

主办：中国建筑科学研究院有限公司建筑环境与能源研究院

第六届全国净化技术 学术年会

论文集



建筑环境与能源微信公众号



ISO1级

全球最高等级超净环境系统

亚洲最大

超5万平米，亚洲最大的单体空气净化产品制造厂房

122名

研发人员占比近20%

国家级

高新技术企业

26个

实验室，国家CNAS认可，符合国内外的专业标准

国家级专精特新“小巨人”企业

中国洁净行业唯一获得此殊荣的企业

关于美埃 About MayAir

美埃(中国)环境科技股份有限公司(以下简称美埃科技)成立于2001年,立足中国市场,深耕高等级空气净化领域二十余年,致力于为电子半导体、生物安全GMP制药、医疗健康、商用人居及大气排放治理等领域提供优化的洁净空气解决方案和具竞争力的增值解决方案。疫情期间,美埃科技为国内外众多医疗机构捐赠生物安全的空气净化设备,是工信部“国家新冠肺炎疫情防控重点保障企业”。

在研发方面一直保持大力投入,研发测试能力较强,公司投入近2,000平方米的研发测试空间,拥有国家“CNAS认可”实验室,包括化学分析实验室、超净微环境实验室、国内首家全环境无死角无菌病房、分区温度控制示范手术室等26个专业实验室,并符合ISO、中国GB、欧盟EN、美国ASHRAE等国内外的专业标准。

在全球布局六座生产基地(南京生产基地、中山生产基地、成都生产基地、天津生产基地、无锡生产基地、马来西亚-吉隆坡生产基地)及三所研发中心(南京研发中心、日本-大阪研发中心、马来西亚-吉隆坡研发中心),制造中心面积超5万平米,现已成为国内空气净化行业较大的供应商。

源于创新、追求卓越,美埃科技专业运营团队,实现从研发、制造、服务网络、物联网运维的全溯源管理体系,坚持走国际化的质量发展之路。美埃专注净化行业二十余年,用“芯”守护环境、致力于成为全球领先的洁净空气设备制造商和服务商。



多元化产品 全方位解决方案

典型解决方案

生物洁净室与生物安全防护解决方案

半导体超洁净解决方案

腐蚀控制解决方案

涂装行业解决方案

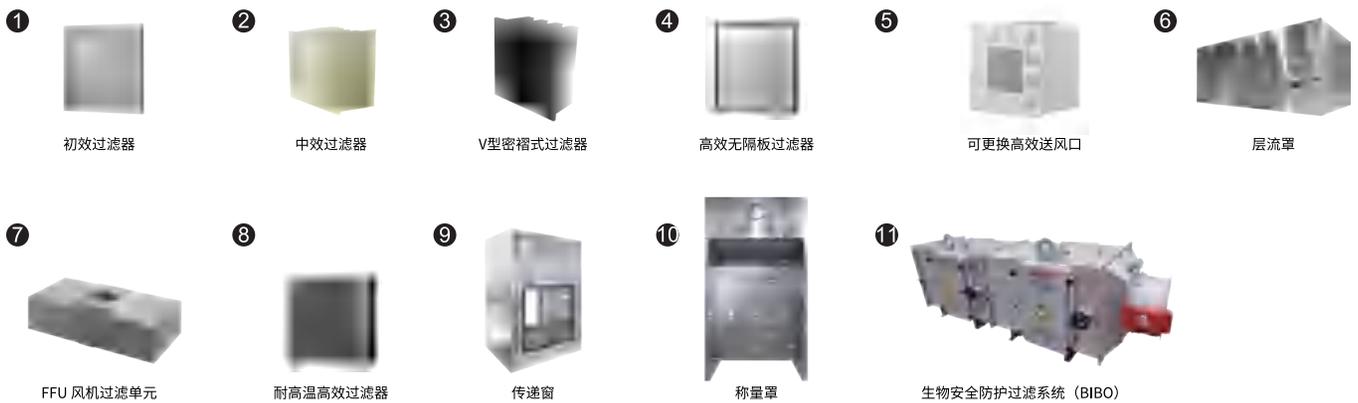
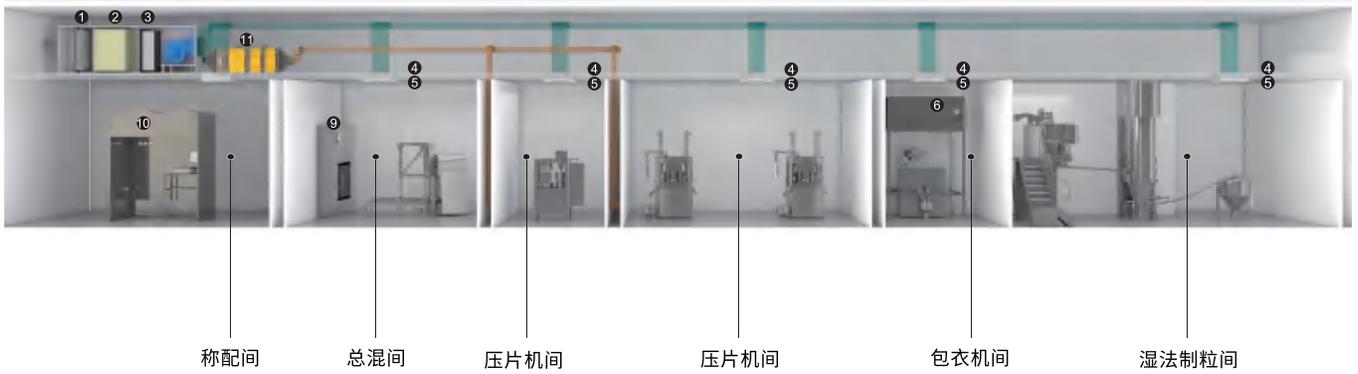
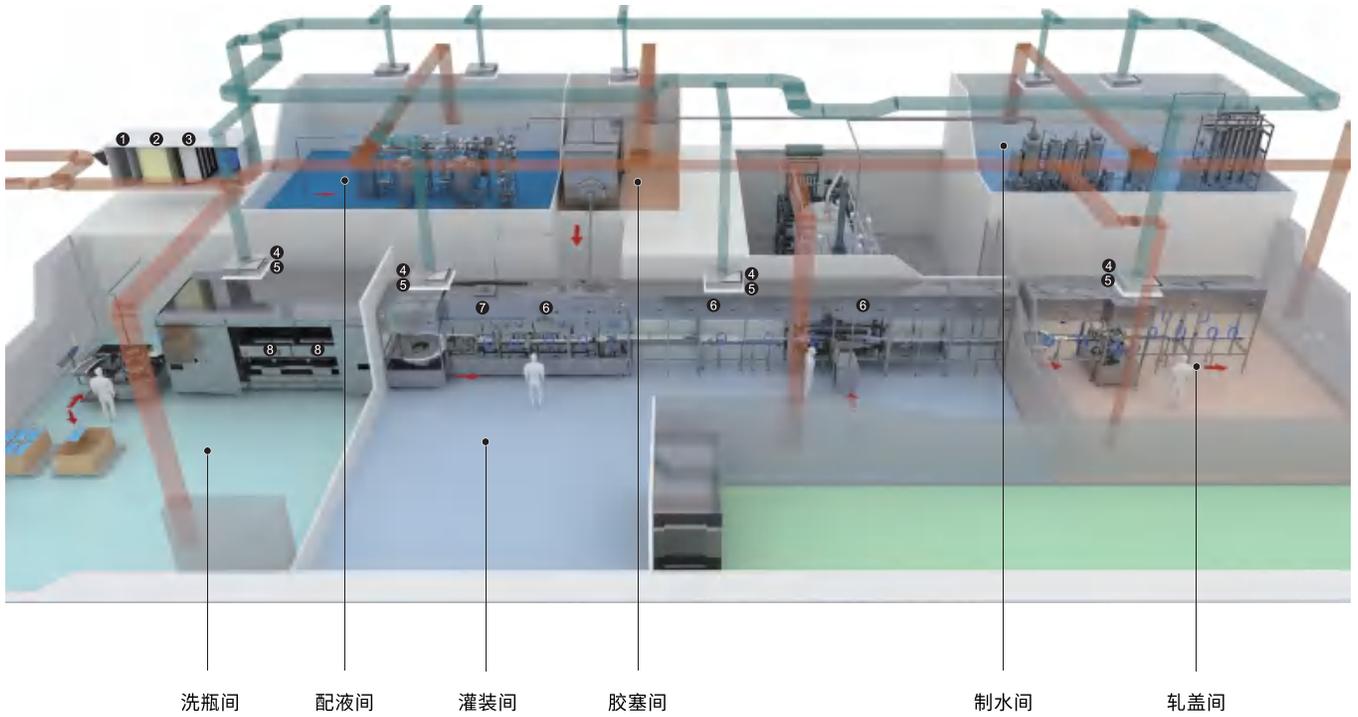
医疗健康解决方案

工业环境排放治理解决方案

室内空气质量解决方案

厨房油烟净化解决方案





LET THE BUILDING BREATHE FREELY / 让建筑自由呼吸



麦克维尔官方微信 麦克维尔官方网站

McQuay
International



我有，无限可能

MDX-C变频直膨式空气处理机组

麦克维尔变频直膨式空气处理机组MDX-C将组合式空气处理机组与变频直膨系统合二为一，软件多功能自由选型设计，不论是商业建筑、工业建筑等均能够轻松自如的应对，满足不同的功能需求！

2 × 3 × 8 × 24 × ∞
 大形式外机 × 大结构箱体 × 大应用方式 × 种功能段 × 高度、宽度自由组合，更多无限可能！



建筑环境与能源

(月刊)

主办单位

中国建筑科学研究院有限公司建筑环境与能源研究院

支持单位

中国建筑学会暖通空调分会
中国制冷学会空调热泵专业委员会
中国建筑节能协会暖通空调专业委员会
中国建筑节能协会热泵专业委员会

编辑出版

《建筑环境与能源》编辑部
2022年第8期
(每月10日出版)

顾问委员会

主 任 郎四维
委 员 江 亿 | 吴德绳 | 龙惟定
马最良 | 徐华东 | 罗 英

编辑委员会

主任委员 徐 伟
副主任委员 路 宾
委 员 (按姓氏笔画排序)
于晓明 | 方国昌 | 龙恩深 | 田 琦 | 由世俊
伍小亭 | 刘 鸣 | 刘燕敏 | 寿炜炜 | 李先庭
李永安 | 肖 武 | 邹 瑜 | 张子平 | 张建忠
金丽娜 | 徐宏庆 | 黄世山 | 董重成 | 端木琳
潘云钢

编辑部

主 编 徐 伟
副 主 编 路 宾
执行主编 王东青
本期编审 沈晋明 刘燕敏
责任编辑 李 炜 崔艳梅
校 对 何远嘉
美 编 才 隽

地址: 北京市北三环东路30号
邮编: 100013
电话: 010-6469 3285
传真: 010-6469 3286
邮箱: beaebjb@163.com



建筑环境与能源公众号



CAHVAC 公众号

版权声明: 凡在本刊发表的原创作品版权属于编辑部所有, 其他报刊、网站或个人如需转载, 须经本刊同意, 并注明出处。

目录 CONTENTS

| 第六届全国净化技术学术年会论文集 | Proceedings of 6th China Purification Conference

为人民健康提供净化的空调	许钟麟, 张彦国, 曹国庆, 潘红红 等 /1
创新是洁净技术发展主动力	沈晋明, 许钟麟 /4
手术室控制新思路、新方法与新要求	沈晋明, 刘燕敏, 许钟麟 /12
《日间手术中心设施建设标准》医疗环境控制思路与措施	沈晋明, 刘燕敏 /19
室内组合式血液病房层流治疗舱的研发	张润, 张燕, 陈玲, 周乐 等 /24
多联手术室的研发与实施	刘燕敏, 沈晋明, 陈琳伟, 田海滨 /30
综合医院手术室平疫结合改造新模式	吴美玲 /35
基于 5G 无线手术数字化体系	沈晋明, 刘燕敏, 黄晓明 /39
手术室带宽口低速空气幕的异温异速送风系统	刘燕敏, 沈晋明 /43
由华亭宾馆疫情再次探讨空调传播新冠病毒的风险	沈晋明, 刘燕敏 /48
基于人工智能手术室全过程、全方位、全信息的管监系统	沈晋明, 黄晓明, 张涵清 /53
探讨封控小区内新冠病毒隐匿性传播	沈晋明, 刘燕敏 /57
探讨手术室宽口低速送风装置最佳配置	沈彦利, 陈玲, 周乐, 刘燕敏 等 /61
内镜中心空调通风的设计与反思	周磊, 李亭瞳 /64
“平疫结合”负压隔离病房设计参数的探讨	沈晋明, 刘燕敏 /68
医院洁净手术室平疫结合设计要点分析	牛维乐, 张丽娜, 李炫, 孟令坤 等 /71
发热门诊、负压(隔离)病房改造案例探析	郑钧国, 喻梅文, 张君, 姜琦 /73
一种新型的洁净手术室控制——控温送风系统	刘燕敏, 胡崔健 /77
负压病房内部空气净化重要性的论证	周乐, 沈彦利, 沈聪, 张明明 等 /81

医疗体系与医疗环境控制可拆式玻璃隔断系统在手术室建设中的应用 陈迎春, 周业磊 /88
医院病理科工艺设计要点分析
..... 牛维乐, 张丽娜, 李炫, 孟令坤 等 /91
正负压智能转换控制系统在平疫结合负压病房的实践应用 廖德安 /94
当务之急: 降低病毒生成空气传播的风险
..... 沈晋明, 刘燕敏, 黄云材, 吴志枫 /97
变风量空调系统在医院建筑中的应用
..... 霍小平, 黄春瑜, 龚建华, 高旭波 /101
ISO 14644-16: 2019《洁净室及相关受控环境——第 16 部分: 洁净室和隔离设备的能效》简介
..... 张彦国 /104
《兽药生产质量管理规范(2020 年修订)》洁净室受控环境关键参数解读
..... 梁 磊 /108
医学洁净实验室设计要点分析及应用介绍
..... 严建敏 /113
医药生物实验室空调系统的设计
..... 项志铨 /118
深圳市某大型实验动物设施空调系统设计
..... 曲大钊 /123
非人灵长类生物安全三级实验室主要通风设备设计探讨 王燕芹 /127
我国高等级生物安全设施中排风高效过滤装置的使用情况及 ISO/PWI 5371 编制背景
..... 张惠 /130
实验动物设施中若干节能措施的应用探讨
..... 侯金明 /133
生物制药厂房洁净度与换气次数的关系——以两次调研为例
..... 李炫 /137
电子行业洁净室用化学过滤器研究进展
..... 陆禹名, 曹国庆, 冯昕, 陈紫光 等 /141
半导体、集成电路洁净室控制 AMC 的化学过滤器评价方法综述 何娜娜, 李启东 /145
制药车间污染物控制的通风方案比较研究
..... 周斌, 侯敏, 李大伟, 李斐 等 /149
一种有效的洁净厂房值班模式运行策略及实测效果分析 孟令坤 /158
某洁净厂房净化空调系统设计
..... 段梅子, 谢军龙, 杨晖, 赵志华 /161
直线式饮料灌装区的气流组织的设计方法
..... 常乐, 汤海斌, 钟林源, 王刚 等 /165
测试气溶胶对高效空气过滤器效率测试结果的影响

研究
..... 曹冠朋, 冯昕, 江锋, 张惠 /168
基于洁净厂房 CFD 仿真结果的污染物浓度场重建方法研究
..... 李德昌, 张彪, 蔡浩, 周苏宛 等 /172
空气中悬浮微生物的净化技术与相关风险探讨
..... 冯昕 /178
利用多机器人嗅觉方法定位洁净厂房中颗粒物源的实验研究
..... 郭讯, 蔡浩, 鲍高贵, 廖禹 等 /185
高效空气过滤元件生命周期综合能耗评价实验研究
..... 曹冠朋, 冯昕, 江锋, 张惠 /191
基于 CFD-DEM 方法褶式过滤介质过滤特性的宏观尺度数值模拟
..... 朱景晶, 钱付平, 曹博文, 鲁进利, 韩云龙 /196
一项基于分子模拟的活性炭吸附气态分子污染物初步研究
..... 陆禹名, 曹国庆, 冯昕, 陈紫光, 戎戈 /203
室内微生物气溶胶传播与净化控制研究
..... 苗露 /206
洁净室压力控制方法简析
..... 王群芳 /210
洁净室运行状态切换过程中的环境参数变化特征及节能潜力分析
..... 纪迎迎 /213
空气净化技术进展与相关净化装置集成移动模块式洁净室浅析
..... 马俊驰, 张少梅, 俞伟 /216
高效低阻玻纤空气滤纸——助力后疫情时代空气净化
..... 陈晓燕, 郭建勋, 包永威 /220
抗菌纤维抗菌效能及在空气净化应用的探讨
..... 熊伟, 薛丹 /223
公共建筑空调通风系统应对雾霾天气的过滤器
..... 涂有, 孙扬, 涂光备 /227
关于“一般通风用空气过滤器”标准修订的些许拙见
..... 涂光备, 涂有 /235
中欧地铁站台与车厢 PM 浓度及净化措施
..... 涂明晖, 涂光备 /241
疫情防控常态化背景下某城市地铁车厢内空气质量测评研究
..... 王学明, 朱蕾, 张留波, 郭元 等 /248
空调室内末端与净化机组的上送下回气流分析
..... 张燕, 周桀, 陈玲, 沈晋明 等 /254
基于计算流体力学的实验室气流组织及污染物分布分析
..... 汤毅, 李浩, 曹晓程, 潘曦 等 /259

为人民健康提供净化的空调

许钟麟¹，张彦国¹，曹国庆¹，潘红红¹，陈兴星²，陈世楠²，郭炎炎²

(1. 中国建筑科学研究院有限公司，北京 100013；2. 福建优净星环境科技有限公司，石狮 362712)

[摘要] 本文通过报章报道的诸多事例，说明建筑物内不用空调是不太现实的，但通过列举的事例，说明空调又是微生物的污染源，其原因是空调进风和回风中的灰尘微粒给系统带来了微生物“生力军”和“营养”。本文提出了一种称为触及式除菌的新手段，尤其适合于局部空调设备，这一手段没有过滤阻力，也不要更换，介质是空气和水都适用，成为在微生物运动中接触表面而消灭之的省力省能无耗材的设备，这一设备原理，可称为触及式原理。这种触及式除菌除味材料和设备特别适用于微生物容易繁殖而不易经常更换耗材的场所，如航天器、密闭空间、密闭容器（如冰箱、水箱）和任何需防止污染的表面，没有任何物理、化学的产物和副作用，不需更换，具有节能省力的特点。

[关键词] 健康；空调净化；除菌；除味

1 能不用空调吗？

1) “新冠病毒的出现不仅改变了我们所有人的生活方式、卫生系统的管理、各项服务的提供以及人际关系的方式，还将影响正在考虑以及未来将考虑建造的新的建筑和结构，也就是说，将影响到建造和城市规划领域。”

这是2021年7月10日国外一则新闻报道的开场白。接着又说：“由于其强大的传染能力和不可预测性，新冠病毒迫使我们重新思考日常活动的各个方面”，“尽可能不要在建筑物内使用空调”。“‘后新冠’时代存在一个基于寻求更自然、更纯净空气建造的想法。未来几年，人们将寻求室内有更多光线、更大的窗户、更密闭的环境和减少空调的使用”。（参见参考消息2021年7月14日第11版）

2) 少用或不用空调恐怕来自于担心空调的污染。那么能不用空调吗？在国外由于怕麻烦、不舒服，个人戴口罩都不愿意，那么在炎热天气不开空调能完全行得通吗？在城市中“更密闭的环境”少用或不用通风换气的空调能完全行得通吗？

这样的规定作为一种临时措施可以理解，但在当年SARS时期，南方地区湿度极大的梅雨季节和炎热的夏季，医院单靠自然通风无法避免室内病原微生物滋长，仍有可能产生微生物污染。如室内湿度很高，病人发热出汗，会增大发菌量；医护人员身穿隔离服、防护服、戴口罩与护目镜，没工作多久就汗流浹背，甚至出现热病。特别是SARS隔离病房，如不及时解决空调及环境控制问题，医护人员工作环境更加恶劣，严重影响医护人员的身心健康。在这次新冠肺炎暴发的冬季，情况相反。袒胸露背治疗的病人容易感冒，“为减少交叉感染，中央空调不能打开，于是，整箱的暖宝宝、被子、油汀被送到病区……”，^[1] 这也是一般病房冬季温

度国内外标准都要求达到24℃（允许波动一定范围）的原因。医护人员因穿防护服也不能穿很多衣服。不在病房时可能“冻手冻脚”，在病房操作时又可能闷热难当。

2003年3月，非典爆发初期为应付急需，有采用在病房安装排气扇以造成负压的做法，当时作者之一考察过的广州市第八人民医院就在病房外窗上设多个向外排风的排风扇，在病房走廊侧内墙上设2个向病房进风的进风扇，如图1所示，形成定向流。使用效果是没有发生病区内的交叉感染，但由于患者被风吹，又时值初春，病人盖了被子还有冷的感觉。若是在北方，那就要吹出病来了。

看来，无论冬夏，不用空调是不太现实的。

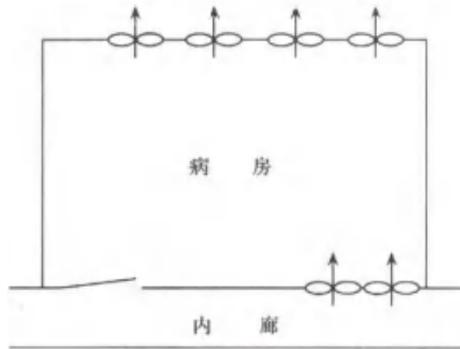


图1 非常情况下一种最简单的隔离形式

2 空调是微生物污染源

1) 空调恐怕不能不用，但空调确是严重的微生物污染源。

空调——包括空调设备和空调系统是严重的微生物污染源。2005年原卫生部抽检了937个公共场所，合格的仅58家，只占总数的6.2%^[2]。微生物超标尤以盘管翅片和过滤器表面最严重。如果和2003

年卫生部颁布的《公共场所集中空调通风系统卫生规范》相比，微生物最多超标几十倍。

2009年调查的北京、上海和深圳三地的家用空调，都有88%的空调换热器翅片上的细菌总数和84%翅片上的霉菌总数超标^[3]。

今年（2021年）又如何呢？据网易新闻报道，今夏上海出现了“夺命空调”，多人被空调“吹”进了ICU；长沙一驾车人被久未清洗的车内空调也吹进了ICU。这些都是“军团菌”惹的祸，而军团菌则是污染空调的“常客”。那些大的公共场所如果调查起来，其结果恐怕不会比过去好多少。

2 空调成为微生物污染源的原因

一是灰尘微粒带进了微生物“生力军”和“营养”，二是它里面的一些表面上有冷凝水，有水就可以有生命存在和繁衍，尤其在关机期间内部温度更适合细菌，1个葡萄球菌，8个小时后可繁殖成65536个，一个病毒在活细胞内可一下复制出10万个子病毒^[4]。

所以，美国和日本有关医院空调通风设施的标准，规定在多类用房中禁止使用带冷热盘管的局部循环机组，除非带有高效过滤器。

如果是新型冠状病毒，在25℃的空气环境中能存活30分钟；在15℃以下时，在空气中更可存活240分钟；含在飞沫中和设备不锈钢表面更可存活24小时^[5]。

3 “据敌于国门之外”战略的运用

1) 集中空调可以“据敌于国门之外”

空调系统中的微生物不是天生的，上面已说过，是被外界空气从新风口和回风口带进来的。如果在新风口和回风口安装具有一定效率的阻隔式过滤器，实行“据敌于国门之外”^[6]的战略即将微生物拒之于系统之外，则系统内就干净得多了；如果送风口也有过滤器，即将微生物拒之于房间之外，那室内受系统中微生物污染的可能性将极大地降低了，再辅之以有效的气流组织，室内污染也将得到控制，比在室内将微生物就地消灭清洁多了。当然，人际接触传播另当别论。

下面是一个实测的例子^[7]：

只在原风机盘管回风口原处安上中效过滤器（测定对PM_{2.5}的一次通过计重净化效率为80%约相当于中档中效过滤器），两家医院病房实测结果比较如表1所列。

由于过滤器安在风口，面积未扩大，致使换气次数减少42%，只有2.7次换气。在此情况下，约为中档中效过滤器，尚有接近一半的除菌效果，实为不易。

另一个例子是在设计时就考虑了这个问题，那

表1 风机盘管送风口安装中效过滤器效果

三甲医院	病房工况	室内平均人数	PM _{2.5} 6次均值 μg/m ³	浮游菌 6次均值 CFU/m ³	PM _{2.5} 降低比例	浮游菌 降低比例
1	未安过滤器	9.3	262	368		
	安过滤器	9.3	63	196	75%	47%
2	未安过滤器	9.7	105	479		
	安过滤器	11.7	45	272	57%	43%

就是301医院改造后的15床的ICU病房^[8]，采用风机盘管，并扩大了原有送风口，另在顶棚上开一个回风口。新风采用“粗效、中效、高中效”三级过滤。（其中超低阻高中效对≥0.5μm计数效率为85%。滤菌效率99.3%）在5.6次换气条件下，结果见表2。

表2 改造后ICU室内含尘浓度动态（住有患者）测试结果

房间名称	设计级别	室平均含尘浓度 粒/L	
		≥0.5μm	≥5.0μm
1号病房	10万级	436.6	9.8
2号病房	10万级	319.2	4.9
负压病房	10万级	562.8	16.1
治疗室	10万级	1245.1	19.2
药疗室	10万级	1532.2	14.4

可见最好达到1万级（≥0.5μm微粒，≤350粒/L）

这两个例子足以证明国标《综合医院建筑设计规范》中的以下规定的必要性：

①集中空调系统和风机盘管机组的回风口必须设初阻力小于50Pa，微生物一次通过率不大于10%和颗粒物一次计重通过率不大于5%的过滤设备。

②当室外可吸入颗粒物PM₁₀的平均值未超过0.07mg/m³时，新风采集口应至少设置粗效和中效过滤器；当室外PM₁₀超过0.07mg/m³时，应再增加一道高中效过滤器。

据过去雾霾尚未发生年代统计^[9]，我国2/3地级市城市符合上述新风设三道过滤器的条件。

2) 局部空调设备难以实现这一战略

局部空调设备——例如壁挂式空调器、顶棚嵌入式空调器由于体积很小，内部几乎没有空间，风机压头受噪声所限也很小，在其中安过滤器等除菌设备，实在困难；而非阻隔式除菌设施有的还有风险，上海某医院某室静电净化器短路起火殃及旁邻手术室致人死亡的教训不能忘记；北京某医院光催化净化器失灵危及患者导致产品被官方通报的教训不能忘记。

3) 省力省能是一个重要原则

粗效过滤器的经常更换费力费财也不节能，中效、高中效滤段初阻力起码50~100Pa，终阻力翻番，也要经常更换。一种初阻力极低而无终阻力的自洁型粗效过滤装置是一种理想设施。中效和高中效的初阻力极低，这将是我们的追求方向。

4 触及式除菌翻开空调除菌技术新一页

1) “在运动中消灭敌人”辅之以阻隔式战略的运用

对于局部空调设备既然难于以“据敌于国门之外”的战略阻挡有害微生物的“发展壮大和进攻”，那么就可以换一种思路，即在微生物于空调设备内部行进运动过程中随时消灭它，并在入口以经过改造的原有阻隔式措施，拦截一部分大颗粒及其所附之微生物。当然，这一战术不产生附加的危害因素，不增加任何新工艺新设备。

2) 所谓运动中消灭敌人是一种比喻，就是微生物在运动过程中由特殊材料表面主动迎击它或在它于运动途中触及该材料的任意表面而触之即衰至亡。如对大肠埃希氏菌、金黄色葡萄球菌、单核增生李斯特菌、荧光假单胞菌，在24小时之内灭菌率>99.99%。

据网上“科普中国”APP科学百科介绍，上述李斯特菌为嗜低温菌，在4℃下仍能繁殖，致死率高于沙门氏菌和肉毒杆菌，是最致命的食源性病原体之一，所以是家用冰箱中食品安全的最危险杀手。检测证明不增加任何零部件，只使用触及式除菌技术的冰箱，1小时即可除去李斯特菌达96%(已扣去自然衰减率)。

空调设备中的叶片、表面不是有水膜吗？水中微生物在这种灭菌原理作用下也只能消亡。以一个带有动态灭菌措施的军用水壶为例，经权威检测机构检测报告，2小时和4小时的水中灭菌率均>99.9%。

3) 下图就是经权威单位(军事科学院军事医学研究院微生物流行病学研究所)检测的电镜照片：大肠杆菌一触即亡，很快萎缩成一条了。

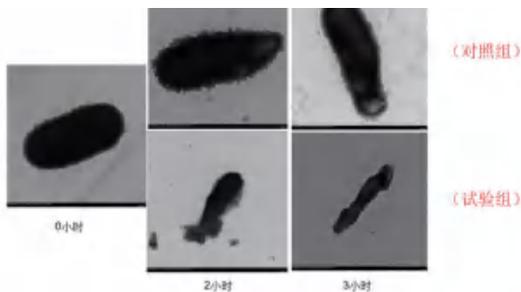


图2 大肠杆菌萎缩死亡(放大1.5万倍)

实验证明30分钟内对循环风内H₁N₁病毒除去率达99.57%，1小时内对黑曲霉除菌率达97.64%，对氨、丙酮、甲硫醇、三甲胺、吡啶、臭氧、硫化

氢等异味、臭味除去率最高达到95%。

上述手段没有过滤阻力，也不要更换，成为在微生物运动中接触表面而消灭之的省力省能无耗材的设备，这一设备原理，可称为触及式原理。这种触及式除菌除味材料和设备特别适用于微生物容易繁殖而不易经常更换耗材的场所，如航天器、密闭空间、密闭容器(如冰箱、水箱)和任何需防止污染的表面，没有任何物理、化学的产物和副作用，不需更换，具有节能省力的特点。由中国建筑科学研究院有限公司建筑环境与能源研究院与福建优净星环境科技有限公司合作研发的这一触及式设备的问世，将为空调特别是民用局部空调展现了除菌净化的新的前景。

5 结论

净化、安全、省力、省能是空调服务于人民健康的基本要求，是净化人要去为之努力实现的一个奋斗目标。

参考文献

[1] 唐闻佳. 寒潮下的隔离留观病房, 中央空调关闭, “扛冻靠抖”的医务人员把“温暖”送给更多患者 [N]. 文汇报, 2020.2.16

[2] 刘燕敏, 聂一新, 张琳, 涂航. 空调风系统的清洗对室内可吸入颗粒物和微生物的影响 [J]. 暖通空调, 2005, 35(2)

[3] 许钟麟, 张益昭, 曹国庆, 孙宁, 潘红红. 用于污染控制的回风口净化装置的三个必要条件——空调净化系统治理污染与节能关系系列研讨之三 [J]. 暖通空调, 2010, 40(2)

[4] 许钟麟. 空气洁净技术原理(第四版) [M]. P336. 北京: 科学出版社, 2014

[5] 《日本新型冠状病毒公众防疫指南》[Z]. 网易新闻, 2020.2.16

[6] 许钟麟. 集中空调净化系统风道污染的治本方向 [J]. 洁净技术(中国台湾), 2007.18

[7] 孟令坤. 风机盘管加装过滤器对于既有医院建筑病房空气净化效果提升的实验研究——国标《医院洁净护理与隔离单元技术标准》编制组系列探讨问题之四 [J]. 暖通空调, 2019, 49(8)

[8] 龚伟, 孙鲁春. 新型重症监护病房净化空调系统的应用——空调净化系统感染控制与节能关系系列研讨之一 [J]. 暖通空调, 2009, 39(12):107-108

[9] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》[S]. 附录A

创新是洁净技术发展主动力

沈晋明¹, 许钟麟²

(1. 同济大学, 上海 200092; 2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

[摘要] 回顾了我国洁净技术随着我国高科技企业发展的艰辛历程, 经过几代人的努力, 从借鉴国外技术与仿制产品, 到跟踪研究国外高技术发展。在大量的技术积累的基础上, 开始了漫长的创新探索路程。进入21世纪以来, 阐述了我国洁净技术取得的创新以及具有自主知识产权的成果。表明创新一直是我国洁净技术发展的主动力。

[关键词] 洁净技术; 发展历程; 高科技产业; 环境控制; 创新与探索

0 引言

洁净室如果从广义的定义是消除对人员、工艺过程和设备污染的空间, 则洁净室名词和概念源于欧洲医学。甚至可以追溯到世纪前的中国漆器生产环境控制以及类似层流的作业台。1862年, 法国化学家和微生物学家路易斯·巴斯德(Louis Pasteur)发现细菌是导致感染性疾病原因, 1867年英国外科医生约瑟夫·李斯特(Joseph Lister)首先认识到手术期间细菌可以经空气途径感染, 开创了消毒手术室内空气, 并同时要求进入手术室医生术前用5%的石碳酸洗手、清洗手术器械, 并在做手术时戴手套, 控制了围手术期的感染。用消毒方法也控制了产褥期、重度烧伤与创伤等感染。当时洁净室被认为经消毒控制医疗环境使感染率下降的医疗空间。并作为规范的做法应用在手术室等一些医疗护理环境^[1]。

基于精密军事产品生产环境对悬浮粒子控制需求将早期洁净室发展为工业洁净室, 为了实现洁净空间, 按生产过程控制粒子不同要求划分为“白区”与“灰区”。当时除了通风, 特别重视人数控制、人的衣着与物体表面清洁、室内装修材料的要求十分严格。但通风量无论选择大或小都难以达到洁净空间要求。只有高效空气(HEPA)过滤器与单向流(俗称层流)技术的创新出现才诞生了现代意义上的洁净室。

现在的高效空气过滤器是指上世纪50年代应美国原子能委员会要求, 1951年研发的亚微米粒径的玻璃纤维滤纸, 替代了德国早在二战前用石棉和埃斯帕托草制成滤料。1953年创新地开发了折叠型高效空气过滤器结构, 其断面风速达到了通风要求的m/s量级而滤速满足了滤除亚微米粒子所需的cm/s量级, 对于0.3 μm 单分散微粒的最低效率达到99.95%, 并实现了批量生产。1955年的西部电气公司(Western Electric)用高效过滤器与正压控制建成了“无尘室(dust-free room)”被认为是第一间洁净室。

在上世纪60年代, 为空军投弹瞄准器、陀螺

仪、精密滚珠轴承、卫星和航天电子设备等生产和组装需求的洁净空间量增大。为了统一订购洁净空间的名称, 1961年美国空军发布了空军技术条令TO 00-25-203《洁净室设计和运行的标准性能标准》。1961年底惠特菲尔德(W.J. Whitfield)用创新思维试验成功了用类似“层流”洁净空间比当时洁净室提高了1000倍洁净度。他提出的“层流”与断面风速100fpm(0.457 m/s)成为经典。其实当时命名“层流”只不过吸人眼球的营销词语, 而非科学术语。而确定的层流断面风速0.457 m/s只是考虑到工艺要求、工作人员舒适性与自净(recovery rate), 并不是最佳风速^[2]。1962年在芝加哥环境科学研究所会议上发表了“超洁净室(ultra-clean room)”论文, 提出了超洁净室应重点在于阻止污染物(keeping contaminants out)进入, 具有自净化(“cleans” itself)以及气流能将工作区域内发生污染“快速推送”(“sweeping” function)出去的功能。层流洁净室与洁净台一经推出就被纷纷采用, 引起美国空军等机构极大重视。1963年4月, 在新墨西哥州的桑迪亚实验室举行的大型洁净室会议上宣布共同编写第一部洁净室联邦标准^[2]。

1963年12月美国总务管理局(GSA)颁布美国联邦标准FS-STD-209《洁净室和 workstation 要求, 受控环境》, 是第一个科学地依据悬浮微粒粒径与浓度的关系在双对数坐标上的直线分布规律来划分洁净度级别, 这是洁净技术发展史上又一个里程碑。但标准采用的英制成为应用的最大问题。仍被许多国家等同采用(identical adoption)或等效采用(equivalent adoption), 但也有有的国家不得不修改采用(modified adoption)。

由于洁净技术发展太快, 不断拓宽应用领域。到了上世纪70年代, 已广泛用于电子、航空航天、医学、制药、生物实验、遗传工程和食品工业等行业。要求洁净技术控制更多的参数, 控制对象从悬浮粒子扩展为所有对工艺过程有害的污染物。洁净技术

被分成了工业洁净技术和生物洁净技术两大类。层流也被正名为单向流，在不同行业中发展出许多气流模式，如局部单向流与非单向流组合的“混合气流”，洁净区域可灵活布置的风机过滤装置 FFU，将关键工艺处于更小空间实施更有效的控制模式等等。高效空气过滤器也发展为对于 0.12 μm 微粒的效率不低于 99.999% 的超低穿透率 ULPA 过滤器。

同样 FS-STD-209 自颁布以来，30 多年中进行了 6 次修订或更新。1992 年，国际标准组织（ISO）成立了 ISO/TC 209 技术委员会，目标是协调国际标准。1999 年 5 月出版第一个洁净室国际标准 ISO-14644.1:1999 “空气洁净度等级划分 Classification of air cleanliness”。2001 年 11 月 29 日美国取消了 FED-STD-209E。

现代工艺过程，特别是大规模集成电路制造工艺不断对洁净技术提出苛刻的环境控制要求，持续地推动着洁净技术的发展。目前超低浓度气态化学污染物或被称为气态分子污染物（airborne molecular contaminant, AMC）成为了芯片生产和良率的主要影响因素。为此 2013 年 2 月发布 ISO-14644.8:2013 “按化学浓度划分的空气洁净度等级 Classification of air cleanliness by chemical concentration”。

为了进一步规范洁净环境的空气洁净度等级验证与统一检测工作，2015 年 10 月 27 日发布 ISO-14644.1:2015 “按粒子浓度划分的空气洁净度等级 Classification of air cleanliness by chemical concentration”。相比 1999 版标准，强调了这空气洁净度等级是按粒子浓度划分。

下一步似乎要有个标准按微生物浓度划分空气洁净度级别。洁净室和相关受控环境的生物污染控制归属于 ISO 14698 系列。生物污染不像颗粒物，这个级别的划分对于不同行业不仅关系到微生物浓度，还要涉及到关注的菌种以及危害风险，目前争议太大。ISO 14698 首先发布各国意见较为统一的评估和控制生物污染的原则和基本方法。认为空气、物表、织物和液体作为生物污染的来源，可构成危害。需要提供确定这些来源生物污染以及验证空气采样器和清洗过程的指导意见。2003 年发布了 ISO 14698 洁净室和相关受控环境——生物污染控制，第 1 部分：一般原则和方法以及第 2 部分：生物污染的评估和解释。只是美国有不同意见。

作为引言，只是简要地阐述了在现代生产工艺推动洁净技术发展的高效空气过滤器、单向流技术以及洁净室标准的三条创新主线。介绍洁净技术发展历史的文献很多，不再赘述。

1 我国工业洁净技术发展历程

由上可知，洁净技术随着工艺过程控制要素数量的不断增加或要素控制要求的持续提高而发展着。洁净技术作为工艺性净化空调，可以说，谁掌握了先进的工艺，或谁把握了工艺的发展趋势，谁就执洁净技术的牛耳。就工艺这一点来说，我国洁净技术发展很长时期内被滞后工艺所制约，进展并非一帆风顺，甚至说十分艰难。

早在 50 年代后期洁净技术就应国防工业生产的需求而发展起来的，借鉴过前苏联技术，当时应用的领域主要在仪表仪器、精密机械和有色金属提纯等。当时为了打破了西方国家对我国的封锁，重点攻关洁净室的关键技术。可喜的是 1964 年中国医学科学院卫生研究所、清华大学核能所等单位研制了高效过滤器的钠焰试验台。1965 年中国建筑科学研究院空气调节研究所和蚌埠绝缘材料厂等单位开发了带波纹隔板的高效空气过滤器，1966 年试制成功第一台洁净工作台，标志着我国洁净技术起步。

随后十年文革，打乱了我国经济发展进程，拉大了与世界的差距。尽管 70 年代曾发动过集成电路大会战，陆续试制与洁净室配套的净化设备。1969 年中国建筑科学研究院空调研究所为 109 厂研制的由局部净化设备组成的大规模集成电路生产线。1973 年中国建筑科学研究院空调研究所研制成功了我国第一台型号为 J-73 的尘埃粒子计数器。1969 年由中国建筑科学研究院空调所牵头几家部委设计单位与生产厂家参加研制装配式洁净室成套设备，开发了装配式垂直单向流、水平单向流洁净室^[1]。原来一些生产无线电或半导体专用设备，以及医疗器械的生产厂家也纷纷转向改为生产净化设备。为当时科研机构与生产厂家提供了急需的洁净装备。

以中国建筑科学研究院为主体十四家部委下属单位参加编写的《空气洁净技术措施》于 1979 年 3 月由国家建委科教局批准实施，这是我国正式公布的第一部集洁净室设计、施工、验收方面的准规范性文件^[1]。可以说 70 年代基本上完成了空气净化所需的成套设备。

改革开放后，经济重心转移，利用外资，引进消费类电子产品生产线。自 1978 年批准引进第一条彩电生产线，80 年代先后建成“咸阳彩虹”、“北京松下”、“上海永新”等 12 家彩色显像管厂。彩管厂建设将洁净技术推向大工业生产的全过程控制，实现了一次跨越。

80 年代我国推行 GMP（Good Manufacturing Practice）是一件大事。世界卫生组织将 GMP 定义为指导食物、药品、医疗产品生产和质量管理的法规。

GMP 中文为“产品生产质量管理规范”，是为保证药品在规定的质量下持续生产的体系。1982 年，中国医药工业公司制定行业性的《药品生产质量管理规范》，1988 年我国卫生部首次颁布了《药品生产质量管理规范》，加大 GMP 的推行力度、在制药全行业实施认证体制奠定了基础。经过 1992 年、1998 年以及 2010 年三次修订，现行版为卫生部令第 79 号颁布的《药品生产质量管理规范（2010 年修订）》，主要参照欧盟 GMP，缩小了与国际 GMP 管理要求的差距，将洁净操作区分为 A 级、B 级、C 级与 D 级 4 个洁净度级别。要求药品生产必需在相应洁净级别的环境中进行，消除药品生产过程中的污染、混淆和差错的隐患，最大程度降低药品生产全过程中的不合格的风险。提出非最终灭菌的产品的高风险操作应在处于 B 级背景洁净区域的 A 级洁净区，对洁净技术提出新的挑战。其中干预受限的屏障系统（Restrictive Access Barrier System, RABS）是一种先进的无菌隔离方式。在保证小空间隔离有效性的前提下，便于在位清洗、在位灭菌以及灵活进出的装置，并被推广到无菌药物灌装（分装）的环境控制。GMP 推动着中国制药行业的国际化进程。当时全国近 7 千家制药厂以及生产药用原材料、包装材料等非药企业，陆续进行了技术改造，洁净技术得到极大推广与发展。其应用的规模之大、范围之广都是空前的。

在丰富的洁净技术的实践基础上，80 年代由中国建筑科学研究院任主编的先后制定了 GB6166-85《高效滤料性能实验方法、穿透率和阻力》，GB6167-85《尘埃粒子计数器性能试验方法》，GB6168-85《层流洁净工作台检验标准》，GB12218-89《一般通风用空气过滤器性能试验方法》等多项产品标准，对规范产品试验与测定方法起了很大作用 [3]。原电子部第十设计院会同有关单位共同编制的国家标准 GBJ73-84《洁净厂房设计规范》，空气洁净度级别等效采用了国际标准 ISO14644-1。至此，我国已经初步具备了洁净工程与装备的技术体系。

90 年代我国加大了微电子产业投入，建成了如首钢日电公司、华晶电子集团公司、绍兴华越微电子公司等大型芯片企业，引进芯片生产线。净化空调系统多为新风独立处理承担全部湿负荷与大风量自循环，只不过是自循环系统形式不同^[4]。由于引进的是落后的工艺，建设周期又长，而芯片技术发展太快了，洁净厂房形式与净化空调模式层出不穷^[5]，我国芯片业与国外差距仍被迅速拉大。其中上海华虹集团是较为成功的案例，一年多就建成 0.5 微

米 8 英寸生产线。大面积洁净室的洁净度达到 ISO 4 级，局部区域达到 ISO 3 级。配置超低穿透率空气过滤器（ULPA），自循环采用了风机过滤器单元（FFU）与显热盘管方式。初步形成了集成电路设计、芯片制造、封装测试和设备材料等各个环节的完整产业链。将我国洁净技术推向高端。

进入 21 世纪，特别要提及中芯国际的发展，短短几年已经成为我国最大、最先进的芯片厂，跻身于 28nm 芯片的先进行列，至少从客观上来说中芯国际发展途径是合适的。生产区域采用了标准机械接口（Standard Mechanical Interface, SMIF）隔离技术的微环境系统。生产区域局部区域达到 ISO 1 级，不仅使用超低穿透率空气过滤器 U16 而且成功实现了分子态污染的控制。中芯国际微处理器成为中国科技产业最主要的供应企业。中芯国际量产了 14nm 芯片，开始风险量产 7nm 芯片，遭到美国禁令。使我们头脑更为清醒，增大对半导体产业补贴，努力赶上技术前沿，同时也将会带动我国洁净技术向更高水平发展。

2 我国生物洁净技术发展历程

生物洁净技术，医院的医疗环境控制是重要的一大应用领域，在 80 年代已经逐步在手术室和血液病病房的无菌环境控制尝试引用空气洁净技术。在上海、哈尔滨、天津等地采用过一些简易的净化装置，取得了一些成果^[6]。随着空调设备小型化、单元化，空调也开始在关键医疗科室使用，同时出现了一些相关的感控问题。80 年代中期我国外科领域取得了较大进步，手术部位感染成为手术成功的一个关键因素、衡量外科治疗质量的重要指标。由总后勤建筑设计院为 301 医院设计的层流手术室采用了我国自主研发的低阻亚高效过滤器^[7]，达到 209 标准千级。1988 年上海民用建筑设计研究院主编了建工行业建设标准 JGJ49-88《综合医院建筑设计规范》，1989 年 4 月试行。最早提出了手术室的三个等级，规定了洁净手术室，并要求粗效、中效、高效三级过滤与层流等技术措施。

真正涉足手术室的现代化，引领手术环境与感染控制逐步接受大工业工艺全过程、全方位控制理念是我国军队医院，在工程实践与成功经验的基础上编写了 FL0106 YFB001-1995《军队医院洁净手术部建筑技术规范》。首先提出区域控制理念（手术部概念及分区控制）和综合保障措施（不仅仅是空气净化）^[8]。

90 年代末我国医院建设高潮开始兴起。国际上没有统一的标准，各国标准涉及医疗用房分级和要求差别很大。1997 年针对当时手术室建设盲目照搬

国外标准或套用工业洁净室,决定以手术室作为现代化医院建设突破口,在充分汲取了各国相关指南与标准对医疗环境控制思路,编写了GB50333-2002《医院洁净手术部建筑技术规范》。在我国大量实测数据与理论计算基础上制定了分级标准,规定了Ⅱ级洁净手术室为标准手术室。确立了以微生物浓度分级,以空气洁净度为保障措施,并一再强调洁净度只是验收指标,菌浓才是运行指标。并使菌浓指标与我国GB 15982-1995《医院消毒卫生标准》相协调。对我国医院手术室的建设和起到了规范与引领作用^[9]。接着,就着手编写《综合医院建筑设计规范》。

2002年底至2003年期间,严重急性呼吸综合征(SARS)疫情的冲击,暴露了当时我国公共卫生系统的不完善,没有合格的空气传染隔离病房与生物安全实验室。大批临时空气传染隔离病房应急建造,当时还没有相关的标准或建设规范,世界卫生组织(WHO)给予了许多帮助。至2003年5月卫生部应急发布了《收治传染性非典型肺炎患者医院建筑设计要则》。SARS疫情2004年为落实国务院2003年第376号令,贯彻执行《突发公共卫生事件应急条例》各地级城市在新建、改建、扩建传染病医院、后备医院或传染病区。并开始建设生物安全实验室。为了规范我国传染病医院与生物安全实验室建设、验收、使用与防护要求,紧急组织相关标准。由中国建筑科学研究院主编的GB50346-2004《生物安全实验室建筑技术规范》和由中国实验室国家认可委员会主编的GB19489-2004《实验室—生物安全通用要求》相继颁布。2004年11月27日国务院发布了《病原微生物实验室生物安全管理条例》。《国家高级别生物安全实验室建设规划》于2004年发布,经过这几年建设已经形成了高级别生物安全实验室体系的基本框架。生物安全方面研究主要面向人口健康、动物卫生、检验检疫、生态环境安全四大领域,针对微生物菌种保藏、科学研究、产业转化三大主体功能,围绕烈性传染病病原体的监测预警、检测、消杀、防控、治疗五大环节的需求。

高级别生物安全实验室是国家生物安全体系的基础支撑平台,是人口健康与动物卫生领域开展科研、生产和服务的重要保障条件。据实验室所处理对象的生物危害程度和采取的防护措施,生物安全实验室分为4级,从危害性最低级别的BSL1实验室至危害程度极高的BSL4实验室。为了保障生物安全实验室的工作人员不受危险微生物的感染、保护实验样本以及实验室周围环境不受污染,生物安全的控制理念是确保建立一套完备、可靠的保障体系。尤其对BSL3与BSL4的生物安全实验室,必须

实施一级屏障和二级屏障,对实验样本、人员与环境确保万无一失。生物安全技术对控制危险微生物气溶胶发挥了重要的作用。

近期将按照区域分布、功能齐备、特色突出的原则,布局建设5-7个生物安全四级实验室。在充分利用现有生物安全三级实验室的基础上,新建一批三级实验室(含移动三级实验室),实现每个省份至少设有一家生物安全三级实验室的目标。以四级实验室和公益性三级实验室为主要组成部分,吸纳其他非公益三级实验室和生物安全防护设施,到2025年,形成布局合理、网络运行的高级别生物安全实验室国家体系^[10]。

北京市在国内率先制定了地标《负压院隔离病房建设配置要求》DB11-663-2009,使隔离病房建设步入正轨,此后GB50849-2014《传染病医院建筑设计规范》于2014年颁布。在实施空气传染隔离环境控制过程中取得了不少经验教训,应用生物洁净技术创造了许多易建、有效的控制措施。特别是配备独立新风湿度优先处理与室内无凝水自循环机组的隔离病房,改变了全新风直流空调的耗能方式,可实现多用途病房转换^[11];解决了隔离病房在非疫情期间常态管理与正常使用。而且从过去靠化学消杀已存在的病菌的理念,转变为消除病菌滋生条件,彻底杜绝了系统中凝水传播途径。只有将空气传染隔离病房能及时转换成不同需求的病房而能有效使用,又能在平时纳入正常医疗体系,免于大批隔离病房长期待用而难于有效维保。

2002版《医院洁净手术部建筑技术规范》实施十年期间,我国手术室建设了10000多间,建设水平又上了一个台阶。并应用到国外的手术室建设项目中。由于更多地掌握了国外的资讯,无论是医院建设标准还是实地考察与调研,信息量十分丰硕。2013版《医院洁净手术部建筑技术规范》旨在通过全面控制、全过程控制以及关键点控制理念,考虑到手术室现状与发展趋势,采用了净化技术综合措施,从工艺、建筑、风、水、电等方面不仅有效地使手术环境受控,减少潜在的外源性感染风险,而且还从诸方面提出了节能降耗措施。使洁净手术室完全摆脱了工业洁净室框框^[12]。

90年代末着手编写的《综合医院建筑设计规范》,经过反复讨论、甚至争辩,长期修编,历经15年,终以国家标准GB51039-2014颁布,于2015年8月1日起实施。强调与我国现有经济发展水平相适应,强调遵循医疗工艺,用合理的投资有效地提高医疗环境控制,降低院内感染,提出一系列降低医院运行能耗的措施。具体规定了各医疗科室的环境控制

要求与措施,并提出了一般手术室的定义、要求与控制措施^[13]。

自2019年12月湖北省卫健委通报武汉市发现多起不明病毒性肺炎病例。2月11日被命名为SARS-CoV-2。2020年3月11日,世卫组织将新型冠状病毒肺炎列为“全球性大流行病”。短短3个月迅速蔓延到中国各地。在大规模疫情爆发期间,暴露出医疗设施严重不足。在当时将所有患者病原全部隔离是防控的成败关键,为了在最短的时间内从重点抢救危重症与重症一直到扩大到轻症、疑似患者应收尽收。根据当地疫情发展具体情况,从发挥既有的传染病院与定点收治医院骨干作用,将原综合医院或专科医院转换成传染病院或定点收治医院;快速建造如雷神山、火神山应急的临时住院医院;将会展中心、体育场馆等大型公共建筑改造成多床位的方舱医院;直至征用酒店、招待所、学校等场所建立临时隔离点、隔离区。用如此短的时间内完成了大量的不同类型的医疗隔离设施建设。迅速解决了疫情医疗资源不足的紧迫问题。正因为我国采取最全面、最严格、最彻底的防控举措,至2020年3月下旬基本阻断在中国本土传播。武汉市4月8日起解除封锁。取得了疫情防控阶段性重要成效。T/CECS 661-2020《新型冠状病毒感染的肺炎传染病应急医疗设施设计标准》规范了应急医疗设施的设计与建设。转而实行“内防反弹,外防输入”的防控策略。至2021年8月20日全球新冠确诊人数突破2亿,而我国仍维持在10万多一点。

由于新型冠状病毒属于RNA病毒,病毒变异相对较快。近期变异毒株不断出现,传播性更强,除了大力推行疫苗接种外,加强综合医院“平疫结合”可转换病区建设成为了今后一项长期任务。开发出各种“以平为主,适用疫情”的医疗设施成为医用洁净技术与装备的新课题^[14]。专门阐述负压隔离病房、重症监护病房与易感染患者病房建设要求条文的《医院洁净护理与隔离单元技术标准》是医院建设领域中最后一个国家标准,已于2021年7月通过第三轮专家审查会,不久将予以颁布。将规范负压隔离病房、重症监护病房与易感染患者病房的建设。届时将标志着医院科室环境控制的标准或规范全部完成。

用于科学研究、教学、药品及生物制品的生产和检定,以及其他科学的实验动物,是指经人工培育或人工改造,遗传背景明确、来源清楚,且携带的微生物可控。实验动物环境控制不是通常认为仅仅保证实验动物的健康生存,更重要维持实验动物环境在实验全过程的合规性与稳定性,确保实验

结果的准确性、有效性和可重复性。为此,实验动物环境控制的基点应是有效减少对实验动物的应力(Reduction of animal stress)消除实验动物不应出现的应激反应,以保证实验数据有效(Effect of scientific data),同时保护操作者的安全(Operator safety)与动物福祉^[15]。80年代前建造的实验动物房要求不高,以小型为主。在80年代后期先进的实验动物房设施才有了很大发展。实验动物资源不断发展。从传统的哺乳纲动物的实验动物,扩展到非哺乳纲动物。随着中国医学药学研究水平的不断提高,对科学实验室、对实验动物房设施要求越来越高,对实验动物环境的洁净度、温湿度、压差与氨浓度的要求也越来越严,为高质量实验动物以及实验全过程提供有力的保障。也促进了洁净装备工程的发展。我国颁布了GB14925-2001《实验动物 环境及设施》与GB50447-2008《实验动物设施建筑技术规范》按照空气净化的控制程度,实验动物环境设施可分为普通环境、屏障环境和隔离环境;按照设施的使用功能,可分为实验动物生产设施和实验动物实验设施。并规定了不同实验动物环境指标。实验动物房降低换气量是节能措施之一,但要从改革饲养方式与实验工艺着手。其中独立通风笼盒(IVC)是被广泛采用的微环境净化屏障。把每个饲养单元缩小到最小的程度,用进、排风管道连接成独立组合件。这样使各IVC完全隔离,最大限度地避免了饲养中的交叉污染,提高洁净空气的利用效率。又可以方便在超净工作台(或生物安全柜)中进行无菌实验操作,同时满足了微环境净化屏障与无菌操作。其次,使用回风也能有效节能。实验动物房之所以采用全新风直流净化空调系统,是为了防止回风引起不同饲养室交叉污染以及自室的污染的积累。采用带净化除味的自室循环机组是个成功的经验,可降低入室新风量,而维持合规的换气次数。近年来各大研究机构、高校、药厂等纷纷建造大型实验动物房。建造综合性实验动物平台也越来越多,为科研与生产单位提供一站式创新技术及资源服务。一类面向科研人员,为科学研究提供动物实验、模型创制、基因编辑与功能药效。另一类面向医药研发企业,要做药物毒性研究,做药物、疫苗、医疗器械的临床前的毒性和有效性研究。我国已经建成了昆明,武汉,哈尔滨,北京,兰州五大实验动物基地。

改善室内空气质量是洁净技术另一个应用领域。进入21世纪,在改善居住条件、提高室内装修档次的热潮下,凸显了不良的室内空气质量对室内人员的影响,空气净化器开始应运而生。经过几年来消除源于建筑材料、家具、人造板材、各种黏合剂涂

料和合成纺织品等甲醛为主的挥发性污染物的持续努力,基本上解决了以材料污染为主室内污染,改善了室内空气质量。“雾霾”是从2003年开始进入人们的视野,影响到室内环境。2012年,环境保护部对空气质量标准进行修订,将PM_{2.5}纳入监测。中国气象局加强了雾霾天气的监测预警工作。2013年1月,中央气象台对霾预警信号标准进行修订,将反映空气质量的PM_{2.5}浓度列为预警的重要指标。9月2日起,中央气象台每日发布空气污染气象条件预报。2013年“雾霾”成为了年度最热关键词。截止到2013年12月30日凌晨,我国有32个省的104个城市受到了雾霾的侵袭,全国大部分地区的笼罩在一片雾霾之下。对于空气净化技术来说,消除雾霾对室内人员的影响,保证室内空气质量完全不成问题。各种空气净化器纷纷登场,良莠不齐。良好的空气净化器至少可以在围护较为密闭的室内空间内有效去除PM_{2.5}悬浮颗粒物。另外,能过滤PM_{2.5}悬浮颗粒物、向室内供给新风的新风机,也受到人们的青睐。但是在资本的推动下从“雾霾杀手”运作到“中国好空气”、“新风进校园”等,不断唤起了人们对空气质量的忧患意识。并用各种让人似懂非懂的新名称、新概念、新技术去博人眼球。资本催熟了市场热点,引爆了空气净化器与新风机的销售,似乎成了人们的“生活的刚需品”。为了把保障人民健康摆在优先发展的战略地位,体现以人民为中心的发展思想。2013年,国务院及时发布《大气污染防治行动计划》即“大气十条”。到2017年,“大气十条”确定的目标如期实现,全国空气质量总体改善,京津冀、长三角、珠三角等重点区域明显改善。2018年6月27日,国务院又发布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》。2021年2月25日,生态环境部举行例行新闻发布,宣布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》圆满收官。大气质量极大改善,使得人们对空气净化器或新风机的认识趋向理性。打赢两次室内空气质量保卫战,充分说明了以人为中心的源头控制思路的胜利,推进了健康中国的进展^[16]。健康建筑的需求升级为净化行业发展带来新的机遇与挑战,促进净化领域科研成果与技术交流

3 我国洁净技术自主发展与创新

纵观以前的50多年洁净技术的发展,前期的高效过滤器、工作台、层流室、粒子计数器、生物安全柜,到洁净度级别标准等等,从借鉴国外技术与仿制产品,到跟踪研究国外高科技的发展。我国的洁净技术工作者开始走上了创新的漫长探索路程,一步一步地取得了一些自主知识产权。

在七十年代末至八十年代末这10年中,我国第

一个打破“层流”与“断面风速0.457 m/s”的教条,提出了“平行流”与工艺相关的“下限风速”^[3]。在洁净室的基础和技术研究方面也取得了众多成绩,如:提出了中国大气尘的统计规律、湿度对大气尘浓度的作用、“W”型大气尘浓度日分布模型,为确定室外设计浓度提供了依据^[3];提出了空气幕层流罩的隔离效果、设计原理与计算方法^[17];提出了乱流洁净室的均匀分布理论计算公式、经验计算公式,以及自净时间、污染时间的计算式;提出了单向流洁净室下侧回风方式的最大室宽、计算模型以及下限风速的概念及数据;提出了高效空气过滤器封导结合的双环密封原理和方案,倒置式液槽密封方案;进行了人体发菌量的测试与分析;建立了滤材、滤器的细菌过滤效率测试台,得到了对大气尘菌源的滤菌效率与计数、计重效率的相关关系^[18]。特别是洁净室三区不均匀分布的计算方法,比国外提出的计算方法更准确性,更方便性。提出的不均匀分布系数,与过滤器满布比的大小,风口气流紊流程度,涡流区大小,房间体积大小等因素有关,只要满布比达到一定程度,涡流区小到一定程度,出口气流很少引射作用,室内含尘浓度就能达到100级或更高级别的层流水平,乱流就逐渐过渡到层流这一量变到质变的关系,从而得到了层流和乱流统一的表达式^[19]。

1983年许钟麟研究员编著了《空气洁净技术原理》^[20],1989年出版了《空气洁净技术应用》^[21],对开展洁净室技术的教学研究与设计施工起了重要的作用。若干高等院校与研究院(较早的有哈尔滨建筑工程学院、同济大学、天津大学、中国建筑科学研究院等)自1978年开始招收洁净技术领域的研究生。不少高校、研究所也开设了洁净技术的研究方向。

1982年6月成立了中国电子学会洁净技术分会,并创办了《洁净技术》杂志,这是第一本介绍洁净行业技术交流与发展的专业杂志。后改名为《洁净与空调技术》,于1983年正式发刊。1986年中国洁净技术学会成为国际污染控制学会联盟(International Confederation of Contamination Control Society)的成员。2006年第18届国际污染控制学术会议在北京召开获得了成功。中国建筑学会暖通空调分会净化专业委员会从建设口整合国内洁净技术力量。每逢双年在暖通空调分会框架内举行年会,每逢单年独立召开年会,定期开展学术活动。促进了国内外洁净技术的交流与发展。如与日本医疗福祉设备学会等学术团体建立联系,每年分别邀请对方在各自年会作主旨演讲,加强了与国外的技术交流。有力地

推动中国的洁净技术的发展。

90年代,随着我国洁净工程市场不断扩大,我国研究机构与高校也投入洁净相关产品的研究与开发。出现一批生产洁净产品的大型企业与洁净工程公司,中外合资、外资企业也大批涌入。从超低穿透率过滤器、生物安全工作台、FFU机组、袋进袋出过滤箱,到铝蜂窝夹心壁板、铝合金架空地板、防静电地面卷材等绝大部分洁净工程所需的产品与材料能在国内生产了。值得一提多用途洁净送风屏,因可以十分方便设置^[22]造就局部洁净区域,并随超薄型高效过滤器的出现发展出各式各样的局部净化设备,应用广泛。又如,医用洁净空调机组以消除微生物滋生条件为宗旨,改革了百年来的空调箱内部件组合次序以及部件的设计,使空调机组摆脱了提高热湿交换效率与消毒灭菌的束缚,有效地防止微生物的二次污染^[3]。

90年代后期我国医院建设高潮开始兴起,由于医疗行业不像制药、食品、生物安全实验室等行业,没有统一的国际标准,这为我国留出一个很大的研究与发展的空间,可以依据我国国情开展医疗环境控制的研究工作与开发相应的技术措施。由于我国医院建设的数量之多、规模之大以及分布地域之广在世界上已是首屈一指的,在设计与施工过程中积累的经验教训是任何国家无可比拟的。加上,我国就医人数世界第一,年手术量名列前茅,微创手术不断地替代着开放手术,我国成功拓展了微创手术应用范围,微创手术案例与技术进入世界前沿。还有,两次疫情的冲击使得我国防控水平以及隔离设施实施能力位于前列。我国已在医疗工艺上取得了一定的话语权。医疗环境控制领域成为我国洁净技术创新的巨大空间,推出越来越多的新思维、新概念、新方式、新模式、新措施、新装备,形成我国独特的、具有自主知识产权的科技成果^[23]。发展出有中国特色的数字化、网络化、智能化手术室及其他医疗科室。

进入了21世纪,我国开始走上自主发展的创新历程。比较有代表性成果如阻漏层理论,改变了高效过滤器放在净化空调系统送风末端的传统做法。将高效过滤器从系统末端移开,并在末端设置有一定阻力与效率的阻漏层,把传统送风装置身上具有的过滤、堵漏、均流三大功能“解耦”,化局部的漏为整体的不漏。有效杜绝了高级别洁净室发生的漏泄。成功应用在我国洁净手术室^[24]。又如,动态气流密封的负压高效排风装置,采用疏堵结合完全改变了常规的机械密封做到“万无一漏”。还可以在位消毒、在位更换。成功用于空气传染隔离病房和生物安全实验室。相比生物安全“必备”的袋进

袋出的过滤装置,既轻巧、简便又安全^[25]。对于高级别的洁净空间与生物安全防护空间,如空气传染隔离病房和生物安全实验室,压差控制很重要,似乎压差越大越好。这是只认密封和高负压的静态隔离理论。为此提出了动态隔离理论,采用合适的送风缓冲室,主动在密封门下留门缝,用自循环风降低新风送风量等。打破了常规的高负压、密闭门,全新风的设计与施工的框框^[26]。

近年来我国手术室装备与建设方面涌现出不少新装置、新模式、新技术。如通仓手术改变了传统的手术实施方式;多联手术室使得通仓手术室更适合我国国情,适用于更多的病种与各类的医院;日间手术改变了手术原有的医疗模式,缩小了住院洁净手术部规模,提高了手术量、降低了手术成本;无级别受控环境改变了我们的控制思路;手术室带宽口低速空气幕送风装置不仅增强了抗干扰能力,而且还能同时满足手术医护、麻醉师与患者的温湿度需求;手术环境变风量变级别改变了手术室的传统运行方式;控温辐射手术室将送风宗旨从调控室内温湿度变为实现最佳无菌区域手段,而且提高了手术医护、麻醉师与患者各自的舒适性;恒压差变新风量配置不仅仅提高了室内空气质量与节能效应而且增强了手术室抗疫能力;柜式组合手术室同时实现板壁与装备模块化的结构,实现了板壁与装备随意按需组合。在鼓励创立5G在医疗健康领域应用场景之际,发展了5G无线数字化手术室新模式,将手术室实时需用的数字化与运营管理的数字化解耦。手术部成为相对稳定的管理运营平台,不时变化的数字化手术室成为嵌入模块,基于5G用无线将两者有机结合起来,大大缩短了改扩建的周期,并可充分发挥AI功能。继而开发了以人工智能为核心的手术室监控与记录装置,可以全方位、全过程、所有数据的记录、存储、可追溯与分析,这对优化手术室人员行为、提高手术标准操作水平、降低手术部位感染以及不良事件发生有革命性的意义^[23]。

随着医疗技术与先进诊疗设备进步会对医疗环境的控制参数数量增加以及控制要求提高,同时也使能耗不断增长,医疗洁净环境控制的能耗一直是医用装备技术的痛点。降低医疗成本与节能降耗的难题一直倍受人们的关注。医院节能降耗应该要以新的发展理念作指导,除了努力提高“能源效率”传统节能技术外,还必须关注医疗技术的新模式、新措施与新装备,推动医院能源结构调整。加快医疗改革、改进医疗方式、改变医疗模式、改革医院体系,才能不断推进“非能源效率”节能创新措施^[27],比传统提高“能源效率”的节能途径更多,节能效

果更大,更易取得多赢的局面,才能走上真正高效低耗的发展道路。

可见,洁净技术发展动力是创新。创新的灵感均来源于工艺的不断进展与变革、来源于工程实践的严格要求,来源于社会的迫切需要。创新使我国走上了一条自主发展道路,取得了丰硕的成果。

4 展望

总之,洁净技术作为工艺性净化空调技术是为工艺服务,谁掌握了先进的工艺过程、把握了工艺发展的方向,谁就执洁净技术的牛耳!回顾了我国洁净技术发展历程,并非一帆风顺,而是充满了艰辛。可以说走过不少弯路,处处受制于人,是在探索中前进的。正因为我国始终把科技创新摆在核心的位置,追求这一点一滴的理念和方法的创新。经过我国几代人的努力,持续地推动着我国洁净技术的发展。

展望21世纪,依托我国洁净室建设丰富的实践、大量的技术积累,只有通过创新,我们才有了众多的新理念、新理论、新措施和新设备。我国具有自主知识产权的成果才会不断涌现。我国洁净技术开始从量的积累迈向质的飞跃,从点的突破迈向系统能力提升。我们应该客观地认清今天的形势。我们既要看到与前沿技术的巨大差距以及面临的严峻挑战,又要看到国家的进步、高科技的发展,应用的范围不断扩大,洁净技术迎来了历史上最好的机遇和条件。加强基础理论的研究与技术革命,加强国内外的学术交流,发挥中国制造的优势,争取标准制定的话语权。以创新引领发展,在洁净技术领域实现从“跟跑”、“并跑”到“领跑”的重大跃升,推动着我国洁净技术更为健康地持续发展。

参考文献

[1] Holbrook, D. , Controlling contamination: the origins of clean room technology[J]. History and Technology,2009,25(3)173-191
 [2] Naughton P., History of Cleanrooms[J]. ASHRAE JOURNAL. 2019(11):38-54
 [3] 许钟麟. 从我国空气洁净技术四十余年的发展展望今后面临的挑战[C]. 第五届海峡两岸制冷空调技术交流会, 2001:1-3
 [4] 沈晋明. 洁净厂房的送风模式[J]. 洁净与空调技术, 2001(4):2-7
 [5] 沈晋明, 孙光前. 微电子洁净厂房暖通空调设计[M]. 现代空调, 北京: 中国建筑工业出版社, 1999:39-59
 [6] 刘燕敏, 沈晋明. 我国医院医疗环境控制技术的70年发展历程[J]. 中国医院建筑与装备, 2019(10):32-35

[7] 许钟麟, 沈晋明. YGG 型低阻亚高效过滤器[J]. 暖通空调, 1988, 28(1):16-19
 [8] 沈晋明. 《军队医院洁净手术部建筑技术规范》简介[J]. 洁净与空调技术, 1995(2):24-28
 [9] 沈晋明. 医院洁净手术部的净化空调系统设计理念与方法[J]. 暖通空调, 2001, 31(5):7-12
 [10] 《高级别生物安全实验室体系建设规划(2016-2025年)》[S]https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201612/t20161220_962213.html?code=&state=123[2016.12]
 [11] 沈晋明. 多用途隔离病房和无凝水空调技术[J]. 建筑热能与通风空调, 2005(3):22-26
 [12] 沈晋明, 刘燕敏. GB50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》编制思路[J]. 暖通空调, 2014, 44(4): 41-47
 [13] 沈晋明, 刘燕敏, GB51039-2014《综合医院建筑设计规范》的编制思路[J]. 暖通空调, 2015,45(3):41-46
 [14] 沈晋明, 刘燕敏. 可实现“平战”转换的综合医院及通风空调设施设计[J]. 中国医院建筑与装备, 2020(7):38-41
 [15] 沈晋明, 闫明明, 汪亚兵. 用GLP精神建造GLP实验动物房[J]. 中国实验动物学报, 2009, 17(2):154-157
 [16] 沈晋明, 刘燕敏. 我国改善医院室内空气质量的百年发展历程[J]. 中国医院建筑与装备, 2021(12):38-41
 [17] 沈晋明. 气幕洁净棚特性研究, 洁净技术[J].1983(1):8-12
 [18] 百度百科. 洁净技术 https://baike.baidu.com/item/洁净技术/4987790
 [19] 许钟麟. 洁净室的不均匀分布算法[J]. 暖通空调, 1979, 9(4):15-21
 [20] 许钟麟. 空气洁净技术原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983年
 [21] 许钟麟, 沈晋明. 空气洁净技术应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989年
 [22] 许钟麟, 沈晋明. 空气洁净屏(棚)送风系统[J]. 暖通空调, 1998,28(2):21-26
 [23] 沈晋明, 刘燕敏. 21世纪手术环境控制发展与创新[M]. 同济大学出版社, 上海, 2021年
 [24] 沈晋明, 许钟麟. 空气净化系统末端分布装置的新概念[J]. 建筑科学, 1998(2):3-7
 [25] 许钟麟, 沈晋明. 动态气流密封负压高效排风装置, 发明专利公开号: CN1601192A, 公开日20050330
 [26] 许钟麟, 张彦国, 曹国庆. 负压隔离病区建设简明技术指南[M]. 中国建筑工业出版社, 北京, 2020
 [27] 刘燕敏, 沈晋明. 从非能源效率浅谈手术部节能[J]. 暖通空调, 2020, 50(1):64-68

手术室控制新思路、新方法与新要求

沈晋明¹，许钟麟²，刘燕敏¹

(1. 同济大学，上海 200092；2. 中国建筑科学研究院有限公司，北京 100013)

[摘要] 在开放手术、微创手术与无创手术共存的时代，微创手术与无创手术不断地替代着开放手术。原有的手术室建设标准以开放手术为主，划分手术室级别的标志性的指标是手术切口的位置、大小、深度、手术时间、风险程度等因素，发展出不同级别手术室与手术环境控制措施。美国 FGI 适应发展趋势提出手术室分级与环控的新思路、新措施，不仅给我们启迪，也值得我们深思。对原有的手术室分类及手术环境控制是一种冲击，也许会改变医院建设的原有的体系。对此，我们应有相应的对策思路。

[关键词] 开放手术；微创手术；无创手术；手术环境控制；思路；对策

0 引言

当今微创手术与无创手术不断替代开放手术，影像已成为手术不可或缺的手段，数字化、网络化、智能化不断赋能手术室，日间手术迅速崛起。什么是推动手术室发展的根本动力？手术室标准如何适应这种发展趋势？手术环境控制又有什么新要求？手术室与影像室又会如何结合？又应如何降低造价与运行能耗？发人深省！对此，美国医院设施指南协会（Facilities Guidelines Institute, FGI）编制 2018 年版“医疗护理机构设计和建设指南”以“医院设计和建设指南”，“门诊设施设计和建设指南”和“住宅建筑卫生，护理和辅助设施设计和建设指南”三个独立的文件颁布（以下简称 2018 版《指南》）。2018 版《指南》给了我们许多启迪，值得我们深思。尽管文献 1 已及时做了介绍。为了能引起对手术室的一些新论述的重视，本文再次从这一角度进行深入解读。

1 手术环境控制与建设标准的推动力

19 世纪 40 年代形成的现代外科手术，其宗旨就是使患者受到最小伤害，安全、有效地切除病灶或修复身体上的缺损，以恢复或改善身体的功能。100 多年来，手术技术、麻醉技术与感染控制技术的一次又一次的进步不断地推动着手术的发展，同时推动着手术室模式沿革，推动着手术室建设、甚至改变了管理与运营的形式。在这基础上也形成了手术室的建设和标准规范。

过去传统的手术称之为解剖型手术或开放手术（Open surgery），是指任何需要外科切口（Surgical incision）的手术，而切口大小必须足以让医师进行手术。在体内组织和构造暴露于空气的情况下，外科医师可以亲眼直接目视或搭配放大镜或显微镜用亲手来执行手术。比如许多心脏外科和神经外科手术。

真正被称为人类外科领域中跨世纪的革命应是

微创手术（minimally invasive surgery, MIS），目前微创技术主要包含腔镜技术和介入技术。体现了高科技与现代外科学有机结合，如果说它是外科发展史上的一座新的里程碑也不为过。未来治疗学发展的最终目标为无创伤方法替代有创伤方法，小创伤替代大创伤的方法。可见微创外科代表着未来手术的发展方向。

微创手术不同于开放手术，手术人员无法亲眼所见，亲手所为，需要为更多的装备、系统与信息提供一个高效率、高安全性的交融平台。如：

1) 医学影像管理系统，通过统一的控制界面，方便手术人员获取各种信息，实时调用高清腔镜影像、手术视野摄像、生命体征监护信息、术中 X 线影像、术中超声影像、手术显微镜影像、PACS/HIS/LIS 系统、手术导航系统等。

2) 手术室存储系统，能够对术中各种信息进行记录，包括各路高清影像的采集、存储、刻录和高清视频流媒体的输出，与电子病历系统的结合。

3) 手术室控制系统，对室内各种设备与系统的控制整合，包括手术环境的系统控制。

4) 手术室示教系统，要求高清视频信号，能满足临床教学、手术视教和远程医疗的需要。

这些就需要手术室数字化、网络化。正是实体手术室的需求使得数字集成手术室 Digital integrated operating room 应运而生，国内给予高、大、上的译名为“数字一体化手术室”。

对于高难度、复杂的手术，为了将介入治疗和外科手术整合或真正融合在一起，需要将 DSA、CT 或 MRI 等大型诊断设备引入手术室，在手术过程无缝转接，优化手术流程、改善治疗效果、提高诊疗效率。这样又诞生了一种新的手术形式——即在实时影像学的引导下，采用介入技术与传统外科技术联合治疗，称之为复合手术室（Hybrid operating room）。同样，由于复合手术室需求，发

展出一整套集成数字化、网络化的整体手术室和手术导航平台,能够将实时 DSA、MRI 或 CT 影像更新到外科导航系统中,关联患者信息,并通过大屏幕实时显示,为术者提供最佳手术路径及术中影像的动态变化的系统。

微创手术在临床应用中暴露出一些不足:(1)经固定的通道器械操作限制了医生的活动度和手的灵巧性;(2)二维图像使外科医生失去了视觉的深度感和对术野直观平稳控制力;(3)手眼间协调性差,使得精细的解剖和吻合变得困难;(4)触觉的减弱和手的自主阵颤、易疲劳增加了操作的困难等。

为此又开发了一种新的手术形式——机器人辅助(Robotic-Assisted)手术系统。即用机器人有效辅助医生进行手术定位和手术操作,提高临床手术的精确性、灵活性和稳定性。机器人辅助手术使得微创外科的发展又进入了一个新时代。极大地拓展了传统的腹腔镜微创外科,扩展到外科领域的各个分支。

机器人辅助手术发展对手术室的数字化、网络化,甚至智能化提出了更高要求。整个手术过程完全建立在计算机辅助技术的基础上,使手术医生能够高效率、高精度、三维立体地了解病灶的分布、形态、结构,从而科学判断手术指征,制定最佳手术方案,最大程度减少手术创伤,避免神经损伤,尽快恢复机体功能。并体现出在虚拟手术仿真系统、术中导航系统、术中监测系统、手术机器人辅助等方面的独特优势。

近期无创手术也得到了极大的发展,这又是一次技术革命。如超声波聚焦刀,是“高强度聚焦超声波肿瘤治疗系统”(High-intensity focused ultrasound, HIFU)。在磁共振 MRI 引导下识别肌瘤,并实时反馈聚焦超声定位和治疗肌瘤时的温度和组织变化。高强度聚焦超声波在聚焦点产生热量,对肌瘤组织进行消融。超声波可穿透皮肤抵达肌瘤组织,没有任何创口,实现完全无创的手术。称之为磁共振引导聚焦超声术(MRgFUS)。经自然腔道的内窥镜手术,以其无创实现了从诊断到治疗、从腔内到腔外的突破,成功替代了部分传统外科手术。如将肠镜送到盲肠并找到病变部位,在内镜下用专用电切刀逐渐将阑尾根部从盲肠壁切断,成功施行了阑尾无创切除术。将来的“无创化”手术可能会基于纳米机器人,这也许又会引发一次手术技术革命,又一次推动了数字化、网络化、智能化的发展。

2 手术室分级指标与建设标准

原有的手术室建设标准以开放手术为主,划分手术室级别的标志性的指标是手术切口的位置、大

小、深度、手术时间、风险程度等因素,发展出不同级别手术室。目前世界各国的医院建设标准均基于此。如将进行关节置换手术、器官移植手术及脑外科、心脏外科和眼科等无菌手术为 I 级手术室,将进行胸外科、整形外科、泌尿外科、肝胆胰外科、骨外科和普通外科中的一类切口无菌手术为 II 级手术室,将进行普通外科(除去一类切口手术)、妇产科等手术为 III 级手术室;将实施肛肠外科及污染类等手术为 IV 手术室^[2]。

我们所称的微创手术是 minimally invasive surgery 的通俗、形象译文,在我国被广泛使用。英文的原意是对某特定的手术而言是“最小的侵入性操作”。因此,微创技术并不一定微创。微创也是创伤,相对而言该创伤可能较小,也有感染风险。若使用不当,微创手术的并发症远高于传统手术。可见用“微创(minimally invasive)”来描述手术并不合适,还是采用“侵入(invasive)”较为合适。

如今是开放手术、微创手术与无创手术共存的时代,不再是开放手术占统治地位了,必须用新的方式为外科操作来分类。美国 FGI 首次提出用“外科操作侵入方式与深度”来定义外科操作的不同类别,值得我们借鉴。

首先要理解外科侵入性操作(Invasive procedures)的涵义。按美国 FGI 的 2018 版《指南》的定义:在无菌外科手术领域中执行并穿透患者身体保护表面(例如皮下组织,粘膜,角膜)的过程。侵入性操作可能属于以下一种或多种:

- 1) 需要进入或打开无菌体腔(例如,颅骨,胸部,腹部,骨盆,关节腔);
- 2) 涉及留置的插入的异物;
- 3) 包括超过全身的 20% 的烧伤的切除和植皮;
- 4) 并非以开放手术开始,但是有公认的可衡量的风险,需要转换为开放手术。

外科侵入性操作似乎与我们平时理解的手术意思相近,其中第 4 点值得我们重视。微创手术也是有风险,不同类型微创手术有不同的可衡量的风险。对于可衡量风险大的微创手术就需要在开放手术室内进行,一旦失败或出现并发症就要立即转换开放手术。这就是为什么大多复合手术室需要配置 I 级洁净手术室设施的缘由。

与外科侵入性操作相反的是“非侵入性操作(Non-invasive procedures)”。进行非侵入性操作的场所,如检查或治疗室(Exam or treatment room),似乎无创的操作过程对室内环境控制要求不高,但要注意如用腔镜技术经自然腔道的未确诊或治疗的消化道、呼吸道、生殖道、泌尿道等症状

与疾病的场所，还是有一定的要求。尤其是支气管镜检查室，不但要求采用全新风直流系统，还要求负压控制。

介于这两者之间的是经皮外科操作（percutaneous procedures）。所谓经皮手术是指皮肤被穿刺或切口穿透的操作，该切口不会比皮肤或皮下空间更深，并且可能涉及引入导线和导管和/或插入留置的异物（临时或永久性），如植入支架、临时下腔静脉（IVC）滤器、主动脉瓣等，对患者可以实施有意识的，最小的，或者局部麻醉。进行经皮外科操作的场所称为操作室（Procedure room）。Procedure room 在我国尚未正式译文，本文以“外科操作室”行文。

手术室建设标准应该是确定不同类别的外科操作的合适医疗环境，为规范医院手术部设计、施工和验收，提高医院洁净手术部医疗环境控制能力，以满足医疗服务功能与感染风险控制需要。为此，外科操作的侵入方式与深度也成为了手术室分级的最合适的、标志性的指标。如果以侵入方式与深度作为外科操作的分级指标，就将3类不同的临床科室，检查、治疗室，操作室和手术室统一起来。这将会引起手术室建设标准或规范的根本性的改变！下面以这个角度再来介绍美国2018版《指南》的外科操作。

3 2018版《指南》的外科操作分类及要求

综上所述，在开放手术、微创手术与无创手术共存的年代，美国2018版《指南》跳出了原“开放手术”的狭隘范围，采用“侵入方式与深度”来定义外科操作的类别（见表1），一共分为3级。根据不同类别的外科操作要求，确定合适的医疗环境控制。

1级用房（见图1）. 检查与治疗室（Exam or treatment room）进行非侵入性操作（Non-invasive procedures）。用于患者咨询，检查以及各种无创治疗和操作。护理人员与患者之间存在身体接触。如抽血，注射/注射，轻微割伤和扭伤（包括伤口包裹），缝线和石膏，轻微皮肤病学操作（包括去除皮肤标

签），PICC（经皮插入的中央导管）导线的放置或去除，以及针头活检。一般只需要4次换气。如用于未确诊的消化道症状，呼吸道症状或皮肤症状的患者使用的检查室，则需要6次换气，其中2次新风，无压力控制要求。仅需送、回风口。要求室内饰面可擦洗和消毒。

2级用房（见图2）. 操作室（Procedure room）进行经皮操作（percutaneous procedures）。为原《指南》的A级手术室，或可称为一般手术室。所谓经皮手术是指皮肤被穿刺或切口穿透的操作，该切口不超过比皮肤或皮下空间，且可能涉及引入导线和导管和/或插入留置的异物（临时或永久性），如植入支架、临时下腔静脉（IVC）滤器、主动脉瓣等，对患者可以实施有意识的，最小的，或者局部麻醉。可以再分为有麻醉管理与没有麻醉管理的两类操作室。操作室需要15次换气，其中3次新风换气，有正压控制要求。需要单一送风装置设置在患者上方。要求室内饰面可擦洗，没有缝隙和裂缝。

3级用房（见图3）. 手术室（Operating room）为原《指南》的C级与B级手术室。是进行侵入性操作（invasive procedures）场所，如需要进入或打开无菌体腔；插入内植的异物；切除和移植覆盖烧伤者全身20%以上面积的皮肤；或在需要时由医生决定转换到一个开放的手术。由于侵入性操作会使患者身体原封闭的部分暴露于病原体（引起感染的物质）的潜在入侵之下，会增加感染的风险，要求处于严格的无菌环境中。手术室需要20次换气，其中4次新风换气。要求主送风装置集中设置在病患和手术小组的上方，送出垂直向下的单向气流。主送风装置的送风面每一边应均比手术台面至少多305 mm。并要求在手术部内进行有序的梯度压差控制。要求室内饰面是整体的，可擦洗，没有缝隙和裂缝。

《指南》在手术部内定义了限制区和半限制区。类似于我国GB50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》规定的洁净区与非洁净区。限制区是在手术部里半限制区域内的指定区域，手术室应位于限



图1 检查室



图2 操作室



图3 手术室

表 1 2018 版《指南》的外科操作用房分类及要求

用房名称	定义	医疗及环境的控制要求	最低设计要求	
			位置与进入	医疗环境通风措施
1 级检查与治疗室	非侵入性操作	可能需要高水平的消毒或无菌器械,但不需要手术室环境控制的患者护理	在非限制区,从非限制区进入	换气 4-6h ⁻¹ 新风 2h ⁻¹ 。无压力控制要求。仅需送、回风口
2 级操作室	经皮手术操作	患者护理需要高水平消毒或无菌器械和操作环境控制一些要求,但不要手术室的的环境控制	在半限制区,从非限制区或半限制区进入	换气 15h ⁻¹ 新风 3h ⁻¹ 。有正压控制要求。需要单一送风装置设置在患者上方。
3 级手术室	侵入性操作: 在无菌外科手术领域中执行并穿透患者身体保护表面的过程	侵入性医疗过程。病人需要生理监测,预计需要主动生命支持的任何 2 级医疗操作要求	在限制区,从半限制区进入	换气 20h ⁻¹ 新风 4h ⁻¹ 。有正压控制要求,主送风装置设置在病患和手术小组的上方,送出垂直向下的单向气流

制区,只能通过半限制区进入。进出受限主要是为了支持高级别的无菌控制,而不一定出于安全目的。限制区内的人流仅限于授权人员和患者。限制区内的人员必须穿外科服装并遮盖头部和面部毛发。需要打开无菌物品时或刷手的人员可能在场,需要戴口罩。操作室可以设置在半限制区,可以从半限制区或非限制区直接进入。检查与治疗室与麻醉后监护病房(PACUs)则位于非限制区。手术部要求设置更衣室或休息室,不规定一定要直接通向限制区。

像其他标准或规范一样,《指南》只是提供设计和建造新建或改建的医疗护理设施的最低共识要求。因此手术室不再分为原《指南》的 C 级与 B 级手术室。《指南》建议医疗护理机构的设计参数要高于规定的最低要求值,以满足临床或工作人员对安全、有效的医疗环境控制的需求。但没有规定要求高出最低要求的冗余量,德国 DIN1946-4-20018 推荐设计冗余度为 1.1。《指南》指出这些最低要求值仅仅供政府职能部门与权威机构对医疗护理机构功能的认定基准,而非最佳设计值。

至于高于《指南》的最低要求的技术文本,FGI 计划从 2018 年开始出版了一系列出版物,以白皮书,论文,案例研究,咨询意见,报告清单等形式出版。被称为“高于基准 Beyond Fundamentals”的出版物(即高于指南最低要求的文本),旨在支持和扩展《指南》中公布的最低设计要求,如复合手术室等。这是一种新的思路,满足不同的设计要求。

3 2018 版《指南》对手术室内功能区的设置要求

2018 版《指南》提出了麻醉区设置要求。首先要明确尽管静注麻醉现在使用越来越普遍,但是无论在检查室,外科操作室还是手术室中都有可能使用气体麻醉。在外科操作前,要依据侵入性水平,患者敏感度和类型的预测,来决定是否使用麻醉或采用哪种麻醉方式。有的患者可能需要吸入麻醉剂以克服焦虑或在整个过程中保持静卧不动。在采用吸入麻醉剂时,必须在设计中计划容纳该设备使用的空间。2018 年卫生指南修订委员会(Health Guidelines Revision Committee, HGRC)制定了麻

醉工作区的最低规划要求。这是基于 HGRC 的多学科团队研究的在手术过程中安全设置麻醉设备和进行吸入麻醉所需的最小空间(区域),包括在真实手术室中模拟手术病例。同时还必须遵守美国国家消防协会的 NFPA 99,《医疗设施守则》和 ANSI / ASHRAE / ASHE 标准 170《医疗设施通风》中的相关要求。

表 2 外科操作麻醉设置最小净面积要求

类型	室内状况	最小楼面净面积
住院手术室	手术室基本配置,可采用全麻	20 ft×20 ft =400 ft ² (37.2 m ²)
住院手术室	使用便携式影像设备进行图像引导手术或需要额外人员和/或大型影像设备的外科手术	600 ft ² (55.7 m ²)
门诊手术室	如不采用全麻根据所需净空计算	255 ft ² (23.7 m ²)
门诊手术室	采用全麻,使用麻醉机和推车	270 ft ² (25.1 m ²)
门诊手术室	如果需要额外的人员和设备,	400 ft ² (37.2 m ²)
操作室	没有麻醉管理	130 ft ² (12.1 m ²)
操作室	有麻醉管理	160 ft ² (14.9 m ²)
内镜室		180 ft ² (16.7 m ²)

手术室依然是医院建设标准的重点。2018 版《指南》只规定了住院手术室与门诊手术室面积的一般要求。与原《指南》的手术室相比,除了强调上述的麻醉所需的区域,现代手术室不仅仅要重视无菌的手术区域,而且必须关注移动诊断设备,或固定诊断设备的移动途径与范围。为此,2018 版《指南》规定了无菌区、麻醉区、循环通道、设备移动通道等各种“功能区”。要注意这些功能区的定义、设置及其净空与间距的要求是可以随着手术技术进步与装备更新而变化的,这使得手术室的面积与配置设计的适应性与灵活性更强。各功能区及其要求表述如下:

1) “无菌区”(浅蓝色区域)是手术室内围绕患者的切口周围的手术区域。“无菌”术语意在不存在有害的微生物。除了要求医务人员在刷手后穿戴整套无菌服进入无菌区,所有进入这无菌区域的物品都要求无菌。在无菌区里的手术台、手术器械桌以及使用的特殊装置,在每一次使用前必须洁净、

无菌。X 射线仪、外科显微镜和其他难以清洗的装备都必须包裹无菌塑料布来维持其无菌。如一间面积为 400 ft² (37.2 m²) 的住院手术室, 要求手术台两侧与脚部各延伸 3 ft (915mm) 形成的无菌区域。

2) “循环通道”(橙色区域)是无菌区两侧各延伸 3 ft (915mm) 及脚部延伸 2 ft (610mm) 形成的空间。

3) “设备移动通道”(浅橙色区域)是循环通道两侧各延伸 2 ft 6 in (762mm) 及脚部延伸 2 ft (610mm) 形成空间, 这可以根据移动设备的要求而变更。

4) “麻醉工作区”(灰色区域)是在手术台头部需要设置 8 ft×6ft (2440mm×1830mm), 麻醉工作区后部(马赛克区域)是麻醉师与助手走动区域(见图 4)。麻醉师或助理麻醉师应逗留在无菌区外, 用隔层把他们与无菌区隔开。

至于门诊手术室, 与门诊手术室相比只是没有设备移动通道, 其他都是相同的(见图 5)。

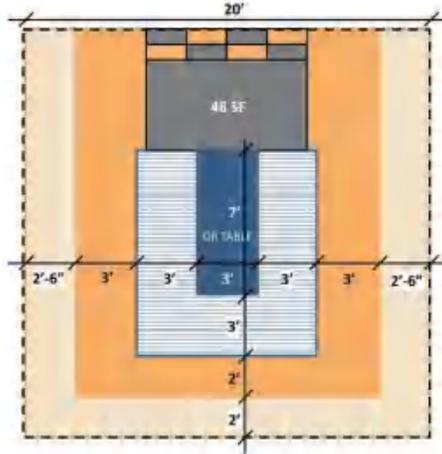


图 4 住院手术室内分区



图 5 门诊手术室内分区

4 影像室分级及与外科操作室的适用性

如今影像装备不仅仅是提供成像服务, 用于检查室或操作室的诊断或治疗。影像装备已成为了现代手术不可缺少的辅助手段, 需要在实时影像学的引导下, 进行侵入性操作。因此制定手术室的建设标准, 必须同时考虑到影像装备如何与检查、治疗室, 操作室与手术室相配合。2018 版《指南》提出了新的影像室分类系统(见表 4)。该分类系统是根据室内执行的外科操作类型及其特定要求, 分类级别与外科操作分类一致。或者说, 1 级影像室适用于诊断或非侵入治疗, 2 级影像室与经皮诊断或治疗性操作结合的成像, 3 级影像室与手术过程结合的成像。

分类取决于所执行的操作类型和患者安全所需要的程度。分类中删除了介入影像, 并将核医学纳入影像服务要求。

2018 版《指南》不再规定的影像室用房的最小用房面积。因为影像设备更新很快, 2018 版《指南》规定所有类型的影像室的空间大小取决于房间中使用的影像设备周围的最小净空或间距要求, 以及制造商的安装、使用和维护建议, 以使这些用房的设计和布局更容易适应新技术和新设备的变化。

对于门诊影像设施, 要求每三间 1 级影像室至少提供一个患者护理空间, 以便患者接受现场医疗服务或注射非放射药物造影剂的制剂。

第 2 类和第 3 类房间应具有独立实体分隔的控制室。

表 3 影像室分级与应用要求

影像用房	应用	设计要求	
		位置	进入
1 级	诊断或非侵入性治疗。如诊断性 x 线摄影、x 线透视、乳房 x 线摄影、计算机断层成像(CT)、超声、磁共振成像(MRI)等影像学。用于通过天然孔腔且不刺穿或穿透天然保护膜的服务	非限制区	从非限制区进入
2 级	经皮诊断或治疗性操作。如冠状动脉, 神经系统, 神经或外周血管造影术和电生理学过程。	半限制区	从非限制区或半限制区进入
3 级	在与手术室相同要求的空间内进行侵入性操作、病人需要生理监测和预计要求采用主动生命支持的任何 2 级医疗操作。	限制区	从半限制区进入

5 2018 版《指南》的启迪与思考

手术室建设标准或规范的主要任务之一是确定不同类型手术室合适的医疗环境, 今天如何确定合适的手术环境的课题又一次提到议事日程来了!

5.1 2018 版《指南》的启迪

近年来多国陆续修订了医院建设标准与指南, 如日本日本医院设备协会在 2013 年颁布了 HEAS-02-2013《医院设施设计指南(空调设备篇)》^[3], 德国

标准研究院 (DIN) 在 2018 年颁布了 DIN 1946-4-2018: 室内通风技术 - 第 4 部分《医疗建筑与用房通风空调》^[4], 对手术室的分级与建设要求还是沿用原有的以开放手术为主导的思路。美国医院设施指南协会颁布的 2018 版的《指南》提出了分级的新思路与环境控制的新措施。归纳为以下几点, 给我们新的启迪, 值得我们思考:

1) 基于开放手术、微创手术、无创手术共存的今天, 2018 版《指南》第一次提出用“侵入方式与深度”来定义外科操作临床科室, 分为 3 个级别的科室, 分别为检查 - 治疗室, 操作室和手术室。并提出了相应的平面布局、辅房要求与控制措施^[1]。

2) 手术归为外科操作中的一部分, 是侵入性操作。由于《指南》提出的是最低要求, 因此手术室就不再分级。高于该最低要求的手术室, 如复合手术室, FGI 将以“高于指南要求”的文本出版。

3) 2018 版《指南》考虑到影像装备已成为检查 - 治疗室、操作室与手术室的一部分, 根据室内执行的外科操作类型及其特定要求提出了影像室分类系统, 并与外科操作分类保持一致。

4) 2018 版《指南》提出手术室的面积由功能区来确定, 影像室的面积由影像装备周围所需的最小净空或间距要求, 及制造商的安装、使用和维护建议决定, 这些新的规定使这些手术室与影像室的设计和布局更容易适应新技术和新设备的变化。

2018 版《指南》确定的手术环境控制的最低要求 20 次换气 4 次新风 (见表 4) 是世界手术环境控制的共识, 与主要工业国家医院建设标准大致类似。如考虑到设计时采用的冗余度为 1.1, 则与我国《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-2013 和《综合医院建筑设计规范》GB51039-2014 相关科室基本一致 (见表 4)。2016 年世界卫生组织 (WHO) 颁布的《预防外科手术部位感染的全球指南》4.23 节中也认为通风系统应送入经过滤空气在手术室中提

供需要的正压。每小时需要 20 次换气来稀释在手术室中产生的且排除由周围区域进入的微生物。^[5]

5.2 对 2018 版《指南》的思考

2018 版《指南》的启迪触发了对我国手术室标准或规范思考, 这也许会改变我国原有的手术室体系, 手术环境控制要求可能会提高。

2018 版《指南》似乎将手术室归属于外科操作室中一类。但实质上是提高了医疗环境的控制要求。今后凡是涉及到侵入性操作都必须在手术室内进行, 均要求 20 次换气其中 4 次新风, 考虑到设计冗余度 1.1, 与 GB50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》的 II 级洁净手术室类似。因此《医院洁净手术部建筑技术规范》将 II 级洁净手术室作为标准手术室还是十分合理的。当前我国洁净手术部多是 I 级和 III 级洁净手术室为主体, 很不理解。今后手术室建造将要求以 II 级洁净手术室为主, 这与《医院洁净手术部建筑技术规范》原意是一致的。我们研究的重点, 如送风装置、手术环境系统控制、造价与运行能耗等课题应该从 I 级洁净手术室转向 II 级洁净手术室, 尤其要研究手术环境如何适用于当今的微创手术。

我们从来没有否定 I 级洁净手术室对手术环境的控制作用, 但从从不提倡泛用。正如德国 DIN1949-4-2018 标准再次强调的一样, I 级洁净手术室还是需要的, 特别对心脏与大血管外科、神经外科手术。对于一些微创手术, 其可衡量的风险很高, 需要随时转换为开放手术, 尤其是复合手术, 要求在 I 级洁净手术室内进行, 并同时考虑 3 级影像室。

III 级洁净手术室以后可能只用于操作室的环境控制, 相对于我国目前操作室的现状, 应该是提高了外科操作环境控制要求了, 还要结合 2 级影像室来考虑。

今后只要经自然腔道的内窥镜诊断或治疗, 要求符合《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-

表 4 各国医疗科室环境控制要求对比

美国 FGI 用房名称	风量 (h ⁻¹)	末级过滤要求	相当于我国规范的用房	相当于德国 DIN1946-4	相当于日本 HEAS-02-2013
1 级检查与治疗室	送风 4-6 新风 2	MERV-13 (F8)	GB51039 一般手术室送风 6 次换气, 新风 2 次换气, 末级中效过滤 (F7)	II 级用房, 新风量 ≥40m ³ / (h 每人) 吸入麻醉剂的场所; 100m ³ / (h 每个病人), 末级过滤 F9	III 级洁净区, 送风 6 次换气, 新风 2 次换气, 末级过滤 ≥ 比色法 80% (F7)
2 级操作室	送风 15 新风 3	MERV-13 (F8)	GB50333 III 级洁净手术室, 18 次换气, 末级 ≥0.5μm 过滤器效率 95% (F9)		II 级洁净区, 一般手术室, 送风 15 新风 3 次, 末级过滤 ≥ 比色法 90% (F8)
3 级手术室	送风 20 新风 4, 垂直单向流送风装置	MERV-14 (F9)	GB50333 II 级洁净手术室, 24 次换气, 末级 ≥0.5μm 过滤器效率 99% (H10)	Ib 级手术室送风量 ≥60m ³ / (h m ² 手术室面积) (+ 10% 冗余) 末级过滤 H13	
层流手术室 (指南中没用规定, 美国大多数医院采用)	垂直单向流送风装置	MERV17 (HEPA)	GB50333 中 I 级洁净手术室, 工作区平均风速 0.2-0.25 m/s, 末级 ≥0.5μm 过滤器效率 99.99% (H12)	Ia 级手术室, 送风量 ≥900m ³ / (h·m ² 出风面积) (+ 10% 冗余), 末级过滤 H13	I 级生物洁净手术室

2013中一般手术室要求,至少6次换气其中新风2次。

根据以上要求,配置适用的数字化与网络化,不要过度。不仅要考虑高级别手术室,也要考虑到一般手术室。数字化、网络化、智能化技术发展飞速,手术技术进步与装备更新换代很快,今天数字化、网络化、智能化配置不一定适合明天的手术与装备,今天的配置价格明天也许会降价。适用是金!

今后手术室标准如何变化值得我们思考。手术环境控制要适合微创手术,不能因为微创手术只有匙孔,环境控制掉以轻心。微创手术也带来了新的感染风险,如微创器材污染。近年有研究表明,腹腔镜手术中,患者皮下氧分压显著低于开放手术,切口感染率较高。微创手术器材十分精密,如腔镜、切割吻合器与腔镜组件的完善消毒以及在手术过程中维持无菌状态,甚至腔镜因温差而起雾等等都是感染控制的新课题。值得关注的是2018版《指南》与德国DIN1949-4-2018标准类似对手术无菌包的打开与器械桌提出了一定的条件与要求。

2018版《指南》分为3个独立文本,旨在缩小住院手术部规模,推行与规范日间手术中心、办公室手术以及护理设施的检查治疗室等,从根本上改变了医疗模式、改革医院体系、改进医疗方式,减少医疗周期、提高医疗效率、降低非医疗的能耗^[1]。我国日间手术中心也正在有序推进,《日间手术中心设施建设标准》已经颁布实施。

6 结语

手术一次又一次的技术革命,推动着手术室建设与发展,对数字化、网络化、智能化不断地提出了新的要求,促进了数字化、网络化、智能化赋能技术的发展。反之,数字化、网络化、智能化也为手术室建设注入了新动能,推动了手术室的创新与升级。手术室建设标准与规范依据着手术自身发展的需求而不断进行修订。在开放手术、微创手术与无创手术共存的时代,微创手术与无创手术不断地替代着开发手术,美国FGI适应发展趋势提出新思路、新措施,不仅给我们启迪,也值得我们深思。对其他国家(包括我国)的手术室分类及手术环境控制是一种冲击,也许会改变医院建设的原有体系。

像手术室一类工艺性空调节能,强调的是合规、合适、合理。首先节能措施应该符合该工艺的相关标准或规范,其次节能措施要适合所服务的工艺,在这两个前提下才能提出合理的节能措施。因此,手术室节能措施更应该密切关注手术技术与手术室建设的重大变革与发展。

近年来,医疗工艺与手术室方面涌现出不少新事物,如通仓手术改变了我们传统的手术实施方式^[7],日间手术改变了手术原有的医疗模式^{[8][9]},一般手术

无级别受控环境改变了我们的控制思路^[10],手术环境变风量变级别改变了手术室的传统运行方式^[11],恒压差变新风量配置增强了手术室抗疫能力而不单是节能^[12],等等。可见实施“非能源效率”的节能措施。比传统提高“能源效率”的节能途径更多,节能效果更大,更易取得多赢的局面^[6]。今后必将推出越来越多的新思维、新方式^[2]、新措施、新装备,使我国手术室建设顺应手术技术的发展。

如何借鉴2018版《指南》,如何基于我国国情、自主知识产权与丰硕的工程实践,修订我国医院建设标准与规范,这需要医疗、感控、工程界等相关领域广大技术人员大家参与,一起商讨,共同努力。愿本文能成为引玉的一砖。

参考文献

- [1] 刘燕敏,沈晋明.美国医院设计和建设新指南及主要修订内容[J].中国医院建筑与装备,2019(6):36-40
- [2] 许钟麟.GB50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》的特点与新思维[J].暖通空调,2015,45(4):1-7
- [3] 沈晋明,刘燕敏.日本HEAS-02-2013《医院设备设计指南(空调设备篇)》简介[J].暖通空调,2015,45(5):1-6
- [4] 沈晋明,许钟麟.德国标准DIN1946-4-2018解读[J].暖通空调,2020,50(4):40-46
- [5] World Health Organization. Global Guidelines for the Prevention of Surgical Site Infection. <https://www.who.int/infection-prevention/publications/ssi-prevention-guidelines/en/>
- [6] 刘燕敏,沈晋明.从非能源效率浅谈手术部节能[J].暖通空调,2020,50(1):64-68
- [7] 刘燕敏,李晓颖,杨咏梅等.通仓交融手术室的沿革与拓展[J].中国医院建筑与装备,2018(6):39-43
- [8] 沈晋明.建设医院日间手术中心(部)[J].中国卫生工程,2019,(6):28-30
- [9] 沈晋明,刘燕敏.“医疗办公大楼”——国外医院发展的新趋势[J].中国医院建筑与装备,2013(8):52-55.
- [10] 沈晋明,刘燕敏.无级别受控环境理念与应用[J].建筑环境与能源,2018,(10):365-369
- [11] 沈晋明,刘燕敏,俞卫刚.级别与风量可变洁净手术室的建造与应用[J].中国医院建筑与装备,2014(3):52-54
- [12] 沈晋明,刘燕敏.可实现“平战”转换的综合医院及通风空调设施设计[J].中国医院建筑与装备,2020(7):38-41

《日间手术中心设施建设标准》医疗环境控制思路与措施

沈晋明, 刘燕敏

(同济大学, 上海 200092)

[摘要] 《日间手术中心设施建设标准》结合日间手术中心的特点, 参照国外的相关标准以及总结我国多年来日间手术室实施的经验教训, 采用了一些新的科研成果, 有许多新的提法与新的措施, 本文就日间手术环境控制的暖通空调方面的编写思路、条文要求与实施措施做一简介。

[关键词] 日间手术室; 建设标准; 编制思路; 暖通空调; 实施措施

0 引言

日间手术 (Ambulatory Surgery) 是一种高效率、低成本、低能耗的手术模式, 能够提高医疗覆盖面, 使更多患者减少等待时间获得治疗。得到了国家层面上的支持, 日间手术中心的建设项目增长很快。近年来日间手术涉及的病种增多、手术量扩大、手术成本减少、感染率下降, 深受医患欢迎, 成为手术发展的方向之一。根据《中国医学装备协会团体标准规范制订、修订计划的通知》(医协装发〔2018〕78号)的要求, 开展《日间手术中心(部)设施建设标准》团体标准的编制工作, 项目编号为: T/CAME 061-2018。2019年3月31日成立了编写组, 2020年2月形成了征求意见稿, 2020年9月完成报审稿。于2020年11月7日以《日间手术中心设施建设标准》T/CAME 21-2020(以下简称《标准》)正式颁布。

本文重点阐述日间手术室的手术环境控制的暖通空调方面的编写思路、条文要求与实施措施。

1 日间手术室手术环境控制基点

日间手术不是门诊手术, 也不是住院择期手术。《标准》参照了中国日间手术合作联盟在第三届全国日间手术会议上的共识, 定义日间手术是“有计划, 可择期在24小时内完成入出院的手术或操作。”

近年来, 得益于微创手术技术、麻醉技术与康复技术的进步, 日间手术将原来需要住院完成的手术、在院时间缩短至24小时以内。涉及的病种越来越多, 从普外到较复杂的手术, 正逐步开展三级或四级的日间手术。日间手术重点开展的是成熟手术, 以微创手术为主, 而非追求实施复杂、高难度的前沿手术。因此, 日间手术对手术装备和手术环境要求不仅不能低于住院手术室, 甚至更高。而且相比住院手术, 术前评估流程更细致、就医流程更科学、术后随访系统更完善。也更需要专业水平高和临床经验丰富的手术医生和麻醉医生。

综上所述, 手术环境控制的三个基点分别为①日间手术环境控制要求不低于住院手术室; ②日间手术以微创手术为主; ③日间手术开展成熟而非复杂、高难度手术。《标准》对手术环境控制也是主要围绕着这三个基点。

2 日间手术环境的控制宗旨

《标准》的“暖通空调”章节的第一条(第6.1条)开门见山就阐明了手术环境控制的宗旨, 要求“净化空调系统应使医疗环境, 特别是手术环境能防止感染, 保护医疗器械并符合相关的职业健康与安全要求”。这是我国标准第一次采用了德国最新DIN1946-4-2018标准《医疗建筑与用房通风空调》中提出的医疗环境控制的三大任务: “防止感染, 医疗器械保护和相关职业健康和安全要求”^[1]。其他各国医院建设标准尚未同时提出这三项任务。

我国无论《综合医院建筑设计规范》GB51039-2014, 还是《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-2013对于医疗环境控制宗旨还仅仅局限于“保障医疗, 控制感染”, 服务的重点主要是患者。现在使用电外科越来越多, 手术过程中使用电刀切割组织、凝结组织、烧灼组织等, 均会释放出致癌风险的入肺超微粒子, 包括病毒, 细菌和活的肿瘤细胞。2010年法国、瑞士和德国同业工伤事故保险联合会首次警告“外科烟雾”的健康风险^[2], 并指出应在手术室中安装适当的、有效的室内通风设备。在围手术期间。医疗环境控制不仅仅保护病患, 也要同时保障医护人员的职业健康与安全。这点也体现在第6.12条“……经评估可以独立设置排除手术烟雾的排风装置或净化装置”。

日间手术中心分为三个区域: 综合服务区域、手术区域与病房区域。其中手术区域和病房区域是受控环境。为了保证医疗受控环境, 《标准》第6.8条要求: “净化空调系统应使相对独立设置的日间手术中心内的手术区域整体处于受控状态。对于附

设医院洁净手术部内的日间手术区域，应由医院洁净手术部统一考虑，符合现行国家标准《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333 的相关规定”。且根据日间手术室运营特点在第 6.13 提出：“I 级与 II 级洁净手术室应每间采用独立净化空调系统，III 级与 IV 级洁净手术室可 2 间合用一个系统”。而不是 III 级与 IV 级洁净手术室可 3 间合用一个系统。

3 日间手术中心（部）洁净用房主要技术指标

日间手术中心有洁净用房和非洁净用房，为了便于控制，《标准》第 6.9 条规定“日间手术中心的手术区域内洁净手术室及其配套的相邻辅房应和其他区域相应的净化空调系统宜分开；洁净区应和非洁净区相应的空调系统宜分开”。

对于非洁净用房在第 6.4 条明确规定“日间手术中心的各类非洁净用房技术指标应符合现行国家标准《综合医院建筑设计规范》GB51039 的相关规定”。但对于日间手术中心（部）洁净用房，表述在表 1 内。粗略一看表 1 的主要技术指标似乎与《医院洁净手术部建筑技术规范》50333-2013 一样，其实不然。

表 1 日间手术中心（部）洁净用房主要技术指标

名称	室内压力	最小换气次数 (h ⁻¹)	工作区平均风速 (m/s)	温度 (°C)	相对湿度 (%)	最小新风量 m ³ /h·m ² 或 h ⁻¹ (括号中数据)	最少术间自净时间 (min)
I 级特别洁净手术室	正	—	0.20~0.25	21~25	30~60	15	10
II 级标准洁净手术室	正	20	—	21~25	30~60	(4)	20
III 级一般洁净手术室	正	15	—	21~25	30~60	(3)	20
IV 级准洁净手术室	正	10	—	21~25	30~60	(2)	30

两者主要的不同之处如下：

1) 尽管洁净手术室分类还是 4 个级别，但每一级别手术室的名称与《医院洁净手术部建筑技术规范》50333-2013 不同，而是维持《医院洁净手术部建筑技术规范》50333-2002 版本的命名，是以 II 级为标准洁净手术室。

2) II 级 -IV 级的洁净手术室最小换气次数要比《医院洁净手术部建筑技术规范》50333-2013 要小。而且最小新风量标注方法不同，是以最小换气次数表示。标准手术室最小换气 20 次，一般手术室最小换气为 15 次，其中新风换气为总换气量的 20%。这是因为现在大多用静注麻醉了，排风量减少了。这基本上与国际大多数医院建设标准等同。2016 年世界卫生组织 (WHO) 颁布的《预防外科手术部位感染的全球指南》4.23 节中也认为通风系统应送入经

过滤的空气在手术室中提供需要的正压。每小时需要 20 次换气来稀释在手术室中产生的且排除由周围区域进入的微生物。^[3]

3) 如果使用气体麻醉，或者采用电外科等在手术过程中排除散发的有害气体，则需要根据污染气体发生量来加大手术室的新风量。

4) 由于表中标注的是手术室最小换气次数或最小新风量，在实际设计或使用时应增加 +10% 的冗余度。如果表中手术室最小换气次数或最小新风量增加 +10% 的冗余度，但不应超过 +20%。与《医院洁净手术部建筑技术规范》50333-2013 中规定的手术室最小换气次数或最小新风量差不多。无论美国 FGI 指南^[4] 还是德国 DIN1946-4 标准^[1] 都明确指出规定的最低要求值仅仅供政府职能部门与权威机构对医疗护理机构功能的认定基准，而非最佳设计值。实际采用的设计参数要高于规定的最低要求值^[4]。这冗余度的取值是采用德国最新 DIN1946-4-2018 标准^[1]。

5) 对于专科医院等日间手术室可能会有特殊要求，在《标准》第 6.3.5 条中还建议：“换气次数和新风量除应符合表 6.1 的要求外，还应满足压差、补偿排风、空调负荷及特殊使用条件等要求”。

4 日间手术部洁净手术室级别的选用

如上所述，《标准》将 II 级洁净手术室作为标准手术室，这就是说以后建造日间手术中心设计选用要以 II 级标准洁净手术室为主，辅以少量的 III 级一般洁净手术室。这符合《医院洁净手术部建筑技术规范》的原意。当前我国建造日间手术中心多是 I 级和 III 级洁净手术室为主体，很不理解。这与工程公司在营销中大力推销 I 级洁净手术室莫无关系。在《标准》第 6.11 明确规定：“日间手术中心非特殊需求不建议选用 I 级洁净手术室及其相应辅房”。不建议选用 I 级洁净手术室，但在《标准》中还保留 I 级洁净手术室，万一有特殊需要。即使对于一些微创手术，如可衡量的风险很高，需要随时转换为开放手术，这要求在 I 级洁净手术室内进行^[5]。这和编写《医院洁净手术部建筑技术规范》的原则是一致的。不否定 I 级洁净手术室对手术环境的控制作用，但也不提倡泛用。

尽管日间手术以微创手术为主，但是不能因为微创手术只有匙孔，环境控制掉以轻心。微创手术也带来了新的感染风险，如微创器材污染。近年有研究表明，腹腔镜手术中，患者皮下氧分压显著低于开放手术，切口感染率较高。微创手术器材十分精密，如腔镜、切割吻合器与腔镜组件的完善消毒以及在手术过程中维持无菌状态，甚至腔镜因温差

而起雾等等都是感染控制的新课题^[5]。值得关注的是美国 2018 版 FGI《指南》^[4]与德国 DIN1949-4-2018 标准类似对手术无菌包的打开与器械桌提出了一定的条件与要求^[1]。这就是《标准》要将“保护医疗器械”作为医疗环境控制的三大任务之一。

5 坚持医疗环境控制的三大措施

编写《综合医院建筑设计规范》GB51039-2014 时提出的医疗环境控制的三项基本原则：合规的换气、合理的上送下回的气流组织与合适的回风过滤器。在疫情中被推广应用到公共场所，显示出对防控疫情的独特作用。这也是日间手术中心医疗环境控制的最基本的三项原则。

1) 日间手术中心各类用房的换气与新风量应符合《综合医院建筑设计规范》与《医院洁净手术部建筑技术规范》相应用房的标准。即使一般用房在《综合医院建筑设计规范》GB51039-2014 的第 7.1.13 规定“医疗用房的集中空调系统的新风量每人不应低于 40m³/h，或新风量不应小于 2 次/h。对人员多的场所，新风量宜能调节”，高于普通的公共场所。

2) 至于气流组织，上送下回的气流分布对于医疗环境有特殊意义。无论对患者呼出的飞沫还是污染物散发的气体，一旦出现应尽快就地沉降阻断传播。上送下回气流就是使污染就地沉降、减少暴露的最有效措施。在《标准》第 6.5 条要求“日间手术中心内的手术区域内用房应采用净化空调系统与上送下回气流组织；其它区域用房可采用普通集中空调系统，送风口无需设置空气过滤器，可采用上送上回气流组织”。这就是说，手术区域内所有用房应采用净化空调系统与上送下回气流组织，这要求略高于《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-2013 的相关规定。我们认为相比洁净手术部日间手术区域换台手术量多，人流物流量大，值得这样做。

3) 无论洁净用房还是一般医疗科室应重视回风过滤除菌，不让室内可能出现的微生物进入空调系统。在《标准》第 6.6 条坚持：“日间手术中心的净化空调系统和普通集中空调系统各级空气过滤器的级别与设置应符合现行国家标准《综合医院建筑设计规范》GB51039-2014 与《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-2013 的相关规定……”。另外，只要空气过滤器不受潮，过滤器是不会滋菌的。所以《标准》强调“在运行过程不应使空气过滤器受潮”。医用空气处理机组将中效空气过滤器设置在热湿处理装置前，并处于正压段，从措施上防止了空气过滤器受潮。另外新风过滤器也是特别容易受潮，尤其许多工程公司直接将新风过滤器设置新风口。《标准》要求“……新风过滤器设置在不临近新风进风

口防雨格栅的新风进风管内……”或设置在空调机组内。

6 日间手术中心医疗用房对空气净化装置与空气净化器采用开放的态度

近年来空气净化装置与空气净化器发展很快，采用的净化技术有所进步，《标准》对各类空气净化装置与空气净化器在医疗用房使用采取开放的态度。《标准》在第 6.7 条很明确规定：“净化空调系统和普通集中空调系统中各级空气过滤器或空气净化装置应符合现行国家标准《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-2013 的相关规定。在整个使用寿命周期内的净化、过滤效率不应低于其设计效率”。理解这条文的涵义需要了解以下几点：

1) 空气净化装置与空气净化器主要用于普通的民用建筑，改善室内空气质量，无风险，不是用于受控环境。其设计、制造与检测遵循《空气净化器》GBT 18801-2015，无可非议。不同领域采用不同标准，不能跨界采用。如用于高风险的医疗受控环境，如洁净手术室、无菌病房、隔离病房等，无论是安装在净化空调系统里，还是设置在室内那就必须按照相关的医疗环境控制标准或规范。同样也是无可非议。不能将《空气净化器》的控制理念、检测方法、效果评价等直接套用到医院关键科室环境控制，这会造成医疗环境失控，后果不堪设想。所以《标准》要求空气净化装置应符合现行国家标准《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-2013 的相关规定。只要符合相关规定的，空气净化装置与空气净化器完全可以用于医疗场所。

2) 在空气净化器常使用超细聚丙烯纤维滤料（简称 PP 滤料）制作的所谓高效过滤器，其提供的过滤效率是按《空气净化器》GB18801 要求的在试验仓内多次循环的净化效率测试值，效率值会很高。并用 CADR 表示其净化能力，且允许在使用寿命周期内衰减、降低。如果要用在高风险的医疗环境控制，无论安装在系统还是设置在室内采用末端过滤器设计效率必须采用其整个使用寿命周期内的最低效率，才能保证其在任何运行状况下不低于该效率，且必须保证净化能力不能降低，这样才能保障受控的医疗环境不失控。为此，空气过滤器在检测前先根据 ISO 16890-4 要求用 IPA 试液对过滤器或过滤单元进行消除静电处理。然后用最容易穿透粒径 MPPS (0.1-0.25 微米之间) 试验尘测试过滤器或过滤单元的一次通过效率。国标《空气过滤器》GB/T14295-2019 对一般通风用的空气过滤器也要求去静电后的过滤效率^[6]。只有这样检测才是空气过滤器的最低效率。PP 滤料的空气过滤器能做到低阻高效

主要靠静电效应。如过滤器自身受潮，或室内空气湿度偏高，过滤器的效率下降很快，这样受控的医疗环境内菌尘浓度升高，感染风险增加，甚至危及生命，这样的例子在医疗场所不少见。

3) 现在问题涉及到各种新型的电空气净化装置，新技术层出不穷，要在医疗环境中使用除了给设计方或院方提供电净化装置的最低净化效率外，还必须符合 GB 50333《医院洁净手术部建筑技术规范》第 8.3.5 条规定：“非阻隔式空气净化装置不得作为末级净化设施，末级净化设施不得产生有害气体和物质，不得产生电磁干扰，不得有促使微生物变异的作用”。以避免对医疗环境产生负面影响。

4) 在医疗场所室内设置的空气净化器在医疗机构相关的建设标准或规范中称为自循环装置（或设备），也有相应的要求。空气净化器要用于医疗环境也得满足这些要求。尤其要关注这些空气净化器在室内的设置，使其送风气流是增强室内的净化效果，而不要扰乱原来室内空气组织。

7 鼓励在日间手术室采用创新技术

近年来，不仅数字化、网络化、智能化赋能技术为手术室发展注入了新动能，而且手术室自身设施的新技术也发展很快。《标准》第 6.12 条提出：“I 级~III 级洁净手术室可以采用辐射板壁或其他措施，保证在手术进行过程中，净化空调系统的送风温度应在不高于室温状况下运行。也可采用同时满足手术人员、患者与麻醉师舒适性要求的其他送风方式。经评估可以独立设置排除手术烟雾的排风装置或净化装置”。在第 6.14 条又提出：“日间手术中心在通过经济和技术比较，可采用全年变新风量节能运行，或可采用全年按需变新风量运行，或可采用全新风直流系统运行。经评估手术室内可不设置独立排风。空调系统可以采用无交叉污染的热回收系统”。《标准》为了鼓励创新，这里有以下几层意思：

1) I 级~III 级洁净手术室的送风量不大，送风速度很低。要求送风气流不高于室温，还需要利用送风气流与室内温度差，以保证送风气流笼罩手术区，提高手术环境控制质量。有的还采用等温送风。要使送风气流不高于室温，尤其是在冬季，需要采用辐射板壁或其他措施消除室内热负荷。冬季实施热辐射板壁消除热负荷较为成功。既然手术室设置了辐射板壁希望在夏季也能得到充分利用，但有一些技术难点。近来手术室利用冷辐射也有发展趋势，形式较多，冷媒除了水，还有空气^[7]，各有千秋。也有采用周边区送风消除热（冷）负荷^[7]。《标准》鼓励这些创新。

2) 手术室内手术人员、麻醉师和患者处于不同

的状态，要同时保证手术人员、麻醉师和患者体感舒适这一直是个老、大、难的问题。手术人员工作强度大，过去手术环境控制满足以手术人员为主的合适工作环境，保障医疗，降低感染。而麻醉师和患者会感到冷，甚至患者出现低温症。过去麻醉师只能多穿一些，而患者不得不采用保温措施。《标准》第 6.12 条这样的表述鼓励研发能同时满足手术人员、患者与麻醉师舒适性要求的其他送风方式与送风装置^[7]。

3) 日间手术室相比住院手术室换台手术量要大得多，手术烟雾容易在手术室内积累，有害于医患，《标准》鼓励开发简便有效的排除手术烟雾的排风装置与排除手术烟雾的自净化装置这两种装置。

4) 同样因为日间手术区域换台手术量多，人流物流量大，需要更多新风改善室内空气质量。《标准》鼓励在通过经济和技术比较，可采用全年变新风量节能运行，或可采用全年按需变新风量运行。也可采用全新风直流系统运行，系统采用无交叉污染的热回收系统。这种系统在美国西海岸用得较多。如果手术室以静注麻醉为主，或全新风运行等，可以经评估手术室内可以不设置独立排风。变新风量运行关键因素要使手术室以及手术区域压差恒定不变，现在也有这样的产品，简化了日间手术室的设计与运行^[8]。

8 规范在手术区域内使用的带热湿处理功能的净化送风末端装置

《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-2013 允许 IV 级洁净手术室以及 III、IV 级洁净用房，可采用带热湿处理功能的净化送风末端装置，这是简化系统的一种方法。最常见的末端装置就是风机盘管机组。但末端装置的送回水管以及凝水管穿越手术室或手术区域常常会造成水损，不仅破坏内装修、损坏室内装备，而且受潮、积水会造成微生物滋生、使受控的环境失控。特别要引起我们重视。这次特意将“水损”作为《标准》的术语，这是引用日本《医院设备指南（空调设备篇）》HEAS-02-2013^[9]。为此，《标准》第 6.15 条更为具体要求“日间手术中心的 IV 级洁净手术室以及 III、IV 级洁净用房，可采用带热湿处理功能的净化送风末端装置。送风末端装置的送风气流不应扰乱室内气流组织，配置的相应水管不应安装或穿越室内，其送风口应设置高中效及更高过滤效率的空气过滤器，回风口空气过滤器的设置应符合现行国家标准《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333 的相关规定”。这就是说，像风机盘管机组这一类末端装置是有要求的，不是市售的普通型机组，所幸的市场上已有不

同类型的医用的产品。

9 结语

日间手术是有计划,可择期在 24 小时内完成入出院的手术或操作,代表着手术发展方向。《标准》的颁布势必极大地推动着日间手术中心的发展,规范了日间手术中心的建设。《标准》编写结合日间手术中心的特点,参照国外的相关标准以及总结我国多年来日间手术室实施的经验教训,采用了一些新的科研成果,有许多新的提法与新的措施,本文对手术环境控制的暖通空调方面的编写思路、条文要求与实施措施的介绍,能有利于对《标准》理解,推动日间手术中心的建设。

参考文献

- [1] 沈晋明,许钟麟.德国标准 DIN1946-4-2018 解读[J].暖通空调,2020,50(4):40-46
- [2] Technische Regeln für Gefahrstoffe. TRGS 525:Gefahrstoffe in Einrichtungen der medizinischen Versorgung[S]. https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-525.pdf?__blob=publicationFile
- [3] World Health Organization. Global Guidelines for the Prevention of Surgical Site Infection.<https://www.who.int/infection-prevention/publications/ssi-prevention-guidelines/en/>
- [4] 刘燕敏,沈晋明.美国医院设计和建设新指南及主要修订内容[J].中国医院建筑与装备,2019(6):36-40
- [5] 沈晋明,许钟麟,刘燕敏.手术室控制新思路、新方法与新要求[J].中国医院建筑与装备,<http://www.chinaacac.cn/chinaacac2/news/?932.html>
- [6] 国家市场监督管理总局中国国家标准化管理委员会.GB/T14295-2019《空气过滤器》[S].中国计划出版社,2019
- [7] 刘燕敏,刘先荣.一种新型的洁净手术室控制——控温送风系统[J].中国医院建筑与装备,2020(4)
- [8] 刘燕敏,何焰,陈尹等.复合手术室的环境控制探讨[J].中国医院建筑与装备,2020(2):94-98
- [9] 沈晋明,刘燕敏.日本 HEAS-02-2013《医院设备设计指南(空调设备篇)》简介[J].暖通空调,2015,45(5):1-6

室内组合式血液病房层流治疗舱的研发

张润¹, 张燕¹, 陈玲¹, 周乐¹, 刘燕敏², 沈晋明²

(1. 美埃(中国)环境科技股份有限公司, 南京 211111; 2. 同济大学, 上海 200092)

[摘要] 随着造血干细胞移植治疗日趋成熟, 血液病房需求量增大。借鉴最新的日美与我国相关标准中对血液病房的要求、性能参数与设施进行分析比较, 针对我国病房大楼层高不高, 没有技术夹层。认为室内组合式层流治疗舱成为最佳应用方式之一。考虑到血液病房送风量大, 局部层流气流要求高, 噪声水平低。针对性地研发了相应的产品, 并通过了检测与在样板房现场的考核与验证。

[关键词] 造血干细胞移植治疗; 血液病房; 层流治疗舱; 研发; 检测与验证

0 引言

造血干细胞移植 (hematopoietic stem cell transplant recipients HSCT) 是目前治疗恶性血液疾病、非恶性疾病和非血液系统疾病, 如难治的重症联合免疫缺陷疾病和实体瘤等的一种较为成熟的方法。

现在常用“造血干细胞移植受者”替代“骨髓移植受者 (Blood and Marrow Transplantation recipients BMT)”, 造血干细胞移植能更准确地描述了当前移植技术状态, 因为收集的供体细胞不仅取自骨髓还涉及到外周血或脐带血。

患者在进行造血干细胞移植治疗时, 需在造血和免疫功能重建之前, 用大剂量化放疗, 几乎摧毁了患者的造血功能和免疫防御系统, 全血细胞缺乏而处于严重免疫缺乏状态, 病人处于骨髓衰竭, 极易发生各种感染及其他并发症。造血干细胞移植中各种病原菌感染是最常见的并发症, 也是造血干细胞移植死亡的主要原因之一。鉴于在治疗这一过程的特殊性, 必须对在专用病房内患者实施全方位、全过程的无菌、无尘的保护性隔离, 以能安全、平稳度过这一治疗期。这专用的必备的病房被称为防护性隔离病房, 易感染患者病房或血液病房。

随着造血干细胞移植治疗日趋成熟, 成功率提高, 越来越多的血液病患者期望能通过造血干细胞移植治愈疾病, 收治入院量增长, 防护性隔离病房已经不能满足需求, 各地都在改建、扩建造血干细胞移植病房。

1 国内外对防护性隔离病房的要求

目前防护性隔离病房设施系统的设计与建造并不相同, 随着治疗手段不断进步对病房的要求也有所改变。期望通过对最新的日美与我国相关标准中对造血干细胞移植患者病房的要求、性能参数与设施的分析比较, 提出研发防护性隔离病房的工作重点与研发的关键点。

1.1 日本《医院设备设计指南(空调设备篇)》

HEAS-02-2013

对易感染患者用病房总体要求应达到清洁度最高的 I 级。单独设置空调、24 小时运行、室内维持正压。

具体要求

(1) 造血干细胞移植患者等易感染患者用病房中, 由于再循环风机的发热量大, 冬季也需要冷热源, 要求 24 小时运行, 应有对策。为了确保室内维持正压, 加压用的一次风和病房循环系统分开等, 也要考虑到异常状态。另外, 为了防止送风排风量的变动, 可以设置定风量装置等。

(2) 为了防止因压力变动而造成的低清净度空气流入, 必须设置前室, 在出入口设置自动关闭装置。

(3) 室内空气的流动必须保持单向性, 使其从病房的一侧送出洁净空气, 经越患者从另一侧的回风口吸入。病房密闭时为正压, 换气次数不低于 15 次/h (其中新风 5 次/h)。

(4) 在病房内要易清除污, 内部装修, 窗、门应考虑采用密闭结构。

(5) 关注易受感染患者病房、前室、卫生间与室外之间的定向流动。

(6) 卫生间与病房合在一起比分开设置气流流向更佳, 室内环境更易控制。

1.2 美国供暖、制冷与空调工程师学会 ASHRAE 标准 170-2021《医疗护理机构通风》

将收治造血干细胞移植患者病房称为防护环境病房 (protective environment room)

在该标准第 7.2.2 防护环境 (PE) 室中, 要求防护环境病房的通风应满足以下要求:

A. 房间围护应密封, 以提供围护两侧 0.01 英寸水柱 (2.5 Pa) 的最小压差。

B. 每个防护环境病房应符合表 6-2 和 7-1 的要求。当需要收治防护环境的患者时, 防护环境病房应具有永久安装的装置和/或机制, 以持续监测房间和走廊之间的气压差, 无论是否有前室。应提供

局部视觉装置，以指示何时未保持正压。

C. 防护环境病房内的空气分布模式应符合以下要求：

① 送风风口应位于病床上方，除非可以证明该位置不可行。风口设计应限制病床的空气流速，以减少患者的不适感（资料性说明：见附录 E 中的 ASHRAE[2017a]）。

② 回风 / 排风风口应位于病房门附近。

③ 高效空气过滤器应位于送风末端装置中。
7.2.2 (c) 的例外情况：对于服务于一间以上防护环境病房的共用空调系统，如果系统超过 75% 的风量服务于防护环境病房，HEPA 过滤器可位于空气处理装置 (AHU) 中所有冷却和加热设备的下游。

D. 防护环境病房与非防护环境病房相邻空间之间的压差应至少为 +0.01 英寸水柱 (+2.5 Pa)。与防护环境病房直接相关并直接通向防护环境病房的卫生间和前室 (如有) 等空间无需设计为与防护环境病房的最小压差，但仍需保持表 7-1 中规定的相邻区域的压力关系。

E. 如果空气首先通过 HEPA 过滤器，且病房符合第 7.2.2 (a) 节至第 7.2.2 (d) 节的要求，则从标准病房改装的防护环境病房可使用再循环空气进行通风。

F. 当设置前室时，压力关系应如下所示：

① 防护环境病房相对于前室应处于正压。

② 前室相对于走廊应处于正压力。

1.3 我国 GB51039-2014《综合医院建筑设计规范》

该规范将造血干细胞移植患者病房定义为血液病房。该规范中第 5.5.16 规定：血液病房用房设置应符合下列要求：

1 血液病房可设于内科护理单元内，亦可自成一区。可根据需要设置洁净病房，洁净病房应自成一区。

2 洁净病区应设准备、患者浴室和卫生间、护士室、洗涤消毒用房、净化设备机房。

3 入口处应设包括换鞋、更衣、卫生间和淋浴的医护人员卫生通过通道。

4 患者浴室和卫生间可单独设置，并应同时设有淋浴器和浴盆。

5 洁净病房应仅供一位患者使用，洁净标准应符合本规范第 7.5.4 条规定，并应在入口处设第二次换鞋、更衣。

6 洁净病房应设观察窗，并应设置家属探视窗及对讲设备。

第 7.5.4 要求：血液病房应满足以下要求：

1 治疗期血液病房应选用 I 级洁净用房，恢复

期血液病房宜选用不低于 II 级洁净用房。应采用上送下回的气流组织方式。I 级病房应在包括病床在内的患者活动区域上方设置垂直单向流，其送风口面积不应小于 6m^2 ，并应采用两侧下回风的气流组织。如采用水平单向流，患者活动区应布置在气流上游，床头应在送风侧。

2 各病房的净化空调系统应采用独立的双风机并联，互为备用，24h 运行。

3 送风应采用调速装置，应至少设两档风速。患者活动或进行治疗时，工作区截面风速不应低于 0.20m/s ，患者休息时不应低于 0.12m/s 。室内温度冬季不宜低于 22°C ，相对湿度不宜低于 45%。夏季不宜高于 27°C ，相对湿度不宜高于 60%。噪声应小于 45dB(A) 。

4 与相邻并相通房间应保持 5Pa 的正压。

1.4《医院洁净护理与隔离单元技术标准》

该标准即将颁布，将造血干细胞移植患者病房归类于易感染患者用病房中的血液病房，相关条文阐述较为详细，具体表述如下：

4.3.2 易感染患者病房应设缓冲间，可兼作治疗前室，可两间共用缓冲间。内走廊与缓冲间 (或病房) 之间应有传递窗。缓冲间与病房隔墙上应留有可通过输液管的小孔洞并应有遮挡措施。

4.3.3 易感染患者病房宜设置含有洗手、淋浴设施的室内卫生间。

4.3.4 易感染患者病房应设探视走廊和对讲设备。

4.3.5 易感染患者病房内废弃物品均应在室内封包，有探视走廊的应从室内与探视走廊间的传递窗递出。

4.3.6 易感染患者病房面积、床间距等应符合下列要求：

1 单人间每床单元使用面积不宜小于 10m^2 ，多人间不宜超过 3 人，床间距不宜小于 1.2m 。

2 当专设儿童血液病房时，使用面积不宜小于 6m^2 ，宜设相邻的家属陪住间，与病房的隔断宜采用透明材料。

3 当专设血液病房时，宜有饮食的消毒设备，并在病房与缓冲间墙壁上设两门联锁的传递餐饮和物件的传递窗。

4 当专设烧伤病房时，单人间每床单元使用面积不宜小于 15m^2 ，多人间不宜超过 3 人，床间距不应小于 1.2m ，建筑设计宜便于烧伤治疗机、治疗床、治疗舱的设置。

4.3.7 易感染患者病房面向护士站的隔墙上半截宜采用透明材料。

表1 易感染患者病房防控区的净化空调设计参数

分区	房间名称	用房级别	与室外方向相邻相通区域的静压差	最小换气次数(次/h)			室内温度(°C)		室内相对湿度(%)		室内噪声dB(A)
				新风	送风	排风	冬	夏	冬	夏	
防控区	易感染患者病房缓冲间	II	+	2	30	/	宜高于病房	宜高于病房	/	/	≤50
	单人血液病房	I	+	3	按风速	/	24	26	40	55	≤45
	多人血液病房	II	+	3	18	/	24	26	40	55	≤45
	血液病房内卫生间	II	-(病房向卫生间定向气流)	/	18	3	/	/	/	/	≤45

6.3.1 易感染患者病房及有关辅助用房净化空调设计参数等要求应符合本标准表 6.3.1 (见表 1) 的规定。

6.3.2 当专设血液病房时, 单人血液病房应设置净化空调系统, 并符合下列要求:

1. 应为一对一自循环系统。
2. 在病床上方集中送风, 送风面距地面不宜小于 2.5 m, 除靠墙外, 送风面每边比床边应外延 0.4 m。
3. 如采用水平送风, 头部送风面上边应距床面不小于 1.4 m, 送风面侧边应比床侧边宽出 0.4 m, 头部应有防吹风措施。
4. 集中送风应具备调速措施, 应至少设白天和夜间两档风速。可采用独立的双风机并联等措施, 互为连锁备用。
5. 白天送风速度宜为 0.25 m/s~0.3 m/s, 夜间不宜大于 0.15 m/s。送热风时, 可适当提高送风速度。
6. 回风口宜布置在平行于病床侧边的两侧墙面或病床不靠墙一侧的墙面下方, 尽量满布。

6.3.3 当专设血液病房时, 若不具备设置集中净化空调系统的条件或不便在床上方设置集中送风面时, 治疗期血液病患者也可采用层流治疗舱(不含冷热盘管), 舱内应达到温湿度要求和 I 级用房标准。

6.3.4 当专设血液病房时, 病房卫生间应采用上送风下排风。

6.3.7 病房集中送风面的高效过滤器装置, 宜满足不在室内更换过滤器的要求, 采用阻漏层送风末端。当只能采用室内换过滤器方式时, 高效过滤器应满布送风面, 不得采用侧布方式, 并应执行本标准第 8.3.6 条关于更换过滤器后进行现场检漏、消毒的规定。

以上 4 种标准血液病房的设计要求大同小异。经分析比较决定还是以我国 GB51039-2014《综合医院建筑设计规范》为依据研发血液病房。

2 建设血液病房的痛点及其对策

如今综合医院设置的血液病房较多, 往往形成一个病区。过去病房楼一般层高 3.6m。现在高层病房大楼可能做到 3.9m 甚至 4.2m。但没有技术夹层。

血液病房送风量大, 噪声要求高。如果采用全空气空调系统, 空气处理机组断面大, 需要布置低速大风管, 有的还将新风集中处理, 又要设置新风管路(见图 1)。但建筑条件往往难以满足这些对空间的要求, 有的不得不将病房楼一层作为机房, 浪费了许多有用空间。成为医院建设血液病房的一个痛点。

考虑到血液病房只有一位患者, 静躺、静坐与慢走, 活动量不大。室内控制温度 22-26°C, 湿度 45-55%, 相对来说温湿度控制范围较宽。或者说, 室内的热湿负荷不大, 相对稳定。要求新风换气次

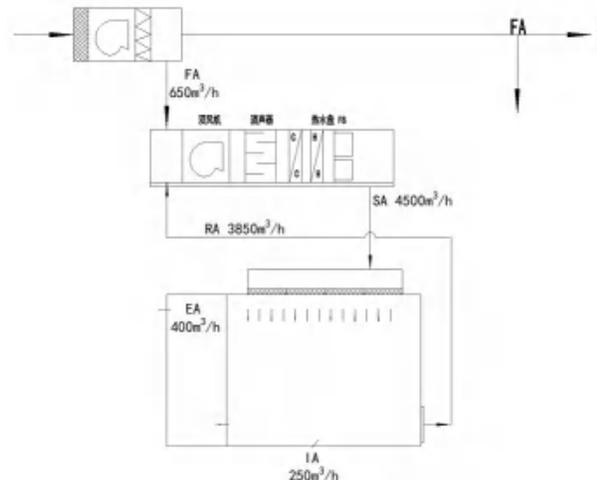


图1 采用传统的血液病房的净化空调系统

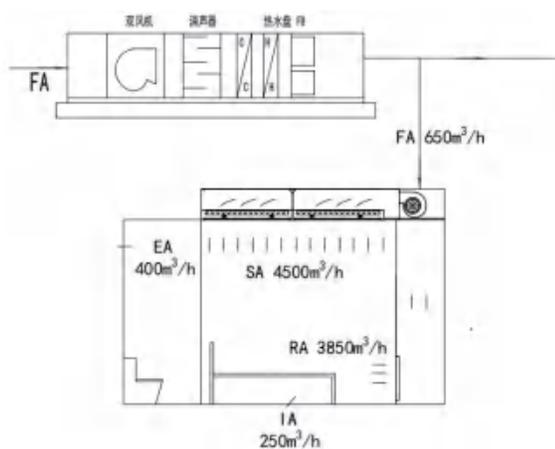


图2 采用层流舱的净化空调系统

数不小于 $3h^{-1}$ 。如果让集中热湿处理的新风承担室内全部热湿负荷，室内自循环送风完成室内换气次数与送风速度，这个系统将空调功能与净化功能解耦了（见图2），运行调节也十分简便。图中借鉴某医院血液病部净化空调系统的设计参数仅用于对比说明。

《医院洁净护理与隔离单元技术标准》也允许“当不具备设置集中净化空调系统或不便在床上方设置集中送风面时，治疗期血液病患者也可采用层流治疗舱”。层流治疗舱可以是水平层流（见图3），也可以是垂直层流（见图4）。

对于目前国内大多医院病房楼的建筑结构，在室内安装层流舱可能是较为合适的方案。

这样，在整个血液病房区域只需设置集中设置一套专用新风处理机组，承担全部热湿负荷，并维持整个病区内的正压分布。各血液病房内设置一套层流舱自循环装置，可以内置加热盘管或电加热器，承担室内温度调节。新风系统可沿走廊设置，分别进入各室的层流舱自循环装置，自室内有独立的排风（如厕所排风），靠维持新排风的风量差值稳定室内外的压差。层流舱循环装置送风流经患者以保持舱内无菌无尘的受控环境。两套系统的组合既可使每间血液病房的空调、净化与正压功能分离，又能将整个病区联系在一起，并始终使整个病区处于受控状态。使得病区的管理更为灵活、方便、有效。由于血液病房内卫生间要求维持Ⅱ级洁净度状态，必须对卫生间进行送风，要求18次换气（见表1），为维持对病房的相对负压，必须加大卫生间的排风量，一送一排十分耗能。日本医院将卫生间直接设置在病房内是一个较佳的对策（图3、4）。

3 研发任务确定与研发的关键点

综上所述，层流舱是建设血液病房的最佳对策之一。对于层高3.4m血液病房宜开发水平层流舱自循环装置，对于层高3.9m以上血液病房宜开发垂直层流舱自循环装置。并且层流舱送风装置是可以分段运输，在室内现场可装配组合，十分简便。

垂直层流的层流舱自循环装置（见图5）分为两个箱体，采用独立的双风机并联，可以单独开启，互相切换，互为备用，维持24h运行。送风箱体的送风口面积不应小于 $6m^2$ ，取3m（长）*2m（宽）。风机箱体高度为2.5m。气流组织采用上送风下侧回风。由于层流舱内净长度不大于3m，可以单侧回风。要求患者活动或进行治疗时，工作区截面风速不应低于 $0.20m/s$ ，患者休息时不应低于 $0.12m/s$ 。噪声应不大于 $45dB(A)$ 。

血液病房的层流舱自循环装置看似难度不大，

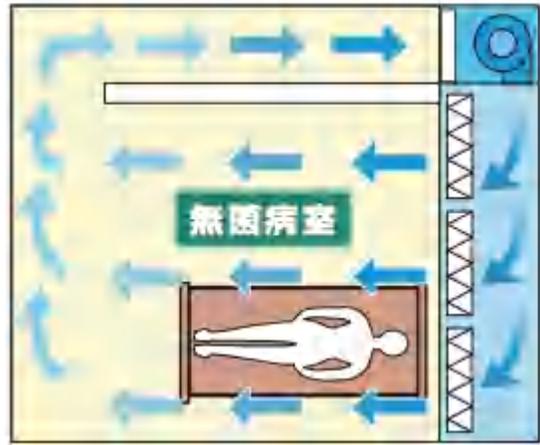
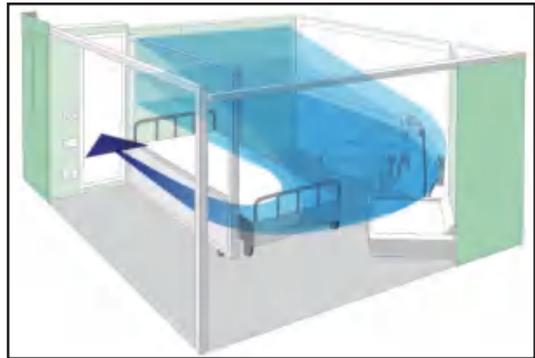


图3 水平层流舱及其布置

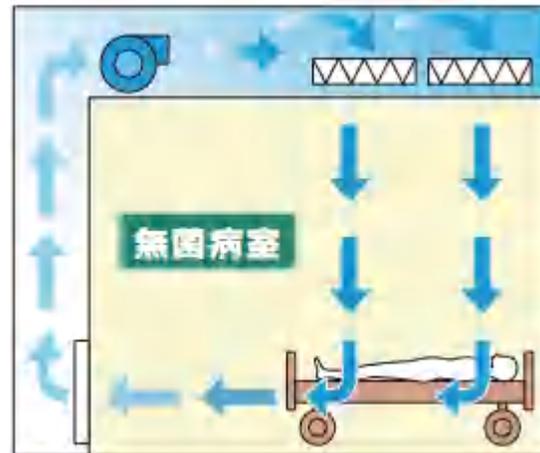
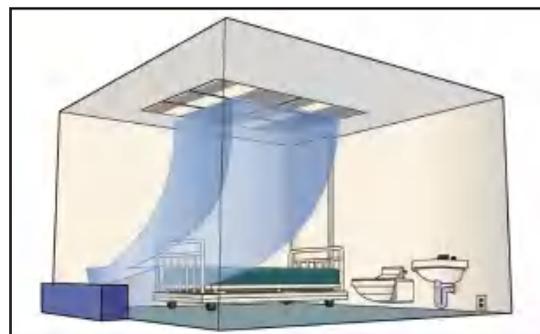


图4 垂直层流舱及其布置

但要解决层流舱的有限空间内大流量经高阻力的高效过滤器自循环的送风气流性能与噪声这两大问题实属不易。或者说是我们研发的关键点。本文以开发的垂直层流舱为例进行阐述。垂直层流舱设置方式见图5，产品开发的性能指标见表2。

3 关键技术研发与检测验证

由上可知层流舱的送风气流性能与噪声是机组开发的两大问题，机组结构是关键技术。

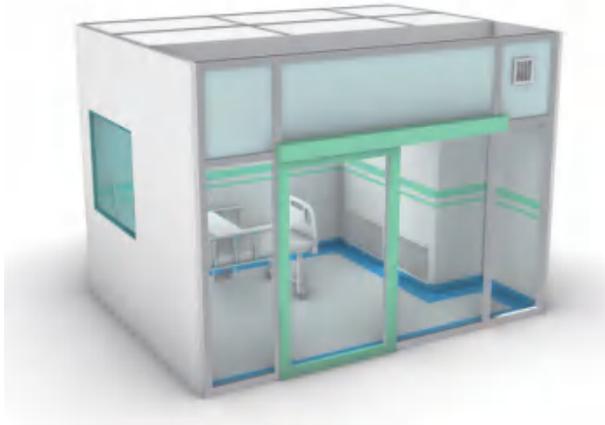


图5 垂直层流舱在室内设置方式

表2 垂直层流舱开发要求

设计性能指标	垂直层流
风量 (CMH)	3240 ~ 6480
噪声 (dB(A))	42(夜)/45(白)
风速 (m/s)	0.12 ~ 0.15(夜)/0.25 ~ 0.30(白)
风速均匀性	< 24%
送风单元 (m)	2×3×0.5
房间 (m)	4×3×3
洁净等级	ISO 5

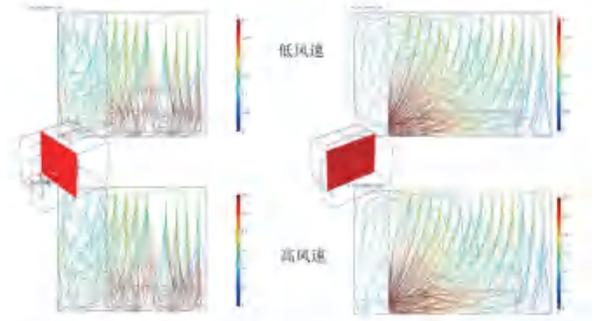


图6 垂直层流舱的送回风气流仿真

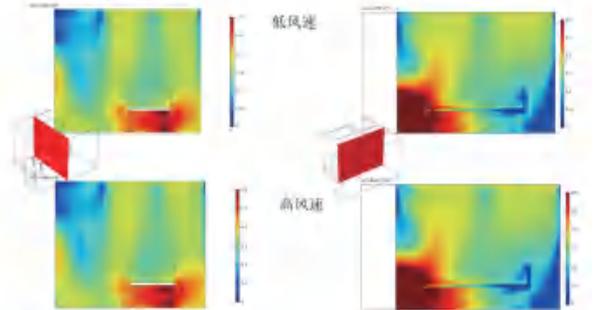


图7 垂直层流舱的送回风速度场仿真

为了加快开发进程，在高风速（0.25m/s）和低风速（0.15m/s）两个运行工况下，通过仿真对层流舱的结构、送回风口设置等进行调整与优化，为产品样机提供最佳的设计参数。

垂直层流舱的送回风气流仿真见图6，左侧图是横截面的气流剖面，右侧图是纵截面的气流剖面。可见洁净的送风气流能充满患者整个活动区域，没有出现涡流区，可以有效保护患者免除菌尘的污染。

垂直层流舱的送回风速度场仿真见图7，左侧图是速度场的横截剖面，右侧图是速度场纵截剖面。整个患者活动区域气流速度合适，床头处风速略低，

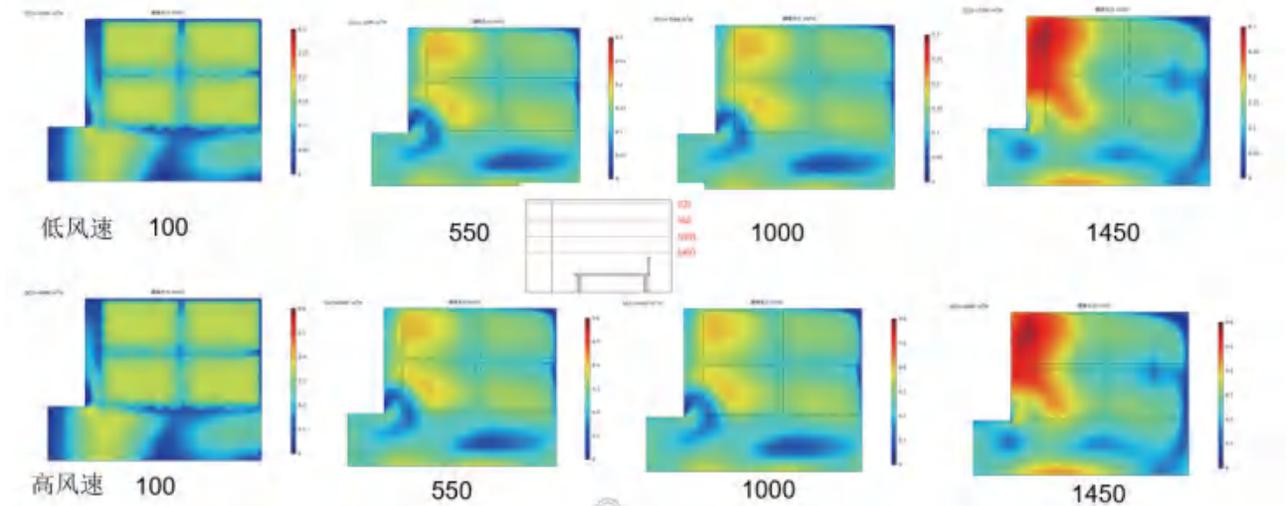


图8 垂直层流舱不同高度速度场的仿真

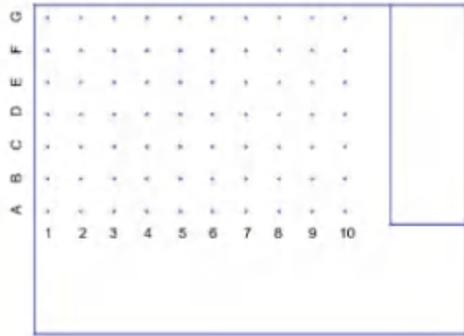


图9 测试点分布

最大值0.25m/s以上										
		单位风速 (m/s)						平均风速 (m/s)	噪声 dB(A)	噪声限值 dB(A)
		A	B	C	D	E	F	G		
白天	1	0.25	0.24	0.24	0.26	0.25	0.25	0.24		
	2	0.25	0.24	0.24	0.26	0.25	0.25	0.28		
	3	0.24	0.24	0.24	0.27	0.26	0.25	0.24		
	4	0.25	0.24	0.25	0.24	0.26	0.26	0.28		
	5	0.25	0.25	0.25	0.27	0.25	0.25	0.27	0.255	4.6%
	6	0.24	0.25	0.24	0.27	0.27	0.27	0.27		
	7	0.26	0.24	0.25	0.27	0.27	0.27	0.27		
	8	0.25	0.24	0.24	0.27	0.26	0.27	0.28		
	9	0.25	0.25	0.25	0.28	0.28	0.26	0.28		
	10	0.26	0.24	0.26	0.25	0.26	0.26	0.27		
满足要求										

最大值0.15m/s以上										
		单位风速 (m/s)						平均风速 (m/s)	噪声 dB(A)	噪声限值 dB(A)
		A	B	C	D	E	F	G		
晚上	1	0.16	0.15	0.15	0.17	0.16	0.16	0.16		
	2	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17		
	3	0.16	0.14	0.15	0.17	0.16	0.16	0.16		
	4	0.15	0.14	0.15	0.17	0.16	0.15	0.18		
	5	0.15	0.15	0.15	0.17	0.16	0.16	0.15	0.158	7.64%
	6	0.16	0.15	0.14	0.17	0.17	0.16	0.19		
	7	0.15	0.15	0.15	0.18	0.16	0.16	0.19		
	8	0.15	0.14	0.16	0.19	0.16	0.16	0.19		
	9	0.15	0.15	0.16	0.16	0.15	0.16	0.18		
	10	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.18		
满足要求										

图10 白天(上)与晚上(下)两档风速下的噪声测试数据

测试距离0.5m, 距轴高度0.8m, 均布8点测试, 28.3L/min, 计数30s, 采样值								
测试点	A	B	C	D	E	F	G	H
0.25m/s								
0.3um	9	10	4	18	10	7	45	44
0.5um	9	6	2	3	1	7	4	19
0.15m/s								
0.3um	1	17	7	31	11	1	31	24
0.5um	0	1	5	15	2	0	5	2
达到ISO5级洁净度级别								

床尾处风速较高,保证了病人休息的舒适感。就这点来说优于水平层流舱。

图8是垂直层流舱不同高度速度场的仿真,并

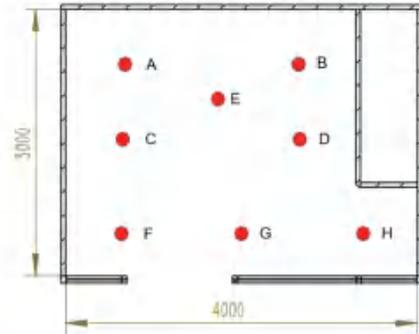


图11 两档风速下与尘埃浓度的测试数据

分别表示离出风面100mm、550mm、1000mm和1450mm速度场横剖面。可见在1450mm速度场横剖面(即离地1050mm)才出现回风口对速度场的局部影响,均小于0.5m/s。

产品样机在自建的血液病房内进行检测,风速测试在出风口100mm处,测试点距离在300mm以内;最外边测试点在距送风口边界50mm;均匀布点共70点见图9。白天与晚上时的风速与噪声数据分别在图10(上)和10(下)所示,尘埃浓度的测试数据见图11,可见产品样机达到了开发的设计要求。

4 结论

据我国红十字会统计,我国目前有近百万等待造血干细胞移植的患者,且每年新增4万白血病患者。血友患者需求治疗量很大。近年来医院血液病房建设量越来越大。成为医院治疗的一个主要组成部分。就以北京大学血液病研究所为例,医治患者已经超万例,仅2019年一年已突破1千例。

针对我国病房大楼层高不高,没有技术夹层。建筑条件往往难以满足血液病房配置的高压力、大风量净化空调系统对空间的要求。成为医院建设血液病房的一个痛点。室内组合式层流治疗舱成为最佳对策之一。考虑到血液病房送风量大,局部层流气流要求高,噪声水平低的特点,系统地研发了相应的层流舱,并层流舱送风装置可以分段运输,在室内现场可装配组合。样机通过了检测与在样板房现场的考核与验证,达到开发要求。经优化后产品可以定型推向市场,期望室内组合式层流舱有助于推动我国血液病房的建设。

多联手术室的研发与实施

刘燕敏¹, 沈晋明¹, 陈琳伟², 田海滨²

(1. 同济大学, 上海 200092; 2. 宁夏鑫吉海医疗工程有限公司, 银川 750000)

[摘要] 随着手术技术与装备的进步, 外科手术需求量激增与医生资源不足, 多联手术室应运而生, 将多个并列手术室之间的隔墙改换成移动隔断门, 或在大开间手术室加装移动隔断门。抓住优化室内布局与气流组织这一关键因素, 使其符合国标 GB50333《医院洁净手术部建筑技术规范》的要求, 大大提高了菌尘排除效率, 可随时切换成独立的单间手术室, 有效保证了无菌手术区域, 提高手术室的利用效率。同时也更好发挥资深医师作用、提升手术效率、避免交叉感染并增强了隐私性。成为一种新型手术室, 可以在各类医院推广应用。

[关键词] 手术室发展; 多联手术室; 手术环境控制; 手术室运行

0 引言

随着我国医保体系完善, 医疗需求量激增。各地都在大量新建与扩建医院, 延伸到更广的地区, 吸引了更多的病患。各种慢性病、大病的高发和早发, 以及外科技术的快速进展, 我国外科医生与麻醉医师的培养赶不上病患需求增加的速度。就拿麻醉医师来说, 我国目前只有麻醉医生 8.5 万人, 如果按照欧美的每万人拥有麻醉医生的比例, 需求缺口就达 30 万。资深的手术医生与麻醉师更是一人难求。尽管每年有大量的医学院毕业生进入医疗界, 但医师成长过程中工作经历与临床经验特别重要。尤其是在资深的手术医生与麻醉师的指导下, 术中的决策与应变的能力。目前许多三甲医院支援医疗水平较低的地区医院, 如何发挥援建医疗专家作用, 指导更多的当地医生开展手术成为关注的热点。

面对这些问题存在三大难题: 1) 如何充分发挥资深的手术医生与麻醉师的指导作用, 提高他们的工作效率? 2) 如何使得更多的年轻医生得到指导, 更快提升临床经验与技能? 3) 如何提高手术量、降低手术成本? 这迫使着许多医院不得不改变传统手术室的运营模式, 寻求新的对策。

内设 4 个手术区的通仓手术室^[1]是一种对策。在这医疗模式下, 资深的高级外科医生和麻醉医师可以同时指导年青医生进行 4 台手术(图 1)。在不增加手术资源前提下, 就能增加手术量, 提高了运营效率, 降低了感染率。这种手术方式是将传统个性化手术(以特定病患特定病症制订并实施的个性化手术)转变为现代工业化的标准操作过程(Standard Operating Procedure)。其本意是使大开间的手术空间、手术器具与设备、手术人员得以有效地利用, 最大程度发挥资深外科医生与麻醉师的作用, 手术团队分享临床专业知识与手术技能, 使医院更快、更省、更安全和更有效地治疗更多的病患。但通仓手术室只适用于专科医院, 或大专科的综合医院,



图 1 通仓手术室

只能同时实施同类单病种的手术! 不能独立进行单台手术。不适用综合医院中量大面广的各类手术。

1 通仓手术室的特点与局限

通仓手术室实施必须符合三个前提: 1) 某类单病种手术技术已经十分成熟, 变为单一、重复、再手术率低、标准化的手术过程; 2) 需要接受该类手术的病患量足够的多; 3) 在手术过程中不能使用电磁辐射大或发生有害气体大的手术装备。

尽管通仓手术室实施近 30 年了, 布局与气流模式已经固定, 设施系统十分完善、运行也十分成熟, 但是上述的特点使得通仓手术室具有如下局限性:

1) 通仓手术室设施仅仅适应于大型专科医院, 难以适用于综合性医院或其他类型医院。要有很大手术量的同类单病种手术, 且进行手术的时候各净化空调系统需要一起开启, 要同时进行 4 台手术, 无法单独实施一台或二台手术。

2) 通仓手术室由于开间大, 无间隔, 特别要注重避免交叉感染与传播。即使日常手术过程中, 4 台手术只要有一台手术没有完成, 就不能清扫、整理其他已做好手术的手术台, 以免发生交叉感染。万一出现窗口期感染患者, 难以进行有效封闭处理。降低了手术室的有效利用率。

3) 通仓手术室在骨科手术期间, 需要拉上移动屏风防止碎骨与血液飞溅(见图2)。移动屏风有上挂式, 也有落地式。资深医生与麻醉师来回走动, 同时指导4台手术, 移动屏风要随时推拉。手术后要收起屏风, 以便清扫手术室。准备下一台手术前又要拉上屏风, 由于玻璃屏风很重, 很不方便。

4) 鉴于通仓手术室的布局, 室内手术床设置的位置垂直于走廊(见图2与3), 麻醉医师的工作区通常靠进门侧布置(见图3)。进出流线方便, 也符合关节置换手术的要求。但是通仓手术室的气流模式无法满足我国GB50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》(以下简称《规范》)明文规定的在手术床长边的两侧有效下回风^[2], 必须使用上回风(见图2与4), 形成上浮气流, 菌尘排除效率不高, 无菌手术区不利的影响因素增多。尽管近30年国内外做了许多研发工作^[1], 靠气流进行隔离来解决手术过程感染控制问题。由于净化空调系统复杂, 室内风口多, 要实现气流隔离整个气流分布的调试工作量大, 在我国具体实施过程中有一定的难度。

由于不符合我国《规范》规定, 给通仓手术室的设计、审图、施工、验收、手术管理与感染控制等提出挑战, 没有可以依据的标准或规范, 若要建造通仓手术室需要做大量的工作。只有在通仓手术室从完善的理论分析研究到大量的实际工程验证等一整套多年实施的成熟经验基础上, 才有可能编写出通仓手术室建设标准。目前难以一时在我国应用推广。

5) 大型手术发展到今天, 已经离不开现代化的诊疗装备, 大多配置了DSA(数字减影血管造影术digital subtraction angiography)的C臂。DSA的电磁辐射阻碍了通仓手术室的应用推广。当一台手术使用DSA, 其他几台手术人员必须规避以防辐射伤害, 大大降低了手术效率。

6) 在现代手术过程中电外科、激光刀、超声刀等会释放的气体、蒸气、液体和固体物质的术中混合物。由于是人体组织的热分解, 不仅释放出热解产物, 如一氧化碳, 甲醛和氢氰酸, 还有超细颗粒物和生物活性成分, 如(肿瘤)细胞, 细胞残余物, 病毒等, 被称为手术烟雾。这些会对手术人员造成各种局部、系统、可逆和不可逆的危害, 有致癌风险^[3]。由于各手术区间没有隔断, 又是上回风, 手术烟雾难以有效排走, 会浮游在通仓手术室内的两相邻手术区中间上部的涡流区, 不断积聚。

7) 资深的手术医生与麻醉师在任何医院永远是稀缺的, 如何充分发挥资深的手术医生与麻醉师作



图2 通仓手术室内移动玻璃屏风



图3 通仓手术室手术台麻醉区靠前门墙面设置



1 上回风口, 2 送风装置, 3 手术床

图4 通仓手术室平面布局

用, 一直引人关注的大问题。如上所述, 通仓手术室难以推广到其他类型医院。在大多医院手术室进行的不同类型的手术, 资深的手术医生与麻醉师尽管可以通过网络观察到不同手术进展情况, 但资深的手术医生与麻醉师还不得不反复从走廊进出各手术室进行指导。由于手术室与走廊的洁净度与无菌程度不同, 加上手术室门的频繁开关, 加大了手术交叉感染的风险。

8) 按理通仓手术室最适用剖宫产手术、分娩等单一医疗过程, 但通仓手术室自开创以来, 因隐私性问题, 不得不明确表明不适用于非全麻的病患手术。同样因隐私性问题也难以推广到其他类型医院中去。

2 多联手术室的研发

鉴于以上通仓手术室的局限性, 构成了通仓手

表 1 通常单间手术室与通仓手术室比较表

项目	单间手术室	通仓手术室
适用医院类型	各类医院	专科医院
适用手术类型	各类手术	同类单病种手术
手术性质	个性化手术	单一、重复、标准化手术
手术效率	依据不同手术	同类单病种手术效率高
相同手术床数占地面积	大	小
手术床布置	按需求布置	手术床只能垂直于走廊布置
手术区之间隔离	实体隔离	气流隔离
手术区变级别运行	无影响	可能会影响到相邻手术区
资深医师指导	不方便，频繁进出手术室，感染风险大	方便
出现传染风险病患	及时隔离、及时消毒	难以及时隔离、消毒
合规性	符合《规范》要求	不符合《规范》要求
感染风险管理	常规感控要求	特殊感控管理要求
防范碎骨与血液飞溅	可以	手术期间要加装屏风
辐射屏蔽	可以做到	手术区间无法屏蔽
隐私性	实体隔墙、隐私性好	对非全麻病患的隐私性差

术室发展的瓶颈。只有突破瓶颈才能研发出新型手术室，首先我们来比较一下通常的单间手术室与通仓手术室的特性与优缺点。

从表 1 的比较可以看出，要研发新型手术室，必须扬两者之长，避两者之短。如果我们设想一下，如果仅仅将多间并列手术室之间的隔墙打通，或者在通仓手术室内每两个手术区之间设置移动隔门。通仓手术室的瓶颈没有突破，关键点不在于移动隔门，而在于如何使得形成的新型手术室符合国标 GB50333《医院洁净手术部建筑技术规范》。因为符合《规范》的要求，尤其是系统设置与气流模式，才能有抗干扰力最强的气流组织，才能有有效保证无菌手术区技术措施，只有这样才能被称之为“多联手术室”。为此申请了我国发明专利（专利号 201910772043.4）。

研发的多联手术室有以下几个特点：

1) 在每两个手术区之间设置移动隔断门。要求设置的移动隔断门气密性能好，随时可以按需方便地自动开启或关闭。用移动隔断门替代骨科手术过程中必不可少的屏风，而且比屏风操作简便、安全。移动隔断门可随时按资深医生或麻醉师对手术指导的需求开启或关闭。既能成为同时进行多台手术的大开间手术室，也可以转变为单间手术室。

如果手术室内不使用带电磁辐射的装备，要求移动隔断门采用全透明落地大玻璃，保持良好的视野（见图 5），犹如一间通仓手术室。每两个手术区之间设置隔断，国外是在中间设置移动玻璃隔门，



图 5 带落地移动玻璃隔断的通仓手术室

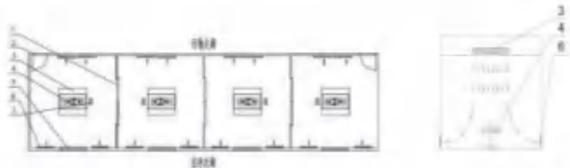


图 6 带防辐射移动隔断的通仓手术室

以便在手术过程移动大型医疗设备。玻璃移动隔门中间可设置自动百叶（见图 5）。如病患非处于全麻状态，为保护隐私，只要关闭百叶。我国可以根据手术室需求，每个隔断采用 4 扇移动隔门结构。手术期间中间的 2 扇隔门固定，靠墙两侧的 2 扇隔门可随时启闭。只有在手术时需要移动设备时，才将中间的 2 扇隔门启闭，两侧的隔门关闭。也可局部采用更先进的电控调光玻璃（也称电子雾化玻璃）做隔门，关闭电控调光玻璃的电源使其液晶分子会呈现不规则的散布状态，阻挡光线射入，电控玻璃就呈现不透明状态，隔声性与隐私性十分理想。

如手术期间需要使用电磁辐射的诊疗装备，则要求移动隔墙采用防辐射材料制成，包括采用局部防辐射玻璃。当采用防辐射结构时，也可在一侧开一扇移动屏蔽门（见图 6）。这种防辐射设计使得在手术过程中可以使用电磁辐射的诊疗装备，既保护了邻室的医护人员安全，又可不用中断手术，提高了手术室使用效率。

2) 每个手术区内手术床与走廊平行设置。国外通仓手术室尽管有的加装了移动隔门，但仅仅是加装了移门（见图 5），其送风天花与手术床的位置还是没有变化。仍然无法避免上回风。我们认为既然每个手术区四周均有实体围护，麻醉工作区可以不受限制而按照需求布置。如果将通仓手术室送



1. 移动隔门, 2. 污物门, 3. 送风装置, 4. 手术床
5. 自动门, 6. 回风口, 7. 排风口

图7 多联手术室平面布局

风装置与手术床位置旋转 90° , 使每个手术区内手术床与走廊平行设置(见图7), 这一关键思路使多联手术室跳出了通仓手术室布局的定式思维。并将手术患者头对头布置(见图7), 两麻醉区紧挨着, 方便资深麻醉师及时指导。

3) 每个手术区设置的气流组织均符合《规范》。手术床的朝向改为与洁净走廊的走向平行这一关键因素, 使得在每台手术床的正上方设置的非诱导送风装置(医学界俗称层流天花)垂直下送的送风气流, 可以由沿手术床的长边所对两侧墙下方设置多个回风口回风。麻醉工作区的正上方设置排风口排风。两端的两个手术区设置有污物门, 当然也可以在每个手术室各设污物门。就能够形成对手术环境控制非常合适的上送下回气流组织, 避免了手术区的上回风, 以有效排除手术区内菌尘, 完全符合我国《规范》要求。

并可以采用我国《规范》推荐的整套净化空调系统, 通过设置PLC控制系统控制集中新风处理机组与各区循环空气处理机组协调运行, 施行湿度优先控制, 有效保证了各手术区的手术环境^[4]。采用这些行之有效的、为我国工程界熟悉的设计与施工技术措施, 以及业已大批量生产的洁净手术室配套的零部件, 而且工程验收也有据可循, 有利于多联手术室建设项目顺利开展, 降低多联手术室的建造成本, 更便于在我国的应用推广。

4) 每个手术区隔离性强, 感染风险小。由于每个手术区之间都有实体隔离, 在手术开始切口时关闭移动门, 可更加有效排出手术烟雾。手术完成后关闭移动门, 就可以自行清理、消毒。不必像通仓手术室要等所有手术都完成后方可清理, 提高了手术室使用效率。有了移动隔断, 大大降低了空气途径感染风险。万一发生感染风险或出现窗口期感染患者, 关闭移动隔门, 使得每个手术区可以及时自行隔离、封闭, 以便消毒灭菌及相应处理。

5) 多联手术室可以推广到综合医院手术区使用移动隔断门隔断后, 使得多联手术室不仅适应于大型专科医院同类单病种手术, 也可适用综合医院

内的各类手术。移动门随时启闭, 同样也便于资深医师与麻醉师穿行在各个手术区进行指导, 不用出入手术室, 有利于感控。也能关闭移动隔离门, 使每个手术区单独实施手术。这就是说, 多联手术室既可以用于通仓手术室, 也能够用作单间手术室。这样, 多联手术室就突破了通仓手术室发展瓶颈, 不仅能够方便地应用到综合医院各类手术, 而且采用遮光百叶或电控调光玻璃改善隔声性与隐私性。

6) 多联手术室赋能技术 多联手术室可以采用赋能技术, 实现在线实时可视化的监控系统, 并在每个手术区的墙壁上设置显示器, 实时播放各手术区的手术进程, 并结合用声光显示来呼叫资深医生或麻醉师, 以便资深医生或麻醉师及时到位进行指导。特别对于防辐射结构的多联手术室, 由于防辐射观察窗相对较小, 防辐射平移门较重, 对门的自动驱动装置提出更高要求。在线实时可视化的监控系统显得尤为重要, 建议我国采用3个手术区的多联手术室。

多联手术室可以通过PLC控制系统与各手术区净化空调系统及其新风、送风、回风以及排风控制阀的通讯连接, 有效地控制了各手术区变级别变风量运行^[5], 以及各手术区启停, 并始终维持多联手术室内各手术区的压差以及对走廊的压差不变^[6]。

3 结语

多联手术室与通仓手术室相比, 不仅仅是每两个手术区之间设置移动隔墙, 更重要改变了通仓手术室的传统布局与优化了气流模式这一关键因素, 使得手术床正上方设置的送风装置垂直下送的气流可以由沿所述手术床的长边所对两侧墙下方设置多个回风口回风。相比通仓手术室, 避免了手术区的上回风, 提高了菌尘排除效率, 增强了手术无菌区域的抗干扰能力, 完全符合我国GB50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》的相关要求。使得多联手术室的设计、审图、施工、验收、手术管理与感染控制有据可循。

由于多联手术室在每两个手术区之间设置移动隔门, 替代了骨科手术过程中必不可少的屏风, 而且比屏风操作更简便、安全, 更具隐私性。移动隔断门可按资深医生或麻醉师需求关上或打开, 既能成为同时进行多台手术的通仓手术室, 也可以随时可切换成为多间完全独立的单间手术室。同时, 实现在线实时可视化的监控系统与呼叫系统。不仅适应于大型专科医院同科单病种手术, 也可推广到综合医院内各类手术。手术区使用移动隔断门隔断后, 在手术施行时可更加有效排出手术烟雾, 手术完成后就可以各自进行清理。不必等所有手术都完成后

方可清理,提高了手术室使用效率。特别是万一出现窗口期感染患者,也可及时进行有效封闭处理。由于可以设置与辐射强度相应的屏蔽移动门和墙体,使得在手术过程中可以使用电磁辐射的诊疗装备,保护了邻室的医护人员安全,提高了手术室使用效率。

综上所述,多联手术室融合了单间手术室与通仓手术室的特点。突破了通仓手术室发展瓶颈,适应了手术室的发展,有利于在我国各类医院中推广与应用。使有限的医疗资源服务于更多的病患,提高手术量、降低手术成本,是一种很有发展前途的新型手术室。

参考文献

- [1] 刘燕敏,李晓颖,欧洲骨科通仓手术室气流组织评价与优选[J].建筑科学,2019(10):92-101.
- [2] 中国建筑科学研究院,GB50333-2014《医院洁净手术部建筑技术规范》[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [3] Technische Regeln für Gefahrstoffe. TRGS 525:Gefahrstoffe in Einrichtungen der medizinischen Versorgung[S]. https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-525.pdf?__blob=publicationFile.
- [4] 沈晋明,医院洁净手术部的净化空调系统设计理念与方法[J].暖通空调,2001,31(5):7-12.
- [5] 沈晋明,刘燕敏,俞卫刚,级别与风量可变洁净手术室的建造与应用——新版《医院洁净手术部建筑技术规范》简析[J].中国医院建筑与装备,2014(3):52-54.
- [6] 刘燕敏,何焰,陈尹等,复合手术室的环境控制探讨[J].中国医院建筑与装备,2019(12):39-43.

综合医院手术室平疫结合改造新模式

吴美玲

(上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200070)

[摘要] 根据某医院洁净手术部改造前院方提出的问题以及“平疫结合”运行模式的诉求, 本文分析了造成手术室湿度超标、手术室内人员感觉到胸闷气短的原因, 提出了设置独立多功能四管制热泵、采用双风机净化空调机组、配置压力无关的文丘里风阀以及自动控制。实现了平时节能模式与疫情期间抗疫模式。两种模式只要按动控制键就能自控转换, 十分简易、有效。

[关键词] 手术室改造; 可变新风机组; 洁净空调; 气流组织; 文丘里阀

0 引言

2019年底, 随着新冠疫情全球性大面积爆发, 医院空调通风系统如何运行引发思考与热议。这次疫情对医院空调系统的设计有很大的影响, 新建医院根据国家相关规范要求不仅要满足平时要求, 也要具备“疫情”时期的工作要求, “平疫结合”成为当下及以后医院空调系统设计的一个主要考虑点。

为此国家卫生健康委、国家发展改革委于2020年7月30日颁布了《综合医院“平疫结合”可转换病区建筑技术导则(试行)》

1 背景介绍

本次改造工程为某医院综合大楼, 1号楼共六层, 已使用多年。为适应现代医疗及“平疫结合”需求, 院方要求对原六层洁净手术部进行改造, 其中包括2间II级手术室, 洁净走廊、洁净辅助用房等(图1)。手术室吊顶设计高度2.8m, 辅房吊顶高度2.6m, 洁净走廊吊顶设计高度2.6m。

院方要求洁净手术部改造后应满足:

1) 洁净手术室可实现平疫结合, 既能满足平时正常手术、又能在疫情中转换成符合传染手术要求的负压的全新风直流手术室。

2) 洁净手术室应全面符合《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-2013^[1](以下简称《规范》)提出的手术环境控制要求。

3) 在疫情中可以在不改变净化空调系统与设施

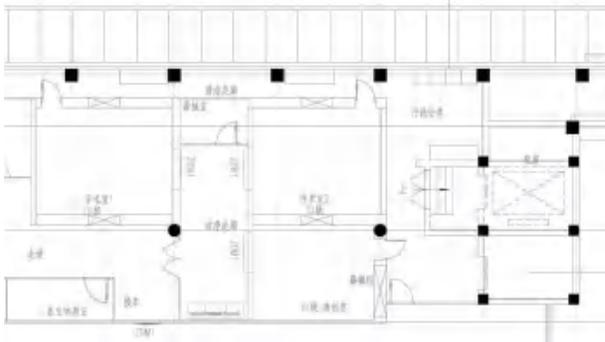


图1 1号楼改造手术室平面图(局部)

的前提下, 十分简便地转化为负压的全新风直流手术室, 可有效地避免误操作等任何可能。

2 改造前手术室空调系统与手术环境控制的不足

改造前, 两间洁净手术室的冷热源与大楼共用, 未单独给洁净手术区另设冷热源系统, 每间洁净手术室独立设置净化空调系统。新风经过滤后进入机组与回风混合, 再经冷(热)盘管热湿处理后送入手术室, 净化空调机组的处理过程详见图2。

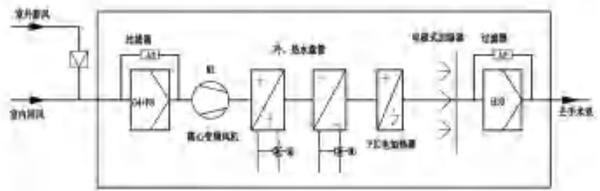


图2 循环机组处理过程示意图

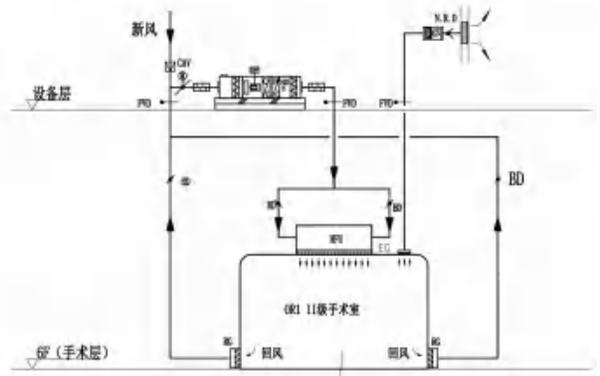


图3 循环机组处理过程示意图

原系统依据《规范》^[1]相关要求, 每间II级手术室新风量为800m³/h, 送风量为2200m³/h, 回风量为1400m³/h, 在每间手术台上方单独设置排风机, 排风量为300m³/h, 每间手术室采用固定新风量、排风量控制模式(图3), 以维持手术室的正压控制。

3 洁净手术室原有空调系统存在问题与分析

与院方要求相比原有的手术室空调系统存在如下问题:

1) 根据院方的反馈, 手术室医护人员经常会感觉气闷, 不时开门进行手术, 而且在过渡季节手术室内相对湿度常常超标, 不利于手术期间感染控制。由于原手术室冷热源与大楼共用, 在过渡季节, 冷冻水的供水温度很难达到 7°C, 基本都在 10°C 左右, 这样的冷冻水温度无法对新风进行深度除湿。

2) 原手术室净化空调系统采用的是固定新风量与排风量, 无法改变新风量, 更无法满足疫情时期手术室全新风直流及负压运行的要求。

对此, 相关的设计标准与规范要求如下:

《公共建筑节能设计标准》GB50189-2015^[2] 第 4.3.11 “设计定风量全空气系统时, 宜采取实现全新风运行或可调新风比措施, 并宜设计相应的排风系统。”在“过渡季节”采用全新运行模式(50%-100%送风量), 利用室外新风进行免费冷却, 为避免室内正压过大, 排风机通常按变频或双速运行考虑。常见的做法是在送风总管、回风总管以及排风总管上分别设置电动多叶调节阀, 送风、回风、排风三者联动控制。虽然已有大量的研究^[3-6]及实际工程经验表明在舒适性空调系统中变新风量运行可以改善室内空气品质和实现运行节能, 但却一直未能在洁净空调系统中得到广泛应用。这时因为在洁净空调领域, 改变新风量, 各手术室的排风量也必须做出相应变化, 否则会破坏手术部甚至整个洁净区域内的压力梯度, 造成了交叉污染。而传统的压力相关型电动多叶调节风阀无法胜任, 常常造成压力失控, 这在洁净空调系统设计中是非常忌讳的。

《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-2013 中第 8.1.14 明确规定: “负压手术室顶棚排风口入口以及室内回风口入口处均必须设高效过滤器, 并应在排风出口处设止回阀, 回风口入口处设密闭阀。正负压转换手术室, 应在部分回风口上设高效过滤器, 另一部分回风口上设中效过滤器; 当供负压使用时, 应关闭中效过滤器处密闭阀, 当供正压使用时, 应关闭高效过滤器处密闭阀。”^[1]《综合医院“平疫结合”可转换病区建筑技术导则(试行)》中第 6.5.1 要求“平疫结合区手术部, 平时手术室按正压设计。手术部根据需要应当至少设置一间可转化为负压的全新风直流手术室, 供疫情时使用, 疫情时的排风管及排风机平时宜安装到位。疫情时负压手术室顶棚排风入口以及室内回风口处均安装高效过滤器, 并在排风出口处设止回阀, 关断回风管, 打开排风管, 启动排风机。”两者设计要求与相应措施基本相同, 需要在洁净手术室加装排风管及排风机, 在疫情中在排风出口处设止回阀, 关断回风管, 打开排风管, 启动排风机。对于医院后勤操作人员

来说, 难免有误操作的可能。

4 探讨洁净手术室平疫结合的新模式

如上所述, 要达到院方要求的洁净手术室的平疫结合的净化空调系统, 用常规的方法难以实现, 必须研究新的系统模式。平疫结合的空调系统关键点在于满足医疗环境控制前提下, 能简便、有效地实施新风量与压差的转换控制。本文将从以下几个方面进行探讨:

4.1 改变手术室冷热源形式

改造前, 手术室冷热源与医院病房大楼共用, 对病房等舒适性空调运行的过程中, 通常为了节能, 会将冷冻水出水温度调至 10°C 左右, 这种出水温度基本上能够满足舒适性空调房间的设计温度, 但如果手术室与大楼共用冷热源, 这样的出水温度是无法胜任手术室内的除湿降温工作, 手术室很容易出现湿度超标的情况。另外, 在过渡季节, 大楼内无需开启冷冻机组制冷, 但是手术室处于内区, 可能会出现需要供冷的情况, 需要开启制冷机组, 这样就会出现“大马拉小车”的现象。

综合考虑, 为洁净手术区域再单独设置一台容量为 120kW 的多功能四管制风冷热泵, 冷水供回水温度 7°C/12°C, 热水供回水温度 45°C/40°C。这种冷热源配置方案虽然会在一定程度上增加初投资, 但可以有效的解决冷冻水出水温度过高, 手术室湿度超标问题。

4.2 替代传统调节风阀

变新风量机组在洁净领域内一直得不到广泛应用, 这与机组采用传统风阀的结构特性及调节方式有很大的关系。传统的电动调节阀一般是压力相关性, 即管道内压力与风量互相影响, 任何一者的改变都会引起另一方的波动。依靠这样的风阀门无法实现新风、送风、排风与回风风量的精确调节, 难以胜任洁净空调要求变新风量同时维持恒定压差控制要求。

为解决这一问题, 笔者提出在可变新风机组中的新风、排风及回风入口处设置压力无关性文丘里调节阀。它可以不受管道内压力变化的影响, 精确维持系统设定的风量。文丘里阀有几个显著特点^[7]:

(1) 压力无关性, 能很好的解决上文所提到的系统管网压力变化问题, 它依靠精密的弹簧、文丘里阀芯、文丘里阀体可以实现一个很好的压力无关性过程;

(2) 响应时间快, 在管网内压力发生变化时, 文丘里阀能在 1S 内克服干扰, 其调节过程是与管网内压力变化过程几乎同时进行的; (3) 控制精度高, 文丘里阀的最大风量与最小风量比可达 20:1, 传统风阀一般在阀门开度减少到 20% 的时候就无法再减小

了，即最大风量与最小风量比为 5:1，在整个风量控制范围内，文丘里阀的控制精度可达 5%（图 4）。文丘里阀的高精度调节性能与它的自身构造是分不开的。

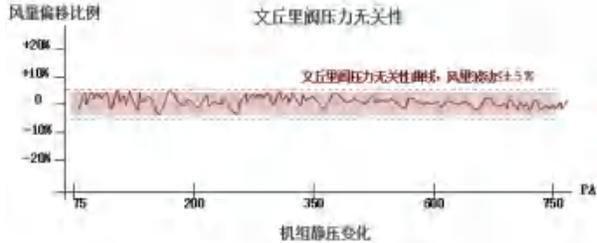


图 4 文丘里阀调节特性图

4.3 引进“变新风量”“变压差”设计理念

针对现有空调系统存在的问题以及院方希望平时能按节能要求进行变新风量运行，提高手术室内空气品质；在疫情期间能够转换为全新风直流与负压运行。笔者提出对本次改造的洁净手术部区域引进“变新风量”“变压差”设计理念，实现两种运行模式。

1) 节能模式：平时开启的节能模式是根据室内外实时状况进行变新风量的日常运行，达到最佳节能与最优室内空气质量。解决在手术人员胸闷气短的症状。只有合适气候才有可能实现全新风运行。

2) 抗疫模式：疫情时期开启的模式，根据病菌特性与疫情防控要求，按确定所需新风比运行，可直至可以进行全新风直流运行，按疫情防控要求实现不同的负压差转换。

恒压差变新风量净化空调机组^[8]主要是由送风机组和回风机组组成的双风机空调机组，回风机设置变频器与静压传感器，在室内回风侧、排风侧、新风侧及循环风侧设置调节阀。根据风平衡定律，送风量 $Q_s = \text{新风量 } Q_x + \text{循环风量 } Q_H$ ，维持压差风量 $\Delta P = \text{新风量 } Q_x - \text{排风量 } Q_p$ ，改变送入的新风量，要



图 5 变新风量空调净化机组

维持室内压差不变，排风量也要相应变化，传统多叶调节阀无法胜任。为解决这一困难，变新风循环机组采用压力无关性文丘里阀与 PLC 控制系统^[8]。PLC 控制系统利用文丘里调节阀可以用数值精确控制的特性，实现在调节新风量 Q_x 的过程中，由静压传感器保证送、回风量不变。PLC 按风平衡公式计算出循环风量 Q_H 与排风量 Q_p 的数值，再直接对新风阀、循环风阀与排风阀进行数值控制，精确维持差值风量 ΔP 不变，从而使得手术室内正压保持稳定。

根据规范要求计算得出 1 号楼两间手术室风量为 $2200\text{m}^3/\text{h}$ ，设置两台 $2500\text{m}^3/\text{h}$ 的恒压差变新风量净化空调机组，机组置于六层屋面，送风、回风通过井道至六层。

恒压差变新风量循环机组采用的是常规的一次回风再加热的处理方式，新风与回风混合至 C 点，再冷却除湿至机器露点 L1，利用四管制风冷热泵的热水再热至 O2，再沿热湿比线送至房间内，具体处理过程如图 6 所示。这种处理方式相比较二次回风与集中新风深度除湿 L2，较大程度的提高了机器露点温度，用普通的 7°C 冷源处理即可满足要求，无需增设直膨段进行深度冷却除湿。

在疫情爆发期间，变新风循环机组可由平时运行节能模式转换为抗疫模式。机组按预先的设定开启全新风运行模式，相应增大排风量，使手术室内维持设定的负压值。两种模式转换完全自控，只要按动控制键就能实现。

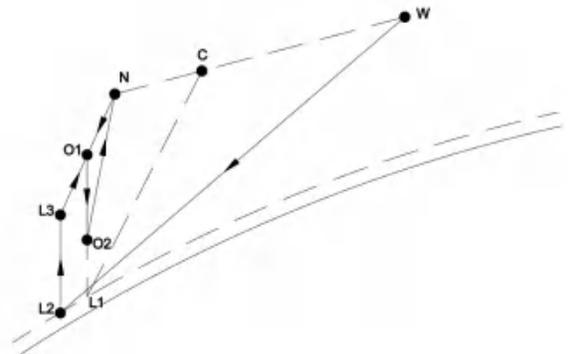


图 6 夏季新风深度除湿与一次回风处理过程图

5 结语

手术室就是在无菌环境以实施手术的场所，是医院的关键科室，保障医疗、降低感染一直是手术室的重点任务。这次洁净手术室的改造就是结合医院“平疫结合”建设。院方提出手术室改造任务，既能满足平时正常手术，又能在疫情中简便地转换成符合传染手术要求的负压的全新风直流。尽管《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-2013 以及《综合医院“平疫结合”可转换病区建筑技术导则(试行)》

提出相应的要求与实施措施，但需要在疫情中改造空调系统，或增设装置，或更改自控系统。运行转换繁琐容易发生误操作。不符合院方的要求。

笔者认为平疫结合，应以平为主，适用疫时。提出手术室平疫结合，最合适的措施应是变压差变新风量。本文从设置独立多功能四管制热泵、采用双风机净化空调机组、配置压力无关的文丘里风阀以及自动控制。实现了平时节能模式与疫情期间抗疫模式。两种模式可以自控转换，只要按动控制键就能实现，十分简易、有效，真正做到平疫结合。

笔者对洁净手术部净化空调系统平疫结合改造项目的设计方案与思考，希望对类似的工程有一定的借鉴与参考意义。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 .GB50333-2013 医院洁净手术部建筑技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部 .GB50189-2015 公共建筑节能设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015
- [3] 张春枝 . 空气节能器在空调系统中的应用 [J]. 暖通空调, 2011, 37(11):45-49
- [4] 陈晨, 杨国荣 . 新风免费冷却节能研究 [J]. 暖通空调, 2012, 42(9):61-63
- [5] 刘俊杰, 朱能 . 洁净室冬季使用新风作为冷源的研究 [J]. 暖通空调, 2003, 33 (2):27-29
- [6] 邹声华, 丁力行 . 空调系统新风和回风对室内空气质量的影响 [J]. 建筑热能通风空调, 2002, 21 (4):18-20
- [7] 吴美玲 . 节能温控型独立通风笼具 (IVC) 系统的应用研究 . 上海: 同济大学硕士研究生论文 2014
- [8] 刘燕敏, 何焰, 陈尹, 吕必金, 陈睿 . 复合手术室的环境控制探讨 . 中国医院建筑与装备, 2020, N0.02:94-98

基于 5G 无线手术数字化体系

沈晋明¹，刘燕敏¹，黄晓明²

(1. 同济大学，上海 200092; 2. 上海益纹微理科技有限公司，上海 201403)

0 引言

手术是临床实践重要组成部分，手术室是为病人提供手术及抢救的场所，是医院的重要技术部门。由于外科手术具有侵袭性、复杂性、个体化、高度依赖操作者技能等特点，对手术环境控制提出了很高的要求。另一方面，手术技术进步、高科技诊疗设备发展。微创与无创手术系统、电外科器械进入手术室也完全改变了传统手术与手术环境控制的需求。在手术过程需要调用更多的相关信息，手术室内众多的诊疗设备不断上传实时信息。这就需要—个高效率、高安全性、超大容量的交融平台。在这基础上诞生了数字化手术室。

数字化赋能了手术室，促进了手术的发展。数字化手术室已成为近期手术室发展的一个方向，也是市场的一个热点。

数字化手术室通常是以计算机、物联网、移动互联网、智能楼宇等信息技术为基础，建立了满足手术相关活动信息收集处理、整合、存储、传输及应用的全维度、全过程、全数字化手术支撑环境。手术室的医疗设备及周边设备通过所提供数字化输入和输出接口，实现与其他系统的数据共享，并允许集中控制，且可将输出信息显示在指定的显示器上。同时可分屏显示本手术室患者信息、手术信息、温湿度等环境控制等信息。患者信息可通过与医院信息系统 HIS、EMR、PACS 等医院信息系统对接，来提取并显示患者临床。

1 数字化手术室优缺点

由于数字化手术室比洁净手术室的造价高得多，甚至高达几千万，相对利润空间也大。各个相关的

工程公司纷纷涌入。为了市场竞争，各大手术室工程公司不断推出新一代数字化手术室，为了凸显数字化手术室技术含量，导致数字化手术室系统配置越来越复杂，功能越搞越多，涉及的信息越搞越广，系统越搞越大，价格也越来越高。现在的数字化手术室不仅满足手术相关活动信息收集处理、整合、存储、传输及应用的全维度、全过程、全数字手术部、甚至囊括了众多的医院运营与管理信息。

这种价格昂贵、大而全的数字化手术室也许只适用于高级、复杂的手术，如多功能复合手术室。其实绝大多数手术过程真正需要的信息不多，没有必要搞那么复杂，信息量那么多。这种大而全的数字化既不需要也不利于我国推进手术室的数字化。加上，一间数字化手术室包罗万象，甚至绑架了整个手术部，使得一个手术部难以搞多间数字化手术室。

另外，手术技术进步，手术装备不断更新换代，新的装备融入，不时对手术室改扩建，这种复杂庞大的数字化体系需配置大量桥架和众多设备的线束总长量惊人。端口固定又使得数字设备接入数量、部署、更改、升级都成为极大瓶颈，加大了改扩建的难度。

这就是说，数字化手术室不仅要满足手术过程所需信息与手术部管理运营要求，还要随时更新适应不断涌现出的手术室新系统与新措施。真是勉为其难了。可见推广单间大而全的数字化手术室是不合适的，不符合手术室数字化发展。而且容易引起误导市场，适用才是“金”。

2 手术部数字化体系概念

首先对传统的大而全的数字化手术室分析一下，数字化手术室可以分为手术室实时需用的数字化与运营管理的数字化。相对来说，数字化手术室的管理与运营系统是比较稳定的，而手术过程需用数字化会受手术技术与装备更新融入而不时更新着。我们不妨将手术室实时需用的数字化与运营管理的数字化解耦。推出“手术数字化体系”的概念，即将管理与运营数字化功能赋予手术部，使手术部成为相对稳定的管理运营数字化平台，成为医院影像归档与传输系统 PACS、医院信息系统 HIS 和实验室信息系统 LIS 等共享信息中转平台。将运行与管理



图 1 数字化手术室系统配置

系统从数字化手术室中剥离，使数字化手术室成为手术部的嵌入模块，提高手术室的数字化的灵活性与适应性，能以最快速度适应不时变化与更新。同时又将数字化手术室与数字化手术部两者有机结合。整个手术部只要一套数字化运营与管理系统，手术部内每个手术室作为嵌入模块可以按照需求配置程度不同实现数字化，不需要将每间都搞成“高、大、上”数字化手术室。

目前数字化手术室大多通过线路及其接口的输入或输出。传统有线数字化手术室的布线工程由于大量的桥架和众多的设备导致了线束总长度惊人。而线束敷设与施工时间长、维护管理成本大。端口固定又使得手术室内的数字设备接入数量、部署、更改、升级成为极大瓶颈。造成手术室建设、更新与改造周期长，无法满足医疗对手术的迫切需求

3 “数字化手术部”与“数字化手术室”无缝对接

“数字化手术部”与“数字化手术室”之间的医疗信息传输与控制要实现无缝对接，最大的问题是因为有线连接的。要突破这一瓶颈，无线是一条途径。

无线至少可以建造施工时不必大量线束的布线、穿线、连线，十分方便，而且升级改造时，无线的优势使设备更新无需大费周折重新布线连线，省时又省力。

在4G时代，多家利用4G移动通信网络推出健康云（图2），但是运行模式都很单一，即一张网运行所有业务。从接入层面上讲，要满足大型手术室现场大量、多种传输并存储要求，现有WiFi、4G、NB-IoT、RFID、ZigBee等窄带物联网均无法达到。就覆盖能力来说，手术部多间数字化手术室现有WiFi、4G、NB-IoT等技术面对众多装备无法满足无缝地在手术室内切换使用。另外，共用私网频段容易相互干扰，4G无线也只能安全做到信息传输与存储，难以安全有效实施远程控制。

4G核心网位于网络数据交换的中央，主要负责终端用户的移动性管理，会话管理和数据传输。4G所有业务都要通过核心网，因此无法实现端到端之间的业务编排，也无法满足不同端的特殊要求。这是产生时延的原因之一。

总之，现有数据接入方式，比如有线光缆/电缆，和WIFI、4G、窄带物联网等无线接入方式都存在大量缺陷。比如有线接入存在布线困难，施工周期长，更新困难，维护成本高等问题，无线接入存在组网频段单一，抗干扰性能差，单一接入方式不能同时满足高频率大并发的小数据传输、大带宽数据传输和低时延的数据传输的需求等问题。

特别是物联网的出现，海量的设备接入网络，这些设备分属不同的工业领域，具有不同的特点和需求。对于网络的移动性、安全性、时延性、可靠性，甚至是计费方式的需求是不同的。主要是服务于智能移动手机的4G网络已经不能胜任了，5G网络应运而生！

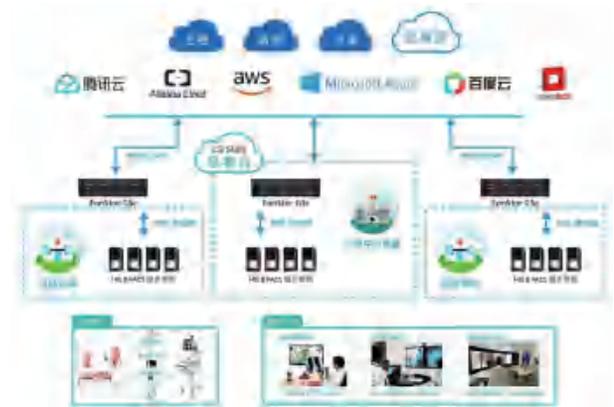


图2 4G移动通信网络推出健康云

4 基于5G的无线数字化手术室

5G时代到来，5G网络的高带宽、低时延、广连接的优势凸显。但不应将5G视作比4G具有更高带宽、更低时延、更广连接，更应该看到5G是一场革命。正因为5G的关键技术突破，其优异特性已经成为了数字经济时代的关键使能技术和基础设施，从4G单纯的移动通信扩展为无处不在的连接和场景应用。

4.1 5G的关键技术

5G网络为了满足面向不同的应用领域，如移动宽带、物联网、关键任务型物联网等需求不同的网络类型。这种多应用场景的巨大差异化促使5G产生了网络切片技术。

网络切片是5G关键技术之一。通俗讲，网络如同道路，用户像路上车辆。如上所述，4G是单一网络架构。用户一多就像车辆使网路变得拥堵不堪。流量下降、时延甚至堵塞。不同交通工具（如大型汽车、小型汽车、摩托车等）有不同要求，如果交通采用分流管理，交通就变得井井有条（见图3）。

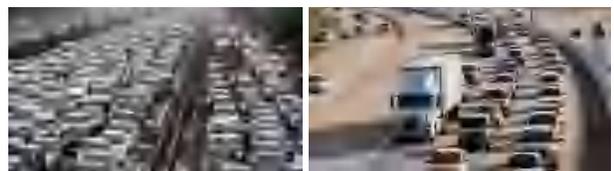


图3 道路不分流交通拥堵的情景 道路分流后交通井井有条

5G网络切片就像道路分流管理一样，是通过网络切片技术在一个独立的实体网络上切分出多个虚拟的网络，每一个虚拟网络根据不同的服务需求，

如时延、带宽、安全性和可靠性等来划分。每个虚拟网络之间，包括网络内的设备、接入、传输和核心网，是逻辑独立的，互不干扰，具备不同的功能特点，面向不同的需求和服务。这分流做法是非常节省成本的、又是绝对安全的！充分发挥 5G 网络作用。

边缘计算又一 5G 关键技术，由于 4G 网架构，所有信息是由核心网决定去调度和处理，就在同一个基站下面，还得上传到核心网去处理再回来，能不能将处理能力直接下沉呢？5G 的移动边缘计算（MEC）就是用来解决控制面和用户面分离就以实现直接下沉。将终端的业务需求，就近调用计算能力解决，而不是层层往上报到核心计算中心，再下发处理。

MEC 边缘云平台通过与运营商网络结合（结合点是用户数据面功能）提供一种新的网络架构，用无线接入网络（CT）就近提供电信用户所需 IT 服务和云端计算功能（IT）是一个 ICT 技术融合的最佳结合点。位于网络边缘、基于云的 IT 计算和存储环境。使数据存储和计算能力部署于更靠近用户的边缘，从而降低了网络时延，可更好的提供低时延、高宽带应用。或者说 MEC 实现了多种接入 + 本地分流 + 能力（资源、网络、业务）

网关的控制与转发分离也是 5G 关键技术，由于 4G 移动核心网网关设备既包含路由转发功能，也包含控制功能（信令处理和业务处理），控制功能和转发功能之间是紧耦合关系。

5G 网络将移动核心网网关设备的控制功能和转发功能进一步分离，网络向控制功能集中化和转发功能分布化的趋势发展。控制和转发功能分离，转发面将专注于业务数据的路由转发，具有简单、稳定和高性能等特性，以满足未来海量移动流量的转发需求。控制面采用逻辑集中的方式实现统一的策略控制，保证灵活的移动流量调度和连接管理。集中部署的控制面通过移动流控制接口实现对转发面的可编程控制。

总之，“控制面和转发面分离”使得网络架构更加扁平化。网关设备可采用分布式的部署方式，从而有效的降低业务的传输时延。控制面功能和转发面功能能够分别独立演进，提升网络整体系统的灵活性和效率。

5G 关键技术的突破，获得运营商级别的运维保障，充分享受到 5G 高可靠高安全的特性。这对医疗卫生机构来说特别重要，拓宽了 5G+ 医疗健康领域应用的场景，推动运用 5G 技术改造提升卫生健康网络基础设施。

4.2 基于 5G 开发无线数字化手术室

由于 5G 采用切片、MEC 边缘技术和网关，从 5G 的客户侧网元中切出独立的专网，并就近直接接入医院专网，实现局域网化；获得了独立安全的专网组网，充分保障非医院设备不能接入，满足数据不出医院的要求。数字化后使信息容错率提高，数据采集更完整。这都为手术室无线数字信号传输奠定了技术基础，消除了发展数字化手术部的关键技术障碍。

为此我们开发了一种适用于手术室无线数字信号传输的 5G 切片专网，包括用户平面功能单元（UPF）与外部 5G 核心网连接，并通过 5G 边缘计算接口连接院内信息化系统；可编程逻辑控制器（PLC）连接所述用户平面功能单元；基带处理单元（BBU）连接用户功能平面单元和外部 5G 核心网，并将网络信号转换成基带数字信号；集线器单元，连接所述基带处理单元，对于电磁屏蔽手术室可通过有线连接穿过手术室屏蔽层接入该手术室，手术室内设置射频拉远单元（RRU）与集线器单元连接，并在该手术室内提供 5G 移动网络覆盖。

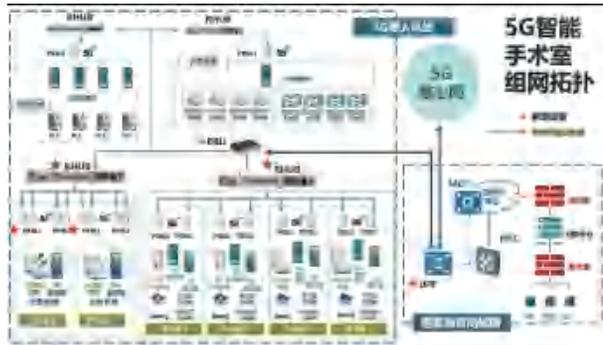


图 4 5G 手术室组网拓扑图

也可将 5G 数据传输单元（DTU）设置在手术室内（见图 4），通过有线连接所述医疗设备并通过所述 5G 移动网络连接射频拉远单元。基于用户功能平面单元、基带处理单元、集线器单元、射频拉远单元部署 5G 移动网络设置有第一切片网络和第二切片网络，其中第一切片网络用于外部 5G 移动通信，第二切片网络用于手术部或院内数据通信。

需要说明的是，5G 数据传输单元是通过第二切片网络连接射频拉远单元。并通过 MQTT/MODBUS 协议，RS-232 串口，RS-485 串口和双向并口连接医疗设备和手术环境控制设备。

另一问题是涉及到控制手术环境的净化空调系统，包括各类传感器，手术室内的控制面板，以及管控净化空调系统（新风机组与循环机组）的 PLC 控制器的医疗网关方式的问题。目前大多医院都采用洁净手术部，将手术室集中布置在手术部，也有

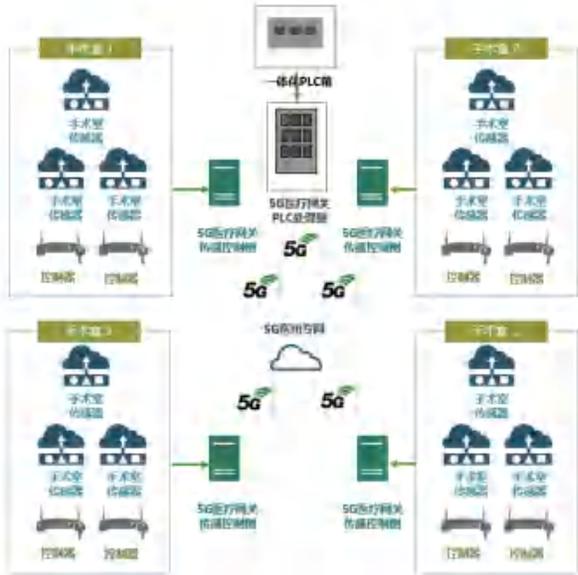


图5 手术室集中布置的网关方式

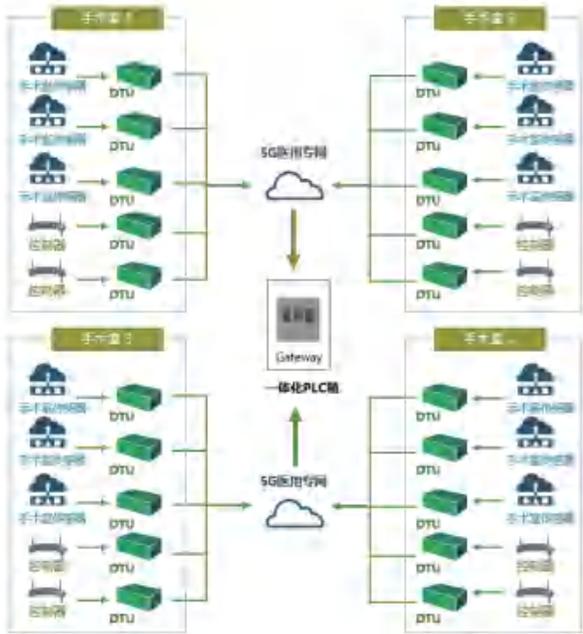


图6 手术室分散布置的网关方式

的将手术室分块布置。这就需要不同的5G医疗网关方式

对于在洁净手术部内集中布置的手术室的5G医疗网关方式如图5所示。

将每间手术室内所有传感器和控制器就近接入专用网关(sGW)，专用网关通过5G通信模块接入5G专网(切片)，通过5G与PLC侧的专用网关对接。其特点专用网关负责就近收敛传感器和控制器的信号交互、从而取代这些分布于医院各处装备之间繁杂的物理布线。专用网关部署在各自手术室的弱电隔板中，分部网关(pGW)部署于设备层的集成一体化PLC箱中。

对于分散布置的手术室我们采用数据传输单元(DTU)连接方案(见图6)。将在手术室内所有的传感器和控制器后端连接DTU，不同传感器和控制器使用的接口和协议不同，可开发不同的DTU适配。通过DTU转换成数字信号，DTU另一端通过5G模块接入5G医用专网(专用切片)。在PLC侧采用5G网关与各DTU通过5G网互联，完成传感器、控制器和PLC之间的信号交互。简单、有效，传感器、控制器与PLC之间无需物理连线，也不要额外设置。但众多的DTU可能投资稍大。

5 结语

综上所述，使用5G切片技术建立院内专网，保证了数据安全，并通过5G边缘计算接口实现了院内数据的共享。采用5G数据传输单元让手术室原有医疗装备接入5G无线网络，在保证原有装备性能的基础上不仅省去了手术室与手术部或医院之间布线工程，实现“数字化手术部”与“数字化手术室”之间的医疗信息传输与控制无线无缝对接。降低了施工与维护成本，便于后续更换。而且也便于手术室设备的更新，或融入新的数字化设备。基于5G用无线将两者有机结合起来，有力地推动了数字化手术部的建设，也有利于数字化手术室的应用推广，降低每间手术室的数字化成本。

手术室带宽口低速空气幕的异温异速送风系统

刘燕敏, 沈晋明

(同济大学, 上海 200092)

[摘要] 针对目前洁净手术室的传统送风装置抗干扰性较差以及难以同时满足医患需求, 提出宽口低速空气幕异温异速送风装置及其净化空调系统。在手术台正上方设置三个独立的送风箱体。中间主层流送风装置送入无菌无尘、温度较高、风速较低的室内的循环风, 在患者的手术部位形成无菌无尘的局部环境, 便于围术期患者体温管理, 同时满足了麻醉师的舒适度。两侧各配置宽口低速空气幕送风装置, 送入温湿度较低、风速较高的洁净无菌送风, 既保护了中心主层流送风气流, 又符合了手术人员需求, 有效排除了在手术中的发尘与发菌。从根本上改变了手术室传统的同一箱体的送风装置的结构与同温同速的送风方式, 是一项具有自主知识产权、值得推广的技术。

[关键词] 洁净手术室; 送风装置; 空气幕; 抗干扰性; 医患需求; 宽口低速; 异温异速

0 引言

洁净手术室的送风装置是实现手术区域环境控制的关键部件。从手术环境控制特点与要求来说, 手术室送风装置自身性能比手术室空调系统及控制系统更为重要。但在实际工程中设计、评标或施工中往往更重视手术室空调系统性能及控制系统, 而不是送风装置自身性能^[1]。

无论是我国还是其他发达国家的医院建设标准, 高级别手术室常常要求在手术台正上方设置局部的层流送风装置。局部层流只是一种约定的俗称, 医学界较为常用。在不同的标准中分别被较为科学地定义为单向流、低湍流度置换流或非诱导送风气流。我国 GB50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》(以下简称《规范》)规定^[2]的 I 级洁净手术室的送风装置的送风面积为 $2.4\text{m} \times 2.6\text{m}$, 在工作面上的送风速度为 $0.2 \sim 0.25\text{m/s}$ 。德国 DIN1946-4-2018《医疗建筑与用房通风》要求^{[3]Ia} 手术室送风装置面积为 $3.2\text{m} \times 3.2\text{m}$, 送风量 $\geq 900\text{m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2 \text{出口面积})$, 相当于送风风速 $\geq 0.25\text{m/s}$ 。美国 ASHRAE170-2017 标准《医疗设施通风》中规定^[4] 手术室的送风口每边要比手术台面的每边大 0.3m 到 0.45m (送风面积约为 $1.2\text{m} \times 2.4\text{m} \sim 1.5\text{m} \times 2.7\text{m}$), 送风速度为 $0.127 \sim 0.178\text{m/s}$ 。

1 现有洁净手术室送风装置的不足与对策

1.1 洁净手术室层流送风装置的不足

层流送风装置应有两大基本功能, 一是将无尘无菌空气迅速置换保护区内所有污染空气, 确保手术部位洁净无菌; 二是防止层流外侧的不太干净的空气渗入保护区内。尽管层流送风装置已被普遍使用, 但是在实际使用中暴露出 2 大不足:

1) 层流送风抗干扰差 由于洁净手术室普遍采用局部送风装置, 送出高洁净度层流气流, 送风装

置的周边的较污染的空气会被不断地引射到层流气流中, 使得洁净气流形成的洁净无菌区域缩小。局部层流断面风速不断减小, 易受周围气流干扰。另外还易受送风温度与室内空气的温度差的影响。有时会使无菌区域缩小。有时会难以到达工作面。无法保证手术区高度无菌无尘区域的要求。在手术过程的实时测定中, 常常会发现 I 级洁净手术室的送风装置实际形成的仅仅是 III 级洁净手术室的无菌无尘区域。

2) 送风温湿度无法同时满足医患 由于手术室的局部层流送风是以同一温湿度、同一风速送出, 而送风温度是优先满足手术人员的舒适度为前提, 以提高手术效率。手术小组人员穿着全套无菌服、工作强度较大, 需要的温度与湿度较低, 风速偏高。这样的送风温度往往易使得手术患者温度偏低, 甚至出现低温症。处在患者头部的麻醉医生也会感到冷, 有吹风感, 不舒适。

1.2 提高洁净手术室层流送风装置性能传统对策

为了提高送风装置层流的抗干扰性, 保证送风质量, 一般采用以下三种对策:

1) 在手术室送风装置四周添加较高的围挡, 有的围挡甚至高达 1m , 保护送风气流能平稳送下来, 这种围挡也被称为稳流器, 但对手术小组无影灯或气塔的操作有影响, 给手术人员有压抑感。为了减少对手术人员压抑感, 实际手术室常常将围挡做得较低 (见图 1) 或将带围挡送风装置做成全透明的, 与供气桥架结合在一起 (见图 2)。

2) 送风装置四周设置窄口高速空气幕 (见图 3), 用空气幕提高送风气流抗干扰性是常用的措施, 国外公司常常在送风装置周围设置窄口高速空气幕 (见图 4)。实际手术室为避免空气幕的高速气流对手术人员的强烈的吹风感, 有的将高速空气幕向外移,



图1 四周低围挡的手术室送风装置



图4 窄口高速空气幕送风装置产品



图2 手术室带高围挡送风装置



图5 手术室内送风装置将窄口高速空气幕外移

1.3 改善手术室所有人员的热舒适性传统对策

传统手术室送风只是满足手术小组人员，无法同时满足手术患者、巡回护士和麻醉医生需求。

手术环境温度控制一般在 22°C-24°C，手术患者身上的切口使皮肤保温作用的散失，加上麻醉剂的作用。婴幼儿与年迈手术患者在手术过程中易发生低体温，即使是中青年患者全麻手术超过 3h 或一般手术超过 2h，也会出现术中低体温，对手术患者危害十分严重。围术期患者体温管理是手术护理的一个重要内容。最常用的措施就是给患者添加保温毯，根据围术期患者体温管理的要求调节保温毯的温度。其中一次性充气式保温毯对围手术期患者的体温管理较为理想（见图 6）。但有报道，泄漏的热空气会干扰层流手术区域^{[7][8]}，有可能加大手术部位感染。至于麻醉医生、巡回护士只能多穿些衣服。

围术期患者的体温管理另一项要求是手术过程

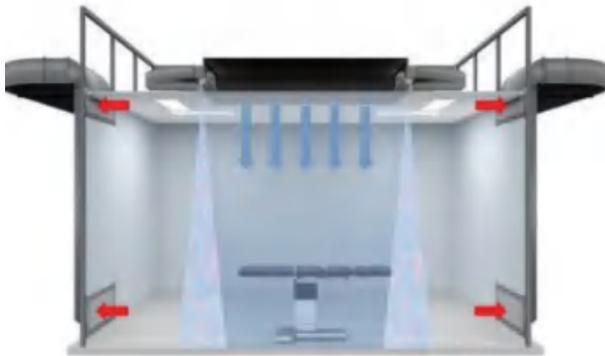


图3 设置窄口高速空气幕的送风装置

避开手术人员，这样扩大了中间的主送风气流面积（见图 4），或中心区域出现湍流（见图 5）。依据我们的研究成果（沈晋明 1981），高速气流由于其强烈的引射作用，不仅干扰了中心的层流气流，而且中心送风气流由于被大量引射，被扰动，使得中心气流速度不断减少，送风气流质量下降。

3) 还有的要求采用等温送风的送风装置 在手术室送风装置在围手术期内采用等温送风来保证洁净气流不收缩，免受送风温差对洁净气流的干扰，但对抗动态干扰的作用不大^[6]。另外，手术室的热湿负荷还需要采用其他手段消除，会增加造价与运行费用。

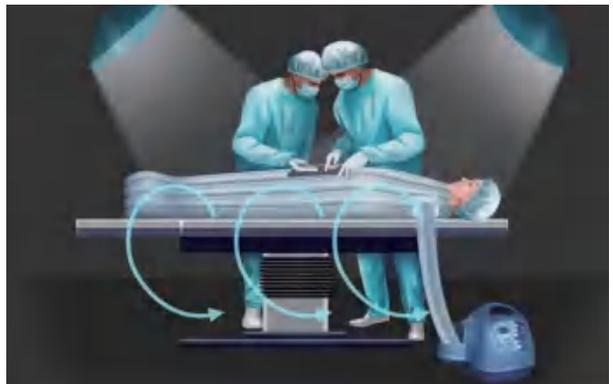


图6 围手术期患者充气式保温毯

的需求。大多数心脏外科手术需要在术中为患者建立体外循环、施行心脏手术时，利用体外循环泵临时代替患者的心脏功能。在开始建立患者体外循环时，要对患者施行低温麻醉，要求手术室快速降温，在几分钟内将患者周围空气降到 20℃ 以下，尽可能降低患者基础代谢和对组织的损伤；在撤除患者体外循环后，又要求手术室能够快速升温。在几分钟内将患者周围空气升到 25℃ 以上。过去最常用的措施就是急剧改变送风温度使整个手术室空气温度达到手术要求。不仅耗能，而且使手术室内所有的人员承受过冷（或过热）的温度。

另外，现在微创手术越来越多，有报导空调的冷风会使腔镜的温度下降，腔镜起雾变混浊，有碍于微创手术顺利实施，延长了手术时间，增加手术部位感染的风险。

2 洁净手术室送风装置的革新

如上所述，手术室送风装置的传统结构与送风方式无法同时满足层流送风气流抗干扰力及医患需求这两大问题，必须针对洁净手术室传统的送风装置的弊病，结合气幕洁净棚的科研成果^[5]，对传统的送风装置进行彻底的革新，对窄口高速空气幕进行改进。手术室送风装置设置的空气幕，不同于大空间的出入口上安装的窄口高速空气幕。既不需要配置的空气幕对门外强烈气流与频繁出入人流的隔离，也不需要气幕有足够高的速度到达地面时完全隔断外侧的干扰。手术室送风装置的气幕主要干扰是手术医护人员的操作过程，而非人员进出。而气幕有足够高的风速到达地面会带着沉降菌反弹反而不利。为此，本文提出了带宽口低速空气幕的异温异速的新型送风装置（已申请发明专利 2020113693901）。

2.1 送风装置配置宽口低速空气幕

气幕洁净棚的科研成果表明在送风装置配置宽口低速空气幕的隔离效果要比设置窄口高速空气幕好得多^[5]。从理论分析与实验验证送风气流的引射量与相邻气流速度差有关。两者气流速度差越大，引射量越大。如在主层流送风装置两侧配置宽口低速空气幕，由于空气幕与相邻气流的流速差小，不仅对送风装置空气幕外侧不太干净的空气引射量小。而且对空气幕内侧主层流气流由于相对速度差更小使得引射量更小，或者说，低速空气幕对中心的主层流气流干扰小。另外，因空气幕宽度大，使得气幕洁净气流外侧不太洁净的气流难以穿透进入中心主层流气流。空气幕的宽口与低速提高了对外抗干扰力、保证了主送风气流的品质，优于手术室传统的送风装置或采用窄口高速空气幕的送风装置。

在手术过程中对手术区域的干扰主要来自手术台两侧的手术医生，手术患者的头部是麻醉区域，麻醉医生用幕布将手术区与麻醉区隔开（见图 7）。为此，我们只要在主送风装置两侧设置宽口低速空气幕，就可以隔离了主要干扰。不用像国外在送风装置四周布置空气幕，这样减少了气幕送风量而降低了能耗。



图 7 麻醉区与手术区用幕布隔开

空气幕速度低固然引射量小，但从另一角度考虑，速度低、气流稳定性较差、影响了抗干扰效果，我们在空气幕送风装置出口内设置不大于 100mm×100mm 的格栅，将一股大气流变成多股小气流的集合，提高了隔离性。

要增强宽口低速空气幕抗干扰性能与对主送风气流保护的关键，是实现中间主送风气流与两侧空气幕气流两者的风速配比最佳。尤其是宽口低速空气幕的技术参数选定，这取决于主送风装置以及所在手术室的物理尺度与环控要求。对于《规范》规定或推荐的手术室物理尺度与合规的送风装置已经有了最佳的结构与气流配比。非标准送风装置则需要将主送风气流与两侧空气幕气流的最佳配比可由 CFD 气流模拟与实测试验验证。

2.2 宽口低速异温异速的送风装置的开发

如上所述，传统洁净手术室内采用同一送风装置的结构与同温同速的送风方式（见图 8），难以同时满足手术患者、巡回护士和麻醉医生对温湿度需求。配置空气幕也不能一味强调抗干扰力效果的最佳参数配比。在开发宽口低速异温异速送风装置时要同时兼顾医患需求与隔离效果。

我们在洁净手术室的手术台正上方设置的主层流送风装置、两侧各配置宽口低速空气幕送风装置、手术台的长边两侧下部设置若干回风口。将中间主层流送风装置与两侧宽口低速空气幕送风装置构成三个独立送风箱体，出风口均设置 HEPA 过滤器。三个独立的送风装置并列，各自送风管上均配置与压力无关的定风量装置（见图 9）。保障三个独立

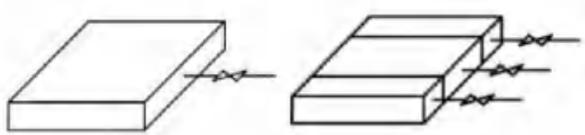


图8传统手术室单一送风装置 图9手术室异温异速三个送风装置

送风箱体是实现最佳风速的配比的前提，从根本上改变了传统手术室同一送风装置的结构与同温同速的送风方式。并将主层流送风装置与两侧宽口低速空气幕送风装置连接2台不同的空气处理机组。

送风装置的中间层流箱连接循环风空气处理机组。送入温度较高、风速较低的室内循环风气流保证了手术部位无菌无尘要求。也可按照围术期患者体温管理需求调节送风温度，避免了手术患者低温症，同时也满足了麻醉师的舒适度。对于像心脏外科、脑外科等手术，也可按需在循环风空气处理机组内单独设置直膨式盘管，急剧改变送风温度以满足手术要求的在几分钟内将患者周围空气急速降温或升温，而不需要急速改变整个手术室的温度，既节能又有效。

由于宽口低速空气幕的送风气流不仅起到隔离作用，而且要服务于手术人员。两侧的空气幕送风箱连接自采新风的空调机组，送入处理过的温度与湿度较低、风速较高的送风，送风状态可以根据室内负荷与手术人员要求来调节。在保证中心层流送风装置宽度前提下，空气幕的宽度可以大一些，以满足我国《规范》对各级洁净手术室的送风装置尺寸的规定。另外空气幕送到手术人员头部高度一般风速不会高于0.5m/s，手术人员穿戴完备的无菌服，对风速不敏感而对温度敏感，也符合了手术人员操作时的需求。

由于上述两大革新，使得宽口低速空气幕异温异速送风装置突破了传统送风装置的结构与送风方式（见图8），不仅宽口低速空气幕提高了主层流气流抗干扰性，而且异温异速三个独立送风装置能同时满足医患对温湿度的要求（见图9），尤其是可实施围手术期患者体温管理。有效维持了室内最佳的无菌、洁净、医患舒适的手术环境。

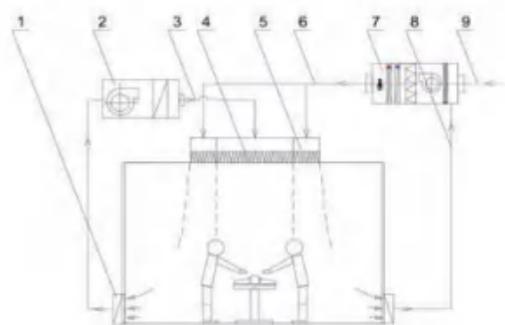
3 手术室宽口低速空气幕送风装置系统配置

用于手术室宽口低速空气幕送风装置，中间主层流送风装置服务于手术台，宽度不应小于0.8m，长度与两侧空气幕送风装置一样应为2.6m，以使送风气流能笼罩手术台，保护手术切口。因两侧宽口低速空气幕保护，中间主层流送风装置不需要太宽，送风速度不要高于0.25m/s。两侧宽口低速空气幕要

求送风速度不应高于1m/s，空气幕宽度不小于0.4m。空气幕宽度可以大一些，送风速度可相应减少一些，只要大于主层流送风装置送风速度的50%就行。

我国《规范》规定Ⅱ级洁净手术室为标准手术室，其送风装置的送风面积为1.8m×2.6m。我们以Ⅱ级洁净手术室为例，带宽口低速空气幕的异温异速的送风装置的中间主层流送风装置尺寸为1.0m×2.6m，面风速为0.22m/s。两侧的空气幕送风装置的尺寸为0.4m×2.6m，面风速为0.5m/s。送风装置及其净化空调系统的设计如图10所示。

在洁净手术室的手术台正上方设置的主层流送



1. 回风口 2. 循环机组 3. 循环风 4. 主层流送风装置
5. 空气幕送风装置 6. 送风 7. 空调机组 8. 回风 9. 新风

图10宽口低速空气幕送风装置及其净化空调系统

风装置4、两侧配置宽口低速空气幕送风装置5。手术台的长边两侧设置若干回风口1。三个独立的送风装置4与5末端设置高效空气过滤器，回风口1处设置中效过滤器。

连接手术室主层流送风装置是循环风空调机组2，将室内空气经回风口1中效过滤器的循环风3送入主层流送风装置4，将无菌无尘的送风气流笼罩手术台区域，如此不断循环。循环风空调机组配置根据手术室内实施的手术要求，一般情况下只要配置空调加热器，实施围手术期患者体温管理。对于需要急速降温或升温的心外、脑外等手术的循环机组就需要配置直膨式盘管及相关系统。

考虑到现在洁净手术部大多独立设置多功能四管制热泵机组作为冷热源。服务于两侧配置宽口低速空气幕送风装置的室外空调机组7采用一次回风再加热的处理方式，这是十分成熟的恒温恒湿控制系统^[9]。将新风9经粗中效过滤器与室内空气经回风口1中效过滤器的回风8混合后，再将经空气热湿处理的送风6，送入两侧空气幕送风装置，承担室内全部热湿负荷。两侧的空气幕送风装置无菌无尘气流笼罩着手术人员。送风装置空气幕的空调机组7由室内设置温度与湿度传感器自动控制，也可

以手术人员自行设定。

4 结语

总之,本文提出的宽口低速空气幕异温异速送风装置在手术室的手术台正上方设置三个独立的送风箱体,使三个独立送风气流实现最佳风速配比,兼顾了医患的需求与抗干扰性能。中间主层流送风装置送入洁净无菌、温度较高、风速较低的室内的循环风,在患者的手术部位形成无菌无尘的局部环境,同时满足了麻醉师的舒适度。两侧各配置宽口低速空气幕送风装置,送入温度与湿度较低、风速较高的洁净无菌送风,保护了中心主层流送风气流,同时使手术人员笼罩在温湿度较低、风速较高的洁净无菌的气流,符合了手术人员手术需求,排除了在操作中的发尘与发菌。由室内温湿度传感器控制空气幕的送风状态,消除手术室动态负荷。从根本上改变了手术室传统的同一箱体的送风装置的结构与同温同速的送风方式。

手术室带宽口低速空气幕的异温异速送风系统增强了手术室洁净送风气流抗干扰力,保证了洁净无菌区域,同时满足医患的温湿度需求。优先保证手术部位的无菌无尘的手术环境。提高手术人员与麻醉医生工作效率,便于实施围手术期患者体温管理,有利于手术实施,有助于有效地降低手术部位感染,是一项具有自主知识产权的技术。希望有意愿合作的企业与我们合作推广这项新技术。

参考文献

- [1] 沈晋明. 手术室送风天花的重要性与安全性 [J]. 中国医院建筑与装备, 2011(10):72-77
- [2] 沈晋明, 刘燕敏. GB50333-2014《医院洁净手术部建筑技术规范》编制思路 [J]. 暖通空调, 2014, 44(4): 41-47
- [3] 沈晋明, 许钟麟. 德国标准 DIN1946-4-2018 解读 [J]. 暖通空调, 2020, 50(4):40-46
- [4] 沈晋明, 保罗尼诺穆拉, 刘燕敏. 简介美国 ASHRAE 标准 170-2013 [J]. 暖通空调, 2014, 44(10):1-7
- [5] 沈晋明. 气幕洁净棚特性研究 [J]. 洁净技术, 1983(1):8-12
- [6] 刘燕敏, 胡崔健. 一种新型的洁净手术室控制——控温送风系统. 净化空调网, 公众号
- [7] Kellam MD, Dieckmann LS, Austin PN: Forced-air warming devices and the risk of surgical site infections [J]. AORN, 2013; 98:354-369
- [8] Kazuhiro Shirozu, Tetsuya Kai, Hidekazu Setoguchi, Nobuyasu Ayagaki, Sumio Hoka, Effects of Forced Air Warming on Airflow around the Operating Table [J]. Anesthesiology January, 2018, Vol. 128, 79-84
- [9] 刘燕敏, 何焰, 陈尹, 吕必金, 陈睿. 复合手术室的环境控制探讨 [J]. 中国医院建筑与装备, 2020(2):94-98

由华亭宾馆疫情再次探讨空调传播新冠病毒的风险

沈晋明, 刘燕敏

(同济大学, 上海 200092)

[摘要] 由上海华亭宾馆疫情引起对空调系统传播新冠病毒的论调又被质疑。本文引用大量学者研究结果表明至今无证据证实新冠病毒会通过空调系统传播的各国 CDC 及科研机构的共识。在分析集中空调与分散空调传播新冠病毒风险的基础上, 提出集中隔离酒店空调应确保合规风量、合理气流组织及合适空气过滤的防疫对策, 达到破坏气溶胶生成条件及其切断传播途径, 降低室内病毒浓度, 防范聚集起病毒感染剂量。而不再纠缠于空调系统会否传播新冠病毒问题, 应集中精力探索尚未发现的传播机理与途径, 完善有效阻断新冠病毒传播的应对策略。

[关键词] 空调系统; 传播; 新冠病毒; 风险

1 引言

当前, 全球正在经历新冠疫情第四波流行高峰, 奥密克戎 (Omicron) 毒株已取代德尔塔 (Delta) 毒株成为主要流行株, 具有传播隐匿、传染性强、传播速度快, 无症状者多, 早期难于发现。这波新冠疫情呈现出点多、面广、频发的特点, 防控形势复杂严峻。在疫情发展过程中, 面对一些源头不明或者传播途径不清的新冠感染者, 空调系统的传播新冠病毒的论调不时会被提起。上次西安机场疫情, 这次上海华亭宾馆疫情, 空调系统的传播新冠病毒的论调又一次被质疑。引发广泛关注、探讨与争论, 这是好事。

尽管我们早在疫情初期就再三阐明了合规的公共建筑集中式空调系统 (俗称中央空调) 不会传播新冠病毒^[1], 并一再重申疫情期间不要关停空调^{[2][3]}。因为“新冠肺炎是自限性疾病”^[4], 疾病在发展到一定程度后, 靠机体调节能够控制病情发展并逐渐恢复痊愈, 在没有严重其他并发症的情况下 (如轻症病例), 只需对症治疗或不治疗。对于疑似病例、轻症患者或密切接触者提升自身免疫力最为重要。维持治疗所需的环境是病人康复的必要条件, 尤其是室温。因此空调是抗疫的措施, 不能关停空调^[4]。

自疫情发生以来不知有多少学者探讨空调系统传播新冠病毒问题^[5], 进行了大量的调研检测、实验研究、流行病学调查等等, 有的在空调系统风口表面上^[6], 甚至在空气中检测出病毒基因材料 (核糖核酸或 RNA)^[7], 并不等于含有活病毒, 更不意味着病毒载量可以使人致病, 也无法证实病毒通过空调系统传播。至少从现实的流行病学调查可以证实, 来自不同地域、不同人种、不同气候带超 4.8 亿多的人基本上都是通过飞沫和密切接触感染被感染的, 至今也没有一例被证实通过空调通风系统传播的案例。有史以来没有哪个案例会有那么大的样

本量支撑? “至今没有证据证实新冠病毒会通过空调系统传播”这是各国 CDC 以及科研机构的共识^[5]。

2 空调系统的传播新冠病毒问题

尽管我们反复说明合规的公共建筑集中式空调系统不会传播新冠病毒, 总不能对时不时出现的质疑空调传播新冠病毒的各种臆想一而再再而三去不停地去解释。

今天就“空调传播新冠病毒”质疑, 用通俗语言去解释, 以形成大家能理解的清晰的思路。与其整天去质疑、去争论, 不如统一思想、探索真正传播途径, 准备好更为完备的应对策略。

先通俗地将空调系统分为集中空调与分散空调。集中空调就是所有空气处理设备都集中在机房内, 将空气处理后由风管送到所服务的各空调空间里。分散空调是将空气处理设备直接设置在空调房间内, 为此需要将空气处理部件、风机、冷热载体、自控与输送系统集中在一个箱体内, 如常见的风机盘管机组 / 多联机 / 分体空调等。

在疫情中如果从以下常识去推理, 难免会自然而然地怀疑到空调系统传播新冠病毒:

(1) 既然认可了新冠病毒会空气传播, 那新冠病毒就必然能经通风空调系统传播;

(2) 集中空调服务多间房间, 只要某一房间出现新冠患者, 那就会想到通过空调系统传播到所有房间, 而分散空调服务单个房间当然是最安全的;

(3) 近期出现餐馆传播链、社区活动中心传播链、棋牌馆传播链、公共交通传播链等均源自空调场所的传播;

(4) 空调场所内人与人近距离接触的感染, 却常常被误认为是空调系统传播;

(5) 确有极少数的感染案例难以用目前病毒已知的传播方式来解释, 或者说“隐匿性传播”, 空调系统自然成为病毒传播的“替罪羊”了。

新冠病毒在人与人之间传播方式，世界卫生组织 2021 年 4 月 30 日更新版中有较为详细表明“新冠病毒主要在彼此有密切（通常在 1 米以内）接触的人之间传播。当含有病毒的气溶胶或飞沫被人吸入或直接与人的眼、鼻或口接触便可能造成感染。也可能在通风不良和 / 或拥挤的室内环境中传播，人们在这类环境中停留较长时间，能被悬浮在空气中或漂浮至 1 米以外的气溶胶感染。”^[8]。

2022 年 3 月 15 日国家卫健委发布《新型冠状病毒肺炎诊疗方案（试行第九版）》再次重申新冠病毒传播途径为^[9]：

1) 经呼吸道飞沫和密切接触传播是主要的传播途径。

2) 在相对封闭的环境中经气溶胶传播。

2.1 集中空调传播新冠病毒的风险

经呼吸道传播的病毒会形成气溶胶，也必然会通过空气途径传输的，从飞沫短距离传输到气溶胶远距离传输，但不是传播。为什么气溶胶不会成为主要的传播方式？关键在于病毒在空气途径传输过程中是否能聚集起达到病毒的感染剂量、可否维持足够长的悬浮时间，从而达到感染的结果。一般情况下很难，在室外几乎不可能。只能在通风不良、人员密度高的相对封闭室内环境中才有可能聚集高浓度、长时悬浮，才有可能出现气溶胶传播的风险。

同样道理，通风空调系统作为病毒传输途径总是存在，关键在于病毒通过空调系统会不会增加病毒的数量，病毒通过空调系统送出的空气中能不能达到病毒的感染剂量，这才值得我们应该客观分析的。而不应该时时刻刻纠缠于新冠病毒是否经通风空调系统传输，一有不明传播案例就让空调系统承担责任。

首先空调系统会不会增加病毒的数量。不合规的空调系统有可能传播细菌，如军团菌；有可能传播霉菌，如在医疗环境中曲霉菌；但能传播病毒的案例极少，除非这病毒感染剂量很低。因为在设计不佳、施工不良、运维不善的空调系统，会在系统或空调机组内积尘积水，为细菌或霉菌滋生繁殖创造了条件，或者说空调系统有可能使细菌或霉菌数量增加。而病毒的生长繁殖方式是依赖于生物的活细胞、寄生在活细胞内、利用宿主细胞的营养物质来自主地复制自身的 DNA 或 RNA、蛋白质等生命组成物质的微小生命体。可见病毒是不可能是在空调系统内生长繁殖。病毒是低等的微生物，其承受空调处理过程中加热、加湿、冷却、除湿的能力要比细菌与霉菌差得多。这就是说病毒通过空调系统不可能会增加其数量，只可能减少。

其次，集中式空调系统送风能不能达到病毒的感染剂量。从常识上理解集中空调系统服务于多个空间，只要其中有一空间出现新冠肺炎患者，病菌就会通过空调系统传播到系统涉及的多个空间。出于常识推理，疫情一开始人们就必然会防范集中空调系统传播，停开空调系统或关闭系统回风似乎是必然的措施。而对服务于独立空间的分散式空调却被认为是安全的。

我们通俗地分析一下，在一般公共场所内一旦某空间中出现感染者（毕竟是少数），的确会不断地产生携带病毒的飞沫和气溶胶。但会被绝大多数未感染者的呼出空气以及进入的新风持续地稀释。即使含有病毒的室内空气被吸入空调系统，其浓度不会高。不要说病毒经过风机高速旋转加压、经过多级过滤、不同热湿处理的部件等空气处理过程还尚存多少，进入系统的新冠病毒又会被系统所有服务空间的大量回风以及进入系统的合规的新风所稀释，几乎没有可能使病毒通过空调系统再进入所有服务的空间的送风还会达到感染剂量，更不用说送风气流中含有的病毒在流动过程中不断与周围空气混合，进入呼吸区高度的剂量必定更低。

合规的集中式空调系统不仅不会传播新冠病毒，而且因为集中式空调系统有能力设置高压头大风量风机、高性能的空气过滤器、高效率的热湿处理部件、合规的新风量、集中排风以及在室内可合理布置送风回风口与压力控制，可以实现合规的新风量、合理的气流组织与合适的空气过滤器，因此集中空调比起常规的风机盘管 / 多联机 / 分体空调机等分散空调具有更强的抗疫能力^[10]。

当然，对于救治新冠肺炎患者的 ICU、隔离病房、手术室等医疗科室由于病人直接呼出飞沫，给病人插管、心肺复苏、强制给氧、切气管都会直接发生病菌空气传播，甚至喷发气溶胶。急救或手术过程中患者的血液、体液以及排泄物也有可能发生气溶胶。对于室内病毒浓度很高的场所，集中空调具有传播的风险，为此各国的规范、标准与指南等文件均规定采用全新风全排风系统，在排风口设置能阻隔性除去病毒的高效过滤器。

2.2 分散空调传播新冠病毒的风险

风机盘管机组 / 多联机 / 分体空调等分散空调室内独立设置，自室回风，从常识理解是最安全的。但分散空调由于是单元式，体积小，却包含热湿处理、输送、自控等部件。加上室内低噪声的要求，内置风机压头不会高，风量不会大。送回风口在同一单元内，只能在回风口配置低阻低效率的空气过滤器。要么吊装在室内上部送风，上部回风，形成了上送

上回的气流分布。要么在室内置地安装下部送风，下部回风，形成了下送下回的气流分布，同时在室内引起较强的横向气流。我们最常见的是吊装式，也就是说绝大多数餐厅、棋牌室、酒吧、社区活动中心等分散空调的室内都是上送上回的气流分布。

万一室内出现新冠肺炎患者，上送上回的气流分布会使飞沫不易沉降，向上飘移，增加飘移距离与时间，不断促使飞沫液滴蒸发，飞沫粒径变小，内置的滤网除菌效率很低，病毒穿过机组，不断循环，不可能减少室内病毒数。还会出现较强的水平横向气流，增强人与人之间的气流直接流动，加大了病毒空气传播感染的风险。这较强的横向气流引发传播风险已引起国内外的高度关注^[11]。也就是说分散空调既不能降低室内病毒量，又有可能在局部聚集起感染剂量。

近期出现餐馆传播链、社区活动中心、棋牌馆传播链、公共交通传播链等。都表明由分散空调产生的不合理空调气流，是引起病毒气溶胶传播的主要原因。疫情中不时出现一些聚集性感染事件也多在分散空调的空间内，至今没有发生一例由集中空调引起的大规模感染事件。可见，设置分散空调的空间不是安全岛！

总之，在分散空调室内出现较强的水平横向气流已经成为我国疫情防控的痛点！不能让这痛点在疫情中继续痛下去！避免产生横向气流就是避免人与人近距离传播的风险，就是降低病毒生成空气传播的几率，已经成为当务之急^[12]。现在已有可实现上送下回的立柜式风机盘管机组，内置高效率回风过滤器，机组上送风接口与送风管、顶送风口相连接，实现了上送下回的气流。可配合独立处理新风直接送入室内^[12]。能有效降低发生聚集性感染风险。

3 集中隔离观测酒店的防疫对策

华亭宾馆的感染事件引发了对入境人员集中隔离观察酒店的防疫对策的讨论。集中隔离观察酒店是指重大疫情期间，临时被征用为隔离人员用于医学观察和隔离的场所。是当前疫情防控外防输入的重要措施。因此我们既不能对集中隔离观察酒店掉以轻心，也不能因为“华亭宾馆事件”将集中隔离观察酒店改造为新冠肺炎患者的隔离病房。这样会浪费大量的人力、物力与财力。

首先我国对所有入境人员严格实施“三查三排一转运”的口岸检疫措施，“三查”就是全面开展健康申明卡核查、体温监测筛查、医学巡查；“三排”就是严格实施流行病学排查、医学排查、实验室检测排查；“一转运”就是对判定的确诊病例、疑似病例、有症状人员和密切接触者“四类人员”，一

律按照有关规定移交地方联防联控机制做后续处置。这就是说入境人员入住集中隔离观察酒店前已经初步筛查了阳性患者，绝大多数入住者应该是无感染的。

其次，隔离酒店的任务应是集中隔离与医学观察。每天检测核酸，即使出现阳性患者也会及时发现，及时转运。因此集中隔离观察酒店主要是管理工作，这在广州市标准化促进会发布的《防控重大疫情酒店隔离管理服务规范》^[13]中写得很清楚。这次华亭宾馆疫情大范围爆发应该是管理上疏漏所导致。

华亭宾馆的空调设计应该是合规，配置四管制空调水系统，客房部分采用风机盘管加新风空调系统，公共区域采用风管送回风的全空气空调系统^[14]。两者的空调系统没有关联。合规的宾馆、旅馆作为集中隔离观察酒店其空调系统不需要特别改造，即使室内有些微正压，这点室内空气渗透量不会引起传染的。不大可能由空调系统引发疫情大面积爆发。问题出在原本歇业装修的华亭宾馆临时被征用为隔离酒店，前期没有按隔离酒店要求对软硬件进行检查，又临时组织起管理隔离酒店的服务队伍，难免会出现管理上疏漏。最令人担忧的出于自我臆想的、而不是从系统控制角度来考虑防疫措施。如盲目关停空调、或开大新风量、或改变排风系统、或用室内净化器替代通风等等，破坏了原设计的意图与整体平衡。但没有看到这方面的报导。

从国内外防疫经验来看，管理疏漏往往出于酒店团队的管理，餐饮服务，垃圾收集、处理与运输，室内清洁消毒，人流物流安排等方面，相关方面的感染事件也被报导的最多。同样也发生在机场、车站、冷链、快递物流上。

新西兰的严格管控隔离设施内出现过新冠病毒空气传播事件^[15]，可引起我们关注。该事件排除了所有可能引起传染的可能性，仅在全程录像中，发现隔离区同一走廊上有两间相隔较远的房间门同时打开。唯一有可能走廊横向气流将一间房间感染气溶胶传播到另一间房间。类似的事件是否在华亭宾馆隔离期间发生过。确有极少数的类似感染案例，病毒气溶胶通过建筑空间远距离传播，西安机场也许也是这种隐匿性传播。文献[16]认为病毒气溶胶有可能形成气云浮游在建筑空间里，随气流飘移，可以局部聚集起感染剂量，会比飞沫传播得更远，比气溶胶传播呈现出更强方向性与随机性。气云传播方式也许可以解释这种隐匿性传播。

如果推测属实，则集中隔离观察酒店应该要求不同区域空间之间设置气闸（缓冲间），也许是切断这种隐匿性传播途径的好方法。客房部应规定在同一走廊的客房的门不能同时开。在宾馆服务时，

客房门不能开。而且客房开门的时间不能过长。也许这些规定难以实施,或者将客房门关闭,独立设置传递窗可能好办些。

我们应该从华亭宾馆疫情事件吸取教训,加强隔离观察酒店的管理,而不要对其空调采用过度的控制措施。应关注破坏病毒空气传播条件,切断传播途径,防范聚集起病毒的感染剂量。加强隔离客房走廊的通风,避免横向气流,设置气闸,倒是简单易有效的措施。

4 结语

综上所述,在疫情中出现不明传播案例,不要再简单地认为集中空调系统传播病毒,也不要动不动就质疑空调系统存在问题。“空调系统传播病毒”不能简单而论,不是“是”与“否”的问题,这容易引起误解。新冠病毒会气溶胶传播,只能说新冠病毒有可能经通风空调系统传输。空调系统传播病毒的关键在于经空调系统会不会增加病毒的数量,由空调系统送出的空气中能不能达到病毒的感染剂量,一般情况下不可能,尤其是集中空调。但对救治重型、危重型患者的ICU、隔离病房及手术室等发生大剂量病毒的场所,是有很大的风险。这就是为什么这些场所一定要采用全新风直流系统,排风口要阻隔除菌的缘由。

由此可见,与其争论空调系统的传播新冠病毒,不如考虑破坏气溶胶生成条件,切断传播途径,降低室内病毒浓度,防范聚集起病毒的感染剂量。室内在呼吸区的病毒浓度取决于空间的大小,人员密度,活动类型,戴口罩,通风空调效果等等因素,应针对性同时采用多层次防控措施,从个人防护到整体防控。我国进入公共场所,查健康码、测体温、戴口罩这是十分有效的控制措施,最大可能减少病原进入,体现我国制度的对防疫的优越性。要理解经呼吸道飞沫和密切接触传播是主要的传播途径,做好个人防护是关键。

另外,本文还强调建筑空间:

- 合规的新风量通风量可有效稀释室内病菌浓度;
- 合理的气流分布能尽快使室内病菌沉降下来,降低悬浮菌浓度,特别要防范横向气流;
- 合适的回风过滤器减少病菌进入空调系统,防范在空调系统中积累;
- 减少人员密度,入室人员戴口罩,手消毒是降低室内浓度的有效措施,避免在室内聚集起病菌感染剂量。
- 不要长时间停留在配置分散空调的公共场所,减少暴露时间。

但愿本文能使大家理解,疫情中出现源头不明

或者传播途径不清的案例,说明我们对新冠病毒传播特性尚未完全了解,存在着许多未知信息,还需不断地探索,气云传播是值得我们深入研究的传播方式[16]。不要再纠缠于新冠病毒是否经空调系统传播问题,应集中精力努力探索尚未发现的传播机理与途径,准备好更为完备的应对策略,才能有效阻断新冠病毒传播,打好这波新冠病毒疫情的攻坚战。

参考文献

- [1] 沈晋明,刘燕敏,防控新型冠状病毒的对策应合理、合适、合规[J].暖通空调,2020,50(6):6-11
- [2] 沈晋明,刘燕敏,新型冠状病毒肺炎疫情期间公共场所集中空调使用建议, <http://www.chinaaacac.cn/chinaaacac2/news/?897.html>. [EB/OL] (2020-02-03) [2022-03-06]
- [3] 沈晋明,刘燕敏,理性认识空调,尽快实现复工复产的安全生产环境, <http://www.chinaaacac.cn/chinaaacac2/news/?900.html>. [EB/OL] (2020-02-22) [2022-03-06]
- [4] 沈晋明,刘燕敏,尽快建立合规的隔离空间的利器——全解耦集分式净化空调系统, <http://www.chinaaacac.cn/chinaaacac2/news/?899.html>. [EB/OL] (2020-02-13) [2022-03-06]
- [5] Ashraf Mimi Elsaid, Hany A. Mohamed, Gamal B. Abdelaziz, et al. A critical review of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems within the context of a global SARS-CoV-2 epidemic SARS-CoV-2, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8450051/>. [EB/OL] (2021-09-20) [2022-03-06]
- [6] Patrick F Horve, Leslie G Dietz, Mark Fretz, et al. Identification of SARS-CoV-2 RNA in healthcare heating, ventilation, and air conditioning units[J]. Indoor Air. 2021,31(6):1826-1832.
- [7] Sinan Sousan, Ming Fan, Kathryn Outlaw, et al. SARS-CoV-2 Detection in air samples from inside heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems- COVID surveillance in student dorms[J]. Am J Infect Control. 2022, 50(3): 330-335.
- [8] WHO, COVID-19 如何在人与人之间传播, <https://www.who.int/zh/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/question-and-answers-hub/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmission> [EB/OL] (2021-04-30) [2022-03-06]
- [9] 中华人民共和国中央人民政府, 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第九版), http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/15/content_5679257.htm.

[EB/OL] (2021-03-14)[2022-03-06]

[10] 沈晋明, 刘燕敏, 不仅要开好空调, 更要增强空调抗疫能力, <http://www.chinaacac.cn/chinaacac2/news/?906.html>. [EB/OL] (2020-05-19)[2022-03-06]

[11] WILLIAM BAHNFLETH, JASON DEGRAW, Reducing Airborne Infectious Aerosol Exposure. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/may2021_18-21_ieq_bahnfleth.pdf. [EB/OL] (2021-05)[2022-03-06]

[12] 沈晋明, 刘燕敏, 当务之急: 降低病毒生成空气传播的风险, <http://www.chinaacac.cn/chinaacac2/news/?985.html>. [EB/OL] (2021-08-13)[2022-03-06]

[13] 广州市标准化促进会, 防控重大疫情 酒店隔离管理服务规范 (T/GZBC X—2020) https://www.sohu.com/a/445282331_120287349. [EB/OL] (2021-01-18)[2022-03-06]

[14] 上海市建筑学会, 关于华亭宾馆疫情扩散与空调系统关系问题的专家观点, <http://www.assc.org.cn/SocietyNews/666>. [EB/OL] (2021-03-21)[2022-03-06]

[15] Fox-Lewis A, Williamson F, Harrower J, Ren X, Sonder G, McNeill A, et al. Airborne Transmission of SARS-CoV-2 Delta Variant within Tightly Monitored Isolation Facility, New Zealand (Aotearoa)[J]. *Emerging Infection Disease*. 2022;28(3):501-509.

[16] 沈晋明, 刘燕敏, 后疫情时期空调系统的防范对策, <http://www.chinaacac.cn/chinaacac2/news/?937.html>. [EB/OL] (2020-09-19)[2022-03-06]

基于人工智能手术室全过程、全方位、全信息的管监系统

沈晋明¹, 黄晓明², 张涵清²

(1. 同济大学, 上海 200092; 2. 上海益纹微理科技有限公司, 上海 201709)

[摘要] 当今, 手术器械与辅料的消毒灭菌, 医护人员个人的消毒卫生处理, 手术环境的无尘无菌控制等已经日趋完美, 手术小组的操作与在手术室内的行为已经成为手术质量与手术部位感染的主要影响。基于手术室 5G 网关技术的人工智能不仅可监控与追溯整个手术的全过程、全方位、全信息数据, 还可快速处理与储存采集到大量数据。并将来自各方面的信息在同一时间轴、在同一台设备上实时可视化展示出来、记录下来、可追溯、可分析处理, 为纠偏与规范手术人员与麻醉师在手术全过程的操作, 以及医护人员在手术室内的行为提供了强大支撑。

[关键词] 手术部位感染; 手术不良事件; 5G 技术; 人工智能; 监控与追溯

0 引言

手术室是医院对患者实施手术、治疗并担负抢救工作的重要场所。从 20 世纪后期以来, 现代手术实践进步速度加快, 正在发生一场革命。手术不断突破禁区, 手术技术的每一次突破, 都是对医疗环境控制提出了新的挑战。5G 无线手术环境控制有了新的突破^[1]。

尽管现在人工智能 (AI) 在参与围手术期管理包括术前评估和准确的风险预测, 现场手术预演, 术中管理包括插管和操作机器人, 输液装置, 监测麻醉深度以及麻醉和手术并发症的早期检测等方面已经较为成熟。

但是这些大型、深部、异物植入手术的手术部位感染越来越引起人们高度关注, 已成为手术成功一个关键因素, 是衡量外科治疗质量的重要指标。手术部位感染与不良事件发生, 轻者影响患者身心健康, 延长出院事件, 重者可能对患者带来严重的损害, 酿成严重的医疗纠纷, 给患者和医务人员带来终生的遗憾。本文将重点介绍采用基于 5G 手术室网关技术的人工智能 AI 监控系统, 改进手术操作与行为, 避免不良事件, 提高手术安全性, 最终优化手术质量和成效。

1 手术部位感染的主要因素

由于外科手术具有侵袭性、复杂性、个体化、高度依赖手术者操作技能与行为等特点, 并对手术器械、辅料以及手术环境控制提出了很高的要求。

导致手术部位感染发生的因素众多, 而且各种因素之间相互作用, 有病人自身的原因, 有环境无菌原因, 也有手术方面的原因。要评价术后感染风险的影响因素^[2], 关键要明确哪些是可控因素, 哪

些是不可控因素, 归纳如下:

(1) 与患者有关的风险因素 (不可控因素): 性别、年龄、营养状况、体重指数、糖尿病、吸烟、营养不良、身体状况、药物、感染、放疗/化疗、术前住院时间、抗生素用量与持续时间、尼古丁、类固醇等使用状况等。

(2) 与手术操作有关的风险因素 (可控因素): 手术技术 (止血、无菌操作、引流、异物植入) 与手术人员的行为与纪律, 手术前的洗澡、去毛方式、手术类型 (手术的机体组织供血程度、手术切口)、抗菌药物使用、手术持续时间、无菌技术、外科洗刷手、手术衣和布单消毒灭菌等。

(3) 手术器械物品清洁、消毒和灭菌 (可控因素): 医疗器械的清洁、消毒、灭菌的质量直接关系到医院感染的发生。若器械使用后清洁、灭菌不严, 当再次使用时, 极易造成医院感染。带入手术室的其他物品, 也必须经过相应的消毒灭菌。

(4) 手术室环境 (可控因素): 手术室空气环境的无菌与洁净程度直接影响患者的切口愈合和康复, 是引起医院感染和交叉感染的重要因素之一。如手术无净化空调系统, 手术多接台, 中间撤换布单、污物及送接患者等人流和物流引起的微粒、纤维、细菌都会污染手术室内空气。

手术部位感染涉及的因素很多 (见图 1), 可见手术部位感染是一个复杂、多变量综合作用的结果。

图 1 所示的是从感染途径的传统评价。如果按著名的事事故致因“三环”理论, 人的不安全行为、物的不安全状态和环境的不安全条件均是潜在风险因子 (见图 2)。每两环交叉处 (蓝色) 是感染潜在风险区, 而三环交叉处 (红色) 就是感染最高风

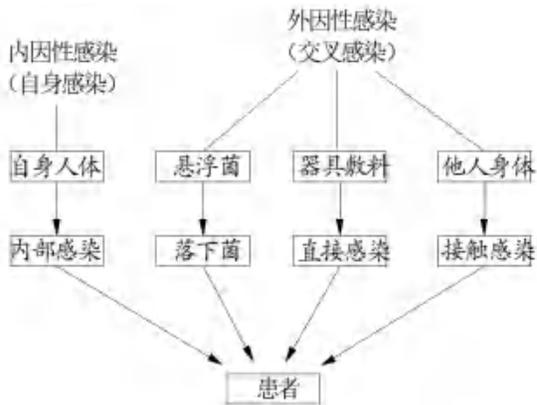


图1 手术部位感染涉及的因素

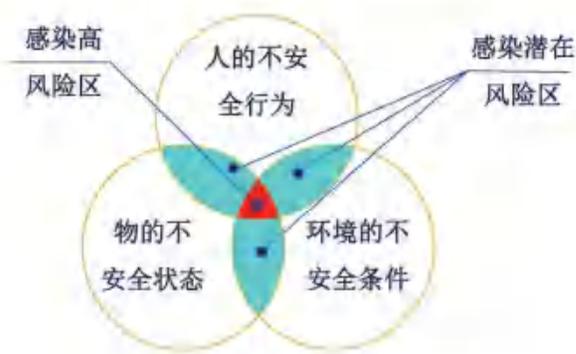


图2 事故致因“三环”理论

感染高风险区。消除或避免感染风险关键在于消除人的不安全行为、物的不安全状态和环境的不安全条件。

(1) 物的无菌状态应是重点考虑，因为手术部位感染以接触感染为主，如器械与辅料的灭菌，物的表面的清洗消毒，病人术前的准备，洗手的步骤，手套，手术服，外套等直接接触的物。

(2) 手术环境因素，如温湿度、无菌无尘程度、压差等，是控制空气途径感染的关键因素。

(3) 人的不安全行为，传统关注的重点是手术团队的无菌操作。但往往对手术过程的规范操作以及手术不良事件等不够重视。

任何事故高风险都是由人的不安全行为、物的不安全状态和环境的不安全条件三方面因素在同一时空出现而引发的。

手术发展到如今的阶段，手术器械与辅料的消毒灭菌，医护人员个人的消毒卫生处理，手术环境的无尘无菌控制等已经日趋完美，除了不可控的自身感染因素外，人们试图探索手术小组的操作与在手术室内的行为对手术质量与手术部位感染的影响^[3,4]。德国医疗卫生学会第一次用立场文件表明手术小组的纪律对手术部位感染影响与通风空调系统等同^[5]。美国帕尔马大学医院模拟人工关节置换手术中手术

人员行为对空气质量的影响，验证了手术小组的行为与室内微生物和颗粒污染相关，甚至会影响净化空调气流对手术部位控制的有效性^[6]。

现在手术部位感染越来越取决于手术人员与麻醉师在手术全过程的操作，以及医护人员在手术室内的行为，甚至手术不良事件（adverse events）。所谓医疗不良事件是由临床管理而非疾病过程造成的意外伤害，严重到足以导致患者在出院时长时间入院或暂时或永久残疾（或两者兼而有之）。造成不良事件的风险主要是人的不安全行为、不符合规范要求操作；及管理上的缺陷，管理行为和规章制度不符合规范要求。如术中器械、辅料清点不清，手术用物遗留体腔或被用过的辅料裹走；手术体位放置不当引起患者神经损伤；使用高频电刀时因护士配合有误而造成电灼伤；病理标本管理不当或丢失；术中用药错误，药物浓度、剂量不准确，输错血；因对新业务、新技术、新的医疗设备不熟悉引起的误操作，手术室开门频繁等等。

不同于过去，对于现代化手术部来说，物的因素与环境因素，如医疗、诊断装备、手术器械与辅料灭菌，人员无菌着装与手消毒，以及无菌手术环境控制可以做得很规范。几乎很少犯错误。最大可能出错的是人的因素与管理性因素。尽管现在均已制定了完善的安全操作规程与管理规章制度，但是只要“是人总会犯错误的（To Err Is Human）。”尤其是一些习惯性动作，无意识的行为在特殊条件下产生了不良后果。人的行为成为手术部位感染与不良事件的最大隐患。

2 控制手术部位感染与手术不良事件的传统手段

对于现代手术来说手术部位感染与不良事件都是致命的。造成手术部位感染与不良事件都是有隐患存在，在特殊条件（或状况）下各种隐患偶然叠加而触发（见图2）。

发生手术部位感染与不良事件的特殊条件可能是医护人员的操作失误与行为不当或手术环境条件的突然改变等等。如何发现问题及时进行干预与纠偏，国外内医院常常通过摄像机进行监控。记录手术全过程、员工的行为以及出入手术室次数与时间。这就是所谓的手术室“黑匣子”系统。

为了记录手术全过程的影像需要从不同角度多点监控。加上，如今手术室中传感器、视频、录音和数字设备的使用有了极大地增长，每时每刻以各种格式生成大量的数据，需要对这大数据去分析、评估。加上手术室众多，这给术中监控人员工作带来了巨大压力。在术后，当事人与感控人员以第三者视角通过影像资料的追溯，分析因手术人员与麻

醉师在手术全过程的不良操作，以及医护人员在手术室内的错误行为而引发的手术部位感染事件或不良事件，找出发生的原因，提出改进措施，以规范操作与行为，弥补管理上的漏洞。例如：

- (1) 规范手术操作，提高手术质量
- (2) 规范手术室内的行为，降低手术部位感染风险
- (3) 纠正错误操作与行为，制定适合的整改措施，避免不良事件发生

因此手术室“黑匣子”被称为控制手术部位感染与不良事件的利器。

3 基于人工智能的开发的管控技术

今非昔比，以往的“黑匣子”如今面临着手术环境复杂、诊疗装备众多、手术时间长、涉及的面广、数据量巨大的挑战，要求记录数据的种类和数量不断增加。数据种类从最初几个逐步发展到几百个甚至上千个，靠人实时监控已经不能胜任了。人的精力有限，无法做到一直保持效率，实时的全方面监控难以达成，更不用说根据实时监控作出判读告警。可见“黑匣子”等传统视频监控是一种被动型的系统。这种系统的确具有同步监视和远程控制的特点，尽管在事后有需要时调出影像进行事件回放，但无法在同一时间点查看相关信息（如环境参数、各种装备运行状况等）。总之，不管是实时监控、发出报警、影像回放、事后分析，都是以人的作用为关键。

真正要找出手术部位感染与不良事件的原因仅仅凭影像资料是不够，还需要依据手术类型与目标信息、微创内窥镜的视频流、医院信息系统、音频资料以及室内环境参数如室温，湿度，空气质量，压差值，室内照明的状态。还有各种报警信息，如电气报警，气体报警，空调系统报警信息等。并要求这些来自各方面的信息在同一时间轴、在同一设备上实时可视化展示出来、记录下来，真实地展现追溯的任何时刻实时场景。不得不求助于人工智能。

所谓人工智能 (Artificial Intelligence) 就是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。采用人工智能对手术全过程监控、追溯与分析是一项很有前途的创新技术。

由于我们基于 5G 研发的无线数字化手术室体系，一方面借助于 5G 低时延、大带宽和高连接的特性，另一方面利用无线数字化手术室体系所采用的 5G 网关技术。可以将视频、音频设备、内窥镜的视频、医院信息系统以及手术环境控制设备等等均可一起接入网关。5G 网关技术在人工智能上可以表现出强大功能。能在传统视频通信基础上融合图像、音频识别技术与跟踪定位技术，实现影像数据和体

征数据的移动化采集和高速传输，以及智能分析。这样我们利用无线数字化手术室体系的 5G 网关开发了一套以人工智能为核心技术的全过程、全方位、全信息手术室管控系统（已申请专利号），不必研发另一套复杂的监控、追溯、分析与管理系统的。

4 手术室 5G 网关的人工智能管控系统

管控系统基于无线数字手术室体系 5G 网关，是因为网关已经能够监控与存储了所有医疗信息与手术环境的数据，开发人工智能为核心技术的手术室管控系统重点在于人的行为。并将医疗信息 + 手术环境 + 行为的数据在同一时间轴记录与存储，便于对所有数据根据院方要求进行回溯和归集、分析、行为识别，等等。均反映了 5G 网关的强大功能。

以人工智能为核心技术的手术室监控与追溯装置主要表现在以下几个方面。

手术相关的医疗信息监控：手术室的全部环境参数（温度、湿度、洁净度、压差），医疗气体状态，器械与辅料，诊疗装备还是外围设备的工作状态和微小变动（包括设备运行日志、设备故障告警），AI 不仅可以实时监控、将各个参数在同一时间轴存储、进行分析而且能在数据异常波动的时候自动触发告警，并且能够自动处置。

手术过程监控：手术作为一个工作流程 (Workflow) 被描述为一项工作从开始到完成的一系列任务、交互或其他过程 [7]。人是手术的主要参与者，AI 通过定位手术人员的身体来检测他们的位置、识别操作手势并评估他们的姿势，可以为优化手术流程提供有用的信息。AI 使用外部视频，研究了评估手术室人员特定身体姿势的能力。每个关节的平均位置被用作二维和三维身体部位定位的定量测量。AI 可以通过监控将相位识别、器具检测和定位、人体检测和姿势评估添加到工作流识别系统中。同时对照手术操作 SOP 执行形成的所有的数据文件也同步存储，一旦 AI 发现操作不规范而引发的手术质量与手术部位感染风险立即警示，所有这些手术操作的存储视频数据可以让医务管理或护理部便捷的进行溯源。

医护人员轨迹监控：人像识别比对系统可实现人脸捕捉、定位、跟踪、轨迹记录、采集、比对等功能，能识别比对不同人员的身份，并及时向管理部门和人员发出警报信息等功能，进而从“大数据”中进行检索、比对、身份确认。在监控范围内设置一条或多条固定的界限，当人或物越过界限或执行某种非设定好的动作时，会触发报警。允许用户设定一条或多条任意形状的界限，采用单向或双向越界模式进行。由一条或数条界限改为一个或多个区域。

手术医生、器械护士、巡回护士与麻醉师进入手术区需要按照规定的轨迹活动。如果不在规定的区域、或闯入高风险区域、或不安标准轨迹行进、或引起干扰气流对层流洁净环境造成严重影响,可能引发交叉感染的风险, AI 对异常行为系统会自动告警,并对异常节点进行智能管控。

5G 网关以人工智能为核心技术可以实现手术实时过程的全域可视,全面可控,全程可溯。用人工智能将每时每刻监控生成大量的数据,快速采集、储存与处理。并将来自各方面的大量数据在同一时间轴、在同一台设备上记录下来、实时可视化展示出来、可追溯、还可以直观真实地再现当时场景每个时刻的过程,对方位与行为识别、分析与评价,自动分析可能存在的故障隐患和人员操作异常。并支持线上轻量化运营。为规范手术人员与麻醉师在手术全过程的操作,以及识别医护人员在手术室内的行为、风险评估,预警干预赋予了强大的功能。

5 结语

利用无线数字化手术室 5G 网关,本文开发的以人工智能为核心技术的可监控与追溯的管控系统,主要目标是建立一个创新的集成系统,提高了识别的灵敏度和准确性,可以对手术全过程、全方位、全信息的监控、记录、存储、可追溯、自动识别与分析潜在的不利因素,通过对大数据分析、评估,追溯,有利于规范并优化受控环境内人员行为、提高标准化操作、预防故障或事故发生,极大地提高了手术过程的安全水平。

5G 网关以人工智能为核心技术的手术全域可视,全面可控,全程可溯的管控系统可以推广其他行业。对关键工艺过程、工艺环境与人的行为监控与追溯成为许多行业发展的必然要求。获取客观、实时、全面的信息比什么都重要。而且确保数据安全和应用安全。要求数据监控与追溯系统必须是具备实时、高可靠、多用途、易存取,可追溯、低功耗。

提供了一个信息快捷同步、不可篡改的、可信的解决方案。对降低对工艺过程关键部位的污染以及避免不良事件有革命性的意义。

参考文献

- [1] 沈晋明,刘燕敏,基于 5G 技术的无线数字化手术室, <http://www.chinaacac.cn/chinaacac2/news/?981.html>. [EB/OL] (2020-05-15)[2022-03-26]
- [2] 沈晋明.绿色医院建筑与医院感染控制 [C].2010 医院建筑设计及装备国际研讨会暨展示会论文集, 2010:169-175.
- [3] Gabriel Birgand , Philippe Saliou , Jean-Christophe Lucet, et al. Influence of staff behavior on infectious risk in operating rooms: what is the evidence?[J]. *Infect Control Hosp Epidemiol*, 2015,36(1):93-106.
- [4] M L Cristina, M Sartini, E Schinca, Operating room environment and surgical site infections in arthroplasty procedures[J]. *J Prev Med Hyg*. 2016 Sep;57(3):E142-E148.
- [5] Walter Popp, Christof Alefelder, Sonja Bauer, et al. Air quality in the operating room: Surgical site infections, HVAC systems and discipline - position paper of the German Society of Hospital Hygiene (DGKH)[J]. *GMS Hygiene and Infection Control* 2019, 14(4): 4-16
- [6] Cesira Pasquarella, Carla Balocco, Maria Eugenia Colucci, et al. The Influence of Surgical Staff Behavior on Air Quality in a Conventionally Ventilated Operating Theatre during a Simulated Arthroplasty: A Case Study at the University Hospital of Parma[J]. *International Journal Environment Research Public Health*. 2020,17(2):452.
- [7] Padoy N. Machine and deep learning for workflow recognition during surgery. *Minim Invasive Ther Allied Technol*. 2019,28(2):82-90.

探讨封控小区内新冠病毒隐匿性传播

沈晋明, 刘燕敏

(同济大学, 上海 200092)

[摘要] 小区疫情封控2周多, 仍不断出现阳性感染者。除了已知的原因外, 也许还存在着隐匿性传播。既不应该用经典的传播理论简单否认, 也不应忽视它的存在, 应予以更多的探索和客观的分析。本文提出一种小概率事件却可能发生的气云传播方式, 希望能提供一条探索隐匿性传播的新思路。

[关键词] 新冠病毒疫情; 传播机理; 隐匿性传播; 气云; 对策

1 引言

上海疫情封控管理期间, 小区严格落实人员“人不流动, 足不出户”。足不出户就是不出家门, 就连走出家门到楼道都不行, 更不要说到小区露天区域、地下车库等户外空间活动。但疫情不见减轻, 每天感染人数依旧居高不下。小区封控已久, 还不断出现阳性感染者。除了已知的原因外, 也许还存在着隐匿性传播, 有的居家不出却被感染。疫情期间国内外还出现极个别难以用经典理论解释的传播案例。

近日流传新冠病毒会顺着风向传播, 使不同楼栋出现感染的现象。也有报道同楼不同单元间通过各种通道传播(见图1)^[1]等等。在疫情期间能对疫情发生的各种事件进行理性分析, 而不是哗众取宠, 无论流传是否正确, 都值得肯定。随后, 复旦大学附属华山医院感染科副主任医师王新宇接受采访, 针对这些流传表示^[2]: “因为新冠肺炎除了飞沫传播和接触传播两种途径之外, 还可以通过空气传播。而空气传播最重要的要素就是高浓度病毒颗粒的气溶胶”。目前医学界尚无明确新冠病毒能够跨楼宇传播的研究结论, 仅存在理论上微小的可能性。“这

种微小的可能性不应被夸大, 造成恐慌。”“有些小区楼间距太近, 近到一个人可以从一栋楼的窗户爬到对面另一栋楼的窗户。这种情况下, 如果两边同时开窗, 理论上存在气溶胶没有被户外空气充分稀释, 从而‘跨楼’进入另一栋楼宇的可能性。”^[3]开窗通风始终是切断空气传播这条传播途径的有效措施, 无论是世界卫生组织还是我国的防疫政策, 都一直建议大家多开窗、多通风。”这些心平气和的解释与探讨更值得称赞。

在目前防控形势下, 居家不接触外人, 直接飞沫传播几乎不可能。居民对物表的接触感染十分注意, 无论接触外来物品、或楼内建筑通道表面, 都戴口罩, 回家立即洗手消毒。那么只有病毒空气传播了, 其最大困惑在于病毒远距离传播还能维持足够感染剂量与活性。如去年发生异楼窗户对窗户之间的跨楼传播^[3]; 今年西安机场、华亭宾馆热点传播事件^[4], 发生在不同功能区域之间的远距离传播, 尽管两区域的独立通风空调系统互不相关; 同楼不同居室间传播案例也有不少报导, 等等。这种隐匿性、甚至诡异的传播, 不应简单地去否认, 也许是给人们思维启迪或探索机遇, 更应值得关注与探索。

2 探讨小区病毒隐匿性传播

对呼吸道传播病菌来说, 空气传输途径总是存在的。无论建筑内楼道还是水、电、风管道及其安装缝隙, 无论沿大楼外墙传输还是楼间传输都是传输途径。关键在于病毒在空气传输过程“远距离飘移及维持感染剂量与活性”。即使居室内感染者呼出病毒, 只要通风合理有效, 室内病毒浓度通常不会高, 除非在通风较差、空间狭小且感染患者多的居室。向楼内外传输的理应是室内病毒浓度, 而不是感染者的直接呼气, 况且飞沫也传不远, 要么感染者故意对着通道吼叫传毒。即使在通道内病毒随气流传播, 但因其扩散性能好, 而会很快被四周空气不断稀释, 浓度下降; 如病毒飘向室外, 在空气中受到温度、湿度、阳光(紫外线)等因素影响,

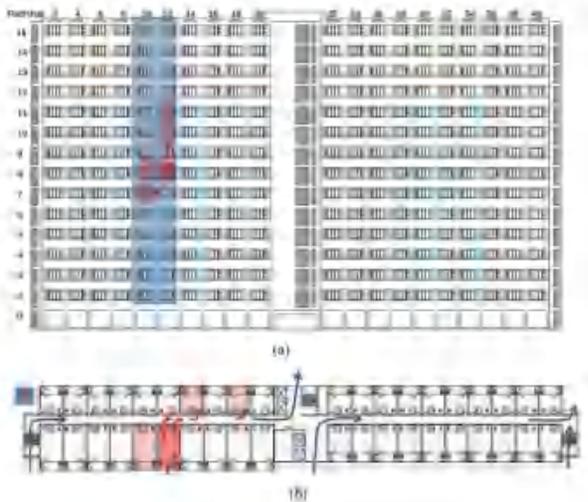


图1 同楼不同居室间的传播^[1]

活力会很快衰竭。即使有可能发生异楼对窗跨楼传播，传播几率也很低。因此按经典的病毒飞沫与空气传播“非此即彼”的思维方法来探讨是无法解决隐性传播问题的。

新冠病毒疫情中，确有极少数的隐匿的感染案例是由病毒气溶胶通过建筑空间远距离传播。集中式通风空调系统几乎不可能传播病毒，但大楼浴厕下水道与排风管路却有可能，如香港的淘大花园^[5]。这是因为浴厕的下水道有可能成为病毒的富集地，大楼的下水道连通各居住单元的浴厕，某浴厕的下水道存水弯的水封干涸，病毒有可能会从下水道逃串。厕所排风气流有可能把污水管内带病毒的水滴进入室内引发感染（见图2），这是病毒借水雾的作用所致。保持下水道存水弯的水封是最简便的有效对策。如大楼配置集中排风管路又没有末端排风机（所谓自然排风），某浴厕的排风会倒灌到未开排风机的另一浴厕内，引起传播。这类似于大楼厨房集中排烟气通道会产生所谓“串烟”的问题，但未见大楼厨房集中排烟气通道因“串烟”引起病毒传播的报导。

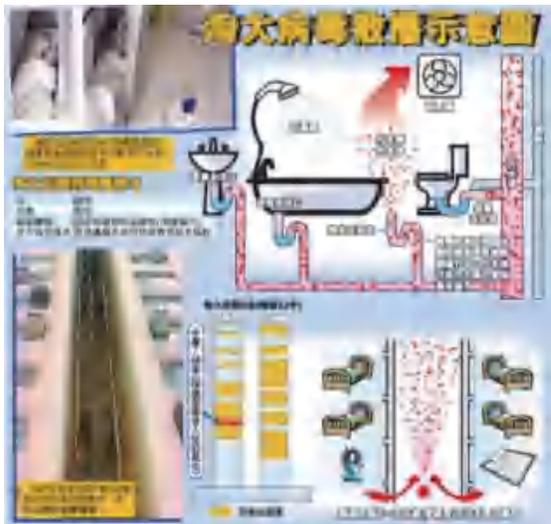


图2 香港淘大花园 SARS 病毒散播示意图
(引自“决胜非典_香港的十个瞬间”)

如果举一个不恰当例子，沙尘暴来势汹汹但传输距离不大，扩散较快，持续时间不长。而雾霾却可横跨千里传输，久久飘浮在上空。就是因为伴随着霾的发生同时雾产生。细尘被大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的气溶胶所裹挟，雾霾这种颗粒聚集集体才有可能随着气流飘移千里很难扩散，造成的危害更大。说明颗粒与水雾聚合会使传输能力大大增强。

感染者呼气有没有可能出现类似现象？

3 气云——新的传播方式

感染者呼出的病毒总是被裹在唾液或粘液液滴中，呼出飞沫与微粒的粒径范围很大从小于 $1\mu\text{m}$ 至大于 $100\mu\text{m}$ ，在空气中保持悬浮的能力不仅取决于粒径大小与形态，还取决于被呼出速度以及周围的空气状态。来自肺部温暖、潮湿的呼气在较冷环境内容易形成雾气，国外称之为气体云（gas cloud），是多相体（multiphase）并得到实验的验证^[6]。一旦形成气体云（见图3），由于云中所含液滴的蒸发的时间比孤粒液滴的时间长得多，液滴的寿命可以大大延长 1000 倍，从几分之一秒延长到几分钟。与孤粒呼气液滴相比，由于浮游在空中的云被同样动量的气流推进的距离要远得多，且不容易沉降。气体云的形成取决于患者个体生理（如呼气量大，频率高，呼出速度大，讲话飞沫多等）和环境条件的各种组合（如温度、湿度和气流）。而飞沫中不同粒径的液滴沉降或蒸发的速率不仅取决于自身的大小，还取决于气流的湍流程度和速度，以及周围环境的特性。这气体云还会捕获呼气而扩大^[6]。

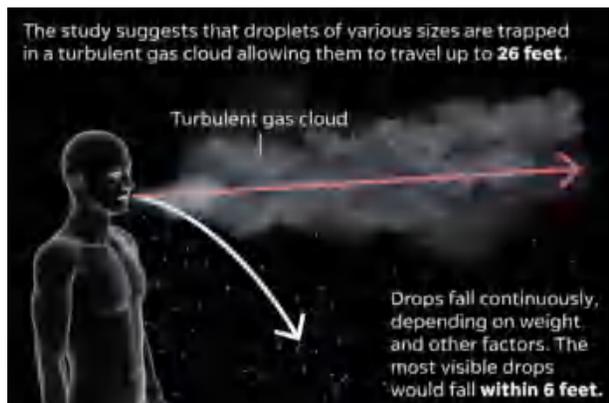


图3 气云模拟及传播特性

气体云（Gas cloud）强调的是以个人呼气成分为主。文献 [7] 提及的是气溶胶云（Aerosol cloud，简称气云）与气体云不同，是个人呼气与环境内液粒、尘埃和气体形成了多相体，强调环境因素。有时可见，有时不可见。气云是在特定的环境中形成，如室内人员多，通风较差，空气中含有人的呼出物和体表分泌物（如汗味）多，相对湿度大等因素，容易局部聚集形成气云。新冠病毒是 RNA 病毒，有脂质外膜，如果厨房排烟不佳，高脂肪高蛋白的菜肴多，室内油脂与蛋白含量高（油腻气味）。只要含有脂肪颗粒形成的气云就很难短时消除，新型冠状病毒很难死亡。这也许是什么疫情中聚集性传播总是与高级海鲜与肉类有关，室内传播常常会发生在餐厅。

总之，气云也许是尚未观察到的新的传播方式^[7]。有可能在空间局部较长时间内保持最低感染剂量与

活性，不像飞沫传播不远，又不像空气传播扩散性好方向性差。气云跟随气流性能好，且随气流传播的途径与方向性清晰，即使微风也可飘移很远。

表 1 反映了飞沫传播、气云传播与空气传播三种传播方式的不同特性^[7]。

表 1 三种传播方式与特性^[7]

传播方式	飞沫传播	气溶胶云传播	空气传播
形态	液滴	云雾状	在空气中形成气态分散体系
粒径范围	≥10μm	1μm 至 10μm	≤1μm
气流跟随性	较差，在移动过程中下降	被气流推动下飘移	很好，还随湍流脉动横向扩散
病毒扩散性	还没有扩散	扩散性差，可聚集	扩散性好，浓度下降快
可感染剂量	存在	有可能局部达到	整个空间内难以达到
传播距离	不到 2m	远距离长时间传输	一般室内尺度范围内
产生条件	感染者直接呼出	在封闭、拥挤、通风不良、污染的场所	飞沫不断蒸发形成的液核气溶胶

如果说在上海“新冠病毒会顺着风向传播，使不同楼栋出现感染”，在香港的淘大花园也出现类似现象，E 楼是感染楼，处在主导风方向的 B 楼和 C 楼被感染的人最多，临近其他大楼也出现被感染（见图 4）。问题在于病毒随主导风气流传播，方向性很强，而且传播距离那么远还能维持感染剂量与活性。由于飞沫传播不远，空气传播因扩散使得病毒也很快被稀释，传播面会很广，不可能有明显的传播方向。如假设在室内形成的气云被飘到室外，气云局部聚集起的病毒感染剂量，不易蒸发，随风飘移，会呈现出较强的方向性。在特定的气象条件下如阴天、低气压、微风、早晚、是有可能发生传播的。

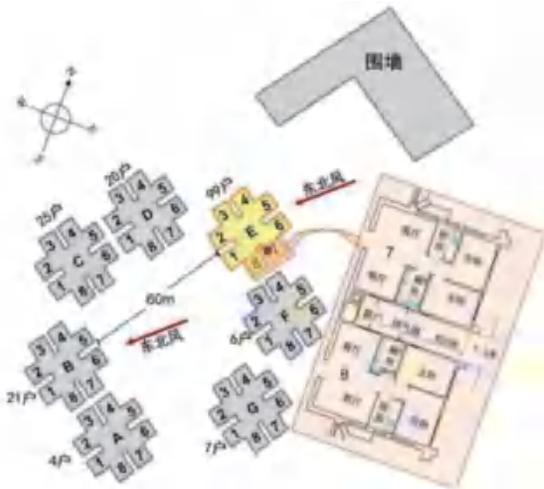


图 4 香港淘大花园不同大楼间出现的感染^[8]

同样形成气云的病毒，只要有合适的气流，气云（而不是感染患者居室的浓度）就会通过建筑内各种空间、缝隙（见图 1b）远距离传播，这种隐性传播值得注意，且发生多次。推测西安机场、华亭宾馆也是气云跨不同功能区域远距离传播 [4]。如果病毒空气传播，无论楼内风道，还是风、水、电管道及其缝隙传播是室内浓度，距离稍远就不可能维持病毒感染剂量与活性。疫情期间各国对病毒感染发生地的通排风管道进行大量的检测，大多无果而终。即使有的在通排风的风口表面上，甚至在空气中检测出病毒基因材料（核糖核酸或 RNA），并不等于含有活病毒，更不意味着病毒载量可以使人致病，难以得出明确的结论，最后不了了之。

现在居住建筑大多是大开口窗户（见图 1a），常常在自然状态下会形成窗户的下部进入较冷的风、上部排出较暖的风（见图 5）。如大楼低层有感染者的住户浴厕排风扇外墙排风，有可能沿着外墙经上层或附近住户的外窗进入室内引起传播。在特定的气象条件下，感染者住户外窗也有可能发生如图 1a 的传播，即所谓的“沿墙爬楼传播”。

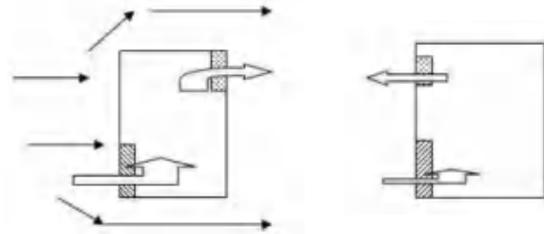


图 5 在自然状态下通风

（左图是风压作用，右图是热压作用）

文献 [9] 对“沿墙爬楼传播”进行了深入研究，认为在无风天（小风速），从下一层窗户上部逸出的较暖气流与室外新风混合后，部分气流会再经上一层窗户下部进入（如图 6 所示）。同样，如果是逸出是室内浓度，经新风混合稀释，再进入上一层很难达到感染剂量，只有气云传播才有可能。文献 9 还提出了另一个假设，对于高层住宅楼，当浮力效应占主导时，在不同楼层居住单元间存在一个“串联”流动，从底层开始，一层一层向上传播，直至顶层（图 6）。图 6 是经文献 9 修改，更为形象化。如果考虑风压的作用，就会知道气流会从大楼迎风面的居室流向背风面的居室（见图 1b）。但对高层住宅大楼来说楼梯间的“拔风”效应不应忽视。楼梯间门应随时关闭，避免拔风引起从居室到走廊的气流流动（见图 1b）引发传播，也可能引发“沿墙爬楼传播”。

4 结语与建议

除了已知原因外，疫情期间封控小区发生新冠

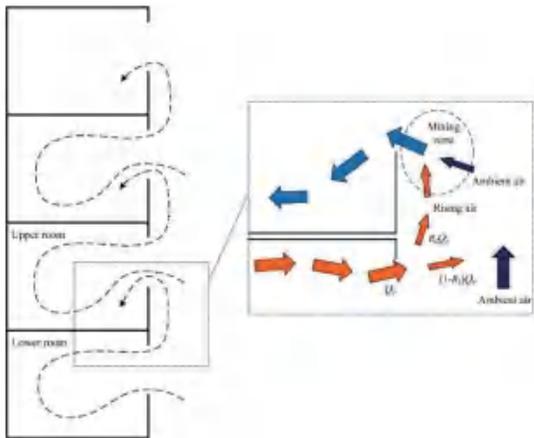


图6 在浮力作用下，居住单元气溶胶传输路线^[10]

病毒隐匿性传播，要客观分析。各国在疫情中也有类似隐匿性、甚至诡异的传播的报道，不应该用经典的理论简单地否认，或忽视它的存在。这也许是给予我们思维启迪或探索机遇，更应值得我们关注与探索。

气云是在特定的条件下形成，在建筑空间内可能出现的气云传播，或爬楼传播，毕竟是小概率事件，尤其是在大楼之间的远距离传播几率更低，但有可能发生。气云只是我们提出一种假设，至少可以解释空气传播难以聚集起感染剂量；飞沫无法常时悬浮、远距离传播，以及一些传染的方向性强与随机性大的诡异传播案例。尽管气云得到国外实验验证，还需要大量的实地调研与检测。文献[11]给出许多防范气云形成与传播的建议。希望有关部门能重视并支持开展病毒气云传播的研究课题。

小概率事件不必引起恐慌，就像怕有交通事故而不敢出门。本轮疫情已经发生一段时间，我们已经积累了许多相关数据，应该实事求是地向人们说明奥密克戎病毒真实的特点、毒性与对人体影响，消除不必要的恐慌。《新型冠状病毒肺炎诊疗方案（试行第九版）》再次重申新冠病经呼吸道飞沫和密切接触传播是主要的传播途径。开窗通风依然是防控的最好手段。对于有感染患者的居室，应该要求感染者自觉在居室内戴口罩，以有效防止病毒散发与积累，也可开启室内净化器或家用空调除湿模式，避免室内形成气云，且居室内尽量少开窗。如果是高层住宅楼应随时保持楼梯间门的关闭。而不应去要求整个小区都关窗，即使以防万一，也只需在阴天、低气压、微风、早晚关闭主导风方向的窗户。大晴天、强对流天气是不可能出现小区楼间的传播。

除非这病毒真正是以空气传播为主，且感染剂量很低，像麻疹一样，那现在的管控措施都无效，唯有依靠个人防护和研发有效疫苗了。

参考文献

- [1] 暖通空调，足不出户，感染奥密克戎的风险有多大？<https://mp.weixin.qq.com/s/VV6r7apjPAu9DYAdDUviAg>, [EB/OL] (2022-04-13) [2022-04-14]
- [2] 文汇报，周围有“阳”楼，病毒会随风飘进我家吗？专家回应，<https://mp.weixin.qq.com/s/6aQQ8DAWqSvDSqBv3Fnyw>, [EB/OL] (2022-04-12)[2022-04-14]
- [3] 澎湃新闻，中疾控周报：新冠病毒能在“握手楼”中通过气溶胶传播，<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1708703347453145196&wfr=spider&for=pc>. [EB/OL](2021-08-21) [2022-04-14]
- [4] 沈晋明，刘燕敏，由华亭宾馆疫情再次探讨空调传播新冠病毒的风险，<http://www.chinaacac.cn/chinaacac2/news/?990.html>. [EB/OL] (2022-03-22)[2022-04-14]
- [5] 梁挺雄，SARS 在香港的流行病学调查与防治 [J]. 中华医学杂志, 2003, 83(11): 10-13
- [6] Lydia Bourouiba, Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19 JAMA. 2020 May 12; 323(18): 1837-1838.
- [7] 沈晋明，刘燕敏，新冠病毒存在着新的传播方式吗？<http://www.chinaacac.cn/chinaacac2/news/?921.html>. [EB/OL] (2020-07-20)[2022-04-14]
- [8] Talky 博客，又说新冠病毒气溶胶传播：2003 年香港淘大花园爆发非典疫情，<https://blog.sciencenet.cn/blog-609047-1227240.html>. [EB/OL] (2022-04-07) [2022-04-14]
- [9] Niu J, Tung T C W, On-site quantification of re-entry ration of ventilation exhausts in multi-family residential buildings and implications [J]. Indoor Air, 2007, 18: 12-26
- [10] Mao Jiachen, Gao Naiping, Airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings: a review [J]. Building and Environment, 2015, 94(12): 516-531
- [11] 沈晋明，刘燕敏. 探讨新冠病毒传播方式及防控对策 [J]. 暖通空调, 2021, 51(10): 69-76

探讨手术室宽口低速送风装置最佳配置

沈彦利¹, 陈玲¹, 周乐¹, 刘燕敏², 沈晋明²

(1. 美埃(中国)环境科技股份有限公司, 南京 211111; 2. 同济大学, 上海 200092)

[摘要] 手术室宽口低速送风装置是一种全新的异温异速的送风形式, 有许多不确定因素。本文借用计算流体动力学 CFD 仿真手术室宽口低速送风装置的流场与温度场, 分析两侧气幕与主层流送风在不同的尺度的配置、以及异温异速不同组合的流场与温度场对手术人员及患者舒适性的影响, 探讨手术室宽口低速送风装置的最佳配置。

[关键词] 手术室发展; 送风装置; 宽口空气幕; 流场; 温度场; 最佳配置

0 引言

传统理论认为洁净手术室送风装置应有两大基本功能, 一是将无尘无菌空气迅速置换手术区内所有污染空气, 确保手术部位洁净无菌; 二是防止送风气流外侧的不太干净的空气渗入手术区内^[1]。同样, 手术室送风温湿度控制主要是保障手术医生在舒适环境下进行手术, 而不是患者。由于传统手术室送风装置的送风是采用同一温度同一速度送出, 难以提高送风气流的抗干扰能力, 又无法避免患者可能会出现低温症。

手术室宽口低速气幕送风装置就是针对传统送风装置不足开发的一种新型送风方式^[1], 送风装置两侧采用宽口低速空气幕保护中间主层流送风气流, 由于采用异温异速的送风方式, 除了满足无尘无菌的控制外, 两侧采用宽口低速空气幕笼罩手术医生满足其舒适性需求, 中间主层流送风气流覆盖患者, 参与患者手术过程的体温管理, 防止出现低温症^[2]。

由于手术室宽口低速气幕送风装置是由 3 个送风箱体造成, 两侧气幕与主层流送风可有不同的尺度、以及异温异速也有不同组合。如何探讨手术室宽口低速气幕送风装置的最佳配置, 需要借用计算流体动力学 CFD 仿真手术室宽口低速送风装置不同组合的流场与温度场, 分析对手术人员及患者舒适性的影响, 以探讨手术室宽口低速送风装置的最佳配置。

1 手术室宽口低速空气幕送风装置系统配置最佳化

1.1 评价指标

手术室宽口低速空气幕送风装置系统是一种新的送风方式, 在实施前有许多不确定因素。要评价宽口低速空气幕送风装置的两侧空气幕与中间主层流送风装置不同宽度的布局、不同送风速度的配置效果, 需要有不同的评价指标。本文提出以下的评价指标:

- 1) 手术医生被空气幕气流所笼罩程度;
- 2) 手术患者受无菌无尘气流覆盖保护程度; 以

及受到空气幕气流影响程度;

3) 手术医生所处的流场, 所受流速范围是否处于舒适性范围;

4) 手术医生所处的温度场, 所处温度范围是否处于舒适性范围;

5) 患者所处的流场, 所受流速范围是否处于体温管理范围;

6) 患者所处的温度场, 所受温度范围是否满足体温管理范围。

需要借用评价指标对 CFD 仿真在不同配置下的真实流场与温度场进行评价, 分析各因素对手术医生与患者的影响, 使宽口低速空气幕送风装置的配置最佳化。

1.2 仿真模型

宽口低速空气幕送风装置的仿真模型取其对称的一半, 仿真结果可用镜面效应反映宽口低速空气幕送风装置送风气流的整体效果, 仿真模型设置如下图 1 所示:

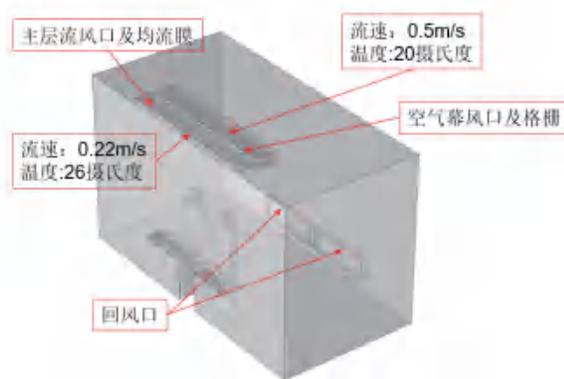


图 1 手术室宽口低速空气幕送风装置配置

本仿真模型为 II 级洁净手术室, 手术台正上方的送风装置面积 1.8m×2.6m。依据以往科研成果以及工程实施经验, 主层流送风速度为 0.22m/s, 空气幕送风速度为 0.5m/s, 手术台长边两侧的墙下布置

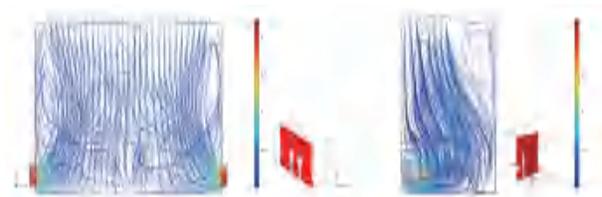
回风口，回风速度小于 2m/s。仿真模型的变化参数只是两侧的空气幕送风口宽度与主层流送风口宽度，而维持总宽度 1.8m 不变。设置的 3 种不同仿真模型参数表示如下：

表 1 3 种不同仿真模型的参数表

方案序号	送风装置尺寸 m	主送风口尺寸 mm	空气幕风口尺寸 mm	总送风量 m ³ /h
1	1.8×2.6	700	550	6589.44
2	1.8×2.6	800	500	6327.36
3	1.8×2.6	1000	400	5803.2

1.3 模拟结果的分析与评价

尽管空气幕设定的宽度有 3 种不同宽度，但对仿真模型的气流流型影响不大，符合 GB50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》要求的手术室上送下回的气流流型（见图 2~14）。



截取的纵向截面 截取的横向截面
图 2 气流流线及速度场



截面速度分布 截面温度分布 温度等值面分布
图 3 主层流送风装置宽度为 700mm 的仿真横截面

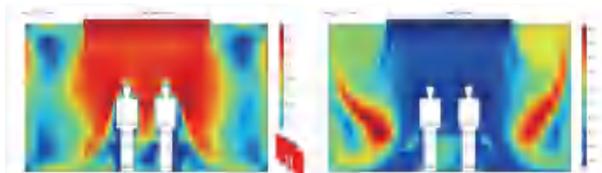


图 4 主层流送风装置宽度为 700mm 的手术医生站位仿真纵截面

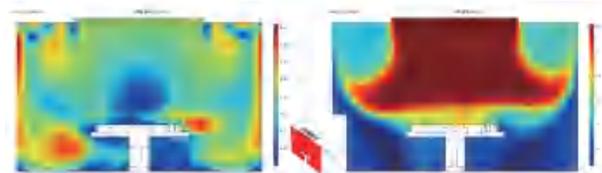


图 5 主层流送风装置宽度为 700mm 的患者躺位仿真纵截面

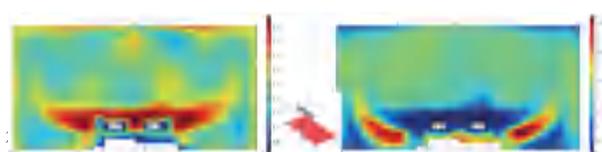


图 6 主层流送风装置宽度为 700mm 的患者躺位仿真水平截面



截面速度分布 截面温度分布 温度等值面分布
图 7 主层流送风装置宽度为 800mm 的仿真横截面

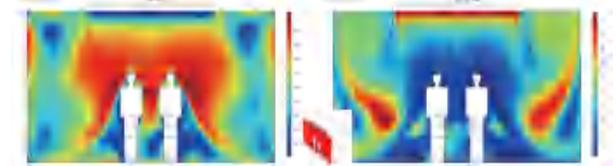


图 8 主层流送风装置宽度为 800mm 的手术医生站位仿真纵截面

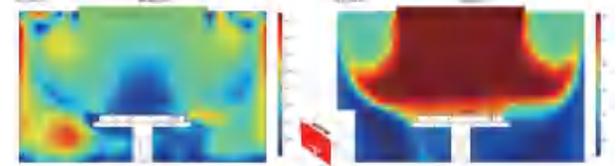


图 9 主层流送风装置宽度为 800mm 的患者躺位仿真纵截面

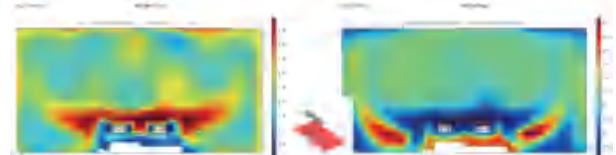
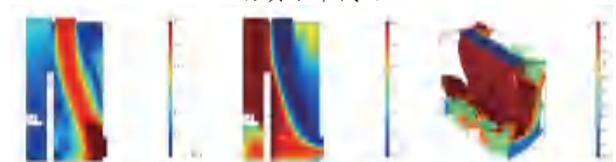


图 10 主层流送风装置宽度为 800mm 的患者躺位仿真水平截面



截面速度分布 截面温度分布 温度等值面分布
图 11 主层流送风装置宽度为 1000mm 的仿真横截面

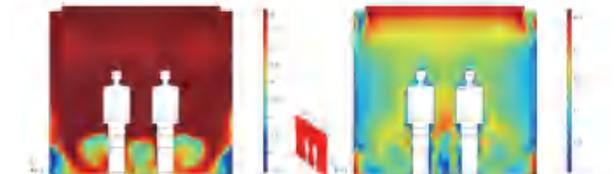


图 12 主层流送风装置宽度为 1000mm 的手术医生站位仿真纵截面

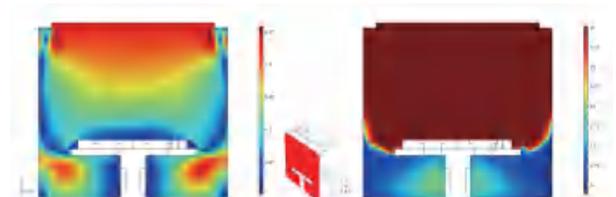


图 13 主层流送风装置宽度为 1000mm 的患者躺位仿真纵截面

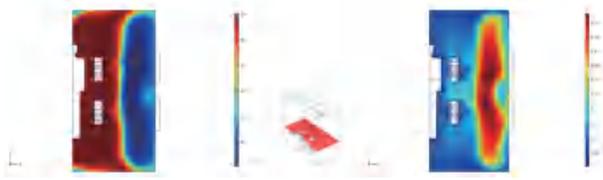


图 14 主层流送风装置宽度为 1000mm 的患者躺位
仿真水平截面

从以上设定的 3 种不同宽度主层流送风装置，分析手术医生能被空气幕气流的笼罩程度，所处的温度场与速度场对手术医生的舒适度。而手术患者能够处在较为温暖的无菌无尘气流保护，受到空气幕气流影响程度，以及所处的温度场与速度场能否避免出现低温症。不难发现中间 700mm 宽度主层流送风装置，两侧 550mm 宽度空气幕送风对手术医生也许不错，但影响到患者的舒适性。中间 1000mm 宽度主层流送风装置能保障患者的舒适与无菌，但两侧 400mm 宽度空气幕送风气流没有将手术医生完全笼罩，影响到手术人员舒适性。就兼顾手术医生与患者两者来说两侧 500mm 宽度空气幕与中间 800mm 宽度主送风口的配置是最佳的。

2 结语

总之，本文就提出的宽口低速空气幕异温异速送风装置在手术室的手术台正上方设置三个独立的送风箱体，通过 CFD 仿真使三个独立送风气流实现最佳风速配比，兼顾了医患的温湿度需求与抗干扰性能。中间主层流送风装置送入洁净无菌、温度较高、风速较低的室内的循环风，在患者的手术部位形成无菌无尘的局部环境，同时满足了麻醉师的舒适度。两侧各配置宽口低速空气幕送风装置，送入温度与湿度较低、风速较高的洁净无菌送风，保护了中心

主层流送风气流，同时使手术人员笼罩在温湿度较低、风速较高的洁净无菌的气流，符合了手术人员手术需求，排除了在操作中的发尘与发菌。由室内温湿度传感器控制空气幕的送风状态，消除手术室动态负荷。以 II 级洁净手术室为例，依据仿真结果，认为手术台正上方的送风装置面积 $1.8\text{m} \times 2.6\text{m}$ ；主层流风口宽度 800mm，送风速度为 0.22m/s；空气幕风口宽度 500mm，送风速度为 0.5m/s 的配置为最佳。这从根本上改变了手术室传统的同一箱体的送风装置的结构与同温同速的送风方式。

手术室带宽口低速空气幕的异温异速送风系统最佳配比增强了手术室洁净送风气流抗干扰力，保证了洁净无菌区域，同时满足医患的温湿度需求。优先保证手术部位的无菌无尘的手术环境。提高手术人员与麻醉医生工作效率，便于实施围手术期患者体温管理，有利于手术实施，有助于有效地降低手术部位感染。下一步将依据仿真模拟结果进行宽口低速空气幕送风装置模块化设计及产品试制，并将样机在本公司手术室样板间内安装，实地检测其气流场及温度场，来验证或修正仿真，优化产品性能，实现产品的定型设计。将成熟的宽口低速空气幕送风装置推向市场，在同时满足医患的前提下，提升我国手术环境控制品质。

参考文献

- [1] 沈晋明. 手术室送风天花的重要性与安全性 [J]. 中国医院建筑与装备, 2011(10):72-77
- [2] 刘燕敏, 沈晋明. 手术室带宽口低速空气幕的异温异速送风系统. www.chinaacac.cn/chinaacac2/news/?979.html

内镜中心空调通风的设计与反思

周磊, 李亭瞳

(浙江省建筑设计研究院, 杭州 310030)

[摘要] 医疗建筑中如何建设一个适用、经济、安全的内镜中心日益显得重要。本文结合三个不同内镜中心的设计与运营案例, 介绍了相关通风与空调系统设计情况, 并对实际运营中发现的问题进行了总结。

[关键词] 内镜中心; 空调通风; 设计

0 引言

随着现代经济和互联网的迅速发展, 现代生活节奏加快, 运动缺失, 工作压力大, 精神高度紧张, 外卖行业的便捷性, 一定程度上加剧了营养过剩, 暴饮暴食, 以上种种生活作息的不规律等均诱发消化系统、呼吸系统以及泌尿系统。随着人们健康意识的增强, 各类体检以及内窥镜检查的人数成倍的上升。

我国内窥镜微创技术开展时间较晚, 但普及速度非常快, 已广泛的应用于普外科、耳鼻喉科、妇产科、胸外科、泌尿外科、儿科等多个科室。随着内窥镜微创技术的不断成熟及适用范围的不断增加, 内窥镜微创手术已经成为消化、呼吸、泌尿、耳鼻喉等系统疾病诊断治疗中不可缺少的手术方式。随着作为医疗器械的内镜的不断发展和完善, 内镜适用的范围越来越大, 内镜中心的建设和运行日益显得重要, 如何建设一个适用、经济、美观的内镜中心, 成为医疗建筑中的一个重要的话题。

1 内镜中心的设计

内镜是内窥镜的简称, 通常将科室称为内镜中心。内镜中心是集中使用内镜对呼吸系统、泌尿系统以及消化系统为患者提供呼吸道、泌尿道、消化道等学科的诊断、治疗的综合中心场所。内镜中心的规划与发展, 须根据医院相关科室的分类、功能以及人才实际状况综合统筹。

根据需求的不同, 内镜中心可以分科布置, 也可以集中布置。一般包含检查区、候诊区、清洗消毒区、复苏区、生活办公区以及辅助功能用房区域。其中, 检查区包括胃镜、支气管镜、肠镜、膀胱镜、ERCP、胶囊内镜等。内镜应经消毒灭菌后才能使用, 内镜中心一般都设置有消毒室, 部分适于压力蒸汽灭菌的硬式内镜及耐湿、耐热的内镜附件清洗后送往中心供应消毒, 软式内镜基本在本科室内消毒灭菌。

内镜散热量不大, 约 600W, 检查治疗室对环境没有特殊要求, 通风空调系统可以采用常规的风机盘管+新风系统, 可以采用 VRF 室内机+新风系

统。考虑到内镜检查过程中, 医护人员需要一定的操作过程, 建议内镜室夏季室内的设计温度应该适当的降低 1~2°C, 其他房间无特殊要求, 可以按照舒适性要求设计。

内镜室的排风需要特别关注。支气管镜室, 产生污染物较多, 伴随有吸痰、痰液收集过程产生异味及有害气溶胶, 会增加传播冠状病毒(严重急性呼吸综合征冠状病毒和中东呼吸综合征冠状病毒)的风险, 属于感染风险高的区域, 需要严格控制, 最小换气次数不小于 12 次/h^[1], 室内维持不小于 5Pa 的负压, 直流系统, 排风经过处理后排放, 不允许返流。全新风处理可以考虑直膨新风机组或者 VRF 系统中可以拖带的小风量的新风室内机, 室内温湿度参数通过排风管路上的温湿度传感器来采集, 进而控制直膨新风机组或者 VRF 新风室内机的送风温湿度, 焓湿图如下图 1、图 2 所示, 支气管镜室的空调、

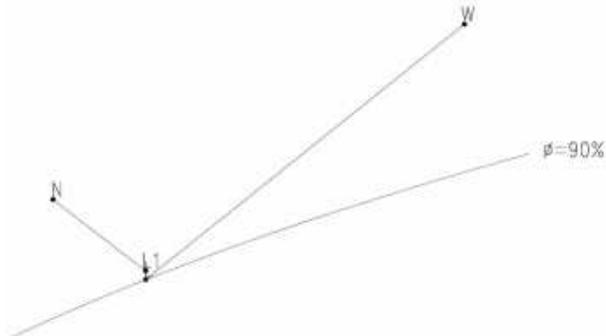


图 1 夏季焓湿图

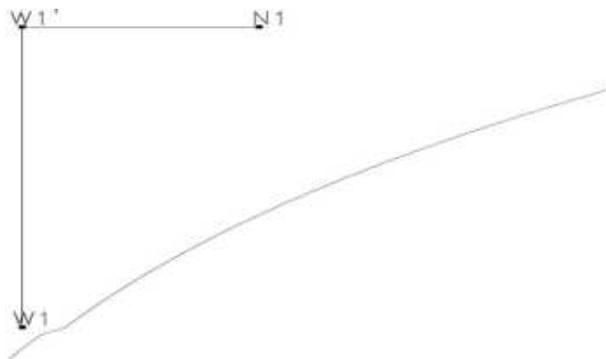


图 2 冬季焓湿图



图3 支气管镜室通风设计案例一



图4 支气管镜室通风设计案例二

通风设计如图3、图4示。排风采用带高效过滤器的无蜗壳风机。

肠镜室内臭气较重，特别是患者内出血时臭气更重，房间相对邻室应设计为负压；膀胱镜经由易感染的尿路，为避免消毒后的导管在使用过程中受邻室污染空气感染，应设计为正压。其余的镜室，一般也考虑正压，有条件时，送排风宜上送下排，如下图5所示。

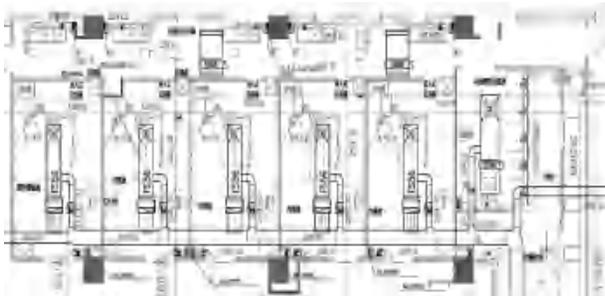


图5 内镜室通风设计案例

清洗消毒室使用的消毒剂包括邻苯二甲醛、过氧化酸、二氧化氯等溶液，这些消毒剂均有刺激性，多数可随水蒸气挥发。根据《WS 507—2016 软式内镜清洗消毒技术规范》5.3.3 条的要求，消毒室如采用机械通风，宜采取“上送下排”方式，换气次数宜 ≥ 10 次/h，最小换气次数宜达到2次/h。消毒室的发热量还是有些大，有必要设置单冷的空调末端，如下图6所示。

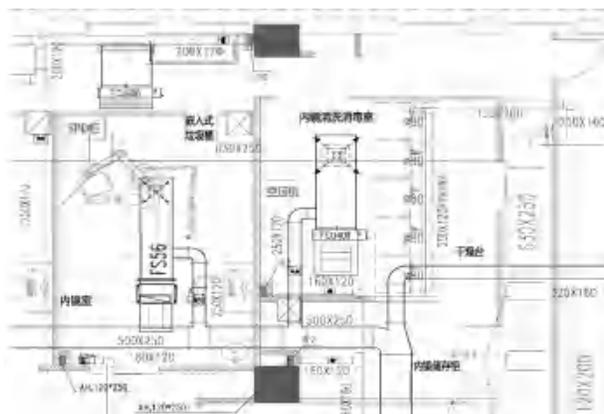


图6 内镜清洗消毒室通风设计案例

2 内镜中心的案例设计与反思

本文结合三个不同内镜中心案例的工艺平面布置，介绍一下相关通风与空调系统设计。

案例1（2017年设计，已投入运行）的工艺平面图如图7，清洗消毒室（图中的阴影区域）分为三个，就近集中设置在每排的中心区域，便于清洗。纤支镜室和隔离纤支镜室（支气管镜室）靠近南侧，集中布置。

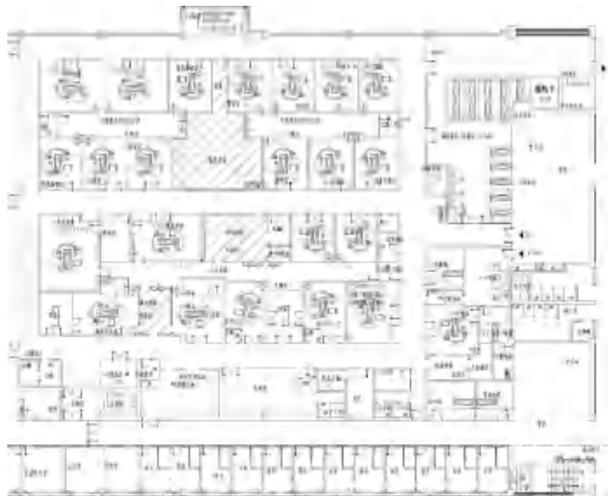


图7 内镜中心平面案例一

对应的空调通风平面图如图8，清洗消毒室的排风集中统一排放，并考虑了中效过滤吸附处理。纤支镜室和隔离纤支镜室（支气管镜室）的全新风合用了一台分体式直膨新风机组，排风合用一台排风机组，并考虑了活性炭吸附处理。其余的区域均采用VRF室内机+新风系统，采用了上排风，设置了一台排风机组，并考虑了高效过滤器过滤吸附处理。

案例2（2019年设计，已投入运行）的工艺平面图如下，清洗消毒室（图中的阴影区域）南北分

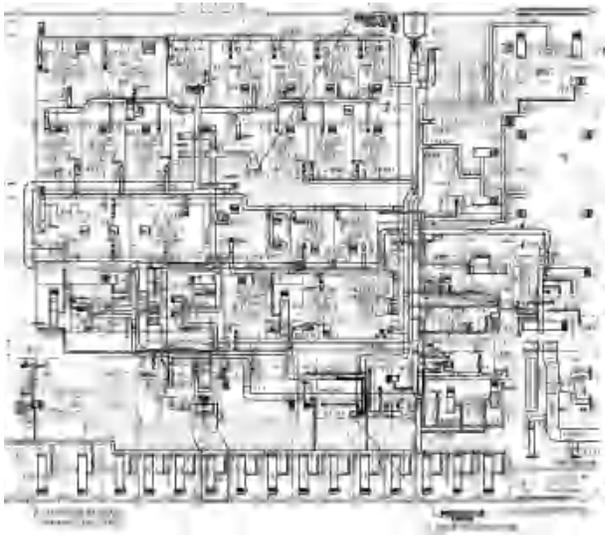


图8 内镜中心空调通风平面案例一

为两个，就近集中设置在每排镜室的右侧区域，便于清洗。两间支气管镜室靠近南侧，集中布置。

对应的空调通风平面图如图9，清洗消毒室的全自动清洗消毒机工艺排风集中统一排放，并考虑了高效过滤器过滤吸附处理；其余的采用下排风，设置了一台排风机组，并考虑了高效过滤器过滤吸附处理；清洗消毒室原设计了风机盘管制冷，在过渡季节和冬季运行，发现室内温度偏高，后续通过增设分体空调辅助降温，这是本设计的一个遗憾。两间支气管镜室的全新风分别采用了一台VRF新风室内机，排风分别设置了一台排风机组，并考虑了高效过滤器过滤吸附处理。其余的镜室采用VRF室内机+新风系统，采用了下排风，新风、排风支管上增设了压力无关性的变流量反馈蝶阀，设置了一台排风机组，并考虑了高效过滤器过滤吸附处理。其余的区域设置了一台排风机组。

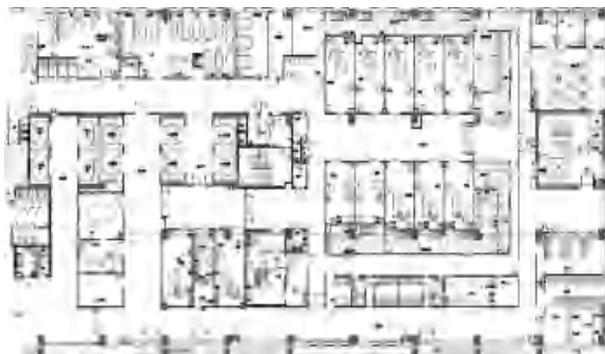


图9 内镜中心平面案例二

房间的漏风量按照式(1)^[2]计算，

$$L_l = 0.827 \# A \# \sqrt{\Delta P} \# 1.25 \# 3600 \# N \quad (1)$$

式中 A 为门的有效漏风面积， m^2 ；门缝宽度为 $0.002-0.004m$ ； ΔP 为压差， Pa ； n 为经验数值，一般取 2 ； 1.25 为不严密处附加系数， N 为门的数量。一间支气管镜室，电动门的尺寸为 1521 ，经复核理论漏风量 $260m^3/h$ ，在实际调试支气管镜的负压时，取房间的送排风差值 $300 m^3/h$ ，实测房间的压差几乎没有。现场调研，发现支气管镜房的吊顶及电动移门漏风比较大，经过更换吊顶材料，以及更换电动移门的橡胶垫的材料，效果有一些，后续如果可以彻底解决电动移门的漏风问题，负压效果会更好一些。部分镜室由于房间自身的漏风、送排风量偏小等因素，镜室的压差不明显。

案例3(2021年设计)的工艺平面图如下，清洗消毒室(图中的阴影区域)左右分为两个，就近集中设置在镜室的南侧区域，便于清洗。一间支气管介入镜室在整个内镜中心的左上角。

对应的空调通风平面图如图10，清洗消毒室的全自动清洗消毒机工艺排风集中统一排放；清洗消毒室设计了风机盘管和全年制冷的VRF室内机组成的双冷源制冷。支气管镜室的全新风采用了一台卧式新风机组(内设置初、中、高效过滤段)，排风分别设置了一台排风机组，并考虑了活性炭过滤吸附处理。ERCP房间采用了VRF室内机+新风系统，采用了上排风，其余的镜室采用风机盘管+新风系统，采用了下排风，剩余的区域采用风机盘管+新风系统，采用了上排风，总共设置了两台排风机组。其余的区域设置了一台排风机组。清洗消毒室全年制冷的室内机和ERCP的室内机共用了一台自由冷暖的VRF系统。

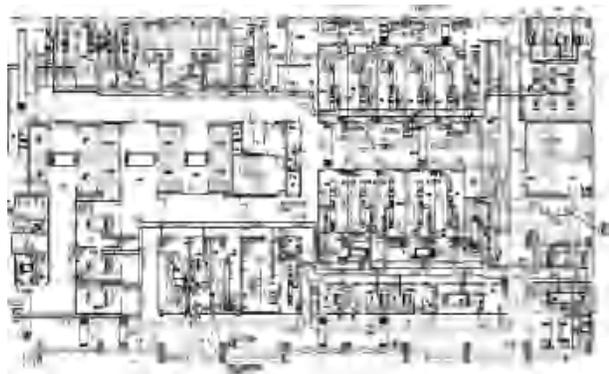


图10 内镜中心空调通风平面案例二

3 结语

上面提到的内镜中心从2017年到目前，陆续设计与运营的三个不同的案例，根据工艺需求配合设计，在实际运营中发现设计存在问题，继而指导设计的改进，在新的项目中，进一步完善设计与循环

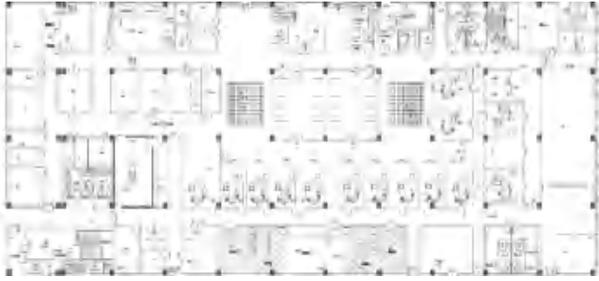


图 11 内镜中心平面案例三

例证，不断地改善和提高内镜中心的使用质量。通过上述三个实际设计案例和运行实际，得到以下的结论：

- 1) 清洗消毒室的排风需要考虑局部排风（工艺排风）和全面排风相结合，宜独立设置。室内宜设置全年制冷的空调末端。
- 2) 有负压需求的房间，比如支气管镜室等，应关注房间本身的气密性设施，与建筑专业、装饰专业配合好吊顶、电动移门的气密性加强措施。
- 3) 通过适当增加镜室的送排风量以及增设压力



图 12 内镜中心空调通风平面案例二

无关性的变流量反馈蝶阀等措施，形成稳定的压差，满足内镜科室的使用需求。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部 .GB50849-2014 传染病医院建筑设计规范 [M]. 北京：中国计划出版社
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部 .GB51251-2017 建筑防排烟系统技术标准 [M]. 北京：中国计划出版社

“平疫结合”负压隔离病房设计参数的探讨

沈晋明, 刘燕敏

(同济大学, 上海 200092)

[摘要]平疫结合是长期战略,但在推行或实施《综合医院“平疫结合”可转换病区建筑技术导则(试行)》中遇到一些困惑。要分清自然通风与机械通风的设计、施工、运行和维护的不同要求,以及理清这些要求来自不同的标准。在具体实施中不要混用两者不同要求,才能建设好综合医院“平疫结合”可转换病区。

[关键词]负压隔离病房;平疫结合;设计参数;机械通风;自然通风

0 引言

由于新型冠状病毒属于RNA病毒,病毒变异相对较快。近期变异毒株不断出现,特别是delta变异新冠病毒,其传播性更强,令人防不胜防,使得新冠疫情防控出现反复。全球疫情形势依然相当的严峻、复杂,中国也难以独善其身。看来新冠病毒要与我们长期共存。除了大力推行疫苗接种外,平战结合、平疫结合又提到了议事日程,加强综合医院“平疫结合”可转换病区建设可能成为一项长期任务。2020年8月颁布的《综合医院“平疫结合”可转换病区建筑技术导则(试行)》(以下简称《技术导则》)又成为关注的焦点。

在《技术导则》条文中规定:

第6.1.14 疫情时的负压隔离病房及重症监护病房(ICU)应当采用全新风直流式空调系统;

第6.3.2 平时病房最小新风量宜为2次/h,疫情时病房新风量按以下设计:

1) 负压病房最小新风量应当按6次/h或60升/s床计算,取两者中较大者。

2) 负压隔离病房最小新风量应当按12次/h或160升/s计算,取两者中较大者。

在疫情中《技术导则》对综合医院“平疫结合”可转换病区建设起到了很大作用。在疫情中第6.3.2/2条文在实施过程中引起一些困惑,如要作为负压隔离病房长期设施的依据条文,值得进一步探讨。

1 负压隔离病房控制措施

自SARS疫情以来,负压隔离病房控制设施似乎已经达成共识。为了更有效控制隔离病房环境,一般要求:

- ①保证足够的稀释风量,提高送风的有效性,维持合适的负压差;
- ②在室内形成送风先经过医护人员再流向患者,最后由排风口排出的合理定向流动;
- ③保证病人释放出的污染物尽可能快速、有效地排除(一般采用HEPA过滤器)。

大多隔离病房内采用了床尾侧顶送,床头侧下

排风的气流模式(见图1),在实际使用中已被证实这种气流模式控制的有效性与合理性。

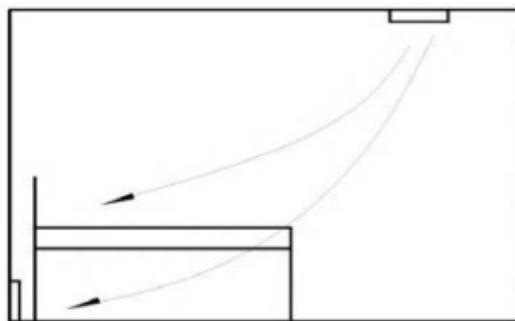


图1 单侧顶送异侧下排的送排风口的布局

但是《技术导则》的第6.3.2/2条文涉及到12次/h与160升/s这两个指标,而且要求取两者中较大者。这160升/s是不是要求160升/s床?还是全室要求160升/s?

因为换气次数这参数是与室内体积有关,而人均通风量这指标与人数相关。如160升/s是全室要求,对于多床负压隔离病房不合适了。

在疫情中负压隔离病房建设常采用图1的气流模式,由于病房顶部要布置送风管与送风口,层高一般在2.5m左右。至于负压隔离病房与ICU的最小面积,现在标准与指南很多,我们以国标GB51039-2014《综合医院建筑设计规范》为依据。第5.5.11/6 监护用房设置应符合下列要求:

- 1) 重症监护病房(ICU)宜与手术部、急诊部邻近,并应有快捷联系。
- 2) 心血管监护病房(CCU)宜与急诊部、介入治疗科室邻近,并应有快捷联系。
- 3) 应设监护病房、治疗、处置、仪器、护士站、污洗等用房。
- 4) 护士站的位置宜便于直视观察患者。
- 5) 监护病床的床间净距不应小于1.20m。
- 6) 单床间不应小于12.00m²。

如以此为据,假设最小单人病房面积12m²,高

2.5m。如以 12 次 /h 换气为设计参数，则送风量为 360m³/h。如设计送风量选为 160 升 /s，即 576m³/h，则病房换气为 19.2 次 /h。按《技术导则》要求取两者中较大者，得以 19.2 次 /h 为设计风量，对建造者来说，近 20 次换气全新风直流空调是很大了，难以接受。

那 6.3.2/2 条文涉及到 12 次 /h 与 160 升 /s 这两个指标到底出处在哪儿？两者有没有冲突？实际使用时应该选用哪个指标？

2 负压隔离病房两大参数

医疗关键科室的 6 次最小换气次数是常规的做法，过去空气传染隔离病房也要求 6 次 /h 换气。空气传染隔离病房要求 12 次 /h 换气的指标，最早是由 1994 年《卫生设施中预防结核分枝杆菌传播指南》提出的。得到由疾病预防控制中心 CDC 和医疗护理感染控制实践咨询委员会 HICPAC 推荐的《医疗护理设施环境感染控制指南》（2003 年）确认，成为国际共识。被各国医院建设标准与指南所采用。直至最新颁布美国 ANSI/ASHRAE/ASHE Standard170-2021《医疗护理设施的通风》仍要求空气传染隔离病房最小换气次数为 12 次 /h。我国 GB50849-2014《传染病医院建筑设计规范》中第 7.4.1 也规定“负压隔离病房宜采用全新风直流式空调系统，最小换气次数应为 12 次 /h。”

至于 160 升 /s 这一指标说来话长。上述这套控制模式对于欠发达国家或地区来说不太合适，每小时 12 次换气全新风直流空调系统控制感染方法的代价太大。另外，在疫情大流行时期，不可能像我们国家如此快速建造像火神山或雷神山那样的全空调应急住院医院。需要一种较为合适的通风方式。

世界卫生组织（WHO）提出在医疗护理场所可以将自然通风作为一种有效控制感染的措施，用来减少感染传播的风险。经过由工程师、建筑师、感染控制专家和微生物学家组成的多学科小组两年多来的努力制定了，为医院规划人员、工程师、建筑师和感染控制人员提供设计和运行指南。世界卫生组织于 2007 年 6 月颁布了一份关于感染预防和控制指导性文件《医疗护理设施中流行性和大流行性急性呼吸道疾病的感染预防和控制——世卫组织指导方针（暂行）》（Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory diseases in health care— WHO interim guidelines）（见图 2）。在这项新的指导方针中，自然通风首次被认为是控制卫生护理感染的有效措施之一。在医疗护理场所，适当的通风可以减少感染的传播。提出了感染控制背景下自然通风的设计要求，以及设计、

施工、运行和维护的基本原则。

并明确定义空气传播隔离室为具有大通风量和可控气流方向的房间，可用于隔离空气传播感染及由一种可能对公共卫生风险构成危险的新型病菌引起的急性呼吸道感染。

空气传播隔离室可以采用自然通风或机械通风：

—在自然通风的空气传播隔离室中，气流应被引导至无人物流的区域，或应允许将污染空气至周围区域和大气快速稀释；每位患者的平均通气量应为 160 升 /s。

—在机械通风的空气传播隔离室中，产生负压以控制气流方向；通风量应至少为 12 次 /h 换气。

2009 年世卫组织又发布了《自然通风在医疗机构感染控制中的应用（Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings）》（见图 2）扼要地提出了主要建议：

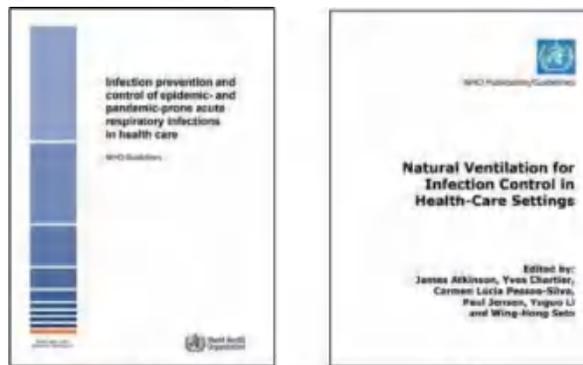


图 2

1) 为防止空气传播感染，所有病人护理区的医疗设施必须有足够的通风。

总体排序：强烈推荐

2) 对于自然通风，应提供以下最低的小时平均通风量：

—空气传播隔离室 160 升 /s/ 病人（每小时平均通风量）（最低风量 80 升 / 秒 / 病人）（请注意，这仅适用于新的医疗设施和重大改建）；

—普通病房和门诊部为 60 升 /s/ 病人；

—对于走廊和其他没有固定数量病人的临时空间为 2.5 升 /s/m³；但是，当在紧急情况或其他情况下在走廊内进行患者护理时，空气传播隔离室或普通病房的通风量要求将相同。

设计必须考虑通风量的波动。

当单独的自然通风不能满足推荐的通风要求时，应考虑替代通风系统，如混合（混合模式）自然通风，如果这还不够，则应使用机械通风。

总体排序：有条件推荐

3) 在设计自然通风的卫生设施时，整个气流应

该将病原的空气排到能足够稀释的区域，最好排到室外。

总体排序：有条件推荐

4) 对于进行与病原体传播相关的产生气溶胶的操作空间，自然通风要求至少应遵循建议 2。如果病菌是空气传播的，则应遵循建议 2 和 3。

总体排序：有条件推荐

这 4 项建议是系统审查外部小组在 2008 年 11 月于日内瓦举行的小组会议期间利用等级评定体系拟订的。在病媒传播疾病流行的地区（如疟疾、登革热），使用自然通风不应以任何方式影响蚊帐的使用政策或做法。

世卫组织这两份文件很明确表明：这 160 升 /s 参数应为每人每小时平均通风量。而且用于自然通风的空气传播隔离室。

3 自然通风在医疗机构感染控制中的应用问题

从理论分析和空气传播防控实践来看，自然通风的重要性不言而喻。这就是各国防疫指南均要求开窗通风的原因。自然通风由于使用自然力和建筑上的大开口，通常可以更为经济地提供较大风量，而且系统非常简单。在不需要加热的气候条件下，自然通风可以很节能。但是由上可知，空气传播隔离室要求 160 升 /s/ 病人（即每人 576m³/h）；普通病房和门诊部要求 60 升 /s/ 病人（即每人 217m³/h）。为什么自然通风人均通风量要求那么大？这要从自然通风防控原理说起。

所谓自然通风就是利用自然力（如室内和室外空气密度差异导致的风力和热浮力）通过专门建造的建筑围护上的开口驱动室外空气进入室内通风。显然，自然通风取决于气候、建筑设计和人类行为。

由于自然驱动力的随时在变化，使得自然通风也有缺点，主要表现在三个方面：导致通风量的波动，难以维持一致的气流方向以及在极端气候下无法保证室内的舒适温度。

如要将自然通风用于医疗护理机构的感染控制，仅靠自然通风难以实现负压。

或者说，自然通风的通风量波动、难以维持气流方向以及无法实现负压，似乎无法实现医疗护理空间感染控制？！唯一的方法就是用更大风量去足够稀释病人的呼出病原微生物而使其无害，使得逸漏到室外或排放到楼外的空气的感染风险最小化。这样对于欠发达国家或地区来说，建造的空气传播隔离病房只要有足够的通风量无需其他控制，其造价与运行费用是最经济的。这也可适用于在疫情中临时建造的病房。尽管如此，空气传播防控区域的

选择和患者在区域内的安置仍需仔细规划和设计，以进一步降低周围地区人群的感染风险。

当采用自然通风控制感染，最低通风量应高于现有的机械通风要求，以补偿通风量的预期波动和气流方向控制的困难。

CDC 以及其他文件建议采用机械通风的空气传播隔离室使用 12 次换气，这相当于对于 4m×2m×3 m 最小单人病房（WHO 定义的）的送风量 80 升 /s。对于采用自然通风的空气传播隔离室，通风量应该加倍。即对于体积相似的房间，建议每小时平均通风量为 160 升 /s/ 病人。同时，还建议病人在任何时候的最低通风量为 80 升 /s。

采用自然通风的普通病房和门诊部为 60 升 /s/ 病人（即每人 217m³/h），相对于 4m×2m×3 m 最小单人病房 9 次换气。

当单独的自然通风不能满足推荐的通风要求时，应考虑替代通风系统，例如混合通风系统，如果这还不够，则应使用机械通风。

从这个意义上讲，自然通风采用每人通风量（升 /s 人）指标更合适，而不是每小时换气量（ACH），尽管换气量在其他标准或指南中常用。人均通风量的使用确认了暴露水平和通风量之间的直接联系，以及与空间设计容纳的患者数量的直接关联。但是，对于走廊和其他没有固定病人数量的空间，通风量是基于空间的体积而不是人数。

4 结语

综上所述，无论从理论分析还是防控实践来看，通风是最重要措施。通风可分为自然通风、机械通风与混合通风。WHO 认为自然通风可以更为经济地提供较大风量，且系统非常简单。推荐欠发达国家或地区医疗机构的疫情防控中采用。但要注意自然通风与机械通风的设计、施工、运行和维护的要求是不同的。由于自然通风的通风量波动和气流方向控制困难，自然通风控制感染的最低通风量要高于现有的机械通风要求。两者不要混用。

1) 《技术导则》的 6.3.2/2 条文涉及到 12 次 /h 与 160 升 /s 这两个指标来自于不同的出处。负压隔离病房如采用机械通风则要求 12 次 /h，如采用自然通风则要求每人 160 升 /s。

2) 《技术导则》的 6.3.2/1 条文涉及到 60 升 /s/ 病人，是用于采用自然通风的普通病房和门诊部。

3) 《技术导则》误将对隔离病房的机械通风要求与自然通风要求合在一起，由于还要求取两者中较大者，就造成医疗机构在实际使用时的困惑，甚至误用。

医院洁净手术室平疫结合设计要点分析

牛维乐¹, 张丽娜¹, 李炫¹, 孟令坤¹, 陈清莹¹, 纪迎迎¹,

杨峰², 王群芳², 张冬冬², 王书要², 侯守源³

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建科环能科技有限公司, 北京 100013;

3. 河北省沧州市青县自来水公司, 沧州 062650)

[摘要] 自从2019年新冠疫情在我国暴发以来, 给洁净手术部的设计提出了更新的要求, 如何应对疫情设计洁净手术室就是本文的主要关注点。

[关键词] 医院; 洁净手术室; 平疫结合; 设计要点

1 概述

洁净手术室采用了空气净化技术, 把手术环境空气中的微生物粒子及微粒降到允许水平。洁净手术部是以洁净手术室为核心, 包括洁净辅助用房、非洁净辅助用房和设备用房等各类辅助用房组成的功能单元。自从2019年新冠疫情在我国暴发以来, 给洁净手术部的设计提出了更新的要求, 如何应对疫情设计洁净手术室就是本文的主要关注点。

2 洁净手术室平疫结合的设计要求

洁净手术室的平疫转换应当从建筑设计、总体规划、机电系统配置上做到平疫结合, 满足结构、消防、环保、节能等方面的要求, 应当严格按照医疗流程要求, 做好洁污分流、医患分流规划, 确保合理组织气流, 避免流线交叉。

2.1 “平疫结合”的规划要求

平疫转换、正负压切换的手术室做能独立的控制, 其住院救治功能区域应当与其他建筑保持必要的安全距离, 也要与医院其他功能区保持必要、便捷的联系; 要设置独立的出入口, 便于区域封闭管理; 要预留用地, 正负压手术室要保持一定的发展余地。

2.2 “平疫结合”的建筑要求

平疫结合的洁净手术室设计应结合实际, 合理配置与所承担任务配置的门诊、检验、检查、手术、重症监护、住院等医疗功能, 兼顾平时使用, 平时可以做感染、气溶胶等手术。同时要要进行多功能切换, 还要跟检验、影像、重症监护等科室在一起。目前建成的大部分正负压切换手术室是Ⅲ级, 做Ⅰ级和Ⅱ级的很少, 这就给大家提了一个新要求, 在平疫结合转换的时候, 手术室要根据医院自身的规划设计Ⅰ级和Ⅱ级正负压切换手术室。

平疫结合洁净手术室应当依据《医院洁净手术部建筑技术规范》进行设计, 手术部要独立成区并设置前后缓冲, 有独立的出入口和换车, 设置单独的清洗消毒间, 手术室周边区域对手术室的影响要

降低到最小。平疫结合洁净手术室可以做绝对负压和相对负压。

2.3 “平疫结合”区的给水系统

平疫结合的洁净手术室应当采取防污染回流措施。清洁区与半污染区和污染区的给水各自独立, 当无法独立时, 向半污染区和污染区供水的给水道上设置减压型倒流防止器, 倒流防止器应当设置清洁区。卫生器具在手术室都是非接触式的, 卫生器

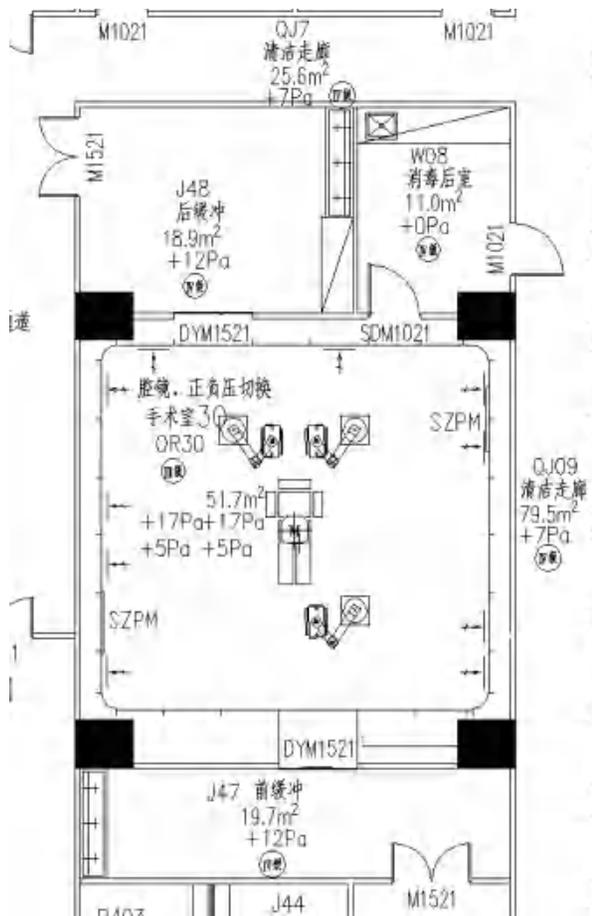


图1 平疫结合洁净手术室布局图

具的选择应当符合现行国家标准《传染病医院建筑设计规范》和《综合医院建筑设计规范》的有关规定。“平疫结合”手术室的排水系统，通气管出口应当设置高效过滤器过滤或采取消毒处理。排水管道应当进行闭水实验，且采取防止排水管道内的污水外渗和泄漏的措施。洁净区域手术室不能有地漏，外面的地漏也要做封补水措施，地漏的通水能力应当满足地面排水的要求。

2.4 “平疫结合”区的污水处理

平疫结合的洁净手术室不仅平时要高效运行，在疫情期间还要满足不同疫情（细菌和病毒）的处理要求；处理工艺应当采用双级强化消毒工艺；处理设施应当耐腐蚀和耐高温的要求。

2.5 供暖通风与空气调节

平疫结合的洁净手术室在非疫情期间按正压运行，在疫情时需要按照负压状态运行。平疫结合的洁净手术室应在室内顶排风口和室内回风口处均应安装高效过滤器，并在排风出口处设止回阀。疫情时关断回风管，打开排风管，启动排风机。

针对平疫结合的手术室顶棚排风口入口处及室内回风口入口处均必须设高效过滤器，并应在排风出口处设止回阀，回风入口处设密闭阀。正负压转换手术室，应在部分回风口上设高效过滤器，另一

部分回风口上设中效过滤器；当供负压使用时，应关闭中效过滤器处密闭阀，当供正压使用时，应关闭高效过滤器处密闭阀。要既能形成正压状态和负压状态，还可以形成全新风的负压状态，对于气溶胶传播的疾病，是按照平疫结合手术室最严格要求来做的。感染类的手术室，在不影响其他病区的基础上，也可以做相对正压。

2.6 配电及自动控制

平疫结合的洁净手术室的医疗设备、照明、通风系统用电应当按一级特别重要负荷设计。新建项目应当设置柴油发电机组供电，改造项目可根据实际情况采用院区内现有柴油发电机组供电或预留市政发电车的接口。

平疫结合洁净手术室应关注信息设施系统、信息化应用系统、建筑设备监控系统、公共安全系统和医院整体的智能化集成系统，以及物联网、人工智能助力疫情救治的技术应用，并充分利用远程会诊系统，提升危重症患者治疗效果。宜设置会诊室、远程会诊终端，采用液晶电视或电脑作为视频和音频发布端，并设置会议摄像机、麦克风、扩音器等，实现视频及音频采集。并且应当采用建筑设备监控系统对负压手术室的温度、湿度及压差进行监控。智慧化手术室的是将来某些手术室要改善的方向。

2.7 医用气体系统

平疫结合洁净手术室的医用气体设计往往是在手术室设计中会忽略的部分，不管是五气还是三气，现在大部分的手术室是从一个气源集中过来，没有正负压切换或平疫转换的手术室设计单独的管路。平疫结合手术室的医用气体管道应当由气源处单独接出，要从源头开始引入独立的管路。

3 总结

平疫结合洁净手术室的设计需要从平面布局开始考虑，同时兼顾空调系统、给排水系统、配电系统、医用气体系统的设计，使手术室既能在疫情发生时能正常运行，又能防止有害微生物在手术室的传播。

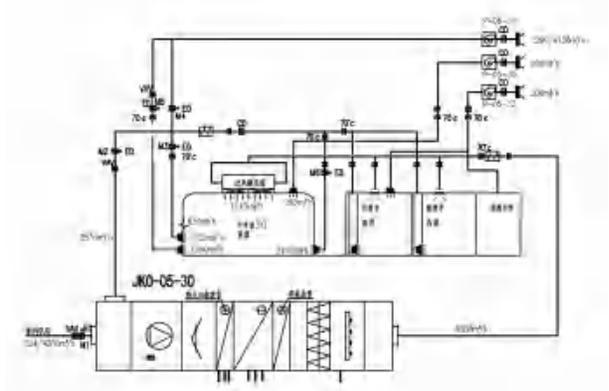


图2 平疫结合洁净手术室空调系统原理图

发热门诊、负压（隔离）病房改造案例探析

郑钧国，喻梅文，张君，姜琦

（浙江省中西医结合医院 杭州市红十字会医院，杭州 310003）

[摘要] 呼吸道传染病的爆发让人们对发热门诊有了新的认识，也让负压（隔离）病房走入人们的视野，全国各地医疗机构纷纷启动了发热门诊的改扩建项目和负压（隔离）病房的建设项目。本文介绍了针对一所建造于20世纪80年代砖混结构的建筑改建成为发热门诊及负压（隔离）病房的案例，改造完成后，发热门诊及负压（隔离）病房分区清楚、功能齐全、流程顺畅，从建设的目的看很好的满足了相关规范标准，为老旧医院应对呼吸道传染病的改扩建提供了一种思路。本次改造发热门诊区域送风经过初效和中效过滤器，换气次数为15次/h，负压（隔离）病房为全新风空调系统，换气次数为20次/h，换气次数远高于国家标准。

[关键词] 发热门诊；负压（隔离）病房；老旧医院；全新风系统

2019年末至2020年初爆发的呼吸道传染病，是人类历史上爆发的一次重大的公共卫生事件，对全球经济社会发展造成了重要影响。本次呼吸道传染病暴发以来，发热门诊及负压（隔离）病房的建设引起业内的高度重视，对发热门诊及负压（隔离）病房的建设要求也越来越高。为加强常态化呼吸道传染病防控工作，各级医疗机构发热门诊成为了呼吸道传染病防控的主要关口，呼吸道传染病的防控也已成为每一所综合性医院医疗工作中的重中之重，基于相关规范发热门诊及负压（隔离）病房的改建成为了每一所医院需要亟待解决的问题，对于新建医院可以按照相关规范标准严格执行，而受制于场地、房屋结构、房屋年限等原因，对于老旧医院的改造，按照最新的规范标准很难一一对应实现，如何在大幅度改变现有结构的前提下通过适当的结构补强实现医院感染预防与控制要求是各医院老旧院区改建的重难点之一。

1 老旧建筑改造的前提—结构安全

结构安全是老旧建筑的改扩建的前提。房屋结构的安全性是指房屋结构对防止破坏倒塌的能力，是结构工程中最重要质量指标。本次改造案例医院位于市中心，改造位置为医院独立的分区，该幢建筑设计于20世纪70年代末，并于20世纪80年代初完成建造，房屋结构为五层砖混结构，为实现发热门诊及负压（隔离）病房功能要求，本次改造需在不改变承重的情况下对原有结构进行承载力补强加固。其中加固部分可以分为对承重墙体新开门洞处进行结构补强加固，增设构造柱及圈梁对该建筑进行整体性抗震加固并对部分梁板采用粘贴碳纤维布进行承载力结构补强加固以及抗震加固。

2 发热门诊改造分析

根据相关规范要求，发热门诊应设在医疗机构内相对独立的区域，与普通门（急）诊有一定距

离，标识醒目，建筑规范，流程合理，符合医院感染预防与控制的有关要求，并便于患者就诊。本次发热门诊的改造位于医院的西南角，建筑面积约300m²，与主门诊楼相隔较远，符合医院感染预防与控制的有关要求。

2.1 发热门诊建筑改造

建筑上因原发热门诊顶板为多孔板，在承重墙无法完全拆除的情况下只能在原结构基础上进行补强加固。改造后发热门诊“三区”设置了完全的物理隔断；区间设置缓冲间。医护人员进出通道分开，医护人员由清洁区经过半清洁区、缓冲区进入污染区。从污染区需经过脱防护服（一脱）间、脱帽子口罩（二脱）间、淋浴消毒间返回清洁区。考虑到平战结合，发热门诊与肠道门诊共用挂号收费、药方、化验室以及治疗准备室，共用清洁通道。平时，发热门诊与肠道门诊可分别各自运转；战时，肠道门诊可并作发热门诊投入使用。

发热门诊改造前如图1所示，改造后发热门诊如图2所示，其中红色路线为医护人员从清洁区进入污染区的路径，绿色箭头为医护人员从污染区进



图1 发热门诊改造前



图2 发热门诊改造后

去清洁区的路径,病人就诊等候区为室外空间,通过本次改造,发热门诊从流程上符合了相关要求和规范,医护人员路径与病人路径实现了无交叉。

2.2 发热门诊暖通改造

在建筑上的隔离完成之后,接下来改造的重点及核心就是暖通系统的改造,发热门诊空调系统为VRV系统、新风系统、全新风系统。根据《传染病医院建筑设计规范》GB 50849-2014,发热门诊最小换气次数为6次/h,发热门诊改造的关键之一是增加通风,增加换气次数,降低空气中病菌的浓度从而降低潜在的感染风险。本次改造发热门诊的换气次数为送风12次、排风15次(送风风机风量 $6000\text{m}^3/\text{h}$,排风风机风量 $7000\text{m}^3/\text{h}$)。在换气次数满足要求的基础之上还要保证气流的流向,通过调整送风阀及排风阀,使得空气整体流向由清洁区→半污染区→污染区。本次改造中清洁区包括:医护入口、药房、挂号收费、淋雨消毒,清洁区送风量大于排风量 $150\text{m}^3/\text{h}$,保证整体气流由清洁区向外扩散;半污染区包括:缓冲区、治疗准备室、化验室、脱口罩区域,半污染区按照送风大于排风进行设计。污染区包括:诊室、病人通道、输液室、抢救室、污洗室及污物暂存间、红黄码诊室、病人洗手间,污染区排风大于送风 $150\text{m}^3/\text{h}$ 。污染区采用上送下排的方式(送风口位于房间的上部,靠近医护人员的位置,排风口位于房间的下部,靠近病人的位置),以保证医护人员的安全。送风经初中效过滤器过滤后送入,排风经过初中高效过滤器过滤后排出。核算采样舱采用室外移动式采样舱,以减少可能存在的感染及传播风险。

3 负压(隔离)病房改造分析

在呼吸道传染病爆发初期,最迫切的任务是切断传播途径,坚决避免可能发生的交叉感染,需要尽快将疑似病人及确诊病人安置在负压(隔离)

病房内。因而负压(隔离)病房的建设成为重中之重、急中之急。而对于负压(隔离)病房的建设则有着以下三点迫切要求:①保护医护人员及患者之外的病人以不受感染;②保护患者所在区域的外部环境不受感染;③保护患者之间不会发生交叉感染。本次改造15间负压(隔离)病房,改造面积约为 600m^2 。负压(隔离)病房改造要点:因本次改造为旧楼改造,承重墙无法大面积拆除,在一定程度上限制了本次改造。受制于房屋本身结构基础,该负压(隔离)病房的改造在建筑平面上并不是严格意义上的三区两通道,但是从院感的角度看,依然能实现三区两通道的功能。

3.1 负压(隔离)病房中的隔离要求

负压(隔离)病房的隔离分为流程隔离和空气隔离。流程隔离是通过建筑平面,严格遵守相关流程,防止病菌外泄。而空气隔离是通过洁净技术的运用,在各区域形成气压差,防止病菌向外扩散。图3为原病房平面图,图4为改造完成后的负压(隔离)病房平面图,本次改造为2层病房,结构基本相同:

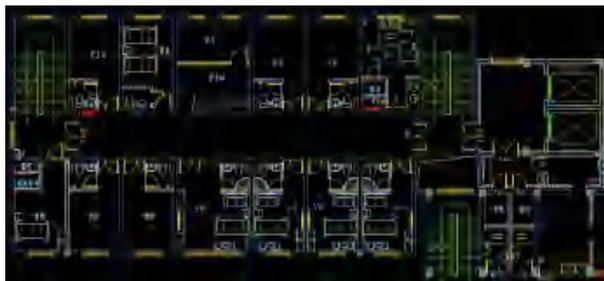


图3 原病房平面图

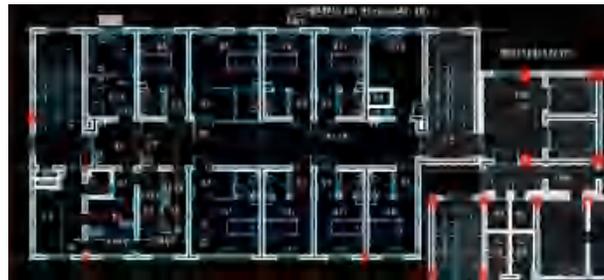


图4 负压(隔离)病房平面图

医护人员进入工作区域路线为红色虚线,医护人员由清洁区进入污染区需经过更衣、缓冲、缓冲。医护人员离开工作区域路线为黄色实线,医护人员由污染区进入清洁区需经过脱防护服、脱口罩帽子、淋浴消毒。护士站与病房走廊之间设立缓冲区,在医护人员无需进入病房时通过与走廊之间的传递窗传递药物以及食物等,减少医护人员进入污染区的次数,降低医护人员被感染的风险。污物则由污染区与外界的传递窗之间传递。分区平面图如图5所示:

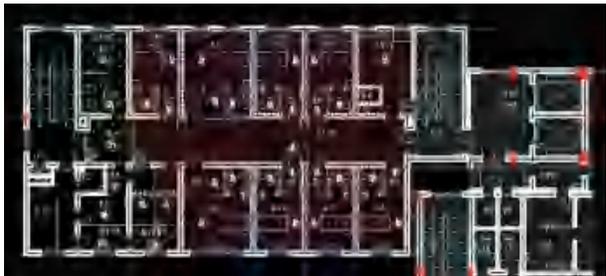


图5 负压（隔离）病房分区平面图

相邻功能区之间压力差为 5Pa，上图中空白部分为清洁区，清洁区压力为 +10Pa，黄色区域为半清洁区，压力为 +5Pa、0Pa，红色区域为污染区，病房走廊为 -5Pa，走廊与病房之间的缓冲区为 -10Pa，病房内压力为 -15Pa，卫生间压力为 -20Pa。

根据相关研究结果，如果没有缓冲间仅靠压差来实现隔离，即使压差达到 -30Pa，隔离效果仅增加 1-2 倍；而增加一间缓冲间，在 -5Pa 时，隔离效果便可提高近 20 倍。所以在缓冲间与压差的双重作用下，可以大大提高隔离效果。本项目改造过程中，由清洁区进入污染区需经过 2 个缓冲间，由污染区进入清洁区需经过脱口罩帽子、淋浴消毒 2 个功能区，但其也起到了缓冲间的作用。缓冲间经高效过滤器进行送风，经高效过滤的缓冲间隔离效果是无高效过滤的 3 倍。

负压隔离病房的建筑主体必须达至气密水平，本次改建病房整体全部用双面玻镁岩棉彩钢板进行内部搭设。每间房间送风管及排风管上安装压力开关型定风量阀，使病房内送风量、排风量不受风管压力波动的影响，使病房的负压可靠有效。每间房间送风管及排风管上安装电动气密阀，并进行联动控制，控制开关集成在护士站，在需要对某一间病房消毒及消毒结束时护士只需按下对应的控制按钮即可完成对电动气密阀的关闭及开启。每间病房内都安装了可视对讲系统，并配套腕表系统，便于医护人员在病房内仍然可以通过腕表收到其他病房内病人的呼叫。每间病房门前安装呼叫警示灯，病房内进行呼叫时，警示灯亮起，便于医护人员第一时间发现。

病房缓冲区安装互锁装置并在门前设置紧急解锁按钮，正常情况下，缓冲区的门为互锁状态，当一扇处于关闭状态另一扇才可以开启。在进行病人抢救时，通过按下紧急解锁按钮，可以临时解除互锁状态，为医护人员抢救病人争取时间。

3.2 负压（隔离）病房空调系统改造

空调系统改造：负压（隔离）病房区域采用全新风空调系统，室内空气不循环使用，送风经过层

流净化系统进入病房，经过高效过滤器后高空排出。

从空调设计来看，整个层面分为净化区域和非净化区域，非净化区域为常压区域，净化区域可分为正压清洁区与病房负压区域。通过调整洁净区域为正压，对负压区域形成一种包围，能有效阻止污染空气向外传播。空气隔离最重要的是压差控制，通过合理的平面设计，在相邻的不同房间内建立压差，在每一间病房内卫生间为压力最低的地方，能够有效保证气流流向并能有效阻止气体从污染区流向半污染区。为保证压差及气流的流向，自控系统就成为暖通改造的关键，本次暖通自控系统改造设置如下：

通风空调系统自控采用 DDC 控制系统，系统控制有手动、自动转换功能，日常运行采用自动状态。DDC 控制箱需设置手 / 自动切换按钮 / 开关、系统设备电源指示灯、运行指示灯以及故障指示灯、开 / 关按钮。

本次负压（隔离）病房改造控制系统具体要求：

3.2.1 通风空调控制系统

通风空调控制系统设置手 / 自动切换按钮 / 开关，用于满足正常状态下的自动运行，以及故障状态下的手动运行。风冷热泵机组与水泵联动，风冷热泵机组的运行模式以及冷冻侧水温在机组自带的液晶控制屏上进行调节。

- 1) 开机顺序：水泵开启 → 热泵机组开启；
 - 2) 停机顺序：热泵机组停机 → 水泵停机；
- 空调箱与排风机联动。

- 1) 开机顺序：排风机开启 → 送风空调箱开启；
 - 2) 停机顺序：送风空调箱停机 → 排风机停机；
- 空调箱的送风控制：送风主管上设置风压传感器，采用变频器控制送风机电机转速，恒定风管静压以恒定末端风量。

空调箱的温、湿度控制：空调箱开始运行后，温湿度控制系统开始工作。

夏季，通过空调箱出风口送风温度和排风机排风湿度传感器信号（温度、湿度设定值可调，湿度控制优先）控制空调表冷 / 加热器的冷冻水回水管上电动比例积分电动调节三通阀，通过表冷段后段温度传感器信号控制电再热的启动，从而送风温度满足室内温度、湿度设计和规范要求；冬季，通过空调箱出风口送风温度传感器型号（温度设定值可调）控制空调表冷 / 加热器的冷冻水回水管上电动比例积分电动调节三通阀，排风机的排风进口湿度传感器信号（湿度设定值可调）控制电极加湿器的加湿量。

排风风机控制：排风主管上设置风压传感器，

采用变频器控制排风机电机转速，恒定风管静压以恒定末端风量。排风机一用一备。

4 结语

本文从建筑平面流程以及暖通系统上介绍了一所位于市中心的老旧院区的改造，为类似医院的改扩建提供了一种思路。发热门诊改造完成后，发热门诊各功能分区清楚、功能齐全、能力满足、流程顺畅，为呼吸道传染病的防控构筑了一条建筑的关卡，为医护人员提供了有力的屏障。通过对病房的改造，实现了气体流向由清洁区向污染区的单向流动，在建筑布局设计上，明确了功能分区，避免了隔离病区医护人员感染，通过对负压隔离病房进行合理设计与医院感染管理措施相结合的方法，达到有效防止传染病传播的目的。

参考文献

- [1] 国家卫生和计划生育委员会 .GB 51039-2014 综合医院建筑设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社 .2015
- [2] 国家卫生和计划生育委员会 .GB 50849-2014 传染病医院建筑设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社 .2015
- [3] 国家卫生和计划生育委员会 .GB 50849-2014 传染病医院建筑设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社 .2015
- [4] 北京市卫生局 .DB 11/663-2009 负压隔离病房建设配置基本要求 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社 .2010
- [5] 全国洁净室及相关受控环境标准化技术委员会 .GB/T 35428-2017 医院负压隔离病房环境控制要求 [S]. 北京: 中国标准出版社 .2017
- [6] 全国洁净室及相关受控环境标准化技术委员会 .GB/T 25915.3-2010 洁净室及相关受控环境 [S]. 北京: 中国标准出版社 .2011
- [7] 许钟麟, 武迎宏. 编《负压隔离病房建设配置基本要求》培训教材 [M], 中国建工出版社, 2010
- [8] 许钟麟 .GB50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》的特点和思维 [J].《暖通空调》, 2015年, 第45卷第4期: P1-7.
- [9] 许钟麟.《医院洁净护理与隔离单元技术标准》编制背景和任务 [C].2019年全国净化技术学术年会会议. 深圳: 中国建研院, 2019.
- [10] 许钟麟, 曹国庆, 张彦国, 张益昭, 潘红红, 沈晋明, 武迎宏. 国标《医院洁净护理与隔离单元技术标准》编制组系列探讨问题之一 [J].《暖通空调》, 2019年, 第8期: P40-44.
- [11] 许钟麟, 曹国庆, 张益昭, 潘红红, 沈晋明, 刘燕敏, 谢景欣. 关于负压隔离病房可以使用循环风的讨论 [J]* — 国标《医院洁净护理与隔离单元技术标准》编制组系列探讨问题之二.《暖通空调》, 2019年, 第8期: P45-48.

一种新型的洁净手术室控制——控温送风系统

刘燕敏¹, 胡崔健²

(1. 同济大学, 上海 200092; 2. 上海科仕控制系统有限公司, 上海 201818)

[摘要] 针对洁净手术室层流送风承担热负荷的调温送风与不承担热负荷的等温送风, 本文基于“气流动量、气流流态和温度效应”新评价指标的合理组合提出控温送风系统。控温送风是将送风温度预设于温度阈值内, 优先调控送风温差(不大于1.5℃), 再调控辅助手段消除余热负荷。不仅适合各类手术, 维持良好的手术环境, 而且可以同时保障手术人员、麻醉医师与患者体感舒适。

[关键词] 洁净手术室; 层流送风; 热湿负荷; 保护区域; 控温送风

0 引言

我国国标 GB50333《医院洁净手术部建筑技术规范》(以下简称《规范》)要求在洁净手术室采用非诱导送风气流(医学界俗称为层流)实现对手术环境的控制。但并不是说有了非诱导送风装置就一定有合格的手术环境控制。层流通风对手术部位感染(SSSI)控制的许多负面报道, 多是层流送风装置不合格所引起的^[1], 对此德国 DIN1946-4 做了许多调研工作, 并再次肯定层流对手术环境控制的正面效应^[2]。

洁净手术室的第一要务就是优先保障手术无菌区域最大、气流质量最佳、抗干扰力最强。为此提出一种新型的手术室的气流模式与设施系统——控温送风系统。将送风温度预设于温度阈值内, 优先调控不大于1.5℃的送风温差, 再调控辅助调节手段, 如采用手术室辐射板壁或周边送风等措施消除余热负荷, 保证手术人员、麻醉师和患者体感舒适。

1 局部层流送风评价指标

按传统理论, 洁净手术室层流送风不仅要求实现无菌无尘的手术环境, 还要求承担消除手术室热负荷。即通过调节送风状态来满足以手术人员为主的合适工作环境。如今, 提出了手术室层流送风应优先保障保护区域质量的要求, 这就涉及到层流送风的性能与评价的问题^[3]。特别是局部层流送风气流优先保障保护区域质量的对策。

按传统理论, 评价超净层流送风质量的主要指标分别为送风气流的“流向单一性、流线平行度、断面风速均匀性”。这三个评价指标体现了层流气

流排除污染的能力, 以及对关键保护区域控制的有效性。但是这些评价指标主要针对全室层流(即送风面积几乎等同于房间天花面积, 见图1), 通常层流的断面平均风速较大, 一般为0.4m/s左右。

不同于工业洁净厂房的全室层流, 洁净手术室采用局部层流, 在手术台上方设置局部层流送风装置。根据我国《规范》规定的I级洁净手术室的送风面积为2.4m×2.6m, 送风速度为0.2m/s-0.25m/s。德国标准 DIN 1946-4《室内通风技术》要求手术室的送风面积不小于3.2m×3.2m, 送风速度约为0.25m/s^[4]。美国ASHRAE170-2017标准《医疗设施通风》^[5]中规定手术室的送风口每边要比手术台面的每边大0.3m到0.45m(送风面积约为1.2m×2.4m-1.5m×2.7m), 送风速度仅为0.127-0.178m/s。

不同于全室层流, 当局部送风装置的送风气流送入室内因流速较周围的空气快而带动周围空气一起流动, 由于送风气流周边压力的变化对周围空气产生引射(或诱导)作用。局部层流送风气流速度越高, 引射周边较污染的空气的量越大, 对层流形成的洁净无菌区域的干扰越强, 使得洁净无菌的保护区域缩小。反之, 局部层流送风速度小, 虽然引射量减少, 但易被周围气流干扰、易受到层流送风与室内空气间的温度差(简称为送风温差)的影响。因此, 不能用传统的三大评价指标评价超净局部层流送风对关键区域保护的有效性。

本文提出评价局部层流送风性能应该是“气流动量、气流流态和温度效应”这三个指标。

1) 气流动量是气流质量与速度的乘积, 是指运动气流的作用效应。与气流的质量和速度相关的物理量, 气流动量方向与速度的方向相同。气流流速快, 送风气流动量大, 抗干扰力强, 但引射量加大。《规范》规定的手术室局部层流送风的速度很低, 但送风面积大, 送风气流质量大, 有足够的动量能维持局部层流, 又能控制引射量。

2) 局部送风的气流流态不可能达到流向单一性、

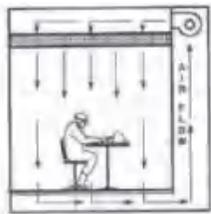


图1 全室层流示意图



图2 洁净手术室局部层流

流线平行度、断面风速均匀性。要求的气流流态是指非诱导性的置换流，且要求自上而下的垂直气流。

《规范》推荐的阻漏层送风装置的气流流态最好。但对于水平层流气流如此低的流速难以维持无菌无尘区域。

3) 温度效应是由层流送风气流与室内空气的温度差引起的。《规范》要求送风气流温度低于室内温度，形成两者间的空气密度差异，相当于因温差引起的热动力，给送风气流有个附加力。加大送风气流流速，使得低流速的送风气流也能送达手术部位（见图3）。热动力对气流运动所起的作用一般不予考虑，只将其作为安全系数。但是对于局部低速层流为了控制引射量，保护无菌区域，温差对气流的作用不容忽略。图3中虚线部分显示了理想的无菌、无尘的保护区域。当然，送风温度也不能太低（或者说送风温差不能太大），否则温度效应使送风气流速度加快，引射量加大，反而使局部层流形成的保护区域缩小（见图4虚线部分）。这就是说，送风温差对局部层流形成的保护区域大小与气流质量相关。

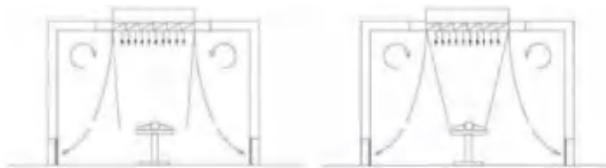


图3 合适送风温差保护区理想 图4 过大送风温差保护区缩小

以下将基于气流动量、气流流态和温度效应这三大因子的合理组合来阐述洁净手术室的层流气流对策。

2 空调对流送风与空调辐射换热

从温度效应评价指标来讲，似乎送风与室内空气温度相同的等温层流（或者说送风温差为零）所形成的无菌无尘区域最大，保护效果最好。由于像手术室等被调空间内的热湿负荷会随时变化，传统的调节措施不外乎变化送风温度或变化送风流量，来维持被调空间的温湿度稳定。像手术室有洁净要求的被调空间，因洁净度与送风量（或换气次数）相关，只能采用变化送风温度、而不能变化送风量的调节措施。对于等温送风来说，没有能力来调节手术室温湿度，或者说无法承担消除室内热湿负荷。也许可以靠专用新风机组承担全部湿负荷，利用围护结构的辐射板壁承担室内显热负荷。这就是近期国外推荐的洁净手术室等温送风与辐射空调的组合模式，但冷辐射空调可能会出现问題。

理论上，辐射空调的优点能够利用低品位热媒（如高温冷冻水或低温热水），可以减少送风量，

提高热舒适性。但在手术室实际使用效果不太理想，会有以下的局限性。

理论上讲纯净的空气对热辐射几乎没有反射能力，在一般温度下占空气绝大部分的氮气、氧气等对称双原子气体，视为透热体，或者说不会产生辐射换热而改变空气温度。室内空气只能通过与辐射壁板表面对流换热而变化温度，因此用辐射调节室内空气温度的效率最低，调节过程缓慢。但是辐射换热的好处是直接作用于人体，只要有足够的辐射换热，能使人体感上获得热舒适。但是空调冷辐射不同于热辐射。冷辐射温度范围不大，为了保证辐射壁不结露，辐射壁面至少要高于室内空气状态露点的 $0.5^{\circ}\text{C}-1^{\circ}\text{C}$ 。又必须低于室内空气温度，否则没有调节作用。但辐射表面温度过低也会使人体感觉不适，极大地限制了辐射空调的供冷能力。冷辐射调节能力也有限，反应速度慢（或调节时间长），不适用工作强度较大而变化较快的工作场所，如手术过程。或者说辐射换热量难以及时消除手术人员手术过程产生的余热。只能适用工作强度不大，比较平稳的工作状态，如办公室、会议室、居家。在手术过程中只有麻醉医师和患者状态比较平稳。

辐射换热量除了辐射壁面温度外，还与在室内能与人员进行辐射换热的辐射面积有关。现代手术室内装备很多，板壁上嵌满了各种存放柜、保冷柜、保温柜、控制屏与面板等，众多悬挂的大型显示屏和落地装备也阻隔了手术人员与辐射壁板之间的辐射换热（见图5）。大型洁净手术室内要真正能用作辐射换热的板壁的面积很小，不得不借用顶板。理论计算也许辐射面积够了，但手术区上方是硕大的送风装置，手术人员和患者在送风装置下方，无法接受到冷辐射。也许与麻醉医师可以进行辐射换热。



图5 手术台周围装备、送风天花与显示屏阻碍了辐射换热

另外，手术过程中人员固定而使用的电热电动装备与工具不断变化，造成手术室的负荷特点是潜热负荷较为稳定，而显热负荷瞬时变化很快且变化幅度较大^[5]。对于室内不断变化的显热负荷靠辐射

空调是难以及时消除的。

空气的比热容比水小得多，改变空气温度比水快。为了提高冷辐射的调节性能，近年来，辐射壁板的冷媒介由空气来替代水。空气媒介冷辐射板壁也开始推广开来。但辐射冷空气媒介是靠专门的空调机供给，是用冷冻水通过热交换盘管取得，热交换盘管水侧与空气侧的传热温差一般为 6°C - 7°C 。这就是说这辐射板壁的媒介不能利用高温冷冻水而节能，仍然需要常规的 7°C 或更低的冷冻水。

如上所述，为了满足手术区无菌无尘要求，洁净手术室送风量是固定。采用辐射空调无法降低手术室的送风量。

可见空气媒介辐射空调用于大型手术室无法显示出“利用低品位热媒，减少送风量以及提高舒适性”三大优点，唯一得益的也许是麻醉医师与患者。而“供冷能力小、室温调节时间较长、难以及时调节辐射量消除动态负荷、以及造价高”等缺点却暴露无遗。

3 洁净手术室控温送风系统

总之，辐射空调手术室是有局限性的。要维持室内设定的温湿度，传统方法将被处理过的层流气流直接送入室内来消除室内热湿负荷，效率最高，调节速度最快，室内热环境控制稳定。直接调节送风气流状态点控制室内温湿度的最大缺点，就是不断改变送风温差会有可能使无菌无尘区域（保护区域）缩小。至于会有气流噪声，吹风感。这倒可以用气流技术来控制的，对身穿全套无菌服的手术人员来说问题不大。

另外，对流空调的送风气流同时依靠出风动量和送风温差来维持运动。那就说应该发挥对流空调对室内温湿度调节作用，尽量利用温差送风效应，优先消除热湿负荷。从工程角度讲，比周围空气低 1.5°C 温差的送风气流与等温的送风气流形成的保护区域是差不多的。那为什么对流空调不利用这 1.5°C 的送风温差，来减少辐射的换热量，而仅仅为了保证层流送风净化效果采用等温送风？

相对于承担热负荷的调温送风与不承担热负荷的等温送风，我们将优先调控不大于 1.5°C 送风温差的层流气流称为“控温送风（controlled temperature supply air）”。尽管各国标准或规范要求手术室温度均在 $21\sim 25^{\circ}\text{C}$ 之间，实际运行中通常将手术室温度控制在 $22\sim 24^{\circ}\text{C}$ 范围内。如控制送风温差不大于 1.5°C ，手术室实际送风温度定在 20°C - 23°C 阈值内，定阈值温度控制的送风也被称为定温送风。当然这阈值温度可以根据手术类型自行设定。

如采用等温送风模式，要求独立新风机组承担

全部湿负荷，机器露点控制在 11°C 左右。独立新风与室内空气混合后再加热到室内等温状态（如室内状态设定 23°C ），势必浪费了许多加热量。室内的热负荷还得另外靠冷辐射去消除。

当采用控温送风模式，利用 1.5°C 温差引起的热动力，就达到同样流速，可以降低局部层流送风量。又能减少独立新风与室内空气混合后加热量（只需要加热到 21.5°C ）。由于温差送风承担了室内部分负荷，减少了冷辐射供冷量。仍然可以保证局部层流送风形成较为理想的保护区域。

遵循这个思路，为此提出洁净手术室控温送风系统，（已申请发明专利202010063365.4）。室内冷辐射板壁温度预设高于室内露点温度 2°C 。来自集中深度除湿处理的新风，承担所有湿负荷，与室内空气回风混合，优先调控不大于 1.5°C 的送风温差，加热到设定的阈值温度向手术室送风。使得送风气流实现最大的保护区域、最佳的气流质量。其余显热负荷再由室内设置的冷辐射板壁或其他辅助调节装置承担。如果手术室内负荷较少，加上预设温度的室内冷辐射板壁，仅靠不大于 1.5°C 的送风温差调节也可能保证室内温湿度控制。

控温送风的消除室内显热负荷的辅助调节装置，可以采用了以下三种方式：

1) 如有低品位热媒（高温冷冻水与低温热水），优先采用水媒介的辐射板壁，这是传统辐射空调节能的关键所在。但是水媒介的辐射换热调节性能较差。

2) 如没有低品位媒介，只要手术室进行微创手术等工作强度不大的医疗过程，室内有足够面积的板壁用作辐射换热用，可采用空气媒介的辐射板壁。空气媒介比水媒介的辐射换热调节性能好，另外空气媒介的辐射板壁只有单层板壁，几乎无比热容，有利于控制辐射板壁结露。

3) 如果是大型洁净手术室，手术过程工作强度较大，手术所用设备或装置较多，使得热负荷变化较快，则推荐采用“周边辅助送风”的方法。除了控温的层流送风外，“周边辅助送风”发挥了上述原用于中空辐射板壁的循环空调机组产生的空调风的作用。如果将这循环空调风改为向设置在板壁的周边送风口送风，将空调风直接吹向板壁，沿着板壁向下流动，直到底部回风口，再返回到空调机组。这种“周边辅助送风”的循环空调风不仅以对流换热方式直接参与了室内直接的热湿交换，而且间接冷却（或加热）了板壁，不管板壁是否有装备，只要有表面就会被冷却（或加热）成为辐射面，参与辐射换热。这样的周边辅助送风大大增强了整个系

统的处理大型手术室的热湿负荷的能力。

当然也可以采用冷剂媒介作辐射板壁，只是目前使用较少，经济性不强。

4 结语

洁净手术室控温送风系统是基于气流动量、气流流态和温度效应的合理组合提出的，认为等温层流送风并非最佳形式。洁净手术室应该优先保证层流送风净化效果，实现最大的保护区域与最佳的气流质量。而不是传统的温湿度优先的送风状态调节而影响层流送风效果，也不是层流等温送风方式。等温层流送风与辐射组合的空调形式理论上分析可能不错，但实际上在手术过程中保持等温送风也许不现实的。空气媒介辐射空调用于大型手术室没能表现出“利用低品位热媒，减少送风量以及提高热舒适性”的三大优点。

洁净手术室控温送风是一种新型的气流形式，是气流动量、气流流态和温度效应的合理组合。将送风温度与辐射温度预设温度阈值内，优先调控不大于 1.5°C 的送风温差，再调控辅助调节手段消除热负荷，维持良好的手术环境，保障手术人员、麻醉医师与患者体感舒适。这辅助调节手段可以是水媒介、空气媒介的辐射换热形式，或周边送风形式。

上海科仕控制系统有限公司已实现了这套控制程序。只有这样，对于手术等工作强度较大的工作场所，才能尽可能使对流换热承担负荷，减轻辐射换热负荷的份额。总之，洁净手术室控温送风对各类手术室显示出强大的适应性与有效性，是一种值得推广的系统形式。

参考文献

- [1] Sebastian Fischer, Martin Thieves, Tobias Hirsch, et al. Reduction of Airborne Bacterial Burden in the OR by Installation of Unidirectional Displacement Airflow (UDF) Systems[J]. Medical Science Monitor. 2015; 21: 2367-2374.
- [2] 沈晋明, 许钟麟, 德国标准 DIN1946-4-2018 解读[J].《暖通空调》,2020年,50(4):40-46.
- [3] 毛继传, 沈晋明, 洁净室阻漏送风末端装置性能与评价[J].《洁净与空调技术》,2004(1):33-41.
- [4] 沈晋明, 保罗尼诺穆拉, 刘燕敏, 简介美国ASHRAE标准170-2013[J].《暖通空调》,2014年,44(10):1-7.
- [5] 沈晋明, 聂一新, 洁净手术室控制新技术: ‘湿度优先控制’[J].《洁净与空调技术》, 2007(3):17-20.

负压病房内部空气净化重要性的论证

周乐, 沈彦利, 沈聪, 张明明, 陈玲

(美埃(中国)环境科技股份有限公司, 南京 211111)

[摘要] 新冠病毒自流行以来, 对中国乃至全世界的社会运行和经济发展带来极大的冲击, 不少国家卫生预防控制体系在疫情冲击下陷入崩溃, 很多医院的负压病房严重不足, 而在这一情况下, WHO 建议在紧急情况下为简化安装并减少施工时间以保证医务人员的健康, 可选配简单配件/管道排气的便携式带高效过滤器的装置, 来洁净室内空气以及安全排气, 可有效的防止对外界的污染扩散。对此我司自主研发的负压洁净单元(以下简称 EHU (ExHaust Unit)) 在当前形势下应运而生, 此产品可快速将普通病房改为负压病房, 其自带杀菌过滤器能有效抑制细菌及病毒的滋生繁殖, 确保排出的空气对外界无害, 并能持续保持病房的负压; 如果需要无菌状态(洁净室)时, 也可简单的切换成空气净化单元。但是, 许多医院在使用该设备只使用全排风方式, 没有采用下述的各国标准中所要求的部分循环模式。本报告通过 EHU 各种运转模式的比较, 进行了除尘·除菌的实验论证, 证实此产品通过有效控制可应用于传染病房等场所。

[关键词] 负压洁净单元 EHU, 传染病房, 自然衰减率, 总衰减率, 洁净空气量 (CADR), 每小时通风次数 (ACH)

1 前言

传染病负压隔离病房主要用于烈性呼吸道传染病患者的收治, 2003 年 SARS 期间充分暴露了我国大量缺乏负压隔离病房的问题。负压隔离病房设计的关键是通风空调系统设计和功能分区^[1]。2020 年初至今的 COVID-19 肆虐全球, 各国均呈现出缺少负压病房的事实。负压隔离病房有别于普通病房, 而如表 1.1 所示各国的标准中对传染病房的设计要求是有差异的, 我国标准 GB/T35428-2017《医院负压隔离病房环境控制要求》规定相邻相通不同污染等级房间的压差(负压)不小于 5Pa, 负压隔离病房和潜在污染区的换气次数宜为 10-15 次/h, 新风量每人不小于 40m³/h; 日本标准 HEAS-02-2013《医院设备设计指南(空调篇)》规定传染病隔离病房最小新风为 2 次/h, 室内循环为 12 次/h; 美国标准 ASHRAE170-2017 也同样要求新风 2 次/h, 循环 12 次/h, 压差 2.5Pa。英国有关标准提出隔离病房内合理的气流组织形式应将所有送风全部排出室外(即 100% 排风), 规定换气次数应不小于 6 次/h, 建议 12 次/h。各国对负压隔离病房的要求稍有差别但都有负压的要求。因此负压净化设备在这类病房中是必不可缺的。

上述各国的标准制定了新风与循环换气次数等, 但未对此进行论证。我司利用 EHU 样机作为空气净化器参照国标《空气净化器》GB/T 18801-2015; 以及作为生物洁净室参照国标《医药工业洁净室(区)悬浮粒子的测试方法》GB/T 16292-2010 和《医药工业洁净室(区)沉降菌的测试方法》GB/T 16294-2010 对 EHU 样机进行不同模式的对比实验。

2 EHU 样机

2.1 样机的简介

图 2.1 是 EHU 样机的外形, 主要工作原理是污染空气吸入正面的进风口, 经内部高效过滤器变成



图 2.1 EHU 样机与构造

表 1.1 中日美隔离病房的最低通风次数和室压差比较

条件		中国 GBT35248-2017	日本 HEAS-02-2013	美国 ASHRAE 170-2017	美国 CDC2007 Guideline for Isolation Precautions	
					现成病房	新建病房
最小通风次数 (/ACH)	新风次数	2	2	2	-	-
	室内循环次数	10~15	12	12	6	12
与近邻室压差 (Pa)		-5	-2.5	-2.5	-	-

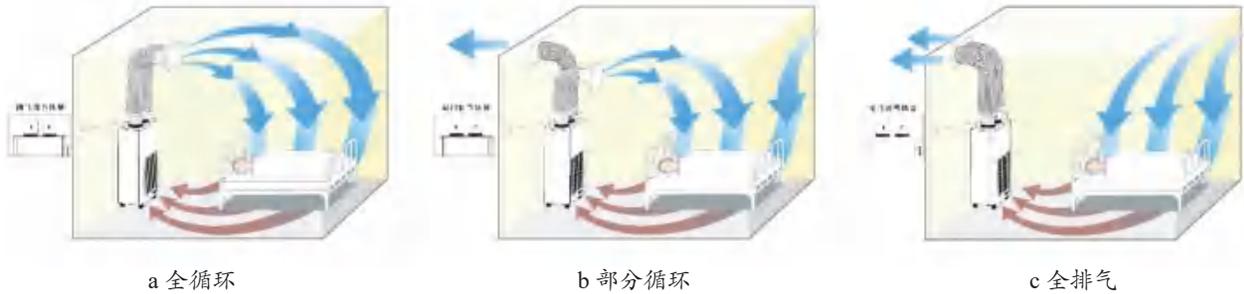


图 2.2 三种模式

清洁空气后由风机经上方 2 个圆柱型的排风口排出，可方便地形成内循环和排风。这样就可简单的实现以下 3 种功能：① 全循环模式即通过如图 2.2a 所示，净化空气从两个排风口都朝室内排风，室内空气循环逐渐达到无菌状态；② 部分循环部分（简称部分循环）通过其中一个排气口经高效过滤器过滤后排气使得室内保持负压，避免污染向外扩散如图 2.2b。同时，通过另外一个排气口进行室内循环使得室内空气净化。此外在排风口上配置了阀门，可调节两个出风的比例，从而可以简单的实现表 1.1 的新风与循环的比例；③ 图 2.2c 全排气模式虽然可以保持负压，但是也有可能将外部的污染空气带入，引起二次感染。

表 2.1 样机主要参数

参数	型号：EHU-600
档位	低 / 中 / 高
电源	AC 100-110V(选配), 220-230V 50Hz 1P
功率 (W)	21/70/142
风量 (m ³ /h)	200/400/600
整机外型尺寸 (mm)	1045×600×300
排风口尺寸 (mm)	Φ150×2 个

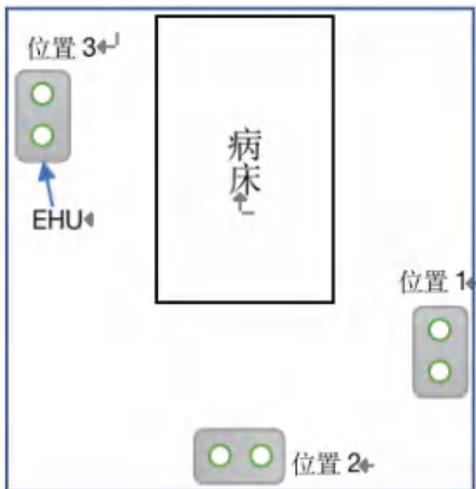


图 2.3 EHU 样机位置 (俯视)

2.2 样机安装位置的选择 (CFD)

针对图 2.2 的三种模式，先进行 CFD 仿真来确认在病房中，样机的最佳位置。然后通过出风管口朝室内方向的角度对气流的影响。

2.2.1 样机的位置

如图 2.3 所示，CFD 设定病房是 3×4m，按照全循环模式 3 个不同 EHU 样机位置的 CFD 气流仿真见表 2.2，从中可以知道样机在位置 2 时，气流最佳，没有产生气流涡处。

2.2.2 三种模式的比较

根据上述位置 2 最佳，所以我们就在位置 2 上对图 2.2 的三种模式进行了 CFD 比较，结果表 2.3 所示。CFD 的结果知道出风口 90° 时，内循环时在病床上方有紊流现象；包括全排气也有相同现象出现。

2.2.3 出风管口的角度

上述的出风口 90° 时，有紊流现象我们增加了 45° 出风口的 CFD，并对管口垂直朝上·45°·90°3 种状态进行了比较表 2.4 所示。出风口垂直朝上和 45° 在病床位置没有发现紊流现象。

2.2.4 CFD 的分析

通过上述的仿真结果，为了使病房内得到最佳的气流分布，与 EHU 出风口的高度，角度，吹出方向等因素有关。从而制定了第 3 章的实验计划。

3 实验

3.1 条件

实验都安排在 30m³ (4×3×H2.5m) 恒温恒湿密封试验舱里进行，温湿度控制在 20~22°C、50~70%，如图 3.1 所示试验舱中央放置了病床，右侧壁处开了 φ100 的孔，仅限于全排风或部分循环时的进风用。根据 CFD 仿真结果对 EHU 样机安放在位置 2。风量设定为高档。分别对全循环，部分循环，全排风三种模式进行除尘·除微生物的实验。

各项实验的被测污染物（尘埃·微生物）都通过安置在舱外的发生装置，通过管道向舱内喷射，然后采样后经过安置在舱外的污染物检测装置后得到

表 2.2 样机位置的 CFD 气流仿真比较 (以下的红圈的部分表示紊流或乱流现象)

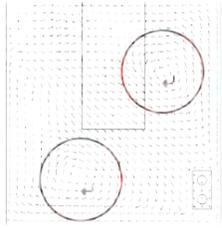
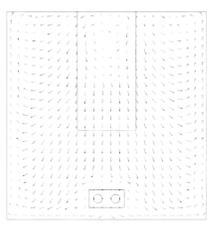
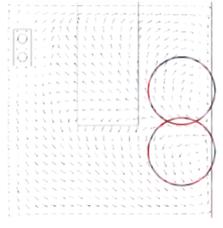
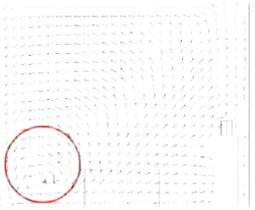
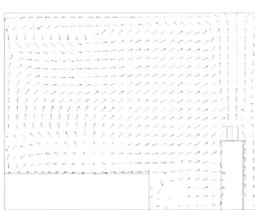
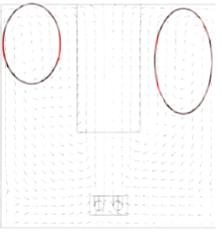
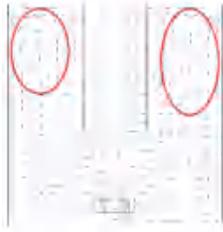
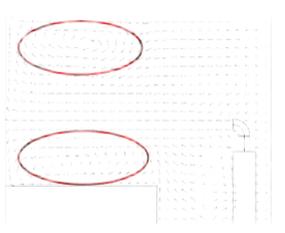
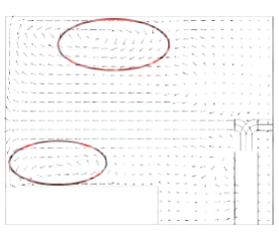
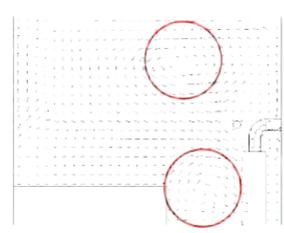
位置	1	2	3
俯视图			
侧视图			
紊流	3 处	无	4 处

表 2.3 三种模式的 CFD 比较

模式	全循环 	部分循环 	全排气 
俯视图			
侧视图			

结果,进行对比分析后得出结果。由于空气中的实验,就要考虑自然衰减,其评价方式如下:

$$N_t = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \# 100\% \quad \text{式 3.1}$$

$$K_t = \frac{V_0' [1 - N_t] - V_t'}{V_0' [1 - N_t]} \# 100\% \quad \text{式 3.2}$$

N_t : 空气中被测污染物的自然衰减率;

V_0 与 V_t : 分别为对照组试验开始前和试验过程中不同时间的空气含被测污染物(微生物)的数量;

K_t : 净化处理对空气被测污染物(微生物)的总衰减率;

V_0' 与 V_t' : 分别为试验组净化(消毒)处理前、和净化(消毒)过程中不同时间的空气被测污染物(微生物)的数量。

表 2.4 出风口角度的 CFD 比较

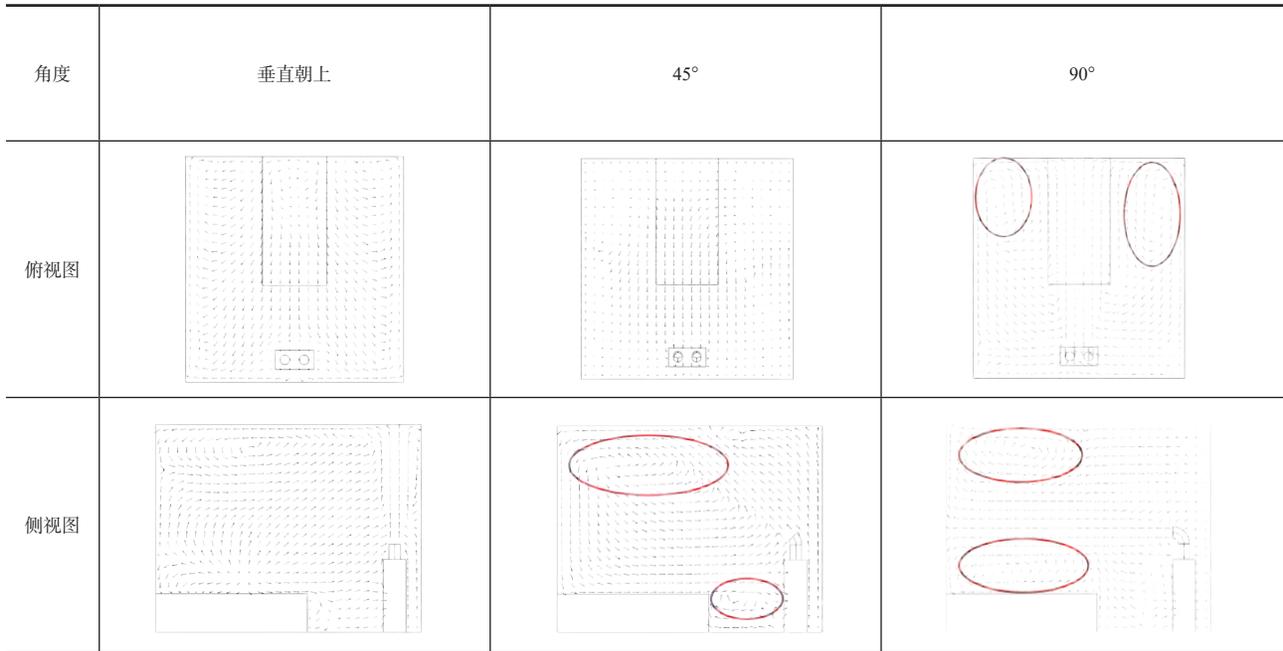


图 3.1 30m³ 舱实验示意图以及布局图

表 3.1 各项检测对象的发生方法仪器和测试方法及仪器
(括号内为该仪器的型号)

检测对象	发生仪器	测试方法及仪器	
		方法	仪器
空气净化器	烟雾发生器 (SPG-C)	方法	颗粒采用分析
		仪器	粉尘测定仪 (8532)
	空气中	方法	空气中采集
		仪器	粒子计数器 (MET ONE3400)
白色葡萄球菌	喷雾染菌微生物发生器 (LB-3310L)	方法	吸引 → 培养 → 计数
		仪器	撞击式空气微生物采样器 (FA-1) 菌落计数仪 (J-2)
生物洁净室	空气中	方法	空气中采集
		仪器	粒子计数器 (MET ONE3400)
	沉降菌	方法	自然沉降菌 → 培养 → 计数
		仪器	培养皿 (φ90×15mm)

每次测试结束后打开试验舱排风系统, 进行过滤除菌或开关紫光灯除菌。

3.2 测试项目

主要测试项目是, 作为空气净化器测试的是颗粒污染物如 $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ 以及洁净空气量 CADR 以及白色葡萄球菌代表空气中的微生物; 作为生物洁净室测试舱内的洁净度和沉降菌来评价。各项实验

产生方法与测试仪器参照表 3.1。所有实验过程都基本上按国家标准来进行。

3.3 结果

3.3.1 基本性能测试

在图 2.2 的三种模式的各种风量与室压差的测试结果如表 3.2 所示。其中为了比较部分循环的效果, 特意做了循环与新风之循环比, 12:2 (A 国标) 和 12:4 (B)。

表 3.2 各种风量与室压差

检测项目	全循环	部分循环		全排风
		A (12:2)	B (12:4)	
总风量 (m^3/h)	600	460 (循 395: 排 65)	460 (循 340: 排 120)	300
压差 (Pa)	0	-6	-8	-18

3.3.2 作为空气净化器

1) $PM_{1.0}, PM_{2.5}$ 的结果

本实验的各项条件都是按照《空气净化器》GB/T 18801-2015 的累积净化量在试验舱进行的。采用烟雾发生器 (SPG-C) 经过点香烟方法, 产生大约 $0.3 \sim 3\mu m$ 的颗粒, 经过 30 分钟后由粉尘测定仪 (8532) 采样, 进行颗粒采样后, 各种模式的数代入式 3.1 和式 3.2 的计算后的总衰减率如表 3.3, 图 3.2 的趋势图所示, 可以知道除了全排风的除尘效率稍微差, 其他都能在 10 分钟以内即可达到 99.8% 以上。

2) CADR 的结果

本实验的也是按照《空气净化器》GB/T 18801-2015 的要求在实验舱内进行的。取样与采样方式如

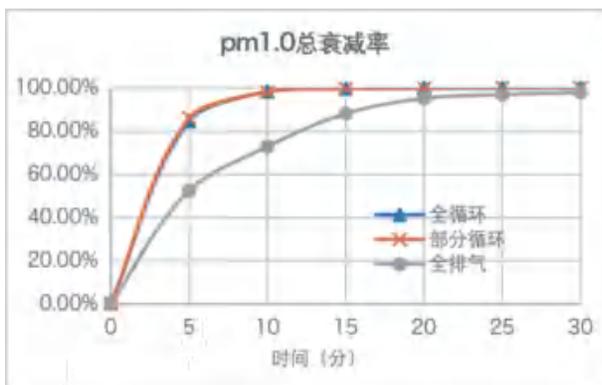


图 3.2 PM1.0 的总衰减趋势

表 3.3 各种模式的除尘性的总衰减率

检测模式	全循环	部分循环		全排风	
		A	B		
颗粒物	PM _{1.0}	99.98%	99.97%	99.97%	97.81%
	PM _{2.5}	99.98%	99.98%	99.98%	97.83%



图 3.3 撞击式空气微生物采样器

同上节，取样采用粒子计数器（MET ONE3400）每隔 2 分钟取样测试，连续记录到 20 分钟为止得到的衰减代入洁净空气量计算式后结果如表 3.4 所示。也就可以知道全排风的 CADR 只有循环的 60% 左右，净化能力大大低于循环模式。

3) 白色葡萄球菌的结果

本实验不仅按照《空气净化器》GB/T 18801-2015 的要求在 30m³ 试验舱进行的，而且还参照了《空气消毒机通用卫生要求》WS/T 648-2019 的要求。空气消毒试验菌为白色葡萄球菌 8032，其菌悬液调制

成浓度约 106cfu/lm。使得空气中含菌量达到 5×10⁴ 以 ~5×10⁵cfu/m³。每个消毒实验之前，先做自然衰减实验。自然衰减实验和消毒实验一样，尽量控制相同的温湿度，保持相近的大气压，溶胶喷雾器喷雾气流压力及流量，使得气溶胶微粒的直径 90% 以上应在 1μm ~ 10μm 之间。

将配制好的白色葡萄球菌悬液，通过细菌喷射枪喷到试验舱中，喷菌液完毕后，开启搅拌风扇 10min，然后静置 15min 后，分别开启被测样机，分别在样机运行至 0、1 小时后进行采样，每次采样时关闭被测试样机；使用图 3.3 的撞击式空气微生物采样器（FA-1）（28.3L/min）进行 1~5min 采样头朝上采样；将采集后的样本放置到 37°C 的培养箱中培养 48h（图 3.4）；菌数采用菌落计数仪（J-2）来计数。



图 3.4 初始菌 105 cfu（左），除菌 1h 后菌 10 cfu（右）

将自然衰减实验的菌落数代入式 3.1 得到自然衰减率，再将净化（消毒）前后空气中的菌落数代入式 3.2 后，得到各项消毒处理对空气被测微生物的总衰减率表 3.5，从中我们知道了，虽然全排风达到 94% 的效率，但是比两种循环模式要差。

表 3.5 各模式除菌前后数量以及其总衰减率

检测模式	全循环	部分循环		全排风
		A	B	
初始空气含菌量 (CFU/m ³)	4.5×10 ⁴	5.5×10 ⁴	5.0×10 ⁴	4.6×10 ⁴
结束空气含菌量 (CFU/m ³)	141	188	177	1979
总衰减率 (自然衰减率 27.5%)	99.6%	99.5%	99.5%	94.0%

4) 作为空气净化器的分析

通过空气净化器标准实验，可以知道全排风模式的洁净能力远差于循环模式。3 种循环模式之间测试数据接近，可视为误差范围。

3.3.3 用于生物洁净室

1) 洁净度的结果



图 3.5 采样位置（俯视）

本实验的各项条件都是按照《洁净室及相关控制环境国际标准》ISO 14644-2015 和《医药工业洁净室（区）悬浮粒子的测试方法》GB/T 16292-2010 参照的要求在试验舱内进行的。由于实验舱面积 12m²，图 3.5 的采样点取 6 个，用粒子计数器取样量为 28.3L/min。EHU 启动前采样 1 分钟，EHU 启动 10 分钟再采样 1 分钟，其尘埃数与其分布结果如图 3.6 和表 3.6 所示，全排风模式的尘埃数大约是两种循环的 1 倍左右。部分循环 A 的尘埃数要略好于其他循环模式。

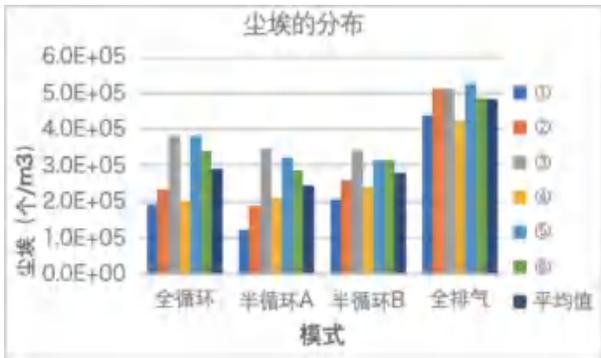


图 3.6 各个模式的尘埃数与其分布

表 3.6 各种模式以及其不同位置的尘埃数 ($\times 10^5$ 个 / m³)

位置	①	②	③	④	⑤	⑥	平均值
全循环	1.9	2.4	3.8	2.0	3.8	3.4	2.9
部分循环 A	1.2	1.9	3.5	2.1	3.2	2.9	2.5
部分循环 B	2.1	2.6	3.4	2.4	3.1	3.1	2.8
全排气	4.4	5.1	5.1	4.2	5.3	4.9	4.8

2) 沉降菌的结果

本实验的参照《医药工业洁净室（区）沉降菌的测试方法》GB/T 16294-2010 的内容在 30m³ 试验舱进行的。将 6 个培养皿 ($\phi 90 \times 15 \text{mm}$) 按图 3.5 舱

内的位置各放入 6 处，以及 EHU 运转时暴露空间 4h，然后像上述的白色葡萄球菌一样进行培养计数，其沉降菌与其分布结果如图 3.7 和表 3.7 所示，全排风模式的沉降菌大约是两种循环的 8-10 倍左右。

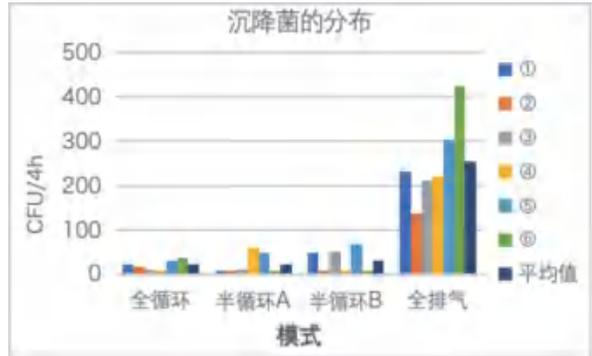


图 3.7 各个模式的沉降菌与其分布

表 3.7 各种模式以及其不同位置的沉降菌 (CFU/4h)

位置	①	②	③	④	⑤	⑥	平均值
全循环	24	16	12	8	32	36	21.33
部分循环 A	4	4	12	60	48	4	22.00
部分循环 B	48	4	52	4	68	8	30.67
全排气	232	136	212	220	304	424	254.67

3) 用于生物洁净室的分析

表 3.8 是参照 GB/T 16292~4-2010 的要点归纳得到的。从尘埃的角度来看表 3.6 的平均值中可以看到全排气模式只能达到十万级，其他的可达到万级；从沉降菌的表 3.7 可以知道所以循环模式都可达到十万级，而全排气则不符合标准范围内。

表 3.8 各种模式以及其不同位置的沉降菌 (CFU/4h)

有关规格	悬浮粒子		沉降菌	
	ISO14644-1	最大允许数 (个 / m ³)	美国 FDA	菌数
洁净度级别	洁净度	$\geq 0.5 \mu\text{m}$	级别	$\phi 90$ -CFU/4h
100	5	3500	A	< 1
1000	6	35200	B	≤ 3
10000	7	352000	C	≤ 5
100000	8	3520000	D	≤ 50

4 结语

利用 EHU 样机通过 CFD 仿真可以知道，虽然无法使整个房间得到层流状态，但是在循环模式情况下，样机放置在床脚部位置可以使得床头部区域得到一个局部的均流气流场，这样就可以有效的保护着医务人员的空气屏障作用。此外，循环出风口的角度也对室内的气流场起着重要作用。要根据房间结构，设备位置的不同，调节出风角度。

全排气模式可以获得较高的负压，使得污染物避免向外排出，阻止了感染患者的病毒对外扩散。但是，全排风模式是通过门缝，建筑物的空隙将外气吸引进入，那就不可避免外界的污染物入侵，导致抵抗力较低的患者二次感染。全循环模式可以

创造一个良好的无菌无尘状态，可是无法实现室内的负压，就无法防止污染的扩散。

从实验数据中可以知道部分循环不仅能保持室内负压，而且可以使病房处于无菌状态。使得患者能够在良好的环境医疗，早日康复起到作用。2个部分循环实验数值非常接近，部分循环A的循环比是按照国标而定，排风量少于部分循环B，排放量的减少，就有利于节能。所以，保持2.5~5Pa的负压，一定量的排气加之净化空气的循环，就可得到良好的负压病房了。经过这一系列实验通过综合考察分析得到了表4.1。

表4.1 各种模式的效果比较(◎非常好,○好,△一般,×差)

净化项目	负压	无菌·无尘	节能	防止污染扩散
全循环	△	◎	◎	△
部分循环A	○	◎	○	◎
部分循环B	○	◎	△	◎
全排气	◎	△	×	◎

美埃(中国)环境科技股份有限公司作为空气净化专业供应商,从本研究中可以知道,通过国内外标准指定的部分循环方式可以得到更为安全·更为有效的负压病房;使得我们更有信心向医疗机构推荐采用部分循环模式。同时,我们也可利用智能化功能,采用压力·风速传感器来数字化控制系统,使得负压病房有效的控制在规定的负压·循环风量的比例,得到最佳的病房,为人类为社会做出应有的贡献。

参考文献

[1] 祁建城,王政,徐新喜等. 传染病负压隔离病房通风空调系统设计 [C]// 生物安全与防护装备学术研讨会 .2007年.
 [2] 国家卫生部,WS/T 368-2012 医院空气净化管理规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
 [3] 王金星, 孙祖帅, 电气自动化技术在医院负压隔离病房中的应用研究 [J]// 中国科技纵横 .2019年.

医疗体系与医疗环境控制可拆式玻璃隔断系统在手术室建设中的应用

陈迎春, 周业磊

(昆山协多利洁净系统股份有限公司, 昆山 215331)

[摘要] 结合国家政策和行业要求, 系统地从结构特点、工艺性能等方面对玻璃隔断进行了分析阐述, 提出了玻璃隔断系统符合“创新、协调、绿色、开放、共享”的建筑行业发展理念, 适应现代化手术的需求, 利于在综合医院与专科医院的推广应用。

[关键词] 医院建设; 隔断系统; 玻璃隔断; 洁净手术室

0 前言

建国以来, 我国医院医疗环境控制思路与技术措施的发展历程, 特别是进入 21 世纪以来医疗环境控制的发展、相应的技术措施与设计规范都成为医疗建筑领域关注的重点^[1], 建设者长期研究的一个重要课题就是如何将符合需求的材料进行筛选并应用到医院建筑隔断中。手术室不等同于洁净室, 更不是层流手术室, 手术环境不应照搬洁净室技术^[2], 在经过大量的对比、模拟、测试、分析后, 以玻璃为主体的隔断系统能够达到上述要求。下文将对玻璃隔断系统的特点及施工应用进行详细说明^[3]。

1 玻璃隔断简述

玻璃隔断系统, 近年来关于手术室隔断系统不断更新, 从最初传统的砖墙表面贴瓷砖或涂料, 到墙板采用铝塑板或抗倍特板, 再到采用轻钢龙骨表面采用挂板或双面木质芯板表面粘贴铝塑板等, 随着对医院手术室的洁净度的要求不断提高, 隔断系统也日新月异, 同时也体现了现代洁净技术在医院手术室隔断中的应用。

从手术室的玻璃隔断与传统的隔断的比较可知, 玻璃隔断无论从结构拆装形式、防火性能、耐腐蚀性、易清洁、不褪色、防霉抗菌等方面, 相对传统饰面、抗倍特板饰面或钢板烤漆饰面等都具有显而易见的优势。同时为适应当前材料、人工费用不断增长, 对材料的可复用性, 且拆装的便捷性有着越来越高的要求, 各主材与辅材在拆卸安装后完全可达到初始安装的质量要求。而手术室玻璃隔断可完全满足以上需求。

2 手术室玻璃隔断的工程实施

2016 年, 我司承接了武汉某医院项目的手术室隔断的材料供应, 客户对传统的隔断材料的可拆性、洁净等级的保证、模块化的结构形式、复用性等方面都不满意。针对本项目的需求特点, 需要从洁净材料中寻找一种合适的材料结构来实现。

在考虑了各种综合解决方案的过程中, 针对业主的需求提出几点主要要求, 一是满足手术室的洁净度要求, 二是采用模块化快拆式弹性连接结构, 以提高材料的复用性。根据我司以往在医院、医药行业的洁净室的设计方案、安装经验以及材料生产工艺的论证与类似结构的使用经验, 提出了全新的玻璃隔断结构形式, 以适应本项目的要求。

2.1 手术室玻璃隔断的应用

(1) 武汉某项目采用的玻璃手术室隔断系统的结构形式如下图 1 所示。



图 1 手术室玻璃隔断结构图

(2) 医院建筑内部隔断装饰材料的要求

对于洁净手术室的装饰装修材料选择, 国标 GB50333-2002《医院洁净手术部建筑技术规范》有着严格条件约束。基于医院手术室的内部隔断的上述特点, 其建造用料应具有如下的性能特点: 表面光洁平整、不产尘、不吸尘、无死角; 密闭性强, 无凹缝、易于密封; 防火不燃或难燃, 难燃材料在着火时产生的烟气无毒性; 耐腐蚀(耐强酸强碱)、耐磨、耐冲击、隔音、防静电、防潮防霉、不吸湿不透湿、环保节能同时表面不脱落碎屑^[5-7]。

(3) 洁净手术室隔断材料的评价指标

根据以上对洁净手术室的装饰材料的特点和要求的分析。我们可以将手术室隔断的评价指标作如下统计，从而更好地为手术室装修材料的选择提供参考^[8]。

表 1 医院手术室装饰材料的技术性能评价指标表

类别	项次	评价标准	重要程度	评价内容
技术性能	无裂痕	规范要求的指标	重要指标	材料本身应无缝隙，安装完成后也无缝隙，或经处理后的缝隙符合规范要求
	不扬尘、不积尘	规范要求的指标	一般指标	凹缝、死角的交角接合的密封及圆弧状况、通风、气体、给排水等管道不得外露
	表面光滑平整、易于清洁消毒	规范要求的指标	次重要指标	材料色泽、表面光洁度体现整体空间的色调
	耐腐蚀性	规范要求的指标	一般指标	对酸碱、消毒剂的抗腐蚀性
	防火性	安全性能指标	次重要指标	防火等级达 A 级
	隔热性	节能性能指标	辅助指标	施工完成隔断及夹层的导热性
	密闭性	配套性能	重要指标	对送回风气流组织的影响程度
	便于拆装性	配套性能	辅助指标	板材、天、地圆弧的结构型式易于施工

(4) 可拆式玻璃隔断的工程实施

选取夹胶玻璃作为原材料。主材为夹胶玻璃，表面坚硬，线形适顺，玻璃做釉面处理，颜色与图案可根据不同科室需求定制，适应不同场合，整体外形美观，观感及手感均优于彩涂钢板结构，完成图片如图 2 所示。



图 2 手术室玻璃隔断现场安装图

(5) 结构型式

本产品采用模块化结构，由于手术床的朝向改为与洁净走廊平行，可以在手术床的正上方设置非诱导送风装置（医学界俗称层流），送风气流垂直下送；沿手术床的长边所对的侧墙下方设置多个回风口；麻醉工作区的正上方设置排风口^[9]。这样就能够控制手术环境的气流组织，避免了手术区的上回风，以有效排除手术区内菌尘。各种主材墙板材、门、风口、电视、显影器等通过专用的连接件组装成洁净室墙板系统，并很好地将墙板系统与天花板、地面连接。通过专用的型材与 H 型钢结构，通过专

用节点处理方法（如图 3），解决医院手术室隔断系统所需要的各种墙节点。

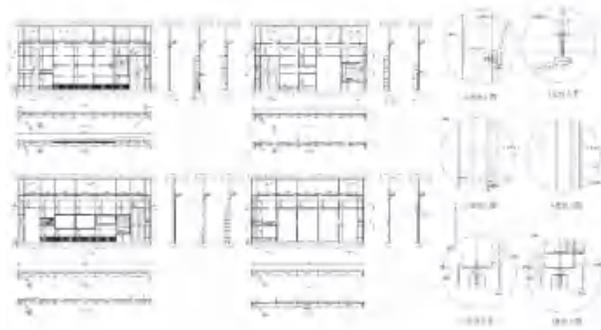


图 3 玻璃隔断设计节点图

(6) 工期与安装工艺

加工区域不在工地现场，不受现场条件限制，全部产品能够在 2-3 个月完成安装，传统营建方式根本不可同日而语。玻璃隔断系统安装工艺流程：定位放线、固定配套天地龙骨、固定竖龙骨、固定横撑龙骨、成品玻璃挂板及圆弧补角安装、缝隙饰条安装。

(7) 绿色环保

医院内部各个科室，根据业务量的大小、发展前景等未知因素需要不断进行内部布局调整以适应医疗形势的需要，玻璃隔断可拆除后重复利用，基本不产生建筑垃圾，非常符合当前坚持绿色环保与可持续发展的理念。

(8) 装配式结构

符合国家相关装配式结构相关政策要求：推动具备条件的政府投资性项目率先示范应用新型建筑工业化；保障性住房项目每年至少要有 30% 采用新型建筑工业化方式建设，并逐年提高比例。学校、医院等公共建筑要优先采用装配式建设技术；推广适合工业化生产的预制装配式混凝土、钢结构等建筑体系，加快发展建设工程的预制和装配技术、提高建筑工业化技术集成水平。支持集设计、生产、施工于一体的工业化基地建设，开展工业化建筑示范试点^[10]。

本产品中板与板，板与门框，板与风口等都采用相同厚度尺寸，以符合新版 GMP 实施指南中洁净室内材料需平整尽量少的凹凸边的要求。墙板系统内各种公用工程及自控系统的线管预先内置于夹层内部，无需现场穿管开孔等工作，保证安装过程中产品的质量。

经测试，玻璃隔断系统两层钢化玻璃之间采用夹胶粘接，背面贴有硅酸钙板，既有提高隔墙的结构强度作用，又起到隔音效果与普通单层页岩砖砌

筑内墙基本类似。

本系统的夹胶玻璃厚度为 13.5mm, 常规使用的钢制隔断墙体厚度为 10-12mm, 两者比较, 明显手术室隔断的刚度及抗冲击性能(例如非常规情况下的冲撞引起的变形)优于此类结构建筑内墙, 这也是该系统今后需要改进和完善的方面。

2.2 手术室玻璃隔断实际工程中的应用问题

(1) 玻璃隔断的受力问题

玻璃隔断采用的双层夹胶玻璃加硅酸钙板粘接而成其自重约 35kg/m², 所以每片墙板的重量约 115kg/m², 而此板材下方的风口、显示器、气体接口设备带等承受板材的重量, 所以必须将板材的重量转嫁于整体框架上。

(2) 可拆式弹片结构在玻璃隔断中的应用

玻璃面板与玻璃面板之间采用弹片卡接, 并用铝合金饰条置于面板之间使面板的整体卡接强度提高, 采用 PVC 饰条嵌于面板的拼接缝之间, 使整体表面平整美观, 同时使整体结构的气密性达到要求, 其结构如图 4 所示;



图 4 玻璃隔断连接局部图

(3) 专用连接型材在玻璃隔断中的应用

为了便于玻璃面板的拆装, 我司通过对医药厂洁净室的可拆隔断系统作局部改良与加固, 使板与骨架之间的连接结构强度更高, 如顶部圆弧转角的加强方式, 采用挂接式并用机械紧固的方式使面材与骨架系统连接, 如图 5 所示;



图 5 玻璃隔断圆弧转角局部图

(4) 手术室玻璃隔断系统的材料应用

—框架结构材料

采用支承骨架结构, 各零部件之间采用独特的弹性卡扣结构, 既保证了各部件的连接强度, 又使

完成面无螺丝、铆钉等紧固件, 使表面平滑美观满足项目中对手术室隔断表面要求。

A、骨架水平度采用调整座调节墙体的水平;

B、骨架立柱上部插于天轨内部并与土建连接, 下部卡接于调整座内部并采用螺栓紧固;

C、立柱与立柱之间采用补强料卡接, 每支补强料纵向间距 500mm。

—装饰面材料

本系统所用面材为夹胶玻璃墙板, 采用两层涂有釉面的钢化玻璃配合有机层结构, 表面光滑美观, 玻璃表面采用降光泽度处理, 使墙面反光无集中反光亮点。玻璃上固定有铝型材框架, 方便与 H 型钢和弹片的固定。

3 结束语

通过上述对玻璃隔断系统各种性能的分析, 选择玻璃隔断系统并应用到医院手术室隔断系统中, 是当前医院建筑内墙选材较好的一种方案, 也是当前医院建筑内墙用材的发展趋势, 符合“装配式、绿色环保节能”的建筑总体发展理念, 值得推广应用。

参考文献

- [1] 刘燕敏, 沈晋明. 我国医院医疗环境控制技术的 70 年发展历程 [J]. 《中国医院建筑与装备》, 2019 年, v.20(10):26-29.
- [2] 沈晋明, 刘燕敏. 手术室手术环境控制不应照搬洁净室技术 [J]. 《暖通空调》, 2017 年 (8).
- [3] 温向阳. 钢制隔断系统在医院内墙建设中的应用 [J]. 《中国医院建筑与装备》, 2018 年 (19): 82-85.
- [4] 吴慎青, 王雨, 覃润波等. 医院洁净手术室装饰装修材料的比较与选择 [J]. 《中国医学建筑与装备》, 2012 年 (01):41-44.
- [5] 陆风, 杨力. 医学实验室维护结构用材的比较研究 [J]. 《中国医院建筑与装备》, 2009 年 (10):64-69.
- [6] 国家卫生和计划生育委员会. GB 50333-2013 医院洁净手术部建筑技术规范 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014
- [7] 刘燕敏, 何焰, 陈琳玮等. 多联手术室的研发与实施 [J]. 《中国医院建筑与装备》, 2021 年 (4): 16-20.
- [8] 陈庄元. 福建省福州儿童医院新病房大楼工程洁净手术室墙面及顶棚施工技术 [J]. 建材发展导向, 2016.
- [9] 安徽省人民政府办公厅. 关于加快推进建筑产业现代化的指导意见 [J]. 《安徽建筑》, 2015 年, 22(001):7-8.
- [10] 周增产, 张晓文, 杨仁全等. 双层中空玻璃连栋温室的研究与应用 [J]. 农业工程技术: 温室园艺, 2006 年, 000(011):19-21.

医院病理科工艺设计要点分析

牛维乐¹, 张丽娜¹, 李炫¹, 孟令坤¹, 陈清莹¹, 纪迎迎¹,
杨峰², 王群芳², 张冬冬², 王书要², 侯守源³

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建科环能科技有限公司, 北京 100013;
3. 河北省沧州市青县自来水公司, 沧州 062650)

[摘要] 本文从病理科的功能出发介绍了医院病理科的工艺设计内容。

[关键词] 医院; 病理科; 设计要点

1 病理科简介

病理组织学的细胞水平的认识(利用显微镜的放大,可分辨 1μ 水平的细胞变化)是目前公认的对疾病最可信赖的定性诊断,病理组织学诊断是B超、核素、血管造影、CT、MRI、生化、免疫等手段所不能代替的。无论从病理诊断在医疗实践中的地位还是从病理科的工作性质和内容上都明确告诉人们,病理科在医院中起着举足轻重的作用。

2 病理诊断技术范围和内容

医院病理科的常规工作有三项:即尸体检查(简称尸检)、活组织检查(简称活检)、细胞学检查。

2.1 尸检

尸检是尸体检查的简称,又称病理解剖,在近代医学二百余年发展中起到了基石和推动作用,至今它仍在医师的提高培养、新疾病的发现(如艾滋病)、对人类疾病的动态变迁认识等方面显示着独有的优势,尤其是对提高医院的医疗质量起着质量控制(质控)的“金标准”作用,因为在质控的诸多标准中首推尸检结果客观可靠。

2.2 活检

活检是活组织检查的简称,活检是病理科主要常规工作,通过活检为临床提供定性诊断。活检诊断的生命是“准确、及时”四个字,这在术中冰冻切片诊断时更显突出。如果没有准确、及时的术中病理诊断,很难想象外科医生去进行乳腺、甲状腺、胰十二指肠、脑、肝等部位的手术;同理,如果没有病理对内窥镜活检的准确、及时诊断,即使进行了气管镜、胃镜、肠镜、腹腔镜等检查也是很难确诊的。

2.3 细胞学检查

细胞学检查包括脱落、刷取、组织印片和肿块穿刺等方法,用以决定病变性质,推测组织学类型。脱落细胞学检查不仅方便、经济,而且又可靠、实用。痰、尿、胸腹水以及针吸细胞学检查,都能在简单的操作中做出明确的诊断。在我们的日常工作中时常遇到一些病例,花费几千元,耗时几个月未能明

确诊断,而通过细胞学检查病人的痰液就得到确切的诊断,因此,在广大基层医院普及细胞学检查意义深远。

2.4 各种辅助病理检查

包括组织化学、免疫组化、分子技术、电镜、形态计量、图像分析等技术的引进和应用,以辅助病理诊断。医院应根据等级要求逐项开展,不断深化。

3 病理科服务流程图

病理组织检查是病理科的重要工作,应严格按照工作流程进行操作,确保制作出高质量的组织切片和及时发出准确的病理诊断报告。病理科服务流程分为病理科常规服务流程、病理科术中快速冰冻工作流程、病理科细胞学检查工作流程,详见图1、图2、图3。

4 病理科建设的分区控制

根据病理检测的工序和实验功能的不同,病理

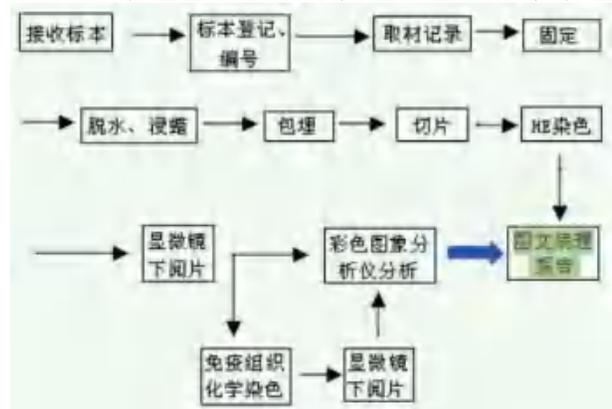


图1 病理科常规服务流程

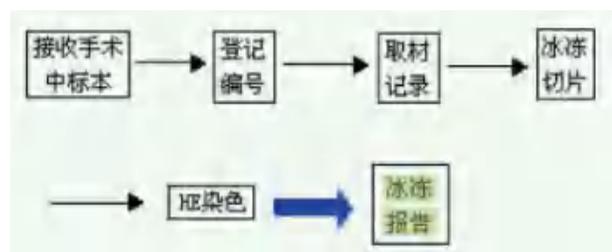


图2 病理科术中快速冰冻工作流程

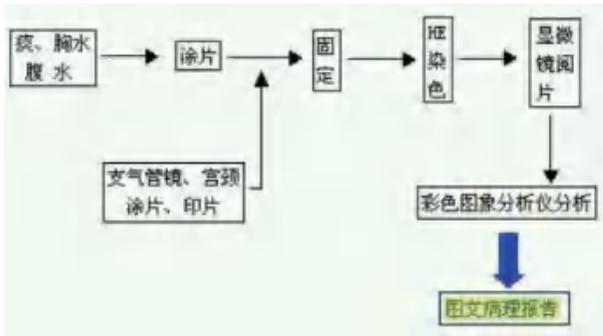


图3 病理科细胞学检查工作流程

科可划分为多个技术工作间，不同的工作在不同的区域内完成，既相互联系又不互相干扰。根据有无污染和污染程度的不同，病理科划分为污染区、半污染区、清洁区、相对危险区，四个区域应明确的分开设置。

污染区的污染源包括送检标本中的病原体和实验中使用的有腐蚀性和能挥发有害（毒）气体的各种化学试剂、放射性元素及污水。污染区应为独立的工作区，以减少污染源对其他区域的影响；污染区应安装紫外线消毒灯等空气消毒装置，每天进行清洁消毒；污染区应安装具有空气净化（除味、除有害气体）功能的通风设备，将有害气体和废气经过处理后排出室外，既保证室内工作环境的安全，又能保证污染区的排风不至于对大气环境造成危害；污染区应安装污水处理系统，污染区的排水应经过处理后达标排放。

半污染区的污染源主要是实验中使用的有腐蚀性和能挥发有害（毒）气体的各种化学试剂。半污染区应安装具有空气净化（除味、除有害气体）功能的通风设备，将有害气体和废气经过处理后排出室外，既保证室内工作环境的安全，又能保证污

表1 病理科的分区

序号	功能单元	区域划分	房间名称
1	活检和细胞学检查区	污染区	收发室（样本接收室）、巨检室、取材室、标本储存室、冷冻切片室、细胞学制片室、细胞学穿刺取材室
2		半污染区	常规制片预处理室，常规制片室，大体标本制作、陈列室，视工作需要和技术条件设置的特殊染色和免疫组化室、相关技术室
3		清洁区	组织病理学诊断室、细胞病理学诊断室、科内病理阅片和会诊室、信息资料室、摄影室、办公室、会议室、仓库、病历资料档案室
4		相对危险区	易燃、易爆物品储藏室，有毒试剂储藏室
5	尸检室及其辅助用房	污染区	普通尸检室、尸体解剖室、大体标本制作室、组织细胞培养室、标本储藏室
6		半污染区	尸检准备室
7		清洁区	更衣室、淋浴室、标本储藏室
8	其他		细胞遗传和分子病理学实验室
9			其他特殊检测实验室
10			图书、电子信息和学术活动室
11			进修病理医师教室

染区的排风不至于对大气环境造成危害；污染区应安装污水处理系统，污染区的排水应经过处理后达标排放。

清洁区内不存在病原体和有害的化学试剂。

相对危险区的污染源为存储的有腐蚀性和能挥发出有害（毒）气体的各种化学试剂，相对危险区应安装具有空气净化（除味、除有害气体）功能的通风设备，将有害气体和废气经过处理后排出室外，既保证室内工作环境的安全，又能保证污染区的排风不至于对大气环境造成危害。

大型病理科的细胞遗传学和分子病理学实验室、电镜室、图像分析和流式细胞实验室应根据是否解除患者标本、是否有有害的化学试剂、是否有电离辐射等因素划分污染区、半污染区、清洁区、相对危险区。

5 病理科专用设备

病理科专用设备见表2。

表2 病理科专用设备间表

序号	房间名称	设备名称
1	病理技术室	石蜡切片机、冷冻切片机、自动脱水机、自动染色机、组织包埋机、冰箱、一次性刀片或者磨刀机、液基细胞制片设备、恒温箱、烘烤片设备等
2	病理取材室	直排式专业取材台、专用标本存放柜、显微照相设备、电子秤、冷热水、洗眼器、紫外消毒灯
3	免疫组化室	实验台、微波炉、高压锅、冰箱、有条件的可设置全自动免疫组化染色机
4	资料室	专用切片及蜡块存放柜、有条件的可设置物流传输系统
5	分子病理检测室	生物安全柜、PCR仪、杂交仪、流式细胞仪、基因测序仪、低温冰箱、普通冰箱
6	病理诊断室	病理科医师每人配备1台双目光学显微镜、并装备多人共用显微镜、显微摄影及投影设备
7	其他设备需求	电镜、超薄切片机、切片数字化扫描仪

6 医院病理科的发展的建议与措施

6.1 完善病理科的硬件设施

严格按照2009年国家卫生部办公厅关于印发《病理科建设与管理指南（试行）》（卫办医政发[2019]31号）的通知加强对病理科的建设，增加人员，配置设备，改善条件，健全制度，严格管理，逐步建立规范化的病理科。根据有无污染和污染程度的不同，病理科工作区域严格划分为污染区、半污染区、清洁区、相对危险区四个区域，区域之间应明确的分开设置，禁止将个人物品、食物、书籍等与实验无关的物品带入实验区和污染区，尽最大可能降低生物安全风险。病理科配备常用的消毒应急包，取材、切片、穿刺如果发生被锐器刺伤或者割伤时及时有效地处理。病理科要做好环境消毒和试验台消毒。病理科的工作中尽量采用减少有毒时间的使用量，采用无毒实际代替有毒试剂，如：TO试剂代替二甲苯、无毒封片代替普通封片剂、AEC显色代替DAB

显色等。

6.2 提高病理科的业务人员的素质和数量

病理科业务人员的素质和数量是保证病理诊断质量的最基本条件，各级医院必须按照规范要求，选派素质优良的、有资质的人员从事病理工作。病理科应结合实际工作量配备数量足够的病理医师、病理技术人员和其他辅助人员，承担教学和科研任务的医院还应适当增加工作人员的数量。病理科人员配备的数量应根据各医院的床位数量和医院的级别确定，病理医师按照每 100 张床位 1~2 名配备，同时按照 1:1 的比例配备技术人员，还应配备资料管理和相关辅助人员。医院因教学、科研、病理专科化及开展新业务的需要，病理医师和技术人员的数量也应适当增加，技术员和医师必须分工明确，不得相互兼职。二级医院至少要有两名医生具有出具病理诊断报告的资格；三级医院至少要有五名医生具有出具病理诊断报告的资格，至少两名医生具有出具术中快速病理诊断报告的资格。

6.3 严格消毒管理，防止交叉感染

严格执行无菌技术操作规程，穿刺必须保证一人一针一管一巾一带，穿刺前洗手消毒。实验人员工作时要专用穿工作服，佩戴口罩和橡胶手套。取材和尸检时必须穿防水隔离衣、配戴防护眼镜。取材、尸检后的器械及时清洗浸泡消毒。取材室和尸检室使用后及时清洁消毒实验台面、地面并使用紫外灯进行全室消毒。冷冻切片机使用完后仔细清洗箱体内的废弃人体组织碎屑，使用冷冻切片专用消毒液或紫外灯对切片机进行消毒。常规切片机和脱水机、包埋机、染色架等常规设备也需要定期消毒。申请单和报告单要分开，病理报告单采用计算机管理系统，申请单须经过消毒处理后再装订归档。易耗品（玻片、碎蜡、试管、一次性切片刀）需要消毒处理后再利用。病理科的生物安全问题不仅关系到实验人员的身体健康，也直接影响到病理科的质量管理体系，只有医院、科室、个人高度重视生物安全问题，并能持之以恒的坚持实施和不断完善才能防止生物安全事故的发生，保证病理科的医疗安全，为实验和工作人员提供一个安全、舒适的医疗环境。

正负压智能转换控制系统在平疫结合负压病房的 实践应用

廖德安

(合肥杜威智能科技股份有限公司, 合肥 230001)

[摘要] 通过基于智能微差压变送专利的精准微压智能测控技术, 通过 PDCA 全流程闭环管控的底层逻辑来实现压力控制和环境控制, 实现了以负压病房为核心单元的压差梯度、气流组织控制以及换气次数控制并实时进行效果验证, 有效实现隔离, 达到保护医护人员的目的。

[关键词] 精准微压智能测; 控梯度压差; 气流组织控制; 换气次数及高效压阻监测; 平疫一键转换

1 背景

新冠病毒与人类长期共存、防疫常态化已经成为共识。“小汤山、火神山、雷神山”的建设是应急之策, 从社会经济、资源利用、产出效率上来讲都不具备大规模推广的可能性。而现有综合医院在疫情初期对个别、点状的传染源的控制行之有效, 一旦疫情进入爆发大流行状态, 预设则完全失效, 甚至成为疾病传染源集中地。同时, 将现有综合医院的感染科、传染病楼做大、做全, 则会产生大量病房空置、医疗资源浪费的情况, 这就对综合医院提出了医疗资源相对弹性的要求。

2020年5月9日国家发展改革委、卫健委、中医药管理局发布《公共卫生防控救治能力建设方案》-发改社会〔2020〕735号(简称《方案》)。为指导《方案》实施, 2020年7月30日国家卫健委、发改委发布《综合医院“平疫结合”可转换病区建筑技术导则(试行)》-国卫办规划函(2020)663号文(简称《导则》), 要求各级卫生健康行政部门以“平战结合、分层分类、高效协作”为原则, 构建分级分层分流的城市传染病救治网络。

2 需求

和现有规范、标准相比, 《导则》更明确了平疫结合负压病房风险控制点, 涉及的压力控制点及环境控制点如下表所示。

长期以来, 生物安全实验室、医药工业洁净厂房建设均有相对完整、严格的风险分析评估体系, 从人防、物防以及技防三个层面保障稳定可靠控制目标的实现, 建设、运维成本高, 且需配备专业运维人员保障系统顺畅运行。

随着万亿抗疫特别国债的发行, 为提升公共卫生防控救治能力, 全国各地都在大规模新建、改造平疫负压病房, 范围广、影响面大, 不可能像生物安全实验室、医药工业洁净厂房在压力控制、环境控制方面投入太大, 其结果就是压力控制、环境控制数据孤立、静止、片面, 为负压而负压, 但负压只是手段、隔离才是目的。因此, 从技防风险控制点出发, 低成本、可大规模推广的数字化、网络化、可视可控、可实时效果验证的模块化、分布式部署的平疫负压病房解决方案成为刚需。

表1 平疫结合负压病房风险控制点

序号	功能需求	导则要求
1	平/疫一键切换	2.4 “平疫结合”区在符合平时医疗服务要求的前提下, 满足疫情时快速转换、开展疫情救治的需要
2	压力梯度控制及监测	6.1.6 疫情时通风系统应当控制各区域空气压力梯度, 使空气从清洁区向半污染区、污染区单向流动
		6.3.5 疫情时, 负压病房与缓冲间、缓冲间与医护走廊宜保持 $\geq 5\text{Pa}$ 的负压差。每间负压病房在疫情改造时宜在医护走廊门口视线高度安装微压差显示装置, 并标示出安全压差范围
3	换气次数监测	6.1.7 “平疫结合”区疫情时清洁区最小新风量宜为 3 次/h, 半污染区、污染区最小新风量宜为 6 次/h
		6.3.2 平时病房最小新风量宜为 2 次/h, 疫情时负压病房最小新风量应 ≥ 6 次/h; 负压隔离病房最小新风量应 ≥ 12 次/h
4	过滤器压阻监测及报警	6.1.10 送、排风系统内的各级空气过滤器应当设压差检测、报警装置。设置在排风口的过滤器, 每个排风系统最少应当设置 1 个压差检测、报警装置
5	环境集中监测及报警	7.2.3 医院建筑设备监控系统设计应当预留负压区域... 各污染区和半污染区的压差监控节点。转换后在设备监控值班室或护士站实现负压病区污染区及半污染区的压差监视和声光报警装置, 病房门口宜设灯光警示
		7.2.8 应当采用建筑设备监控系统对负压手术室和生物安全实验室的温度、湿度及压差进行监控
6	智能化	7.2.11 根据疫情救治需要, “平疫结合”区宜设置与疾控中心、应急指挥中心等管理部门的专用通信接口
	应急演练	9.3 承担疫情救治任务的医院应当定期检查相应系统、设备的状态, 并定期开展必要的演习, 保证各系统、设备及应急处置体系处于正常状态

表 2 压力控制、环境控制投入对比

序号	项目	生物安全实验室、医药工业洁净厂房	平疫负压病房
1	风险分析评估体系	完整、严格	缺乏相关运行维护评价规范
2	人防物防技防	完备	人防物防完备、技防不完备
3	数量	少	多
4	规模	小	大
5	资金保证	资金充足	少
6	意识	思想重视	不重视
7	运维	配备专业人员	无

3 系统架构

为有效抗击疫情，杜威智能依托杜威微压智能测控协同研究开发中心，结合二十四年制药工业洁净室在线监测实践经验，成功研制出量程 ±25Pa、精度优于 1%、最小可测量 0.1Pa 的防疫抗疫专用数字微差压变送器及正负压智能转换控制系统，并在武汉大学中南医院得到有效验证。该系统采用智能微差压变送专利，通过精准微压感知测控技术，结合嵌入式软件算法，解决了负压病房梯度压差、气流组织控制、换气次数及高效压阻监测和实时效果验证痛点，可分布式部署，具有模块化、网络化、可视、可控、可追溯的特点，可广泛应用于平疫结合病房、门急诊、医技等场合。

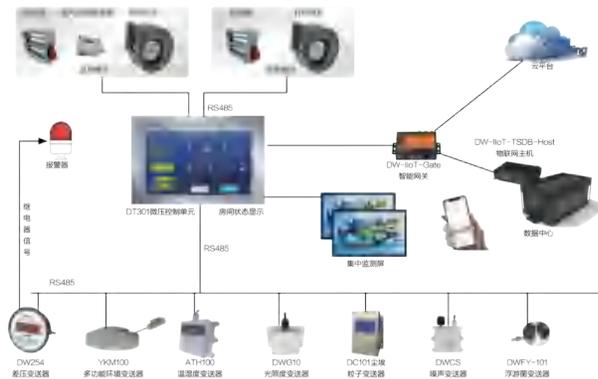


图 1 系统架构

4 技术实现

4.1 压差梯度监测及控制

系统核心由高精度智能微差压变送器、MCU 主控单元、风阀控制单元组成。采用 PDCA 全流程闭环管控的底层逻辑来实现压力控制和环境控制。实现原理如图 2：

(1) 设定目标 (Plan)。MCU 主控单元设定压力控制目标和环境控制目标 (换气次数)，如以医护走廊为基准，缓冲间与医护走廊之间 -5Pa 压差，病房与缓冲间之间 -5Pa 压差，卫生间与病房之间 -5Pa



图 2 PDCA 全流程闭环管控

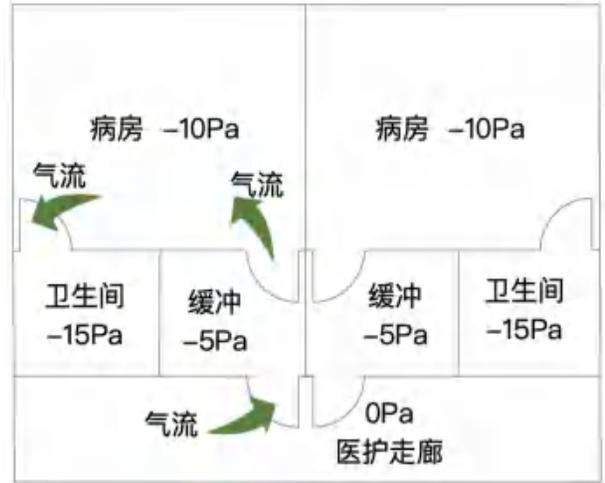


图 3 梯度压差气流组织控制

的压差，如图 3 所示。

(2) 态势感知 (Do)。在各功能区部署一台高精度数字微差压变送器，精准感知各功能区之间的实际压差值、换气次数并实时反馈至 MCU 主控单元。

(3) 分析对比 (Check)。MCU 主控单元比对设定目标值和实际值，嵌入式软件算法计算发出执行指令给风阀控制单元。

(4) 精准执行 (Act)。风阀控制单元接收指令控制送、排风阀执行器的开合度，达标停止执行，不达标则继续下一次循环。设定如下图 4 所示。



图 4 正负压病房智能转换控制系统设置



图5 智能控制显示屏

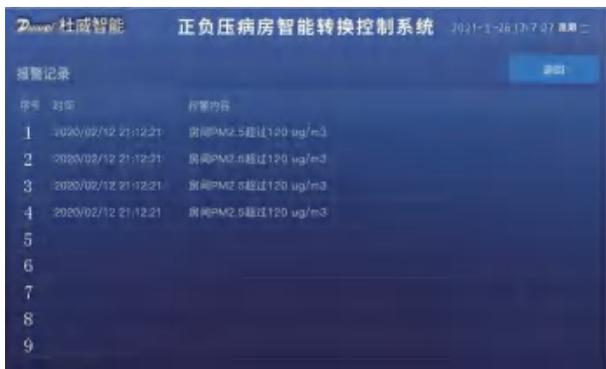


图6 系统日志及报警查询

4.2 环境集中监测及报警

每病房缓冲间门口部署智能控制显示屏，实时感知病房相关环境指标，如温度、湿度、CO₂浓度、PM_{2.5}、VOC、风阀、门磁、窗磁等状态，超标声光报警。

4.3 换气次数监测及控制

换气次数是控制污染的以及保持室内的压力有效途径。和风口法、风管法等需现场测定并计算的传统测试方法不同，在各功能间送风口各部署一台高精度数字风量变送器，精准感知送风速度并自动计算换气次数并在智能控制显示屏显示。疫情时期一键切换至负压模式，换气次数不足则自动报警。为保证换气次数，也可在病房主风管或各功能区送、排风管增设补偿风机，一旦送风量不达标，MCU 主控单元自动向风阀控制单元发送指令，启动补偿风机保证换气次数。

4.4 过滤器压阻监测及报警

在空调机组的初、中、高效送风过滤器、病房排风高效过滤器处部署高精度数字微差压变送器，实时监测过滤器状态并反馈至智能控制显示屏显示，超过压阻上限设定值则报警提示更换。

4.5 气密反馈及校验

项目施工联调阶段，启用测试模式，侦测三项关键指标：（1）送、排风全开，侦测最大换气次数；（2）

送风全开、排风全关，侦测压差上限；（3）送风全关、排风全开，侦测压差下限。三项管关键指标反向验证施工是否符合暖通设计标准，系统默认只能在关键指标范围内进行设置和调整，可根据实际调试和运行经验选择最优控制方式。

4.6 平/疫一键切换

系统包括平常模式和疫情模式，两种模式独立运行，疫情模式下，接上级指令，输入密码即可直接切换至疫情模式，满足疫情时快速转换、开展疫情救治的需要。

4.7 系统日志及报警查询

智能控制显示屏以及护士站大屏，可实现六类异常报警，包括压差不足报警、换气次数不足报警、各级过滤器压差报警、环境指标异常报警、门磁状态异常报警、设备故障报警。如图6所示。

5 结论

正负压智能转换控制系统在精准微压智能测控技术基础上，全面感知，智能控制，主动调节、效果验证所见即所得，可广泛应用于平疫结合负压病房、门急诊、医技、手术室、ICU、静脉用药调配中心（PIVAS）等各种应用场景。通过专用通信接口，可结合物联网、大数据、AI及5G技术，搭建平疫结合负压病房环境参数监测平台，使平台软件具有学习功能和分析功能，不仅可以在压力系统出现非正常波动时协助工作人员进行分析和判断，而且具有一定自我调节和修复能力，随着时间推移，系统不断学习和数据积累后还可进行故障或工况转换的预判，从而提前预警工作人员。从而推进智慧医院信息与疾控数据共享、业务协同，打造疾控、卫健委防疫应急平台，构建分级分层分流的传染病救治网络。

参考文献

[1] 国家发展改革委. 卫健委. 中医药管理局〔2020〕735号文. 公共卫生防控救治能力建设方案.
 [2] 国家卫健委. 发改委国卫办规划函（2020）663号文. 综合医院平疫结合可转换病区建筑技术导则（试行）. .
 [3] 国家卫生和计划生育委员会. GB 50849-2014 传染病医院建筑设计规范[S].北京: 中国计划出版社. 2015
 [4] 全国洁净室及相关受控环境标准化技术委员会. GB/T 35428-2017 医院负压隔离病房环境控制要求[S]. 北京: 中国标准出版社. 2017
 [5] 国家卫生部. GB 50686-2011 传染病医院建筑施工及验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2012
 [6] 许钟麟, 张彦国, 曹国庆. 负压隔离病房建设简明技术指南[M]. 中国建筑工业出版社. 2020.06

当务之急：降低病毒生成空气传播的风险

沈晋明¹，刘燕敏¹，黄云材²，吴志枫²

(1. 同济大学，上海 200092；2. 广东申菱环境系统股份有限公司，佛山 528308)

[摘要] 德尔塔是迄今为止发现的最易传播的变种，空气传播风险增长。但病毒生成空气传播必需具备一定条件，疫情中许多案例一再验证了这一点。本文提出破坏生成空气传播条件是最佳的抗疫对策，而不是消毒灭菌。符合合规的新风量、合适的回风过滤器与合理的气流分布的措施与装备值得推广与应用。

[关键词] COVID-19 疫情；德尔塔变异株；传播方式；空气传播；破坏传播条件；对策与措施

0 引言

尽管 COVID-19 疫情持续一年多，在全球范围内有些地区仍在蔓延，感染人数仍维持在高位，这给了新冠病毒更多突变和被选择的机会，新的变异株在不断出现。如 2020 年 9 月在英国被发现 Alpha 变异株，于 2020 年 5 月在南非被发现 Beta 变异株，于 2020 年 11 月在巴西被发现 Gamma 变异株，于 2020 年 9 月在印度被发现 Delta（德尔塔）变异株，以及 2020 年 12 月在秘鲁发现的 Lambda 变异株。看来新冠病毒变异成为常态。

由于德尔塔变异株“双突变”（携带 E484Q 和 L452R 突变），使得德尔塔变异株具有传播力强、潜伏期短、病毒载量高、病情发展快、重症比例高、可能有免疫逃逸现象。世界卫生组织（WHO）总干事特德罗斯·阿达诺姆·格布雷耶苏斯在 6 月 25 日的新闻发布会上说，德尔塔变异病毒是“迄今为止发现的最易传播的变种”。德尔塔变异株成为了全球最新一波 COVID-19 疫情的驱动力，目前全球新冠肺炎确诊病例已经突破两亿大关。

自 2021 年 5 月 21 日在我国广东省广州市荔湾区一名 75 岁的女性（5 月 18 日出现发病症状）被确认为德尔塔新冠肺炎以来，至今在我国南京、扬州、张家界、郑州、长沙、武汉等多个城市出现新一轮新冠肺炎疫情，波及 20 多个省市，出现 200 多个中高风险区。本轮疫情波及范围大，人群面广，加之多个不同来源的输入病例导致的本土疫情叠加，加大了整个疫情防控工作的艰巨性和复杂性。

1 变异病毒空气传播风险增大，令人担忧

德尔塔变异株来势汹汹，成为目前全球新冠肺炎疫情流行的主要毒株。德尔塔变异株的传染性强和传播快，基本传染数(R0)高达 8-9，与水痘差不多，比以往毒株传播能力提高了 1 倍。体内病毒载量高，广东省疾控中心的研究显示，德尔塔突变株感染后的病毒载量比原始毒株高 1260 倍。致病力更强，与感染英国最早发现的 Alpha 变异株的人相比住院风险要高出 1 倍。潜伏期短，两三天就会发病，有些

甚至 24 小时就发病。为此专家更新了对德尔塔变异株“密切接触者”的认识。“在同一空间、同一单位、同一建筑，在发病前四天和病人相处在一起的，都是密切接触者。可能超过 1m、2m 的距离也会传播”。这使得人们对德尔塔变异株引起疫情反弹感到恐慌，特别是本轮疫情中广州早茶传播链、扬州麻将馆传播链、荆州火车站传播链、常德穿紫河游船传播链等等，这在客观上表明了封闭的室内环境成为德尔塔变异株传播的主要场所，令人担忧。如真是德尔塔变异株的空气传播风险增大了，降低病毒生成空气传播风险应是这轮疫情防控的当务之急！



图 1 德尔塔变异株空气传播风险

国内外相关科学研究和疫情防控实践表明，德尔塔变异株并没有导致新冠病毒生物学特性发生颠覆性改变，传染源、传播途径基本清楚，现有的疫情防控措施对德尔塔变异株仍然有效。这就是说德尔塔毒株的传播方式没有发生变化，仍是通过呼吸道飞沫传播，接触污染物传播，气溶胶传播（或称空气传播）。正如我国《新型冠状病毒肺炎诊疗方案（试行第八版）》明确表明新型冠状病毒“经呼吸道飞沫和密切接触传播是主要的传播途径。在相对封闭的环境中长时间暴露于高浓度气溶胶情况下存在经气溶胶传播的可能。由于在粪便及尿中可分离到新型冠状病毒，应注意粪便及尿对环境污染造成气溶胶或接触传播”。

所有这些传播途径中,病毒的空气传播(见图1)最令人关注、令人不安。

2 变异病毒空气传播,需有条件

病毒空气传播一直是令人质疑、令人困惑、令人捉摸不定、更令人防不胜防。

空气作为一种传播途径总是存在的,毋庸置疑。Airborne transmission 如果从气溶胶力学解释仅仅是污染物的空气传输,无论是传输途径或传输方式没有什么可以争议的。如果从传染病学和公共卫生学定义空气传播,则指能空中传送,通过暴露于长时间悬浮在空气中、长期存在传染性、含病原体的小液滴和微粒而被传播感染。那空气传播不仅仅是传输方式而且还使被感染的结果,这就容易引起争议。是否形成空气传播就涉及到感染者呼出液滴在空气中的悬浮能力(浮游时间与距离),以及如何聚集起感染剂量这两大问题。

感染者呼出飞沫与微粒的粒径范围很大从小于 $1\mu\text{m}$ 至大于 $100\mu\text{m}$,在空气中保持悬浮的能力不仅取决于粒径大小与形态,还取决于被呼出速度以及周围的空气状态。

经典理论是以呼出物的粒径来区分飞沫传播与空气传播,这样很容易产生两极分析方法,大于 $5\mu\text{m}$ 是液滴(液体)传播,小于 $5\mu\text{m}$ 是液核(固体)。如果从气溶胶来理解,两者之间肯定存在着气液两相流状态。美国CDC定义用“传播距离”来区分飞沫传播与空气传播。“飞沫传播”定义为暴露于感染者呼出的较大飞沫或微粒,在 1.83m 内发生传播。定义“空气传播”是暴露在可在空气中悬浮数小时的较小飞沫或微粒,超过 1.83m 外发生传播。这样用传播距离定义,说明空气传播取决于粒子在空中悬浮能力,而不是粒径。而工程领域对“气溶胶传播”定义是悬浮在空气中颗粒的传播,涉及范围比空气传播广得多。

空气传播,不同于飞沫,难以聚集起感染的剂量。因空气传播,扩散性很好,病毒在气流作用下不断分散,传播面会很广。与此同时被很快稀释,浓度不断下降,只有感染剂量很小的病菌才有可能。另外,在空气中飘浮、分散的病毒,在空气环境中受到温度、湿度、阳光(紫外线)等因素影响,活力会很快衰竭。感染者呼出的飞沫,大多会在不到 2m 的半径内迅速落地,一些飞沫不断蒸发剩下蛋白质和病原微生物组成液核,可能飘浮在空气中,但液核含病原体非常少。即使德尔塔感染者也只有在封闭、拥挤、通风不良的室内;或感染者多,如诊疗场所;才会聚集起来感染剂量,才有可能出现空气传播。

总之,飞沫无法常时悬浮、远距离传播,空气

传播难以聚集起感染剂量,出现空气传播往往是气云,我们在公众号“新冠病毒存在着新的传播方式吗”(2020-7-21)中就提出了在一定环境条件下室内有可能形成气云(Aerosol cloud)。感染者呼出的液滴在形成的潮湿和温暖的气云中要比孤立液滴被蒸发的时间要长得多。其寿命可以大大延长1000倍,从几分之一秒延长到十几分钟。或者说,气云可以在远距离和长时间内保持感染力而引起的传染病病原体的传播。国外的文献也有类似的气云假设(Gas cloud)。这次由德尔塔变异病毒引发的这轮疫情,从广州早茶传播链、扬州麻将馆传播链、荆州火车站传播链、常德穿紫河游船传播链等到国内外许多空气传播案例,如先后出现在同一厕所,或同坐一张餐桌,或走路经过等无接触却被感染了。国外又开始提出气云传播了(见图2)。美国CDC早在在2020年10月28日新版中就承认“在(在通风不足的封闭空间内)这种情况下,科学家认为COVID-19患者产生的具有传染性的较小飞沫和颗粒的数量会集聚,足以将病毒传播给其他人。”气云可能是空气传播一直令人关注的传播形式。



图2 “新冠病毒云”: “恐怖”变种对悉尼构成的令人生畏的威胁

3 破坏病毒生成空气传播的条件,当务之急

由于德尔塔变异株的病毒载量高,体内复制快,人体呼出气体毒性大,传染性明显增强,传播速度更快,使得德尔塔变异株空气传播风险增大。病毒一旦空气传播就难以防范,令人担忧,降低病毒空气传播风险应是当务之急。防范病毒空气传播的最有效方法理应是加强个人防护。我们在公众号“防控新型冠状病毒的对策应合理、合适、合规”(2020-1-30)就强调戴口罩、手消毒和社交距离重要性,而不是停开空调或全新风空调。但这仅仅是被动的防护措施!

如果我们从另一个角度去思考,病毒空气传播必须在一定条件下才能长时浮游并聚集起感染剂量,那用工程措施主动地破坏病毒生成空气传播的条件,就可以有效避免产生病毒空气传播,这才是最简效方法。为此借鉴GB51039-2014《综合医院建筑设计

规范》控制原则，我们在公众号“理性认识空调，尽快实现复工复产的安全生产环境”（2020-2-22）提出的工程措施除了合规的新风量，更应重视“合适的回风过滤器与合理的气流分布”。

在我国绝大多数公共建筑，包括医疗建筑（除了关键科室）多为风机盘管/多联机/分体空调等单元式空调器。由于体积小、管道占建筑空间少、可以十分灵活地按层、分区、分时控制，能自室独立调节，被广泛应用。但是空调器单元式，体积小，却包含热湿处理、输送、自控等部件。加上室内低噪声的要求，内置风机压头不高，送回风口在一个单元内，在回风口常配置效率较低的空气过滤器。要么吊装在室内上部送风，上部回风，形成了上送上回的气流分布。要么在室内置地安装下部送风，下部回风，形成了下送下回的气流分布。其中采用的最多是吊装式。但在这次新冠病毒疫情中暴露出许多上送上回、下送下回的风机盘管/多联机组的感染案例了。上送上回、下送下回的气流分布会使飞沫不易沉降，向上飘移，增加飘移距离与时间，不断促使飞沫液滴蒸发，飞沫粒径变小，病毒有可能穿过室内机内置的滤网，进入室内机。室内机不能良好过滤除菌，室内机不断循环室内空气也不可能减少室内病毒数。还会出现较强的水平横向气流，增强人与人之间的气流直接流动，加大了病毒空气传播感染的风险。即使全新风，气流分布不合理，也无法避免室内人员近距离传播。2020年初在广州某餐厅发生的一起 COVID-19 聚集性感染案例（见图3）。研究表明是由空调气流引起液滴传播的主要原因，使得就餐的3个家庭中10人被感染，感染关键因素是横向的气流。引起人们对常规的风机盘管/多联机的上送上回气流的高度警惕。可见我国

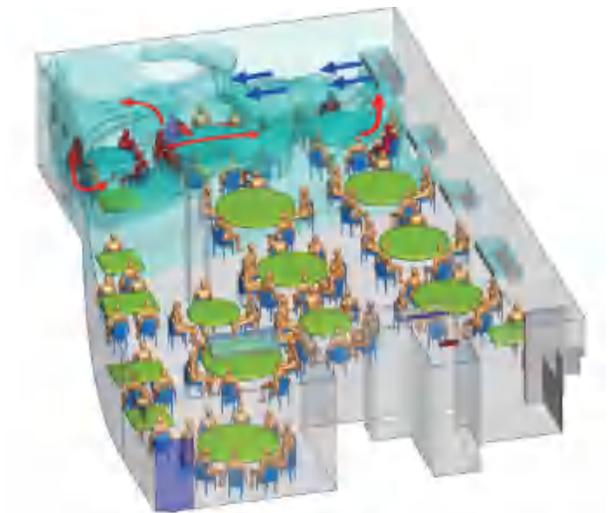


图3 单元式空调器上送上回气流引发的空气传播

传统的风机盘管/多联机/分体空调等单元式空调器已经成为我国疫情防控的痛点！

没有必要不顾能耗实施全新风运行。合规的新风量能够满足室内卫生要求，加上合适的回风过滤器与合理的气流分布是破坏病毒生成空气传播条件的有力工程措施。合适的回风过滤器在我国 GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》第 7.1.11 就规定“集中式空调系统和风机盘管机组的回风口必须设初阻力小于 50Pa、微生物一次通过率不大于 10% 和颗粒物一次计重通过率不大于 5% 的过滤设备”。或者，美国 ASHRAE 推荐的不低于 MERV13 空气过滤器。过滤器阻力不大而且可以除去大部分的病毒。至于合理的气流分布，具体表现为排除污染物（致病菌）效率高：

- ①抑制局部传染源不扩散到全室；
- ②尽快地将悬浮菌就地沉降；
- ③不让沉降菌再次起浮成为悬浮菌；
- ④送风尽快进入人的呼吸区域，致病菌尽早排出。

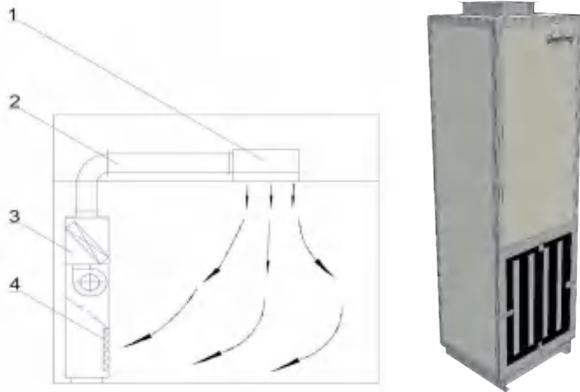
按照以上原则，当然在室内能做到“定向气流”是最好的，就像隔离病房的气流组织。一般场所能在室内实现上送下回气流是可以满足这些要求。万一室内出现感染者，病毒一旦呼出，上送下回气流就会尽快让它就地沉降、阻断传播，经回风过滤器有效去除病毒，再进入空调器。如此循环，这样病毒无法聚集，也无法浮游在空中，在室内难以形成气云。加上源源不断的合规新风量送入，稀释室内空气。这样就破坏了病毒生成空气传播的条件。

4 可上送下回立柜式风机盘管机组，简效措施

从传统的设计思路来说，空调室内实现上送下回气流分布，需要一个系统。不像上送上回、下送下回的气流分布可以仅靠一台单元式空调器组实现。目前风机盘管/多联机/分体空调等单元式空调器无论气流分布或内置的空气过滤器是无法满足上述要求，可能成为病毒空气传播的推手。为此我们研发了“可上送下回的单元式室内空调器（专利号 202010531302.7）”。该专利的产品有 3 种形式。

“可上送下回立柜式风机盘管机组”是一台细长垂直的单元式的立式空调器（见图 4）。一般场所，机组下回风口设置不低于 MERV13 的空气过滤器。机组的机外余压保证上部的送风口可以用管道连接室内天花装饰面上的送风口。为了降低机组噪声，可以设计分成两个箱体，便于安装与运输。机组整体组装后不高于 2m。相对于现有的风机盘管机组来说，这样一个机组空间内可以选择高压头的风机、热交换盘管与空气过滤器面积可以做大一些，有足够的体积可以设置消声器（见图 4 风机进口的挡声

板)。机组上送风接口与送风管、顶送风口相连接,实现了上送下回的气流分布以及回风合适过滤的要求。独立处理新风直接送入室内。



1. 送风箱 2. 送风管 3. 空调器机组 4. 回风空气过滤器

图4 可上送下回立柜式风机盘管机组

对于我国大量既有建筑已经安装了卧式风机盘管机组的场合,尽快改造可能是今后的任务。如机组有较大的余压可以增加带过滤器的下回风口(见图5),如机组余压很小,可以采用立柜式风机过滤器回风单元(见图6)。这样通过较为简单的改造,可以实现合适回风过滤与合理的气流分布。

5 结语

德尔塔变异株的病毒载量高,体内复制快,人体呼出气体毒性大,传染性明显增强,传播速度更快,增加了空气传播的风险。病毒在室内空气传播途径使人难以捉摸,令人防不胜防,甚至发生窗对窗之间的新冠气云传播。加大了疫情防控的难度。

病毒需在一定的条件下才能在空气中长时浮游、聚集起感染剂量。个人防护只是被动措施,本文从另一个角度提出了用工程措施,即合规新风量、合适的回风过滤器与合理的气流分布主动去破坏病毒生成空气传播的条件,就能有效避免产生病毒空气传播。并开发了可上送下回的单元式室内空调器以及设置方法。万一室内出现感染者,病毒一旦呼出,上送下回气流就会尽快让它就地沉降、阻断传播,经回风过滤器有效去除病毒,再进入空调器。如此循环,这样病毒无法聚集,也无法浮游在空中,在室内难以形成气云。加上源源不断的合规新风量送入,稀释室内空气。本文推荐的可上送下回立柜式

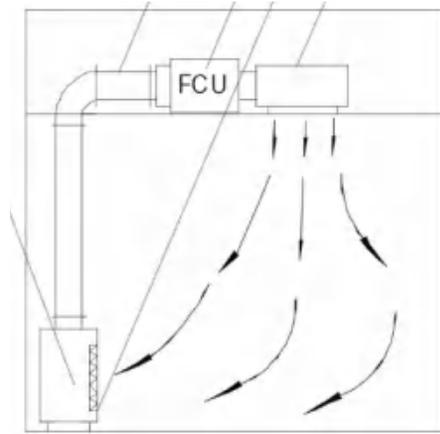


图5 增加带过滤器的下回风口

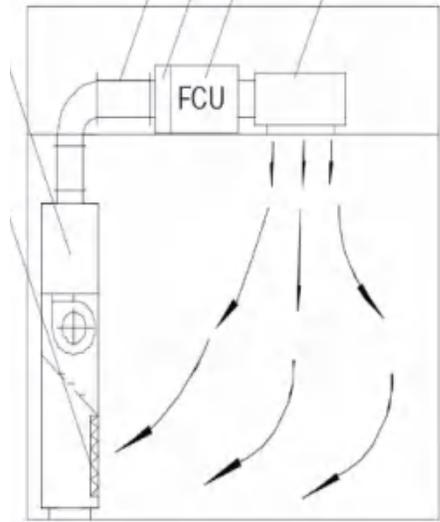


图6 立柜式风机过滤器回风单元

风机盘管机组,可破坏了病毒生成空气传播的条件,是一直最简效方法,值得推广。

新冠病毒传染性强,容易出现无症状感染,经常出现变异,而且体内产生中和抗体的半衰期时间短,人畜共患,这些特性使新冠病毒几乎不可能从自然界完全消灭,新冠病毒变异可能成为常态。疫情防控是一项长期任务,本文提出破坏病毒空气传播的条件,消除病毒空气传播的解决方案不是临时措施,而是关乎疫情防控的关键,是一项在公共建筑,如餐馆、茶室、咖啡店、商店、会议室、办公室等场所值得推广的长期措施。

变风量空调系统在医院建筑中的应用

霍小平¹, 黄春瑜¹, 龚建华², 高旭波²

(1. 上海大智中央空调技术有限公司, 上海 201199; 2. 宁波雪路登智能科技有限公司, 宁波 315500)

[摘要] 变风量空调系统在国外医院建筑中应用比较广泛。本文通过实际案例, 对 VRV 在医院建筑中应用特性以及设计特点进行了介绍。

[关键词] VRV; 医院建筑; 全空气系统; 设计

国外的医院空调设计, 特别是普通病房与门诊楼, 基本上都是变风量空调系统。

1 综合性医院空调设计总则

一空调系统应设计成能适当利用室外空气进行经济运行的系统(采用机械循环的室外空气不应降低对空气过滤的要求)。

在许多地区, 若气候和病人护理情况适当, 则减少或关闭机械通风, 用开窗进行自然通风也许是切合实际的。

—VAV 系统。变风量系统的节能潜力已被认可, 这里的一些标准旨在最大程度、合理地采用这类系统。

人员使用区域内的任何系统, 应有避免内区空气滞留的措施, 因为内区温控器的需求是由其周围区域的空气温度来满足的。

—非集中式空气处理系统(即用于供热与供冷的单元型房间机组, 如风机盘管机组、热泵型机组等)。这些机组可只用作再循环机组, 对室外空气的所有要求, 应由经适当过滤、单独的集中式空气处理系统来满足, 见表 1。

表 1 综合性医院内集中式通风与空调系统的过滤器效率

房间名称	过滤器级数	第一级过滤器效率 MERV/(%)	第二级过滤器效率 MERV/(%)
住院病人护理、处置、与诊断的所有房间, 提供直接服务或清洁供应如消毒与清洁处理等房间	2	8, (30%)	14, (90%)
环境保护病房	2	8, (30%)	17, (99.97%)
检验室	1	13, (80%)	—
行政管理、批量贮藏、污物存放、食品准备、洗衣房	1	8, (30%)	—

2 通风及房间空调要求

由于紫外线灭菌照射灯(UVGI)使用时有潜在的问题, UVGI 灯的有效性依赖于房间内的气流形式。使用 UVGI 灯可看作是通风系统设计的补充, 而不能视它主要的控制装置。所以房间的换气次数, 就应当作没装 UVGI 等一样加以确定。

—通风量。通风系统至少应按表 2 的要求和适用的注释进行设计与平衡。表 2 所示的通风量并不

排除采用更大、更合适的通风量。

—换气率。在无最小换气次数规定的房间内, 送风与排风量也许会响应负荷的变化而小至零。在表 2 列出的房间中, 若采用 VAV 系统, 其最小总换气量应在所注明的范围之内。

—温度与湿度。房间的温度和相对湿度应为表 2 中的所示值。

—空气流动方向。为了保持无菌控制, 送风量与排风量一般应受控制, 以保证气流从“清洁”区流向“次清洁”区, 尤其在重要区域。

—虽然在非敏感区域与病房(通过可操作的窗)允许自然通风, 但设施中的所有房间及区域均应考虑设置机械通风。

那么, 国内何以很少有这样的设计呢?

最主要的原因还是在于暖通空调行业, 特别是设计院对健康空调的理念认识不够, 又担心最终调试不出来, 所以宁肯用带中效过滤器风机盘管, 也不愿意采用过滤与消毒杀菌功能强过一百倍的变风量空调系统。

但是, 在世界潮流的汹涌浪涌之下, 我们中国广袤无垠的大地上还是不乏采用变风量空调系统的医院。

比如, 我们公司曾经就很荣幸地完成了这样一个应用案例:

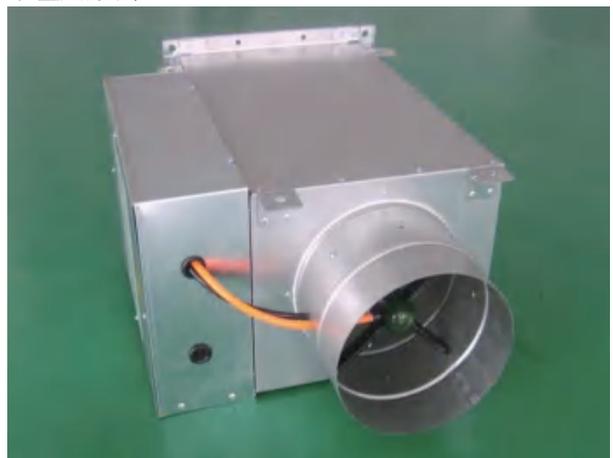


表2 医院与门诊设施内影响病人护理的房间通风要求

房间名称	相对于邻区空气流动关系	新风最小换气次数 (次/h)	最小总换气次数 (次/h)	全部空气直接排 至室外	通过房间机组 空气再循环	相对湿度 (%)	设计温度 (°C)
护理单元							
病房	—	2	6	—	—	—	21-24
厕所	进	—	10	是	—	—	—
新生儿护理部	—	2	6	—	否	30-60	22-26
环境保护病房	出	2	12	—	否	—	24
空气感染隔离病房	进	2	12	是	否	—	24
隔离附室或前室	进/出	—	10	是	否	—	—
病人走道	—	—	2	—	—	—	—
产科设施							
分娩室	出	3	15	—	否	30-60	20-23
待产/分娩/恢复	—	2	6	—	—	—	21-24
待产/分娩/恢复/产后护理	—	2	6	—	—	—	21-24
支持区域							
药物配送室	出	—	4	—	—	—	—
污物工作间或污物存放	进	—	10	是	否	—	—
清洁工作间或清洁物存放	出	—	4	—	—	—	—
急诊、外科与重症监护							
手术室/外科膀胱镜检查	出	3	15	—	否	30-60	20-23
恢复室	—	2	6	—	否	30-60	21-24
重症监护	—	2	6	—	否	30-60	21-24
中级护理	—	2	6	—	—	—	21-24
新生儿重症监护	—	2	6	—	否	30-60	22-26
处置室	—	—	6	—	—	—	24
创伤室	出	3	15	—	否	30-60	21-24
支气管镜室	进	2	12	是	否	30-60	20-23
分诊	进	2	12	是	—	—	21-24
急诊等候室	进	2	12	是	—	—	21-24
操作室	出	3	15	—	否	30-60	21-24
眼科激光室	出	3	15	—	否	30-60	21-24
X-线(外科/重症监护/心导管 插入术)	出	3	15	—	否	30-60	21-24
麻醉气体贮存室	进	—	8	是	—	—	—
诊断与处置区域							
检查室	—	—	6	—	—	—	24
处置室	—	—	6	—	—	—	24
物理治疗与水疗	进	—	6	—	—	—	24
胃肠内窥镜室	—	2	6	—	否	30-60	20-23
内窥镜器械处理间	进	—	10	是	否	—	—
影像科							
X-线(诊断与处置)室	—	—	6	—	—	—	24
暗室	进	—	10	是	否	—	—
影像科等候室	进	2	12	是	—	—	21-24
检验科							
一般性检验	—	—	6	—	—	—	24
生化室	进	—	6	是	否	—	24
细胞学	进	—	6	是	否	—	24
玻璃器皿清洗	进	—	10	是	—	—	—
显微解剖学	进	—	6	是	否	—	24
便盆间	进	—	10	是	—	—	24
浴室							
房间整理服务间							
消毒与供应							
ETO(环氧乙烷)消毒器室	进	—	10	是	否	30-60	24
消毒设备间	进	—	10	是	—	—	—
内科与外科中心供应							
污物或去污染间	进	—	6	是	否	—	20-23
清洁工作室	出	—	4	—	否	30-60	24
消毒品贮藏	出	—	4	—	—	70(最大)	—



图1 医院外观

3 VAV 系统在医院建筑的应用范例——上海华山哈佛医院

上海华山哈佛医院，由美国哈佛大学与上海华山医院联合组建，总建筑面积约 6.5 万平方米。后因院校合并，现已改名为复旦大学附属华山医院浦东分院，因哈佛大学捐赠投资，并提供设计方案，我们习惯上仍保留最初的工程名称。

本工程采用单风道带热水盘管型变风量末端，共计 563 套。

3.1 设计方案特点

1) 因空气品质与防菌防霉要求，拒绝水管进房间与吊顶，全部采用全空气系统设计。

2) 大厅等公共区域采用定风量空调系统。

3) 可分割的医疗与标准病房采用变风量空调系统。

我们在完成该项目多年后，发现这种全空气系统的设计可能是国外医疗系统最基本的设计方案，与国内将风机盘管放之四海而皆准的设计有明显的设计目的与设计理念的区别。在这方面，上海华东设计研究院胡仰奇总工带领手下团队作出了许多艰苦的技术翻译与推广工作，下面许多数据引用了他们翻译的数据，在此表示我们深深的敬意！

3.2 标准病房平面图

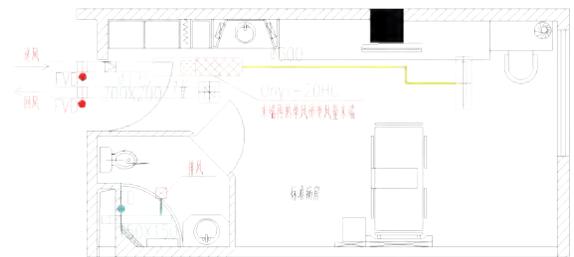


图2 标准病房平面图

4 医院项目采用变风量系统的可能区域

见表 3。

表 3 医院项目采用变风量系统的功能区

功能区域	可选择的 HVAC 系统	
住院病房区	1. 有末端再热的变风量系统 2. 有风机箱的变风量单风道系统 3. 多区域系统	4. 有末端再热的单风道定风量系统 5. 定风量双风道系统 6. 包括周边辐射（如果需要的话）
急重症护理区	1. 有末端再热的变风量系统	2. 有末端再热的单风道定风量系统
敏感（设备）区	基于制冷剂的单元式系统（不采用冷冻水的单元式系统）	
办公区	1. 有末端再热的变风量系统 2. 变风量双风道系统 3. 有风机箱的变风量单风道系统 4. 多区域系统	5. 有末端再热的单风道定风量系统 6. 定风量双风道系统 7. 风机盘管系统（限于非临床区域） 8. 包括周边辐射（如果需要的话）
后勤支持区	1. 有末端再热的变风量系统 2. 双风道系统 3. 多区域系统	4. 有末端再热的单风道定风量系统 5. 定风量双风道系统 6. 包括周边辐射（如果需要的话）
护理区	1. 有末端再热的变风量系统 2. 双风道系统 3. 多区域系统	4. 有末端再热的单风道定风量系统 5. 定风量双风道系统 6. 包括周边辐射（如果需要的话）

ISO 14644-16: 2019《洁净室及相关受控环境——第16部分：洁净室和隔离设备的能效》简介

张彦国

(中国建筑科学研究院有限公司 建科环能科技有限公司, 北京 100013)

[摘要] 国际标准化组织(ISO)于2019年5月发布了ISO 14644-16第一版, 针对洁净室以及隔离设备的节能提出指导和建议, 本文简单介绍标准的内容, 分析洁净室节能的各项技术措施, 供相关业内同行参考。

[关键词] ISO14644-16; 洁净室; 节能

0 引言

2030年前“碳达峰”和2060年前“碳中和”的目标并不简单, 必须要在各个可能的行业和环节全力推进节能减排。

得益于生命科学、微电子、航空航天等高新技术的快速发展, 洁净室的建设速度和规模也达到了前所未有的程度。洁净室的能耗比同等规模的办公建筑高出10倍以上^[1], 而且长久以来, 由于洁净室性能对工艺影响极大, 通常是不惜代价保证功能, 对洁净室能耗方面关注很少, 洁净室工程节能潜力非常可观。2019年5月, 国际标准化组织(ISO)发布ISO 14644系列标准《洁净室及相关受控环境》的第16部分《洁净室和隔离设备的能效》, 对洁净室相关能效方面作出了规定, 为优化洁净室的设计、建造和使用, 提高能源使用效率提供指导和建议。

1 背景

国内在洁净室节能方面的工作近些年刚刚起步, 2018年7月由全国洁净室及相关受控环境标准化技术委员会编制发布了GB/T 36527-2018《洁净室及相关受控环境节能指南》标准。一些发达国家关注较早, 并已颁布相关标准, 例如德国的VDI 2083: 2011“Cleanroom technology - Energy efficiency”, 英国的BS 8568: 2013“Cleanroom energy - Code of practice for improving energy efficiency in cleanrooms and clean air devices”, 俄罗斯的GOST R 56190: 2014“Cleanrooms Energy efficiency”等, 美国的IEST-RP-CC012.3“Considerations in Cleanroom Design”也包含了能耗方面的内容。ISO/TC 209-WG13工作组在相关标准的基础上, 经过多年的协商交流, 最终形成最终文本, 其中也包括中国代表。此外, ISO14644-16的编制, 参考了ISO 50001《能源管理系统——使用指南》中的术语、原则和基本要求等。

国家重点研发计划项目“洁净空调厂房的节能设计与关键技术设备研究”(编号: 2018YFC0705206)

2 正文内容简介

ISO14644-16正文包括15章, 涵盖洁净室的全寿命周期。

首先是前言和内容简介, 接着是: 第1章范围(Scope)、第2章引用标准(Normative references)、第3章术语和定义(Terms and definitions)、第4章节能评估和实施过程(Energy reduction evaluation and implementation process)、第5章用户特殊需求对能耗的影响(Impact of user requirement specification on energy consumption)、第6章风量和修正系数(Airflow volume and compensating factors)、第7章电源管理: 调低、关闭和恢复(Power management: Turn-down, turn-off and recovery)、第8章自适应控制(Adaptive control)、第9章热负荷和冷负荷(Heating and cooling loads)、第10章风机和过滤器的选择(Fan and filter selection)、第11章照明水平(Lighting levels)、第12章培训(Training)、第13章运行(Operation)、第14章维修(Maintenance)、第15章停用(Decommissioning)。

前言中简单介绍了ISO组织、ISO14644-16编制依据的规则、技术委员会等。

内容简介中介绍了洁净室能耗的特点、ISO14644-16编制的意义、应用范围等。有几个重点: ①洁净室能耗很高, 尤其是为保证风量和风压所消耗的空调系统能源。②新建洁净室的精心设计、既有洁净室的改进和升级, 都能得到巨大的节能效果。③洁净室的全寿命周期内的各个环节, 都有优化和节能机会, 前期的设计非常重要, 再有是加强运行监测分析和调试。

第1章“范围”里简述ISO14644-16标准的目的、适用的范围。

第2章“引用标准”中提到ISO 50001《能源管理系统使用指南》, 是本标准的上位标准。

第3章“术语和定义”, 分为“一般条文”、

“与安装相关的术语”、“与能效相关的术语”、“缩略语”4个小结，介绍了22个术语、9个缩略语。有几个重点：①污染物去除效率（contaminant removal effectiveness, CRE）——忽略从过滤后的送风中进入的颗粒物时，排风/回风中测量的颗粒物浓度与室内颗粒物浓度的平均值之比；②换气效率 air change effectiveness (ACE)——污染事件后，洁净室一个或多个位置的恢复率（recovery rate）与洁净室总恢复率的比值；③调低 turn-down——控制单向流洁净室及洁净空气装置的气流速度或非单向流洁净室的风量，以便在洁净室不运行时节约能源；④URS——用户需求，对洁净室节能非常重要，标准中专门用第5章来分析URS对能耗的影响。

第4章“节能评估与实施过程”共分13节，描述实施洁净室节能项目的流程，以及流程节点上重点关注的问题和细节措施。洁净室节能是一个系统工程，必须要有科学的方法和流程，第4章中用一个流程图把各个环节有机串联起来，如图1所示，这个流程图是我们进行洁净室节能工作的总的工作框架。

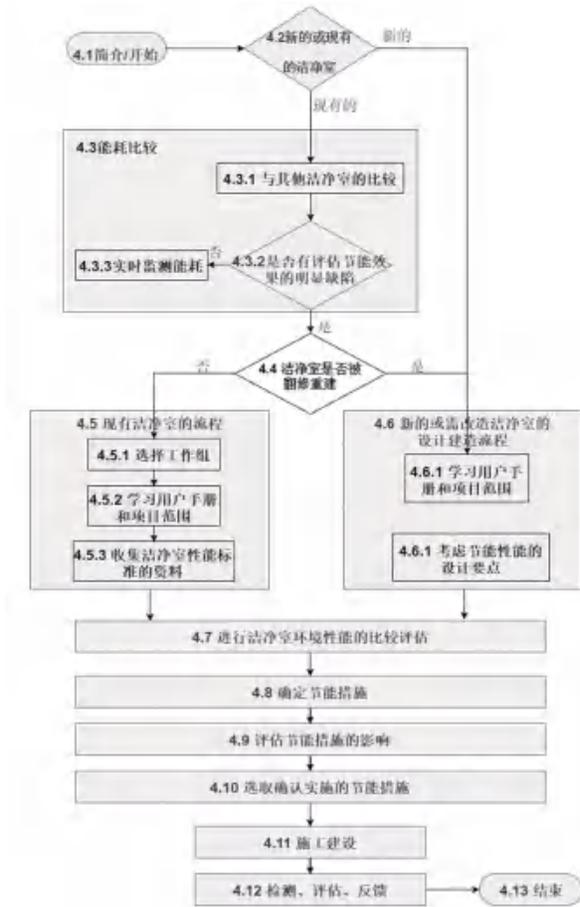


图1 节能的系统化方法——项目工作流程

第4章中有几个重点：①在4.3.1节中，提到确定洁净室“主要能源使用”（significant energy use, SEU）的重要性。节能需要成本，只有确定了洁净室“主要能源使用”，即节能工作的目标主体，才能有效证明投入和产出是否合理、有效。在新编制的CECS（中国工程建设标准化协会）《洁净室节能评价技术标准》中，将“洁净室主要能源使用”（significant energy use of cleanroom）定义为“洁净室为控制悬浮粒子浓度、压差、气载分子污染物、温度、湿度等关键参数的能源消耗”，和生产工艺等相关的能耗不在标准关注和讨论的范围内。②用以对比的样本或基准的选择也十分关键，实际实施中会发现，没有一个条件相同的标准样本或理想状态，可以进行同类比较或前后比较，因此，“比对样本可以是另一个相似的洁净室设施、以前经过优化的能源性能调试数据或基于以前经验的计算比对样本”等。不同的基准选择，会得出不同的节能效果评价。

第5章“用户需求（URS）对能耗的影响”，内容不多，但强调了用户需求的重要性，以及洁净室内人员着装水平对洁净度以及能耗的影响。人员是洁净室内重要污染源，专业的洁净服可以抑制人员产尘，进而可以降低洁净室风量，实现节能。

第6章“风量及修正系数”，这一章强调了控制风量和风速对于降低非单向流和单向流洁净室能耗的重要作用，并给出了风量的计算方法和估算程序。几个重点：①将换气次数（air change rate, ACR）和洁净室级别脱钩，即洁净室风量和洁净室体积无关，而取决于洁净室内活动的性质以及送风分配系统的设计。按照国内传统的洁净室风量设计方法，不同级别的洁净室按照不同的换气次数计算风量，这种传统计算方法的出发点，是认为洁净室内尘源主要是围护结构，洁净室产生的污染和洁净室表面积、体积成比例相关。目前的观点，认为洁净室内的尘源主要来自于人员和操作，因此对于同样操作和相同人数的洁净室，房间体积即便相差很大，仍只需同样的风量。②计算风量时应计算洁净室的污染物去除效率（CRE）或换气效率（ACE），这其实是两种不同的计算方法，目前存在不同的意见。③风量修正系数关系到风量冗余度的设置，应从不同的洁净度报警限值和预测的CRE或ACE值进行评估考虑。④通常在设计阶段，通过考虑发生量、洁净度报警限值、修正系数等来确定设计风量 Q_1 ， Q_1 是考虑冗余度的。在调试阶段，根据实际运行效果，确定运行风量 Q_2 ，并且 $Q_2 < Q_1$ ，并且在运行中监测实际洁净度级别始终在报警限值之内。

第7章“电源管理：调低、关闭和恢复”。药品生产必须遵守《药品生产质量管理规范》(GMP)，GMP中对生产车间的状态作出明确规定，在药品生产过程中状态要持续保持，一旦车间的运行状态发生改变，需要重新进行验证。因此药品生产的洁净室，通常连续不间断的保持同一状态运行，即便是在不生产的时候，整个洁净室也要“空转”，因为GMP车间的验证是非常繁复的。但随着监测和调控技术的发展，我们的观点也应有所改变，ISO14644-16中反复提到的调低(turn-down)就是这个目的。个人观点，洁净室保持同一运行状态的目的，是为了确保洁净室运行参数持续保持符合药品生产的质量要求，如果我们能够提供充足的证据，例如利用最新的监测技术以及完善的事先工况验证等，确保洁净室在生产时能符合要求的状态，在这种情况下，是在不生产时“调低”甚至“关闭”(turn-off)的。调低或关闭时应注意，要通过设置物理屏障、保证压差、控制通道和入口、加强人员培训等，尽可能防止室内污染，缩短自净时间。

第8章“自适应控制”，明确提出通过洁净室内的传感器和分析仪器的反馈，来进行风量的主动控制，是一种最节能的控制方案。

第9章“热负荷和冷负荷”比较简单，认为如果没有特殊要求，温湿度的控制范围应该可以宽一些。

第10章“风机和过滤器的选择”，洁净室和一般建筑的重要区别，就是系统风量大、阻力高，因此选择高效风机和低阻过滤器是洁净室节能的重要途径。在选择风机时，尽可能选择电机直接驱动，并配备变频控制器。选择过滤器时，应尽可能选择额定风量大的过滤器以降低阻力，同时设置预过滤器以防止末端过滤器的频繁更换和容尘量超负荷。

第11章“照明水平”非常简单，只有几句话，强调照明应可控并及时关闭，使用局部LED照明以降低背景照明。

第12章“培训”，对于洁净室的运行状况和节能计划的实施，员工的意识、素质、业务知识水平等，无疑是非常重要的，必须有计划的进行员工培训。

第13章“运行”，明确在运行过程中，应重点执行的操作规程和关注的重点，以及当出现含尘浓度升高时采取的措施。

第14章“维修”，简单提出维修维护的原则要求以及关注的几个重点。

第15章“停用”非常简单，提示停用时评估是否会对相邻房间产生影响。

3 资料性附录简介

ISO14644-16中有6个附录，都是资料性的，附录A源强度：送风量及计算实例(Source strength: Air volume and worked example)、附录B节能措施(Energy saving opportunities)、附录C影响评估(Impact assessment)、附录D基准化分析法：洁净室的能源性能指标(Benchmarking: Energy performance indicators for cleanrooms)、附录E减少过多的冷热损失或获得的有效措施(Useful measures to minimize excess heating and cooling losses or gains)、附录F减小关键区域面积的示例(Critical area reduction example)。6个附录虽然是资料性的，但内容很丰富也很重要，篇幅和15章正文接近。

附录A“源强度：送风量及计算实例”，附录A篇幅很长，分为5个小节，A.1小节“非单向流洁净室送风量的计算”，通过以下公式计算洁净室风量：

$$Q = \frac{D}{f \varepsilon C} \quad (3.1)$$

式中：

C ——计算区域所需的气溶胶颗粒物浓度(粒/ m^3)；

D ——洁净室(人员和设备)总颗粒物散发率(粒/s)；

Q ——送风量(m^3/s)；

ε ——通风效率指数(无量纲)；

A.2小节“通风效率”，详细描述了两个描述通风效率的指数 ε ，即换气效率(ACE)和污染物去除效率(CRE)的定义、特点和计算公式等。如果洁净室的空气混合良好，则ACE指数将为1，如果少于平均值的洁净空气到达测量位置，则ACE指数将低于1，如果更多空气到达测量位置，则高于1。ACE指数可能介于0.7和1.3之间，CRE指数通常的范围设定在0.3到1.0之间。A.3小节“洁净室颗粒物散发率”，简述如何计算公式(3.1)中的“D”值，需要将人员和设备的颗粒物散发率加在一起。A.4小节“计算非单向流洁净室送风量的实例”，包括如何根据洁净室级别要求和修正系数的设定，确定公式(3.1)中的“C”值，最终计算出风量。A.5小节“单向流洁净室风速的计算”，虽然风速越高，空气中的污染物越低，但综合考虑各种变量后，建议在很少或没有活动的时间，风速可以降低到0.2 m/s到0.3 m/s之间，但是需要事先征得产品质量部对于降低气流速度的同意。

附录B“节能措施”，笔者认为也是ISO14644-16中的一个重点内容，通过一个很详细的表格，列

举出所有洁净室节能的机会,表格中将洁净室整个寿命周期分为6个阶段、31个要素:首先是污染源强度的评价阶段。第2个阶段是用户需求(URS)阶段,这个阶段又分为7要素,包括“性能需求、设施规模、人员数量、着装要求、工艺设备负荷、工艺设备的适应性、隔离屏障技术的应用。”第3个阶段是设计、翻修和建造阶段,这个阶段要关注13个要素:“单向流风速、非单向流风量、新风、排风、照明、系统选择(集中的AHU还是分散的FFU)、调低的能力、空气处理装置和暖通空调设备、空气过滤器、空调通风输配系统、建筑管理系统(BMS)、环境管理系统(EMS、PMS、MMS)。”第4个阶段是测试阶段,包括调试验证和定期测试两个要素。第5个阶段是运行和维护阶段,包括7个要素,分别是“操作能力培训、监控、调低程序、关闭系统、洁净室漏气量、维修程序、清洁和保洁管理”。第6个阶段,也是洁净室的最终阶段,即洁净室的关停和报废。在对每个要素的分析上,从“机会措施、重点考虑、可能的负面影响、风险管控的策略和工具”四个方面进行逐一的要点分析。这个表基本上列出了洁净室节能的各个环节,具有重要的参考作用。ISO14644-16在编制中,强调对洁净室的针对性,因此对于动力站(冷热源)方面并不涉及,笔者认为,洁净室的冷热源也非常有特点,例如洁净室都是在内区,所以在围护结构方面没有任何节能潜力,洁净室的供冷周期非常长,甚至有些洁净室需要终年供冷,因此冷热源方面也可列入节能的要素。

附录C“影响的评估”比较简单,强调在能源优化时,要充分评估对洁净室性能的影响。

附录D“基准化分析法:洁净室的能源性能指标”,笔者认为也是ISO14644-16的重点之一。用哪些指标来评估洁净室的节能效果非常重要,指标要能代表洁净室的特点。ISO14644-16中列出的能效评估指标有“洁净功率密度(PICR)”、“洁净用能密度(EICR)”、“设施用能密度(EI)”,附录D中,用三个小节详细的描述了三个指标的计算方法、特点等。PICR定义为“用于去除洁净室空气中污染物的风机功率与净化区域总面积的比值,即洁净室单位面积风机功率,单位为 W/m^2 ”。EICR定义为“用于去除洁净室内空气中污染物的风机全年用电量与净化区域总面积的比值,即洁净室单位

面积每年的风机能耗,单位为 kWh/m^2 ”。EI定义为“洁净室全年综合用能与净化区域总面积的比值,单位为 kWh/m^2 ”。PICR可以用来评价洁净室通过提高风机效率、降低系统阻力、降低风量而产生的节能效果,与运行时间无关。EICR在PICR基础上,还评价洁净室通过值班工况、间歇运行、变频调节等改变运行方式而产生的节能效果,全年运行工况有变化。EI是一年的洁净室综合用能,还包括空气系统之外的其他能耗。笔者认为,三个指标略显不足,关于洁净室节能评价指标,在CECS《洁净室节能评价技术标准》中,补充了更多的指标,此部分内容可单独成篇进行讨论,本文篇幅所限,不再赘述。

附录E“减少冷热损失的措施”,分供热和制冷两节,分别描述如何降低冷热负荷,提高供热和制冷效率。

附录F“缩小关键区域面积的示例”,通过采用隔离设备等,把洁净室关键区域的面积控制在一定范围内,可有效降低洁净风量,进而节能。

4 结论和建议

ISO 14644-16由ISO/TC 209负责,ISO/TC209是国际标准化组织“洁净室及相关受控化境”技术委员会,成立于1993年,秘书处设在美国ANSI(American National Standards Institute 美国国家标准学会),会员24个,包括中国以及美国、英国、德国、法国、日本、俄罗斯、巴西、澳大利亚等发达国家,观察员国家21个。TC209已经发布了17个洁净室和相关受控环境的标准,包括14个洁净室相关的ISO 14644系列标准,以及3份ISO 14698标准。其发布的标准在国际上有权威地位。ISO14644-16重要新内容包括:①明确编制用户需求(URS)的重要性;②不再按照洁净室级别和体积计算风量,给出根据尘源强度等计算风量的方法;③梳理挖掘洁净室节能的各个环节;④给出三个节能评价指标PICR、EICR和EI。标准给出了标准化、纲领性和指导性的建议,在推动洁净室节能方面无疑起到了重要作用,如何在国内具体项目上实施应用,还需要结合项目特点,进一步仔细研究探讨。

参考文献

- [1]ISO. Cleanrooms and associated controlled environments —Part 16: Energy efficiency in cleanrooms and separative devices [EB/OL]. First Edition 2019.5

《兽药生产质量管理规范（2020年修订）》 洁净室受控环境关键参数解读

梁磊

（中国建筑科学研究院有限公司，北京 100013）

[摘要] 结合笔者参与《兽药生产质量管理规范（2020年修订）》编制及《兽药工业洁净厂房设计标准》主编的工作经验，对其洁净室受控环境关键参数的指标确定、控制措施及最新的理念变化进行阐述，重点介绍了动态级别、室内温湿度、气流流型、截面风速、送风量、自净时间及压差等指标的变化及理解要点，为新版兽药 GMP 厂房设施的设计、建造及维护管理提供指导。

[关键词] 兽药 GMP；动态级别；关键参数

0 引言（背景）

药品生产质量管理规范 GMP (Good Manufacture Practice) 体系是国家药品生产质量的根本保证，是民生大计。我国目前分设两套独立的 GMP 体系：国家药监局管理的人药 GMP 和农业农村部管理的兽药 GMP。2020年6月1日起，我国农业农村部第3号令《兽药生产质量管理规范（2020年修订）》（以下简称兽药 GMP）开始正式施行。

本次兽药 GMP 修订在厂房设施的要求方面，考虑我国兽药行业的生产特点和国情，对标欧盟和我国人药 GMP 标准，吸收融合了国内外相关法规、标准及技术理念的更新变化，大幅提高了我国兽药生产厂房设施的建设标准和要求。2021年6月1日，作为新版兽药 GMP 的配套技术支撑性文件，中国工程建设标准化协会团体标准《兽药工业洁净厂房设计标准》T/CECS 805-2021（以下简称设计标准）正式实施，设计标准以新版兽药 GMP 为依托，旨在规范兽药工业洁净厂房设计的技术要求，提高兽药工业洁净厂房的设计质量，达到安全可靠、环保节能、技术先进、经济适用等目标，适用于为符合新版兽药 GMP 而新建、扩建和改建的兽药工业洁净厂房的设计^[1]。本文结合了笔者参与新版兽药 GMP 修订及设计标准主编的工作经验，重点阐述了新版兽药 GMP 对室内洁净环境控制关键参数的指标确定、控制措施及最新的理念变化，为新版兽药 GMP 厂房设施的设计、建造及维护管理提供指导。

1 动态级别理解要点

动态级别的设置，是本次新版兽药 GMP 在硬件方面最大的变化。之前法规对各类工艺生产环节的洁净级别规定仅为静态，本次修订与国际接轨，亦和我国人药保持一致，采用 A、B、C、D 四个字母表示四个不同的净化级别，每个字母分别同时定义了“静态”和“动态”两个状态下的净化级别。

静态是指工程竣工，所有生产设备已安装就绪，但没有生产活动且无操作人员在场的状态。动态则为实际生产或（最不利情况）模拟操作时的工况状态^{[2]10}。表1为新版兽药 GMP 附件1无菌兽药中列出的 A ~ D 级所对应的动、静态工况下的空气悬浮粒子浓度的标准规定。

1.1 对 A 级大粒子规定的更新

表1 A~D 各级别空气悬浮粒子的标准规定

洁净度级别	悬浮粒子最大允许数 / 立方米			
	静态		动态	
	≥0.5μm	≥5.0μm(2)	≥0.5μm	≥5.0μm
A 级	3520	不作规定	3520	不作规定
B 级	3520	不作规定	352000	2900
C 级	352000	2900	3520000	29000
D 级	3520000	29000	不作规定	不作规定

不同于现行欧盟及我国人药 GMP 的要求，新版兽药 GMP 在 A 级动、静态和 B 级静态（均为 ISO5 级）时对 5.0μm 均已不作规定。这是因为，世界范围内 GMP 体系均采用《洁净室及相关受控环境国际标准》ISO14644 进行洁净级别的定义，而 ISO14644-1 在 2015 年的更新版本中取消了 ISO5 级对 5.0μm 要求。本次新版兽药 GMP 修订也随之进行了相应的调整。无独有偶，2020年2月份欧盟发布其 GMP 附录 1——Manufacturing of Sterile Product（无菌产品生产）征求意见稿（以下简称欧盟征求意见稿）中，也对该部分内容进行了完全相同的更新，见表 2^{[2]9-10}。

表2 征求意见稿中动态级别悬浮粒子标准

Grade	Maximum limits for particulates ≥0.5μm/m ³		Maximum limits for particulates ≥5μm/m ³	
	at rest	in operation	at rest	in operation
	A	3520	3520	Not applicable
B	3520	3520	Not applicable	2900
C	352000	352000	2900	29000
D	3520000	Not defined ^(a)	29000	Not defined ^(a)

1.2 对 A 级最小采样量的规定

根据 ISO14644-1 相关规定，对于 A 级大粒子

的控制粒径,只要大于小粒子控制粒径的1.5倍即可,在取消了对A级中5.0 μm 的要求后,欧盟征求意见稿中给出了1.0 μm 的推荐值^[29]。以1.0 μm 为例,在ISO14644-1中查得其在ISO5级最大浓度限值^{[3]5}为832 pc/m³,最小采样量的计算见公式(1)^{[3]10}:

$$V_s = (20 / C_{n,m}) \times 1000 \quad (1)$$

式中:

V_s 为每个采样点每次最少采样量,用L表示;

$C_{n,m}$ 为相关洁净度等级规定的最大被考虑粒径的等级限值 (pc/m³);

20 表示当粒子浓度处于该洁净度等级限值时,可被检测到的粒子数。

根据公式(1)计算得到最小采样量仅为24L,如采用流量28.3L/min的尘埃粒子计数器进行采样,则A级单个采样点仅需1min。由于法规的变更往往具有延滞性,因此目前我国人药GMP净化车间A级还不得不延续单点1m³的最小采样量进行采样,我国兽药GMP则已根据最新法规广泛采用1.0 μm 作为控制粒径,大幅减小了A级的验证时间和成本。

1.3 对兽用生物制品的若干特别规定

根据我国兽药生产特点和行业现状,结合前瞻性的考虑,在兽用生物制品中对一些操作环节的洁净级别做了更加符合实际生产情况的规定:1)考虑到现有技术,在接种和收获环节很难实现B级背景下的A级这事实,直接对胚苗的半成品制备、组织苗的半成品制备(含脏器组织的采集)区规定为C级背景下的局部A级,但必须注意,适当放宽标准只是因为考虑了目前行业现状,实践中应按B级背景下的局部A级进行设计和建设;2)病毒生产区中间检验房间如采用生物安全柜(可视为局部A级),房间可设为C级;3)种毒、种细胞制备间应按B级背景下的局部A级进行设计和建设;4)根据附件3兽用生物制品,在“轧盖前产品处于较好密封状态下”时房间可直接设为D级,这和附件1无菌兽药中“轧盖操作可选择在C级或D级背景下的A级送风环境中进行。A级送风环境应当至少符合A级区的静态要求。”的表述不同。A级送风要求空气经HEPA过滤后,在送风处能够达到表1中规定的静态悬浮粒子的要求,仅在静态下进行检测,其日常监测的规定根据生产车间的风险评估来确定。

1.4 静态检测与动态监测

应了解新版兽药GMP设置动态级别的主要指导思想是对实际生产环境的控制。静态工况的检测须由具有相关资质的机构进行^[4],而动态级别的保障主要靠企业对不同级别区域通过连续监测或日常监测完成。动态考核的是实际生产过程中的状态参

数,是真正意义上对实际生产关键环境的控制要求。需要特别指出的是,D级动态“不作规定”并不意味着就可以没有控制要求,在适用情况下,车间应根据风险评估及历史数据制定其动态限度^{[2]9-10}。

2 洁净室及相关受控环境关键参数

与旧版兽药GMP(2002)相比,本次修订除保留了压差和截面风速指标要求外,取消了对温度、相对湿度、换气次数、噪声、照度及新风量等指标的具体参数要求,增加了气流流型和自净时间概念,提出以“满足人员舒适性要求”和“符合生产工艺操作”等定性要求作为控制目标。这样调整也是对国内国际GMP规范的做法。不再对环境参数进行简单、机械的人为“一刀切”式的统一规定,车间根据各自的生产工艺特点和使用要求,制定出科学的,符合客观实际的洁净室受控参数指标,并通过验证予以确认。

2.1 温度、相对湿度

生产工艺对室内温湿度有明确工艺要求的(如某青霉素生产车间的灌装间要求50%以下相对湿度),应按工艺要求进行设计和建设。如没有特殊工艺要求的,由于法规中不再明确数值,因此设计标准中给出了各种参数的推荐指导值,供车间和设计单位参考。表3为设计标准给出的在没有特殊工艺要求时兽药工业洁净厂房内洁净室温、湿度推荐范围。

表3 兽药工业洁净厂房设计标准给出的
洁净室舒适性温、湿度推荐范围

房间性质	温度(°C)		相对湿度(%)
	冬季	夏季	
A、B、C级	20 ~ 24		45 ~ 60
D级	18 ~ 26		45 ~ 65
人员净化及生活用房	16 ~ 20	26 ~ 30	—

2.2 气流流型

根据新版兽药GMP要求,洁净室工作区的气流应均匀分布,气流流速应满足生产工艺要求。A级采用单向流,B~D级采用非单向流。单向流为通过洁净区整个断面、风速稳定,大致平行的受控气流;非单向流为送入洁净区的空气以诱导方式与区内空气混合的一种气流分布^{[1]2}。生产中还多见由单向流和非单向流组合的混合流房间,如非最终灭菌的无菌制剂车间中的灌装间,为B级背景环境下的A级,就是典型的混合流房间代表。

设计阶段要注意混合流房间的背景环境送风不应影响A级区域,实践中可通过烟气流型测试确保A级边界不会因气流的扰动而对单向流区域产生负面影响。

对A级而言,不论是开放的单向流罩,受限屏

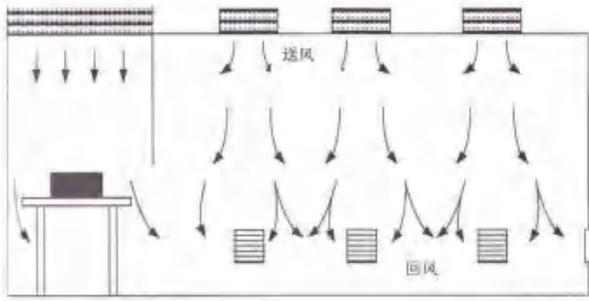


图2 典型混合流房间气流流型示意图 (来自网络)

障系统 (Restricted Access Barrier System, RABS) 或隔离器, 均应确保经高效过滤器过滤后的送风在不受任何干扰 (部件、操作人员、设备等未灭菌物品的污染) 的情况下覆盖或贯穿无菌生产操作环节^[5], 即确保无菌暴露操作在所谓“First Air”的保护下进行^{[2]18}。设计阶段可以使用实体模型进行操作模拟, 生产阶段可采用烟气流型测试进行验证。

2.3 截面风速和送风量

表4为设计标准中给出的A级截面风速, 及不同洁净级别下兽药工业洁净室(区)用换气次数表示的送风量参数表。

表4 A级截面风速及不同洁净级别下兽药工业洁净室(区)送风量参数表 (推荐)

空气洁净度级别	气流流型	平均风速 (m/s)	参考换气次数 (次/h)
A	单向流	0.45±20%	—
B	非单向流	—	40 ~ 60
C	非单向流	—	≥20
D	非单向流	—	15 ~ 20

A级的截面风速在新版兽药GMP中被明确给出。应理解法规希望A级截面风速的目标值为0.45m/s, 即90英尺/分钟(FPM), 该数值起源于美国联邦标准(Federal Standard)209E, 2001年被ISO14644取代^[6](<https://www.iest.org/Standards-RPs/ISO-Standards/FED-STD-209E>), 美国FDA无菌生产指南中就指出A级截面风速通常确定的目标速度应为90英尺/分钟(FPM), 范围可在设定点周围的正负20%^[7]。本次新版兽药GMP修订第一次提出不均匀度的要求, 从笔者所在单位的检测部门多年来对国内各类洁净室ISO5级的检测结果来看, 由于设计或安装不合理, 相当比例局部百级截面风速不均匀, 虽然平均值达到规范要求, 但实际上存在极小或无风速区域, 会产生较大扰流, 即使静态下洁净度检测勉强达标, 其在动态工况抗干扰能力之弱是可想而知的。因此希望通过不均匀度这一指标对百级的设计、建造及运维管理提出控制要求。另外, A级区若采用密闭隔离器、手套箱或其他密闭A级操

作设备, 风速可适当降低, 但其动、静态的粒子数应可验证。

表4中B~D级换气次数为推荐值, 实际计算过程中还应结合房间热、湿负荷计算出的送风量、根据自净时间确定的送风量三者取最大值^{[1]22}。

自净时间指医药洁净室被污染后, 净化空气调节系统在规定的换气次数条件下开始运行, 直至恢复固有的静态标准时所需时间^[12]。反应的是洁净空气的稀释能力, 可理解为换气次数的另一种体现。自净时间的检测应对每分钟数值进行连续记录, 生成曲线。一般不建议对A级区做自净时间检测, B级和C级(ISO5级和7级)自净初始浓度不少于目标浓度上限100倍; D级和E级(ISO8级和9级)自净初始浓度不少于目标浓度上限10倍^[8]。新版兽药GMP附件1中给出了自净时间推荐值(15-20分钟)与欧盟及我国人药GMP相同。根据国际制药工程协会(ISPE)的经验数据, 换气次数在20次/h时, 洁净室从动态恢复至静态跨越1个级别约需14分钟, 跨越两个级别约需21分钟(见图3), 与我国兽药GMP推荐值基本相当。但近年来, 随着各国洁净工程行业技术的发展与进步, 围护结构的严密性和房间气流组织的合理性都得到大幅提升, 图4为国内某实际工程的实测结果, 20次/h换气次数下C级房间的自净在8-12分钟即可完成。

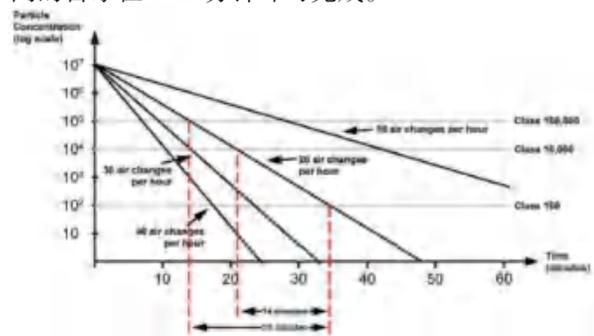


图3 ISPE提供的不同换气次数下自净时间经验数据

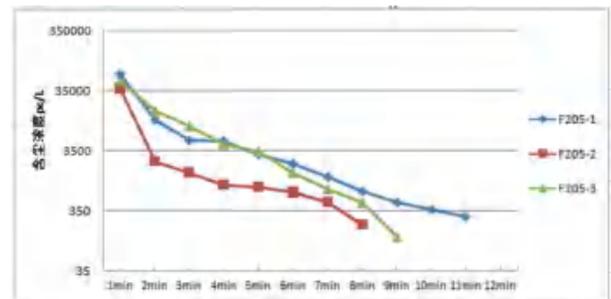


图4 国内某实际工程C级房间的自净时间实测结果

2.4 压差

根据新版兽药GMP对压力的通用要求, 洁净区与非洁净区之间、不同级别洁净区之间的压差应

当不低于 10Pa。必要时，相同洁净度级别的不同功能区域（操作间）之间也应当保持适当的压差梯度，并应有指示压差的装置和（或）设置监控系统。

本次修订调整了老版中不同级别洁净区之间、洁净区与非洁净区之间及洁净区与大气之间压差不小于 5Pa、10Pa 和 12Pa 的要求，采用了与我国人药 GMP（2010）相同的 10Pa 作为统一指标。此外，最新的欧盟征求意见稿也增加了此前没有的 10Pa 压差要求，与我国一致。

有生物安全三级防护要求的兽用生物制品的生产车间，防护区应为绝对负压，核心工作间（区）与室外大气压差不小于 40Pa，与相邻走廊（或缓冲间）的压差不小于 15Pa^[9]，其余室外相邻相通方向的房间压差不小于 10Pa。防护区的负压空调系统应能抵御各种压力波动，保证其在任何工况下均能维持绝对负压，以防止出现绝对正压而导致气体外溢的情况发生。考虑到车间生产特点，对不同工况（系统开关机、备用风机切换、备用电源切换及房间外排风设备启停等）转换过程各房间之间的相对压差变化不做要求。在设计时应考虑整个防护区压力变化的可验证性条件；对系统送、排风机启停或切换逻辑顺序进行充分分析，保证任何时刻排风量大于新风量（回风工况）或送风量（全新风工况）^[10]。表 5 为笔者统计的国内 16 个已部通过农业农村部三级防护 GMP 验收的高致病性禽流感（表中简称禽流感）和全病毒口蹄疫（表中简称口蹄疫）疫苗生产车间的空调系统形式及压力无关阀门采用方式的情况。

表 5 16 个项目空调系统形式和压力控制模式

项目编号	项目类别	空调系统形式	压力控制形式	压力无关阀门形式
1	口蹄疫	全新风	定送变排	文丘里
2	口蹄疫	回风	定送定排	无
3	禽流感	回风	定送变排	蝶阀
4	禽流感	回风	定送变排	蝶阀
5	口蹄疫	回风	定送变排	蝶阀
6	禽流感	回风	定送定排	无
7	口蹄疫	全新风	定送变排	文丘里
8	口蹄疫	回风	定送定排	无
9	口蹄疫	回风	定送定排	无
10	口蹄疫	回风	定送变排	文丘里
11	口蹄疫	回风	定送定排	无
12	禽流感	回风	定送定排	无
13	口蹄疫	回风	定送定排	无
14	禽流感	回风	定送定排	无
15	禽流感	回风	定送定排	无
16	禽流感	回风	定送定排	无

注：“定”为房间定风量控制；“变”为房间变风量控制。

从表 5 可以看出，除 2 个项目采用全新风系统外，其余均为回风空调系统。相当一部分车间并未采用压力无关装置，但依然能够通过检测和验收，满足工况转换时防护区均为绝对负压的要求。这是由于

法规并没对工况变化期间防护区内核心工作间（区）与其相临房间压差提出要求，因此压力控制的重心从房间转移到系统送、排风机层面^[11]，只需控制好送、排风机机组的启停顺序、频率变化和时间差，即可在宏观层面充分保证防护区的绝对负压。

3 结论

1) 本次新版兽药 GMP 修订，采用并更新了动态级别规定，重新定义了截面风速，取消了部分室内关键环境参数值，增加了气流流型和自净时间等概念，明确了常规类及涉及生物安全车间的压力要求等。规范的修订对标了国内国际标准，有借鉴，有更新，有创新，体现了科学性和先进性，力图使我国兽药工业洁净厂房设施的建设更加科学合理。

2) 作为新版兽药 GMP 的配套技术支撑性文件，《兽药工业洁净厂房设计标准》T/CECS 805-2021 对新版兽药 GMP 中厂房设施各类建设要求提供了技术措施或指标推荐范围，用来指导须满足新版兽药 GMP 的新建、扩建和改建车间的实施，供设计、建设方参考使用。

参考文献

- [1] 中国工程建设标准化协会. T/CECS 805-2021 兽药工业洁净厂房设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [2] EudraLex - Volume 4 - Good Manufacturing Practice (GMP) guidelines Annex 1 Manufacturing of Sterile Product (Second Targeted stakeholder's consultation) [EB/OL]. https://ec.europa.eu/health/sites/default/files/files/gmp/2020_annex1ps_sterile_medicinal_products_en.pdf, 2020-02-22
- [3] ISO14644-1:2015, Cleanrooms and associated controlled environments — Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration, [S]. ISO copyright office, CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland.
- [4] 中华人民共和国农业农村部公告 第 389 号 [EB/OL]. http://www.xmsyj.moa.gov.cn/zwfw/202101/t20210122_6360346.htm2021-01-22/20210725
- [5] Parenteral Drug Association (PDA), Points to Consider for Aseptic Processing Part 1 January 2015, [M]. Parenteral Drug Association, Inc, ISBN: 978-0-939459-75-9: 5-6
- [6] David Brande, Dan Milholland, and Nick Haycocks, Why is 90 FPM considered the standard for cleanroom airflow [J]. PRMACEUTICAL ENGINEERING, March-April 2017 | Volume 37, Number 2, P46

- [7] U.S. Department of Health and Human Services Food and Drug Administration, Guidance for Industry Sterile Drug Products Produced by Aseptic Processing — Current Good Manufacturing Practice, [S] . food and Drug Administration 1401 Rockville Pike, Rockville, MD 20852-1448, September 2004: 6
- [8] ISO14644-3:2019, Cleanrooms and associated controlled environments — Part 3: Test methods, [S] . ISO copyright office, ISO copyright office, CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland: 21-22
- [9] 农业农村部 . 兽用疫苗生产企业生物安全三级防护标准 [EB/OL]. [2021-07-25]. [http: // www. moa. gov. cn/ govpublic/ SYJ/ 201709/ t20170906_ 5808192. htm? keywords=2573, 2017 08 31/ 2017 09 06](http://www.moa.gov.cn/govpublic/SYJ/201709/t20170906_5808192.htm?keywords=2573,2017 08 31/2017 09 06)
- [10] 梁磊, 陈光华, 谷红等 . 重大动物疫病疫苗车间空调系统生物安全要点探讨 [J] . 《暖通空调》, 2018 年, 48 (1) : 33.
- [11] Lei Liang, Xin Feng, Yi Li, Pressure control strategies in biosafety level-3 large-scale production facilities for animal vaccines, Biosafety and Health 2(2020) 124-129, DOI : [https://doi.org/10.1016/ J. BSHEAL. 2020. 08. 002](https://doi.org/10.1016/J.BSHEAL.2020.08.002)

医学洁净实验室设计要点分析及应用介绍

严建敏

(上海市卫生建筑设计研究院有限公司, 上海 200003)

[摘要] 医学洁净实验室涉及的致病性微生物多, 而且不同的细菌、病毒混杂在一起, 是医院易高感染的区域之一。为防止医学实验室潜在的有毒、有害气体外溢, 感染实验人员或污染实验环境, 需要建立一套完整、有效地保护医护人员和室内环境安全的净化空调设计方案, 医学实验室负压净化空调这一技术措施已逐渐被人们接受。本文结合某医院 PCR 负压洁净实验室为例, 详细阐述其负压净化空调系统的设计方案, 期望对日后类似型医学洁净实验室设计有所帮助, 方便读者参考。

[关键词] 洁净; PCR 实验室; 设计; 应用; 案例

1 简介

医学实验室是以生物安全为核心, 确保实验室人员不受实验样本侵染, 周围环境不受污染的一种技术手段, 通常采用二级隔离。一级隔离通过通风柜、生物安全柜等, 二级隔离通过建筑、空调净化和电气控制系统来实现。净化空调系统根据实验对象的危害程度、所操作致病性生物因子的传播途径等因素确定, 并应采取有效措施避免交叉污染。合理、合规、有效的负压实验室净化空调系统设计, 是防止实验过程中有毒、有害气体外溢, 防止潜在交叉感染的风险控制技术措施之一。

2 医学实验室净化空调方案介绍

2.1 医学实验室工艺要求

医学生物安全实验室一般由洁净实验室和辅助用房组成, 自成一区。实验区分为清洁区、半污染区、污染区, 不同区域之间需设置缓冲室或传递窗, 而且各区宜保持压力梯度和定向气流, 使空气从低风险清洁区流向高风险的污染区。产生有毒、有害气体的房间应在二级生物安全实验室进行, 涉及对人体或环境有危害的微生物、气溶胶应在二级以上生物安全实验室进行。高致病性病原微生物实验室宜为负压环境, 低致病菌实验室可采用正压环境设计。

2.2 设计指标

洁净实验室均为人工受控环境, 室内环境需要维持一定的空气温湿度、换气次数、压力状况、空气洁净度等技术指标, 为实验人员和实验样本提供安全和舒适的工作环境。实验室和辅助用房主要技术指标见表 1。

表 1 洁净实验室主要技术指标

科室	洁净度(级)	换气次数(次/h)	相邻房间压差值(Pa)	温度(°C)	相对湿度(%)	备注
核心实验室	8级	10~15	-10~-15	22~24	50~60	不包括特殊实验室
辅助用房	8.5级	8~10	-5~-10	18~26	60~65	

2.3 净化空调设计原则

实验室相对是一个污染空气源, 要求房间始终处于受控负压状态, 空调系统一般采用的全空气系统, 乱流送风, 气流组织为上送下回(排)形式。对送风口和排风口的位置需要合理布置, 使室内气流有正确的流向, 尽可能减少气流停滞区域, 确保室内可能被污染的空气以最快速度流向排风口, 并且要求有效、直接、独立的排风系统。洁净实验室净化空调系统应独立, 除使用全空气净化空调系统外, 排风系统应独立而且宜采用下排风口形式, 受条件限制可采用净化风机盘管, 独立控制。

由于实验室设备多, 人流密, 医护人员长期在封闭环境工作, 容易互相交叉感染, 加大新风量, 增加排风量有利于稀释“混浊”的空气。为防止实验室“污染”空气从室内流入室外, 实验室建立负压是必要的。排风换气次数应 ≥ 10 次/h以上, 负压值保持在 -10Pa 以上, 并要防止室外空气从排风口中倒灌进来。实验室洁净度要求不宜太高, 过高会造成投资增大, 运行成本增加。设定在 8 级和 8.5 级之间比较合适。相对湿度控制在 65% 以下, 适合于消除静电产生, 控制细菌繁殖速度, 确保洁净实验室安全可靠运行。

洁净实验室的送风系统应设置粗、中、高效三级空气过滤器, 空调机房不应距离实验室过远。风机应选用风量变化较大时风压变化较小的离心风机, 洁净区内不宜设置分体空调、风机盘管、多联机等的空调器(机)。有正压要求的洁净医学实验室, 排风系统的风机应与送风连锁, 送风先于排风开启, 后于排风关闭。有负压要求洁净医学实验室的排风应与送风连锁, 排风先于送风开启, 后于送风关闭。

3 洁净实验室设计实例

3.1 项目概况

该项目位于某市的三级甲等综合医院内, 气象条件为夏热冬暖。医院检验中心区域内布置了不同

性质的高致病性实验室和低致病性实验室，以及不同压力（正压或负压）洁净实验室，本文以普通型 PCR 洁净实验室为设计参考案例。

3.2 建筑平面布置

PCR 实验室可以分二类，普通型 PCR（图 1）和加强型 PCR（图 2）。加强型 PCR 主要检测空气传播的高致病性因子，它一般由普通型 PCR 实验室和辅助用房组成。实验室基本配置为低温冰箱（冰柜）、离心机、电泳槽、PCR 仪、超净工作台、通风橱、生物安全柜等设备，试剂准备室配置 II 级 A2 型生物安全柜（内排型）、核酸提取室设置 II 级 B2 型生物安全柜（全排型）。

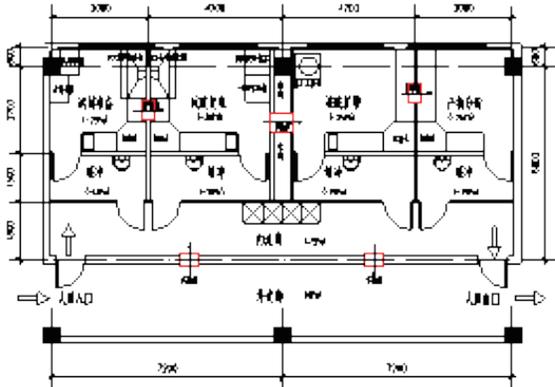


图 1 普通型 PCR 实验室

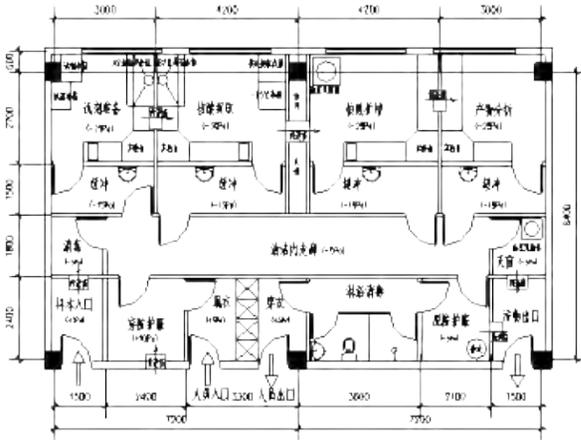


图 2 加强型 PCR 实验室

3.3 设计参数

PCR 实验室设计温度 22~24℃、相对湿度 50~60%，试剂准备室生物安全柜全为内循环 II 级 A2 型（外排风量为 450 m³/h），核酸提取室为全外排 II 级 B2 型（排风量为 1500 m³/h），主要技术指标见表 2。

3.4 冷热源

PCR 实验室通风空调使用具有特殊性和连续性，

表 2 PCR 实验室设计参数

房间名称	洁净度级别	换气次数 (次/h)	与室外方向相邻房间压差 (Pa)	温度 (°C)	相对湿度 (%)	噪声 dB(A)
内走廊	/	/	-5	22~26	/	≤60
缓冲	8.5 级	10	-15	22~24	60~65	≤55
试剂准备室★	8 级	15	-25	22~24	50~60	≤55
缓冲	8.5 级	10	-15	22~24	60~65	≤55
核酸提取室★	8 级	15	-30	22~24	50~60	≤55
缓冲	8.5 级	10	-15	22~24	60~65	≤55
产物扩增室★	8 级	15	-25	22~24	50~60	≤55
缓冲	8.5 级	10	-15	22~24	60~65	≤55
产物分析室★	8 级	15	-25	22~24	50~60	≤55

表中：1./ 表示不作要求 2. ★为核心工作区

不建议与其它冷热源合同，宜采用单独风冷热泵机组作为新风空调箱的冷热源，或者采用热泵型直接蒸发式新风空调机组作为冷热源。由于 PCR 实验室多为检测“新冠”病毒，而且采用全新风净化空调系统，全新风空调箱处理冷湿负荷较大，从工程实践中看，常规冷源保证供水温度维持在 7℃，由于各种原因有一定的难度，因此目前比较常用方法是，全新风空调箱除常规一级表冷段外，另设置直接蒸发式二级表冷段（见图 3）进行深度“去湿”，此方案在工程实践中较为常用。

3.5 设计方案（变送定排系统）

基于 PCR 实验室检测样品为“新冠”病毒，采用变新风定排风系统，全新风净化空调设计方案（图 3）是常规方案。试剂准备室和核酸提取室，新风（送风）管上安装变风量阀（VAV），排风管上设置定风量阀（CAV）、生物安全柜排风安装变风量阀（VAV），其他实验室送排（回）风管上安装定风量阀，并按实验工艺要求将 PCR 洁净实验室设计为负压净

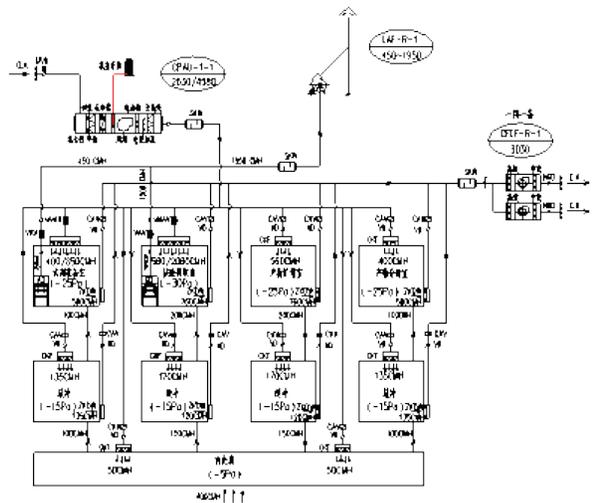


图 3 普通型 PCR 实验室系统图

化空调系统。各洁净实验室及辅助房间送排风采用上送风下排风型式,生物安全柜排风按“多柜一风机”配置,排风机设在建筑物最高处并处于当地主导风向向下风侧。为保证洁净室风量平衡,实验室生物安全柜排风和送风口连锁控制,实行无缝切换。

3.6 净化空调系统

净化空调系统送风均经过初、中效、亚高效过滤器处理送入实验室内,实验室内采用高效送风口送风,排风口(回风口)设置板式中效过滤器,屋顶排风机采用内设中、高效过滤器排风过滤箱,并在排风机出口设止回阀,防止室外空气倒灌。所有排风口(回风口)采用板式中效以上过滤器及带调节装置的百叶风口,为确保实验室始终保持负压,排风机采用双风机配置,生物安全柜(排风)与新风机(补风)实行无缝切换。

3.7 压力梯度

以普通型 PCR 实验室为例(见图4),整个实验室均为核心工作区,所以房间均为负压设定,核酸提取室负压要求最大,其它实验室次之。专用内走廊对外相通相邻房间最小压差 -5Pa,负压缓冲室对内走廊最小压差 -15Pa,试剂准备室对缓冲室最小压差 -10Pa,核酸提取室对缓冲室最小压差 -15Pa,产物扩增室对缓冲室最小压差 -10Pa、产物分析室对缓冲室最小压差 -10Pa。

图4 普通型 PCR 实验室压力梯度

试剂准备室 (-25Pa)	核酸提取室 (-30Pa)	产物扩增室 (-25Pa)	产物分析室 (-25Pa)
缓冲 (-15Pa)	缓冲 (-15Pa)	缓冲 (-15Pa)	缓冲 (-15Pa)
内走廊 (-5Pa)			

通过实验室送风、全面排风、生物安全柜局部排风的风量平衡计算分析,PCR实验室试剂准备室室内生物安全柜(A2型)不工作时,实验室换气次数10次/h,工作时换气次数39次/h,具体房间风量分析见下表(表2)。核酸提取室内生物安全柜(B2型)不工作时,实验室换气次数15次/h,工作时换气次数55次/h,具体房间风量分析见下表(表3)。

表2 试剂准备室风量平衡计算表

工作状态	房间换气次数(次/h)	新风(补风)量(m ³ /h)	排风量(m ³ /h)	生物安全柜排风量(m ³ /h)	压差风量(m ³ /h)
生物安全柜工作	39	1050	500	450	-100
生物安全柜不工作	10	400	500	/	-100

表3 核酸提取室风量平衡计算表工作状态

工作状态	房间换气次数(次/h)	新风(补风)量(m ³ /h)	排风量(m ³ /h)	生物安全柜排风量(m ³ /h)	压差风量(m ³ /h)
生物安全柜工作	55	2060	760	1500	-200
生物安全柜不工作	15	560	760	/	-200

3.8 气流组织

为避免各个实验室间交叉污染和实验室内“污染”空气外漏,各实验室均设置前室,同时严格控制送、排风的比例以保证各实验室的负压差要求,实现各实验区域气流的单向流动,并遵循以下几点原则:送风口设置在房间靠门处,远离房间内生物安全柜等气溶胶污染源发生源处;排风口设置在房间内下侧;靠近房间最高污染源处且无任何障碍;对于狭小空间,送排风口房间对角线设置;PCR实验室空气流向,外走廊流向内走廊(总缓冲区),内走廊空气流向各缓冲区域,各缓冲区域空气流向各实验操作区域(见图5)。



图5 普通型 PCR 实验室气流流向

3.9 控制策略

PCR实验室采用变新风系统和定排风系统(简称变送定排)。有局部排风设备实验室,送风通过风管上的变风量阀(VAV)进行控制,实现实验室送风量可变,房间排风管设置定风量阀(CAV),控制实验室全面排风量恒定,而生物安全柜局部排风量大小可变,通过柜门的开启高度调节(柜面风速>0.5米/秒)排风管的变风量阀(VAV),实现变送定排模式(图6、图7)。而PCR实验室其它无局部排风设备房间,送、排风进行定风量阀控制,使整个PCR实验室实现负压节能运行。该控制策略优点在于实验室各房间不会因送排风量变化而相互影响,维持PCR实验室各房间的负压稳定,满足整个PCR实验室及辅助房间的负压控制要求。

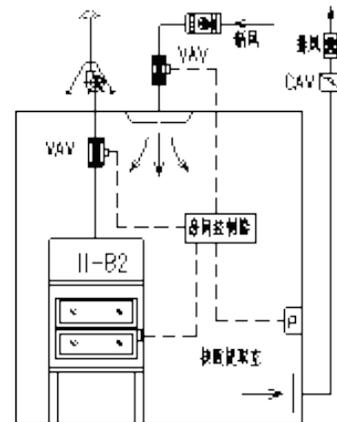


图6 PCR 实验室控制原理图

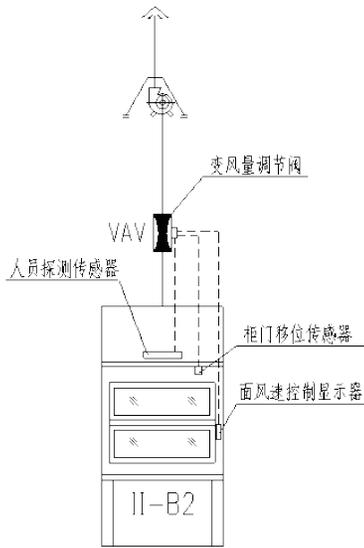


图7 生物安全柜控制原理图

4 负压净化实验室设计关注点

4.1 设计要点

基于微生物实验室等，涉及的实验领域比较广泛，一般微生物实验室洁净等级为十万级，具体的洁净度等级依据实验室的具体操作要求确定。设有局部排风的正压十万级实验室换气次数宜为10-15次/h；并应根据局部排风量进行风量平衡计算。正压洁净室对外的静压差值应 $\geq 10\text{Pa}$ ，不同级别之间的相邻相通房间之间静压差值 $\geq 5\text{Pa}$ 。对负压的房间之间静压差值 $\geq -5\text{Pa}$ ，不同级别之间的相邻相通房间之间静压差值 $\geq -10\text{Pa}$ 。

4.2 通风空调方案

洁净实验室净化空调方案，应依据操作对象的危害程度、实验设备排风要求、空调自控技术及绿色节能要求等条件，经过经济技术比较后确定，并采取有效防止交叉污染的技术措施。可采用定新风变排风（简称定新变排）方案、变新风定排风（简称变新定排）方案或变新风变排风（简称变送变排）方案。

实验室设置局部通风的设备，应按照生物污染或化学污染分类分别设置独立排风系统。高致性微生物净化实验室，净化空调系统应独立成为一个系统。各实验室宜按单向流设计，排风口安装在送风气流的下游方向。生物安全柜补风宜采用主动型补风（送风需冷热处理后送入室内），送风机房宜同层或上下层就近布置，排风过滤风机宜屋顶布置，排风口高于所在建筑物屋面2m以上。

二级以上生物安全实验室，必须在实验室内设计有效排风口，不能利用生物安全柜或其它负压装

置作为实验室排风口。特别是在PCR实验室内配置II级A2型生物安全柜（内排型），室内无有效排风口，实验室安全运行无法有效保证。

4.3 相对零压位置

实验室气流流向和压力梯度要合理正确，严格控制各实验室房间的压力梯度，力求各区域气压平衡，防止PCR各实验室之间因压力设计不当而导致交叉感染的风险，同时应尽量减少不必要的人流和物流进出，破坏室内压力相对平衡。以PCR实验室为例，相对零压设置位置很关键，当内走廊设定负压（见图8），外走廊空气渗入内走廊，对于实验室是相对安全的；如内走廊设定正压（见图9），实验室内空气压力控制不当外溢，内走廊空气可能流入外走廊，存在安全隐患。笔者设计原则为：PCR洁净实验室实验样品是高致病性、高传染性的，内走廊宜为负压，保证各实验室空气经缓冲室及前室流入外走廊。低致病性实验样品实验室，内走廊可设定为正压，不会使外走廊（或室外）空气大量经内走廊及前室流入实验室，破坏洁净度和污染实验室。

试剂准备室 (—)	核酸提取室 (—)	产物扩增室 (—)	产物分析室 (—)
缓冲 (—)	缓冲 (—)	缓冲 (—)	缓冲 (—)
内走廊 (—)			

图8 PCR实验室压力梯度（一）

试剂准备室 (—)	核酸提取室 (—)	产物扩增室 (—)	产物分析室 (—)
缓冲(+)	缓冲(+)	缓冲(+)	缓冲(+)
内走廊 (+)			

图9 PCR实验室压力梯度（二）

4.4 各实验室负压分析

从PCR实验室压差要求分析，房间功能要求不一样，各房间正压或负压也不一致，实验室围护结构的密闭性尤为重要，可靠的密闭性是保证正负建立的必要条件。各实验室对相邻房间压差宜保持在 -10Pa ，过高的相对压差对实验室围护结构需要更高的强度，过低的相对压差不利于洁净度保证。负压的建立应经过洁净室风量平衡计算确定，可采用缝隙法计算法、换气次数法及经验法。在缺少计算资料的情况下，推荐压差 $\Delta P=5\text{Pa}$ ，换气次数2~3次/h，压差 $\Delta P=10\text{Pa}$ ，换气次数4~6次/h。

4.5 压力控制方法

根据生物安全实验室要求，可采用压差控制法或余风量控制法。压差控制法通过压差传感器测量室内与参照区域的压差，与设定的压差比较后，控

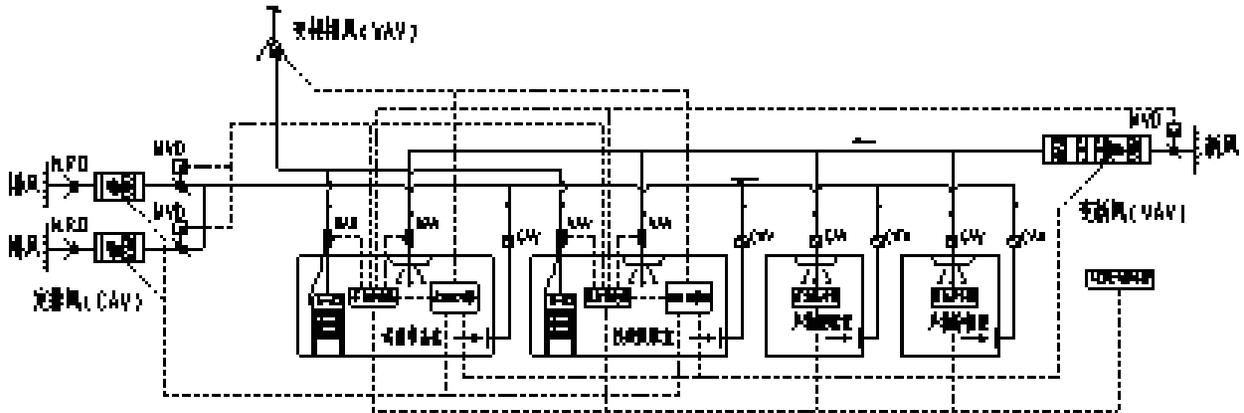


图 10 PCR 实验室压力控制原理图

制器根据偏差调节送风量（或排风量）进行控制，从而达到要求的压差。此种压力控制法为反馈控制，系统的响应时间相对长，控制精确度低。余风量控制法是将实验室的送风量排风量之间保持一定的风量差（称为余风量），使实验室内外产生一定的压差。当室内总送风量大于（小于）室内回风、排风总量时，空气通过余压阀和房间缝隙排出（渗入），与相邻区域建立起正压（负压），要求洁净度较高的场所。

在 PCR 实验采用压差控制法（图 10）方案中，整个通风空调对变新风的实验室（有独立排风设备），在新风入口安装变风量阀（VAV），房间排风安装定风量阀（CAV），局部排风设备设置变风量阀（VAV）。不需要变新风的实验室，在新风入口和排风出口安装定风量阀（CAV），该系统为变新风变排风系统。通风空调系统不受各实验室送、排风量变化而影响整个 PCR 实验室压力波动，压力控制见图（图 10）。在整个净化空调系统中，唯一需要变化的是新风空调机组，满足核心实验室运行的压差要求，实现实验室节能和安全运行目的。

5 总结

以上十分简要地介绍了医学洁净实验室净化空调设计思路、要求和具体做法，并就医学实验室设计等提供一些个人观点，目的是为设计者提供一个满足国家相关规范和标准的参考案例和满足医学实验室的工作环境。

生物安全实验室由于其标的物的高危害性，它不仅强调对实验样品的保护同时它更强调对实验人

员及外环境的保护，因此保证实验室环境的密闭性及维持其负压状态的稳定性是设计及建造的重要因素。

随着医疗事业的发展和医学科学的进步，净化实验室空调系统的思路、形式和设施等都在不断变化，一个良好、舒适、清洁的环境不仅是净化空调的目的，也是现代医学实验室的一个不可缺少的部分。

参考文献

- [1] 国家卫生部 .GB 50333- 2013 医院洁净手术部建筑技术规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社 ,2014:05.
- [2] 国家卫生和计划生育委员会 .GB 51039-2014 综合医院建筑设计规范 [S]. 北京：中国计划出版社 ,2015:08.
- [3] 国家卫生部 .GB 15982-2012 医院消毒卫生标准 [S]. 北京：中国标准出版社，2012:11.
- [4] 国家卫生和计划生育委员会 .WS 233-2017 病原微生物实验室生物安全通用准则 [S] 2017:07.
- [5] 全国标准化委员会 .GB 19489- 2008 实验室·生物安全通用要求 [S]. 北京：中国标准出版社，2009:07.
- [6] 住房和城乡建设部 .GB 50346- 2011 生物安全实验室建筑技术规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社 ,2012:05.
- [7] 中国医学装备协会 .T/CAME 15-2020 医学实验室建筑技术规范 [S].2020:06.
- [8] 中国工程建设标准化协会 .T/CECS662-2020 医学生物安全二级实验室建筑技术标准 [S]. 北京：中国计划出版社，2020:02.

医药生物实验室空调系统的设计

项志铨

(中石化上海工程公司, 上海 200120)

[摘要] 传统的实验室暖通设计已非常成熟, 本文主要针对医药领域中带有生物安全实验柜或者带有变风量智能型通风柜的实验车间工程项目的空调系统和排风系统的合理设计及其系统特点, 总结并分析了不同设计方案的思路 and 具体做法, 从中对于稳定排风和非稳定排风进行了重点分析和对系统构成进行了阐述, 对于医药生物具有实验室性质的车间设计具有一定的指导意义。

[关键词] 变风量实验室; 变风量送风、排风系统; 压差稳定控制; 变风量系统设计

0 引言

近些年来, 随着生物新药的不断研制与迅速开发, 创新药物的发展步入了快速发展的新阶段, 由于创新药的新成分、新剂型不能直接用于临床治疗, 需要一定时间周期的应用观察和不断的试验, 所以近几年来生物医药企业内的实验室项目或带实验柜的车间建设得非常多, 而实验室内采用最多的主要设备是生物安全柜和智能型通风柜, 有关于单纯实验室空调送风系统和排风系统组成和特点介绍的文章前些年在各类专业学术杂志上已发表了许多。本文主要探讨的是在医药领域内制药生产车间内部的空调系统包括空调净化系统与生物安全柜和智能通风柜一并运行时系统的组成和合理设计的方法; 如何针对生物安全柜和智能通风柜排风量随时变化引起的室内压力波动、系统满足最小排风量运行的要求、室内温湿度的合理控制以及在维持房间压力的稳定、系统的稳定运行等方面进行讨论和总结。

1 生物安全柜的分类与级别

先了解一下医药生物场所采用的几种生物安全柜的排风要求以及与排风系统的连接方式, 从而有助于对于实验类空调送排风系统的合理设计。

对于生物安全柜的外形大家应该已经非常熟悉了, 图1图2就是两种常用的生物安全柜的外形。根据生物安全实验室建筑技术规范的相关要求: I级生物安全柜的操作口平均风速要求达到0.38m/s, 必须是100%的排风, 不得使用循环风, 排风管与生物安全柜的连接必须是密闭连接(直联); II级生物安全柜分四种级别:A1、A2、B1、B2。A1的操作口平均风速要求达到0.38m/s~0.50m/s, 采用30%的排风, 可使用70%的循环风, 排风管与生物安全柜的连接可以是套接; A2的操作口平均风速要求达到0.50m/s, 30%排风, 可使用70%循环风, 排风管与生物安全柜的连接可以是套接或密闭直联; B1的操作口平均风速要求达到0.50m/s, 70%排风, 可使用30%循环风, 排风管与生物安全柜的连接必须

是密闭直联; B2的操作口平均风速要求达到0.50m/s, 100%排风, 不可使用循环风, 排风管与生物安全柜的连接必须是密闭直联。通常在生物制药车间或实验室内采用的是B2型生物安全柜, 也就是称为二级生物安全实验室。这类实验室的排风一般都需要通过H11高效过滤器过滤或再添加一节活性炭过滤器, 经过两道过滤后再排向室外大气(屋面排放)。现在也经常会用化学过滤器来代替活性炭过滤器, 但成本和运行费用也增加了。



图 1



图 2

2 带有生物安全柜的净化空调系统

先介绍一下带有生物安全柜的空调净化系统, 系统送风一般需要设置初效、中效、高效三道空气过滤器, 初效过滤器通常置于空调箱紧靠新风口的地方, 中效过滤器设置在空调箱的正压段, 而高效过滤器应置于系统的末端送风口处, 不应设在空气处理机组的箱体内。图3为带有生物安全柜的净化空调系统流程图, 图中我们把生物安全柜的排风作为常排来处理的(制药车间内的生物安全柜通常也是恒定常排的), 这就为系统的设计和控制带来了方便, 也为以后的运行操作带来了简便。两个接种房间内生物安全柜的排风我们按照规范要求采用密闭连接(直联), 由于系统控制简单了, 尤其是对于房间的压力控制, 因为我们不用担心因为生物安全柜的排风是间歇性的或排风量是变化的, 这样系

统风量平衡就可以比较稳定，压差也比较稳定。图中可以看出，有生物安全柜的房间排风量调节到房间处于相对负压状态，通常就是系统排风加上生物安全柜的排风大于房间的送风量，如图中 $1100\text{m}^3/\text{h}+1000\text{m}^3/\text{h}>2000\text{m}^3/\text{h}$ ，实际运行时生物安全柜的 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 排风量和为满足房间温湿度要求、维持洁净 C 级的最低换气次数要求、满足人员的新风量要求所需的 $2000\text{m}^3/\text{h}$ 送风量是固定不变的，因为在高效送风口入口处安装了定风量阀 (CAV)，生物安全柜的排风固定不变，因此只要对房间的排风管阀门进行调节系统便能平稳运行。在这个系统中所有排风都是固定不变的，整个系统运行就比较容易达到设计参数要求。

实际运行结果温湿度的控制以及压差的稳定性都是比较理想的，本系统中的两个接种房间温度控制范围夏季 $22^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ 、冬季 $20^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ ；湿度 $55\%\pm 10\%$ ；压差 30Pa 都是得到了较好的控制。具体处理流程就是常规的新风先通过初效过滤器 (G4) 后与室内回风混合，夏季通过冷却盘管和加热盘管后经中效过滤器 (F8) 送至高效过滤送风箱 (H13)；冬季通过加热盘管和加湿器后经中效过滤器 (F8) 送至高效过滤送风箱 (H13)，H13 高效风口与定风量阀 (CAV) 组成空调末端，由于高效过滤器的荷载逐渐增大，引起管路静压发生变化，会造成送风量减小，室内的换气次数达不到洁净级别要求，而通过 CAV 的作用能使洁净房间的送风量保持不变，换气次数保持恒定，从而保证了房间的洁净度。此系统运行时按规定排风必须与送风连锁，即先开送风机再开排风机，停止运行时先关排风机再关送风机 (三、四级生物安全实验室正好相反的)。

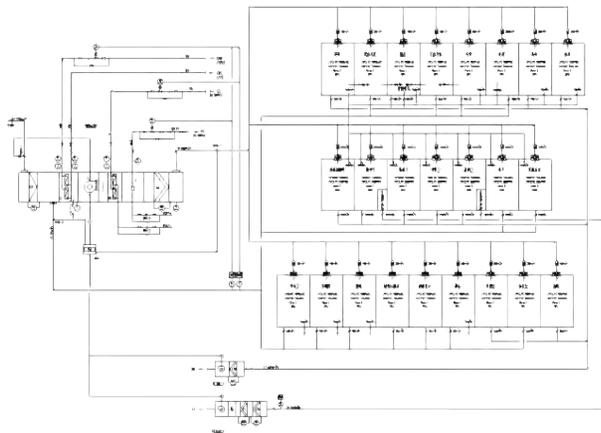


图 3

3 变风量实验室空调系统的设计

对于医药生物实验和生产车间工程还经常采用

智能型实验室通风柜 (图四是两台大型智能型通风柜的外貌)，有些车间布置一台智能型通风柜，有些则布置好几台。由于这种智能型通风柜的排风量是可以变化的，所以空调系统的组成和风量、压差控制方法就会比较复杂。这种智能型通风柜采用的是变风量控制系统，每个通风柜配置有风速控制器，通过实时测量柜面风速，完成通风柜的风速调节以满足通风柜不同开度时能始终保持安全面风速的要求，通常整个通风柜风量控制系统的响应时间要求在 3 秒以内，这个响应时间越短越好，它对房间的压差稳定以及影响整个空调系统的运行稳定性具有重要的作用。同时我们需要了解通风柜的两个重要特性以便在设计和使用上更加完善和灵活。一个就是当通风柜门关闭后，风量阀要维持通风柜的最小排风量，一般设计要考虑 $150\text{m}^3/\text{h}\sim 300\text{m}^3/\text{h}$ 的最小排风量 (图 5 是一个比较典型的带智能型通风柜实验室变风量空调系统的组成)；另外在遇到通风柜出现异常情况时，通风柜要启动紧急排放模式，这时控制系统将全部打开风阀，排放系统将以最大排风量运行，此时不再受面风速值的控制。使用上智能型通风柜的控制面板上具有报警功能：即如果面风速传感器的实际测量值低于设定值，在延迟数秒后面风速仍然没有回到设定值，监控面板将会发出声光报警。(参见实验室变风量排风柜 JG/T222-2007 和空气变风量通风柜 BS EN14175-6-2006 中的详细介绍)。



图 4

在详细了解了智能型变风量通风柜的特性后，对于空调系统送排风系统的设计具有很大的帮助。下面我们带变风量通风柜的空调系统做法介绍一下：图 5 是比较典型的普通空调环境下医药生物变风量实验室车间项目的系统组成。

系统由普通空气处理机组 AHU-101 承担各房间的热湿负荷来达到一定的温湿度要求，同时考虑系统中一些稳定排风的排风补充；新风处理机组

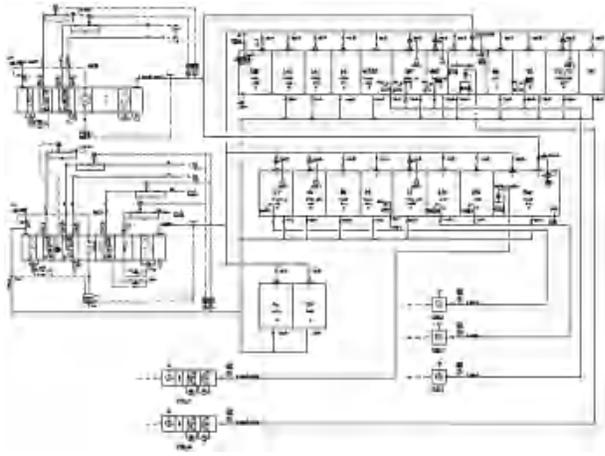


图 5

MAU-101 则承担新风自身的负荷以及新风量的大小要满足系统变化的排风量。空气处理机组典型的基本组成就是新风与室内回风混合、通过 G4 初效过滤器后夏季通过冷却盘管和加热盘管后经中效过滤器 (F8) 送至各房间; 冬季通过预热盘管、再热盘管和加湿器后经中效过滤器 (F8) 送至室内。新风机组要满足通风柜全开时的最大排风量 (有时在通风柜数量比较多的时候可以结合室内的温湿度控制要求而考虑一定的使用系数) 和最小排风量的工况要求, 排风通常通过高效过滤器和活性炭过滤器后再排放。实验通风柜的排风都是通过排风 VAV 变风量控制阀来调节的, 对应的新风补风也是安装了 VAV 变风量控制阀, 通过房间的压差变化信号来调整送风量的大小以满足房间应排风量的变化引起的压力变化, 譬如当排风柜排风量瞬间变小时, 在响应时间内房间压力会迅速升高, 压力传感器输出信号, 经过变风量调节阀的运算调整阀门开度, 相应减少送出的风量以达到房间的设计压力; 同样当排风柜排风量逐渐变大时, 房间压力会迅速下降, 压力传感器输出信号, 经过变风量调节阀的运算加大阀门开度, 送风量增加以达到房间的设计压力, 所以在这个变化过程中, 变风量调节阀 VAV 的响应时间对房间乃至周边房间的压力稳定起到了关键作用, 响应时间越短, 系统稳定越快, 影响其他房间的程度也越小。

4 变风量房间净化空调系统的设计

上面我们叙述了净化系统实验车间稳定排风的系统做法和普通系统实验车间稳定和非稳定排风系统的做法, 而在具体的医药生物项目空调系统中还会遇到净化非稳定的情况。

图 6 是净化区非稳定排风的系统单元 (称为定送变排系统), 净化空气处理机组还是由标准的初

效过滤器、冷却盘管、加热盘管、干蒸汽加湿器和中效过滤器组成, 送风末端为定风量阀 + 高效过滤器组成。图中即满足冷热负荷又满足洁净要求的系统送风量为 $5000\text{m}^3/\text{h}$, 两台智能通风柜不工作时有最低的排风要求, 排风量共 $300\text{m}^3/\text{h} \times 2$, 此时系统回风量为 $4500\text{m}^3/\text{h}$, 新风量为 $500\text{m}^3/\text{h}$, 房间负压渗透风量考虑 $100\text{m}^3/\text{h}$; 在通风柜工作时, 最大排风量为 $1500\text{m}^3/\text{h} \times 2$, 此时房间压力会迅速下降而偏离设定值, 房间回风管上的 VAV 变风量阀门会快速反应, 减小回风量, 使房间内的压力维持到设计设定值, 所以系统回风量在 $4500\text{m}^3/\text{h} \sim 2100\text{m}^3/\text{h}$ 范围内变动, 新风量在 $500 \sim 2900\text{m}^3/\text{h}$ 之间变动。由于房间送风量在定风量调节阀作用下是稳定的, 保证了洁净度所需的换气次数能够保持不变, 所以室内的温湿度和洁净度都能控制得比较稳定。如果即满足冷热负荷又满足洁净的负荷净化风量小于 $3000\text{m}^3/\text{h}$, 为了保持房间的压力平衡还是要把送风量放大到 $3000\text{m}^3/\text{h}$ 的。对于这套系统回风管和排风管上变风量调节阀的正确选择以及产品本身的响应时间非常重要, 这会直接影响到房间压差的稳定性和对周围房间的压差影响程度。净化系统采用这种定送变排的控制方式目前是广泛采用的, 尽管成本较高, 但实际运行情况是比较好的, 变风量房间的压差控制是比较稳定的。

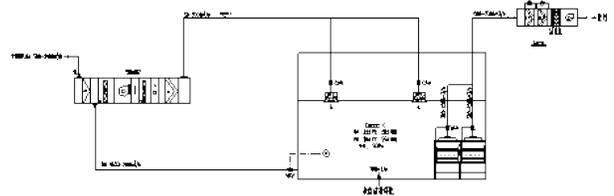


图 6

对于这种变风量系统或者我们称为间歇性运行系统在生物制药生产车间项目里经常会遇到, 但有时一些设计师为了使洁净车间里的风量保持平衡或者说保持车间的换气次数维持不变, 就直接采用双位电动阀在排风和回风之间进行切换的方法来保持数据上的平衡 (见图 7)。也就是当阳性对照房间内的排风柜不工作时, 其排风管上的电动阀处于关闭状态, 而房间排风管上的电动阀完全打开; 当排风柜工作时, 其排风管上的电动阀同步与排风柜一起打开, 同时房间排风管上的电动阀则联动关闭。这种控制方式也能保证系统的风量平衡和系统的正常工作, 但由于电动阀反应时间较慢、切换时间较长, 风量变化会延迟, 压力从变化到稳定需要一段时间, 从而在房间排风变化或间歇运行的过程中, 房间的压差平衡会延迟, 同时引起周边房间的压差瞬间打

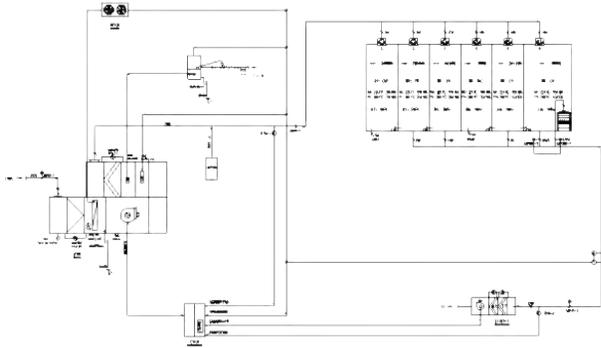


图 7

乱，对系统运行产生不利的影响。因此我们不主张采用电动阀的切换方式来满足房间的风量平衡，特别是有洁净度要求的净化房间。

5 变风量房间非净化系统的设计

以上是针对洁净区变风量生产车间空调系统典型做法的举例分析。下面再总结分析一下普通区变风量医药生物实验室的三种做法。

图 8 是一种最常见的变风量医药生物车间项目的空调送排风系统（图中只列出一个房间来说明）。室内冷热负荷（建筑、人员、灯光、设备等）由多联式空调机或风机盘管来承担，新风空气处理机组 (MAU) 自身承担新风负荷，新风量的大小满足房间风量动态平衡要求以及人员卫生要求（主要用来补充通风柜的排风量）。如两台通风柜的排风变化为 3000~600m³/h，房间考虑一定的负压，新风量应该在 500~2900m³/h 之间。这种设计方案比较常见，新风送风末端采用带压差传感装置的变风量控制器，直接满足室内的排风变化引起的压力变化。即当通风柜的排风量变化，引起室内压力的变化，变风量传感器接受信号并通过计算比较迅速作出阀门开大或关小的动作，由于房间负荷主要是由分体多联机机组或风机盘管来承担的，因此室内温湿度（主要是温度）控制波动不会很大，基本上能够保持稳定的，这种系统通常被称为变送变排系统。

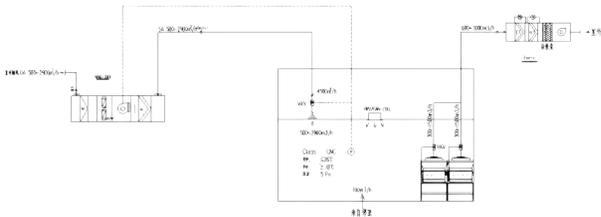


图 8

图 9 系统相对比较简单，也是一种变送变排的形式。系统负荷（建筑、人员、灯光、设备、新风）全部由空气处理机组 AHU 来承担，房间排风量

变化所引起的压差变化是通过送风变风量阀门的变化来保持稳定的，所以对于净化系统和温湿度有一定要求的普通系统不宜采用。从图 9 的系统原理图上看，系统计算的负荷风量为 2000m³/h（满足夏季 ≤26℃、冬季 ≥18℃），两台通风柜全开时的排风量为 3000m³/h，渗透负压风量考虑 100m³/h，这样为维持房间基本要求的负荷风量以及满足房间最大排风量就需要送 2900m³/h 的风量，所以在通风柜全部运行排风达到 3000m³/h 时，回风量为 0，系统相当于全新风运行；在通风柜进入最小排风量运行时，送风量由变风量控制阀 VAV 调节到满足房间温湿度要求的负荷风量 2000m³/h，此时回风量通过变频风机调速应该以 1500m³/h 风量运行，此时新风量降至 500m³/h，这样无论通风柜以全排运行也好还是以低速档运行也好，房间的压差都能维持在设计要求范围内。

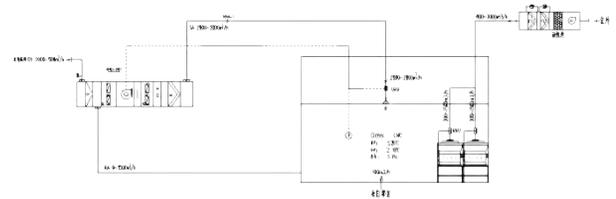


图 9

有时我们会碰到通风柜实验的气体有毒有害的危害程度比较大，或者定性为甲、乙类生物实验车间，这种情况按规定房间内不能采用循环空气，应采用全送全排的直流系统，可以采用如图 10 所示的旁通方式来保持房间内的压差稳定。如当计算送风量 5000m³/h 时，在通风柜最大与最小工况运行时，通过压差传感器调节通风柜排风旁通管上的 VAV 变风量调节阀，使旁通风量在 2100~4500m³/h 之间，而总排风量始终为 5100m³/h 保持不变。如果不是甲乙类房间或实验的气体危害性很小的情况下，尽管这种系统室内的温湿度控制比图九的变送变排系统要稳定，波动小，但不建议采用这种方式，主要是这种方式运行不节能。

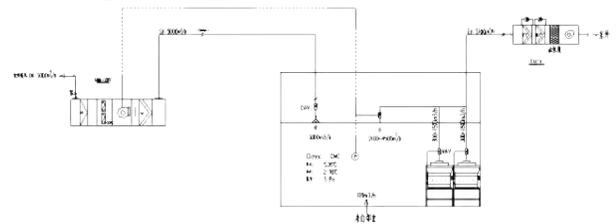


图 10

6 变风量房间综合排风系统的组成

以上分析的是单一生物安全柜或变风量通风柜排风的房间空调系统，有时医药生物实验项目通常房间内还有其它一些设备局部排风点，万向排气罩

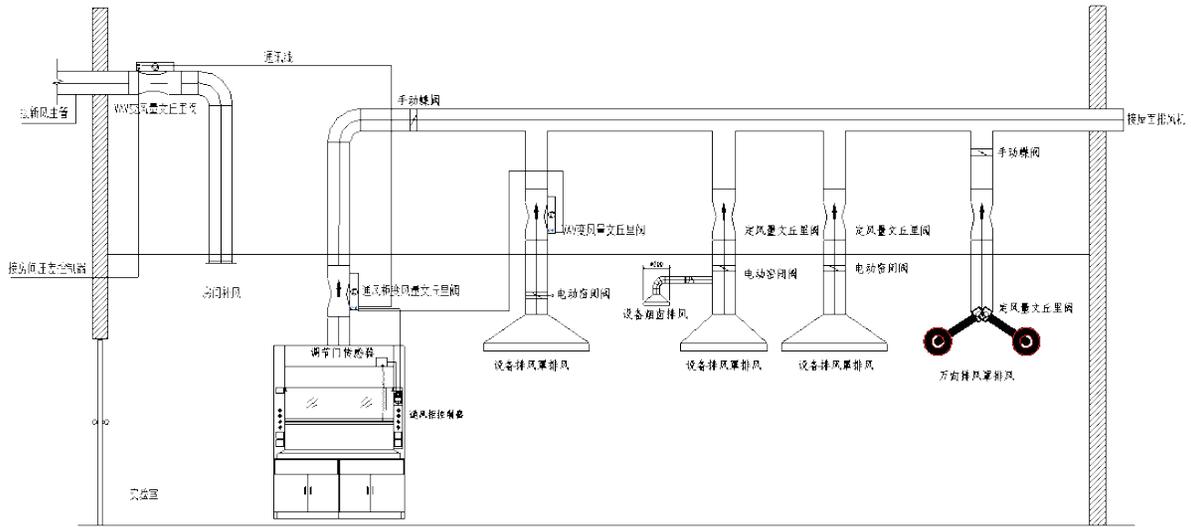


图 11

就是经常采用的局部排风设施。所以我们经常会看到房间内将变风量实验通风柜与其它排风点连接在同一个排风系统上，这样可以简化排风系统，节省空间，降低投资。图 11 表达的就是变风量通风柜排风与其它局部设备排风点以及万向排气罩排风组成的一个系统。图中每个 VAV 变风量阀自带控制器，各阀之间采用通讯传递风量信号，实时监测房间静压，依据房间认定的静压值调节新风补充量，使房间保持一定的压差（通常为相对负压即气流从室外流向室内），并维持房间一定的换气次数。比如：当通风柜排风量最小时，且全部设备排风阀均关闭时，此时的送风将小于房间最小换气次数要求的送风量，为保证房间换气次数，需设置一个设备排风罩变风量阀。排风罩变风量排风阀的变化与通风柜排风阀的变化相反，即通风柜排风阀开到最小时，此排风罩变风量排风阀开到最大；通风柜排风阀开到最大时，排风罩变风量排风阀开到最小值。顺便提一下，实验室房间控制器（配液晶触摸控制屏）可以针对设备排风罩变风量阀采用时间控制，通常分白天模式和夜间模式。此变风量阀白天（如 9:00-18:00）按上述提到的风量控制原理工作，夜间到第二天早上（18:00-9:00）关闭。但注意夜间模式设备排风电动阀全部关闭了，而排风机自动调至低频工作，只保持通风柜最小排风量运行，此时新风阀可处于关闭状态。

7 结语

综合上面的叙述，我们对医药生物实验室车间项目的稳定排风和非稳定排风时的空调系统和排风系统方案的合理设计和控制要求，针对设有生物安全柜和智能型变风量通风柜的房间是否有洁净度要求、室内温湿度控制精度的要求、温湿度的控制范围、房间有毒有害气体的程度、房间是否有甲乙类防爆要求、房间设备局部排风点的性质和数量等综合因素，结合采用的是集中式全空气系统、风机盘管系统或多联机分体空调系统还是空气处理机组+全新风空气处理机组（AHU+MAU）的系统形式来合理进行医药生物实验室工程项目的设计工作，并通过实验室车间的工艺性质和要求，优化系统形式，合理布置系统，使系统对节能有利，对压差控制的稳定性有利，对房间的温湿度控制有利，对实际运行和操作管理以及降低投资有利。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部 .GB 50346-2011 生物安全实验室建筑设计技术规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012
- [2] 全国暖通空调及净化设备标准化技术委员会 .JG/T222-2007 实验室变风量排风柜 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2017
- [3] 变风量通风柜 BS EN 14175-6-2006.

深圳市某大型实验动物设施空调系统设计

曲大钊

(上海开纯洁净室技术工程有限公司, 上海 200235)

[摘要] 以深圳市某大型实验动物设施为例, 阐述了实验动物房空调系统的设计, 主要描述了该设施的暖通设计参数、空调系统的划分、气流组织的设计、全时保障的设计理念、环保节能的措施等内容, 为今后类似的大型实验动物设施的空调系统设计提供一些参考和思路。

[关键词] 大型实验动物设施; 全时保障; IVC 系统; 净化空调系统; 节能环保

0 引言

进入新世纪以来, 随着人们对健康及医疗质量的更高追求, 生物医学、制药等行业获得了飞速发展。特别是近两年新冠疫情的爆发与不断流行, 疫苗、医药产业的规模也进入了快速扩张阶段。作为生物医药行业研发的基础, 实验动物设施近年来也迎来了爆发式的增长。符合全时保障理念的净化空调系统作为实验动物设施能够稳定运行的核心保障, 也日益受到更为广泛的关注和更加严格的规范及要求。本文通过深圳市某大型实验动物设施的设计内容的介绍, 对该类型的实验动物房及其辅房的空调系统设计进行简单的描述。

1 工程概况

该实验动物设施位于深圳市光明新区, 地下两层, 地上十四层(无第四层编号)。其中地下二层为停车库、机房等设备用房; 地下一层为动物设施的清洗、仓储及核磁实验区; 一层功能为共享大堂、光镜区、神经影像中心; 二层为小动物 P2 区(负压), 各类光镜、流式细胞实验区; 三层, 五层至七层为小动物饲养繁育及实验区; 八层为教学科普实验室、会议室、图书室; 九至十四层为非人灵长类动物繁育及实验区。

该设施总工艺建筑面积达 38726 平方米, 其中地上工艺面积 33105m², 地下工艺面积 5621 平方米, 建筑高度 78m, 为中国乃至全球首屈一指的大型实验动物设施。

2 空调通风系统设计

2.1 空调设计参数的确定

2.1.1 空调室外设计参数, 详见表 1;

表 1 空调室外设计参数^[3]

夏季		冬季	
室外大气压力 (hPa)	1002.4	室外大气压力 (hPa)	1016.6
空气调节室外计算干球温度 (°C)	33.7	空气调节室外计算干球温度 (°C)	6.0
空气调节室外计算湿球温度 (°C)	27.5	空气调节室外计算相对湿度 (%)	72
通风室外计算温度 (°C)	31.2	通风室外计算温度 (°C)	14.9

考虑到深圳夏季高温高湿天气居多, 为保证实验动物设施的正常运行, 本项目空气调节室外计算干球温度取值按极端最高温度平均值 34.4 °C 计, 空气调节室外计算相对湿度按最热月平均室外相对湿度 81% 计, 高于国家规范要求。

2.1.2 动物实验区主要环境指标, 详见表 2;

表 2 动物实验区主要环境指标^[1]

项目	指标					
	小鼠、大鼠、豚鼠、地鼠			犬、猴、猫、兔、小型猪		
	普通环境	屏障环境	隔离环境	普通环境	屏障环境	隔离环境
温度, °C	19-26	20-26	16-26	20-26		
相对湿度, %	40-70					
最小换气次数, 次/h	8	15	--	8	15	--
动物笼具周边气流速度, m/s	≤0.2					
与相通房间最小静压差, Pa	--	10	50	--	10	50
空气洁净度, 级	--	7	--	--	7	--
氨浓度指标, mg/m ³	≤14					
噪声, dB(A)	≤60					
沉降菌最大平均浓度, 个/0.5h, φ90mm 平皿	--	3	无检出	--	3	无检出

2.2 空调系统划分

本动物设施建筑面积庞大, 工艺布局复杂, 使用功能繁多, 除常规的大小动物饲养、隔离、实验区外, 还包含有 P2 实验室、核磁影像区、回旋加速功能区、脑科模拟实验区、光镜及流式细胞实验区等新型高端实验动物功能区。主要功能区域的空调系统详见表 3。

2.3 气流组织型式

(1) 该实验动物设施内大小动物饲养区域普遍采用上送下排的气流组织型式, 其中小动物顶部送风采用高效箱+阻漏式高效送风的型式, 大动物顶部送风采用散流器。考虑到动物排泄物中氨气含量较高, 且氨气较空气密度小, 容易在顶部聚集, 因此动物饲养区域房间顶部设置有顶部排风口, 以便更好的将室内异味排出, 保证动物饲养良好环境;

表 3 空调系统分区

机组编号	负担区域	机组编号	负担区域	机组编号	负担区域
AHU-B1F-1	脑科加工车间(净化区)	PAU-5F-1	灌流室	PAU-10F-2	办公区
AHU-B1F-2	脑科(净化千级房间)	PAU-5F-2	办公及实验区	MAU-11F-1	北部猴房
AHU-B1F-3	电镜区组织样品处理	PAU-5F-3	清洗区及辅房	MAU-11F-2	南部猴房
AHU-B1F-4	电子显微镜综合成像	MAU-6F-1	动物生产试验北区(净化区)	MAU-11F-3	实验室区域
PAU-B1F-1	脑科加工车间	MAU-6F-2	动物生产试验中区(净化区)	PAU-11F-1	清洗区及辅房
PAU-B1F-2	清洗(洗衣)	MAU-6F-3	动物生产试验南区(净化区)	PAU-11F-2	办公区
PAU-B1F-3	垃圾房补风	MAU-6F-4	动物生产试验西区(净化区)	PAU-11F-3	手术部新风预处理
PAU-B1F-4	组织样品处理、辅房、走廊	MAU-6F-5	IVC 笼具送风(净化区)	AHU-11F-1	手术室
PAU-B1F-5	回旋加速区辅助用房	PAU-6F-1	灌流室	AHU-11F-2	手术室洁净走廊及辅房
PAU-B1F-6	细胞培养(净化区)	PAU-6F-2	办公及实验区	MAU-12F-1	大动物生产北侧
PAU-B1F-7	回旋加速器房间	PAU-6F-3	清洗区及辅房	MAU-12F-2	大动物实验
PAU-B1F-8	热室区域(净化区)	MAU-7F-1	1区无菌动物实验区(净化区)	MAU-12F-3	大动物生产南侧
PAU-1F-1	办公及辅房区	MAU-7F-2	2区无菌动物生产区(净化区)	PAU-12F-1	清洗区及辅房
PAU-1F-2	核磁区域	MAU-7F-3	3区转基因实验室(净化区)	PAU-12F-2	办公区
MAU-2F-1	ABSL-2 区域(净化区)	MAU-7F-4	4-1 制备区(净化区)	MAU-13F-1	大动物生产南侧
AHU-2F-1	EEG 电生理实验区	MAU-7F-5	4-2 繁殖区(净化区)	MAU-13F-2	大动物生产北侧
AHU-2F-2	流式细胞实验区	MAU-7F-6	IVC 笼具(净化区)	PAU-13F-1	清洗区及辅房
PAU-2F-1	辅房办公区	PAU-7F-1	清洗区及辅房	PAU-13F-2	办公区
MAU-3F-1	1区隔离器区(净化区)	AHU-8F-1	成像区(净化区)	PAU-13F-3	手术部新风预处理
MAU-3F-2	2区生物净化(净化区)	AHU-8F-2	研发工作室(净化区)	AHU-13F-1	洁净走廊及实验室、辅房
MAU-3F-3	大鼠饲养试验东区(净化区)	MAU-9F-1	犬区及检疫区	AHU-13F-2	千级培养间
MAU-3F-4	大鼠饲养试验西区(净化区)	MAU-9F-2	猴区动物实验室	AHU-13F-3	手术室 OR1~OR2
MAU-3F-5	动物暂养区(净化区)	PAU-9F-1	清洗区及辅房	AHU-13F-4	手术室 OR3~OR4
MAU-3F-6	IVC(净化区)	PAU-9F-2	手术部新风预处理	MAU-14F-1	大动物散养北侧
PAU-3F-1	灌流室	AHU-9F-1	手术部洁净走廊及辅房	MAU-14F-2	大动物生产
PAU-3F-2	清洗区及辅房	AHU-9F-2	手术室	MAU-14F-3	大动物散养南侧
MAU-5F-1	动物生产试验北区(净化区)	AHU-9F-3	I级手术室	PAU-14F-1	微生物检测(净化区)
MAU-5F-2	动物生产试验中区(净化区)	MAU-10F-1	北部猴房	PAU-14F-2	清洗区及辅房
MAU-5F-3	动物生产试验南区(净化区)	MAU-10F-2	南部猴房	PAU-14F-3	办公区
MAU-5F-4	动物生产试验西区(净化区)	MAU-10F-3	实验室区域	—	—
MAU-5F-5	IVC 笼具送风(净化区)	PAU-10F-1	清洗区及辅房	—	—

(2) 二层的 ABSL-2 动物实验区采用负压空调系统, 顶排风口、底部排风口均采用带有高效过滤器的风口型式, 室内的送排风口均需室内消毒后更换, 以保证该区域的有毒有害气体不发生泄漏;

(3) 小动物 IVC 饲养送风型式, 目前主要有两种, 有主机 IVC 系统的送风方式 A 和无主机 IVC 系统的送风方式 B。

经研究表明, 送风方式 A 适用于较小规模的设施, 适用于对笼盒参数需要分散、灵活调控的项目,

送风方式 B 适用于中大型的设施^[4]。本项目小动物饲养主要采用了送风方式 B 的 IVC 集中空调系统, 该送风方式除了非工作时段可大幅降低空调通风机能耗, 带来可观的经济效益外, 还具有多重冗余备份且交叉污染的风险更低, 具有更高的安全性。

3 项目特点

作为中国乃至全球首屈一指的大型动物设施, 本项目的空调系统设计也加入了更多创新、实用、环保节能的元素, 力争本项目成为国内有代表性的

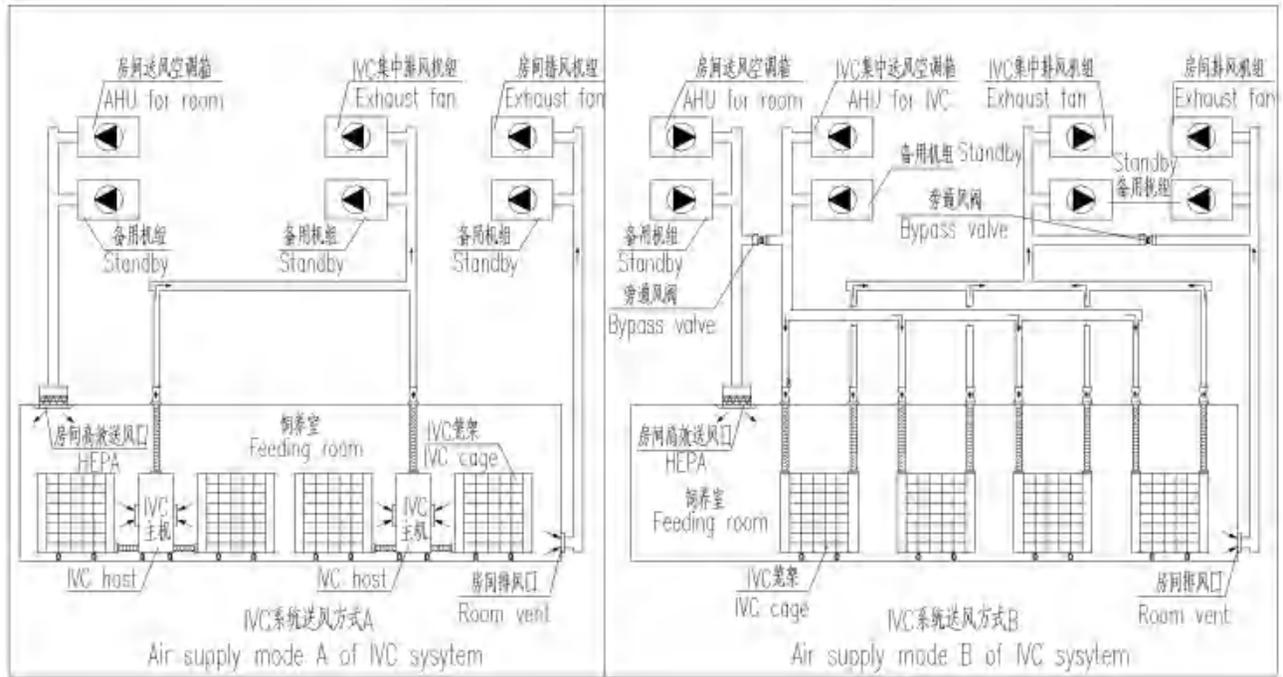


图1 两种不同IVC系统送风方式示意图

高端动物设施，为今后同类设施的空调系统设计作出有价值的参考。

3.1 实验动物设施全时保障系统设计

3.1.1 全时保障系统理念及依据

《实验动物设施建筑技术规范》GB 50447-2008^[2]中要求，屏障环境设施和隔离环境设施的动物生产区（动物实验区），应设置备用的送风机和排风机；屏障环境设施的动物生产区（动物实验区）的用电负荷不宜低于2级。当供电负荷达不到要求时，宜设置备用电源；屏障环境设施动物生产区（动物实验区）的送、排风机应设正常运转的指示，风机发生故障时应能报警，相应的备用风机应能自动或手动投入运行。

3.1.2 全时保障系统的技术支持

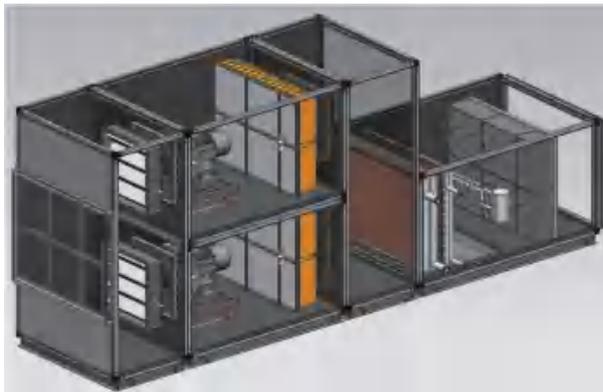


图2 双通道不间断空调送风机组

大动物饲养间、小动物饲养间均采用双通道空调机组、排风机组进行通风。风机和过滤器均为一用一备的形式，发生故障机组过滤器定期更换时机组无需停机，系统及房间环境的参数不受影响；机组过滤器定期更换时机组无需停机，系统或检修时备用风机不间断、自动即时切入；IVC的集中送风空调机组采用整机全功能段完全备用的设计，最大程度地确保屏障环境的安全性。

除了双通道不间断送排风机组的运用外，全时保障系统还包含完全备用的IVC送排风机组、不间断高效过滤器的更换系统、维修马道系统、强弱电的高级别架构系统、柴油发电机系统、自控保障系统、建筑信息可视化三维监控系统等内容，为实现实验动物设施的“全时保障”保驾护航。

3.2 环保设施的运用

3.2.1 废气排放情况

项目需经废气处理设备处理的排风系统共有57套，由于排放口数量较多，把排放废气类型相同、相近、且不会发生化学反应的排放口合并在一起集中处理，57套排风系统合并后对应23台废气处理设备和23个排放口。

3.2.2 废气处理设备工艺选择

动物房常用的废气处理工艺及各自的技术原理、优势等见表4：

综合比较以上废气处理工艺方案，并根据以往同类设计项目及实际运行项目的反馈，本项目选择

表 4 废气处理工艺比较

处理工艺	一体抗流喷淋除臭设备	活性炭吸附设备	喷淋吸收设备	UV 光解或光催化设备	微生物除臭设备
技术原理	活性氧预处理的纳米半导体光催化+气液扰流净化	多孔材料吸附	溶解吸收或酸碱中和反应	强紫外线照射分解(或辅以TiO ₂ 光催化剂)	微生物分解
优势	针对实验室/实验动物设施尾气设计, 效率平衡	处理范围广, 运行稳定, 可靠稳定	对含硫、酸碱废气效率高, 稳定可靠	对 VOCs、微生物效率高, 设备结构简单	能耗最低, 安全稳定
能源及耗材	电、水	电、活性炭滤材	电、水、酸碱溶液	电	电、水、菌种及营养液
设备风阻	低	高	中等	低	中等
电力消耗	低	中等(克服风阻需增配风机)	高	高	最低
二次排放	无中间产物、废水达标	吸附了 VOCs 的废活性炭属危废(HW49)	酸碱废液需进行废水处理后排	产生高浓度臭氧	微生物发酵产生异味

了一体抗流喷淋除臭工艺方案。为满足环评要求, 在纳米半导体光催化与气液扰流之间增设了低风阻活性炭过滤器。废气处理工艺流程及主要技术介绍见图 3:

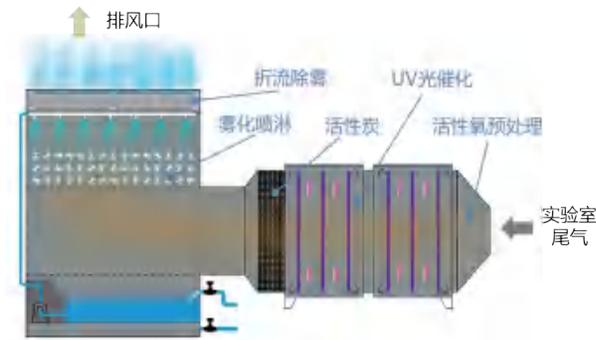


图 3 一体抗流喷淋除臭废气处理工艺流程

3.3 空调节能设施介绍

动物设施中的暖通空调系统是实验动物设施运行能耗的最大用户, 因此在保障实验动物环境控制的基本前提下, 在空调系统的设计阶段考虑一定的节能措施就非常有必要。

3.3.1 常见的能量回收系统

常见的空气侧热回收措施有热管热回收、乙二醇热回收和分布式空气能量热回收系统等。前两种热回收方式在以前的少量设施中也有应用 [5]。分布式空气能量热回收系统则是一种新型的, 相对智能化、集成化的热回收系统。本项目能耗最大的 3 ~ 7 层小动物实验设施空调系统就采用了分布式空气能量热回收系统。

3.3.2 分布式空气能量热回收系统的原理及表现

分布式热回收系统的优点是能够利用全年温度

恒定的室内排风热量来作为空调的再热能源同时回收再热消耗的冷量来预冷新风, 可提供稳定的温湿度控制, 热回收效率不受室外气温的影响。该系统的热回收过程是完全依托在工业级智能化控制器的运算下实施的, 其控制指令是基于对项目所在地全年 8760 小时的历年气象参数进行计算而得出的。同时, 系统利用人工智能可实现实时的自我策略优化与自学习, 真正地有效保障全年的综合热回收效率。凭借强大的控制系统, 分布式空气能量热回收系统成为了一种主动式的热回收系统, 可实现多机组之间任意组合的最优化热回收。

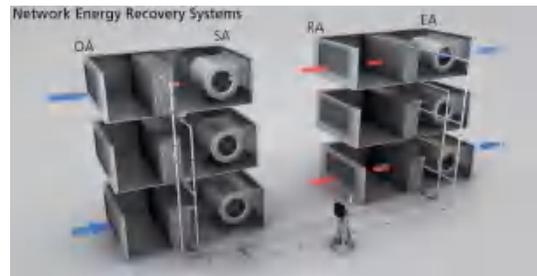


图 4 分布式空气能量热回收系统原理

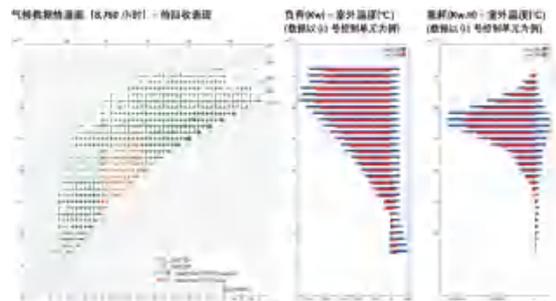


图 5 分布式空气能量热回收系统计算及表现

4 总结

作为中国乃至全球首屈一指的大型动物设施, 本项目的空调系统设计融入了创新的全时保障的设计理念, 实用的废气处理环保设施以及先进的分布式热回收节能措施, 力争本项目成为国内有代表性的高端实验动物设施, 为今后同类项目的空调系统设计作出有价值的参考。

参考文献

- [1] 全国实验动物标准化技术委员会, GB 14295-2010 实验动物 环境及设施 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011
- [2] 住房和城乡建设部, GB 50447-2008 实验动物设施建筑技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- [3] 住房和城乡建设部, GB 50736-2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
- [4] 季金星. 独立通风笼具两种送风方式的解析 [J]. 《中国比较医学》, 2019 年 29 卷 (1) 95-100.
- [5] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 (第二版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

非人灵长类生物安全三级实验室 主要通风设备设计探讨

王燕芹

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

[摘要] 新型冠状病毒疫情爆发以来, 国内的非人灵长类生物安全三级实验室大量建设。该类实验室中依据实验特点, 设置了负压猴笼、II-B2型生物安全柜、负压解剖台等, 该种设备均需依据设备自身的通风要求、结合生物安全三级实验室的特点, 进行设计和计算, 以保证同时满足设备和实验室的各项要求。文章对三种通风设备的设计进行分析, 并且对多台通风设备且通风状态发生变化时进行理论分析。当房间设置通风设备时均需考虑排风量、运行状态的情况, 并且考虑房间送风量是否补充增加由于通风设备排风导致的风量。文章同时提出对该种设计的节能考虑。

[关键词] 非人灵长类生物安全实验室; 排风; 负压猴笼; B2生物安全柜; 负压解剖台

0 引言

2019年底新冠疫情的爆发, 给全球带来了极大的冲击, 生物安全逐渐被民众所认知。我国更是体现了大国的风采, 全国疾控中心、医院、疫苗系统均通过各种方向的努力, 建设生物安全实验室及高生物安全风险生产车间。为应对新冠疫情的实验, 针对开展空气传播疾病的治疗药物以及疫苗评价需要, 非人灵长类的生物安全三级实验室在国内的建设也逐渐增多。

1 非人灵长类生物安全实验室简介

生物安全实验室是通过防护屏障和管理措施, 达到生物安全要求的微生物实验室和动物实验室。包括主实验室及辅助用房^[1]。目前国内涉及生物安全实验室的国家规范或标准为《生物安全实验室建筑技术规范》(GB50346-2011)(以下简称“规范”)和《生物安全实验室通用要求》(GB19489-2008)(以下简称“要求”)。生物安全实验室根据生物危害程度和操作对象的危害成度可分为一级、二级、三级和四级, 其中四级生物安全实验室等级最高, 在我国乃至世界范围内数量有限。从国内现有实验室的分布和使用情况来看, 三级生物安全实验室等级高、应用也较为普遍。

非人灵长类动物(non-human primates, NHP)在生理、认知能力、神经解剖学、社会复杂性、繁殖和生育等方面与人类具有高度相似性。与人类的遗传物质有75%~98.5%的同源性^[3]。非人灵长类生物安全实验室是用来饲养非人灵长类动物或利用非人灵长类动物的开展实验的生物安全实验室。为应对新冠疫情的爆发, 我国的非人灵长类生物安全实验室的建设大大增加。按照生物安全实验室的分级, 该种生物安全实验室为三级生物安全实验室。本文

以非人灵长类生物安全三级实验室为基础进行探讨。

2 重要通风设备设计

非人灵长类 ABSL-3 实验室中, 由于需要提供非人灵长类动物的饲养及观察空间, 因此多设置负压猴笼, 对于实验室中的人和动物均可达到更高的卫生级别; 而实验过程中, 对于猴子的一些微型实验, 在生物安全柜中操作, 可以更好的保证实验室人员的安全; 非人灵长类 ABSL-3 实验室中动物需要解剖时, 由于非人灵长类动物的聪明、好动等的特性, 需设置专门的解剖台对其进行解剖。因而非人灵长类 ABSL-3 实验室中, 负压猴笼、生物安全柜及负压解剖台为常见的通风设备, 无论是对实验操作角度或者对实验人员的安全保护角度考虑都尤其重要。

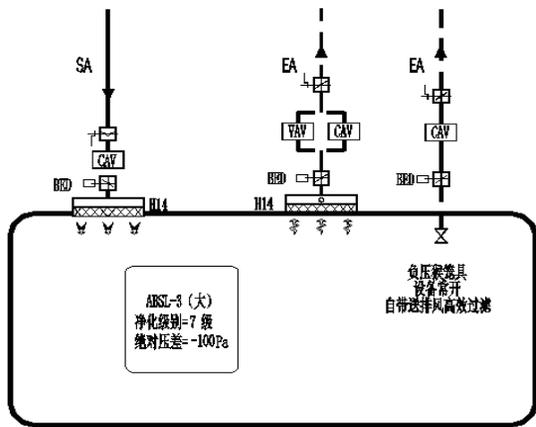
2.1 负压猴笼

非人灵长类动物的负压饲养猴笼现在国内有几家产品, 产品材质、外观等性能存在差异, 但是各家的负压饲养猴笼均无法实现完全密闭。

以某产品为例, 该负压猴笼的排风量因猴笼的个数来确定, 个数越多则排风量越大, 以保证猴笼中动物的呼吸以及猴笼形成负压。该产品自身设置送风机及排风机, 且设备本身设置高效送风口和高效排风口, 设备通过送风机动力抽取房间的空气送入负压猴笼内, 设备通过排风机动力将负压猴笼内经过污染的空气排出。但是设备本身排风机压头有限, 仅可克服设备自身的高效的阻力。按照规范要求“三级和司机生物安全实验室防护区室外排风口应设置主导风的下风向, 与新风口的直线距离应大于12m, 并应高于所在建筑物屋面以上”。为克服排风口通向屋面的阻力, 部分生物安全实验室依据生物安全风险评估设置两道高效过滤后屋面高空排放时, 则设备本身的排风机无法克服该阻力从

而满足规范要求。

为满足规范中对于三级生物安全实验室的排风口位置、房间净化级别、房间压力及房间自动控制的要求，设计计算时设计人员根据业主确定的猴笼个数，确定猴笼的排风量、排风管匹配等参数，结合房间由换气次数计算得到的送风量，通常情况下，房间送风量大于猴笼的所需的排风量，考虑房间采用定送风量、变排风量的空调系统形式时（定送变排的形式已在文献[2]中予以阐述，此处不再赘述），为保证系统的稳定性，将负压猴笼设备的排风设置为定排风且设备处于常开的状态，房间排风设置为变排风的形式（见图1），以满足规范中对于生物安全三级实验室的各项要求。



SA: 送风管路; EA: 排风管路; H14: 高效过滤器(级别H14); CAV: 定风量阀; VAV: 变风量阀; BED: 生物安全型电动密闭阀; MED: 生物安全型电动调节阀
图1 设有负压猴笼的生物安全实验室通风原理示意

2.2 IIB2 生物安全柜

II级生物安全柜又分为A1型、A2型、B1型和B2型^[4]。目前我国实验室常用为II A2型（以下简称A2生物安全柜）和II B2型（以下简称B2生物安全柜），两种生物安全柜在通风方式上存在差异。使用者应依据实验室的生物危害分级和所从事的操作类型综合考虑，选取合适类型的生物安全柜^[5]。

当选用B2生物安全柜时，由于B2生物安全柜的特性决定，该设备排风量为单台1800m³/h，为保证生物安全柜开启或关闭的状态不对实验室的压力造成影响，房间设置与生物安全柜相同风量的排风口。生物安全柜开启时，生物安全柜对应的排风开启、房间排风口关闭；生物安全柜关闭时，生物安全柜对应的排风关闭、房间排风口开启，保证房间的排风稳定。由于无论生物安全柜开启或者关闭的状态，房间需一直排放生物安全柜所需的排风量，因此对

应的房间送风量应保证换气次数和压力要求的前提下，同时应补充生物安全柜或其对应排风口的排风量。见图2。

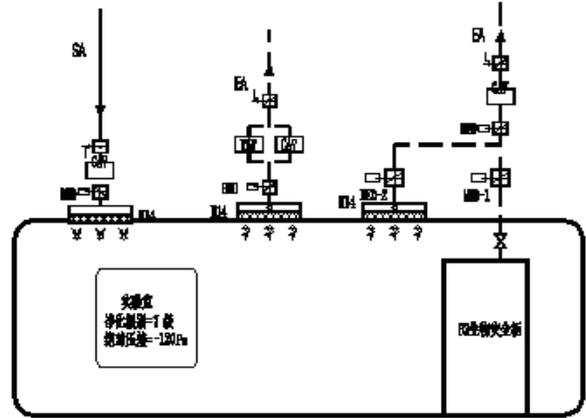


图2 设有B2生物安全柜的生物安全实验室通风原理示意

2.3 负压解剖台

负压解剖台是非人灵长类生物安全实验室中常用的设备之一。不同厂家的负压解剖台的通风参数要求不尽相同。有些解剖台仅为一个操作台面，无通风要求。部分解剖台产品则需设置排风，以迅速的将解剖动物的气味迅速的排出室外。

以某解剖台为例，该解剖台要求设置1000m³/h的排风，解剖台下方与地面连接处设置排气口且自身无高效过滤器及排风机；解剖台从房间抽风，与前所述负压猴笼及B2生物安全柜类似。由于解剖台设备自身的特殊性，解剖台的排气通道处于一直开启的状态，排风通过外置排风机实现。对于该种类型的解剖台的排风，工程设计时应为该设备设置高效过滤器、排风机等；为保证房间的压力和自动控制满足规范要求，考虑将该解剖台的排风设置为固定排风量（见图3）；房间送风量则除了考虑换气次数等要求外，需结合实际情况，考虑房间送风量增加该部分送风量，以保证房间的各项参数满足要求。

该排风机可单独设计也可以与空调大系统的排风机合并使用。当房间通风设备较少且通风状态固定时，考虑采用空调大系统的排风机实现对负压解剖台的通风。

3 设计分析

上节介绍的非人灵长类生物安全实验室中使用的负压饲养猴笼、B2生物安全柜及负压解剖台三种通风设备的通风设计方案，据笔者经验，以上三种通风设备均在某一项目中得以使用。该项目已经施工完成并通过了三级生物安全实验室的综合性能检测验收，且通过CNAS评审，已投入正常使用。实

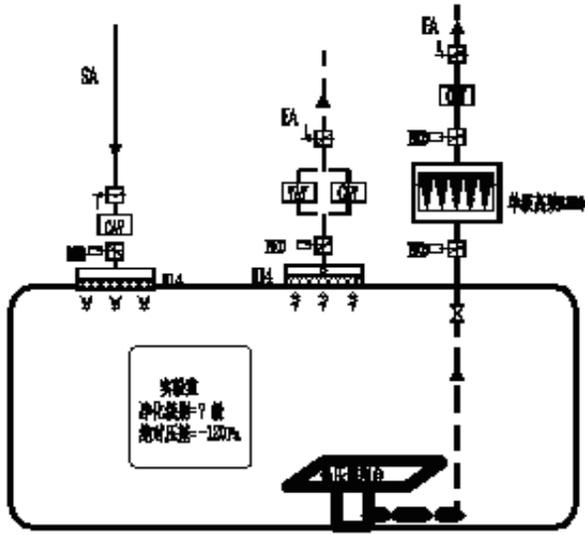


图3 设有负压解剖台的生物安全实验室通风原理示意

实践证明，以上所述通风设备的通风原理能够满足规范要求。

但值得考虑的是，现阶段非人灵长类生物安全实验室中用于饲养的负压猴笼为保证操作便利，大多未采用完全密闭的手套箱隔离器方式，因此对于实验室的围护结构的密闭性提出更高的要求，进而房间内较小的风量变化，均会对房间的压力产生较大的影响。当房间出现通风设备时，从通风和房间压力的角度考虑，设计一般需考虑通风设备的种类单一或者多种、通风量稳定或者变化、通风量相比房间送风量的大小以及结合空调系统的变风量形式，综合进行设计考虑，避免房间压力发生逆转或者造成能耗的浪费；同时应考虑设备自身所设置的高效过滤器、排风机等的特殊性，协调考虑空调系统的设备阻力情况，保证房间系统的平衡性。

当房间通风设备单一且通风量稳定不变时，例如负压猴笼及负压解剖台，需考虑设备通风量与房间送风量的关系。经过计算换气次数及房间负荷而确定的房间送风量大于通风设备排风量时，通风设备考虑定排风，房间剩余排风则考虑为变排风；反之，房间送风量应能补充增加设备通风量，通风设备考虑定排风，房间剩余排风则考虑为变排风。

当房间通风设备单一且通风量发生变化时房间通风量的设计计算则较为负责，例如2.2节B2生物安全柜，需考虑不同工作状态切换及不同工作状态下的房间参数要求。同样应考虑房间送风量与设备通风量的大小，考虑是否补充增加设备通风量。

当房间通风设备多种且通风量发生变化时，设计房间的通风系统时应详细了解各通风设备的详细要求、运行情况等，充分考虑通风量的多变，综合

考虑各种通风设备的运行情况，确保采取相应措施保证房间各项参数满足规范要求。

在满足各项要求的前提下，三级生物安全实验室为全新风直流系统，一定程度上来说，通风设备越多则能耗越大，设计时还应从节能的角度进行考虑。

4 结论

针对非人灵长类生物安全实验室中三种常见的通风设备的通风原理及分析得出以下结论：

1) 设置有通风要求的负压饲养猴笼时，考虑将猴笼的通风设置为常开状态，房间送风量则需考虑是否需要补充该通风设备的排风量。

2) B2生物安全柜为通风状态发生变化的通风设备，需要考虑不同通风状态切换运行时的通风情况。可在房间设置相同通风量的对应排风口与生物安全柜进行切换，保证房间的排风量不会因为生物安全柜的运行状态发生变化，而对房间产生较大的影响。房间送风量根据计算的情况考虑是否补充增加生物安全柜的排风量。

3) 设置有通风要求的负压解剖台时，解剖台的排风机、高效过滤器等均需依靠工程设计时予以设计，将解剖台的排风机与大系统的排风机合并使用，确保该设备通风量处于稳定状态；房间送风量根据计算的情况考虑是否补充增加负压解剖台的排风量。

4) 生物安全实验室的围护结构密闭性要求较高，房间通风设备单一或多台、通风量稳定或变化时，应综合考虑各种设备的排风量及运行情况，确保房间各项参数均能满足规范要求。同时应从节能的角度予以充分考虑。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 .GB 50346-2011 生物安全实验室建筑技术规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[2] 王燕芹，梁磊，陈清莹等 . 高级别生物安全实验室空调系统设计要点探讨 [J]. 中国医院建筑与装备，2020,21:35-37

[3] 黄涛，张海涛，李志雄等 . 非人灵长类动物在病毒感染模型中的研究进展 [J]. 中国实验动物学报，2021, 年4月第29卷第2期，248-255

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部 . JG170-2005 生物安全柜 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.

[5] 王燕芹，梁磊，孟令坤等 . 生物洁净实验室中的生物安全柜空调系统设计 [J]. 暖通空调，2019 年底49卷第2期，82-86

我国高等级生物安全设施中排风高效过滤装置的使用情况及 ISO/PWI 5371 编制背景

张 惠

(建科环能科技有限公司, 北京 100013)

[摘要] 本文对排风高效过滤装置结构、检测项目进行了简单介绍。根据 2016 年至 2020 年我国高等级生物安全实验室现场检测以及由生产单位委托进行的排风高效过滤装置检测数据统计结果, 分析了其在我国的使用情况。

[关键词] 排风高效过滤装置; 气密性; 扫描检漏

0 引言

排风高效过滤装置指用于特定生物风险环境, 以去除排风中有害气溶胶为目的的过滤装置, 装置具备原味消毒及检漏功能。在高级别生物安全实验室中, 主要依靠隔离屏障设施来实现实验操作以及动物饲养过程不会产生治病微生物外泄风险, 进而确保实验操作人员和周边环境的安全性, 排风高效过滤装置是最为关键的一部分^[1]。2016 年, 中国发布了国家行业标准 JG/T 497-2016《排风高效过滤装置》, 标准规定了排风高效过滤装置的术语和定义, 分类与标记, 材料, 要求, 试验方法, 检验规则, 标志、包装、运输与储存。

1 排风高效过滤装置简介

1.1 排风高效过滤装置分类

排风高效过滤装置按安装方式可分为风口型和管道型排风高效过滤装置。风口型排风高效过滤装置安装于实验室维护结构, 在实验室现场检测时, 一般不对其气密性能进行单独检测, 而是视其为实验室维护结构的一部分, 满足整体性密封要求即可。风口型排风高效过滤装置通常配备下游采样口、扫描检漏机构驱动装置(仅扫描检漏型装置配备), 消毒口、排风高效过滤器、过滤器阻力监测压力表等, 其外观如图 1 所示。



图 1 风口型排风高效过滤装置外观

管道型排风高效过滤装置(Bag-in and Bag-out, 简称 BIBO)主要安装于实验室防护区外, 通过密闭排风管道与实验室相连, 可进行原味消毒及检漏。该装置一般配备上游发尘孔、下游采样口、扫描检漏机构驱动装置(仅扫描检漏型装置配备), 消毒口、排风高效过滤器、过滤器阻力监测压力表等, 通常设备进风口处设置生物安全性密闭阀, 实验室现场检测时可对其气密性进行检测, 其外观如图 2 所示。



图 2 管道型排风高效过滤装置外观

1.2 检测项目及评价指标

应用于高等级生物安全实验室中的排风高效过滤装置现场验证指标、检测方法以及相应风险控制需求见表 1 所示。其中扫描检漏范围为工程现场安装就位前, 即未安装过滤器前检测项目。

依据 JG/T 497-2016《排风高效过滤装置》的要求, 除表 1 中的检测项目外, 排风高效过滤装置型式检验还需对表 2 中的项目进行测试。

2 排风高效过滤装置运行现状调研

2.1 数据来源

本次用于支撑调研结果的数据, 主要通过 2016~2020 年度生物安全实验室现场检测以及设备检测获得。统计年份内有效数据结果共计 5263 台, 其中, 2016 年度累计测试 614 台; 2017 年度累计测

表1 应用于高等级生物安全实验室中的排风高效过滤装置现场验证技术

检测项目	检测方法	合格评价指标	数据来源	风险控制考虑
箱体气密性 (适用于安装于防护区外的排风高效过滤装置)	变压法(压力衰减法)	分钟泄漏率不大于箱体净容积的0.1%	GB 19489 JG/T 497 加拿大国家标准	避免装置内危险气溶胶外泄, 保护周边环境
高效过滤器检漏	光度计或计数器扫描法测试	局部透过率实测值不大于0.01%	GB 50346 GB 50591 RB/T 199 JG/T 497 ISO 14644-3	避免装置内危险气溶胶外泄, 保护周边环境
	光度计或计数器效率法测试	使用光度计测试时, 整体透过率实测值不大于0.01%; 计数器测试时, 置信度为95%的透过率置信上限不得超过0.01%		

表2 排风高效过滤装置型式检验检测项目

测试项目	要求
外观	排风高效过滤装置表面应平整、光滑、无划痕
阻力	排风高效过滤装置应有压力测量装置, 应对安装后的过滤器阻力进行监控, 且应有防止压力测量装置采样管被污染的措施(如在压力测量装置测压管上装设与高效过滤器过滤效率相当的过滤装置等)。
承压能力	管进型排风高效过滤装置应能承受2500Pa的压力至少60min, 承压期间装置应无开裂及永久性变形。承压试验后, 装置密封性应仍能满足要求。
可消毒性	排风高效过滤装置应具备对装置内部进行循环消毒的配套措施。排风高效过滤装置应对装置内各部位进行可靠消毒, 并提供相应的推荐消毒程度及证明文件。
漏点识别有效性	扫描法检漏型排风高效过滤装置应具备有效识别、定位漏点的能力。
上游气溶胶浓度均匀性验证	在高效过滤器上游测试段内, 距过滤器上游断面30cm距离内选择一个断面, 在该断面平均布置9个测点, 所有9个测点的气溶胶浓度测试结果与各测点测试结果算术平均值偏差均小于20%

试473台; 2018年度累计测试738台; 2019年累计测试890台; 2020年累计测试2548台。本次统计数据主要为生物安全实验室现场检测时所测排风高效过滤装置, 共5220台, 由生产单位委托所测排风高效过滤装置共计43台。

本次统计数据中风口型排风高效过滤装置共计3870台, 占统计数据的73.5%, 管道型排风高效过滤装置共计1393台, 占统计数据的26.5%, 如图3所示。

按高效过滤器检漏测试方法可分为扫面法检漏型和效率法检漏型排风高效过滤装置, 本次统计数据中扫描法检漏型排风高效过滤装置共计4838台, 占统计数据的91.99%, 效率法检漏型排风高效过滤装置共计425台, 占统计数据的8.1%, 如图4所示。

2.2 风口型排风高效过滤装置运行情况分析

本次统计数据中风口型排风高效过滤装置共计3870台, 其中高等级生物安全实验室现场检测3854

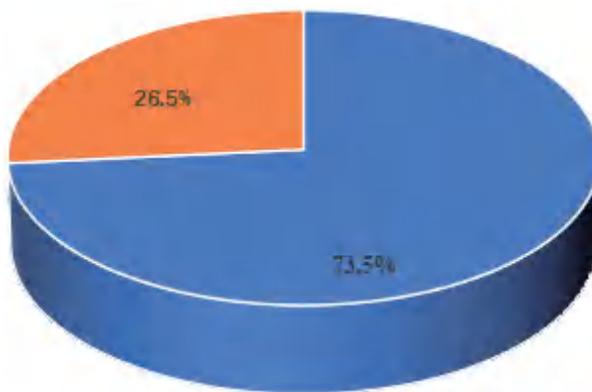


图3 风口型及管道型排风高效过滤装置所占比例

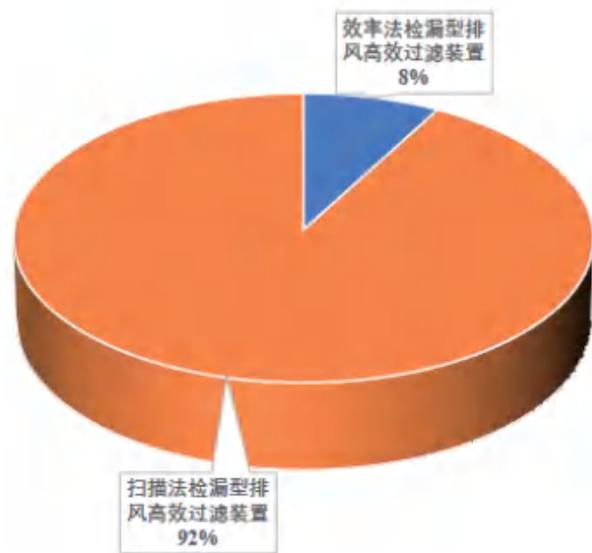


图4 扫描法检漏型及效率法检漏型排风高效过滤装置所占比例

台, 由生产单位委托测试风口型排风高效过滤装置性能16台。

现场检测风口型排风高效过滤装置, 均为安装高效过滤器后的设备, 故仅进行了高效过滤器检漏测试, 其中, 扫描检漏3349台, 效率法检漏521台。扫描法检漏风口型排风高效过滤装置中共130台在检漏过程中出现问题, 常见问题包括密封垫未压紧、滤芯损坏以及边框密封条损坏。仅1台效率法检漏风口型排风高效过滤装置透过率超过0.01%。

由生产单位委托进行的风口型排风高效过滤装置性能测试, 测试项目包括扫描检漏范围、气密性、承压能力、漏点识别有效性, 以上检测项目均合格, 其中气密性除达到JG/T 497-2016《排风高效过滤装置》标准中要求的1000Pa压力下分钟泄漏率不超过0.1%的要求外, 1000Pa压力下均能达到EJ/T1096-1999《密封箱室密封性分级及其检验方法》标准中2级密封箱室小时泄漏率不超过0.25%的要求^[3]。

2.3 管道型排风高效过滤装置运行情况

本次统计数据中管道型排风高效过滤装置共计1393台,其中高等级生物安全实验室现场检测1366台,由生产单位委托测试管道型排风高效过滤装置性能27台。

2.3.1 工程现场检测设备运行情况

工程现场所测管道型排风高效过滤装置共计1366台,其中扫描检漏型1364台,效率法检漏型2台。

(1) 气密性

从调研测试结果来看,所有测试样品均能达到JG/T 497-2016《排风高效过滤装置》标准中要求的1000Pa压力下分钟泄漏率不超过0.1%的要求,其中704台管道型排风高效过滤装置在1000Pa压力下无法满足小时泄漏率不超过0.25%的要求,合格率为50.5%。

(2) 高效过滤器扫描检漏

现场所测管道型排风高效过滤装置中,扫描检漏型排风高效过滤装置1364台,其中95台经扫描检漏发现过滤器安装边框泄漏,经更换密封垫、重新压紧过滤器或更换高效过滤器后,扫描检漏合格,约占7.0%,44台过滤器滤芯泄漏,经更换过滤器后合格,约占3.2%。

2.3.2 由生产单位委托测试管道型排风高效过滤装置性能测试情况

由生产单位委托测试管道型排风高效过滤装置共计27台,均为扫描检漏型排风高效过滤装置。

所有27台设备委托方所委托测试项目均符合JG/T 497-2016《排风高效过滤装置》的要求。

在测试过程中最常遇到的问题是上游均匀性无法满足要求,原因通常为生产厂家未在气溶胶发生段后设置均流装置,或均流装置效果不能满足要求,但经生产厂家整改,所测设备均能满足要求。

2.4 某高等级生物安全实验室2016年、2018年及2019年测试结果对比

分别于2016年、2018年及2019年对我国某高等级生物安全实验室进行了检测,该实验室共配备59台管道型排风高效过滤装置,其检漏方法均为扫描检漏。

对3次测试结果进行了汇总分析,59台设备3次气密性测试均能满足于1000Pa下分钟泄漏率不大于0.1%的要求。但16年有13台BIBO无法满足1000Pa下小时泄漏率不大于0.25%的要求,18年增加至46台,19年有40台。

2016年对59台扫描型排风高效过滤装置进行了检漏测试,其中4台设备首次扫描时发现过滤器滤芯出现破损,经重新更换过滤器后,达到标准无泄漏要求。2018年和2019年复测,59台BIBO均能达到无泄漏要求。

3 结论

在高级别生物安全实验室中,主要依靠隔离屏障设施来实现实验操作以及动物饲养过程不会产生治病微生物外泄风险,进而确保实验操作人员和周边环境的安全性,排风高效过滤装置是最为关键的一部分。

检测发现,有5.1%的排风高效过滤装置在检漏过程中发现泄漏,多为过滤器安装不规范,或过滤器在运输、安装过程中出现破损。如过滤器安装质量不规范、不受控制、不进行现场检测,会对人的感染和环境污染造成潜在的风险。

2016年,中国发布了国家行业标准JG/T 497《排风高效过滤装置》。2016年之后,超过5000台排风高效过滤装置依据该标准进行了测试,几乎涵盖了所有国际、国内供应商的产品。

2019年12月以来,新型冠状病毒肺炎(Corona Virus Disease 2019, COVID-19)逐渐蔓延。2020年3月11日,世卫组织认为当前新冠肺炎疫情可被称为全球大流行,中国约有2000名医护人员被感染。世卫组织2019-nCoV相关实验室生物安全临时指南(2020年2月12日)要求如实验室有回风,必须经过高效空气过滤器过滤;实验室排风需经过高效空气过滤器过滤,且排风出口需远离新风口。

由此,我单位以JG/T 497《排风高效过滤装置》为蓝本,开始ISO/PWI 5371 High efficiency filtration units in exhaust ventilation system of biosafety facilities(《生物安全设施排风高效过滤装置》)编制工作,在保证生物安全的前提下,可以使国内外市场、产品供应商、最终用户和所有人受益。

参考文献

- [1] 曹国庆,张彦国,翟培军等.生物安全实验室关键防护设备性能现场检测与评价[M].北京:中国建筑工业出版社,2018:71.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.JG/T497-2016排风高效过滤装置[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [3] 核工业标准化研究所.密封箱室密封性分级及其检验方法.EJ/T 1096-1999[S].北京:1999

实验动物设施中若干节能措施的应用探讨

侯金明

(上海开纯洁净室技术工程有限公司, 上海 200235)

[摘要] 文章分析了实验动物设施高能耗的原因, 针对实验动物设施的特点, 提出了在工程实践中适合实验动物设施的若干节能措施, 并进行了适用性探讨。

[关键词] 实验动物设施; 高能耗分析; 节能措施

0 引言

近年来, 随着我国生命科学领域的蓬勃发展, 实验动物行业也迎来了其黄金发展期, 在新冠疫情对全国各行业造成巨大冲击的情况下, 实验动物行业仍保持着高速发展的态势。实验动物的饲养种类越来越丰富, 饲养数量越来越多, 实验动物设施总面积及单体面积均越来越大, 独栋式、园区式实验动物设施在全国各地接连涌现。但在实验动物行业高速发展的同时, 实验动物设施由于其特殊性所带来的高能耗问题, 一直对实验动物行业的相关各方提出着挑战。

1 实验动物设施高能耗的原因

相比于其他建筑, 实验动物设施能耗非常之高, 以最具代表性的空调负荷指标为例, 常见民用建筑空调冷负荷指标如表 1 所示:

表 1 常见民用建筑空调冷负荷指标^[1]

建筑类型	冷负荷指标 / (W/m ²)	建筑类型	冷负荷指标 / (W/m ²)
住宅	100~120	健身房	140~200
办公室	100~150	高级病房	80~110
会议室	200~300	CT 诊断室	120~150
商场	250~350	一般手术室	100~150
中餐厅	300~400	洁净手术室	300~500

而实验动物设施中全新风工况的普通环境及屏障环境的空调冷负荷指标如表 2 所示:

表 2 实验动物设施中空调冷负荷指标 (全新风工况)

设施类型	冷负荷指标 / (W/m ²)
普通环境	500~700
屏障环境	800~1100

实验动物设施相比较常见民用建筑, 空调冷负荷指标巨大的原因, 笔者认为有以下几点:

- (1) 环境温湿度参数要求较严格, 尤其是湿度要求;
- (2) 换气次数要求高, 新风量大;
- (3) 设施要求全年不间断运行等;

第(1)条及第(2)条由《实验动物 环境及设施》^[2]规定, 具体可见表 3:

表 3 《实验动物 环境及设施》GB 14925-2010 中对环境参数的要求

项目	小鼠、大鼠		豚鼠、地鼠			犬、猴、猫、兔、小型猪			鸡
	屏障环境	隔离环境	普通环境	屏障环境	隔离环境	普通环境	屏障环境	隔离环境	屏障环境
温度 / °C	20~26		18~29	20~26		16~28	20~26		16~28
相对湿度 / %	40~70								
最小换气次数 / (次/h)	15	20	8	15	20	8	15	20	-
空气洁净度 / 级	7	5 或 7	-	7	5 或 7	-	7	5 或 7	5 或 7

第(3)条由《实验动物设施建筑技术规范》^[3]中要求: 屏障环境设施和隔离环境设施的动物生产区(动物实验区), 应设置备用的送风机和排风机。当风机发生故障时, 系统应能保证实验动物设施所需最小换气次数及温湿度要求。

2 实验动物设施部分节能措施的应用探讨

针对实验动物设施的特殊性, 实验动物设施的节能可从降低换气次数、降低新风量、设置能量热回收、提高系统能效等方面进行考虑。

(1) 降低换气次数及降低新风量

《实验动物 环境及设施》GB 14925-2010 中指明: 为降低能耗, 实验动物设施非工作时间可降低换气次数, 但不低于 10 次/h。

《实验动物设施建筑技术规范》GB 50447-2008 中规定: 使用开放式笼架具的屏障环境设施动物生产区(动物实验区)的送风系统宜采用全新风系统。采用回风系统时, 对可能产生交叉污染的不同区域, 回风经处理后可在本区域内自循环, 但不应与其他实验动物区域的回风混合。使用独立通风笼具的实验动物设施室内可以采用回风。

综合以上要求, 实验动物设施可以有条件的降低换气次数及降低新风量(使用回风), 结合正常运行及值班运行的考虑, 以屏障环境设施为例, 可以进行如表 4 的多工况运行设置:

表 4 多工况运行的换气次数设置

	全新风工况		带回风工况	
	正常模式	值班模式	正常模式	值班模式
新风	18	10	10	5
回风	0	0	8	5
排风	15	7	7	2

相比于全年按全新风工况运行的正常模式，带回风工况的正常模式及值班模式，新风量分别减少 45% 及 72%，节能效果明显。

但带回风工况并不适用于所有实验动物设施，一般在饲养室单间面积较大（大于 50m²）且对动物饲养环境控制要求不是特别严格的场所比较适用。

(2) 设置能量热回收

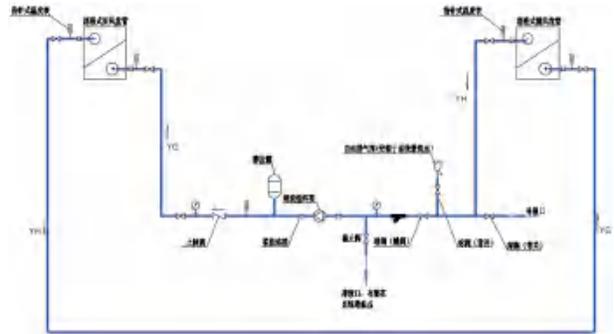
①转轮式全热回收器及板翅式全热回收器

曾有研究人员在实验动物设施中尝试使用转轮式全热回收器，但此方案即使使用了反吹措施及高强度紫外线杀菌措施，转轮上仍有微生物存活，无法杜绝新风及排风的交叉感染^[4]；而板翅式全热回收器在排风和新风间存在压差时，也无法避免新风及排风的交叉感染。同时两者体积较大，应用场景受限，在实验动物设施中鲜有见到使用这两种热回收方式。

②乙二醇热回收系统

乙二醇热回收系统以乙二醇溶液为媒介，将排风中的能量回收后转移到新风中，从而减少处理新风的能量，达到节能的目的。

夏季工况时，当乙二醇溶液经过排风盘管，排风温度上升，乙二醇溶液温度降低，再经过新风空调箱盘管时，新风温度降低，夏季工况以排风温升的能量来计算热回收的能量。冬天则以新风温升的能量来计算热回收的能量。其原理图如图 1。



在某深圳实验动物设施中，采用分布式热回收系统，冬季供热设备的需求可降低 50%~60%，夏季制冷设备的需求可降低 20%~30%，夏季再热设备的需求可降低 100%，能耗有明显的降低。

④三维热管热回收

三维热管热回收在实验动物设施中有两种应用方式^[5]，一种是新排风三维热管热回收，一种是除湿三维热管热回收。

新排风三维热管热回收是指利用三维热管热交换器，在新、排风间进行能量热回收。其布置示意图如图 3。

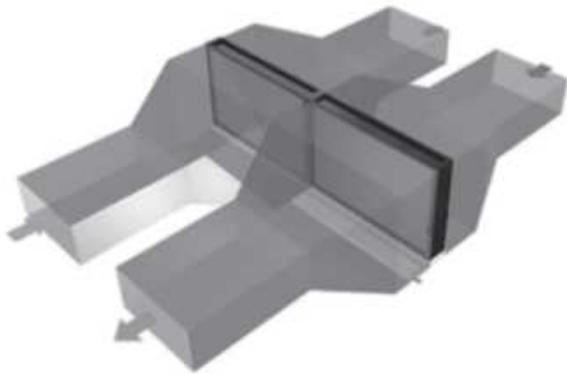


图 3 新排风三维热管热回收示意图

新排风三维热管热回收可降低设备初投资，节省运行能耗，但其需要新排风管有相贴部分，对设计会造成一定难度，并需要一定空间布置。

除湿三维热管分为两个区段，第一区段(预冷段)安装在空调表冷器前的进风位置，第二区段(再热段)安装在表冷器后面的出风位置。其结构如图 4 所示。

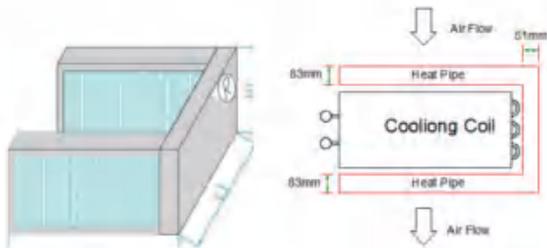


图 4 除湿三维热管的结构

由于表冷器后面空气的温度低于表冷器前面的空气温度，热量由三维热管的预冷段，转移至三维热管的再热段，而空气经过三维热管预冷段冷却后，再经过表冷器冷却除湿，表冷器的除湿量就会大大增加。

过冷后的空气经过三维热管的再热段，可以升高到舒适的送风温度，同时相对湿度大大降低，而整个预冷和再热的过程完全没有能源的消耗。

(3) 提高系统能效

①四管制多功能冷热水机组的应用

四管制多功能冷热水机组，其原理图如图 5 所示，它集冷热源于一体，充分应用制冷循环的蒸发侧和冷凝侧热量，可单独供冷水，单独供热水，亦可以同时供冷供热，冷、热自动平衡与分配。在四管制多功能冷热水机组冷热联供运行时，它的制冷能效比 4.0 左右，同时制热能效比达 5.0 左右，冷热联供综合能效比达 9.0 左右，显著节省用户后期的运行费用。

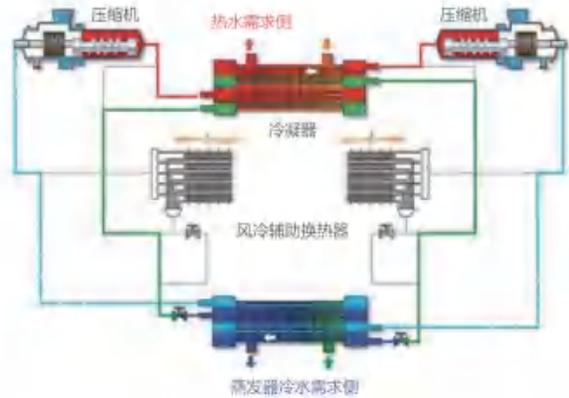


图 5 四管制多功能冷热水机组系统原理图

②溶液调湿空调系统的应用

溶液调湿技术^[6]是采用具有调湿功能的盐溶液为工作介质，利用盐溶液的吸湿和放湿特性，通过溶液浓度的改变以控制送风相对湿度，相对湿度的控制范围在 50%~70% 之间。溶液除湿时，通过浓缩溶液使之具备很强的吸水能力，能够将空气中的水分直接吸入溶液中，从而实现对空气的干燥；溶液加湿时，可补水稀释溶液，通过喷淋稀溶液实现对空气的加湿。

传统空调系统采用冷凝除湿、露点送风的方式控制室内湿度，除湿后空气温度很低，需再热后才能满足送风温度要求，再热温差为 4~8℃，系统能耗很高。而溶液调湿处理后的送风相对湿度正好满足使用要求(55%~70%)，设计工况下无需再热；此外，利用盐溶液的吸湿、放湿特性，还可实现对回风的全热回收，有效降低了空调系统的能耗，节能率可达 30% 以上。

溶液调湿空调系统相比于风冷热泵系统的优缺点对比如表 5。

③磁悬浮离心冷水机组的应用

磁悬浮离心式冷水机组是一种利用先进的磁悬浮技术的空调系统，其高效的节能率、卓越的负载性能和超长的使用寿命，系统综合能效比可达 6.0

表 5 风冷热泵系统与溶液调湿空调系统的优缺点对比

方案名称	风冷热泵系统	溶液调湿空调系统
优势	1、系统稳定，对于需要全年稳定运行的动物房来说，至为重要； 2、初投资费用低，主机可采用知名品牌，能效比高，运行稳定； 3、空调机组满足温湿度要求，没有生物安全隐患。	1、系统全热回收，冷热源节约运行能耗约 50%；空调系统节约运行能耗 30%； 2、利用 CaCl ₂ 溶液在不同浓度下的吸湿特性，可以控制送风空气中水蒸气的分压力，从而保障室内全年绝对湿度恒定在设计范围内； 3、经全热回收预处理后的新风可通过调节 CaCl ₂ 溶液温度和 CaCl ₂ 溶液浓度，两个参数拟合至送风状态点，无须将新风处理至露点，再热至送风状态点。主机的压缩比较低，在极端高温高湿环境下，也能够运行； 4、系统高度集成，能实现分区域独立控制，布置较为灵活； 5、空调压缩机设置备用，控温控湿更加安全可靠。
劣势	1、极端气温下，主机能效比较低； 2、系统由主机+末端+管路等构成，施工量较大； 3、安装完成需要系统整体调试； 4、设备数量较多，对于机房面积要求更大。	1、溶液调湿机组系统高度集成，故障率较高，影响整机运行； 2、因为机组全热回收，系统带液运行； 3、溶液除湿盐溶液介质存在少量飘液情况，盐溶液介质对实验动物本身及实验的潜在影响缺乏广泛的实验论证。 4、初投资较高； 5、设备集成度高，单台机组尺寸大，对于设备机房位置及及载荷有较高要求；

以上,使其尤其适合于大型高能耗建筑,对于独栋式、园区式实验动物设施全年 24 小时运行的情况下,磁悬浮离心式冷水机组节能优势明显。

磁悬浮离心式冷水机组有以下优点:

- a. 节能高效, 机组 IPLV 可达 10 以上, 在部分负荷运行条件下, 峰值效率 COP 高达 12。全负荷段可实现节能运行;
- b. 无需考虑远端能效衰减, 机组无油, 长期使用性能无衰减;
- c. 可取消备机, 多压缩机有强大的备用性;
- d. 可采用同等冷量配置, 整齐划一, 无需担心低负荷运行问题, 方便系统运行维护;
- e. 运行噪音与振动低, 磁悬浮机组没有机械摩擦, 具有气垫阻隔震动, 机组产生的噪音和振动极低。

3 结论

适用于实验动物设施的节能措施有很多种类型, 是否选用其中一种或多种, 可从技术经济等条件考虑。实验动物设施运行能耗极高, 相应的其节能潜力也很大, 针对项目具体特点, 可以在前期设计或改造中有针对性的选用节能措施, 这将给设施的运

行带来极大的经济性。

参考文献

[1] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 (第二版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008

[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB14925-2010 实验动物环境及设施 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50447-2008 实验动物设施建筑技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[4] 韩俊召, 焦宏照. 转轮式全热换热器在 SPF 实验动物环境中的应用探讨 [J]. 制冷与空调, 2008,2(22):91-94.

[5] 吴强, 尤军, 王志毅, 熊丹. 三维热管热回收应用于实验动物房性能比较 [J]. 能源与环境, 2021,2:48-49.

[6] 韩俊召, 裴清清. 溶液全热回收装置在 SPF 实验动物环境中的应用分析 [J]. 洁净与空调技术, 2007,1:46-48.

生物制药厂房洁净度与换气次数的关系 ——以两次调研为例

李 炫

(建科环能科技有限公司, 北京 100013)

[摘 要] 生物制药厂房的一大特点是其工艺对于洁净等级要求高, 因此药厂空调的风量以及能耗较大。为发掘制药厂房的节能潜力, 需要针对其高换气次数和洁净度之间的关系进行研究。本文比较了国内外部分文献对于厂房换气次数的数值要求, 并通过对两家不同形式生物制药厂房进行了性能测试和降频实验, 简单分析了其洁净度变化特点。结果表明: 制药厂房换气次数存在一定冗余。

[关键词] 生物制药厂房; 洁净空调; 洁净度; 换气次数

1 我国制药行业洁净厂房室内环境现状

医药行业的快速发展离不开严格的工作和生产供应, 随着对医疗制药技术要求不断提升, 相应医药行业洁净室(厂房)的要求也愈加提高, 导致新建或改扩建的洁净室面积不断能增大, 层数不断增加, 进而产生更大能耗。因此, 强化医药行业洁净室净化空调系统节能效益对于降低洁净室整体用能具有重要意义。

就洁净室目前的使用情况来看, 净化空调系统是整个洁净室使用中能耗最大的设备组成部分, 因为在具体的应用中, 必须要确保净化空调系统能够为室内提供充足的送风量, 这样才能确保整体的温湿度要求能够满足相关的标准和实际需要, 而较大的送风量必然会造成整体能耗的上升。在净化空调需要应用中, 具体需要的送风量多少是需要按照洁净度的等级需要进行设置的, 按照国家标准的ISO4级和ISO5级单相流洁净室送风换气次数要求来看, 需要满足每小时400次到600次的送风量要求。

2 国内外标准比较

2.1 《兽药生产质量管理规范》(2020年修订)

中华人民共和国农业农村部令2020年第3号《兽药生产质量管理规范》(2020年修订), 第四十五条: 应当根据兽药品种、生产操作要求及外部环境状况等配置空气净化系统, 使生产区有效通风, 并有温度、湿度控制和空气净化过滤, 保证兽药的生产环境符合要求。

洁净区与非洁净区之间、不同级别洁净区之间的压差应当不低于10Pa。必要时, 相同洁净度级别的不同功能区域(操作间)之间也应当保持适当的压差梯度, 并应有指示压差的装置和(或)设置监控系统。

兽药生产洁净室(区)分为A级、B级、C级

和D级4个级别。生产不同类别兽药的洁净室(区)设计应当符合相应的洁净度要求, 包括达到“静态”和“动态”的标准。

2.2 《药品生产质量管理规范》(2010年修订)

《药品生产质量管理规范》(2010年修订)第42条: 厂房应当有适当的照明、温度、湿度和通风, 确保生产和贮存的产品质量以及相关设备性能不会直接或间接地受到影响。

其附录《无菌药品》中对无菌药品生产所需的洁净区分为4个级别A~D级, 其中, A级属高风险操作区, 如灌装区、放置胶塞桶和与无菌制剂直接接触的敞口包装容器的区域及无菌装配或连接操作的区域, 应当用单向流操作台(罩)维持该区的环境状态。单向流系统在其工作区域必须均匀送风, 风速为0.36-0.54m/s(指导值)。应当有数据证明单向流的状态并经过验证。在密闭的隔离操作器或手套箱内, 可使用较低的风速。B级指无菌配制和灌装等高风险操作A级洁净区所处的背景区域。C级和D级指无菌药品生产过程中重要程度较低操作步骤的洁净区。生产不同类别兽药的洁净室(区)设计应当符合相应的洁净度要求, 包括达到“静态”和“动态”的标准。

表1 无菌药品生产所需的洁净区分级

洁净度级别	悬浮粒子最大允许数/立方米			
	静态		动态	
	≥0.5μm	≥5.0μm	≥0.5μm	≥5.0μm
A级	3520	20	3520	20
B级	3520	29	352000	2900
C级	352000	2900	3520000	29000
D级	3520000	29000	不作规定	不作规定

2.3 《洁净厂房设计规范》GB 50073-2013

《洁净厂房设计规范》GB 50073-2013, 第6.3.3条: 为保证空气洁净度等级的送风量, 应按表2中

表2 空气洁净度等级的送风量计算

空气洁净度等级	气流流型	平均风速	换气次数
1~3	单向流	0.3~0.5	-
4、5	单向流	0.2~0.4	-
6	非单向流	-	50~60
7	非单向流	-	15~25
8、9	非单向流	-	10~15

表3 空气微粒清洁度等级要求

空气洁净度等级	气流流型	平均风速	换气次数
2	单向流	0.3~0.5	-
3	单向流	0.3~0.5	-
4	单向流	0.3~0.5	-
5	单向流	0.2~0.5	-
6	非单向或混合	-	70~160
7	非单向或混合	-	30~70
8	非单向或混合	-	10~20

的有关数据进行计算或按室内发尘量进行计算。

2.4 ISO 14644-4 洁净室及相关受控环境——第四部分

设计、施工和启动，第4.5条：要求的空气微粒清洁度等级应符合相关国际标准的清洁度要求。

3 厂房调研结果及分析

项目组选取上海市和吉林省长春市2处典型的制药工业洁净厂房进行空调系统降频运行现场实验。房间洁净度采用 HANDHELD 3016 型尘埃粒子计数器进行实测；换气次数采用 TSI 8375 型风量罩对送风量采样，并除以房间体积换算换气次数；静压差采用 TSI 9565-P 型数字压力计进行实测；新风量使用 TSI 9565-P 型多功能精密风速仪对新风机组风口进行实测；房间温度与相对湿度采用 HM40 型温湿

表4 调研用仪器设备

仪器名称	厂家	规格型号	出厂编号
风量罩	美国 TSI	TSI 8380	T83801840006
尘埃粒子计数器	LIGHTHOUSE	3016	180602025
多功能精密风速仪	美国 TSI	TSI 9565-P	9565P1924017
数字压力计	美国 TSI	TSI 9565-P	9565P1924017
温湿度计	VAISALA	HM40	L0450790

度计进行实测。设备型号和精度见表4。

3.1 上海市某制药车间实验结果

项目组于2019年3月前往上海市某人用药品净化空调车间开展空调系统运行实验。此次调研范围为质检车间三层 AHU-R-303 系统。该系统共有8间房间。除脱鞋间为D级外，其他所有房间等级均为C级。

实验系统包括三层脱鞋、更衣、C级气闸、细胞实验室、细胞操作室1、2等洁净区域。系统内房间送风空调系统采用一次回风系统。系统部分房间排风。净化空调系统空气经空气新风预处理和初效、中效、高效过滤器三级过滤后送入室内。送风

口为无隔板高效过滤器风口，90厚，初阻力小于100Pa，送风支管设定风量阀，房间出风支管设变风量阀，细胞室设置定+变风量阀，接至主回风管道。回风总管上安装 BIBO 高效过滤箱，高效过滤箱中安装一道高效过滤器。

降频前后送 / 排风机频率为：

降频前送风机频率(Hz)：45。送风机频率(Hz)：35。

第一次降频送风机频率(Hz)：40。送风机频率(Hz)：32。

第二次降频送风机频率(Hz)：35。送风机频率(Hz)：30。

第三次降频送风机频率(Hz)：30。送风机频率(Hz)：27。

降频前后主要房间送风量、换气次数和洁净度

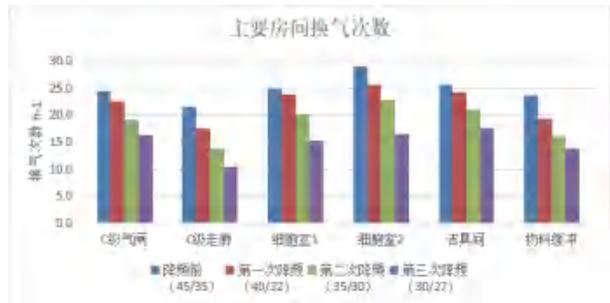


图1 降频前后主要房间换气次数

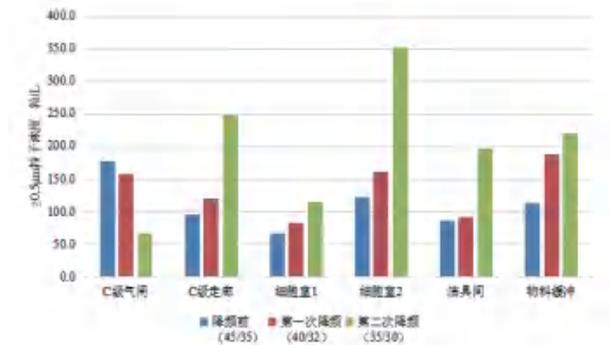


图2 降频前后主要房间洁净度变化

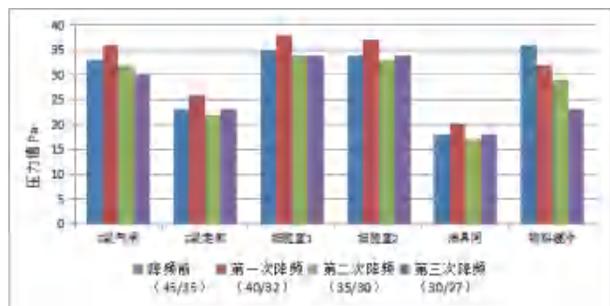


图3 降频前后主要房间压力变化图

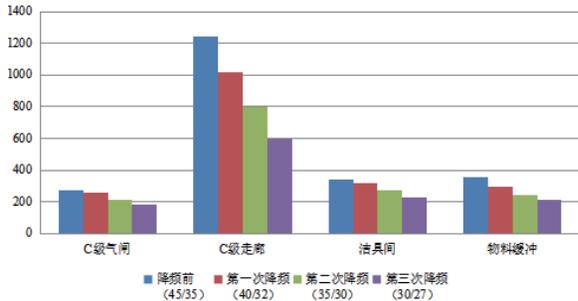


图4 降频前后定进变出房间送风量变化

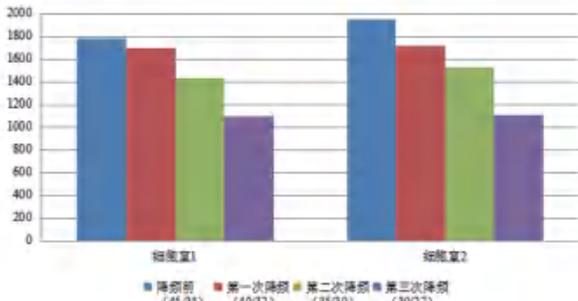


图5 降频前后定进定+变出房间送风量变化

变化情况见图1至图5。

由图可见，定风量阀在工作压差范围内可以将风量恒定在设定值上，降频后，各房间均出现送风量明显下降。其原因为房间送风口均安装高效过滤器，阻力较大，因此降频后各送风支管均超出额定工作范围压差下限，导致送风支管阀门失效，送风量减少。对于高效定送、非高效定+变回/排形式的房间，送风管压力绝对值一般高于回排风管压力绝对值。风机降频后，送风管的定风量阀往往先出现失调现象。由于压力控制，送风量始终大于回排风量，将房间压力维持在一个相对稳定的状态。

在降频后，每个系统房间的送、排（回）风量都出现了不同程度的减小，换气次数随之减小。而房间内粒子浓度总体上升，（C级气闸有所下降）且随着换气次数减小多而上升更快。但是均未超过标准浓度350粒/L，符合对应洁净等级下的粒子浓度。

本系统没有设置手动调节阀，由于系统较为简单，支管长度、局部阻力管件少，定、变风量阀均处于正常工作压力。但是对于复杂的系统，建议加装手动调节阀使定、变风量阀达到工作压力范围。

3.2 吉林省长春市某制药车间实验结果

项目组于2019年8月赴吉林省长春市对某兽药制药车间开展实验。本次调研系统一次回风负压系统，送风口为无隔板高效过滤器风口，90厚，初阻力小于100Pa，送风支管设手动调节阀，房间出风支管设手动调节阀，排风机一用一备，主管安装BIBO，接至主回风管道。回风总管上安装BIBO高

效过滤箱，高效过滤箱中安装一道高效过滤器。

降频前后送/排风机频率为：

降频前送风机频率(Hz)：44。送风机频率(Hz)：45.8。

第一次降频送风机频率(Hz)：37.9。送风机频率(Hz)：39.2。

第二次降频送风机频率(Hz)：37.4。送风机频率(Hz)：36.7。

实验结果如图6至图8。负压系统压力变化后，房间洁净空气稀释能力下降，洁净度影响较大。

手动调节阀系统阻力较小，因此管道沿程阻力及管件局部阻力对系统压力影响较大，在系统中距

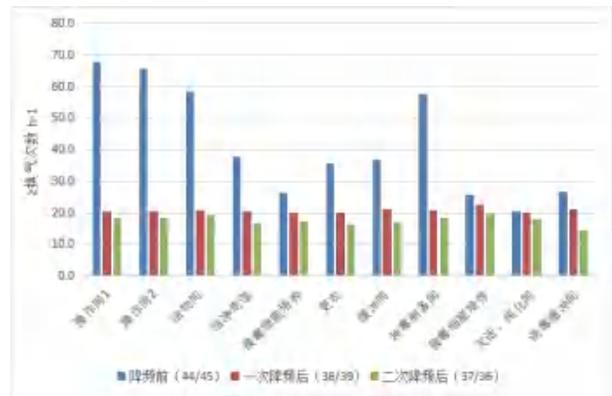


图6 降频前后主要房间换气次数

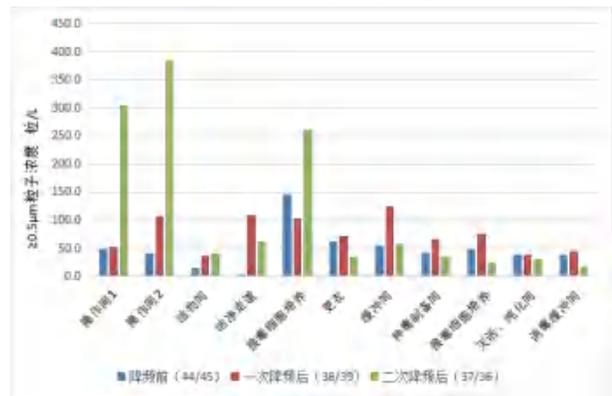


图7 降频前后主要房间洁净度变化

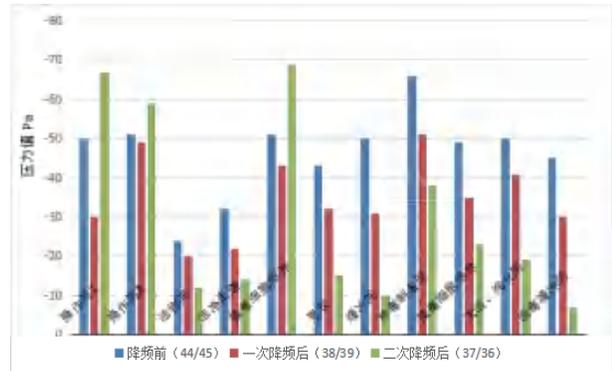


图8 降频前后主要房间压力变化

离送风机远点的房间，手阀调节能力不如距离送风机近点的房间。手动调节阀系统总体来说系统压力较小，系统较为简单，因此整个系统降频后压力、洁净度、换气次数等数据均呈现出较强的规律性。

降频后，每个系统房间的送、排（回）风量都出现了不同程度的减小，换气次数随之减小。而房间内粒子浓度上升，第一次降频后，所有房间粒子浓度均未超过 350 粒/L。第二次降频后，操作间及接毒细胞培养粒子浓度升高幅度较大。除操作间 2 为 385 外，其余房间粒子浓度均未超过 350 粒/L。

从两次调研中可以发现，通过降低净化房间的换气次数，可以使房间内微粒浓度保持在一个较低水平，证明净化系统降低换气次数具有一定可行性。但是不同系统、不同阀门形式对于系统能否在降低换气次数后保持所有房间的压力梯度、粒子浓度以及其他参数有待进一步调研或分析。

4 结语

尽管很多科研人员已经提出一些合理的换气次数取值，或是建立模型指出盲目增加换气次数并不能提高洁净等级。但是实际工程中洁净厂房风量大是一个显著特点。这是因为洁净风量就比普通舒适性空调风量大，大家习惯接受的换气次数标准值偏高，而且即使设计人员根据相关要求提出较低的合理换气次数，业主在实际工程中也会“为了安全”再加码。在“双碳战略”下，能耗大的制药厂房如何探究能耗特征，提高管理运营水平，甚至是探索值班工况是必要的，在保证工艺生产的前提下，优化控制策略，为节能减排做出贡献。

参考文献

- [1] International Organization for Standardization Technical Committee 209(ISO/TC 209). ISO 14644-1 Cleanroom and Associated Controlled Enviroments(Part 1): Classification of Air Cleanliness [S]. Geneva : International Organization for Standardation, 1999.
- [2] International Organization for Standardization Technical Committee 209(ISO/TC 209). ISO 14644-4 Cleanroom and Associated Controlled Environments(Part 4) : Design , Construction and Start-up[S]. Geneva : International Organization for Standardation 2001.
- [3] 许钟麟. 空气洁净技术原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 刘俊杰, 尹维友, 刘世超. 非单向流洁净室换气次数的计算方法 [J]. 天津大学学报, 2012, 45(11): 987-993.
- [5] 许钟麟 空气洁净技术原理 [M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] 中华人民共和国信息产业部. GB50073 洁净厂房设计规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001. Ministry of Information Industry of the People's Republic of China. GB50073 Code for Design of Cleanroom[S]. Beijing: China Standard Press, 2001(in Chinese).
- [7] 冯昕, 许钟麟, 张益昭, 等. 生产无菌药品的背景环境 B 级区换气次数实测分析 [J]. 暖通空调, 2014.2:84-88.

电子行业洁净室用化学过滤器研究进展

陆禹名^{1,2}, 曹国庆^{1,2}, 冯昕^{1,2}, 陈紫光^{1,2}, 戎戈^{1,2}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建科环能科技有限公司, 北京 100013)

[摘要] 基于多孔介质吸附原理的化学过滤器, 可有效降低半导体生产车间及数据中心机房等场所环境内气态分子污染物浓度。本文介绍了化学过滤器的基本概念和原理, 整理了吸附材料和吸附理论模型, 对化学过滤器性能评价参数进行梳理, 并对未来的研究方向进行展望。

[关键词] 电子行业洁净室; 化学过滤器; 多孔材料; 吸附; 气态分子污染物

1 前言

电子洁净厂房内的气态分子污染物(AMC)控制对芯片等产品的工业和性能非常重要, 以往从事洁净室环境控制的研究人员更多关注温度、湿度以及洁净度, 随着芯片技术的进一步发展, AMC成为影响产品良品率的主要因素。

目前, 用于机械通风系统的 AMC 过滤器, 即化学过滤器, 较常被应用于洁净室及室内环境 AMC 的去除。化学过滤器虽带有“过滤器”, 但其净化机理与常规“过滤”有着本质不同。本文将从化学过滤器作用机理、材料、吸附模型等方面进行阐述, 以期促进高性能化学过滤器的设计和开发。

2 化学过滤器的作用原理

不同于高效过滤器的拦截等过滤机理, 化学过滤器去除空气中污染物的作用机制通常分为物理吸附和化学吸附。物理吸附一种是可逆的物理吸附, 主要通过广泛存在于分子间的范德华力作用进行吸附, 通常用于去除非极性有机污染物和分子量较高(> 80)的污染物, 被吸附在物体表面的物质被称为吸附质, 吸附吸附质的物质被称为吸附剂; 化学吸附主要依赖于吸附剂和吸附质分子间的化学反应, 用于去除化学品, 如酸、碱、氢化物等^[1-3]。化学过滤器是有选择性地吸附并与污染气体发生化学反应, 而不是机械地“过滤”杂质。

2.1 物理吸附

对于 AMC 的物理吸附过程分为三个阶段: (1) 污染物分子在吸附剂颗粒周围的气体边界层运动的对流传质过程; (2) 污染物分子由吸附剂气体边界层运动至微孔隙中的扩散过程; (3) 污染物分子与吸附剂表面结合的吸附过程。气体边界层对流传质过程的速度取决于气流模式, 扩散过程的速度主要取决于微粒的大小, 直接决定了扩散路径。在实际去除 AMC 的通风系统中, AMC 浓度低、梯度小, 扩散速率慢, 吸附过程多发生于吸附剂表面而无法进入深部孔隙, 去除效率相对较差。为提高去除效率和吸附效果, 通常尽可能降低吸附剂颗粒粒径,

缩短 AMC 扩散至吸附剂表面的距离, 以增大 AMC 与吸附剂的接触时间。

影响物理吸附的主要因素有: (1) AMC 浓度: AMC 浓度越高、吸附量越大, 这一关系常用等温吸附线来描述。(2) AMC 沸点: 通常沸点大于 100°C 的吸附质蒸气易于吸附凝结在吸附剂表面。(3) 环境温度: 温度越高、物理吸附效果越差。(4) 环境相对湿度: 水分子将与 AMC 在吸附剂表面发生竞争吸附, 影响 AMC 的物理吸附效果。

2.2 化学吸附

AMC 的化学吸附过程, 吸附剂依靠范德华力吸附 AMC, 随后化学添加剂与 AMC 发生化学反应, 生成固体成分或无害气体, 换言之, 化学吸附过程在物理吸附过程三个阶段基础上, 增加了 AMC 在吸附剂表面发生化学反应的一个阶段。化学吸附过程是一种具有选择性的、不可逆的过程, 仅能针对特定种类的 AMC 发挥作用。

与物理吸附过程不同, 在一定范围内环境温度和相对湿度越高, 目标 AMC 污染物的化学吸附过程越容易发生或进行, 较高温度会提高化学反应速率, 较高的湿度可提高 AMC 接触化学浸渍物质的能力。但需要注意, 非目标 AMC 污染物在较高温、湿度环境下, 可能会发生脱附, 需谨慎控制环境参数。

3 吸附材料

除了活性炭、氧化铝、硅胶、沸石等典型吸附材料之外, 研究人员致力于开发具有更大比表面积的材料。金属有机骨架材料(MOFs)以其丰富的结构形式、较大的比表面积, 在储能、催化、分离等领域吸引广泛兴趣, 在吸附领域具有很大的应用潜力, 尤其是 Li 等人成功制备出一种具有稳定结构的有序大-微孔 MOF 单晶材料, 可能会在吸附领域展现良好的性能^[4]。

除了调整材料自身结构, 研究人员通过浸渍法和负载法提高既有多孔材料的吸附性能。所谓浸渍法, 是指将活性炭、氧化铝等材料作为基材, 通过在酸或其他化学物质中浸渍处理, 在基材表面形成

化学键，以提高材料的吸附性能。例如 Kang 等人利用磷酸对活性炭进行浸渍处理，浸渍后的化学过滤器对洁净室内挥发性有机化合物的去除效率提高 2%~3%^[5]。Rong 等人利用氨基苯甲酸对人造丝基活性炭浸渍处理，成功提高材料的吸附能力^[6]。活性炭经碱改性后其吸附性能有较大改善，吸附量的大小与其比表面积呈正相关性，而与孔径和孔体积无明显关系^[7]。

除浸渍法外，在活性炭表面负载催化剂也是提高材料吸附性能的思路。活性炭表面负载 MgO 和 CaO，可明显提高材料对二氧化碳的吸附性能^[8]，为碳捕集提供思路。Yoshika 将金属氧化物氧化钴、二氧化锰和二氧化钛负载到活性炭表面后，对甲醛的吸附性能均得到明显改善^[9]。Leuch 和 Bandosz 通过负载金属（Fe、Co 和 Cr）对活性炭进行改性，结果表明表面负载金属的活性炭可用于去除氨污染^[10]。活性炭表面的官能团也对其吸附性能有着重要影响，活性炭经 KMnO₄ 浸泡后，其表面含氧官能团数量增加，对 SO₂ 的吸附效果得到改善^[11]。

4 性能评价

目前，针对化学过滤器性能的评价标准主要以 ISO 10121.2-2013 标准、ASHRAE 145.2-2011 标准、GB/T 34012-2017 为主。

ISO 10121.2 标准适用于任意净化材料和净化技术的全尺寸气体过滤装置，吸附设备或非吸附设备均可进行测试，对测试系统和测试装置无形式要求，仅对上游目标污染物的种类及浓度、温度、相对湿度、风量等参数给出建议。上游目标污染物可选择酸性气体（二氧化硫、二氧化氮、氮氧化物、硫化氢、

醋酸）、碱性气体（氨气、N-甲基对比咯烷酮）、VOC、其他气体（臭氧、氯气、一氧化碳、二氧化碳），测试气体浓度为 9ppm 或 90ppm。ASHRAE 145.2 主要针对吸附介质过滤装置进行评价，但不适用于吸收、洗涤等方式的过滤装置。该标准同样给出了典型测试目标污染物的种类及测试浓度，其中甲醛和臭氧的测试浓度为 1×10^{-6} ，其他均为 100×10^{-6} 。GB/T 34012-2017 给出了甲醛、苯、甲苯、TVOC、二氧化硫、一氧化碳、氨等七种目标污染物，并建议试验温度和相对湿度宜为 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $50 \pm 10\%$ 。

需要说明的是，无论是 ISO 10121.2 标准还是 ASHRAE 145.2 标准，目标污染物的测试浓度均要远高于实际使用环境中的浓度，所得到的测试数据仅能用于横向性能对比，无法反映过滤装置的实际使用性能。

ISO 10121.2 标准和 ASHRAE 145.2 标准给出了去除效率、容污量、压降和保持力四项参数，作为化学过滤器的性能评价指标：（1）去除效率，指的是在一定时间内被化学过滤器去除的污染物的百分比，即被测目标污染物上下游浓度之差与上游浓度之比，测试效率并非一成不变，而是随着测试时间逐渐减小，一旦下游目标污染物浓度达到一定水平时，化学过滤器即需更换。（2）压降，化学过滤器的压降主要受到结构形式、净化材料填充层厚度、测试风量、净化材料颗粒粒径等因素影响，测试过程中不随时间发生变化，通常以化学过滤器在测试装置中安装前后管道内压降之差，来表示化学过滤器的压降，这与高效空气过滤器的压降随测试时间而不断增大不同。（3）容污量，是指在规定的实验条

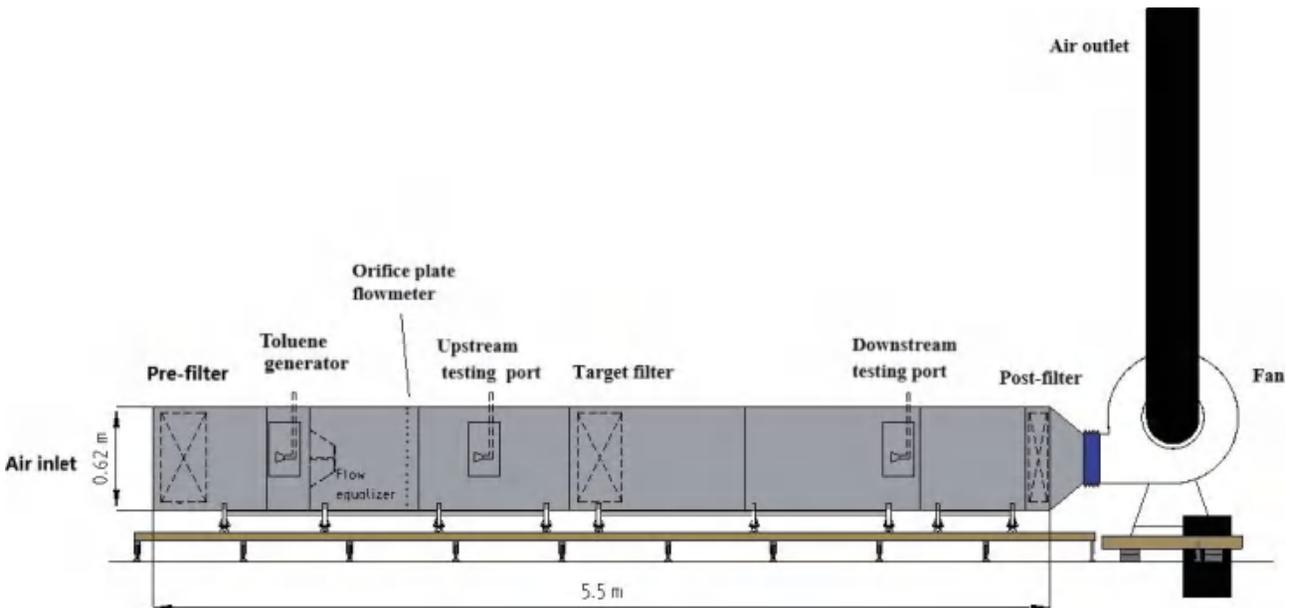


图 1 测试平台示意图

件的试验周期内，化学过滤器所去除的目标污染物总量，即化学过滤器上下游浓度之差在测试时间段内的积分值。（4）保持力，是用于衡量化学过滤器抗脱附能力的参数，在吸附测试试验结束后，用相同流量的洁净空气吹扫过滤器，经过一定时间后，过滤器中剩余的容污量。

如图 1 所示，为 Zhi 等人参考 ISO 10121.2 标准所搭建的化学过滤器性能测试平台^[12]，可对目前常见的化学过滤器进行测试。通常情况下，高效空气过滤器的阻力压降达到一定程度时，即认为需要更换，与此不同的是，在环境因素、运行因素恒定的条件下，化学过滤器的阻力压降变化较小，仅能通过对下游目标污染物的浓度进行监测，一旦接近或达到最大允许浓度时，即进行更换。因此，目前对化学过滤器的使用程度、更换时机的评价尚不成熟和统一认识，主要依赖对环境评估和运维管理经验。尽管现行标准中测试浓度远高于实际情况，但其给出的测试温度、湿度范围，对实际环境参数的选择和设计，仍具有重要参考意义。

5 吸附模型与性能预测

基于无孔平面上吸附的 Langmuir 模型、可方便计算比表面积的 BET 模型、具有完备热力学特性的 Derjaguin-Broekhoff-der Boer (DBdB) 模型、以及吸附动力学模型等，已取得很多研究成果，下面对此类传统模型进行简单介绍。

1918 年 Langmuir 根据气体向吸附剂固体表面的凝聚速度和自表面蒸发速度相等时即达到吸附平衡状态，提出如式（1）所示的吸附等温式，

$$q = \frac{q_0 K_L \wedge P / P_{SAT} h}{1 + K_L \wedge P / P_{SAT} h} \quad (1)$$

式中， q 为吸附质最大吸附浓度； K_L 为经验常数； P 为吸附质分压力； P_{SAT} 为吸附质在该温度下的饱和蒸气压。Langmuir 模型相对于实际情况做出了很多假设，如：（1）固体吸附剂表面的吸附位均匀分布，每个吸附位只吸附一个分子或原子；（2）吸附剂与吸附质之间的吸附类似可逆化学反应，且吸附质分子间无相互作用。这就局限了 Langmuir 模型的应用范围，仅对均一吸附剂表面的单分子层吸附有效，并不适用于对多分子层的吸附过程。

1938 年，Brunauer、Emmett 和 Teller 共同提出了著名的多分子层吸附模型，即 BET 模型，其关系式如式（2）所示：

$$q = \frac{q_0 K_{BET} \wedge P / P_{SAT} h}{6[1 - \wedge P / P_{SAT} h] : 6[1 -] - K_{BET} q \wedge P / P_{SAT} h} \quad (2)$$

式中， q 为吸附质最大吸附浓度； K_{BET} 为经验常数； P 为吸附质分压力； P_{SAT} 为吸附质在该温度下的饱和蒸气压。BET 模型与 Langmuir 模型类似，认为吸附剂表面均一分布吸附位，且同样忽略了吸附质分子间相互作用。BET 模型在描述第 II 类吸附等温线及计算活性炭等多孔吸附剂的比表面积等方面得到了大量应用，该模型对大多数中孔吸附剂是有效的，对于小孔或者微孔等吸附剂则不甚理想^[13]。

Freundlich 模型加入了吸附剂孔径分布和表面负载官能团对吸附过程的影响，广泛应用于物理吸附和化学吸附过程，其关系式为：

$$q = q_0 \wedge P / P_{SAT} h^{K_F} \quad (3)$$

式中， q 为吸附质最大吸附浓度； K_F 为经验常数； P 为吸附质分压力； P_{SAT} 为吸附质在该温度下的饱和蒸气压。Freundlich 模型在吸附质浓度较低时的计算结果与实际有较好的一致性，但吸附质浓度较高时计算结果并不能反应真实情况。

Dubinin 和 Astakhov 充分考虑了多孔吸附剂的孔径分布，对 D-R 方程进行修正得到 D-A 方程，其关系式如式（4）所示，

$$\ln \wedge q h = \ln \wedge q_0 h + K_{DA} 6 \ln \wedge P / P_{SAT} h e^n \quad (4)$$

式中， q 为吸附质最大吸附浓度； K_{DA} 为经验常数； P 为吸附质分压力； P_{SAT} 为吸附质在该温度下的饱和蒸气压。 n 的取值范围为 1~3，较小的 n 值对应着微孔结构，较大的 n 值对应着孔径分布较窄的结构，例如对于中孔材料 $n=1$ ，对于分子筛 $n=3$ 。

1997 年，Jensen 等人提出多空间吸附模型 (MASM)，对多组分吸附质的吸附过程进行描述。针对吸附剂结构不均一性问题，该模型将微孔分成两个空间，在接近吸附剂表面的空间，吸附质分子与吸附剂有着较强的相互作用；而在远离吸附剂表面的空间，吸附质分子只与吸附剂表面附近的分子存在相互作用，而不能直接与吸附剂表面作用。

以上经典吸附模型均是建立在宏观尺度，并未反应出吸附本质，比如吸附剂微观结构、化学性质对吸附性能的影响，此类信息依靠传统模型均无法获得。而随着计算机模拟技术的发展，分子模拟为了解吸附微观过程和吸附机理提供可能。例如，安亚雄等人建立活性炭狭缝模型，计算其对异己烷、苯、甲苯、丙酮等 VOCs 的吸附数据^[14]；周日峰等人采用巨正则蒙特卡罗方法 (GCMC) 和分子动力学方法 (MD)，从分子层面研究甲烷和甲苯在活性炭中的吸

附和扩散特性^[15]; Zhi 等人建立活性炭狭缝分子模型,并结合 Langmuir 等宏观模型,定量分析了活性炭微观结构对过滤器吸附性能的影响^[16]。将微观模型和宏观模型相结合的多尺度模拟,将是未来吸附研究的重要方向。

6 结论与展望

化学过滤器的性能直接影响到洁净室环境和成本,提高其吸附性能具有重要研究意义和应用价值。而传统的实验测试和宏观模型计算,均不足以揭示吸附过程的机理,尤其是材料的微观结构和化学性质对吸附过程的影响。

为提高化学过滤器的吸附性能,可从以下方向展开研究:(1)建立“微观-宏观”多尺度吸附模型,描述吸附过程、分析吸附机理,以指导吸附材料优化和制备;(2)综合考虑环境因素、运行条件、材料特性的耦合作用对化学过滤器在使用过程中的影响,建立基于真实结构的化学过滤器模型,对其性能进行预测。

参考文献

- [1] Rong H, Ryu Z, Zheng J, et al. Influence of heat treatment of rayon-based activated carbon fibers on the adsorption of formaldehyde[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 261(2):207-212.
- [2] Liu Y, Wilcox J. Molecular Simulation Studies of CO₂ Adsorption by Carbon Model Compounds for Carbon Capture and Sequestration Applications[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(1):95-101.
- [3] Tao Z, Clarens A. Estimating the Carbon Sequestration Capacity of Shale Formations Using Methane Production Rates[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(19):11318-11325.
- [4] Shen K, Lei Z, Chen X, et al. Ordered macroporous metal-organic framework single crystals[J]. *Science*, 2018, 359(6372):206-210.
- [5] Kang Y H, Shiue A, Hu S C, et al. Using phosphoric acid-impregnated activated carbon to improve the efficiency of chemical filters for the removal of airborne molecular contaminants (AMCs) in the make-up air unit (MAU) of a cleanroom[J]. *Building & Environment*, 2010, 45(4):929-935.
- [6] Rong H, Liu Z, Wu Q, et al. Formaldehyde removal by Rayon-based activated carbon fibers modified by P-aminobenzoic acid[J]. *Cellulose*, 2010, 17(1):205-214.
- [7] 陈益清,高晓洋,伍健威,等. 碱改性活性炭对 VOCs 的吸附性能[J]. *化工环保*, 2019, 039(002):202-207.
- [8] Shih-Cheng, Hu, Angus, et al. Removal of carbon dioxide in the indoor environment with sorption-type air filters[J]. *International Journal of Low Carbon Technologies*, 2016, 12(3):330-334.
- [9] Sekine Y. Oxidative decomposition of formaldehyde by metal oxides at room temperature[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(35):5543-5547.
- [10] Leuch L, Bandosz T J. The role of water and surface acidity on the reactive adsorption of ammonia on modified activated carbons[J]. *Carbon*, 2007, 45(3):568-578.
- [11] F.T. Foroushani, H. Tavanai, F.A. Hosseini. An investigation on the effect of KMnO₄ on the pore characteristics of pistachio nut shell based activated carbon[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2016, 230: 39-48.
- [12] Zhi Y, Liu J, Liu K. Long-term performance analysis of chemical filters in cleanrooms based on a prediction model Performance analysis based on a prediction model[J]. *Indoor Air*, 2020.
- [13] 黄杨. 活性炭分子结构模型的构建及其吸附行为的模拟研究[D]. 重庆大学, 2016.
- [14] 安亚雄,付强,刘冰,等. 不同孔径活性炭吸附挥发性有机物的分子模拟[J]. *化工进展*, 2019, v.38;No.338(11):337-342.
- [15] 周日峰,石基弘,刘全祯,等. 活性炭吸附甲烷和甲苯的分子模拟研究[J]. *过程工程学报*, 2018, 18(S1):103-108.
- [16] Zhi Y, Liu J. Analysis of chemical filter performance and activated carbon microstructure at low concentration[J]. *Building and Environment*, 2020, 169: 1-9.

半导体、集成电路洁净室控制 AMC 的化学过滤器评价方法综述

何娜娜¹, 李启东²

(康斐尔过滤设备(昆山)有限公司, 昆山 215314; 复旦大学, 上海 200433)

[摘要] 高等级半导体洁净厂房, 不仅需要准确设计和高效空气化学过滤器进行气载分子污染物 (AMC) 的控制, 更需要用各种监测手段进行 AMC 气体的有效监控; 在现场发生突发或者未知状况时, 进行滤料饱和度分析, 及污染物溯源分析, 解决现场实际问题以进行过滤方案的改良升级和运行周期的成本降低, 在 ISO 10121 的成品测试台上进行过滤器的实验室验证, 减少客户采纳新方案的风险。

[关键词] AMC; 空气化学过滤器; 监测; ISO 10121; 饱和度分析

0 引言

随着半导体工业的发展和摩尔定律的演进, 最新的工艺制程已达到 3nm 的技术节点, 而半导体制造也面临越来越多的污染控制挑战, 其中一个重要挑战来自于气载分子污染物 (Airborne Molecular Contamination, 简称 AMC) 的控制。在纳米级工艺尺寸下, AMC 已成为半导体制造众多工序关注的主要问题, 其控制好坏将决定性影响产品良率, 因此在洁净室强制安装 AMC 化学过滤器已成为业内共识。然而除了污染物控制外, AMC 浓度监测和环境评估也成为一难题, 原因在于检测方法不一致, 无法横向比较, 以及国内尚处于早期特殊发展阶段, 无人真正关注并研究 AMC 污染对制程的影响, 导致了忽略对这一块严格管控和效果评估。如何有效监测与评估洁净室 AMC 浓度, 评估环境中 AMC 有害物的危害程度, 根据检测结果和洁净室的具体情况, 实施空气控制净化方案, 观察效果, 持续改进, 确保空气品质, 提升整个工艺制程的产品良率, 在高制程的半导体生产中越来越重要。当气载分子污染影响到产品合格率时, 需要一个系统性的方法解决, 包括测量, 以及测试的标准。

1 AMC 监测对工艺制程的影响

洁净室 (clean room), 亦称无尘车间或无尘室, 其主要功能是通过室内污染控制, 以达到敏感器件批量生产的目的。洁净室要求在一定空间范围内空气中的微颗粒, 有害气体, 细菌等污染物清除, 同时将温度, 湿度, 压力, 气流速度, 气流分布, 噪音震动, 照明, 静电控制在需求范围内, 这是一种经特别设计、处理的房间。无论外界空气如何变化, 其室内均能维持原先设定要求的性能。

在实际项目实施运行中, 对颗粒, 温湿度, 压力, 震动噪音等都有非常明确的验收要求和标准, 而唯独 AMC 气体的测试验证容易被忽略, 这不仅

和产业发展的特定阶段有关, 也和 AMC 气体的分类复杂, 气体种类众多有关系, 以及不同工艺受到的影响不同有关。最新的 SEMI 标准 SEMI F21-1016 (2016-10) 发布, 对无尘室的分类提出了明确的标准。将 AMC 气体分为 MA (Acids), MB (Bases), MC (Condensables), MD (Dopants) 四类, 每类气体对制程的影响各异, 且随着制程的发展, 越来越多的新气体对制程产生影响, 进入控制的范围。IEEE 领导下的“国际器件和系统路线图 (IRDS)”也对制程和气体种类提出了新的定义。AMC 监测的复杂在于气体种类非常多, 检测极限低, 且在不断更新变化。

表 1 洁净室中要求控制的气相分子污染物分类及代表化合物

MA	MB	MD	MR	
HF, 氟化氢	NH ₃ , 氨	TEP, 磷酸三乙酯	TEP, 磷酸三乙酯	
HCl, 氯化氢	NMP, 甲级吡咯烷酮	TCEP, 三(氯乙基)磷酸酯	TMS, 三甲基硅醇	
SO ₂ , 二氧化硫	三乙胺	BF ₃ , 三氟化硼	六甲基二硅醚	
CH ₃ COOH, 醋酸	三甲胺	B(OH) ₃ , 硼酸	D4, 八甲基环四硅氧烷	
H ₂ S, 硫化氢	乙醇胺	PH ₃ , 磷化氢	四氯乙烯	
有机污染类别		AMC	沸点 / °C	备注
挥发性有机化合物		IPA 异丙醇	82	普通清洗剂
		庚烷	98	洗脱之前, 沸点比苯高
符合 ITRS 定义的挥发性有机物, GC-MS 停留时间 ≥ 苯		苯	80	交通尾气排放
		甲苯	111	
		丁醇	117	
		二甲苯	140	交通尾气排放
		PGMEA	146	化学工艺品, 通常被视为可凝物
MC: 符合 SEMI 和 ITRS 定义的可凝性有机物		乳酸乙酯	154	工艺化学品
		三甲苯	165	一般交通污染
		NMP, N-甲吡咯烷酮	204	工艺化学品
		磷酸三乙酯	215	阻燃剂
		BHT, 丁基甲酚	265	塑化剂
		邻苯二甲酸二乙酯	298	塑化剂
		DOP, 邻苯二甲酸二辛酯	385	塑化剂, ULPA 过滤器测试气溶胶

2 AMC 检测技术

2.1 空气检测

2.1.1 在线监测

AMC 气体的在线检测方法很多，ISO14644-8 按照不同的气体种类给出了检测方法，其中也包括了在线监测的方法，如表 2 所示。

表 2 ISO14644-8AMC 检测方法

ISO-AMC Class # WT (µm) ^a	Contaminant category						
	Acid	Base	Organics	Biotoxics	Condensables	Cytotoxins	Deposits
0	IMP, IC, UVS, DIFF, NCS	IMP, FC, UVS, DIFF, ECS	DIFF, SOR, SB, GC-FID, GC-MS, IR	IMP, IC, UVS, SB, DFF	SOR, GC-FID, GC-MS, IR	IMP, IC, UVS, DIFF, SOR, GC-FID, GC-MS, IR, ECS	SOR, GC-FID, GC-MS, IR, ICP-MS, IR, OF-MS, UVS, OF-AAS, UVS
-1							
-2							
-3							
-4	IMP, IC, UVS, CLS, IR, CPR, DFF	IMP, IC, UVS, CLS, IR, CPR, DFF		IMP, IC, UVS, CLS, IR, CPR, DFF		IMP, IC, UVS, CLS, IR, CPR, DFF	
-5							
-6	IMP, IC, UVS, IR, CLS, CPR, DFF	IMP, IC, UVS, IR, CLS, CPR, DFF	SOR, GC-FID, GC-MS, ICP-MS	IMP, IC, UVS, IR, CLS, CPR, DFF, SAW	SOR, FC, DFF, GC-MS, MSD	IMP, IC, UVS, IR, CLS, CPR, DFF, SOR, GC-FID, GC-MS	IMP, IC, UVS, IR, CLS, CPR, DFF, SOR, GC-MS, ICP-MS
-7							
-8	IMP, IC, UVS, IR, CLS, CPR, DFF	IMP, IC, UVS, IR, CLS, CPR, DFF		IMP, IC, SOR, UVS, ICP-MS		IMP, IC, SOR, UVS, ICP-MS	
-9	IMP, IC, UVS, IR, CLS, CPR, DFF		SOR, GC-MS	IMP, IC, CZE, ICP-MS, SAW, GC-MS, ICP-MS	SOR, GC-MS	IMP, IC, CZE, ICP-MS, SAW, GC-MS	
-10	IMP, IC, UVS, IR, CLS, CPR, DFF	IMP, IC, UVS, IR, CLS, CPR, DFF		IMP, IC, CZE, ICP-MS, SAW, GC-MS, ICP-MS		IMP, IC, CZE, ICP-MS, SAW, GC-MS	
-11							
-12							

备注：采样方法：DIFF-被动扩散采样器；FC-过滤采样头；SB-采样袋；SOR-吸收管；IMP-吸收瓶，装有特定吸收液；WW-硅片暴露采样法；DSE-液滴扫描提取；DT-扩散管；

离线方法：AA-S-原子吸收光谱；AA-GF-原子吸收光谱+石墨炉；AES-原子发射光谱；CL-化学荧光法；CZE-毛细管区电泳法；GC-FID-气相色谱-氢火焰离子化检测器；GC-MS-气相色谱质谱法；IC-离子色谱法；ICP-MS-电感耦合等离子体质谱法；IR-红外光谱法；MS-质谱法；UVS-紫外光谱法；FTIR-红外光谱法；TXRF-全反射x射线荧光光谱法；

在线方法：IMS-离子迁移谱法；PGC-可移动式气相色谱；ICS-离子色谱在线监测；CLS-化学荧光在线监测；SAW-表面声波法。

在线监测可以实时捕捉气体浓度的变化，及时把握现场环境浓度变化的趋势，包括季节性，高低峰的差异，以便有效地指导现场运行和维护。

2.1.2 离线监测

离线监测主要在于准确，检测限低，一般作为在线实时监测的补充和交叉验证。除了检测方法的区别，还有采样方式的区别，如表 3 所示。

2.2 化学过滤器成品检测——ISO 10121-2 标准

2.2.1 化学过滤器整体检测的必要性

化学过滤器为损耗品，一旦暴露即开始吸附空气中的污染物，因此无法做到出厂的 100%性能检测。对化学过滤器进行完整的性能检测并出具具有可比性的检测报告，对于项目前期的产品选择和技术确认非常有必要。先在实验室做检测，而非拿到客户现场直接做试验，可以让客户避免不必要的损失。



图 1 康斐尔赛默飞在线监测系统图 2 康斐尔日本堀场 Hitachi 在线监测系统



图 3 康斐尔珀金埃尔默 GC/FID 检测仪器 图 4 康斐尔戴安 IC 检测仪器

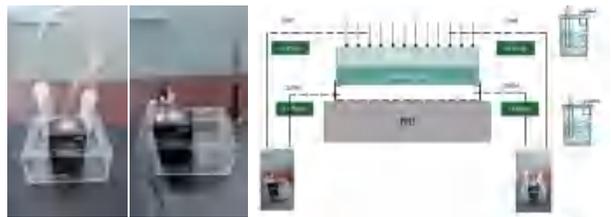


图 5 采样装置示意 图 6 康斐尔化学过滤器离线采样点位示意图

表 3 离线监测方法

气体	采样方法	采样时间	分析方法	特点
MA 酸性气体	超纯水 超纯水 + 碱性吸收液	3L/min, 2hrs, 50ml 采样水	离子色谱 (IC)	采样时间长； 仅反应一段时间的数据结果，分析复杂，费用高；无法及时反馈结果
MB 碱性气体	NH ₃ -超纯水 有机胺-TENAX 管 或 苏玛罐	NH ₃ -3L/min, 2hrs, 50ml 采样 水有机胺 -200ml/min, 2hrs	NH ₃ -离子色谱 (IC) 有机胺-气相色谱质谱联用仪 (GC/MS)	
MC 可凝性气体	TENAX 管 或 苏玛罐	200ml/min, 2hrs	气相色谱质谱联用仪 (GC/MS)	
MD 掺杂性气体	TENAX 管 或 苏玛罐	200ml/min, 2hrs	一般为气相色谱质谱联用仪 (GC/MS)，部分气体采用离子色谱 IC。	

目前业内绝大多数的厂商没有化学过滤器的成品测试台，通常采用滤料的测试数据来反推过滤器的性能。这会存在几个问题，1) 滤料的性能不等于过滤器的性能，滤料充填后是否达到所要求的堆积密度（可控制在松装密度与振实密度之间），这样可以避免滤料床层有空隙、短路或沟流的出现，否则极大影响空气化学过滤器性能发挥，使用寿命大大下降；2) 滤料测试的停留时间和成品的停留时间完全不同；停留时间越长，表现出的性能越优越；3) 滤料的测试浓度并非实际运行工况的测试浓度。因此成品检测成为必须，而 ISO10121 定义了最接近洁净室环境，符合实际工况的检测工况以及测试台

搭建的标准，成为微污染领域的权威标准之一。

2.2.2 符合 ISO 10121-2 标准的空气化学过滤器成品测试台

康斐尔化学过滤器测试台是全球上少有的几个符合 ISO 10121 标准要求的化学测试台之一。测试台的作用不仅是测定过滤器的去除效率，使用寿命，还包括发尘量，挥发性气体，评定洁净度等级，判断是否适合用在洁净环境等。

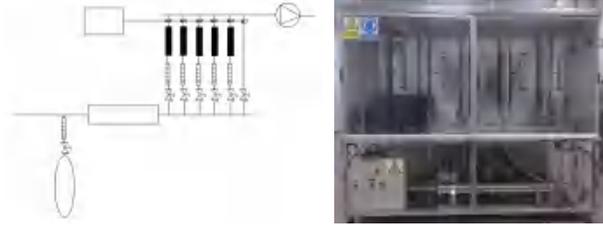


图 7 ISO10121-1 测试原理示意图 图 8 康斐尔符合 ISO10121-1 测试台



图 9 康斐尔符合 ISO10121-2 标准搭建的成品测试台

表 4 ISO10121 测试台典型实验参数示例

参数	范围
相对湿度	50%±1%
温度	23°C±0.2°C
风量	3000CMH
常用气体	甲苯，二氧化硫，硫化氢，氯化氢，氨气等
常用气体浓度	<10ppm

2.3 滤料饱和度分析 Gigamonitor

康斐尔 Gigamonitor 检测方法是目前业内位数不多的安装后用于现场问题解决的检测方法。它针对已经使用一段时间的滤料进行裁剪，拿回实验室进行浸出实验，还原过滤器安装期限内所有的吸附污染物，测得的结果重新用于改进过滤器方案，该方法已成功为客户解决了现场诸多问题，并且节约全生命周期的运行费用。

滤料饱和度分析可用于分析滤料中 Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , F^- , CH_3COO^- , $HCOO^-$, NH_3 以及低、中、高沸点有机物的含量，以此分析过滤器的已吸附容量，并且可以反推滤料的剩余使用寿命。



图 10 已使用过滤器的滤料裁剪

3 实际案例分析

案例一：某电子厂在其 MAU 新风空调箱安装了康斐尔化学过滤器，通过离线监测发现现场实际浓度比设计浓度要高很多。客户想要升级化学过滤器，提升使用寿命，缩短更换时间。康斐尔依据现场浓度进行了产品的升级设计，为了防止新升级产品导入给客户带来的风险，康斐尔在实验室进行了根据 ISO 10121-2 的成品过滤器检测，并给客户提供了检测报告，而后客户确认进行现场试装。



图 11 插片散填式化学过滤器

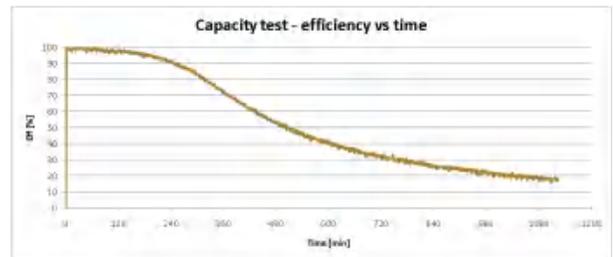


图 12 实验室成品测试台性能曲线对比

案例二：某 IC 芯片制造厂商，在其光刻区安装了针对 MA 和 MB 的某品牌化学过滤器，需要保证下游浓度小于 0.5ppbv，寿命一直无法达到设计的 6 个月，在线监测显示 NH_3 的气体浓度一直小于 10ppbv，平均值小于 5ppbv。客户找到康斐尔反馈了上述情况，康斐尔按照客户现场的工况重新设计了滤网，虽然寿命高于原厂滤网，但还是未能达到

设计的6个月。此时康斐尔建议客户进行滤料饱和度分析，即 Gigamonitor 检测，检查滤网已吸附的各项气体含量，以优化产品设计。

Gigamonitor 检测结果显示环境中除了目标气体，还有大量的其他竞争气体存在，而正是这部分气体大量消耗了化学过滤器的吸附容量。

改良前后化学过滤器的使用寿命大大超出了6个月，达到了一年以上，帮助客户极大降低了使用寿命周期的成本。



图 13 通过 Gigamonitor 改良后设计的 Gigapleat NXPP 产品

4 结语

AMC 气体关乎到半导体工艺的产品良率，在前

期需要检测背景环境中分子污染物浓度来确定设计条件，并基于统一标准进行过滤器性能的比较和测试报告的提供；安装使用过程中需要检测进行性能的验证和评估；安装后期需要借助饱和度分析来进行问题分析和方案的升级。需要借助检测来评估性能。其中在线监测和离线监测大部分本公司都能自行提供，因此基于 ISO 10121 的检测报告和滤料饱和度分析也成为了实际运用中难得获取的补充检测手段。借助这些补充技术，不仅可以帮助客户筛选最优解决方案，减少运行风险，还能极大节约运行成本。

参考文献

- [1]ISO 14644-8 Cleanrooms and associated controlled environments— Part 8 Classification of airborne molecular contamination
- [2]SEMI Classification of airborne molecular contaminant levels in clean environments SEMI F21-1102-2012[S]

制药车间污染物控制的通风方案比较研究

周斌¹, 侯敏^{1,2}, 李大伟³, 李斐¹, 蔡浩¹

(1. 南京工业大学城市建设学院暖通工程系, 南京 211816; 2. 中国电子工程设计院有限公司

湖北分公司, 武汉 430070; 3. 南京大学环境学院, 南京 210023)

[摘要] 药物的生产过程会伴随药物粉尘和废气的产生, 这些污染物将影响药物的生产质量, 同时还会危害大气环境及威胁工人健康。本文通过对连云港某制药车间作业场所进行实测了解了内部的污染物现状, 对其通风系统存在的问题, 进行局部优化。通过设置环形射流气幕, 与局部排风罩相结合, 形成吹吸式系统。结果表明, 环形射流装置可以削弱机盖开启过程对污染物扩散的影响。气幕排风罩组成的吹吸式系统, 在人员操作过程中能起到防护作用, 且不影响人员操作, 适用于过滤离心工艺的污染物控制。原有排风罩的平均捕集效率为 74%~78%。而设置了吹吸式系统后, 其捕集效率较为稳定, 受送回风气流影响小, 抗干扰性能增强, 平均捕集效率提高到 94%~97%。本研究为制药生产车间的环境控制提供解决方案。

[关键词] 制药车间; 气流组织; 污染物控制; 吹吸式系统

1 背景

在制药工业中, 从原料生产到药品包装的整个生产过程可能会造成室内外环境污染。其中, 制药业的原料药生产对生态环境的影响最大。根据《药品生产质量管理规范》(GMP), 药品生产区域应该根据生产工艺、药剂类型、人员工作班次等对制药车间内的环境进行科学合理的管理。不同药物的制备过程不同, 但大多数特征在于制备流程长, 污染物排放的节点很多以及污染物成分复杂。

药品生产主要分为发酵、生物技术、化学合成、提取、中药及制剂六大类。制药业的污染形式包括大气污染、水污染、固体污染和环境噪声污染等。其中, 大气污染方面较为突显。制药车间排出的废气主要有: 粉尘、含无机物废气、含有机物废气三大类。其危害包括三个方面: 威胁人类健康、危害大气环境以及影响药物生产质量。制药中的废气排放特点: 短时间浓度高、种类多、呈周期性, 多区域无组织排放多、排放物质危害性大。目前制药行业已经成为生态环保部调查的重污染行业之一^[1]。

制药工艺中粉尘的主要来源: (1) 固体原料药的粉碎、筛选、炮制等机械过程; (2) 加热原料药制剂过程中产生的气体在空气中冷凝或发生化学反应形成的粉尘^[2]。药物粉尘的危害性与其性质有关。一般药物粉尘浓度高, 危险性则大。长期暴露会引起各种呼吸道疾病(如尘肺病)。而对于一些高危药物粉尘, 会与人体发生化学反应(如生物药尘); 若本身具有高毒性, 短时间暴露也会引起工人身体感官刺激或损伤(如眼部、皮肤等)、中毒或者

导致癌症的发生, 从而使许多工人的健康受到威胁, 甚至死亡。药尘的浓度超标还可能会引起粉尘爆炸, 严重制约着企业发展, 同时给国家造成巨大的经济损失^[3]。

制药车间污染物控制可分为污染源控制、通风和空气净化^[4]。污染源控制是从产生污染物的源头着手, 避免或减少污染物的产生; 或者利用屏障设施隔离污染物, 不使其进入室内环境。采取的主要措施是调整原料配方。通风是利用自然力或机械力将不符合卫生标准的脏空气排向室外。空气净化是使用特殊的清洁设备来收集、净化和循环室内空气污染物, 然后返回室内或排出室外。

通风设计是控制制药车间污染物的一项重要措施。目前, 常用的通风措施主要有: 局部排风、全面通风、诱导通风、全室空气净化等。按照空气流动的动力来分, 通风系统可分为自然通风和机械通风; 按照空气作用的区域, 可分为局部通风和全面通风。局部通风分为局部排风罩和吹吸式通风两大类。在制药车间中, 通常用局部排风罩控制源头上的有毒有害气体或蒸气, 将其收集并经过处理后从车间清除^[5]。为了有更好的通风效果, 常将两种或多种通风方式相结合应用于实际工程中。然而随着第十三届全国人民代表大会常务委员会第七次会议通过《中华人民共和国职业病防治法》、江苏省生态环境厅全面实施《挥发性有机物无组织排放控制标准》, 如何通过高效的空气洁净技术营造良好的制药车间环境、保护操作工人的环境卫生, 已经成为建筑环境与能源应用工程领域不得不面对的难题。

2 研究对象

2.1 测试方案

本文选取生产异甘草酸盐注射材料的连云港某

基金资助: 江苏省第十四批“六大人才高峰”计划项目(JNHB-043)、2020年南京工业大学专业学位研究生工程实践创新能力培养重点案例建设项目(No.10)

3016L 型粒子计数器来测量颗粒物计数浓度。颗粒物计数器测试范围为 0.3-0.5 μm 、0.5-1 μm 、1-3 μm 、3-5 μm 、5-10 μm 和 >10 μm 的粒子。使用 GT-1000-VOC 测量车间 VOCs 浓度。

相关浓度测量仪器读数单位 (PPM) 与质量浓度 (mg/m^3) 关系式如式 (1) 所示:

$$C = \text{PPM} \# \frac{M}{22.4} \# \frac{273}{273+t} \# \frac{B_0}{101325} \quad (1)$$

其中 M 为污染物的相对分子量, 本文取 82; t 为测量时环境温度; B_0 为测量当地的大气压。

2.3 局部改进方案

本文提出了两种局部排风的形式, 一种为封闭式幕帘排风罩, 增设幕帘, 将设备用幕帘围挡, 使污染物控制在幕帘内, 形成半封闭式的幕帘排风罩; 一种为气幕排风罩, 在设备外侧增设环形槽罩射流, 形成空气幕, 阻止污染物向室内扩散。模拟的物理模型为一个小室, 模型尺寸为 7m (L) \times 6m (W) \times 3m (H)。排风罩距污染源越近, 其捕集效率越高^[5]。由于设备需要打开, 局部排风罩距地最小高度为 2.3m, 圆形排风口的半径为 0.65m, 设备位于中心, 半径为 0.6m, 高为 1.1m, 现场测试排风口的平均风速为 1.5m/s。物理模型的示意如图 3 所示, 排风罩位于中心, 根据现场车间的布局以及人员操作空间等因素的考虑, 幕帘尺寸为 1.8m (L) \times 1.8m (W) \times 2.7m (H), 底部开口 0.2m 高的缝隙进行补风。根据林太郎提出的流量比的方法^[6], 计算得到环形射流气幕的参数, 图 4 为局部排风系统的二维示意图, 具体尺寸如表 3 所示。

表 3 局部排风系统具体尺寸

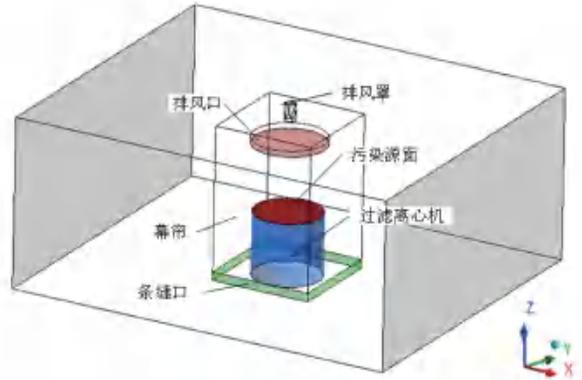
	F(m)	D(m)	D0(m)	D1(m)	u0(m/s)	E0(m)	ug(m/s)	u1(m/s)
封闭式幕帘排风罩	1.20	0.20	1.30	--	1.50	--	0.03	--
环形气幕排风罩	1.20	0.20	1.30	1.40	1.30	0.10	0.03	0.52

2.4 整体通风方案

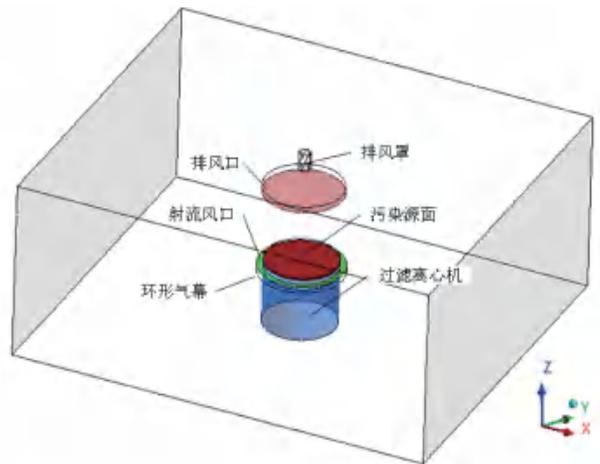
本文将提出的局部吹吸式通风系统方案放置在整体厂房中, 模型如图 5 所示。

工况 6 为原制药车间的通风方式, 即上部吸气罩 + 上送侧回的通风方式, 送风口定义为速度入口边界; 回风口定义为速度出口; 排风罩口为流量出口; 设备及墙面等其他面定义为绝热墙。工况 7 为改进后的通风方式, 即环形气幕排风罩 + 上送侧回的通风方式。

本章节中门处于关闭状态, 即不考虑自然通风对室内气流组织的影响; 且车间内流场为等温场;



(a) 封闭式幕帘排风罩



(b) 环形气幕排风罩 (吹吸式通风系统)

图 3 局部改进方案的几何模型示意图

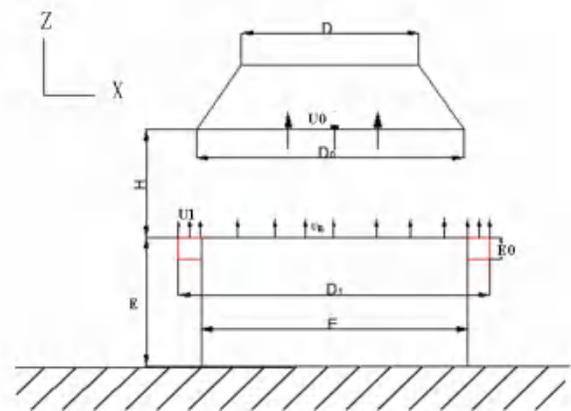


图 4 局部吹吸式通风系统的二维示意图

送风气流的污染浓度为 $0\text{mg}/\text{m}^3$ 。模拟过程将设备上表面视为污染源面, 污染物持续释放, 散发量为 $3.15 \times 10^{-5}\text{kg}/\text{s}$, 释放时间为 10min, 每 1min 记录一次模拟结果。根据 HGT 20698-2009 《化工采暖通风与调节设计规范》规定, 在化工车间机械通风设计中,

表 4 不同通风方式的工况设置

工况	送风速度 (m/s)	回风速度 (m/s)	单个排风罩风量 (m ³ /h)	环形射流风速 (m/s)	通风方式
6	5.00	2.50	7200	0	上部吸气罩+上送侧回
7	4.50	2.00	6000	0.63	环形气幕排风罩+上送侧回

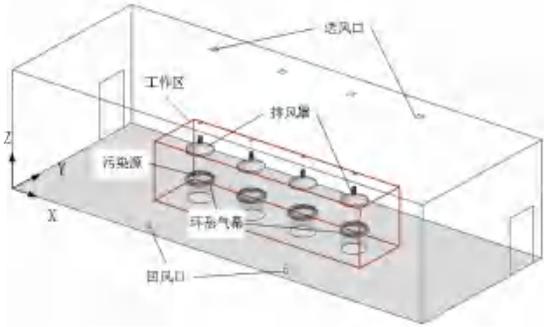


图 5 设置局部吹吸式系统的整体厂房通风系统图

其换气次数不低于 6 次/h，计算得到送风口速度为 4.5 m/s，回风口速度为 2.5m/s。工况具体参数如表 4 所示。

3 实验和模拟结果

3.1 原有排风罩通风条件下室内污染情况

原料药的过滤分离工艺过程包含五个工况：物料运转至该车间、投料、设备运行、取料和转运其他车间。工艺过程中车间内的空气品质参数及污染物平均浓度结果如表 5 所示。

根据 GBZ 2.1—2019《工作场所有害因素职业接触限值》中草酸制剂混合尘的允许浓度值为 2mg/m³，而在工作场所中实测的药物粉尘浓度最高值为 3.44 mg/m³。GBZ 2.1—2019《挥发性有机物无组织排放标准》中规定的 VOCs 允许浓度值为 20mg/m³，通过公式 1 换算车间内 VOCs 的最高质量浓度为 40.4mg/m³。

由表 5 中的数据，可知在测试车间内，原料药过滤分离工艺对车间内的温度和湿度影响较小；粉尘浓度和 VOCs 的浓度波动较大，污染物浓度远高于其他区域，且逐渐向相邻车间扩散。物料在转运中（工况 1 和工况 5），粉尘浓度较低，是因为在运输过程，物料封闭装载在容器中，泄露量较小。当进行原料药过滤分离工艺，开启离心设备机盖过程中（工况 2 和工况 4），污染物波动较大，可能是由于离心机内残留一些颗粒状药物和有机物挥发气体，在打开盖子的瞬间受到诱导空气作用，跟随车间气流运动。在设备运行中（工况 3），污染物浓度也较高，由于物料在高速运转中，会释放大量的污染物。同时也说明排风罩的捕集效率较低，会导致大量污染物泄漏扩散至车间其他区域。

表 5 各工况不同测点的空气品质参数表

工况 1 (物料运至车间)				
测点	温度 (°C)	湿度 (%)	PM ₁₀ (mg/m ³)	VOCs (PPM)
测点 1	31.2	76.4	0.39	3.23
测点 2	31.3	75.2	0.90	3.65
测点 3	31.6	75.3	0.39	3.24
测点 4	30.2	75.6	0.39	3.52
工况 2 (开盖投料)				
测点	温度 (°C)	湿度 (%)	PM ₁₀ (mg/m ³)	VOCs (PPM)
测点 1	31.5	76.2	0.85	4.37
测点 2	31.5	75.3	1.81	6.43
测点 3	31.0	75.6	1.42	5.21
测点 4	31.3	75.4	0.96	5.59
工况 3 (设备运行)				
测点	温度 (°C)	湿度 (%)	PM ₁₀ (mg/m ³)	VOCs (PPM)
测点 1	32.3	75.8	0.83	6.79
测点 2	33.1	75.5	3.44	12.34
测点 3	32.7	75.8	1.54	9.28
测点 4	32.6	75.1	1.25	9.10
工况 4 (开盖取料)				
测点	温度 (°C)	湿度 (%)	PM ₁₀ (mg/m ³)	VOCs (PPM)
测点 1	31.2	75.5	0.92	5.23
测点 2	31.5	75.6	2.47	7.15
测点 3	31.5	75.1	1.20	5.81
测点 4	31.0	75.6	1.09	5.92
工况 5 (转运其他车间)				
测点	温度 (°C)	湿度 (%)	PM ₁₀ (mg/m ³)	VOCs (PPM)
测点 1	31.3	75	0.66	2.44
测点 2	31.6	75	1.68	3.21
测点 3	31.6	75	0.82	2.16
测点 4	31.4	75	0.87	2.26

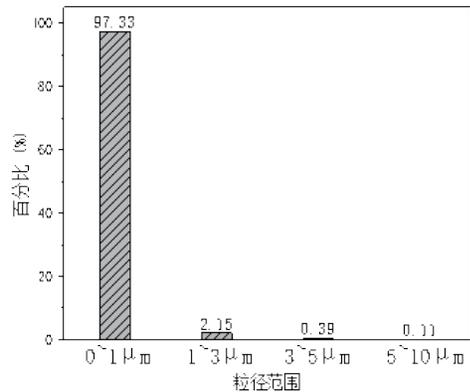


图 6 药物粉尘不同粒径百分比

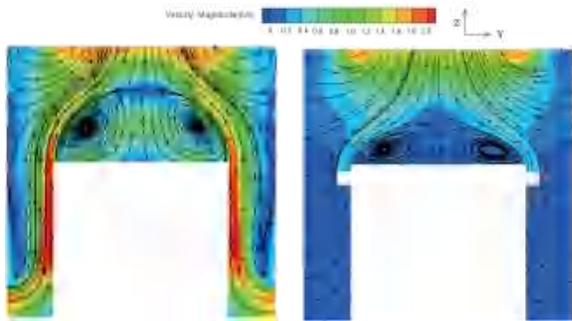
图 6 为距离设备 0.2m（测点 2）处药物粉尘不同粒径的计数浓度百分比。发现离心机过滤分离过程中，药物粉尘粒径在 0~1μm 之间占整体的 97.33%，其浓度约是粒径在 1-10μm 污染物的 50 倍；粒径为 1~3μm 占整体的 2.15%。

由此可知在草酸盐制备的原料药多功能车间，过滤分离工艺会产生大量颗粒粉尘和挥发性有机物 VOCs，污染物主要集中在离心设备附近，并且有向相邻车间扩散的趋势。其细小微粒粉尘占绝大部分（粒径小于 1μm 的粉尘大于 97.33%），颗粒质量轻，悬浮于空气中；同时说明车间内的局部排风罩对污

染物的控制效果差，这是导致工作环境污染加剧的主要原因，是治理的重点。

3.2 局部改进方案条件下流场和污染物捕集性能

图 7 给出了在第 600s 时刻的两种局部排风罩系统下轴心 X=0 断面的速度分布情况。由流场的流线对比图可以看到，排风罩的排风口会卷吸周围的空气，造成周围空气的扰动。由于排风气流的吸力方向上的非选择性，气流随着距吸风口的距离增加，气流迅速衰减，从而使离心机位置的空气流动速度变弱。图 7 (a) 可观察到气流从条缝进入幕帘中在靠近设备上方形成较大涡旋，条缝与吸气罩形成一个包裹气流，在设备与吸气罩周围气流速度较大，很容易破坏包裹的气流，导致整个幕帘中污染物浓度较高，同时一部分污染物滞留在设备上方，无法及时排除。与图 7 (a) 相比较，图 7 (b) 中的气幕排风罩通风系统对周围空气的扰动较小，且排风的速度小，一定程度上隔断横向气流对排风罩收集污染物的影响和污染物的扩散。但在污染源上方，由于环形气幕的阻挡，靠近轴心位置气流速度较低，且气流紊乱，容易形成涡旋，造成污染物滞留，一定程度上削弱了污染物的捕集效率。



(a) 封闭式幕帘排风罩 (b) 环形气幕排风罩

图 7 局部排风系统速度云图

由下图 8 可看在两种优化方案都可提高局部污染物控制效果，捕集效率可达 90% 以上。车间现存的上部吸气罩的捕集效率为 74%，对污染物的捕集效果较差，可能由于吸气流的速度衰减较快，吸气罩吸入的大量车间内的空气，而吸气罩下方较远距离处的污染物较少部分的被带走。在封闭式幕帘局部排风下，其捕集效率可达 90%。需要注意的是，幕帘装置尺寸过小，阻碍了操作人员进行投料和取料，并且这个过程幕帘无法起到防护作用。若扩大幕帘装置的尺寸，使得每个设备占地面积增大，制药企业初投资大大增加。在环形气幕排风罩下，其捕集效率为 94%，环形射流装置在人员操作也能起到防护作用，且占地面积小，不影响人员操作^[7]。综上分析，气幕排风罩更适用于过滤离心工艺的污染物控制。

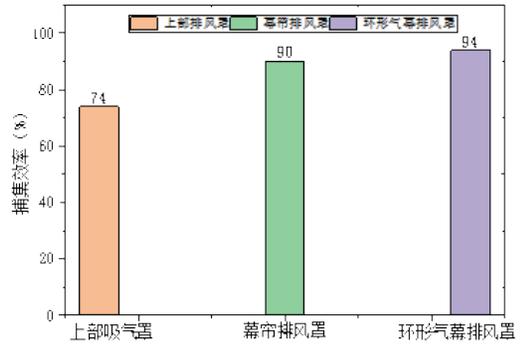
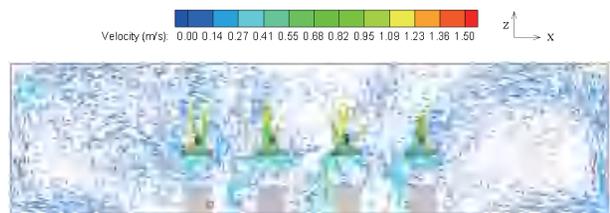


图 8 各局部通风方式下的捕集效率

3.3 整体通风方案条件下室内流场和污染物捕集性能

图 9 显示了不同通风系统下排风罩轴心面 (Y=3) 车间内的速度流线图。通过对比可知，当多个排风罩应用工业通风时，气流之间会相互干扰，排风罩会卷吸上方的气流，顶部送风向回风口运动会遇到排风罩，与排风罩面发生碰撞，改变了气流方向，同时一部分送入室内的新鲜空气直接进入排风罩内，不利于工人呼吸健康；两侧气流被排风罩卷吸，同时受到回风口的作用，导致发生回流，产生涡流。当有环形气幕时，车间内的气流分为气幕区和气幕外区，环形气幕和排风罩形成包裹性气流，且相互之间的气流干扰较小，但在车间两侧，涡流的范围变大，主要是由于环形气幕隔绝排风罩对室内气流的吸入量，且送风速度为 4.5 m/s，相对工况 6，送风量减小了，导致室内两侧气流滞留。



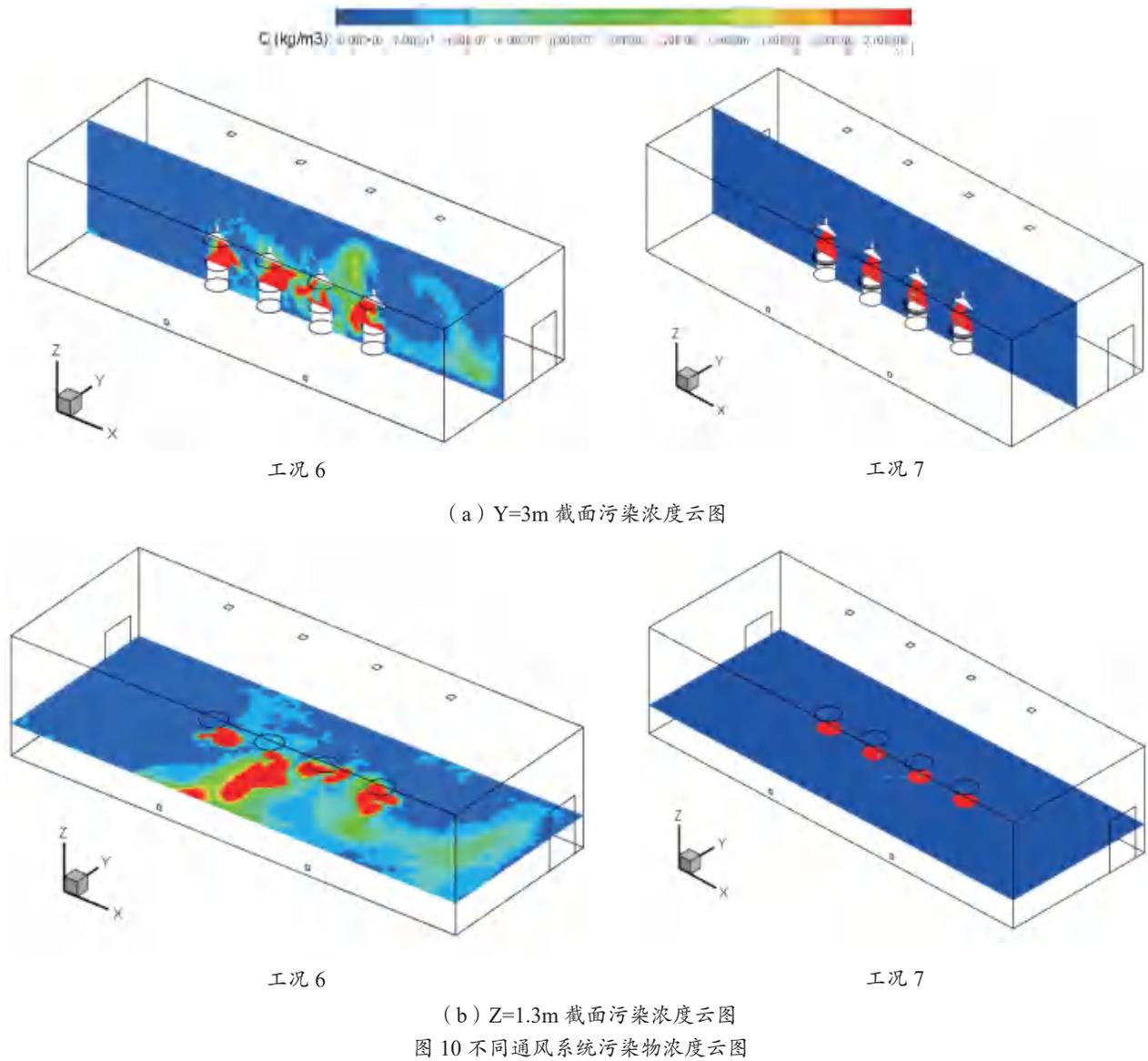
(a) 工况 6: 上部吸气罩 + 上送侧回 (原有方案)



(b) 工况 7: 环形气幕排风罩 + 上送侧回 (改进方案)

图 9 不同通风系统速度流线图

图 10 对比了颗粒污染物释放时间 10min 时，不同通风系统下，局部排风口处的颗粒污染物浓度分布。设备上表面会持续散发颗粒污染物。由图 10 (a) 可以发现，放置设备的区域浓度较高。在原通风系统下，排风罩吸入速度沿 -Z 方向衰减快，导致对污



染物没有聚集作用，同时送风气流经过设备区域，颗粒污染物会受到横向气流的作用力，导致污染物向回风口方向扩散。两侧的排风罩（p-1 和 p-4）卷吸大量非工作区域的气流，而中间的排风罩（p-2 和 p-3）会吸入两侧排风罩的气流，从而使得中间排风罩的气流紊乱，排风罩间气流相互影响。

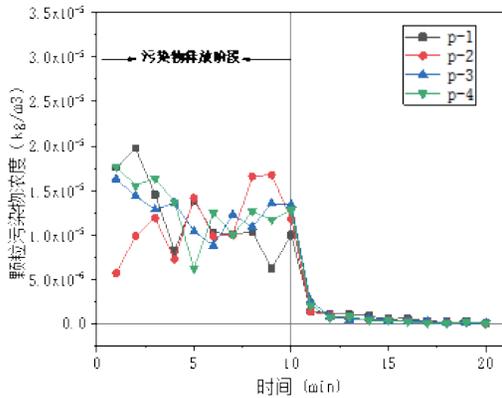
图 10 (b) 为在水平方向 Z=1.3m 高度上污染物分布云图。在原通风系统下（工况 6），中间设备释放的污染物向回风口扩散，且浓度大于 $2\text{mg}/\text{m}^3$ 。这是由于在高度 1.3m 平面，主要受到回风的影响，使得污染物的扩散向回风口方向迁移。

图 11 为不同工况下排风口处颗粒污染物随时间的变化。在 0 至 10min，排风口浓度较高，工况 6 的排风口浓度小于工况 7；当第 10min 时刻，污染

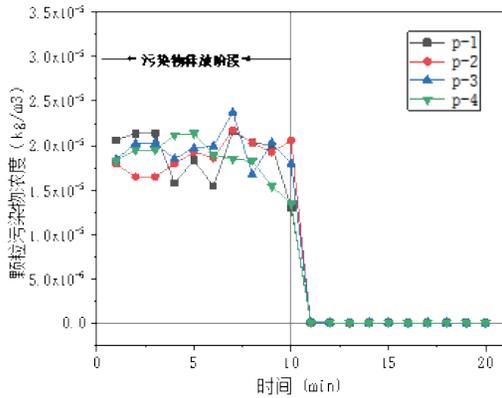
源停止释放后，排风口浓度急剧下降，趋近于 0。

如图 11(a) 所示，在原有通风无射流装置情况下，在 0 至 10min，4 个排风口的污染物浓度变化较大，波动范围为： $4.22 \times 10^{-6} \sim 2.09 \times 10^{-5} \text{kg}/\text{m}^3$ 。当排风口处的浓度越高，则排风罩对污染物的捕集效果越好。如图 11(b) 所示，在有射流装置情况下，排风口污染物浓度变化较小，污染物浓度范围在 $1.30 \times 10^{-5} \sim 2.15 \times 10^{-5} \text{kg}/\text{m}^3$ ，说明环形气幕具有较好的抗干扰性；在第 10min 之后浓度很快降至 $0 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

图 12 给出了不同工况下，车间内污染物平均浓度随时间的变化，可以发现，在无环形射流装置工况下（工况 6，即图中工况 5-1），在 0 至 10min，由于局部排风罩污染物的捕集效果受到送回气流的影响，导致污染物向室内扩散，随时间车间内的污



(a) 工况 6



(b) 工况 7

图 11 排风口浓度随时间变化

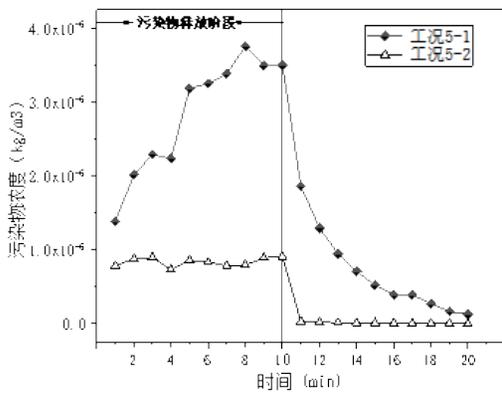


图 12 车间内污染物平均浓度随时间变化

染物平均浓度逐渐增大，最高值达 $3.76 \times 10^{-6} \text{kg/m}^3$ ；在 10min 之后，污染源停止散发，且通风系统仍在运行，污染物平均浓度急剧下降后逐渐趋近于 0。在有环形射流装置工况下(工况 7，即图中工况 5-2)，在 0 至 10min，环形气幕具有较好的隔绝效果，局部排风罩的捕集效率高，车间内的污染物平均浓度稳定在 $0.84 \times 10^{-6} \text{kg/m}^3$ 附近；在 10min 之后，污染物平均浓度很快趋于 0。

3.4 厂房污染物控制效果评价

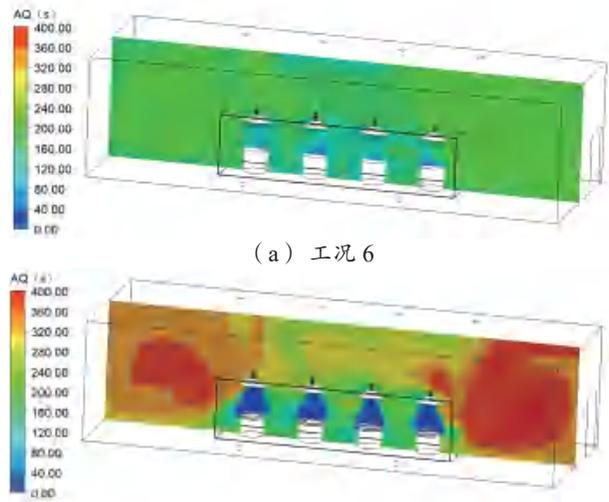
通过对车间的空气龄、排风罩的捕集效率及目标区标准化浓度比来对车间的污染物控制效果进行评价。

3.4.1 空气龄

空气龄 (Age of air, AQ) 表示空气进入室内到达某区域所需时间，常用于评价室内空气质量，反映室内空气的新鲜程度。空气龄的运输方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial x}(u\tau_p) + \frac{\partial}{\partial y}(v\tau_p) + \frac{\partial}{\partial z}(w\tau_p) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \tau_p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial \tau_p}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial \tau_p}{\partial z}) + 1 \quad (2)$$

式中 u 、 v 和 w 分别表示 X、Y 和 Z 方向上的气流速度， Γ 为扩散系数。



(a) 工况 6

(b) 工况 7

图 13 不同工况下室内空气龄云图

图 13 为不同工况下车间内排风罩轴心截面 (Y=3) 的空气龄分布。工况 6 中，室内的轴心截面的空气龄较均匀，车间空气龄范围在 0~280s；工作区的平均空气龄为 152s，非工作区的平均空气龄为 221s。工作区的空气流动快，主要是由于排风罩吸入室内的空气，同时排风罩下方区域受送回风气流的影响，使排风罩对污染物的控制效果恶化。工况 7 中，轴心截面的空气龄分布不均匀，车间空气龄范围在 0~400 s；工作区的平均空气龄为 87s，非工作区的平均空气龄为 314s。工作区中，排风罩正下方的空气龄相对工作区其他位置小，主要由于环形射流送入了新鲜空气。在非工作区，两侧的空气龄大，主要由于该通风方案下，送风量减少；两侧区域距离排风罩较远，且环形气幕隔绝了排风罩对非工作区气流的吸入，使得气流在两侧产生涡旋，气流回流。

3.4.2 排风罩的捕集效率

排风罩的捕集效率见图 14，由于排风罩在车间

内的位置不同,每个排风罩下方区域气流特性不同,使每个排风罩的污染物的捕集效率会有所不同。在工况 6 中,污染源稳定释放过程,各排风罩的捕集效率最大波动在 20%,说明受送回风气流影响较大;排风罩 p-1 至 p-4 的平均捕集效率分别为 74%、74%、78% 和 78%。在工况 7 中,各排风罩的捕集效率最大波动在 3%,说明其捕集效率较为稳定,受送回风气流影响小,环形气幕排风罩的抗干扰性强;排风罩 p-1 至 p-4 的平均捕集效率分别为 94%、96%、95% 和 97%。

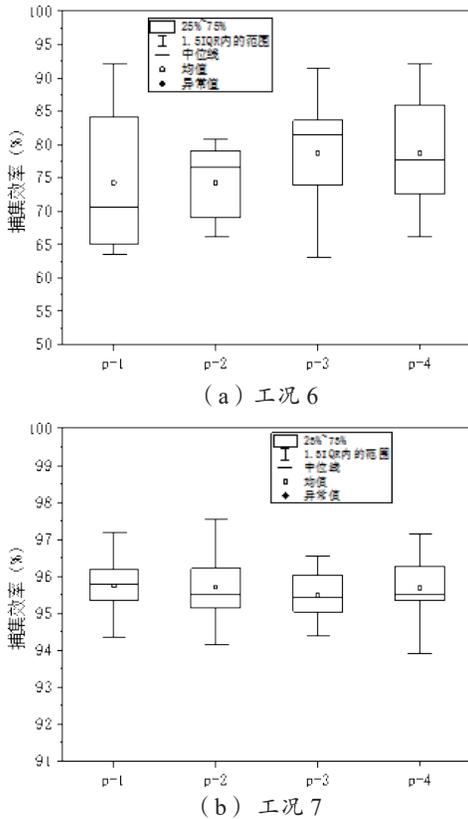


图 14 各局部排风罩的捕集效率随时间的变化

3.4.3 目标区标准化浓度比

虽然捕集效率能具体表示局部通风的控制效果,但不能体现整个建筑环境内的通风效果。为此,这里提出目标区标准化浓度,其定义为目标区域内的平均浓度与室内平均浓度之比:

$$h_c = \frac{C_g}{\bar{C}} \quad (3)$$

其中 h_c 为目标区标准浓度比; C_g 为目标区平均浓度; \bar{C} 为全室平均浓度。 h_c 值越高,有害物越多的聚集在目标区,而相对非工作区的有害物浓度就越低。运用捕集效率和目标区标准化浓度两个评价指标,不仅能够评价目标区域的控制效果,也能得到非目标区域的控制效果。

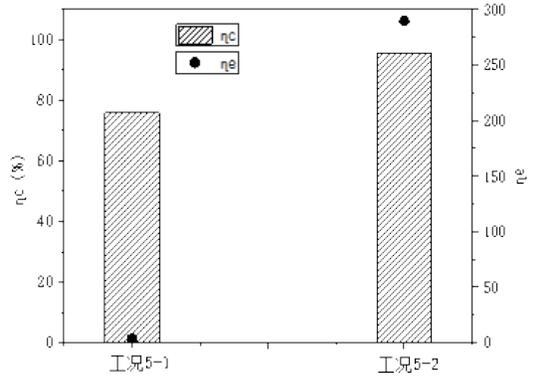


图 15 不同工况下通风指数

图 15 为不同工况的通风指标 η_c 和 η_e , 工况 6 和工况 7 通风情况下,室内的污染物去除效率分别为 76% 和 95.5%; 目标区标准化浓度 η_e 值分别为 3.77 和 289.8, η_e 值越小,则表明污染物扩散至非工作区域越多,局部排风罩对污染物的去除越困难。该结果同样表明,当增设环形射流装置,车间通风系统对局部污染物的控制效果较好。

若由于车间内空间布局无法增设环形射流装置,当污染源停止释放污染物,吸气罩经过一段较长时间,可以将室内的污染物收集排放,达到生产卫生要求;若要提高去除效率,可增大排风量,适当降低送风量。当增设环形射流装置,车间内两侧的空气龄较大,空气质量较差,可改变送回风口的位,来提高车间两侧的空气品质。多个污染源排放时,环形气幕仍有较好的隔绝效果,且每个排风罩的捕集效率高,抗干扰性强;同时也降低了送风量,降低了能耗。

4 总结

通过对制药车间原有通风系统和改进方案的研究,得到以下结论:

(1) 原料药的过滤分离工艺会产生大量颗粒粉尘和挥发性有机物 VOCs, 车间内原有的局部排风罩对污染物的控制效果受限,导致大量污染物泄漏扩散至车间其他区域,亟需重点治理。

(2) 气幕排风罩组成的吹吸式系统,在人员操作过程中能起到防护作用,且不影响人员操作,适用于过滤离心工艺的污染物控制。

(3) 原有排风罩的平均捕集效率为 74%~78%。而设置了吹吸式系统后,其捕集效率较为稳定,受送回风气流影响小,抗干扰性能增强,平均捕集效率提高到 94%~97%。

参考文献

[1] 赵文,马爱霞.我国医药行业发展现状研究[J].现代商贸工业,2015,36(3):4-6.

- [2] 苗泽华, 彭靖, 董莉. 工业企业环境污染与实施生态工程的激励机制构建——以制药企业为例 [J]. 企业经济, 2012, 31(12):10-14.
- [3] 罗琼, 王海宏, 孙彦玲. 银川某制药企业药物性粉尘对工人健康的影响 [J]. 现代医药卫生, 2017, 2:267-269.
- [4] 朱鸿志. 化工厂房通风设计要点的探析 [J]. 化工管理, 2015, 33:148.
- [5] 孙一坚, 沈恒根. 工业通风 [M]. 第4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [6] 林太郎. 工业通风 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [7] 许钟麟. 空气洁净技术原理 [M]. 第4版. 北京: 科学出版社, 2014.

一种有效的洁净厂房值班模式运行策略及实测效果分析

孟令坤

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

[摘要] GMP 要求无菌药品生产的洁净厂房空调系统应保持连续运行。本文对某一洁净厂房空调系统值班模式进行实测分析, 提出切换过程中洁净厂房维持基本参数的运行策略。

[关键词] 洁净厂房; 空调系统; 值班模式; 切换; 运行策略

0 前言

《药品生产质量管理规范》(2010 版)(简称人药 GMP)和《兽药生产质量管理规范》(2020 版)(简称兽药 GMP)中都给出“无菌药品生产的洁净区空气净化系统应当保持连续运行, 维持相应的洁净度级别, 因故停机再次开启空气净化系统, 应当进行必要的测试以确认仍能达到规定的洁净级别要求”。这就要求对于无菌药品生产的空气净化系统不能停机, 否则就需要重新进行验证。因此, 无菌药品的生产企业在非生产时间仍保持洁净区空气净化系统的连续运行。

洁净厂房根据不同生产状态的需要, 采用空调系统变工况运行, 是洁净厂房建筑节能的重要途径。特别是在制药厂房的空调系统运行中, 按照生产模式和值班模式交替运行, 能够在值班模式时大幅降低风机能耗, 因而具有很大的节能潜力。

在洁净厂房空调系统不同工况运行、以及在工况进行切换时, 会由于实际运行工况偏离原设计工况, 而引起房间余风量、压差等参数发生改变, 尤其是在工况切换过程中, 会产生压差的大幅波动, 甚至房间压差逆转的情况, 进而会对洁净厂房洁净度的维持带来很大的风险。本课题在前期对部分实际工程进行调研及测试时, 也证实了上述压差波动甚至逆转现象的存在。如何使洁净空调系统在多工况运行时, 尤其是在不同工况切换过程中, 维持房间压差的稳定, 对于保障房间洁净度等级, 将洁净度风险降至最低, 以及采用值班模式运行策略, 降低洁净厂房空调系统能耗具有重要意义。

1 洁净室常用的控制方案

表 1 为洁净室空调系统常用的几种控制方案

图中: CAV 为压力无关型定风量阀; VAV 为压力无关型变风量阀; ED 为电动密闭阀。

该项目由国家重点研发计划项目“洁净空调厂房的节能设计与关键技术设备研究”(课题编号: 2018YFC0705201)资助

I. 定送定排

送风、排风通过设置压力无关型定风量阀, 保证房间送风和回风/排风差值固定, 从而保证房间压力稳定。

II. 定送变排

送风设置压力无关型定风量阀, 回风/排风设置压力无关型变风量阀, 洁净室在运行过程中, 回风/排风根据压力的波动, 调节变风量阀的开度, 保证洁净室压力稳定。(此类型实际工程中较为常见)。

III. 变送定排

排风设置压力无关型定风量阀, 送风设置压力无关型变风量阀, 送风根据压力的波动, 调节送风变风量阀的开度, 保证洁净室压力稳定。(此类型实际工程中较为常见)

IV. 变送变排

洁净室送排风均设置压力无关型变风量阀, 根据房间压力波动情况, 调整送排风量, 保证房间压力稳定。但实际过程中, 会遇到送排风动作先后的逻辑问题, 实现起来比较麻烦, 比较常见的案例是在调试的时候送排风均按照变风量使用, 当调试完成后, 将送风或排风中的一个锁死, 系统就转换成 III 或 IV 的系统形式。

V. 等量切换

洁净室内经常会使用到如: B2 型生物安全柜、通风橱或负压解剖台等独立排风设备。这些排风设备排风量较大, 且设备的开启/关闭对于房间压力影响较大。有很多设计方案, 为了保证房间压力稳定, 在运行过程中要求独立排风设备不许关闭, 设备的消毒和维护都存在很大问题。笔者在设计过程通常采取等量切换的原则, 保证房间压力稳定。

2 值班模式案例分析

正如前文所述, 对于必须连续运行的洁净室, 可以通过值班模式, 即在非生产工况下降低换气次数, 来实现节能。

表 1 洁净室控制方案

		系统形式
I	定送定排	
II	定送变排	
III	变送定排	
IV	变送变排	
V	等量切换	

2.1 值班模式方案

双稳态定风量阀的使用，如图 1 所示：

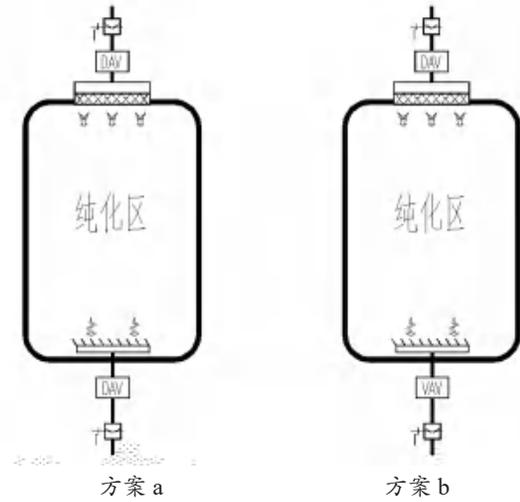


图 1 值班模式方案

图中：DAV—双稳态定风量阀；VAV—变风量阀

方案 a 和方案 b 中纯化区所在空调系统采用变频风机，送风总管安装压力传感器，维持送风总管压力稳定；方案 a 每个房间的送风和回风总管均安装双稳态定风量阀；方案 b 每个房间的送风总管均安装双稳态定风量阀，回风总管安装变风量阀。正常工作状态下，双稳态定风量阀处于高态运行，值班模式下双稳态定风量阀处于低态运行。方案 a 为表 1 中系统形式 I 的变形；方案 b 为表 1 中系统形式 II 的变形。

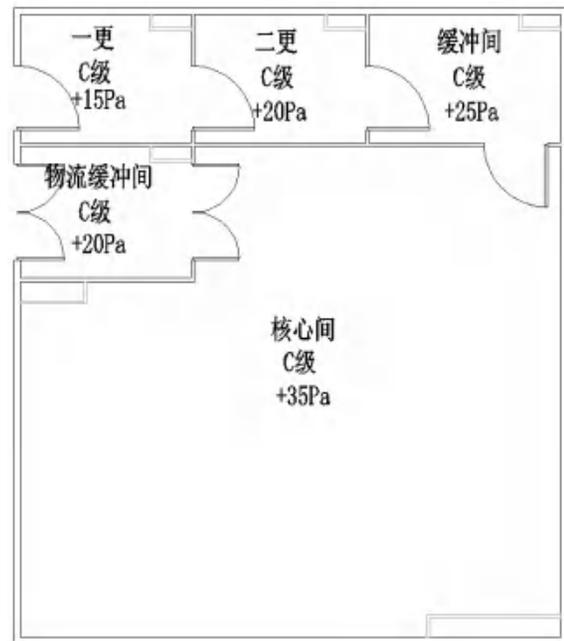


图 2 工艺平面图

2.2 下面对某一项目采用方案 a 进行改造。

空调采用一次回风系统，房间采用 H14 高效过滤器上送风，单层百叶风口侧下回风。设计按照送风设置双稳态定风量阀，回风设置双稳态定风量阀，低态风量为高态风量的 50%。空调系统如图所示：

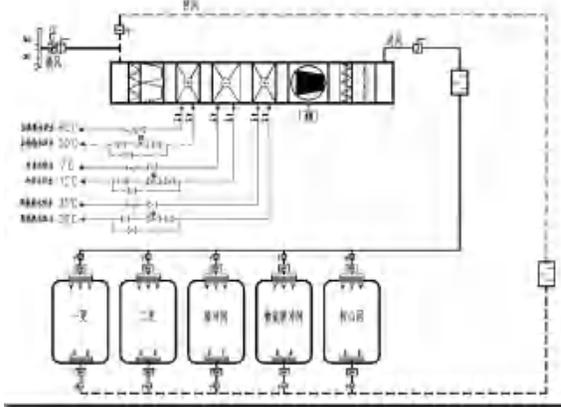


图 3 系统原理图

系统设计参数为：

表 2 系统设计参数

房间名称	换气次数	送风量 / (m ³ /h)	送风口规格	送风口个数	回风量 / (m ³ /h)	回风口规格	回风口个数	新风量 / (m ³ /h)
AHU 2-1								
一更	22.0	327	305×610	1	282	300×200	1	45
二更	22.0	327	305×610	1	282	300×200	1	45
缓冲间	22.0	356	610×610	1	308	400×300	1	49
物流缓冲间	22.0	327	305×610	1	282	300×200	1	45
核心间	22.0	3505	610×1220	4	3027	800×300	3	478
总计		4841		8	4181			4841

正常运行工况，双稳态定风量阀处于高态，调试各个房间满足设计压力梯度时，各个房间的送风量和回风量值；

表 3 工作模式风量实测值

房间名称	实测风量 / (m ³ /h)	实测回风量 / (m ³ /h)	实际换气次数	送风、回风量差值 / (m ³ /h)
一更	354	283	23.8	71
二更	350	290	23.6	60
缓冲间	377	323	23.3	54
物流缓冲间	346	303	23.3	43
核心间	3607	3152	22.6	455
总计	5034.0	4351		

后将阀门调整为低态，对各个房间送风量和回风量进行测试。

表 4 值班模式风量实测值

房间名称	实测风量 / (m ³ /h)	实测回风量 / (m ³ /h)	实际换气次数	送风、回风量差值 / (m ³ /h)
一更	206	110	13.9	96
二更	166	119	11.2	47
缓冲间	205	114	12.7	91
物流缓冲间	158	118	10.6	40
核心间	1677	1233	10.5	444
总计	2412.0	1694		

说明：一开始，将送风和回风阀门都按照高态 50% 的风量设置低态风量，调试的过程中发现，压力已经与设计值有较大偏差（几乎都小于设计的压差）；在现场调整了回风低态的风量，使得房间压力梯度满足设计压差及压力梯度后，锁定回风双稳态定风量阀低态风量。

调试完成后恢复正常运行。

2020 年 5 月 30 日 9:00 至 10:00 对系统进行连续监测，并在 9:30 时进行由工作状态切换至值班状态，在 9:45 时由值班状态切换回工作状态。

房间压力记录如图 4 所示：

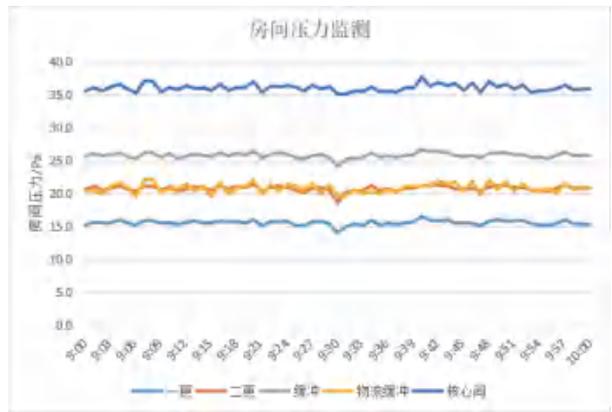


图 4 压力记录值



图 5 含尘粒子浓度实测值

测试的过程中，系统冷热源还处于调试状态，未正常使用，房间内的电气设备也同样未就位，所以未对温湿度参数进行测试。

从以上两图可以看出，送排风采用双稳态定风量阀，设置值班工况时，房间压差，洁净度等参数，基本上还可以满足相关规范和设计的要求。

3 总结

洁净室风量、压力梯度和洁净度三者之间是一个动态平衡过程。国内现有的规范或设计经验值，均存在很大的冗余。值班模式和工作模式切换过程中，洁净室的参数虽然有所波动，但都基本处于满足规范要求的范围内。

某洁净厂房净化空调系统设计

段梅子¹, 谢军龙¹, 杨晖², 赵志华²

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430000;

2. 汇智工程科技股份有限公司武汉分公司, 武汉 430000)

[摘要] 净化空调系统是洁净厂房生产的一个关键系统, 应用于社会的范围日益广泛。本文从空调系统形式、冷热源设计及系统节能等方面, 分析某洁净厂房净化空调系统设计方案, 并提出了优化设计建议。

[关键词] 洁净厂房; 净化空调系统; MAU+FCFU 系统; 节能

0 引言

净化空调系统应用于制药工业、医疗、纺织工业、电子工业及航天工业等。与常规工艺空调系统相比, 净化空调系统在空气过滤、气流组织、室内压力控制、风量及能耗方面有着明显的区别^[1,2]。与一般的舒适性空调相比, 净化空调系统在空气的热湿处理过程中, 具有送风量大、热湿比大及送风温差小等特点^[3]。一般空调系统的换气次数较小, 常在 10 次·h⁻¹ 以下, 而净化空调系统的换气次数远大于一般空调系统, 甚至可高达数百次^[4]。由于风量大、换气次数高, 加之有净化要求, 设有过滤系统, 其管道阻力比常规空调系统的阻力大一倍以上, 因此风机风压比一般空调系统风机风压高^[5], 使得净化空调系统风机能耗较高, 另外, 送风量大也会造成洁净室除湿和温度控制耗电量大^[6]。

净化空调系统应保证生产所需的温度、湿度、压差等环境参数^[7], 在防止车间内产品污染起到了重要的作用, 是洁净厂房生产的一个关键系统。相关研究表明, 洁净厂房的能耗是一般写字楼的 10~30 倍^[8], 在洁净厂房的总能耗中, 净化空调系统能耗约占 30%~65%^[9]。净化空调系统的能耗不容忽视, 需对其设计与运行环节合理实施节能措施。本文从系统形式、气流组织、压差控制、温湿度控制及系统节能措施等方面提出有针对性的策略, 保证系统运行的稳定性和可靠性的同时达到节能的目的。

1 工程概况及室内外设计参数

本项目中洁净厂房位于湖北省潜江市, 为一食品添加剂制剂厂房, 建筑总面积约 20685m², 洁净区总面积为 3450 m², 车间净化级别为 ISO8 级, 走廊及辅助间吊顶高度 2.8m, 洁净生产区共为 5 层, 主要功能间吊顶高度为 1 层 6m, 2 层 6m, 3 层 7m, 4 层 7m, 5 层 2.8m。

温度控制要求为: 18~26℃; 湿度控制要求为: 45%~65%; 换气次数 ≥15·h⁻¹。

室外气象参数为: 夏季空调室外计算干球

温度 t_w=35.3℃, 湿球温度 t_s=28.4℃, 大气压力 999.7hPa; 冬季空调室外计算干球温度 t_w=-2.4℃, 相对湿度 67%, 大气压力 1024.5hPa。

本文取最具有代表性的第二层为研究对象。该区域建筑面积约 2072 m², 洁净区总面积约 770 m²。净化空调系统设计冷负荷为 420kW, 设计热负荷为 330kW。

2 净化空调系统设计

针对洁净厂房生产需要和净化空调系统的特点, 本文提出新风+洁净单元循环(MAU+FCFU)系统, 该系统由集中式新风处理机组+洁净单元模块式循环机组+自动控制系统组成, 能解决常规净化空调系统能耗大、运行模式固定化、调节不精确等问题, 降低运行成本, 适用于有洁净要求的生物实验室、药品生产车间、电子产品生产车间等区域。MAU+FCFU 系统为温湿度独立控制系统, 新风机组负责室内湿度的控制, 通过电动比例积分阀及传感器自动调节冷(热)源流量大小来控制新风送风含湿量; 洁净单元模块式循环机组负责房间的温度控制, 通过电动比例积分阀及传感器自动调节冷(热)源流量大小来控制房间内的温度。MAU+FCFU 系统采用湿度优先控制策略, 将温湿度解耦进行控制, 新风承担室内全部潜热负荷和部分显热负荷。自动控制系统采用温、湿分控技术和区域分段自动控制技术, 在保证室内温、湿度符合要求的前提下, 有效地控制各区域的送风参数。根据不同的生产需求选择不同的模块组合, 可达到制冷、除湿、加热、加湿等不同工况的要求。

2.1 冷热源设计

净化区 MAU+FCFU 系统每层分别选用一台新风机组及若干台洁净单元模块式机组以满足车间生产和净化需求, 冷源由螺杆式冷水机组提供, 冷冻水供水温度为 7℃/12℃。新风机组热源由蒸汽提供, 蒸汽供气压力 0.3MPa, 洁净单元模块式机组热源由容积式蒸汽—热水换热器提供, 热水温度 60℃。

2.2 新风机组设置

集中式新风处理机组由新风段 + 粗中效过滤段 + 表冷挡水段 + 风机段 + 均流段 + 蒸汽加热段 + 蒸汽加湿段 + 中效过滤段 + 出风段组成，如图 1 所示，二层新风机组设备参数见表 1。

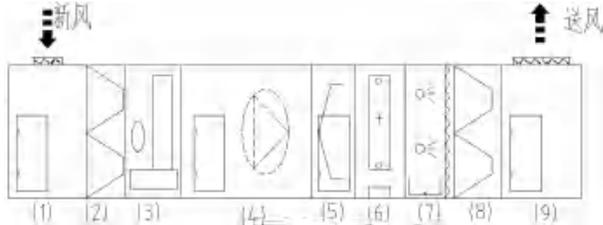


图 1 新风机组示意图

表 1 新风机组设备参数表

序号	名称	备注
1	新风段	顶开新风口，配手动密闭调节阀及电动调节阀，外开检修门
2	粗中效过滤段	袋式粗效过滤器：G3，袋式中效过滤器：F5
3	表冷挡水段	冷量：420kW，设挡水板
4	风机段	变频风机功率：30kW，余压 950Pa，外开检修门
5	均流段	内开检修门
6	蒸汽加热段	加热量：330kW
7	蒸汽加湿段	加湿量：165kg/h，设挡水板
8	中效过滤段	袋式中效过滤器：F9
9	出风段	顶开送风口，配手动密闭调节阀，内开检修门

2.3 洁净单元模块式循环机组设置

洁净单元模块式循环机组由循环回风段 + 表冷（加热）段 + 风机段 + 中效过滤段 + 出风段 + 冷凝水加热保护装置组成。FCFU 机组各设备参数按照各车间负荷及风量需求配备。FCFU 机组具有体积小、重量轻、安装及维护方便、对车间的荷载及夹层的高度的要求相对较低等优点。

2.4 夏、冬季空气处理过程焓湿图

MAU+FCFU 系统夏、冬季空气处理过程的焓湿图如图 2 所示，MAU 机组仅负责新风集中处理，新风为全排风系统，FCFU 机组仅负责室内循环风处理，两种空气处理机组分别独立对室外新风和室内循环风进行处理。

2.5 洁净室风量设计参数

根据相关规范，洁净室的新鲜空气量 G1 应取下列两项中的最大值：

- (1) 补偿室内排风量和保持室内正压值所需新鲜空气量之和；
- (2) 保证供给洁净室内每人每小时的新鲜空气量不小于 40 m³。

洁净室的送风量 G 应取下列三项中的最大值：

- (1) 满足空气洁净度等级要求的送风量；
- (2) 根据热、湿负荷计算确定的送风量；
- (3) 上述 G1 计算值。

综上所述，二层各车间的风量如下表 2 所示。

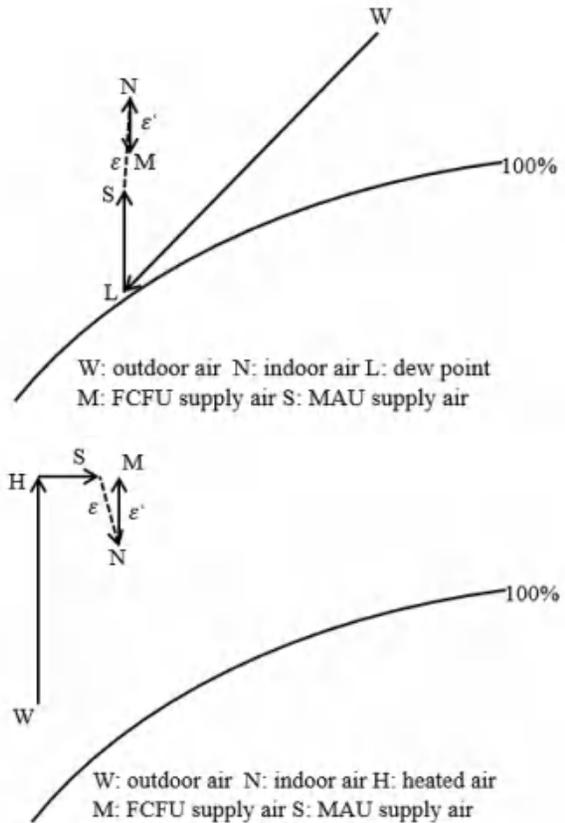


图 2 夏、冬季空气处理过程焓湿图

表 2 厂房二层各车间风量表

房间名称	面积 /m ²	吊顶 /m	换气次数 /h ⁻¹	正压 /Pa	总风量 / (m ³ ·h ⁻¹)	设计总风量 / (m ³ ·h ⁻¹)
换鞋	9.5	2.6	12	0	295.46	300
脱衣洗手	14.7	2.6	15	5	571.74	570
更洁净衣	15.5	2.6	18	15	728.21	730
气闸	8.1	2.6	18	20	377.21	380
工衣收发室	13	2.6	15	0	488.67	490
工衣整理消毒室	21	2.6	18	20	965.48	970
工衣清洗室	18	2.6	18	15	843.8	840
物缓冲间 1	6.4	2.6	12	5	198.74	200
物缓冲间 2	7.1	2.6	15	15	278.07	280
准备间	16	2.6	18	20	731.95	730
工卫间	7.8	2.6	18	15	362.7	360
质控室	9	2.6	18	25	420.73	420
器具收发室	9.8	2.6	12	0	304.2	300
器具存放	25	2.6	18	20	1159.7	1160
器具清洗	32	2.6	18	15	1488.7	1490
洁净区化浆间	50	5.5	26	20	7162	7160
普货混合间	122	5	19	20	11571	11580
筛分间 1	74	5.8	18	20	7725	7730
筛分间 2	199	4	18	20	14328	14320
洁净走廊	92	2.6	22	25	5264	5270

2.6 洁净室压差及气流组织设计

按相关规范规定，洁净室与周围的空间必须维持一定的压差：不同等级的洁净室之间的压差不宜小于 5Pa，洁净区与非洁净区之间的压差不应小于

5Pa, 洁净区与室外的压差不应小于 10Pa, 同级别洁净区之间的压差保持在 3-5Pa 之间, 洁净区排风房间与其周围洁净区房间应保持相对负压。为维护房间压差, 洁净区内回(排)风口应装设空气阻尼层(建议安装粗效过滤器)。车间的压差设置原则如图 3 所示, 二层各功能间正压设置见表 2。

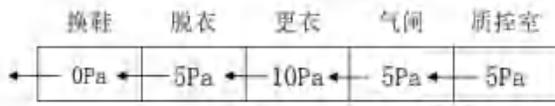


图 3 部分功能间压差控制

洁净区净化空调系统送回风形式为顶送侧下回的形式, 气流流型为非单向流, 送风速度 0.5 ~ 0.6m/s。经气流组织仿真计算, 顶送侧下回的气流组织形式能够满足洁净厂房设计规范要求的室内空气洁净等级。

3 洁净室联锁控制

洁净区送风、回风、排风和消毒系统的启闭联锁如图 4 所示。

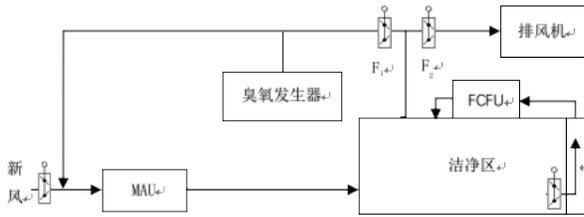


图 4 消毒排风示意图

当空调系统正常工作时, 运行程序为: 先开送风机、新风阀, 再启动回风阀、排风机、排风阀, 关闭时联锁程序相反。

当使用臭氧消毒时, 运行程序为: 开送风机, 关新风阀、排风机、阀 F2, 开臭氧发生器、阀 F1, 消毒时间根据工艺要求确定; 结束后, 关臭氧发生器、阀 F1, 开新风阀、排风机、阀 F2, 排风 0.5 小时。

当使用熏蒸消毒排风时, 运行程序为: 开送风机、新风阀、排风机、阀 F2, 关阀 F1, 排风 2 小时后, 关排风机、阀 F2, 开阀 F1, 关送风机、新风阀。

不同运行模式下个设备的开启情况如表 3 所示。

表 3 运行模式联锁

名称	运行模式		
	空调	消毒	排风
新风机组送风机	开	开	开
粗中效过滤	开	关	开
洁净区排风机	开	关	开
消毒排风机	开	关	开
新风阀	开	关	开
回风阀	开	开	关
臭氧发生器	关	开	关

4 净化空调系统节能对比

洁净厂房净化空调系统常用形式为一次回风系统, 表 4 为本洁净厂房净化空调系统采用一次回风系统与 MAU+FCFU 系统夏季能耗情况, 由能耗对比结果可见, MAU+FCFU 系统节能率最高可达 22%。相较于常用的一次回风系统, MAU+FCFU 系统节能效果较好。

表 4 系统能耗对比

楼层	一次回风系统			MAU+FCFU 系统		节能效率 /%
	新风量 / (m³/h)	回风量 / (m³/h)	总冷负荷 / kW	新风冷负荷 / kW	循环冷负荷 / kW	
一层	13170	22350	355	270	32	15
二层	20330	42550	579	420	61	17
三层	15120	43390	476	310	62	22
四层	14920	38710	454	305	55	21
五层	13140	30920	387	270	44	19

5 结语

净化空调系统的使用在洁净厂房生产作业过程中起到重要的作用, 由于系统风量大、阻力大、能耗高, 净化空调系统的使用会增加运行成本。在实际的工程设计中, 应在系统形式设计、设备选型、气流组织设计、系统控制等方面予以重视, 并结合设计条件、工程特点等因素, 采取经济合理、技术先进、安全可靠的设计方案。本文针对某洁净厂房, 提出 MAU+FCFU 系统, 从冷热源、正压、气流组织及系统节能等方面, 分析 MAU+FCFU 系统, 其优势如下:

(1) 与一次回风系统相比其节能率可达 22%, 节能效果较好;

(2) 避免了空气集中处理的系统需在吊顶内布置大量风管的问题, 对建筑空间的要求更低, 降低建筑成本, 同时降低风管布置成本及维护难度, 经济性更佳;

(3) 可实现分区自控, 可根据生产的不同需要达到灵活的控制, 实际情况多风向出风, 送风方式多样化;

(4) FCFU 机组冷源可根据实际情况多样化, 可由数码变容直膨机、风冷热泵机组、风冷模块机组及水冷模块机组等制冷设备提供冷源。

参考文献

[1] 姚洪娥. 某硅晶片生产厂房净化空调设计 [J]. 暖通空调. 2010, 40(04): 22-25.
 [2] 许磊, 郝旭军, 葛贵武. 某生物制剂车间净化空调系统设计浅析 [J]. 洁净与空调技术. 2021(01): 91-94.
 [3] 张小芬, 郜义军, 李先庭. 卷烟厂空调系统及节能研究现状 [J]. 暖通空调. 2011, 41(11): 107-113.
 [4] 何强勇. 洁净手术室空调系统热湿处理过程探讨

[J]. 机电信息 . 2012(25): 62-65.

[5] Li X, Ma X Y, Hao Y F. Energy Saving Analysis of Clean Air Conditioning System in Pharmaceutical Company[J]. Advanced Materials Research. 2014, 3295(1954): 166-169.

[6] Shan K, Wang S. Energy efficient design and control of cleanroom environment control systems in subtropical regions – A comparative analysis and on-site validation[J]. Applied Energy. 2017, 204: 582-595.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部 .GB 50073—

2013 洁净厂房设计规范 [S]. 北京 , 中国计划出版社出版 ,2013.

[8] 贺志勇 . 洁净厂房空调系统节能技术的研究 [J]. 洁净与空调技术 . 2018(01): 46-51.

[9] Tsao J, Hu S, Xu T, et al. Capturing energy-saving opportunities in make-up air systems for cleanrooms of high-technology fabrication plant in subtropical climate[J]. Energy and Buildings. 2010, 42(11): 2005-2013.

直线式饮料灌装区的气流组织的设计方法

常乐, 汤海斌, 钟林源, 王刚, 潘志刚

(杭州娃哈哈集团有限公司, 杭州 310018)

[摘要] 为了对灌装操作空间提供分区域的不同风速送风和保证单向的气流组织, 本研究通过 CFD 数值模拟技术严格设计并验证了送风顶盖内的喉部和组合导流板的细节尺寸, 使得送风顶盖具有较好的流量分配和气流引导作用。首先定量计算了多种喉部尺寸选型的分流效果, 使得三个区域的流量分配符合预设要求。之后又优化了组合导流板对气流的引导作用, 增加了短挡板, 使气流按照预定路线对孔板壁面送风, 避免了涡流和逆向气流产生。气流通过送风顶盖的分流与引导, 灌装区气流流线齐整规则, 流速分区且均匀, 同时避免了瓶架缝隙内出现高速气流。本研究将设计与 CFD 模拟相结合, 为灌装区洁净送风提供了优化设计思路与可靠送风装置。

[关键词] 饮料灌装; 洁净生产; 导流板; 均匀送风

无菌冷灌装的饮料产品口味更新鲜, 营养更丰富, 还能降低能耗, 减少瓶重, 节约成本, 但工艺要求较高^[1,2]。灌装时如果发生微生物污染将会导致产品变质, 具有一定的风险^[3,4]。因此为灌装机提供超高级别的洁净送风对于无菌灌装非常重要^[5,6]。对于灌装机内的执行灌装操作的重点区域, 单向流的气流组织设计原则^[7-9]如下: 1. 尽量减少涡流, 从而避免微尘在涡流内回旋积累; 2. 防止上升气流的产生, 减少微尘逆向污染上游较洁净的空气; 3. 尽量保证流向单一, 流型规整, 流线不交叉。为了实现以上气流组织要求, 对灌装操作区域高要求送风, 本研究采用了送风顶盖对过滤后的空气进行流量分配和气流引导。

1 送风顶盖的流量分配与气流引导功能

灌装操作重点区域的洁净送风路径如图1所示, 首先超高效过滤后的洁净空气自送风管进入送风顶盖, 送风顶盖包含挡板、组合导流板和网孔板。空气经过网孔板后, 垂直吹向瓶架和灌装瓶。

送风顶盖的主要作用是流量分配。在灌装操作

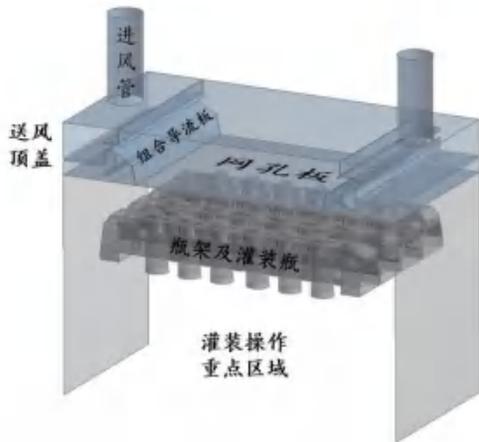


图1 灌装操作区域和送风顶盖

重点区域中根据机械布局把该空间分成三个区, 如图2所示。灌装瓶都集中在中间即一区, 自由空气体积较少, 因此一区需要的单位面积流量也较少, 孔板下的送风速度保持在 0.25 m/s 即可。如果风速设定太高, 那么在瓶架机械和瓶身之间缝隙中就会形成高速气流, 引起噪音和振动。外壁与瓶架之间区域即三区, 自由空间较多, 因此所需的单位面积流量较多, 孔板下的送风速度保持在 0.5 m/s。在灌装瓶与自由空间之间的过渡区, 即三区和一区之间, 设置为二区。为尽量减少三区近外壁面的空气掺混进入灌装瓶区域, 特意在二区设置了较高速的气流 0.8 m/s, 形成类似气帘的效果, 将一区与三区适当隔离。

为了实现三个分区的流量分配和流速控制, 需要在送风顶盖内设置组合导流板并严格设计其几何尺寸和相对位置。而且在分配流量的同时, 也要注意引导气流形成稳定合理的流动路径。

2 喉部的流量分配设计与数值模拟

由于对灌装操作区域进行了分区, 提供不同的送风速度, 在送风顶盖内部就需要通过挡板和导流板的严格设计, 来分配三个分区的流量。按照图2所示三个区域预设定的风速, 乘以三个区域的面积,



图2 灌装操作区分区送风

可以得到流量分配比例为，一区流量占总送风量的32%，二区25.5%，三区42.5%。

流量分配最重要的一个细节部位就是喉部。喉部位置如图3所示，由上挡板下端，直导流板起始端，弧导流板起始端和下挡板上端组成。上游气流经过此处，挡板和导流板将气流分割和导流，分配至三个流道之中，然后通过网孔板对三个区域送风。因此喉部中各个导流板的相对位置至关重要，在后续研究中也发现，相对位置变动1mm，也会引起流量分配的显著变化。

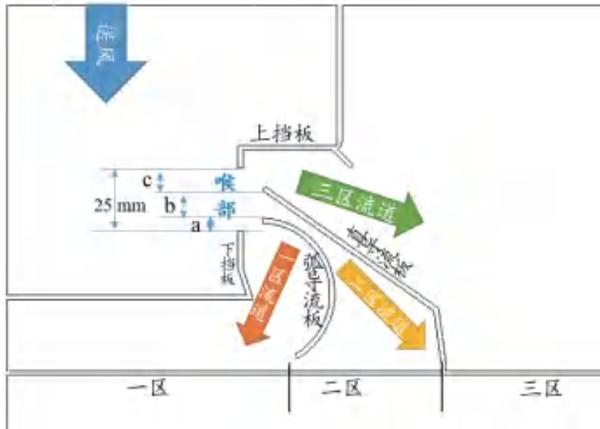


图3 送风顶盖内的喉部、挡板和导流板

喉部总高度为25mm，c尺寸为上挡板下沿至直导流板的垂直方向间距，b尺寸为直导流板至弧导流板的垂直方向间距，a尺寸为弧导流板至下挡板上沿的垂直方向间距。当总高度固定为25mm时，abc尺寸的相对变化则成为流量分配的关键。为此在设计尺寸时，采用了CFD数值模拟方法对尺寸改变时的流量分配情况进行了细致的模拟。

CFD计算使用的模型如图4所示。由于网孔板孔径较小，分布较密，在划分网格时将消耗大量的计算资源，因此截取了长度为0.2m的一段送风顶盖，来研究喉部尺寸的改变对流量分配的影响。数值模拟采用了使用雷诺平均N-S模型，选取RNG k-ε湍流模型。采用SIMPLEC算法解决压力速度耦合问题以加快单个迭代步中的收敛速度。本文中不考虑温差或压力差的引起的自然对流，送风温度设定为20℃。

模型中所有导流板和挡板设置为壁面，网孔板下延伸0.1m的空间承接孔板出流的空气，该空间设为压力出口。圆管进风口设置为速度入口，按照三个区域预设定的速度如图2所示，乘以三个区域对应的网孔板面积，可以得到该模型总送风量为0.0752 m³/s，单侧（单个圆管）0.0376 m³/s。

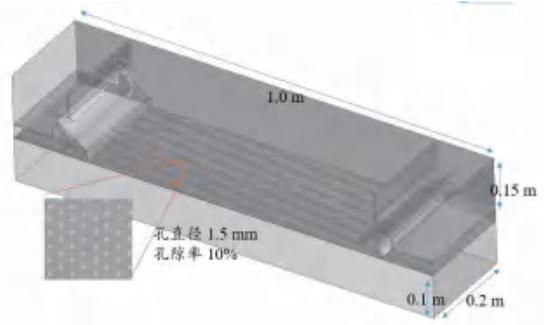


图4 CFD数值模拟中使用的模型



图5 灌装操作区域送风效果流线图

3 送风顶盖下灌装操作区域送风效果

如图5所示，通过严格设计了送风顶盖内的喉部与组合导流板，对气流进行流量分配和气流引导，孔板下送风的效果符合预期设定。首先流线非常均匀齐整，除了在瓶底部不可避免的有较小涡流，整体流向单一皆向下。其次，分区的流速控制也有效果，二区流速保持在0.8m/s，起到了一定的隔离作用，同时一区即近外壁面区域的流速，也能保证在0.5m/s，满足洁净送风要求。值得注意的是，在三区即灌装瓶区域，风速也不会太高，可以发现在瓶身和瓶架之间的缝隙处，流速升高但没有超过1.0 m/s。

由此可以发现，在严格设计细节尺寸后送风顶盖非常好的起到了分配流量调节风速的作用，同时送风顶盖内实现了良好的气流引导效果，使得孔板下送风的流速均匀，流线齐整。

4 结论

本研究在优化设计过程中，采用了CFD数值模拟技术，对送风顶盖内各处细节尺寸的进行了气体流动计算和优化验证，使送风符合预期要求，保证了灌装操作区的高要求的气流组织。对于流量分配，喉部中各个导流板的相对位置至关重要，相对位置变动1mm，也会引起流量分配的显著变化。通过计算了多种喉部尺寸选型分流效果，从而确定了喉部9-11-5 mm的组合，使得三个区域的流量分配符

合预设要求。通过严格设计送风顶盖,可实现较好的实现分区流速控制和气流引导功能,使灌装瓶区域得到洁净送风保障,与外壁面气流相隔离,同时限制了瓶身和瓶架之间的缝隙处的较高流速。整体保持流线均匀齐整,流向单一向下。

本文提供了一种将设计与CFD模拟相结合的优化思路,尤其是对于内部细节尺寸较多且影响因素不确定,为快速实现送风效果,可以通过多工况的模拟结果,来选取最佳设计尺寸,同时也可以直观发现较不利的影响因素和设计短板,实现对灌装区高质量高级别的洁净送风。

参考目录

[1] 赵益臻等 .PET 瓶椰汁饮料的开发及超洁净灌装技术的应用 [J]. 饮料工业 ,2018, 21(01): 13-19
[2] 江地 . 洁净和超洁净无菌灌装工艺设备和灌装流程应用 HACCP 方法的浅析 [J]. 饮料工业 , 2008, 07:35-38

[3] 弓耀忠 . 加强食品领域洁净度监测的必要性 [J]. 食品工程 ,2013, 04:5-7
[4] 周立法 . 饮料洁净室无菌灌装的四大因素分析 [J]. 食品安全导刊, 2011, 09:46-47
[5] 刘春艳等 . 红河州瓶 (桶) 装饮用水厂灌装车间空气洁净度调查 [J]. 环境科学导刊 ,2019, 38(S1):69-71
[6] 张春鹏, 王波, 李美桃 . 徐州市桶装水厂灌装车间空气洁净度调查 [J]. 职业与健康, 2019, 35(07):908-910
[7] 李杨, 唐旺, 廖图 . 单向流洁净室洁净度控制方法 [J]. 环境工程, 2015, 33(S1):405-409
[8] 周玉岩, 高燕霞, 冯丽 . 辐流洁净室的建立与洁净度检测方法的研究 [J]. 中国医院建筑与装备, 2015, 09:98-101
[9] Tomás and Norton. CFD in the Agri-Food Industry. A maturing engineering design tool, Computers and Electronics in Agriculture, 2013

测试气溶胶对高效空气过滤器效率 测试结果的影响研究

曹冠朋^{1,2}, 冯昕^{1,2}, 江锋³, 张惠^{1,2}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建科环能科技有限公司, 北京 100013;
3. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

[摘要] 本文在高效过滤器效率测试标准方法基础上, 对标准钠焰法进行了改进, 并探究了上游不同气溶胶物质对计数法测试的影响, 同时也探究了中效过滤器对上游测试气溶胶的消静电效果。研究表明: 改进钠焰法上游气溶胶计数几何平均粒径可达 90nm 左右, 更接近 MPPS 粒径; 和标准钠焰法相比, 改进钠焰法测试效率有较稳定的减小, 但减小值少于一个数量级。NaCl 尘源计数法测试效率均明显低于标准钠焰法和改进钠焰法, 且差别达到一个数量级, 即效率值少一位“9”。NaCl 尘源、KCl 尘源和 PAO 尘源计数法对比, 前两者效率测试结果接近, 且均高于 PAO 尘源计数法, 个别测试结果的差别可达到一个数量级, 说明不同性质物质的气溶胶可引起计数法测试效率的差异。中效过滤器对 NaCl 气溶胶可起到一定的消静电作用。

[关键词] 粒径分布; 过滤效率; 改进钠焰法; 计数法; 气溶胶; 消静电

0 引言

在高效过滤器效率检测的现行国家标准中, 推荐钠焰法作为高效过滤器及滤料效率检测的基准试验方法, 计数法作为超高效空气过滤器及滤料效率的基准试验方法^{[1][2]}。钠焰法测试时, 氯化钠气溶胶的计数峰值直径及计数几何平均直径在 40nm~50nm, 一般小于过滤器的最易透过滤径 (MPPS)^[3], 而根据研究^[4-7], 用钠焰法测试滤料时, 不同的粒径分布影响效率测试结果, 所以有必要优化钠焰法测试时上游气溶胶粒径分布使其平均粒径接近 MPPS 粒径, 使钠焰法测试效率更接近 MPPS 效率。

另一方面, 现行国家标准中计数法测试可采用的多分散气溶胶物质包含液体物质如 DEHS、DOP 等, 固体物质如 NaCl, 但不同物质产生的气溶胶颗粒有一定差异, 是否会影响计数效率不清楚。此外, 计数法测试时, 荷电颗粒比非荷电颗粒可以更有效地被过滤器除去, 所以标准中推荐使用电中性的颗粒来检测过滤器, 是否可通过更为简易的方式进行电中和也有必要进行探究。

针对以上问题, 本文通过实验方法对以下内容进行了研究:

1) 钠焰法测试时, 对于上游气溶胶粒径分布的优化方式, 本文拟采用改变 NaCl 溶液浓度及让喷雾后的原始气溶胶经过一道中效过滤器处理使其平均粒径更接近 MPPS 粒径, 并探究不同粒径分布对钠焰法测试的影响程度;

2) 计数法测试时, 分别采用 NaCl、KCl 和

PAO 作为上游气溶胶, 以探究不同气溶胶物质对计数法测试的影响程度; 同时也探究中效过滤器对上游测试气溶胶的消静电效果。

1 实验研究

1.1 实验装置

高效过滤器效率测试采用三种气溶胶分别进行测试, 即 NaCl 和 KCl 和 PAO。各个高效过滤器效率测试分别在效率测试钠焰法试验台和计数法试验台上分别进行, 同时根据实验需要分别对原有试验台进行了改造, 即在原有试验台发生尘段和缓冲箱之间加一个中效过滤器箱体, 当需要时安装中效过滤器, 即气溶胶发生器发尘后经过一道中效过滤器处理以作为高效过滤器效率测试尘源, 采用原始尘源 (不经中效过滤) 时则取下中效过滤器, 保留中效过滤器箱体。

1.2 实验材料及仪器

实验中高效过滤器效率测试共采用不同级别的多块高效过滤器, 见表 1。

表 1 实验中高效过滤器类别

编号	型号	级别	额定风量
1	610mm×610mm×90mm 无隔板	H14、H13、H12、 H11、H10	1000m ³ /h
2	610mm×610mm×292mm 有隔板	H14	3400m ³ /h

实验中使用仪器如下:

1) 高效过滤器上游气溶胶粒径分布测试用宽范围颗粒粒径谱仪 (Wide Range Particle Spectrometer, WPS), 测试粒径范围为 10nm~10μm。

2) 高效过滤器钠焰法效率测试均采用标准试验台钠焰光度计进行测试。

3) 高效过滤器计数法效率测试时均采用 2100C 型激光粒子计数器, 测试粒径档为 0.1 μm 、0.2 μm 、0.3 μm 、0.5 μm 、0.7 μm 、1.0 μm , 效率测试时上游气溶胶采样均通过稀释倍数经自校标定的稀释器采样测量。

2 实验结果及分析

2.1 钠焰法气溶胶粒径分布

实验中, 采用了不同的发生条件, 包括改变 NaCl 溶液浓度、喷雾后经中效处理, 以产生不同粒径分布的 NaCl 气溶胶, 作为钠焰法测试高效过滤器效率时的上游尘源, 不同发生条件发生的 NaCl 气溶胶粒径分布情况见表 2。

从表 2 中可以看到:

1) 喷雾发生的 NaCl 气溶胶经过一道中效过滤器处理后, 计数几何平均粒径明显增大, 最大增大达相同溶液浓度未经中效处理的 1.8 倍左右, 和标准喷雾条件相比最大增大达 2.1 倍, 达 90nm 左右, 更接近 MPPS 粒径, 计重几何平均粒径略有变小, 标准偏差均明显变小;

2) 经过不同的中效处理后, 粒径变化有所不同, 经 F8 中效处理的气溶胶计数几何平均粒径增大略高于经 F7 中效处理。

2.2 不同钠焰法及计数法对比

2.2.1 中效过滤尘源对钠焰法影响

实验中首先用标准钠焰法、NaCl 溶液浓度为

2%, 且经 F7 袋式中效过滤器过滤后的气溶胶作为测试尘源的改进钠焰法、NaCl 溶液浓度为 10% 的改进钠焰法以及 NaCl 溶液浓度为 10%, 且经 F7 袋式中效过滤尘源的改进钠焰法分别测试同一块高效过滤器, 以研究经中效过滤器过滤后的不同尘源对钠焰法测试结果的影响, 被测高效过滤器级别为 H14, 型号为 610mm \times 610mm \times 292mm, 有隔板, 额定风量为 3400m³/h。

从图 1 中可以看到:

1) NaCl 溶液浓度为 2% 或 10% 时, 发生气溶胶经过 F7 袋式中效过滤与不经中效过滤尘源的钠焰法相比, 测试效率均略有降低, 效率值变化均在第五位“9”上, 且变化值少于一个数量级;

2) 同一尘源条件下, 测试风量减小一半, 过滤器效率测试值增加, 变化值也少于一个数量级。

2.2.2 标准钠焰法、改进钠焰法和 NaCl 尘源计数法对比

实验中分别用标准钠焰法、NaCl 溶液浓度为 10%, 且经 F8 中效过滤器过滤后的气溶胶作为测试尘源的改进钠焰法和 NaCl 作为测试尘源的计数法测试不同型号的高效过滤器, 被测过滤器级别 H11、H13(型号为: 610mm \times 610mm \times 90mm, 无隔板), 额定风量为 1000m³/h。不同测试方法测得过滤器效率结果对比见图 2。

从图 2 中可以看到:

1) 经 F8 中效过滤后, 与不经中效过滤尘源的标准钠焰法相比, 不同过滤器在不同风量下测试效



图 1 不同尘源时 H14 过滤器不同风量不同钠焰法效率对比 (左图 2%NaCl; 右图 10%NaCl)

表 2 不同喷雾条件 NaCl 气溶胶粒径分布情况

NaCl 溶液浓度	上游发生尘条件		计数几何平均粒径 / μm	计数几何标准偏差 GSD	计重几何平均粒径 / μm	计重几何标准偏差
	喷雾压力 /MPa	中效类型				
2%	0.6	无	0.0425	1.86	0.4531	3.14
2%	0.6	F7 袋式	0.0679	1.83	0.4337	2.29
10%	0.6	无	0.0507	1.85	0.5235	3.48
10%	0.6	F7 袋式	0.0719	1.77	0.3604	2.36
10%	0.6	F8 纸质	0.0903	1.84	0.4342	2.04

注: 2%NaCl 溶液浓度喷雾条件即标准钠焰法测试时的喷雾条件, 此处称为标准钠焰法, 其余喷雾条件均为改进钠焰法喷雾条件; 喷嘴均为 Collison 喷嘴。

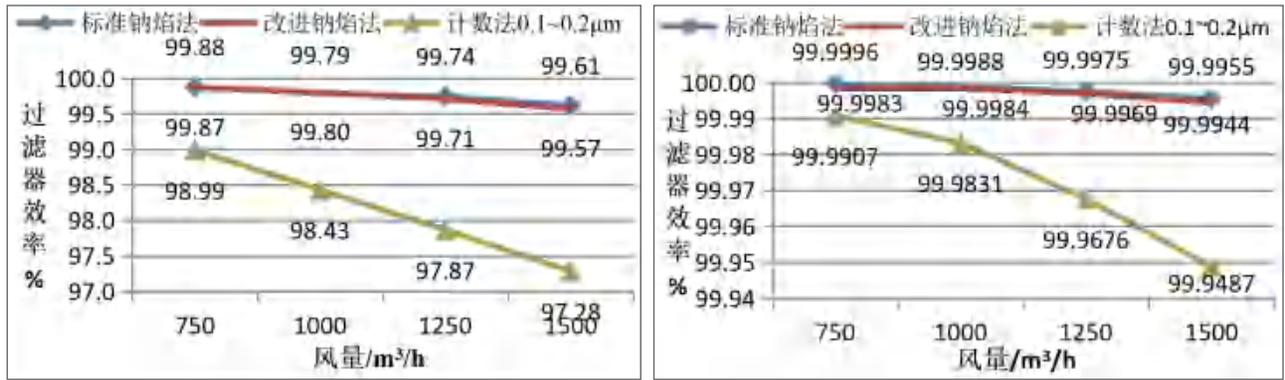


图2 H11 (左图) 和 H13 (右图) 过滤器不同风量不同测试方法效率对比

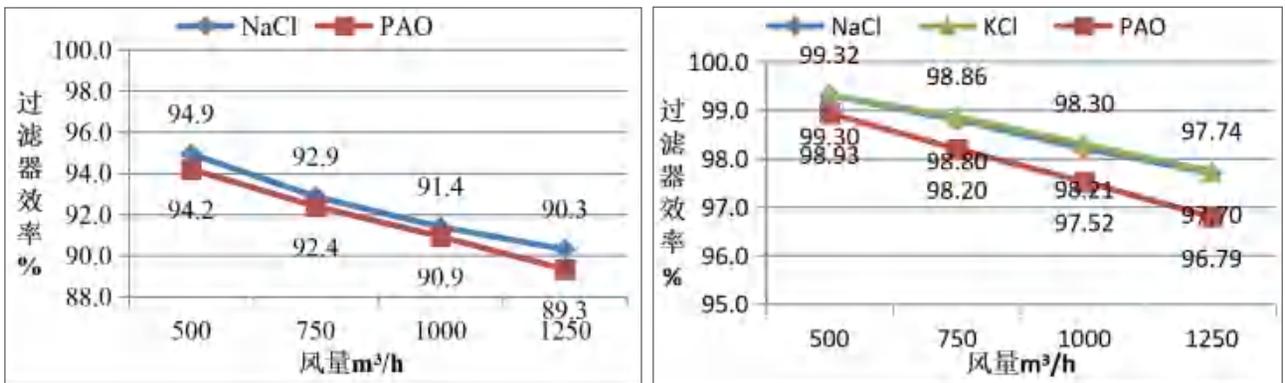


图3 不同尘源时 H10 (左图) 和 H11 (右图) 过滤器不同风量下计数法效率对比 (0.1~0.2μm)

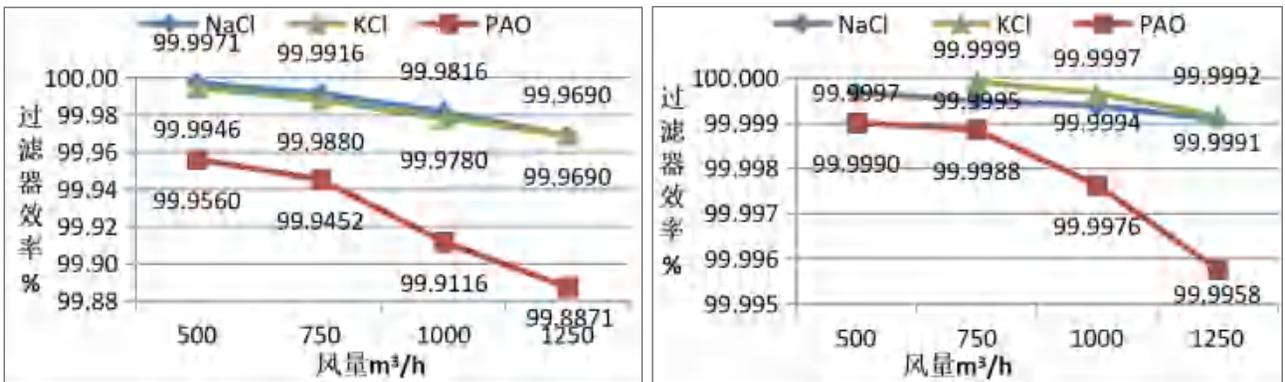


图4 不同尘源时 H13 (左图) 和 H14 (右图) 过滤器不同风量下计数法效率对比 (0.1~0.2μm)

率均略有降低, 说明上游气溶胶粒径分布变化可影响钠焰法测试结果;

2) 不同风量下, NaCl 尘源计数法效率均明显低于标准钠焰法和改进钠焰法, 且差别达一个数量级, 即效率值少一位“9”, 说明不同测试原理的测试方法之间差别更大。

2.3 不同尘源的计数法对比

为了解不同尘源对计数法效率测试的影响, 实验中分别采用 NaCl、KCl 和 PAO 作为测试尘源, 用计数法测试同一高效过滤器效率, 并进行对比。实验中 NaCl 和 PAO 尘源测试时, 被测过滤器上

游尘源均经过一道 F8 纸质中效过滤器过滤, 且均未进行电中和处理; KCl 尘源测试时, 上游尘源不经过中效过滤器过滤, 但经电中和处理。测试过滤器级别 H10、H11、H13 和 H14, (型号为: 610mm×610mm×90mm, 无隔板), 测试结果对比见图 3、图 4。

从图 3 和图 4 中可以看到:

1) NaCl 尘源计数法和 KCl 尘源计数法相比, 二者不同粒径档效率测试值均较接近; 测试时, KCl 尘源计数法尘源经电中和器电中和处理, 但尘源未经中效过滤, NaCl 尘源计数法尘源未经电中和处

理,但经中效过滤,说明中效过滤器过滤后可起到对 NaCl 气溶胶的消静电作用,从而使其测试结果接近电中和处理的 KCl 尘源计数法;

2)NaCl 尘源、KCl 尘源和 PAO 尘源计数法对比,前两者效率测试结果接近,且均高于 PAO 尘源计数法,个别测试结果的差别可达到一个数量级,即过滤器效率测试值相差一位“9”,说明不同性质物质的气溶胶可引起计数法测试效率的差异。

3 结论

本文在高效过滤器效率测试标准方法基础上,通过改变氯化钠气溶胶发尘的溶液浓度及在发尘后经一道中效过滤器处理,使钠焰法测试时上游气溶胶平均粒径得到优化,使其更接近 MPPS 粒径,并探究了不同粒径分布对过滤器效率测试的影响程度;对于计数法,本文探究了上游不同气溶胶物质对计数法测试的影响,同时也探究了中效过滤器对上游测试气溶胶的消静电效果。通过研究得到如下结论:

1) NaCl 气溶胶经过一道中效过滤器处理后,计数几何平均粒径明显增大,最大增大达相同溶液浓度未经中效处理的 1.8 倍左右;不同的中效过滤器也影响气溶胶粒径分布。

2) NaCl 溶液浓度为 2% 或 10% 时,发生气溶胶经中效过滤后,与不经中效过滤尘源的标准钠焰法相比,不同过滤器在不同风量下测试效率均有较稳定的降低,说明上游气溶胶粒径分布变化可影响过滤器效率钠焰法测试结果,但变化少于一个数量级。

3) NaCl 尘源计数法测试效率均明显低于标准钠焰法和改进钠焰法,且差别达到一个数量级,即效率值少一位“9”,说明不同测试原理的测试方法之间差别更大。

4) NaCl 尘源计数法和 KCl 尘源计数法相比,二者不同粒径档效率测试值均较接近,中效过滤器

过滤后可起到对 NaCl 气溶胶的消静电作用,从而使 NaCl 尘源测试结果接近电中和处理的 KCl 尘源计数法。

5)NaCl 尘源、KCl 尘源和 PAO 尘源计数法对比,前两者效率测试结果接近,且均高于 PAO 尘源计数法,并有相对稳定的规律性差别,个别测试结果的差别可达到一个数量级,即过滤器效率测试值相差一位“9”,说明不同性质物质的气溶胶可引起计数法测试效率的差异,但同类型的固体气溶胶 NaCl 和 KCl 测试结果更为接近。可能与 NaCl 和 KCl 气溶胶粒子性质及气溶胶粒子带电荷特性相近,而二者与液态性质的 PAO 气溶胶粒子性质差异更大有关。

参考文献

- [1] 国家标准化管理委员会 .GB 6165-2008 高效空气过滤器性能试验方法效率和阻力 [S]. 北京:中国标准出版社, 2009
- [2] 国家标准化管理委员会 .GB 13554-2008 高效空气过滤器 [S]. 北京:中国标准出版社, 2009
- [3] EN 1822-5:2009 High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) !a Part 5: Determining the efficiency of filter elements [S]
- [4] 高龙, 冯昕. 气溶胶浓度及测试粒径对高效过滤器计数法检漏测试的影响 [J]. 暖通空调, 2015, 45(1):73-77
- [5] 曹冠朋, 冯昕, 路宾. 高效空气过滤器现场检漏方法测试精度比较研究 [J]. 建筑科学, 2015, 06:145-151
- [6] 张振中, 庄子威, 江锋. 高效过滤器钠焰效率试验中 NaCl 浓度对测量精度的影响 [J]. 原子能科学技术, 2014, 48(11):2101-2105. [2017-08-28]
- [7] 冯昕, 张益昭, 王智超. GB/T6165—2008 计数法与国际现行标准化测试方法的实验比较 [J]. 暖通空调, 2011, 41(09):10-12+78. [2017-08-28]

基于洁净厂房 CFD 仿真结果的污染物浓度场重建方法研究

李德昌, 张彪, 蔡浩, 周苏宛, 姜明瑞

(南京工业大学城市建设学院, 南京 210009)

[摘要] 浓度场重建是指利用有限的时空离散的浓度数据按照某种方法得到污染物在空间中连续的浓度分布。基于浓度场重建可以获知区域内各类环境参数的分布情况(颗粒物、VOC等),这对于环境监测、污染源精准定位都能提供有力的技术支撑。将浓度场重建技术应用于洁净室行业既可以很好的满足洁净室对污染物控制严格的需要也对技术本身的发展具有现实意义。本文在 Kernel 系列方法的基础之上提出了一种改进的不基于模型的污染物浓度场重建方法——Kernel DM+V/W+方法。该方法通过在 Kernel 方法的基础上引入局部气流信息修正项的方式,有效的解决了 Kernel DM+V/W 方法在使用局部气流信息时不符合污染物传播规律的弊端。基于洁净厂房 CFD 仿真结果,从定性和定量的角度探究了本文提出的场重建方法与 Kernel 系列方法中使用局部气流信息(Kernel DM+V/W)和未使用局部气流信息(Kernel DM+V)的两种方法之间的优劣。从定性和定量结果综合来看,本文提出的场重建方法能较好的重建污染物在空间中的浓度分布。

[关键词] 洁净室; 浓度场重建; 室内污染物监测; 污染物分布

0 引言

近年来,随着疫苗生产、芯片制造行业的飞速发展使得对环境参数高要求、高标准的洁净室行业异军突起,市场规模不断扩大。目前,洁净室的洁净度通常依靠有限位置处的传感器测点来保障,并不能获得污染物在洁净室空间上的连续分布。当污染物在洁净室内扩散时,由于对洁净室内污染物浓度分布信息的缺失,无法制定具有针对性的通风措施,只能按照高换气次数的冗余大风量的设计方案来消除室内污染物,这造成洁净室巨大能源消耗,研究表明洁净空调系统的能耗是普通空调的15倍^[1]。

浓度场重建是指利用有限的时空离散的浓度数据按照某种方法得到污染物在空间中连续的浓度分布。在洁净室内应用浓度场重建技术,可快速获取洁净室内目标参数的分布情况,这有利于优化洁净室内的通风状况,为解决冗余大风量设计所造成的高能耗的缺陷、降低洁净室运行成本提供可能。同时,针对洁净室内的污染物浓度场重建可直观的描述室内的高污染区域,精准定位突发状况下的污染源,也契合洁净室高洁净度的要求。

场重建研究并不是一个简单的工作。在现实场景中,污染物在空间中的扩散时刻受到湍流和平流作用,呈现复杂的动态结构。在湍流和平流的共同影响下,污染物浓度在时间和空间上呈现剧烈波动的离散的蜿蜒分布,这为污染物场重建带来极大的挑战。其次,由于污染物在空间中的分布是不可见的,因此很难得到真实的浓度场作为研究的对比基准。目前,密集部署的传感器网络是获得真实浓度

场最直接的方法,但是该方法易受到空间范围和经济成本的制约,并且传感器校准也比较繁琐^[2]。再者,传感器工作时具有响应和恢复时间难以做到连续有效采样,并且只能采集到所在位置处的浓度信息,这也为重建出空间上连续的浓度场带来困难^[3]。

目前,场重建方法主要分为两大类:基于模型的方法和不基于模型的方法。前者通过把测量值与污染物传播的控制方程建立联系,考虑了污染物在传播过程中的多种物理化学过程,从而计算出各个位置处的污染物浓度^[4]。基于模型的主流方法有:高斯烟羽模型^[5]、盒子模型^[6]、计算流体力学(CFD)模型^[7-9]、拉格朗日和欧拉模型^[10-12]。基于模型的方法存在着不可忽视的弊端,这类方法在计算现实环境中的污染物浓度分布时需要求解问题进行简化,并且需要获得准确的边界条件。而不基于模型的方法利用统计学手段,将采集到的时空离散数据视为随机变量,通过解析数据本身和数据之间所蕴含的信息,来准确的得到污染物在空间分布的准确描述。该方法不依赖于特定的扩散方程,也无需对场重建问题过度简化,对于复杂难解的真实环境具有更强的适应性。不基于模型的场重建方法有:Kriging法^[13]、卡尔曼滤波法^[15]、一般插值法^[16]、Kernel系列方法^[3, 17-20]等。

前人在污染物场重建领域已经进行了多方面的探索。其中Lilienthal等人提出的Kernel系列方法成为目前国际上研究较为成熟的不基于模型的场重建方法。该系列方法的核心思想是把已知空间位置上的浓度数据通过权重函数进行空间外推,

从而预测出未采样位置处的污染物浓度。自 2004 年, Lilienthal 等人首次提出了 Kernel DM (kernel distribution mapping) 方法^[3, 17]以来, 经过多年研究探索, 先后于 2009 年提出了 Kernel DM+V 方法^[18, 19]和 Kernel DM+V/W 方法^[20]。Kernel DM+V 方法不仅可以预测出未采样位置处的均值浓度, 而且可以反映出浓度场的波动特性。Kernel DM+V/W 方法首次考虑了局部气流信息对浓度场的重要影响。该方法在重建浓度场时通过沿着气流方向拉伸高斯核形状的方式对局部气流信息加以利用, 单个浓度数据对周围环境的影响权重具有上、下风区一致的弊端, 这并不符合实际的污染物传播规律。

本文提出了一种改进的污染物浓度场重建方法——Kernel DM+V/W+ 方法, 该方法提供了一种不同于 Kernel DM+V/W 方法的全新的局部气流信息的使用方式。本文通过在 Kernel DM+V 方法的基础上引入了局部气流修正项, 将已知位置处的浓度数据对周围环境的影响权重进行重新分配, 使得下风区受到的影响明显大于上风区。并基于洁净厂房仿真案例进一步将 Kernel DM+V/W+ 方法与 Kernel DM+V 和 Kernel DM+V/W 方法进行了方法验证和方法间对比。

1 研究方法

1.1 场重建方法

局部气流对于污染物在空间中的扩散具有不可忽视的影响。在局部气流的作用下, 污染物更容易朝着当前位置的下风向运动。因此, 下风区比上风区更容易受到污染物的扩散影响。局部气流越强, 则下风区和上风区的差异越大。

Kernel 系列方法中的 Kernel DM+V/W 方法是国际上结合局部气流信息进行场重建研究中较为成熟的方法。但是该方法仅仅是在 Kernel DM+V (Kernel 系列方法中的一种) 的基础上, 通过简单拉伸高斯核形状的方式与局部气流信息建立联系, 而采样数

据对上风区和下风区的影响权重依旧沿用了 Kernel DM+V 方法的对称分布模式, 没有考虑到采样数据对上、下风区的影响差异。这一点从图 1(a)、(b) 中可以看出。因此, Kernel DM+V/W 方法并不能充分地反映上述污染物实际的传播规律。

针对上述不足, 本文提出了一种改进的污染物场重建方法——Kernel DM + V/W+ 方法。该方法在已有的 Kernel DM+V 方法基础上引入了局部气流修正项 (公式 1), 重新调整了采样点对上、下风区的影响权重, 增强了采样数据对下风区浓度分布的影响, 同时削弱了对上风区的影响。

$$\vec{F} = 1 + \mathbf{b} \# |\vec{n}| \# \cos i \quad (1)$$

在前人的研究中已经充分介绍了 Kernel 系列方法的理论和计算公式^[18, 19], 为简洁起见, 本文仅重点介绍对 Kernel DM+V 方法的优化内容。Kernel DM+V 方法的核心思想是利用权重函数 (公式 2), 把采样点处浓度数据进行空间外推, 即把采样点对上、下风区的影响权重进行建模。为了使这一过程与污染物的传播规律相符, 本文通过在 Kernel DM+V 方法的权重函数的基础上乘以局部气流修正项, 达到使采样点对上、下风区的影响权重进行重新分配的目的。具体见公式 3。

$$\sim_i^{(k)}] \mathbf{v}_0 \mathbf{g} = \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{r} \mathbf{v}_0}} e^{-\frac{|x_i - x^{(k)}|^2}{2\mathbf{v}_0^2}} \quad (2)$$

$$\sim_i^{(k)} \wedge \mathbf{v}_0, \mathbf{i} \mathbf{h} = \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{r} \mathbf{v}_0}} e^{-\frac{|x_i - x^{(k)}|^2}{2\mathbf{v}_0^2}} \quad (3)$$

$$\S^1 + \mathbf{b} \# |\vec{n}| \# \cos i \mathbf{h}$$

式中, x_i 为采样数据所在网格中心点坐标; $x^{(k)}$ 为采样点附近第 k 个网格中心点坐 \mathbf{v}_0 标; β 为权重函数的核带宽, 它决定了采样点对周围环境的影响范围; 为风速影响因子, 单位为 s/m ; \vec{n} 为风速矢量, 单位为 m/s ; θ 为 x_i 和 $x^{(k)}$ 的连线与风向的夹角。

经过上述修正, 本文提出的 Kernel DM + V/W+

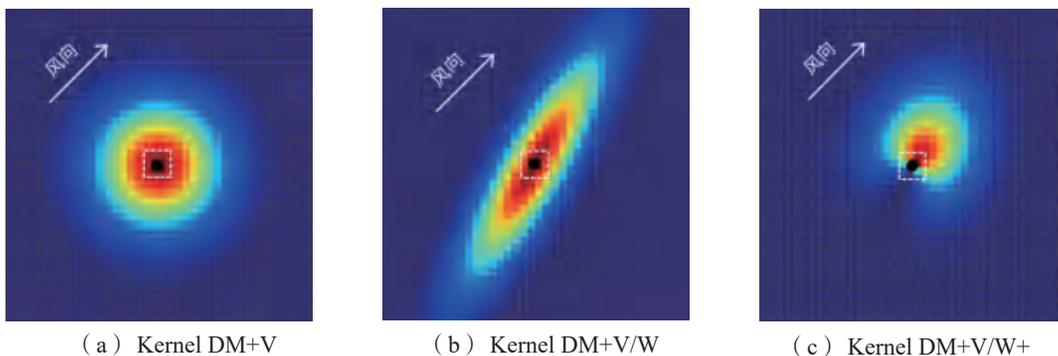


图 1 三种场重建方法的权重分布图, 白色虚线框中的黑色圆点表示采样数据点

方法在对采样点处浓度数据进行空间外推时，下风区受到采样点的影响明显大于上风区，这与污染物随局部气流从上风区向下风区迁移的规律相一致。具体效果见图 1 (c)。

1.2 定量评价方法

本文利用 NLPD^[21] 指标对重建出的浓度场在准确预测未采样位置处的浓度方面进行定量地优劣评价。NLPD 指标能够把重建出的浓度场数据与浓度场的波动特性一起纳入评价体系，可以较好地量化实际的浓度场与重建出的浓度场之间的偏离程度。NLPD 数值越低，越表明重建出的浓度场能够较好的预测出未采样位置处的浓度。该定量评价方法首先把实际的浓度场数据分成训练集和测试集两部分；接着把数据作为场重建算法的输入，重建出污染物浓度场；然后利用 NLPD 指标把重建出的浓度数据与中的数据进行对比；最后通过最小化 NLPD 的方式定量的评价场重建方法的优劣。该评价方法已多次应用于场重建研究中^[18-20]。NLPD 指标的具体公式如下：

$$NLPD = \frac{1}{2n} \sum_{i \in D} \left(\log \frac{\hat{c}_i(x_i)}{c_i} + \frac{(c_i - \hat{c}_i(x_i))^2}{\hat{c}_i(x_i)} \right)^3 + \frac{1}{2} \log(2\sigma) \quad (4)$$

式中， c_i 为测试集数据； $\hat{c}_i(x_i)$ 和 $\hat{c}(x_i)$ 分别为场重建方法预测的浓度方差和均值浓度。

2 研究案例

2.1 案例设置

洁净厂房模型（图 2）来源于清华大学所做的人员在 FFU 下的颗粒物浓度扩散模拟实验^[22]。该模拟以真实实验为支撑，保证了仿真结果的可靠性。该洁净厂房模型尺寸为 9.6×9.6×4.55 m，其中孔板距离地面 1.3 m，孔板距离顶面 3.25 m。FFU 尺寸为 1.2×1.2 m，布置间隔 1.2 m，布置率为 25%。气流以 0.35 m/s 的速度从房间上方的 FFU 送入室内，然后经下部孔板排出室外，气流形式为上送下回的单向流。洁净厂房内设置一尺寸为 0.4×0.25×1.8 m、发热量为

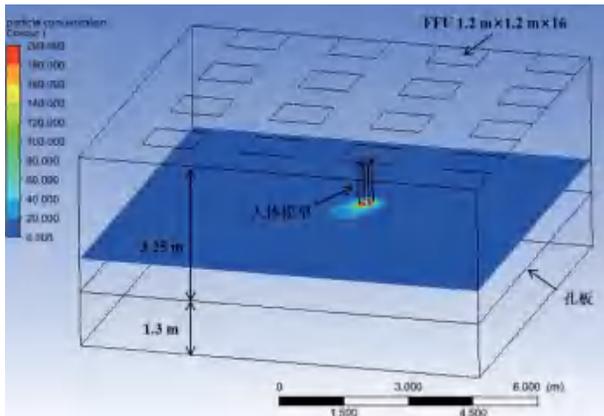


图 2 洁净厂房模型

70 W 的长方形柱体，用于模拟室内人员。颗粒物源设置为人体模型表面^[22]。

2.2 研究过程

我们以洁净厂房 CFD 仿真结果的某个切面（图 2 中的蓝色平面）作为研究对象，为不同场重建方法重建出的浓度场提供对比基准。首先，我们把切面数据插值到 0.12 m×0.12 m 的网格当中，得到 6400 个均匀网格下的浓度数据（图 3）。然后，按照 5 种采样比例（5%、10%、20%、40%、60%）从插值数据中随机挑选浓度数据，挑选出的数据作为训练集，未挑选到的数据作为测试集。最后，利用中的离散数据重建出空间上连续的浓度场，并通过 NLPD 指标把重建出的污染物浓度与中的污染物浓度数据进行对比，从而定量的评价了场重建方法的优劣，研究流程见图 4。

3 场重建结果评价

3.1 场重建结果定性评价

在洁净厂房研究案例中，每种场重建方法分别

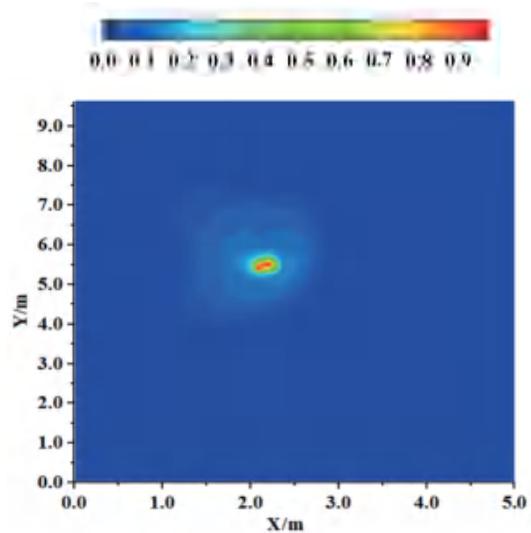


图 3 归一化的 CFD 仿真结果

重建了 5 种采样比例下的污染物浓度场。限于篇幅，该研究案例分别选取低采样比例（10%）和高采样比例（40%）两种典型情况下的定性结果（图 5）进行简要分析。

如图 5 所示，在同一采样比例下，三种方法重建出的污染物浓度场之间无明显的差异。在不同的采样比例下，就同一方法而言，利用高采样比例数据重建出的浓度场反映出的高浓度区域更加集中（红色区域面积更小），与利用低采样比例数据重建出的浓度场相比，更加接近 CFD 仿真出的浓度场（图 3）。

3.2 场重建结果定量分析

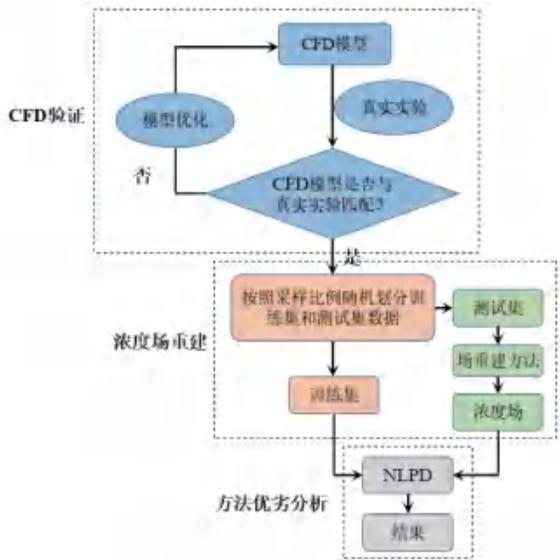


图4 研究过程流程图

本文将切面处插值后的仿真数据（图3）随机划分成5种不同采样比例的训练集和测试集。然后，三种场重建方法利用分别重建出污染物浓度场，并通过NLPD指标把三种方法重建出的污染物浓度数据分别与进行对比，从而定量的评价了三种场重建方法的优劣。重复5次上述过程，每次记作一次独

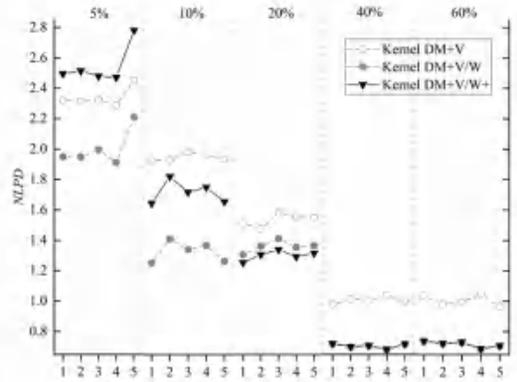


图6 洁净厂房研究案例中，三种场重建方法预测未采样位置处的浓度的性能表现

立实验。

图6展示了三种场重建方法在不同采样比例下5次定量分析中的NLPD值的表现。从图中可以看出，随着采样比例的增加，每种方法重建出的浓度场的NLPD值均明显减小，这表明增加采样比例有利于提高场重建方法在预测未采样位置处的污染物浓度的准确度方面的性能。当采样比例增加到40%时，三种场重建方法的性能达到最佳，再增加采样比例已经不能明显改善场重建方法的性能。

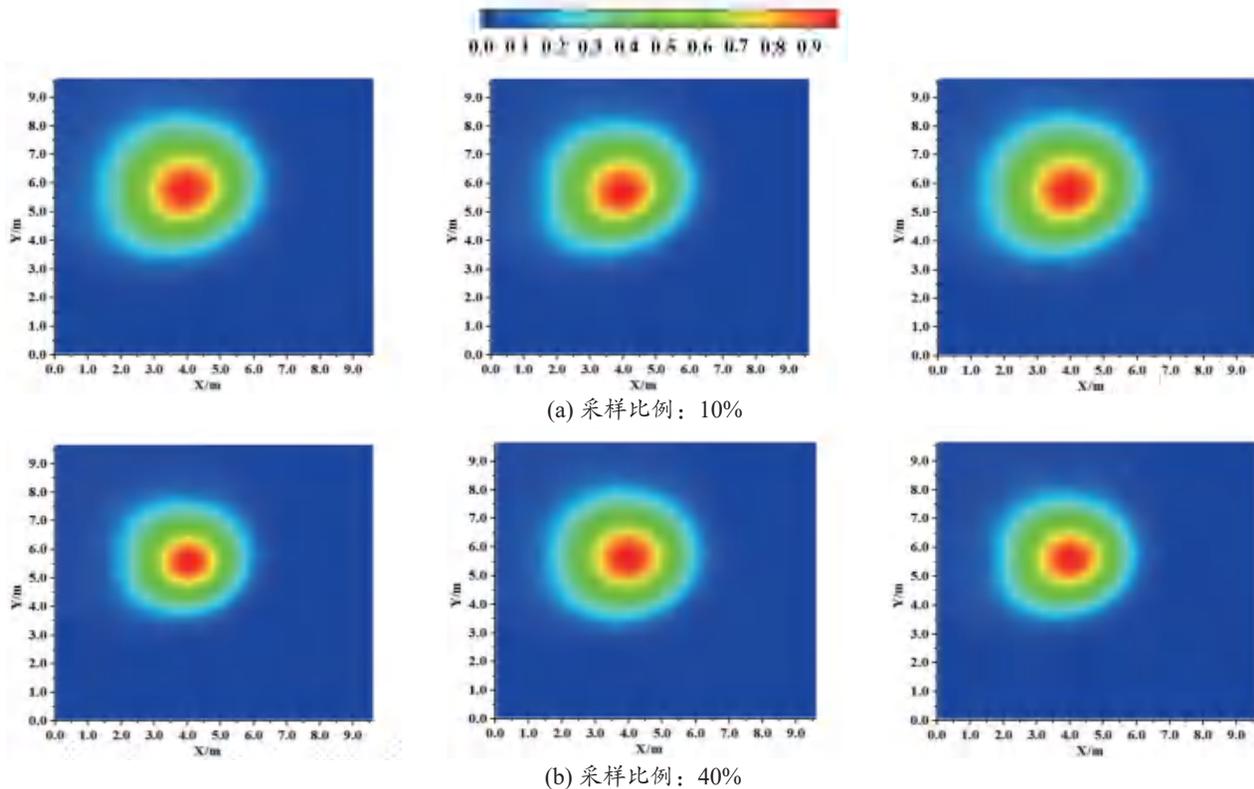


图5 洁净厂房研究案例中三种场重建方法重建出的归一化浓度均值分布图；左列：Kernel DM+V方法，中间：Kernel DM+V/W方法，右列：Kernel DM+V/W+方法；从上至下，采样比例（采样数据占总数据的比例）依次为10%、40%

从图6还可以看出,除了采样比例为5%以外,其余采样比例下使用局部气流信息的Kernel DM+V/W和Kernel DM+V/W+方法的NLPD值表现均优于未使用局部气流信息的Kernel DM+V方法,这一结果表明在重建污染物浓度场时考虑局部信息能够更好的预测未采样位置处的污染物浓度,提高重建出的污染物浓度场的准确度。

在低采样比例时(采样比例为5%和10%),本文提出的场重建方法表现不佳。该结果是可以预见的,洁净厂房研究案例的气流形式在垂直方向上具有较大的风矢量,而水平方向的风矢量较为微弱,在重建水平方向的浓度场时,这种微弱的局部气流信息成为影响本文提出的方法的性能的不利因素。与此同时,低采样比例对场重建方法的性能的不利影响再一次加剧了这一现象。当采样比例达到20%,本文提出的方法在重建出的浓度场的准确度方面明显优于已有的两种方法。这表明,提高采样比例带来的性能提升弱化了微弱气流对本文提出的场重建性能的不利影响。

4 结论

区别于以往的使用局部气流信息的Kernel DM+V/W方法,本研究着重强调了采样点处上、下风区的污染物浓度受局部气流的影响的差异,提出了一种改进的污染物浓度场重建方法——Kernel DM+V/W+。该方法通过在Kernel方法的基础上引入局部气流信息修正项的方式,有效的解决了Kernel DM+V/W方法在使用局部气流信息时不符合污染物传播规律的弊端。本文以人员在FFU下的仿真结果作为浓度场的比对基准,并从中采集不同比例的浓度数据用于三种场重建方法(Kernel DM+V/W+方法、Kernel DM+V方法和Kernel DM+V/W方法)之间的性能对比。本文从定性和定量的角度分析了三种方法在不同采样比例下的性能优劣。主要结论如下:

1. 从定性结果来看,高采样比例下重建出的浓度场比低采样比例下重建出的浓度场相比,高浓度区域更加集中,更加接近CFD仿真结果。从NLPD表现来看,随着采样比例的增加,每种方法的NLPD值均明显降低。这表明增加采样比例对于改善场重建方法的性能是有利的。

2. 存在一个采样比例阈值,当采样比例达到这个阈值后,再增加采样比例已经不能明显提高场重建方法的性能。根据本文对于洁净厂房案例的研究发现,采样比例为40%时为该阈值。

3. 在没有主导气流的微弱环境下,本文提出的场重建方法在预测未采样位置处浓度的准确表现不

佳。但从定性结果来看,本文提出的场重建方法仍能较好的重建出污染物浓度的整体分布。

5 致谢

本研究得到了国家自然科学基金(51478468)资助,得到了南京工业大学高性能计算中心的计算支持。

参考文献

- [1] 董学鑫. 半导体厂房空调系统节能研究 [J]. 价值工程, 2020,39(15):233-4
- [2] 路佳城, 凌六一, 董科学. 基于电化学传感器的大气NO₂与O₃监测研究 [J]. 环境科学学报, 1-7
- [3] LILIENTHAL A, DUCKETT T. Building gas concentration gridmaps with a mobile robot [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2004, 48(1):3-16
- [4] MøLGAARD B, HUSSEIN T, CORANDER J, et al. Forecasting size-fractionated particle number concentrations in the urban atmosphere [J]. Atmospheric Environment, 2011, 46
- [5] Robotics; Studies from Benemerita University Autonoma of Puebla in the Area of Robotics Reported (An Application of the Gaussian Plume Model To Localization of an Indoor Gas Source With a Mobile Robot) [J]. Journal of Robotics & Machine Learning, 2019.
- [6] MENSINK C, COLLES A, JANSSEN L, et al. Integrated air quality modelling for the assessment of air quality in streets against the council directives [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(37)
- [7] MOON D, ALBERGEL A, JASMIN F, et al. The use of the MERCURE CFD code to deal with an air pollution problem due to building wake effects [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1997, 67
- [8] ZHANG Z, CHEN Q. Experimental measurements and numerical simulations of particle transport and distribution in ventilated rooms [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(18)
- [9] PONTIGGIA M, DERUDI M, BUSINI V, et al. Hazardous gas dispersion: A CFD model accounting for atmospheric stability classes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1)
- [10] GARIAZZO C, SILIBELLO C, FINARDI S, et al. A gas/aerosol air pollutants study over the urban area of Rome using a comprehensive chemical transport model [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(34)
- [11] A. R A, A. G B, V. L E, et al. Graz Lagrangian

- Model (GRAL) for Pollutants Tracking and Estimating Sources Partial Contributions to Atmospheric Pollution in Highly Urbanized Areas[J]. *Atmosphere*,2020,11(12)
- [12] LIU, SHICHAO, NOVOSELAC, et al. Lagrangian particle modeling in the indoor environment: A comparison of RANS and LES turbulence methods (RP-1512) [J]. *HVAC&R Research*,2014,20(4)
- [13] WONG D W, YUAN L, PERLIN S A. Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of air quality data [J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology: Official journal of the International Society of Exposure Science*, 2004, 14(4).
- [14] LIAO D, PEUQUET D J, DUAN Y, et al. GIS Approaches for the Estimation of Residential-Level Ambient PM Concentrations[J].*Environmental Health Perspectives*, 2006,114(9)
- [15] BLANCO J L, MONROY J G, LILIENTHAL A, et al. A Kalman filter based approach to probabilistic gas distribution mapping[J].*Applied Computing*,2013
- [16] PYK P, BADIA S B I, BERNARDET U, et al.An artificial moth: Chemical source localization using a robot based neuronal model of moth optomotor anemotactic search [J].*Autonomous Robots*,2006,20(3)
- [17] LILIENTHAL A, STREICHEN F, ZELL A. Modelbased shape analysis of gas concentration gridmaps for improved gas source localisation; proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 18, 2005 – April 22, 2005, Barcelona, Spain, F, 2005[C].Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc
- [18] LILIENTHAL A J, REGGENTE M, TRINCA M, et al. A statistical approach to gas distribution modelling with mobile robots - The Kernel DM+V algorithm; proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009, October 11, 2009 – October 15, 2009, St. Louis, MO, United states, F,2009[C]. IEEE Computer Society
- [19] ASADI S, REGGENTE M, STACHNISS C, et al. Statistical gas distribution modeling using kernel methods[M]. *IGI Global*,2011:153–79
- [20] REGGENTE M, LILIENTHAL A J. Using local wind information for gas distribution mapping in outdoor environments with a mobile robot; proceedings of the IEEE Sensors 2009 Conference - SENSORS 2009, October 25, 2009-October 28, 2009, Christchurch, New zealand,F,2009 [C].Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc
- [21] JOAQUIN, NBSP, CANDELA Q, et al. Machine Learning Challenges. Evaluating Predictive Uncertainty, Visual Object Classification, and Recognising Tectual Entailment[M]. Springer,Berlin, Heidelberg
- [22] Zhao J, Shao X, Li X, et al. Theoretical expression for clean air volume in cleanrooms with non-uniform environments[J]. *Building and Environment*,2021:108168.

空气中悬浮微生物的净化技术与相关风险探讨

冯昕^{1,2}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建科环能科技有限公司, 北京 100013)

[摘要] 2019年底由中国首先报告的新冠肺炎疫情(COVID-19)绵延至今, 引发了整个建筑行业对于空气净化巨大需求, 极大促进了针对空气中悬浮微生物的各种净化技术的发展及应用。但好的技术应用不当也会导致坏的后果。本文主要对当前主流应用的空气悬浮微生物净化技术的技术原理及使用中应关注问题进行了探讨, 希望对实际工程设计、运行维护提供有益的参考。

[关键词] 空气悬浮微生物; 净化技术; 过滤; 紫外辐照; 静电

0 引言

始于2019年底, 由中国率先发现并报告的新冠肺炎疫情(COVID-19)绵延至今, 已导致全球接近2亿人感染, 超过4百万人死亡, 对全球宏观经济造成了空前的经济损失。作为一种典型的空气传播疾病, 除做好个人防护措施外, 对于存在风险的室内空间, 也需要使用空气净化措施或手段实现空间净化、消杀。疫情期间, 多种空间净化及消杀技术层出不穷, 但工程技术人员必须认识到, 不同的技术具有不同的应用场景及适用条件, 使用不当则反而容易造成风险及污染感染事件。基于上述想法, 本文将介绍目前较为成熟的针对空气中悬浮微生物的净化技术, 并对其适用条件和使用过程中的关注开展探讨, 希望能够为广大工程技术人员进行相关工程项目的设计、施工改造以及运行维护提供有益的参考。

1 可实现空气中悬浮微生物净化处理的主要技术

针对环境空气中的微生物净化处理技术, 主要有物理过滤拦截、生物法、以及化学法等, 其中, 物理过滤拦截主要依靠纤维过滤材料按尺度大小拦截空气中悬浮气溶胶的特性, 现有研究表明, 不同效率级别的深层过滤材料对于颗粒物的拦截过滤效率主要取决于气溶胶的大小尺寸, 大多数过滤材料对于100~250nm颗粒物净化过滤效率最低, 而不管颗粒物尺寸小于该范围还是大于粒径范围, 其净化过滤效率都会随着颗粒物粒径远离该粒径范围而逐渐升高。物理法技术包括高温热力消毒以及紫外照射杀菌技术, 当高温作用于微生物时, 使细胞膜的结构变化, 酶钝化, 蛋白质凝固, 从而使细胞死亡。紫外照射杀菌(ultraviolet germicidal irradiation (UVGI))主要通过特定波长的紫外线的照射, 促使病原微生物DNA/RNA链断裂, 消除活性或传染性。化学法包括过氧化氢熏蒸、臭氧熏蒸等, 主要利用特定化学物质的强氧化性破坏组成微生物的蛋白质从而消除其活性。

1.1 基于物理拦截以及过滤机理的净化处理技术(技术原理、滤除效果)

利用物理拦截以及纤维过滤率技术进行空气中悬浮微生物的净化去除, 是最为传统和可靠的技术选择, 这项技术的发端可一直追溯至19世纪末口罩的诞生。基于物理拦截以及过滤机理的净化设备针对颗粒物的大小尺寸而非生物特性发挥净化功能。根据伦敦公共卫生实验室Noble的测试结果^[1]: 1) 空气中与疾病有关的带菌粒子直径一般为4~20 μm 。2) 来自人体的微生物大都附着在12~15 μm 尘粒上。3) 许多真菌孢子以单个形式存在于空气中。我国的研究学者许钟麟等也曾提出细菌等价直径的概念, 因为大多数微生物并不能在空气中独立存在, 常常附着在比其大数倍的灰尘颗粒表面, 一方面灰尘中所蕴涵的有机碳可为微生物的存活提供养分, 另一方面, 灰尘颗粒可以吸附并保存一定水分, 而这对微生物的生存以及繁殖至关重要。国内曾有研究表明空气中的细菌浓度与3.5 μm 尘粒浓度间存在一定相关关系, 测试结果也表明几种纤维过滤材料对大气杂菌的过滤效率与4~5 μm 颗粒物过滤效率相当^[2]。天津大学涂光备也通过对比试验得出纤维过滤装置对大气菌的过滤效率与其对 $\geq 5\mu\text{m}$ 的大气尘计数效率有较好的线性关系^[3]。表1给出了国外研究学者所总结的一些相关研究中不同过滤等级过滤器对微生物的过滤效率试验结果。

从表1中可以看出, 对于给定颗粒物过滤效率的高效过滤器(DOP透过率0.006%~0.02%), 其对于裸体尺寸为0.1 μm 的大肠杆菌T1噬菌体透过率基本比起DOP过滤效率约低1个数量级。考虑到DOP测试中的颗粒物中值粒径为0.18~0.22 μm , 与大肠杆菌T1噬菌体尺寸相差不大, 对比结果显示即使在实验气溶胶发生条件下, 也很难得到单个悬浮的微生物气溶胶。图1给出了作者团队对额定风量均为1000 m^3/h 的F5级别中效、H10级别亚高效以及H13级别高效过滤器不同风量下的滤菌效率试

表 1 不同等级过滤器对微生物的过滤效率试验结果^[4]

过滤器	试验微生物		透过滤率	参考文献
	名称	尺寸		
一般通风过滤器	豚草花粉	20 μm	48-98%	Annis 1965
低效率过滤器	豚草花粉	15-25 μm	25-76%	Sutton et al. 1965
高效过滤器 (DOP 透过滤率 0.02%)	大肠杆菌 T1 噬菌体	0.1 μm	0.004%	Harstad et al. 1967
高效过滤器 (DOP 透过滤率 0.006%)			0.00085%	
高效过滤器 (DOP 透过滤率 0.011%)			0.0044%	
静电除尘器	印度沙雷氏菌	0.5 \times 1 μm	3-8%	Decker et al. 1951
	大肠杆菌 T3 菌体	0.1 μm	0-20%	
静电除尘器	球芽孢杆菌	2.5 μm	3%	Margard and Logsdon 1965
静电除尘器	球芽孢杆菌	0.5-0.9 μm	0.2-25.5%	Rickman 1992
	(风速 0.68-1.88m/s)	2.0-3.5 μm	0.3-6.9%	

试验结果，试验菌种采用白色葡萄球菌。从试验结果可以看出，过滤器对白色葡萄球菌的过滤效率会明显高于其标称的颗粒物效率，例如，对于标称效率不低于 85% (0.1-0.2 μm) 的亚高效过滤器，其额定风量下的滤菌效率达到 98%；对于标称效率不低于 99.95% (0.1-0.2 μm) 的高效过滤器，其额定风量下的滤菌效率达到 99.997%。此外，与颗粒物的过滤效率随风量变化规律类似，随着风量的提高，各级别过滤器都会呈现不同程度的滤菌效率下降现象，中效和亚高效过滤器在风量由额定的 1000 m^3/h 提高到 1500 m^3/h 时，滤菌效率下降约 10 个百分点，提示我们在过滤器使用过程中，必须严格控制其运行风量，不得超风量运行。

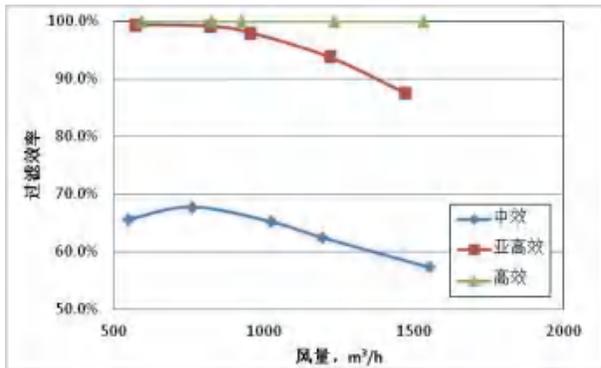


图 1 中效、亚高效以及高效过滤器不同风量下的滤菌效率试验结果

而对于病毒来说，虽然其自身物理尺寸仅约为 0.01 μm ~0.1 μm 左右，相比细菌要小很多，但同样的，病毒的在环境空气中的存在方式同样是附着在尘粒及其他颗粒物上，病毒进入空气中时所最终形

成的粒子大小取决于导致其脱离生存环境进入空气的机械或生物作用力大小，而与病毒自身大小无关。Sellers 等^[5]曾报道，自身尺寸仅为 25~30nm 的口蹄疫病毒，被感染的猪散布到空气中后，使用多级液体装机采样器进行采样，结果表明，65%~71% 的携带病毒气溶胶粒子直径大于 6 μm ，19%~24% 的携带病毒粒子直径为 3~6 μm 区间，而只有 10%~11% 直径小于 3 μm 。黄子才等^[1]在全国六大味精厂测量空气中 L-谷氨酸有害噬菌体病毒的采样结果表明，该病毒气溶胶的空气动力学中值直径在 201~4.7 μm 之间，大约 80% 的携带病毒粒子尺寸为 1.6~4.6 μm ，大约 20% 在 1.4~1.5 μm 之间，而在 0.65~1.1 μm 之间的噬菌体粒子仅占 0.9%。表 2 给出了作者团队对某型号航天用高效空气过滤器所做的细菌（枯草芽孢杆菌黑色变种，约 1.0 μm ）以及病毒（大肠杆菌 T3 噬菌体，约 0.1 微米）过滤效果对比测试，测试结果显示二者过滤效率基本相当，显示其各自携带微生物气溶胶粒子尺寸基本相当，均与微生物单体尺寸关系不大。

表 2 同一台高效过滤器的滤菌及滤病毒对比试验结果

	枯草芽孢杆菌黑色变种	大肠杆菌 T3 噬菌体
试验风量 / (m^3/h)	100	100
上游微生物浓度均值 / (CFU/m^3)	6.86 \times 104	7.45 \times 104
下游微生物浓度均值 / (CFU/m^3)	2.36	4.7
微生物滤除效率 / %	99.9966	99.9937

1.2 紫外杀菌技术

紫外线指波长在 100~400nm 区间的光线，按生物学作用差异一般分为 UVA（波长介于 320-420nm）、UVB（波长介于 280-320nm）、UVC（波长介于 200-280nm）以及真空紫外线（100-200nm）。从其发展历程来看，紫外线照射消毒是一种古老而又简单的物理消毒方法，它在近代历史上人类与疾病的抗争中发挥了重要作用。紫外线的消毒功能最早由英国科学家 Downes 和 Blunt 发现，他们首次发现经太阳照射后，某些菌类停止了繁殖活动，随后这一现象被证实为太阳光中紫外线所发挥的作用，在此基础上，1909 年，世界上诞生了第一个紫外线水消毒装置。1929 年，紫外线杀菌机理被发现：UVC 波段紫外线直接被 DNA 吸收，并造成以下主要损伤^[26]：

- 1) 相邻嘧啶形成环丁烷嘧啶二聚体；
- 2) 形成嘧啶 - 酮光产物；
- 3) 氨基酸吸收紫外线使蛋白质变性失能；
- 4) 导致酶的钝化，破坏酶活性中心的氢键；
- 5) 波长小于 230nm 的紫外线可导致 DNA 链断

裂，从而造成细胞死亡。

图2和图3分别给出了DNA对不同波长紫外线的吸收比例，以及不同波长紫外线的相应杀菌效果^[7]。

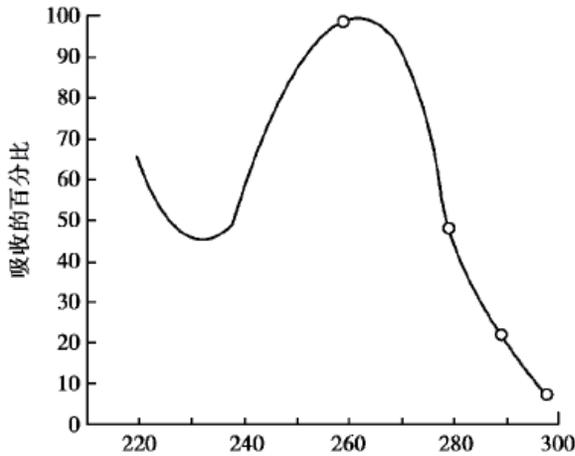


图2 DNA对不同波长紫外线的吸收^[27]

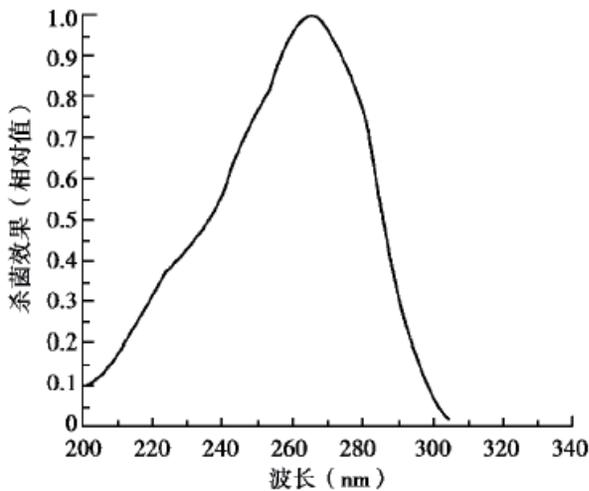


图3 不同波长紫外线杀菌效果^[27]

紫外线杀菌之所以能够在过去100多年的时间得到充分的应用，主要原因在于其所具备的以下主要特点：

1) 杀菌的广泛性：紫外线的消毒杀菌功能通过DNA或RNA核酸直接吸收实现，因此细菌、病毒、真菌甚至高等动植物的细胞都可获得消毒杀灭效果。

2) 杀菌的快速性：当近距离使用高强度紫外灯时，可在1s或更短的时间杀灭细菌，这种快速性是其他许多生物、物理以及化学消毒方法所无法比拟的。

3) 使用经济性：传统的紫外杀菌消毒设备只有紫外灯管和相应电源，其用电功率与日常照明用灯具基本相当，运行能耗远低于绝大多数的消毒灭菌

设备。

在实际灭菌效果方面，表3给出了紫外线辐照强度等级和典型微生物的杀灭率。

表3 紫外线辐照强度等级和典型微生物的杀灭率^[8]

紫外线剂量等级	剂量 $\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$	杀灭率, %			
		炭疽杆菌	流感病毒	天花病毒	结核菌
1	1	0	0	0	0
5	50	1	6	7	10
10	500	8	45	53	66
15	4000	49	99	100	100
20	20000	96	100	100	100

基于大量的现有研究表明，紫外线照射杀菌技术在消毒效果上完全可满足一般使用建筑使用环境对于物体表面以及小型封闭空间空气的消毒要求。但必须关注紫外线消毒装置在实际使用中所带来的各种安全性问题，这一部分内容将在本文后面进行详细论述。

1.3 基于静电的空气微生物净化技术

静电是实现净化设备空气净化功能的重要手段之一，其主要通过带电集尘装置等人工营造的电场，利用静电吸附功能实现对空气中悬浮颗粒物的捕集功能。主要包括以下技术形式：

1) 给纤维过滤器所使用过滤材料纤维上增加静电荷实现对空气中微生物的净化消杀：郭佳佳^[8]通过比对测试发现滤料静电消除前后对粘质沙雷氏菌的过滤效率存在明显差异，其所测试的一种F8级别及一种F7级别化纤过滤材料在消静电处理前对粘质沙雷氏菌的过滤效率均接近100%，但在消静电处理后，F8滤料对粘质沙雷氏菌的过滤效率降为约20%，F7滤料对粘质沙雷氏菌的过滤效率降为约10%，显示静电吸附对于以液滴形态存在的微生物仍可发挥较大作用。

2) 利用高压放电措施电离空气，在空气中形成大量的游离正离子和电子，这些游离离子通过与空气中携带微生物的颗粒物碰撞接触使之带电，并在集尘极所形成的定向电场中加速运动并最终被集尘板捕获。董非等^[9]曾对一种常见的利用静电吸附并配合过滤器的室内空气净化器进行实验室及现场净化消毒测试，测试结果显示，在对颗粒物净化效率仅为75%条件下，该净化机在20m³气雾室内开机作用30min，对空气中人工发生的白色葡萄球菌杀灭率为99.98%；在90m³房间中开机作用60min，对室内空气中自然菌的杀灭率达到90%以上。

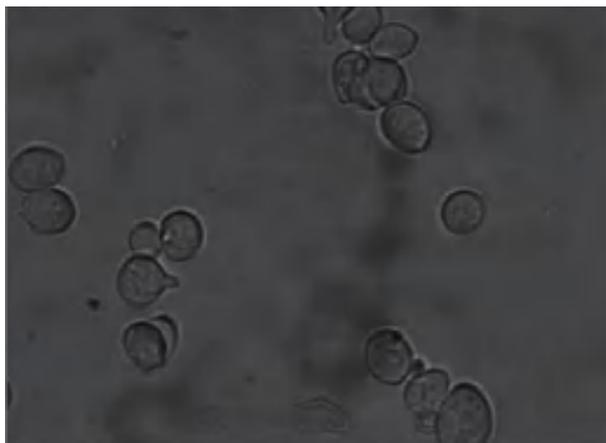
3) 电离空气过程中，静电净化器的电晕极在放电条件下，放电区域索性的高能电子可轰击气体分子生成大量强氧化性粒子，破坏微生物细胞结构，从而实现杀菌消毒效果。刘新等^[10]曾对一种上述原

理装置的消毒灭菌效果进行了实验研究, 研究结果表明, 在排除了电晕所导致的高温灭活、紫外辐射以及臭氧影响的基础上, 在电晕极间电压为 2.0kV/cm, 处理时间为 35s 的操作条件下, 该装置对城市污水处理厂活性污泥所提取培育微生物气溶胶杀灭效率大于 97.9%。同时, 研究者通过显微镜观测到了微生物细胞形态被放电所产生自由基 ($\cdot\text{OH}$) 处理前后的形态变化 (图 4), 观测结果显示, 强氧化性自由基可氧化分解微生物的细胞壁和细胞膜, 从而使得微生物细胞结构破坏, 内容物流出, 从而导致细胞死亡。

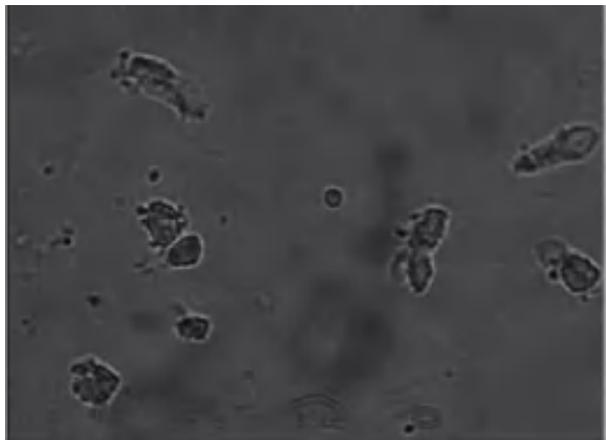
2 选择及使用微生物净化处理技术需关注的主要问题

2.1 纤维过滤措施

过滤器只拦截微生物, 但对所拦截的微生物并没有杀灭功能, 相反的, 过滤器自身特性以及使用过程中的积尘往往能够为其所拦截微生物提供一定的水分及有机碳养分, 从而使得过滤器在处理不当时候反而易成为建筑屋内微生物污染的一个潜在来源。因此, 在使用过滤器作为环境空气微生物净化处理



(a) 自由基处理前细胞形态



(b) 自由基处理后细胞形态

图 4 自由基处理前后灰霉菌孢子形态变化 [32]

措施时需要注意以下问题:

1) 仅依靠过滤器自身无法解决微生物在过滤材料上的孳生问题。天津大学刘俊杰团队曾通过实验研究证明在适宜的温度、湿度以及过滤材料上负载有营养物质时, 微生物可在过滤材料上生长, 并可观测到涵盖延滞期、指数期、稳定期和衰亡期 4 个阶段的完整生存周期^{[11][12]}。Kemp 等^[13]将新的纤维过滤材料和多层化纤过滤材料在大气环境中连续使用 8 周, 发现从第 2 周起, 两种过滤材料上微生物数量迅速增加, 虽然化纤过滤材料上微生物总量略低, 但 4 周后两种过滤材料上微生物总量接近一致。Martikainen 等^[14]曾调查 11 栋公共建筑所使用通过滤器发现每克过滤材料上的细菌及霉菌含量分别约为 $3 \times 10^3 \sim 1.9 \times 10^5 \text{CFU}$ 及 $7 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^5 \text{CFU}$, 而在营养物质充足的情况下即使温度低至 4°C , 仍可观测到过滤材料上微生物的活动。Neumeister 等^[15]通过对柏林市中心一座大型会议中心通风系统用过滤器进行调查发现, 尽管仅粗效预过滤器就可提供约 84% 的微生物净化过滤效率, 但在过滤材料通过荧光纤维镜也观测到了约 800 处霉菌生长。为解决过滤材料所拦截微生物的孳生问题, 一个通常容易被想到的解决方案就是为过滤纤维表面复合添加抗菌剂, Verdenelli 的研究表明^[16], 经抗菌剂处理的过滤材料在头 7 天培养期内基本不会有细菌和真菌繁殖, 但在长达 100 天的培养期期间, 抗菌剂效果随时间逐渐衰竭。美国 ASHRAE 针对这一问题曾资助研究项目“Determine the efficacy of antimicrobial treatments of fibrous air filters”, 研究结果表明^[4]: 对于因使用而导致积尘的过滤器, 即使经过复合添加抗菌剂处理, 也无法避免微生物孳生。该研究将经过抗菌处理和未经抗菌处理的过滤器安装于同一通风空调机组内连续使用 4 个月后进行菌落计数分析, 试验结果表明, 经过抗菌处理过滤器的细菌测试结果为 $14900 \pm 5100 \text{CFU}$, 而未经抗菌处理的过滤器细菌测试结果为 $12700 \pm 3900 \text{CFU}$, 二者之间基本没有差别。

因此, 控制过滤器上的微生物孳生问题关键还需要从微生物生长繁殖的必要环境条件入手, 水分以及必要的营养物质是微生物生长繁殖的两大必要条件, 作为拦截一切灰尘颗粒的过滤器, 显然无法避免富含有机碳、可为微生物生存提供养分的灰尘存在, 就必须合理控制过滤器所处环境的湿度条件, 避免过滤器长期在潮湿环境下工作。但在现实应用条件下, 大多数一般通风系统中, 过滤器与表冷器、加湿器等一同安装于组合式空调机组中, 难以保证有利的湿度控制条件, 针对这一问题, 许钟麟等^[17]

曾提出一种为组合式空调机组增加辅助干燥灭菌的技术,该技术为组合式空调机组增设一个包含干燥用风机、电加热器以及循环管路的电热干燥系统,在系统停止运行期间,将空调机组内迅速升温至约60℃并维持至少30min。原理上,大多数细菌病毒等微生物可在此条件下达到灭活条件,例如新型冠状病毒的灭活条件为56℃下30min,因此该技术可在很大程度上解决过滤器的微生物孳生问题。

2)当过滤器存在残存活性微生物风险时,必须关注过滤器的安全更换以及后续无害化处理问题,避免工作人员与过滤上存活微生物产生接触从而导致感染事件的发生。在使用风险较高的高级别生物安全实验室应用领域,对于高风险的高效排风过滤器如何进行在线消毒灭菌、安全更换已经有了较为成熟的技术基础,复旦大学韩文东等^[18]就曾报道通过对生物安全三级实验室的核心区排风高效过滤器进行甲醛熏蒸消毒,对所放置的4种生物指示剂均可实现完全灭菌。但在医院等相对低风险建筑环境,对于过滤器的安全更换以及消毒、无害化处理的关注则不够。针对这一问题,作者建议在存在潜在感染风险的室内环境中,当使用过滤器作为净化处理措施时,应避免过滤器在被充分消毒灭菌前被暴露在清洁区域空气中,并应避免工作人员与未消毒过滤器产生直接皮肤接触。可通过熏蒸或喷洒消毒剂等方式在过滤器被卸下前进行消毒灭菌,消毒后被卸下的过滤器应存放于密封袋内并按医疗废弃物标准进行后续无害化处理,同时也必须注意工作人员在消毒、拆卸、包装以及运输过程中的个人防护。

2.2 紫外照射杀菌技术

紫外照射杀菌技术消毒效率高、作用快速、经济性好,但目前其主要应用领域仍局限于污水处理(据报道,目前约有25%的西方国家工业和生活污水处理厂使用紫外杀菌技术^[19])、物体表面消毒以及小型封闭空间空气消毒。这主要是由于紫外线目前自身所存在的一些基础技术障碍:

1)紫外线的杀菌消毒效果受多种环境因素影响,居喜娟等^[20]通过实验研究证明,在10~30℃常规室温范围内,随温度降低,紫外线消毒效果下降;房间相对湿度达到90%时、房间中喷有机物(浓度为10%小牛血清菌悬液)也同样导致紫外线消毒效果下降。此外,紫外线杀菌技术的本质仍是依赖于紫外线的辐射传播机理,因此当使用过程中紫外灯管积尘、或者空气中颗粒物的散射功能都会对紫外线的实际杀菌效果产生不利影响。

2)紫外线对人体健康有一定危害。常见健康影响包括红斑病、白内障、电光性眼炎、皮肤红斑反

应等。波长小于250nm紫外线作用于空气还可产生光化学烟雾以及臭氧等有害气体。张银娟和朱军^[21]曾报道2例因紫外线空气消毒产生臭氧所导致的呼吸道过敏反应的病例,2例病例在进入术前使用紫外线消毒30min手术室后,均出现不同程度的咳嗽、胸闷、呼吸困难、脉搏与呼吸加快等临床反应,经脱离环境和抗过敏等治疗后症状缓解。张润莉和李凤英^[22]也曾报道过在病房中有病患时进行紫外线空气消毒,导致病人呼吸抑制,经及时抢救方恢复正常的临床病例。

3)紫外杀菌具有可逆性^[23-25]。与传统的热力及化学杀菌不同,紫外线照射杀菌有时是可逆的,这是由于DNA损伤后,细胞有四种修复作用酶系统:光复活、切除修复、重组修复和诱导修复。其主要作用机理如下:

①光复活:通过可见光激活细胞的光复活酶,分解紫外线照射形成的嘧啶二聚体,使得DNA复制可以顺利进行。光复活作用是一种高度专一的修复方式,它只作用于紫外线引起的嘧啶二聚体。光复活酶在生物界分布广泛,不仅低等的单细胞生物有,鸟类也有,但高等哺乳动物却没有。

②切除修复:这是在一系列生物酶的共同作用下,将DNA链中的受损伤部位切除,并以完整的那一条链为模板,合成出被切除的部分,然后使得DNA恢复正常结构。这是较为普遍的一种修复机制,对多种损伤均能其修复作用,但有些变异的菌种却丧失了这种功能,所以表现为紫外线耐受性很差。

③重组修复:通过DNA聚合酶和连接酶的作用,使得DNA的损伤可通过DNA分子间的多次重组来逐渐得到修复。

④诱导修复或SOS修复:RecA蛋白质所参与的可诱导修复作用,称为SOS修复,也称应急反应。当DNA损伤太大导致合成停止,DNA链上留下许多大缺口是,RecA能与这些缺口结合并发生DNA链之间的重组交换,加快复制和修复,该系统可以快速修复由紫外线引发的大面积损伤,应急反应主要包括DNA修复和变异两方面。其中变异是诱导微生物产生更有利于其生存的变化。现有研究表明,细菌的修复能力很强,0℃条件下2min即可完成快修复,而慢修复在37℃条件下40-60min也可完成。

4)紫外杀菌的所导致的细菌耐药性变异问题。微生物经紫外线照射后呈现多向性结果,有些被彻底灭活,有些则保持存活,有些死而复活,而有些则发生了不同程度的变异,而变异的方向同样多种多样,有的具备了更强的紫外线抵抗力,有的可耐化学杀菌剂,有的生化性能变了,而目前研究较为

关注的则是部分细菌对抗生素产生了耐药性变异。Weckes 等^[26]发现,经 45mJ/cm² 的紫外线消毒后,水中大肠杆菌对四环素和氯霉素的耐药率高于消毒前,并且多重耐药大肠菌群的比例也显著升高。陈艳华等^[27]曾报道医院空气中微生物的耐药性高达 72%~76.9%,远高于社区,有学者认为这可能与基层医院大量使用紫外线进行空气消毒有关。王燕等^[28]曾报道短时间的紫外线照射并传代培养后,细菌发生较为明显的耐药性变异,其中,第四代褪色沙雷菌对阿莫西林/克拉维酸的敏感性由中介变为耐药,第八代褪色沙雷菌对氨基糖苷由敏感变为中介,第十二代褪色沙雷菌对头孢呋辛由中介变为耐药。孙荣同等^[29]发现,将阴沟杆菌和表皮葡萄球菌经紫外线照射诱导后,阴沟杆菌第 8 代对 5 种抗生素呈现耐药性,而且其存活时间也更长了(抗紫外),其中,对氨苄西林和亚胺培南由敏感转为耐药,对阿莫西林/棒酸由中介转为耐药,对氨基糖苷、哌拉西林/他唑巴坦以及替卡西林/棒酸由敏感转为中介;而表皮葡萄球菌第 8 代对红霉素由敏感转为耐药,对四环素则由耐药转为敏感。

3 结论

综上所述,过滤、紫外辐照、静电均可基本满足空气消毒需求,但其不同的技术原理决定了其必然存在不同的适用场景以及适用条件,工程技术人员在进行相应的设计、施工、改造以及装置运行维护过程中应根据具体需求选择适用的技术,并关注其对应的潜在风险,避免因技术措施使用不当或维护不当导致的不利后果。

参考文献

- [1] 于玺华. 现代空气微生物学 [M]. 人民军医出版社, 2002
- [2] 李恒业. 大气中生物粒子的等效率直径及其有效滤材的研究 [C], 中国电子学会洁净技术学会第二届学术年会论文集, 1986: 170-174
- [3] 涂光备, 张少凡. 纤维型滤料滤菌、滤尘效率关系的研究 [J], 洁净技术: 1990, 2: 20-21
- [4] Karin K.Foarde, James T. Hanley, ASHRAE 909-RP, Determine the efficacy of antimicrobial treatments of fibrous air filters, ASHRAE, 1996:9
- [5] Sellers R.F., Parker J., Airborne excretion of foot and-mouth disease virus[J], The Journal of Hygiene, 1969, 67(4):671-677
- [6] 薛广波. 现代消毒学 [M], 北京: 人民军医出版社, 2002:196-198
- [7] 丁有生, 紫外杀菌灯技术与应用 [J], 灯与照明, 2015, 39: 1-4
- [8] 郭佳佳. 玻璃纤维和化学纤维滤料对悬浮细菌颗粒物的过滤性能研究 [D], 天津大学环境科学与工程学院, 1997
- [9] 董非, 李爱萍, 杨彬等. 医用空气净化消毒器杀菌效果的试验观察 [J]. 中国卫生检验杂志, 2007, 017(006):1088-1089
- [10] 刘新, 康颖, 邹芳等. 电晕放电自由基簇射技术杀菌试验研究 [J], 载人航天, 2015 (21): 125-129
- [11] 韩贵媛. 微生物气溶胶在纤维滤料上过滤和繁殖规律的研究 [D], 天津大学环境科学与工程学院, 2011
- [12] 孟蕾. 微生物气溶胶在空气纤维滤料上的繁殖和次生污染研究 [D], 天津大学环境科学与工程学院, 2012
- [13] Kemp P, Neumeister-Kemp H, Lysek G, et al. Survival and growth of micro-organisms on air filtration media during initial loading[J], Atmospheric Environment, 2001, 35(28):4739-4749
- [14] Martikainen, P.J., Asikainen, A., Nevalainen, A. et al., Microbial growth on ventilation filter materials, Indoor Air, 1990(3):203-206
- [15] Neumeister, H.G., Moritz, M., Schleibinger, H. et al., Investigation on allergic potential induced by fungi on air filters of HVAC systems, Indoor Air, 1996(3):125-130
- [16] Verdenelli M., Cecchini C., Orpianesi C., et al. Efficacy of antimicrobial filter treatments on microbial colonization of air panel filters[J], Journal of Applied Microbiology, 2003, 94(1):9-15
- [17] 许钟麟, 赵伟, 孙宁. 适用于医院净化空调机组的干燥灭菌装置: 中国, 201520478015.9[P]
- [18] 韩文东, 孙志平, 丁悦娜等. 生物安全三级实验室核心区排风高效空气过滤器原位消毒的研究 [J], 微生物与感染, 2012, 7 (3): 146-151
- [19] 丁有生. 紫外杀菌灯技术与应用 [J], 灯与照明, 2015, (39): 1-4
- [20] 居喜娟, 薛广波, 卞雪莲等. 紫外线空气消毒器除菌效果的研究, 中国消毒学杂志 [J], 1994, 11(4): 223-226
- [21] 张娟银, 朱军. 紫外线空气消毒所产生臭氧引起呼吸道过敏病例报告 [J], 中国消毒学杂志, 1996, 13(2): 100-101
- [22] 张润莉, 李凤英. 紫外线空气消毒致病人呼吸抑制一例报告 [J], 中华护理杂志, 1997, 32(4): 248
- [23] 于玺华. 紫外线照射消毒技术的特性及应用解析 [J]. 暖通空调, 2010, 07: 68-72

- [24] 沈同, 王镜岩. 生物化学 [M], 北京: 高等教育出版社, 1998, 346-349
- [25] 池振明. 现代微生物生态学 [M], 北京: 科学出版社, 2006, 167-171
- [26] Meckes M.C., Effect of UV light disinfection on antibiotic-resistant coliforms in wastewater effluents. *Applied and Environmental Microbiology*, 1982, 43(2): 371-377
- [27] 陈艳华, 李晖, 陆一平等. 医院空气中细菌分类及耐药性分析 [J], *中国抗生素杂志*, 2006, 31(8): 505-507
- [28] 王燕, 周焜, 张映华等. 紫外线照射对细菌耐药性的影响 [J], *中华医院感染学杂志*, 2010, 20: 3355-3356/3363
- [29] 孙荣同, 王明义, 高海娥. 紫外照射对两种不同类型细菌的影响 [J], *中国消毒学杂志*, 2009, 26(2): 158-161

利用多机器人嗅觉方法定位洁净厂房中颗粒物源的实验研究

郭讯, 蔡浩, 鲍高贵, 廖禹, 陈阿祥

(南京工业大学, 南京 211800)

[摘要] 获知洁净厂房中颗粒物的释放源位置, 对于实现洁净厂房中的颗粒物高效控制、气流组织优化与节能等均具有重要的意义。针对洁净厂房中定位颗粒物源的问题, 本文开发了一种基于改进的粒子群优化算法的颗粒物源定位方法 (IPSO 方法), 并在真实的环境中进行了源定位实验。用 IPSO 方法开展了 15 组独立实验, 成功了 11 组, 成功率为 73.3%。进而利用基于标准粒子群算法的源定位方法 (SPSO 方法) 进行了 15 组独立实验, 成功了 7 组, 成功率为 46.7%。通过对比两种方法的实验结果发现, IPSO 方法的成功率远高于 SPSO 方法, 且具有应用在洁净厂房中定位颗粒物源的潜力。

[关键词] 洁净厂房; 颗粒物; 源定位; IPSO 方法

0 引言

随着电子、生物等高新技术的发展, 洁净行业已成为半导体、微电子、光伏、医药、精密仪器等高科技领域发展的基础支撑。在这些领域的产品生产过程中, 对于洁净厂房的环境要求十分严格, 一颗微粒就可能导致巨大的损失。例如 1 的微粒落入 1 Mbit 容量的集成电路芯片上即可对它造成破坏^[1,2]。在制药行业, 洁净厂房中生产环境的微粒可能会和药物中的某些成分发生化学反应, 使得药品产生不可控的变化, 从而影响药品的稳定性和纯度等, 严重时可能会导致患者死亡^[3]。因此, 保障洁净厂房中颗粒物的数量尤为重要, 而快速、准确地定位颗粒物源的位置是进一步控制洁净厂房中颗粒物数量的重要前提。

目前, 源定位方法大致可分为固定传感器网络方法和机器人嗅觉方法两类^[4,5]。前者通常利用布置在室内有限数量的传感器所检测的污染物浓度来推断源的位置^[6]。后者通常使用配备传感器的机器人, 自主寻找目标污染物、追踪烟羽, 最终找到污染源^[7-10]。与固定传感器网络方法相比, 机器人嗅觉方法的主要优势在于: 不依赖于对流场环境的仿真建模、不需要提前布置传感器、对复杂和未知环境具有更强的适应性。综上所述, 本文将采用机器人嗅觉方法进行源定位。

近年来, 一些学者试图将机器人嗅觉方法应用到定位室内环境的污染源中, 提出了几种多机器人嗅觉方法, 主要包括改进的蚁群算法^[11,12]、鲸鱼优化算法及其改进算法^[13]、粒子群算法^[14]及其改进算法^[15-19]。但是, 这些方法主要针对的气体源的定位问题, 只有少数研究考虑了室内颗粒物源的定位问题^[13,20,21]。Feng 等人^[20]提出了一种改进粒子群优化

算法用于定位室内颗粒源, 该方法通过在标准粒子群算法中加入迎风项, 利用 CFD 对每种场景下的颗粒浓度和空气速度进行模拟, 并将其提供给粒子群算法进行源定位。结果表明, 该方法定位成功率超过 96%, 远远高于 SPSO 算法的定位成功率。Yang 等人^[13]提出了标准鲸鱼方法 (SWOA 方法) 和改进的鲸鱼方法 (IWOA 方法) 分别用于在没有气流信息和有气流信息的情况下定位室内时变颗粒源, 通过实验和 CFD 仿真相结合的方法, 与 SPSO 方法和 IPSO 方法进行了验证和比较, 结果表明, SWOA 方法比 SPSO 方法具有更高的成功率。IWOA 方法的成功率略好, IPSO 方法在平均定位时间方面略好于 IWOA 方法。Chen 等人^[21]介绍了一种安装了低成本多通道光学颗粒计数传感器的移动机器人寻找颗粒物来源的方法且做了相关实验, 但是该方法基于信息趋同的气味源定位算法为了拟合颗粒羽流模型, 在风洞中进行了精细化的测量数据采集。

上述研究尽管取得了一定的进展, 但是这些研究均是仿真研究, 因此不可避免地存在一些局限性:

(1) 时均化的数值模型难以模拟污染物浓度受湍流影响呈现出的剧烈和频繁波动; (2) 仿真研究中没有充分考虑传感器的特性; (3) 仿真研究很难体现机器人对流畅的干扰及机器人之间的碰撞。

本研究旨在解决洁净厂房中颗粒物源的定位问题, 为未来应用到洁净厂房中提供理论支撑。为了有效实现这一目标, 本文提出了一种适用于定位颗粒物源的改进粒子群优化方法 (IPSO 方法), 搭建了一套多机器人颗粒物源定位系统, 并在真实环境中验证了该方法的可行性。利用了 3 台机器人采用 IPSO 方法进行了 15 组独立实验。此外, 又利用基于标准粒子群算法的源定位方法 (SPSO 方法) 进行

了15组独立实验，对比了ISPO方法和SPSO方法的性能。

1 多机器人嗅觉方法

1.1 方法框架

多机器人的溯源流程一般包括了三个过程：烟羽发现过程、烟羽追踪过程和源确认过程，详细流程见图1。机器人通过烟羽发现算法离开初始位置，进入烟羽发现过程，沿直线向前检测空间中存在的某种污染物。在这一过程中，如果任何一台机器人检测到的浓度高于设定的发现阈值 C_{min} ，说明其中某台机器人发现了空间中存在的某种特定污染物。机器人发现烟羽后，进入烟羽追踪过程，机器人利用烟羽追踪算法持续追踪烟羽，并向检测到的浓度较高的区域移动，直到机器人陷入浓度局部极值区（浓度高于周围浓度的区域）。机器人陷入浓度局部极值区后，进入源确认过程，利用源确认算法，判断是否找到了源。

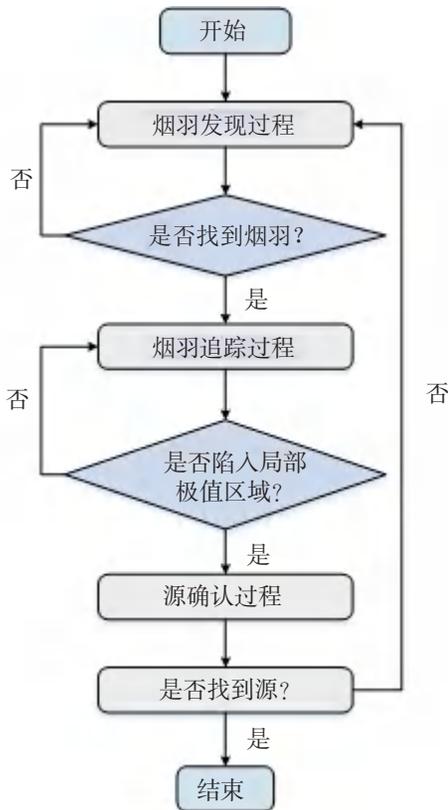


图1 多机器人溯源方法的流程图

三个过程主要涉及了三个核心算法，此外，为了避免机器人之间、机器人和障碍物之间的碰撞，在溯源过程中还增加了避障算法^[22]。

1.2 溯源方法

在烟羽发现过程中，采用一种简单的发散策略^[23]快速发现烟羽。多台机器人通过烟羽发现算法从

初始位置出发，机器人沿直线向前移动，多台机器人的运行轨迹之间呈相同的夹角，以实现快速发现烟羽的目的^[15]。当机器人检测到的污染物浓度超过预设的阈值 C_{min} ，则多机器人进入烟羽追踪过程。

在烟羽追踪过程中，本文采用的算法为改进粒子群优化算法（IPSO），是在标准粒子群优化算法（SPSO）的基础上引入了逆风项。SPSO算法一般是用第 i 个机器人 R_i ($i=1,2,3,\dots,N$) 在某一时刻 t 检测到的浓度 $c_i(t)$ 评估机器人是否在合适的位置，并指导机器人的下一步行动。在SPSO算法中， R_i 的速度向量和位置更新公式为：

$$V_i(t+1) = \omega \times V_i(t) + l_1 \times r_1 \times (P_i^*(t) - P_i(t)) + l_2 \times r_2 \times (X^*(t) - P_i(t)) \quad (1)$$

$$P_i(t+1) = P_i(t) + V_i(t+1) \quad (2)$$

其中， $V_i(t)$ 和 $P_i(t)$ 分别表示 R_i 在 t 时刻的速度向量 (m/s) 和位置 (m)； ω 为惯性权重，本文取为 $I^{[15]}$ ； $l_1 \times r_1 \times (P_i^*(t) - P_i(t))$ 表示 R_i 趋向自我探索浓度最优值的位置，其中 $P_i^*(t)$ 表示 R_i 在 t 时刻位置， P_i^* 表示从溯源开始到 t 时刻 R_i 自身浓度最大值 $C_i^* [t]$ 所对应的位置， l_1 取为 $2^{[24]}$ ； $l_2 \times r_2 \times (X^*(t) - P_i(t))$ 表示 R_i 之间协同合作与信息共享，其中 $X^*(t)$ 表示从溯源开始到 t 时刻机器人团体检测到的浓度最大值 $C^*(t)$ 所对应的位置， l_2 取值为 $2^{[24]}$ ； r_1 和 r_2 是匀分布在 $[0, 1]$ 之间的随机数。

R_i 自身的局部最优位置更新公式为：

$$P_i^*[t+1g] = \begin{cases} P_i^*[t+1g] & c_i[t+1g] \geq c_i[tg] \\ P_i^*[tg] & c_i[t+1g] \# c_i[tg] \end{cases} \quad (3)$$

$$P_i^*[t+1g] = \begin{cases} P_i^*[t+1g] & c_i[t+1g] \geq c_i[tg] \\ P_i^*[tg] & c_i[t+1g] \# c_i[tg] \end{cases} \quad (4)$$

多机器人的全局最优位置更新公式为：

$$X^*[t+1g] = \begin{cases} P_i^*[t+1g] & c_i[t+1g] \geq C_i^*[tg] \\ X^*[tg] & c_i[t+1g] \# C_i^*[tg] \end{cases} \quad (5)$$

在SPSO算法中仅利用了浓度信息，因此机器人比较容易陷入局部极值区域^[13,24]。IPSO算法是在SPSO算法的基础上，通过增加逆风项，形成一种融合浓度和气流信息的改进粒子群算法，其速度向量更新公式为：

$$V_i(t+\Delta t) = \omega \times V_i(t) + l_1 \times r_1 \times (P_i^*(t) - P_i(t)) + l_2 \times r_2 \times (P_g^*(t) - P_i(t)) + l_3 \times r_3 \times V_i^u \quad (6)$$

其中 l_3 反应气流对 R_i 速度的影响，本文中设为 $3^{[15]}$ ，能帮助机器人快速追踪气流； r_3 是均匀分布在 $[0, 1]$ 之间的随机数。

V_i^u 为 R_i 在 t 时刻的逆风项向量，表示为：

$$V_i^u = \begin{cases} -V_{\max} \times V_i^s \div |V_i^s| & |V_i^s| \geq V_{\min}^s \\ V_{\max} \times V_r & |V_i^s| < V_{\min}^s \end{cases} \quad (7)$$

其中， V_{\max} 表示机器人最大移动步长 (m)， V_i^s 表示 R_i 在 t 时刻检测到的气流速度 (m/s)， V_r 表示在 $[0, 1]$ 内均匀分布的一个无量纲随机向量， V_{\min}^s 表示风速风向仪的测量阈值 (m/s)。

在源确认过程中，本文采用浓度极大值方法^[25]确认源和终止溯源过程。当机器人检测到浓度极值后，如果全局最优位置对应的浓度极值 $C^*(t)$ 大于设定的源确认浓度阈值 C_{\max} ，则认为这个全局最优位置在源附近，同时终止溯源过程，否则机器人跳出局部极值区域继续检测更高的浓度值和追踪源。



(a)



(b)

图2 实验场地: (a) 实验室现场; (b) 实验区域示意图 (DS: 下风区的源位置; SP1~SP3: 机器人起始位置)

2 实验设置

本文在南京工业大学城市建设学院实训中心开展了实验，机器人活动范围为 $7.65\text{m} \times 4.1\text{m}$ (如图2所示)。在实验中利用了3台移动机器人来验证SPSO方法和IPSO方法的有效性和可行性。每台机器人搭载1个激光雷达 (RPlidar A1)，1台工控机，1台超声波风速风向仪 (Windsonic)，1个颗粒物浓度传感器 (CP-15-A4-CG)。

实验采用了超声波离子加湿器作为空气中颗粒物释放源^[26]，通过将氯化钠盐溶液雾化产生颗粒物，本文主要检测 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物的体积浓度。首先将氯化钠盐溶液倒入超声波加湿器中，然后利用PVC管将雾化的颗粒物输送到制定位置，带孔小球的位置作为颗粒物源位置。释放源位于下风区的位置 ($X=7.35\text{m}$, $Y=3.05\text{m}$)，其高度为 1.05m 。

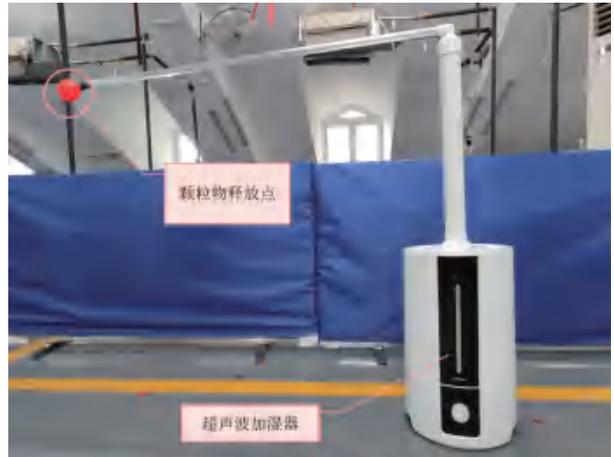


图3 颗粒物源释放装置

在每次开始源定位实验前，将门窗打开进行通风，当室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于30时，关闭门窗，打开柜式空调。随后开启超声波加湿器释放颗粒物，再让机器人按照SPSO方法和IPSO方法进行源定位实验。机器人从起始位置出发，采取“走-停-走”策略^[11]行进。每台机器人的最大移动步长不超过 0.5m ，最大线速度为 0.3m/s ，每台机器人每一步耗时约为 10s ，数据采集时间为 6s ，采样频率为 10Hz 。

在每次实验过程中，烟羽发现的浓度阈值均设为180。在烟羽追踪过程，如果多台机器人的全局最优位置在5步内变化小于等于 0.5m (等于最大移动步长)，则机器人认为已陷入浓度极值区域，然后采用浓度极大值方法进行源确认，源确认的浓度阈值设置为1300。此外，为了避免单次实验耗时过长，机器人移动步数达到50步 (耗时大约为 15min) 则直接终止源定位过程。当实验终止时，如果机器人定位的源位置距离实际的源位置不超过 0.5m ，则认

为源定位成功，否则认为源定位失败^[27]。

3 结果与讨论

3.1 源定位结果分析

为了解决洁净厂房中定位颗粒物源的问题，本文针对颗粒物源采用 IPSO 方法和 SPSO 方法在真实环境中分别进行了 15 组独立实验，实验结果如表 1 所示。当采用 IPSO 方法时，15 组实验成功了 11 组，成功率为 73.3%。当采用 SPSO 方法时，15 组实验了 7 组成功，成功率为 46.7%。实验结果表明了本文利用 IPSO 方法在能够成功定位颗粒物源，且具有较高的成功率。

表 1 颗粒物源定位的实验结果

源定位方法	成功组数 / 总组数	成功率	平均定位步数
IPSO 方法	11/15	73.3%	36.8
SPSO 方法	7/15	46.7%	38.8

3.2 源定位过程分析

3.2.1 IPSO 方法成功案例分析

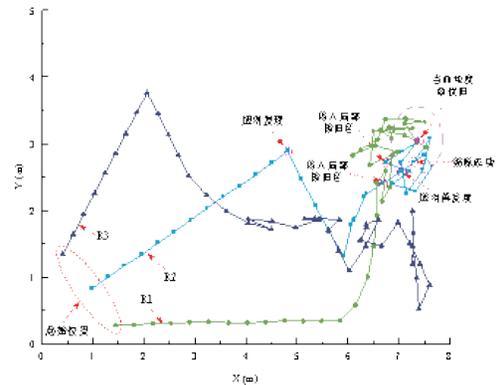
图 4 展现了一组利用 IPSO 方法定位在 DS 位置上的颗粒物源的成功案例，以及三台机器人每步采集到的最大浓度平均值。

机器人 (R1~R3) 分别从各自的起始位置出发，沿直线朝不同的方向进行发散，在第 12 步时，R2 发现了烟羽。

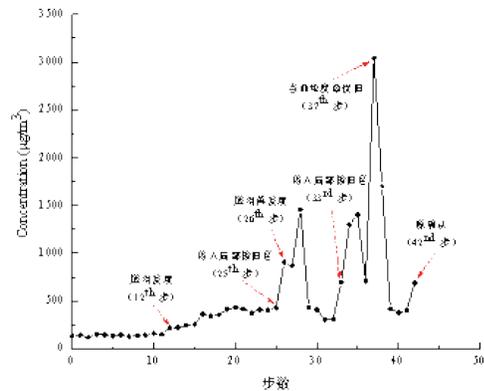
机器人群体在发现烟羽后，采用烟羽追踪算法，通过 IPSO 算法持续追踪烟羽。在第 20 步时，机器人群体探测到一个当前浓度最大值 $C^*(t)$ (图 4(b))，机器人群体开始在此区域附近进行搜索，直到第 25 步，机器人群体探测到的浓度平均值仍小于 $C^*(t)$ ，因此认为它们陷入了 1 个局部极值区。

机器人群体陷入局部极值区后，利用极值逃离机制逃离该区域。第 26 步，机器人群体发现一个新的浓度最优值 $C^*(t)$ ($903.95\mu\text{g}/\text{m}^3$) (图 4(b))，因此它们跳出之前的浓度极值区域，重新开始追踪烟羽。在第 28 步，机器人群体检测到的浓度平均值 ($1456\mu\text{g}/\text{m}^3$) 高于第 26 步的检测值，直到第 33 步，机器人群体探测到的浓度平均值仍小于 $C^*(t)$ ，判断已陷入了第 2 个局部极值区。

机器人群体在第 37 步发现一个新的浓度最优值 $C^*(t)$ ，且该值大于 C_{max} 。在接下来的 5 步中，机器人群体在其周围进行浓度探索，但未发现更大的浓度平均值。因此，机器人群体在第 42 步将第 37 步发现的全局浓度最优值的位置确定为源位置，且终止溯源。机器人群体确定的源位置与实际源位置的误差在水平与垂直方向均小于 0.5 m (图 4(a))，因此认定此次源定位实验成功。



(a) R1-R3 移动轨迹图



(b) R1-R3 每步采集的最大浓度平均值

图 4 利用 IPSO 方法成功定位颗粒物源的实验结果

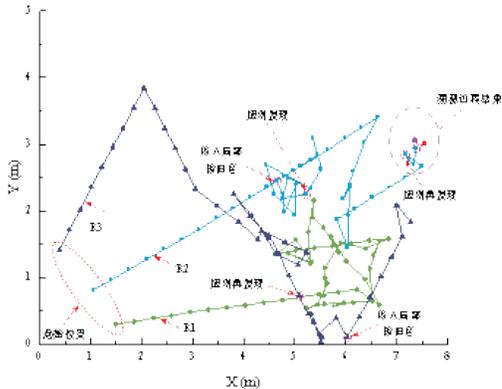
3.2.2 SPSO 方法失败案例分析

图 5 展示了利用 SPSO 方法定位颗粒物源的实验过程以及三台机器人在每一步中检测的平均浓度的最大值。在整个源定位过程中，每台机器人都移动了 50 步，经历了烟羽发现、烟羽追踪、陷入局部极值区这一系列过程。

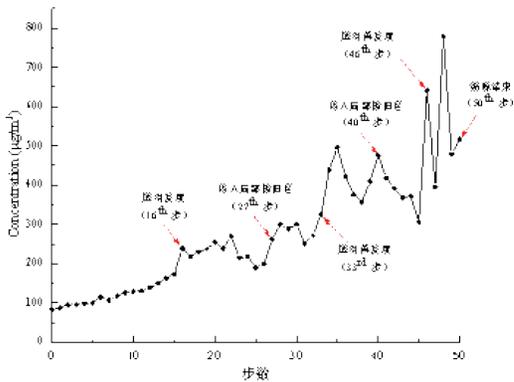
机器人 (R1~R3) 分别从各自的起始位置出发，沿直线朝不同的方向发散。在第 16 步，R2 发现了烟羽，三台机器人同时进入烟羽追踪过程。

机器人群体在发现烟羽后，采用 SPSO 算法持续追踪烟羽。在第 22 步时，机器人群体探测到一个当前浓度最大值 $C^*(t)$ (图 5(b))，此后，机器人在此区域附近进行搜索，直到第 27 步，机器人群体探测到的浓度平均值仍小于 $C^*(t)$ ，因此判定陷入了 1 个局部极值区。

机器人群体陷入局部极值区后，利用极值逃离机制逃离该区域。在第 33 步时，R3 检测到一个新的浓度最优值 $C^*(t)$ ($325.36\mu\text{g}/\text{m}^3$) (图 5(b))，跳出局部极值区，重新开始追踪烟羽。在第 35 步，机器人群体检测到的浓度平均值 ($496.36\mu\text{g}/\text{m}^3$) 高于第 33 步的检测值，直到第 40 步，机器人群体探测



(a) R1~R3 移动轨迹图



(b) R1~R3 每步采集的最大浓度平均值

图5 利用SPSO方法定位颗粒物源的实验失败结果
 到的浓度平均值仍小于 $C^*(t)$ ，判断已陷入了第2个局部极值区。采用极值逃离机制逃离局部极值区后，在第46步，机器人群体检测到了一个新的浓度最优值 $C^*(t)$ ($641.76\mu\text{g}/\text{m}^3$) (图5(b))，但是直到第50步机器人都未能检测到一个超过 C_{max} 的检测值，根据设定的算法程序，当达到50步未能定位到源，则直接终止源定位过程，且判定该源定位过程失败。

在对这组失败的实验案例进行分析后可以发现，机器人在溯源过程中检测到的浓度始终都较低。从图5(a)可得，在最后一次烟羽在发现过程中，虽然机器人R2与源的距离小于0.5m，但是却并未检测到大于 C_{max} 的浓度值。这可能是由于柜式空调的送风百叶周期性的摆动导致烟羽有很大的波动性，在距离源更近的位置检测到的浓度平均值并不总是更高的。

4 结论

为了解决在洁净厂房环境中颗粒物源的定位问题，以进一步应用到洁净厂房中提供理论依据，本文基于标准粒子群算法，提出了一种颗粒物溯源方

法(IPSO方法)。本文以超声波加湿器释放的颗粒物为对象，通过三台机器人开展了颗粒物源定位实验，验证了IPSO方法的可行性，并对比了IPSO方法和SPSO方法的性能。通过本文实验研究，可得到如下结论：

(1) 采用IPSO方法在下风区的颗粒物源位置上进行了15组实验，成功了11组，成功率为73.3%，机器人的平均定位步数为36.8步。结果表明IPSO方法定位颗粒物源具有较高的成功率和可行性。

(2) 采用SPSO方法在下风区的颗粒物源位置上也进行了15组实验，成功了7组，成功率为46.7%，机器人的平均定位步数为38.8步。对比IPSO方法和SPSO方法的实验结果，IPSO方法的成功率和平均定位步数均高于SPSO方法，而SPSO方法的成功率较低尚不能够满足洁净厂房等实际工程的需求。

受实验条件的限制，本文在普通室内环境中开展机器人溯源实验，旨在验证方法的可行性。在今后的研究中，尚需要在真实的洁净厂房中进行实验，以期进一步推动方法在洁净厂房中的应用。

参考文献

[1] WHYTE W, BAILEY P v. Particle dispersion in relation to clothing[J]. The Journal of Environmental Sciences,1989,32(2):43-49
 [2] BERNDT C. Evolution of IEST-RP-CC003. 3, Garment System Considerations for Cleanrooms and Other Controlled Environments[J]. Journal of the IEST,2003,46:21
 [3] 王英伦. 尘埃粒子在医药生产中的危害及控制 [OL].2012, <http://www.phmacn.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=39&id=4315>
 [4] CHEN Y, CAI H, CHEN Z, et al. Using multirobot active olfaction method to locate time-varying contaminant source in indoor environment[J]. Building and Environment, 2017,118:101-112.DOI:10.1016/j.buildenv.2017.03.030.
 [5] CHEN X, HUANG J. Odor source localization algorithms on mobile robots: A review and future outlook[J].Robotics and Autonomous Systems,2019,112:123-136
 [6] ZHANG T T, YIN S, WANG S. Quantify impacted scope of human expired air under different head postures and varying exhalation rates[J].Building and environment,2011,46(10): 1928-1936
 [7] LILIENTHAL A J, LOUFI A, DUCKETT T.

Airborne Chemical Sensing with Mobile Robots:

11[J].Sensors, 2006, 6(11): 1616–1678. DOI:10.3390/s6111616.

[8] ISHIDA H, WADA Y, MATSUKURA H. Chemical Sensing in Robotic Applications: A Review[J].

IEEE Sensors Journal,2012,12(11):3163–3173 DOI:10.1109/JSEN.2012.2208740.

[9] KOWADLO G, RUSSELL R A. Robot odor localization: a taxonomy and survey[J].The international Journal of Robotics Research,2008,27(8):869–894. DOI:10.1177/0278364908095118.

[10] 路光达, 张明路, 张小俊等. 机器人仿生嗅觉研究现状 [J]. 天津工业大学学报, 2010, 29(6): 72–77

[11] Luo D H, Zou Y H, Zhuang J J. Multi-robot odor source localization strategy based on a modified ant colony algorithm[J].Robot,2008,30(6):536-541

[12] MENG Q-H, YANG W-X, WANG Y, 等. Adapting an ant colony metaphor for multi-robot chemical plume tracing[J].Sensors,2012,12(4):4737–4763

[13] YANG Y, ZHANG B, FENG Q, et al. Towards locating time-varying indoor particle sources: Development of two multi-robot olfaction methods based on whale optimization algorithm[J]. Building and Environment,2019,166. DOI:10.1016/j.buildenv.2019.106413.

[14] 孟庆浩, 李飞, 张明路等. 湍流烟羽环境下多机器人主动嗅觉实现方法研究 [J]. 自动化学报, 2008,34(10): 1281–1290

[15] FENG Q, CAI H, CHEN Z, et al. Experimental study on a comprehensive particle swarm optimization method for locating contaminant sources in dynamic indoor environments with mechanical ventilation[J]. Energy and Buildings,2019,196:145–156. DOI:10.1016/j.enbuild.2019.03.032.

[16] MENG Q-H, YANG W-X, WANG Y, et al. Collective Odor Source Estimation and Search in Time-Variant Airflow Environments Using Mobile Robots: 11[J]. Sensors, 2011, 11(11): 10415–10443. DOI:10.3390/s111110415

[17] GONG D-W, ZHANG Y, QI C-L. Localising odour source using multi-robot and anemotaxis-based particle swarm optimisation[J].IET control theory & applications, 2012, 6(11):1661–1670

[18] FENG Q, ZHANG C, LU J, et al. Source

localization in dynamic indoor environments with natural ventilation: An experimental study of a particle swarm optimization-based multi-robot olfaction method[J].Building and Environment,2019,161. DOI:10.1016/j.buildenv.2019.106228.

[19] FENG Q, CAI H, YANG Y, et al. An Experimental and Numerical Study on a Multi-Robot Source Localization Method Independent of Airflow Information in Dynamic Indoor Environments[J]. Sustainable Cities and Society,2020,53:101897. DOI:10.1016/j.scs.2019.101897

[20] FENG Q, CAI H, LI F, et al. An improved particle swarm optimization method for locating time-varying indoor particle sources[J].Building and environment, 2019,147:146–157[21]CHEN X, MARJOVI A, HUANG J, et al. Particle Source Localization With a Low-Cost Robotic Sensor System: Algorithmic Design and Performance Evaluation[J]. IEEE Sensors Journal, 2020,20(21):13074–13085

[22] FENG Q, CAI H, LI F, et al. Locating time-varying contaminant sources in 3D indoor environments with three typical ventilation systems using a multi-robot active olfaction method[C]//Building Simulation. Springer,2018:597–611

[23] 李吉功. 室外时变气流环境下机器人气味源定位 [D]. 天津大学, 2010

[24] JATMIKO W, SEKIYAMA K, FUKUDA T. A pso-based mobile robot for odor source localization in dynamic advection-diffusion with obstacles environment: theory, simulation and measurement[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine,2007,2(2): 37–51. DOI:10.1109/MCI.2007.353419

[25] 奉祁林, 杨艺斌, 邓焯等. 室内时变流场中多机器人源定位方法实验与数值验证 [J]. 环境工程, 1–12

[26] LUNDGREN D A. An aerosol sampler for determination of particle concentration as a function of size and time[J].Journal of the Air Pollution Control Association, 1967, 17(4):225–229

[27] LI J G, MENG Q H, WANG Y, et al. Odor Source Localization Using a Mobile Robot in Outdoor Airflow Environments with a Particle Filter Algorithm[J].Autonomous Robots, 2011,30(3):281–292. DOI:10.1007/s10514-011-9219-2

高效空气过滤元件生命周期 综合能耗评价实验研究

曹冠朋^{1,2}, 冯昕^{1,2}, 江锋³, 张惠^{1,2}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建科环能科技有限公司, 北京 100013;
3. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

[摘要] 本文主要通过实验方法重点研究高效空气过滤元件(过滤器及滤料)生命周期综合能效评价的特征粉尘以及综合能效评价方法,并对多种滤料和滤器进行实际的生命周期综合能效评价。通过研究得出结论:1)高浓度粉尘会使阻力容尘试验时间缩短,但可能导致低估过滤元件综合能耗的状况,推荐低浓度的NaCl气溶胶作为滤料能效测试的粉尘;2)经验证,可以采用四阶多项式的方法拟合阻力-喂尘量关系,并据此建立高效空气过滤元件的综合能效评价方法;3)过滤器能效测试时,采用优化后的NaCl气溶胶测试结果优于KCl气溶胶,但NaCl粉尘潮解比KCl严重,测试过程阻力回落状况明显,故本文推荐采用KCl粉尘。

[关键词] 高效空气过滤元件; 能耗评价; 特征粉尘阻力; 容尘

0 引言

空气过滤元件生命周期内的综合能效评价以及相应的能效分级标识体系,一直是空气净化行业关注的重点,但截止目前,行业内仍缺乏得到广泛接受的能较为接近反应产品实际运行性能的标准化测试方法。欧洲通风协会EUROVENT^[1]曾于2011年颁布针对中效过滤器的能效测试评价方法,该方法使用现有的ASHRAE人工测试尘,其粒径过大,难以真实反映滤材深度过滤机理对其长时间运行能效的影响,因此一直未得到广泛应用,但具体何种尘源能较为接近地反映过滤元件的真实能效,目前仍缺乏令行业信服的能效测试特征粉尘及发生制备方法。另一方面,在高效空气过滤器领域,伴随着近年来低阻PTFE新型过滤材料(ePTFE)的涌现与广泛使用,针对其与基于传统深度过滤机理的玻纤滤材在整个生命周期内综合能效表现的比较,成为行业目前较为迫切的需求。针对上述问题,本文将通过实验方法重点研究高效空气过滤元件(过滤器及滤料)生命周期综合能效评价特征粉尘的发生以及适用于高效空气过滤元件综合能效评价方法的建立。

1 实验系统简介

本文拟通过改变发尘条件获得不同尘源,用其测试高效过滤元件(过滤器及滤料)的阻力容尘特性。实验中分别对高效滤料和高效过滤器进行阻力容尘测试,其中滤料容尘实验在滤料效率测试试验台上完成,实验装置流程参见GB 6165-2008《高效空气过滤器性能试验方法效率和阻力》中滤料钠焰法试验台^{[2][3]}。过滤器容尘实验采用NaCl和KCl两种气溶胶分别测试,其中NaCl实验在经过改造的高效过滤器效率测试试验台上完成,KCl实验在未经改造

的过滤器效率测试试验台上完成。

滤器称量用MS3002TS/02型分析天平,量程为0.5g~3200g,分度值0.1g,滤料称量用FA2004N型分析天平,量程为0~200g,分度值0.1mg。

滤料容尘实验样品选取过滤效率等级为H13和H14的玻纤滤料样品两种,样品有效过滤面均为φ100mm的圆形样品,滤速均为5.33cm/s;滤器容尘实验样品选取过滤效率等级为H14的高效过滤器(型号610mm×610mm×90mm无隔板高效,额定风量为1000 m³/h),中效过滤器采用过滤效率等级为F7的袋式中效。

2 实验结果及分析

2.1 试验粉尘研究

2.1.1 滤料测试粉尘

实验中分别选定不同的喷雾条件以获得期望质量浓度的NaCl气溶胶,产生不同质量浓度气溶胶的喷雾条件汇总见表1。

表1 不同喷雾条件产生气溶胶的粒径分布及实测质量浓度

上游气溶胶期望质量浓度	粒径分布及质量浓度			
	计数几何平均直径/μm	计数几何标准偏差 GSD	计重几何平均直径/μm	实测质量浓度/(mg/m ³)
标准钠焰法	0.068	1.91	0.26	40.6
"20mg/m ³ "	0.044138	1.754	0.19756	20.855
"10mg/m ³ "	0.046642	1.815	0.2425	10.72
"5mg/m ³ "	0.047348	2.045	0.38133	5.695

2.1.2 滤器测试粉尘

实验中分别采用KCl和经一道F7袋式中效过滤的NaCl气溶胶作为测试粉尘。采用KCl气溶胶作为尘源时,不经中效过滤的气溶胶峰值直径可达到近100nm,KCl粒径分布测试结果见图1,NaCl气溶胶粒径分布测试结果见图2。

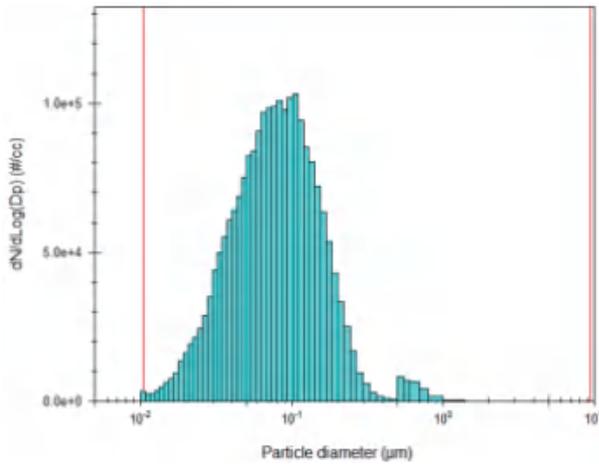


图1 KCl气溶胶粒径分布

2.2 高效过滤元件能效评价方法研究

2.2.1 滤料阻力及容尘研究

改变上游发尘条件，发生不同粒径分布和质量浓度的NaCl气溶胶，并分别测试H14和H13多块滤料的阻力容尘特性，以研究上游粉尘特性对同一滤料阻力容尘测试结果的影响。H14和H13滤料在不同上游气溶胶条件下阻力随喂尘量变化对比情况见图3。

从图3中可以看到：

1) 不同上游气溶胶条件下，各滤料阻力随喂尘量变化关系不同，相同喂尘量情况下，H13和H14滤料阻力均在“20mg/m³”上游气溶胶浓度条件下阻力随喂尘量增长最快，说明不同上游气溶胶质量浓度和粒径分布一定程度上影响滤料阻力随喂尘量变化关系；

2) 若H13、H14分别以500Pa、550Pa作为终阻力，“标准钠焰法”、“20mg/m³”、“10mg/m³”喷

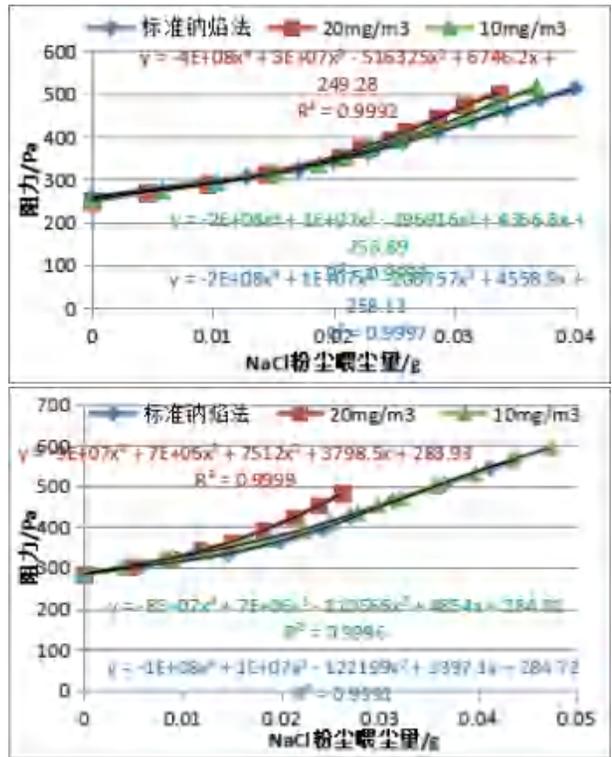
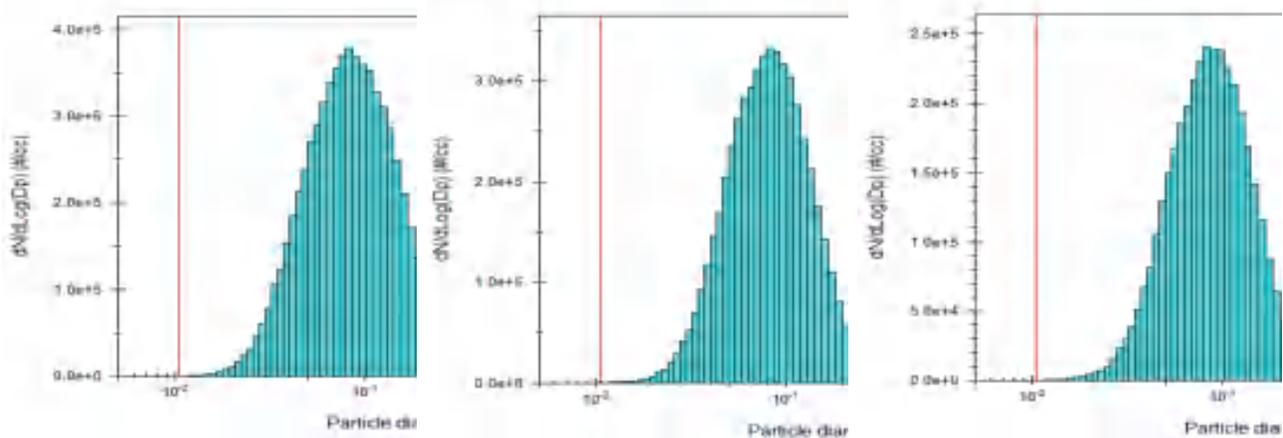


图3 H13滤料(上图)和H14(下图)滤料在不同上游气溶胶条件下阻力随喂尘量变化对比

雾条件下的H13容尘量分别为0.0385g/100cm²、0.0337g/100cm²、0.037g/100cm²，H14容尘量分别为0.04g/100cm²、0.028g/100cm²、0.0418g/100cm²。

高效滤料的阻力特性直接影响其能耗特性，所以需要建立科学的方法对过滤元件的能耗状况进行评估，以保证实验测试的能效水平接近高效过滤元件在实际使用环境中的能效水平。本文拟参考EN 779中过滤器全年运行能耗计算方法建立高效过滤



左图：初始喷雾状态；中图：喷雾40min后；右图：喷雾终状态；NaCl溶液浓度10%，喷雾压力0.6MPa

图2 喷雾不同时间段，中效下游NaCl气溶胶粒径分布情况

元件能效评价方法，并验证其可行性。采用4阶多项式：

$$\overline{TP} = a \Delta P_i^4 + b \Delta P_i^3 + c \Delta P_i^2 + d \Delta P_i + \overline{TP}_i \quad (1)$$

拟合实验中的H14和H13的阻力-容尘曲线，各滤料样品阻力-容尘关系见图8和图9。式中， a 、 b 、 c 、 d 为常数， ΔP_i 为测试风量下滤料的初阻力。

从图4中用四阶多项式拟合多块滤料在不同喷雾条件下的阻力-容尘曲线可知，实验中实测的阻力-喂尘量数据均可以通过四阶多项式准确的拟合，且相关系数 R^2 均在0.999以上，说明过滤元件的阻力和喂尘量之间满足四阶多项式的关系，同时采用下式计算滤料的平均阻力：

$$\overline{TP} = \frac{1}{M_x} \int_0^{M_x} TP dm = \frac{1}{5} a M_x^4 + \frac{1}{4} b M_x^3 + \frac{1}{3} c M_x^2 + \frac{1}{2} d M_x + \overline{TP}_i \quad (2)$$

式中， M_x 是一个规定量的负荷尘，用以模拟过滤器或滤料运行一年的情况。

采用下式计算滤料的年耗能 W ：

$$W = \frac{q_v \overline{TP} St}{h} \quad (3)$$

其中， q_v 为滤料的测试风量，取 $0.000533 \text{ m}^3/\text{s}$ ， t 为运行时间，取 6000h ， η 为风机平均效率，取 50% 。

由上面研究可知，采用不同的尘源，测试滤料的阻力-喂尘量关系也不同，从而导致计算的运行

表2 不同滤料计算平均阻力和平均年能耗结果

滤料编号	H13-2	H13-4	H13-5	H14-2	H14-3	H14-4
测试尘源	标准钠焰法	20mg/m ³	10mg/m ³	标准钠焰法	20mg/m ³	10mg/m ³
平均阻力 $\Delta P/\text{Pa}$	295.4	351.4	296.5	383.1	366.4	400.0
年耗能/W	1889.6	2247.3	1896.3	2450.3	2343.7	2558.6

注：测试滤料面积 100cm^2 ，测试滤速为 5.33cm/s 。

能耗也不同，那么当采用不同的测试粉尘时这种能效计算的结果差别有多大，可以通过实际测试数据进行计算，以探讨不同分布测试气溶胶对滤料计算能耗的影响。为便于计算，本文H13、H14滤料终阻力分别选取 500Pa 和 550Pa 。根据图4中的拟合函数分别计算H13和H14在不同上游测试尘源条件下的能耗值，计算结果见表2。

从表2中可以看到：

1) 不同上游测试气溶胶喷雾条件下，同一滤料的计算平均阻力和年能耗均有一定差别，即测试尘源特性对测试样品的计算平均阻力及能耗有影响；对于H13滤料，在“ 20mg/m^3 ”喷雾条件下的平均阻力和年能耗计算值均比另两条件大，和最小值相比大 18.9% ；对于H14滤料，在“ 10mg/m^3 ”喷雾条件下的平均阻力和年能耗计算值均比另两条件大，和最小值相比大 9.2% ；

2) 相同测试粉尘条件下，不同级别滤料之间计算平均阻力和年能耗均差别明显；

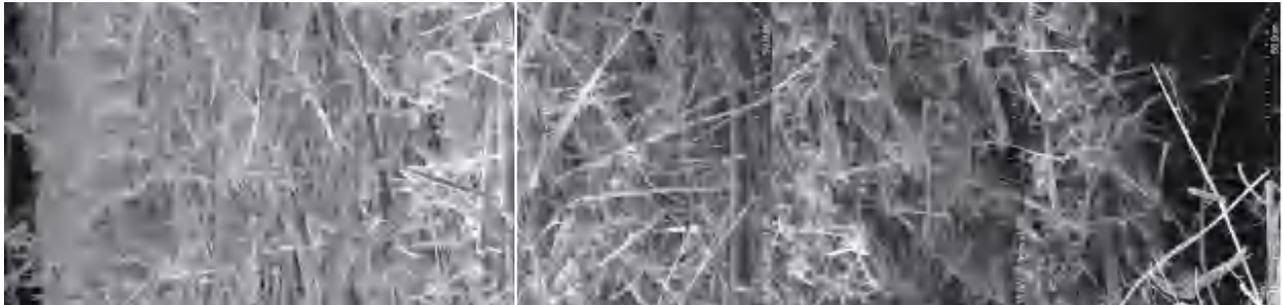


图4 H14滤料(上游 20mg/m^3)样品截面电镜结果
(迎风面到背风面的不同深度共拍照五次，对应图从左到右顺序，下同)



图5 H14滤料样品截面电镜结果(上游 10mg/m^3)

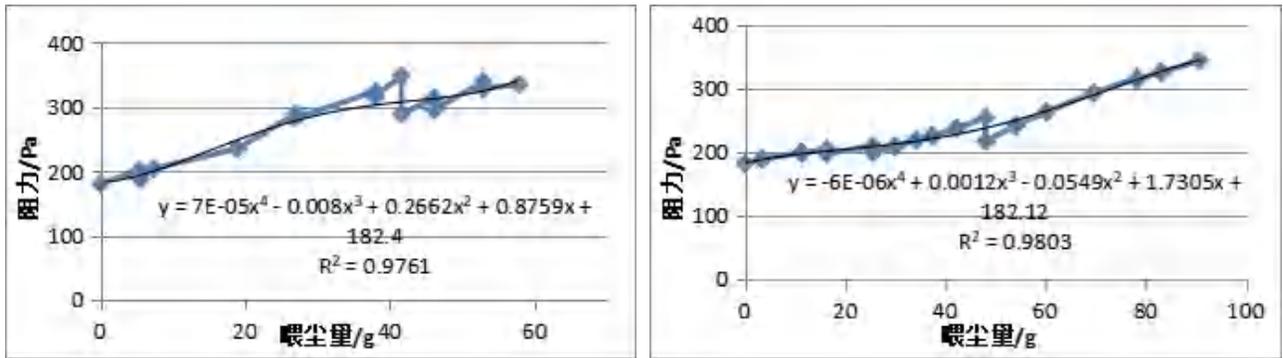


图 6 H14 过滤器阻力随喂尘量变化关系 (左图: NaCl 尘源; 右图 KCl 尘源)

为探究不同上游气溶胶喷雾条件下气溶胶粒子“侵入”滤料层的深度,以及不同分布和质量浓度的气溶胶粒子“侵入”深度对滤料阻力-喂尘量特性的影响,对各样品的截面进行电镜观察,观察结果见图 4 和图 5。

从图 4~图 5 中可以看到:

不同上游气溶胶条件下,气溶胶粒子均不同程度的侵入滤料各层纤维,越向背风面气溶胶粒子越少,而且基本均是小粒径粒子,不同喷雾条件下除表面沉积明显不同外,侵入各层纤维的状况也略有不同,“标准钠焰法”和“20mg/m³”喷雾条件下,滤料截面从第四层开始粒子明显变少,但“10mg/m³”喷雾条件下,到第四层仍能看到明显的粒子,说明喷雾时间更长粒子“侵入”滤料的状况更明显,低浓度喷雾条件应更能反映过滤元件真实处理粒子的状况,故本文推荐低浓度粉尘发尘条件。

2.2.2 滤器阻力及容尘研究

滤器容尘实验共测试了两块 H14 高效过滤器,其中 NaCl 气溶胶喷雾后经过一道 F7 袋式中效处理后作为容尘实验上游尘源, KCl 气溶胶经 TS18108 喷雾器喷雾后未经中效过滤而直接作为容尘测试尘源。H14 过滤器阻力随喂尘量变化关系见图 6。

从图 6 中可以看到:

1) 终阻力基本相同情况下,采用 NaCl 或 KCl 测试的相同型号过滤器容尘量明显不同,采用 KCl 测试的容尘量明显大于 NaCl;

2) 无论采用 NaCl 还是 KCl 气溶胶,均存在过滤器阻力回落的问题,由于室内环境湿度较高,NaCl 或 KCl 都存在不同程度的潮解;但同样间隔两天后测试, KCl 气溶胶做容尘实验时,阻力回落 30Pa 左右, NaCl 气溶胶测试时,阻力回落达 60Pa 左右,说明 NaCl 潮解影响程度高于 KCl。

和滤料测试相同,也采用电镜对高效过滤器的表面和纤维内部进行观察,以了解不同类型气溶胶

粒子在高效过滤器滤材内部的分布情况。电镜结果见图 7 和图 8。

从图 7~图 8 中可以看到:

1) 不同类型气溶胶测试时,气溶胶粒子均不同程度的侵入过滤器滤料各层纤维,越向背风面气溶胶粒子越少,且基本集中在小粒径粒子;

2) 两种类型气溶胶粒子“侵入”过滤器滤料层的情况差别明显, KCl 尘源测试时,前三层都有气溶胶“侵入”,但从四层开始 KCl 粒子很少, NaCl 尘源测试时,前四层均可以明显看到“侵入”到滤料层内部的 NaCl 粒子,说明 NaCl 气溶胶更深入的进入滤材内部。

同样参考 EN 779 中过滤器全年运行能耗计算方法对测试的过滤器运行能耗进行计算并对比。根据实际测试值, NaCl 尘源测试时 Mx 值取 57.8g, KCl 尘源测试时 Mx 值取 90.8g,同时根据图 7 的拟合函数计算结果见表 3。

从表 3 中可以看到:

表 3 高效过滤器计算平均阻力和平均年能耗结果

过滤器编号	测试尘源	平均阻力 /Pa	年能耗 /kW
H14-1	NaCl	274.2	914.1
H14-4	KCl	252.8	842.7

1) 采用不同类型尘源测试时,过滤器计算平均阻力及能耗值均有差别,即测试尘源类型对测试样品的计算平均阻力及能耗有影响;

2) 终阻力大致相同情况下, NaCl 尘源测试时,计算平均阻力和能耗值均高于 KCl;

3 结论

空气过滤元件生命周期内的综合能效评价以及相应的能效分级标识体系,一直是空气净化行业关注的重点,但目前仍缺乏令行业信服的能效测试特征粉尘及发生制备方法,同时也没有针对高效空气过滤元件的完善的能效评价方法。本文针对上述问题,对高效空气过滤器在使用过程中所需处理的粉



图7 H14 高效过滤器滤材样品截面电镜结果 (NaCl 尘源)



图8 H14 高效过滤器滤材样品截面电镜结果 (KCl 尘源)

尘特征进行分析,提出了适用于高效空气过滤元件生命周期模拟的测试尘源、发生制备方法以及建立试验评价方法,并对多种滤料和滤器进行实际的生命周期综合能效评价,对方法的可靠性与可操作性进行了充分的试验验证。通过实验研究,得到如下结论:

1) 对于过滤器测试,采用优化方法,并经中效预处理的方式可以发生计数峰值粒径接近 $0.1\mu\text{m}$ 且粒径分布较为稳定的气溶胶,或者直接采用 TSI8108 喷嘴调整发尘参数也可以发生计数峰值粒径接近 $0.1\mu\text{m}$ 的 KCl 气溶胶;

2) 经验证,可以采用四阶多项式的方法拟合高效空气过滤元件的阻力 - 喂尘量关系,进而计算过滤元件生命周期内的综合能耗并建立高效空气过滤元件的综合能效评价方法;

3) 对于同一滤料,不同粒径分布和质量浓度的 NaCl 粉尘测试的阻力容尘特性不同,容尘量也不同,高浓度粉尘会导致阻力容尘试验时间缩短,但可能导致低估过滤元件综合能耗的状况;

4) 采用不同浓度的粉尘进行能效测试,粉尘均

主要集中在滤材表层,但仍有部分粒子不同程度的“侵入”滤材内部各深度,测试粉尘浓度越低,则测试时间越长,气溶胶粒子进入滤材内部的状况越明显;

5) 滤器能效测试时,采用优化后的 NaCl 气溶胶平均阻力和综合能耗的计算值均高于 KCl,且 NaCl 粉尘颗粒“侵入”滤材深度更深,说明优化后的 NaCl 粉尘更适合于高效过滤器能效测试,但实际测试中 NaCl 粉尘的潮解状况要比 KCl 严重,测试过程阻力回落状况明显。

参考文献

- [1] EUROVENT 4/11 Energy efficiency classification of air filters for general ventilation purposes[S].Paris: Eurovent. 2010
- [2] 国家标准化委员会 .GB 6165-2008-T 高效空气过滤器性能试验方法效率和阻力 [S]. 北京: 中国标准化出版社, 2008
- [3] 国家标准化委员会 .GB/T 13554-2008 高效空气过滤器 [S]. 北京: 中国标准化出版社, 2008 GB/T 13554-2008 高效空气过滤器

基于 CFD-DEM 方法褶式过滤介质过滤特性的宏观尺度数值模拟

朱景晶¹, 钱付平², 曹博文¹, 鲁进利¹, 韩云龙¹

(1. 安徽工业大学建筑工程学院, 马鞍山 243032; 2. 安徽工业大学能源与环境学院, 马鞍山 243032)

[摘要] 本研究将褶型空气过滤介质三维物理模型简化为多孔介质模型, 基于实验数据获取多孔介质计算参数。用 Johnson-Kendall-Roberts (JKR) 粘附力接触模型修正 Hertz-Mindlin 接触模型, 并基于计算流体力学 (CFD) 理论和离散单元方法 (DEM) 模拟颗粒在介质表面的沉积过程, 分析褶型空气过滤介质结构特点对颗粒沉积特性的影响。结果表明: CFD-DEM 耦合方法可以有效地应用在褶型空气过滤介质的过滤特性的研究中; 颗粒会在纤维表面形成粉尘层和树突结构, 粉尘层会影响后续气流组织, 而树突结构最终会形成“颗粒墙”; “颗粒墙”的形成会阻止颗粒进一步在流体域中行进, 这使得褶尖角部分成为了颗粒沉积的“低效率”部位; 相较于褶尖角区域, 颗粒会集中在褶的开口区域和中间区域团聚和沉积。本文拓展了褶型空气过滤介质过滤性能的研究方法, 对结构优化研究具有重要的理论参考价值。

[关键词] 褶型空气过滤介质; CFD-DEM; 气流组织; 沉积特性

1 前言

2020年初, COVID-19病毒席卷全球, COVID-19的空气载体为空气中的环境气溶胶^[1]。此次, 纤维滤料(口罩)在疫情中发挥重要作用。其中, 高效率口罩, 如 N95 等, 即可认为是一种类单褶结构。褶型空气过滤介质相对于平板型过滤介质来说, 因其褶尖角的存在使得内部结构和流场十分复杂, 因此, 颗粒在褶型空气过滤介质中的沉积过程也就更加值得关注和研究。一般来说, 纤维介质过滤颗粒可以分为两个阶段: 洁净过滤阶段和含尘过滤阶段。前者是纤维介质本身对颗粒的捕集, 这个阶段我们可以认为过滤介质的过滤效率和压力损失与时间无关; 后者是纤维表面的粉尘层对颗粒的捕集(即“尘滤尘”), 这个阶段过滤介质的过滤效率和压力损失与时间有明显联系。因此, 前者又被称为稳态过滤阶段, 后者被称为非稳态过滤阶段。一般来说, 研究者通过实验观察和收集到的数据均是非稳态过滤阶段之后的数据, 如阻力和过滤效率的变化、终阻力下的容尘量等^[2], 褶型空气过滤介质的性能和结构优化也往往是基于非稳态过滤阶段的过滤现象和结论。但是值得注意的是, 早期学者^[3]的数学模型认为纤维层外的粉尘层是均匀分布的, 然而实验表明这并不是一个严谨、正确的结论^[4]。由此推论, 颗粒在褶型空气过滤介质表面沉积的粉尘层更加不是均匀的形态。并且, 在稳态过滤阶段由于纤维的捕集作用而形成的粉尘层形态将直接影响非稳态过滤阶段(即“尘滤尘”阶段)的捕集颗粒过程, 进而对介质的过滤性能和使用寿命产生重要影响^[5]。因此, 稳态过滤阶段颗粒沉积特性的研究对于提

升介质过滤性能来说是至关重要的。然而, 稳态过滤阶段相较于非稳态过滤阶段来说持续的时间很短, 粉尘数量太多(造成颗粒团聚的过程很快), 颗粒体积相对于过滤器来说非常小(不属于同一数量级), 因此很难用实验观察到纤维表面粉尘层的具体形成过程, 部分学者^[7]也只是通过实验手段观察到了非稳态过程中颗粒枝簇(或者称为树突结构)现象, 可实际上, 树突结构形成的位置和生长方式应当是由纤维结构和气流作用共同决定的。这也是非稳态过滤阶段颗粒沉积特性研究的难点之一。

当前, 随着计算机技术的发展, 越来越多的研究者都在试图利用数值模拟技术对颗粒物在纤维表面的沉积过程展开研究^[8]。最早关于颗粒物的沉积研究仍然是基于单纤维开始的。Wang 等^[9]使用格子-玻尔兹曼法(Lattice Boltzmann Method)对于二维圆柱纤维模型(平行和交错排列)进行了数值模拟研究。赵等人^[10]基于格子-玻尔兹曼法, 提出 LB-CA 模型, 模拟颗粒在纤维表面的沉积过程; 李水清等人^[11, 12]将 DEM 方法应用在对单纤维的数值模拟研究中, 并完成带电颗粒的沉积过程模拟。之后, 钱付平团队^[13-15]基于 Matlab 软件生成的褶型随机纤维过滤介质三维拟态化结构, 应用 CFD-DEM 耦合方法, 从微观角度分析了不同结构参数和运行工况下的气-固两相流动特性。Hosseini 等^[16]基于 CFD-DPM 耦合方法模拟颗粒的沉积, 通过添加 UDF(用户自定义函数)实现了颗粒物的可视化。Saleh 等^[17-20]提出了一种快速, 灵活的褶型纤维过滤介质的建模方法, 并将 CFD-DPM 耦合方法应用在了褶型空气过滤介质研究当中, 通过多次添加 UDF 完成颗

粒在褶型空气过滤介质表面的沉积。Cao 等^[21] 基于 Voronoi 算法重建纤维三维拟态化模型，基于 CFD-DPM 耦合方法完成微观尺度下颗粒在纤维表面的沉积研究。Feng 等人^[8] 则是提出一种新的颗粒追踪方法 (Eulerian-Markov 方法)，与传统的 Lagrangian 方法比，Eulerian-Markov 方法可以节约 80%-90% 的时间。Su 等人^[22, 23] 基于 OpenFOAM 平台从微观角度完成了颗粒在纤维表面的沉积过程模拟，并从成本与准确性角度与 CFD-DEM 耦合方法做出比较。

当前针对颗粒在褶型空气过滤介质表面的沉积特性研究，特别是宏观尺度研究，基本上是利用 CFD-DPM 耦合方法，但是该方法需要多次添加 UDF 来完成模拟，实现较为困难，且比较难以观察颗粒的沉积过程及沉积形态。而 CFD-DEM 耦合方法目前只应用在介观尺度模拟，实际工程参考价值较小。本文将 CFD-DEM 耦合方法拓展到了宏观尺度模拟研究中，对颗粒在模型表面的沉积过程进行模拟，具体分析了褶型空气过滤介质内颗粒物的沉积特性以及颗粒在介质表面的分布规律。本研究可以为优化褶型过滤介质结构，提高介质使用寿命提供理论参考。

2 模拟基础

2.1 三维物理模型及边界条件

参照实际产品结构参数，1:1 重构“V”型褶型空气过滤介质宏观模型，如图 1 所示，该样本孔隙率为 0.7。为了更好的观察到颗粒在流体域中的行进以及颗粒在介质表面的动态沉积情况，本研究选用的单褶结构具有高褶高，小角度的特点，这样可以使得整体计算域更长，颗粒轨迹和团聚过程更加明显。介质褶高 50mm，褶厚 4mm，为保证进出口断面气流的均匀性计算域上下游长度各取为 25mm 流体区域。本研究是针对颗粒在单褶结构中的沉积过程进行模拟，滤料的厚度不能忽略，计划对“V”型褶采用多孔介质 (Porous zone) 模型处理。流体域进口设为速度进口 (Velocity inlet)，出口设置为压力出口 (Pressure outlet，相对大气压力为 0)，壁面条件为对称边界条件 (Symmetry)。在数值计算过程中基于层流 (Laminar) 模型进行计算。为了便于观察颗粒在褶型空气过滤介质中的分布规律，将整个介质划分为三个区域：褶尖角区域、褶的中间区域、褶的开口区域。

在褶开口处设置颗粒工厂 (Particle factory)，持续产生并发射颗粒。为保证颗粒工厂能够向流体域稳定注入颗粒，将颗粒生成速率设为 0.31556kg/(s·m²)，本研究中采用的颗粒粒径在 1~10μm 之间 (随机分布)。

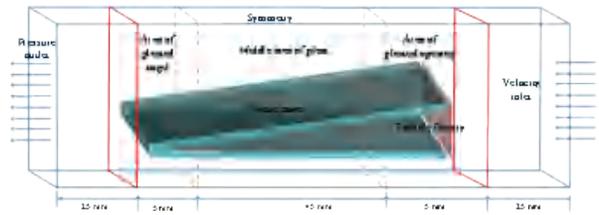


图 1 宏观模型计算区域和边界条件示意图

2.2 多孔介质模型

本研究褶型空气过滤介质部分将基于 ANSYS Fluent 软件内置多孔介质计算模型 (porous zone) 模拟^[24]。该计算模型是将褶型空气过滤介质 (多孔介质) 区域定义一个流动阻力，具体来说是在增加一个动量源项。本文在多孔介质模拟中仅考虑粘性阻力，忽略惯性阻力。因此，该动量源项也是仅考虑粘性阻力项，忽略惯性阻力项，因此，动量源项 S_i 表达式为^[25-28]：

$$S_i = -\frac{dp}{dt} = -\frac{\mu}{k} v_i \quad (1)$$

式中， t 为纤维过滤介质厚度 (mm)， k 为渗透率， μ 为空气粘度 (Pa·s)， v 为纤维过滤介质厚度方向风速 (m/s)。

此处，定义：

$$C_1 = \frac{1}{k} \quad (2)$$

则， C_1 即为粘性阻力系数 (m²)。

为保证模拟结果的可靠性和准确性，需要给所建立的模型提供准确的计算参数值。对于一维低速流动，在仅考虑粘性阻力的情况下，主要测定参数为粘性阻力系数。粘性阻力系数可以基于达西定律 (Darcy's law)^[29, 30] 进行计算。在洁净过滤状态下 (过程中完全不含粉尘)，纤维过滤介质在过滤风速方向上的压降与过滤风速大小存在如式 (3) 所体现的数学关系：

$$-\frac{dp}{dt} = C_1 m v \quad \text{或} \quad -\frac{\Delta p}{t} = C_1 m v \quad (3)$$

其中， Δp 为纤维过滤介质厚度方向压力损失 (Pa)。

2.3 实验测定过程及结果

选用与上述模型材料属性相对应的某型号标准滤纸，如图 2 (a) 所示，该型号滤纸孔隙率为 0.7。参数测定实验基于 ISO-16890/EN779 测试台进行阻力测试，如图 2 (b) 所示。该测试台采用 KIMO/SIEMENS 压差表，压差测试范围：0-1000 Pa，气源压力 0.6MPa，工作电压 380V。所有的实测阻力在数据输出时会自动修正至标准工况 (温度 20°C、大气压 0.1MPa、相对湿度 50%)。本研究在无尘状态

下, 改变入口风速, 测试进出口阻力值。测试结果如图 3 所示。纤维过滤介质在过滤风速方向上的压降与过滤风速大小存在如式 (3) 所体现的数学关系。



图 2 实验样本及测试台示意图

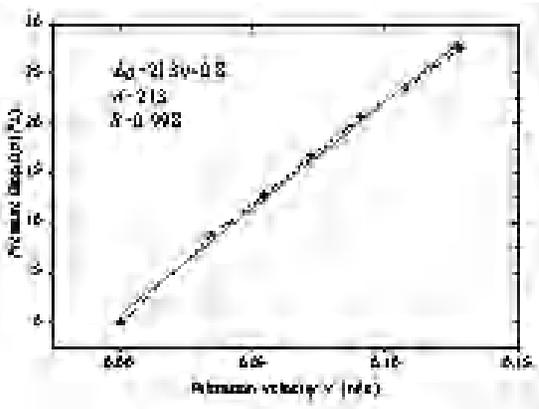


图 3 实验测定结果拟合

$$C_l = \frac{A}{t \cdot \Delta n} \quad (4)$$

其中, A 为图 3 中线性方程的一次项系数。

经测算, 本实验研究样本的粘性阻力系数 C_l 值为 $2.82 \times 1010 \text{m}^{-2}$ 。

3 CFD-DEM 耦合方法

3.1 技术路线

本研究的气固两相流过程基于 CFD-DEM 耦合方法, 该方法在本研究中的具体体现是: 由 CFD 软件 Fluent 计算流体相, DEM 软件 EDEM 计算颗粒相, 两者信息双向传递, 通过控制 Fluent 的启停, 控制整个耦合计算过程。具体计算过程如图 4 所示: Fluent 为颗粒提供 CFD 信息, 如流速、压力、颗粒所受到的相关作用力等, EDEM 将颗粒信息反馈给 Fluent, 如颗粒的位置、速度、体积等。

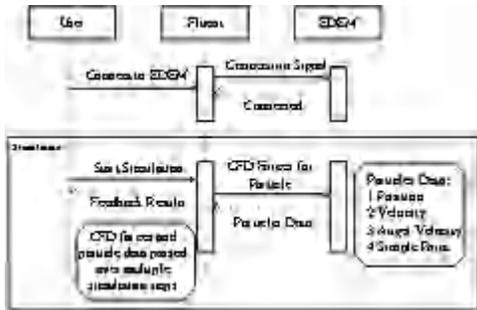


图 4 基于 CFD-DEM 数值模拟的技术路线

对当 Fluent 与 EDEM 耦合时, 考虑颗粒相对流体的影响, 在 Navier-Stokes 方程加入额外的体积分数项 ε 。因此, 含尘过滤阶段气相控制方程 (连续性方程和动量方程) 如下所示^[31]

$$\frac{\partial f}{\partial T} + d \cdot \Delta f u g = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \Delta t f u h + d \Delta t f u h = -f d P - F_{fp} + d \Delta t x h + t f g \quad (6)$$

式中: ε 为气体体积分数; T 为时间, s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; F_{fp} 为流体与颗粒之间的相互作用力, N ; τ 为应力张量。

本研究基于 Hertz-Mindlin 接触模型进行力学计算^[32], 考虑颗粒自身平动和转动, 基于牛顿运动定律计算, 如式 (6) 和式 (7) 所示

$$m_p \frac{du_p}{dT} = F_F + F_W + f_{n,i} + f_{t,i} \quad (7)$$

$$I_p \frac{d\omega_p}{dT} = \sum_{i=1}^k M_i \quad (8)$$

式中: F_F 为流体对颗粒的作用力, N ; F_W 为范德华粘附力, N ; I_p 为颗粒的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。其中, 流体对颗粒的作用力 F_F 由 Fluent 提供, 该力本研究是基于 Fluent 中的 DPM 模型计算^[33], 包括曳力, 压力梯度力, Basset 力、升力和虚拟质量力等^[36-38]。

3.2 Hertz-Mindlin-JKR 接触模型

当颗粒物粒径达到微米级或是亚微米级时, 除了要考虑颗粒间的作用力外, 还需要考虑颗粒与颗粒之间以及颗粒与纤维之间的粘附力^[39]。这是一些学者在研究过程中, 认为颗粒到达纤维表面一定半径范围内即可认为被捕捉的依据之一。当然, 认为颗粒到达纤维表面一定半径范围内即可认为被捕捉的做法无疑是粗糙的且不够严谨的。细颗粒物间的粘附力主要有液桥力、范德华力、静电力等^[40-42]。实际上, 粘附力在不同的环境中主要表现也是不一致的: 例如干燥环境下颗粒间相互摩擦会产生静电力; 在一定湿度环境下, 范德华力和液桥力对粘附起主导作用; 当环境相对湿度大于 20% 时, 范德华力可忽略不计; 在高湿环境中, 空气易导电, 静电力易释放, 可忽略颗粒静电力等^[43]。但是总的来说, 不同环境下粘附力在纤维表面的表现是一致的。从能量角度来说, 物体表面的粒子和内部粒子所处的环境不同, 因而所具有的能量不同, 当物体内部的粒子迁移到物体表面时, 需要克服向内的拉力而做功, 当这些被迁移的粒子形成新的表面时, 所消耗的这部分功就转变成表面内粒子的势能, 增加了体系的总能量。这里增加的势能可以被定义为表面能 (Surface energy)。表面能不仅存在于物体的表

面,在任何两相界面上均存在^[44]。Johnson-Kendall-Roberts (JKR) 粘附力接触模型引入了颗粒间表面能的概念,考虑了表面能对颗粒和材料表面之间作用关系,可以精确地描述细颗粒物在材料表面的粘附作用^[45]。因此,本研究将利用 Johnson-Kendall-Roberts Cohesion (JKR) 粘附力接触模型来修正 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型。

在 Hertz-Mindlin-JKR 模型中,接触力基于接触半径、相互作用参数和表面能量计算。

$$F_{n,i} = \frac{4E^*}{3R} a_0^3 - \sqrt{16r_0E^*} a_0^3 \quad (9)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (10)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-e_1^2)}{E_1} + \frac{(1-e_2^2)}{E_2} \quad (11)$$

$$a_0 = \left\langle \frac{9rR^*}{2E^*} d \frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}} \pi r^{\frac{1}{3}} \right\rangle^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

式中, σ 为表面能, J/m^2 ; E^* 为当量杨氏模量, Pa; E_1 和 E_2 为两材料的弹性模量, Pa; e_1 和 e_2 为两材料泊松比; R^* 为当量半径, m; R_1 和 R_2 为颗粒半径, m; a_0 为接触半径, m。颗粒间无直接相互接触时也存在凝聚力,颗粒间有非零凝聚力的最大间隙 δ_c 为:

$$d_c = \frac{a_0}{R^*} - \sqrt{4r_0a_0/E^*} \quad (13)$$

式中, δ_c 为有非零凝聚力的最大间隙, m。根据受力平衡原理,颗粒受到接触力时还会受到大小相等、方向相反的粘附力。

同时,微米或亚微米大小的碰撞颗粒的颗粒间吸引力大大高于相应的重力或惯性力,这导致细颗粒在流体域中接触时趋于粘附并形成颗粒团聚体^[34, 47, 48],参考前人的工作,本研究引入颗粒团聚体的概念^[17, 49],将不同粒径的颗粒以颗粒团聚体的形式送入流体域,期望可以达到为了降低计算成本的目的。

4 结果与分析

4.1 实验测试结果

基于 ISO-16890/EN779 测试台,对单褶结构下的实际介质样本(介质褶高 50mm,褶厚 4mm)进行阻力测试,测试含尘状态下,进出口压力随容尘量之间的关系。测试流程如图 5 所示。测试结果如图 6 所示,对数据进行分析,得到此样品容尘量与阻力之间的关系,如式(14)所示。

$$\Delta p = 0.0048m^2 + 0.68m + 73 \quad (14)$$

其中, m 为待测褶型过滤介质颗粒累计增重(g)。

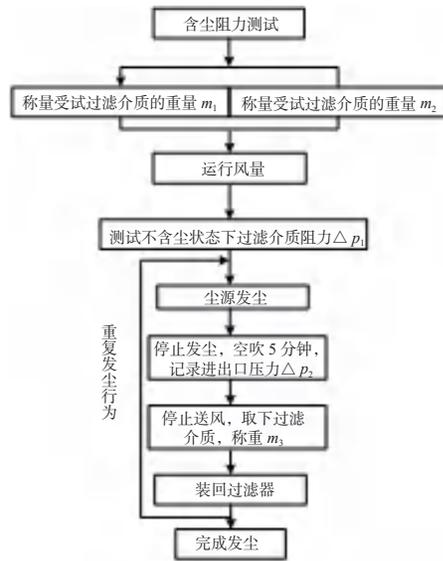


图 5 在含尘气流条件下,进出口压力随容尘量变化测试流程

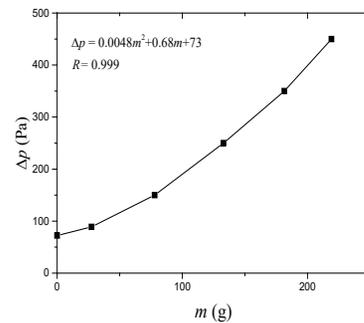


图 6 容尘量与进出口压差之间的关系

4.2 数值模拟结果

基于 Hertz-Mindlin-JKR 模型进行颗粒注入过程的模拟,如图 7 所示。在观察颗粒运动过程中,验证了一些传统的颗粒沉积结论,如颗粒团聚在介质表面,形成了树突结构,随着时间推移便形成“尘滤尘”的现象等,这在后文会有具体体现。利用对进出口压差的监测,发现进出口压差随着颗粒的注入是持续增加的,当颗粒停止注入后,压力增长变缓。与式(14)所得压力变化规律进行对比,发现误差为 5.4%,在可接受范围内。

在颗粒进入流体域的动态过程中,发现早期进入的颗粒影响了后期的气流组织。进一步观察颗粒在流体域中的状态,JKR 模型修正下的颗粒是粘附在一起的。存在粘附状态对颗粒在介质壁面上的沉积形态是有很大的影响的。如图 8 所示,颗粒与颗粒之间的粘附作用以及颗粒与介质之间的粘附作用,使得树突结构更加的明显。并且树突结构会不断增长。当褶型介质两边的树突增长到一定程度而又刚好相连时,此时就会在流体域中形成一层或者是多层“颗粒墙”。当颗粒形成的墙体被颗粒破坏后,

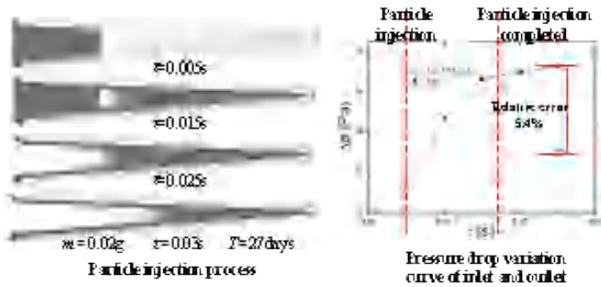


图7 基于 Hertz-Mindlin-JKR 模型颗粒沉积过程

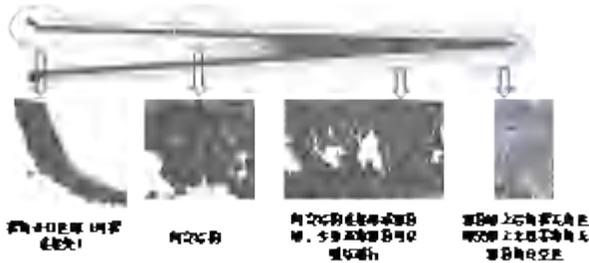


图8 Hertz-Mindlin-JKR 模型下颗粒沉积形态

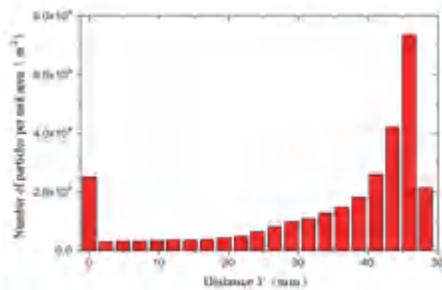


图9 基于 Hertz-Mindlin-JKR 模型不同截面上单位面积颗粒数量

离散的颗粒将会随气流继续运动。然而，当颗粒墙没有被气流破坏，反而稳定下来后，此时后续的颗粒将无法穿过颗粒墙，或者仅有少量颗粒穿过，此时颗粒墙颗粒可以近似认为是流体域新的边界。并且，颗粒墙形成的位置正好处于褶尖角区域与褶的中间区域结合处。因此，可以认为在气流和颗粒受力（包括粘附力）的共同作用下，颗粒沉积不仅是改变的介质表面的孔隙率等物性参数，也影响了介质内部的物理结构。这也是在模拟过程中发现褶尖角区域沉积颗粒相对较少的原因。在 Saleh 等人^[17]的宏观研究成果中就发现了类似的颗粒沉积现象。该现象是气流与各类力学的共同作用，与介质的工作环境、颗粒的性质参数、介质的性质参数都有着直接的关系。该类现象也使得褶尖角部分成为了颗粒拦截的“低效率”部位。通过图9可以较为直观地发现，由于多层颗粒墙的存在，越接近褶尖角区域和褶的中间区域的分界线，单位面积颗粒数（颗粒浓度）越高。但是越过分界线，进入褶尖角区域后颗粒浓度降低，颗粒数仅有褶的中间区域平均单位面积颗粒数的一半，为褶的开口区域的颗粒数的

1/20。从图8中可以看出，褶尖角区域部分地方甚至出现颗粒真空区。实际上，Kim 等人^[39]的研究也证明，褶型空气过滤介质的有效过滤面积约为理论过滤面积的50-60%。因此，探讨此现象的发生条件和规律将对褶型空气过滤介质的结构改进和性能优化，以及提高介质容尘量有着积极意义。同时，基于图8和图9发现，在 Hertz-Mindlin-JKR 模型下，褶的开口区域的颗粒层不断加厚。基于图9也可以看出，褶的开口区域单位面积沉积的颗粒数量较高。实际上，这一区域正好是两褶的连接区域。

4 结论

本研究基于 CFD-DEM 耦合方法对颗粒在褶型空气过滤介质中的沉积特性展开研究，得到以下结论：

(1) 尝试将 CFD-DEM 耦合方法应用在褶型空气过滤介质宏观模拟中，结果表明 CFD-DEM 耦合方法具有可行性。Hertz-Mindlin-JKR 模型有效地模拟了颗粒在介质表面的沉积过程。

(2) 颗粒在纤维表面沉积的位置和形态将影响褶型空气过滤介质内部的气流组织，进而影响介质两端的过滤压降。褶型空气过滤介质的结构优化除了考虑结构参数(如褶高、褶尖角等)和性质参数(孔隙率、粘性阻力系数等)对过滤性能的综合影响外，还应当考虑粉尘层形成过程和最终形态对过滤过程的综合影响。

(3) 在气流和颗粒受力（包括粘附力）的共同作用下，颗粒沉积不仅是改变的介质表面的孔隙率等物性参数，也影响了介质内部的物理结构。由于颗粒的团聚作用和“树突结构”的形成，褶尖角区域与褶的中间区域结合处会形成多层“颗粒墙”，该“颗粒墙”在不被破坏的前提下，会阻止颗粒进一步在流体域中行进，这使得褶尖角部分成为了颗粒沉积的“低效率”部位。

(4) 褶的开口区域，即两褶的连接区域为颗粒沉积的主要区域之一。

参考文献

[1] Leung W F, Sun Q. Charged PVDF multilayer nanofiber filter in filtering simulated airborne novel coronavirus (COVID-19) using ambient nano-aerosols[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 245:116887

[2] Théron F, Joubert A, Coq L L. Numerical and experimental investigations of the influence of the pleat geometry on the pressure drop and velocity field of a pleated fibrous filter [J]. Separation & Purification Technology, 2017, 182(2017):69-77

- [3] Zhao Z M, Gabriel I T, Pfeffer R. Separation of airborne dust in electrostatically enhanced fibrous filters [J]. *Chemical Engineering Communications*, 1991, 108(1):307-332
- [4] Thomas D, Contal P, Renaudin V, et al. Modelling pressure drop in HEPA filters during dynamic filtration [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1999, 30(2):235-246
- [5] Bin X, Xiao Y. Experimental investigation of air pressure affecting filtration performance of fibrous filter sheet [J]. *Environmental Technology*, 2017, 38:558-565
- [6] Chen S, Wang Q, Chen D R. Effect of pleat shape on reverse pulsed-jet cleaning of filter cartridges [J]. *Powder Technology*, 2017, 305:1-11
- [7] Kasper G, Schollmeier S, Meyer J. Structure and density of deposits formed on filter fibers by inertial particle deposition and bounce [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2010, 41(12):1167-1182
- [8] Zhuangbo F, Pan W, Wang Y, et al. Modeling filtration performance of pleated fibrous filters by Eulerian-Markov method [J]. *Powder Technology*, 2018, 340:502-510
- [9] Wang H, Zhao H, Guo Z, et al. Lattice Boltzmann method for simulations of gas-particle flows over a backward-facing step [J]. *Journal of Computational Physics*, 2013, 239(4):57-71
- [10] Haoming W, Haibo Z, Kun W, et al. Simulating and modeling particulate removal processes by elliptical fibers [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2014, 48(2):207-218
- [11] Li S Q, Marshall J S. Discrete element simulation of micro-particle deposition on a cylindrical fiber in an array [J]. *Journal of aerosol science*, 2007, 38(10):1031-1046
- [12] Liu G, Marshall J S, Li S Q, et al. Discrete-element method for particle capture by a body in an electrostatic field [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2010, 84(13):1589-1612
- [13] Huang N J, Qian F P, Zha W J, et al. Modeling of the Pleated Filter Based on Microscopic Structure and Numerical Simulation of Its Filtration Characteristics [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2014, 14(3):403-408
- [14] Qian F P, Huang N J, Lu J L, et al. CFD-DEM Simulation of the Filtration Performance for Fibrous Media Based on the Mimic Structure [J]. *Comput. Chem. Eng.*, 2014, 71:478-488
- [15] Qian F P, Huang N J, Zhu X J, Lu J L. Numerical study of the gas-solid flow characteristic of fibrous media based on SEM using CFD-DEM [J]. *Powder Technology*, 2013, 249:63-70
- [16] Hosseini S A, Tafreshi H V. Modeling particle loaded single fiber efficiency and fiber drag using ANSYS-Fluent CFD code [J]. *Computers & Fluids*, 2012, 66(66):157-166.
- [17] Saleh A M, Fotovati S. Modeling service life of pleated filters exposed to poly-dispersed aerosols [J]. *Powder Technology*, 2014, 266(6):79-89
- [18] Saleh A M, Tafreshi H V. A simple semi-numerical model for designing pleated air filters under dust loading [J]. *Separation & Purification Technology*, 2014, 137(137):94-108
- [19] Saleh A M, Tafreshi H V, Pourdeyhimi B. Service life of circular pleated filters vs. that of their flat counterpart [J]. *Separation & Purification Technology*, 2015, 156(2):881-888
- [20] Saleh A M, Tafreshi H V, Pourdeyhimi B. An analytical approach to predict pressure drop and collection efficiency of dust-load pleated filters [J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 161:80-87
- [21] Cao B, Wang S, and Dong W, et al. Investigation of the filtration performance for fibrous media: Coupling of a semi-analytical model with CFD on Voronoi-based microstructure [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 251:1173614
- [22] Shu Z Y, Qian F P, Fang C and Zhu J J. Numerical simulation of particle spatial distribution and filtration characteristic in the pleated filter media using OpenFOAM. *Indoor Built Environ* 2020; DOI: 10.1177/1420326X20931925 journals.sagepub.com/home/ibe
- [23] Shu Z Y, Qian F P, Zhu J J and Lu J L. Numerical simulation of gas-solid flow characteristic of particles in fibrous media using OpenFOAM. *Indoor Built Environ* 2020, 29:921-930
- [24] Dederling M, Stausberg W, Lliev O, et al. On new challenges for CFD simulation in filtration [C]. Leipzig: National Air Filtration Association, 2008, 316-320
- [25] Krishnamoorthy C, Yao S, Raci K C. Computational investigation of backward-facing step flow preceding a porous medium [J]. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2010, 546(6):195-205
- [26] Subrenat A, Bellettre J, Cloirec P. 3-D numerical

simulations of flows in a cylindrical pleated filter packed with activated carbon cloth [J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(22): 4965-4973

[27] Hanspal N S, Waghode A N, Nassehi V, et al. Development of a predictive mathematical model for coupled Stokes/Darcy flows in cross-flow membrane filtration [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 149(3): 132-142

[28] Liu J G, Tavener S, Wang Z R. The lowest-order weak galerkin finite element method for the Darcy equation on quadrilateral and hybrid meshes [J]. *Journal of Computational Physics*, 2018, 359(4): 312-330

[29] Deng C H, Tong L, Chen B F, et al. Direct numerical simulation for fluid flow in porous media [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2011, 35(6):1257-1260

[30] Bear J. Dynamics of fluids in porous media [J]. *Engineering Geology*, 1972, 7(2):174-175

[31] Chen J, Chu K W, Zou R P, et al. Prediction of the performance of dense medium cyclones in coal preparation [J]. *Minerals Engineering*, 2013, 31(5):59-70

[32] Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and contact of elastic solids [J]. *Proceedings of Royal Society of London*, 1971, 324(1558): 301-303

[33] Li S Q, Marshall J S. Discrete element simulation of micro-particle deposition on a cylindrical fiber in an array [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2007, 38(10):1031-1046

[34] Wen C Y, Yu Y H. Mechanics of fluidization [J]. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 1966, 62:100-111

[35] Anderson T B, Jackson R. A fluid mechanical description of fluidized beds equations of motion [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1967, 6(4): 527-539

[36] Mei R, Adrian R J, Hanratty T J. Particle dispersion in isotropic turbulence under Stokes drag and Basset force with gravitational settling [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 225(-1):481-495

[37] Saffman P G. Lift on a small sphere in a slow shear flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, 22(2): 385-400

[38] Odar F, Hamilton W S. Forces on a sphere

accelerating in a viscous fluid [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, 18(2): 302-314.

[39] Jeon K J, Jung Y W. A simulation study on the compression behavior of dust cakes [J]. *Powder Technology*, 2004, 141(1-2):1-11

[40] Li S, Marshall J S, Liu G, et al. Adhesive particulate flow: The discrete-element method and its application in energy and environmental engineering [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37(6):633-668

[41] Ennis B J, Li J, Tardos G I, et al. The influence of viscosity on the strength of an axially strained pendular liquid bridge [J]. *Chemical Engineering Science*, 1990, 45(10):3071-3088

[42] Nicolson M M, Evans R C. The interaction between floating particles [J]. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1949, 45(02):288-295.

[43] Jones R, Pollock H M, Cleaver J A S, et al. Adhesion forces between glass and silicon surfaces in air studied by AFM: effects of relative humidity, particle size, roughness, and surface treatment [J]. *Langmuir*, 2002, 18(21):8045-8055

[44] Hentscher J R. Surface energy, wetting and adhesion [J]. *Journal of Adhesion*, 1981, 12(1):3-12.

[45] Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and contact of elastic solids [J]. *Proceedings of Royal Society of London*, 1971, 324(1558): 301-303

[46] He Y, Gu Z, Lu W, et al. Atmospheric humidity and particle charging state on agglomeration of aerosol particles [J]. *Atmospheric Environment*, 2019: 141-149

[47] Grass R N, Tsantilis S, Pratsinis S E. Design of high-temperature, gas-phase synthesis of hard or soft TiO₂ agglomerates [J]. *AIChE Journal*, 2010, 52(4):1318-1325

[48] Teleki A, Wengeler R, Wengeler L, et al. Distinguishing between aggregates and agglomerates of flame-made TiO₂ by high-pressure dispersion [J]. *Powder Technology*, 2008, 181(3):292-300

[49] Nichols G, Byard S, Bloxham M J, et al. A review of the terms agglomerate and aggregate with a recommendation for nomenclature used in powder and particle characterization [J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2010, 91(10):2103-2109

一项基于分子模拟的活性炭吸附气态分子污染物初步研究

陆禹名^{1,2}, 曹国庆^{1,2}, 冯昕^{1,2}, 陈紫光^{1,2}, 戎戈^{1,2}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建科环能科技有限公司, 北京 100013)

[摘要] 建立具有不同大小石墨微元的多孔炭材料模型, 采用巨正蒙特卡洛法 (GCMC) 和分子动力学方法 (MD), 对其吸附过程典型气态分子污染物 (AMC) 的扩散系数和等温吸附线进行计算, 从分子层面分析 AMC 在活性炭中的吸附和扩散特性。最终发现, 在不同模型中获得的计算结果差异较大, 整体上 AMC 吸附量和扩散系数随着碳环数量增加而增大。

[关键词] 活性炭; 气态分子污染物; 吸附; 扩散; 分子模拟

0 前言

随着“中国制造 2025 计划”战略的推出, 我国集成电路市场需求和产业空间不断扩大, 我国微电子相关的工业洁净厂房市场规模也随之大幅增长^[1]。洁净室内超低浓度的气态分子污染物 (AMC) 已经成为了影响产业发展和良品率的主要因素^[2], 其可能引起光阻剂的 T 型覆盖、腐蚀效应、非均匀的氧化层生长、晶片表面特性变化、栅氧化层完整性降低等。基于多孔介质吸附原理的净化技术仍然是目前最可靠的主流净化手段, 以此为基础的化学过滤器已应用于半导体生产车间及数据中心机房等场所并成功降低环境内 AMC 浓度^[3-4]。

化学过滤器的核心是吸附材料, 基于吸附理论的模型, 如: 在无孔平面上吸附的 Langmuir 模型、可方便计算比表面积 BET 模型、具有完备热力学特性的 Derjaguin-Broekhoff-der Boer (DBdB) 模型、以及吸附动力学模型等, 成功预测了吸附材料的性能。然而此类传统的吸附模型需要在假设吸附机理已知的前提下才可以建立相关控制方程, 然后通过数据拟合的方式来判断所假设的机理是否准确。新材料的发展, 一方面展示了巨大的应用前景, 另一方面也给传统吸附模型带来新的挑战。例如, 如何验证这些传统模型对材料是否适用以及如何筛选出合适的新材料用于 AMC 吸附。由于物理含义不清或难以验证模型参数问题, “高质量”的数据拟合并不代表吸附机理被正确描述。因此, 通过这种自上而下的建模方式来研究吸附机理效率不高, 无法为新型吸附材料的开发提供及时、有效的指导。

对于此类新挑战, 分子模拟技术提供了新的途径。利用分子模拟技术对吸附过程进行计算, 无需过分关注吸附机理, 根据计算获得结果, 计算结果可为了解吸附的微观过程和吸附机理提供信息, 也可为吸附剂的开发提供思路和指导。如张益坤等人

建立经典活性炭狭缝模型, 对丙酮的吸附过程进行模拟, 为活性炭表面植入官能团改性提供指导^[5]; 安亚雄等人同样利用活性炭狭缝模型, 计算其对异己烷、苯、甲苯、丙酮等 VOCs 的吸附数据^[6]; 周日峰等人采用巨正则蒙特卡罗方法 (GCMC) 和分子动力学方法 (MD), 从分子层面研究甲烷和甲苯在活性炭中的吸附和扩散特性^[7]。

较为常见的活性炭分子结构有 Franklin 模型、狭缝孔模型、炭圆盘模型以及焦炭模型等^[8]。狭缝孔模型简单、易于操作, 应用较为广泛, 但其孔隙结构单一, 并不能真实描述多孔炭材料的无序性和多样性; 焦炭模型利用混合反向蒙特卡罗技术, 建模时将径向分布函数和势能同时最小化, 最大限度接近真实结构, 但这大大增加了电脑硬件消耗。综合考虑结构模型与真实结构的接近程度、计算耗时等因素, 本文基于 Albesa 等人的研究, 以石墨微元为基础构建活性炭材料的结构模型^[7, 9-10], 采用巨正蒙特卡洛法 (GCMC) 和分子动力学方法 (MD), 从分子层面描述典型 AMC 如 O₃、C₇H₈、NH₃、SO₂ 在活性炭中的吸附和扩散行为, 以扩散系数和等温吸附线为目标参数, 定性分析模型结构变化对吸附过程的影响。以往此类模型多应用于天然气储存过程中吸附和脱附研究, 将其应用于 AMC 吸附较少见到。

1 模型构建

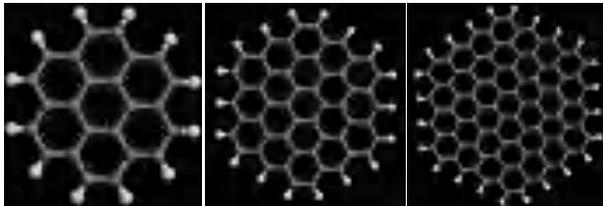
以石墨微元为基础, 构建 7 环 (24 C)、19 环 (54 C)、37 环 (96 C) 三类不同大小微元的多孔炭材料模型 (如图 1 所示), 由 Amorphous Cell 模块建立包含 O₃、C₇H₈、NH₃、SO₂、活性炭的晶胞, 并进行结构优化、退火处理等过程, 最终得到模拟单元的平衡结构 (如图 2 所示), 密度均为 0.5g/cm³。

利用 Materials Studio 软件中的 Sorption 模块, 计算 O₃、C₇H₈、NH₃、SO₂ 在活性炭中的吸附量、

吸附等温线等内容。经过能量优化和结构优化，得到稳定构型后，根据 Einstein 关系，通过计算分子质量中心的均方位移 (Mean Square Displacement, MSD) 对时间的斜率获得扩散系数 D, 如式 (1) 所示:

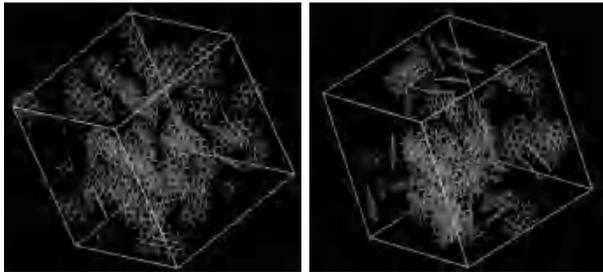
$$D = \frac{1}{6N} \lim_{t \rightarrow 3} \frac{d}{dt} \left\langle \sum_{i=1}^N |r_i(t) - r_i(0)|^2 \right\rangle \quad (1)$$

式中, N 表示系统中扩散粒子的个数, $r_i(t)$ 和 $r_i(0)$ 分别表示第 i 个粒子的质心在时间步长 t 下的最终位置和起始位置, 尖括弧 $\langle \rangle$ 代表均方位移的系综平均。

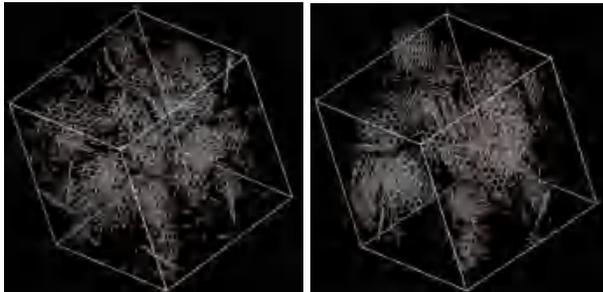


(a) 7 元环结构 (b) 19 元环结构 (c) 37 元环结构

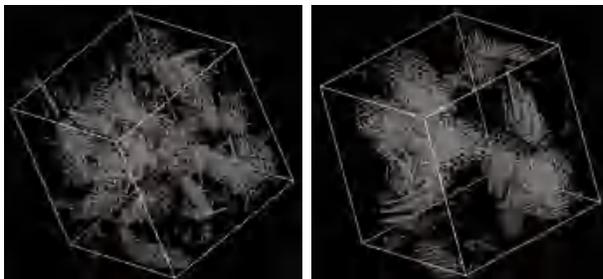
图 1 多孔碳材料分子结构



(a) 7 元环晶胞初始结构和稳定结构



(b) 19 元环晶胞初始结构和稳定结构



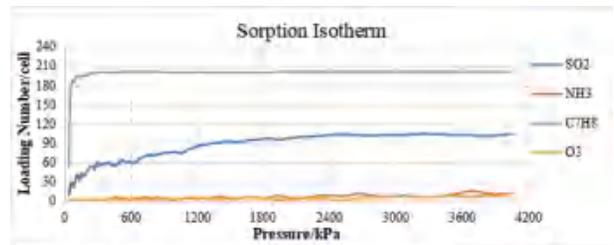
(c) 37 元环晶胞初始结构和稳定结构

图 2 模拟单元的初始和稳定结构

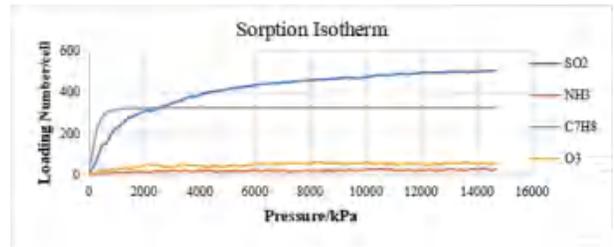
2 结果与讨论

2.1 活性炭中 AMC 的吸附量

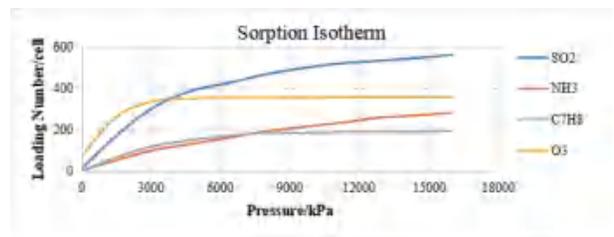
如图 3 所示, 为 C_7H_8 、 SO_2 、 O_3 、 NH_3 在活性炭中的等温吸附线。由图可知, 四类吸附质的等温吸附曲线基本符合 I 型等温线。 C_7H_8 的吸附量随着炭环或碳原子数的增加未发生明显变化; 而 SO_2 、 O_3 、 NH_3 的吸附量均在不同程度上随之增大, SO_2 的吸附量从 7 元环模型到 19 元环模型中出现较大增长, O_3 和 NH_3 的吸附量则是从 19 元环模型到 37 元环模型中出现较大变化。同一类型、不同结构的吸附剂, 对同一种吸附质的吸附效果, 有着明显不同。



(a) 7 元环



(b) 19 元环

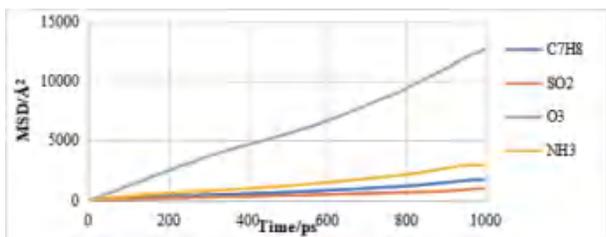


(c) 37 元环

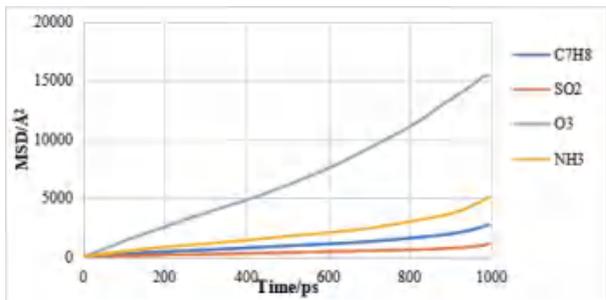
图 3 AMC 在活性炭中的等温吸附曲线

2.2 活性炭中 AMC 的扩散

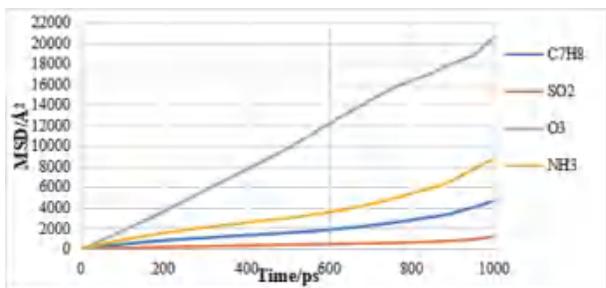
在活性炭吸附 AMC 的过程中, 除吸附量之外, 扩散系数在吸附过程中具有重要影响。相比增大材料的平衡吸附量, 适当的增加扩散系数可实现更长的穿透时间和更大的有效吸附容量^[11]。如图 4 所示, 为 C_7H_8 、 SO_2 、 O_3 、 NH_3 在活性炭中的均方位移, 根据式 (1) 即可计算对应的扩散系数。由计算结果可知, 典型的气态分子污染物 C_7H_8 、 SO_2 、 O_3 、 NH_3 在活性炭中的扩散系数均随着模型中碳环数增加而增大, 这是由于碳环数增加、分子孔隙变大, 气体分子受限程度降低、与碳材料间的作用力减小, 利



(a) 7元环



(b) 19元环



(c) 37元环

图4 活性炭中AMC的均方位移

于运动。此外， O_3 、 NH_3 、 C_7H_8 、 SO_2 在活性炭中的扩散系数依次降低，这可能与气体分子本身尺寸有关，分子越小、越易于运动。

3 结论

本文构建了具有不同大小石墨微元的多孔炭材料模型，研究了典型AMC如 O_3 、 C_7H_8 、 NH_3 、 SO_2 在活性炭中的吸附和扩散行为，利用蒙特卡罗和分子动力学方法分析微元大小对吸附和扩散的影响，得到结论如下：

(1) 石墨微元大小对多孔碳材料吸附 O_3 、 C_7H_8 、 NH_3 、 SO_2 均有一定影响，综合来看，37环结构多孔碳材料对多目标污染物的吸附性能最好。

(2) 不同种类的吸附质在多孔炭材料中的扩散系数差异较大， O_3 、 NH_3 、 C_7H_8 、 SO_2 的扩散系数依次降低，但整体上均随着炭环数增加而增大。

材料自身结构对吸附过程和扩散过程均有较大影响，在进行分子模拟时，不应简单依赖现有模型应在对实际材料进行表征、获取一定结构和成分信息的基础上进行建模，而不是简单依赖现有模型，这样计算结果才能接近真实情况。

参考文献

- [1] 中国产业信息. 2018年中国洁净室工程市场规模预测 [R/OL]. [2019-02-19]. <http://www.chyxx.com/industry/201712/590649.html>.
- [2] 职远, 刘俊杰. 电子洁净室气态化学污染环境控制规范分析 [J]. 暖通空调, 2020, 050(005):49-55.
- [3] 黄秀琴, 李亚东. 洁净室化学过滤器的选型及使用效果研究 [J]. 科学技术创新, 2020(14):56-57.
- [4] 周海健, 李启东. 浅谈高效空气化学过滤净化器在数据中心机房的应用 [J]. 洁净与空调技术, 2021(01):85-90.
- [5] 张益坤, 梁晓怿, 池君杰, 等. 改性活性炭内丙酮吸附的动力学模拟 [J]. 原子与分子物理学报, 2018, 035(001):147-152.
- [6] 安亚雄, 付强, 刘冰, 等. 不同孔径活性炭吸附挥发性有机物的分子模拟 [J]. 化工进展, 2019, v.38;No.338(11):337-342.
- [7] 周日峰, 石基弘, 刘全祯, 等. 活性炭吸附甲烷和甲苯的分子模拟研究 [J]. 过程工程学报, 2018, 18(S1):103-108.
- [8] 黄杨. 活性炭分子结构模型的构建及其吸附行为的模拟研究 [D]. 重庆大学, 2016.
- [9] Lu X, Jin D, Wei S, et al. Competitive adsorption of binary CO_2/CH_4 mixture in nanoporous carbons: Effect of edge-functionalization [J]. Nanoscale, 2014, 7(3):1002.
- [10] Albesa A G, Rafti M, Vicente J L, et al. Adsorption of CO_2/CH_4 Mixtures in a Molecular Model of Activated Carbon through Monte Carlo Simulations [J]. Adsorption Science & Technology, 2012.
- [11] Qiwei Chen, Ru Xiao, Xiao Lei, et al. Experimental and modeling investigations on the adsorption behaviors of indoor volatile organic compounds in an in-situ thermally regenerated adsorption-board module [J]. Building and Environment, 2021.

室内微生物气溶胶传播与净化控制研究

苗露

(山东建筑大学, 济南 250101)

[摘要] 微生物气溶胶易于携带病毒、细菌等致病污染物质, 严重破坏和影响人体健康系统, 基于新型冠状病毒肺炎的背景下, 病毒微生物气溶胶传播受到广泛关注。本文将从微生物气溶胶的具体特性出发, 利用 COMSOL 软件对顶送侧回、顶送顶回、顶送底回三种气流组织下的气溶胶颗粒物扩散特性进行数值模拟分析, 并且针对房间新风系统中的过滤净化组合进行了对比, 利用 MATLAB 软件比较了粗 + 中效、粗 + 高效、粗 + 中 + 高效不同过滤组合下的室内微生物细菌浓度变化情况。实现了微生物气溶胶污染物的有效排出, 降低了发生病菌微生物交叉感染的可能性, 提高了室内空气品质。

[关键词] 微生物气溶胶; 气流组织; 过滤净化

0 引言

自 2019 年 12 月首次发现新冠肺炎 (COVID-19) 以来, 新型冠状病毒肺炎迅速在全球范围内扩散传播, 截至 2021 年 7 月 25 日, 全球累计确诊感染者超过 1.9 亿人, 累计死亡人数超过 410 万人。新型冠状病毒是引起新冠肺炎的重要病原体, 其传播途径包括飞沫传播、接触传播以及气溶胶传播, 病原体通过气溶胶方式进行传播的风险评估系数小于飞沫和接触传播所带来的治病风险, 但是研究表明, 当患者为超级新冠肺炎感染者时, 其所在空间内进行 24 小时暴露观察, 气溶胶进行病毒传播的风险可以达到 26%^[1], 因此致病微生物气溶胶的传播机制和运动轨迹值得探讨和研究。本文着重对于病菌微生物气溶胶传播进行研究分析, 为了更好地营造洁净舒适的室内环境, 在了解微生物气溶胶相关传播特性的基础上, 分析对比了顶送侧回、顶送顶回、顶送底回三种气流组织形式下, 微生物气溶胶粒子的运动情况, 并且针对房间新风系统中的过滤净化组合进行了对比, 能够更好的实现室内环境的净化控制, 降低人体对于病菌微生物感染的风险, 保障人们的生存健康。

1 微生物气溶胶

1.1 微生物气溶胶的概念及传播特性

气溶胶实际上是一种具有稳定性的悬浮体系, 细微的液滴或者固体微粒与气相均匀接触混合就形成了气溶胶形态。通过现代生物学理论对于生物气溶胶进行归类, 可划分为病毒、细菌、放线菌、立克次氏体、支原体、衣原体、螺旋体八个种类的微生物群体^[2]。微生物气溶胶污染物种类繁多, 污染来源多样, 具有传染和致病特性, 微生物的活性易于变化且覆盖面积广泛。

微生物气溶胶因其含有病毒、细菌等对于人体健康有害的微生物, 在 ISO/DIS16814《建筑环境设

计 - 室内空气质量 - 人居环境室内空气质量的表述方法》^[3]中, 将微生物气溶胶明确作为微生物污染物, 并进行了区别划分, 活性粒子微生物以及非活性粒子微生物都将对于室内环境产生污染作用, 其中的病毒、细菌类微生物作为活性粒子, 更容易被空气中的微小颗粒或液滴所包裹, 以气溶胶的形态长时间悬浮于室内环境中, 或者在沉积作用下依附接触物体表面, 快速进行生长繁衍以及传播疾病。

人体通过呼吸作用, 将部分小颗粒物呼出体外, 部分以液体飞沫形式存在, 由于外部环境的蒸发作用, 外面所包裹的液滴变成蒸气, 保留飞沫核悬浮在空气中, 这种以病毒寄存在悬浮颗粒物中的形式称为气溶胶传播。成年人在静止状态下正常的做呼吸运动, 平均每分钟向环境输出 500~1500 个细菌、病毒等活性粒子, 当人体身体状态处于运动时, 平均每分钟向外呼出的活性粒子数量可达数千个。含有致病传染特性的活性菌粒在空气中以气溶胶的形态进行传播, 很容易造成传染性疾病的发生。

微生物污染物在气溶胶传播的方式下, 随环境气流流动, 污染传播覆盖面积广泛, 可长时间悬浮停留于环境中, 活性粒子气溶胶的浓度相较于雾化前的原溶液的浓度水平更高, 含有致病微生物的能力更强。

1.2 致病微生物气溶胶的危害

一般性的病毒颗粒直径在 0.01~0.5 μm 之间, 通过人体呼吸系统排出, 病毒外部被包裹着液滴, 空气中悬浮的气溶胶颗粒粒径在 0.5~10 μm 范围内。微生物气溶胶污染物被人体呼吸系统吸入体内后, 将导致过敏性疾病及呼吸系统感染^[4]。人体摄入含有内毒素的生物气溶胶后, 将引起身体血压的急剧升高^[5]。高庆先^[6]等人对于生物气溶胶污染物对人体心血管系统的相关影响进行了相关研究, 结果表明生物气溶胶的大量吸入降低了血管的弹性, 增加了

心血管疾病发生的概率。气溶胶颗粒携带病毒、细菌等微生物进行扩散和传输，被吸入肺部，流入人体血液，在血液循环系统作用下，扩散渗入其他器官和组织，影响人体肺部功能或出现器官衰竭现象，导致人体发病和死亡。

2 微生物气溶胶粒子运动轨迹

2.1 数学模型

利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件进行求解，采用层流模型和流体流动粒子追踪模型相结合来描述独立空调房间内的微生物气溶胶颗粒的运动情况。具体的数学模型如下所示。

层流模型方程：

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

流体流动颗粒跟踪模型方程：

$$\frac{d\mathbf{m}_p \mathbf{v}_h}{dt} = \mathbf{F}_i \quad (3)$$

2.2 流场模型

独立空调房间采用层流模型与流体流动颗粒追踪模型相结合，设置进风口风速为 0.3m/s，风口域的选用材料为空气，为简化计算，建立简化模型，忽略门窗及缝隙对流场的影响，并且将三维模型近似简化为二维模型。整个仿真模型采用内流场，其边界为光滑墙体，气流不能穿越，颗粒物接触壁面进行反弹，接触出风口进行消失。

2.3 微生物气溶胶粒子追踪

在释放相同粒子数和相同测定时间内，采用不同的气流组织形式来进行颗粒物的运动模拟，下图为测定时间结束时刻的微生物气溶胶粒子分布图，具体如下：

2.3.1 顶送侧回

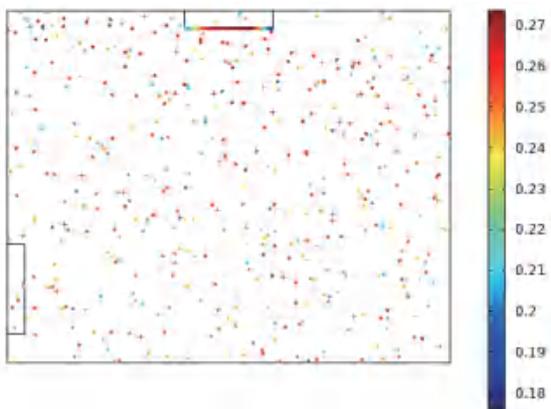


图 1 顶送侧回粒子分布云图

从图 1 可以看出，采取顶送侧回的气流组织形式，空调房间内的微生物气溶胶明显的分布广泛且

覆盖密集。顶送侧回的气流组织形式下，室内空气流动对于室内微生物气溶胶的排出效果较差，气溶胶污染物在房间内的滞留时间较长，发生病菌微生物交叉感染的可能性较大，预防交叉感染效果差。

2.3.2 顶送顶回

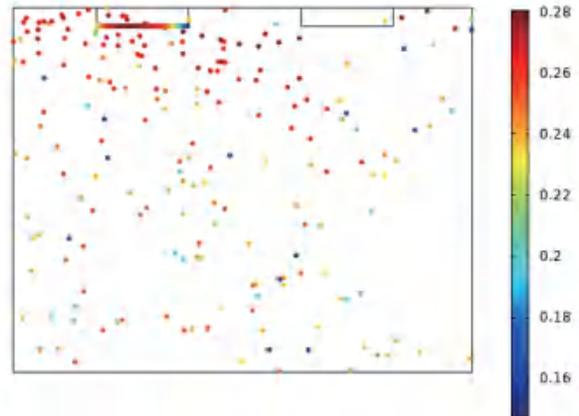


图 2 顶送顶回粒子分布云图

从图 2 可以看出，采取顶送顶回的气流组织形式，空调房间内的粒子分布相对于顶送侧回的形式而言，气溶胶粒子的数量明显减少。顶送顶回的气流组织形式下，室内空气流动对于室内微生物气溶胶的排出效果一般，发生病菌微生物交叉感染的概率仍较高。

2.3.3 顶送底回

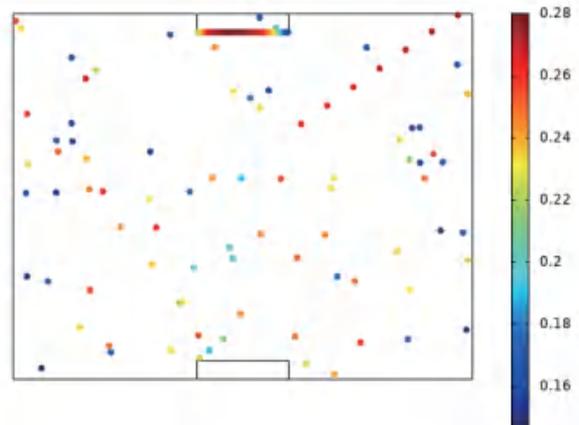


图 3 顶送顶回粒子分布云图

从图 3 可以看出，采取顶送底回的气流组织形式，空调房间内的粒子分布相对于顶送侧回和顶送顶回的气流组织形式而言，房间内滞留的气溶胶颗粒数量最少，且没有出现大面积的颗粒物集中聚集现象。顶送底回的气流组织形式下，室内空气流动对于室内微生物气溶胶的排出效果相比于其他两种送风形式而言，净化效果最好，发生病菌微生物交叉感染的可能性最低。

2.4 结论分析

对比微生物气溶胶在房间内的数量，顶送底回的气流组织形式下，室内微生物气溶胶的数量最少，游走的微生物气溶胶颗粒仅有总量的8.8%，其次为顶送顶回，顶送侧回形式下的微生物颗粒含量最高，50%以上的微生物气溶胶都残留在房间。

对比微生物气溶胶的空间分布情况，明显观察到在送风口处均出现了微生物气溶胶积聚现象，污染物浓度较高，因此需要定期的清理和更换风管和送风口，避免微生物进一步滋生和繁衍。

3 新风系统的过滤净化分析

3.1 新风系统净化作用

新风系统对于室内微生物污染的净化作用分为两方面。一方面新风系统的过滤组件能够过滤室外向室内输送的微生物污染物，对于即将进入室内的空气进行除菌和灭菌流程，降低了微生物气溶胶污染物进入室内的可能性。另一方面新风系统向室内输送净化后的洁净空气，有利于稀释和排除室内较高浓度且集中分布的微生物气溶胶污染物，降低了病毒微生物气溶胶在室内的传播和扩散，提高了室内空气品质。

3.2 室内微生物污染物控制方程

$$V \frac{dC}{dt} = Q_m C_0 (1 - h_m h + p Q_m C_0 + Q_n C_0 - C V_d A - Q_m + Q_m + Q_n h C + G + R_w) \quad (4)$$

式中 V 为房间体积 (m^3)； A 为房间表面积 (m^2)； C 为室内微生物浓度 ($\mu g/m^3$)； C_0 为室外微生物浓度 ($\mu g/m^3$)； Q_m 为新风量 (m^3/h)； Q_n 为渗透风量 (m^3/s)； Q_n 为自然通风风量 (m^3/h)； η_m 为净化系统过滤效率； p 为微生物穿透因子； V_d 为沉积速度 (m/h)； G 为单位时间内微生物散发源强度 (CFU/min)； R_w 单位时间内由于二次悬浮所产生的微生物散发源强度 (CFU/min)。

以独立的空调房间为研究对象，考虑门窗封闭状态下新风系统对室内微生物的作用，故自然通风量为0；新风系统下的房间压力为正压，因此渗透风量取值为0；只考虑室内人体静态情况下的微生物污染物作用，故二次悬浮所产生的微生物散发源强度也为0。因此，可以将公式进行进一步简化。

$$V \frac{dC}{dt} = Q_m C_0 (1 - h_m h - C V_d A - Q_m C + G) \quad (5)$$

针对换气次数的选择，根据GB/T 18883-2002《室内空气质量标准》规定，对于达到室内空气质量的最小新风量标准为 $30m^3/(h \cdot 人)$ ，折合换气次数为2.14次，因此换气次数的选择上，选取每小时2.14次的换气次数。

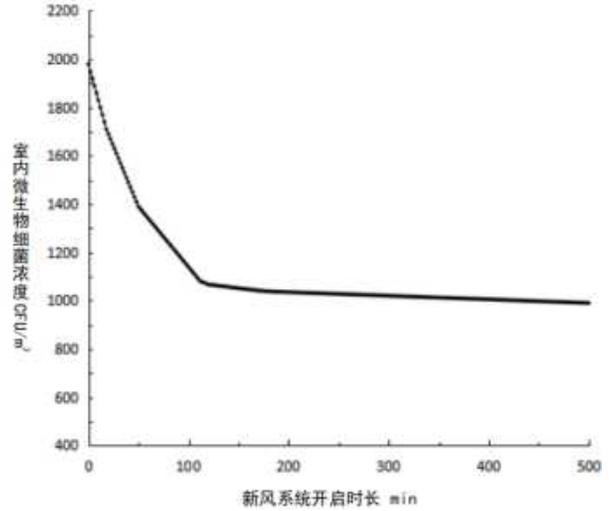


图4 粗+中过滤组合

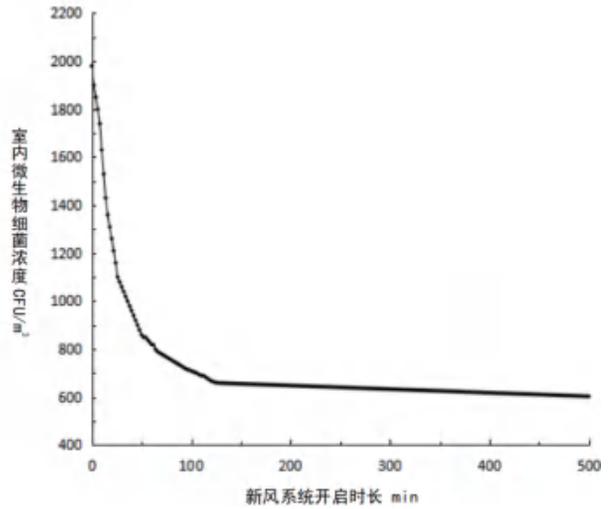


图5 粗+高过滤组合

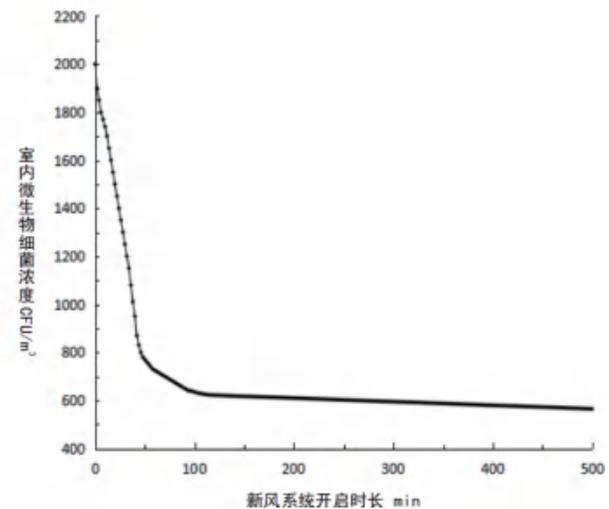


图6 粗+中+高过滤组合

3.3 模拟结果与分析

利用 MATLAB 创建 Simulink 模型,模拟了新风系统下不同过滤净化组合对于室内微生物污染物的净化控制。比较了粗+中效、粗+高效、粗+中+高效不同过滤组合下的室内微生物细菌浓度随时间变化情况。如下所示:

通过拟合曲线图可以看出,在新风系统未开启前,室内的微生物浓度处于较高的初始状态,随着新风系统的开启,过滤组件发挥作用,室内输入净化后的新鲜空气,室内的微生物细菌含量出现明显的下降趋势,并且随着时间的推移,变化程度逐渐趋向平稳,达到动态稳定状态。

采用不同的新风系统过滤组合,室内微生物浓度变化趋势和最低浓度含量明显不同,新风系统采用粗+中效过滤时,室内微生物细菌浓度水平最高,房间空气品质最差,净化效果最不明显;采用粗+中+高效组合过滤时,室内微生物细菌浓度水平最低,室内空气品质最好,净化效果最好。

对比不同过滤组合的净化效果,采用粗+中+高组合过滤时,净化效果明显,最高效率可达70%左右,其次净化控制效果水平为粗+高效组合>粗+中效过滤组合,粗+中效过滤组合下的过滤净化效率仅达到50%左右。

对比室内微生物细菌浓度趋于稳定的状态情况,采用粗+中+高效的过滤组合能够最快达到室内微生物浓度动态稳定,用时102min室内微生物细菌浓度为602CFU/m³。粗+高效过滤组合达到室内微生物浓度稳定状态,用时最长,用时125min室内微生物细菌浓度为688CFU/m³

4 结语

通过对比不同气流组织形式下微生物气溶胶颗粒物的运动特性和不同过滤组合的新风系统净化效果,发现采用顶送底回的气流组织形式和粗+中+高的过滤组合,室内病菌微生物的浓度含量最低,微生物气溶胶的排出效果最佳,发生病菌微生物交叉感染的可能性最低,净化效果明显,对于有效阻断病菌传播及减少传染病的蔓延具有积极作用。

参考文献

- [1] 雷浩,肖胜蓝,张楠,魏健健,金滔.新型冠状病毒在家庭环境中的主要传播途径[J].科技日报,2021,39(09):78-86.
- [2] 周德庆.微生物学教程[M].中国教育出版社,2002:4-6.
- [3] 车凤翔.空气生物学原理及应用[M].人民军医出版社,2002,23-29.
- [4] 郑云昊,李菁,陈灏轩,等.生物气溶胶的昨天、今天和明天[J].科学通报,2018,63(10):878-894.
- [5] Zhong J,Urch B,Speck M,et al.Endotoxin and β -1,3-D-Glucan in Concentrated Ambient Particles Induce Rapid Increase in Blood Pressure in Controlled Human Exposures[J].Hypertension,2015,66(3):509-516.
- [6] 高庆先,刘俊蓉,李文涛,等.中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示[J].环境科学,2015,36(4):1141-1147.
- [7] 施珊珊,纪文静,赵彬.不同通风形式下住宅内细颗粒物质量浓度及室内暴露量的模拟及比较[J].暖通空调,2013,43(12):34-38.

洁净室压力控制方法简析

王群芳

(建科环能科技有限公司, 北京 100013)

[摘要] 随着医疗医药行业、数字智能化行业、生物研究行业、食品生产行业, 在对生产高要求和高可靠性的需求问题上, 对生产环境的洁净度和压力需求提出了更高的要求, 为抵挡外来污染设置的正压洁净室, 为避免洁净室中含有致病性微生物或污染物对环境及人员造成危害, 使洁净室保持一定的正压和负压, 对洁净室生产环境的压力控制提出了更高的要求, 压力控制保障系统成为生物安全风险控制方面不可缺少的重要技术标志之一。

[关键词] 洁净室; 压力; 控制方法

0 引言

随着洁净室的广泛应用, 对防止粒子污染、微生物污染、降低生物安全风险的环境的控制要求不断提高, 洁净室维持其洁净度最重要的技术手段之一, 是使洁净室保持适当的压差。正压差可减少周围环境对洁净室内部空间的干扰和影响, 负压差可控制洁净室污染空气对周围环境及人员的影响和危害。稳定的压差控制系统能较好的保障洁净室环境要求, 洁净室压力控制是通过洁净室送排风风量差实现的, 在实际工程中, 为保证洁净室所要求洁净度和压力, 系统设计风量往往偏大, 冗余设计无法避免, 从而造成了较大的能耗。因此, 在满足洁净室环境要求的前提下, 兼顾洁净室净化空调系统节能效益, 对于洁净室压力控制方法进行分析是十分有必要的。

1 洁净室及压力控制简介

洁净室与其他普通房间最大不同之处为“洁净”二字, 对洁净室而言, 其主要环节为室内洁净度的控制, 而压差控制是维持洁净室洁净度等级、减少外部污染、防止交叉污染、控制污染空气外泄最重要有效的控制手段之一, 通常情况下, 洁净室分为正压和负压两种静压设置。正的静压差是洁净室抵挡外来污染的一个重要参数, 而负压差是阻止洁净室内的污染物逸出的重要参数。因含有致病性微生物或污染物的空气扩散对环境及人员会造成危害,

负压洁净室对压力控制的要求更甚。

目前国内外设计施工标准中对洁净室压力的设置均有相关要求, 本文中只列举《洁净厂房设计规范》^[1] GB 50073-2013 标准中对洁净室压力的要求, 洁净厂房内各洁净室的空气洁净度等级应满足生产工艺对生产环境的洁净要求; 第 6.2.1 条洁净室(区)与周围的空间必须维持一定压差, 并按工艺要求决定维持正压差或负压差; 第 6.2.2 条不同等级的洁净室之间的压差不宜小于 5Pa, 洁净区与非洁净区之间的压差不应小于 5Pa, 洁净区与室外的压差不应小于 10Pa。实际设计和使用中除满足工艺基本需求外, 还应满足相关设计要求。

2 洁净室压力控制方法

洁净室的洁净主要通过洁净空调系统实现, 最常见的是集中式洁净空调系统, 即空气处理设备集中设置在空调机房内, 空气经处理达标后由风管系统送入各房间, 达到各房间对温湿度、压力、洁净度等的要求。

洁净空调系统根据工艺要求及相关规范, 分为正压空调系统和负压空调系统, 通过控制送风量、回/排风量的差值控制系统内各房间要求压力。洁净室(区)的压差控制在不同项目中会有不同设计和不同的调试方法, 整体来说共分为四大类, 如图 1 所示。

方法 1, 送风、回/排风均设置手动多叶对开调

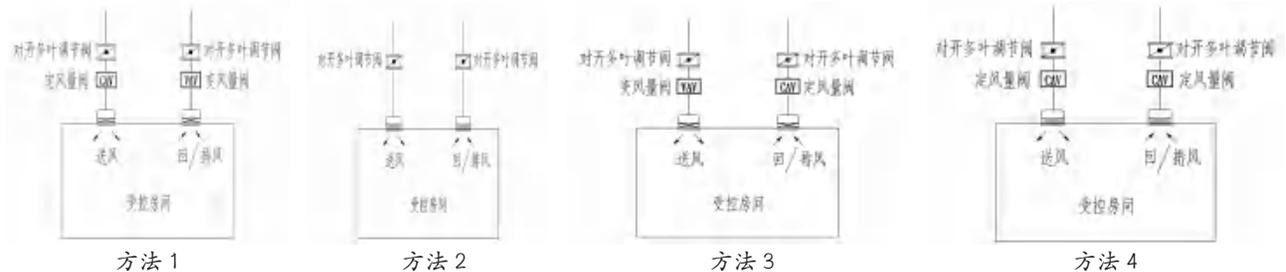


图 1 常见的洁净室压差控制方法

节阀。施工完毕后，通过人工手动调节多叶片调节阀开度实现风量调整，从而控制压力以满足设计压力要求。该控制方法，初投资较低且空调系统相对简单，但其控制和调试均靠人工实现，后期调整需爬到吊顶内手动调整较为麻烦。

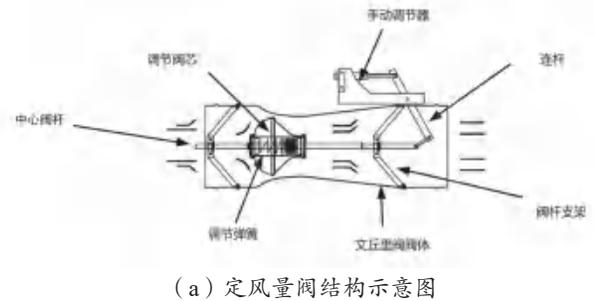
方法2，送风设置CAV定风量阀、回/排风设置CAV定风量阀。出厂时根据所要求的风量，将定风量阀的阀杆锁定在一个固定位置，出厂前经过严格的标定，只要风管的压力在定风量阀的工作范围内，当风管内压力变化时，定风量阀通过阀芯位置的改变来保持一个恒定的风量，继而保持恒定的压差。该控制方法，送风、回排风管道不仅设置了定风量阀，且一般会同时配置手动调节风量增，初投资增加，且该阀门安装要求阀门前后有一定长度直管段导致系统管网复杂，但定风量阀门的运行无需外部供电，阀门本身带有精密的控制弹簧，对于风管中压力波动能作出及时响应，保证风量和压力控制的稳定性。

方法3是送风设置CAV定风量阀门、回/排风设置VAV变风量阀门。送风设置的定风量阀出厂时根据设计所要求的风量，将定风量阀的阀杆锁定在一个固定位置，精确控制预定的送风量，当风管内压力变化时，定风量阀通过阀芯位置的改变来保持一个恒定的风量，继而保持恒定的压差。回/排风设置的变风量阀出厂时根据所要求的风量标定，在控制端输入所需风量或压力信号，使其风量或压力控制在所要求的数值。当洁净室风量或压力发生变化时，控制器接收到的信号会自动与控制信号进行计算比较并纠正，使阀门被迅速调节到相应的风量，控制命令信号可以使模拟信号、无源干接点信号或由通讯端口写入，变风量阀在出厂前经过严格的标定，只要风管的压力在变风量阀的工作范围内，文丘里阀便会精确控制风量。该控制方法增加阀门及自控系统，初投资较大，且空调系统安装和控制均较以上两种方法复杂，但该方法送风量恒定不变，当压力变化时，变风量阀能及时收到控制信号并迅速调整，无需工作人员排查原因和手动调整，实现了系统压力智能化自动化控制调节。

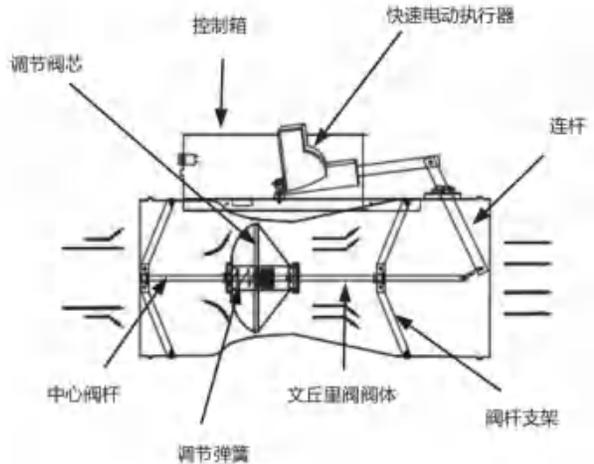
方法4是送风设置VAV变风量阀，回/排风设置CAV定风量阀门，方法4的工作原理与方法3同，只是定风量阀、变风量阀的设置位置相反。该方法较方法3，固定送风量，调整回/排风量更容易控制洁净室压力，而固定回/排风量，调整送风量可能出现调整范围不稳定，送风量过度降低导致洁净室的洁净度不能满足。

洁净送、回、排风量与渗透风量达到动态平衡，

使得洁净房间洁净度和压力可保持在稳定状态；洁净系统风量及压力控制的方法各式各样，本文阐述的控制方法中，提及的定/变风量控制阀改变了传统风量控制的模式，使得风量控制更加稳定和精确。目前较常用的定/变风量阀为压力变化无关型的控制阀，如图2所示，该类型阀门不需要任何动力装置，具有不受风管内静压变化影响，当风管内压力变化时，通过阀门特有的阀芯组件位置的改变来保持一个恒定的风量，继而保持恒定的压差。



(a) 定风量阀结构示意图



(b) 变风量阀结构示意图

图2 常见定/变风量控制阀

3 某车间净化空调系统压力控制调研

内蒙古呼和浩特市某制药车间调研实验，本车间某系统为二次回风系统，送风口为无隔板高效过滤器风口，回风口为百叶风口，送风支管安装文丘里定风量阀门，根据设定风量自动调节阀门开度，回/排风支管采用定风量与变风量相结合方式，变风量阀根据房间设定压力调整开度。通过对本系统通过调频方式降低风量，观察空调系统降频前后室内洁净度和静压差变化情况，降频前送风机频率(Hz)：44.1，送风机频率(Hz)：32.9。空调系统降频前后洁净室风量和绝对压力变化情况见图3，空调系统降频前后洁净室换气次数和绝对压力变化情况见图4。

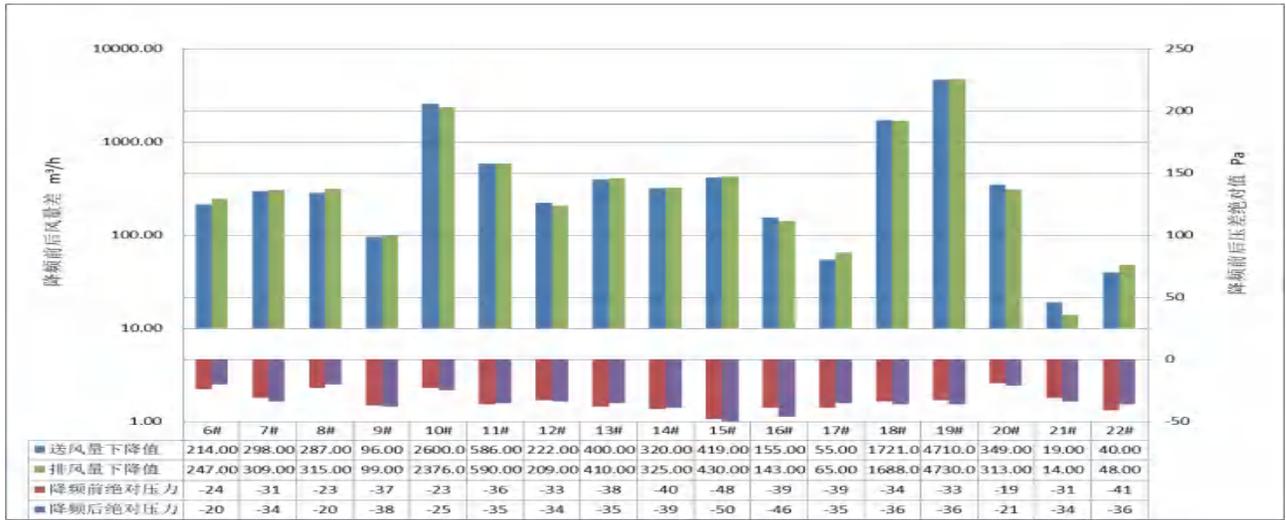


图3 降频前后风量变化幅度压力变化对比(定进变出)



图4 降频前后换气次数下降率与压力变化对比(定进变出)

文丘里阀正常工作压力较大,且由于安装高效过滤器,送风主管道压力均为480Pa以上,选择风机功率较之安装普通手阀系统大。由于房间出风采用定/变风量阀结合的方式,其变风量阀门作用主要用于调整房间压力值,当压力稳定后,应将变风量阀开度固定,以免实际生产过程中人员频繁开关门体造成房间压力不断变化。对于负压系统房间,安装送定、回/排定+变阀门,系统降频时可保证房间压力梯度在可控范围内,由于房间负压值不变,且无人员干扰,故室内洁净度较之降频前变化不大。

4 结论分析

洁净室净化空调系统因使用时间和工艺需求的变化,系统的阻力和风量不断变化,为保证洁净室洁净度、压差、风量等参数满足设计规范和和使用要

求,目前绝大多数洁净室的洁净空调系统设计冗余度较大,造成空调系统运行费用和能耗较大,其中因压差控制不完善不及时而造成的设计冗余更甚,如果可以采取一定的控制手段,如设置压力无关型定变风量控制阀门,保证在风量大幅减少的情况下,通过阀门迅速的调整,使得洁净室的压力依然保持在设计要求范围内,则可以降低洁净空调系统运行能耗,达到绿色节能的目的。

参考文献

[1] 中国电子工程设计院, 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 洁净厂房设计规范: GB50073-2013. 北京: 中国计划出版社. 2013

洁净室运行状态切换过程中的环境参数变化特征及节能潜力分析

纪迎迎^{1,2}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建科环能科技有限公司, 北京 100013)

[摘要] 本文研究了某兽药生物制药洁净车间值班工况下降低风量运行的技术经济可行性, 基于该项目的空调系统形式及工艺流程以及其对温湿度、洁净度、压差等参数的需求, 通过降低送、排风机运行频率的方法, 对比分析了运行工况及值班工况下车间内温湿度、洁净度、压差等参数的区别, 得出了值班工况能满足其对温湿度、洁净度、压差的技术要求, 且通过降低送、排风机运行频率实现了节能 20.3% 的目的, 具有经济可行性。

[关键词] 兽药生物制药洁净车间; 值班工况; 技术经济可行性分析

0 引言

随着新版兽药生产质量管理规范(2020年修订)的更新, 其对兽药生物制药洁净车间有了新的要求。兽药生物制药洁净车间既要达到静态级别的要求, 也要满足动态级别的要求, 第三方检测机构对其的验收一般指的是静态验收, 这就要求企业内部有动态检测的能力。设计人员在进行净化空调设计时需同时考虑室内洁净度能否满足动静态级别下的要求。这就使得空调系统能耗进一步加大。然这类需保证室内环境应满足特殊生产工艺及操作环境的建筑, 由于其在营造洁净环境过程中对风量、压力、室内热湿环境有特殊的要求, 且不同行业可能导致空调系统形式的不同, 单位风量的耗功率较之普通建筑空调系统也要高, 造成该类建筑在能源使用方面存在较大差异。出于国家对环境保护、节约能源等问题的持续重视, 该类建筑的节能潜力空间逐渐被人们关注, 本文研究了某地区兽药生物制药洁净室值班工况下降低风量运行的技术经济可行性, 通过降低送、排风机运行频率的方法, 对比分析了运行工况及值班工况下车间内温湿度、洁净度、压差等参数的区别, 得出了值班工况能满足其对温湿度、洁净度、压差的技术要求, 且通过降低送、排风机运行频率实现了节能 20.3% 的目的, 具有经济可行性。

1 净化空调系统现状

此次调研了某地兽药生物制药洁净车间净化空调系统中的一个典型的 JK-H 系统, 此系统为满足三级防护要求的负压二次回风系统。

1.1 室内外设计计算参数

(1) 室外计算参数

1) 夏季: 空调干球温度 30.6℃, 空调湿球温度 21.0℃, 通风温度 26.5℃, 室外风速 1.8m/s。

2) 冬季: 空调计算温度 -20.3℃, 相对湿度 58%, 通风温度 -11.6℃, 室外风速 1.5m/s。

表 1 室内设计参数表

房间性质	温度 (°C)		相对湿度 (%)
	冬季	夏季	
A、B、C 级	20 ~ 24		45 ~ 60
D 级	18 ~ 26		45 ~ 65

(2) 室内设计参数

1.2 空调冷热源

该系统空调机组内冷热盘管采用四管制, 机组内冷热盘管独立设置。夏季冷源为 7/12℃ 冷水, 夏季再热为 35/30℃ 热水。冬季热源为 60/50℃ 热水, 冬季加湿采用 0.2MPa 蒸汽, 均由厂区动力中心供给, 冬夏季控制策略由人工切换。

1.3 气流组织及空气净化流程

该系统采用高效过滤器上送风, 单层百叶侧下回风/排风。高效过滤器为无隔板高效过滤器, 90 厚, 初阻力小于 100Pa, 每个送风高效过滤器上设手动调节阀。单层百叶侧下回风/排风, 风口自带滤网。排风总管上安装高效过滤箱, 高效过滤箱中安装两道高效过滤器, 排风机一用一备。回风总管上安装高效过滤箱, 高效过滤箱中安装一道高效过滤器。过滤器级别为 H13。该系统图如下图 1 所示:

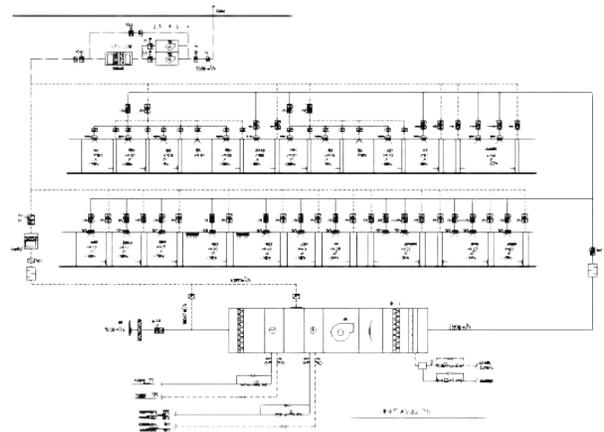


图 1 JK-H 系统图

2 运行及值班工况下室内参数

此次现场调研时间为 2019 年 2 月，室外温湿度如下所示：室外温度 -7.4°C ；室外湿度 33.2%。

2.1 设备参数

送排风机降频前后设备参数如下表所示：

表 2 设计参数

送风机		排风机	
风量 / (m^3/h)	全压 / Pa	风量 / (m^3/h)	全压 / Pa
33638	2400	8586	1300

表 3 运行工况运行时的参数

送风机			排风机		
风量 / (m^3/h)	全压 / Pa	频率 / Hz	风量 / (m^3/h)	全压 / Pa	频率 / Hz
27760	2451.5	44.1	7113	2050	43.6

表 4 值班工况运行时的参数

送风机			排风机		
风量 / (m^3/h)	全压 / Pa	频率 / Hz	风量 / (m^3/h)	全压 / Pa	频率 / Hz
16647	2451.5	32.9	5212	2050	31.4

2.2 室内参数

(1) 室内温度

送排风机降频前后室内温度变化如下图 2 所示：



图 2 室内温度对比图

冬季室内温度设计值为 20°C ，由图 2 可知，在运行工况和值班工况下的室内温度值都在计算值以上，满足室内温度要求。值班工况下温度普遍高于运行工况的原因是：降频后的温度测试时间晚于降频前的室内温度测试时间，一方面是送风量降低。另一方面是受设备人员散热影响。

(2) 室内湿度

送排风机降频前后室内湿度变化如下图 3 所示：



图 3 室内湿度对比图

冬季室内湿度设计值为 40%，由图 3 可知，在正常运行工况室内湿度值都大于 30%，且趋于平缓，均满足新版 GMP 对室内湿度 30% 的最低要求。值班工况下室内湿度值大部分都大于 30%，个别小于 30%，且无规律。分析原因是：降频后的湿度测试时间晚于降频前的室内湿度测试时间，受人员散湿影响。值班工况下个别房间湿度低于运行工况下的房间湿度值得原因是：房间相对较大，开门时间较长，受室外因素影响。

(3) 室内换气次数

送排风机降频前后室内换气次数变化如下图 4 所示：



图 4 室内换气次数对比图

降频后送风量减少，房间体积不变，故值班工况下房间换气次数大部分低于运行工况下的房间的换气次数，个别房间换气次数接近甚至超过正常运行工况下的换气次数的原因是：该房间送风阀门被人为的调大所导致的原因。

(4) 室内绝对压差

送排风机降频前后室内绝对压差变化如图 5 所示：

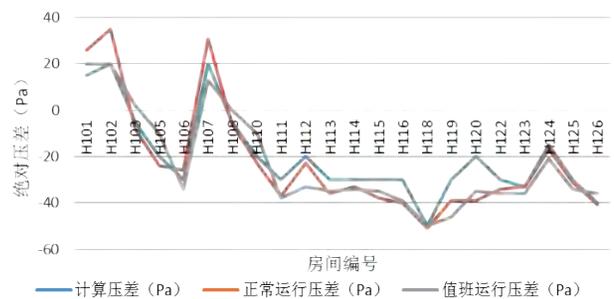


图 5 绝对压差对比图

计算绝对压差与降频前后房间压差变化趋势趋于一致。

3 节能潜力分析

3.1 风机运行参数分析

风机功率计算公式如下：

$$N = \frac{Q \# P}{3600 \# 1000 \# h_0 \# h_1} \quad (1)$$

Q —风量, m^3/h ;

P —风机的全压, Pa;

η_0 —风机的内效率, 一般取 0.75~0.85;

η_1 —机械效率, 1. 风机与电机直联取 1;

2. 联轴器联接取 0.95~0.98; 3. 用三角皮带联接取 0.9~0.95; 4. 用平皮带传动取 0.85;

把表 3 与表 4 的数值带入公式 (1) 可得下表 5:

3.2 峰、平、谷电价

表 5 风机功率对比表

	送风机功率/kW	排风机功率/kW
运行工况	37.86	8.20
值班工况	22.74	6.04

已知该地区电价为下表 6 所示:

表 6 峰、平、谷电价

类别	峰	平	谷
时间	7:30--11:30 17:00-21:00	5:00-7:30 11:30-17:00 21:00-22:00	22:00-5:00
电价(元)	1.0	0.7	0.4

已知该车间正常生产与非生产的时间表如下表 7 所示:

表 7 生产时间表

类别	生产时间	非生产时间
时间	7:30-17:00	17:30-7:30

3.3 年运行节能潜力分析

年费用计算式如下式所示:

$$Y = N \# y \# 24 \# 300 \quad (2)$$

Y —年费用, 万元;

N —风机的功率, kW;

y —峰、平、谷电价, kWh;

300—年生产日数。

把表 5、6、7 的数值带入公式以上公式, 得无值班工况时的运行模式与含有值班工况时的运行模式下的年费用统计表如下表 8 所示:

表 8 年费用统计表

类别	无值班工况	有值班工况
年费用 Y/万元	22.63	18.83

由表 8 可知, 采用值班工况时的年费用为不采用值班工况下的年费用的 79.7%。即一年可节省 20.3% 的费用。

4 结论

由以上分析可知, 采用值班工况时的年费用为不采用值班工况下的年费用的 79.7%。即一年可节省 20.3% 的费用。以上节省的费用仅考虑了风机的能耗, 如果再加上冷热源的能耗节省, 会节省更多的能耗, 减少更多的花费。

空气净化技术进展与相关净化装置 集成移动模块式洁净室浅析

马俊驰, 张少梅, 俞伟

(昆山协多利洁净系统股份有限公司, 昆山 215331)

[摘要] 新药、新技术、新工艺的不断涌现, 以及对制药行业、医疗行业及电子行业的洁净室要求越来越高, 从传统的洁净室工程建设到模块式洁净室转型将会尤为重要。现今我国模块式洁净室处于起步阶段, 在国际上瑞典及美国等国家已经取得了长足发展。相信未来几年, 随着相关产业升级及更新换代, 模块式洁净室的需求量将会快速增长上升。基于此, 本文主要分析集成移动模块式洁净室在隔离病房和实验室的应用。

[关键词] 集成移动模块式洁净室; 隔离病房; 实验室

0 引言

集成移动模块式洁净室主要应用于更新快、周期短的项目。模块式理念给我们带来了很多效益: 缩短建造周期, 工期可控; 降低制造成本, 投资精确可控; 过程可复制、可再现, 充分保证质量; 出厂前全方位系统确认验证, 保证系统性能指标达到最优。

1 集成移动模块式洁净室的特点

传统洁净室均按技术及施工模式实施, 存在很多的不足之处: 材料无法标准化使用、工厂无法批量化生产; 建造工期长; 施工安全性差; 材料重复使用率低等。

随着集成移动模块式洁净室的出现, 模块化、产品化以及集成化的应用, 极大地降低了对洁净室空间、进度的要求。它完全颠覆了传统模块化洁净厂房的概念, 从根本上满足客户灵活多变的需求。

(一) 模块化: 模块具有其独立的结构。

根据用户的 URS, 结合传统洁净室系统工程以及洁净室产品制造积累的技术和经验, 用产品制造的模式替代工程建设模式, 将洁净室模块采用工厂

预制的方式, 将整个洁净车间进行模块化。

(二) 产品化: 模块到达现场后进行积木式的拼装、连接、组合。

每个模块洁净室材料的生产和总装在工厂完成。在现场安装的过程中, 移动简便, 实现了整个模块连接过程的简易化和标准化。

(三) 集成化: 模块具有标准的结构和标准的公用系统接口。

利用 BIM 设计 (三维模型设计) 的方法, 确保模块具备系统集成的特点。将洁净室的空调、配电等系统进行整合, 预留标准接口, 经过调试验证后交付用户直接使用。

2 集成移动模块式洁净室的应用

(一) 集成移动模块式洁净室结构框架的计算

集成移动模块式洁净室, 每个模块都是采用钢结构框架, 以保证单独模块的稳定性及安全性, 现以某模块式洁净室水平桁架计算为列:

1) 设计资料

桁架跨度为 7850mm, 高度为 600mm

构件总重: 114.817 公斤, 构件每米单重: 14.6264kg/m, 结构简图如下所示:

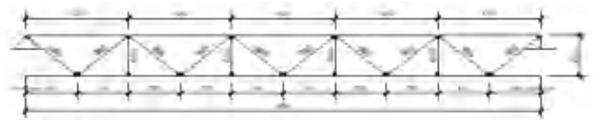


图 2 水平桁架结构简图

2) 截面布置

杆件编号图如下所示:

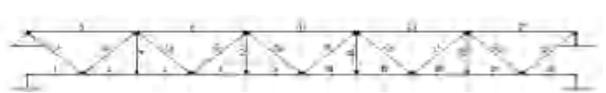


图 3 杆件编号图

3) 最不利构件应力详细校核

最不利下弦 1 号杆件, 采用截面 BOX-

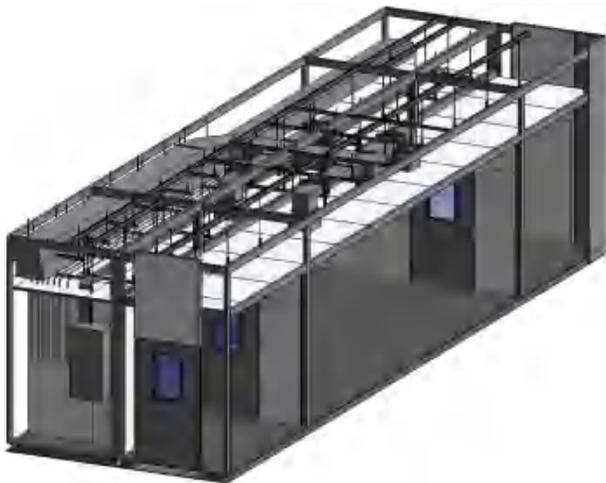


图 1 集成移动模块式洁净室 BIM 设计三维模型

120*60*2-Q235

截面面积: $A=7.04\text{cm}^2$

强度验算: $\sigma=0/7.04\times 10=0\text{N/mm}^2<215\text{MPa}$, 合格
最不利竖杆 4 号杆件, 采用截面 BOX-

50*1.5-Q235

截面面积: $A=2.91\text{cm}^2$

强度验算: $\sigma=0/2.91\times 10=0\text{N/mm}^2<215\text{MPa}$, 合格
最不利上弦 5 号杆件, 采用截面 BOX-

120*60*2-Q235

截面面积: $A=7.04\text{cm}^2$

强度验算: $\sigma=0/7.04\times 10=0\text{N/mm}^2<215\text{MPa}$, 合格
上弦杆件考虑节间弯距补充计算

上弦杆件弯距设计值计算

考虑构件自重: 0.055264kN/m

考虑风载: 0kN/m

上弦杆件平面内荷载设计值: $0\times 1.4=0\text{kN/m}$

上弦杆件平面外荷载设计值:

$0.055264\times 1.2=0.0663168\text{kN/m}$

上弦杆件平面内荷载产生绕 x 轴弯矩设计值:

$0\times 0\times 1.57\times 1.57/10=0\text{kN}\times\text{m}$

上弦杆件平面内荷载产生绕 y 轴弯矩设计值:

$0\times 1\times 1.57\times 1.57/10=0\text{kN}\times\text{m}$

上弦杆件平面外荷载产生绕 x 轴弯矩设计值:

$0.0663168\times 1\times 6\times 6/10=0.23874\text{kN}\times\text{m}$

上弦杆件平面外荷载产生绕 y 轴弯矩设计值:

$0.0663168\times 0\times 6\times 6/10=0\text{kN}\times\text{m}$

上弦杆件考虑节间弯距强度:

$\sigma=0/704-238740/22597-0/15412.6=(-10.5652)\text{N/mm}^2<215\text{MPa}$, 合格

最不利斜杆 6 号杆件, 采用截面 BOX-

50*1.5-Q235

截面面积: $A=2.91\text{cm}^2$

强度验算: $\sigma=0/2.91\times 10=0\text{N/mm}^2<215\text{MPa}$, 合格
最不利端斜杆 7 号杆件, 采用截面 BOX-

50*1.5-Q235

截面面积: $A=2.91\text{cm}^2$

强度验算: $\sigma=0/2.91\times 10=0\text{N/mm}^2<215\text{MPa}$, 合格

由此可见, 模块式洁净室结构框架的计算是保证模块空间及连接组合的关键。决定着整个模块式洁净室的组合方式。

(二) 集成移动模块式洁净室在隔离病房的应用

隔离病房还要有合理的平面布局, 利用建筑设施、功能分区与物理隔离, 实现合理的负压梯度, 用数道屏障阻截渗漏。二是遵循传染病控制思路, 规划合理的人流与物流^[1]。

隔离病房结构包括:

- 1) 隔离间;
- 2) 隔通道(缓冲间);
- 3) 卫生间;
- 4) 医用设备间;
- 5) 传递窗;
- 6) 医用设备带。

所述隔离病房舱体模块均采用统一的规格及技术性能生产制作而成, 在疫情发生时可快速组装成可扩展的临时传染病负压隔离病房及负压隔离区, 在疫情结束后能拆解集中存储, 可以节约资源, 减少浪费。



图 4 集成移动模块式隔离病房布局图

医疗环境控制技术服务于医疗过程与感染控制, 技术的合理性取决于医疗过程环境控制要求与感染风险的认定^[2]。

目前隔离病房气流组织主要有两种方式, 一种是我国标准推荐的主、侧送风气流模式, 另一种国外常用的单侧顶送异侧下排气流模式。针对移动隔离病房活动空间小的特定案例, 送排风口的布置, 特别是送排风口的形式与调节, 通过模拟找出最佳配置。

1) 主、侧送风模式

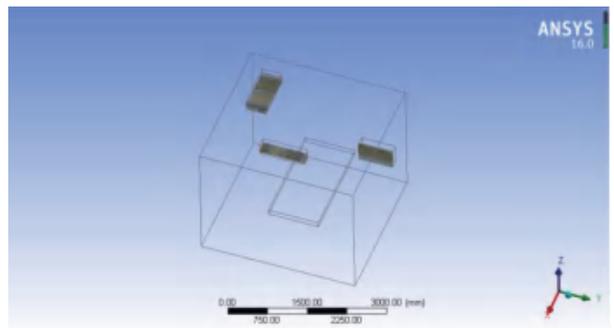


图 5 主侧送风模式模型图

2) 单侧顶送异侧下排方案

通过图 6 的模拟, 认为国外常用的单侧顶送异侧下排气流模式优于我国标准推荐的主、侧送风气流模式。更适合移动隔离病房, 实施气流更为简单、有效。医护人员处于气流上风侧, 减少了医护人员活动区域的气流涡旋, 不仅可以使得患者呼出的污

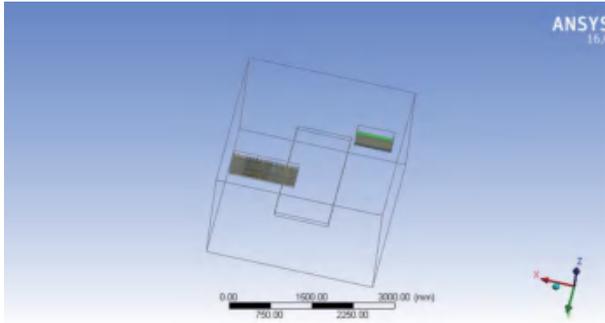


图6 单侧顶送异侧下排模型图

染物较快排出，降低了医护人员感染风险。根据上述的评价指标来说，单侧顶送异侧下排气流模式更佳。

(三) 集成移动模块式洁净室在实验室的应用

集成移动模块式洁净室针对不同的应用，通过模块式设计及技术创新，在设计阶段引入干涉分析技术、结构模拟技术及气流模拟技术，保证稳定性能的同时，提升洁净装修的材料、设备、配件循环利用效果，有效降低生产与实用能耗，减少了投资风险。

根据给出口东南亚国家的集成移动模块式核酸检验实验室设计方案为列，根据客户的需求，每日3000人核酸检测量进行设计，同时考虑出口运输尺寸问题，因此移动式模块核酸实验室根据集装箱的尺寸进行设计。设计方案如图7：

实验室方案说明：

- 1) 人员进出设置更衣与缓冲区；
- 2) 各实验环节之间应有互锁传递窗；
- 3) 暖通系统采用全新风与全排，全排风机口设置中效，排风口设置高效过滤^[3]；
- 4) 实验室内的空气流向：试剂准备区——样本混合及核酸提取区——核酸扩增区，空气压力递减的方式，实施对空气流向的控制；
- 5) 建议更衣与缓冲区域保持正压，后两个区域保持负压状态；
- 6) 各区域温度控制为：22±2℃，洁净度为D级；

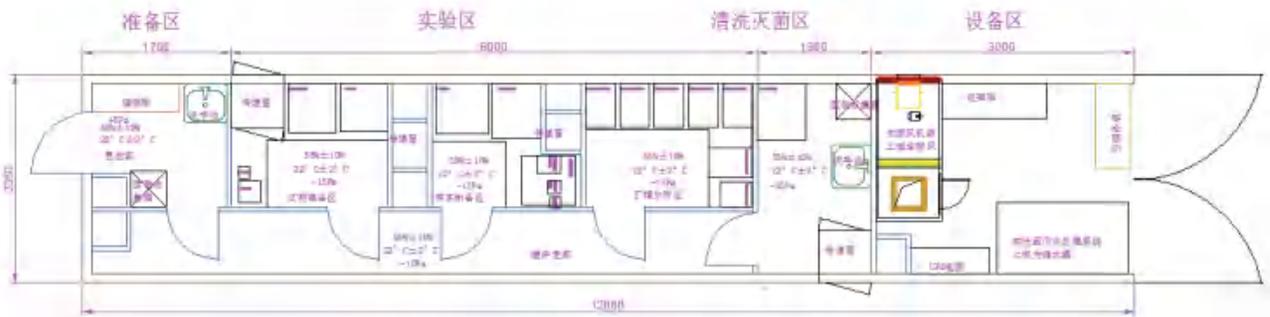


图7 集成移动模块式核酸检测实验室方案图

7) 核酸实验室可设置门禁系统。

实验室的洁净室工程是将一定空间范围内空气中的微粒子、有害空气、细菌等污染物排除，并将室内温湿度、洁净度、室内压力、气流速度与气流分布、噪音振动及照明等控制在某一需求范围内^[4]。

主要技术指标如下表所示：

通过洁净室工程模块式设计技术应用将电气管线、配件、纯水纯气管线及配件、工艺管道、隔离设备及材料等模块化，实现工程产品化，洁净室工程施工工厂化，工程施工标准化。

表1 主要技术指标

技术指标	参数说明
材料可重复利用性	80%以上材料重复使用率
安装模块	实现标准化生产，70%施工任务在工厂内完成；提高洁净室材料生产施工效率15%以上，工期缩短20%~40%
洁净度	模块式洁净室参数可满足，CLASS4、CLASS5、CLASS6、CLASS7 (ISO14644-1)；监测微粒粒径：粒径达到0.3um
温度	18~28℃内选取，控制精度正负1℃内
湿度	45~65%内选取，控制精度正负5%内
层流风速	0.3m/s-0.5m/s，控制精度正负20%内

3 结束语

集成移动模块式洁净室引领净化行业发展创新趋势。伴随着新技术不断涌现以及洁净室车间要求逐步提高，在净化行业未来发展中，绿色环保，节能减排、节约投资、增加效益将会是工程模块化领域创新的重点。

集成移动模块式洁净室新型工艺机械装备应用将促使洁净行业产业链延伸及模块化配件产业聚集，且其在制造周期、制造成本、节能环保、全程管控等方面的独特优势，必然会成为净化行业创新趋势，并且进一步促使行业的盈利模式发生变化，以及促进相关行业更新换代及发展。具有促进企业技术领先与升级改造作用。

参考文献

[1] 沈晋明, 刘燕敏. 由新型冠状病毒疫情思考医院

负压手术室 [J]. 暖通空调, 2021, 51(7):12-17.

[2] 沈晋明, 刘燕敏. 手术室手术环境控制不应照搬洁净室技术 [J]. 暖通空调, 2017, 47(8):31-35.

[3] 郑若. PCR 实验室通风空调设计探讨 [J]. 中国医

院建筑与装备, 2017, 18(001):64-68.

[4] 崔晓菲. 洁净室气流分布及影响气流因素分析 [J]. 科学与财富, 2010(5):22-22.

高效低阻玻纤空气滤纸

——助力后疫情时代空气净化

陈晓燕, 郭建勋, 包永威

(南京玻璃纤维研究设计院有限公司, 南京 210001)

[摘要] 当前, 空气污染与防治受到了人们的广泛关注, 高效率、低能耗的空气净化过滤系统受到人们的青睐。本文以南京玻纤院在高效低阻玻纤空气滤纸方面的大量研究为基础, 通过构建玻纤空气滤纸微观结构模型, 攻克了玻纤滤纸微观结构调控技术; 通过对粘结剂及其复配方案的研究, 优化了玻纤滤纸基材的表面改性技术, 实现了玻纤空气滤纸高效低阻(高PF值)的优异性能。本文对南玻院玻纤滤纸的综合过滤性能(PF值)与同行的产品进行了对比分析, 产品PF值较同行存在明显优势。高效低阻玻纤空气滤纸可降低空气净化过滤系统的送风能耗, 符合当前我国的低碳发展战略。

[关键词] 空气净化; 玻纤空气滤纸; 高效低阻; 结构模型

1 前言

2020年初, 突如其来的新冠疫情, 让人们开始关注空气净化的问题。传染性疾病的致病病毒、细菌等多以气溶胶形式悬浮于空气中, 形成活的生物粒子病毒、细菌的粒径一般可视为 $0.001-100\ \mu\text{m}$ 的固体或液体微小粒子, 大部分含有致病病毒的气溶胶当量直径 $> 1\ \mu\text{m}$ ^[1]。

利用高效空气过滤器能够阻断带有病毒、细菌的气溶胶颗粒向外传播, 可有效防止交叉感染和环境污染^[2]。优化升级空调新风过滤换气系统, 使用高效率的空调新风过滤换气系统能有效阻断病毒的空气传播。人类与病毒的斗争是一个长期的过程, 虽然我们已经处在了后疫情时代, 但仍然要重视并关注空气洁净相关技术的发展。

就洁净室目前的使用情况来看, 净化空调系统是整个洁净室使用中能耗最大的设备组成部分^[3]。高效低阻的玻纤空气过滤产品可以有效降低过滤器的阻力, 从而降低空调送风系统的阻力, 助力净化空调系统的节能降耗, 符合当前我国的低碳发展战略。

2 玻纤空气过滤纸性能评价

玻璃纤维滤空气过滤纸的开发, 极大地促进了空气洁净技术的发展。玻璃纤维具有诸多优异的性能, 由其制成的空气过滤材料既具备高效率、高容尘量、低阻力等优点外, 还兼具抗生物侵蚀稳定性、热稳定性、不可燃性等优点^[4]。

评价玻纤空气过滤纸过滤性能的关键指标是过滤效率和过滤阻力。过滤效率是指当上游含尘气体经过滤纸时, 一部分颗粒物会被滤料捕集, 被滤纸捕集的颗粒量与上游含尘气体中颗粒总量的比值即为过滤效率。过滤阻力通常是指在额定风量下, 过

滤纸上游空气流入侧和下游空气流出侧之间的气体压差, 单位为Pa, 是表征空气过滤材料性能优劣的另一个重要指标。过滤纸的阻力直接关联过滤器的使用寿命, 滤纸的阻力与滤器的阻力是线性相关的。在满足效率的前提下, 阻力直接关联运行成本, 阻力越低, 运行能耗越低, 使用寿命越长, 运行成本越低^[5]。

本文为综合评价效率和阻力, 使用PF值(式1)对玻纤空气过滤纸进行评价:

$$PF = \frac{-100 \log \eta / 100h}{\Delta P} \quad (1)$$

式中, η 为DOP透过率(DOP为邻苯二甲酸二辛酯, 透过率=1-过滤效率), %; ΔP 为气流阻力, mmH_2O 。PF值越高, 表明滤纸的过滤性能越好。

3 高效低阻(高PF值)玻纤空气滤纸的开发

南京玻璃纤维研究设计院有限公司作为国内玻纤湿法制品技术的发源地, 一直致力于玻纤湿法制品的相关技术的研究。通过多年技术攻关, 2021年在玻纤空气过滤纸方面取得了显著的突破, 实现了高效低阻(高PF值)玻纤空气滤纸的批量生产, PF值性能领先国际先进水平。

3.1 玻纤空气滤纸微观结构设计技术

空气过滤过程是一种极其复杂的流动现象, 利用流体力学的知识可表述为气-固二相流在多孔介质中的对流扩散及分离过程, 通过扩散、拦截、惯性等过滤机理将固相颗粒隔离在多孔介质表面或内部^[6]。纤维的相关特征参数会影响纤维集合体的孔隙结构, 进而影响到滤纸的过滤性能。玻璃纤维的直径范围比较广, 不同直径和长度的工艺配比就存在非常多的可能性。借助数值模拟技术建立过滤微观结构的模型, 量化获取不同滤纸微观结构内部的

流体流动、颗粒捕集等相关信息,预测其过滤性能(见图1)。为了获得良好的过滤性能,玻纤滤材结构采用直径较粗($\geq 6\mu\text{m}$)的纤维作为骨架,用直径较细的玻璃微纤维($\leq 4.5\mu\text{m}$)实现较高过滤效率。

项目根据 Kozeny-Carman 方程(式2),采用数值模拟技术对不同直径纤维进行配比设计,结合实验验证获得最优配比(见图2)。

$$\frac{Ql}{\overline{p}A} = \frac{f^3}{K(1-f)^2 S_V^2 n} + \frac{rZf^3}{(1-f)S_V \sqrt{2rpt}} \quad (2)$$

其中, Q 为流量, \overline{p} 为平均压力, l 为厚度, Δp 为压力差, A 为样品测试面积, ε 为孔隙率, ρ_a 为纤维密度, S_V 为体积比表面积, μ 为空气的粘度, ρ 为空气的密度, K 为与材料孔隙形状有关的常数, Z 为常数,取值为 $48/13\pi$ 。

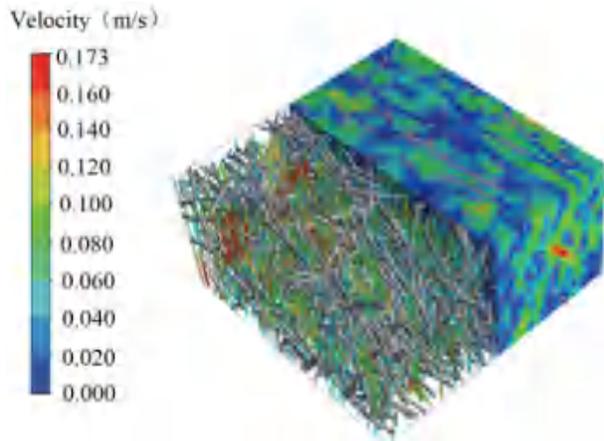


图1 玻纤滤材内部流场分布

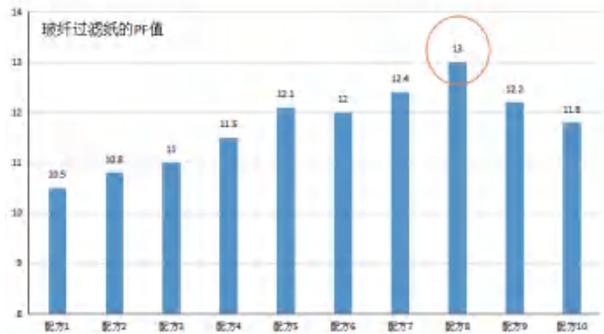
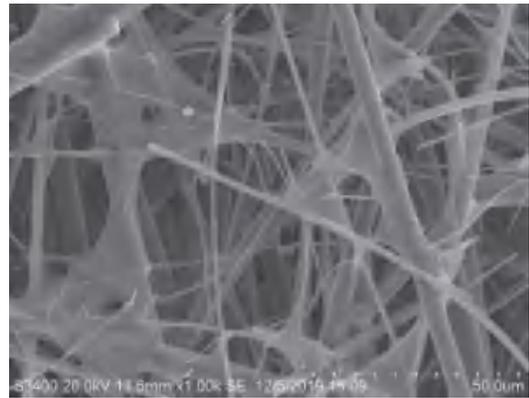


图2 不同纤维直径配比的影响

3.2 高效低阻玻纤滤材基材表面改性技术

玻璃纤维不同于植物纤维,其表面光滑,纤维间结合力较弱,通过粘结剂对其表面改性,要求改性后的玻纤滤材能兼容拉伸强度挺度要求,满足滤器加工的要求。施胶后的粘结剂在玻纤基材中烘干固化过程成膜,大面积堵塞纤维间的孔隙通道,造成过滤阻力明显上升,PF值下降5~6%(见图3(a))。



(a) 传统玻纤滤材



(b) 南玻院研发高PF值玻纤滤材

图3 南玻院研发高PF值玻纤滤材与传统滤材微观电镜图

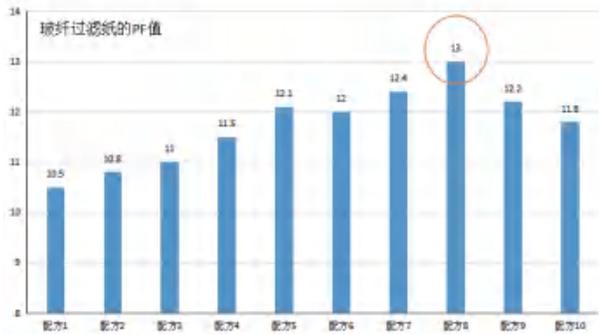


图4 不同粘结剂配方对玻纤滤纸PF值的影响

项目通过筛选大量的粘结剂及其复配方案,制定出满足高效低阻要求的粘结剂配方(见图4),制成后的玻纤空气过滤纸的PF值可达13。从高PF值玻纤滤纸的微观结构电镜图(见图3.b)可以看出,玻璃纤维单根纤维被无差异化包裹,纤维间通道被保留,避免因成膜造成的阻力上升,满足了玻纤空气过滤纸的高PF值性能要求。

4 南玻院高效低阻(高PF值)玻纤空气滤纸性能测试结果

南玻院围绕玻纤空气滤纸实现高效低阻(高PF

表 1 南玻院高效低阻玻纤空气滤纸与同行的数据对比

厂家	南玻院高 PF 值过滤纸			国际先进水平公司 A			国内知名公司 B		
	TSI8130A		PF 值	TSI8130A		PF 值	TSI8130A		PF 值
	DOP, 0.3 μm @5.3 cm/s			DOP, 0.3 μm @5.3 cm/s			DOP, 0.3 μm @5.3 cm/s		
测试条件	效率 %	阻力 Pa	效率 %	阻力 Pa	效率 %	阻力 Pa	效率 %	阻力 Pa	
测试对比结果	99.975	279	12.9	99.981	293	12.7	99.980	315	11.7
	99.972	270	13.2	99.978	295	12.4	99.972	306	11.6
	99.973	278	12.8	99.975	286	12.6	99.974	308	11.6
平均	99.973	276	13.0	99.978	287	12.6	99.975	310	11.7

值)展开了多项研究,开发的玻纤空气过滤纸在过滤性能的提升上取得了显著突破,高效低阻产品(高 PF 值)与同行的数据对比见表 1。

由表 1 可以看出,在测试条件一致且同一台检测设备的前提下,南玻院的高效低阻(高 PF 值)玻纤空气滤纸的过滤性能(平均 PF 值为 13)要明显高于国际先进水平公司 A(平均 PF 值为 12.6)以及国内知名公司 B(平均 PF 值为 11.7)的玻纤空气滤纸过滤性能,南玻院的高效低阻玻纤空气滤纸 PF 值性能较同行具备明显优势。

5 结语

南京玻璃纤维研究设计院开展了大量研究工作,通过对玻纤过滤纸的微观结构优化设计,突破了玻纤基材的表面改性技术,实现了玻纤过滤纸的高效低阻(高 PF 值),产品 PF 值性能较同行存在明显优势。高效低阻玻纤滤纸的应用可有效降低净化空调系统的阻力,节约电耗,实现低碳减排。

参考文献

[1] 李雪,蒋靖坤,王东滨,邓建国,贺克斌,郝吉

明.冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素[J].环境科学,2021,42(07):3091-3098

[2] 南京玻纤院“黑科技”推进抗疫复产[J].中国建材,2020,04:76-77

[3] 彭孟娜.工业用空气过滤材料的研究[J].成都纺织高等专科学校学报,2017,34(03):200-203

[4] 于宾,黄海涛,石文英,张显华.耐高温纤维空气过滤材料的研究进展[J/OL].化工新型材料,2021:1-7

[5] 陈晓燕,王皓,张瀚洋.玻璃纤维滤材基材制浆过程中的性能影响因素研究[J].玻璃纤维,2020,(05):35-39.

[6] 梁钦雄.玻璃纤维滤材的过滤特性[J].天津造纸,1995,3:34-41.

[7] 张诚,胡志军,王松凌,汪丹妤.玻璃纤维空气滤纸的制备及性能[J].纸和造纸,2014,33(10):49-52

抗菌纤维抗菌效能及在空气净化应用的探讨

熊伟¹, 薛丹²

(1. 普拉爱尔空气过滤有限公司, 诺克斯市; 2. 诺博生物材料股份有限公司, 斯克兰顿市)

[摘要] 介绍关于抗菌纤维金属(银)离子的抗菌效能实践, 同时介绍以这种技术制成的空气过滤抗菌纤维 FiberShield 的特点。讨论了其对不同病毒及细菌的抗菌效能。

[关键词] 细菌病毒; 新冠病毒; 抑菌带; 抗菌纤维; 空气过滤

0 引言

抗菌纤维已广泛应用于各个领域。这些纤维制成的各类织物, 可以有效地抑制各类细菌病毒的传播繁殖并消减由此引起的异味。在空气细菌病毒过滤净化应用领域, 一些研究与探讨也在不断展开。

介绍关于抗菌纤维金属离子抗菌效能的众多技术和实践, 包括诺博的银离子抗菌纤维技术。介绍空气过滤抗菌纤维 FiberShield 的特点, 探讨了抗菌纤维复合粉尘过滤器的实验和测试。讨论了 FiberShield 对不同细菌及病毒的抗菌效能。

1 银离子的抗菌机理

几种被广泛接受的银离子抗菌机理包括^[1]:

1) 银离子侵入细菌细胞壁或外膜。细菌细胞壁通常有带负电荷的多肽, 可能通过电荷的形式与 Ag⁺ 发生结合。

2) 银离子能量在细菌细胞聚集。细菌细胞会主动通过其传输系统摄入金属离子。

3) 银离子与细胞蛋白包括酶结合。银离子会污染细菌蛋白, 与酶的巯基(-SH)结合, 导致细菌失能。

4) 银离子与细胞的 DNA 结合。银取代普林氮和苯胺碱之间的氢键, 防止细胞复制 DNA 和随后的细胞分裂。

冯等人^[2]通过电子显微镜观察到银离子在大肠杆菌和金黄色葡萄球菌中的迁移和变化。实际上, 银与细菌细胞内的硫醇如谷胱甘肽有亲和力, 两者结合会产生有毒的硫化物, 对细胞内部产生破坏。比较有说服力的机理是, 银与细胞内的氨基, 羧基,

磷酸等强亲和力, 使得细菌细胞内的酶失能。细菌细胞壁由于磷脂的存在呈负电荷, 它含有 60% 的磷脂和 40% 的蛋白。而银离子呈正电。

一定浓度的银离子会导致细胞壁变形和破裂, 使得更多的银离子浸入细胞。这些离子能够与细胞内得蛋白质和酶结合对细菌内部产生破坏。图 1 显示了银离子攻击 E.coli 细菌的全过程^[3]。

在初始阶段(a), 银离子由于负电荷的作用靠近并接触到细菌细胞壁外壳。随后是银离子进入细菌细胞内部阶段(b)。(c)电镜观察到银离子锚定多处细胞壁并在细胞壁上形成孔隙, 导致细胞溶解。(c)中的析出物是银离子与细胞的融合物, 这是细胞抵御外来物(银离子)的一种免疫机制, 银离子攻击的最终累计效应是抑制了细胞生长, 不是消灭细胞。

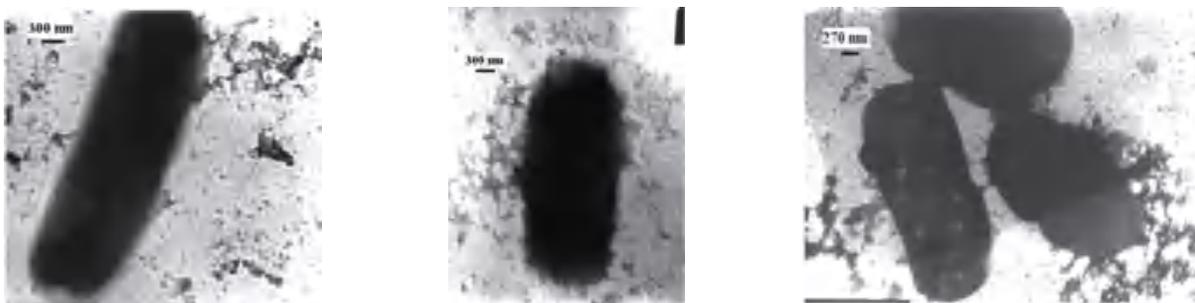
图 2 显示, 细菌在装有涂银纤维的培养皿中得到了充分抑制, 涂银纤维具有良好的抗菌性。

Robert B. Thurman 描述了金属离子侵入细菌及病毒衣壳的模型, 在分子水平阐述了铜银离子的抗菌效果^[4]。他指出是银离子的浓度, 而不是银离子的特性决定了银离子的抗菌效果。这些离子作用到细菌或病毒的蛋白和核酸。

Robert B. Thurman 总结道, 金属化合物如银盐极易与其他分子反应, 侵入细菌细胞壁或病毒的衣壳。他提到了三种银离子的抗菌机理。

2 抑制带与抑菌效能

银离子具有广谱的抗菌效能。M.K.Rai 指出, 纳米银离子的大小, 形状, 释放浓度, 剂量对材料



(a) 银离子“接近”细胞

(b) 银离子“进入”细胞

(c) 银离子“溶解”细胞

图 1 TEM 显示的银离子攻击 E.coli 细菌的不同阶段



(a) E.coli 细菌在培养皿中大量繁殖



(b) E.coli 细菌在培养皿中的 7 个菌落

图 2 银离子攻击革兰氏阴性细菌对照

(a) 为对照纤维；(b) 为涂银纤维

的抗菌性能有不同的影响^[5]。10-100 纳米的银颗粒对革兰氏阴性和阳性细菌的杀菌效果最强。而银离子浓度达到 75 lg ml 足够抑制细菌的生长。

银离子的不同抗菌性能，可以用抑制带 (IZW) 来描述。抑制带越宽抗菌效能越强。^[6]显示 8 种不同抗菌剂含量的纤维的抗菌性能，其抑制带从 10mm 到 25mm 不等。

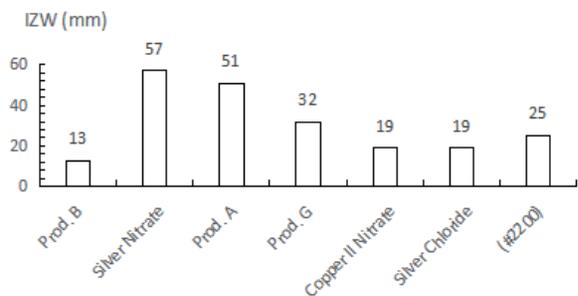


图 3 典型空气环境抗菌纤维的抑制带

图 3 为将使用过的抗菌纤维放入培养皿中经 48 小时培养，测出典型“脏物”下不同抗菌纤维的抑制带尺寸。硝酸银纤维具有很大的抑制带，抗菌效果良好。^[7]

图 4 显示带正电荷的银离子抑制病原体的生长和繁殖。培养皿中细菌无法在银离子周围生长。

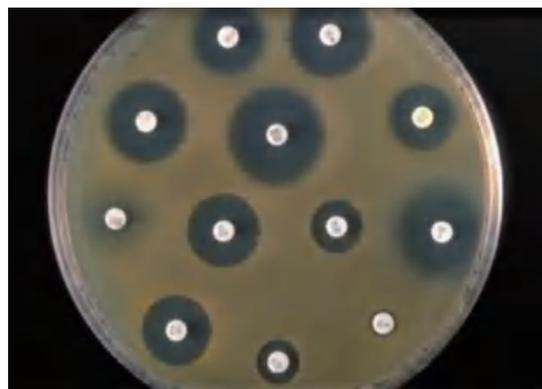


图 4 银离子抑菌带

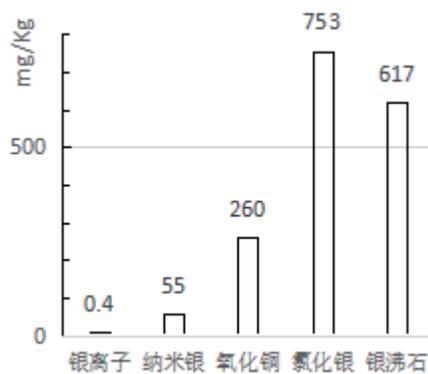


图 5 抗菌成分含量比 mg/kg



图 6 FiberShield 银离子聚合尼龙纤维表面

诺博纤维布中银离子纤维丝占 3% 到 10%，可以对整个织物表面形成抗菌的抑制带覆盖。空气中的带菌或病毒的粉尘，水滴，气溶胶颗粒物等，被具有一定过滤粒径及效率的过滤布纤维截获后，细菌或病毒则停留在抑制带覆盖区被抑制或失能。

相对其他抗菌材料，诺博的银离子技术在相同的抑菌效能下，纤维中银离子用量少，离子释放浓度高。专利 US2004258914 实施例涂敷银离子的纤维，其 24 小时银离子释放测试值达到 15-75mg/l，且纤维基材中银离子释放率增加了 30-50%^[8]。而复

合银离子的纤维与常规纤维的比例约 5: 95 左右。图 5 给出了诺博银离子抗菌剂与其他抗菌剂的效果剂量对比。在同样的抑菌效果下, 银离子含量仅占抗菌材料的 400 μg 每公斤, 远远低于其他如铜锌抗菌浓度需要量。图 6 是诺博银离子表层聚合尼龙纤维外表电镜图。

3 抗菌空气过滤器

不好的空气质量对人体健康造成困扰, 尤其是空气中包含各种致病菌病毒等生物气溶胶颗粒物时。虽然高效或超高效粉尘过滤器可以去除这些致病菌病毒颗粒物, 他们仍然会寄存在过滤器的纤维中导致细菌在其上繁殖生长, 对下游空气造成新的危害。同时, 细菌的繁殖增长, 也会降低粉尘过滤器的容尘量, 降低过滤器的使用寿命。

传统的 HEPA 可以以 99.97% 的过滤效率拦截 0.3 μm 的颗粒物, ULPA 则为 99.999% 的效率拦截 0.1-0.3 μm 的颗粒物。那么增加了抗菌纤维涂层后的过滤器在容尘量, 过滤效率, 压阻及抑制带参数上有什么变化呢? 相互的是什么关系呢?

文献 [10] 指出, 过滤器粉尘颗粒物的堆积会阻止银离子与微生物有效接触, 降低过滤器的微生物去除能力。ASHRAE 实验证明, 无尘和有尘过滤器对于不同的抗菌剂, 显示出不同的微生物生长测试结果。也即, 抗菌过滤器的抗菌能力与粉尘之间存在相关性。ASHRAE 进一步导出了过滤器的过滤能力与压阻之间的关系。

测试证明, 过滤器细菌病毒抑制带与纤维抗菌剂释放浓度有关, 释放浓度越大, 抑制带越宽, 过

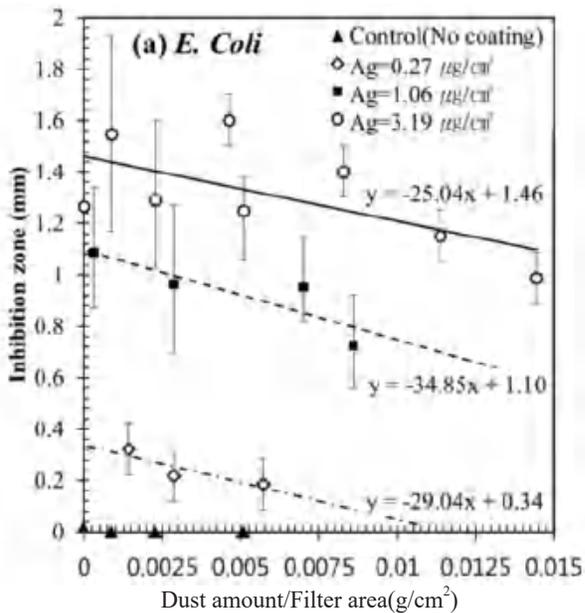


图 7 过滤器抗 E.Coli 细菌的抑制带与集尘量

滤器抗菌能力越强; 过滤器压阻随其集尘量增加而增加, 同时过滤器抑制带变小抗菌能力下降^[11]。如图 7 所示。

Yun Haeng Joe 等人采用 CCM 和 DDM 的方法测试过滤器的抗菌性能。CCM 是菌落计数法, 而 DDM 是培养皿扩散法。

CCM 方法的过滤器效率由式 (1) 表达,

$$h_{CCM} = 1 - \frac{CFU}{CFU_0} \quad (1)$$

其中 CFU_0 无抗菌功能的过滤器的细菌计数。

DDM 方法无量纲化后的过滤器抑菌能力 CFU^* 和抗菌效率 η_{DDM} 分别为式 (2) 和 (3)

$$CFU = (1 - IZW)^{\frac{\alpha}{\beta}} \quad (2)$$

$$h_{DDM} = 1 - (1 - IZW)^{\frac{\alpha}{\beta}} \quad (3)$$

其中 CFU^* 是相对无抗菌纤维过滤器的无量纲化, η_{DDM} 是相对最大抑制带 IZW_{max} 的无量纲化, α 和 β 分别为细菌系数, 可以从测试数据中得出。

由图 8 可知, 过滤器抑菌能力 CFU^* 随过滤器纤维中抗菌剂含量增加而增加, 其值呈指数下降趋势。没有抗菌纤维或抗菌功能的过滤器, 其 CFU^* 为 1。另一方面, 过滤器抗菌效率 η_{DDM} 随过滤器纤维中抗菌剂含量呈指数上升趋势, 可达到最大抑制带 IZW_{max} , 其抗菌效率 η_{DDM} 最大。

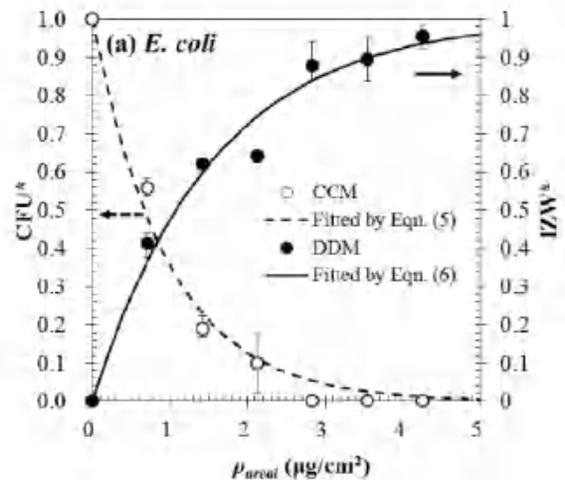


图 8 CCM 与 DDM 的 E.coli 抗菌实验

4 FiberShield 抗病毒纤维

FiberShield 是普拉爱尔与诺博联合研制的一款抗菌纤维材料, 采用了诺博的银离子抗菌纤维技术, 为尼龙 6.6 抗菌无纺布过滤材料。常规产品为每平方米 34 克重。其广谱抗菌抗病毒性能, 与粉尘过滤材料复合后, 可以广泛应用到暖通空调除尘抗菌的

应用环境，去除微生物繁殖散发的难闻臭味，抑制细菌病毒的繁殖，减小病菌的交叉污染风险。

在分子水平上由于温度和湿度的作用，纤维中的银及银盐以一定浓度的银离子的形式存在，是为一种很强的抗菌剂。当纯银盐使用专有聚合技术聚合到纤维中后，银离子变得更加高效，安全并且作用持久。

制造工艺上，采用了银离子与尼龙的聚合缓释技术，保证了银离子不可能从抗菌纤维丝表面上脱落^[9]。在常温和常湿的环境下，能有效地持续释放银离子。用 TSI8130 仪器，在 30lpm，0.3μm 颗粒物下测定 34 克重 FiberShield 抗菌过滤材料的穿透率平均值为 8.4%，标准差为 1.2%，最大值为 12.0%。

依照检测标准 ISO 18184:2019 对 6 种常见细菌和 4 种病毒进行了测试。细菌包括金黄色葡萄球菌，大肠埃希菌，绿脓杆菌，溶血性链球菌，肺炎克雷伯菌和真菌。病毒包括 H₁N₁，H₇N₉，鼻病毒和新冠病毒 SARS-Cov-2。

测试证明，FiberShield 对细菌类的抑菌率均高达 99.99%，对病毒的抗病毒活性率的测试值也很高。图 9 所示，FiberShield 对 SARS-CoV-2 的 2 小时抗病毒活性率高达 99.14%。

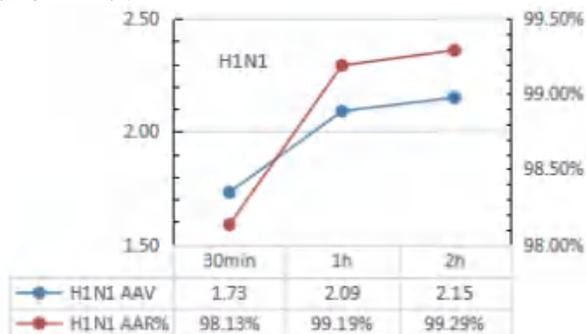


图 9 (a) FiberShield 对 H₁N₁ 的测试

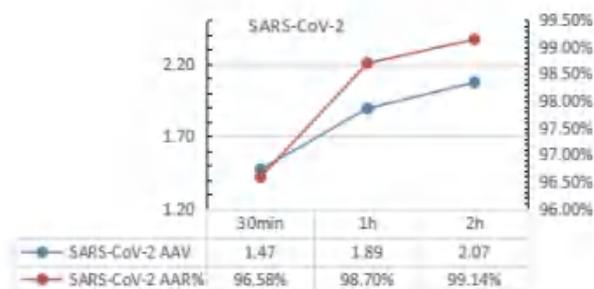


图 9 (b) FiberShield 对 SARS-CoV-2 的测试

5 结语

抗菌抗病毒空气过滤器材料的性能和安全性值得深入研究。粉尘复合抗病毒纤维制成的过滤器，

其粉尘量与细菌量相互影响。抗菌带是衡量抗菌纤维性能的重要指标。文献 [11] 等众多实践，提供了抗病毒空气过滤器的抗病毒抑菌能力和抗菌效率参考测试方法，值得学习。如何制作高效安全且成本不高的抗菌抗病毒过滤器，值得开展探索。

参考文献

- [1] Maria Corena McLeod, PhD, Silver vs Copper vs Zinc Whitepaper, Noble Biomaterials, Inc
- [2] Feng QL, A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on Escherichia coli and Staphylococcus aureus. J Biomed Mater Res 2000, 52:662-668
- [3] Siddhartha Shrivastava, Characterization of enhanced antibacterial effects of novel silver nanoparticles, Nanotechnology 18 (2007) 225103
- [4] Robert B. Thurman, The molecular mechanisms of copper and silver ion disinfection of bacteria and viruses, Critical Reviews in Environmental Control, 18:4,295-315
- [5] M.K. Rai, Silver nanoparticles: the powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria, Journal of Applied Microbiology
- [6] C. Cecchini, Effects of antimicrobial treatment on fiberglass-acrylic filters, Journal of Applied Microbiology 2004,97: 371-377
- [7] Johns Manville International, Air filter and method for reducing the amount of microorganisms in contaminated air, US5840245
- [8] NOBLE FIBER TECHNOLOGIES, Enhanced metal ion release rate for anti-microbial applications, US2004258914
- [9] NOBLE FIBER TECHNOLOGIES, EXTRUDED COMPONENT WITH ANTIMICROBIAL GLASS PARTICLES, US2011250450
- [10] Yun Haeng Joe, Correlation between the Antibacterial Ability of Silver Nanoparticle Coated Air Filters and the Dust Loading, Aerosol and Air Quality Research, 2013, 13: 1009-1018
- [11] Yun Haeng Joe, A Quantitative Determination of the Antibacterial Efficiency of Fibrous Air Filters Based on the Disc Diffusion Method, Aerosol and Air Quality Research, 14:928-933, 2014
- [12] Kamyar Shirvanimoghaddam, Fight against COVID-19: The case of antiviral surfaces, APL Mater.9,031112 (2021)

公共建筑空调通风系统应对雾霾天气的 过滤器选型

涂有¹，孙扬²，涂光备³

(1. 天津仁爱学院，天津 301636；2. 中国科学院大气物理研究所，北京 100029；

3. 天津大学环境学院，天津 300350)

[摘要]虽然国内大气环境近年显著改善，但不少城市仍难达到基本标准，促使空调通风系统采取过滤措施来改善某些公共建筑室内空气品质，以保护居留者健康。众多研究机构、大专院校为此进行了大量有益的工作，明确了理念和思路，然而至今尚缺少便于工程实用的简便方案。笔者参考欧洲通风协会 4/23-2018 指南，提出了适合国情的、按建筑类别和室外环境，选取空调通风系统空气过滤器的简易方法，并予以计算验证。希望本文起到抛砖引玉的作用，期盼主管部门尽快编制空调通风系统应对雾霾天气的空气过滤器选型应用指南，以解除设计单位及用户的燃眉之急。

[关键词]公共建筑；空调通风系统；空气过滤器；选型

雾霾天气伤害人类健康是近些年来医学循证的研究结论，被世界卫生组织（WHO）和各国卫生健康机构所认同。中国近年来为改善城市室外空气质量减少雾霾天气，采取了多项措施并取得显著的成效。根据国家统计局 2021 年 2 月 28 日公示的 2020 年《国民经济和社会发展统计公布》所述：“全年空气质量达标城市占 59.9%，未达标城市占 40.1%。细颗粒物（PM_{2.5}）未达标城市（基于 2015 年平均浓度未达标城市 262 个）年平均浓度 37 微克，比上年下降 7.5%”。

尽管近年来国内环境空气质量明显提升并持续改善，但就目前 340 个所监测城市的数据来看，无论是与世界卫生组织（WHO）的《环境空气质量准则》^[1]，或是与科技先进国家的现状相比，都存在较大的差距。参考美国、日本等国近几十年城市空气环境改进的漫长历程来看，国内城市空气环境的改善不是一蹴而就的事，依然任重道远。某些污染严重的城市，公共建筑空调通风系统配置合适的空气过滤器十分必要。

1 世界卫生组织关于大气 PM_{2.5} 的浓度标准和欧美城市的现状

1.1 研究表明，空气中悬浮颗粒物，其主要成分是硫酸盐、硝酸盐、氨、氯化钠、碳黑、矿物尘、燃烧生成的颗粒等；是有机和无机的、固态和液态的，悬浮于空气中的混杂颗粒物，对人类健康的影响大于其他污染物。

医学循证的研究结论表明，因暴露于室内空气细颗粒物所引发或加重的主要疾病有：过敏与哮喘、肺癌、心血管病 [CVD]、慢性肺阻塞病 [COPD] 和

痴呆症^[2]。据笔者所知，在过往的相关文献中很少强调有引发和加重痴呆症的风险。将近年来倍受关注的中老年痴呆病患与另外 4 类空气细颗粒物可能引发的疾病风险并列的变更，从一个侧面反映了国际学术界、医务界，对空气悬浮细颗粒物影响人类健康的研究仍在持续深化。

当前的研究已可确定室内空气品质（IAQ）和疾病负担（BOD: burden of diseases）之间的关系。现今国际通用的所谓“疾病负担”，其量化指标是“伤残调整寿命年”（DALY: disability adjusted life year）。多年来世界卫生组织和世界银行已将该指标用作全球疾患研究的基本参数。DALY 是个时间量，定义为相对于完全健康状态的寿命而过早死亡的寿命损失年数。该指标是一项合并考虑了因病早逝和因病致残或失能的健康生命损失的复合参数，此项指标综合了发病、病情、患者的年龄因素、因病致残或死亡以及贴现率等多种因素，用以客观地反映疾病对人类和社会的危害程度^[3]。

据欧盟估计，欧盟国家因室内空气品质造成的疾病负担约为每年 200 万个 DALY。也就是说，欧盟 28 国约 5 亿人口中平均每年可能有 0.4% 的人口，因环境空气质量低下导致疾患而折寿一年。国内目前尚缺乏这方面的研究以及资料积累和数据统计，但可断言的是，因室内空气品质欠佳造成的社会及经济损失应该也是相当可观的。

1.2 WHO《空气品质指南》所给定的人类吸入空气的 PM“阈值浓度”，通常又称之为空气质量准则（AQGs），是目前最完善和普遍接受的。该文件所推荐的环境空气颗粒物年平均浓度限值

为： $PM_{2.5}$ 年平均浓度 $\leq 10\mu g/m^3$ ； PM_{10} 年平均浓度 $\leq 20\mu g/m^3$ 。

该文件还指出：“WHO 空气质量准则（AQGs）是为在全世界范围内使用而制定的。各国制定的国家标准之间是有差异的。因为标准是依据所采用的权衡健康风险的方法、技术可行性和经济方面的考虑，以及其他各种政治和社会因素来制定的。而这些因素反过来又取决于国家发展水平和空气质量管理能力。WHO 承认这些差异的存在。而且特别认识到在制定这些政策目标时，应该充分考虑当地情况后决定是否直接将准则值作为当地具有法律效力的标准。”

根据世界各地域空气环境和经济水平等的巨大差异，世界卫生组织并具体提出了除准则值以外的3个过渡时期目标值，如表1所示。并指出：“以过渡时期目标值作为逐步减少空气污染的渐进性步骤，主要用作为污染严重地区的目标值，以促进空气污染由高至低的转变。不过逐步达到准则值应该是所有地区空气质量管理及降低健康风险的最终目标。”

表1 WHO 颗粒物质量准则及过渡时期目标

	$PM_{2.5}$ $\mu g/m^3$ (year)	$PM_{2.5}$ $\mu g/m^3$ (24h)	PM_{10} $\mu g/m^3$ (year)	PM_{10} $\mu g/m^3$ (24h)
过渡时期目标-1 (IT-1)	35	75	70	150
过渡时期目标-2 (IT-2)	25	50	50	100
过渡时期目标-3 (IT-3)	15	37.5	30	75
空气质量准则 (AQG)	10	25	20	50

世界卫生组织《空气品质指南》并非凭空构思的产物，它既基于欧美各国大气环境的现状，又考虑到世界范围的巨大差异，所提出了分步达标的计划。它也为国内制定适合国情的标准，提供了法理依据。表2给出了部分欧美城市近些年的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度等资讯。

表2 欧美部分城市近年 $PM_{2.5}$ 年均测值（ $\mu g/m^3$ ）及人口状况

年份	柏林	汉堡	伦敦	巴黎	苏黎士	米兰	华沙	纽约	洛杉矶
2013	16	14	15	20	15	30	26		
2014	21	16	14	17	10	26	26	9	11
2015	17	14	12	17	12	30	23	8	12
2016	16	14	12	16	10	27	22	7	12
人口 (万)	356.3	183.1	1031.3	1084.3	124.6	130.3	170.6	1889.7	1282.9

1.3 国内现行的，为保护环境、保障人民健康、防治大气污染的《环境空气质量标准》（GB 3095-2018），见表3。此标准应是参照WHO《空气品质指南》制定。该标准将空气环境功能区分为两类。一类为自然保护区、风景名胜区和需要特殊保

护的区域；二类为居住区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村地区。（该标准1996年版曾将空气环境功能区分为三类，2012年版将第三类纳入第二类，成为现在的两类）。两类空气环境功能区的空气质量分别按两个级别要求。有关颗粒物部分的内容如表3所列。对照表1，可以看出广GB 3095-2018标准中，空气颗粒物的浓度指标与WHO过渡时期指标IT-1和IT-3基本一致。以国内近年城市空气质量的总现状来看，这个标准是客观和务实的。

表3 GB 3095-2012（2018）*《环境空气质量标准》中按颗粒物的分级

级别	$PM_{2.5}(\mu g/m^3)$		$PM_{10}(\mu g/m^3)$		与WHO相应级别
	日均值	年均值	日均值	年均值	
一级	35 (37.5)	15	75	35 (30)	IT-3 (括号内为WHO数值)
二级	75	35	150	70	IT-1

注*：2018年8月4日生态环境部曾发出修改单对标准部分内容予以修订，不影响本表内容。

上述国家统计局2020年“全年空气质量达标城市”，就是按照GB 3095的第二类空气环境功能区所规定的“二级”指标的统计结果。就空气细颗粒物而言，是指达到了世界卫生组织的初步要求，即过渡时期空气细颗粒物的目标1（IT-1）水平的城市。

因为几乎所有涉及空气悬浮细颗粒危害人类健康的论述，都是以多年医学循证的研究统计结果为依据的。而这些研究对应的坐标，基本都是大气环境细颗粒物浓度的年均值。正因为如此，WHO特别强调指出：“评价WHO空气质量准则值（AQGs）和过渡时期目标时，与24小时平均浓度相比，通常优先推荐年平均浓度，因为在低浓度暴露时，很少有人关注到短期暴露产生的健康效应。”也就是说短期高浓度暴露肯定不利健康，但对其健康后果尚无确切的判断，采用年平均浓度作为设计参数更科学。

2 国内城市的 $PM_{2.5}$ 年均测值

按照国标GB 3095-2012《环境空气质量标准》，自2013年元月起，作为第一阶段监测实施的京津冀、长三角、珠三角等重点区域以及直辖市、省会城市共74个城市，开展了包括室外环境细颗粒物 $PM_{2.5}$ 内的6个基本项目的监测。2014年新增87个城市为第二阶段实施城市。目前总数增加为至340个城市和地区，覆盖全国各地域，并取得了一大批珍贵数据。为暖通空调专业应对室外雾霾天气，采取空气过滤等措施改善室内空气品质提供了基础依据。近8年来国内主要城市大气环境 $PM_{2.5}$ （ $\mu g/m^3$ ）实测年均值如表4所列。

表 4 近 8 年来国内主要城市大气环境 PM_{2.5} (μg/m³) 实测年均值的变化情况

年份	北京	天津	上海	重庆	沈阳	哈尔滨	西安	武汉	南京	青岛	厦门
2013	90	96	62	70	78	81	105	/	/	66	36
2014	86	83	52	65	74	72	76	70	70	59	37
2015	81	70	53	57	72	70	57	79	62	51	29
2016	73	69	45	54	54	52	71	56	47	45	28
2017	56	60	39	44	49	57	73	52	41	38	26
2018	50	50	36	37	40	38	62	48	43	34	24
2019	41	52	35	37	43	40	58	45	40	39	24
2020	38	48	32	33	42	47	51	37	31	32	19

表 5 2019 年与 2020 年全国监测城市按大气环境 PM_{2.5} (μg/m³) 年均值的分类

PM _{2.5} 年均值	监测城市数量 (个)	占总数的百分比	部分城市名称
≤15 (μg/m ³)	10	3.0%	三亚、丽江、拉萨、甘孜州、阿坝州、玉树州、锡林郭勒盟等
≤25 (μg/m ³)	74	22.2%	福州、厦门、海口、北海、茂名、汕头、江门、本溪、伊春等
≤35 (μg/m ³)	103	30.9%	上海、重庆、杭州、广州、深圳、桂林、长春、兰州、吉林、南昌、南宁、贵阳、昆明、青岛、大连、烟台、宁波、珠海等
≤50 (μg/m ³)	92	27.6%	北京、天津、南京、武汉、成都、长沙、沈阳、哈尔滨、合肥、苏州、常州、安庆、镇江、九江、营口、抚顺、鞍山、宝鸡等
50 (μg/m ³)	54	16.2%	西安、太原、郑州、济南、石家庄、保定、洛阳、开封、安阳、运城、晋中、潍坊、淄博、泰安、邯郸、唐山、喀什、和田等

笔者注：考虑到 2020 年处于新冠疫情特殊时期，本表以 2019 与 2020 两年测值的平均数代表该城市近年大气环境 PM_{2.5} 的年均浓度状况。

由表 4 可以看到，因近几年来各大城市采取燃煤锅炉改烧天然气、汽车限号、污染企业外迁等举措，以及市区道桥、房屋施工采用喷雾降尘、餐饮业排烟过滤等多项环保措施后，大气环境 PM_{2.5} 监测值呈现逐年显著下降的状况。以北京、上海为例，2020 年的年均值分别仅为 2013 年的 42.2% 和 51.6%。但进一步的改善难度肯定更大，绝不可能期待像这 8 年直线下降式地那么快进步，某些城市还可能由于各种原因而有所反复，对此应有所预判。

根据大气物理研究所孙扬博士团队提供的全国 340 个城市、地区 2019 和 2020 年的监测数据（其中缺少日喀则、林芝、昌都、三沙等 7 城市或地区的数据），笔者归纳分类的结果如表 5 所列。

从表 5 可知，目前所监测城市达到 GB 3095-2018《环境空气质量标准》二级指标的共 187 个，占监测城市总数的 56.1%。与 2018 年的统计数据相比，增加了 45 个城市，提高了 13.5% 的占比。剩余的北京、天津、重庆、南京、武汉、成都、沈阳、合肥等 146 个大城市空气质量虽然明显改善，但目前仍与 GB 3095-2018 的二级空气质量限值还有差距，PM_{2.5} 年均值都在 35μg/m³ 以上，高于 WHO 过渡时期目标 -1 (IT-1) 的指标。这类城市约占所监测城市总数的 43.8%。与 2018 年的统计数据 56.8% 相比减少了 13.0%，这是一个很大的进步。值得关注的是，其中还有西安、郑州、洛阳、开封、太原、济南、潍坊、淄博、泰安、石家庄、保定、唐山等 PM_{2.5} 年均值 > 50μg/m³ 的重度污染城市。虽然与 2018 年的统计数据相比这类重度污染的城市也减少了 7% 左右，但依然约占监测城市总数的 16.2%。

其中喀什、和田等城市 PM_{2.5} 年均值甚至 > 100μg/m³。

处于这些污染严重城市的民用空调系统，为保护居留者身体健康，无疑应采取措施降低室内空气细颗粒物浓度。在当前国内的情况下，制定适合国情的空调通风系统空气过滤装置设计选型指南，规范新建空调通风系统空气过滤设备的性能配置，考核并改造既有空调通风系统的过滤装置，以应对恶劣的空气环境，业内人士普遍认为极为必要。

3 公共建筑空调通风系统应对 PM_{2.5} 超标的工程应用措施

3.1 国内各研究机构 and 大专院校近些年，针对居留场所 PM_{2.5} 污染所做的相关调查、测试总结，以至新编制的、控制室内空气品质的行业标准等方面的研究成果，对提升业内对控制室内空气悬浮细颗粒物的原理、方法和手段等方面的认识有很大的促进，对这些研究工作取得的成绩应予以充分肯定^[4-14]。

目前所见国内推出的空调通风系统，采用空气过滤方式应对大气污染，以保障室内空气品质的各种设计、选型方法，其基本思路都是运用室内悬浮细颗粒物的瞬态或稳态质量平衡方程进行计算。笔者也参与了其中一些相关的研究工作^[8、13、16-19]。然而最终发现，眼下国内相关的许多研究成果，从理论上讲几乎都无可非议。所列出的关联的因素堪称全面。然而如何获取、确定这些参数，用以进行空气过滤器选型设计则难于下手。

3.1.1 以室外空气细颗粒物设计浓度为例，该值应是室内颗粒物污染平衡方程的基础设计参数，而其设计取值如何确定并不简单，既要符合客观实际，

又应易于统计和方便用于设计选型。目前所见室外环境细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的设计浓度有多种方案,不外乎是参考暖通空调室外温、湿度确定方法,以不保证率,不保证天数、时数等为依据。甚至还有比照采暖、供冷度日值(HDD/CDD: heating and cooling degree days)概念,依据环保部门的 $PM_{2.5}$ 监测值来推算室外细颗粒物设计浓度。

室外环境细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的浓度变化,远不像室外温、湿度的变化那么规律。某个地区一年四季、全年各月、每天各时的温度、湿度变化具有连续性、缓变性。某地区的室外温、湿度随所处经纬度、地理环境和大气环流等变化基本有序,而且几乎非人力所能左右。即便近些年来大气温度略有升高而其波动幅度相对而言十分微弱,异常的情况并不多。但室外环境的 $PM_{2.5}$ 浓度则大不相同,受人为因素干扰极为明显。不仅很多情况下变化无常,同一城市或地区,可能因地形或建筑物密集等大气扩散条件不同而差异显著,邻近交通繁忙的街区、工业区、机场等处的 $PM_{2.5}$ 浓度测值往往显著偏高。

何况国内大气环境正处于持续改善中,那么依据近期大气监测值统计得到的,符合不保证率、不保证天数规定的室外计算浓度值,恐怕一时难于稳定。期待规范、指南及时变更设计依据未必现实,而要求设计、管理人员随大气监测值变化及时跟进,似乎也难合情理。

3.1.2 计算室内与室外相关联的污染负荷量时,需要依据围护结构的穿透系数、确定室外空气的渗漏风量。而这些数值的可靠确定相当复杂。不仅建筑结构不同而有别,同一建筑在不同季节,各个朝向、层高的房间,因风压、热压等随风向、风力和内外温差等变化而各异。对于某些空调通风房间可能因有不等风量的无组织排气所形成的正压,正常运行状况下,室内可能并不存在室外颗粒物穿透入室的污染源。

此外,室内的其他细颗粒物污染源,如人员及其在室内不同活动时的散发的、各种办公用品(复印机、打印机等)及日常生活设备等所产生的颗粒物质量等等,目前也都缺少可靠的数据。而没有这些资料,就无从依据平衡方程获取所需空气过滤器必要的过滤性能指标。

3.1.3 空调系统中的冷、热交换器等主要设备的设计与选型,也与空气过滤器选型有很大差异。依据空调冷、热负荷的计算结果,选定冷、热交换器的管排数、并可挑选肋片管的片型、片高和片间距等,以适应所需。而一般通风用空气过滤器,按过滤性能分档有限,可供选择的余地很小,非此即彼。

设计选型时追求计算精准又有何实际效益?

另外,在空调系统实际运行中,可采用改变水温、水量等多种手段保证其冷热供应量,依据室内及室外实际参数随时进行调节,一般情况下室内温度、湿度不应偏高或偏低,不存在不当耗费问题。而空气过滤设备则明显不同,一旦按室外污染设计浓度选定并装置在系统中,无论室外污染状况如何变化,空调系统中如无其他措施空气过滤器的动力消耗始终存在,而且随滤材聚集尘埃阻力渐大,滤材更新前能耗有增无减。此外,室内颗粒物质量浓度在保证率、保证天数以内的全年中绝大部分时段,都低于甚至远低于设计所确定的室内细颗粒物浓度。那么设计选型的意义、价值何在?

3.1.4 既然按照基于质量平衡原理的传统理论方法。计算并确定符合空调通风系统对颗粒物过滤效率要求的空气过滤器,存在许多待定因素和难处。而且似乎也无需如此叫真,因为室内颗粒浓度在较低数值以内变化,也决不会像室内温、湿度的波动可能明显影响居留者的舒适度和健康状态。更夸张地说,在国内目前经济发展水平上,在当下多种食品、饮用水等类别繁多的、可能直接危害人类健康的风险并存的情况下,公共建筑空调系统设置合适的空气过滤器,或者也可算是“锦上添花”的举措。对某些易感人群居留的、环境要求高的公建确实必要,但似乎也不宜要求偏高偏严。因为提升室内空气品质将增大电力耗费和加重大气环境负担。那么某些公共建筑的过分改善,对于大多数居留场所不具备采取净化通风措施条件的城镇居民而言,其后果是负面的。

3.1.5 此外,应对雾霾天气的空气过滤器选型,还必须掌握空气过滤器的颗粒物质量过滤效率 ePM 值,而目前国内尚未对一般通风用空气过滤器 ISO 16890:2017 国际新标准^[15]正式跟进。国内产品多数仅能提供依据国标、欧标的计数过滤效率,这也是工程应用必需面对的问题^[16-19]。

3.2 借鉴欧洲通风协会 4/23-2018 指南的工程应用方案

如前所述,时至今日国内行业依旧对如何依据空气过滤器的 PM 过滤效率,进行工程设计选型感到难于下手。笔者读到欧洲通风协会 4/23 (2018) 指南后深受启发。欧洲通风协会 4/23-2017 指南是由隶属于欧洲工业协会的欧洲通风协会所制定。该文件文本由欧洲通风协会的空气过滤器产品组(PG-FIL, Product Group Air Filters)负责起草,经欧洲的国家成员协会审定,于2018年1月9日颁发了第1版4/23指南,本文依据2018年10月1日印发的、

对第 1 版略有修改增添的第 2 版。

此前欧洲所沿用的 EN 13779 “对非居住建筑通风与房间空调系统的性能要求”以及随同 ISO 16890 标准发布的 EN 16798-3:2017^[20]，都是依照 EN 779:2012^[21] 标准编制的。所以空气过滤器级别的判定，是以空气过滤器对实验气溶胶粒径为 0.4 微米粒子的计数过滤效率为依据。按照欧洲通风协会的最新决议，上述两项标准随同 EN779:2012 标准截止到 2018 年被废止。所以欧洲通风协会 4/23-2018 指南的面世，正是为了填补此方面的空白和适应欧洲通风市场的迫切需要，当然同时也为国际通风行业提供了一套适应 ISO 16890: 2017 系列标准的方案。

恰如该文件在其结论中所言：“欧洲通风协会 4/23（2018）指南给出了一种通风系统采用空气过滤设定室内空气品质的理论与实践结合的方法。”并指出这份文件：“反映了欧洲通风协会，特别是其中空气过滤器产品小组的许多空气过滤专家们对该项技术的深入理解及经验。”同时还认为，“这份文件为暖通空调设计人员和通风设备制造商合理设计空气过滤器提供了有效的建议。”

笔者认为，该文件立足于空气过滤器的工程应用，摆脱了过滤细颗粒物的理论计算，所需的那些难于确定的关联因素的束缚而创建的。该文件在结论中所言：“此方法虽然简单，但仍然考虑了全部关联因素。”所表达的这种自信，笔者认为实事求是和有底气的。同时认为，欧洲通风协会 4/23（2018）指南或许正是可以协助国内通风净化行业，走出在控制室内颗粒物 PM 浓度方面，目前在空气过滤器选型设计上所面临困境的一剂良方。

该方法的要点是，根据建筑空间人员居留情况、使用规律及对空气品质的需求等，采用分级方式对待，不具体计算室内污染发生量及所需送风的稀释能力。同级别建筑物经过滤处理后的送风，其细颗粒物浓度 PM_{2.5} 值等同。欧洲通风协会 4/23（2018）指南把民用建筑的室内送风细颗粒物浓度级别，由高到低定为 PM_{2.5}≤5μg/m³ 至 PM_{2.5}≤15μg/m³ 4 个等级。

该方法又依据 WHO 环境空气质量准则及欧洲城市空气现状，将室外大气环境分为 PM_{2.5}≤10μg/m³、≤15μg/m³ 及 ≥15μg/m³ 3 个档次。

这 3 挡 PM_{2.5} 年均测值浓度不同的室外大气环

境，与经过滤处理后的 4 个 PM_{2.5} 浓度不等的室内送风级别，共构成了空调通风系统应对雾霾天气的 12 种空气过滤装置组合，使空气过滤器选型任务大为简化。

3.3 笔者参考欧洲通风协会 4/23（2018）指南的思路，依据国情并经初步测算后，提出以下方案：

国内近年制定的行业标准 JGJ/T-2018《公共建筑室内空气质量控制设计标准》，按建筑物使用要求分为 4 个等级，并规定了相应的室内 PM_{2.5} 设计日浓度值，在其解说中又举例说明各级的适用场所，如表 6 所示。从表 6 可以看到，JGJ/T-2018 标准用 PM_{2.5} 的日浓度值为分级依据，以配合其设定的选型计算。从表 6 所列 WHO 的对照值可以看出，该标准的分级与 WHO 室外空气近期与远期指标的分级相一致。

表 6 JGJ/T-2018 行业标准的 PM_{2.5} 室内设计日浓度值及与 WHO 标准的对照

等级	PM _{2.5} (μg/m ³ ·d)	适用场所举例	WHO 室外空气 PM _{2.5}
一级	25	医院、幼儿园、养老院	准则值 10μg/m ³ ·y; 25μg/m ³ ·d
二级	35	教室、高级宾馆客房、高级办公楼	过渡期 -3 15μg/m ³ ·y; 37.5μg/m ³ ·d
三级	50	普通宾馆客房、普通办公楼、图书馆	过渡期 -2 25μg/m ³ ·y; 50μg/m ³ ·d
四级	75	餐厅、展厅、体育馆、影剧院、博物馆	过渡期 -1 35μg/m ³ ·y; 75μg/m ³ ·d

表中：μg/m³·y 为年均值，μg/m³·d 为日均值

笔者虽认同 JGJ/T-2018 标准所规定的室内空气质量级别，但认为以 PM_{2.5} 年均值作为分级的指标更合理。如前所述，WHO 认为：“评价空气质量时，与日平均浓度相比，采用年平均浓度作为设计参数更科学。”因此，笔者所建议的空气过滤器选型方案与欧洲通风协会 4/23（2018）指南相统一，即室内空气品质的分级是以 PM_{2.5} 年均浓度值为准的。

就国内室外空气 PM_{2.5} 年均测值的近况来看，因其分布范围很宽，如若室外空气类别偏少，应对的技术措施针对性必然较差。根据表 4、表 5 所列，国内 338 个城市 PM_{2.5} 近年监测数据，对照表 2 所给欧洲主要城市近年的测值，及欧洲通风协会 4/23（2018）指南的室外空气分类，并兼顾今后国内环境改善的前景，笔者建议国内室外空气按 PM_{2.5} 年均测值的分类，宜分为 5 级。如表 7 所列。

表 7 室外空气（ODA）按 PM_{2.5} 年均测值的分级

室外 1 级 (ODA 1)	PM _{2.5} ≤15μg/m ³	PM ₁₀ ≤35μg/m ³	相当于 IT-3	一级 *
室外 2 级 (ODA 2)	PM _{2.5} ≤25μg/m ³	PM ₁₀ ≤50μg/m ³	相当于 IT-2	
室外 3 级 (ODA 3)	PM _{2.5} ≤35μg/m ³	PM ₁₀ ≤70μg/m ³	相当于 IT-1	二级 *
室外 4 级 (ODA 4)	PM _{2.5} ≤50μg/m ³	PM ₁₀ ≤105μg/m ³		
室外 5 级 (ODA 5)	PM _{2.5} > 50μg/m ³	PM ₁₀ > 105μg/m ³		

笔者经计算后给出了适合当前国情、相应于各送风等级的送风颗粒物浓度，如表 8 所列。与 EUROVENT 4/23 指南不同在于，该标准依据欧洲的大气环境近况以 WHO《空气质量指南（2005）》的准则值 $PM_{2.5} \leq 10 \mu g/m^3 \cdot y$ 为基数。从实际出发，笔者则根据国内大气环境现状以 WHO《空气质量指南（2005）》的过渡时期目标 -1 (IT-1)，即年平均 $PM_{2.5} \leq 35 \mu g/m^3 \cdot y$ 为计算基数。另外该指南未明确区分送风与新风，本文定义的送风等级是依据新风限值确定的，与送入室内的空气浓度有别，实际送风浓度与新风比和回风是否设置空气过滤装置有关。送风等级与新风限值如表 8 所示。

表 8 送风等级 (SUP) 和相应新风限值

送风 1 (SUP 1)	新风颗粒物浓度不超过 WHO IT-1 的 0.2 倍限值 (年平均 $PM_{2.5} \leq 7 \mu g/m^3 \cdot y$)
送风 2 (SUP 2)	新风颗粒物浓度不超过 WHO IT-1 的 0.3 倍限值 (年平均 $PM_{2.5} \leq 10.5 \mu g/m^3 \cdot y$)
送风 3 (SUP 3)	新风颗粒物浓度不超过 WHO IT-1 的 0.5 倍限值 (年平均 $PM_{2.5} \leq 17.5 \mu g/m^3 \cdot y$)
送风 4 (SUP 4)	新风颗粒物浓度不超过 WHO IT-1 的 0.7 倍限值 (年平均 $PM_{2.5} \leq 24.5 \mu g/m^3 \cdot y$)

表 8 中的 4 个新风等级与表 6 中的 4 个不同适用场所的级别逐一对应。对表 8 所列新风限值举例说明如下：若某场所按 JGJ/T-2018 行业标准的目标等级二级设计，即室内 $PM_{2.5}$ 日浓度值为 $35 \mu g/m^3 \cdot d$ ，相应的年平均浓度值为 $15 \mu g/m^3 \cdot y$ ，其送入的新风限值应 $\leq 10.5 \mu g/m^3 \cdot y$ 。也就是说，为满足室内空气品质要求，备有 $(15-10.5) \mu g/m^3$ 乘以送入新风量的差额，作为稀释室内 $PM_{2.5}$ 发生量等不确定因素的裕量。

依据表 7 所列的，室外空气按 $PM_{2.5}$ 年均测值分类的 5 个级别，以及表 8 所列的，不同室内空气品质要求的 4 个目标等级相对应的新风等级，笔者经计算给出了按照室外空气级别和送风等级所推荐的最低 $ePM_{2.5}$ 效率，见表 9。

根据设在巴黎的欧洲通风协会认证中心 (Eurovent Certita Certification) 对市售的 91 台空气过滤器，按照 EN 779 标准和 ISO 16890 标准分别测试的对比结果，如表 10 所列。

依据上述两个标准的测试对比数据，可大略以

表 9 按照室外空气和送风级别所推荐的新风通路最低 $ePM_{2.5}$ 效率

室外空气 (ODA)		送风 1 (SUP 1)	送风 2 (SUP 2)	送风 3 (SUP 3)	送风 4 (SUP 4)	
级别	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5} \leq 7 \mu g/m^3$	$PM_{2.5} \leq 10.5 \mu g/m^3$	$PM_{2.5} \leq 17.5 \mu g/m^3$	$PM_{2.5} \leq 24.5 \mu g/m^3$
室外 1/ODA1	≤ 15	≤ 35	60% (≤ 6)	30% ($\leq 10.5 \mu g/m^3$)		
室外 2/ODA2	≤ 25	≤ 50	80% ($\leq 5 \mu g/m^3$)	60% ($\leq 10 \mu g/m^3$)	40% ($\leq 15 \mu g/m^3$)	
室外 3/ODA3	≤ 35	≤ 70	80% ($\leq 7 \mu g/m^3$)	70% ($\leq 10.5 \mu g/m^3$)	60% ($\leq 14 \mu g/m^3$)	40% ($\leq 21 \mu g/m^3$)
室外 4/ODA4	≤ 50	≤ 105	90% ($\leq 5 \mu g/m^3$)	80% ($\leq 10 \mu g/m^3$)	70% ($\leq 15 \mu g/m^3$)	60% ($\leq 20 \mu g/m^3$)
室外 5/ODA5	> 50	> 105	90% ($\leq 5 \mu g/m^3$)	80% ($\leq 10 \mu g/m^3$)	70% ($\leq 15 \mu g/m^3$)	60% ($\leq 20 \mu g/m^3$)

表 10 ISO 16890 和 EN 779 空气过滤器级别的比较

EN 779: 2012	EN ISO 16890 - 所实际测量的平均效率范围		
空气过滤器级别	ePM_{10}	$ePM_{2.5}$	$ePM_{1.0}$
M 5	5% - 35%	10% - 45%	40% - 70%
M 6	10% - 40%	20% - 50%	60% - 80%
F 7	40% - 65%	65% - 75%	80% - 90%
F 8	65% - 90%	75% - 95%	90% - 100%
F 9	80% - 90%	85% - 95%	90% - 100%

表 11 按照室外空气和送风级别所推荐的 EN 779 最低效率

室外空气	送风 1	送风 2	送风 3	送风 4
室外 1	F 7	M 6		
室外 2	F 8	F 7	M 6	
室外 3	F 8	F 7	F 7	M 6
室外 4	F 9	F 8	F 7	F 7
室外 5	F 9	F 8	F 8	F 7

目前国内市售空气过滤器可提供的 EN779 分级标识，确定表 9 所需最低效率的空气过滤器型号，详见表 11。

4 计算验证

为验证上述所建议，用于工程设计的空气过滤器简易选型方案，给出了以下例题。

例题的设计选型计算方法，按照 JGJ/T-2018 标准的规定执行，以其计算结果与简易方案进行对比如下。

例题：上海某高级办公室，按 JGJ/T-2018 标准归属二级，室内空气 $PM_{2.5}$ 设计浓度为 $15 \mu g/m^3 \cdot y$ ；等同 $35 \mu g/m^3 \cdot d$ (表 6)。按表 8，简易选型方案的送风等级为 SUP 2，新风限值为 $PM_{2.5} \leq 10.5 \mu g/m^3 \cdot y$ 。该办公室建筑面积 $62 m^2$ ，层高 2.9m，容积约 $180 m^3$ ，办公人员 12 人，根据 JGJ/T-2018，第 3.0.6 款，设计最小新风量 $494 m^3/h$ (人均 $30 m^3/h$ ，地面 $2.16 m^3/h \cdot m^2$)。该办公室采用全空气系统，房间送风量 $1220 m^3/h$ ，约 6.8 AC/h，新风比约 0.40。根据近些年上海室外大气测值及该建筑所在位置 (参见表 5)，室外 $PM_{2.5}$ 年均浓度按 $35 \mu g/m^3 \cdot y$ 计算，如表 7 所示，归属于简易选型方案所给定的室外空气 ODA 3 的年均 $PM_{2.5}$ 浓度范围。

方案 1：当空气过滤装置仅设在新风通路时

房间送风的 $PM_{2.5}$ 浓度 C_{s1} 为房间回风与新风混合后的浓度。如下式所列：

$$C_{s1} = (1-0.40) \times 15 + 0.40 \times 10.5 \text{ (SUP 2)}$$

$=9.0+4.2=13.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

维持室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度不高于 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 水平, 每小时由排风可带走室内可能发生的 $\text{PM}_{2.5}$ 细颗粒物总量为:

$$1220 \times (15-13.2) = 2196\mu\text{g}/\text{h}$$

参照 JGJ/T-2018 行业标准 3.4.1 款的规定, 当人均占用面积 $> 2.5\text{m}^2$ 时, 人体产尘量可忽略。当无具体数值时, 按 JGJ/T-2018 第 3.5.3 款规定, 当无具体数值时, 渗透风取值范围为 $0.1-0.6\text{AC}/\text{h}$, 穿透系数取值范围为 $0.6-0.9$ 。当均取中间值计算时, 该办公室 $\text{PM}_{2.5}$ 的产尘量为:

$$0.35\text{AC}/\text{h} \times 0.75 \times 180 \text{ m}^3 \times 35\mu\text{g}/\text{m}^3 = 1653.8 \mu\text{g}/\text{h} < 2196 \mu\text{g}/\text{h}$$

计算结果表明, 本项目以送风量 40% 的新风, 经过滤后浓度由 $\text{PM}_{2.5} \leq 35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $\text{PM}_{2.5} \leq 10.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, 再与室内浓度为 $\leq 15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的回风混合为含细颗粒物浓度 $\text{PM}_{2.5} \leq 13.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的空气送入室内, 足以以保证室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 水平的需求。

换句话说, 本案按空气过滤器工程简易选型的推荐, 选用表 9 所推荐的 $\text{ePM}_{2.5}$ 为 70% 的空气过滤器, 或参照表 10 选取 F7 的空气过滤器设置在新风通路上, 设计工况下室外新风经过滤后的浓度降至 $\text{PM}_{2.5} \leq 10.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, 再与回风混合送入, 可满足室内的要求。

方案 2: 当空气过滤装置分设在新风通路及送风通路时

参照 EUROVENT 4/23 指南的规定, 为保护 HVAC 系统, 新风的第一级空气过滤器的效率应不低于 ePM_{10} 50%, 约相当于 $\text{ePM}_{2.5}$ 10%-15%。若该项目按常规新风设有 $\text{ePM}_{2.5}$ 为 15% 的予过滤器 (M5 或 M6, 参见表 10、表 11)。新风经过滤与回风均匀混合, 再经第二级空气过滤器处理后送入室内。此时, 若与方案 1 室内空气质量相同, 即室内送风的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度应不大于 $13.2\mu\text{g}/\text{m}^3$, 所要求的送风第二级空气过滤器的 $\text{ePM}_{2.5}$, 可计算如下:

$$\text{ePM}_{2.5} = 1 - 13.2 / (0.6 \times 15 + 0.40 \times 0.85 \times 35) = 1 - 13.2 / 20.9 = 0.632$$

即 [$\text{ePM}_{2.5}$] 最低效率应为 63.2%, 仍宜选用相当于 EN 779 的 F7 等级的空气过滤器。虽然方案 2 比方案 1 的空调机组所需驱动能耗稍大, 但这种布置方案也有其可取之处。

5 结论

1) 截止目前, 笔者认为国内相关研究结果尚未能给出简便、合理的应对雾霾天气的空过滤器选型方法。借鉴理论与实践相结合的 EUROVENT 4/23 选用指南, 搞一套适合中国当前现状、适合工程应

用的可行方案十分必要, 期盼有关主管部门指导此项工作。

2) WHO 也一再强调, “各国标准的制定需要考虑当地条件的限制和公共卫生的优先重点问题。因为标准是依据所采用的权衡健康风险的方法、技术可行性和经济方面的考虑, 以及其他各种政治和社会因素来制定的。而这些因素反过来又取决于国家发展水平和空气质量管理能力。”正因为如此, 笔者认为, 公共建筑通风空调系统应对雾霾天气所采取的技术措施规定宜相对较宽松、并且便于实施和考核。

3) 从节约空调通风系统运行能耗考虑, 宜在主要空气过滤段装置旁通阀。多数城市雾霾天气冬季、春季较严重^[22]。夏、秋室外空气相对良好的时段可考虑开启旁通阀, 以降低空气过滤段的流通阻力减少驱动能耗。当然, 变频风机必备, 室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的感知元件以及旁通阀的开度指令和相应的执行机构等都需要研发和工程应用予以检验。

4) 带新风或自循环的房间空气净化器安装简单、移动方便, 更有开停自如的优点, 可作为通风空调系统应对雾霾天气的一种补充方式, 综合应用。也可作为公共建筑空调通风系统在采取本文推荐的空气过滤措施基础上, 对个别特殊高要求房间的一种辅助手段。

本文所建议的方案必有疏漏之处, 供业内人士审视并斧正。

本文撰写过程中得到大气物理研究所孙扬博士团队的鼎力支持, 提供了许多监测数据, 在此一并致谢。

参考文献

- [1] World Health Organization, Air Quality Guideline Global Update 2005 (Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide[S], WHO Regional Office for Europe in Publications, Scherfigsvej 8 DK-2100 Copenhagen, Denmark
- [2] Eurovent 4/23-2018 Selection of en ISO 16890 rated air filter classes for general ventilation applications (second edition, published on 1 October 2018) [S], Eurovent 80 Bd. A. Regers Ln, 1030 Brussels, Belgium, Eurovent, European Industry Association
- [3] 王书平, 时景璞. 疾病负担评价常用指标及其应用 [J]. 辽宁医学杂志, 2007, 21 (5): 321-323
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 2018 公共建筑室内空气质量控制设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社
- [5] 陈治清. 办公建筑室内颗粒物污染与控制措施研

究 [D]. 上海同济大学, 2014, 45-55

[6] 朱梅. 基于 PM2.5 浓度标准的室内环境控制方法的研究 [D]. 武汉科技大学, 2014, 25-27

[7] 王清勤, 李国柱, 朱荣鑫等, 空气过滤器设计选型用 PM2.5 室外浓度确定方法 [J], 建筑科学, 2015, 31 (12): 71-77

[8] 涂光备, 涂有, 刘冰等, 细颗粒物 (PM2.5) 室外设计浓度的相关问题 [J], 暖通空调, 2016, 46(10): 70-74

[9] 王清勤, 李国柱, 赵力等, 建筑室内细颗粒物 (PM2.5) 污染现状, 控制技术与标准. 暖通空调, 2016, 46 (2) 1-7

[10] 王清勤, 赵力, 李国柱等. 建筑室内细颗粒物污染控制设计方法研究 [J], 暖通空调, 2016, 46 (4): 61-65

[11] 曹国庆, 谢慧, 赵申. 公共建筑室内 PM2.5 污染状况及过滤器效率调研 [J]. 建筑科学, 2015, 31 (4): 40-44

[12] 基于过滤浓度日数的新风 PM2.5 过滤负荷特性研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2017, 45No.9: 1345-1351

[13] 涂有, 涂光备, 张鑫. 通风用空气过滤器的细颗粒物 (PM2.5) 过滤效率研究 [J]. 暖通空调, 2016, 46 (5): 49-54

[14] 李剑东, 徐昭玮, 王志勇, 侯银燕, 王智超. 通风系统用空气净化装置细颗粒物 (PM2.5) 净化效率测试方法 [J]. 暖通空调, 2017, 47(4): 60-64

[15] ISO 16890-1:2016 Air filters for general

ventilation Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM) [S] ISO copyright office published in Switzerland 2016, P. VI

[16] 涂有, 涂光备. 关于一般通风用空气过滤器国际新标准 ISO 16890:2016 的探讨 [J]. 暖通空调, 2017, 47 (12): 15-19

[17] 涂有, 涂光备, 赵策. 试解读《一般通风用空气过滤器》国际新标准 [J]. 洁净与空调技术, 2018, No.3 (总 99): 1-5

[18] 涂有, 涂光备, 刘冰等. 再议一般通风用空气过滤器国际新标准 [J]. 暖通空调, 2018, 48 (5): 27-32

[19] 涂有, 涂光备. 三议 ISO 16890:2016 标准的一些相关问题 [J]. 暖通空调, 2018, 48 (10): 1-7

[20] BS EN 16798-3:2017 Energy performance of buildings-Ventilation for buildings-Part 3: For non-residential buildings- Performance requirement for ventilation and room-conditioning systems[S] Brussels:BSI Standard Publication,2017

[21] EU 779:2012 Particulate air filters for general ventilation — determination of the filtration performance[S], Brussels: BSI Standard Publication,2012

[22] 孙扬, 孟祥来, 张成影等. 全国与半导体产业关键城市大气颗粒物及分子污染特征分析 [C]// 国际污染控制与洁净技术高峰论坛论文集, 苏州: 12-42

关于“一般通风用空气过滤器”标准修订的 些许拙见

涂光备¹, 涂有²

(1. 天津大学环境学院, 天津 300350; 2. 天津仁爱学院, 天津 301636)

[摘要] 为配合市场对一般通风用空气过滤器的颗粒物质量过滤效率指标 ePM_x 的需求, 也为了适应国际潮流和贸易往来的顺畅, 参考 ISO 16890 标准尽快编制国内相应的标准, 事不宜迟。本文从洁净行业对一般通风用空气过滤器所关注的角度着眼, 对 ISO 16890 标准在本土“落地”表达了某些期待。希望增添、补充一些项目和内容, 适度松动该标准的一些规定, 以适应本土的需要与习惯。本文建议宜保留洁净行业常用的、 \geq 某些粒径累计量的过滤效率值; 宜给出静电前空气过滤器的 ePM_x 。建议允许采用 KCL 或 DEHS 一种气溶胶测试等。本文对计径计数测量的粒径档位选择, 提出了有别于 ISO 16890 标准的建议, 并通过计算验证了其适用性。期盼主管部门尽快启动一般通风用空气过滤器标准的修订。

[关键词] 通风; 空气过滤器; 空气净化; 过滤效率

0 前言

由 ISO/TC 142 “空气及其他气体净化设备技术委员会”起草并颁发的 ISO 16890-1~4:2016 “一般通风用空气过滤器”系列标准^[1-4], 显然是为了配合近些年来国际上日益关注的空气悬浮颗粒物(PM)对人类健康的影响, 应运而生的产物。虽然近年国内大气环境已大为改善, 但很多城市污染依然严重。为提升室内空气品质, 将有越来越多设置集中空调系统的公共建筑会增设或改进原有空气过滤装置, 或配置室内空气净化设备, 以有效降低室内空气悬浮颗粒物质量浓度。所以, 科学地选用适宜的空气过滤器, 成为暖通空调设计人员日益关注的问题, ISO 16890 标准的出现自然引起国内同行的关注。

笔者此前曾就 ISO 16890 标准发文议论, 表示认同此标准的整体思路和基本框架, 认为该标准“既满足了市场所需标明有细颗粒物过滤效率 ePM_x 等技术参数的空气过滤器, 又起到了整合国际现行《一般通风用空气过滤器测试方法》标准的作用。”; 笔者又认为: “ISO 16890 标准实际脱胎于此前的欧美一般通风用空气过滤器标准, 并秉承和兼顾了欧美原有标准的特质”^[7]; 笔者还指出“就测定空气过滤器过滤效率而言, 忽略 0.3~10 μm 粒径范围内空气动力学当量直径和光学当量直径的差异, 同时回避了直接测量细颗粒物质量的试验方法, 而是利用计数计径的测量值和典型的大气气溶胶离散粒子体积分布数学模型, 换算得到所需的 ePM_x 值。该标准的这些做法从当下的技术条件和工程实用角度来衡量应该说是明智之举。”^[8]

笔者同时也对国内一些专家有意另起炉灶的想法提出了质疑。笔者认为, 测定空气过滤器过滤性

能的主要目的之一是控制产品质量, 为使用者提供在规定测试方法和人工气溶胶的条件下, 产品的可靠的技术指标, 而这些数据从来不可能完全反映在千变万化使用条件下的实际效果。既然如此, 这些专家们所强调的, 以光学当量直径替代空气动力学当量直径与实际不符, 以及 ISO 16890 标准所用的大气气溶胶离散粒子体积分布数学模型不能反映中国的大气环境等^[9]。这些意见作为科研课题无可非议、而且也是国家级别科研单位作为基础科学研究的职责, 笔者也殷切期盼这些专家们取得更多的研究成果。但所提出要采用直接测量空气过滤器前后, 空气中悬浮颗粒物相应空气动力学当量直径的颗粒物质量, 以确定 ePM_x 的方法未必贴切于空气过滤器技术性能检测的目的。笔者认为这种设想不仅当下技术上有难度, 而且对反映空气过滤器性能的价值可能有限, 并和国际潮流相, 不利于推广与应用。

本文从洁净行业对一般通风用空气过滤器所关注的角度着眼, 对 ISO 16890 标准在本土“落地”表达了某些期待。希望增添、补充一些项目和内容, 适度松动一些规定, 以适应本土的需要与习惯。既是“落地”就宜“入乡随俗”、“为我所用”, 否则可能出现“水土不服”的情况, 而影响推广普及和实际应用。日本、韩国同行在 ISO 16890 标准在本土化方面先行了一步^[10]。笔者从洁净工程实用的角度出发, 提出以下一些粗浅的建议恭请行业专家们审议。

1 对一般通风用空气过滤器某些技术数据的期待

ISO 16890 系列标准的诞生, 主要是迎合近些年来备受关注的大气环境污染问题, 为改善公共与民用建筑等居留环境的空气质量, 以保障人们的身

体健康。按照 ISO 16890 标准给出的空气过滤器技术数据,并未充分考虑在洁净室及相关受控环境的空调通风系统中,对这些空气过滤器的技术指标,有什么需求和期待。在笔者印象中,洁净室及相关受控环境从来都是一般通风用空气过滤器的大用户,绝不逊色于民用建筑通风系统的用量。洁净空调系统中所使用的予过滤器、主过滤器、前置过滤器、回风过滤器等,特别是在 ISO 8 级、ISO 9 级洁净室中可能用做终端过滤器的高中效、亚高效等各种空气过滤器等,都属于此范畴。难道洁净行业不该对此方面更新的标准有所期待?

1.1 大于等于 (\geq) 某粒径的数量累计值的过滤效率

ISO 14644 “洁净室及相关受控环境”系列标准,若从其起源:“美国联邦标准 FS-209 标准”算起,近甲子之年。该标准既是全球遵循、也是国内一贯认同的洁净技术的基础。从以空气悬浮颗粒物数量浓度为凭证的洁净室洁净度等级、表面洁净度的级别划分等技术指标,到相关的各种技术数据:室内机械、电气设备的产尘量;人体、洁净服及用品的散尘量;建筑材料和设备表面的发尘量等,无一不是以颗粒物的粒径与数量为依据。上世纪七、八十年代当时为配合大规模集成电路的发展,举洁净行业全国之力,在大江南北多个地域所测定的室外大气悬浮颗粒物的分布状况,同样也是以等于和大于 (\geq) 某粒径的累计值来统计和表述的^[11]。所以,洁净行业从来关注的空气过滤器的主要性能,必然也是对 \geq 某粒径颗粒物累计量的过滤效率值。

如果按照欧美的做法,以 ISO 16890 系列标准置换原来的一般通风用空气过滤器标准:EN 779:2012^[12]、ANSI/ASHRAE 52.2:2012^[13]。顿时将 ISO 16890 系列标准给出的一般通风用空气过滤器的质量过滤效率值 ePM_x ,摆在洁净室从业人员眼前,想必会使多数人感到生疏和茫然。面对颗粒物小于等于 (\leq) $1\mu m$ 、大于等于 $0.3\mu m$ 区间的质量过滤效率值 ePM_1 ; 颗粒物小于等于 (\leq) $2.5\mu m$ 、大于等于 $0.3\mu m$ 区间的质量过滤效率值 $ePM_{2.5}$; ; 颗粒物小于等于 (\leq) $10\mu m$ 、大于等于 $0.3\mu m$ 区间的质量过滤效率值 ePM_{10} ,除了借鉴其他空气净化系统的应用经验、或是参考某些传统与新标准比对实验所得的数据之外,恐怕眼下洁净行业人员根据产品样本标明的 ePM_x 值,可能无从下手来选用所需要的空气过滤器。虽然久而久之,洁净室设计、管理人员也会熟能生巧逐渐在脑海中建立起, ePM_x 值与其他过滤效率值之间的大致对应关系,以用于空气过滤器选型。但如果落地的 ISO 16890 标准能直接给出这些数据岂不两全其美,何必要舍近求远?

笔者的期待是,希望所见的一般通风空气过滤器国内产品样本,除按照 ISO 16890 标准的基本要求提供 ePM_x 值外,同时给出对 $\geq 0.5\mu m$ 、 $\geq 1.0\mu m$ 、 $\geq 2.0\mu m$ 、 $\geq 5.0\mu m$ 等粒径的数量累计值的过滤效率。这不会给实验及数据整理增添多少麻烦了,但给使用者带来许多方便,这样的好事何乐而不为?

1.2 宜妥善处理消除静电对空气过滤器过滤效率的影响

ISO 16890 标准规定,以消除静电前、后被测空气过滤器相应粒径的计数过滤效率数学平均值,再利用可表征大气尘特征的、基于光学当量直径的离散和累计体积分布函数,以之作为空气过滤器的计径计数效率测量值换算成 ePM_x 的依据。此举有利于采用计算机编程整理测试结果,既保证精准无误又快捷。ISO 16890 标准此项规定,似乎不可说其有欠公允,它已经采取了消除静电前、后的测值的数学平均量,作为换算空气过滤器 ePM_x 值的依据,以用于预估实际运行状态下过滤性能。但笔者仍认为对此方面尚有可商榷、补充的余地。

一般通风用空气过滤器的主力滤材是各种化学纤维,除熔喷丙纶、涤纶等滤材外,还有热熔、针刺等工艺厂的各种化纤滤材。这类滤材有别于玻纤类滤材,一般都具有不同程度的静电效应,那些采用高静电驻极技术处理的滤材静电效应更为显著。若按 ISO 16890 标准规定操作,这类滤材制作的空气过滤器的 ePM_x 报告值将大幅下降,级别猛然跌落,令其原有的较玻璃纤维等滤材易于回收处理及成本略低等某些优势荡然无存。

但多数化纤滤材只是在处理含油烟或各种醇类等挥发性有机物时,所附着的静电荷快速消失,过滤性能显著下降。但一般通风用空气过滤器的主要使用场所,通常都不涉及这些特殊污染的空气。而且这类滤材的空气过滤器其容尘量相对有限,使用时间较短、更换比较频繁,因此并不需要其滤材永久驻极。另一方面目前国内生产的一些采用新型静电增强技术的滤材,其静电保持的可靠性也有明显提升。更主要的是,用于降低进入室内 PM_x 的空调通风系统的空气过滤器,其主要发挥功效的季节一般都在冬季和春季。这是大多数城市室外全年 PM_x 值最高、污染最严重的时段^[14]。一般来说也是室外空气含湿量全年最低的时期,根据使用的经验来看,对化纤滤材静电效应的影响一般有限。对于那些采用化纤滤材过滤器的室内空气自净器来说,其吸入的是工作和居留环境的空气,一般也不会显著降低其静电效应所占过滤效率的份额。

总起来说笔者的建议是,在按 ISO 16890 标准

规定给出按消除静电前、后的测值的数学平均量所计算得出的 ePM_x 值及相应的空气过滤器等级外，希望同时给出空气过滤器未消除静电前，在原始状态下的测值所对应的 ePM_x 值及相应空气过滤器等级，或作为附录以供参考。消除静电前及按 ISO 16890 标准规定得出的两组数据前同时列出有何不可？让选用者便于根据所使用的地域、场所和环境及过往的使用经验，自主做出合理的选择岂不更好。提供这一组数据，对于实验及数据处理没有多少麻烦，而对于促进化纤滤材不断改善技术性能或许略有价值。

1.3 关于实验用人工尘气溶胶的建议

虽然按照 ISO 16890-2 第 6.1、6.2、6.3 款所规定的，要求按 $0.3\mu m-1\mu m$ 与 $1\mu m-10\mu m$ 分段采用 DEHS 和 KCl 两种标准气溶胶测试计径效率，以分别确定 ePM_1 及 $ePM_{2.5}$ 和 ePM_{10} 。该标准的此项规定明显是欧、美两大集团互不相让的妥协结果^[9]。虽然照搬 ISO 16890 标准的规定，同时配置 KCL 和 DEHS 两套试验气溶胶发生装置无特殊困难，并无不可。目前国内的一些空气过滤器生产商已按此要求改造了原有的试验系统。鉴于国际上尚无明确的有关 PM_1 量级的指标，也缺少与 PM_1 浓度关联的、对人体健康产生影响的医学循证的研究报告。所以笔者认为，不生产亚高效及性能的厂家，可考虑只配置 KCL 一种人工尘源，提供最常用的 $ePM_{2.5}$ 及 ePM_{10} 数据。

笔者依据 GB/T 14295: 2008 标准对所用 KCL 人工尘的粒径离散分布百分比的规定，及从 ANSI/ASHRAE 52.2 标准、EN 779 标准的测试系统所获得的实测数据等，对这几种 KCL 人工尘，粒径 $\geq 0.3\mu m$ 的数量与体积离散分布进行了计算与比较，如表 1 所列。

比较表 1 所列中国和欧美等 3 个一般通风用空气过滤器试验用的人工尘，各相应粒径范围的尘粒数及质量（按均值计以体积量表示）所占总量的百分比相差较大。

表中，GB 表示 GB/T 14295: 2008 标准对 KCL 尘源的粒径离散分布的要求，笔者据此计算了按粒

径范围的体积分布百分比。

A 为笔者按 ANSI/ASHRAE 52.2-2007 标准附录 B 中，图 B-3 所提供的上游断面 9 个测点，12 个几何平均粒径档的测值计算所得，反映了该标准对 KCL 人工尘的要求。

TU 为笔者按同济大学林仲平教授所提供，该校按 EN 779 标准所建空气过滤器测试台的 3 组 KCL 人工尘数据（范围在 0.18 至 $9.6\mu m$ ），按表 1 粒径范围整理而得。

UB、RU 分别为笔者按 ISO 16890 标准所推荐的、用以换算 ePM 的《城市及郊区环境标准大气尘体积分布》数据计算而得。需要说明的是，受原始数据所限，这两项数值对应的粒径档范围分别是 $0.3-0.55\mu m$ 、 $0.55-1.0\mu m$ 、 $1.0-2.2\mu m$ 、 $2.2-10.0\mu m$ 。略有别于表 1 所列粒径档范围。

从表 1 可见，GB/T 14295: 2008 标准所要求人工尘，在 0.3 至 1.0 微米范围所占 ≥ 0.3 微米总量的数量百分比达 95%，而占 ≥ 0.3 微米总量的体积百分比约为 7%。与美国标准的对应指标：数量占 62.97%、体积占 1.55%，及欧洲标准的对应指标：数量占 73.37%、体积占 1.20% 相比较，相差较大。但与 ISO 16890 标准所推荐的、用以换算 ePM_x 的《城市及郊区环境标准大气尘体积分布》数据比较接近。

由此可知，因 GB/T 14295: 2008 标准所要求人工尘中， 0.3 至 $1.0\mu m$ 范围所占数量百分比很大、而此部分所占总量的体积百分比相对较低。但 $\geq 2.0\mu m$ 范围所占的数量百分比比较欧美标准都偏小，其结果是，同一空气过滤器按 GB/T 14295: 2008 标准测试的过滤效率值将偏低，让产品处于不利位置。笔者现时手边缺少更多数据佐证，不便多言。期盼国内专家进步研究此问题。笔者的观点是，建议国内修订后的一般通风用空气过滤器标准中，KCL 发尘的装置及粒径分布宜与 ISO 16890-2 标准相一致，对此问题提请专家们议定。

1.4 关于颗粒物过滤效率 ePM_x 分级的建议

对于 ISO 16890:2016 标准所建议的，包括 ePM_{10} 、 $ePM_{2.5}$ 、 ePM_1 以及计重效率共四个组别，连同各组内以 5% 效率值差额作为分档，来标识空气

表 1 KCL 人工尘与“标准大气尘”的尘粒和体积分布百分比

粒径范围/ μm	粒径分布百分比/%					体积分布百分比/%				
	GB	A	TU	UB	RU	GB	A	TU	UB	RU
0.3~0.5	65.5	30.46	43.28	88.79	84.70	2.01	0.21	0.03	25.56	11.54
0.5~1.0	30.3	32.51	30.09	10.60	12.13	5.87	1.34	1.17	15.57	9.37
1.0~2.0	3.1	27.52	16.67	0.47	2.75	43.18	8.90	0.83	14.27	17.66
2.0~10.0	>1	8.51	9.89	0.14	0.43	48.93	89.55	97.97	44.42	61.43

过滤器的级别。以此方法将产生多达几十个空气过滤器级别，笔者对此并不完全认同。原有的一般通风用空气过滤器标准如 EN 779:2009 将空气过滤器分为 G1-G4 和 F5-F9 共 9 个级别；ANSI/ASHRAE 52.2:2012 将空气过滤器从 MERV-1 到 MERV-16 分为 16 个等级；国内标准 GB/T 14295-2008 则与欧盟标准类似，将空气过滤器级别分为粗效 1-4，中效 1-3，高中效以及亚高效共 9 个级别。面对 ISO 16890 标准多达四、五十个空气过滤器等级，设计与运行管理人员会很被动。看似级别划分很精确，实际给选用、管理增添了麻烦^[7]。而且各种化纤滤材本身的纤维线径、密度等受原材料物性、或生产过程中工艺温度、压力的控制与波动，以及生产环境的温度、湿度变化等因素的影响，每一批同类滤材的技术性能都波动在某个容许范围内，其过滤效率 3-5% 亦为常态^[15]。再者，按 :2016 标准规定所报告的数值本身就是一个人工气溶胶计径效率测值按所谓的标准大气尘体积分布的计算结果，与实际工程中的使用效果并未必一致，那么何不删繁就简，以较粗的线条划分级别为宜。譬如各组内不以 5% 效率差额分级，而采用四舍五入的方式，就可使级别数量减半。

2 光散射粒子计数器粒径档位的设定

粒径档位的不同设定影响到测试仪器的标定和数据处理，笔者认为 ISO 16890 标准的所推荐的光散射粒子计数器粒径档位未必合理。为此根据既往几十年来洁净行业的习惯，建议了一组有别于 ISO 16890 标准的所推荐的光散射粒子计数器粒径档位的设定。

按照 ISO 16890: 2016 标准的规定，当计算 ePM₁，ePM_{2.5} 和 ePM₁₀ 时，各相应的粒径挡上限分别为 di+1=1, 3, 10 μm，同时还要求计算 ePM₁ 时不少于 3 个粒径挡，计算 ePM_{2.5} 时不少于 6 个粒径挡，计算 ePM₁₀ 时不少于 9 个粒径挡。因此 ISO 16890

标准规定的光散射粒子计数器的粒径分档，如表 2 所示。

表 2 所列 ISO 16890 标准推荐的光散射粒子计数器粒径分档，较传统仪器除增加多个档位外，个别旧有的、已在业内人士思维中形成概念并习惯使用的档位却被增设的邻近档位所替代。如该标准推荐设 0.55 μm 档以替代 0.5 μm 档，推荐设 2.2 μm 档而无 2.0 μm 档，推荐设 5.5 μm 档而舍弃了 5.0 μm 档。

值得注意的是，表 2 所列各粒径档恰恰是 ANSI/ASHRAE 52.2-2012 标准所要求的光散射粒子计数器各粒径档位。笔者认为，ANSI/ASHRAE 52.2-2012 标准对粒子计数器的粒径档位要求特殊可能是影响它在国际上推广使用的因素之一。

在 ISO 16890-1: 2016 标准附录 B 给出的示例中，所列的各粒径档位略微有别于 ISO 16890 标准正文所推荐的粒径分档。这也表明 ISO 16890 标准的所推荐的光散射粒子计数器粒径档位并非唯一的，是相对松动的。该示例与表 2 所列粒径档位相比较，在 1.0 μm 之前仅有 0.3, 0.5, 0.7 μm 3 档，略去了 0.4 μm 档，并以 0.5 μm 档以替换了 0.5 5 μm 档。其余粒径档位与 ISO 168902: 2016 标准的推荐值相同。如表 3 所示。

笔者从洁净行业既往的习俗出发，提出了一个有别于 ISO 16890 标准的粒子计数器粒径分档的建议，供国内同行参考^[16]，如表 4 所示，该粒径档位既能满足 ISO 16890 标准有关计算不同 ePM_x 值时，对档位的数量要求，又涵盖了目前应用广泛的粒子计数器粒径档位。

比较表 4 和表 2、表 3 可以看出：笔者所建议的粒径档位共 11 档，较 ISO 16890 标准所推荐的粒径档位少 2 档，另外将 0.55, 2.2, 5.5 μm 档改为习惯采用的相近的档位。与 ISO 16890-1 附录 B 例题示例所采用的粒径档位相比也减少了 1 档。

表 2 ISO 16890-2: 2016 所推荐的光散射粒子计数器各粒径档位

$d_i/\mu\text{m}$	0.3	0.4	0.55	0.7	1.0	1.3	1.6	2.2	3.0	4.0	5.5	7.0
$d_{i+1}/\mu\text{m}$	0.4	0.55	0.70	1.0	1.3	1.6	2.2	3.0	4.0	5.5	7.0	10.0
$\bar{d}_i/\mu\text{m}$	0.35	0.47	0.62	0.84	1.14	1.44	1.88	2.57	3.46	4.69	6.20	8.37

表 3 ISO 16890-1 附录 B 示例中所采用光散射粒子计数器各粒径档位

$d_i/\mu\text{m}$	0.3	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6	2.2	3.0	4.0	5.5	7.0	7.0
$d_{i+1}/\mu\text{m}$	0.5	0.70	1.0	1.3	1.6	2.2	3.0	4.0	5.5	7.0	10.0	10.0
$\bar{d}_i/\mu\text{m}$	0.39	0.59	0.84	1.14	1.44	1.88	2.57	3.46	4.69	6.20	8.37	8.37

表 4 笔者建议的光散射粒子计数器各粒径档位

$d_i/\mu\text{m}$	0.3	0.5	0.7	1.0	1.4	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0
$d_{i+1}/\mu\text{m}$	0.5	0.7	1.0	1.4	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0	10.0
$\bar{d}_i/\mu\text{m}$	0.39	0.59	0.84	1.18	1.67	2.44	3.46	4.47	5.92	8.37

光散射粒子计数器粒径档位设定不同时, 是否影响最终试验报告的计算结果, 其误差有多大? 笔者以最为关注的 ePM_{2.5} 为例进行计算比较如下。

2.1 按 ISO 16890 标准推荐的粒径挡, MERV-A14 空气过滤器的计算结果

笔者按照 ISO 16890 标准推荐的粒径挡, 计算了按 ASHRAE 52.2 划定为 MERV-A14 的化纤袋式空气过滤器, 该过滤器初始状态时的 ePM_{2.5}, 相关数值见表 5。

表 5 MERV-A 14 空气过滤器按 ISO 16890 标准推荐的粒径挡计算 ePM_{2.5} 的相关数值

$\bar{d}_i/\mu\text{m}$	$\Delta\text{ln}d_i$	$E_i/\%$	$q_{3\mu}(\bar{d}_i)$	$q_{3\mu}(\bar{d}_i) \Delta\text{ln}d_i$	$E_i q_{3\mu}(\bar{d}_i) \Delta\text{ln}d_i$
0.35	0.29	64	0.22627	0.065618	0.041996
0.47	0.32	69	0.19891	0.063651	0.043919
0.62	0.24	74	0.15837	0.038009	0.028127
0.84	0.36	86.3	0.11522	0.041792	0.035797
1.14	0.26	92.0	0.08503	0.022108	0.020339
1.44	0.21	95.0	0.07618	0.015998	0.015198
1.88	0.32	96.9	0.08022	0.02567	0.024875
2.57	0.31	98.4	0.09984	0.030950	0.030455
合计				0.303796	0.240706
ePM _{2.5} =0.240706/0.303796=0.7923=79.23%					

表 5 中 MERV-A 14 空气过滤器的初始状态过滤效率 E_i 前 3 项数据根据 ISO 16890-1 标准附录 B 中图 B.1 所给 MERV-A 14 空气过滤器的初始状态计径过滤效率曲线查得。

2.2 按 ISO 16890-1 标准附录 B 示例所采用的粒径挡, 空气过滤器 MERV-A14 的计算结果

在 ISO 16890-1 标准附录 B 给出的示例中, 1.0 μm 之前仅有 0.3, 0.5, 0.7 μm 3 档, 与笔者在表 4 中所给出的粒径档位的建议相同, 但在 1.0 μm 与 3.0 μm 之间设有 1.3, 1.6, 2.2 μm 3 档, 与 ISO 16890

表 6 MERV-A 14 空气过滤器按 ISO 16890-1 标准附录 B 所给示例的粒径挡计算 ePM_{2.5} 的相关数值

$\bar{d}_i/\mu\text{m}$	$\Delta\text{ln}d_i$	$E_i/\%$	$q_{3\mu}(\bar{d}_i)$	$q_{3\mu}(\bar{d}_i) \Delta\text{ln}d_i$	$E_i q_{3\mu}(\bar{d}_i) \Delta\text{ln}d_i$
0.39	0.51	66.0	0.21917	0.111958	0.073892
0.59	0.34	78.0	0.16568	0.055747	0.043483
0.84	0.36	86.3	0.11522	0.041096	0.035466
1.14	0.26	92.0	0.08503	0.022309	0.020524
1.44	0.21	95.0	0.07618	0.015818	0.015027
1.88	0.32	96.9	0.08022	0.025546	0.024754
2.57	0.31	98.4	0.09984	0.030966	0.030471
合计				0.303439	0.243347
ePM _{2.5} =0.243347/0.303439=0.8020=80.20%					

标准的推荐值相同。根据 ISO 16890-1 标准附录 B 所给示例的粒径挡, 笔者对 MERV-A 14 空气过滤器未消静电前 (即初始状态) 的 ePM_{2.5} 进行了计算, 其相关数值如表 6 所示。

2.3 按笔者推荐的粒径分档, MERV-A 14 空气过滤器的计算结果

按照笔者推荐的粒径分档, MERV-A 14 空气过滤器初始状态的 ePM_{2.5} 相关数值计算结果如表 7 所示。

表 7 MERV-A 14 空气过滤器按笔者推荐的粒径挡计算 ePM_{2.5} 的相关数值

$\bar{d}_i/\mu\text{m}$	$\Delta\text{ln}d_i$	$E_i/\%$	$q_{3\mu}(\bar{d}_i)$	$q_{3\mu}(\bar{d}_i) \Delta\text{ln}d_i$	$E_i q_{3\mu}(\bar{d}_i) \Delta\text{ln}d_i$
0.39	0.51	66.0	0.21917	0.111958	0.091806
0.59	0.34	78.0	0.16568	0.055747	0.050172
0.84	0.36	86.3	0.11522	0.041096	0.038754
1.18	0.34	93.0	0.082426	0.028025	0.026063
1.67	0.36	96.0	0.076767	0.027636	0.026531
2.45	0.41	98.0	0.096103	0.039402	0.038614
合计				0.303864	0.244055
ePM _{2.5} =0.244055/0.303864=0.8032=80.32%					

表 7 中 MERV-A 14 空气过滤器的初始状态过滤效率 E_i 的后 3 项数据根据 ISO 16890-1 标准附录 B 中图 B.1 所给空气过滤器 A 的初始状态计径过滤效率曲线查得。

MERV-A 14 空气过滤器初始状态下的 ePM_{2.5} 的计算结果如下。

按 ISO 16890 标准推荐的粒径挡: ePM_{2.5}=79.2%

按 ISO 16890-1 附录 B 所给示例的粒径挡: ePM_{2.5}=80.20%

按笔者推荐的尘粒计数器粒径分档: ePM_{2.5}=80.32%

2.4 按上述 3 种粒径分档, 对 EN 779 划为 F9 的某空气过滤器的计算结果

在 ISO 16890-1 标准附录 B 中, 还给出了按 EN 779 划为 F9、按 ASHRAE 52.2 划分为 MERV-A 15 的玻璃纤维滤纸刚性空气过滤器的相关测试数据。笔者同样按上述 3 种粒径分档, 依据 ISO 16890-1 标准附录 B 中所提供的该 F9 空气过滤器的相关基本测试数据进行了计算, 结果如下:

按 ISO 16890 标准推荐的粒径挡计算, ePM_{2.5}=0.271873/0.303013=89.72%;

按 ISO 16890-1 附录 B 所给示例的粒径挡计算, ePM_{2.5}=0.273703/0.303439=90.20%;

按笔者推荐的粒径挡计算, ePM_{2.5}=0.274150/0.303864=90.22%。

分别比较 MERV-A 14 的化纤袋式和 F9 或

MERV-A 15 的玻纤滤纸刚性空气过滤器的上述 3 个初始状态 ePM_{2.5} 的计算值, 可以得出 3 种粒径分档所得结果基本一致。而笔者推荐的粒径档共 11 档, 较 ISO 16890 标准推荐的粒径档减少了 2 档, 较 ISO 16890-1 标准附录 B 示例所采用的粒径档减少了 1 档。同时, 笔者所推荐的粒径分档中保留了与 ISO 14644 系列标准相一致的, 也是五六十年以来洁净技术行业惯常采用的 0.5, 2.0, 5.0 μm 粒径档, 并摒弃了 ISO 16890 标准推荐的 0.55 μm、2.2 μm 及 5.5 μm 档, 此外也略微减小了检测工作量。

3 结语

为适应一般通风用空气过滤器的颗粒物质量过滤效率指标 ePM_x 的需求, 也为了配合国际潮流和贸易往来的顺畅, 参考 ISO 16890 标准尽快编制国内相应的标准, 事不宜迟。

笔者认为有两种可选方案, 其一, 修订 GB/T 14295 标准, 将其分为计数过滤效率测试及质量过滤效率测试两部分。所增添的 ePM_x 测试部分基本与 ISO 16890 标准相一致。

其二, 维持 GB/T 14295 标准基本不变, 另编制一项与 ISO 16890 标准相协调的空气悬浮颗粒物质量过滤效率新标准。也就是说, 国内《一般通风用空气过滤器》测试与性能等级有两套标准可选用。

无论采取上述那个方案, 笔者建议 GB/T 14295 标准的人工尘的发生装置与产生气溶胶的粒径分布宜与 ISO 16890 标准相一致, 以利于国内空气过滤器及相关产品走出国门。

笔者的诉求很简单, 希望 ISO 16890 标准踏踏实实落地。既照顾到那些可能为一带一路效力的企业, 可以按照 ISO 16890 标准的规定, 基本上原汁原味地“照方抓药”以适应国际市场的认同; 又宜兼顾到洁净行业的需要和国内几十年的习惯、以至考虑到大量生产化纤滤材空气过滤器厂商的处境和促进其产品性能的提升等等。

笔者相信主管部门和专家们的超凡智慧, 一定能做好 GB/T 14295 标准的修订及 ISO 16890 标准的“落地”工作。以上拙见供专家们审议。

参考文献

[1] IX -ISO.ISO/FDIS 16890-1:2016 一般通风过滤器 -- 第 1 部分: 颗粒物综合过滤效率 (ePM) 技术要求和分级体系 [S]. 冯昕译, 蔡杰校. 2016-12-01
 [2] IX -ISO.ISO/FDIS 16890-1:2016 一般通风过滤器 -- 第 2 部分: 计径效率和阻力的测量 [S]. 冯昕译, 蔡杰校. 2016-12-01
 [3] IX -ISO.ISO 16890-1:2016 Air filters for general ventilation Part 1: Technical specifications, requirements

and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM) [S] ISO copyright office published in Switzerland 2016

[4] IX -ISO.ISO 16890-2:2016 Air filters for general ventilation Part 2: Measurement of fractional efficiency and air flow resistance [S] ISO copyright office published in Switzerland, 2016

[5] IX -ISO.ISO 16890-3:2016 Air filters for general ventilation Part 3: Determination of gravimetric efficiency air flow resistance versus the mass of test dust captured [S] ISO copyright office published in Switzerland 2016

[6] IX -ISO.ISO 16890-4:2016 Air filters for general ventilation Part 4: Conditioning method to determine the minimum fractional test efficiency [S] ISO copyright office published in Switzerland 2016

[7] 涂有, 涂光备. 关于一般通风用空气过滤器国际新标 ISO 16890:2016 的探讨 [J]. 暖通空调, 2017, 47(12):15-19

[8] 涂有, 涂光备, 刘冰等. 再议一般通风用空气过滤器国际新标准 [J]. 暖通空调, 2018, 48(5): 27-32

[9] 冯昕, 路宾, 张惠等. ISO 16890 系列标准存在的问题及未来发展方向 [J]. 暖通空调, 2019, 49(7): 17-23

[10] 大谷义雄. Amendments made in the of ISO 16890 to JIS B9908 《ISO 16890 转换为 JIS B 9908 的修正情况》 [C]//2019 (苏州) 洁净技术国际高峰论坛论文集, 2019: 17-19

[11] 涂光备. 洁净室及相关受控环境: 理论与实践 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014

[12] EU 779:2012 Particulate air filters for general ventilation — determination of the filtration performance [S], Brussels: BSI Standard Publication, 2012

[13] ASHRAE. Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size: ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2012 [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2012

[14] 孙扬、孟祥来、张成影等. 全国与半导体产业关键城市大气颗粒物与分子污染特征分析 [C]. 国际污染控制与洁净技术高峰论坛论文集. 苏州: 2020:12-42

[15] 涂有, 涂光备, 张鑫. 国内外通风用空气过滤器的测试、分级及比照 [J]. 暖通空调, 2015, 45(8):53-61

[16] 涂有, 涂光备. 三议 ISO 16890: 2016 标准的一些相关问题 [J]. 暖通空调, 2018, 48(10):1-7

中欧地铁站台与车厢 PM 浓度及净化措施

涂明晖¹, 涂光备²

(1. 瑞典皇家理工学院工业工程与管理学院, 斯德哥尔摩; 2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

[摘要]近年来的研究表明, 地铁系统内, 特别是地铁地下站台和车厢内部的空气颗粒物 (PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁) 浓度远高于城市颗粒物的背景浓度。由于地铁系统空气中往往含有较多重金属的颗粒物, 其生物毒性更高。本文依据近年中国与欧洲城市地铁地下站台和车厢内颗粒物浓度检测的资料等文献, 比较了中国与欧洲地铁系统中颗粒物的浓度和构成, 以及基本的空气净化措施。受城市颗粒物的背景浓度及人流、车流密度的影响, 中国地铁站台的颗粒物浓度普遍高于欧洲, 而地铁车厢内的颗粒物浓度在同一水平; 中外各城市地铁站台的颗粒物成分相似, 都以重金属元素为主; 笔者从参与检测的经验及相关文献中认识到, 在地铁系统中使用未经实地质量校正的光散射采样器, 一般存在测值的准确性问题; 本文并建议采用磁性颗粒过滤网, 及橡胶轮胎的新型列车和可变坡度的轨道系统, 以改善地铁系统空气质量和节能减排。

[关键词] 地铁站台; 地铁车厢; PM₁₀; PM_{2.5}; PM₁

0 引言

随着各国对于降低环境污染和节能减排的力度不断加强, 公共交通成为城市人们出行的普遍选择。其中, 地铁系统被认为是最清洁的交通方式之一。由于其方便快捷, 准点率高和有助于缓解地上交通拥堵的特点, 在世界绝大多数人口密集的城市均有铺设。然而, 近年来越来越多的研究表明地铁系统中, 特别是地下站台和车厢内部, 空气颗粒物浓度远高于地上城市背景颗粒物浓度。根据各国的测试所披露, 地下站台和地上 PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁ 质量浓度之比, 最高约在 8、11 和 1.3 倍左右^[1-8], 见表 1。因此, 地铁部分职工和通勤者往往暴露在高污染的空气中。

空气污染对人体健康的负面影响已被众多医学循证的研究结论所确定^[9-13]。空气中 PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁ 质量浓度与心血管疾病, 呼吸系统疾病和死亡率都有显著正相关性^[14-16]。Delfino Ralph 等人的研究表明, PM₁₀ 质量浓度的上升会导致心脏缺血风险、血压升高、心率变异性降低以及炎症和血栓形成的循环标志物的增加^[14]。Dominici 等人发现 PM_{2.5} 质量浓度每增加 10μg/m³, 心力衰竭的风险就会增加

1.28%^[15]。Hu 等人的研究发现, PM₁ 颗粒比 PM_{2.5} 或 PM₁₀ 颗粒具有更大的毒性并导致更高的死亡率^[16]。因此, 持续关注地铁系统中颗粒物浓度及其成分, 相应改进地铁系统空气净化措施很有必要。

相对于中国, 欧洲的地铁建设和研究有更长的历史。分析和比较中、欧两地地铁系统的空气污染状况和空气净化措施, 对于进一步改进我国地铁系统和推进绿色出行有借鉴意义。

1 中、欧地铁系统空气污染检测结果的对比

地铁系统内空气颗粒浓度, 因车流、人流密度以及地面环境和通风状况等, 随时间和空间而变化。这些特征使地铁系统测试结果的综合表征和比较复杂化。本文根据测量空间的不同, 将所获实地测量结果分为站台和车厢内, 以比较各地地铁系统空气质量的差异。由于各组测量使用的设备、测量环境和测量时段差别较大, 可能将影响其直接对比的精准, 因此本文也使用了地铁系统内与地上周围环境中的颗粒物浓度比率来进行间接比较。

1.1 站台空气颗粒物浓度的对比

欧洲地铁建成较早, 通风系统不完善, 相当一

表 1 国外城市地铁地下站台和地面上 PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁ 的浓度及其对比

城市	PM ₁₀ / (μg/m ³)			PM _{2.5} / (μg/m ³)			PM ₁ / (μg/m ³)		
	地下	地上	比率	地下	地上	比率	地下	地上	比率
布拉格 ^[1]	103	74	1.4	--	--	--	--	--	--
那不勒斯 ^[2]	195	25	7.8	52	5	10.4	--	--	--
斯德哥尔摩 ^[3]	470	98	4.8	260	23	11.3	--	--	--
首尔 ^[4]	359	155	2.3	129	102	1.3	--	--	--
墨西哥城 ^[5]	90	71	1.3	48	45	1.1	--	--	--
米兰 ^[6]	149	28	5.3	--	--	--	--	--	--
斯德哥尔摩 ^[7]	199	48	4.1	--	--	--	--	--	--
德黑兰 ^[8]	--	--	--	--	--	--	37	28	1.3

部分站台没有机械通风系统，而是通过列车运行过程中的活塞风和隧道中的垂直通风井被动通风换气。而且很多站台没有屏蔽门，这导致隧道内高浓度颗粒物的空气污染站台环境。国内和欧洲较新的地铁系统几乎都采用了机械通风和空调系统，以及完善的站台屏蔽门等与隧道隔离的设备。主动通风系统和屏蔽门对隧道空气污染站台的阻隔与净化作用，不少实测研究予以确认^[17-19]。为便于比较站台空气质量的差异，笔者将有无使用屏蔽门和机械通风系统的站台分类为新式站台和老式站台。欧洲老式站台的测试数据汇总于表2，中国与欧洲新式站台的数据列于表3。

从表2可以看出，老式站台的颗粒物质量浓度比地面上浓度，即比背景环境的浓度高出很多，其PM₁₀、PM_{2.5}和PM₁的平均值在190,104和41μg/m³左右。比背景环境浓度高约5.5, 6.6和1.2倍，其差异明显。

从表3可以看到，欧洲新式站台，除设施特殊

的都灵地铁的测量结果之外^[23]，欧洲新式站台PM₁₀和PM_{2.5}浓度平均约为149和65μg/m³，较老式站台有所改善。根据中国各城市的站台的测试数据，PM₁₀、PM_{2.5}和PM₁浓度平均约为201, 106和91μg/m³，高于欧洲同类站台。根据Querol等人的研究，一般地铁站台尘源，除了列车的机械磨损之外，还有城市背景颗粒渗透，通勤者从外部带入和由于行动产生的二次扬尘^[24]。中国城市地铁人流、车流密度高、背景污染浓度高，在同等的技术条件下，站台污染浓度必然高于欧洲。但由于城市背景颗粒物浓度相对较高，其地下地上浓度比率反而略低于欧洲。

笔者只收集到在上海^[27]和布拉格^[20]测量PM₁浓度的结果。建议未来进行更多站台PM₁的测量以确定此粒径下的污染物浓度，以便制定适应未来发展的地铁系统空气质量标准。

1.2 地铁车厢内测量结果的对比

与地铁站台类似的，欧洲地区地铁由于建立较

表2 欧洲地区老式地铁站台测试结果汇总

城市 (测量时间)	主要实验设备*	实地质量校正*	指标	站台浓度 / (μg/m ³)	地上浓度 / (μg/m ³)	浓度比率
布拉格 (2013) ^[20]	APS 3321	否	PM ₁₀	143-243	52	2.8-4.7
	CPC 3025		PM _{2.5}	84-132	40	2.1-3.3
	SMPS 3936		PM ₁	36-46	35	1.0-1.3
那不勒斯 (2014) ^[2]	Aerocet 531	是	PM ₁₀	172-262	255	6.9-10.5
			PM _{2.5}	45-58		9.0-11.6
波尔图 (2014) ^[21]	DustTrak 8533	是	PM _{2.5}	65-265	38	1.7-7.0
雅典 (2014) ^[21]	DustTrak 8533	是	PM _{2.5}	22-158	10	2.2-15.8
雅典 (2014-2015) ^[22]	AM510 Sidepak	是	PM ₁₀	85-230	--	--
斯德哥尔摩 (2016,2020) ^[7]	Fidas 200S	是	PM ₁₀	68-315	48	1.4-6.6
	OPS 3330 AQmesh Grimm 1.108					

* 因各测试项目所使用的PM质量浓度实验设备不同，特别是采用光散射型粉尘测试仪一类的仪表，是否根据地铁现场空气中悬浮颗粒物的成分给予了质量修正，对所报告的测试结果影响较大。为此，表中特别列出实验“主要实验设备”及“实地质量校正”两个栏目备考。

表3 中国与欧洲新式地铁站台测试结果汇总

地区	城市 (测量时间)	主要实验设备	实地质量校正	指标	站台浓度 (μg/m ³)	地上浓度 (μg/m ³)	浓度比率
中国	香港 (2013) ^[25]	OPS 3330	否	PM _{2.5}	7.5*1	--	--
	上海 (2013-2014) ^[26]	DustTrak 8533	是	PM ₁₀	63-306	82	0.8-3.7
				PM _{2.5}	17-292	62	0.3-4.7
	上海 (2014) ^[27]	AM510 Sidepak	否	PM _{2.5}	83-178	--	--
				PM ₁	60-122		
	北京 (2014,2016) ^{*2 [17]}	LD-5	否	PM ₁₀	108-124	105	1.0-1.2
PM _{2.5}				0-106	67	1.3-1.6	
北京 (2016) ^{*3 [28]}	DustTrak 8532	是	PM ₁₀	128-479	275	0.5-1.7	
			PM _{2.5}	67-278	176	0.4-1.6	
台北 (2019) ^[29]	Temtop P600	否	PM _{2.5}	75	14	5.4	
欧洲	米兰 (2012) ^[6]	Grimm 107 Con.Tec. DustMonit	是	PM ₁₀	93-205	28	3.3-7.3
	巴塞罗那 (2013,2014) ^[21]	DustTrak 8533	是	PM _{2.5}	13-154	9-22	1.4-7.0
	巴塞罗那 (2013-2015) ^[30]	HVS CAV-A/MSb	是	PM _{2.5}	33-87	--	--
	巴塞罗那 (2015,2016) ^[19]	DustTrak 8533	是	PM _{2.5}	22-80	--	--
	都灵 (2015) ^{*4 [23]}	Grimm EDM 180	是	PM ₁₀	23	26	0.9
			PM _{2.5}	16	20	0.8	

*1 使用单位颗粒密度计算浓度；*2 部分站台使用全高屏蔽门，其余站台使用全封闭屏蔽门；*3 使用全高屏蔽门；*4 使用了橡胶轮胎列车和坡度变化的轨道技术。

表 4 欧洲可开窗列车车厢测试结果汇总

城市 (测量时间)	主要实验设备	实地质量校正	指标	车厢浓度 / ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	地上浓度 / ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	浓度比率
雅典 (2011,2012) ^[31]	Lighthouse Handheld 3016 IAQ	否	PM ₁₀ PM _{2.5} PM ₁	195-440 40-100 20-35	--	--
雅典 (2014) ^[21]	DustTrak 8533	是	PM _{2.5}	78-135	10	7.8-13.5
雅典 (2014, 2015) ^[22]	DustTrak 8532	是	PM ₁₀	132-138	--	--
那不勒斯 (2014) ^[2]	Aerocet 531	是	PM ₁₀ PM _{2.5}	58-138 21-36	25 5	2.3-5.5 4.2-7.2
都灵 (2015) * ^[23]	Aerocet 531	是	PM ₁₀ PM _{2.5}	15 13	26 20	0.6 0.7

* 使用了橡胶轮胎列车和可调坡度的轨道技术。

表 5 中国与欧洲封闭式列车车厢测试结果汇总

地区	城市 (测量时间)	主要实验设备	实地质量校正	指标	车厢浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	地上浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	浓度比率
中国	香港 (2013) ^[25]	OPS 3330	否	PM _{2.5}	10	--	--
	香港 (2014) ^[35]	DustTrak 8532	是	PM _{2.5}	24-50	--	--
	天津 (2015) ^[34]	DustTrak PEM-2000-25AA	是	PM _{2.5}	63-274	87	0.7-3.1
	北京 (2014,2016) ^[17]	LD-5	否	PM ₁₀ PM _{2.5}	66-91 55-80	105 67	0.6-0.9 0.8-1.2
	台北 (2016) ^[33]	Grimm 1.108	否	PM ₁₀ PM _{2.5}	55 47	35 20	1.6 2.4
	深圳 (2018) ^[32]	DustTrak DRX 8534	否	PM ₁₀ PM _{2.5} PM ₁	25 19 17	-- 16 --	-- 1.2 --
欧洲	台北 (2019) ^[29]	Temtop P600	否	PM _{2.5}	80	14	5.7
	巴塞罗那 (2011,2012) ^[24]	Grimm 1107 DustTrak DRX	是	PM ₁₀ PM _{2.5} PM ₁	36-100 11-32 11-30	-- 21* --	-- 0.5-1.5 --
	巴塞罗那 (2013, 2014) ^[21]	DustTrak 8533	是	PM _{2.5}	19-75	9-22	2.1-3.4
	巴塞罗那 (2015,2016) ^[19]	DustTrak 8533 OPS 3330	是	PM _{2.5}	30-47	--	--
	波尔图 (2014) ^[21]	DustTrak 8533	是	PM _{2.5}	29-79	38	0.8-2.1

* 文献中使用巴塞罗那城区年均 PM_{2.5} 进行比较。

早, 至今依然有相对老式的列车运行, 这类列车的车窗可由乘客自由开关, 因此车厢密封性不强^[2, 21, 22, 31]。而中国地铁系统中运行的列车都为新式列车, 车窗完全密封并有车内空调系统^[17, 25, 29, 32-35]。为方便比较车厢污染物浓度差异, 笔者将欧洲地区测量地下可开窗列车车厢空气污染的测试结果列于表 4, 将中国和欧洲封闭式列车的测试结果列于表 5。

由表 4 可知, 除在都灵的测量结果外^[23], 可开窗列车车厢内 PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁ 浓度平均约为 184, 68 和 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。车内与地上 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 平均浓度比率大约为 3.9 和 8.2。由此可见, 可开窗列车的车厢内更易富集隧道中的颗粒物, 特别是 PM_{2.5} 颗粒物, 其浓度比率比老式站台的地下地上浓度比率更高。

从表 5 可知, 中国各城市列车车厢内 PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁ 平均浓度约为 53, 61 和 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 与地上周围环境 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度相比, 高出约 1.2 和 2.4 倍。值得注意的是, 由于在天津和香港测量

PM_{2.5} 浓度时使用了实地质量校正^[34, 35], 其浓度数值明显高于未经实地校正的测量结果, 使得计算出的平均 PM_{2.5} 浓度比平均 PM₁₀ 浓度高。在欧洲地区, 封闭式列车车厢内 PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁ 浓度平均为 68, 40 和 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右, 与地上周围环境 PM_{2.5} 浓度相比, 高出约 1.7 倍。比较中国和欧洲封闭式列车车厢颗粒物浓度可看到, 车厢内 PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁ 浓度在同一水平上。而国内城市背景颗粒物浓度较欧洲各地要高, 说明中国地铁车厢空调通风系统有较好的净化能力。比较欧洲地区可开窗式列车和封闭式列车时, 封闭式列车车厢 PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁ 浓度都明显低于前者, 而且与室外环境的浓度比率也差别明显, 说明气密性是保障车厢内空气质量的关键因素。

2 地铁空气悬浮颗粒物的构成成分和产尘的机制

为探究地铁悬浮颗粒物的发生机制, 应对地铁颗粒物的化学成分进行分析。表 6 对比并列出了中国与欧洲地铁所采集颗粒物的化学成分分析结果。

表 6 地铁空气悬浮颗粒物的构成成分测试结果汇总

地区	城市(测量时间)	颗粒主要成分	地下浓度 / (ng/m ³)	地上浓度 / (ng/m ³)	浓度比率
中国	上海 (2013-2014) ^[26]	Ba	153	2	65.8
		Fe	12377	550	22.5
		Rb	3	0.2	12.3
		Sr	7	1	10.5
		Cu	35	4	9.4
	上海 (2014) ^[27]	Fe	17105	180	95.1
		Cr	214	17	12.7
		Ba	578	73	8.0
		Mn	163	25	6.5
		Cu	71	12	5.7
	天津 (2015) ^{*1[34]}	Fe	17550	—	—
		Mg	7020	—	—
		Al	6630	—	—
		Ca	5560	—	—
		K	1640	—	—
	北京 (2016) ^{*2[28]}	Fe	507	292	1.7
Mg		650	560	1.2	
Ba		10830	9602	1.1	
Zn		6488	5758	1.1	
Na		20775	18730	1.1	
欧洲	米兰 (2012) ^[6]	Fe	61300	1280	47.9
		Cu	1610	51	31.6
		Mn	480	22	21.8
		Ni	35	3	11.7
		Br	54	5	10.8
	布拉格 (2013) ^[20]	Fe	42933	2700	15.9
		Mn	353	37	9.6
		Cu	97	13	7.3
		Mo	705	113	6.3
		Cr	53	10	5.3
	巴塞罗那 (2013,2014) ^{*3[21]}	Ba	228	4	56.9
		Mn	170	6	28.3
		Cr	22	1	21.5
		Cu	157	8	19.6
		Zn	133	56	2.4
	巴塞罗那 (2013-2015) ^[30]	Fe	19833	—	—
Ca		917	—	—	
Ba		498	—	—	
Al		317	—	—	
Mg		300	—	—	
雅典 (2014) ^{*3[21]}	Cr	140	1	140.0	
	Mn	249	2	124.5	
	Ba	88	4	22.0	
	Cu	59	3	19.7	
	Zn	148	14	10.6	
波尔图 (2014) ^{*3[21]}	Cr	21	0.2	105.0	
	Mn	293	3	97.7	
	Cu	406	9	45.1	
	Ba	55	7	7.9	
	Zn	90	32	2.8	

*1 地铁列车内颗粒物成分;

*2 使用浓度单位为 μg/g;

*3 只列举了除 Fe 之外的多数元素, Fe 占比约 53%-68%, 文献中未与地上颗粒 Fe 浓度比较。

与两个地区大气颗粒物浓度有很大差别不同的是, 各城市地铁中悬浮颗粒物的主要组成基本相同。各站台颗粒物的主要成分都为 Fe, Mn, Ba, Cu, Cr 等重金属元素, 其中 Fe 元素占比最高。与地上周围环境颗粒物成分对比可以看出, 地铁空气悬浮颗粒物存在明显的重金属元素富集, 其比率通常在 5 倍以上, 个别测试结果 Fe 元素浓度比高达 95 倍。

有关地铁列车车厢内颗粒物元素分析的文献很少, 从天津市地铁车厢颗粒物成分分析报告^[34]可

以看出, Fe 依然是车厢内颗粒物的主要组成成分, 而其余主要成分为 Mg, Al, Ca 等非重金属元素。这说明背景环境的颗粒物也是车厢内颗粒物成分的构成。

从地铁尘的重金属元素成分比例极高可以看出, 地铁系统最主要的颗粒物来源很可能是列车运行时的机械磨损。主要磨损位置是轮轨间的滚动滑动磨损^[36], 刹车系统磨损^[37]和供电系统的滑动磨损(第三轨或架空电缆)^[38]。在对不同列车部件进行针盘型摩擦机磨损试验过程中收集到的空气颗粒物进行成分分析的结果^[38-40]也符合以上推断。表 7 列举了实验室列车各部件磨损试验中空气颗粒物的成分分析结果, 其中 Fe, Mn, Cu, Cr 等重金属元素是磨损颗粒的主要成分, 这与站台和车厢内实地测量的结果相吻合。

3 光散射颗粒物采样器用于地铁系统实地测量时存在的问题

如表 2- 表 5 所示, 各测试研究中使用的测量设备都不尽相同, 并且不是所有的报告都包含对设备的实地质量校正, 而使用基于标准尘的校准系数。

表 7 列车材料磨损试验结果汇总

作者	测试材料	主要成分	质量分数 (%)
Liu 等 ^[39]	车轮 - 轨道	Fe	—
		Mn	
		Cu	
		Cr	
Abbasi 等 ^[40]	闸瓦 - 车轮	Fe	—
		Cu	
		Mn	
		Cr	
Cha 等 ^[38]	集电靴 - 第三轨	Fe	94
		Si	2
		Na	1
		S	1
		Ca	1

在使用光散射采样设备时, 采用的有效密度或校准系数的不同也会导致结果差异。在地铁中使用冲击式采样器经过校正的实验结果往往比未进行质量校正的结果数值更高, 这说明由于地铁空气悬浮颗粒物含有高比例的重金属元素, 其有效密度和折光系数与用以标定光散射粉尘仪的标准尘差别极大, 使用一般情况下得到的有效密度或校准系数不能完全真实的反映出站台颗粒的质量浓度。比如在斯德哥尔摩进行的测量^[7]中, 其使用的光散射采样器 Fidas 200S 已经过标准尘校正, 但在地铁地下站台上再次使用冲击式采样器进行质量校正时, 发现 Fidas 200S 所记录的 PM₁₀ 浓度是冲击式采样器进行称重计算的 PM₁₀ 浓度的 1/7。从表 2- 表 5 可以发现, 欧洲地区的研究几乎都包含对于测量设备的实地质量校正过

程,但国内的测量报告有关于实地校正的内容较少提及。所以,笔者建议在使用光散射采样器进行实地测量时,应同时进行质量校正。

由表4和表5可知,世界各地的随车实地测量普遍使用轻便的光散射颗粒采样器,如DustTrak系列或Grimm系列设备,因此测量结果都需要使用有效密度或校准系数进行转换,而有关车内颗粒的实际成分和直接重量测量的文献却很难看到,即便有对设备进行实地质量校正,也是在站台上完成的,而不是车厢内。Wang等人的研究^[34]是笔者收集到有关车内PM_{2.5}质量浓度检测的一篇文章,他们收集了车内颗粒样本进行了质量校正和成分研究。从其测量结果与其他提及的国内车内PM_{2.5}检测结果的比较(表5)可以看出,使用质量校正之后的结果比其他结果高三倍左右。因此,笔者建议在进行随车实地测量时,若使用光散射检测器,也应像站台测量类似使用直接重量检测进行校正。

4 结论与建议

中国各城市地铁的建设相比于欧洲地区建成较晚,中国首个建成的地铁线路是于1969年完工的北京地铁一号线,而欧洲地区的首个运营地铁是于1863年建成的伦敦地铁。因此中国地区的地铁系统普遍采用更先进的通风及空气净化系统,比如站台和隧道中的主动通风系统、站台与隧道之间的屏蔽门和车窗密封的新型列车。与此同时由于欧洲地区基础建设更新速度较慢,采用的通风策略和列车型号在各城市有新旧差别较大的情况。但欧洲部分城市测试使用的新型净化和减排技术亦可为国内地铁系统的改进和更新提供参考。现将主要结论和建议列举如下:

1)从老式及新式地下站台空气颗粒物浓度的比较(表2和表3)可知,站台屏蔽门能有效降低地下站台空气颗粒物的浓度。而站台屏蔽门一般可分为半高,全高和全封闭屏蔽门^[17],这三种屏蔽门都可以做到保护乘客安全,防止跌落站台等危险情况的发生,但其净化站台空气的效果却有差异。He等人在北京地铁系统中比较三种屏蔽门的空气净化效果可知,全封闭屏蔽门能更好的隔离隧道中污染物对站台空气质量的影响,同时,在比较北京地铁系统中使用全封闭屏蔽门站台^[17]和全高屏蔽门站台^[28]颗粒物浓度时(表3),证明全封闭屏蔽门具有更好的空气净化效果,国内新建地铁宜于普遍采用。

2)中国与欧洲封闭式列车PM₁₀,PM_{2.5}和PM₁的浓度比较可以看出,两地车厢内空气质量在同一水平上,与地面浓度的比率受城市背景空气质量影响,国内列车的浓度比率略高于欧洲地区,表明国

内列车空调通风系统的净化效果是不错的,但仍有改进的余地。

3)由于地铁系统颗粒的Fe丰度很高,而且地下污染物直接经由通风管道排入室外会导致地上空气质量下降,因此近年来也有对在地铁通风井中增加磁性过滤网的研究^[41-44]。Son等人在首尔地铁实地测试了使用磁性滤网的过滤效果^[45]。在通过双层磁性滤网之后,通风井中PM₁₀,PM_{2.5}和PM₁浓度最大下降约52%,46%和38%。Son等人在首尔地铁测试了两种磁性混合过滤网(magnet-magnet和magnet-cascade),其对地铁PM₁₀颗粒物的过滤效率可达40%和27%^[46]。笔者认为此类磁性滤网技术不仅可以在通风井中使用,而且可扩展到车厢内的空调过滤系统。从Wang等人对车厢内颗粒成分的分析可以看出,Fe同样是车内颗粒主要成分^[34]。

4)由于地铁尘重金属含量高的特性,颗粒物的有效密度和折光系数与标准尘差异很大,如果使用光散射采样设备进行颗粒物质量浓度测量往往会有较大的偏差。因此笔者建议在测量地铁尘浓度时同时使用冲击式采样器对光学采样设备进行实地质量校正。

5)Carteni等人在都灵地铁对使用橡胶轮胎和可变坡度的轨道技术的都灵地铁M1线路进行了研究^[23]。由于地铁系统中主要的颗粒物来源是列车运行时金属部件之间的磨损,在使用橡胶轮胎后,地铁系统的PM₁₀和PM_{2.5}浓度比其他欧洲普通地铁系统有明显下降(表3和表4)。站台PM₁₀和PM_{2.5}下降约89%和82%,车厢内PM₁₀和PM_{2.5}下降约90%和75%。同时,使用可变坡度的轨道使列车在进站时上坡减速、出站时下坡加速,可有效降低列车能耗。笔者建议国内地铁相关研究可考虑此类使用非金属列车部件的方向,但由于橡胶的磨损可能产生不同化学成分的颗粒,其生物毒性还有待进一步探究。而且非金属部件的磨损率往往高于金属材料,轮胎淘汰更换率也应进行评估。

5 附录

表8 文中涉及粉尘检测设备简称全称对照表

简称	全称
Aerocet 531	Met One 公司, Aerocet 531 粒子质量分析计数器
AM510 Sidepak	TSI 公司, AM510 Sidepak 个体暴露粉尘仪
APS 3321	TSI 公司, APS 3321 空气动力学粒径谱仪
AQmesh	Aqmesh 公司, Aqmesh 空气质量监测仪
Con.Tec. DustMonit	IONER 公司, DustMonit 粉尘监测仪
CPC 3025	TSI 公司, CPC 3025 凝聚式粒子计数器
DustTrak 8532	TSI 公司, DustTrak 8532 气溶胶监测仪
DustTrak 8533	TSI 公司, DustTrak 8533 气溶胶监测仪
DustTrak DRX 8534	TSI 公司, DustTrak DRX 8534 气溶胶监测仪
Fidas 200S	Palas 公司, Fidas 200S 细粉尘测量仪
Grimm 1.108	GRIMM 公司, Grimm 1.108 光学粒子计数器

续表 8 文中涉及粉尘检测设备简称全称对照表

简称	全称
Grimm 107	GRIMM 公司, Grimm 107 光学粒子计数器
Grimm EDM 180	GRIMM 公司, Grimm EDM 180 光学粒子计数器
HVS CAV-A/MSb	MVC 公司, HVS CAV-A/MSb 大容量自动采样器
LD-5	YM 公司, LD-5 PM _{2.5} 激光粉尘仪
Lighthouse Handheld 3016 IAQ	Lighthouse 公司, 手持式粒子计数器和 PM _{2.5} 测试仪器
OPS 3330	TSI 公司, OPS 3330 光学颗粒物粒径谱仪
SMPS 3936	TSI 公司, SMPS 3936 扫描电迁移率粒径谱仪
Temtop P600	Temtop 公司, Temtop P600 PM _{2.5} 、PM ₁₀ 空气质量监测器

参考文献

[1] Braniš, M., The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system. *Atmospheric Environment*, 2006,40(2): 348-356

[2] Carteni, A., F. Cascetta, and S. Campana, Underground and ground-level particulate matter concentrations in an Italian metro system. *Atmospheric Environment*, 2015,101: 328-337

[3] Johansson, C. and P.-Å. Johansson, Particulate matter in the underground of Stockholm. *Atmospheric Environment*, 2003,37(1): 3-9

[4] Kim, K.Y., et al., Spatial distribution of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul Metropolitan Subway stations. *Journal of Hazardous Materials*, 2008,154(1): 440-443

[5] Mugica-Álvarez, V., et al., Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system. *Atmospheric Environment*, 2012, 49:284-293

[6] Colombi, C., et al., Particulate matter concentrations, physical characteristics and elemental composition in the Milan underground transport system. *Atmospheric Environment*, 2013,70: 166-178

[7] Tu, M. and U. Olofsson, PM₁₀ in underground stations from different types of trains. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021,95: 102867

[8] Kord Mostafapour, F., et al., Characterizing of fine particulate matter (PM₁) on the platforms and outdoor areas of underground and surface subway stations. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2018,24(4):1016-1029

[9] Katsouyanni, K., et al., Confounding and Effect Modification in the Short-Term Effects of Ambient Particles on Total Mortality: Results from 29 European Cities within the APHEA2 Project. *Epidemiology*, 2001,12(5):521-531

[10] Medina, S., et al., Apheis: public health impact of PM₁₀ in 19 European cities. *Journal of*

Epidemiology and Community Health, 2004,58(10):831-836

[11] Yorifuji, T., et al., Health impact assessment of PM₁₀ and PM_{2.5} in 27 Southeast and East Asian cities. *Journal of occupational and environmental medicine*, 2015, 57(7):751-756

[12] Naddafi, K., et al., Health impact assessment of air pollution in megacity of Tehran, Iran. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2012,9(1): 28

[13] Barzeghar, V., et al., Long-term trend of ambient air PM₁₀, PM_{2.5}, and O₃ and their health effects in Tabriz city, Iran, during 2006–2017. *Sustainable Cities and Society*, 2020,54: 101988

[14] Delfino Ralph, J., C. Sioutas, and S. Malik, Potential Role of Ultrafine Particles in Associations between Airborne Particle Mass and Cardiovascular Health. *Environmental Health Perspectives*, 2005,113(8):934-946

[15] Dominici, F., et al., Fine Particulate Air Pollution and Hospital Admission for Cardiovascular and Respiratory Diseases. *JAMA*, 2006, 295(10): 1127-1134

[16] Hu, K., et al., Mortality burden attributable to PM₁ in Zhejiang province, China. *Environment International*, 2018, 121:515-522

[17] He, S., et al., Commuter health risk and the protective effect of three typical metro environmental control systems in Beijing, China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 62: 633-645

[18] Moreno, T., et al., Subway platform air quality: Assessing the influences of tunnel ventilation, train piston effect and station design. *Atmospheric Environment*, 2014, 92:461-468

[19] Moreno, T., et al., The effect of ventilation protocols on airborne particulate matter in subway systems. *Science of The Total Environment*, 2017,584-585:1317-1323

[20] Cusack, M., et al., Variability of aerosols and chemical composition of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ on a platform of the Prague underground metro. *Atmospheric Environment*, 2015, 118: 176-183

[21] Martins, V., et al., Characterisation of Airborne Particulate Matter in Different European Subway Systems, in *Urban Transport Systems*. 2017, BoD-Books on Demand.89

[22] Mammi-Galani, E., et al., Exposure and dose to particulate matter inside the subway system of Athens, Greece. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017,10(8):

1015-1028

[23] Carteni, A. and F. Cascetta, Particulate matter concentrations in a high-quality rubber-tired metro system: the case study of Turin in Italy. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2018,15(9): 1921-1930

[24] Querol, X., et al., Variability of levels and composition of PM10 and PM2.5 in the Barcelona metro system. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012,12(11):5055- 5076

[25] Yang, F., et al., Heterogeneity of passenger exposure to air pollutants in public transport microenvironments. *Atmospheric Environment*, 2015, 109: 42-51

[26] Zhang, X., Y. Xu, and J. Su, Temporal and spatial characteristics of particulate matters in metro stations of Shanghai, China. *Building and Environment*, 2020,179: 106956

[27] Guo, L., et al., Characteristics and chemical compositions of particulate matter collected at the selected metro stations of Shanghai, China. *Science of The Total Environment*, 2014, 496: 443-452

[28] Pan, S., et al., Analysis and interpretation of the particulate matter (PM10 and PM2.5) concentrations at the subway stations in Beijing, China. *Sustainable Cities and Society*, 2019,45: 366-377.

[29] Wang, C.-Y., et al., Identification of High Personal PM2.5 Exposure during Real Time Commuting in the Taipei Metropolitan Area. *Atmosphere*, 2021,12(3)

[30] Moreno, T., et al., Oxidative potential of subway PM2.5. *Atmospheric Environment*, 2017,148:230- 238

[31] Assimakopoulos, M.N., et al., Indoor air quality in a metropolitan area metro using fuzzy logic assessment system. *Science of The Total Environment*, 2013,449: 461-469

[32] Zhang, Y., Z. Huang, and S. Wen, Spatiotemporal variations of in-cabin particle concentrations along public transit routes, a case study in Shenzhen, China. *Building and Environment*, 2020,180: p107047

[33] Cheng, Y.-H., X.-H. Ninh, and S.-L. Yeh, Dominant Factors Influencing the Concentrations of Particulate Matters inside Train Carriages Traveling in Different Environments in the Taipei Mass Rapid Transit System. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019,19(7): 1579-1592

[34] Wang, B.-Q., et al., Concentrations, properties, and health risk of PM2.5 in the Tianjin City subway system. *Environmental Science and Pollution Research*,

2016,23(22): 22647-22657

[35] Zheng, H.-L., et al., Characteristics of PM2.5, CO2 and particle-number concentration in mass transit railway carriages in Hong Kong. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017,39(4): 739-750

[36] Abbasi, S., et al., Pin-on-disc study of the effects of railway friction modifiers on airborne wear particles from wheel-rail contacts. *Tribology International*, 2013,60: 136-139

[37] Olofsson, U., A study of airborne wear particles generated from the train traffic—Block braking simulation in a pin-on-disc machine. *Wear*, 2011,271(1-2): 86-91

[38] Cha, Y., et al., Airborne Wear Particles Generated from Conductor Rail and Collector Shoe Contact: Influence of Sliding Velocity and Particle Size. *Tribology Letters*, 2016,64(3): 40

[39] Liu, H., et al., Effect of the Sliding Velocity on the Size and Amount of Airborne Wear Particles Generated from Dry Sliding Wheel-Rail Contacts. *Tribology Letters*, 2016,63(3): 30

[40] Abbasi, S., et al., A pin-on-disc study of the rate of airborne wear particle emissions from railway braking materials. *Wear*, 2012,284-285: 18-29

[41] Hayashi, S., et al., Development of High Gradient Magnetic Separation System for a Highly Viscous Fluid. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010, 20(3): 945-948

[42] Wang, Y., et al., Removal of dust from flue gas in magnetically stabilized fluidized bed. *Particuology*, 2008,6(2): 116-119

[43] Gui, K.-t., et al., Collecting aerosol in airflow with a magnetically stabilized fluidized bed. *Journal of Environmental Sciences*, 2001,13: 497-501

[44] Jung, H.-J., et al., Chemical speciation of sizesegregated floor dusts and airborne magnetic particles collected at underground subway stations in Seoul, Korea. *Journal of Hazardous Materials*, 2012., 213-214: 331-340

[45] Son, Y.-S., et al., Removal of Particulate Matter Emitted from a Subway Tunnel Using Magnetic Filters. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(5): 2870-2876

[46] Son, Y.-S., et al., Development of a magnetic hybrid filter to reduce PM10 in a subway platform. *Journal of Hazardous Materials*, 2019,368: 197-203

疫情防控常态化背景下某城市地铁车厢内 空气品质测评研究

王学明, 朱蕾, 张留波, 郭元, 周乐

(美埃(中国)环境科技股份有限公司, 南京 211111)

[摘要] 随着交通拥堵问题的出现, 公共交通已经成为越来越多人们的出行选择, 2018年地方政府工作报告, 媒体报道公共交通出行分担率, 北京72%(仅中心城区)、成都>50%、重庆59.3%、上海50.2%, 深圳<60%。轨道交通以其自身的优点越来越受到市民青睐。在地铁成为越来越多的人选择的交通出行方式时, 人们乘坐地铁的时间也随之增长, 地铁车厢内空气质量对人体产生的不良影响逐渐引起国内外学者的广泛关注。

根据迄今资料, 国内外的地铁、公交、火车上空气过滤系统比较单一。比如, 德国火车上的空调系统, 使用的是G4型空气过滤器。然而目前飞机上的过滤系统有了大的升级, 四大航空公司所有的客机中都已配备高效微粒空气(HEPA)过滤器, 可以更好过滤空气杂质, 甚至病菌。在疫情防控常态化的背景下, 地铁车厢内的空气被更有效的净化是减小病菌病毒传播的一个关键因素。

为了更好地研究地铁内空气质量, 选取了某市轨道交通系统具有代表性的3条线路的列车车厢以及换乘车站, 对车厢、站台和站外的空气状况进行了监测研究。通过参考国内外文献以及相关资料, 选取车厢内最具有代表性的五种污染性气体二氧化碳(CO₂)、可吸入肺颗粒物(PM_{2.5})、甲醛(HCHO)、挥发性有机物(TVOC)、和微生物含量, 通过空气监测仪进行测量分析, 以期阐明地铁车厢内空气污染物时间、空间上的变化规律及其影响因素, 为制定相关的标准和规范提供一定的科学依据。

[关键词] 地铁车厢; 空气质量; 空气净化; 杀菌过滤器; 车载空气消毒机

1 地铁车厢内空气环境研究理论基础

地铁是目前大众选择的交通工具, 存在早晚上下班的高峰时期段, 一般为早7:00-9:00, 晚17:00-19:00, 在高峰期时段内地铁客流量增大, 人员更加密集, 人流量的增加会影响空气污染指标的变化。

室内空气品质的评价一般采用主观、客观及主客观相结合的评价方法^[1]。本研究主要选用量化监测的方法对地铁内空气进行研究。

本次研究分析各种污染物的监测数据, 借鉴美国、欧盟和中国环境空气质量达标要求内相关污染物的规定值^[2], 结合地铁内特殊环境条件, 选择CO₂、PM_{2.5}、甲醛、TVOC、微生物五种污染物浓度作为评价地铁内空气质量的指标。结合我国《地铁设计规范》、《室内空气质量标准》和《环境空气质量标准》中相关内容, 如表1所示, 对地铁内空

表1 监测污染物参考标准

污染参数	单位	标准限值	参照标准	备注
二氧化碳(CO ₂)	%	0.15	GB50157-2003 《地铁设计规范》	日平均值
PM _{2.5}	μg/m ³	75	GB3095-2012 《环境空气质量标准》	日平均值
甲醛	mg/m ³	0.10	GB/T18883-2002 《室内空气质量标准》	1h均值
TVOC	mg/m ³	0.6	GB/T18883-2002 《室内空气质量标准》	8h均值
菌落总数	cfu/m ³	2500	GB/T18883-2002 《室内空气质量标准》	依据仪器

气质量进行评价。由于测试条件的局限性, 在测试的过程中都是通过多次瞬时值去反映空气质量的污染程度, 与实际标准中的日平均值还是有一定的差别。

2 背景

2.1 研究方法

根据地铁轨道交通的特点, 对某城市三条客流量大的轨道交通路线(1, 2, 3号线)客流量及车厢内不同位置的CO₂浓度、PM_{2.5}浓度、甲醛浓度、TVOC浓度、微生物浓度(只测试中午和晚上)作为客观评价参数, 对不同时段地铁站台、站外、车厢内的空气状况进行全面系统的客观实地监测。

按照不同站点客流量大小和车站形式, 选择某城市地铁三条线路中A、B、C、D、E、F、G、H八个具有代表性站点, 详见表2; 在现场采样中, 根据车厢内人员的数量, 划分为3个级别, 每节车厢总人数小于等于最大乘客量的50%定为客流量小1级; 每节车厢总人数大于最大乘客量的50%且小于最大乘客量80%定义为客流量中2级; 每节车厢总人数大于等于最大乘客量的80%, 定义为客流量大3级。通过对地铁中不同站点车厢内的人流量统计如图1所示, A、E站点早、中、晚的人流量都较大; B、C、F、G、H呈现早晚人流量较大, 中午人流量较小的趋势; D早、中、晚的人流量都相对较少。

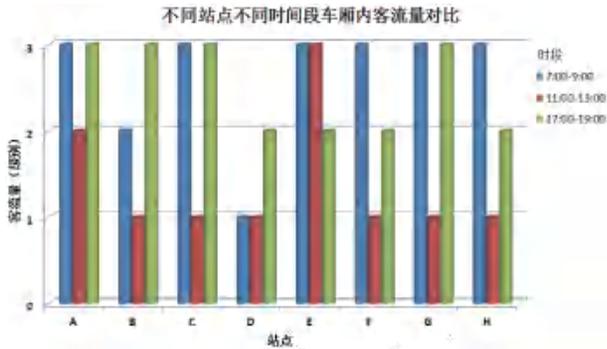


图1 不同站点不同时间段车厢内客流量对比

表2 某城市地铁测试站点

站点	测试线路	车站形式
A	1号线	地下三层岛式
B	3号线	地下二层双岛式
C	1号线	地下二层岛式
D	3号线	地下二层岛式
E	3号线	地下三层岛式
F	2号线	地下二层岛式
G	1号线	路侧高架三层侧式
H	2号线	地面二层侧式

2.2 测试仪器

测试用仪器见表3;

表3 地铁测试仪器

测试项目	仪器	型号	测试时间
温湿度、风速	温湿度/单点风速仪	Testo 405-V1	实时
PM _{2.5}	PM _{2.5} 颗粒物检测仪	TSI8532 风尘测定仪	实时
CO ₂	CO ₂ 检测仪	SIRIUS ST-501	实时
甲醛	甲醛检测仪	Formaldemeter HTV-M	实时
TVOC	TVOC检测仪	ppbRAE 3000+	实时
微生物	微生物采样	FA-1	5mim

2.3 测试时间和位置

早高峰测试时间为7:00-9:00, 平常时间测试为11:00-13:00, 晚高峰测试时间为17:00-19:00。

测试时间: 6-7月, 温度范围: 26-31℃, 相对湿度范围: 60-80%。

位置: 站外、站台、车厢, 如图2所示。



图2 地铁站外、站台、车厢的位置图

2.4 测试方法

实时采集并记录空气中CO₂、PM_{2.5}、甲醛、TVOC、微生物的浓度、温度, 同时记录采集时间内环境的人员密度等情况, 为后面分析污染物浓度变化提供一定的环境依据。

污染物气体检测标准主要有, GB 21551.3-2010

《家用和类似用途电器的抗菌、除菌、净化功能空气净化器的特殊要求》、GB 18801-2015《空气净化器标准》、GB 11737-1989《居住区大气中苯、甲苯和二甲苯卫生检验标准方法》。

车厢内的测试高度定为呼吸带高度, 站台和站外的测试高度定在1.2m^[3]。车厢中取样位置在两个开关门中间位置取样, 站台取样位置为车站站台的中间位置。

CO₂、PM_{2.5}、甲醛、TVOC都是手持式设备, 根据标准取样方法, 打开测试仪器开关, 待数据稳定后开始测试, 在测试高度的范围内实时读取1min仪器显示数据, 取样3次求平均值。

微生物是通过六级微生物撞击采样器在指定地点取样5分钟, 将取样后的培养基先密闭保存, 然后放在恒温恒湿培养箱内培养24h, 计数菌落的数量, 如图3所示。



图3 微生物采样及培养流程

3 不同位置和车厢内不同时间段污染物指标分析

3.1 不同站点不同位置和车厢内不同时间段CO₂浓度测试结果分析

人体长期吸入浓度过高的二氧化碳时, 会造成生物钟紊乱, 因为二氧化碳浓度高时能抑制呼吸中枢, 浓度特别高时对呼吸中枢还有麻痹作用, 且很容易感到大脑疲劳。针对不同站点不同位置CO₂浓度进行监测, 对8个站点的站台、车厢和站外的全天CO₂平均浓度进行分析, 如图4所示。从图中可以看出, 相比于站外和站台, 车厢内的CO₂浓度最高, 主要来源于人体呼出的气体, A和E的人流量最大CO₂浓度最高, 达到了站外浓度的2倍多, 因为H是在地上二层, D人流量小, 从数据也可以看出, 站台CO₂浓度也高于站外CO₂浓度, 为了改善车厢内CO₂浓度, 可以先通过新风系统改善站台中CO₂浓度, 使得车厢和站台中气体交换时可以减小CO₂浓度。

针对车厢内不同时段CO₂含量进行了监测, 如图5所示, 从图中可以看出中午时车厢内CO₂的浓度较低, 早晚时间段车厢内CO₂的浓度较高, 主要原因早晚高峰时间段车厢中人员流量较多, 人体排放的CO₂是车厢中CO₂的主要来源, 从数据我们可以发现, A和E这两个车站在人员高峰期的情况下, CO₂的浓度超过我国室内标准0.15%即1500ppm的范围, 其它站点CO₂的浓度都在标准范围内。

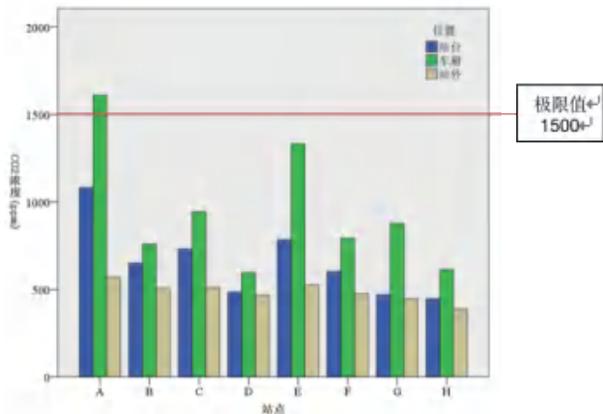


图4 不同站点不同位置 CO₂ 浓度

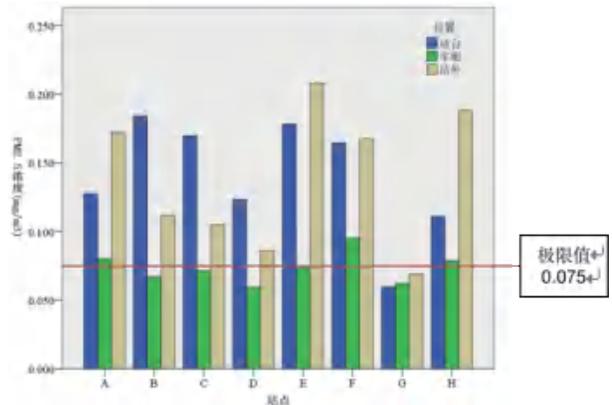


图6 不同站点不同位置 PM_{2.5} 浓度

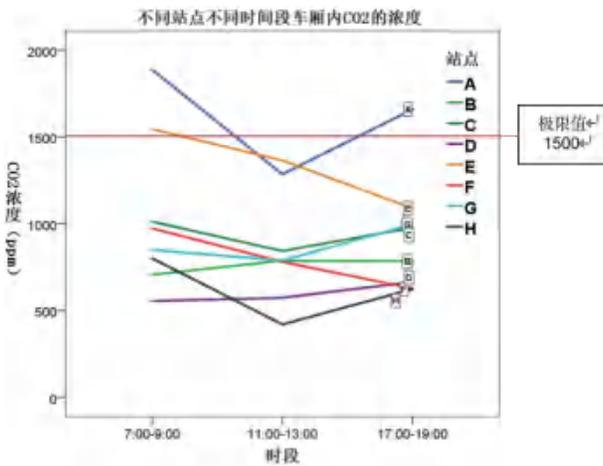


图5 不同站点不同时间段车厢内 CO₂ 的浓度

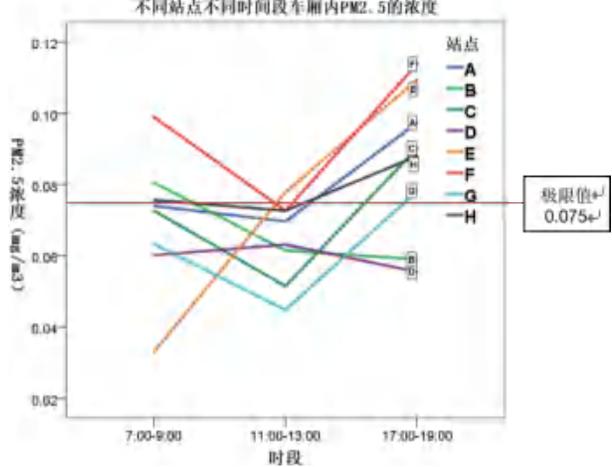


图7 不同站点不同时间段车厢内 PM_{2.5} 的浓度测试结果分析

3.2 不同站点不同位置和车厢内不同时间段 PM_{2.5} 浓度测试结果分析

PM_{2.5} 颗粒虽然在大气成分中含量并不高,但是对空气质量、人体健康等都有着极大的危害。针对不同站点不同位置 PM_{2.5} 浓度进行监测,对8个站点的站台、车厢和站外的 PM_{2.5} 浓度进行分析,如图6所示。相对于站台和站外,车厢内 PM_{2.5} 的浓度最低,主要是由于地铁车厢内有过滤系统,可以明显改善车厢内的颗粒物浓度。

对车厢内不同时段全天 PM_{2.5} 平均含量进行了监测,如图7所示,监测到不同线路上地铁车厢内 PM_{2.5} 浓度呈现早晚浓度较高,中午相对较低的规律。这是由于 PM_{2.5} 的主要来源为机动车排放、人员流动,早晚人较多,PM_{2.5} 浓度较高。而 GB 3095-2012 中规定,空气中的 PM_{2.5} 含量限值是 75μg/m³,从测试数据可以发现,地铁1,2,3号线车厢内 PM_{2.5} 含量平均值均大于这一限制,最大浓度可以达到 441μg/m³,同时可以发现,A和E的 PM_{2.5} 的浓度明显高于其它车站的。

3.3 不同站点不同位置和车厢内不同时间段甲醛浓

甲醛对眼、鼻、喉黏膜有强烈的刺激作用,会抑制细胞机能^[4],我国《室内空气质量标准》规定室内空气中甲醛的限值为 0.1mg/m³,对8个站点的站台、车厢和站外的甲醛浓度进行分析,如图8、9所示。对于站台、车厢、站外,除F和H外,其它站点甲醛的浓度相对持平,F和H甲醛浓度较高的是因为在测试周期内发现附近有修建,整体浓度都在 GB/T18883-2002 限度 0.1mg/m³ 的范围内,主要原因为地铁已运行较久,且车厢内一般不会新增建筑材料、各种黏合剂涂料等可以产生甲醛的物质。

3.4 不同站点不同位置和车厢内不同时间段 TVOC 浓度测试结果分析

TVOC 对人体健康有巨大影响,当 TVOC 达到一定浓度时,短时间内人们会感到头痛、恶心、呕吐、乏力等,严重状况下会使人体产生抽搐、昏迷的症状,而且包含很多致癌物^[5]。

针对不同站点不同位置 TVOC 浓度进行监测,如图10所示,整体来看车厢内的 TVOC 浓度较低,同时站外的浓度高于站台的浓度,站外浓度高的原

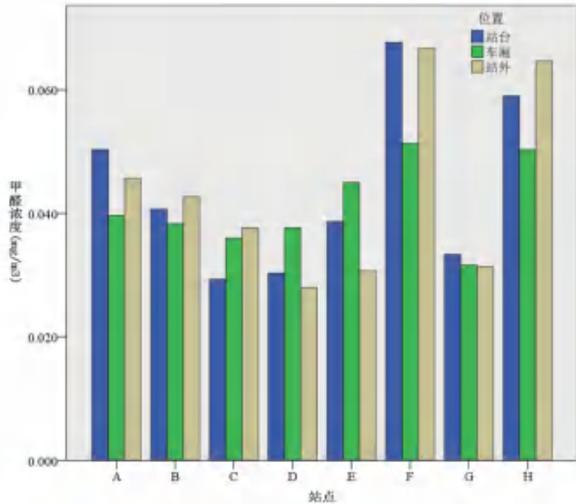


图 8 不同站点不同位置甲醛浓度

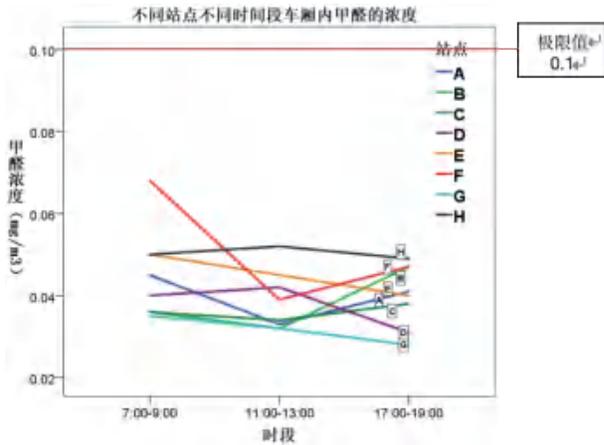


图 9 不同站点不同时间段车厢内甲醛的浓度

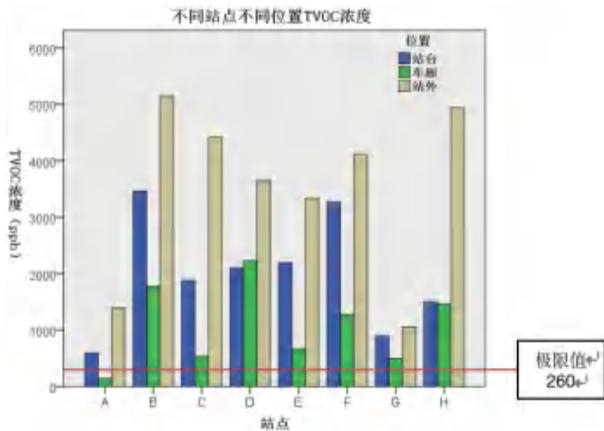


图 10 不同站点不同位置 TVOC 浓度

因主要是地铁站附近有一些地摊卖早餐、油炸食品等，车厢内浓度相对较低，主要地铁车厢内经过空气过滤。

针对不同时间段挥发性有机物含量进行了监测，如图 11 所示，监测到不同线路上地铁车厢内的挥发

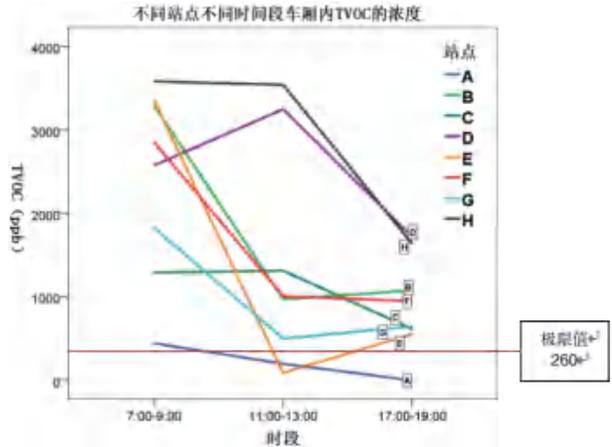


图 11 不同站点不同时间段车厢内 TVOC 的浓度

性有机物浓度大部分表现为早上较高，中午和晚上呈现下降的趋势，但是整体 TVOC 的变化规律性不强。我国室内 TVOC 含量标准限定含量低于 0.6mg/m³ 即 0.26ppm 的范围，测试中最大 TVOC 浓度达到 5ppm 左右，远远超过标准限定浓度，主要的原因手持式 TVOC 测试仪器 (PID) 是以甲苯标记，测试的过程中氨气等挥发性气体也会被记入其内，会使得整体数值相对较大，但是依然通过趋势可以反映出一定的现状。

3.5 不同站点不同位置微生物浓度测试结果分析

针对不同站点不同位置微生物浓度进行监测，如图 11 所示，我国室内微生物标准限定含量低于 2500cfu/m³ 即六级撞击式空气微生物采样菌落数低于 67cfu 的范围，整体来看车厢内微生物的浓度低于站台和站外微生物的浓度，同时可以发现 A 和 E 这两站车厢内的微生物含量较高，超过了 GB/T18883-2002 限度，其它地铁站车厢内微生物的浓度满足要求，主要因为这两站的客流量较大，人的聚集会增加微生物数量，降低空气的流通性，使得最终微生物浓度增加，地铁上开发一种杀菌过滤器，这样可以降低人流量较大的车厢内微生物浓度。

细菌数计算方法：

$$1\text{cfu}/\text{m}^3 = \frac{4500N}{A} \# T$$

式中，A—平板面积 (cm²) T—平板暴露时间 (min) N—平均菌落数 (cfu)

4 车厢内各空气污染物物的相关分析

上述对不同时间段对车厢内污染物浓度的影响和不同站点中站台-车厢-站外中污染物的浓度对比，接下来对各种空气污染物通过皮尔逊相关性也进行了一定的分析，在自然科学领域中，皮尔逊相关系数 (Pearson) 广泛用于度量两个变量之间的相关程度，其值介于 -1 与 1 之间。一般来说相关性大小要看显著性达到什么程度。显著性越小说明相关程度越高，

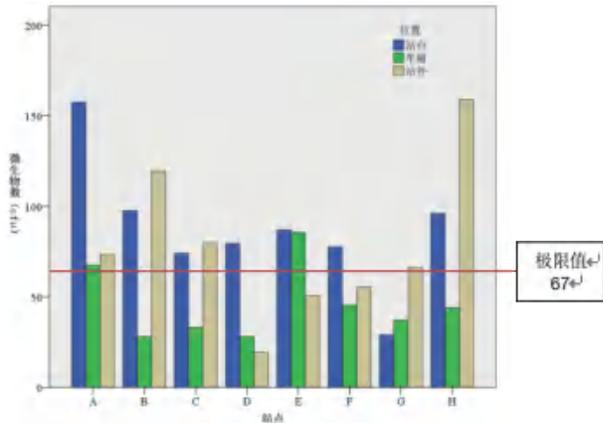


图 12 不同站点不同位置微生物数

显著性小于 0.05 则为显著先关，小于 0.01 则为极显著相关；大于 0.05 则说明不相关，或者相关性不强，也可以简单理解为不相关。N 为样本量。如果样本数据点精确的落在直线上（计算样本皮尔逊系数的情况），或者双变量分布完全在直线上（计算总体皮尔逊系数的情况），则相关系数等于 1 或 -1。皮尔逊系数是对称的： $\text{corr}(X,Y) = \text{corr}(Y,X)$

Pearson 相关系数的计算公式：

$$r = \frac{1}{N-1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x S_y}}$$

其中，r 代表相关系数，N 表示样本量， S_x 和 S_y 表示随机变量 X 和 Y 的标准差

具体分析结果见表：

表 4 地铁车厢内污染物相关分析表

		CO ₂	PM _{2.5}	甲醛	TVOC	微生物浓度
CO ₂	Pearson	1	0.094	0.018	-0.165**	-0.037
	显著性	/	0.051	0.738	0.005	0.662
	N	432	432	360	293	144
PM _{2.5}	Pearson	0.094	1	0.098	0.358**	0.219**
	显著性	0.051	/	0.064	0.000	0.008
	N	432	432	360	293	144
甲醛	Pearson	0.018	0.098	1	0.046	0.351**
	显著性	0.738	0.064	/	0.489	0.000
	N	360	360	360	231	120
TVOC	Pearson	-0.165**	0.358**	0.046	1	0.374**
	显著性	0.005	0.000	0.489	/	0.000
	N	293	293	231	293	96
微生物数	Pearson	-0.037	0.219**	0.351**	0.374**	1
	显著性	0.662	0.008	0.000	0.000	/
	N	144	144	120	96	144

** 在 0.01 级别（双尾），相关性显著

通过对某城市地铁 1, 2, 3 号线车厢内污染性气体的相关性分析发现 TVOC、CO₂、PM_{2.5} 和微生物浓度存在显著相关关系。从表 4 中可以看出，CO₂ 浓度与 TVOC 浓度之间的相关系数为 -0.165，t 检验的显著性概率为 0.005<0.01，拒绝零假设，表明两个变量之间显著相关。PM_{2.5} 浓度与 TVOC 浓度之间的相关系数为 0.358，t 检验的显著性概率为 0.000<0.01，拒绝零假设，表明两个变量之间显著

相关。TVOC 浓度与微生物浓度之间的相关系数为 0.374，t 检验的显著性概率为 0.000<0.01，拒绝零假设，表明两个变量之间显著相关。所以 TVOC、CO₂、PM_{2.5} 和微生物浓度之间存在着显著的相关性。

通过对比各污染物的相关性可以发现，车厢内各污染物浓度变化存在着一定的相关性，CO₂ 和微生物浓度的变化主要是由于人体呼出的气体，TVOC 和 PM_{2.5} 主要是由于工业生产、机动车排放导致站台污染物浓度较高，车厢与站台之间的空气循环引起，综上所述，TVOC、CO₂、PM_{2.5} 和微生物浓度基本都是通过人直接或者间接产生。

5 站台和车厢内净化设备对地铁环境改善规划

5.1 站台中净化设备

从上述的测试可以看出站台和站外 PM_{2.5} 的浓度较高，PM_{2.5} 的主要来源为工业生产、机动车排放和人员流动等，在通风不及时的情况下造成沉积，车厢内的新风主要来源于站台，所以降低站台中 PM_{2.5} 的浓度对提高车厢内空气质量起着关键的作用。车厢人流量较大的地方微生物浓度较高，主要是人体呼吸排出大量的污染物。可以通过大空间净化装置（如图 13），通过内部风机负压的工作模式，使得室内被污染的空气通过预过滤，静电过滤器，UV 灯，光催化过滤器，气态污染物过滤器的层层过滤，室内空气不断被净化，保证车厢始终维持为干净的空气。为了验证对环境的改善效果，通过在 30m³ 的环境仓中发生一定量的污染物，净化装置放在测试的条件下，测试结果如表 5 所示。根据过滤器的特点，可以将过滤器安装在站台内人员流动密集地方的送风口附近，为大环境提供洁净的空气。

表 5 大空间净化装置测试报告

参数	标准配置
甲醛 1 小时去除率 (30m ² 实验舱)	≥95%
除菌 1 小时效率	≥99.5%
臭氧增加量 (mg/m ³ lh)	≤0.1
颗粒物 CADR (m ³ /h)	850
UV 灯	L303mm, φ15



图 13 大空间净化装置原理图和示意图

5.2 车厢内净化设备

5.2.1 车厢内净化设备的开发

针对车厢内污染物浓度较高的情况，可以考虑在地铁内增加消毒机（如图 14），为了验证对环境的改善效果，通过在 30m³ 的环境仓中发生一定量的污染物，车载空气消毒机放在其中，测试结果如表

6, 根据车厢体积可以推算出一节车厢安装 3 台车载空气消毒机, 根据测试效果推算出车厢内 PM_{2.5}、TVOC 和细菌浓度基本可以降低到标准要求, 为车厢内营造洁净舒适的环境。

表 6 车载空气消毒机测试报告

型号: 车载空气净化器 尺寸(W×H×D mm): 420×320×110				
性能测试报告				
抗菌率 (%) 2h 30m ³	除 PM _{2.5} 效率 (%) 1h 30m ³	颗粒物 CADR(m ³ /h) 20min 30m ³	除甲醛效率 (%) 6h 30m ³	TOVC 去除效率 (%) 6h 30m ³
99.78	99.77	126	86.42	85.23



图 14 车载空气消毒机原理图和实物图

6 结论

通过对某城市具有代表性的 1, 2, 3 号线的 8 个车站的车厢、站台及站外在不同时间段、不同拥挤程度对空气中 CO₂、PM_{2.5}、TVOC、甲醛和微生物浓度作为监测指标进行监测。结合监测数据, 发现某城市地铁空气质量有如下结论:

(1) 通过对不同时间段各站点污染物浓度的分析, 有如下结论:

对于 CO₂ 含量, 车厢内的浓度较高, 主要来源于人体呼出的气体, 高峰期的情况下, A 和 E 地铁车厢内 CO₂ 的浓度超过我国室内标准 0.15% 即 1500ppm 的范围; 对于 PM_{2.5} 含量, 车厢内的浓度最低, 主要由于地铁车厢内有过滤系统, 地铁 1, 2, 3 号线车厢内平均值均大于 75μg/m³ 这一限制; 对于甲醛含量, 不同站点的站台、车厢、站外变化都不

明显, 在 0.1mg/m³ 的限度内, 均满足地铁内空气质量的要求; 对于微生物浓度, A 和 E 车厢内的微生物含量较高, 超过了限度 2500cfu/m³。

(2) 根据对某城市地铁内空气质量数据分析, 主要体现在 CO₂、PM_{2.5}、TVOC 和微生物的浓度这 4 方面污染物还有待提高, 可以给乘客和工作人员提供更好的空气质量。

(3) 站台和车厢内净化设备对地铁环境改善规划, 可以通过净化机和空气消毒机等, 减少粒子污染洁净环境的机会, 为车厢和站台内营造洁净舒适的环境。

7 展望

对地铁环境进行空气品质分析与研究的根本目的是保护乘客与工作人员的健康与舒适, 提高人们的生活质量。针对车厢中 PM_{2.5} 颗粒、微生物、TVOC 的污染物高于标准限定的浓度, 可以考虑在地铁车厢内加入消毒机及站台内增加净化机, 减少细菌、病毒传染, 让空气质量有一个显著的改善。

总之, 本研究可作为我国其他城市地铁车厢内空气品质研究的参考, 后面的研究可以进一步探讨空气净化器的引入对地铁车厢内各种污染物的净化效果, 建立全面的城市轨道交通空气净化体系, 为乘客和工作人员提供健康、舒适的环境。

参考文献

- [1] 樊振国. 室内自然通风模拟分析及评价 [D]. 天津: 天津大学, 2007
- [2] 钱一晨, 金晶. 典型国家和国际环境空气质量标准对比研究 [J]. 能源研究与信息, 2013, 29(002):67-73
- [3] 刘冰玉. 地铁车厢环境空气质量研究 [D]. 北京: 北京市市政工程研究院, 2013
- [4] 王玮, 马俊杰. 甲醛暴露影响的研究报告 [J]. 环境科学与管理, 1995
- [5] 赵义湘. 什么是 VOC [J]. 建筑工人, 2003, 02:50-50

空调室内末端与净化机组的上送下回气流分析

张燕¹, 周乐¹, 陈玲¹, 沈晋明², 刘燕敏²

(1. 美埃(中国)环境科技股份有限公司, 南京 211111; 2. 同济大学, 上海 200092)

[摘要]从传统的设计思路来说, 空调室内末端实现上送下回气流分布, 需要一个系统。不像传统上送上回、下送下回的气流分布仅靠一台单元式空调器组可以实现。目前风机盘管/多联机/分体空调等单元式空调器无论气流分布或内置的空气过滤器是无法满足防疫的要求, 可能成为病毒空气传播的推手。本文借用计算流体力学 CFD 仿真诠释了上送下回气流组织对于降低气溶胶扩散的重要性。为此针对性地研发了可上送下回的单元式室内空气净化机组, 经检测达到了设计要求, 并通过实施现场的考核。

[关键词] 空调系统; 室内末端; 循环机组; 上送下回; 净化机组

1 引言

由于德尔塔变异株的病毒载量高, 体内复制快, 人体呼出气体毒性大, 传染性明显增强, 传播速度更快, 使得德尔塔变异株空气传播风险增大。病毒一旦空气传播就难以防范, 令人担忧, 降低病毒空气传播风险应是当务之急。防范病毒空气传播的最有效方法理应是加强个人防护。在公众号“防控新型冠状病毒的对策应合理、合适、合规”(2020-1-30)就强调戴口罩、手消毒和社交距离重要性, 而不是停开空调或全新风空调。但这仅仅是被动的防护措施!

如果从另一个角度去思考, 病毒空气传播必须在一定条件下才能长时浮游并聚集起感染剂量, 那用工程措施主动地破坏病毒生成空气传播的条件, 就可以有效避免产生病毒空气传播, 这才是最简效方法。为此借鉴 GB51039-2014《综合医院建筑设计规范》控制原则, 在公众号“理性认识空调, 尽快实现复工复产的安全生产环境”(2020-2-22)提出的工程措施除了合规的新风量, 更应重视“合适的回风过滤器与合理的气流分布”。

在我国绝大多数公共建筑, 包括医疗建筑(除了关键科室)多为风机盘管/多联机/分体空调等单元式空调器。由于体积小、管道占建筑空间少、可以十分灵活地按层、分区、分时控制, 能自室独立调节, 被广泛应用。但是空调器单元式, 体积小, 却包含热湿处理、输送、自控等部件。加上室内低噪声的要求, 内置风机压头不高, 送回风口在一个单元内, 在回风口常配置效率较低的空气过滤器。要么吊装在室内上部送风, 上部回风, 形成了上送上回的气流分布(见图1)。要么在室内置地安装下部送风, 下部回风, 形成了下送下回的气流分布。其中采用的最多是吊装式。但在这次新冠病毒(见图2)疫情中暴露出许多上送上回、下送下回的风机盘管/多联机组的感染案例了。上送上回、下送

下回的气流分布会使飞沫不易沉降, 向上飘移, 增加飘移距离与时间, 不断促使飞沫液滴蒸发, 飞沫粒径变小, 病毒有可能穿过室内机内置的滤网, 进入室内机。室内机不能良好过滤除菌, 室内机不断循环室内空气也不可能减少室内病毒数。还会出现较强的水平横向气流, 增强人与人之间的气流直接流动, 加大了病毒空气传播感染的风险。即使全新风, 气流分布不合理, 也无法避免室内人员近距离传播。2020年初在广州某餐厅发生的一起 COVID-19 聚集性感染案例。研究表明是由空调气流引起液滴传播的主要原因, 使得就餐的3个家庭中10人被感染, 感染关键因素是横向的气流。引起人们对常规的风机盘管/多联机的上送上回气流的高度警惕。可见我国传统的风机盘管/多联机/分体空调等单元式空调器已经成为我国疫情防控的痛点!

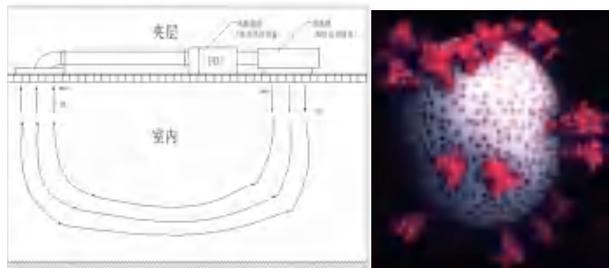


图1传统空调室内末端上送上回的气流分布图 图2新冠病毒

2 室内风机盘管循环机组改造上送下回气流净化机组

2.1 非医疗关键科室的空调室内末端改造上送下回气流净化的必要性

2020年疫情初国务院联防联控机制综合组颁布的《新冠肺炎流行期间办公场所和公共场所空调通风系统运行管理指南》给出了意见, 相关学会、协会、地方政府也出台了相关指南。这些指南基本原则一致, 即:

- 1) 停止使用不带新风集中式空调系统。
- 2) 有新风的集中式空调系统应采用全新风运行,

关闭系统所有的回风口,同时开启相应的排风系统,并适当开启外窗以确保通风有效性。

3) 有新风供给的风机盘管机组 / 多联机空调 / 分体式空调,使用过程中,新风空调系统应全部投入正常运行,同时应开启相应的机械排风系统;有可开启外窗的房间应使外窗保持一定的开度,尽可能地引入室外新风。

4) 无新风供给的风机盘管机组 / 多联机空调 / 分体式空调,使用过程中,有可开启外窗的房间要保持外窗一定的开度,尽可能地引入室外新风。

没有必要不顾能耗实施全新风运行。合规的新风量能够满足室内卫生要求,加上合适的回风过滤器与合理的气流分布是破坏病毒生成空气传播条件的有力工程措施。合适的回风过滤器在我国 GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》第 7.1.11 就规定“集中式空调系统和风机盘管机组的回风口必须设初阻力小于 50Pa、微生物一次通过率不大于 10% 和颗粒物一次计重通过率不大于 5% 的过滤设备”。或者,美国 ASHRAE 推荐的不低于 MERV13 空气过滤器。空气过滤器阻力不大而且可以除去大部分的病毒。至于合理的气流分布,具体表现为排除污染物(致病菌)效率高:

- ①抑制局部传染源不扩散到全室;
- ②尽快地将悬浮菌就地沉降;
- ③不让沉降菌再次起浮成为悬浮菌;
- ④送风尽快进入人的呼吸区域,致病菌尽早排出。

按照以上原则,当然在室内能做到“定向气流”是最好的,就像室内的气流组织。一般场所能在室内实现上送下回气流(见图 3)是可以满足这些要求。万一室内出现感染者,病毒一旦呼出,上送下回气流就会尽快让它就地沉降、阻断传播,经回风过滤器有效去除病毒,再进入空调器。如此循环,这样病毒无法聚集,也无法浮游在空中,在室内难以形

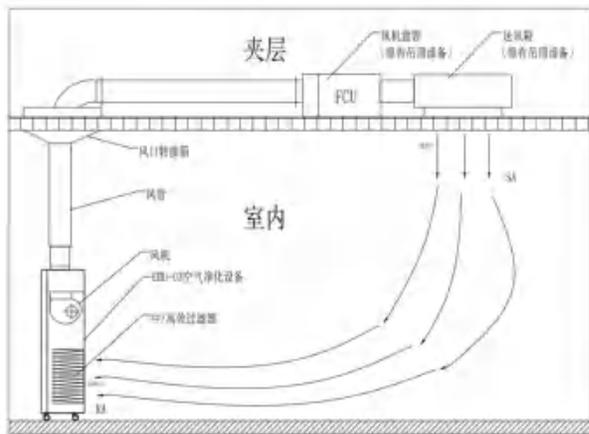


图 3 空调室内末端改造上送下回气流

成气云。加上源源不断的合规新风量送入,稀释室内空气。这样就破坏了病毒生成空气传播的条件。

2.2 医疗关键科室的空调室内末端改造上送下回气流净化的必要性

为降低全新风直流的负压隔离病房运行费用,国内外标准、指南或规范都允许在一般负压隔离病房室内设置循环机组,以减少送入新风量。要求的室内空气的流动必须保持定向性,从病房的一侧送出洁净空气,经患者从另一侧的回风口吸入。病房密闭时为负压,换气次数不低于 12 次/h(其中新风 2 次/h),我国《医院洁净护理与隔离单元技术标准》第 6.4.2 明确规定“负压隔离单元通风空调系统应符合下列规定:1)当专设危重症隔离病房时,应采用全新风系统。2)负压隔离病房可设带循环风的净化空调系统,每间病房的回风应仅在该病房内循环。3)各病房应设独立排风。4)新风宜集中供应。”

表 1 中日美室内的最低换气次数和室压差比较

条件	中国 GBT35248- 2017	日本 HEAS- 02-2013	美国 ASHRAE 170-2017	美国 CDC2007 Guideline for Isolation Precautions	
				既有病房	新建病房
最小换气 次数 (/	2	2	2	-	-
ACH) 室内循环 风换气 次数	10~15	12	12	6	12
与邻近室压差 (Pa)	-5	-2.5	-2.5	-	-

2.3 仿真模型

本次上送下回气流净化机组(简称 RHU)及其参数及配件如图 4 所示。

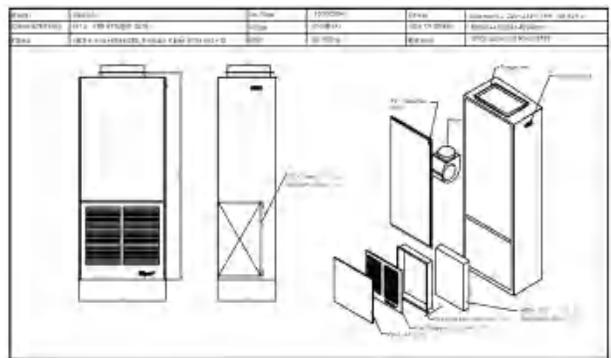


图 4 RHU 设备及配件说明

本仿真模型设置参数为:房间尺寸 5(L)x5(W)x2.7(H)m, SA 上送风口尺寸 0.6x0.6m, RA 上回风口尺寸 0.6x0.6m,改造 RA 下回风口尺寸 0.4x0.5m,总送风量 1000m³/h,换气次数 15 次/h。依据 GB/T 51039《综合医院建筑设计规范》用于医院类病房面积不小于 12m²,且高度在 2.6m~3m 之间。本次选定办公区面积为 25 m²,房间高度 2.7m。仿真模型的

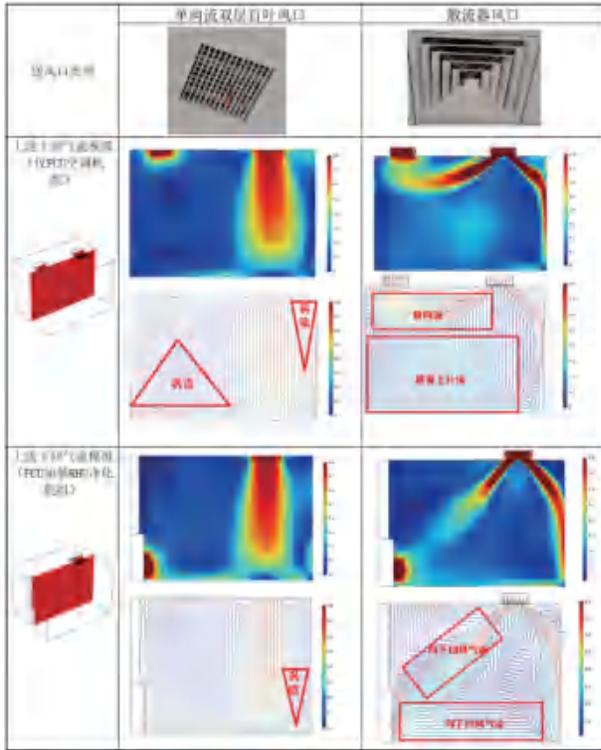
变化参数为有/无上送下回气流净化机组变化。

2.4 CFD 模拟结果分析与实地综合参数测试

2.4.1 CFD 模拟

本次气流模拟设定在两类送风口下，分别是隔离病房采用的单向双层百叶风口（叶片均为 90 度垂直地面向下），以及普通病房采用的散流风口（叶片倾斜角为 30 度），主要对比分析空调室内末端传统上送上回气流与采用 RHU 后的上送下回气流的模型状态，如表 2 所示。

表 2 上送上回与上送下回 CFD 气流模拟



从以上设定的两大类系统装置模拟的速度云图和气流流向图来看，无论是单向双层百叶风口还是散流器百叶风口，传统的上送上回系统装置中的气流有局部较大面的涡流和空间横向流、地面上升流，存在浮游菌在房间内蓄积扩散，以及沉降菌再次起浮成为悬浮菌，大量致病传染源停留在中部空间层的现象，易被人群接触和吸收从而感染病毒等。而从空调室内末端改造上送下回气流净化机组的速度云图和气流流向图来看，定向回流区域广，如带有病毒的气溶胶一旦呼出，上送下回系统就会尽快将悬浮菌就地沉降、阻断传播，并经回风机组内过滤器净化过滤，再进入空调循环机组，同时上部重新送出洁净后的空气到室内，大大减少了人群呼吸道感染范围。

2.4.2 现场机组参数测试

实地被测环境为办公区（见图 5），尺寸为 5(L)×5(W)×2.7(H)m，温度 25°C，湿度 46%RH，对空调室内末端使用 RHU 改造下回风气流（见图 6）进行风量、噪声、功耗电流测试，结果如表 3 所示。



图 5 实地测试办公区 图 6 空调室内末端改造下回风气流净化机组

表 3 综合参数测试数据

测试项目	高档	中档	低档	隔离病房要求
RHU+ 空调室内末端总风量, CMH	1309	1282	1014	1000
功耗 W	411	285	97	
电流 A	3	2.1	0.74	
各档噪声 dB (A)	61.5	58.7	49.3	≤50

3 室内菌浓测试

3.1 测试条件

按照《空气消毒机通用卫生要求》（WS/T 648-2019）和《医药工业洁净室（区）沉降菌的测试方法》（GB/T 16294-2010）进行室内沉降菌和浮游菌现场测试，浮游菌和沉降菌测点布置如图 8 所示，浮游菌采用六级筛孔撞击式空气微生物采样器（FA-1）如图 7（28.3L/min）室内 4 点（见图 8 的③⑤⑦⑨点）进行 5min 采样（见图 9）；沉降菌室内 9 点采集 30min 后在 37°C 的培养箱中培养 48h，采用菌落计数仪计数。测试期间室内有 2 位办公人员按常规办公。

分别按 FCU 和 RHU 如下三种不同运行工况进行比较测试：

a. FCU 和 RHU 停机

b. FCU 开机，RHU 停机（室内空调上送上回气流组织）

c. FCU 和 RHU 开机（室内空调上送下回气流组织）

3.2 测试结果

上述 FCU 和 RHU 三种不同运行工况下，通过



图7 六级筛孔撞击式微生物空气采样器

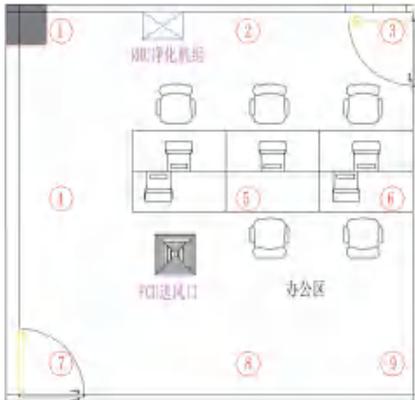


图8 菌布点位置图



图9 浮游菌测试

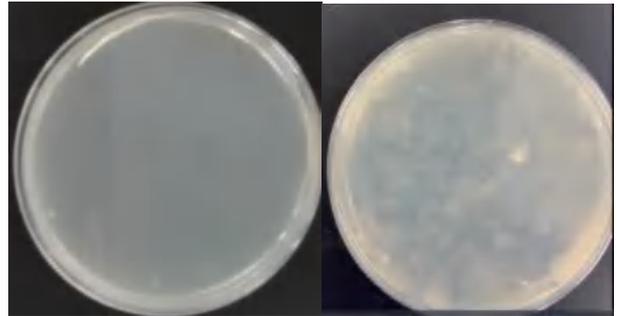


图10 测试前/后营养琼脂培养基

图10 测试前/后营养琼脂培养基计算 cfu 菌落数后，室内沉降菌数和浮游菌数如表4和表5所示。

分析上述 FCU 和 RHU 三种不同运行工况形成室内不同气流组织下的室内含菌浓度，其中工况 a 与 b 的室内菌浓差别不明显，甚至开启 FCU 后室内部分区域的菌浓有所增加，说明现有的上送上回的 FCU 空调末端对降低室内菌浓效果不明显，甚至会使得室内部分区域的菌浓不降反升；比较工况 c 与工况 b，室内沉降菌及浮游菌平均下降分别为 66.7% 和 85.5%，表明加装下回风气流净化机组 RHU 后形成室内空调上送下回气流组织，可显著降低室内菌浓分布，改善室内空气品质。

4 结语

新冠传染性强，容易出现无症状感染，经常出现变异，而且体内产生中和抗体的半衰期时间短，人畜共患，这些特性使新冠病毒几乎不可能从自然界完全消灭，新冠病毒变异可能成为常态。疫情防控是一项长期任务，本文采用净化机组将传统空调室内风机盘管机组改造为上送下回气流方式，可破坏病毒空气传播的条件。消除病毒空气传播的解决方案不是临时措施，而是关乎疫情防控的关键。

除此以外，本研发的净化机组还可以客制化定制：

- 结合工程项目需求，可开发多种尺寸规格的机组
- 与现场装潢协调，可制作不同外观造型的机组

表4 室内沉降菌数与比较

工况	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	平均值
工况 a	18	17	26	13	23	20	15	16	17	18.3
工况 b	13	15	18	15	24	21	11	13	14	16.0
工况 c	6	13	3	6	6	3	2	5	2	5.1
b 与 a 菌浓下降率 (%)	27.8	11.8	30.8	-15.4	-4.4	-5.0	26.7	18.8	17.7	12.1
c 与 a 菌浓下降率 (%)	66.7	23.5	88.5	53.9	73.9	85.0	86.7	68.8	88.2	70.6
c 与 b 菌浓下降率 (%)	53.9	13.3	83.3	60.0	75.0	85.7	81.8	61.5	85.7	66.7

表 5 室内浮游菌数与比较

工况	③	⑤	⑦	⑨	平均值
工况 a	208	290	256	308	265.5
工况 b	243	269	233	279	256.0
工况 c	35	87	16	12	37.5
b 与 a 菌浓下降率 (%)	-16.8	7.2	9.0	9.4	2.2
c 与 a 菌浓下降率 (%)	83.2	70.0	93.8	96.1	85.8
c 与 b 菌浓下降率 (%)	85.6	67.7	93.1	95.7	85.5

• 依据现场空调室内末端管道阻力不同及换气次数的需求，配置多种风量压头机组

• 多种过滤器选型：

介质过滤器：初效过滤器，中效过滤器，高效过滤器；

杀菌抗病毒过滤器：银离子杀菌过滤器，铜银离子抗病毒过滤器；

其他杀菌器：UV 紫外杀菌灯，等离子杀菌器；

复合过滤器：除异味 VOC 过滤器，除甲醛过滤器；

• 控制系统：单台手动调速，多台远程群控，

云系统监控等

本研发的净化机组除了应用在医院隔离病房，还可以广泛用于公共建筑，如餐馆、茶室、咖啡店、商店、会议室、办公室等场所。

参考文献

[1] 沈晋明, 刘燕敏. 当务之: 降低病毒生成空气传播的风险. <https://mp.weixin.qq.com/s/2BWJRf0fwB4lh8ho2D1Ag>

[2] 沈晋明, 刘燕敏. 新冠病毒到底会通过空调系统传播吗? <https://www.jianzhuj.cn/news/43101.html>

基于计算流体力学的实验室气流组织及污染物分布分析

汤毅¹，李浩²，曹晓程¹，潘曦³，伊伟奇²

(1. 上海市安装工程集团有限公司，上海 200080；2. 上海理工大学，上海 200093；
3. 上海建工集团工程研究总院，上海 201114；)

[摘要] 微纳实验室对温湿度、洁净度和压力有一定要求，本文基于某实验平台在机电安装工程开展前开展设计工况下的仿真模拟，分析了最不利设计工况下的室内各截面温度、湿度、气流速度和压力场分布，同时分析了操作人员产生的颗粒物和运行轨迹。本文研究的结论对实验室的深化设计提供借鉴和指导。

[关键词] 微纳实验室；气流组织；温度场；污染物；仿真

微纳实验室（全称“先进微纳加工与测试平台净化实验室”）是展开光学设计、超精密加工和微纳制造、生物医疗研发、聚集离子束加工技术等方面研究的试验平台，室内应具备一定的洁净度、恒温恒湿以及抗振动要求，故暖通系统的各项设计参数十分关键。本文拟在某大学微纳实验室机电安装工程开展前，参考以往建设经验^[1-3]利用数字化技术针对微纳平台中电子束曝光区（最严格要求区域）开展仿真模拟，从而得到设计工况下的室内温度、湿度、流速及压力分布，为后续深化设计相关参数的改进提供指导借鉴。

电子束曝光区室尺寸为7.45m×6.56m×3m，见图1。室内摆放两台电子束曝光设备，设备尺寸2.1m×1.6m×2.3m；每台电子曝光设备配有一个减振台，减振台尺寸0.902m×1.102m×0.152m，其中电子束曝光设备为室内主要的热源。

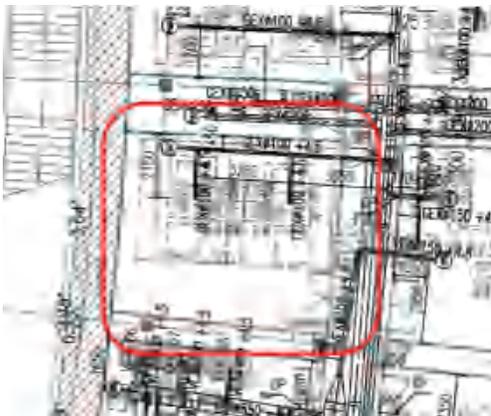


图1 模拟计算区域平面图

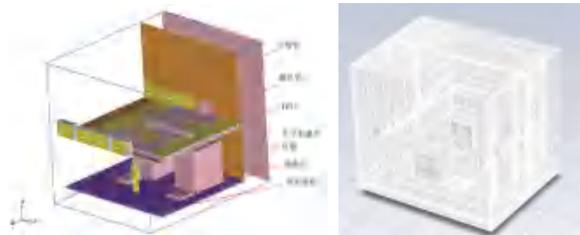
室内采用FFU（风机过滤单元）+DCC（干冷却盘管）+MAU（新风处理机组）的空调形式，循

环风经高架地板通过回风夹道和干盘管回到吊顶空间，再由吊顶空间经风机过滤单元进入室内。其中循环总风量为10000m³/h，FFU单台尺寸为1200mm×1200mm，共25台，安装高度为3m。DCC尺寸为1200mm×800mm，共8台。新风送至吊顶空间内，新风管距高架地板地面3.7m，有两个100mm×300mm的风口送风。

1 模拟计算说明

1.1 模拟计算用物理模型

根据设计图纸及相关资料建立建筑模型，见图2（a）所示。为了模拟室内颗粒物的扩散，在模型内设置1人作为颗粒物释放源。通常情况下，对于流场内的物理参数重点分析的是某一特定区域以及特定的值，在划分网格的过程中，可以对空间内的重点区域进行网格加密，这样得出数据更加精确以及接近真实变化情况。本项目采用六面体结构化网格，总计生成85万余个网格，见图2（b）所示。



(a) 整体模型图 (b) 模型全局网格图

图2 电子束曝光区室模拟模型及网格布置

为便于分析模拟计算结果，选取几个典型平面作为研究对象。见图3所示，y-0.8为高架地板上0.8m高度水平面；y-1.5为高架地板上1.5m高度水平面；x-2.55为距西墙2.55m的垂直面。通过这些剖面上的温度、速度、分布来分析模拟计算结果。

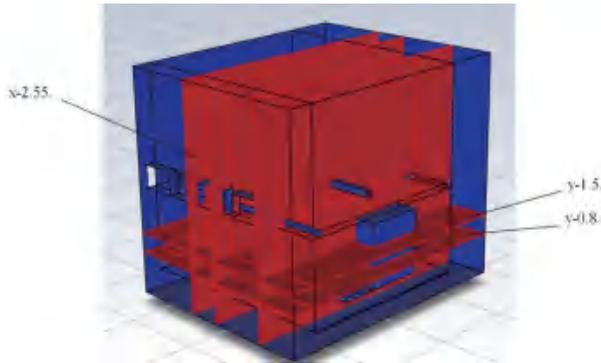


图3 模拟分析测线与测点位置分布

1.2 边界条件的设置

在仿真模型中，根据设计建议 FFU 的出风口单台风量为 $2000\text{m}^3/\text{h}$ ，进风口采用的边界条件类型为“recirculation inlet”和“recirculation outlet”，尺寸为 $1200\text{mm}\times 1200\text{mm}$ ，单台风量为 $2000\text{m}^3/\text{h}$ ；新风口尺寸为 $100\text{mm}\times 300\text{mm}$ ，风速为 1.5m/s ，送风温度为 18°C ，两个新风口采用的边界条件类型为速度进口。DCC 尺寸为 $1200\text{mm}\times 800\text{mm}$ ，采用压力出口边界条件，出口压力值设为“ 0Pa ”，风量由软件自动计算得到，出风温度为 18°C 。由于设计暂未提供设备的发热量，根据空调系统原理图上的房间冷负荷为 40kW ，因此在模拟中考虑最不利工况，选择 40kW 作为设备散热量。

本次模拟以计算区域长度方向中心剖面平均速度值作为计算结果收敛判定条件。模拟计算中还作了如下假设：

- 1) 忽略计算区域围护结构上门窗缝隙渗透风的影响；
- 2) 根据文献参考，室内颗粒物释放源为室内人员，释放颗粒粒径为 $0.5\mu\text{m}$ ，释放量假定为每人身穿全套型洁净服步行状态时发生的产尘量 $56000\text{pc}/\text{min}^{[4]}$ ；

3) 由于无法模拟颗粒通过干盘管时的运动情况，在计算中颗粒物碰撞到干盘管即认为该颗粒物被捕集，中止计算该颗粒物轨迹；

4) FFU 送风中无颗粒物存在；

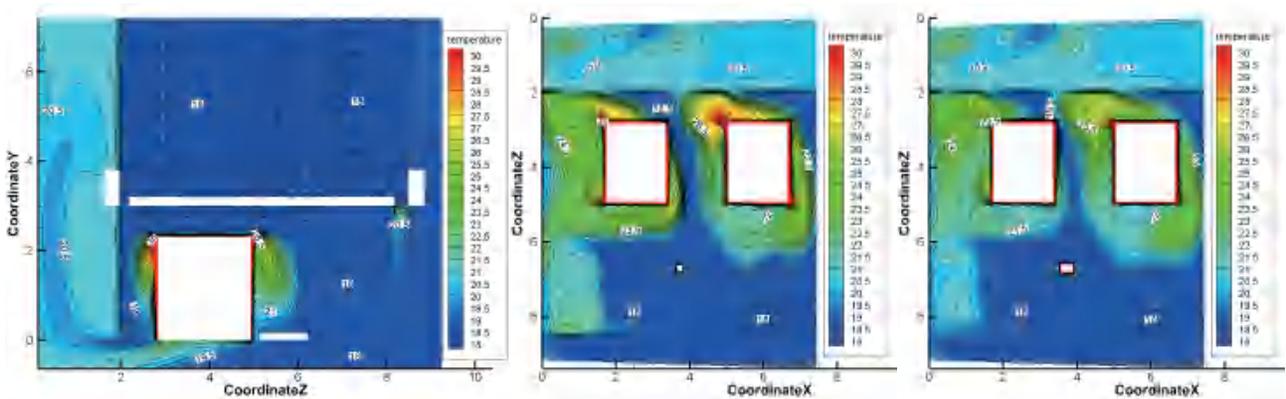
5) 由于模拟区域处于建筑的内区，因此，模拟计算中忽略了壁面的传热。

2 室内温湿度、压力场及颗粒物分布的模拟分析与研究

2.1 室内温度场分布

图4为设计工况下各剖面温度分布。可以看出，在室内仅1人，设备发热量 40kW 的情况下，电子束曝光区室内送风温度为 18°C 时，电子束曝光区室大部分区域的温度在 $18\sim 24^\circ\text{C}$ 范围内，其中在电子束曝光设备附近，由于设备运行产生大量热量，温度较高，在 $26\sim 30^\circ\text{C}$ 左右，其他区域保持在和送风同样的温度，故在设计工况下，仿真得出的模拟效果预测设备散热未影响房间内的主要温度场分布。具体表现为在设备前方 1.5m 左右时，设备发热量对室内温度的影响几近消失。另外，由于西侧区域顶部未布置 FFU，该区域温度明显较高（见图4(a)），约为 21°C 左右，稍高于送风温度。本次模拟中对于设备的形状进行了简化，将设备的发热设置在了设备外表面，并且为设置最不利工况，仿真中设置的设备发热量为 40kW 远高于设备的实际功率值，导致了设备表面温度较高。而实际运行条件下一般不会达到这么高的表面温度。

对比 1.5m 高度和 0.8m 高度的温度分布（见图4(b)和4(c)），可以发现设备周围温度较高的区域主要出现在设备上部，设备和后侧墙间温度相对也略高于其它区域。因此，建议将设备和侧墙以及设备间的距离适当增大，这样更有利于设备的散热，提高空调系统的降温效果。另一方面，目前的 FFU 送风速度为 0.386m/s ，参考产品说明和设计说



(a) x-2.55 截面温度分布

(b) y-0.8 截面温度分布

(c) y-1.5 截面温度分布

图4 室内各截面温度场分布

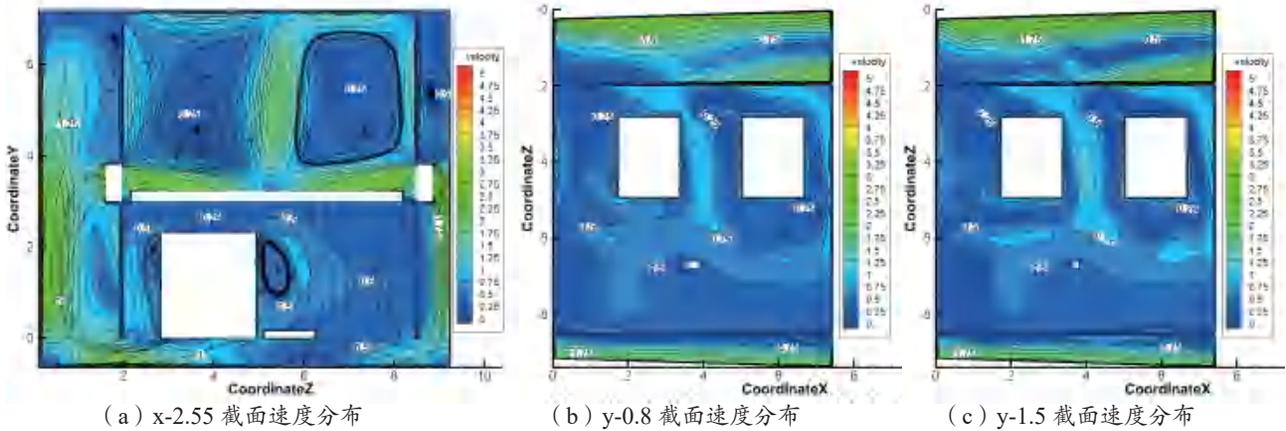


图5 室内各截面速度场分布

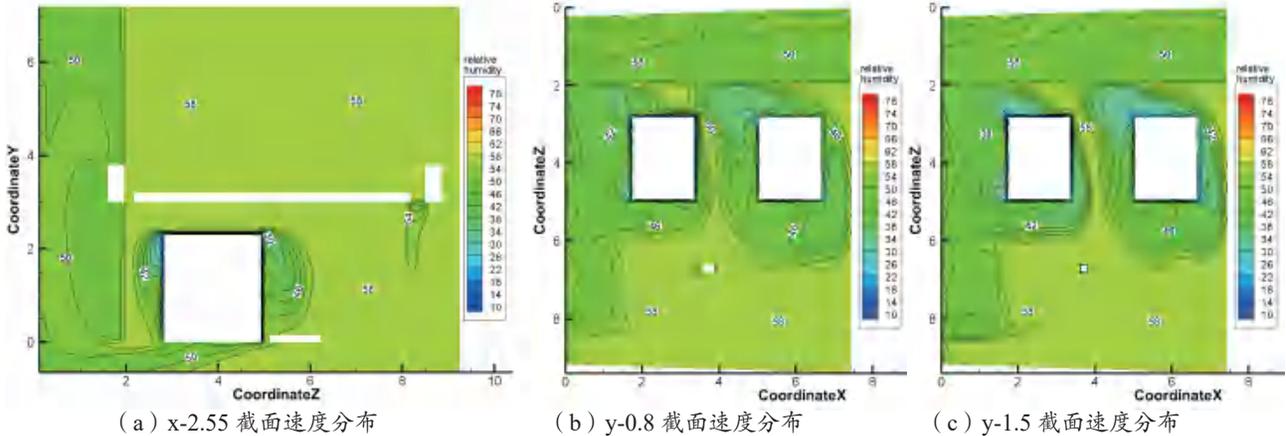


图6 室内各截面湿度场分布

明后留有一定余量，可以适当加大FFU的送风速度，来达到这一效果，但该方法相对来说会加大FFU能耗，不太节能。

2.2 室内速度场分布

设计最不利工况下各剖面速度分布见图5。可以发现，除回风夹道风速较大，可达0.75~2.5m/s外，室内大部分区域风速基本都在0.25~0.5m/s范围内。在设备附近由于设备的阻挡及发热，形成了涡流区，其它区域流线平行度较好，洁净室内的气流平行度是影响气流组织和空气龄的关键，涡流的形成会导致室内灰尘和污物无法及时排出，而实验室内过大的气流速度（超过0.5m/s）则会影响实验的精度和操作人员的舒适性。仿真的预测结果进一步揭示了西侧区域布置FFU的必要性。

2.3 室内湿度场和压力分布

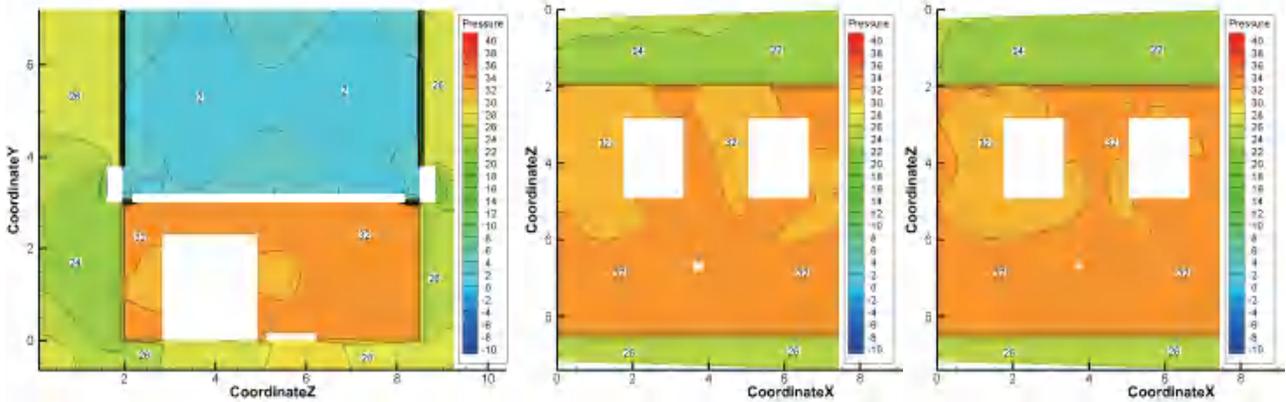
实验室内各剖面湿度场分布效果见图6。可以看出，由于设备的发热，在设备周围相对湿度较低，在36%~46%之间，其它区域相对湿度稳定在58%左右，在设备前方1.5m处，设备发热量对湿度的影

响几乎消失。仿真结果显示室内湿度场分布基本满足设计要求，与温度场相同，相对湿度场受FFU送风影响较明显，室内大部分区域的相对湿度都接近送风的相对湿度，较低的相对湿度有利于防止室内结露以及金属生锈。

室内各截面的压力场见图7，在电子束曝光区内都保持32Pa的正压（注：模拟中设定干盘管的出口压力为0Pa，因此32Pa是相对于干盘管出口为32Pa，并非洁净室与相邻房间的压差，该值其实是模拟计算出的整个空气回路，包括架空地板、回风道、干盘管等的总阻力），送风静压箱内维持2Pa的正压，回风夹道内约为24~26Pa，各区域压差较为稳定。

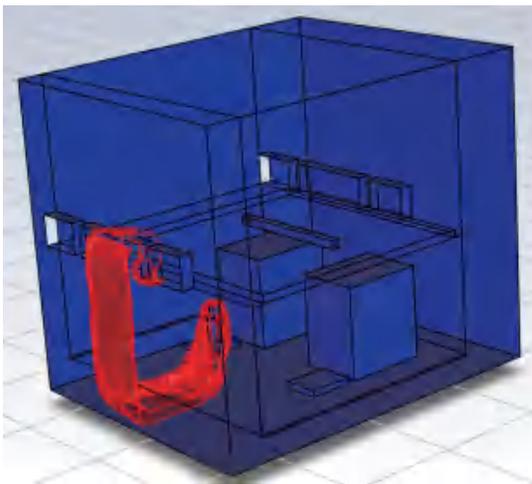
2.4 室内颗粒物分布

室内1人工况下颗粒物空间分布和运动轨迹见图8。可以发现该工况下送风气流对颗粒物的排出效果较好，操作人员产生的尘源基本通过通过高架地板迅速被一侧的排风带走，仅在人员附近与回风夹道内存在0.3μm的粒子，室内排出粒子效果明显。微纳实验室一般在投入运行后会严格控制室内人员

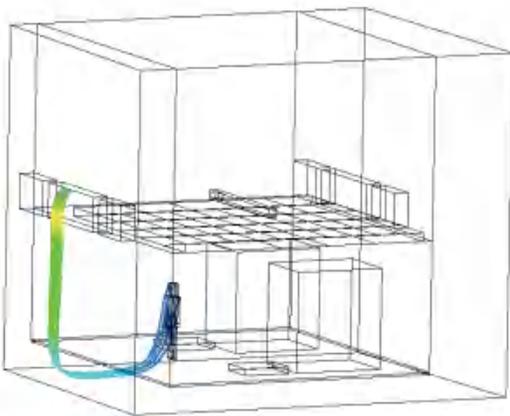


(a) x-2.55 截面速度分布 (b) y-0.8 截面速度分布 (c) y-1.5 截面速度分布

图7 室内各截面压力场分布



(a) 颗粒物分布



(b) 颗粒物运动轨迹

图8 颗粒物空间分布

的数量,本次仿真仅对室内人员发生的颗粒物研究提供可行性方案,下一步将针对室内不同数量的人员进行深入研究,以进一步发现发尘源增加后,该设计或变设计工况下洁净度能否满足要求。

3 结论

本文对某在建的微纳实验平台进行了最不利工况下的空调系统仿真模拟研究,旨在机电安装开展前对设计工况进行预测,同时为深化设计提供合理化建议。本文仿真工况下室内暖通系统各参数基本可控,下一步将研究室内不同散热和不同数量的人员对气流组织和洁净度控制的影响,本文得出的结论如下:

(1) 本次研究预测除设备存在大量散热影响周边区域外,室内大部分区域的温度能维持在送风温度即 18°C ,这对于设备的散热是有利的;但设计要求的室内温度保持在 21°C 左右,故在该设计工况下可适当提高送风温度,以防止设备在不运行时过热的房间温度会影响实验结果。

(2) 研究发现西侧回风夹道中有与室内明显的温度、湿度和速度差,可能会影响实验室的正常运行,这是由于顶部未设置FFU导致,故建议在深化设计中在此区域增加FFU,以改善上述问题。

(3) 本次模拟的设备散热为 40kW ,而实际情况下设备的功率远小于该数值,故室内温度和湿度的均匀性应该会比仿真结果更高,而仿真中建议设备区域留出充足的散热区域。

参考文献

- [1] 于晓民. 大型预制风管弧形弯头内部气流仿真分析[J]. 安装, 2021, 2: 41~42+55.
- [2] 汤毅. 导流片对预制弯头内气流组织的影响[J]. 建筑施工, 2020, 7: 1337~1339.
- [3] Yi Tang, Haidong Wang, Jian Pan. Simulation Research of Airflow in the Prefabricated Large Duct Elbow with Different Deflectors[J]. Earth and Environmental Science. Volume 760, Issue 1. 2021.
- [4] 许钟麟, 空气洁净技术原理(第4版)[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

悬浮二级减震全直流风机
大风轮 低噪音 无极调速



美国戴斯全热交换芯
可水洗免更换



日本芝浦全直流风机
低噪音超大风量



英国ARM处理器
性能稳定



美国HV多重过滤
高效过滤PM2.5

Karls Energy Recovery Ventilator

E280卡尔斯系列全热新风机

热湿膜交换芯

给房子戴上“N95”

根据广微测报告编号：2018FM04500R01

无孔膜 | 零漏风 | 零级防霉 | 防止交叉感染



滤芯可水洗



抗潮湿



抗冻



0级防霉



抗雾霾



热湿交换芯



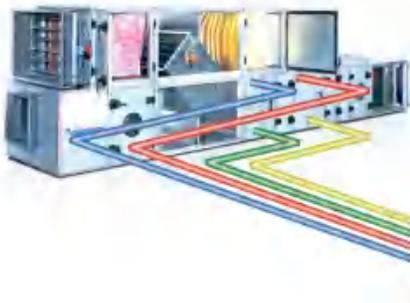


绿色实验室

克莱门特四管制多功能热泵

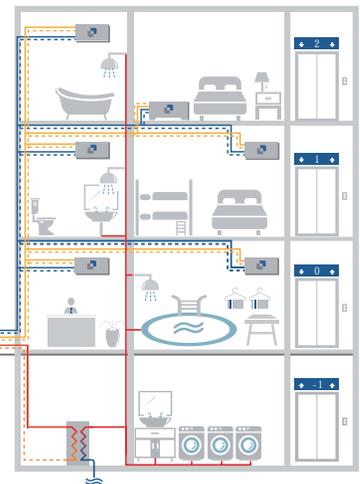
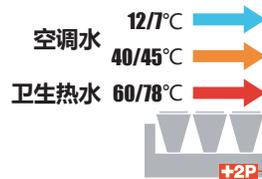
——实验室净化冷热源理想解决方案

集冷热源于一体，一台机组四个接管，两个为冷冻水进出口，两个为热水进出口，冷热自动平衡，制冷量和制热量可分别实现 0~100% 独立调节，综合能效 TER>8



克莱门特六管制多功能热泵机组 (+2P 专利技术)

专门为同时和不同时具有供冷、制热、高温生活热水需求而开发设计的冷热联供节能解决方案，实验室理想的无人值守智能化小型冷热站。



克莱门特捷联制冷设备(上海)有限公司

中国区总部

地址：上海市星火开发区白云路88号
电话：(021)57505566
传真：(021)57505797
邮编：201419
E-mail: info@climaveneta.com.cn

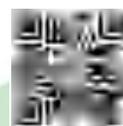
北方中心

地址：北京经济技术开发区荣昌东街7号105
电话：(010)67872299
传真：(010)67872022
邮编：100176
http://www.climaveneta.com.cn

南方中心

地址：上海市漕溪北路88号圣爱广场1512室
电话：(021)64275900
传真：(021)64275009
邮编：200030

全国统一售后服务热线
400-880-7575



微博



微信

康斐尔分子过滤产品系列 解决不同行业挑战

作为优质洁净空气解决方案的全球领先制造商，康斐尔提供各类气体污染物解决方案，其产品广泛应用于微电子 AMC 控制、腐蚀性气体控制、高危剧毒化学气体处理和异味臭味控制与实验室排风控制。主要行业包括微电子、液晶面板、固态硬盘、博物馆、数据中心、化工、石化、制药、金属冶炼、垃圾处理、废水处理和室内空气净化等。

 **63大专业滤料系列**



MCCLD仿真软件



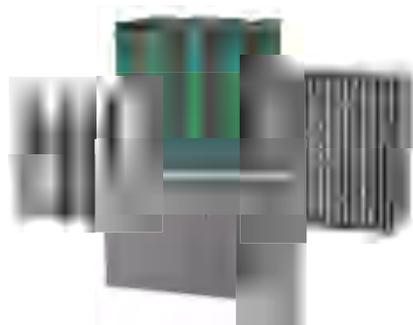
100%本地化



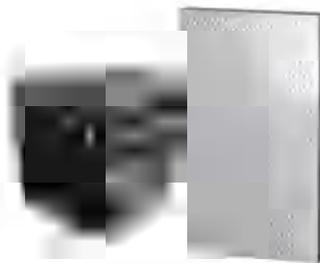
**100%
ISO10121测试**



21种测试手段



GigaPleat



CamCarb



CamCube

康斐尔中国总部

地址：上海市徐汇区吴中路 39 号新概念大厦 13 楼 200233

电话：+86-21-31007321

全国服务热线：400 820 6776

www.camfil.cn



