

2019年全国净化技术学术年会 论文集





XJH 鑫吉海

MEDICAL ENGINEERING



宁夏鑫吉海医疗工程有限公司

总部地址：北京市朝阳区慧忠北里天创世缘A座1103室
电话：010-64802519/20/21

传真：010-64802501
网址：www.xinjihai.com





建筑环境与能源

(月刊)

主办单位

中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院

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
中国建筑节能协会地源热泵专业委员会

编辑出版

《建筑环境与能源》编辑部
2019年第9期(总第25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 刘燕敏

责任编辑 李 炜 | 李月华

校 对 才 隽

美 编 周 林

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



建筑环境与能源微信公众号



暖通空调学会微信公众号

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

|2019年全国净化技术学术年会论文集|

Proceedings of National Biennial Academic Conference on Air-Purification Technology, 2019

德国 2018 版标准 DIN 1946-4 简介

..... 黄梦楠 /1

《医院洁净护理与隔离单元技术标准》编制背景和任务

—— 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

..... 许钟麟, 曹国庆, 张彦国, 张益昭 等 /2

通仓交融洁净手术室设计及研究

..... 严建敏, 李婕 /6

解读德国 DIN1946-4-2018 版标准

..... 沈晋明, 许钟麟 /13

大动物生物安全三级实验室内防护区边界分析

..... 周权, 冯昕, 曹国庆, 梁磊 等 /19

屏障环境动物房室内环境控制应用实例

..... 陈烨汀 /22

降低血液病房顶部集中送风面积的样板间实验研究

—— 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三

..... 马兆勇, 蒋国清, 许钟麟, 曹国庆 等 /26

关于负压隔离病房可以使用循环风的讨论

—— 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

..... 许钟麟, 曹国庆, 张益昭, 潘红红 等 /29

通过湿度控制实现 GMP 合规生产

..... Martin Ginty, 郑丽丽 /32

生物制剂药厂值班模式案例分析与探讨

..... 赵伟, 张彦国, 董秀芳 /34

某激光实验装置净化空调系统设计

..... 李晓菲 /36

谈实验室的可持续性设计

..... 田耀荣 /41

美国医院设计与建设新指南与主要修订内容

..... 刘燕敏 /43

ISO 16890 系列标准存在的问题及未来发展方向	冯昕, 路宾, 张惠, 曹冠朋 /48	既有医院洁净手术室最大可调新风量的研究	牛维乐, 侯守源 /138
医院洁净空调负荷特性与系统节能	陈尹 /55	空气中甲醛含量的测定及不确定度评定	杨志远, 杨英霞, 李强, 徐昭炜 等 /142
医疗建筑净化空调热湿处理过程及空调系统的分析	汪延璐 /61	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	孟令坤 /147
基于 CFD 技术的某医院复合手术室速度场数值模拟与分析优化	李春阳, 樊洪明 /64	洁净手术部检测调试的几点思考	谭鹏, 曹国庆 /150
从非能源效率浅谈手术部节能	刘燕敏, 沈晋明 /68	BIM 技术在医院净化工程建设中的应用	蒲辉辉 /154
微电子行业洁净室空气化学污染控制标准	吴小泉 /73	手术部气体灭火系统设置探讨	王杰 /159
生殖医学中心建设技术探讨	王海, 闫田, 李良华 /80	典型洁净医学实验室空调系统设计要点分析	牛维乐, 侯守源 /161
复合手术室的环境控制探讨	刘燕敏, 何焰, 陈尹, 吕必金 等 /84	高等级生物安全实验室压差控制技术与策略研究	高鹏, 曹国庆 /164
褶型空气过滤介质结构参数对其压力损失影响的规律研究	朱景晶, 钱付平, 叶蒙蒙, 魏氏 等 /89	高等级生物安全实验室自控系统设计探讨	张昆东, 曹国庆 /168
浅谈医院手术室开关门对洁净环境的影响	吴骁, 周斌, 薛科, 丁丽丽 等 /97	高等级生物安全实验室 UPS 设计及风险分析	张昆东, 曹国庆 /173
欧洲骨科通仓手术室气流组织评价与优选	刘燕敏, 李晓颖 /103	生物安全二级兽用生物制品动物实验设施设计要点分析	牛维乐, 孟令坤, 陈清莹, 张昆东 等 /177
建设医院日间手术中心(部)	沈晋明 /112	生物安全实验室间气溶胶传播风险分析	周权, 冯昕, 曹国庆, 梁磊 等 /182
风机过滤单元(FFU)性能试验方法——CRAA 标准(报批稿)解读	林忠平, 王登 /115	某生物安全三级检验用动物舍电气系统设计	杨峰 /185
高效空气过滤器国标体系主要修订内容解读	冯昕, 江锋, 张惠, 曹冠朋 等 /120	化学淋浴系统现场检测及评价方法研究	党宇 /188
解读工程建设行业标准《住宅新风系统技术标准》	杨英霞, 王智超, 徐昭炜 /127	湿度控制: 抑制微生物生长的一种工具	Martin Ginty, 郑丽丽 /192
ISO1 级洁净室微环境气流组织模拟分析	吴小泉 /132	某洁净厂房高架地板布置率优化设计	关子谦, 樊洪明 /195
静电型过滤材料的效率实验探讨	江锋 /137	模块化装配式静脉药物调配中心	申辉宇 /199

开幕祝词

尊敬的各位领导，各位嘉宾，各位代表，各位同行：

大家上午好！

2019年第五届全国净化技术学术年会今天在深圳隆重召开，首先请允许我代表主办方向出席会议的各位领导、嘉宾和国内外的代表致以热烈的欢迎和崇高的敬意！

深圳一直是我国开放的前沿，创新之都。今年迎来深圳特区创建 39 周年，8 月 18 日《中共中央国务院关于支持深圳建设中国特色社会主义先行示范区的意见》将深圳定位“中国特色社会主义先行示范区”和“社会主义现代化强国的城市范例”。这次净化技术深圳年会我们将年会主题定为“创新 跨越 品质 低耗”，就是借深圳宝地的东风，吹响了创新、跨越的号角，去实现高品质低能耗的环境控制的目标。

知识创新、科技创造每天都在发生，创新、创业、创造的脚步从未停止。中美贸易战暴露了我国产业链仍然徘徊在全球产业链的中端位置，进入世界一流的科技产业层级不多，在全球产业链的发展和合作中很容易被动，甚至丧失了话语权。中国要在高科技领域中突围，大力发展我国高端产业势在必行，推动产业创新是实现跨越的必由之路。

高端产业的显著特征是高技术、高附加值、低污染、低能耗、低排放，具有强大的竞争优势。目前，正从国家层面积极推动高端产业的发展，如电子、通讯、信息、医疗、制药、实验动物与生物安全等。高端产业的发展离不开高品质工艺环境控制。净化技术要不忘初心、牢记使命。净化技术的初心就是保障高品质工艺环境，净化技术的使命就是为高端产业的发展保驾护航！

引领高端产业发展的是高科技，科技创新与跨越是高端产业的特点，不断促使着生产工艺的变革，保障工艺环境控制的净化技术也必须随之变化。今天有效的、节能的环境控制技术，明天也许荡然无存。高端产业的发展不断给净化技术提出了新的要求、新的挑战，也给净化技术带来了新的机遇、新的发展。净化技术的“变”永远是唯一“不变”的原则，也是净化技术永葆朝阳产业的关键。

《药品管理法》是我国药品监管的基本法律。2019 年 8 月 26 日十三届全国人大常委会第十二次会议进行第三次审议并表决通过《药品管理法（修订草案）》。自 1984 年颁布以来第二次进行系统性、结构性的重大修改，并上升为法律。取消了 GMP/GSP 认证，强调了健全的药品追溯制度与药物警戒制度；强调了质量保证体系与数据完整性；规定从事药品研制，应当遵循药物非临床研究质量管理规范（GLP）、药物临床试验质量管理规范（GCP），保障药品研制全过程持续符合法定要求。本次会议上将介绍在新的《药品管理法》对制药环境控制的新要求。

自 2016 年 11 月，世界卫生组织（WHO）发布了《预防外科手术部位感染的全球指南》，在 4.23 节“手术室通风情况下的层流通风系统”中明确建议“层流通风系统不应该用于降低接受全关节置换术手术的患者的手术部位感染风险”。在世界范围内反响很大。德国 DIN1946-4 标准委员与德国医疗卫生协会（DGKH）备受质疑，承受很大压力。3 年来基于过硬的调研成果与正确的循证，颁布了 2018 版 DIN 1946-4 标准“医疗建筑与用房通风空调”以及德国医疗卫生协会（DGKH）发布官方立场文件。提出了医疗环境控制的宗旨是防止感染，保护医疗器械和相关职业健康与安

全要求的三大任务。不仅肯定了层流对手术环境控制的三大任务的正面效应，而且还规定了确认手术室级别的程序以及手术保护区域的定位分析。提高了医疗环境的控制要求，完善了控制措施。本次会议特别邀请了参与 DIN1946-4 标准修订的德国专家介绍德标的修订。

2018 年美国医院设施指南协会颁布了“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”三大文本。并将 ASHRAE 170-2017 版“医疗护理设施通风”，作为指南的第 3 部分。值得注意，指南是从改变医疗模式、改革医院体系、改进医疗方式等医疗根本上去简化了流程化管理模式、减少医疗周期、提高医疗效率、降低非医疗的能耗，尽可能将住院设施资源留给更复杂和紧急情况下更需医治的患者，而不仅仅从传统的提高“能源效率”的思路去节能、去降耗，这对我国医院设计、建设有较大的指导意义与工程应用价值。本次会议将作专门介绍。

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：2018YFC070520X）以及国家重点研发计划项目“室内微生物污染源头识别监测和综合控制技术”（课题编号：2017YFC0702804）已经取得了不少重大进展，课题组的负责人员将在本次会议上介绍他们的科研成果。

医院建设领域中最后一个国家标准《医院洁净护理与隔离单元技术标准》已与 2019 年 7 月 1 日通过征求意见稿审查会，不久将予以颁布。标志着医院科室环境控制的标准或规范全部完成，这一套标准将是我国医院建设历程中的一个里程碑。中国建筑科学研究院许钟麟研究员将在本年会上给大家做全面介绍。

值得注意的是 2016 年底国际标准化组织颁布 ISO 16890《一般通风用空气过滤器》，从空气过滤器检测到分级提出了全新标准，已取代了现有的美国 ASHRAE 52.2 与欧洲 EN779 两大标准。在工业净化和生物净化领域内直接采用 DIN EN ISO 16890-1 还存在着不少争议，以及如何根据洁净空间洁净度级别计算与选择各级过滤器效率引发些困惑。2018 版 DIN 1946-4 标准率先在医疗领域中采用了这一标准。我们将对此做具体介绍。

每年年会均按当前净化技术发展需求，邀请国内外著名专家就大家关注热点作专题报告，以及相关领域与会代表作学术交流报告。本年会除大会主题学术讲演外，还安排了专题分会场交流讨论。欢迎全国暖通净化空调专业各院校、科研机构、设计单位、工程公司、生产企业、医院、制药、电子等方面代表等积极参与。

新的形势对我们提出新的要求。高端产业是一个国家核心竞争力的重要标志，是战略性新兴产业的重要一环。高端产业要发展，科技必须创新与跨越，生产工艺也一定会不断发展与革新。我们净化人积极行动起来，不忘初心、牢记使命。顺应战略发展方向、抓住发展大好机遇。依托本学会的科技资源和人才优势，深化交流合作，提升环境控制水平，提高环控设施的先进性与灵活性。以创新与跨越为引领，努力实现低耗高品质的环境控制。为大力发展我国高技术含量和高附加值的高端产业和战略性新兴产业做出我们净化人的应有贡献。

今年年会为贯彻落实中央的关于学术会议管理办法的有关规定，规范了本次学术会议规程。由于我们对相关条文不熟，本次会议组织进程缓慢，在执行过程中给与与会人员与受邀专家带来了许多不便，在此表示歉意。尽管如此，依旧得到了业界内许多同行与有社会责任心的相关企业的积极支持与热心资助，使得本届全国净化技术学术年会能够如期召开，感到十分欣慰，特别是深圳鑫吉海医疗建设有限公司以及许多企业大力支持！我们相信通过今年的净化技术学术年会上的交流、探讨、学习，会收获更多的创新理念、实现净化新技术、新产品和新措施的跨越，以低耗实现高品质的环境控制。

最后，预祝本届全国净化技术年会圆满成功，祝全体代表在大会期间身体健康，万事如意，本着交流学习而来，能满载成果而归。

谢谢大家！

2019 年全国净化技术学术年会
二〇一九年九月二十一日

德国 2018 版标准 DIN 1946-4 简介

黄梦楠

(韦氏(苏州)医疗科技有限公司, 苏州 215011)

[摘要] 本文重点介绍了德国 2018 版标准 DIN1946-4 主要修改内容。

[关键词] DIN1946-4; 医疗建筑与用房通风; 标准

0 引言

德国标准 DIN1946 第 4 部分的“医疗建筑与用房通风”是世界最有影响的医院建设标准之一, 特别是在医疗护理环境的控制思路、技术措施和手术室送风装置及其验收等方面内容引人注目^[1]。上一版自 2008 年底颁布, 进行了长达 10 年的修改。于 2018 年 6 月发布 2018 版 DIN 1946-4 “室内通风技术 - 第 4 部分: 医疗建筑与用房通风”^[2]。由 DIN 供暖和室内通风技术及其安全标准委员会 (NHRS) 的相关专家组和规则制定者参与修订。下文简要介绍一下新版标准的关注点与主要修改内容。

1 2018 版标准的关注点与主要修改内容

新版标准满足医疗建筑与用房通风空调在规划, 建造, 验收和运行方面的技术要求, 医疗建筑与用房包括医院, 日间诊所, 日间手术中心, 透析中心和医疗器械加工等单位。

医疗环境控制是各国医院建设标准的关注点。医疗环境控制要求, 特别是对手术室的要求, 重点旨在尽量减少易引起感染的病原体数量, 提高对患者的保护。新版 DIN 1946-4 还要求考虑到医护人员职业健康和安全的最新要求, 同时保护医疗器械免受微粒污染。

为了给予医护人员和患者切实有效的保护, 基于 DIN EN ISO 14644 进行了调整, 以满足手术室规范和合格标准。特别强调在洁净室和洁净领域全球通用标准中, “湍流稀释”(TVS)和“低湍流度置换流”(TAV)两种送风方式, “低湍流度置换流”(TAV)具有更高的保护作用。认为在装有 TAV 系统的 Ia 级手术室中, 无尘无菌的空气从手术室的天花板垂直流向手术室地板。在特定保护区内(手术区域, 器械台), 能实现每小时超过 300 次的换气。而 Ib 级 (TVS) 手术室由于送风与手术室内被污染的空气相混合后对手术区进行稀释, 换气量只能达到 20 至 25 次。与湍流稀释 (TVS) 相比, 低湍流度置换流系统 (TAV) 还将术中病原体 (沉降) 诱发的感染率降至不到 10%。

目前, 随着高频和激光等手术中技术的广泛应用, 会释放出致癌风险物质。主要指入肺超微粒子 (UFP 超微粒子直径 < 100 纳米) 被称为“外科烟雾”,

包括病毒, 细菌和活性肿瘤细胞。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, 指出了在手术室中安装适当的、有效的室内通风设备的必要性, 并赞助了当地排风系统和 FFP-2 口罩。2015 年, “外科烟雾”被录入有害物质委员会“关于有害物质的技术规定”(TRG), 并确定了提高后的要求, 原则上按照 OSH (职业安全与健康) 现有技术中最有效的技术方法: “低湍流度置换流”(TAV)系统在清除手术人员可吸入部位的“外科烟雾”方面, 比手术室的湍流通风效果好 10 倍以上。

关于手术室高浓度“外科烟雾”的另一个后果, 新版 DIN 1946-4 指出“外科烟雾”会通过正压缝隙渗漏造成健康危害, 手术室中的空气通常会通过正压缝隙渗漏进入相邻的前室或走廊。未来进行规划时, 应该避免正压缝隙渗漏或将其限制在必要的最低程度内。

为了确保将来能够贯彻落实多方面的职业安全要求, DIN 1946-4:2018-06 规定, 除了医院医疗专家外, 安全工程师和卫生工程师, 设备操作员也必须参与到室内通风设备的规划、实施、运行以及维保中。“设备部件的规划、实施、运行的要求清单”。以新版标准的附件公布。

2 结语

新版 DIN1946/4 标准的正式颁布, 标准中的条文叙述、控制思路与技术措施值得研究与借鉴, 特别是明确了“低湍流度置换流”(TAV)对手术环境控制的正面效应以及规定了相应的措施。澄清了世界卫生组织《预防外科手术部位感染的全球指南》中 4.23 节对层流的质疑。^[3]我们相信新版的这些研究成果与技术措施将有助于推动我国医院建设的健康发展。

参考文献

- [1] 沈晋明. 简介新版德国医院空调标准 DIN1946/4 [J]. 暖通空调, 2010, 40(2):13-17.
- [2] Deutsches Institut für Normung, DIN1946-4-2018, Raumlufttechnik-teil 4: Raumluft technische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens [S]. 2018, 6.
- [3] 沈晋明, 刘燕敏. 评述《预防外科手术部位感染的全球指南》4.23 节 [J]. 暖通空调, 2017, 47(11):61-67.

《医院洁净护理与隔离单元技术标准》编制背景和任务

——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

许钟麟¹，曹国庆¹，张彦国¹，张益昭¹，潘红红¹，沈晋明²，武迎宏³

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

3. 北京市医院感染管理质量控制和改进中心，北京 100044)

[摘要] 国外标准将重症监护病房 (ICU)、易感染患者病房、空气传染病隔离病房作为医院重点用房作出规定，但国内标准只有这方面的零碎内容。国内至 2009 年累计血液病患者以百万计，呼吸道感染占院内感染比例高达 40%，与外国以泌尿系统感染为首不同。ICU 是各医院普遍设置的用房。从防护角度出发，一是正压防护患者，二是负压防护环境，故新编国家标准定名为《医院洁净护理与隔离单元技术标准》。

[关键词] 技术标准；重症监护病房 (ICU)；洁净护理；隔离；空气传染病

2016 年 11 月 10 日，建标 [2016]248 号文批准《医院洁净护理与隔离单元技术标准》(以下简称《技术标准》)立项，主编部门为国家卫生健康委员会，第一起草单位为中国建筑科学研究院有限公司。

1 制订《技术标准》依据的国情

1.1 病例现状

近二三十年来我国血液病发病率、死亡率呈上升趋势。据 2003~2007 年对全国 32 个肿瘤登记地区的统计，白血病发病率为 5.17/10 万，死亡率为 3.94/10 万^[1]。又据报道，至 2009 年，我国有白血病患者约 400 万^[2]。白血病患者免疫力极低甚至丧失，是最易感染人群，其死亡率在儿童及 35 岁以下成人中居第 1 位^[3]。血液病已成为严重影响我国城乡居民健康和生命安全的疾病之一。

自 SARS 以后，空气传染的疾病引起人们高度关注，全球 41 种主要传染病中经空气传播的达 14 种，在各种具体传播途径中，空气传播占首位；全球因微生物气溶胶引起的感染中 20% 为呼吸道感染。我国呼吸道感染在医院感染中占首位，最多达到 53%^[4]。这与西方国家以泌尿系统感染居首位明显不同。

1.2 建设现状

手术室和重症病房是医院的 2 个核心部分。不含普通病房的重症病房，主要有医院普遍设立的重症监护病房 (ICU)、免疫力极低的易感染病人病房 (如血液病、脏器移植、免疫缺损新生儿、烧伤等

患者病房)和空气传染性隔离病房。

关于手术室，我国早已出台洁净手术部建筑技术规范，而一般手术部的标准在综合医院建筑设计规范中也有体现。关于重症病房在综合医院建筑设计规范中则规定得很简略，血液病房只在 YEB004-1997《军队医院洁净护理单元建筑技术标准》中有若干规定。空气传染性隔离病房在传染病医院建筑设计规范中规定得也很简单，只有北京市地方标准《负压隔离病房建设配置基本要求》应用我国自己的科研成果，即动态隔离理念和措施^[5]，纠正了流行的高负压、密闭门、全新风的不全面理解，给出了传染性隔离病房的技术标准，这一理念的著作已被译成英文介绍到国外。虽然各地的设计大都参照此标准，但没有国家标准的规定，仍给设计者带来不便。

至于 ICU，虽被医院普遍设置，但是控制环境污染的手段差别很大，有用集中系统的，有用自循环系统的，有用局部设备的，没有比较统一的标准，也被认为是可能发生严重交叉感染的场所，因没有完整的设计标准，某些地方也曾发生过因使用空气净化消毒设备不当而造成的严重事故。

综上所述，设计人员和医院建设方呼吁出台有关上述易感染病人病房、空气传染性隔离病房和 ICU 的技术标准，以适应我国医疗事业发展的需要，为健康中国的大国策服务。

2 和《技术标准》有关的国外情况

在国外有关医院或医疗设施的综合标准中，都着重提到有关 ICU、易感染病人病房和空气传染性隔离病房的规定。

基金项目：“十三五”国家重点研发计划项目“室内微生物污染源头识别监测和综合控制技术”(编号：2017YFC0702800)。

2.1 日本

(1) 在日本医疗福祉设备协会标准《病院设备设计》(2013 年版及此前几版)中,除普通病房和放射治疗病房外,主要列出 3 类病房:

易感染病人病房——主要指造血干细胞移植等容易感染患者的病房。

空气传染性隔离病房——主要指肺结核、水痘、麻疹等空气感染患者的病房。

ICU——重症患者及术后处于重症状况的患者的监护病房。

(2) 日本医疗用房的环境控制都采用净化空调系统,按洁净度划分出 5 个等级,见表 1^[6]。

(3) 日本对 3 类病房的规定见表 2^[6]。

2.2 美国

(1) 在美国 ASHRAE 标准《医疗护理设施的通风》(ASHRAE170-2017)中,列出的病房除普通病房外,主要有 4 类:

空气传染性隔离病房——主要用于粒径小于 5 μ m 的悬浮飞沫携带的微生物传染患者(如肺结核、麻疹、水痘患者)的隔离。

防护环境病房——主要用于保护高风险免疫缺陷患者(如同种异体干细胞移植和高强度化疗患者)免受来自人和环境的空气传播病原体传染的病房。

重症监护病房——主要用于危、重症和创伤(如烧伤)重症患者的监护室。

空气传染病隔离与防护环境组合病房——正压,前室为负压。当不需要隔离时病房压力性质不变,只改变前室的压力性质,即前室对内对外都为正压或都为负压。

虽是 4 类,实际上还是 3 类。

(2) 美国对 3 类病房的规定见表 3^[7]。

2.3 德国

(1) 根据德国标准《医疗护理设施中建筑和用房的通风空调》,此类用房划分为 Ia, Ib 和 II3 级。Ia 和 Ib 级主要为手术室,II 级中包括此外的所有房间、走廊和医用区域。在病房中除复苏室、治疗室等普通房间外,主要有:重症监护病房、传染病患者(患有多重抗药性结核病、水痘患者)病房、易感染患者(免疫功能不全、烧伤患者,或骨髓、器官移植患者)病房及传染与易感染患者病房。

与美国标准相似,也可分为 3 类。

(2) 德国对 3 类病房的规定见表 4^[8]。

德国标准过于简略,但与美国标准大致相同。特殊场合的易感染病房设局部集中低湍流度送风装置,象德国手术室标准和我国洁净手术室那样送风,送风面积扩大,可以保护更大区域,并使送风速度减小,避免吹风感。

表 1 日本医疗用房等级

洁净度级别	名称	特征
I	高度清洁区域	用垂直或水平层流,末级过滤器为高效过滤器(DOP 效率为 99.97%),相当于我国 B 类高效过滤器
II	清洁区域	必要时可用层流,末级过滤器为 ASHRAE 比色法效率 90% 以上的高性能过滤器,相当于我国高中效~亚高效过滤器
III	准清洁区域	末级过滤器为 ASHRAE 比色法效率 80% 以上的过滤器,相当于我国高中效以上的过滤器
IV	一般清洁区域	末级过滤器为 ASHRAE 比色法效率 60% 以上的过滤器,相当于我国中效以上的过滤器
V	污染管理区域	末级过滤器为 ASHRAE 比色法效率 06% 以上的过滤器,相当于我国中效以上的过滤器

表 2 日本对 3 类病房的规定

洁净度级别	洁净度	净化空调	最小换气次数/h ⁻¹	最小新风换气次数/h ⁻¹
易感染病人病房	I	层流,对空调方式提出要求,送风末级过滤器的 PAO 法效率为 99.97%	15 ¹⁾	2
空气传染性隔离病房	II	防止向室外泄漏,负压,对空调方式、送回风形式提出要求,送风末级过滤器为 ASHRAE 比色法效率 90% 以上的过滤器	12 ²⁾	2
重症监护病房(ICU)	III	正压,注意气流分布,可正负压切换,对空调方式、气流分布提出要求,送风末级过滤器为 ASHRAE 比色法效率 80% 以上的过滤器	6	2

1) 根据送风截面积和风速确定,送风速度垂直层流为 0.35m/s,水平层流为 0.40m/s。

2) 有高效过滤器的可使用循环风,否则全排风。当排风口通向人员活动场所和住宅时,应安装高效过滤器。

表 3 美国对 3 类病房的规定

	净化空调	最小换气次数/h ⁻¹	最小新风换气次数/h ⁻¹
空气传染性隔离病房	送风无末级过滤器,全排风,若设排风高效过滤器,则可使用循环风。第二级为 MERV14 级过滤器,相当于我国高中效过滤器,置于冷盘管和送风机的下游侧空调箱末端出口前。负压。对气流组织、流向甚至风口形式都提出了要求。	12	2
防护环境病房	除第二级为 MERV14 级过滤器外,末级过滤器为高效过滤器(对 0.3 μ m 微粒的过滤效率不低于 99.97%,相当于我国 B 类高效过滤器)。正压。对气流组织、流向甚至风口形式都提出了要求,采用如手术室的局部集中非诱导低湍流度气流送风。	12	2
重症监护病房	送风无末级过滤器,第二级为 MERV14 级过滤器,相当于我国高中效过滤器(凡住院病患护理、诊疗区及为其提供直接服务的房间,均同此)。对气流组织、流向甚至风口形式都提出了要求。	6,15(外伤休克)	2,3(外伤休克)

2.4 对比分析

从上面三国标准可以看出,在重症监护病房方面日本与美国、德国有所不同,日本明确要有高中效末级过滤器,而美国和德国只有空调箱末端的第二道过滤。

从以下几方面分析 2 种布置的合理性。

(1) 不论送风口有无过滤器,在空调箱末端还应安装粗效或中效过滤器进行预过滤,这是空调箱应该有的,各国标准也都有此规定。

(2) 任何集中空调装置都应设新风过滤和预过滤,预过滤即空调装置的末端过滤,以防水滴、风机皮带磨屑、尘粒等进入管道甚至损坏后面的过滤器,一般用中效过滤器,如上述美国和德国标准在空调箱末端改用 MERV14 级或 F9 过滤器,相当于我国高中效过滤器,虽然效率提高了,但因其安在设备内,安装质量和保护程度都会下降,如被打湿、发霉、破损。我国工业和医院洁净工程中就发生过这样的情况。

(3) 在送风口无过滤器的情况下,停机时管道返尘在所难免。

(4) 空调箱末端的过滤器因其面积小、阻力大,能耗增大,更换时间缩短。

(5) 末端有过滤器时,因通过风量小,效率提高,净化效果更好。

(6) 送风口布置过滤器可方便加大消声器,以满足病房低噪声要求。对于日本的布置方式,消声器及原空调箱中的消声器都可安在管道上,即风口

末级过滤器前,空调箱长度得以缩短。否则按德国标准要求,在末级过滤器后不应再安装消声器,造成消声器无法加装。

3 中国有关规范对 3 类病房的规定

上述 3 类病房在中国有关规范中分别有规定,见表 5。

4 关于《技术标准》的命名

4.1 病房类别

从前面介绍可见,3 类病房又可简化为 2 类:不论是免疫力极低患者还是一般重症患者,都是抵抗感染的弱者,都需要避免受到外界的感染,故都需要正压隔离;空气传染病患者隔离病房,为了防止对外传染,必须用负压隔离。

从日、美、德三国标准看,日本除一般病房和负压隔离病房末级(即安装在送风口)采用相当于我国中效 1~高中效的过滤器外,其他 3 类病房末级过滤器皆用相当于我国高中效以上的过滤器,而美国、德国的重症病房及一般病房和直接服务于病人的用房,无末级过滤器,只在空调箱末端安装相当于我国高中效及以上的过滤器。

也就是说,这三国标准对于所有病房(不仅是重症病房)的环境控制都采用集中空调(少数可用供热供冷的局部机组+过滤器)。

4.2 末级过滤器要求

我国 GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》对洁净用房的末级过滤器的规定是:

I 级——高效过滤器(我国 A 类高效过滤器约

表 4 德国对 3 类病房的规定

	净化空调	最小换气次数	最小新风量
重症监护病房	送风无末级过滤器,第二级为 F9 过滤器,相当于我国高中效过滤器,置于空调箱末端。回风最低为 F5 过滤器,相当于我国中效 2 过滤器。二级过滤后不宜有消声器和阀门,消声器最好安在其上游	未提	40m ³ /(人·h)或>100m ³ /h
易感染患者病房	末级过滤器至少为 F9 过滤器(相当于我国高中效过滤器),必要时用 H13 高效过滤器和局部集中非诱导低湍流度气流送风。正压	未提	未提
传染病患者病房	负压。必要时排风安装 H13 高效过滤器	未提	未提

表 5 中国有关规范对 3 类病房的规定

	净化空调	过滤器	规范
易感染患者病房、血液病房	垂直层流病房,送风速度 0.35m/s	末级高效过滤器	YEB004-1997《军队医院洁净护理单元建筑技术标准》
	水平层流病房,送风速度 0.40m/s	末级高效过滤器	
	I 级洁净用房(如血液病房),工作区截面风速 0.12~0.20m/s,集中送风面积不小于 6m ² ,新风换气次数不少于 2h ⁻¹	末级高效过滤器	GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》
重度(含)以上烧伤病房	III 级洁净用房(必要时按 II 级换气次数),病床上方集中送风,送风范围为床的每边外延不小于 30cm	末级亚高效过滤器	GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》
重度以下烧伤病房、过敏性哮喘病房	IV 级洁净用房,分散风口	末级高中效过滤器	GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》
	可采用洁净用房	未定	
重症监护病房:新生儿重症监护病房(NICU)和早产儿室	宜为 III 级洁净用房	末级亚高效过滤器	GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》
一般 ICU	宜为 IV 级洁净用房	末级高中效过滤器	GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》
传染病隔离病房	排、回风有高效过滤器时可循环使用,必要时全排风,一般 8~10h ⁻¹ 换气,可达 12h ⁻¹	末级高中效过滤器	GB 50849-2014《传染病医院建筑设计规范》,DB11/663-2009《负压隔离病房建设基本配置要求》

相当于国外的 H12 过滤器,比国外要求最低一级为 H13 的高效过滤器要低一些);

II 级——高效或亚高效过滤器;

III 级——亚高效过滤器;

IV 级——高中效过滤器。

由此可见,日、美、德标准用的高中效过滤器,按我国标准可以达到我国医院 IV 级洁净用房标准,只是国外标准并未给出洁净度和菌浓具体指标。

4.3 微生物浓度要求

我国 GB 15982-2012《医院消毒卫生标准》规定:II 类环境为非洁净手术部(室),产房,血液病病区、烧伤病区等保护性隔离病区,重症监护病区,新生儿室,等。只要求沉降菌浓度达标,即 $\leq 4.0\text{cfu}/(\text{皿}\cdot 15\text{min})$ (平皿为 $\phi 90$,相当于 $8\text{cfu}/(\text{皿}\cdot 30\text{min})$)。而洁净用房 IV 级标准也只规定了沉降菌浓度,即 $\leq 6\text{cfu}/(\phi 90\text{皿}\cdot 30\text{min})$ 。日、德标准明确指出,血液病房等处应为最高洁净要求场所,用高效过滤器,可达我国 I 级洁净用房标准。把血液病房和其他重症病房的菌浓标准等同起来是不合适的。

4.4 小结

采用高中效过滤器作为末级过滤器的病房,可以达到 GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》规定的 IV 级洁净用房标准,所以对易感染和重症病房可强调洁净护理,对空气传染性隔离病房可强调隔离,但都是采用空气净化手段,都可达到 IV 级洁净用房标准,所以表述为洁净—护理与隔离—单元(病房区)这样的命名,是合适的。

5 结语

洁净护理与隔离单元包括的 3 类病房,是各国标准所重视的医疗用房,建设好、用好这类病房,既是医院的需要,也是广大患者的希望,制订好这类病房的技术标准则是社会的需要。

参考文献

- [1] 陈万青,单保恩,郑荣寿,等. 2003-2007 年中国肿瘤登记地区白血病发病与死亡分析[J]. 肿瘤, 2012,32(4):251-255.
- [2] 许钟麟. 空气洁净技术原理[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2014:330-331.
- [3] 葛均波,徐永健. 内科学[M]. 8 版. 北京: 人民卫生出版社, 2013:578.
- [4] 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, 40(7):58-62.
- [5] 许钟麟. 隔离病房设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2006:19-29.
- [6] 福祉设备协会. 病院设备设计ガイドライン: HEAS02-2013[S]. 东京: 株式会社白桥, 2013:19-21.
- [7] ASHRAE. Ventilation of health care facilities: ASHRAE 170-2017[s]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2017:815.
- [8] DIN. Ventilation and air conditioning-part 4: VAC systems in buildings and rooms used in the health care sector: DIN1946-4[S]. Berlin:DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2008:12-16.

通仓交融洁净手术室设计及研究

严建敏, 李 婕

(上海市卫生建筑设计研究院有限公司, 上海 200003)

[摘 要] 目前我国医院手术室大多数为单式为主, 手术室模式几十年来基本维持不变, 边际贡献已基本达到极限。为使手术室提高使用效率、加快手术周转率、改变高级医护人员缺少的“窘境”, 通仓交融洁净手术室的出现, 为我们提供了建设手术室一种新思路, 是解决目前医院缺手术室数量、缺高级麻醉师、减少护士数量的最有效的方法之一。

本文就通仓交融洁净手术室空调系统设计理念、设计方案、设计特点及防止交叉感染措施介绍给广大读者供参考。

[关键词] 通仓交融; 手术室; 空调系统; 交叉感染; 措施

0 引言

通仓交融手术室 (Barn Integrated Operating Room) 是多台手术交汇融合在一个大空间内的简称。通常指在一个完全开放的大空间内, 有多台手术可同时开展 (一般为 4 台手术) 的一个综合性的手术平台。4 台手术的团队在这平台上有机组合在一起, 在手术过程中相互交流、交汇、合作与融合。



图 1 通仓交融手术室内景

在这个综合手术平台上, 建筑空间是需控制的, 人员数量是受限制的, 手术区域环境是可控的, 洁净等级是可变的, 空调系统是变风量的, 气流组织是变化的, 运行是多样化的。在交融通仓手术室内, 经验较少的外科医生和麻醉师能够在专家指导下, 能成功地完成手术, 使他们的能力得到了锻炼, 并且增加了手术数量, 减少了人员配置, 提高了手术运营效率, 又可随时根据手术技术与装备的发展而变化。

1 通仓交融手术室设计方案

1.1 手术室概要及平面布局

通仓交融手术室一般能同时开展 1~4 台手术, 在手术进行时, 仅需要一位高级麻醉师及一名资深手术医生, 其余均由麻醉师、主刀医生及护士完成。一名巡回护士同时管理 4 台手术, 医护人员数量配置相比传统模式缩减 25%, 大大提高了工作效率,

而且手术空间、手术器具与设备、手术人员得以高效利用, 最大程度发挥高级外科医生与高级麻醉师的作用, 手术团队分享临床专业知识与手术技能, 使医院在有限优质医疗资源下, 更快、更省、更安全和更有效地服务治疗更多的病人。

通仓交融手术室一般建筑面积控制在长 23.4m×宽 8.4m=196m² (见图 2) 内, 手术内区与外区面积比 1:5.5 左右, 手术室人员与设备标准配置见表 (表 1、表 2), 手术室内设备和人员布置见图 (图 2)。

表 1 人员布置表

①	主任麻醉师	⑤	器械护士
②	麻醉师	⑥	患者
③	主刀医生助手	⑦	主任巡回护士
④	主刀医生	⑧	实习医生

表 2 设备布置表

I	手术床	VII	器械柜	(1)	器械台 1
II	LED 无影灯	VIII	保温柜	(2)	器械台 2
III	多功能吊塔 1	IX	保冷柜	(3)	等电位箱
IV	多功能吊塔 2	X	观片灯	(4)	地插座箱
V	麻醉柜	XI	书写台	(5)	医用气体箱
VI	药品柜	XII	控制面板	(6)	废弃物筒
				(7)	麻醉机

基于手术性质及对不同手术净化等级要求的区别, 四台手术均可在 I 级洁净手术室与 III 级洁净手术室之间任意变级切换, 而不影响其它手术的开展。也就是说 1# 或 3# 手术区按 I 级洁净手术室运行, 而其它 2#、4# 手术区可以是 III 级洁净手术室运行。理论上可以有 24 种运行模式。但当开展移植手术时, 通仓交融手术室只能按 I 级洁净手术室运行。

1.2 空调系统设计方案

通仓交融手术室, 共有 4 个即独立又关联的手术区域, 为使手术区处于受控状态, 并且各手术区能够灵活使用, 每个手术区采用 4 套独立空调系统, 而整个手术室采用 1 套新风空调系统, 有利于通仓交融手术室整体压力控制和正压维持。

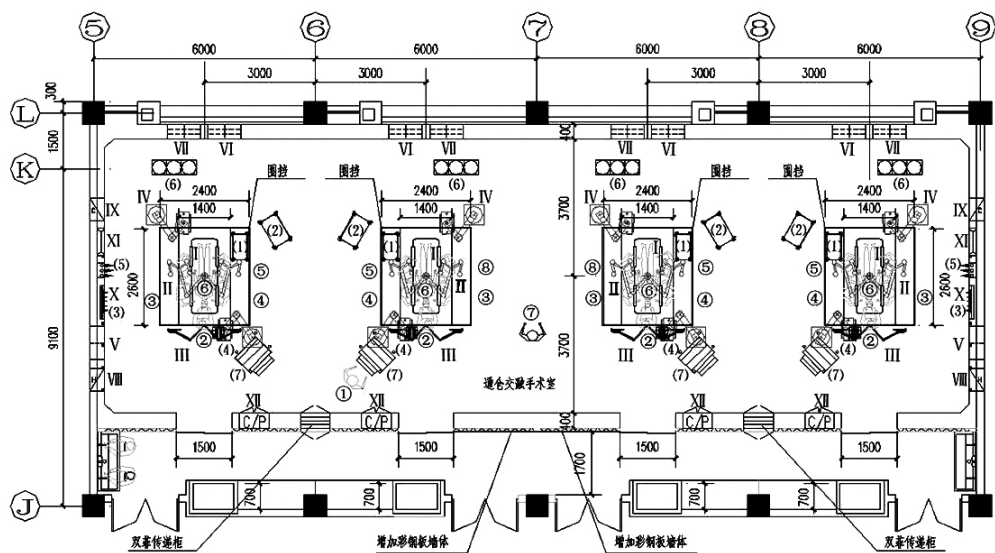


图 2 手术室设备与人员布置图

空调系统设计方案的核心理念是，采用集中新风空调系统消除手术室内湿负荷，循环空调系统调节手术室内温度，空调的 2 个系统分别对手术室内温度和湿度进行独立控制，使通仓交融手术室整体处于受控状态，各手术区可灵活使用。

1.2.1 设计参数

手术室室外参数参考上海地区，室内设计参数依据《医院洁净手术部建筑技术规范》（GB 50333-2013）指标确定：室内温度 24℃，相对湿度 50%，单个手术区平均室内人数 4.5 人。通过计算通仓交

融手术室（四个手术区）总冷负荷 $Q=89.7\text{kW}$ ，总湿负荷 $d=9.28\text{Kg/h}$ ，室内冷负荷 $Q_n=31.3\text{kW}$ ，新风负荷 $Q_w=58.4\text{kW}$ ，每个手术室控制区为 $2.6\text{m}\times 2.4\text{m}$ ，送风量 $9000\text{m}^3/\text{h}$ ，新风量 $1000\text{m}^3/\text{h}$ ，排风量 $500\text{m}^3/\text{h}$ ，渗透风量 $500\text{m}^3/\text{h}$ 。

1.2.2 温度湿度独立控制

根据以上阐述，通仓交融手术室净化空调系统采用温度湿度独立控制（见图 3），其特点是：洁净手术部内各手术室新风处理后状态点相同，并且是恒定的，各手术室循环空调系统自成独立系统，

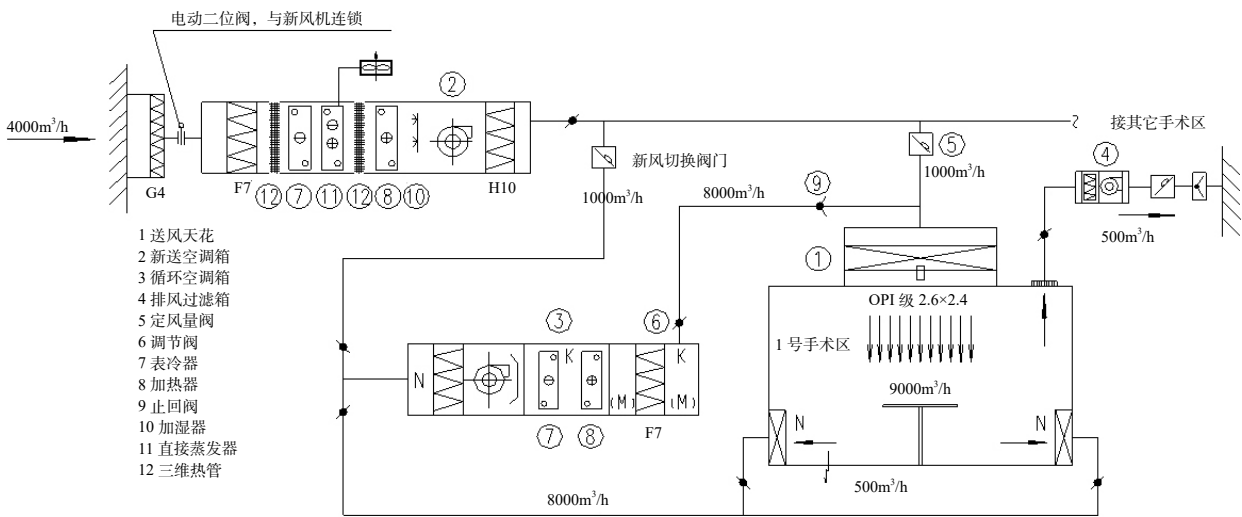


图 3 温度湿度独立控制空调系统图

回风的气流组织设计，可以有效控制各手术区菌尘沉降污染。但受通仓交融手术室平面及各种条件限制，上部下回气流组织有一定困难，我们按现有成熟的设计经验，送风形式设计成：I 级手术区上部送风，1/3 风量下回，2/3 风量上回，而 III 级手术区上部送风，全部采用下回风，并且 I 级和 III 级手术室下部回风不是平行于手术台长边两侧，而是在手术台短边一侧（见图 8），风量平衡计算表见下表（表 3）。

表 3 风量平衡和风口参数表

手术室级别	名称	总风量 (m³/h)	风口数量 (个)	风口风量 (m³/h)	风口尺寸 mm×mm	风速 m/s
I 级	送风天花	9000	1	9000	2600×2400	0.401
	回 风	3000(下)	2	1500	1000×400	1.04
		5000(上)	2	2500	4000×250	0.694
	排 风	500	1	500	360×360	1.07
	渗 透	500	—	—	—	—
III 级	送风天花	3000	1	3000	2600×1400	0.229
	回 风	2000(下)	2	1000	1000×400	0.69
		—(上)	—	—	—	—
	排 风	500	1	500	360×360	1.07
	渗 透	500	—	—	—	—

1.4 手术区 I/III 级别转换

《医院洁净手术部建筑技术规范》第 8.2.1 条规定，“I 级 ~III 级洁净手术室内集中布置于手术台上方的非诱导型送风装置，应使包括手术台的一定区域即手术区处于洁净气流形成的主流区内。”我们从 I 级 ~III 级洁净手术室集中送风装置面积中发现（图 6），不同级别的送风面积长度是固定的，不同的是宽度。

这样为我们了提供解决 I/III 级手术区转换的思路，将手术区集中送风装置分成三个送风箱体，可完美解决 I/III 级转换难题（图 7）。将 I 级手术区送风装置（2600×2400）分成 3 个箱体，即中心箱体 1 个（2600×500）为在长边二侧各增加 1 个箱体（2600×500）。将 3 个箱体组合使用即可达到 I/III 级手术区转换。当使用中心箱体时为 III 级手术区，当中心箱体和二侧箱体同时使用时为 I 级手术区。

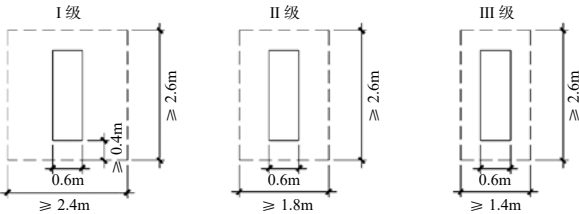


图 6 手术区送风装置面积

我们以 I 级手术区为例进行分析，送风为中心箱体和二侧箱体，送风总箱体（2600×2400），送风量 9000m³/h，箱体面积 2600×2400=6.24m²，截面风速 0.4m/s，送风管分以送风装置长边左右 6 路分支管，分别送入 3 个箱体。每路送风管上安装定风量阀，并固定设计风量，保证整个送风装置截面风速的均匀。每个定风量设双位控制，实施送风状态与关闭状态的切换。为维持各分支管路风量平衡，必须选择压力无关型定风量装置，才会随过滤器积尘而阻力增加等因数改变风量，长期维持送风装置截面风速的恒定。同样 III 级手术区送风时，开启中心箱体（2600×1400），送风量 3000m³/h，箱体面积 260×1400=3.64m²，截面风速 0.22m/s。关闭二侧箱体的定风量阀，实现低级别运行，大大减少了送风量，可以降低运行费用与能耗。具体变级别方式见表 4。

表 4 手术区变级别运行

工况	级别与送风量	运行操作	风量	送风装置面积
高级别洁净手术区	I 级，大风量	同时开启三个送风箱	9000m³/h	2.6×2.4m
中高级别洁净手术区	III 级，中风量	单独开启中间送风箱	3000m³/h	2.6×1.4m

1.5 手术区 I/III 级转换的空调系统实施

通仓交融手术室 I 级手术区送风量 9000m³/h，III 级手术区送风量 3000m³/h，送风量比为 3:1。根据风量与风压平方 ($L/L1=H/H1^{1/2}$) 关系计算，当循环空调箱送风量 9000m³/h，机外余压 600Pa 时满足 I 级手术区洁净度要求，当转换 III 级手术区时，风量需减少到原送风量的 1/3，机外余压降至 66Pa 左右，显然不能满足克服风系统阻力的要求。按风量 - 风压性能曲线，当空调系统完成后，管网性能曲线固定，而改变风机性能曲线必然的，也是可行的。我们将 I 级手术区 9000m³/h 的送风机，设计成二台 4500m³/h 的相同性能曲线的风机，当运行 I 级手术时，开二台风机，而运行 III 级手术时，开一台风机，这样当送风机 4500m³/h 改变 3000m³/h 时，机外余压 600Pa 降为 400Pa。按管网特性方程式 $H=KQ^2$ 计算，由于

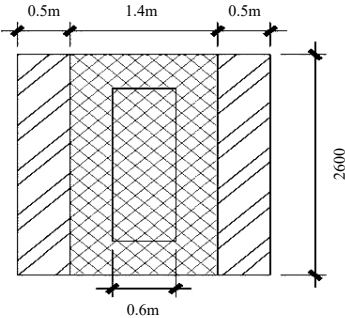


图 7 I/III 级转换送风装置

I/III 级手术区合用一套管路,阻力系数确定,风量减少使系统阻力减少 2.25 倍,循环风机产生的风压完全能克服风系统阻力。

一台风机单独工作时的风量大于并联工作时每台风机的风量,二台风机并联工作时,其并联工作时的风量不可能比单台泵工作时的风量成倍数增加 ($L1+L2 < 2L1$)。因此在选择风机时,应考虑相同型号风机在并联运行时,均处在风量高效率工作点而且风量大于单台风机风量的因数。

1.6 四管制冷热源

洁净手术室一年四季处于制冷、再加热、制热这种特殊状况,在以往的洁净手术室设计中,冷热源采用风冷热泵机组或冷水机组+热水锅炉,水系统采用二管制或四管制,洁净空调箱再加热采用电加热或热水盘管。风冷热泵机组难以满足同时供冷供热要求,而洁净空调箱采用冷却去湿再加热,形成冷热量互相“抵消”,造成明显不合理的能耗,使洁净手术室成为医院高能耗部门。采用多功能冷热源一体机,替代锅炉+冷水机组制冷和制热设备,是手术室一种比较合理的冷热源选择方案。

冷热源采用四管制多功能空气源热泵,可实现同时解决洁净手术部冷冻去湿、再加热的要求,达到恒温恒湿控制的目的。该方案取消空调箱内电加热,利用多功能空气源热泵余热作为再加热热源,节约了大量冷热量互相“抵消”的能耗。同时在过渡季节手术室可同时制冷制热,各类手术室之间互相不干扰。通过近几年在手术室的实际运行,取得了较好的节能效果。

2 气流模拟 (CFD) 试验

为验证通仓交融手术室采用上部回风气流组织的合理性,我们搭建了 1:1 实体模型 (1/2 型),目前正在做实体模型气流模拟试验,主要检验:

(1) 手术区内上回风是否影响在手术主流有效区域内单向流气流。

(2) 条形上部回风口和下部回风口结合回风是



图 8 通仓交融手术室实景图

否合理。

(3) I/III 级级别转换在多少时间内气流达到相对平衡。

(4) 手术室内温湿度场分布。

(5) 各手术区按 I/III 级运行时互相干扰问题。

模拟实验具体结果将在以后文章中讨论。CFD 模拟图 (见图 8) 得出主要结论:

(1) 手术灯对气流的影响较大,导致手术灯下方出现涡旋。但在非手术灯下方,流线基本保持直线。

(2) 在污物通道处设置下部回风口,导致手术室洁净通道侧出现较大涡旋,但此涡旋并未影响手术关键区。

(3) 上部回风口回风量大,能够在各个手术区之间形成气流方向向上的“空气幕”。

3 防止气流交叉感染措施

通仓交融手术室内气流组织是防止通仓交融手术室交叉感染的关键,也是通仓交融手术室洁净技术的核心。我们从气流组织和细菌控制三方面着手。首先各手术区采用各自独立的空调系统,为了使二台手术区之间气流尽量互不干扰,空调设计气流组织为, I 级手术区大风量送风时,采用 2/3 风量上回,送风天花送风气流下降到手术床高度后成 U 型气流上回至回风口 (见图 9),使二台手术区之间形成洁净气幕。当 III 级手术区小风量送风时,无法形成气流幕,采用下回风。手术室采用上回风形式与国

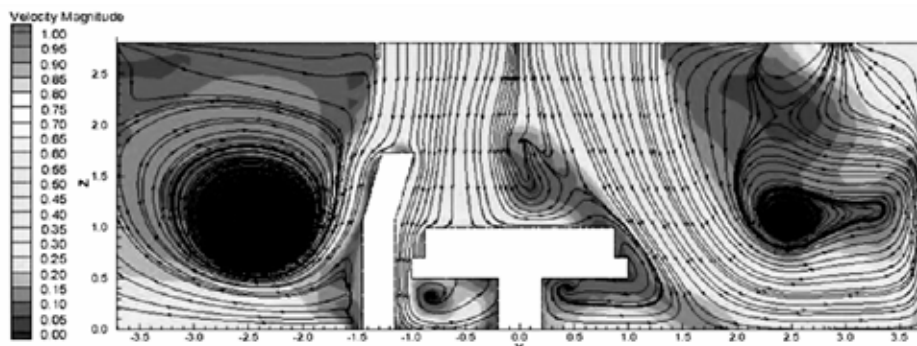


图 9 通仓手术室气流模拟图

家有关规范相抵触,我们正在实验室做气流模拟和细菌检测实验,论证上回风的合理性(国外手术室有上回风工程实例),实验室初步检测结果:洁净度满足洁净手术室的级别要求。

其次在二台手术区内安装 DNA 实时细菌检测和分析设备,该设备采用 DNA 基因技术检测细菌成份,当手术区细菌浓度超过标准值时报警,启动洁净空调箱加大细菌超标手术区的送风量,形成该手术区对二侧手术区正压,使手术区细菌浓度始终处于标准值。最后当各手术区手术结束不同步时,为防止各手术区术后打包交叉感染,采用密闭污物小车(图 11)替代术后打包,将术后各类器械、辅料等物品全部装入密闭小车内,密闭运出手术室送入医院中心供应室,彻底消除各手术区交叉感染潜在风险。

4 空调节能性分析

4.4.1 U 型三维热管夏季预冷

目前手术室空调系统基本上有二种方案,传统的一次回风加再热系统,另外一种温度湿度独立

控制、新风湿度优先控制。二种空调系统方案从 h-d 图上分析,从 L1 点加热到 T 点,可利用余热、废热进行加热。新风冷却后再加热有多种方案,如可采用多功能热泵机组的废热再加热,也可采用直接蒸发冷却器的冷凝热再加热。本方案采用三维热管技术,在新风空调箱表冷器前后侧增加 U 型热管,夏季新风预冷却,可节省冷量 $Q=4000 \times 1.2 \times (90.6 - 85.2) / 3600 = 7.2 \text{ kW}$,经新风直膨机深度冷却后,再将新风再热 $Q = 4000 \times 1.2 \times (33 - 29.4) / 3600 = 4.8 \text{ kW}$,节省新风能耗约 12kW。采用三维热管技术,在夏季对提高新风最终处理温度,在冬季减少新风相对湿度,使新风控制系统内出风口空气相对湿度不大于 75%。

4.4.2 温湿度独立控制方案节能分析

通仓交融手术室空调方案放弃了一次回风加再热方案传统方案,采用温度湿度独立控制、新风湿度优先控制方案,并在新风空调箱内采用三维热管技术。经计算比较,通仓交融手术室夏季总冷量 94.4kW,其中:新风机组中一级制冷段由冷水机组

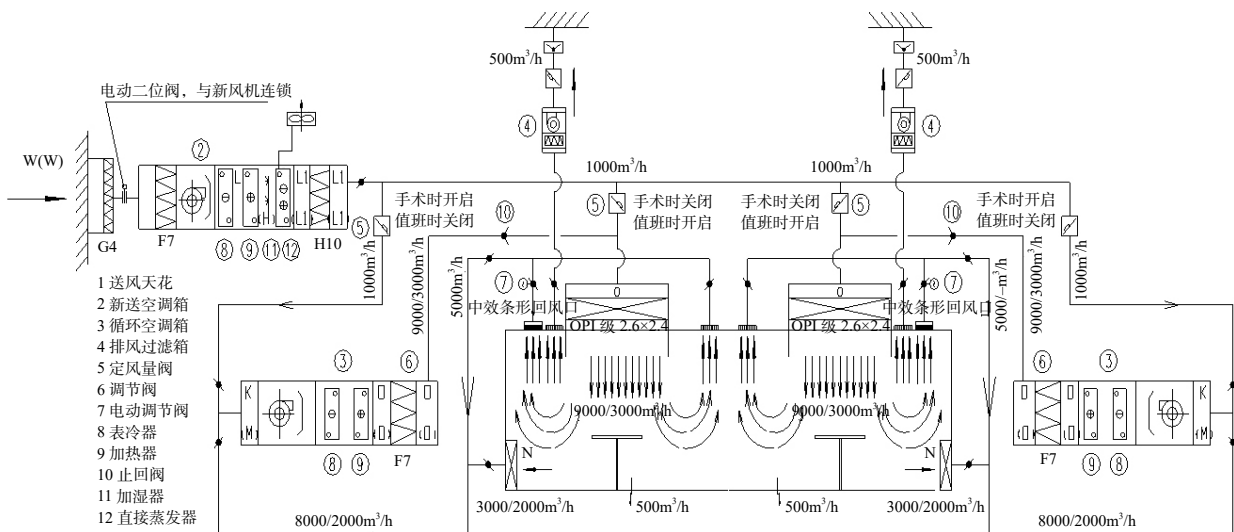


图 10 洁净空调系统及气流分析图



图 11 密闭污物小车

表 5 洁净手术室耗冷量比较

洁净度等级	送风量 /(m ³ /h)	一次回风加再热方案				温度湿度独立控制方案			
		总冷量 /kW	循环冷量 /kW	新风冷量 /kW	再热量 /kW	总冷量 /kW	新风再热量 /kW	新风冷量 /kW	循环再冷量 /kW
I	9000	49.87	37.7	12.17	16.6	23.6	5.4	17.3	6.3
III	3000	23.8	12.6	11.2	5.5	20.3	3.4	16.4	3.9

注：一次回风加再加热方案 I-D 图，见暖通空调 2015 年增刊 2。

承担 48.8kW，二级制冷段由直膨机承担 20.4kW，循环机组冷量 25.2kW（单台冷量 6.3kW），冬季总热量 34.4kW，新风加热量 21.6kW，循环机组加热量 12.8kW（单台热量 3.2kW），加湿量 25kg/h。

对比传统的一次回风加再热方案，总冷量约为 199.48kW，其中：新风机组冷量 46.68kW，循环机组冷量 150.8kW。两方案比较，采用温湿度独立控制方案，总冷量约为 94.4kW，每年运行 1500h，年耗能 14.16 万 kW·h 电。采用一次回风再加热方案，总冷量约为 199.48kW，如每年运行 1500h，年耗能 29.92 万 kW·h 电；前者比后者每年少用电 15.76 万 kW·h。按热泵机组最低 COP=3.0 估算，一间通仓交融手术室一年可节电 315.24kW。

作者将通仓交融手术室空调方案，采用传统的一次回风加再热方案和温度湿度独立控制方案进行比较结果如表 5 所示。

5 结论

5.1 通仓交融手术室在国内医院建设标准或规范中，如我国《医院洁净手术部建筑技术规范》（GB 50333-2013）尚未涉及，需要不断努力从控制思路、设计计算、实体模型、数值模拟等方面在具体工程中验证后实施。

5.2 我国胸外科微创手术已经不亚于国外，通仓交融手术室能在很大程度上提高手术室运营效率，

改善感染控制并最大程度降低运行成本。对于我国大型专科医院手术室来说，这是一个“减量增效”的新思路。

5.3 通仓交融手术室可减少医护人员总数量约 25%，高级麻醉师及资深护士约 37.5%，人力成本降低 9.38%，手术量可提高 25% 以上，经济效益增加显著。

5.4 通仓交融手术室空调系统有四大特点：

- （1）手术室温湿度独立控制；
- （2）空调冷热源四管制系统；
- （3）I/III 洁净等级可转换；
- （4）上回风和下回风形式有机组合。

5.5 通仓交融手术室洁净 I/III 等级可转换，使在切除不良结节的手术量过程中，需调正手术方案，扩大手术视野而转换洁净度成为可能。

参考文献

[1] 刘燕敏, 李晓颖, 等. 《通仓交融手术室的沿革与拓展》中国医院建筑与装备 2018No6.
[2] 严建敏. 《洁净手术室空调系统温湿度独立控制方案探讨》暖通空调 2015 年增刊 2.
[3] 沈晋明, 刘燕敏. 俞卫刚 / 《级别及风量可变洁净手术室的建造与应用》中国医院建筑与装备 2018No6.
[4] 医院洁净手术部建筑技术规范 GB 50333-2013.

解读德国 DIN1946-4-2018 版标准

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] 2018 版 DIN1946-4 标准“医疗建筑与用房通风空调”提出了医疗环境控制的宗旨是防止感染, 保护医疗器械和相关职业健康与安全要求的三大任务。不仅肯定了置换流(医学界习惯称为层流)对手术环境控制的三大任务的正面效应, 提高了医疗环境的控制要求, 完善了控制措施。而且规定了确认手术室级别的程序以及手术保护区域的定位分析。特别提出了医院卫生专家和卫生工程师对医疗环境控制的职责。

[关键词] 医疗建筑与用房通风空调; 标准修订; 医疗环境控制宗旨; 控制措施; 层流通风效应

0 引言

2018 年 06 月德国标准研究院(DIN)颁布了新版 DIN 1946-4: 室内通风技术 - 第 4 部分: 医疗建筑与用房通风空调^[1]。与该标准同时公布的还有附件: 设备部件的规划、实施、运行的要求清单。这两份文件都是由 DIN 供暖和室内通风技术及其安全标准委员会(NHRS)中的相关专家组和规范制定者参与制订。2018 年 09 月又对标准中“空气过滤器一般要求”做了些变更。

该标准的修订过程与颁布一直引人关注。自从德国 Brandt 博士在美国外科学会年刊(Annals of Surgery) 2008 年 11 月刊上发表了一篇《手术室层流通风对防止整形和腹腔手术的手术部位感染没有效果》^[2], 引起了激烈讨论。德国权威的机构罗伯特·科赫研究院(RKI)的医院卫生和感染预防委员会(KRINKO), 德国医疗卫生协会(DGKH)和德国 DIN1946-4 标准委员会均介入了此事, 对此发表了各自的看法, 我们对此做了详细的报道^[3]。2016 年 11 月, 世界卫生组织(WHO)发布了《预防外科手术部位感染的全球指南》, 在 4.23 节“手术室通风情况下的层流通风系统”中明确建议“层流通风系统不应该用于降低接受全关节置换术手术的患者的手术部位感染风险”^[4]。在世界范围内影响很大, 似乎层流送风不适合手术环境控制。德国 DIN1946-4 标准委员与德国医疗卫生协会(DGKH)承受很大压力, 对此十分重视。不少学者进行了针对性的研究或发表论文。较为著名的, 德国成立多学科医疗环境的调研小组, 先对手术室送风装置的性能与维保状况认定后, 才开始进行监测。经过长达 6 年, 监测了同一医院同一手术团队分别在湍流(俗称乱流)和置换流(医学界习惯称为层流)手术室的共 1286 台手术, 结论认为置换流通风对降低室内悬浮菌和手术部位感染率是有效的^[5]。认为 WHO《预防外科手术部位感染的全球指南》所依据的文献的最大缺陷是对所调研手术室的送风装置性

能以及维保状态没有经过工程界的认定, 无法排除送风装置性能或维保不合格等诸多关键因素的干扰, 影响了循证的公正性。对此我们也及时进行了评述, 提出我们的看法^[6]。

2018 年德国医疗卫生协会(DGKH)发布官方立场文件, 全面、理性地论述了手术部位感染、手术室通风与医护人员纪律, 对历来的论文与 WHO 指南作了客观地评价。认为在任何情况下, 都不能提出反对在手术室使用层流通风的建议。层流送风装置确保了 3m×3m 的手术保护区域, 优于传统的湍流通风——在减少病原体和微粒、消除潜在致癌外科烟雾方面更为有效, 从而保护了患者、外科医生和暴露在外的器械。外科科室应依据现行有效的 DIN 1946-4 的规定、手术过程的风险, 安装层流通风^[7]。

尽管在修改过程争论很大, 但基于过硬的调研成果与正确的循证, 意见趋向一致, 至 2018 版标准 DIN 1946-4 “医疗建筑与用房通风空调”颁布(以下简称 2018 版标准), 尘埃落定。认为标准满足了医疗建筑与用房室内通风空调设备在规划、建造、验收和运行方面的技术要求, 包括医院, 日间诊所, 日间手术中心, 透析中心和医疗设备与器械加工单位。

1 2018 版标准的主要修改点

2018 版标准包括 8 章、6 个附录和 1 个附件, 分别为: 前言, 1 适用范围, 2 规范性参考文献, 3 术语和缩写, 4 一般原则, 5 房间级别和通风要求, 6 通风空调部件, 7 系统合格评定和验收检测, 8 定期检测。

附录 A(资料性)项目规划阶段指南, 附录 B(规范性)可视化初步检测, 附录 C(规范性)防护等级测定, 附录 D(规范性)湍流度测量, 附录 E(资料性)手术灯的系统测试, 附录 F(资料性)微生物监测。以及附件设备部件的规划、实施、运行的要求清单。

其中附录 E、附录 F 以及附件是新增的。

德国 DIN1946-4 标准委员会修订思路与具体条文的修改很大程度受到 WHO《预防外科手术部位感染的全球指南》文件的影响。尽管 DIN1946-4 标准委员会认为 WHO 在循证上出现问题,但是换个角度考虑,至少说明原标准只是从本专业出发,考虑不周全,才会发生类似问题。这次 2018 版标准与原 DIN 1946 4:2008 (以下简称原标准)相比^[8],主要有以下几点更改:

(1) 考虑到防止感染,医疗器械保护和相关职业健康和安全要求;

(2) 修改技术方面与卫生方面验收测试和再测试,设备认证相关标准和所需程序;

(3) 根据 DIN EN ISO 14644 “洁净室和相关受控环境”的洁净室和洁净室区域的现行国际法规,对手术室的测定进行详细说明;

(4) 依据 DIN EN ISO 16890-1 “基于颗粒物过滤效率 (ePM) 的技术要求与分级体系”中对过滤器分级的新定义/命名法,进行调整;

(5) 补充了用于设备部件规划,实施和运行的清单,作为附件。

首先,2018 版标准在第 4 章“一般原则”中明确医疗环境控制宗旨不再仅仅是预防空气途径感染控制,而是“防止感染,医疗器械保护和相关职业健康和安全要求”这三大任务。在大量的研究与调查基础上确定了悬浮菌沉降对医疗器械的负面效应,特别是在围手术期间。医疗环境控制不仅仅保护病患,也要保障医护人员的职业健康与安全。如电外科释放的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^[9],并指出应在手术室中安装适当的、有效的室内通风设备的必要性。

2018 版标准强调了依据现行的国际标准 DIN EN ISO 14644 对手术室进行测定。直接采用 DIN EN ISO 16890-1 中对过滤器分级的新定义与命名法,改变了传统的通风空调系统中设置空气过滤器的级别名称,在医疗标准还是第一次。因为 DIN EN ISO 16890-1 在净化领域内应用还存在着不少争议。

2 2018 版标准对手术室的要求

2018 版标准对于手术室的阐述以及相应条文最受人关注。2018 版标准在第 5 章基本上维持了原标准的医疗用房的分级以及对各类医疗科室最低要求与相应控制措施。并再次明确采用通风空调的医疗用房分为 I 级和 II 级。

2.1 手术部用房分级

手术部用房有 I 级和 II 级,均要求保持正压。手术室均为 I 级,送风末端均要求配置不低于 H13 的高效过滤器。其中要求 Ia 级手术室与器械准备室内的连续空间内配有低湍流度置换流 (TAV, 医学界习惯称为层流) 送风装置,在保护区内要求每小时换气 > 300 次。Ib 级手术室配置稀释湍流 (TAS) 送风装置,也可以配有低湍流度置换流送风装置,要求每小时换气 ≥ 20 次。与手术室直接连接的用房为 I 级,与手术室不相连接的用房为 II 级。

2018 版标准再次正面肯定了 Ia 级手术室低湍流度置换流的正面效应。研究证明低湍流度置换流比稀释湍流在保护范围内降低病原体 and 颗粒负荷的效果明显高得多。并在总结了 Ia 级手术室与 Ib 级手术室两种不同送风气流模式的重要特征 (见表 1)。

表 1 两种不同送风气流模式的重要特征

特征	Ia 级低湍流度置换流手术室	Ib 级稀释湍流手术室
明确的保护区域:	有	否
从手术区域快速清除颗粒 (自净时间 $< 1\text{min}$)	是	否
手术区域的细菌负荷 $< 1/50\text{ cm}^2$	是	否
器械台上的细菌负荷 $< 1/50\text{ cm}^2$	是	否
快速消除手术团队呼吸区域的烟雾粒子	是	否

2.2 对手术部不同用房提出了最低的通风空调要求与相应措施 (见表 2)

2.3 手术室级别确定、保护区定位与要求

为了更准确地定位手术室级别、控制要求与使用,2018 版标准提出了医院卫生专家 (Krankenhaustygeniker) 和卫生工程师 (Hygiene-Ingenieur) 的定义。医院卫生专家是与 KRINKO 的定义相称的人,我国 GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》采用了“医院卫生学 (Hospital hygiene)”术语,是指维持医院关键科室的卫生状态,主要任务是防止感染及有害气体和化学物质的危害。那医院卫生专家就是防止感染、有害气体和化学物质的危害的专家 (不仅仅是感控专家),并用流行病学的方法进行监测调研发现问题以寻找合适的控制措施。卫生工程师被定义为独立于设计人员和安装人员,拥有专门从事通风,并具有医疗卫生方面的知识和经验的工程师。我国医疗机构还没有专门的医院卫生专家与卫生工程师。

在设计规划时先要确定手术室级别以及控制要求。2018 版标准要求使用者 (院方) 必须以书面形式提交要进行的手术类型、手术持续时间、手术区域的大小、手术床的数量和位置、以及器械台的大小和布置。医院卫生专家和卫生工程师作为责任方,依据这些数据来确定手术室级别。特别强调手术室的级别应在该手术室中实施最严格要求手术所需

表 2 手术部用房的最低通风要求

用房用途	最低要求	措施
1 手术部	正压平衡：所有送风量的总和>所有出风量的总和。 房间最好使用表面光滑且易于清洁和消毒的器具的供热。不允许使用对流散热器。	手术部：Ⅱ级用房至少有两级空气过滤。手术室 / 器械准备：Ⅰ级用房有三级空气过滤。
1.1 所有手术室	正压平衡：所有送风量的总和>所有出风量的总和。 在设计邻近房间 / 走廊的正压渗漏缝隙口之前，应考虑由 X 射线 / 激光，手术烟雾和麻醉气体引起的健康危害。 超出运行时间应满足 6.9 的要求。 根据医疗用途，每个手术室的手术区域的温度应在 19℃ 和 26℃ 之间调节。 室外新风量 $\geq 1200\text{m}^3/\text{h}$ 。 空气湿度生理要求：30%~65%（不大于：13g/kg 绝对湿度）。	手术室 / 器械准备：Ⅰ级用房有三级空气过滤。正压渗漏缝隙应保持必要的最小值；优先通过门下缝隙口。 出风终端设备为绒毛分离器。 在手术室中心装饰后地面高 1.8m 处确定通风空调系统的声功率级。 室外新风量应排除有害气体（麻醉气体，消毒剂产生的气体，手术烟雾等）引起的健康危害。 悬吊式天花板确保相对于手术室的负压。
1.1.1 Ia 级手术室	整个受保护区域内置换流（低湍流度）。 确定的保护区的有效性。 送风装置的送风量 $\geq 900\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \text{ 出口面积}) (+10\% \text{ 冗余})$ ，取决于具体设计。 声压级 $\leq 48\text{dB(A)}$ 。 无菌器械放置 / 准备，敞开的医疗器械以及其他使用的医疗器械应存放在保护区内。	将室外新风与其余再循环空气彻底混合。 保护区上方的送风装置的出口面积应大于保护区面积。 送风装置出口可设置旋转气流稳流器，放置在装饰后地面上方约 2.10 m 处。 在房间使用期间调节房间供暖，以使出风温度不低于送风温度。
1.1.2 Ib 手术室	声压级 $\leq 48\text{dB(A)}$ 。 送风量 $\geq 60\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \text{ 手术区面积}) (+10\% \text{ 冗余})$ ，取决于具体设计。	
1.1.3 无菌物品存放		
1.1.3.1 仅与手术室直接连接用房	防止悬浮菌尘负荷进入或离开相邻的手术室	Ⅰ级用房有三级空气过滤。通风平衡：所有送风量的总和 = 所有出风量的总和。
1.1.3.2 与手术室不直接连接用房	防止悬浮菌尘负荷从邻近房间进入无菌物品或软包装的容器中	Ⅱ级用房有二级空气过滤 正压平衡：所有送风量的总和>所有出风量的总和。 部分送风可溢流到邻近的走廊
1.1.4 器械 / 准备间	使用的器械和其他医疗器械应在与手术期间相同的通风条件下放置 / 准备 / 储存。	Ⅰ级用房有三级空气过滤。
1.2 手术区域内的其他房间	室外新风量 ≥ 1.5 次换气 (1/h) 但是 $\geq 40\text{m}^3/\text{h}$ 每人。 室内空气温度为 22℃ 至 26℃。	Ⅱ级用房，两级空气过滤。
1.2.1 走廊 / 储藏室	室外新风量 $\geq 5\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。	Ⅱ级用房，两级空气过滤。
1.2.2 使用麻醉气体的房间（例如麻醉准备，恢复室，病人被移到另一张床的前厅）	室外新风量：每位患者 $\geq 150\text{m}^3/\text{h}$ 。	Ⅱ级用房，两级空气过滤。
1.2.3 非无菌工作室，处理室	室外新风量： $\geq 15\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。 与邻近房间相比为负压：所有送风量的总和 < 所有出风量的总和。	Ⅱ级用房，两级空气过滤。

要的级别来定义。此外，还应考虑潜在干扰因素（例如手术子母灯，在天花板安装的装备单元，如吊塔和设备机架，显示器，散热器等）对低湍流度置换流的影响。

如果在设计时需要单独的房间或区域内使用器械桌和无菌医疗设备，则应确保与用于该手术室的级别（Ia 或 Ib）相同的卫生通风条件。

2018 版标准对于定为 Ia 级手术室要求对其保护区进行定位分析，由以下几点确定：

（1）这间手术室要进行的所有手术中最多可能的设置所需要的最大面积；

（2）手术床的定位或放置，手术区域的大小和数量，放置无菌器械 / 材料 / 植入物 / 移植物（器官）的托盘，医疗设备（例如 C 型臂，洁净手术室吊塔等组件），穿着无菌服的手术团队在手术过程中通常的移动区域等。

可见，Ia 级手术室的保护区面积不一定是所谓“标准尺寸” $3\text{m} \times 3\text{m} (9\text{m}^2)$ ，对应的低湍流度置换流

的送风装置也不一定为“标准”的 $3.2\text{m} \times 3.2\text{m}$ 。是根据具体要求的定位分析而确定的。

最后要满足表 1 所示的 Ia 级手术室的保护区要求，从送风装置出口到达手术床上方（离装饰后地面 1.0m）保护区应处于低湍流度置换流，在手术过程中能去除保护区内污染物，特别是微生物，手术烟雾和令人不快的气味。还应防止从非手术区域的污染物进入保护区内。

2.4 手术部用房空气过滤器要求

2018 版标准仍然将空气过滤器作为标准唯一的空气净化部件，其中Ⅰ级和Ⅱ级用房的空气过滤器的配置与要求见表 3。明确Ⅰ级用房配置三级过滤，第一级与第二级过滤器按 DIN EN ISO 16890-1 定义。末端过滤器至少为 H13 的高效过滤器，按 DIN EN 1822-1 标准定义。医疗护理机构内的用房除了Ⅰ级用房外，其他用房都归于Ⅱ级用房，这意味着其他用房均需采用机械通风并配置两级空气过滤器。这点与美国相关的标准趋于一致。

表 3 I 级和 II 级用房的空气过滤器的配置与要求

空气过滤器配置	I 级用房	II 级用房	相关标准
第一级	ISO e PM1 / ≥ 50	ISO e PM1 / ≥ 50	原标准 DIN EN 779 F 7
第二级	ISO e PM1 / ≥ 80	ISO e PM1 / ≥ 80	原标准 DIN EN 779 F 9
第三级	至少 H13	—	DIN EN 1822-1 标准 H 13

2.5 非手术期间允许节能运行

非手术期间降低 I 级手术室中的风量，维持正压是可以的。2018 版标准也允许在非手术期间关闭手术室，但要求手术室在最后一次清洁（因清洁会增加额外湿度）后关闭所有门，空调系统继续运行 $\geq 30\text{min}$ 或直到完全去除因清洁增加的湿度。并须确保重新启动系统后，室内环境检验结果符合本标准要求。

出于管理、组织或技术原因，院内有个别手术室保持通风空调持续运行可能有用的，以便在紧急情况下手术室立即启用。

手术部内在非手术期间允许关闭 II 级用房的通风空调。

3 完善医疗环境设施的通风空调系统与部件

2018 版标准鉴于过去主要是医院的感控人员在调研 I 级手术室对手术部位感染的关系。由于微生物检测与统计方法不统一，以及通常不涉及手术室设施的实时性能，造成循证与调研结论的偏差。但是，在客观上反映出现有的手术室设施确实存在产品性能、施工质量与维护保养不佳等各种问题。

为了防止对医疗环境不合适的监测，以及医疗环境监测前没有对环境控制设施的认证而产生的误解与误导，2018 版标准重点修改了对医疗环境在技术与卫生方面验收测试和再测试，以及设备认证的相关标准和所需程序。特别在新增的附件 F（资料性）“微生物监测”中规定评估手术室生物污染水平应根据 DIN EN ISO 14698-1 “洁净室和相关的受控环境 - 生物污染控制 - 第 1 部分：一般原则和方法”提出的微生物检测方法进行选择 and 验证。并要求一旦不符合要求，医院卫生专家和卫生工作者应安排进一步测试以确定原因。改进措施的类型、范围和紧迫性将取决于该用房规定阈值，以及超出这些阈值的数量。

另外还完善了在 2018 版标准的第 6 章对通风空调系统与部件要求相应的条文，在第 7 章对系统合格评定和验收检测以及在第 8 章的定期监测。认为只有第 7 章中描述的技术和卫生测试才能用于检查通风空调系统的功能。

2018 版标准还以附件形式颁布了设备部件规

划、实施和运行的清单，将所有要求清单化，这是一大进步。为医疗环境控制建立了完整的保障体系。笔者列举了其中部分清单形式（见表 4）。

表 4 设备部件技术测试的检查清单

	确定	不确定	不能使用	需要改进	需要验证	备注
6.1 一般原则						
通风和空调系统的所有输送空气的部件应设置在容易触及的地方，并且出于卫生要求，最好的布置方式，可以避免进入 I 级空间进行清洁和维护						
必须在所有通风区域设计，操作和维护送风系统和再循环系统，能够安全地避免由无机或有机物质（例如系统中的有害气体）导致送风不许可的污染，且可认为送风是无味的。						
6.1.2 气流中的表面和材料						
通风区域的送风和再循环系统必须由这样的材料制成						
● 不释放有害物质						
● 不构成微生物滋生地						
● 没有纤维						
● 不含有害物质						
● 无气味						

针对表 3 的检查清单，以下笔者归纳些 2018 版标准中相关条文的叙述，以供参照。

总则 通风空调系统的所有气流分配部件应易于触及并便于维保。应满足 VDI 3803 第 1 部分“通风技术 - 结构和技术要求 - 集中式空调系统”和 VDI 6022 第 1 部分“室内空气技术，室内空气质量 - 通风和空调系统和设备的卫生要求”的相关规范要求。

提高了送风质量的要求 认为只要气流流经医疗区域的通风空调系统的设计、运行和维护方式不允许无机或有机物质污染送风。例如，避免系统内的有害气体，且送风被认为是无味的。如果没有关于生物和化学污染物浓度的健康相关阈值，如微生物挥发性有机化合物（MVOC）、内毒素、过敏原、病原体和手术烟雾，则将室外空气作为参考点，要求送风中的菌尘含量至少符合 DIN EN 16798-3 中 1 类户外空气的要求。

送风和再循环风系统应采用不排放有害物质且不为微生物提供滋生地的材料制成。为此，应确保所使用的设备和系统部件不会将任何有害物质，纤维或气味释放到气流或房间内。气流内的任何多孔衬里（例如阻性消声器）都应覆盖适当的耐磨材料（例如玻璃丝或钢板）。

气流流经的表面，部件和配件的设计和制造应使其光滑（并防止受划伤，无毛刺）和耐磨性，防止灰尘沉积并能确保清洁。

任何部件及其连接、支撑和其他固定装置的设计应避免灰尘颗粒局部沉积，并便于手动和机械清洁。所有部件和材料，包括密封件和密封剂，均不

得对健康有害,不得散发异味或有害物质,不得为微生物提供滋生地。仍坚持空调系统蒸气加湿,美国 ASHRAE170-2017 标准已经有条件允许绝热加湿了。

保障 I 级用房的医疗环境控制 为了保障 I 级用房的医疗环境控制,2018 版标准做了更完善的规定。验收 Ia 级手术室要根据 DIN EN ISO 14644 要求,如按照手术室面积计算测量点数,检测自净时间至少 2 个测量点等。I 级用房应确保天花吊顶板上的空气不会渗入(负压)。并设置(可闭合的)压差测试口(直径至少 8mm)进行监测。所有通风空调部件的设置不应进入 I 级房间进行清洁和维护。如果只能通过 I 级房间进行维护的,则应在卫生计划中规定的每次检查或维护活动后对相关房间进行清洁和消毒程序。

在 I 级用房如手术室中,可以使用墙壁和天花板表面供热(冷)系统。主要应是辐射型表面供热(冷)。供热和冷却表面应光滑、封闭、可清洁、且耐消毒剂。开放式冷却天花板和悬挂式辐射式天花板,不允许在医疗用房或医院消毒供应中心(CSSD)使用。

这样在 Ia 级手术室进行手术时可以保持送风温度的恒定调节。如有必要(如室内负荷变化),通过调节室内热(冷)量从而保证了 Ia 级手术室和准备区中的置换气流效果。可以避免在进行手术期间,因室内负荷变化导致送风温度提升。

保证空气过滤器的有效性与安全性 空气过滤器合理选择与合适设置是保证其有效性与安全性的有力措施。要求第一级过滤应位于空气处理机组内进风口,最长使用寿命应限制在 12 个月。第二级过滤应是空气处理机组的最后一个部件,最长使用寿命应限制在 24 个月。第三级过滤应安装在送风口的压力侧,使用寿命取决于最终压降和制造商的规定,可持续使用时间最长可达 10 年。末端高效过滤器定期检漏从原标准的 36 月,改为 24 月。对于末端高效过滤器运行时间超过 6 年,则要求定期检漏为 12 月。系统中配置三级过滤器均应各自配备差压计,便于及时更换。

在设计阶段,应确保防止在空气过滤器附近低于露点的温度,特别是在系统非运行期间。加湿器或除湿功能的冷却盘管的设置位置应避免水分对过滤器的渗透;在任何情况下,任何具有除湿功能的冷却器都不得直接安装在任何过滤器的上游。蒸汽加湿器应保持制造商规定的必要蒸发距离。

2018 版标准允许当送风设备在医疗用房自循环,可以使用二次空气冷却装置。但要达到该标准

的要求,须配备两级空气过滤。并符合 VDI 6022 中对于可检查和可清洁的要求

4 结语

面对着从 Brandt 论文到 WHO《预防外科手术部位感染的全球指南》对层流效应的质疑,DIN1946-4 标准委员会将这一挑战变成完善标准自身的一次契机。一方面组织了多学科进行了正确调研与循证,另一方面冷静地反思了 DIN1946-4-2008 版标准的不足之处。这次 2018 版标准以崭新面貌问世。提出了医疗环境控制的防止感染,保护医疗器械和相关职业健康与安全要求的三大任务。不仅肯定了置换流(医学界习惯称为层流)对手术环境控制的三大任务的正面效应,而且确认手术室级别更为慎重。明文要求医院卫生专家和卫生工程师作为责任方,依据院方提供的数据来确定手术室级别。这种“理性对待层流手术室”的态度与我国是一致的^[10],医学界习惯称为的层流在我国 GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》中更为确切地表达为“非诱导型送风气流”。

当然 2018 版标准的修编,提高了医疗环境的控制要求,提高了送风质量的要求,完善了控制措施。在大多数场合,客观上扩大了 Ia 级手术室的保护区。明确手术室以及与手术室相通的用房均为 I 级,要求送风末端至少配置 H13 高效过滤器。医疗护理机构内的用房除了 I 级用房外,其他用房都归于 II 级用房,这意味着均需要机械通风并配置两级空气过滤器。提高了普通医疗科室用房的环境控制要求。这些都无疑会增加医院相应的能耗。这次修编又删除了原 2008 版的第 6.5.7.1 中,关于 Eurovent 能效等级 A 的要求。从节能角度看不免有些遗憾,也许 2018 版标准的重点回到了“有效控制医疗环境”这一初心上来。

可谓十年磨一剑,10 年来 DIN1946-4 标准备受质疑,承受了巨大压力,标准委员会以科学的态度、严谨的循证,经 10 年激烈讨论与反复修订,终于统一思想,颁布了 2018 版标准,澄清了医疗环境控制中一些重大问题,提出了相关的合适控制措施,我们相信 2018 版标准的实施将对推动医疗环境控制的发展发挥重大作用。

参考文献

- [1] Deutsche Institut für Normung, DIN 1946-4 Raumlufttechnik – Teil 4: Raumlufttechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens[S]. Berlin: Beuth Verlag, Juni 2018.
- [2] Brandt C, Hott U, Sohr D, et al. Operating room ventilation with laminar airflow shows no protective effect

on the surgical site infection rate in orthopedic and abdominal surgery[J]. *Annals Surgery*, 2008,248(5):695–700.

[3] 沈晋明, 刘洋, 评议德国手术感染控制措施的讨论 [J]. *暖通空调*, 2010,40(12):13–19.

[4] World Health Organization. Global Guidelines for the Prevention of Surgical Site Infection.

<https://www.who.int/infection-prevention/publications/ssi-prevention-guidelines/en/>.

[5] Fischer S, Thieves M, Hirsch T, 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.

[6] 沈晋明, 刘燕敏, 评述《预防外科手术部位感染的全球指南》4.23 节 [J]. *暖通空调*, 2017,47(11):61–

67.

[7] Declaration of the Board of Directors of the German Society of Hospital Hygiene. Air Quality in the Operating Room – Surgical Site Infections, HVAC Systems and Discipline. <https://www.krankenhausthygiene.de/english-information/>.

[8] 沈晋明, 简介新版德国医院空调标准 DIN1946/4 [J]. *暖通空调*, 2010, 40(2):13–17.

[9] 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.

[10] 许钟麟, 沈晋明, 中国手术室集中送风方式的应用 [J]. *暖通空调*, 2018,48(7):21–26.

大动物生物安全三级实验室内防护区边界分析

周 权¹, 冯 昕¹, 曹国庆¹, 梁 磊¹, 张彦国¹, 吴东来², 关云涛², 吴新洲²,

王 栋², 李晓斌³, 唐江山³

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 中国农业科学院哈尔滨兽医研究所, 哈尔滨 150069;

3. 中国农业科学院兰州兽医研究所, 兰州 730046)

[摘 要] 本文通过对比加拿大和我国的生物安全实验室标准, 以及工程实例, 分析了生物安全防护区的差异, 建议规范增加大动物生物安全三级实验室内防护区的概念, 进而提出了对 GB 50346 中 4.1.4 和 4.2.5 条修改的建议。

[关键词] 生物安全实验室; 内防护区; 边界

0 引言

根据世界动物卫生组织 (OIE, World organization for animal health) 发布的“非洲猪瘟 (ASF) 全球形式”, 2016~2018 年期间, 全球共爆发了 1764 起非洲猪瘟疫情, 涉及家畜 819644 只, 其中包含我国 29 起非洲猪瘟疫情, 涉及家畜 45328 只。^[1] 在艰难的抵抗百年之后, 我国成非洲猪瘟的疫区, 虽然非洲猪瘟不是人畜共患病, 但对于我国这样一个生猪存栏量超过 5 亿头的国家来说, 非洲猪瘟无疑是对生猪养殖业造成了灾难性的打击。为了能够有效的控制和预防高致病性、高死亡率的病菌传播, 科学家们需要对这些病菌做细致的分析和研究, 大动物生物安全实验室便由此而生。

经过这些年的发展, 在美国疾病预防控制中心注册的生物安全三级实验室, 由 415 个 (2004 年) 增加到 1495 个 (2011 年)。^[2] 截止到 2017 年 10 月, 我国已有近百个高等级生物安全实验室建成, 其中通过 CNAS 认可的三、四级实验室共有 55 个, 从数量上看, 我国与欧美发达国家相比, 还有很大的差距。^[3] 2016 年 11 月, 国家发展和改革委员会、科技部联合发布了我国《高级别生物安全实验室体系建设规划》(2016~2025), 为我国高级别生物安全实验室的下一阶段的发展指明了方向、明确了任务、完善了保障机制。

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, 这是我国《生物安全实验室建筑技术规范》GB 50346 对生物安全实验室的定义。生物安全实验室的屏障分为两级, 操作者和操作对象之间的隔离称为一级屏障; 生物安全实验室和外部环境的隔离称为二级屏障。我们这里讨论的是二级屏障, 生物安全实验室和外部环境的隔离。如图 1 所示, 技术人员采用各种方法和技术措施, 竭尽全力去控制进出这只“重壳蟹”的各种

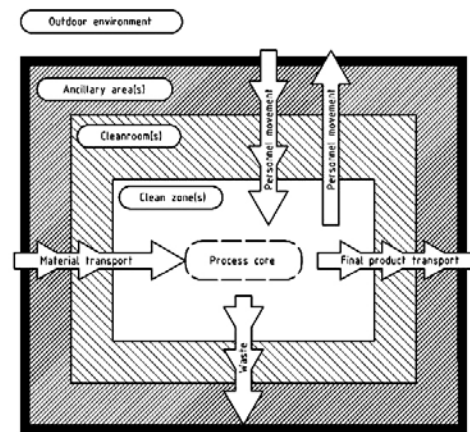


图 1 防护控制概念示意图 (ISO 14644-4-2001)

物质, 其中包括人员、服装、器材、空气、水, 甚至是阳光。严格控制各种物质进生物安全实验室, 有两层含义, 首先防止进入实验室的物质影响实验结果的准确性, 其次是防止实验室内的有害物质“逃逸”出去, 对自然环境造成生物安全危害。既然是“重壳”, 就意味着存在着一个或多个边界来划分我们的生物安全实验室, 尤其是大动物生物安全实验室, 防护边界的划分, 对实验室的 SOP (Standard Operating Procedure)、PPE (Personal Protective Equipment)、运行管理、投资造价等等都有较大的影响, 因此对生物安全实验室具有相当重要的意义。

1 规范要求

在我国的规范中没有防护边界的定义, 取而代之的是“实验室防护区”, 即指生物风险相对较大的区域, 对维护结构的严密性、气流流向等有要求的区域。在《生物安全实验室建筑技术规范》GB 50346 的 4.1.3~4.1.5 条中, 都详细给出了不同级别及相同级别不同类型生物安全实验室的防护区所包含的房间, 如下表 1 所示。

表 1 GB 50346 实验室防护区所包含房间

序号	类型	防护区房间	辅助区
1	BSL-3 中 a 类	主实验室、缓冲间等	清洁衣物更换间、 监控室、洗消间、 淋浴间等。
2	BSL-3 中 b1 类	主实验室、缓冲间、 防护服更换间等	清洁衣物更换间、 监控室、洗消间、 淋浴间等。
3	ABSL-3	主实验室、缓冲间、 防护服更换间等	清洁衣物更换间、 监控室、洗消间等。
4	四级生物 安全实验室	主实验室、缓冲间、 外防护服更换间等	监控室、清洁衣物 更换间等
5	四级生物安全实验室 (设有生命支持系统)	主实验室、化学淋浴间、 外防护服更换间等	

从上述表格中可以看出，只是在设有生命支持系统的四级生物安全实验室，化学淋浴在被列入防护区的范围内，动物生物安全三级实验室的淋浴间未准确说明所属区域。

根据《加拿大生物安全标准》第二版^[4]，名词解释中相关的条文，“Containment barrier”，可译为“防护屏障——干净区域与污染区域的边界（即实验室工作区域、动物房、动物隔离间、解剖间与非防护区之间的界限）。在边界上须保证气流向内的气流方向，应设置空气的物理防护屏蔽，用以防止空气传播或气溶胶传播的传染性物质或毒素进入干净区域”。根据以上定义，《加拿大生物安全手册》第二版（Canadian Biosafety Handbook, Second Edition）中给出了大动物生物安全三级实验室的示意图。

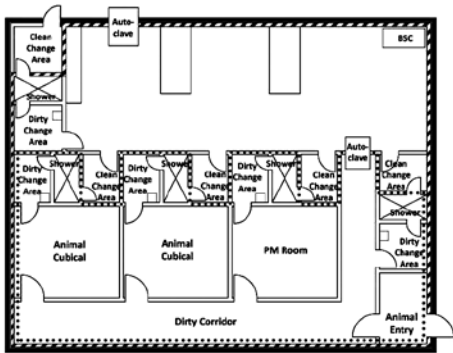


图 2 大动物三级防护区示意图^[5]

图 2 中明确将大动物饲养间及污染更衣区、淋浴均划定为防护区。《加拿大生物安全手册》中关于防护区还有更细致的分类，图中黑色阴影线所包含的区域为防护区，蓝色虚线区域为“内防护区”。我国生物安全实验室相关规范中并没有相应的分类，也没有明确的示意图帮助设计师们深入的理解。根据对图 2 的理解，内防护区应包含：淋浴（Shower）、防护服更换（Dirty Change Area）、饲养间（Animal Cubical）、污物走廊（Dirty Corridor）、动物入口（Animal Entry）。

我国生物安全实验室可由防护区和辅助工作区组成，而加方将防护区内部生物危险更高的区域划分为内防护区。加方打压边界在哪里？

2 工程实例分析

中、加两国的生物安全实验室规范的差异，致使两国建成的生物安全实验室必然存在一些不同之处，下面我们通过两个实例来进一步说明。

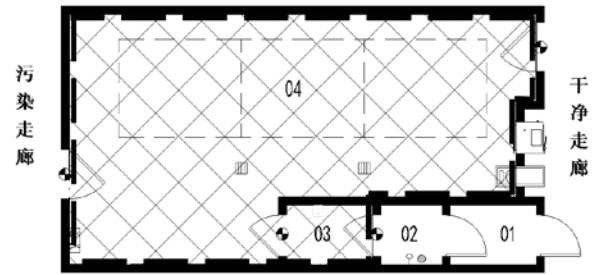


图 3 某大动物生物安全三级实验室核心区示意图

如图 3 所示，我国某大动物生物安全三级实验室示意图，我国近些年建造的大动物生物安全三级实验室大多与此相似，01 房间为更衣 3，02 房间为淋浴，03 房间为更衣 4，04 房间为动物饲养间，防护区为网格填充区域，包括 03 房间（更衣 4）、04 房间（饲养间），参考 GB 50346 中 4.2.5 条，“ABSL-3 中 b2 类主实验室及其缓冲间和四级生物安全实验室主实验室及其缓冲间应采用气密门”，进出 01 房间（更衣 3）的 2 套门均采用气密门（图中以“+”符号标识的门为气密门），同样在进、出饲养间的门也均采用了气密门（动物从右上角的气密门进入饲养间，从左侧气密门进入污染走廊）。依据 GB 19489 中 6.5.1.2，“动物饲养间的门应有可视窗，向里开”，此动物房饲养间与相邻房间的门均设计为向内开启。

如上设计方式存在如下问题：

（1）实验室防护区仅包括 03 房间（更衣 4）、04 房间（饲养间），而 02 房间（淋浴）未被包含在防护区内，但是在生物安全三级实验室内，实验人员的个人防护装备一般为一体式防护服 + 正压头套，并没有配备正压防护服，因此在 02 房间（淋浴）内仍然存在较高的生物安全风险；

（2）实验室防护区包括 03 房间（更衣 4）、04 房间（饲养间），防护边界即为图中蓝色虚线所示，那么 03 房间（更衣 4）与 04 房间（饲养间）之间的防护区内门就没有必要还使用气密门。

分析了我国的大动物生物安全三级实验室，接下来我们介绍一下，加拿大萨斯喀彻温大学国际疫苗中心的同类型实验室，此实验室 2012 年施工完成，2014 年完成全部的认证投入使用。

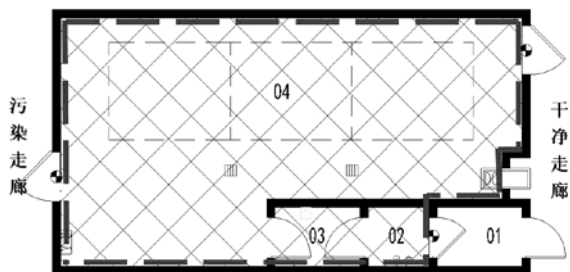


图4 加拿大萨斯喀彻温大学生物安全三级实验室核心区示意图

如上图4所示,与我国的设置相类似,包括01房间(更3)、02房间(淋浴)、03房间(更4)、04房间(饲养间),防护区(蓝色虚线内部的区域)包括:02、03、04房间,图中以 $\blacksquare$ 符号标识的门为气密门,经确认为充气式气密门。此大动物饲养单元内充气式气密门共计3套,其中1套设置在淋浴入口处,动物进、出饲养间2套也是气密门。

此实验室与我国同类实验室,在防护区、防护边界、气密门的设置上有相同之处,也存在一定的差异。相同之处在于,人员入口都是3个辅助房间,即01房间(更3)、02房间(淋浴)、03号房间(更4),在防护边界上均设置了气密门、渡槽;不同之处在于:

- (1) 将02房间(淋浴)设置为内防护区;
- (2) 内防护区的内门采用普通门,而不是气密门;
- (3) 动物进、出饲养间的门均向外开启;
- (4) 在防护边界上未设置传递窗。

从以上两个大动物三级生物安全实验室的对比可知:

- (1) 气密门是保障围护结构气密性的关键防护设备,它也是确保防护边界连贯性的必要条件;
- (2) 建议内防护区包含02房间(淋浴),这样可以进一步的降低感染性微生物的扩散,有效的提高实验室生物安全防护能力,降低实验室生物安全风险;
- (3) 借鉴《加拿大生物安全手册》,建议我国

规范针对大动物生物安全三级实验室,增加“内防护区”概念,其包含动物饲养间(核心间)、防护服更换间(或更4)、淋浴间、污染走廊;

(4) 依据以上内防护区概念及防护边界的划分方法,02房间(淋浴)、03房间(更4)、04房间(饲养间)之间的门均可采用普通钢质门,即能够满足实验室生物安全要求,又能够降低建设及维护成本。

3 结论

本文通过对比中、加生物安全实验室标准及工程实例,发现大动物生物安全三级实验室防护边界的差别,分析了防护边界设置对实验室生物安全风险的影响。从《加拿大生物安全标准》和萨斯喀彻温大学国际疫苗中心的实际工程来看,将与大动物饲养相连的缓冲间及淋浴间均设置为内防护区,这种规定和做法既有利于降低实验室生物安全的风险,又能节约大动物生物安全三级实验室造价,优于我国标准中的相关条款,建议如下:

(1) 增加内防护区概念及其防护边界的划分原则;

(2) GB 50346 中 4.1.4 条, ABSL-3 中的 b2 类实验室内防护区应包含淋浴间;

(3) GB 50346 中 4.2.5 条,“ABSL-3 中 b2 类主实验室及其缓冲间和四级生物安全实验室主实验室及其缓冲间应采用气密门”,修改为“ABSL-3 中的 b2 类实验室和四级生物安全实验室的防护边界应采用气密门”。

参考文献

- [1] http://www.oie.int/fileadmin/Home/eng/Animal_Health_in_the_World/docs/pdf/Disease_cards/Report_1_Global_situation_of_ASF_Updated_191018.pdf
- [2] Kaiser J., Taking stock of the biodefense boom, Science. 2011 Nov 18;334(6058):905.
- [3] 张彦国,曲怡然.国内外高等级生物安全实验室标准和建设概况[M].暖通空调.2018,48(1):2-6.
- [4] Canadian Biosafety Standard (Second Edition), XV, Public Health Agency of Canada,2015.
- [5] Canadian Biosafety Handbook (Second Edition), 30, Public Health Agency of Canada,2015.

屏障环境动物房室内环境控制应用实例

陈烨汀

(上海科仕控制系统有限公司, 上海 201822)

[摘要] 屏障环境实验动物设施需要确保设施环境的洁净度、房间压差、温度、相对湿度等最为重要的几个参数, 以保障实验动物实验质量。而空调通风自控系统是确保其环境参数最为重要的环节, 一个精确、高效、节能、合理的控制系统势在必行。从一个屏障环境实验动物设施空调通风控制系统实例, 选用压力无关性的文丘里阀结合差值风量重置控制方法对屏障环境实验动物设施的室内风量控制、压力控制进行分享叙述。

[关键词] 屏障环境实验动物设施; 风量控制; 差值风量恒定; 压力控制; 模式控制

0 引言

随着国家对各领域创新的支持, 在制药领域, 我国各大有实力的药企从过往仿制药逐渐纷纷开发具有自我知识产权的药物, 即创新药物。但是, 创新药物因成分剂量, 剂型及处方都存在很大的不确定因素。若直接用于临床, 在安全性方面并不能得到保障, 增加患者受危害的风险。所以, 采用实验动物作为临床前的研究尤为重要。

近期, 国内相关药企, 高校及社会的科研机构都加大了对实验动物生产、实验设施的建设。在此情形下, 我有幸参与到一家规模较大的实验动物中心的建设中。

目前, 该实验动物中心, 已建设完成, 符合国标, 并将通过国际 AAALAC 认证, 已经通过省科技厅的现场验收, 并于 2019 年 8 月正式投入运营。

实验动物中心, 投入运营后, 中心单日最多可容纳实验猴 380 只, 实验犬 230 只, 啮齿类动物将容纳 15000 只。用作创新药临床前研究, 药代动力学、药效和毒理学研究。

实验动物中心, 其饲养环境存在普通环境和屏障环境, 今天我们以 1 个屏障环境设施分享我们对屏障环境环境参数指标控制的方法。

实验动物中心屏障环境的布局如图 1 所示, 此屏障环境设施是典型的两侧双走廊型的布局, 这种

布局因其能避免清洁物品与污染物品交叉污染, 同时也方便了人流与物流, 是目前一种主流的屏障环境实验动物设施的布局。

设施布局是控制污染的手段之一, 而控制污染最重要的手段仍然是通过自控的手段, 控制净化区域所需的送风风量以及控制正确的压力梯度。一个有效, 合理的自控控制系统对实验动物设施污染控制尤为重要。下述, 是我们对风量控制与压力控制的理解与实际应用。

1 屏障环境实验动物设施通风量控制策略

1.1 屏障环境实验动物设施通风量控制要点

根据我国已颁布的国标 GB 14952-2010《实验动物环境与设施》要求, ISO7 级的屏障动物生产区, 检疫区, 实验区及主要辅助功能区的最小换气次数均为 15 次以上。

但是, 实际上在设计时各设计院会根据使用方提出的设施内饲养动物的密度, 及处理室内的热湿负荷需求的送风量以及洁净度需要的换气次数综合考虑。

本项目的屏障环境实验动物设施其动物饲养室的环境, 检疫室的环境的换气次数控制为 20 次, 主要辅助功能区的换气次数为 15 次, 均高于规范要求的最小换气 15 次, 符合屏障环境实验动物设施通风量与洁净度的技术控制要求。

结合屏障环境实验动物设施环境技术指标对通风量, 洁净度有着严格的参数规范。考虑系统节能模式的运用和运行后高效过滤器堵塞带来的问题。此屏障环境通风系统, 我们在房间末端送风采用了压力无关性的文丘里风量调节阀给与室内送风量进行稳定、准确的控制。同时, 对于 AHU 净化空调机组, 我们采用以管道静压控制机组变频的方法。在设定管道静压值时, 我们对处在系统压力最高点处的文丘里风量调节阀与最不利回路处的文丘里风量调节阀做了前后压差的测试, 以保证设定的压力值能满足系统中每一个文丘里风量调节阀的工作压

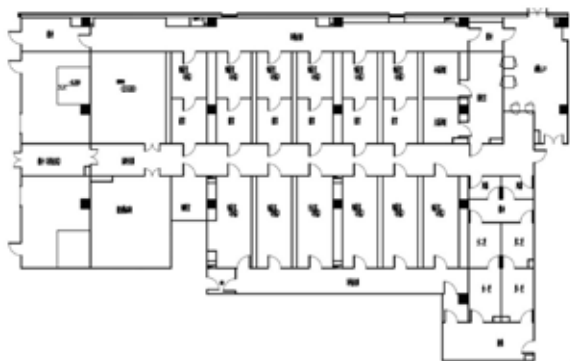


图 1 屏障环境实验动物设施布局图

降需求,这个步骤是后面调试每个房间的送风风量的基本保证。

在调试房间送风风量时,我们是从有最大送风量需求的洁净走廊开始调试,然后再辐射到每一个饲养室,检疫室,污物走廊及更衣换鞋等辅助房间。在房间送风风量调试的环节中,因送风末端采用文丘里风量调节阀的缘故以及前期管道静压设定控制的准备,我们进行的很顺利,因文丘里风量调节阀的压力无关特性,使得我们调试完一个房间送风风量后无后顾之忧,无需担心已经调试好的房间存在送风量变化的情况;对于整个屏障环境从我们第一遍开始调试送风风量,到第三遍复测送风风量结束,总共只用了半天的时间。

1.2 屏障环境实验动物设施的模式控制

根据屏障区动物房实际使用以及节能的需求,我们采取了3种不同的运行模式,分别为正常工作模式,节能值班模式以及消毒清洁模式。

在正常工作模式下,以屏障区动物房所要求的换气次数进行控制,此时送风量相对较大,以满足在白天有工作人员在动物房进行操作时,环境的洁净度,处理房间热湿负荷的需求。

节能值班模式,主要在夜晚及非工作日时,饲养区域内无工作人员操作时,因人带来的尘埃数及热湿负荷减小,此时饲养房间以相对低的换气次数(选取10~12次换气)运行。以达到节能运行的目的。

在以上两种模式下,尽管房间的送风量发生了变化,但保持房间正压环境的风量差值一直维持不变。饲养室与相邻房间的相对压差仍保持 $\geq 10\text{Pa}$ 。

消毒清洁模式的控制,主要是控制送风末端与排风末端的电动密闭阀。在该模式下,送风电动密闭阀与排风电动密闭阀均处于关闭状态。以保证在熏蒸消毒时,室内空气不外泄。在消毒完成后,根据要求,先打开排风电动密闭阀,延时后打开送风电动密闭阀。对应的先打开排风机组后打开空调机组,快速稀释房间内熏蒸药水到来的气味。

因系统内的送风末端及排风末端均采用调节式的变风量文丘里风量阀,所以除以上的模式外,可以有更多的房间换气次数变化选择,如一些饲养室处于空载情况时,在保证室内压差不变的条件下,可以降低更多的换气次数,以达到节能的目的。

2 屏障环境实验动物设施压力控制策略

2.1 屏障环境实验动物设施压力控制要点

在屏障环境动物饲养室,IVC笼架是主要的防护设施,饲养室房间作为二级防护屏障,根据我国已颁布的国标GB 14952-2010《实验动物环境与设

施》中实验动物生产间的环境技术指标表规范,屏障环境相通区域的最小静压差 $\geq 10\text{Pa}$;屏障环境设施辅助用房主要技术指标表规定洁净走廊,污物走廊及更衣、消毒等辅助房间与相通区域的最小静压差 $\leq 10\text{Pa}$;

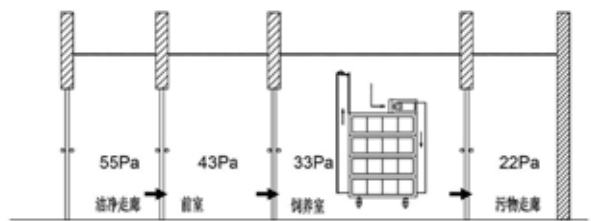


图2 压力梯度

如图2所示,结合此次项目为正压屏障环境的双走廊模式,其气流方向根据工艺布局呈现出中间的洁净走廊的压力高于各饲养间的压力,及各饲养间压力又高于污物走廊的压力的逐级递减格局,不同功能区相对压差 $\geq 10\text{Pa}$ 。

2.2 屏障环境实验动物设施压力控制方式

目前净化房间室内的压力控制存在几种方式,有较为原始的手动调节法控制压力,有初始的室内压差直接控制法,有较为稳定的风量跟踪控制法,和更为稳定与先进的串级风量控制法。无论通过上述哪一种方法实现压力控制,归根结底都是以控制进入房间的风量与离开房间的风量,促使房间压力达到正压(或负压)控制的目的。不同的是所选取的末端风量设备不同及控制的变量存在差异。

在本项目中,我们在每个独立的净化房间均配置单独的房间微压差传感器及压力探测器,在洁净走廊及污物走廊因长度较长的区域,我们每10m配置1个压差测试点,根据现场洁净走廊与污物走廊的长度需具有3个压差测试点。所有房间的压差均对准同一夹层环境测试绝对压差。

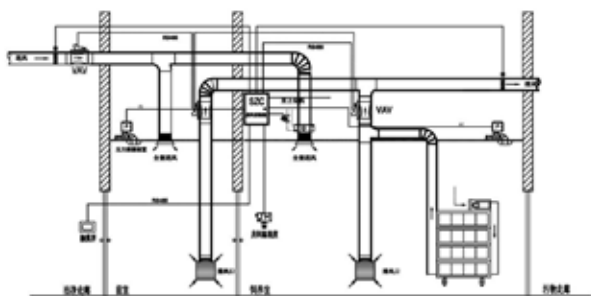


图3 房间控制图

此次我们对室内压差的控制采用最为先进的差值风量重置的控制法。如图3所示,我们在饲养室的送风末端和排风末端均采用压力无关特性的文丘里风量调节阀,以保证精确控制房间送风风量与排风风量,同时根据饲养室压力要求与房间密闭性情

况设定饲养室房间的风量差值,从而保证饲养室房间压差的稳定控制。若在房间围护性结构(如门、传递窗)关闭情况下,若房间测试压力与设定压力存在较大偏差时,可通过风量差重置控制,实现房间压差准确控制。

在这里我要强调的是具有压力梯度控制的环境,最主要的是找到基准点,基准点找对并控制好,对后续的压力控制有着事半功倍的作用。对于此次的动物房,我们找的基准点是洁净走廊,从布局上洁净走廊是整个系统犹如主心骨的区域,洁净走廊的压力值要求也是整个系统较高的。所以,我们的首要目的是先控制好洁净走廊的压力。

屏障区动物房的空调通风系统,从开机到对应的管道静压稳定控制需要 4min,所以在这 4min 内,所有的末端风量控制阀均不动作是最好的选择,以避免在不稳定的静压条件下做出不正确的操作。空调通风系统的管道静压稳定将作为末端风量设备是否开始控制的首要条件。

2.3 屏障环境实验动物设施室内压力测试效果

严格按照国标 GB 14952-2010《实验动物环境与设施》的静压差测定方法在静态环境,动态环境及开机情况下的压力测试:

(1) 静态环境下检测室内压力控制效果

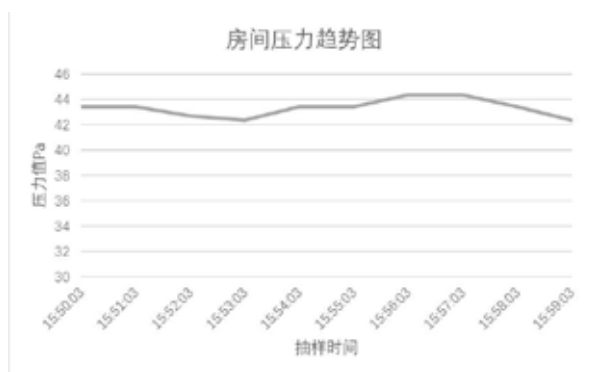


图4 静态状态下的房间压力趋势图

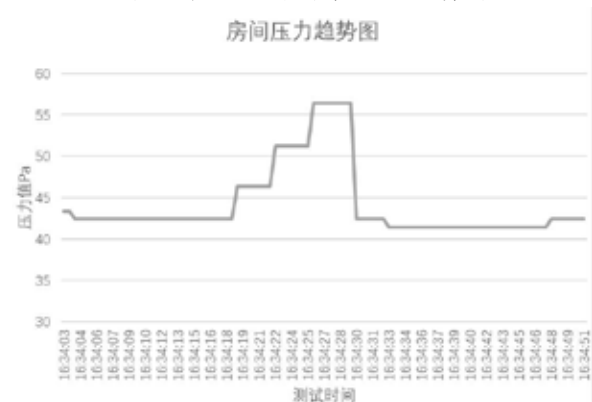


图5 前室房间对洁净走廊,在门的启闭情况下房间压力趋势图

静态检测指在洁净实验室动物设施空调送风系统连续运行 48h 以上,已处于正常运行状态,工艺设备已安装,设施内无动物及工作人员的情况下进行检测。^[1]

图4所示,我们选取其中测试 10min 的房间压力测试数据。压力控制稳定准确,基本能控制在设定压力 $\pm 1.5\text{Pa}$ 的幅度。

(2) 动态环境下检测室内压力控制效果

动态环境是指有人员进出的情况,我们在人流/物流/气流走向布置测试压力点,对室内压力进行测定。

在人员进出情况下,我们抽取一间房间的压力记录情况;我们分别对该房间的两扇房间门在启闭情况下,进行压力的监视如图5,图6所示。可以看到在人员正常进出且随手关门情况下,室内压力随即恢复正确值且控制稳定;这主要在于我们选取的室内压力控制策略差值风量重置控制法在开关门的瞬间,不因无效的测量压力变量而进行调节。若在开关门的过程中,门未被关闭,导致相邻房间压力梯度消失,压力趋于一致,这种压力变化过程出现 3s 后,上位机中控系统即发出压力异常蜂鸣报警,提示值班管理人员及时进行检查,若检查房门与传递窗均关闭正常,值班管理人员可选择手动进行风量差重置或根据设定延时进行自动风量差重置。

(3) 开关空调通风系统情况下的室内压力控制效果

开关空调通风系统指在重新开启空调通风系统,室内压力是否能迅速恢复至设定压力的测试。

在重新开启空调通风系统后,前 4min 是机组升频率控制管道静压调整的过程,在系统管道静压控制稳定后,房间能在 3~5min 内即恢复室内压力的准确控制。这种迅速恢复室内压力的方式是采用通过空调通风系统的运行状态指令,作为末端文丘里风量调节阀的控制的条件。在空调系统为停止状态时,房间末端的排风文丘里风量调节阀的开度为系统关

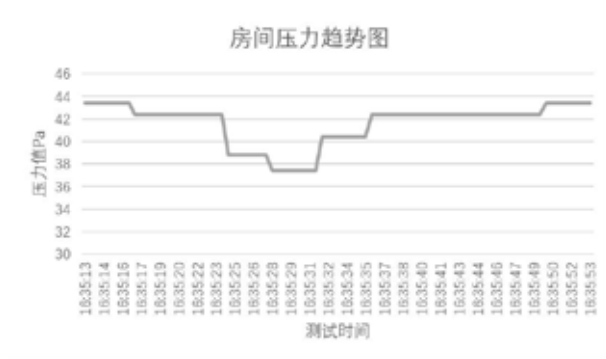


图6 前室房间对饲养室,在门的启闭情况下房间压力趋势图



图7 重启空调通风系统后房间压力趋势图

闭时的最后停止位置；同时，在空调系统由停止状态变为运行状态可促使风量差值重置程序初始化，在空调通风系统开启后达到相应范围的管道静压值，程序初始化开始执行，延时 10min（时间可设）后初始化程序关闭。其中，空调通风系统若满频率未达到管道静压时，上位机中控系统进行报警，所有末端文丘里风量调节阀均不动作；若 10min 后，仍存在室内压力偏离设定压力的情形，上位机中控系统进行报警，值班管理人员进行检查现场，检查室内围护性结构及压差监测设备及文丘里风量调节阀，若均无问题情况下，值班管理人员可选择手动进行风量差重置或根据设定延时进行自动风量差重置。同时需注意若自控系统中无门禁状态信号上传，则在重启空调通风系统前，应先检查现场的围护性结构，如房门、传递窗是否处于关闭状态，以保证重启空调通风系统情况下，室内压力能有效有序控制。

3 屏障环境实验动物设施温湿度控制策略

3.1 屏障环境实验动物设施温湿度控制要点

温度、相对湿度作为饲养室环境的日常检测参数，其重要性不言而喻。屏障环境动物饲养室要求温度为 20~26℃，最大日温差 ≤ 4℃，相对湿度为 40~70%。

尽管其中 IVC 笼架是动物饲养的主要屏障环境，但是，IVC 笼架系统其笼盒内的温湿度主要是受二级屏障环境饲养室的影响。

3.2 屏障环境实验动物设施温湿度控制方式

在此项目中，饲养室的温湿度主要由净化空调机组进行控制。考虑到项目建设在沿海区域，其相对湿度过高，所以在设计时考虑选用带有转轮除湿功能的净化空调机组。

在饲养室的末端排风管路上设置温湿度传感器，监视饲养室室内温湿度（图 3 所示）；同时在送风末端设有再热装置；设定饲养室环境所需的温度，与饲养室实时监视的温度值进行比较，比例调节末端再热装置的水阀，以保持饲养室温度的稳定。

在饲养室门口，我们设置就地触摸屏，以显示实时的室内温湿度，并在触摸屏内设置参数的报警上限与报警下限，当实时的温湿度值超出上下限范围时，就地触摸屏实现声光报警进行提示。

在 EMS 上位机系统，对室内温湿度实时监视，具有超限报警提示，实时数据采集及趋势记录，报警短信发送等功能。上述就地及远程系统均有助于管理者更有效率的管理好屏障动物房的环境。

4 项目调试过程中存在的不足之处

IVC 笼架是作为饲养实验动物主要的防护设施，是具有独立送 / 排风的空间。项目上所选用的 IVC 笼架，自带送风机取室内送风为笼架进行送风，排风接入集中排风系统。问题在于 IVC 笼架与房间排风共有 1 个变风量末端设备。同时，室内排风变风量末端设备对房间压差有着重置调节作用。若在重置过程中，因人员出入导致房门等虚掩情况出现，使得饲养房间与相邻房间气流控制异常，导致人为因素的不正确的排风风量调节，这种情况下，因 IVC 无独立的风量阀进行控制，势必造成 IVC 笼架内的环境造成影响。同时，对房间工作 / 节能模式切换也带来困难。

我的建议是 IVC 笼架在饲养室作为一种独立的微环境，在目前的情况下，把笼架设备的排风与饲养室的室内排风进行独立的控制，对于目前的系统控制将更为合理、稳定。同时，在今后的设计控制方面，我个人觉得 IVC 笼架微环境与饲养室的二级屏障环境的通风系统完全独立分开，在造价成本上或许会更贵一些，但从整个通风系统的控制的稳定性及节能性将做的更好。具体详见参考文献 [2]。

5 结束语

实验动物设施的空调通风控制系统应注重保障屏障环境的环境参数如洁净度、压力、温度、相对湿度的控制，注重对整个空调通风系统运行的节能考虑。结合能精确调节风量的文丘里风量调节设备和理念先进的压力控制方法，实践证明是能更稳定的控制屏障环境实验动物设施内的通风量，更有效有序的控制其室内压力；与此同时，末端文丘里风量设备的压力无关性，对运行模式切换调节，风量变化控制无后顾之忧，实现屏障环境实验动物设施空调通风系统经济、可靠的运行。

参考文献

- [1] 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，中华人民共和国国家标准 GB 14925-2010：实验动物环境及设施。
- [2] 何婧，沈晋明，汪亚兵：“实验动物房环境特点与空调设计”，《洁净与空调技术》，2003 年第 1 期。

降低血液病房顶部集中送风面积的样板间实验研究

——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三

马兆勇¹, 蒋国清¹, 许钟麟², 曹国庆², 潘红红², 王维平³

(1. 苏州通快净化科技有限公司, 苏州 215000; 2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013;
3. 解放军总医院第五医学中心, 北京 100039)

[摘要] 在面积 9m²、高 2.5m 的血液病房样板间中进行了实验。在顶部送风尺寸每边比床边外延 0.4m 的条件下, 室内达到远低于 3.5 粒/L 浓度的 5 级洁净度要求; 床面 0.4m 以上床头位置风速低于 0.1m/s, 远低于避免吹风感的 0.12m/s 要求; 可比常规做法节能 1/3~2/3。

[关键词] 血液病房; 顶部集中送风; 吹风感; 高效过滤器; 送风面积

0 引言

血液病(又称白血病), 包括再生障碍性贫血及恶性血液病。由于体内白细胞特别是中性粒细胞减少, 或体内原始/原幼细胞大量增殖抑制正常造血, 患者对感染的防御能力严重降低。由于化疗、放疗及免疫抑制剂的应用, 患者常出现严重中性粒细胞缺乏, 和/或淋巴细胞功能受抑, 致使部分患者并发严重感染而危及生命。患者常在 7 天后白细胞降至 0, 所以感染致死是血液病患者致死的最主要原因^[1]。

近二三十年来我国血液病发病率、死亡率呈上升趋势。据 2003~2007 年对全国 32 个肿瘤登记地区的统计, 白血病发病率为 5.17/10 万, 死亡率为 3.94/10 万^[2]。又据报道, 至 2009 年, 我国有白血病患者约 400 万^[1]。

为了将血液病患者在治疗期(干细胞移植完成前)所处环境的空气含菌浓度尽可能降低, 从 20 世纪 60 年代以来, 将血液病房建成垂直层流(单向流)或水平层流(单向流)洁净室成为共识, 我国最早的有关血液病房的标准 YEB004-1997《军队医院洁净护理单元建筑技术标准》也作了这样规定。

由于层流要求送风速度达到 0.35m/s(垂直)或 0.40m/s(水平), 加之过滤器满布送风, 因此血液病房风量太大, 达到 10000m³/h 以上。

1 减少血液病房送风面积

血液病房采用层流主要是为了达到 5 级洁净度。文献[1](转引日本文献)认为, 通过全空间的清洁空气的单向流特性占支配地位的房间, 也称为单向流洁净室。所以文献[1]给出了垂直单向流过滤器

满布比不小于 60% 的限定。由于血液病房面积一般在 10~12m² 左右, 所以 GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》要求血液病房顶部集中送风面积不小于 6m²。这将使送风量减少 40% 以上, 但仍有近 8000m³/h 之多。

根据《医院洁净护理与隔离单元技术标准》(以下简称《标准》)编制组举行的多次调研会和对有关医院的走访, 均认为血液病房不宜过大, 面积可减小到 6m², 且层高 2.5m 就可以。

考虑到血液病人基本卧床, 所以《标准》编制组决定把顶部集中送风面积进一步缩小, 然后进行样板间实验。

2 样板间建造

建造了一间装配式血液病房样板间(见图 1), 净尺寸(长×宽×高)为 3m×3m×2.5m。病房一端靠墙放一张病床, 尺寸(长×宽×高)为 2m×1m×0.65m。送风天花置于床正上方, 尺寸(长×宽)为 2.4m×1.8m, 除床头外, 其余三边均比床边外延 0.4m。床左右两侧各满布 3 个回风口, 每侧回风口截面积为 3m×0.4m。

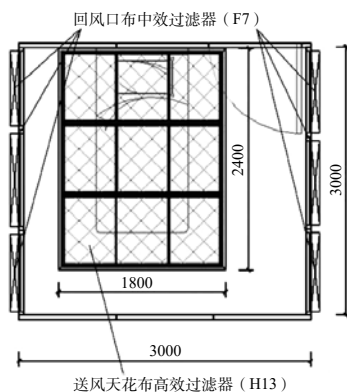


图 1 样板间平面图

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目“室内微生物污染源头识别监测和综合控制技术”(编号: 2017YFC0702800)。

样板间由 1 台空调机组送风，设计风量为 4000m³/h，最大风量为 5000m³/h，最大新风量为 350m³/h。送风天花设高效（H13）过滤器（1120mm×540mm×70mm），共 6 台；房间回风设中效（F7）过滤器（880mm×290mm×60mm），共 6 台。系统示意图见图 2，3。

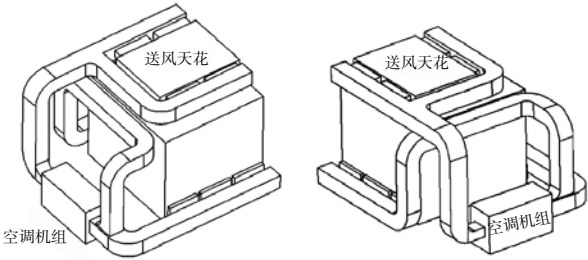
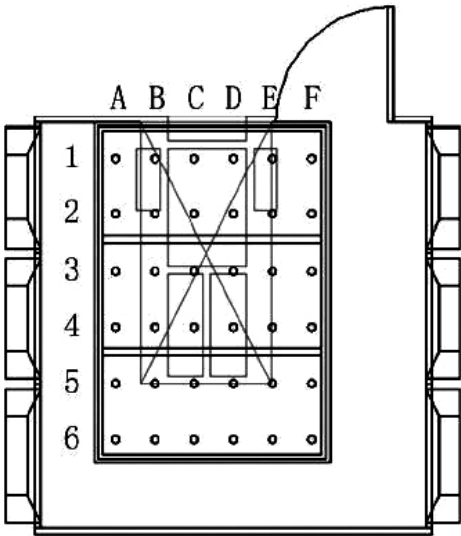


图 2 系统示意图 1 图 3 系统示意图 2

表 1 风速测试结果 1 (m/s)

位置	A	B	C	D	E	F
1	0.23	0.23	0.23	0.26	0.26	0.26
2	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
3	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
4	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
5	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
6	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26

注：送风量为 4000m³/h，测试位置为送风面下 10cm，测试时间为 9 月 23 日 06:30，室内温度 26℃。

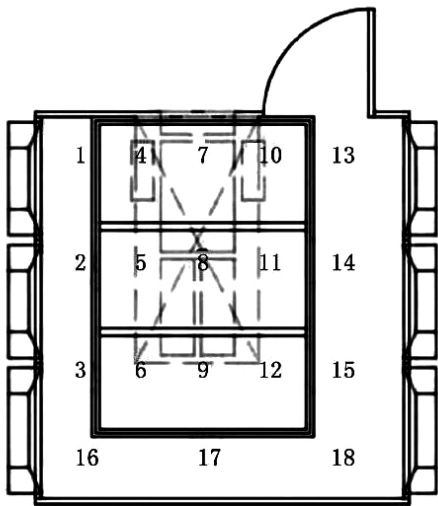


A~F 为测点列编号；1~6 为测点行编号。
图 4 风速测点布置

表 2 风速测试结果 2 (m/s)

位置	A	B	C	D	E	F
1	0.09	0.10	0.00	0.00	0.08	0.15
2	0.19	0.08	0.06	0.06	0.16	0.21
3	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
4	0.08	0.06	0.03	0.09	0.18	0.05
5	0.05	0.03	0.01	0.01	0.15	0.20
6	0.09	0.08	0.09	0.10	0.12	0.32

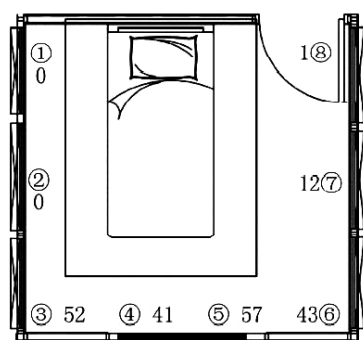
注：送风量为 4000m³/h，测试位置为距地面 1.2m，测试时间为 9 月 28 日 08:00，室内温度 23℃。



1~18 为测点。
图 5 主流区洁净度测点布置

表 3 主流区洁净度测试结果 (粒/28.3 L)

测点位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
≥ 0.5μm	14	2	0	36	3	0	3	0	2	0	3	5	0	0	0	30	0	158
微粒数量	10	0	0	42	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	19	0	171



①~⑧为测点; 数据为测试结果, 单位为粒/28.3L

图6 周边区洁净度测点及测试结果

4 讨论

(1) 表1说明送风速度相当均匀。

(2) 表2是床头部分数据, 床头部分对应第1, 2行的B, C, D, E测点, 其中C, D测点位于头部位置。根据国内外研究成果^[3-4], 若希望95%的人头部没有吹风感, 该处风速宜小于0.12m/s。床高0.65,《标准》拟要求床上方0.4m处风速不大于0.12m/s, 所以床高加枕头加头部位置, 离地面约1.1~1.2m。因此测试结果表明, 在床上头部以上位置, 风速远低于0.12m/s, 不会造成吹风感。

(3) 根据扩大主流区理论和实测研究^[5-6], 当送风面积达到房间面积1/5以上时, 周边区也可以实现5级洁净度, 当然气流流型不能用标准单向流来衡量。上述样板间的送风面积已远超这个范围, 所以微粒浓度达到远低于3.5粒/L是可能的。

(4) 本实验中高效过滤器在静压箱下面, 向上满布拧紧, 实验中已发现有一处泄漏, 工程安装时

如不严谨、预先检漏, 则使用中出现泄漏是极大威胁; 特别是更换过滤器后又要检漏、堵漏, 而且要对涉及的环境消毒, 很不容易做到。故工程上如能采用不在室内更换过滤器的方式, 如阻漏层送风天花, 则可避免上述缺陷。

5 结语

血液病房集中送风面积采用每边比床外边延长0.4m的做法, 在病房面积约为10m²时, 可以使室内达到微粒浓度远低于3.5粒/L的洁净度, 因此可适用于面积更大些的病房, 而且头部风速远低于0.12m/s, 合乎要求。这一送风方式将比传统方式节能1/3~2/3。

参考文献

- [1] 许钟麟. 空气洁净技术原理 [M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2014:273~282,329~330.
- [2] 陈万青, 单保恩, 郑荣寿, 等. 2003~2007年中国肿瘤登记地区白血病发病与死亡分析 [J]. 肿瘤, 2012, 32(4):251~255.
- [3] 邓佑鹏. 医院建筑内防止SARS病毒传播与感染的综合措施与对策研究 [D]. 上海: 同济大学, 2005:90~122.
- [4] 许钟麟. 隔离病房设计原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2006:124~126.
- [5] 许钟麟, 马骏, 孙宁, 等. 确定生产无菌药品的背景环境B级区换气次数的方法 [J]. 暖通空调, 2013,43(12):135~140.
- [6] 冯昕, 许钟麟, 张益昭. 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, 2014,44(2):84~88.

关于负压隔离病房可以使用循环风的讨论

——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

许钟麟¹, 曹国庆¹, 张益昭¹, 潘红红¹, 沈晋明², 刘燕敏², 谢景欣³

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 同济大学, 上海 200092; 3. 江苏省疾病预防控制中心, 南京 210001)

[摘要] 认为用全新风不是负压隔离病房的必要条件, 一些国外标准也指明有高效过滤器时, 可以使用回风。排风采用国产 C 类高效过滤器且保证边框无泄漏时, 滤菌效率达 99.99997%。病人一个喷嚏最多产生 30 万个/min 菌粒, 对于 12h⁻¹ 换气的病房, 1h 打 5 个喷嚏, 采用循环风时平均有 0.34×10⁻⁴ 个/L 微粒送入室内, 和病人所在氛围中菌浓相比可视为 0, 故可使用循环风。从国外几个标准看, 只要通过高效过滤器, 允许使用室内自循环风。

[关键词] 负压隔离病房; 高效过滤器; 循环风; 全新风; 全排风

0 引言

负压隔离病房内住的是致病菌发生源的病人, 隔离的目的是防止空气传染致病菌排至室外影响环境和致病菌传染给进入病房的医护人员。病人处于自身散发、呼出、咳嗽等产生的含菌气溶胶的包围中, 所以像美国等国外标准允许 1 间病房住 2 位同类病人, 改建的最多可住 4 位。

怎样防止病房内的含菌空气对环境和室内人员的危害呢?

有一种意见是采用全新风。但有研究指出, 隔离病房采用全新风不是一个必要条件^[1]。

送风采用全新风就要求全排风, 过去没有高效过滤器时要求向室外高空排放, 这样做的依据是高空排放完全不会或极少影响被吸入的新风, 所以可采用全新风。但是含有危险传染性疾病的微生物排至室外是对环境的破坏。后来要求经高效过滤器后全排风。以下讨论说明全排风的必要性不充分。

1 回风菌浓分析

假设采用一般送风口, 床头下排风, 在送风口下方一小块区域内是全新风, 该区域内没有室内病人产生的致病菌。这种气流继续下送, 与病人周围含菌空气掺混, 将其稀释、吹散, 从排风口排出。

病人一个喷嚏约产生 6 万~30 万个/min 10μm 大小的含菌液滴, 2s 后液滴蒸发, 粒径变为 1.6μm^[1]。根据实验测定^[2, 3], 国产 C 类高效过滤器对 ≥ 0.5μm 的微粒的过滤效率达 99.99994%, 对实验用的 1μm 线度的枯草杆菌芽孢的过滤效

率达 99.99997% (实验中回风口吸入菌数量为 1.632×10¹⁰ 个/min)。

假定取最大值一个喷嚏产生 30 万个/min 含菌液滴。据笔者观察, 1 位病人 1h 内可打 5 个喷嚏。病房体积为 45m³, 12h⁻¹ 换气, 设 1h 内能将喷出微粒全部排出 (远小于实验细菌数, 实际上由于气流不均匀等因素做不到这一点), 则 1 次换气需要排出的微粒数为 3×10⁵ 个/min×5÷12=1.25×10⁵ 个/min。如果按 2h⁻¹ 新风换气, 即将 1.25×10⁵ 个/min 微粒的 83% 再循环送入室内, 按上述效率, 约有 0.000003%×1.25×10⁵ 个/min×83%=0.31 个/min 微粒重新送入室内, 与室内人员面临的患者喷出的菌浓相比可视为零。

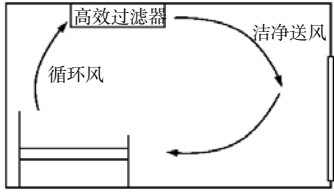
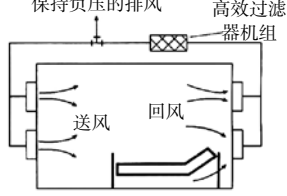
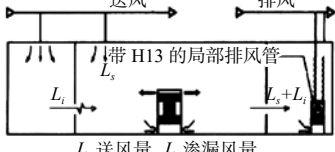
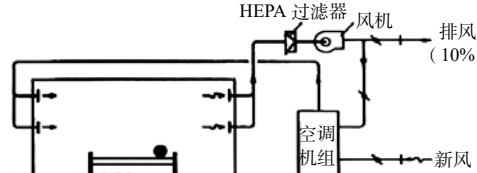
从上面分析可见, 有高效过滤器时, 一小部分排风对室外环境没有危害, 而采用全新风时如果没有经过高效过滤器除菌就全部排到室外 (即过去的高空排放), 对室外环境仍有潜在威胁。

上述 0.31 个/min 微粒相当于送风菌浓为 0.31 个/min÷(12h⁻¹×45m³)=0.034 个/m³=0.34×10⁻⁴ 个/L。文献 [1] 从保护医护人员角度出发, 当医护人员未戴口罩时, 假设要求在 1.5h 内吸入不超过 1 个 1.6μm 微粒 (由喷出的 10μm 微粒在 2s 后蒸发而成), 则要求室内 1.6μm 微粒的浓度不应超过 1.3×10⁻⁴ 个/L。可见上述 0.34×10⁻⁴ 个/L 计算结果远小于此要求限值, 而且 1.5h 内只能吸入不超过 1 个 1.6μm 微粒是过严的要求。如果医护人员戴 N95 口罩, 则室内允许的 1.6μm 微粒浓度可提高 1 万倍以上。此外室内还有日常消毒措施。

所以经高效过滤器过滤后的回风送入室内和采用全新风, 室内致病菌微粒数没有明显差别。而室

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目“室内微生物污染源头识别监测和综合控制技术”(编号: 2017YFC0702800)。

表 1 国内外有关标准条文

	名称	条文	笔者注										
美国	ASHRAE 170-2013	7.2.1 空气传染隔离病房（AII） b) 空气传染隔离病房的空气应全部直接排至室外。例外：由标准病房改造为空气传染隔离病房时，将室内出风直接排到室外的做法是不切实际的，只要出风先通过 HEPA 过滤器即可室内再循环。 表 7-1 设计参数 <table><tr><th>空气传染 隔离病房 (U)</th><th>最小新风 换气次数</th><th>最小换气次数</th><th>将所有送风 直排到室外</th><th>用带供热、供冷直管 的室内自循环设备</th></tr><tr><td></td><td>2</td><td>12</td><td>是</td><td>否</td></tr></table> 注：U 为增加病房的当量换气次数，可以在室内使用配有 HEPA 过滤器的附加空气循环设备，但仍需满足表 7-1 中最小新风换气次数。 c 用于设计的规定最小总换气量应为正压房间的送风量，或负压房间的排风量。	空气传染 隔离病房 (U)	最小新风 换气次数	最小换气次数	将所有送风 直排到室外	用带供热、供冷直管 的室内自循环设备		2	12	是	否	在 2008 版有关修改的说明中指出，对现行标准的变更在正文中用下划线（意味增加）和中划线（意味删除）表示。2013 版中已将下划线去掉，并删掉了中划线及其对应内容
	空气传染 隔离病房 (U)	最小新风 换气次数	最小换气次数	将所有送风 直排到室外	用带供热、供冷直管 的室内自循环设备								
		2	12	是	否								
CDC 的《卫生保健设施中防止结核分枝杆菌传播指南》（Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health care facilities, 1999）	给出了 2 种推荐的气流组织图示  图 1 美国 CDC 推荐气流组织之一  图 2 美国 CDC 推荐气流组织之二	图 1 虽然未见系统图，但可看出此为顶送顶回，经过高效过滤器在室内自循环											
美国建筑师学会《医院与卫生保健设施的设计与建设指南》（Guidelines for design and construction of hospital and health care facilities, 2010）	其表 3 有如下备注： U 若空气传染隔离病房排风无法排至室外，可采用循环风系统，但循环风须经高效空气过滤器处理且只能返回隔离病房	图 2 此图也很清楚地显示，回风经过高效过滤器后一部分排出以保持室内负压，大部分循环至对侧又送入室内											
德国	DIN 1946-4（2008）《医疗护理设施中建筑和用房的通风空调》	表 1 通风要求 5.1 传染病患者的病房 有关气闸室的送风和排风及负压平衡：相对于相邻的走廊区域，气闸室要保持负压；必要时，排风采用 H13 的高效过滤器	没有送、排风的具体说明										
俄罗斯	ГОСТ Р 52539-2006《医院中空气洁净度一般要求》	5.9 5 级房间的要求（隔离病房） 在 5 级房间，排风应采用 H13 级过滤器； 建议的换气次数不低于 12 h ⁻¹ ，该级房间不能进行空气循环；局部空气净化装置（见图 3）可用于减少送风量和必要的换气次数  图 3 5 级房间（隔离病房）局部空气净化装置的应用											
日本	HEAS-02-2013《医院设备设计与管理指南》	8.3.5 传染病患者用隔离病房 (2) 室内循环风的换气次数在 12 h ⁻¹ 以上；隔离病房的空气流动形式如图 4 所示  图 4 隔离病房的空气流动形式 (3) 在病房内原则上不能使用风机盘管等室内循环装置。为了进一步提高室内的空气洁净度，可以采用带有 HEPA 过滤器的风机循环系统	日本标准没有提到优先用全新风，而是直接给出图 4										
中国	GB 50849—2014《传染病医院建筑设计规范》	7.4.1 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 h ⁻¹ 7.4.2 排风应经过高效过滤器处理后排放。											

内菌浓的分布主要与气流组织有关,与是否循环使用回风无关。

当然,不论是全新风还是循环风,高效过滤器(主要是边框)无泄漏是必须的,如果边框无泄漏,则排风、回风都是安全的。本文对此不展开讨论,可参阅文献[1]。

2 国内外标准分析

表1列出了国内外有关标准关于循环风的规定或建议。

对表1关于隔离病房一些要求分析后可以认为:

(1)除了德国标准给出的信息太少,和其他标准不便于比较外,俄、日标准基本上是美国标准的翻版。

(2)美国标准虽然首先提出全排风,但对于改造后的隔离病房,只要出风有高效过滤器即可再循环。这里要注意由标准病房改造的隔离病房也是正经的隔离病房,没有说它只住致病菌感染程度极轻的病人,“只要”是2008年修订后强调的,2013年版沿用。如果循环风应绝对避免,就不可能有上述例外,就不可能有表7-1注U中允许在室内使用配有高效过滤器的附加空气循环设备。

(3)从美国标准表7-1设计参数及其注U可以看出,至少表达易混淆——最小新风换气次数 2h^{-1} 又要求全排风和 12h^{-1} 换气,这是有矛盾的。

(4)CDC指南给出的图示完全是室内自循环的系统,符合出(或回)风有高效过滤器即可室内循环。

(5)俄罗斯标准参照美国标准但表述有不妥之处。既然说“不能进行空气循环”,但又说可用带高效过滤器的局部装置在室内循环,还给出了图示,这等于把可循环的室内上部送风口搬到下部地面上,或者说如果把局部装置安到顶棚上就是室内可循环的模式。

(6)日本标准强调“原则上”不使用风机盘管等室内循环装置,这里重点在带冷热盘管的风机盘管机组,说明因其积尘、积菌不好清洁维护,也因为风机盘管压头小,不能带高效过滤器,带高效过滤器的循环系统在系统冷热盘管上几乎无细菌沉降滋生,所以可用。这可能也有对上述美国标准同样的理解。

日本标准文字中没有提到优先使用全新风,给出的图示表明可以室内自循环——排(回)风经过高效过滤器,有10%排出以维持负压,其余则返回空调机组,与新风混合后送入室内。

(7)中国标准未作细致表述,一个“宜”字表明更注意到美国标准“全部直接排到室外”的表述而增加软化的立场。

3 结语

通过有关的实验、理论分析及对照国外发达国家的标准,可以认为:当负压隔离病房排(回)风口设有不低于待批的国家标准《高效空气过滤器》的40级(原为C类)高效过滤器时,负压隔离病房可采用非全新风净化空调系统。这种非全新风系统应为每间病房独立使用本室空气循环的系统,也称自循环系统。由于我国幅员辽阔,还应提出:当室外气象条件合适并经技术经济比较后适宜采用全新风系统的,可全部病房和辅助用房分别共用一个全新风系统。这对四季如春的地区是适宜的。

参考文献

- [1] 许钟麟. 隔离病房设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2006:145-164.
- [2] 赵力, 许钟麟. 隔离病房隔离效果的微生物学实验方法[J]. 暖通空调, 2007, 37(1):9-13.
- [3] 张益昭, 许钟麟, 王清勤. 隔离病房回风高效过滤器滤菌效率的实验方法[J]. 暖通空调, 2006, 36(8):95-112.

通过湿度控制实现 GMP 合规生产

Martin Ginty, 郑丽丽

(蒙特空气处理设备(北京)有限公司, 北京 101318)

[摘要] 药品生产质量管理规范(GMP)要求对于药品的质量和安全性有直接影响的工艺、人员、环境或设备必须在指定范围内进行操作。如果湿度不满足生产工艺的要求,进而会造成生产不合规的情况,产生一系列的问题。我们可以根据各个生产区的温湿度要求,采用不同的焓湿和湿度控制方法,将各生产区的温湿度控制在合理的范围之内,从而保证各个生产环节能够满足 GMP 的操作环境要求。凭借 60 多年的制药行业和其他领域生产经验,蒙特可以提供干燥除湿解决方案以及相关专业知识和支持,确保您的生产符合 GMP 规定。

[关键词] GMP; 生产工艺; 温湿度要求; 焓湿和湿度控制; 蒙特; 干燥除湿解决方案

药品生产质量管理规范(GMP)要求对于药品的质量和安全性有直接影响的工艺、人员、环境或设备必须在指定范围内进行操作。这些指定范围由生产团队规定,并且有相应的解决问题的对策。对于药品质量和安全存在间接影响的生产或存储工艺中的任何其它部分,也必须评估可能的风险影响。

如果湿度不满足生产工艺的要求,进而会造成生产不合规的情况。未经控制的湿度水平会影响到生产工艺,致使生产出不合格的产品。

湿度控制不当造成的一些常见问题有:

(1) 能耗增加; (2) 美观度改变; (3) 微生物滋生; (4) 化学反应; (5) 测试设备精度差; (6) 回潮; (7) 导电性改变; (8) 对操作工艺造成影响; (9) 厂房和产品降级; (10) 冷凝问题; (11) 产品干燥问题; (12) 腐蚀; (13) 制冷装置效率降低; (14) 生产力下降; (15) 结冰。

图 1 显示了相对湿度变化对于各种物料存储的影响:

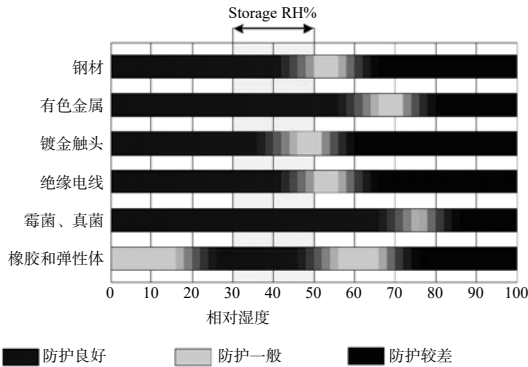


图 1 相对湿度对静置位置存放物料的影响

相对湿度和气温之间的相对关系很重要,气温变化也影响相对湿度。比如,温度下降或表面寒冷会使相对湿度上升,有可能会造成冷凝。

1 各个生产区的温湿度要求

固体药剂生产相关区域的常见温湿度条件见表 1。

表 1

生产区域	温度	湿度
称重, 混合	20~22°C	35~40% RH
压片	20°C	25~35% RH
包衣锅	12~95°C	10~70%
填充包装	20°C	10~35% RH
贮存	20~25°C	45% RH

若指定工艺和周围区域保持在正确的相对湿度水平,那么就不会给正在生产的物料或者生产设备造成湿度相关的问题。特定工艺所需的相对湿度值取决于多种因素:

- (1) 所用的物料(原料药、辅料药);
- (2) 生产空间的地点、气候等;
- (3) 标准操作规程;
- (4) 可能受到其它因素影响的 GMP 特殊规定。

因此,在所有生产区域中,应始终认真考虑湿度,以达到最佳的产品质量。

自问问题:

(1) 我的设备中的相对湿度是否在任一时间都满足 GMP 规定要求?

(2) 如果超不满足,持续了多长时间? 恢复到规定值需要多长时间?

(3) 这有什么影响,我需要对此采取应对措施吗?

(4) 恢复时间是固定的还是可变的?

可能您正面临着湿度相关的生产或质量问题:

(1) 原料和辅料药的流动性没有达到预期水平。
(2) 称重一批原材料或成品时,存在可能由于水分含量变化而引起的重量变化。

(3) 有堵塞、结块或其它的料仓、料箱、管道和工艺设备障碍的迹象吗?

(4) 在包装时应考虑是否使用可渗透水分的容

器。

(5) 容易发生水解降解的原料和辅料药应特别关注。

即使考虑到所有这些因素,或许也需要溯本求源并自我提问,“生产和存储工艺的相对湿度水平是如何在研发阶段确定的?”

2 储存和仓储

与理想温度和湿度条件的偏差必须降到最低,加以控制并记录在文件中。不幸的是,温度和湿度偏差几乎是不可避免的,但是 HVAC 的自动控制和湿度控制系统可提高响应和恢复的快捷度,而且能提供历史和趋势数据,并对这些重大偏差进行追踪。

需要考虑温度或湿度偏差对于存储的每种物品的影响。对于仓库来说这是一项艰巨的任务,因为它要包含数百种甚至上千种的不同库存项目,而且未来还会存放新的项目。因此,影响性的评估有可能成为一项艰巨的任务。

使用自动生成日志,更容易确保将温度和湿度控制在规定范围内。

3 焓湿和湿度控制

可尝试使用不同的方法控制湿度。

使用室外空气通风——通风气流的水分含量必须低于建筑内空气中的含水量才有效,因此,它会受天气变化和季节性条件的影响。所以,我们不使用未经处理的室外空气,因为它具有可变性,并考虑处理进入建筑或者已存在于建筑中空气的其它处理方法。

加热——可降低相对湿度,但不会改变绝对湿度,水蒸气的质量不变,结露点也未改变。如果你需要加热某个区域以达到舒适效果,这可能是一种合理的湿度控制策略,但费用相对昂贵。

冷却——使用冷却盘管先把空气温度降到露点以下,使冷凝水析出,然后升高气温就可以使相对湿度降低。但是当温度低于 10°C 时,效率会显著降低。此外,冷却盘管冷凝会造成腐蚀,而且潮湿条件是细菌和霉菌滋生的温床。

干燥除湿——可降低相对和绝对湿度,还能降低结露点,同时适用的温度范围广(操作范围在 +40°C 至 -40°C),而且所需风量小,有助于节能。可以使用多种能源,比如电、蒸汽、燃气、低温热水等,所以可以利用可用的公用设施和废热。系统干燥运转能降低因潮湿条件引起的细菌滋生和维护可能性,进而延长设备的使用寿命。而且,这种湿度控制方法可以做到在 -70°C 结露点(对于某些敏感原料药)进行干燥。

4 结语

凭借 60 多年的制药行业和其他领域生产经验,蒙特可以提供干燥除湿解决方案以及相关专业知识和支持,确保您的生产符合 GMP 规定。我们能够提供多种系统,可以应用到研发、试点工厂和各种规格生产区中,确保您在从生产测试和试验的有限生产到全面生产的过程中投入的时间和精力能得到充分利用。

生物制剂药厂值班模式案例分析与探讨

赵 伟, 张彦国, 董秀芳

(洁净空调厂房的节能设计与关键技术设备研究课题组)

[摘 要] 随着新版 GMP 工作的深入和全面质量意识的提高, 2010 新版 GMP 后实施的药厂与之前药厂能耗有明显提高, 因此如何在保证药品符合新版 GMP 要求, 同时又能最大化帮助企业降低运行费用这个问题提到日程。本文主要介绍某项目通过值班模式方式降低运行费用。

[关键词] 2010 新版 GMP; 节能; 值班模式

1 GMP 中相关条文规定

近几年, 随着生物技术的大力发展, 越来越多的生物制剂药厂投入建设并使用。通常为了保证生物制剂产品不被污染, 一般生物制剂产品都被要求在无菌环境下生产的, 因此如何在满足《药品生产质量管理规范(2010 年修订)》(2011 年 3 月 1 日执行, 以下简称 2010 新版 GMP) 生产环境要求, 又能降低车间运行费用, 从而降低企业生产成本, 显得尤为关键。2010 新版 GMP 无菌附录三《生物制品》关于生物制剂产品要求如下:

第十四条 生物制品的生产操作应当在符合下表规定的相应级别的洁净区内进行, 未列出的操作可参照下表在适当级别的洁净区内进行:

洁净度级别	生物制品生产操作示例
B 级背景下的局部 A 级	附录一无菌药品中非最终灭菌产品规定的各工序灌装前不经除菌过滤的制品其配制、合并等
C 级	体外免疫诊断试剂的阳性血清的分装、抗原与抗体的分装
D 级	原料血浆的合并、组分分离、分装前的巴氏消毒 口服制剂其发酵培养密闭系统环境(暴露部分需无菌操作) 酶联免疫吸附试剂等体外免疫试剂的配液、分装、干燥、内包装

2010 新版 GMP 附录一《无菌制剂》相关要求如下:

第三十二条 在任何运行状态下, 洁净区通过适当的送风应当能够确保对周围低级别区域的正压, 维持良好的气流方向, 保证有效的净化能力。

第三十八条 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度级别要求。

2 案例方案介绍

本项目洁净区域分成 A\B\C\D 四个区域, B 级区域由于产品生产需要, 不是全年都满负荷有生产任务的。而按照 2010 新版 GMP 要求, 无菌产品建议连续运行(条例详细情况见上文), 因此考虑使用值班模式。

本项目采用送排双风机系统, 空调系统风机采

用变频技术, 可进行变频控制。送风管设置风量传感器, B 级高效送风口前设置双稳态定风量阀(或者变风量阀), B 级回风设置变风量阀, 以控制该房间压差。重点房间高效送风口前安装末端再冷盘管用于调节房间温度。

该项目空调系统原理图见(图 1)。

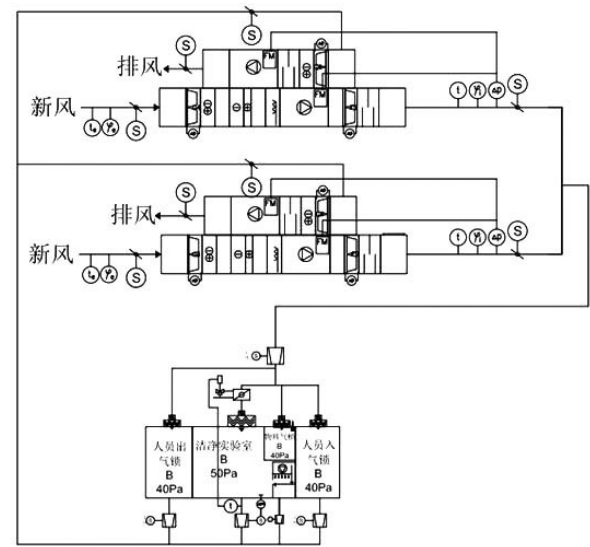


图 1 本项目空调系统原理图

本项目该空调系统设计了工作模式、值班模式等几个模式组合, 各个模式间工作控制逻辑如下:

(1) 空调系统模式从停机切换到工作模式

3s 后, 打开空调的新风阀, 回风阀, 送风阀, 根据选择, 对应房间进入工作模式。

100s 后, 打开空调的送风机, 以最低频率启动。

102s 后, 检测送风机开启状态, 任一台启动失败, 系统进入停机模式。

104s 后, 两台送风机开启正常的情况下, 打开空调的排风机, 以最低频率启动。

106s 后, 检测排风机开启状态, 任一台启动失败, 系统进入停机模式。

180s 后, 两台排风机开启正常的情况下, 送风机以固定频率升频。

183s 后, 排风机以固定频率升频。

600s 后, 送排风机频率改由压力控制。

(2) 空调模式从工作切到值班模式

11s 后, 空调排风机降到值班模式频率。

13s 后, 空调送风机降到节能模式频率, 所有房间进入值班模式, 新风阀和回风阀切到节能模式的开度。

空调模式从值班模式切到工作模式

6s 后, 空调新风阀和回风阀切到工作模式的开度, 根据选择, 对应房间进入工作模式。

200s 后, 空调送风机以固定频率升频。

203s 后, 2 组空调排风机以固定频率升频。

600s 后, 送排风机频率改由压力控制。

通过上述几种模式的切换, 保证该系统值班模式正常使用。

3 运行效果

(1) 该系统在这种模式下运行, 洁净室参数均符合设计要求。

(2) 年能耗分析:

通过对该项目近 5 年实际运行情况的跟踪, 我们收集了该项目实际运行数据, 具体情况分析如下。近 5 年年耗电量分析 (见图 2)。

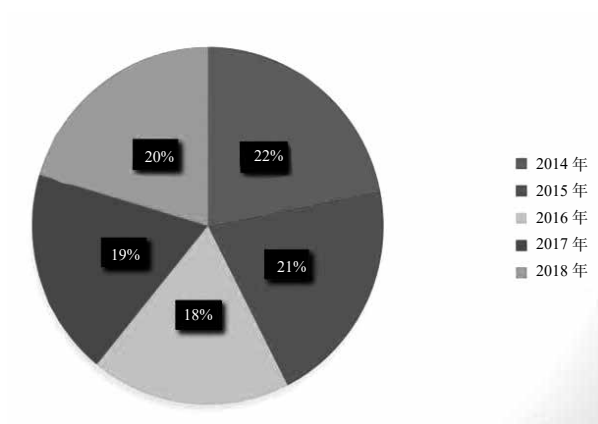


图 2 某项目年耗电量分析图 /kW·h

该数据显示近 5 年该项目最大年份年耗电量与近 5 年年耗电量平均值相比, 偏差不到 10%。说明, 在采用值班模式后, 该项目室外气候条件变化 (冬季及夏季温度波动, 湿度的变化) 对该类型项目整体耗电量影响有限。

(3) 逐日能耗分析:

近 5 年半逐日耗电量分析见图 3 (考虑到业主信息保密性, 图 3 中的逐日耗电量数据做了适当修改, 但整体逐日耗电量趋势不变),



图 3 2014~2019 年逐日耗电量分析

从图 3 中可以看出下面信息:

(1) 近 5 年半最低日耗电量是日最大日耗电量的 10%, 该种情况一般发生在春节放假期间;

(2) 近 5 年 50% 的时间实际日耗电量是最大日耗电量一半左右, 近 3/4 的时间实际日耗电量不大于最大日耗电量的一半。充分说明, 该类型项目大部分时间处于值班模式运行, 而真正满负荷运行的时间非常短, 因此在日后设计该类型项目要充分考虑这些因素, 在保证满足各种情况下实际需求的同时, 可以降低初投资和运行费用;

(3) 2014 年~2018 年每年 5 月到 10 月日耗电量分布规律比较平稳, 不同年份趋势一致; 而每年 10 月到次年 5 月, 逐日耗电量波动很大。说明, 采用了值班模式后, 夏季日耗电量受外界条件影响减少;

(4) 最大能耗值不是出现夏天而是冬天, 其原因是该项目加湿采用电加湿, 冬季室外空气比较干燥, 由于考虑生产环境需要而对室外新鲜空气进行了必要的加湿。因此, 在该类型项目选址和设计时, 尽量考虑当地是否有蒸汽资源, 减少冬季因电加湿导致的用电能耗增高。

参考文献

- [1] 《医药工业洁净厂房设计规范》GB 50457-2008.
- [2] 《洁净厂房设计规范》GB 50073-2013.
- [3] 《药厂洁净室设计、运行与 GMP 认证 (第二版)》许钟麟 同济大学出版社 2011.6.
- [4] 《药品生产质量管理规范 (2010 年修订)》2011 年 3 月 1 日执行.

某激光实验装置净化空调系统设计

李晓菲

(上海建筑设计研究院有限公司机电院机电一所, 上海 200041)

[摘要] 结合超强超短激光实验装置项目工程概况与项目背景, 详细介绍了净化空调系统形式、空调负荷的计算、冷热源的选择、净化风量的计算与气流组织、新风量的确定及新风处理。阐述了该项目的空调自动控制系统, 给出了实际运行效果及数据。

[关键词] 净化空调; 气流组织; 新风机组; 自动控制

1 项目背景及工程概况

超强超短激光是人类已知的最亮光源, 相当于把地球接收到的太阳总辐射聚焦到头发丝粗细的尺度。所谓“超强”, 是激光脉冲峰值功率达到拍瓦级 (10^{15}W , 千万亿瓦); 所谓“超短”, 是脉冲宽度达到数十飞秒级 (1 飞秒 = 1 千万亿分之一秒)。能量如此之高的激光, 能在实验室里创造出类似于恒星内部、黑洞边缘的极端条件, 在许多科技领域有重要价值。

本项目是国际上率先建成激光峰值功率达到 10

拍瓦的“上海超强超短激光实验装置”(Shanghai Superintense Ultrafast Laser Facility, SULF)。该装置主要包括一套 10 拍瓦超强超短激光系统, 同时具备高重复频率的 1 拍瓦级激光输出束线。本项目共 6 层, 地上 4 层, 地下 2 层, 总建筑面积 9150m²。地下 2 层用户实验平台大厅建筑面积 1100m², 层高 11.2m, 吊顶高度 6m。1 层激光器大厅建筑面积 1100m², 层高 10.9m, 吊顶高度 7.5m。3 层以上为充电能库、常规元器件材料库房等辅助用房。如图 1 所示。

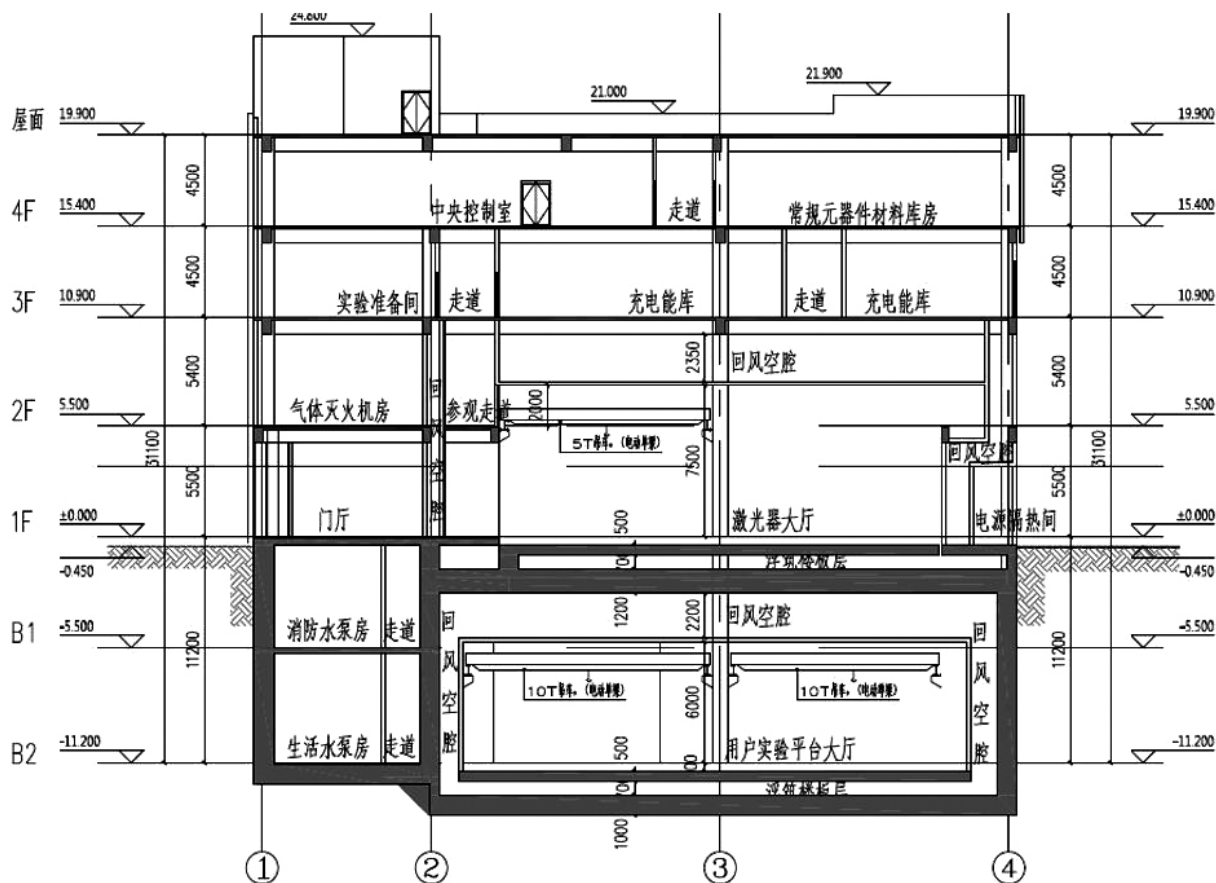


图 1 实验装置剖面图

2 设计参数及负荷计算

2.1 室内设计参数

超强超短的激光在空气中穿过遇到细小的颗粒会引起散射，减弱光的强度，使得光不能聚焦为一个点，而是变成一个光斑。因此，激光器大厅和地下室用户实验平台大厅中要求的洁净等级均为 7 级。而产生激光所使用的光学晶体对温度变化敏感，温度变化使得晶体的表面的曲率发生变化，进而影响激光的行走路线。空气中的湿气会腐蚀晶体表面，缩短设备的使用寿命。所以，室内温度和湿度同样是需要严格控制的。这些环境参数对科学试验的成败至关重要，洁净室具体要求见表 1。

表 1 洁净室具体要求

房间名称	温度 °C	相对湿度 %	新风量 m³/h·p	洁净度	工艺冷却水温度参数 °C	基础震动
用户实验平台大厅	22°C±0.5	30-40%	+10 帕计算	7 级	17°C±1	5um@<100Hz
激光器大厅	22°C±0.5	30-40%	+10 帕计算	7 级	17°C±1	5um@<100Hz
百级超净装配间	22°C±0.5	30-40%	+10 帕计算	5 级	-	5um@<100Hz
千级超净装配间	22°C±0.5	30-50%	+10 帕计算	6 级	-	5um@<100Hz

2.2 空调负荷计算

激光器大厅、用户实验平台大厅为大空间实验室，分别位于地下 2 层、地下 1 层及 1 层、2 层。底部设有浮筑楼板层，四周设置回风空腔，故围护结构负荷很小。实验区工艺设备较多，发热量较大，全年处于制冷工况。室内显热负荷主要由照明负荷、人员负荷、围护结构、FFU 风机发热、电再热盘管、工艺设备散热组成。同时需考虑工艺冷却循环水带走的热量及新风负荷，最终确定室内负荷。显热负荷占比见图 2。

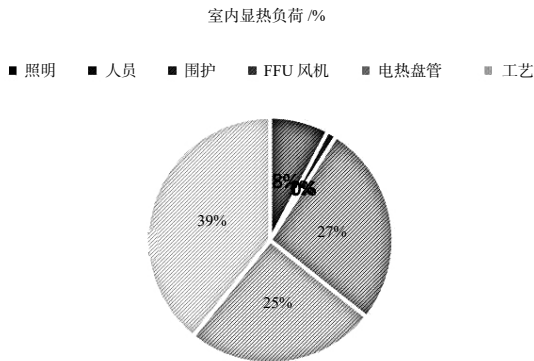


图 2 各显热负荷占比示意图

经计算，激光器大厅、用户实验平台大厅、百级超净装配间、千级超净装配间、电源隔热间夏季总制冷负荷为 447kW，冬季总制热负荷为 165KW。激光器大厅、用户实验平台大厅的设备工艺冷却水负荷约为 441KW。

3 空调冷热源

风冷冷水机组整体性好，安装方便，运行可靠，可露天安装在室外，不占用有效建筑面积。冷水机组 + 冷却塔系统稳定性好，冷水机组 COP 高，但需要设置冷冻机房，屋顶需考虑冷却塔布置位置。由于该项目是独立单体，建筑面积较小，缺乏安装冷水机组的机房面积，故采用 3 台制冷量为 350kW 的自然冷却风冷冷水机组。考虑洁净室空调需要 24h 连续运行，其中一台机组作为备用。洁净室采用干盘管 +FFU 的空调方式，为了确保吊顶内的干盘管无冷凝水产生，避免冷凝水泄漏损坏室内设备，采用温湿度独立控制系统，干盘管的冷水供水回水温度为 14°C/19°C。

激光器大厅、用户实验平台大厅的设备工艺冷却水系统采用 2 台 240KW 的风冷冷水机组冷却，该机组的出水温度为 14°C，回水温度为 19°C。经过调研风冷冷水机组的多家厂商资料，风冷冷水机组不能直接制取设备工艺冷却水所要求的 17°C 供水温度，故配置 2 套板式热交换机组进行换热。

其他区域如超快化学与大分子物理用户终端实验室、光电检测操作间、走道、电梯厅前室等各个功能用房为舒适性空调区域，要求空调使用灵活，故采用热泵型变制冷剂流量多联系统。该系统节能、舒适、运行平稳，占用的建筑空间小，更能满足用户个性化的使用要求。

4 净化空调系统

4.1 净化空调方式选择

洁净室一般采用净化空调箱或 FFU（风机过滤单元）+DC（干表冷盘管）的净化空调方式，这两种方式各有优缺点，需根据工艺需求、机房情况等进行选择。洁净空调箱对室内的空气进行集中处理，处理后的空气经风管送入洁净室，该方式的优点是运转设备均在独立机房内，检修方便，室内噪声易控制，其缺点是空气输送路程较长，空气输送能耗较大，管道占用吊顶空间较大，需要一定面积的空调机房。而“FFU（风机过滤单元）+DC（干表冷盘管）”的方式将大量的 FFU 和 DC（干表冷盘管）均匀安装在洁净室吊顶内，实现室内回风、室内送风，其优点是空气输送路程短，空气输送能耗较小，节省机房面积，缺点是有一定的噪声，设备检修不方便，干盘管有冷凝水泄漏的风险。鉴于本项目缺乏机房面积，采用“转轮除湿机 +FFU（风机过滤单元）+DC（干表冷盘管）”的方式，FFU 按中档风量选用并采用高效直流变速风机，节能的同时可控制室内噪音，干盘管设置冷凝水盘和冷凝水排放管路，以避免盘管结露产生的影响。

洁净区顶部均布 FFU (风机过滤单元), 处理后的一次风 (新风与回风) 在回风夹道中与循环风混合, 经设置在吊顶上干式冷盘管处理后进入上部送风静压箱, 经 FFU 加压、高效过滤后送入大厅内, 回风经侧墙下部回风百叶风口 (带初效过滤器), 再至回风夹道。干盘管主要承担洁净室内显热负荷, 洁净室内的洁净度由 FFU 保证^[4]。处理流程见图 3。

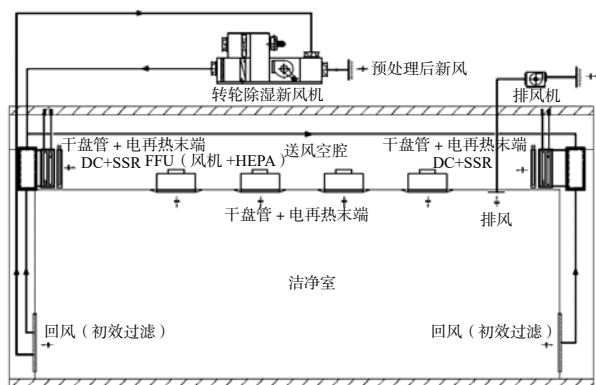


图 3 净化空调处理流程

4.2 新风量的确定及新风处理过程

4.2.1 新风量的确定

新风空调系统用于补偿洁净室排风量和维持洁净室正压所需的渗透风量, 带走室内湿负荷, 保证干盘管处于干工况运行, 同时满足人员卫生需求^[3]。共设置两台双冷源新风除湿机组, 风量分别为 8000m³/h 和 7000m³/h, 一台负责一层激光器大厅、百级超净装配间、千级超级装配间, 一台负责用户实验平台大厅。

4.2.2 新风处理过程

激光器大厅、用户实验平台大厅、百级超净装配间、千级超级装配间要求室内湿度严格控制在 30%~40% 之间, 在室内温度 22℃ 时, 室内空气含湿量为 6.56g/kg, 露点温度为 7.79℃, 新风仅采用常规冷水机组进行冷冻除湿难以达到以上湿度要求, 需要采用转轮除湿方式进行除湿。

冷冻除湿法具有除湿效率高、除湿量大、耗电

量小的优点, 但常温冷冻机组不能进行深度除湿, 适用于空气露点温度较高的场合。转轮除湿法具有深度除湿、湿度调节精度高等优点, 特别适宜于低温、低湿状态下应用, 缺点是需要电热再生, 耗电量较大。采用冷冻除湿与转轮除湿二级联合除湿的方法可结合两种除湿方法的优点, 减小室外新风湿度对室内的干扰, 减小室内湿度的波动, 同时提高冷冻除湿的机器露点和冷水机组的效率, 降低了转轮除湿机组的除湿量, 节省了再热量, 实现了节能运行。

冷冻除湿与转轮除湿二级联合除湿系统由双冷源新风除湿机组和转轮除湿空调箱组成。双冷源新风除湿机组为带有预冷盘管的直膨式冷冻除湿机组, 室外新风经过高温冷冻水 (14℃) 预冷盘管预冷后, 经过低温蒸发器进一步降温除湿, 在转轮除湿空调箱中与室内回风进行混合后, 经过分子筛转轮深度除湿升温, 再经过高温冷冻水 (14℃) 表冷盘管进行降温, 最后送入洁净室回风空腔, 实现了室内的湿度控制。新风处理流程如图 4、5 所示。在转轮除湿机组中设置电极加湿器, 满足冬季室内加湿的要求。

为了延长 FFU 中高效过滤器的使用寿命, 新风除湿机组设置了粗中效纤维层过滤器和高效滤过滤器。双冷源新风除湿机组的冷凝器夏季排风温度在 40~50℃, 将冷凝器排风作为转轮除湿机组的再生空气可节约电加热量, 该排风在进入转轮除湿机组再生段前, 经过热管热回收器与再生出口排放的高温空气进行换热升温, 进一步节约再生电加热量, 减少再生空气的加热量约为 50%。

4.3 净化风量计算

根据 GB 50472-2008《电子工业洁净厂房设计规范》中对洁净室内送风量的要求, 分别计算净化风量和负荷风量。1 层激光器大厅及地下室用户实验平台大厅为 7 级 (万级) 净化要求, 根据 GB 50472-2008 规定, 空气洁净度等级为 7 级, 气流流型为非单向流, 换气次数为 15~25 次/h^[1], 由于洁净室内发热量较大, 故选择换气次数为 25 次/h。根

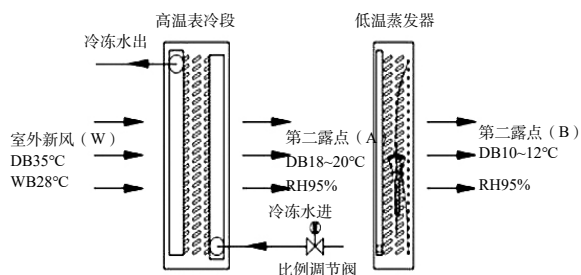


图 4 冷冻降温除湿过程

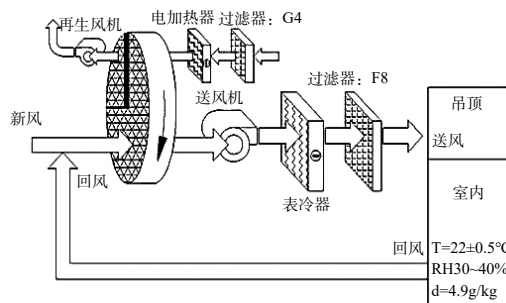


图 5 转轮除湿过程

据 GB 50736-2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》规定,工艺性空调的送风温差根据室温允许波动范围选取,故选择送风温差为 2.5°C ^[2]。1层5级(百级)装配间根据工艺要求,独立设置净化空调系统,面风速按 0.20m/s 。1层6级(千级)装配间根据工艺要求,换气次数60次/时,独立设置净化空调系统。

4.4 气流组织

洁净区顶部均布FFU(风机过滤单元),送风口、回风口的送回风温度、位置、风速对室内的气流组织、室内的温度场、速度场影响很大,借助CFD三维气流组织数值计算仿真模拟技术,可以以直观的方式表示出各种不同风口位置尺寸和送风温度下的温度场和速度场,分析讨论其不同参数下的气流分布的规律、特点及其改进方向,寻求合适的气流组织形式以满足节能和工艺性的需要。本项目采用CFD软件来模拟温湿度和洁净度要求较高的激光器大厅和用户实验大厅的气温度场和速度场,温度场及速度场气流流型图如图6、7所示。

根据CFD模拟来确定FFU的台数、位置及送风风速,确定回风口的位置和数量,同时校核实验平台的气流速度。

5 空调自动控制系统

5.1 温度控制

采用干表冷盘管+电加热器相结合的系统控制室内的温度。在激光器大厅、用户实验大厅、百级

装配间、千级装配间的四周墙体及中间的柱子上设置室内温度探头,实时采集室内温度与设定值进行比较。通过DDC控制干表冷盘管回水管上电动三通阀的开度,调节水流量,使洁净室的温度保持在控制范围内。另外配置电加热器安装在吊顶静压箱内,电加热器前后均设置温度探头,通过电加热器前的温度传感器控制电加热器的加热量,同时检测电加热器后的送风温度,以控制送风温度精度。

5.2 湿度控制

采用双冷源新风除湿机组和转轮除湿机组控制室内的湿度。在激光器大厅、用户实验大厅、百级装配间、千级装配间的四周墙体及中间的柱子上设置室内湿度探头。双冷源新风除湿机组和转轮除湿机组自带控制系统,能在不同工况下,根据室内湿度调节除湿以及加湿量,满足洁净室湿度要求,并留有大楼BA控制接口。

5.3 压差控制

《电子工业洁净厂房设计规范》中要求洁净室(区)与周围的空间应保持一定的静压差,目的是为了确保洁净室(区)的正常工作状态或空气平衡暂时受到破坏时,空气只能从空气洁净度等级高的房间流向空气洁净度等级低的房间,使洁净室(区)内的空气洁净度不会受到污染空气的干扰。在激光器大厅、用户实验大厅内设置压差传感器,根据室内外的压差控制大厅内的排风机变频运行,同时风管上设置电动调节阀与风机联锁控制。百级装配间、

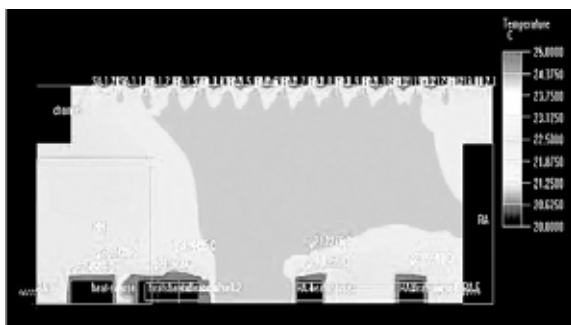


图6 温度场气流流型图

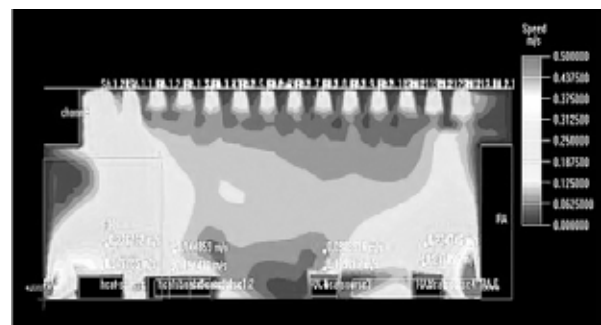


图7 速度场气流流型图

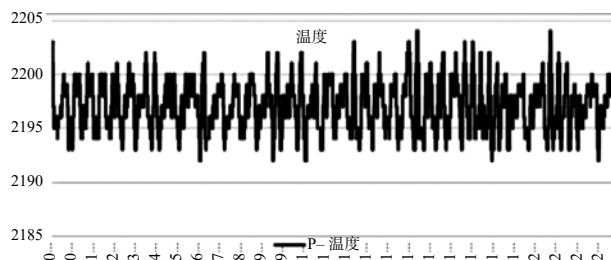


图8 温度波动

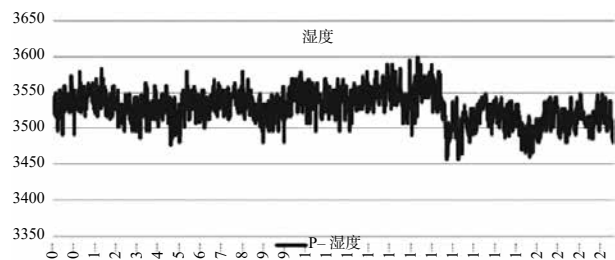


图9 湿度波动

千级装配间设有余压阀, 自动调节室内外的压差。

6 检测结果

经运行后检测, 单点温度波动度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}/24\text{h}$ 以内, 整个大厅工作面二十多个温度监控点均匀度达到 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}/24\text{h}$ 以内, 湿度波动度实现了 $\pm 1\%\text{RH}/24\text{h}$ 的指标, 洁净度也达到 7 级要求。温湿度波动检测如图 8、9 所示。

7 结语

本项目目前已建成并投入使用, 经检测各项指标均满足使用要求。激光器大厅和用户实验大厅是该项目最重要的两个科研区域, 在高大空间内控制室内温湿度波动范围和保证洁净度要求, 气流组织及其稳定性是关键, 需要在换气次数较大的情况下, 能够保证工作区具有均匀而较小的气流速度。在实

际工程中还应综合考虑冷热源等整体的经济性和适用性, 同时冷冻除湿与转轮除湿相结合的二级除湿方式等问题还值得继续研究与探讨。

参考文献

- [1] 中国电子工程设计院. 电子工业洁净厂房设计规范: GB 50472-2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008:19-20.
- [2] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012:58.
- [3] 中国电子工程设计院. 净化厂房设计规范: GB50073-2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013:19.
- [4] 姚洪娥. 某硅晶片生产厂房净化空调设计 [J]. 暖通空调, 2010,40(4):22-25.

谈实验室的可持续性设计

田耀荣

(深圳壹创国际设计股份有限公司, 深圳 518000)

[摘要] 可持续性设计是一种构建及开发可持续解决方案的策略设计活动, 实验室的可持续性设计即是满足当前需要且能适应未来要求实验室环境的设计模式, 此文抛砖引玉, 希望能引起大家对可持续性设计重视及可持续性设计方案的落地实施。

[关键词] 可持续性设计; 实验室

现代的许多科技发明创造大多起始于实验室, 因此实验室的设计和建造在国内外普遍受到重视。在设计或建造了国内很多科研机构、大学的实验室后, 越来越发现国内实验室与国外实验室存在的差别, 不过, 国内的实验室也在逐渐吸收国外实验室设计和建造的理念, 其中实验室的可持续性设计就是很值得我们去学习。

目前, 在设计或建造我国的一些实验室时发现, 几乎没有一座实验室不在变, 有的是在征求需求时就反复修改, 有的可以修改二十次, 需求和平面规划图好不容易定下来, 在建造时又发生了改动, 原来设计的化学间, 改为了办公室, 原来设计的办公室, 改为了仪器间, 原来设计的一般氮气, 改为了超纯氮气等, 有的实验室甚至长年在变动中。其实这一现象的存在是也是合理的, 因为新技术的不断发展、创新, 新的科研内容和科研团队, 要求有新的工艺流程相配合, 二者交织在一起, 缺一不可。为了满足工艺流程的变动, 实验室的平面及空间布局需作相应变动, 但在已建成的建筑物中作变动是有一定困难的。当然, 这种变动有大有小, 如果是小变更, 只是增添一两台新设备, 在设计时也是预留, 这些也是允许的, 但是, 有的变动较大, 比如通风柜和灭菌设备的增加, 就比较有困难了。尤其涉及到新设备需求的气和电量的增加或气体种类的变化、墙体拆除及管线移位等, 由于原设计和建造中未考虑这些后来可能会有的变动, 在改造中, 就很难实现。为了达成新工艺的要求, 不得已采取的办法是以新工艺流程来迁就原建筑物的空间划分及设备设施的布局, 这会给以后工作带来长年不便。如果变动一次永不再变也还勉强, 可事实是以后还要变动。这种经常的变动提示我们, 在设计初始就应考虑相应措施。为了适应实验室工艺流程的不断变化, 在设计时必须考虑实验室建筑适应的灵活性与可变性, 也要考虑实验室家具的灵活性和可变性, 为后期实验室工艺流程的改变打下基础。

可持续性设计是一种构建及开发可持续解决方

案的策略设计活动, 实验室的可持续性设计即是满足当前需要且能适应未来要求实验室环境的设计模式。国内的实验室的设计和建造也在逐渐推动这种模式的发展, 主要体现在以下几方面: 建筑结构、实验室内部规划、实验室内部装修的可持续设计、机电专业的可持续设计、实验室家具的可持续设计等。

由于当前竞争的市场环境, 很多科研机构把更多的资金投在实验外以创造高质量的空间, 以便吸引新的科研人员并留住既有的科研人员, 实验室的建筑结构需要从单一的实验室功能转变为综合性的功能, 要有舒适的休闲区比如咖啡厅、健身中心、散步小径、花草树木、水榭、桌椅、自动售货机等, 且布局紧凑, 色调适宜, 这些舒适的设施服务于科研人员而使他们每天能更有效地完成工作, 并且有随着时间推移, 有进一步可扩展的空间, 使实验室科研人员不但能专心从事研究, 也能调节他们的心情, 为他们的身心健康提供帮助。

实验室内部规划一般是从总体到局部, 从一般到特殊, 实验室的规划设计必须要统筹安排才能规划好。在规划时还要考虑灵活性和可变性, 哪些设备、设施、实验台、实验柜等可以变动, 哪些管线如给排水管、空压管、电气、通风等不能随意移动, 所有设备尽可能不设独立基础固定, 如需固定时, 对小型设备可铺设厚钢板固定, 以便易于拆除, 对大型设备, 当需做基础固定时, 不做凸出地面的基础, 并尽可能置于底层, 其目的是做到固定设备有可能随工艺变动而移动。办公室围绕外墙布置, 提供望向室外的视野。科学家可以一边撰写研究报告一边监督他们的实验室空间。

实验室内部精致的人性化、让人舒服的装饰设计更能让科学家们愿意在实验室内停留, 所以实验室按精装的标准来做设计也是可持续设计的内容之一, 应当使用多种让眼睛舒适的颜色和材料, 研究表明, 使用颜色来塑造室内空间能让所有里面工作的人健康且舒适。地面图案的不同增加视觉趣味,

多种颜色和材料让人眼舒适。

一座典型的实验室每平方使用的能量、水等比办公楼多五倍之多，所以实验室机电专业的可持续设计尤为重要，主要包括大量的排风、大量的发热设备、科学家要求 24 小时使用，不可替代的实验要求有自动故障的备用系统和不间断电源供应（UPS）或紧急电源。实验室环境的可持续设计还会提高生产力。

可持续照明设计在提高工作人员舒适性和生产力的同时减少了能量的使用。日光是可持续设计的一个重要组成部分，它不仅减少能量使用，而且增加舒适性和提高生产力，可以把自然光引入大多数实验室空间和公共空间，从而几乎在建筑中的任何地方，人们都能有机会观察室外来确认天气并让自己了解当地的时间。

管廊的设计更利于以后工艺流程的变动。将各种管线集中一起设置管廊，它不仅便于管理，而且各实验室也显得整洁漂亮。管廊要求按可变工艺流程选择位置，为此这种管廊常置于实验室的中心地带，也就是说它可为各个实验室提供所求。管廊内除留有检修通道外，尚留有管线扩建预留地，C 型钢可以为管廊的设计提供很大的帮助。管廊的平面

形式常依实验室的总体布局要求而定，一般常见的有一字形和丁字形等。

实验室全部采用自控变风量空调系统，这对工艺流程的随意变换提供了有利条件。另外现在空调通风风管采用的是一种透光膜似的风管，内设一根很细的螺旋弹簧钢丝作支撑，不用时可压缩成很短一段管线，用时打开即可拉得很长。这种管线很轻，可直接放置在吊顶顶棚上部，不需设吊勾固定。这种管线不仅施工方便，而且在土建计算吊顶荷载时对此部分可忽略不计，这就又节约了一定费用。

通风柜的选用其平面尺寸是与其它化验台、柜相一致的，所以室内布置整齐并易于调换，这也是属于实验室家具的可持续设计，当然这也节约了一定面积。实验台具有废液收集系统和安全存储，在实验台设计时也做好预留，与工程系统轻松连接或断开以及灵活的工作台等，也是属于实验室家具的可持续设计。

未来，随着精细化管理深入到实验室及社会要求的可持续发展要求，会有越来越多的设计理念应用到实验室的设计和建造中，希望大家一起努力，为科研工作尽份力。

美国医院设计与建设新指南与主要修订内容

刘燕敏

(同济大学, 上海 200092)

[摘要] 2018 版《医院设计和建设指南》以三个独立文本颁布, 旨在推进住宅医疗与护理、日间医院、日间手术中心、办公室医疗等, 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, 以实施“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。

[关键词] 医院设计; 能源效率; 医院能耗

0 引言

美国医院设施指南协会 (Facilities Guidelines Institute, FGI) 是 1998 年成立的非营利性实体, 其使命是建立和促进以共识为基础的指南和出版物, 如著名的《医院设计和建设指南》(以下简称《指南》), 并在研究的指导下提高医疗护理质量。FGI 管理《指南》的发展进程, 保护《指南》的知识产权, 并管理资助《指南》发展的研究资金。《指南》每 4 年更新一次。从 2010 年开始, 《指南》已将 ANSI / ASHRAE / ASHE 标准 170: “医疗护理设施通风”纳入, 以提供医疗护理设施的通风要求。不同的是, 2014 版的《指南》分为“医院与门诊设施设计和建设指南”和“住宅建筑医疗、护理和辅助设施设计和建设指南”两个独立文本。这里的住宅建筑涉及养老院和其他长期护理设施。这是因为住宅护理和临终关怀设施, 辅助生活设施和独立生活环境, 以及非住宅辅助设施 (成人日托设施, 健康中心和门诊康复中心) 在美国得到了极大发展。

最新的 2018 年版《指南》以三个独立的文件发布, 即“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”。ASHRAE 170-2017 版“医疗护理设施通风”, 已作为该版《指南》的第 3 部分纳入 (见图 1)。所指的门诊设施 (Outpatient Facilities) 包括日间医院、日间诊所、日间手术中心等, 并涵盖小型诊所, 以及大型医疗建筑中的多种临床服务, 如独立影像、办公室医疗、手术单元等。2008 版“门诊设施设计和建设指南”形成独立文本的目标是为医疗环境提供设施框架, 以支持其发展的足够灵活性, 并以支持门诊病人和门诊设施人员的独特需求。近年来, 门诊设施中提供的服务已经迅速发展和扩展, 以前仅在医院中执行的许多医疗

过程和操作, 现在通常在门诊环境中进行。这次修改澄清了这方面的要求, 允许设计的一些灵活性, 以支持长期发挥作用的设施的开发。医疗保险也推动了门诊设施的这种服务变化, 扩展了更多种类的门诊医疗设施, 也满足了市场需求。



图 1 最新的 2018 年版《指南》

《指南》提供的是设计和建造新建和改建的医疗保健设施的最低共识要求。最低要求值难以定义, 也会随时间变化, 唯一现实问题降低建设成本与运行费用。但在许多情况下, 医疗护理机构需要超过《指南》规定的这些最低要求值, 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。这些最低要求值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。从 2018 年开始, FGI 还计划出版一系列出版物, 将会以白皮书, 论文, 案例研究, 咨询意见, 报告清单等形式出版。这些出版物被称为“超越基准 (即指南的最低要求)”, 旨在支持和扩展《指南》中公布的最低设计要求。这些主题包括详细讨论《指南》要求及其应用方法, 研究支持指南要求, 研究或其他循证的最低要求建议, 最佳实践、节能运行以及改变医疗机构设计的实践趋势。如最近出版的有:《复合手术室设计基础》,《使用情景规划预测医疗保健的未来》,《设计精神病院的常见错误》等等, 帮助设施管理人员和设计人员了解医疗护理领域中进展, 使设施更安全、有效, 并改善临床结果。声学建议审查委员会 (APRC) 审查了《指南》中现有的声学标准与要求, 并对相关的声学要求进行了修订, 更新, 澄清并提供了统一的设计标准。

基金项目: 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: 2018YFC0705205) 资助。

1 《指南》的主要修订与关注点

1.1 手术室方面的主要修订

1.1.1 操作室的新分类

原《指南》是依据美国外科学会按麻醉类型进行手术室分类（见表1）。

表1 原《指南》的手术室分类

级别	适宜手术定义
C级手术室	需要全身或大面积局部麻醉及生命机能维持设备的大型手术
B级手术室	使用口服的、注射（非肠道）的或静脉的镇静剂或在镇痛剂或游离药物的小型或大型手术
A级手术室	术前不使用镇静剂，仅在表面、局部或部位麻醉下的小型外科手术，不包括静脉、脊髓及硬脑膜上需要B级或C级的手术。

现《指南》是基于手术的侵入性程度、患者承受的潜在感染风险水平、使用的镇静剂类型、房间内的工作人员数量和使用设备的最小净空要求来进行手术操作室分类（见表2）。使进行医疗操作的用房类型要求的定义和应用保持一致。也决定了医疗操作用房的大小、饰面和其他基础设施要求。这3类用房分别为：

1级用房（见图2）. 检查与治疗室（Exam or treatment room）进行非侵入性操作（Non-invasive procedures）。一般只需要4次换气，如用于未确诊的胃肠道症状，呼吸系统症状或皮肤症状的患者使用的检查室，则需要6次换气。无压力控制要求。

2级用房（见图3）. 操作室（Procedure room）

进行经皮操作（percutaneous procedures）。为原《指南》的A级手术室，或也可称为一般手术室。所谓经皮手术是指皮肤被穿刺或切口穿透的操作，该切口不会比皮肤或皮下空间更深，并且可能涉及引入导丝和导管和/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。

3级用房（见图4）. 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，插入一个内植的异物，切除和移植覆盖烧伤者全身20%以上面积的皮肤，或不作为一个开放手术开始，但有风险，在需要时由医生决定转换到一个开放的手术。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，送出单向、垂直向下的非诱导气流。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。

《指南》在手术部内定义了限制区和半限制区。类似于我国GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》规定的洁净区与非洁净区。限制区是手

表2 现《指南》的医疗操作用房分类

用房名称	应用与要求	设计要求		
		类型	位置	围护表面
1级检查与治疗室	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	非限制区	从非限制区进入	地板：洁净耐磨；稳定，牢固，防滑 墙饰面：耐洗的 天花板：可使用常规清洁设备清洁；允许嵌入式顶棚
2级操作室	患者护理需要高水平消毒或无菌器械和一些环境控制，但不需要手术室的环境控制	半限制区	从非限制区或半限制区进入	地板：清洁耐磨；稳定、牢固、防滑。 地板和墙基组件：带整体弧形墙底的整体式地板，其墙面部分高度152mm。 墙饰面：耐清洗；无裂缝、开口或裂缝 天花板：光滑、无裂缝、可擦洗、不吸收、无穿孔；能够承受清洁化学品；无裂缝；如果有衬垫或每块天花板材每平方英尺至少重1磅，且无穿孔、单片、锯齿状或高纹理板材，则允许嵌入铺设在天花板上
3级手术室	侵入性医疗过程 病人将需要生理监测，预计需要主动生命支持的任何2级医疗操作	限制区	从半限制区进入	地板：清洁耐磨；稳定、牢固、防滑。 地板和墙基组件：带整体弧形墙底的整体式地板，其墙面部分高度152mm。 墙饰面：耐清洗；无裂缝、开口或裂缝 天花板：整体的，可擦洗的，能够承受清洗和/或消毒化学品，可密闭进出口



图2 检查治疗室



图3 操作室



图4 手术室

术部里半限制区域内的指定区域,手术室应位于限制区,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。限制区内的交通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。需要打开无菌物品或刷手的人员可能在的场所,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。手术部只要求设置更衣室或休息室,不要求直接通向限制区。

1.1.2 不同类型操作室的尺度

《指南》还规定了医院不同类型操作室的尺度(见表3),并考虑其净空(见图4与图5)。

1.1.3 规定了手术室内“功能区”

《指南》规定了各种“功能区”,便于分类控制。

“无菌区”是手术室内围绕患者的切口周围的区域。“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戴无菌手套才能进入无菌区,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物品都必须包裹无菌塑料布来维持其无菌。麻醉师或助理麻醉师应停留在无菌区外,用隔层把他们与无菌区隔开。如一间20ft×20ft(6096mm×6096mm)的住院手术室面积为400ft²(37.2m²),要求手术台两侧与脚部各延伸3ft(915mm)形成的无菌区域。

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

“设备移动通道”是循环通道两侧各延伸2ft6in(762mm)及脚部延伸2ft(610mm)形成空间。

“麻醉工作区”是在手术台头部需要设置8ft×6ft(2440mm×1830mm),麻醉工作区后部是麻醉师与助手走动区域(见图5)。

至于门诊手术室分区,只是没有设备移动通道,其他都是相同的(见图6)。

1.1.4 术前和术后患者护理空间

现《指南》修订了术前和术后患者护理区域,以便更灵活地配置这些区域。尽管这些空间也已标准化,医院和门诊设施的术前和术后病人护理区的新要求如下。

第一、形成独立区域,为每个区域定义了最小的患者护理空间:

- 术前区域——每间手术室,一般手术室或影像的房间配一间患者护理空间。

- 第1阶段复苏,麻醉后护理单元(PACU)——每间手术室或3级影像室配一间患者护理空间。

- 第2阶段复苏——每间手术室,2级或3级影像室配一间患者护理空间。

第二、可以形成组合区域。医院可以将所有患者护理站,术前、第1阶段复苏、第2阶段复苏这3个区域组合到一个区域。如果选择组合区域,则必须满足组合区域中最严格的区域要求。组合到一个区域的好处可允许直接进入半限制区,而不必穿

表3 医疗操作用房类型、最小净面积与净空

操作室类型	室内状况	最小楼面净面积	净空
住院手术室		400ft ² (37.2m ²)	见图5
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	600ft ² (55.7m ²)	
门诊手术室	如不采用全麻根据所需净空计算	255ft ² (23.7m ²)	
门诊手术室	采用全麻,使用麻醉机和推车	270ft ² (25.1m ²)	见图6
门诊手术室	如果需要额外的人员和设备,	400ft ² (37.2m ²)	
操作室	没有麻醉管理	130ft ² (12.1m ²)	手术台两侧净空2ft6in(762mm) 头部与脚部净空3ft(915mm)
操作室	有麻醉管理	160ft ² (14.9m ²)	手术台头部净空6ft(1830mm) 其他相同
内镜室		180ft ² (16.7m ²)	手术台两侧净空5ft(1524mm) 头部与脚部净空3ft6in(1066mm)

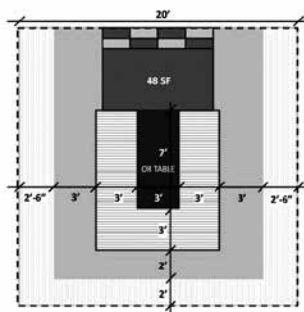


图5 住院手术室内分区

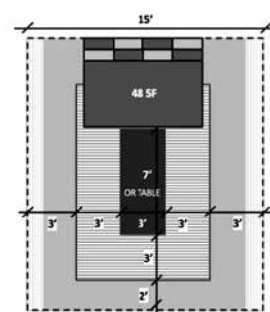


图6 门诊手术室内分区

过非限制的公共走廊（仅适用于第 1 阶段），可提高这三个区域合并后的灵活性和效率。此外，当仅组合术前和术后患者护理区域时，每个医院手术室、操作室、2 级或 3 级影像室至少需要 2 个患者护理区域（站）。

为使手术室能随时尽快自净到设计状态，要求在手术室通风空调系统的持续运行。允许手术室在不使用时可以减少换气次数以维持其对外正压和室内无菌状态，并规定了不使用状态时的最低换气次数：通常手术室可以减少到 8 次/h，特殊用途手术室减少至 9 次/h。

1.2 影像室方面的主要修订

影像室是提供成像服务的房间。根据影像室可用于诊断，治疗或侵入性操作。现《指南》采用了新的影像室分类系统。分类取决于所执行的操作类型和患者安全所需的支持程度，分类中删除了介入影像，并将核医学纳入影像服务要求。影像室新分类系统见表 4。现《指南》规定的影像室相关的用房的尺度，是侧重于最小净空，而不是规定最小用房面积。因为影像设备更新很快，规定最小净空而非最小用房面积，以使这些用房的设计和布局更容易适应新技术和设备的变化。

1.3 独立实体的屏蔽控制室

2 级和 3 级的影像用房应该有一个独立实体的屏蔽控制室，所有类型的影像室的大小取决于房间内使用的设备周围的最小净空和制造商的安装、服务和维护建议。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，以便患者接受现场实验室的工作或注射非放射药物造影剂的制剂。

1.4 病房方面主要修订

现《指南》规定在新建的建筑中重症监护病房，除 NICU（新生儿重症监护病房）外，所有重症监护病房都应是单病房。单病房的最小面积 200ft²

(18.6m²)。进行改建的单个患者使用的病房或隔间情况可以例外，最小净面积可为 150ft² (13.9m²)。不允许在重症监护病房内设置有开放水面（没封闭），以避免水源性感染。

1.5 医疗区的无菌处理设施

2014 版《指南》将一室无菌处理作为医疗区的无菌处理设施（或卫星无菌处理设施）的最低要求。考虑到在无菌处理区域保持污染到清洁工作流程的重要性，指南修订委员会以及感染预防专家确定最低要求应是两室无菌处理设施，包括去污室和洁净工作室。2018 年版的《医院指南》和《门诊指南》为设计无菌加工设施提供了新的指导，支持临床人员遵守手术器械清洗、去污和消毒的专业实践指南。只是对于使用小型台面消毒器进行有限的工作流程，允许使用一室无菌处理设施作为例外。但是，无论是两室或一室无菌处理设施，该设施必须支持从污染到清洁的单向交通流程，并要求提供存放清洁器械的空间。

1.6 “大尺度患者”的新要求

美国三分之二的人是超重或肥胖，确保设施中有足够的承重的升降机，足够大的床和椅子，以及足够宽的门口和净空，以适应实施减肥的疗程。考虑到患者的自身因素，现《指南》用“大尺度患者”替代“肥胖症”，包括“肥胖临床定义”。“患者尺度”主要从患者体重、体重在全身的分布以及患者身高来确定。为满足在整个医疗护理设施中为大尺度的患者提供医疗服务的需要，规定了大尺度患者的容纳设备、护理人员所需的间距与净空距离，和更大容量的患者升降机（见图 7~9）。以及确定大尺度患者的住宿需求。

1.7 性侵犯法医检查室的设计要求

性侵犯法医检查室（SAFE）虽然不是医院的服务要求提供，但《指南》详细说明了设计要求。规

表 4 影像室分类系统

影像用房	应用	设计要求		
		类型	位置	围护表面
1 级	诊断性 x 线摄影、x 线透视、乳房 x 线摄影、计算机断层摄影（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	地板：洁净耐磨；稳定，牢固，防滑 墙饰面：耐洗的 天花板：可使用常规清洁设备清洁；允许嵌入式顶棚
2 级	用于诊断和治疗过程，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	地板：洁净耐磨；稳定，牢固，防滑。 地板和墙基组件：带整体弧形墙底的整体式地板，其墙面部分高度 152mm。 墙饰面：耐清洗；无裂缝、开口或裂缝 天花板：光滑、无裂缝、可擦洗、不吸收、无穿孔；能够承受清洁化学品；无裂缝；如果有衬垫或每块天花板材每平方英尺至少重 1 磅，且无穿孔、单片、锯齿状或高纹理板材，则允许嵌入铺设在天花板上
3 级	侵入性医疗操作和病人需要生理监测和预计要求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	地板：洁净耐磨；稳定，牢固，防滑。 地板和墙基组件：带整体弧形墙底的整体式地板，其墙面部分高度 152mm。 墙饰面：耐清洗；无裂缝、开口或裂缝 天花板：整体的，可擦洗的，能够承受清洗和 / 或消毒化学品，可密闭出入口

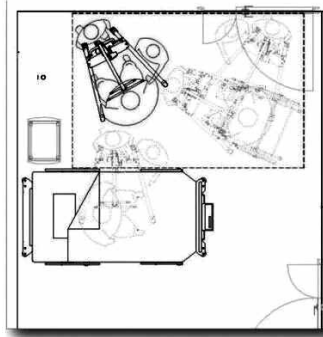


图7 大尺度患者要求的间距

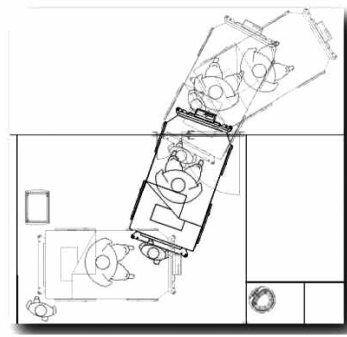


图8 大尺度患者门幅要求

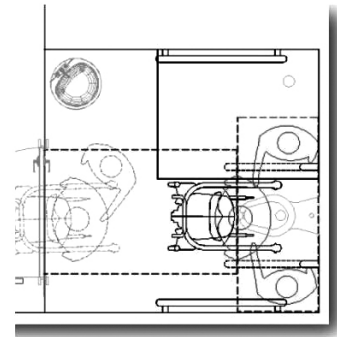


图9 大尺度患者如厕要求

定该空间应包括符合单病室检查的要求，内设盆腔检查床/台，个人厕所和淋浴。用于法医收集物和实验室用品的可上锁存储区，以及方便的咨询室，家庭咨询室，辅助服务和执法区。

2 结语

美国医院设施指南协会长期与 ASHRAE 和 ASHE 合作，是美国能源之星的合作伙伴。所编写的《指南》不仅仅从传统的提高“能源效率”的思路去节能，如降低手术室换气次数与末端过滤器效率等。2014 版《指南》将住宅医疗、护理分离出去。2018 版《指南》又将门诊设施（包括日间医院、日间诊所、日间手术中心、办公室医疗等）独立。意

在推进“去机构化（Deinstitutionalization）”。从改变医疗模式、改革医院体系、改进医疗方式等医疗根本上去简化了流程化管理模式、减少医疗周期、提高医疗效率、降低非医疗的能耗，尽可能将住院设施资源留给更复杂和紧急情况下更需医治的患者。对此我们称之为提高“非能源效率”的节能措施，这往往比“能源效率”的节能途径更多，节能效果更大，会取得多赢的局面。《指南》拓宽了我们在医疗领域节能的思路，提供了良好的节能实践。这对我国医院设计、建设有较大的指导意义与工程应用价值。

ISO 16890 系列标准存在的问题及未来发展方向

冯 昕, 路 宾, 张 惠, 曹冠朋

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

[摘 要] 颁布于 2016 年的 ISO 16890 系列标准是国际首个针对一般用空气过滤器性能测试评价的国际标准。介绍了该标准的主要技术内容, 对标准目前所存在的主要技术问题进行了重点剖析, 并结合近年来的国内外研究现状, 对标准未来发展改进方向给出了相应的建议。

[关键词] 过滤器; 空气净化; 净化效率; 标准试验尘; 过滤器消静电试验

0 引言

2016 年底, 国际标准化组织 ISO 第 142 技术委员会“气体及其他气体净化设备”正式投票通过并颁布针对一般通风过滤器性能测试的首个国际标准 ISO 16890-1~4:2016。这标志着经过接近 10 年的反复协商与妥协, 欧洲国家与美国、玻纤行业与化纤行业基本形成相对一致的观念, 过滤产业朝全球共同市场方向迈出了关键性的一步。作为国际首个针对 PM (颗粒物污染物) 净化效率评价与分级的标准体系, ISO 16890 在技术标准体系中第一次对市场及普通用户所关心的空气净化设备 PM_{10} (全球范围、欠发达地区)、 $PM_{2.5}$ (中国等发展中国家) 及 $PM_{1.0}$ (欧美等发达国家) 效率如何进行测试及评价提供了完整的技术手段, 从其编制过程乃至 2016 年底的正式颁布都引起了各方广泛讨论。中国建筑科学研究院作为 ISO/TC 142 的国内接口单位, 全程参与了 ISO 16890 系列标准及其前身未通过最终投票的 TS 21220 标准过程讨论, 本文将从该标准的主要内容、标准目前所存在的问题与所面临的争议, 以及未来标准进一步发展的方向进行介绍与探讨, 希望能够抛砖引玉, 引起业内各方对于该标准的重视、广泛讨论及技术投入, 为我国空气净化行业在下一阶段标准体系完善过程中发挥更大作用提前进行技术储备。

1 ISO 16890 系列标准内容简介

ISO 16890 系列标准总标题为“一般通风过滤器”, 共由四部分组成, 分别为:

第一部分: 颗粒物过滤效率 (ePM) 技术要求和分级体系 (technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM))^[1];

第二部分: 计径效率和阻力的测量 (measurement of fractional efficiency and air flow resistance)^[2];

第三部分: 计重效率及阻力与试验容尘量关系的测定 (determination of the gravimetric efficiency and the air flow resistance versus the mass of test dust captured)^[3];

第四部分: 确定最低计径效率的消静电方法 (conditioning method to determine the minimum fractional test efficiency)^[4]。

在具体的技术内容方面, ISO 16890 系列标准以现有的欧美一般通风用过滤器测试标准 (ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2012^[5] 及 EN 779:2012^[6]) 为基础, 沿用目前欧美测试标准体系中在用的测试装置、测试尘源、测试仪器及相应的测试方法, 通过规定参考城镇及郊区大气尘粒径分布特征曲线, 并对 0.3~10 μm 区间至少 12 挡粒径挡的计径效率进行测试, 并依据测试结果通过计算而非直接测量的方式获得被测过滤器的颗粒物过滤效率 (ePM)。在

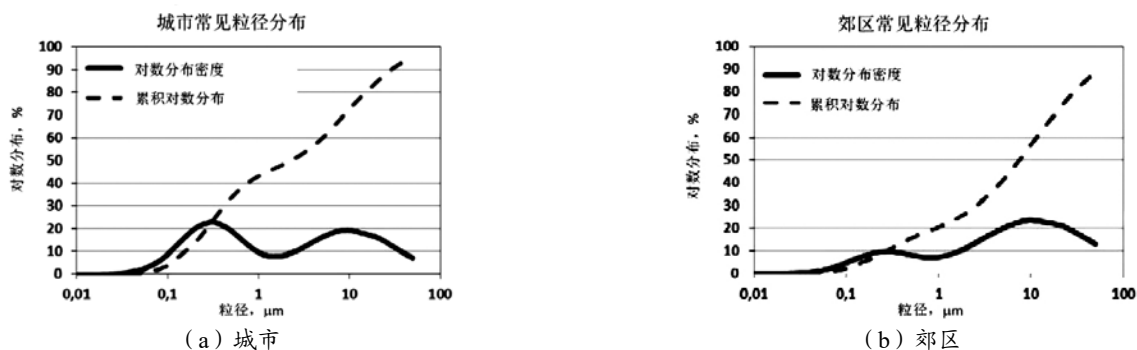


图 1 该标准所规定的城市和郊区参考大气尘粒径分布特征曲线

参考大气尘粒径分布特征的数学表述上，由于 ISO 标准希望能沿用当前测试手段，因此放弃了对小于 0.3 μm 粒子的描述，而是选择大气尘通常所认知的三模态分布中的细模态与粗模态 2 个对数正态分布按规定比例分别组合成参考大气尘特征粒径分布。图 1 显示了该标准所规定的城市和郊区参考大气尘粒径分布特征曲线，表 1 给出了当采用 ISO 16890-2:2016 所推荐的计数器粒径分挡时，计算得到的城市和郊区参考大气尘体积分布系数。

表 1 城市和郊区参考大气尘离散散粒子体积分布系数 $q_3(d_i)$

光学粒径 / μm				大气尘离散散粒子体积分布系数 / $q_3(d_i)$	
d_i / μm	d_{i+1} / μm	平均粒径 $\bar{d}_i=\sqrt{d_i \cdot d_{i+1}}$ / μm	$\Delta \ln d_i = \ln(d_{i+1}/d_i)$	城市	郊区
0.30	0.40	0.35	0.29	0.226 27	0.094 12
0.40	0.55	0.47	0.32	0.198 91	0.083 95
0.55	0.70	0.62	0.24	0.158 37	0.074 32
0.70	1.00	0.84	0.36	0.115 22	0.070 14
1.00	1.30	1.14	0.26	0.085 03	0.076 28
1.30	1.60	1.44	0.21	0.076 18	0.088 33
1.60	2.20	1.88	0.32	0.080 22	0.108 04
2.20	3.00	2.57	0.31	0.099 84	0.137 26
3.00	4.00	3.46	0.29	0.126 88	0.167 08
4.00	5.50	4.69	0.32	0.155 56	0.195 42
5.50	7.00	6.20	0.24	0.177 57	0.216 71
7.00	10.0	8.37	0.36	0.191 57	0.231 43

注： i 为计数器测试粒径挡编号； d_i 为测试粒径挡下限粒径 (μm)； d_{i+1} 为测试粒径挡上限粒径 (μm)。

具体测试过程上，过滤器计径效率测试与 ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2012 标准一致，而后按式 (1) 计算颗粒物过滤效率 $e\text{PM}$ ：

$$e\text{PM}_x = \frac{\sum_{i=1}^n E_i q_3(\bar{d}_i) \Delta \ln d_i}{\sum_{i=1}^n q_3(\bar{d}_i) \Delta \ln d_i} \quad (1)$$

式 (1) 中：下标 x 表示粒径范围； n 为用于效率计算的计数器粒径挡数量； E_i 为第 i 挡粒径所对应的计径效率，当计算平均颗粒物过滤效率 $e\text{PM}_{2x}$ 时，使用平均计径效率，当计算最低颗粒物过滤效率 $e\text{PM}_{2x, \min}$ 时，使用经消静电处理后的过滤器最低计径效率。

计算 $e\text{PM}_{21}$ 、 $e\text{PM}_{22.5}$ 及 $e\text{PM}_{210}$ 时，对应计算的粒径范围 x 分别为 0.3~1.0、3.0、10.0 μm 。

对于，当计算 $e\text{PM}_{21}$ 及 $e\text{PM}_{2.5}$ 时，使用表 1 的城市大气粒径分布；当计算 $e\text{PM}_{10}$ 时，使用表 1 的郊区大气粒径分布。

实验室应分别在被测过滤器初始状态及消静电处理后，分别进行上述计径效率测试与 $e\text{PM}$ 计算，并以算术平均值作为被测过滤器的标称效率，过滤器的分级报告值为实测效率向下圆整为 5% 的整数倍，效率大于 95% 的过滤器报告值为 “> 95%”，

同时，标称效率及消静电处理后的最低效率均应满足表 2 的分组最低效率要求。

表 2 ISO 16890 标准规定的过滤器分组最低效率要求

分组	过滤效率限值 /%			级别报告值
	$e\text{PM}_{1, \min}$	$e\text{PM}_{2.5, \min}$	$e\text{PM}_{10}$	
ISO Coarse			< 50	初始状态下计重效率
ISO $e\text{PM}_{10}$			≥ 50	$e\text{PM}_{10}$
ISO $e\text{PM}_{2.5}$		≥ 50		$e\text{PM}_{2.5}$
ISO $e\text{PM}_1$	≥ 50			$e\text{PM}_1$

上述过滤器消静电测试方法由 ISO 16890-4:2016 规定，起点源自欧洲 EN 779:2012 标准，但在异丙醇处理试验方法上，由 EN 779:2012 规定的浸泡后晾干调整为异丙醇蒸汽熏蒸方式。这一方法是由日本提出初步想法，并由我国蔡杰进行了较为详细的比对试验，证明其比 EN 779:2012 所规定的方法更能彻底消除滤材所附静电，从而最终为 ISO 16890 系列标准所采纳。

2 ISO 16890 系列标准所存在的问题与争议

ISO 16890 系列标准是国际上首个基于实际需求导向的技术标准，直接迎合了普通消费者对过滤器及各类净化器的 PM 净化效率解读需求，因此在全球范围内尤其是我国引起了较为热烈的讨论。但应清楚意识到，标准尤其是国际标准更多体现的是对现有成熟技术的总结与妥协，而大多数情况下，这种妥协既包括技术性，也包括政治性。以下对 ISO 16890 系列标准目前所面临的一些问题以及争议进行介绍。

问题 1：该标准只基于现有的测试手段选择光散射等效粒径进行计径效率测量，通过计算而非直接测量获取过滤器的 PM 净化效率，测量结果难以反映空气净化装置的实际运行性能。

首先，光散射粒径既不等于粒子的实际几何粒径，也不等于表征其空气运动特性的空气动力学粒径。从光散射式粒子检测仪器的原理上看，粒子光散射信号强度与粒径的立方成正比，但只有针对理想球形的单一物质，方可基于这种比例关系得到所测粒子的粒径，不同物质的形状差异、光散射系数 (refraction index real part, R_{IRF}) 差异都将导致测量结果偏离，针对这一本质上无法解决的问题，粒子测量行业采用标定的统一方法进行妥协处理，约定采用同样的标准物质 (聚苯乙烯乳胶球 (PSL)) 作为参比物，当被测粒子与某粒径的 PSL 给出一致的光散射强度信号时，认为被测粒子粒径等同于所参比的 PSL，当然被测粒子形状、光散射系数与 PSL 偏差越大，则测量误差也就越大。为验证上述观点，笔者团队以球形的油性 DEHS 气溶胶、正立方体的固体 KCl 气溶胶及实际大气尘作为测试对象，

分别使用基于空气动力学直径测量的粒径迁移率分析仪 (DMA) 与设置不同光散射系数的光学粒子计数器进行比对测试, 结果见图 2。从图 2 可以看出: 即使球形的单一物质气溶胶, 也难以通过仪器光散射系数的调整实现光学粒子计数器测试结果与空气动力学粒径测试仪器建立一致性; 而非球形气溶胶, 以及复合成分、形状复杂的大气尘, 光散射测量结果与空气动力学粒径测试仪器无法建立可比性。

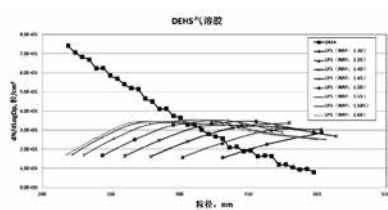
因此, 基于光散射粒径测试最终得到的颗粒物质量浓度有别于实际值, 基于该浓度所测得的净化效率, 必然与其实际运行过程中的效率存在差异且不具有可比性。

其次, 现有的欧美标准体系均采用最小测试粒径为 $0.3\mu\text{m}$ 的光学粒子计数器作为计效率测试手段, 基于此, ISO 16890 系列标准限定了用于测量并计算颗粒物净化效率的粒径范围, 无论 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} , 均以 $0.3\mu\text{m}$ 作为所测粒径范围的下限。但实际大气尘粒径分布的监测结果表明, 小于 $0.3\mu\text{m}$ 的粒子数量占大气尘粒径整体绝对优势, 笔者团队在 2015~2017 年间对北京地区不同大气污染状况下 $10\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 区间大气尘计数浓度分布进行统计分析, 图 3 显示了具有代表性的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别为 $0\sim 50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $100\sim 150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 及 $300\sim 400\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, 大气粉尘粒径分布测试结果, 其他浓度条件下的大气粉尘计数分布参见文献 [7]。监测结果显示, 大气计数浓度峰值一般发生在爱根核模态 (Aiken mode) 的 $20\sim 50\text{nm}$ 区间及凝聚模态 (accumulation mode)

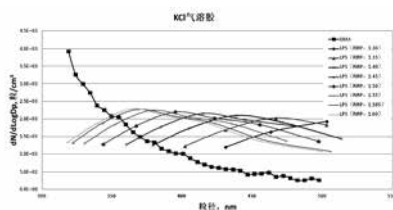
的 $100\sim 140\text{nm}$ 区间 [7]。上述监测结果与国外研究学者在美国 [8]、德国 [9]、希腊 [10]、巴西 [11] 及西班牙 [12] 等国家进行的类似监测结果吻合。因此, 在 PM 净化效率尤其是 PM_{10} 净化效率的评价中排除 $0.3\mu\text{m}$ 以下区间粒子, 缺乏足够的科学性与合理性支撑。

问题 2: 采用 2 种标准气溶胶而非单一标准气溶胶带来的问题。

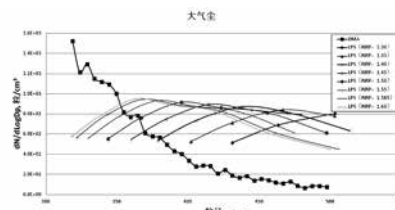
传统的欧洲 EN 779:2012 标准规定使用 Laskin 喷嘴所产生的油性 DEHS 液滴作为测试气溶胶物质, 而美国 ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2012 标准则采用雾化干燥并经静电中和处理的固体 KCl 气溶胶作为测试气溶胶。由于 ISO 16890 系列标准是基于一个相对宽的粒径范围对多挡粒径分别测试计效率, 因此从技术角度考虑, 选择一种可保证各采样粒径挡均能获取具有统计意义测试结果的单一试验粉尘即可, 美国标准的 KCl 气溶胶粒径分布更分散、更符合实际, 但欧洲方面不愿意让步, 双方最终作了一个妥协: 即对于 $1\mu\text{m}$ 以下粒子, 沿用欧洲的 DEHS 气溶胶; 对于 $1\mu\text{m}$ 以上粒子则采用 KCl 气溶胶。妥协的结果: 一方面带来了操作层面不必要的麻烦, 原本只需进行 1 次的试验必须分为 2 次、采用 2 套发尘系统完成, 对于容尘量较小的各类膜过滤装置, 存在试验时间延长而导致性能迁移的风险; 另一方面, 针对不同物性试验气溶胶, 光散射式计数器存在响应差异, 进而导致测试结果偏差。表 3 给出了分别按照 ISO 16890 系列标准采用 2 种标准测试气溶胶 (DEHS 和 KCl) 及只采用 1 种测



(a) 油性 DEHS 气溶胶

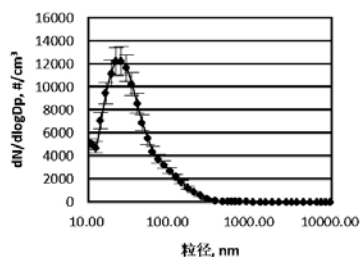


(b) 固体 KCl 气溶胶

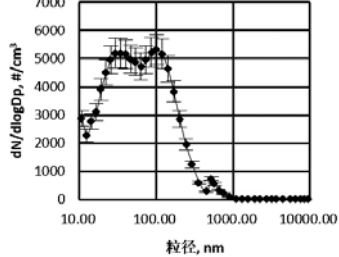


(c) 实际大气尘

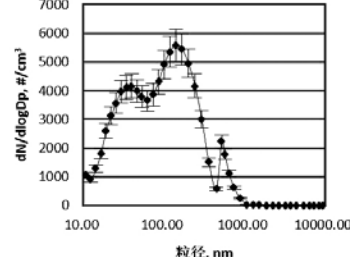
图 2 不同光散射系数的光学粒子计数器粒径分布测试结果与 DMA 测试结果比较



(a) $0\sim 50\mu\text{g}/\text{m}^3$



(b) $100\sim 150\mu\text{g}/\text{m}^3$



(c) $300\sim 400\mu\text{g}/\text{m}^3$

图 3 北京地区不同 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度条件下的大气粉尘平均粒径分布

试气溶胶 (KCl) 分别进行 PM_{2.5} 净化效率测试时, 所得到的相应 ePM 效率对比。从试验结果来看, 按照 ISO 16890 系列标准采用 2 种标准测试气溶胶所获得 PM_{2.5} 净化效率的试验结果, 相比采用单一气溶胶的试验结果, 其效率绝对值偏差 10%~15%, 考虑到 ISO 标准级别标识以 5% 分挡划界, 这一偏差相当大。

表 3 采用单一气溶胶和采用 2 种气溶胶的同一过滤器 ePM 效率试验结果比较 %

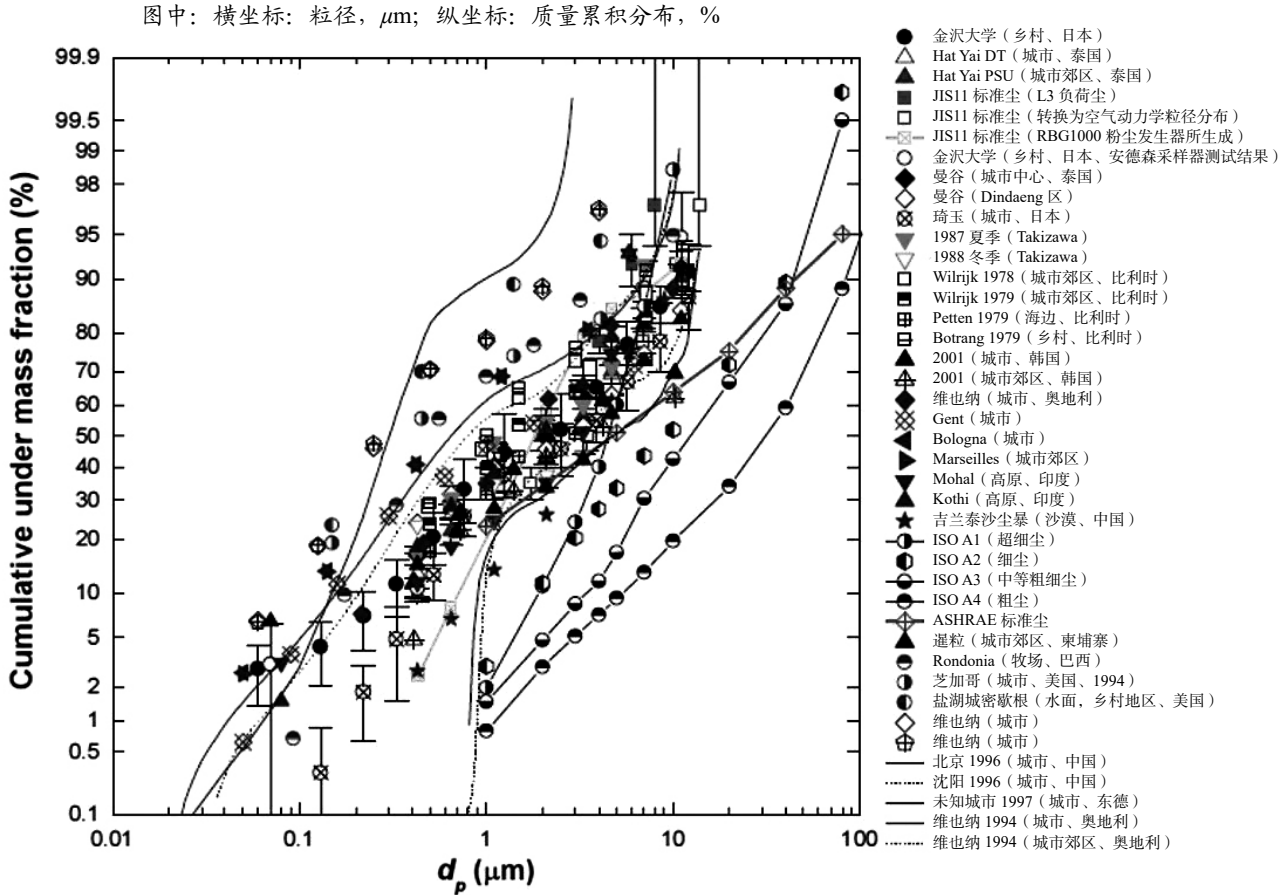
试验过滤器级别	试验气溶胶	
	KCl	DEHS 和 KCl
F5	35.44	24.34
F6	47.80	31.92
F7	68.40	60.40
F8	84.95	75.12
F9	90.61	88.62

问题 3: 过滤器容尘量试验问题。

ISO 16890 系列标准所规定的过滤器容尘量试验方法与传统标准方法没有明显区别, 只是在试验负荷尘方面采用 ISO 15957:2015^[13]所规定的 L2 粉尘(即 ISO 12103-1:2016《Road vehicle-test contaminants for

filter evaluation-part1: Arizona test dust》所规定的 A2 细灰), 这种试验粉尘源自 20 世纪 80 年代前后对于汽车用过滤器的试验负荷尘, 以美国 Arizona 地区的荒漠土为主, 表征对于道路扬尘的模拟, 而后 ASHRAE 在此基础上按比例添加炭黑(代表大气中的燃烧产物)及纤维, 形成目前世界范围内广泛使用的过滤器容尘试验负荷尘。但超过 30 年的全球使用经验表明, ASHRAE 粉尘作为过滤器负荷尘存在的主要问题有: 第一, 负荷尘吸湿性较强, 易结块, 使用前需严格烘干, 否则试验结果误差较大; 第二, 负荷尘的全球几个主要供应商产品存在差异, 使用不同供应商产品所做的过滤器容尘量试验结果不可对比。

ASHRAE 负荷尘成分中的炭黑和纤维是造成其吸湿结块的主要因素, 因此 ISO 16890 系列标准摒弃炭黑和纤维而直接采用 ASHRAE 负荷尘的基础荒漠细灰作为负荷尘。但荒漠土作为大气尘的模拟试验手段存在明显不足, 这主要是因为从形成机理上看, 基于风化、破碎等机理所逐渐形成的荒漠土粒径偏大, 亚微米尺度粒子占比极低, 与实际大气尘



偏差大,因此难以反映出过滤器处理实际大气粉尘时的性能表现,图5为日本学者于2011年做的目前在用过滤器负荷尘与全球主要城市的大气尘粒径分布比较^[14]。由图5可以看出,有的国际标准负荷尘包括ISO A2细灰绝大部分为 $1\mu\text{m}$ 以上的大粒子,与实际大气尘粒径分布偏差较大,基于上述负荷尘的试验结果也难以获取反映过滤器真实性能变化的试验结果。

问题4:对于化纤过滤材料的消静电处理问题。

对于化纤过滤材料的消静电处理问题上,当前ISO 16890系列标准及EN 779:2012均倾向于不管材料驻极技术好坏,一律尽可能消除全部静电后复测效率,并与未处理前的测试结果进行比对,其目的是提示用户采购过滤器材料时基于滤材纤维的过滤效率和基于静电驻极技术的过滤效率贡献占比各为多少,即认为所有静电驻极技术都是不可靠的,实际使用中均可能完全丧失。但从整个过滤行业的发展及市场实际需求来看,这种试验方法较为简单粗暴,存在以下主要问题:

第一,化纤过滤材料的静电荷保持特性与使用环境、使用时间等存在较强的关联性,若处理空气中含有油烟或各种醇类等挥发性有机物,确实会加速材料所附静电荷的快速丧失,但在一般通风用过滤器使用场所,往往不涉及上述特殊污染处理,因此用其作为所有产品的统一评价方法过于苛刻。

第二,一般通风过滤器使用时间有限,并不需要滤材永久驻极。而依据笔者所在团队对于当前国内产品的测试经验,不同供应商、不同加工工艺的化纤材料驻极特性差异显著,部分滤材驻极效果极差,静电保持时间不超过3天,但也有滤材确实能长时间保持其纤维所附静电。此外,目前各种新型的静电增强技术的发展也大幅提升了滤材静电保持的可靠性^[15],是否在未来国际标准化体系中一定要强调无差别的消静电处理值得进一步商榷与讨论。

第三,更低阻力及更高效率是净化过滤行业永恒的主题与前进方向,对于我国建筑物整体体量庞大、净化处理设备市场需求快速发展的市场意义尤其重大。尽管存在静电流失、效率下降问题,但采用静电驻极技术的化纤材料在相同过滤效率下的阻力确实会优于传统的玻纤过滤材料,是降低空气净化设备运行能耗的一个重要发展方向。而从行业发展角度考虑,该标准所体现的引导作用应该是促进化纤滤材厂商持续改进,提高静电驻极技术,发展更加耐久、更加低阻节能的产品,而非在其存在不足的当下简单地限制其应用、限制一个技术领域的未来发展可能性。因此,行业所需要的消静电方法

应该强度适中,能够给出静电对于整体净化效率的贡献占比,更为重要的是,可以比较出不同过滤材料静电驻极技术的优劣,从而促进厂商提高驻极技术,持续提高产品可靠性。

3 未来一般通风用过滤器标准的发展方向

综上所述,现有的国际标准体系对于如何科学评价过滤器颗粒物净化效率仍存在诸多不足,笔者认为,至少在以下几个方面仍需进行扎实的基础工作以获得更具科学性的过滤器测试评价标准:

第一,进一步完善大气尘特征粒径分布特征的基础数据收集,并在此基础上发展反映大气尘实际尺度特征的新型试验粉尘,建立基于直接测量而非间接计算的过滤器及类似用途净化装置的 $\text{PM}_{2.5}$ 净化效率的试验方法。首先,采用直接质量测量方法的优势在于,测试仪器不需要对试验尘粒径范围进行不必要、不合理的筛选,可采用标准的PM采样头配合多种检测手段进行测试。其次,当试验粉尘采用单一物质时,可采用标准比对方法对光散射式粉尘仪及光度计进行标定校准,使之符合测试要求,鉴于绝大多数光学粒子计数器厂商均不开放光散射系数的调整修订,而主流光散射式粉尘仪则开放质量浓度修正系数,因此以试验粉尘为标准物质,通过对粉尘仪与标准仪器比对修正,从而可在确保测试精度的前提下,大幅降低试验成本。最后,通过特定粉尘物质及相应测量手段的选择,可有效规避环境影响,使试验方法既满足实验室测试需要,也适于对建筑物已安装过滤装置的测试需要。例如,通过选择大气含量低同时对人体无毒无害的NaCl或KCl等作为试验尘,配合只针对相应Na或K进行质量浓度测量的火焰光度计等测试手段,就可在环境大气颗粒物不作净化处理的前提下,对已安装的空气净化装置进行性能评价,提高测试精度。

第二,建立基于上述试验粉尘的过滤器测试负荷尘发生方法,建立更为科学的过滤器容尘加速试验方法,以使过滤器实验室容尘试验结果能更科学地反映过滤器实际运行过程中的性能变化,从而使过滤器生命周期综合能效的科学评价与分级成为可能。同时,由于效率试验和容尘试验均采用同一种试验尘,使试验成本大幅降低,试验进行也更为快捷方便。

第三,建立新的、低强度化纤过滤材料消静电试验方法。新方法应在现有试验方法提供的信息基础上,更科学地比较与辨识不同静电驻极技术及相应产品的优劣,以及不同化纤材料保有静电能力的差异性,从而发挥促进行业发展的标准导向功能。

第四,简化过滤器的分级体系,使之更贴近

市场需求。目前各国中效过滤器的分级标准普遍过细,以中效级别为例,欧洲 EN 779:2012 对效率为 40%~95% 的过滤器分 5 挡 (M5~M6, F7~F9),美国 ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2012 对效率为 50%~95% 的过滤器分为 8 挡 (MERV9~MERV16)。而对于 ISO 16890 系列标准,其实质上是对 50%~95% 区间级别分挡达到 19 挡。但过细的过滤器分挡体系,既非必要,也不符合市场需求。在实际市场应用上,即使是按分级最粗的欧洲标准组织生产的厂商,目前实际上也只有极少数大型国际厂商会在日常产品生产中考虑涵盖所有级别过滤器,以适应各行业用户的多样化需求,而绝大多数规模厂商日常品种只包括 2~3 个最常用级别以保证生产成本的最优控制。回归到分级体系的基础出发点,过滤器级别划分需要体现 2 个基本原则:一方面,突出不同过滤器在使用效果上的差异性,以及确保产品正常性能波动不会导致级别判定偏差。而要保证级别判定不出现偏差,则产品的质量控制体系必须能够将产品性能的波动范围最多控制在级别允许范围的一半,也就是说,当以 5% 作为每一挡级别的允许范围时,产品的生产性能波动必须控制在 $\pm 2.5\%$ 以内,否则企业很难保证对给定级别过滤器的稳定生产。对于目前中效过滤器行业的普遍工艺水平及质量控制水平而言,要保证这一点是较为困难的。另一方面,过细的级别分挡也不符合市场实际需求,对于大多数中效过滤器应用场合而言,60% 和 65% 的过滤器不存在可辨识的使用效果差异,甚至效率绝对值偏差 10%~15% 的过滤器在实际应用场合中的使用效果差异也难以体察。因此,在未来的标准修订过程中,标准编制组及全行业都需要认真的思考一个真正符合用户市场需求的过滤器分级体系。

本文对 ISO 16890 系列标准的核心技术内容进行了简单介绍,着重对当前的标准所存在的问题进行了阐述,并对标准未来发展完善方向提供了参考建议。从笔者近 10 年来参与 ISO 标准工作的经验来看,ISO 标准更新完善是我国相关行业及企业发展的动力而非阻力,需要国内同仁在各个层面持续努力,这种努力既包括技术性的基础投入,也包括国家层面改进当前 ISO 部分不合理运行规则的政治努力。ISO 由欧洲国家发起,从诞生时所建立的运行规则就体现了对于欧洲标准体系的过度保护,在标准的投票规则上,ISO 采用每个正式成员国均只有 1 票的完全平均做法,但在欧洲目前的一体化前提下,几乎每个欧洲标准的背后都有至少 10 票的强势支撑,这导致大多数欧洲标准可以轻松进阶成为国际

性的 ISO 标准。这一现状对于国际其他主流经济体如中国、美国及日本并不公平,也与目前大多数国际性经济合作组织采用按 GDP 划分投票权重的规则体制不符。而在欧盟内部,任何欧洲标准的投票表决也同样采用按 GDP 划分投票权重的规则。所以,我国各行业参与 ISO 标准体系的制定和修订过程,既需要科学技术人员的努力付出,也需要国家标准管理部门的政策投入与政治外交努力,使得 ISO 成为更为公平的国际标准化技术平台,更好地保证我国相关行业的利益,促进行业健康发展。

参考文献

- [1] ISO. Air filters for general ventilation—part 1: technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM): ISO 16890-1:2016[S]. Geneva: International Organization for standardization, 2016:1-26.
- [2] ISO. Air filters for general ventilation—part 2: measurement of fractional efficiency and air flow resistance: ISO 16890-2:2016[S]. Geneva: International Organization for standardization, 2016:1-58.
- [3] ISO. Air filters for general ventilation—part 3: determination of the gravimetric efficiency and the air flow resistance versus the mass of test dust captured: ISO 16890-3:2016 [S]. Geneva: International Organization for standardization, 2016:1-20.
- [4] ISO. Air filters for general ventilation—part 4: conditioning method to determine the minimum fractional test efficiency: ISO 16890-4:2016 [S]. Geneva: International Organization for standardization, 2016:1-10.
- [5] ASHRAE. Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size: ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2012[S]. Atlanta: ASHRAE, 2012:2-53.
- [6] CEN. Particulate air filters for general ventilation—determination of the filtration performances: EN 779:2012 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2012:4-69.
- [7] FENG X, ZHANG H, ZHANG Y G, et al. A long-term monitoring results and summary of airborne particle size distribution from 10 nm to 10 μm under different PM contamination levels in Beijing[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Building Energy, Environment, 2018:652-657.
- [8] WHITEY K T. The physical characteristics of sulfur aerosols[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(S1):25-49.

- [9] BIRMILI W, WIEDENSOHLER A, HEINTZENBERG J, et al. Atmospheric particle number size distribution in central Europe: statistical relations to air masses and meteorology[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(23): 32005–32018.
- [10] KOPANAKIS I, CHATOUTSIDOU S E, TORSETH K, et al. Particle number size distribution in the eastern Mediterranean: formation and growth rates of ultrafine airborne atmospheric particles[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 77: 790–802.
- [11] SCHNEIDER I L, TEIXEIRA E C, OLIVEIRA L F S, et al. Atmospheric particle number concentration and size distribution in a traffic-impacted area[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, 6(5): 877–885.
- [12] GÓMEZ-MORENO F J, PUJADAS M, PLAZA J, et al. Influence of seasonal factors on the atmospheric particle number concentration and size distribution in Madrid[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(18): 3169–3180.
- [13] ISO. Test dusts for evaluating air cleaning equipment; ISO 15957:2015[S]. Geneva: International Organization for standardization, 2015: 1–8.
- [14] 鲍林尧, 畑光彦, 大垣豊, 等. 一般換気用フィルタ試験粒子規格化のための大気エアロゾル粒子径分布特性の検討 [C]//Research Conference in Autumn 2011 by The Society of Powder Technology, 2011.
- [15] TIAN E Z, MO J H, LONG Z W, et al. Experimental study of a compact electrostatically assisted air coarse filter for efficient particle removal: synergistic particle charging and filter polarizing[J]. *Building and Environment*, 2018, 135: 153–161.

医院洁净空调负荷特性与系统节能

陈 尹

(上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200041)

[摘 要] 洁净区域特殊的负荷特性及空调系统和绿色节能措施。

[关键词] 内区; 冷热处理; 能耗; 系统适应性

1 空调负荷的特性

1.1 手术室在建筑中的位置

由 GB 50333 医院洁净手术部建筑技术规范, 目前已建成的洁净手术部较多采用双通道布置方法, 即有一个洁净通道和一个清洁通道, 往往手术室就布置在这二个通道之间, 基本上不直接靠外围护结构布置, 同时由于手术室洁净度的要求, 就是直接靠外围护结构布置的手术室在其内部也采用板材进行封闭且气密性良好, 因此外界空气的状态对手术室自身的温、湿度影响有限。由此可知, 洁净手术部基本上是处在围护结构保温良好的封闭内区。

1.2 负荷特性

洁净手术部内照明和人员发热变化较小, 基本为一定值, 医疗设备的发热量较大, 且使用情况多变, 故手术室的热负荷变化较大。手术室人聚集在手术台周围, 发湿量集中、变化较小。手术期间的负荷特点是热负荷波动较大, 湿负荷比较稳定, 从而引起室内热湿比波动较大。

根据洁净手术部环境控制的工艺要求, 一般采用一次回风再热的方式, 空气处理过程存在着较大的再热负荷(再热负荷是洁净手术室工艺性空调系统与普通舒适性空调系统的主要差别之一)。现代化的综合医院规模较大, 手术室的数量较多, 其巨大的再热负荷在医疗建筑的空调负荷中占着很大的比重。

1.3 手术室空调的基本形式及热湿处理

1.3.1 基本形式

通常手术室末端净化空调机组采用由表冷器进行热湿(加湿另配加湿段)处理的形式, 即手术室的回风和新风混合后经表冷器处理后再送到手术室的方式。由此可知, 末端空调机组出口的温、湿度参数直接决定了手术室内的温、湿度。

1.3.2 热湿处理过程

(1) 手术室的冷热处理过程基本上是一(二)次回风系统, 即经冷热处理的新风和手术室的回风混合后通过表冷器处理到机器露点, 再加热到送风状态点后送入室内。

(2) 由于手术室基本上在建筑内区, 热负荷常

年存在, 故要消除热负荷需系统常年制冷, 即对末端空调机组来说, 冬季也需冷冻水供应。

(3) 冬季手术部在运行前室内热负荷较小, 需要进行供热(保温), 在正常手术时随着热负荷的加大, 空调系统又需要切换到供冷工况。

由此可知手术部需常年供冷且始终处在制冷、制热、再加热这种特殊状况。

1.4 空调水系统的分类

对于集中式空调水系统来说, 有二管制系统有四管制系统, 所谓二管制系统, 就是连接冷、热源到空调末端处理设备的一供一回二根水管, 空调末端处理设备设一组盘管, 夏季是冷盘管冬季是热盘管。四管制系统, 空调末端处理设备各设一组冷、热处理盘管, 分别连接冷源、热源到空调末端处理设备的四根供回水管。故二管制系统只能单制冷或单制热, 四管制系统能实现单制冷或单制热及同时制冷和制热, 不难看出由于冷、热水管道是分开的, 可以各行其道, 对室内负荷变化的适应性强, 调节灵活, 可满足不同的温、湿度需求, 易对有温、湿度要求的、不同冷热负荷的房间进行精确控制。

1.5 四管制系统的适应性

基于手术部始终处在制冷、制热、再加热这种特殊状况, 二管制系统是很难使空调系统的运行参数符合 GB 50333 医院洁净手术部建筑技术规范所规定的要求, 虽然个别系统能使参数满足 GB 50333 的要求, 但随着室外气候的变化, 其控制的精度和管理的难度将大大增加。

由于四管制系统将制冷和制热分成二个独立的系统, 即可单独制冷又可单独制热也可同时制冷制热, 因此能方便地实现制冷、制热、再加热等二管制系统较难实现的功能, 较容易满足房间的温湿度要求, 且控制系统也较简单可靠。

2 医院冷热源与洁净区域冷热源

2.1 规范要求

GB 50333 8.1.9 洁净手术部净化空调系统可采用独立冷热源或从医院集中冷热源供给站接入。除应满足夏、冬设计工况冷热负荷使用要求外, 还应满足非满负荷使用要求。冷热源设备不宜少于 2 台。

GB 50333 8.1.9、8.1.10 手术部净化空调系统及其冷热源采用什么形式,应通过手术部布局以及全年运行工况分析,从能量的综合利用角度考虑,优化选择。目前大多手术部体量较大,又常设外走廊,手术室处于空调区内,特别是在过渡季节,室外温度降低,室内冷负荷减小,人员湿负荷不变的情况下,热湿比下降,为了保证送风温度和湿度,空气需先进行冷却降温除湿,再进行等湿加热。整个过程同时需要冷量和热量,所以可以考虑采用四管制系统。传统方式制冷和制热需分别消耗能源,若制热采用电加热方式时能源利用率极低。而多功能热泵机组能够在蒸发器获得冷水的同时,从热回收器获得冷凝热加热热水,不平衡部分通过辅助换热器排放,从而实现同时制冷和制热,而只需输入一份能源,便同时获取冷量和热量,大大降低了能耗。因此过渡季采用多功能热泵,可以显著减低能耗,减少排放。所以为了一份能源两份利用,可以考虑多功能热泵形式,总之应综合考虑整个手术部的全部冷负荷和热负荷(包括空调系统再加热量,洗浴、刷手以及污物清洗的热水用量)选择合适的冷热源,才能有效节能。洁净手术部冷热源应具有可靠性、经济性、适应性,方便维护和运行,所以宜考虑过渡季节使用要求和经济性是否采用独立冷热源方式。当用非独立冷热源方式时,应考虑过渡季节使用要求和医疗要求及经济性。由于手术部空调系统不能停,而且为使冷热源具备较好调节能力,保障使用要求,在条件允许时可设2台(可以是2台设计满负荷,也可以非满负荷)。对供冷供暖运行时间较少的手术部,采用分散式冷热源更经济。

2.2 冷源系统

2.2.1 常规冷源(水冷)有以下几种形式:

(1) 电动压缩式机组,包括涡旋式、往复式、螺杆式及离心式机组。

(2) 溴化锂吸收式机组,包括热水型、蒸汽型及直燃型。

一般来说,活塞式、涡旋式制冷机的单机制冷量较小,且其能效比(性能系数)也较差,不适合作为空调系统的集中冷源。

离心式、螺杆式制冷机的单机制冷量较大,且其能效比(性能系数)也较好,适合作为空调系统的集中冷源。螺杆式制冷机的低负荷调节性能较好,离心式制冷机的性能系数最高,但其低负荷调节性能略逊。

溴化锂吸收式制冷机,根据其驱动热源的供应方式可分为蒸汽(热水)型和直燃型两类,一般来说,较适合利用发电厂或热电联产的余热蒸汽(热

水)源,不宜采用商业市政供应的蒸汽(热水)源,更不宜采用专配锅炉为驱动热源供应蒸汽(热水)型冷水机组的形式。

2.2.2 常规冷源系统设计原则

中小型医疗建筑,采用多台螺杆式制冷机均分的配置方式,数量一般以2至4台为好。

大中型医疗建筑,尽量采用效率更高的离心式制冷机。由于医疗建筑通常会有较小负荷的空调运行情况,为保证系统的低负荷调节性能,一般在选用离心式制冷机的时候另外搭配1至2台螺杆式制冷机,对于螺杆式制冷机,其制冷能力为离心式制冷机的50%左右。如果采用1台螺杆式制冷机的额定制冷量偏大时,可采用2台螺杆式制冷机,其单台制冷能力为离心式制冷机的25%左右。

目前,还可以考虑变频式离心冷水机组。该种制冷机,即能扩大机组的部分负荷运行范围,又能达到良好的节能效果。可采用多台制冷量相同的离心式制冷机均分配置方式,其中一台(或全部)为变频式离心冷水机组。

2.2.3 蓄冷空调系统

空调蓄冷技术,即是在电力负荷很低的夜间用电低谷期,采用制冷机制冷,利用蓄冷介质的显热或潜热特性,用一定方式将冷量存储起来。在电力负荷较高的白天,也就是用电高峰期,把存储的冷量释放出来,以满足建筑物空调或生产工艺的需要。应用蓄冷空调技术的意义(1)削峰填谷、平衡电力负荷;(2)改善发电机组效率减少环境污染;(3)减少装机容量,节省空调用户的电力花费;(4)改善制冷机组运行效率;(5)蓄冷空调系统特别适用于负荷比较集中、变化较大的场合;(6)应用蓄冷空调技术,可扩大空调区域的使用面积;(7)适合于应急设备所处的环境等。蓄冷系统大致可分为水蓄冷及冰蓄冷空调系统。

2.2.4 常规冷源(风冷)形式

风冷热泵机组,适用于夏热冬冷地区峰值负荷不大,负荷变化率较大的中小型建筑,一般采用多台主机,空调系统全年运行时,宜采用热泵式机组,当同时需要供冷和供热时,宜选择四管制风冷热泵机组。

2.3 常规热源系统

2.3.1 热源的种类

医院热源有蒸汽和热水两类,来源有市政热网、燃气(油)锅炉、电锅炉。

当有市政热网供应的蒸汽或高温热水时,只需设置汽(水)—水热交换器即可,采用多台均分的配置方式,当一台停止工作时,剩余换热器的设计

换热量应满足总热量的 65%~70%，数量一般以 2 至 4 台为宜。

没有市政热网供热时，一般采用燃气（油）锅炉作为热源。锅炉分为蒸汽锅炉和热水锅炉两类。

2.3.2 系统设计原则

根据公共建筑节能设计标准，除厨房、洗衣、高温消毒、工艺性湿度控制等必须采用蒸汽的热负荷外，其他场合不应使用蒸汽锅炉。

热水锅炉：建议采用自带换热器的热水锅炉，可不必再设水—水热交换器，空调水系统直接接驳其换热器的进出口即可使用。设计时，同样采用多台均分的配置方式，数量一般以 2~3 台为好。

空调热源还有一种形式是采用电锅炉。《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015 对采用电锅炉作为空调热源有严格的条件限定。

当空调系统的冷源采用空气（地）源热泵型冷（热）水机组、直燃型溴化锂吸收式冷（热）水机组、直接蒸发式的分体空调或直接蒸发式变制冷剂流量空调系统时，由于设备本身即可制冷也可制热，故无需再另外设置热源。

3 常用绿色节能方式

3.1 净化区域的几种节能方式

3.1.1 变新风系统

根据规范手术室新风采用新风集中处理，处理后的新风送到各手术室的循环系统，这种净化空调系统的特点是，各手术室空调自成系统，可避免交叉感染，而且各手术室也可以灵活使用，新风集中控制有利于各手术室正压要求。

夜间手术室停用时，为保证手术室的洁净度，要维持一定的正压值，这样必须有经处理的新风送入手术室，而送入的新风量与白天正常使用的量往往不一样，这样对新风机来说就存在二个不同的送风量。为降低能耗往往采用风机变频技术加以解决。

上海市第六人民医院的项目中，在非手术时间采用变风量运行，其能耗计算如表 1。

3.1.2 新排风全热交换

新风预处理在能耗中占很大的比例，排风通过热交换器预处理新风达到节能的目的。为防止产生交叉感染，所以这个措施一般适用于低级别较低的洁净手术室。（标准病房的新风也采用）

3.1.3 I 级手术室二次回风系统

洁净手术室设计中，一次回风系统的再热耗能问题是一直存在的，而在 I 级手术室中，送风量很大，如果继续采用一次回风系统，大风量的冷热抵消造成的能源浪费是不能接受的，因此，I 级手术室采用二次回风系统，在空调箱表冷段后再与回风混合一

表 1

20 间 I 级手术室		19 间 III 级手术室
手术室区域非手术时间	12h/天	
	手术室区域运行新风量 m ³ /h (设计新风量)	非手术时间新风量 m ³ /h (变 风量运行, 3 次换气次数)
A401 I 级通仓手术室 1	900	378
A402 I 级通仓手术室 2	900	378
A403 I 级通仓手术室 3	900	378
A404 I 级手术室	900	405
A405 I 级 CT 手术室	1200	540
A406 I 级 CT 手术室	1200	540
A407 I 级 DSA 手术室	1200	621
A408 I 级通仓手术室 1	800	333
A409 I 级通仓手术室 2	800	333
A410 I 级通仓手术室 3	800	333
A411 I 级手术室	700	306
A412 I 级手术室	800	369
A413 I 级手术室	1200	540
A414 I 级通仓手术室 1	800	333
A415 I 级通仓手术室 1	800	333
A416 I 级通仓手术室 1	800	333
A417 I 级手术室	800	369
A418 I 级手术室	800	333
A419 I 级手术室	800	333
A420 I 级手术室	1100	495
A421 污物暂存	50	50
A422 缓冲	67	67
A423 急救换床	210	210
A424 控制室	109	109
A425 控制室	218	218
A427 医护电梯厅	109	109
A439 洁净走廊	1932	1932
A440 洁净走廊	1680	1680
A442 缓冲	42	42
A444 洁净走廊	890	890
B405 换床	151	151
合计	23660	13443

非手术时间只将新风送入手术室区域内以维持室内正压

I 级手术室区域新风机 2 台	单台风量: 13200m ³ /h 单台电机功率: 11kW
I 级手术室区域全年非手术时间新风机能耗	23660/13200×11kW×12h/天 ×365 天 =86359kW·h
I 级手术室区域全年非手术时间新风机运行费用	86359kW·h×0.8 元/kW·h=69087 元
I 级手术室区域全年非手术时间新风机能耗 (变风量运行)	13443/13200×11kW×12h/天 ×365 天 =49067kW·h
I 级手术室区域全年非手术时间新风机运行费用 (变风量运行)	49067kW·h×0.8 元/kW·h=39254 元

20 间 I 级手术室		19 间 III 级手术室	
手术室区域非手术时间		12h/ 天	
	手术室区域运行新风量 m ³ /h (设计新风量)	非手术时间新风量 m ³ /h(变 风量运行, 3 次换气次数)	
A601 III 级手术室	1200	585	
A602 III 级手术室	900	432	
A603 III 级手术室	700	360	
A604 III 级手术室	700	360	
A605 III 级手术室	1000	414	
A606 III 级手术室	700	369	
A607 III 级手术室	700	369	
A608 III 级手术室	700	369	
A609 III 级手术室	1000	468	
A610 III 级手术室	800	405	
A611 III 级手术室	800	405	
A612 III 级手术室	900	423	
A613 III 级手术室	900	423	
A614 III 级手术室	1100	549	
A615 III 级手术室	1100	522	
A616 III 级手术室	900	423	
A617 III 级手术室	900	423	
A618 III 级手术室	1100	522	
A619 III 级手术室	1000	459	
A620 污物暂存	50	50	
A621 缓冲	67	67	
A624 医护电梯厅	109	109	
A629 患者电梯厅	151	151	
A634 洁净走道	2033	2033	
A635 洁净走道	2226	2226	
B602 换床	185	185	
合计	21922	13102	
非手术时间只将新风送入手术室内以维持室内正压			
III 级手术室区域新风机 2 台		单台风量: 12100m ³ /h 单台电机功率: 11kW	
III 级手术室区域全年非手术时间 新风机能耗		21922/12100×11kW×12h/ 天 ×365 天 =87288kW·h	
III 级手术室区域全年非手术时间 新风机运行费用		87288 kW·h×0.8 元 /kW·h=69830 元	
III 级手术室区域全年非手术时间 新风机能耗 (变风量运行)		13102/13200×11kW×12h/ 天 ×365 天 =52168kW·h	
III 级手术室区域全年非手术时间 新风机运行费用 (变风量运行)		52168 kW·h×0.8 元 /kW·h=41735 元	
	非变风量运行		变风量运行
	全年非手术 时间新风机 能耗 (kW·h)	全年非手术 时间新风机 运行费用 (元)	全年非手术 时间新风机 运行费用 (变 风量运行) (元)
I 级手术室区域	86359	69087	49067
III 级手术室区域	87288	69830	52168
合计	173647	138917	101235
标准煤换算依据	1kW·h=123g 标准煤		
换算标准煤	21359kg		12452kg
变新风运行可以大致节省 42% 的运行费用			

次来代替再热, 这样可以在满足送风量得前提下, 以达到节能的目的。

3.2 制冷主机的几种节能方式

3.2.1 洁净手术部空调水系统及冷热源的优化选择

一般情况下医院都有蒸汽或热水锅炉, 通过设置不同换热量和不同出水温度的板式换热器来满足不同使用功能的要求。

洁净手术部冷冻水系统, 有下列两种情况值得分析。

其一冷冻水是从整个大系统中引出, 这要求把和手术部使用情况一样的各功能用房的负荷合并, 如血液病房、DSA 房间、NICU 房间等, 设置一台仅满足此负荷的冷冻机在夏季和过渡季使用, 冬季可使用板式换热器结合冷却塔来提供免费供冷, 运行较为最经济; 制热则使用锅炉结合板式换热器的系统。系统全年供冷、供热同时存在满足手术室需要。

其二采用四管制制冷热水机组, 即采用独立的空调冷热源系统, 此系统是根据设计计算的空调冷热负荷选择不同制冷(热)量的机组, 水系统完全独立, 与整个医院的其他水系统分开(也可作为备用冷、热源)。

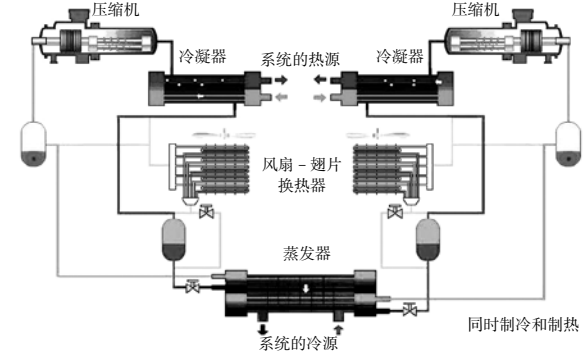


图 1 四管制制冷热水机组原理

3.2.2 四管制机组的运行能耗

四管制多功能冷热水机组的工作原理是冷热量的回收和综合利用, 由压缩机、冷凝器、蒸发器、可变功能换热器等组成。采用二个独立回路的四管制水系统, 冷冻水侧与蒸发器换热, 热水侧与冷凝器换热, 一年四季可实现五种运行模式(区别于热泵热回收机组), a- 单制冷, 可变功能换热器作为冷凝器散热; b- 单制热, 可变功能换热器作为蒸发器吸热; c- 制冷 + 制热(设备微电脑调节自动平衡冷热量), 可变功能换热器根据需求散热或者吸热; d- 空调制热加热回收器制热水; e- 热回收器单独制热水。

四管制制冷热水机组, 五种模式无缝联接, 与末端冷热需求即时吻合。机组冷冻水供水温度范围

7~15℃，热水供水温度范围 26~60℃，安全运行环境温度范围 -10~46℃。

从上述机组的工作原理中不难看出四管制机组的运行能耗和二管制机组差不多，依靠可变功能换热器能实现同时供冷水、供热水的功能，满足手术室制冷、制热、再加热这种特殊需求。因此对手术部采用独立冷、热源的系统来说其使用风冷热泵的运行方式时，其运行能耗会省。

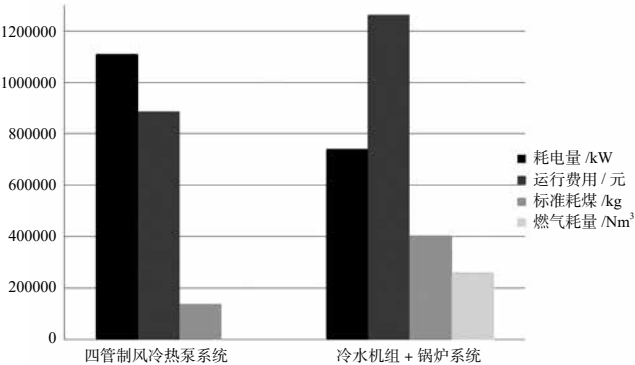
在上海市第六人民医院的项目中，冷热源选择了冷水机组加锅炉和空气源多功能四管制热泵机组的形式，冷水机组加锅炉作为全院的冷热源系统，同时作为净化区域冷热源系统的备用，净化区域的冷热源主要为空气源多功能四管制热泵机组。

分别对两种冷热源系统单独运行情况下进行全年运行能耗计算，结果如下：

上海市第六人民医院净化区域能耗计算				
20 间 I 级手术室			19 间 III 级手术室	
净化区域夏季冷负荷		1698 kW		由华电源负荷计算软件得出
净化区域夏季再热负荷		1189 kW		
过度季节打 75 折冷负荷		1274 kW		
过度季节打 75 折再热负荷		891 kW		
净化区域冬季冷负荷打折		849 kW		
净化区域冬季热负荷		871 kW		
空气源多功能四管制热泵机组 3 台		制冷量 650kW 制热量 725kW		单台输入功率（包括风机输入功率）夏季 203kW，冬季 240kW
四管制空调冷冻水水泵		电机功率 15kW	流量 95m³/h	4 台（3 用 1 备）
四管制空调热水水泵		电机功率 11kW	流量 63m³/h	4 台（3 用 1 备）
空气源多功能四管制热泵机组综合能效 6.00 （制冷量 650kW+ 制热量 725kW）/ 输入功率 203kW+ 冷冻水泵电机功率 15kW+ 热水水泵电机功率 11kW				（制冷量 + 制热量）/ 输入功率，考虑系统中所有制冷机、风机、冷水水泵、热水水泵的 - 耗电
磁悬浮离心式冷水机组 5 台		单台制冷量 3517kW		单台输入功率 540kW
冷冻水循环水泵		电机功率 75kW	流量 505m³/h	6 台（5 用 1 备）
冷水机组冷却水循环水泵		电机功率 90kW	流量 755m³/h	6 台（5 用 1 备）
低噪声方形横流冷却塔		风机功率 7.5 × 4kW		单台冷却塔风机台数 4
燃气式承压热水锅炉		制热量 7MW；燃气耗量 742Nm³		效率 92%（板式换热器换热效率未考虑）
冷水机组 + 锅炉系统为两管制系统，为整栋大楼提供冷热水，供给净化区域的热水水泵能耗根据流量关系进行推算		夏季		(1189/7000) × 300=51kW
		过度季节	(891/7000) × 300=38kW	
		冬季	(871/7000) × 300=37kW	
冷水机组 综合能效 4.79；制冷量 3517kW/ 压缩机功率 540kW+ 冷冻水泵电机功率 75kW + 冷却水泵电机功率 90kW+ 冷却塔风机功率 7.5 × 4kW				考虑系统中所有制冷机、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔的耗电
暂估电价		0.8 元 /kW·h		
空调运行时间		5~10 月为制冷季，共 180 天，12~3 月为制热季，共 120 天，过度季节 65 天，每天运行 12 小时。		
标准煤换算依据		1kWh=123g 标准煤		1Nm³ 天然气 =1.21kg 标准煤
全年负荷系数为 0.52		（不同时间，系统运行负荷不同，只有很少的时间系统能达到满负荷运行。通常 1.2% 的时间，负荷在 100%；32.8% 的时间，负荷在 75%；39.7% 的时间，负荷在 50%，26.3% 的时间，负荷在 25%——根据 GB 50189—2015(4.2.13) 综合部分负荷性能系数定义）。		

	空气源多功能四管制热泵机组	冷水机组 + 锅炉	
		制冷运行费用	制热运行费用
夏季	三台机组同时制冷和制热 主机：1698kW/650kW/ 台 ×203kW/ 台 ×180 天 ×12h/ 天 ×0.52×0.8 元 / kW·h=476505 元 冷冻水泵：15kW/ 台 ×3 台 ×180 天 ×12 h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=40435 元 热水侧水泵：11kW/ 台 ×2 台 ×180 天 ×12h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=19768 元 合计 536708 元	按综合能效 4.79 计算： 冷水系统耗电：1698kW/4.79×180 天 ×12h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=318529 元	锅炉运行费用：1189kW×3600kW/KJ/35590 kJ/Nm³/0.92×180 天 ×12h/ 天 ×2.6 元 /Nm³×0.52=381768 元 热水水泵：51kW×180 天 ×12 h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=45827 元
	合计 536708 元		合计 746123 元
过度季节	两台机组同时制冷和制热 主机（冷负荷>热负荷，按冷负荷计算）：1274kW/650kW/ 台 ×203kW/ 台 ×65 天 ×12h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=129104 元 冷冻水泵：15kW×2 台 ×65 天 ×12 h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=9734 元 热水水泵：11kW×2 台 ×65 天 ×12 h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=7139 元 合计 145977 元	按综合能效 4.79 计算： 冷水系统耗电：1274kW/4.79×65 天 ×12h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=86302 元	锅炉运行费用：891kW ×3600 Kw/KJ /35590 kJ/Nm³/0.92×65 天 ×12 h/ 天 ×2.6 元 / Nm³×0.52=103308 元 热水水泵：38kW×65 天 ×12h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=12330 元
	合计 145977 元		合计 201941 元
冬季	两台机组同时制冷和制热 主机（热负荷>冷负荷，按热负荷计算）：871kW /725kW/ 台 ×240kW/ 台 ×120 天 ×12h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=172722 元 冷冻水泵：15kW×2 台 ×120 天 ×12h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=17971 元 热水水泵：11kW/ 台 ×2 台 ×120 天 ×12 h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=13179 元 合计 203872 元	按综合能效 4.79 计算： 冷水系统耗电：849kW/4.79×120 天 ×12 h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=106176 元	锅炉运行费用：871 kW ×3600 Kw/KJ /35590kJ/Nm³/0.92×120 天 ×12h/ 天 ×2.6 元 / Nm³×0.52=186442 元 热水水泵：37kW×120 天 ×12h/ 天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=22164 元
	合计 203872 元		合计 314782 元
合计	886557 元		1262846 元

能耗统计	空气源多功能 四管制热泵机组	冷水机组 + 锅炉
夏季运行费用	536708 元	746123 元
过度季节运行费用	145977 元	201941 元
冬季运行费用	203872 元	314782 元
合计	886557 元	1262846 元
运行消耗电力	1108196kW·h	739160 kW·h
运行消耗天然气		258276 Nm ³
换算标准煤	136308 kg	90917+312514=403434kg
空气源多功能四管制热泵机组可以大致节省 30% 的运行费用		

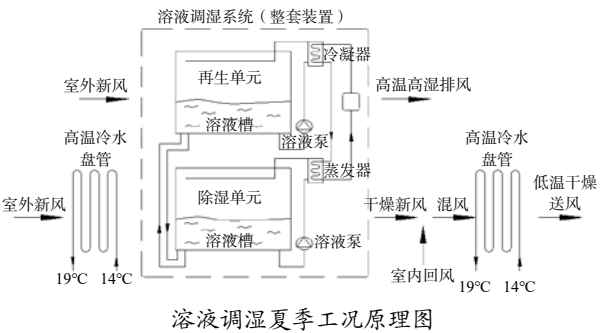


在上述案例中采用冷却塔免费制冷			
低噪声方形横流冷却塔 5 台	风机功率 7.5×4 kW	单台冷却塔风机台数 4	
费用	电机功率 90 kW	流量 755m³/h	6 台 (5 用 1 备)
冷却塔免费 制冷时间	58 天 (室外空气 温度低于 7℃)	仍需冷水 机组开启 天数	62 天 (室外空气温度高于 7℃)
冬季冷水机组 运行能耗	按综合能效 4.79 计算: 冷水系统耗电: 849kW/4.79×62 天 ×12 h/天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=54858 元		
冬季冷却塔 运行能耗	运行能耗: (849/3517)×(90kW+7.5kW×4)kW×58 天 ×12 h/天 ×0.52×0.8 元 /kW·h=8387 元		
冷水机组 + 锅炉运行费用 (冬季部分天数冷却塔免费制冷)			1219915 元
运行费用比不使用冷却塔免费制冷可以节约 42931 元			

对于采用冷水机组加锅炉的系统,虽然单个设备的运行效率比热泵要高,但其运行的设备较多,控制难度较高,管理复杂,始终存在冷热能抵消的问题,故综合能耗不一定小,大有被四管制热泵所取代之势。

3.2.2 溶液除湿空调系统 (温、湿度独立控制)

溶液调湿技术是采用具有调湿功能的盐溶液为



工作介质,利用溶液的吸湿与放湿特性对空气含湿量进行控制。

新风处理: 室外新风由外界提供的高温冷水预冷除湿后,进入溶液调湿单元除湿。低湿状态的新风与回风混合后由外界提供高温冷水对混风进行降温,达到送风状态点。

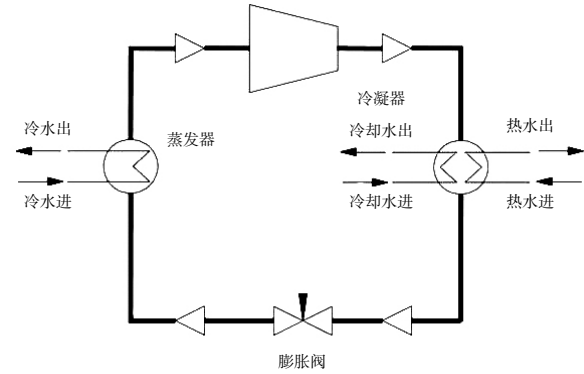
溶液调湿: 除湿单元内,溶液吸收新风中的水分后,浓度变小,为恢复吸收能力,稀溶液被送入再生单元使用新风进行再生,再生后的浓溶液再送入除湿单元,如此进行循环。

由于温度和湿度采用独立控制,避免常规系统中热湿联合处理带来的能耗损失;冷机制取高温冷水,蒸发温度提高,冷机 COP 可提高;溶液调湿系统处理湿负荷,高温冷机承担复核减少,冷冻水流量随之减少,降低了水系统输配能耗。

可精确控制温湿度,避免出现室内湿度过高或过低现象。常规系统难以同时满足温、湿度参数的缺点得以解决,也可以满足不同房间热湿比不断变化的要求。

目前没有资料证明经溶液处理过的新风对人体有害,也没有资料证明经溶液处理过的新风对人体无害。

3.2.3 冷水机组冷水机组冷凝热回收



目前常用的冷凝热回收是冷凝器内有两组并联的冷却水盘管,其中一组盘管可以将热量传递给冷却水,再通过冷却塔释放到环境中;另一组盘管可以将热量回收用于生活热水供应。其热水回收温度一般为 35~60℃,热回收率控制在 10~100% 之间。需考虑使用侧的不稳定性,在冷却塔盘管侧考虑 100% 的冷却能力,以保证机组正常运行。

3.2.4 冷却塔免费制冷

目前冷却塔的免费制冷是指在冬季用冷却塔来替代冷冻机进行制冷。系统仅运行冷却塔和水泵,而冷冻机不开启,从而节约运行费用。

医疗建筑净化空调热湿处理过程及空调系统的分析

汪延璐

(西安四腾环境科技有限公司, 西安 710075)

[摘要] 介绍了净化空调系统的热湿处理过程及空调机组的配置, 经过对比两管制系统、四管制系统的空调末端、管路系统及冷热源系统形式, 阐述了四管制净化空调系统的重要性, 并提出净化空调系统的节能解决方案。

[关键词] 净化空调; 深度除湿; 四管制; 节能

医疗建筑净化空调系统控制的对象是室内的温度、湿度、气流形式、风速、噪声、洁净度等, 以此来保证医护人员及患者的医疗活动对室内空气品质的需求。医院净化空调系统对控制室内温度以及湿度方面, 相较于普通舒适性空调系统有着更为严格的要求。而医疗用房相对湿度的大小主要关系到空气中细菌的存活时间, 相对湿度越大, 细菌的存活时间越长, 所以控制相对湿度是医院净化空调系统的重要任务。本文就目前净化空调系统的不同热湿处理过程以及相应的空调系统形式展开分析。

1 空调热湿处理过程

目前净化空调系统的热湿处理过程有以下几种形式:

(1) 新风经预处理机组的冷却盘管初步降温除湿, 然后经过直膨式蒸发器进一步降温除湿, 实现深度除湿, 经过再加热后, 送入循环机组与回风混合后进入循环机组的冷水盘管进行等湿冷却, 处理到送风温度后送入室内。

该热湿处理方式需配置新风预处理机组, 主要应用于洁净手术部等净化空调机组数量多, 空调机房面积较大的区域。

(2) 新风经集中降温处理后与室内的回风混合后通过循环机组表冷器处理到机器露点, 再加热到送风状态点后送入室内。

该热湿处理方式需配置新风预处理机组, 主要应用于洁净手术部等净化空调机组数量多, 空调机房面积较大的区域。同时作为第一种热湿处理过程的备用方案, 当深度除湿模块出现故障时, 采用该热湿处理过程。

(3) 新风与室内的回风混合后通过循环机组表冷器处理到机器露点, 冷却除湿后再加热到送风状态点后送入室内。(该热湿处理方式主要应用于ICU、中心供应室、静脉配置中心等净化空调机组数量少, 空调机房面积小等区域。)

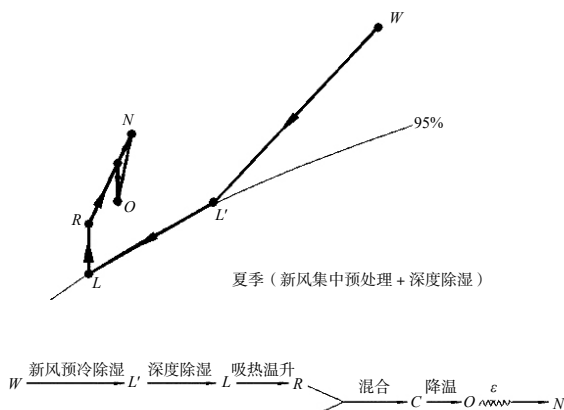


图 1

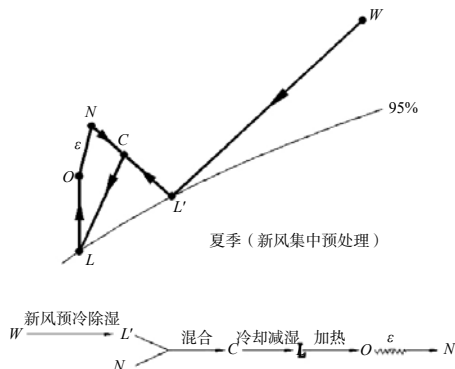


图 2

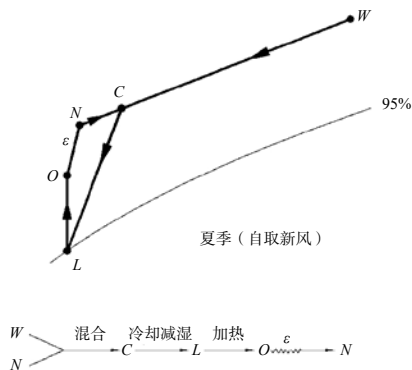


图 3

2 空调末端配置

针对上述三种热湿处理形式，一般空调末端采用如下几种配置。

(1) 新风预处理机组（配深度除湿段）（图 4）

该类型新风机组设一组盘管，主要作为夏季冷却新风之用，连接冷源到机组采用一供一回两根水管，空调水系统为两管制系统。

(2) 净化空调循环机组（两管制）（图 5）

该类型空调循环机组设一组盘管，夏季是冷却盘管，冬季是供热盘管，只能单制冷或单供热，空调水系统为两管制系统。空气的再热过程通过设置于表冷段后的电加热装置实现。

(3) 净化空调循环机组（四管制）（图 6）

该类型空调循环机组各设一组冷、热处理盘管，并分别采用一组供回水管与冷源、热源连接。空调

水系统为四管制系统，该系统可以实现单制冷或单供热及同时制冷和供热。由于四管制系统冷、热水管道是分开的，夏季时可以由表冷段冷却空气后直接经过加热段对空气进行再热处理，无需配置电加热装置，并且采用热水再热对室内负荷变化的适应性强，调节灵活，可满足不同的温湿度要求，可以对不同冷热负荷的空调系统进行精确控制。

3 净化空调冷热源的探讨

经过对上述空调末端的配置的分析，净化空调机组再热热源有电再热以及热水再热两种方式。

《医院洁净手术部建筑技术规范》GB 50333-2013 第 8.3.1 条第 5 款对再热方式做出如下规定“当空气处理过程需要再热时，不宜全部采用电加热装置，可利用余热、废热作为送风再热源”。

《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015 第

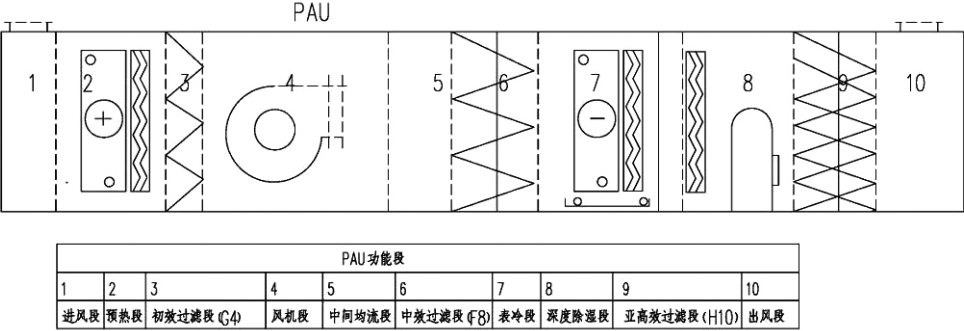


图 4

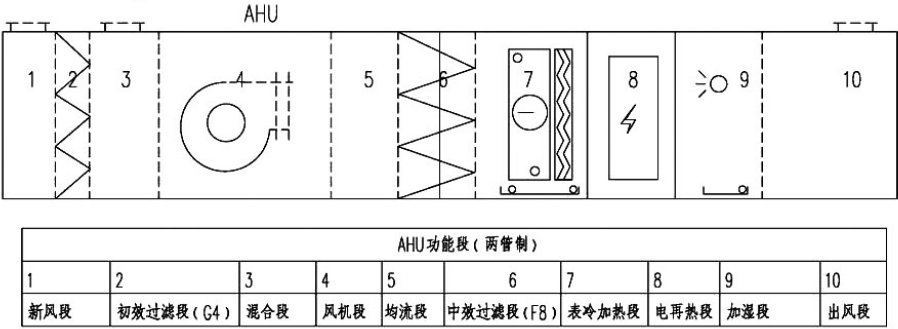


图 5

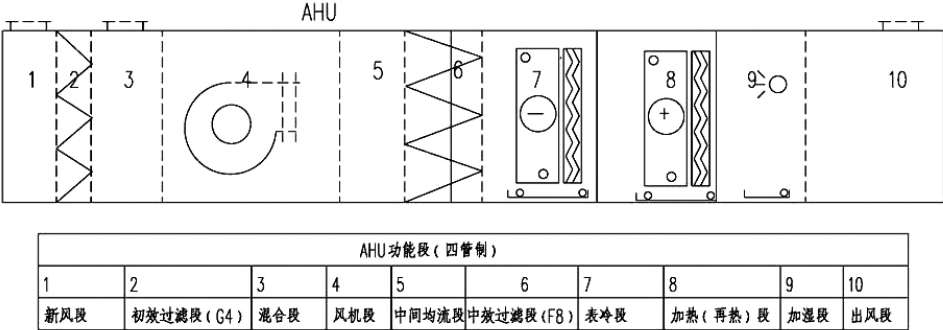


图 6

4.2.2 条对采用电作为加热装置作出了明确的限制。

依据上述规范的条文的规定,净化空调机组应优先选用热水再热作为再热方式,故净化空调水系统应优先选用四管制系统。当采用四管制系统时,夏季时需要同时为空调机组提供冷、热水作为冷却、再热之用,常规的再热热源有热水锅炉、热泵机组。

《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015 第 4.2.15 条第 4 款对空气源热泵机组的选择做出如下规定“对于同时供冷、供暖的建筑,宜选用热回收式热泵机组”。

依据上述条文的规定,医疗建筑净化空调系统建议使用可以利用冷凝热回收技术同时提供冷、热水的四管制多功能冷热水机组作为其冷、热源。

四管制多功能冷热水机组的工作原理是能量的回收和有效利用,它有压缩机、冷凝器、蒸发器、可变换热器等组成。采用两个独立回路的四管制水系统系统的工作原理如图所示。这样的设备可代替锅炉+冷水机组模式,实现多功能冷热源一体机,同时解决净化空调冷冻去湿、再加热的要求,达到恒温恒湿控制的目的。在机组冷热联供运行时、它的制冷能效比可以达到 4.0,同时热能效比达 5.0,冷热联供能效比达 9.0,能大幅度节省用户后期的运行费用。

4 初投资

四管制系统相对于两管制系统,初投资主要集中在管路系统的增加上,根据大量工程案例分析,同区域冷水管径一般比热水管径约大一档,采用四管制后工程总投资所增加的比例约 12% 左右。

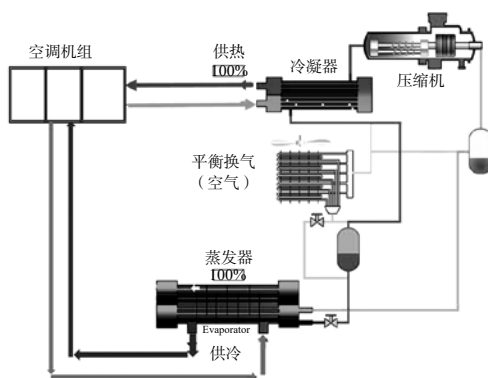


图 7

5 案例分析

(1) 工程概况

此项目为西安市某医院净化工程,净化区域包括洁净手术部、ICU、中心供应室、静脉配液中心、NICU、产科手术室等区域。

(2) 冷热源及系统简介:该工程所需夏季制冷

量为 5125KW,洁净手术部所需制冷量为 2203kw,夏季再热量为 1016kW。院方可提供的夏季制冷量约 3100kW 且无制冷机房供净化空调冷源设备使用。因此该项目采用四管制多功能冷热水机组作为独立冷源,并通过冷凝热回收系统产生 45/40℃ 的热水为所有净化区域提供再热用热水。净化空调水管路为同程式四管制的闭式机械循环系统。

(3) 工程经济分析

下表就该工程再热系统进行经济分析

净化空调初投资	四管制冷热水机组	电再热	锅炉房热水再热
再热量	1016kW	1016kW	1016kW
耗电量	50kW(水泵耗电量)	1016kW	50kW(水泵耗电量)
天然气耗量	无	无	117m ³ /h
运行成本(元/小时)	38.5	783	295.9
运行成本(元/夏季)	48, 510	986, 580	372, 834

备注:上表中电价、天然气价格均按照西安市物价局发布的价格进行计算,并考虑气候变化因素和净化空调设备的同时使用系数。

经过上表可以看出,采用四管制多功能冷热水机组可以收到很好的节能效果。

6 结语

医疗建筑净化空调系统相较于普通舒适性空调在建筑能耗中占据更大的比重。所以在医院净化空调设计过程中,应根据医院所在地区的能源供应具体情况,经过详细的工程技术经济分析,确定合理的空调系统形式。

参考文献

- [1] 沈晋明. 医院节能与冷热源核心技术 [C]. 北京: 中国计划出版社, 2002. 杭州: 医院建筑设计年会, 2007.
- [2] 管德赛, 张为. 论医院洁净手术室空调四管制的优越性 [J]. 洁净空调技术, 2012, 73(1): 42.
- [3] 朱青青, 沈晋明, 陆文. 用于湿度优先控制的新型新风机组 [J]. 制冷技术, 2008(3): 36-40.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 医院洁净手术部建筑技术规范 .GB 50333-2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准 .GB 50189-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

基于 CFD 技术的某医院复合手术室速度场数值模拟与分析优化

李春阳, 樊洪明

(北京市绿色建筑环境与节能技术重点实验室, 北京工业大学, 北京 100124)

[摘要] 本文对一间除送风天花外需要设置高效送风口的超大面积复合 DSA 手术室做了气流组织的数值模拟分析研究, 验证了该手术室空调系统初步设计方案中风口相对位置是否正确、合理。结果表明: 当前设计方案的气流组织, 手术区域气流均匀性不好、流线不畅, 送风口之间气流扰动大, 在手术区域有明显涡流。通过对风口的相对位置和送风速度的调整, 与原设计方案对比分析, 为施工过程中的风口定位安装、风系统调试给出指导意见, 同时为这间复合手术室的温度场、浓度场研究和实测验证奠定了基础。

[关键词] 复合手术室; 气流组织; 数值模拟

0 引言

由于医疗设备的增加和满足医院教学的需要, 现在新建复合 DSA 手术室面积一般在 70m^2 以上。这样的超大型洁净手术室往往会面临市场上现有的送风天花太小, 仅能满足手术区上方的局部单向流, 周边区域的洁净度无法控制, 所以需要外加同级别过滤性能的高效送风口。这又会引来送风天花与高效送风口之间气流搭接、风量分配, 送风速度设定等问题, 本文就这些问题进行分析讨论。

在某医院一间万级复合手术室的空调设计方案中, 送风方式拟采用 $2.6\text{m}\times 1.4\text{m}$ 送风天花和 4 个 $484\text{mm}\times 484\text{mm}$ 高效送风口。为了考察本方案的可行性, 在快速、节约成本、相对准确的前提下, 本文利用 CFD 技术对手术室内流场空态工况下的空气流动和分布情况做了数值模拟研究, 预测其室内空气分布, 从而验证设计方案是否正确、合理。

1 复合 DSA 手术室模型的建立

1.1 物理模型

根据设计方提供的图纸, 建立计算几何模型如图 1 所示。手术室尺寸 $X\times Y\times Z=7.6\text{m}\times 9.5\text{m}\times 3\text{m}$;

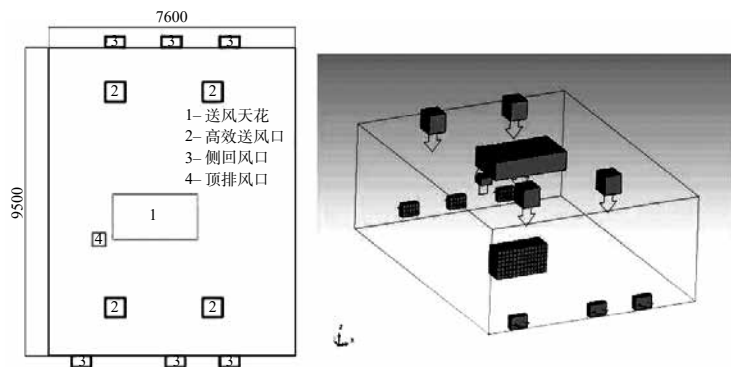


图 1 方案一几何模型

送风天花 $X\times Y\times Z=2.6\text{m}\times 1.4\text{m}\times 0.35\text{m}$, 手术床按院方实际要求, 未居中布置且床侧边与手术室短边平行, 因此送风天花也未居中布置。该间手术室面积比一般 III 级洁净手术室要大很多, 送风天花 $2600\text{mm}\times 1400\text{mm}$ 不能承担满足洁净度换气次数的所有送风量, 需要另外加 4 个相同过滤级别的 $484\text{mm}\times 484\text{mm}$ 高效送风口, 总送风量 $3900\text{m}^3/\text{h}$; 两侧下回风, 回风口 $600\text{mm}\times 350\text{mm}$, 共 6 个, 每边 3 个, 回风口下沿距地 0.1m ; 排风口 $400\text{mm}\times 400\text{mm}$, 置于手术室顶部手术床人体头部右侧位置。方案一这种风口布置方案看似正确, 实则违反了送风天花长边应正对手术室长边、回风口应布置在手术室长边的原则, 对手术区气流组织造成很大影响, 后文会做详细分析。

在满足院方对手术床和观察室相对位置的前提下, 如图 2 所示, 将手术床绕其中心旋转 90° , 送风天花相应也旋转 90° , 4 个高效送风口位置不变, 在手术室长边两侧分别布置两个回风口, 保留短边两侧原中间位置回风口。这种布置方式成为方案二。方案三在方案二的基础上, 调整了送风口的送风速度。



图 2 方案二、三几何模型

1.2 数学模型

流体流动与传热基本方程组中的各方程可采取共同的形式表达, 这种形式称为流动与传热的通用微分方程。使用通用变量 φ , 通用微分方程为:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varphi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}) + S_\varphi$$

式中, 第一项为非定常项, 第二项为对流项, 第三项为扩散项, Γ_φ 为对应于变量 φ 的扩散系数, 末项 S_φ 为函数 φ 的源项。方程在通用方程中的对应关系, 见下表。

通用方程的对应关系

方程名称	φ	Γ_φ	S_φ
连续性方程	1	0	0
x-动量方程	u	$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$	$\rho f_x - \partial p / \partial x$
y-动量方程	v	$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$	$\rho f_y - \partial p / \partial y$
z-动量方程	w	$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$	$\rho f_z - \partial p / \partial z$
能量方程	T	$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$	$\rho(q + \Phi)/c_v$
湍流动能方程	K	$\mu + \mu_t / \sigma_k$	$-\rho \varepsilon + H$
湍流能耗散率方程	ε	$\mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon$	$(\sigma_\varepsilon \varepsilon H - \rho \sigma_\varepsilon \varepsilon^2)/K$

将该手术室内气流视为常物性不可压缩牛顿流体, 围护结构视为绝热, 医生、护士和医疗设备等内热源暂不考虑, 手术室内的流场、压力场均视为准稳态。空气流动为湍流, 满足连续性方程、动量方程和能量方程。紊流模型目前在通风空调数值模拟领域应用最多的是 $k-\varepsilon$ 两方程模型, 通过求解湍能 k 和湍能耗散率 ε 的输运方程得到湍流粘性系数。

1.3 边界条件

(1) 壁面。空态工况下手术室内无吊塔、无影灯等医疗设备, 没有手术医生、护士和病人, 假设手术室围护结构为绝热边界, $T=24^\circ\text{C}$ 。

(2) 送风口。

方案一: 送风天花下送风 $=0.13\text{m/s}$, 高效送风口下送风 0.43m/s , 其他两个方向速度为 0, 送风温度 22°C 。

方案二: 不变。

方案三: 送风天花与高效送风口下送风均为 0.22m/s 。

(3) 回风口。自由出流边界。

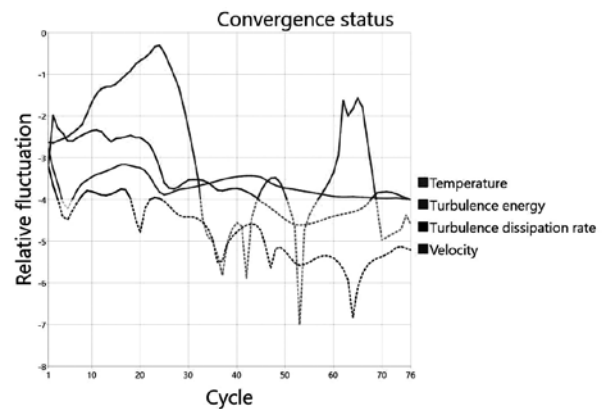
(4) 排风口。排风风速 $=1.04\text{m/s}$, 其他两个方向速度为 0, 排风温度 24°C 。

1.4 网格划分

网格分布对于获得可靠的数值解有很大的影响, 网格太小会导致计算速度慢, 尺寸过大将导致计算失真和发散。本研究采用非均匀网格划分方法, 具体做法是, 在整个计算域上用控制容积将其填满, 并将网格节点放在控制容积中心。计算域中有些区域物理量变化较大, 或者我们更为关心此处的情况,

如送风口、回风口等等, 在这些区域网格画的密一些, 其他区域, 节点间距大一些, 采用这种非均匀网格划分方法, 可以节省计算机计算时间, 并集中计算能力对着重研究的位置进行计算。

网格单元最大 x、y、z 尺寸分别为 0.1m 、 0.1m 、 0.1m 。针对本模型, 靠近风口处网格加密, 每个风口划分相同网格数。为提高计算速度和计算精度, 模拟送风口网格局部加密, 网格总计 302940 个。开始计算后 76 步达到收敛, 计算收敛曲线如下所示。



2 模拟结果与分析

本文所研究的复合 DSA 手术室工程实例, 其非诱导送风装置即送风天花的长边与手术室短边平行, 送风天花两侧分别布置两个高效送风口, 回风口布置在手术室短边侧墙。重点分析这间手术室的设计方案一中气流流向是否能够达到设计预期, 分别在 X 方向: 纵向断面 1 ($X=3.284\text{m}$, 手术区送风天花纵向中心断面), 分析手术区气流在有两侧高效送风口影响下的送回风效果; Y 方向: 横向断面 2 ($Y=4.288\text{m}$, 手术区送风天花横向中心断面), 分析手术区气流在手术室长边侧墙无回风口且排风口未在病人头部正上方布置的情况下的送风效果。方案二与方案一取相同断面, 作横向比较。方案三与方案二除送风速度外, 其他设置条件均保持一致, 作横向比较。

图 3 中可以看到, 手术室在空态工况下, 工作面高度(离地 1.2m)以上主流区域可以保证为单向流, 但是手术室内气流均匀性不好, 流线不畅。两侧高效送风口相距送风天花不同。手术区左侧, 由于高效送风口的送风速度远大于送风天花的送风速度, 造成高速气流上返至手术床左侧, 相当于在手术区域与回风口之间形成了一道风幕, 阻隔了手术区域气流向回风口流动, 回风口对手术区域空气流动的诱导作用不明显; 手术区右侧, 同样高效送风口在手术区域与回风口之间形成了一道风幕, 而且送风天花与回风口距离较远, 回风口仅对高效送风口送

风起诱导作用,手术台右侧形成了较为明显的涡流区,导致该区域内空气滞留时间增加,不利于病菌和尘埃粒子的及时消散,从而影响手术区洁净效果。

图5中可以看到,手术室在空态工况下,手术主流区依然可以保证为单向流,但是手术室两侧没有回风口,对气流没有诱导作用。由于手术室横向跨度比常规面积手术室大,气流受墙壁的影响,在靠近手术台处形成明显的涡流。这对手术区是不利的,容易使手术中产生的病菌、尘粒随着气流向上流动,当遇到通过无影灯向下的气流时会发生大面积扩散,造成二次污染。

图4、6中可以看到,送风天花和手术床旋转90度后,手术室长边两侧(Y方向)回风口对手术区空气流动起到了明显的诱导作用,大部分手术区气流能够从手术室长边侧回风口流出回到空调机组,

手术室短边侧回风口对高效送风口气流起诱导作用。高效送风口的高速气流对手术区气流影响大大降低,仅在手术床病人头部右侧(X方向)形成了一道风幕。

图7、8中可以看到,方案三将送风天花和高效送风口的送风速度均设为0.22 m/s,消除了高速气流对手术区单向流的影响,增强了手术区局部单向流的抗干扰性,在手术床四周没有明显涡流产生,手术室内气流均匀性较好,流线通畅。

3 结论与展望

(1) 本次模拟及时发现了对现有设计方案的不妥之处,说明在复合手术室的建设中,设计人员、施工人员往往会忽略超大面积复合手术室的气流组织,在送风天花不能承担所有送风量、需要增设高效送风口的情况下,没有合理规划气流流向,想当然的随意布置风口,没有考虑风口之间气流搭接的

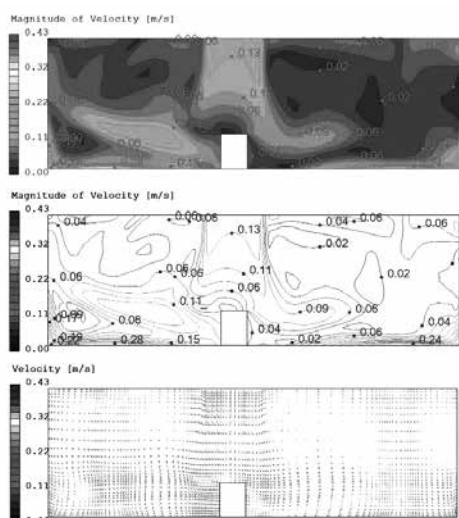


图3 方案一断面1速度及速度矢量分布(X=3.284)

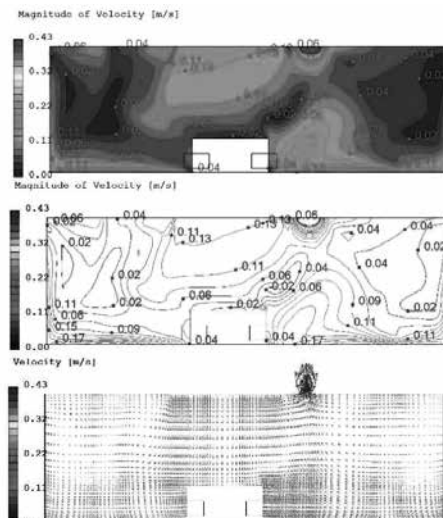


图4 方案二断面1速度及速度矢量分布(X=3.284)

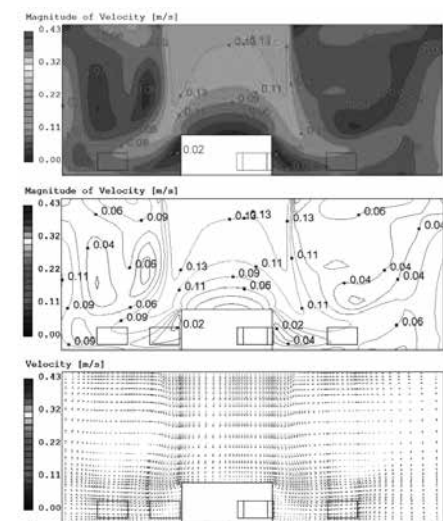


图5 方案一断面2速度及速度矢量分布(Y=4.288)

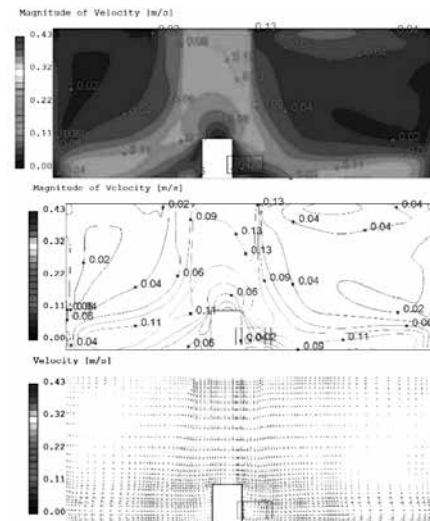


图6 方案二断面2速度及速度矢量分布(Y=4.288)

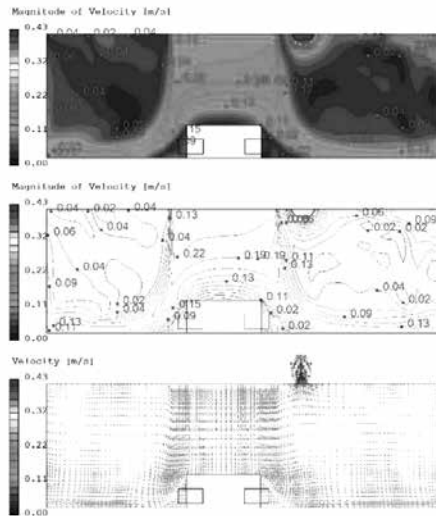


图7 方案三断面1速度及速度矢量分布(X=3.284)

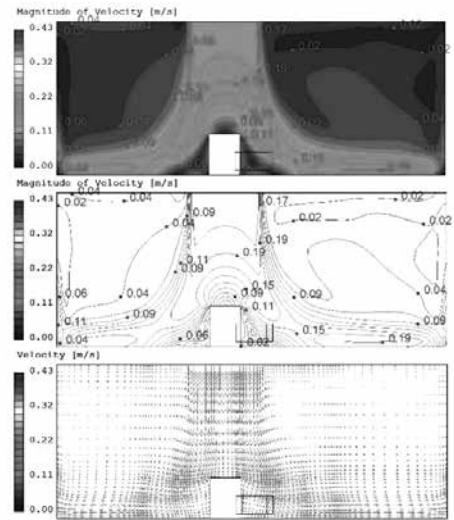


图8 方案三断面2速度及速度矢量分布(Y=4.288)

问题。甚至一味的按照院方的要求,违背了“长边对长边,回风口在手术室长边侧墙均匀布置”的原则。从而导致手术室乱流度增加、洁净度不达标。

(2) 方案二中仅对手术床和送风天花的位置做出了调整、方案三只把送风天花和高效送风口设置成同一送风速度,在深化设计过程中,如何将高效送风口的定位安装,如果继续调大送风天花送风速度、调小高效送风口速度,送风效果是否会更好。这些问题还需与设计方、施工方、使用方一道共同努力,通过反复实验和实测数据反馈来解决。同时

希望有更多的洁净技术专家、学者进行相关研究,给出这种复合手术室气流组织设计建议。

参考文献

- [1] 许钟麟,沈晋明.医用洁净装备工程实施指南.中国建筑工业出版社,369-373.
- [2] 李晓虹,苏华,甘涛.某医院I级手术室速度场数值模拟与分析.洁净与空调,2009,(3):20-22.
- [3] 邵建敏,张建飞,吴学红.典型I级洁净手术室空调气流组织及细菌浓度分布模拟与优化.热科学与技术,2014,13(4):347-351.

从非能源效率浅谈手术部节能

刘燕敏, 沈晋明

(同济大学, 上海 200092)

[摘要] 传统的暖通空调领域节能措施着眼于从能源系统、输送系统、空气处理系统、控制系统等方面去提高“能源效率”, 节能效果受到许多因素制约。如果从“非能源效率”节能思路出发, 去提高手术效率、改进手术方式、改变医疗模式、改革医院体系、降低非医疗的能耗等措施, 节能途径更多, 节能效果更大, 取得了多赢的局面。只有从“能源效率”和“非能源效率”两方面综合考虑的措施才能更有效地推动我国医院手术部的节能降耗。

[关键词] 手术环境控制; 节能技术; 能源效率; 非能源效率; 综合措施

0 引言

维持医疗环境的能耗是医疗机构能耗中的最大份额之一。由于医疗环境的控制宗旨除了维持室内空气质量与热舒适外, 最重要是保障医疗过程顺利进行, 并将感染风险处于受控状态, 特别是手术环境, 谁也不敢掉以轻心。手术环境已成为能量使用强度很高 (Higher energy use intensity) 的场所, 是国内外共同关注的议题。但是传统的手术环境的节能措施, 特别是暖通空调领域节能降耗, 均着眼于从能源系统、输送系统、空气处理系统、控制系统等方面尽可能去提高能源效率。如今所有的节能措施似乎人人皆知了, 这些仅局限于提高能源效率的节能技术的创新有限, 要大幅度降低能耗的有效措施甚至可以说已黔驴技穷了。如果我们换一种思路, 跳出“提高能源效率”等传统的节能理念, 进入“非能源效率 (Non-energy efficiency)”的节能思路, 也许给我们更广阔的节能思路与路径。

所谓“非能源效率”是指不直接通过提高能源效率的途径来降低能耗。如通过改革生产工艺、提高生产效率; 通过合理的工艺环境控制、调整控制参数, 保障生产工艺; 通过改善空气品质 (包括热舒适) 提高员工的工作效率等措施来降低每件产品的生产能耗等措施。如今先进的技术与高科技装备向医疗行业转移的速度已达到前所未有的程度, 现代手术室已经成为高科技场所。这些常用于高科技企业的“非能源效率”节能措施值得我们在手术室节能领域进行探索。

“非能源效率”的节能理念与实施, 不断冲击着传统的医疗模式, 甚至医疗体系, 同时也对传统的暖通空调提出新的挑战, 需要从理论上与具体实施上解

决前所未遇的许多新问题。也可以说为暖通空调在医疗领域发展提供了新的机遇, 开辟了新的途径。下面我们就“非能源效率”的节能思路与相应的暖通空调设施系统对策进行探讨。

1 非能源效率节能措施的评价指标

要开发非能源效率节能措施, 首先要解决节能的评价指标。现代手术室的室内配置的医疗装备与相应设施系统增多、容量加大、控制要求提高, 在我国医疗科室特别是手术室的能耗持续不断地增加。面对这一必然的发展趋势, 如果仍将“手术室能耗”作为手术室的唯一评价指标, 现代手术室节能无法进一步发展。然而, 我们应该看到作为现代手术室, 随着诊疗技术的进步、设施科技含量的提高, 手术质量提升、效率提高、感染率降低, 治愈率提升, 病患受到的伤害会更小, 康复会更快。如果现代手术像高科技产业一样, 充分发挥高科技设施的优势, 在质量提升的同时提高效率, 就可以有效降低每次手术的成本。因此, 如果以“每次手术的成本与能耗”作为评价指标^[1], 就为发展“非能源效率”的节能措施创造了条件。成为现代手术室节能的最佳对策之一, 可以取得多赢的局面。这一评价指标的实质是将传统的医疗科室总投入或总能耗, 转变为每一独立医疗过程的成本或能耗, 以体现出非能源效率。这每一独立医疗过程, 可以是每次手术或每个手术周期等等。

2 改革医疗工艺降低手术能耗

在我国, 一谈到手术室发展就会被一大堆“云计算、大数据、互联网、人工智能”等高配的时髦语句所笼罩, 似乎一体化数字手术室、智慧手术室、增强现实手术室、自主机器人手术室等代表着手术室发展趋势。其实, 现代手术发展一直遵循“以最小的手术伤害达到最佳的手术效果”的宗旨。自 19 世纪 40 年代形成的外科手术, 就是一种开放手术 (或称解剖型手术), 是由手术技术、麻醉技术与感染控制的进步不断推动着外科发展。具有标志性的是全关节置换与

基金项目: 由“十三五”国家重点研发计划绿色建筑及建筑工业化专项-洁净空调厂房的节能设计与关键技术设备研究项目的课题五“医院手术室及实验动物房节能设计、关键技术研究与工程示范 (2018YFC0705205)”资助。

器官移植手术,开发了层流手术室有效降低了当时造成手术失败的关键因素——手术部位感染。近年来,真正改变传统的开放手术是微创手术,被称为外科手术的革命^[2]。微创手术无须开刀,只需在病人身上开1~3个5~10mm匙孔。具有创伤小、时间短、恢复快的优越性,大大降低了对手术环境控制的要求,在我国得到了极大地发展。从内镜、腔镜、介入技术,发展到介入超声技术和介入放射技术等方式等在人体内施行手术。如今已深入到外科手术的各种领域,促进了介入器械、术中成像、精密立体定位、数字化信息系统等技术的发展^[3]。DSA介入、多功能复合手术、机器人辅助腔镜手术等等均基于微创手术发展起来。复合手术将介入医学、外科学和影像诊断学三大技术的结合,配备了现代诊断装备(DSA、CT、MRI等)、先进的微创手术器械与一体化数字平台,在同一处、同一时段综合实施,一站式(one-stop)高质量、低风险地完成了复杂手术,提高了手术效率、降低了手术能耗。由于以微创手术为代表的技术革命,手术环境控制从过去超百次换气的近乎全室的层流送风,变为现在只需要20次换气、甚至15次换气的局部送风。而且相应地净化空调系统的热负荷变小、控制要求降低、无需HEPA过滤器,系统能耗的降低何止30%。

微创手术已进入外科各个领域,微创手术类型与装备也各不相同,发展相应的最佳手术环境控制是暖通空调的一个新课题。由于微创手术在手术过程中需要医学信息系统随时调用病患自身的、手术切片的病理报告等各种相关信息。要求的医学影像信息系统以高性能服务器、网络及存储设备构成的硬件支持平台,以医疗影像的采集、传输、存储和诊断为核心,将集影像采集传输与存储管理、影像诊断查询与报告管理、综合信息管理等集成于一体的数字化综合应用系统。暖通空调工程师要将这手术环境控制系统无缝融合在这一数字化平台中。

3 提高手术量次降低每次手术能耗

我国医院建设的规模与建造的速度已名列世界前茅,超大规模的洁净手术部在国内也已屡见不鲜,但仍然不能满足日益增长的医疗需求。反观世界发达国家,已不再像过去那样大量新建或扩建医疗设施,而是充分发挥既有医疗设施的效能。提高手术效率,缩短手术时间,加快手术周转率(Turnover time),提升手术室的使用率(operating room utilization),加大手术量次(surgery throughput),已成为降低手术成本与能耗的最佳对策^[1]。对于我国这样后发展国家,应汲取他国发展过程中的经验教训。尽快将手术室设计与建设从以感染控制为导向的平面布局转移到提高

医疗效率的方向。传统的平面布局从区域感染控制理念出发,分为一般区域、非洁净区域、洁净区域,或分为非限制区、半限制区、限制区。遵循ISO14644-4《洁净室及相关受控环境-第4部分:设计,建造和启动》,要求洁净区域处于非洁净区域之中,并需从非洁净区进入洁净区,使得洁净手术部的体量加大。并按手术室与其他科室、医护与患者、人流与物流、洁物与污物分离的原则,形成了双通道、多通道等多种极为复杂的布局形式。医护人员进入需要仔细辨别所走通道与目的地。

要提高手术量次,加快手术周转,必须简化手术部布局,布置快速通道,优化流程,尽可能减少不必要的人流与物流。如美国发展以无菌物品储存为核心的新型“中心岛”模式;欧洲发展沿快速通道布置带前室的手术室模式;日本发展出新型单通道布局模式等以提高手术效率为中心的平面布局。其特点是设置中心快速通道、方便人员流动、加快周转、加大手术的量次以降低医疗成本^[4]。针对新型平面布局暖通空调相应的系统划分与控制成为新的研究课题。

发展以提高诊疗效率为中心的平面布局的最大障碍如何分流洁物与污物以及避免交叉感染的问题。其中厢式密闭箱车(case cart)是一个较为有效的对策。厢式密闭箱车是一种气密性运输车辆。如果厢式密闭箱车从消毒供应中心将无菌物品,运输到手术部无菌核心区,回程时进入手术室将污染物品密闭装运后再返回消毒供应中心。由于物品均密闭在厢式密闭箱车内,这对平面布局来说不存在洁物与污物的概念,或者说整个平面布局不存在污物与洁物的流线,也就不再需要洁、污物分流的通道,简化了平面布局。暖通空调系统需要对这平面布局增加厢式密闭箱车的集中放置区域与物流的通道进行相应的控制。

4 改变手术实施方式降低每次手术的能耗

自手术实施以来,手术都是针对特定病患的身体状况与病症特性制订方案并实施个性化手术,切除病灶或修复身体上的缺损,以恢复或改善身体的功能。自上世纪60年代开创的全髋关节或全膝关节置换手术,发展到90年代这项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。同时,要求全髋关节或全膝关节置换手术的病患越来越多。为了提高手术的效率、降低手术成本,解决缺少有经验的高级外科医生和麻醉医师。最初尝试在结构上完全开放的大空间内设置两个及以上的手术区域,称为通仓手术室(Barn Operating Room)。在这一大空间内同时进行的多台手术,但不是各自独立进行,而是在高级外科医生和麻醉医师指导下进行的单一、重复、标准化的手术过程。从个性化手术演变到工业化的标

准化操作,加快了手术的速度,大大降低每次手术的能耗,这是手术实施方式上的革命。据英国医院的统计,通仓手术室使手术量提高了 40%。而且受控的手术环境面积缩小。如在德国汉堡海洛斯医院 (HELIOS ENDO Klinik Hamburg) 手术部中 160m² 面积通常只能布置 3 间标准手术室,而用作通仓手术室,内部可设 4 个手术区,使医院能更快、更省能、更安全、更有效地为更多的患者实施置换手术^[5]。通仓手术室相对于 4 间手术室来说,空调面积小了,还省下 6 堵墙的建筑围护传热的能耗。通仓手术室的术后感染率英国报告 2010 年仅为 0.3%,远低于英国年平均感染率 1% 的水平。近年来,通仓手术室已经成为一种新的发展趋势。

通仓手术室在我国实施尚有许多问题,国外医院建设标准或指南,及我国 GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》均未涉及。既能保障各自自主送风装置对手术环境的有效控制,又要避免一个大空间内 4 台手术的主送风装置互相干扰。对暖通空调工程师来说,有机、合理地配置室内的各种风口(新风、送风、回风与排风),以形成室内良好的气流组织,才能实现大空间内手术环境有效控制。通常,前期设计往往凭借设计人员的以往工程经验,相应的设计规范与类似工程的信息做出判断。经验型的设计可能会臆想出多种设计方案,难以评价方案的优劣。经验型的设计可能会出错,尤其对先前没有遇到的案例。我们依据循证设计在完成对相关文献进行系统评价 (System review)^[6] 以及实际工程的考察^{[5][7]},经过优选与评价建造了 1:1 的实体模型^[8]。在完成了对实体模型各种变换工况的实测,将实测数据与结果校验了 CFD 仿真模拟,修改模拟边界条件,进一步完善模拟,提高了模拟精度,已初步提交通仓交融手术室工程设计方案与设计参数。期待着实际工程的验证。

5 改变手术的医疗模式降低手术周期的能耗

如果从病患的手术周期(从收治入院到术后康复出院)来说,日间手术(Ambulatory Surgery, One-day Surgery, Same day Surgery)无非是一种高效率、低能耗的医疗模式。所谓的日间手术是将原来需要住院完成的手术将在院时间缩短至 24 小时以内。日间手术最早是由英国内科医生 James H. Nicoll 提出,后来在美国与欧洲大陆得到推广,直到 90 年代才进入中国。各国都在大力推广日间手术,已发展成为日间手术中心或日间手术部。在国际上一些率先推广的国家,日间手术占择期手术比例已经高达 60% 以上,英国和美国更是高达 80%,而且都颁布了相应的指南^{[9][10]}。

日间手术不是门诊手术,是从住院手术分离出

来,且涉及的病种较多,从普外到较复杂的手术,目前我国正大力促进开展技术难度大的三级或四级的日间手术。医疗技术发展,使得过去在住院洁净手术室开展的许多手术现在可以在一般手术室中开展。因为日间手术周期更短,待院时间(或耗能时间)是以小时而不是以天计算。简化了流程化的管理模式,减少人员配备,更有效地使用手术室装备和设施系统,大大降低手术周期总能耗,提高手术效率,将住院设施资源留给更复杂和紧急情况需要手术的患者。

尽管我国卫健委已颁布了日间手术管理导则(2016 版征求意见稿)。但由于缺乏“日间手术中心(部)设施的建设标准”,许多日间手术中心(部)设施的建设只能参照 GB 50333-2002《医院洁净手术部建筑技术规范》。由于该规范不符合日间手术中心(部)特点与要求,不适应日间手术中心(部)发展与相应设施的规范建设。日间手术部不同于住院手术部,也不同于门诊手术,对流程的要求非常精细,术前检查、筛选、评估,术中麻醉技术的运用和手术人员的配合,术后安全性的确保等等。为了保障日间手术中心(部)良好运转,术后复苏室与手术室的配比数要高于目前的所建的手术部。日间手术中心(部)通常需要一般手术室和洁净手术室。一个手术中心(部)同时存在一般手术室和洁净手术室是一个新课题。因为洁净手术室是区域控制理念,要遵循 GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》的规定。而一般手术室仅要求单室控制,要满足 GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》的要求。需要根据日间手术中心(部)的特点研究平面布局、人流物流流程、手术室与辅房配置,区域环境以及不同手术环境控制等问题。也给暖通空调提出了一个新的研究课题。为此,我们正在编制《日间手术中心(部)建设标准》。

6 降低手术环境控制级别、缩小手术部洁净区域面积减少环境控制能耗

高洁净度级别的环境控制系统能源消耗往往是整个手术部最大的能耗。在合理评估医疗与感控要求的基础上,缩小高洁净度级别控制区域面积,或降低环境控制洁净度级别,成为提高“非能源效率”的常用策略之一。要正确认识洁净手术室,GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》一再强调洁净手术室“采用净化技术综合措施,从工艺、建筑、风、水、电等方面减少潜在的外源性感染风险,有效地使手术环境受控”。手术室不等同于洁净室,手术环境不应照搬洁净室技术^[11]。

对于洁净用房 GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》作出了新的规定。将刷手间、术前准

备室、无菌物品存放室、预麻室、术后重症监护、精密仪器室、护士站、洁净走廊等原 III 级洁净用房降低为 IV 级。原要求 IV 级洁净用房的手术室邻室和更衣室（二更）现为非洁净用房。取消了清洁走廊名称，只要非洁净区内走廊均无洁净度级别要求。为此缩小了手术部洁净区域的面积。并认为非洁净区、无洁净度级别的用房，并非一般用房无须控制，而是定义为无级别受控环境^[12]。这对关键医疗科室环境控制的节能有特殊意义，这可解耦洁净度级别、换气量、正压值，使得关键医疗科室环境控制的设计参数真正按需选择，有效地降低能耗。

在 GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》规定的一般手术室，是无级别受控环境的医疗用房。以一般手术室为主配以必要的辅助房间形成的受控区域称为一般手术部，没有相应的洁净度级别要求。不同于洁净手术部，是用区域控制保障洁净手术室，而一般手术部是单室控制的概念，只须重点控制一般手术室。但一般手术部属于无级别受控区域，要强调人流与物流进出要求受控，人需更衣换鞋、无菌物品与医疗废物要进行管理，手术部内部设施易清洁、可消毒。要求不低于 6 次的通风换气量，末级过滤器为高中效。一般手术室能耗要大大低于洁净手术室。如经过评估，将洁净手术室内进行的手术可以在一般手术室内进行，就能有效降低手术室运行能耗。

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》明确建议“层流通风系统不应该用于降低接受全关节置换术患者的 SSI 风险”，推荐手术室通风系统送入经过滤的 20 次换气，保证热舒适与空气质量，并提供所需的正压^[13]。该要求相当于 GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》中 II 级洁净手术室。大大缩小了 I 级洁净手术室的使用范围。GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》也提出将甲醛、苯和总挥发性有机化合物（TVOC）浓度列为必测项目，将提高室内空气质量、消除手术烟雾作为控制目标之一。手术环境控制从主要防止病患感染转向了保障医务人员健康与舒适，这也是手术室空调发展的新动向。

以上这些信息为我们“非能源效率”节能提供了有力的法规依据。为此要提倡循证设计，只有建造真正适合所建医院的医疗与 SSI 控制目标的手术室与相应通风方式，才是经济、有效，才能真正降低手术环境控制能耗^[14]。暖通空调工程师应配合医疗专家与感染控制专家对手术环境进行合理评估，选择合适的手术环境控制参数，不仅仅涉及洁净度级别与无菌程度，还要考虑到室内空气质量。能在低一级别手术室进行的手术不进高一级别手术室，能在一般手术室

进行的手术不到洁净手术室，能做日间手术不做住院手术，这为降低手术环境控制能耗创造了条件。

《医院洁净手术部建筑技术规范》提出 4 个级别手术室意在便于选择，不是要求所有手术部建齐 4 个级别的手术室。目前，手术部的实际工程多以 I 级洁净手术室和 III 级洁净手术室为主体，如果改为以 II 级洁净手术室和 IV 级洁净手术室为主体，则可大大降低手术部造价与运行能耗。如果《日间手术中心（部）建设标准》颁布，则洁净手术室与一般手术室构成的组合手术部，也许成为手术部节能的新方向。

另外，通常手术室是从手术部位上方集中送风，应允许开发以 20 次换气为基础的非手术部位上方集中送风的新型送风方式，以及开发更有效地控制手术环境空气质量的净化空调系统又是暖通空调工程师的一项新任务。

7 去机构化，改变医疗机构体制，降低或消除非医疗科室能耗

高科技不仅促使医疗方式的变革，而且也会渐进地改变医疗体制。欧美医疗体系中出现了“去机构化（Deinstitutionalization）”的发展趋势，值得我们关注。所谓“去机构化”就是将关键医疗科室从医院机构分离出去，独立运行，以缩小医院规模，降低非医疗的成本与能耗。如果将每次手术总耗能（即还包括为手术服务的所有科室的耗能）作为评价指标的话，则去机构化是最省能的医疗体系。

为什么传统手术室要在医院中才能正常开展？是因为需要一整套非医疗科室组成的医院管理体系才能保证各医疗科室正常运行，如感染控制、医疗与护理监控、血浆药品管理、诊疗化验设备、医疗耗材、无菌物品供给与医疗废物处理，以及病人档案（病历、影像与理化检验资料等）与财务管理等。用这样一套庞大的医院管理体系才能保障有序医疗进程与手术顺利实施，并在保证手术质量、降低感染方面呈现出巨大的优越性，但是庞大的医院管理系统的能耗很大，远远高于手术直接消耗的能量。

如今，在欧美病患的病历、影像、理化检验与治疗等资料数字化，病人档案网络化，只要病患授权就可即时从任一卫生医疗机构的病患档案库调出档案；微创手术的发展使得手术风险与感染率大大减少，感染控制主要集中在接触感染（包括悬浮菌沉降诱发的接触感染）而目前无菌物品供给与污物处理又社会化，医疗耗材由专业公司直接供应；资金收支与税收都可以在网上操作，管理也十分简便。这些都使得大多手术不再依靠庞大的医院管理体系，而独立运营。在这样的时代背景下，出现了一种新的医疗方式——办公室手术（office-based surgery）^[15]，已经在欧美推广开来了。

这种办公室手术从过去以医院为基地 (hospital-based) 转换成以办公室为基地 (office-based), 是医疗系统的革命。为了保障独立运行的办公室手术的公用设施与能源供给, 医疗办公大楼 (Medical Office Building) 应运而生。医疗办公大楼不同于普通的办公大楼, 公用设施冗余, 能源供给充沛, 物流简捷、物业服务质量高等优点, 保证了办公室手术租赁医疗办公大楼脱离医院而独立运行, 得到了极大发展。并颁布了办公室手术相应的指南、规范与验收标准等^{[9][15]}。

我国病历、影像、理化检验与治疗等资料数字化、网络化已逐步完善, 医疗后勤也已社会化, 医疗档案共享从理论上或系统设施上似乎没有问题。然而, 目前我国医疗档案共享要从本院发展到全国医疗机构, 就要涉及到实验室认可、诊疗的互认, 国家医疗管理体制乃至法律体系等一系列问题, 阻碍了我国去机构化的推广与普及。以办公室手术与医疗办公大楼为代表的去机构化, 以及相关的暖通空调设施系统与能源供给也应是今后研究的问题。

8 结语

传统的暖通空调领域节能措施着眼于从能源系统、输送系统、空气处理系统、控制系统等方面去提高能源效率。但手术部节能措施受到许多因素制约, 与暖通空调能耗相关的主要因素有: 与高科技装备及配套设施系统能耗相关的热湿负荷, 为保障手术与控制感染的医疗环境控制的能耗, 手术部内不同区域的控制与有序梯度压差的实现, 以及维持室内空气质量与热舒适环境的能耗等。一味降低与手术环境控制直接相关的能耗, 或套用公共建筑的节能措施, 也有可能给医疗与感控造成负面影响, 而且节能措施的效果有限。本文从“非能源效率”节能思路出发, 去提高手术效率、改进手术方式、改变医疗模式、改革医院体系、降低非医疗的能耗等措施, 取得了多赢的局面, 节能效果更大、节能途径更多。尽管不断对传统的暖通空调提出挑战, 也为暖通空调发展提供新的机遇。

工艺性空调除了受工艺因素制约, 也受工艺发展而改变。可以说掌握了工艺发展的趋势, 也就知晓工艺性空调发展的机遇。“非能源效率”就是基于医疗工艺进展去研发节能的措施, 如果还是局限于传统医院与洁净手术部模式搞节能, 也许随时代的发展变得黯然无色。虽然提高“非能源效率”的节能技术措施是可行的、可操作的, 但是难以量化。只能针对一个、一个特定的医疗工艺做量化, 使人们实实在在看到“非能源效率”效果, 这将是我们的下一阶段的任务。当然, 也不能因此轻视提高“能源效率”的各种措施, 只有从“能源效率”和“非能源效率”两方面综合考虑的措施才能更有效地推动我国医院手术部的节能降耗。

参考文献

- [1] 沈晋明, 刘燕敏, 俞卫刚. 从设施角度谈降低医院手术成本的措施 [J]. 暖通空调, 2014, 44(3):43-47.
- [2] Matthews JB. Minimally invasive surgery: how goes the revolution?[J].Gastroenterology. 1999 Mar;116(3):513.
- [3] 沈晋明. 手术室建设发展趋势与对策 [J]. 中国医院建筑与装备, 2012(10):30-33.
- [4] 沈晋明, 俞卫刚. 国外医院建设标准发展对我国医院手术部建设的启发与思考 [J]. 中国医院建筑与装备, 2013(2):62-66.
- [5] 沈晋明, 刘燕敏. 德国医疗建筑手术部通风与空调系统的应用研究 [J]. 中国医院建筑与装备, 2017(3):33-37.
- [6] 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.
- [7] 沈晋明. 德国汉堡海洛斯医院手术部配置与管理考察报告 [J]. 中国医院建筑与装备, 2013(3):60-63.
- [8] 刘燕敏, 李晓颖, 严建敏. 等. 通仓交融手术室实体模型评价与优化 [J]. 中国医院建筑与装备, 2018(6):39-43.
- [9] American College of Surgeons, Guidelines for Optimal Ambulatory Surgery Care and Office-based Surgery, Chicago, IL 60611-32,
- [10] UK Department of Health, Health Building Note 10-02: Day surgery facilities, May 2007, <http://www.dh.gov.uk>,
- [11] 沈晋明, 刘燕敏. 手术室手术环境不应照搬洁净室技术 [J]. 暖通空调, 2017, 47(8):31-35.
- [12] 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.
- [13] World Health Organization. The global guidelines for the prevention of surgical site infections[S]. Switzerland:- Geneva, 2016.
- [14] 沈晋明, 刘燕敏, 评述《预防外科手术部位感染的全球指南》4.23 节 [J]. 暖通空调, 2017, 47(11):61-67.
- [15] 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.
- [16] American Association for Accreditation of Ambulatory Surgical Facilities, Accreditation Handbook for Office-Based Surgery including Review Guidelines [R]. <https://www.aaaasf.org/>.

微电子行业洁净室空气化学污染控制标准

吴小泉

(南京天加环境科技有限公司, 南京 210028)

[摘要] 微电子工业在日益庞大而复杂的数据处理与存储市场需求的驱动下, 半导体线宽已缩小至 7nm。若不能建立起有效空气化学污染控制标准 and 对其彻底控制, 纳米级的光刻工艺是无法进行的。本文介绍了空气化学污染的控制设施平台的建设, 并进行了实验验证, 该平台是中国首例达到国际标准 (ISO1 级, ISO 14644-1) 超净空气环境设施, 在该设施中可开展空气洁净度和空气污染控制等课题研究, 对实际项目的设计、运行具有重要参考价值。

[关键词] 半导体线宽; 空气化学污染; 空气洁净度; ISO1 级

0 引言

自 1958 年世界上第一块硅集成电路诞生以来, 在过去的 60 多年里, 微电子工业在日益庞大而复杂的数据处理与存储市场需求的驱动下, 基本是按照摩尔定律进行发展, 半导体线宽从 20 世纪 60 年代 70 μm 发展到 90 年代不足 1 μm ^[1]; 之后随着线宽的光刻工艺由 0.5 μm ~0.35 μm 缩小至 0.25 μm ~0.1 μm , 以及 193nm 浸入式光刻工艺的发明及后续发展, 又将线宽缩小至 32nm; 当前因极紫外光刻技术工艺研究的新进展, 线宽已缩小至 7nm^[2,3]。193nm 制程是指光刻技术的光源波长为 193nm, 光学光刻的极限分辨率可以达到光源波长的 1/2, 即 193nm 制程为 0.1 μm 光刻工艺。有研究指出, 没有对空气化学污染物的彻底控制, 特征尺寸小于 0.1 μm 的光刻工艺将无法进行^[4]。

1 空气化学污染物的分类、来源及危害

按照国际标准 ISO 14644-8:2013, 洁净室及相关受控环境第 8 部分: 按化学物浓度划分洁净度等级 (Cleanrooms and associated controlled environments -Part 8: Classification of air cleanliness by chemical concentration (ACC)), 以及美国半导体设备与材料学会 SEMI, Semiconductor Equipment & Materials Institute 的标准空气化学污染物的分类, 如表 1 和表 2。

AMC 的来源主要分室内和室外, 室外主要是补充新风带来, 室内是工艺设备、生产操作人员, 建筑材料等^[5], 具体如表 3^[6]。

AMC 能损害原材料、工艺、制成品、生产设备和机械设备等, 如 AMC 中的酸类物质会造成晶体及光学的微粒及雾状浑浊; 光学改变导致的光刻率的变化; AMC 中的碱类物质会造成深紫外线 (DUV) 光阻剂缺陷 --T 型覆盖等^[7]。

AMC 中的 NH₃ 会造成 T-top 现象, 在 0.15~0.2 μm 制程暴露在 1.0ppb 及 0.1 ppb 的 NH₃ 污染环境中 30 分钟结果, 如图 1^[8]。此外 NH₃ 与 SO₄²⁻ 化学反应后则会在光罩表面产生 (NH₄)₂SO₄ 结晶污染物如图 2,

表 1 空气化学污染物定义

污染物类别	定义
酸	以接受电子对并建立新化学键未化学反应特性的物质
碱	以给出电子对并建立新化学键未化学反应特性的物质
生物毒	危害生物、微生物、生物组织或细胞个体的生产与存活的污染物
可凝聚物	可在洁净室运行状态下因凝聚而沉积在表面上的物质
腐蚀剂	使表面产生破坏性化学变化的物质
掺杂物	经产品个体吸收或 (和) 经扩散后, 与个体结合为一体, 即时为微量亦可改变材料特性的物质
有机物	以碳基本元素, 含氢, 含或不含氧、氮等其他元素的物质
氧化剂	沉积在关注表面或产品上后, 形成氧化物 (O ₂ /O ₃) 或参与氧化还原反应的物质

表 2 空气化学污染 AMC 污染物的分类

酸性物质 (Ac) HF 氢氟酸 HCl 盐酸 H ₃ PO ₄ 磷酸 H ₂ SO ₄ 硫酸 HNO ₃ 硝酸 HBr 氢溴酸	酸性物质 (Ba) AMINE 胺 (含氮有机化合物) NH ₃ 氨 NMP N-甲基吡咯烷酮 (溶剂) HMDS 六甲基二硅胺烷 (偶联剂)
凝聚物质 (Cd) DOP 邻苯二甲酸二辛脂 (通用增塑剂) DBP 二丁脂 (PVC 增塑剂, 合成橡胶等软化剂) DEP 邻苯二甲酸二乙脂 (增塑剂) iloxanes 硅氧烷 (有机硅)	掺杂物质 (Dp) B ₂ H ₆ 乙硼烷 (掺杂气体) BF ₃ 三氟化硼 (掺杂气体) A ₃ H ₃ 砷烷 (掺杂气体) TCEP 磷酸三氯乙酯 (阻燃增塑剂) TEP 磷酸三乙酯 (溶剂) TPP 磷酸三苯酯 (使塑料抗静电、增韧、阻燃)
H ₂ O ₂ 双氧水、O ₃ 臭氧 IPA 异丙醇 (溶剂)、Cl ₂ 氯气	

表 3 电子厂房 AMC 的主要来源

AMC 空气化学污染源	主要成分
5%~10% 源于外气 (External Sources)	燃烧产物硫氧化物 SO _x 、氮氧化物 NO _x 、挥发性有机物 VOCs、大气中臭氧 O ₃ 、氨 NH ₃ 、硫化氢 H ₂ S 等
30%~40% 源于操作人员	氨 NH ₃ 、K 离子、PVC 手套、香水、发胶等
25%~30% 源于制程逸散 (Process Chemicals)	制程中使用化学原料: 显影剂、去光阻剂; 机台及常务系统维修保养; 特种气体管路泄露等
其他 20%~30% 源于洁净室用材“释气”和设备泄露	洁净室结构材料、涂料; 机台内部材质、SMIF/FOUP/微环境 Mini-environment 材质; 过滤器滤网材质 (要求低硼) 和密封胶释放有机磷酸盐类; 接缝密封胶。

此外因 lens 雾化产生 2 次反射造成 “ghost” 现象如图 3, 引起产品良率降低, 甚至导致晶片报废如图 4^[9]。

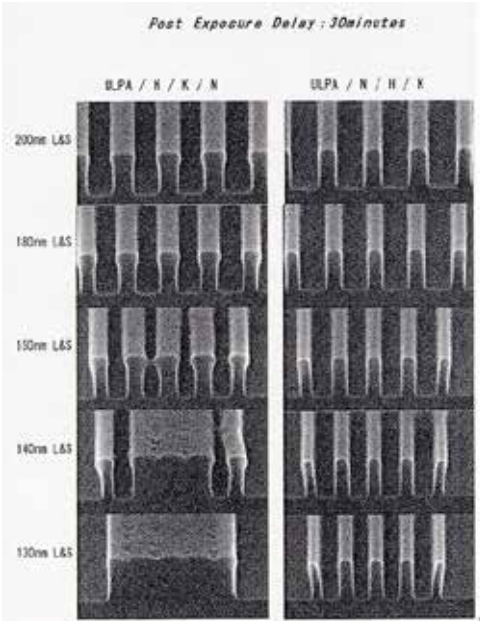


图 1 1.0ppb (左) 及 0.1 ppb (右) NH₃ 中暴露

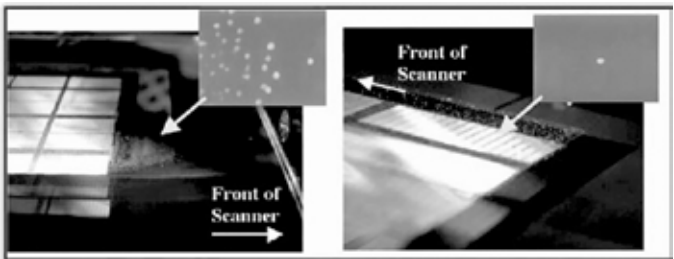


图 2 光罩表面 (NH₄)₂SO₄ 结晶污染物

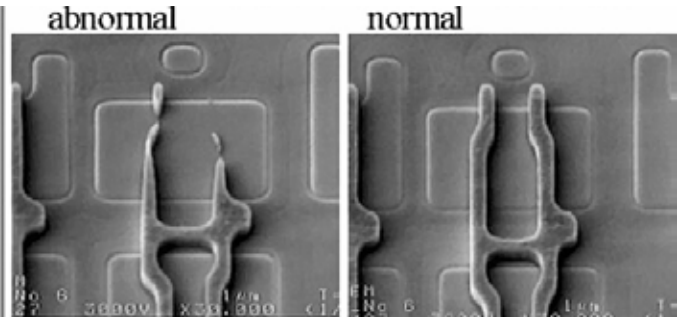


图 3 lens 雾化产生 2 次反射造成异常

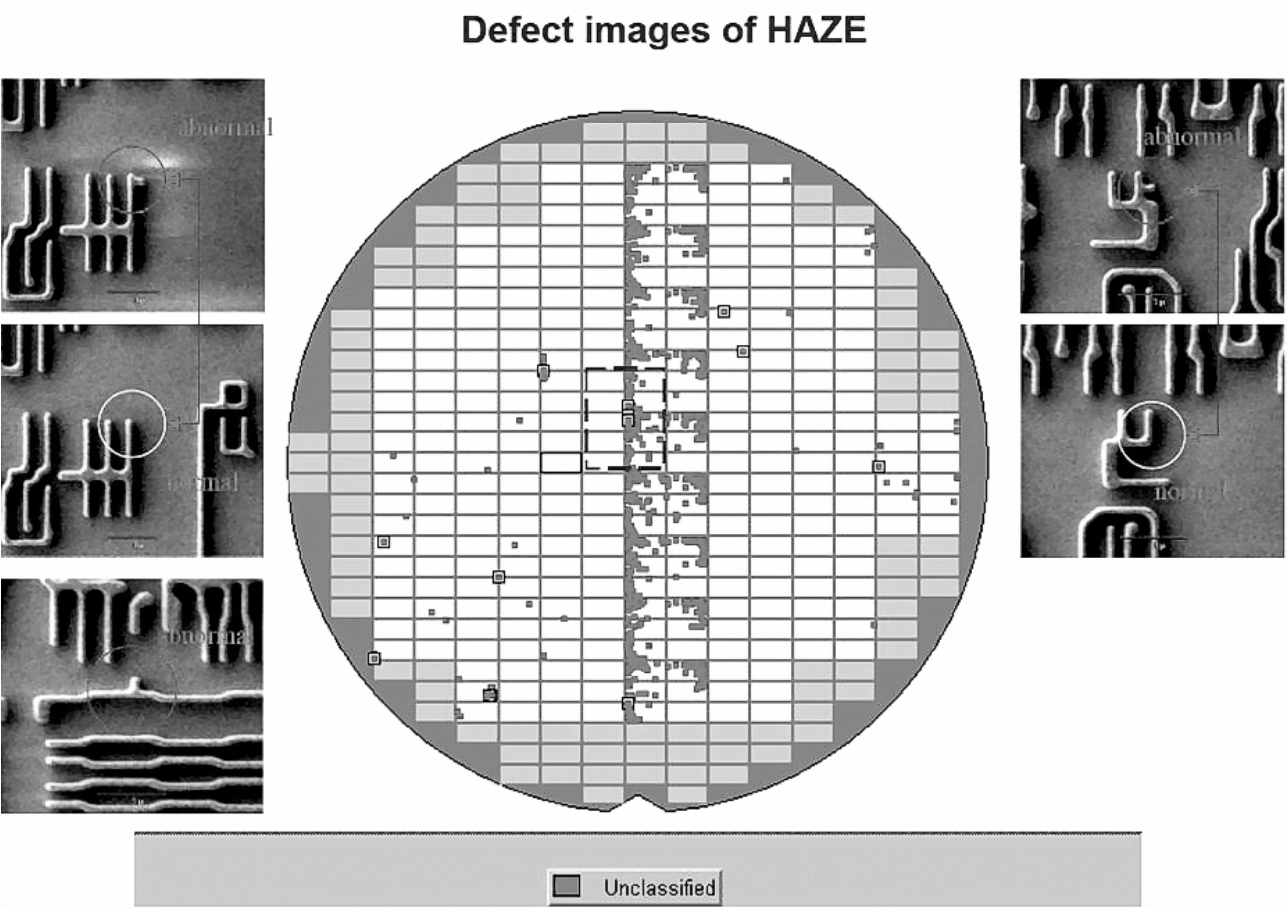


图 4 晶片 Haze 现象损坏

2 洁净室空气化学污染标准与控制方案

2.1 空气化学污染标准

对 AMC 浓度最普遍采用的参照值见“国际半导体技术指南”，2001(ITRS)，见表 4。

为满足高标准的技术要求、降低能源消耗及生产成本的需要，通常在大通间的洁净室（Ballroom）通过分隔设计形成局部的微环境，对于微型环境洁净度的要求，可达到更先进的净化标准，即从 ISO 2 级提升到 ISO 1 级；另一方面，对整个洁净室的洁净度可以被轻松的从目前的 ISO 6 级到 2012 年以后下降到 ISO 7 级，到 2019 年以后可下降至 ISO 8 级，这几乎已接近一般的居室环境。根据 ITRS 要求摘录相关标准在表 5 中。

表 4 ITRS 2001 AMC(pptM)

技术结点 DRAM	1995 250nm	2001 130nm	2002	2003 100nm	2004 90nm	2005 80nm	2006 70nm	2007	2010 45nm	2013 32nm	2016 22nm
光刻碱 NH ₃	1000	750	750	750	750	< 750	< 750	< 750	< 750	< 750	< 750
栅极 - 金属 Cu, E=2×10 ⁵		0.2	0.2	0.15	0.1	0.1	0.07	< 0.07	< 0.07	< 0.07	< 0.07
栅极 - 有机物 分子重 ≥ 250, E=1×10 ⁻³	1000	100	90	80	70	60	60	50	40	30	20
有机物 (-CH ₃)		1800	1620	1440	1260	1100	900	< 900	< 900	< 900	< 900
硅层触点 - 酸 (Cl, E=2×10 ⁻⁵)	180/50	10	10	10	10	10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
硅层触点 - 碱 (NH ₃ , E=2×10 ⁻⁶)	13000	20	16	12	10	8	4	< 4	< 4	< 4	< 4
杂质 (P 或 B)		< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

注：pptM 单位是物质克分子量的缩写，表示万亿分之一，克分子量是物质 6.022×10²³ 个分子的化学质量。

表 5 ITRS 洁净室整体与微环境洁净度与化学污染要求

年份	2005	2007	2010	2013	2015	2019
动态随机存储器半节距 /nm	80	65	45	28	24	17
临界颗粒尺寸 /nm	40	33	23	20	15.9	10
洁净室整体洁净度	-	ISO 6 级	ISO 6 级	-	ISO 7 级	ISO 8 级
微环境局部洁净度	-	ISO 2 级	ISO 1 级	-	ISO 1 级	ISO 1 级
微环境化学污染控制（在气相中）						
总酸（包含有机酸）	-	1000pptM	500pptM	-	500pptM	-
总碱	-	5000pptM	2500pptM	-	2500pptM	-
可凝聚有机物	-	3000pptM	2500pptM	-	2500pptM	-

2.2 微电子行业洁净室空气化学污染控制方案

在洁净室的 HVAC（Heating Ventilation Air-Conditioning）暖通空调系统中，包括新风机组 MAU（Make-Up Air Unit）和循环风机组 RHU（Recirculation Air Handling Unit）应配置合适的空气化学过滤器，在风机过滤单元 FFU（Filter Fan Unit）中配置化学过滤网以及专用化学过滤装置，以满足大环境、微环境中维持合格的空气质量。HVAC 系统图、MAU 及 FFU 分别如图 5~7^[10]。

3 控制空气化学污染的平台建设及实验验证

3.1 平台建设布局与构建

室外空气经由 16~20 个功能锻有机组合成的新风机组的四级过滤，处理新风中的悬浮粒子和空气

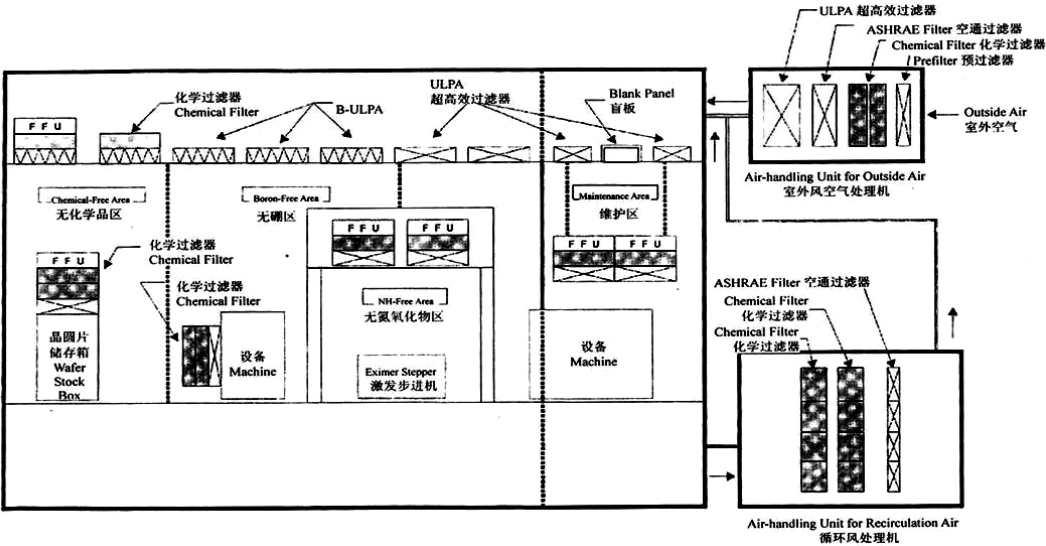


图 5 洁净室常见 HVAC 系统图

新风机组是该实施系统的首要关键设备。新风机组箱体结构的设计,在面板铝型材上插装隔热型材成为一体化铝塑型材,铝型材边带有凹凸槽,凹凸槽相互衔接时形成榫头,再通过螺栓紧固形成严密的迷宫式密封,见图 10,新风机组整机的制造,如图 11。平台构建完成如图 12~15。

3.2.2 洁净度测试结果

图6 控制空气化学污染新风机组全功能段示意

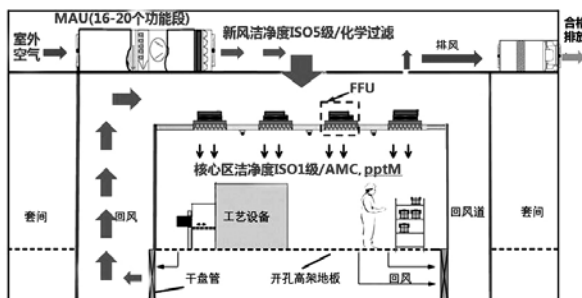


图 8 控制空气化学污染实施系统

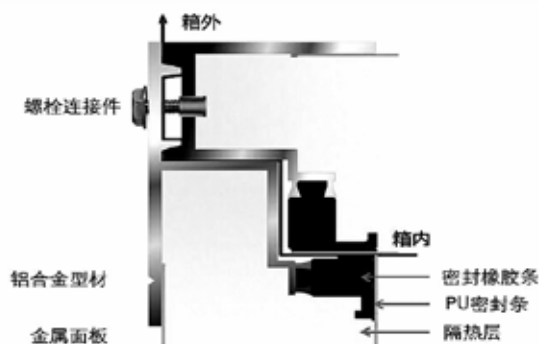


图 10 新风机组的箱体结构设计

核心区的空气化学污染物的测试结果如图 18 所示。

在洁净室核心区内酸性、碱性的分子污染物（主要是 SO_2 、 NO_2 、 NH_3 ）基本上已处于很低的水平，已达到仪器测量下限，空气化学污染控制措施起到了明显的作用。

本文概述了电子厂房洁净室空气化学污染控制的必要性、控制标准及方案。笔者所在单位研制出了电子厂房洁净室新风机组,并研究建成的空气化学污染实施平台是中国首例达到国际标准(ISO 1级, ISO 14644-1)超净空气环境设施,分别获得了2013年度中国机械工业科学技术奖二等奖和2015年度中国机械工业科学技术奖一等奖,并且主编了国家标准-洁净室及相关受控环境空气化学污染控制指南。

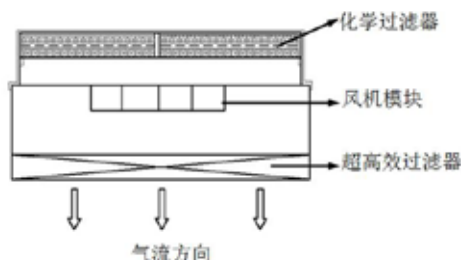


图 7 FFU 配化学滤网

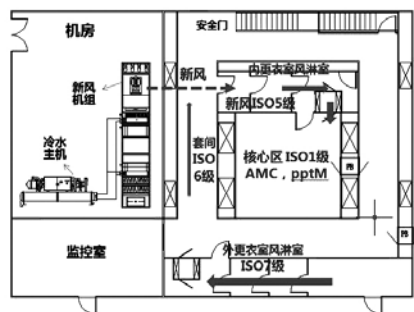


图9 平台平面布局



图 11 新风机组的制造, $100000\text{m}^3/\text{h}$, 全静压 -2500Pa



图 12 实施系统的外部及内部图

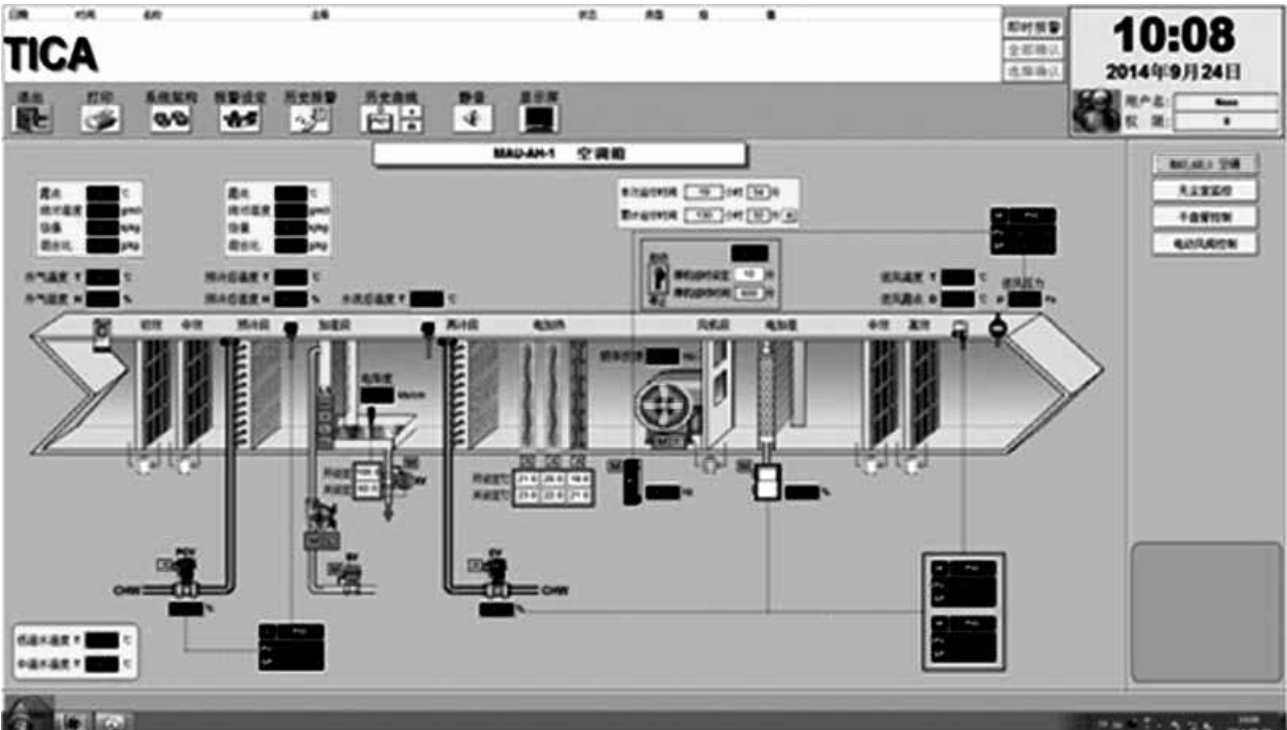


图 13 实施系统的空调自动监控软件

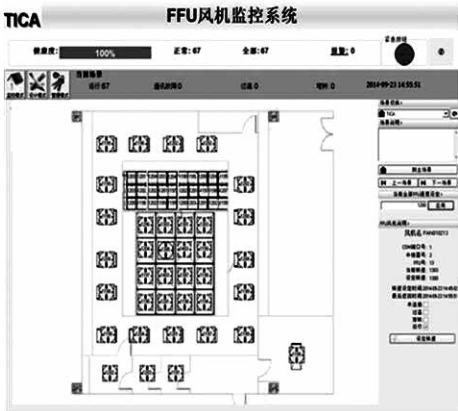


图 14 实施系统的FFU群控监测软件

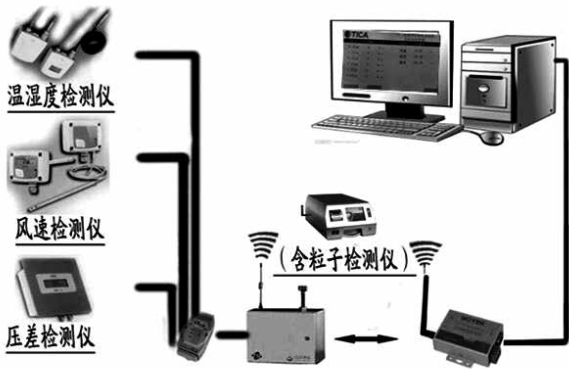


图 15 实施系统的在线粒子监测系统

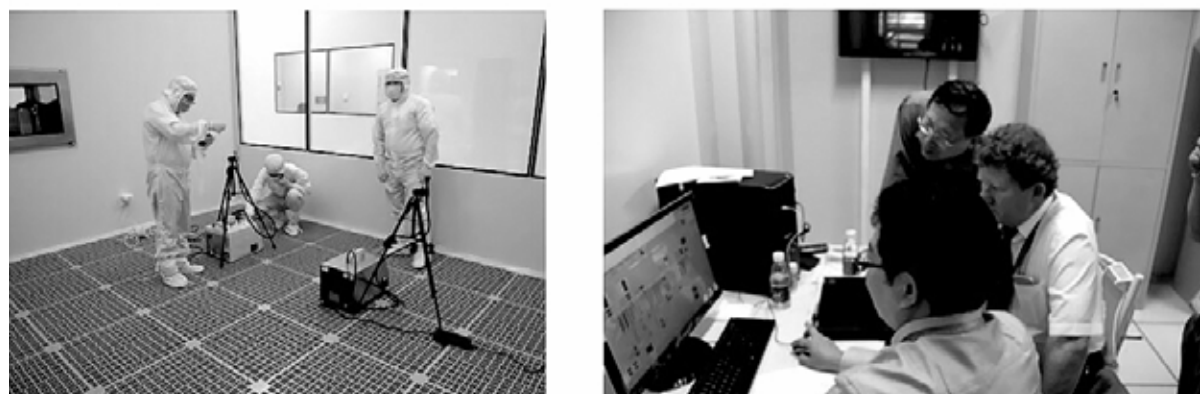


图 16 实验仪器及实验照片

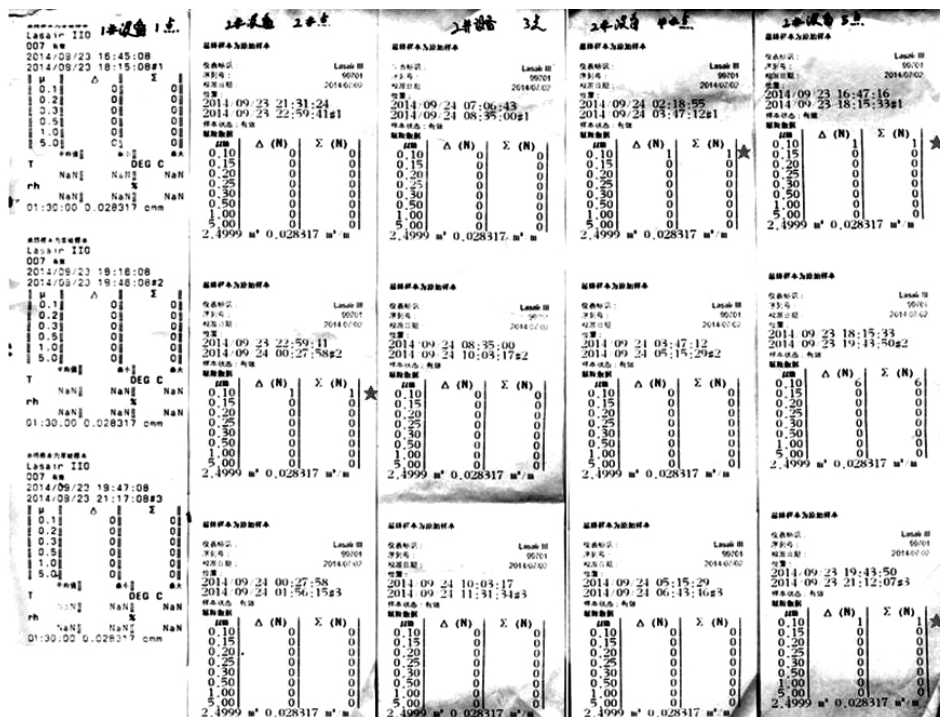


图 17 实施系统平台核心区的洁净度测试结果

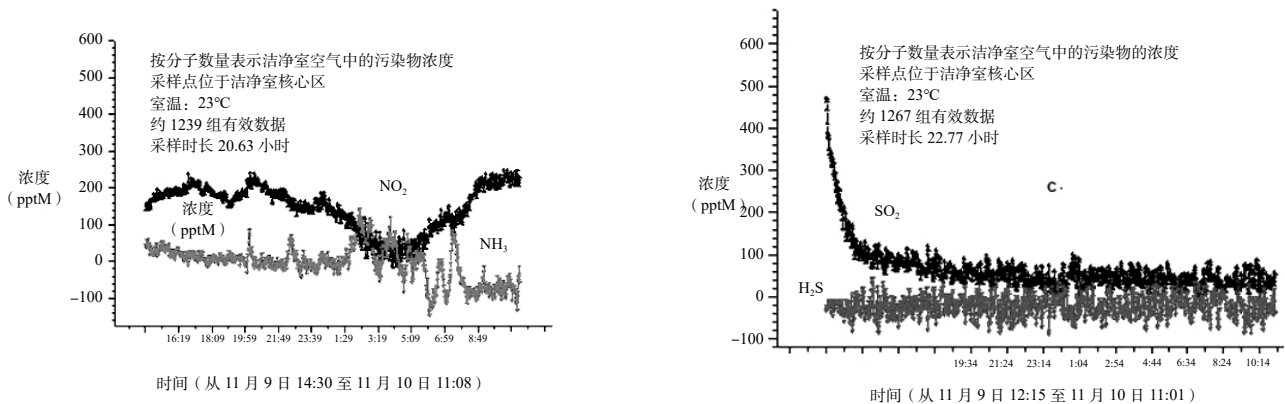


图 18 核心区酸性和碱性化学污染测试结果

在该集成系统, 可研究洁净度、空气化学污染、气流速度场、气流温度场、中温水系统、节能等课题, 研究成果对于实际项目的设计、运行具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] A.Tonti, Perspectives in environmental control for future integrated nano-electronics: devices, surfaces, development of clean processes, ICCCS 2004, Bonn/Germany.
- [2] 王龙兴. 全球集成电路的技术新进展和主要产品分析 [J]. 集成电路应用, 2019, 36(02).
- [3] 周婧博. 基于专利分析的极紫外光刻现状研究. 科技和产业, 2017, 17(11).
- [4] Klaus Kuemmerle, Airborne contamination control in clean room, ICCCS 2004, Bonn/Germany.

- [5] 刘媛娜, 谈 300mm 晶圆厂洁净室光刻区域环境中 NH₃ 和 SO₂ 的控制. 电子工业设备, Nov. 2006, 142.
- [6] 安志星, 白玉山. 空气化学污染探讨. 洁净与空调技术, 2010, 6(2).
- [7] 赵庆, 苏伟胜. 洁净室内化学气体污染物的分类及控制. 制冷与空调, 2009 年 8 月, 第 23 卷第 4 期, 91-96.
- [8] Bhattacharyya, "The case of the growing reticle defect at 193nm lithography", Yield Management Solutions, Summer 2003, 78-84.
- [9] 刘兴学, 郭志伟, 蔡春进, 等. 应用化学滤网去除某晶圆厂黄光区洁净室的氨气, 工业安全卫生月刊, 2008.3.
- [10] 洁净室及相关受控环境空气化学污染控制指南, GB/T 36306-2018.

生殖医学中心建设技术探讨

王海, 闫田, 李良华

(武汉华康世纪洁净室技术工程有限公司, 武汉 430205)

[摘要] 生殖中心建设目前除了《综合医院建筑技术规范》GB 51039-2014 和卫生部 2003 年颁布的《人类辅助生殖技术规范》有少量提及外, 没有针对性的设计、施工及验收要求, 对此, 本文结合以往生殖中心的建设经验, 对相关专业的要求及注意事项进行探讨。

[关键词] 生殖中心; 洁净技术; 胚胎培养

0 引言

根据国家卫健委数据, 截至 2018 年底, 中国经批准开展人类辅助生殖技术的医疗机构已达 497 家, 近年来, 每年人类辅助生殖各项技术类别总周期数超过 100 万, 出生婴儿数超过 30 万, 接待服务人群仍在持续增加, 可见建设高标准生殖中心也成为顺应需求的一个趋势, 但生殖中心建设不同于其他科室, 首先从就医对象看就诊患者不同于一般患者, 需要为他们营造温馨氛围, 体现生命之源的理念, 且需要保护患者隐私, 其次从生殖技术上需要有科学、合理的布局和工艺流程, 满足使用要求的洁净工程, 并具备可升级的灵活性。且生殖中心建设目前除了《综合医院建筑技术规范》GB 51039-2014 和卫生部 2003 年颁布的《人类辅助生殖技术规范》有少量提及外, 没有针对性的设计、施工及验收要求, 对此, 本文结合以往生殖中心的建设经验, 对相关专业的要求及注意事项进行探讨。

1 平面布局及选址

首先生殖中心的选址需注意 2 大点: 远离环境污染; 远离医源性污染。

其次平面设计时需严格按《卫生部关于修订人

类辅助生殖技术和人类精子库相关技术规范、标准及伦理原则的通知》, 保证项目校验通过。

主要场所面积要求:

(1) 超声室: 使用面积不小于 15m², 环境符合卫生部医疗场所 III 类标准;

(2) 取精室: 与精液处理室邻近, 使用面积不小于 5m², 并有洗手设备;

(3) 精液处理室: 使用面积不小于 10m²;

(4) 取卵室: 供 B 超介导下经阴道取卵用, 使用面积不小于 25m², 环境符合卫生部医疗场所 II 类标准;

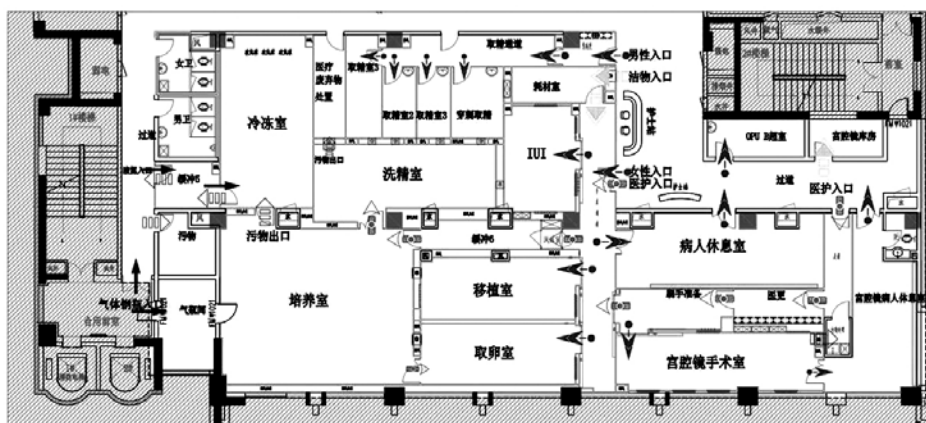
(5) 体外受精实验室: 使用面积不小于 30m², 并具备缓冲区。环境符合卫生部医疗场所 I 类标准, 建议设置空气净化层流室。胚胎操作区必须达到百级标准;

(6) 胚胎移植室: 使用面积不小于 15m², 环境符合卫生部医疗场所 II 类标准。

平面流程应按以下几大流程来考虑:

女患流程、男患流程、医护流程、洁物流程、污物流程、气瓶液氮罐流程 (图 1)。

原则上各功能室之间毗邻, 方便操作者交流和



图例说明:

洁物流线 污物流线 医护人员流线 病人流线 液氮及气体钢瓶流线

图 1

行走路线最短，以胚胎培养室为中心，其他功能室毗邻胚胎培养室分布。取精室紧邻精液处理室，注意隔音，保护患者隐私。工作站与胚胎移植室和取卵手术室传递窗临近。

其他注意事项如下：

- (1) 胚胎培养室需配备资料室；
- (2) 精液处理室采用狭长型，可方便对接多个取精室；
- (3) 辜穿室入口建议医患分流；
- (4) 胚胎培养室超净工作台需垂直于传递窗，方便医护人员操作；
- (5) 取卵及移植室床位需床尾朝向胚胎培养室，方便医护人员操作；
- (6) 实验室设备摆放，尽量减少热台和孵育箱两个区域的距离。

2 装饰装修

装饰主要在于材料的选择上，保证无有害气体释放、环保、防滑、阻燃、耐磨、抗静电、耐腐蚀、易清洁。

墙板选择上，选用抗菌面层的专用板材，保证面层不生锈、抗冲击性能优越、加工性能好、表面平整。

门体气密性好，门与地面设置密封条。其中手术室、移植室、取卵室、胚胎培养室的入口应设置自动气密封门。胚胎培养室与液氮存放间之间门体也宜采用自动门，方便工作人员使用。

墙地面以及墙顶面连接处采用圆弧过渡，易于清洁。

地面常用的材料为 PVC 卷材，其具备较好的抗菌、耐磨、抗酸碱特性，且环保不含甲醛，也可采用更优的橡胶卷材。但需注意考虑液氮的泄露对地面的腐蚀，冷冻储存室地面材质应具备抗冻、防滑、

易清洁特性，通常采用花纹不锈钢板。

取卵室、移植室的净化级别较高，可将器械柜、气体面盘、插座箱等墙面嵌入式安装处理，保证稳定的气流组织，避免室内存在死角，类似手术室的安装方式。

净化区与非净化区之间需要物品传递的应设置传递窗，移植室、取卵室与胚胎培养室之间应设置传递窗，并配置恒温装置。取精室的传递窗应设置成单向可视，保证病人的隐私性。

当胚胎培养室靠近外窗时，应设置合理的遮光措施，考虑布艺窗帘容易产尘，且其不宜清洗消毒，因此不建议在净化区设置布艺窗帘，通常采用双层玻璃中带可调百叶窗户，手动控制百叶角度，使用方便也有利于清洁消毒，保证室内洁净度。

3 净化空调

生殖中心净化区需考虑的技术指标包括洁净度、温度、相对湿度、静压差、换气次数、新风量、噪声、VOC 等，特别是胚胎培养室，其环境状态对成功率有极大的影响，因此生殖中心空调系统在达到要求的技术指标外，还应有较强的可靠性和安全性。

表 1 生殖中心净化区主要设计参数表

名称	净化级别	最小静压差	换气次数	新风量	噪声	温度	相对湿度
		相邻低级别洁净室	/(次/h)	/(次/h)	dB(A)	/℃	/%
胚胎培养室	千级	8	50~60	5	≤ 60	18~26	30~60
胚胎培养缓冲间	千级	5	50~60	5	≤ 60	18~26	≤ 65
冷冻间	万级	5	25~30	2~3	≤ 60	21~27	≤ 60
精液处理室	万级	5	25~30	3~4	≤ 60	21~25	30~60
移植室	万级	5	25~30	3~4	≤ 49	21~25	30~60
植入室	万级	5	25~30	3~4	≤ 49	21~25	30~60
洁净通道、辅房	十万级	5	15~20	2~3	≤ 60	21~27	≤ 60

3.1 系统配置

考虑实验室区与临床区的使用功能及工艺流程均有明显的区分范围，建议该两个区域的空调系统

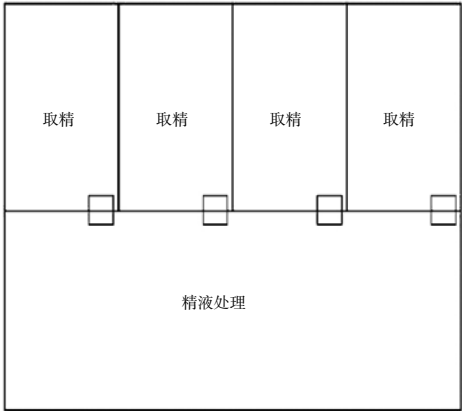


图 2 取精室与精液处理间的关系

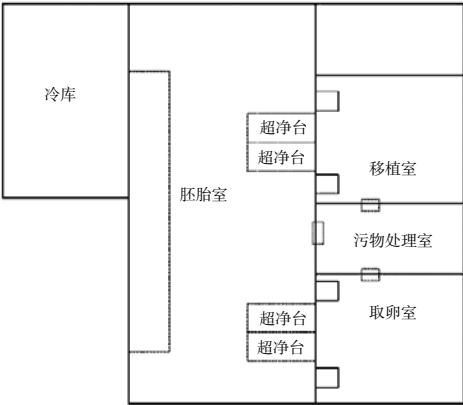


图 3 胚胎培养与移植室、取卵室的关系

分开配置,对于规模较大的生殖中心,胚胎培养室面积大,可独立配置空调系统,降低机组规格,避免噪声影响。同时胚胎培养室配置备用空调机组,确保其空调系统可不间断运行。因净化级别高,新风比相对较小,采用新风集中深度除湿处理,避免一次回风造成的严重冷热抵消,有效降低运行能耗。

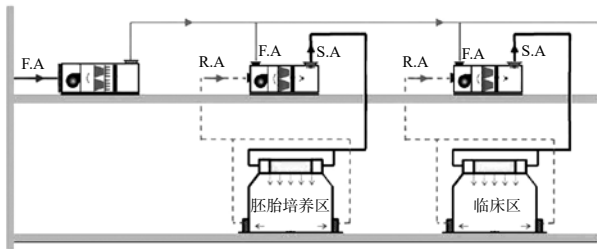


图4 集中新风深度除湿风系统示意图

3.2 气流组织

净化级别为万级和千级的房间应采用上送侧下回风,良好的气流组织有利于洁净度的控制。胚胎培养室的送风口应避免开培养箱布置,以免气流对胚胎培养造成影响。

3.3 冷热源配置

根据以往项目经验,生殖中心的温湿度控制主要存在以下问题,一是因冷热源与大楼共用,但生殖中心室内冷热负荷与普通区域不一致,导致室内不能到达要求的温湿度;二是采用的水系统供水温度过高导致的除湿能力不足,湿度失控;对此,建议采用如下方案,确保生殖中心特别是胚胎培养室的恒温恒湿安全可靠:

(1) 整个科室要求配置全年冷热源时,冷热源优先考虑采用氟系统。

(2) 当大楼提供冬夏季冷热源或要求采用水系统时,胚胎培养室所处的空调系统冷热源采用氟系统,集中新风处理机组采用水系统+氟盘管深度除湿。

(3) 胚胎培养室系统可配置独立的新风处理机组,其冷热源采用氟系统。

胚胎培养室空调系统控制面板设置于胚胎培养室内。

3.4 VOC 控制

特殊于其他净化空间要求,生殖中心对 VOC 的含量要求极为敏感,其不能通过高效过滤器阻隔去除,因此往往也是净化设计时忽略的问题,通常可在送风系统(机组或送风管道上)设置高锰酸钾或活性炭吸附装置,有效降低室内 VOC 含量,并配合室内空气质量监控系统,确保胚胎培养室内环境

满足要求。

表2 常用活性炭过滤器规格表:

型号	外形尺寸	去除效率	活性炭含量	压降 (Pa)@
	宽×高×深 (mm)	/%	/kg	风量 (m/h)
HACB-242412-4V	610×610×292	95	18	140@3600
HACB-241212-4V	610×305×292		8.5	150@1800
HACB-122412-2V	305×610×292		8.5	150@1800
HACB-121212-2V	305×305×292		4.2	160@900

3.5 排风系统

根据功能需求及保证整个系统风量平衡配置排风系统,排风风口应设置中效过滤器。冷冻间为防止液氮大量泄漏,需配置紧急排风系统,室内手动控制启停。

显微操作区域涉及高精度操作,应避免震动影响,因此,空调机组、室外机等空调设备应远离类似区域。

4 电气配置

生殖中心的电气技术配置包括照明、动力、信息采集、安全可靠等技术指标。

照明方面,普通照明、插座、等电位、空调配电等常规设计即可,但应考虑以下特殊配置:

(1) 受精卵在强光照射下容易被杀死,所以可将胚胎培养室一部分照明灯源采用色温较低的黄光灯源,或在墙面上设置亮度可调的壁灯,保证实验的成功率。若采用的壁灯为外凸式,壁灯安装高度要控制在 1.8m 以上。

(2) 因实验室通常除以低照明的环境下,可在墙面高度 0.3m 的合适位置设置地脚灯,方便工作人员行走。

(3) 每个取精室门口可设置“有人”、“无人”指示灯,切换开关放在房间内或与门锁连锁。

(4) 非净化的医疗相关房间建议设置紫外线消毒灯,且配置相应定时开关,在合适的时间由护理人员进行消毒操作,同时开关应安装在隐蔽位置,并设置明显的标识,防止误操作。

(5) 有治疗功能的房间至少应有 1 个灯具应有应急电源供电。

不间断电源:每台胚胎培养箱均必须配置一个 UPS 供电插座,适当预留部分备用,有条件的可采用一用一备。考虑培养箱需要有可靠的供电,建议一个 UPS 供电回路不超过 5 台培养箱,同时为保证整个夜间能不间断供电,UPS 电源容量应能保证持续供电 12h 以上。

弱电系统方面,网络、电话、门禁、监控、呼叫、背景音乐等常规设计考虑,胚胎培养室内需无死角监控,至少应对角放置摄像机;每台超净台宜预留一个网点备用;取精室壁挂电视布置一个网点;

PGD、胚胎培养、精液处理等功能房间预留足够网点。门禁建议配置指纹+虹膜识别。

实验室环境监控系统：对室内的温度、湿度、PM_{2.5}、氧气含量、二氧化碳含量、VOCs等实施监控，良好的实验室环境能最大限度维持胚胎发育潜能。

设备监控：培养箱、液氮罐、气体管道压力、UPS电量、断电报警等。

实验室核对系统：生殖技术涉及夫妇双方，必须要求安全保障，一一对应。因人工核对具有人员分心、注意力盲区、耗时长等缺点，建议配置电子核对系统，才能保证样本匹配无误。

5 医用气体

管道材质：二氧化碳、混合气、氮气管道可采用316L脱脂不锈钢管，考虑铜离子对胚胎发育有一定影响，因此不建议培养箱供气管道采用紫铜管。

终端设置：采用终端调压面板，面板含减压阀、压力表，应能独立调压，培养箱可以串联后连接到一个终端上，每4~6个培养箱配备一个终端。并考虑1~2个备用终端。

终端位置：当胚胎培养室面积较大，大多会设置中岛培养箱，气体和电气管线需从功能柱中穿下，功能柱上设置终端调压面板。也有部分培养箱靠墙设置，则相关终端应设置在对应墙面上。具体设置

方式应依据平面布局配置。

关于培养箱：目前多数医院采用的是cook（小培养箱）和thermo fisher（大培养箱），cook适用混合气终端，thermo fisher适用二氧化碳终端，超净工作台旁设置二氧化碳终端。另外，准备箱需配置氮气终端。所以，每个项目都应该了解培养箱的规格型号后再采用适用终端。

6 结语

高标准的生殖中心建设需从前端规划、设计做起，每一个生殖中心有相似之处，但从地理位置、平面布局、科室使用等来看均存在很多的不同，因此，需在设计时周全考虑，深入沟通，注重细节，才能为更好的建设生殖中心打下坚实基础。

参考文献

- [1] 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范（GB 500736-2012）. 中国建筑工业出版社. 2012.
- [2] 卫生部关于修订人类辅助生殖技术和人类精子库相关技术规范、标准及伦理原则的通知. 2003.
- [3] 方宏云. 浅议生殖医学中心设计. 中国医院建筑与装备. 2018-01-01.
- [4] 郝春雷. 北京大学第三医院医学生殖中心设计综述. 山西建筑. 中国医院建筑与装备. 2010-08-15.

复合手术室的环境控制探讨

刘燕敏¹, 何 焰², 陈 尹², 吕必金³, 陈 睿³

(1. 同济大学, 上海 200092; 2. 上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200041; 3. 克莱门特捷联制冷设备(上海)有限公司, 上海京 201419)

[摘 要] 分析了我国的洁净手术室的环境控制方法的优缺点, 鉴于复合手术室的特点与配置的多功能四管制热泵, 提出了可变新风量净化空调控制系统, 实施了手术环境的节能有效的控制。不需要技术夹层, 不需要在手术室上方设置空调机组、不需要将复杂的风、水、电管线引入技术夹层。对新风处理不需要超低温冷冻水, 不需要增设直膨式盘管。且保证在变新风量或变送风量节能运行期间, 维持手术室正压不变。该方法也适用于人员较为密集的其他医疗科室。

[关键词] 手术室; 手术环境; 控制方法; 可变新风量净化空调控制系统

0 引言

成像设备应用在手术室有很长的历史。早在 20 世纪 60 年代初, X 射线装置就安装在手术室天花上, 60 年代后期推出的移动 C 臂, 成为手术室成像的支柱。复合手术室概念在上世纪在 80 年代构思出来的。1983 年第一次成功进行经皮球囊瓣膜成形术治疗严重主动脉瓣狭窄后, 到 2002 年开始进行人体经导管主动脉瓣膜置换术。这需要一种将血管造影导管插入与心脏手术相结合的设施。越来越复杂的手术和介入方法需要更先进的成像, 并且要在手术床上术中术后成像和干预, 这样复合手术室(图 1)被定义为在同一场所、同一时段、在同一病患完成两种及以上亚专科的治疗方式的场所^[1]。尽管复合手术及其手术室设施昂贵, 但还是得到了稳步的发展, 近年来发展更快。目前, 复合手术应用到各个医学临床的领域, 满足多学科的需求, 广泛应用于胸心外科、神经外科、血管外科、肝胆外科等介入手术的治疗。德国最新颁布的 DIN 1946-4-2018《医疗建筑与用房通风空调》将复合手术室归类为可容纳大

型医学成像设备的 1 级手术室。并规定手术室的通风空调设施应满足该手术室内要进行的所有手术中最严格的手术环境控制。

复合手术室在我国的发展速度以及复合手术室的拥有量已经在世界上名列前茅。目前我国还有不少医院正在建设复合手术室。由于没有国内外相应的标准或规范, 这些复合手术室设计均参照我国 GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》(以下简称《规范》)推荐的湿度优先控制的方法, 即新风集中处理与各手术区循环机组组合的净化空调系统(图 2)。这一系统可以避免耗能的冷却除湿后再加热的空气处理过程, 又便于实现洁净手术部有序梯度压差的控制、以及各手术室有效控制与自行调节^[2], 有力地推动了我国洁净手术室的建设。

《规范》推荐的新风集中处理与各手术室循环机组组合的净化空调系统与英国的复合手术室的空调系统类似。英国采用新风集中处理, 承担全部热湿负荷, 各手术区上方设置净化循环机组, 不进行热湿处理仅作为自循环, 加大送风量以实现无尘无菌的层流送风。在我国, 不同于英国, 尤其东部地区, 春夏季室外不仅气温高而且含湿量高, 新风集中处理承担全部湿负荷, 除湿量大、机器露点低, 一般在 11℃ 左右, 使得冷水机组通常的 7℃ 冷冻出水难以达到, 造成在室外湿度大的时候手术室内湿度易超标。为此有的采用可产生低温冷冻水的特殊冷水机组, 但这些冷水机组的运行效率低。有的增加直膨式制冷机组, 将直膨式的蒸发器盘管加入在新风处理机组冷冻水盘管后部再次冷却除湿, 以达到所需的机器露点^[3], 但增加了能耗。有时为了避免过低的露点温度对室内环境控制造成负面影响, 不得不再加热。又为了节能去增添热管, 增加直膨式冷凝器盘管等措施进行再加热。系统越搞越复杂。



图 1 复合手术室实景

基金项目: 本论文由国家十三五重点研发计划项目“洁净空调厂房的节能设计与关键技术设备研究”(2018YFC0705205)资助。

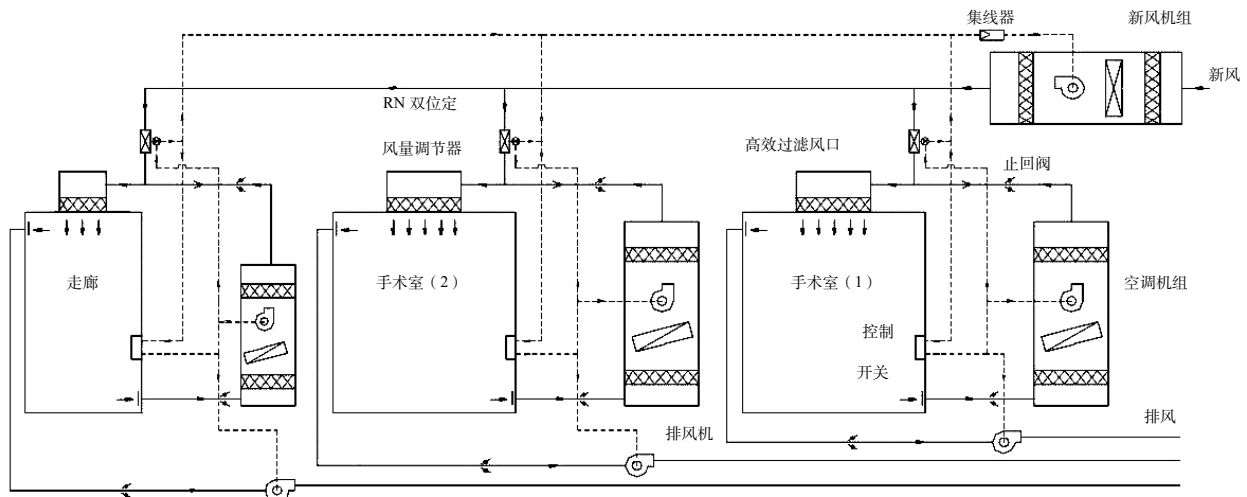


图2 《规范》推荐的净化空调系统

由于《规范》推荐的净化空调系统，涉及到新风集中处理机组、各手术室循环机组以及组合的净化空调系统，系统较多，空气处理过程又较为复杂，整个系统的性能与控制质量很大程度取决于工程公司及其施工管理人员的素质，这是造成目前洁净手术部良莠不齐的主要原因之一。

1 复合手术室环境控制特点

复合手术室不同于传统单间手术室。手术室面积大，要求单边不小于7.32m，面积不小于60.39m²，最大可以达到200多m²。复合手术室内人员多，一般由8到10名不同学科的人组成的团队工作，不同学科人员论替，进出频繁。复合手术室内热湿负荷大，手术时间长，手术团队常感到气闷。期望能在室外气候合适的时候增加新风量供给，提高室内的空气品质。

通常来说洁净室系统变新风量是个大忌，会破坏整个洁净区域有序梯度压差分布。《规范》推荐的净化空调系统，因其集中处理的新风量是固定的，难以在气候合适的时候增加新风量。即使能变新风量运行，各间手术室内独立的排风量还需做相应变化，以维持各手术室压力、乃至整个手术部有序梯度压差不变，增加手术部控制难度。至少无法满足复合手术室变新风量最佳运行的要求。

复合手术室面积较大，往往要求独立运行。要在复合手术室上方设置大面积技术夹层，集中布置循环机组、新风机组及其相应的风、水、电等多种复杂管线，难度较大。

近年来，我国医院洁净手术部的冷热源大多配置了多功能四管制热泵，可同时供热供冷。不仅提供空调系统所需的冷热水，而且还可供给生活用水。对于多功能四管制热泵来说，最大的节能效益在于

充分利用其供给的冷冻水与热水。但是对于《规范》推荐的净化空调系统来说，多功能四管制热泵产生的热量在夏季用不掉，不得不排放到大气，降低了运行效率。

综上所述，《规范》推荐的净化空调系统对复合手术室环境控制显现出不足，对此有必要研究一种合理可行、控制简单有效、节能降耗的手术环境控制系统。

2 探讨复合手术室环境控制系统

针对目前洁净手术部配置的多功能四管制热泵的冷热源与复合手术室的特点，本文提出的可变新风量净化空调系统是个较为合理的手术环境控制方案。

可变新风量净化空调系统采用一台集中式全空气空调机组，不同于新风集中处理与各手术室循环机组组合的半集中式净化空调系统，系统中所有的热湿处理部件及其控制部件全都集中在一个机组，机组质量完全可由工厂生产全过程完善控制，并将复合手术室全年运行的控制逻辑下载到PLC的控制器里，由机组自带。由于是集中式全空气空调机组，对于复合手术室实体来说，机组运至手术室附近配置，接上相应管线即可运行，因此无需在手术室上方设置一层技术夹层，不需要在手术室上方设置多种机组，也不需要复杂的将风、水、电管线引入技术夹层，避免水损、降低了造价、减少施工时间，也改善了手术室的噪声水平。将工程与工程质量交给工厂，实现规模化生产是一个发展趋势^[4]。大大降低对工程公司与施工经理素质的要求。由此可见，可变新风量净化空调机组设计与制造质量成为手术环境控制成功的关键。两者的差别反映表1。

可变新风量净化空调机组要实现变新风量，较

表 1 可变新风量净化空调系统与《规范》推荐净化空调系统的比较

项目	《规范》推荐的净化空调系统	可变新风量净化空调系统
系统形式	半集中式空调系统	集中式全空气空调系统
系统涉及的机组与管线	新风机组、循环机组，相应的风、水、电管线复杂	1 台空调机组，只需连接手术室实体的送风管和回风管
工程质量	取决于工程施工与监理	可由生产厂全过程控制
新风量供给	全年固定新风量供给	随气候状态变化新风量供给
空调热湿处理	空气处理方式较为复杂，新风处理的机器露点低，再加热很小	空气处理方式简单，处理的机器露点高，再加热很大
排风	独立排风	系统排风
关键控制点	新风机组的机器露点控制	空调机组的机器露点控制
系统控制	施工时安装设置后再系统调试	机组自带 PLC 控制器

为理想是双风机机组模式（见图 3）。不同于舒适性变风量空调机组，必须同时考虑室外的焓值变化和颗粒物浓度的变化，实现最佳运行也是个难题。本机组自带的 PLC 基于文献 [5]，计算出合适的气候条件下加大新风量，尽可能利用新风自然冷源降低能耗。但传统的双风机空调机组在变新风量过程中难以同时准确控制排风量与循环风量，常常造成室内压力失控。要实时精确控制这三者的风量，传统的风阀结构与调节方法无法胜任。另外，手术过程中频繁启停不同的手术装备，室内热湿负荷变化较快，要实时准确控制机器露点、及时精确补偿大容量的再加热，也是个困扰的难题。这些均是传统变新风量空调机组难以在医院科室推广应用的主要原因。



图 3 集中式全空气空调机组

3 新型的复合手术室可变新风量净化空调机组

本文提出的可变新风量净化空调机组（见图 4）由送风机组 18 与回风机组 2 组成。送风机组的送风机 8 配置了变频器与静压传感器，在送风机 8 的进风侧设置压力无关新风风量调节阀 5、粗效过滤器 6。在其送风侧依次设置：均流装置 10、中效过滤器 12、制冷盘管 15，加热盘管 16，加湿器 17 等部件。回风机组 2 的回风风机配置变频器与静压传感器，在其进风侧设置回风阀 1，出风侧设置压力无关排风风量调节阀 4 以及压力无关循环风量调节阀 3，循环风量调节阀 3 与送风机组 18 相通。为避免空调机组带水或积水，将热湿处理部件设置在正压段，断面风速不大于 2m/s。

新风过滤机组 13 作为选配部件，只有当地有可能出现大气污染，如 PM_{2.5} 超标的雾霾天才选用。新风过滤机组的进风侧设置粗效过滤器 14，出风侧设置高中效过滤器 11。通常，新风管上的电动风阀 7 常开，新风电动阀 9 常闭。只有在大气污染时，开启新风过滤机组 13，打开新风电动阀 9，关闭新风管上的电动风阀 7 进行工况切换。

我国雾霾天气大多发生在冬末春初期间，可根据当地的大气状态配置新风过滤机组。随着我国大气污染治理力度加大，雾霾天气发生频率越来越少、持续时间越来越短。越来越多的地区可变新风量净化空调机组的新风入口没有必要常年配置冗余的空

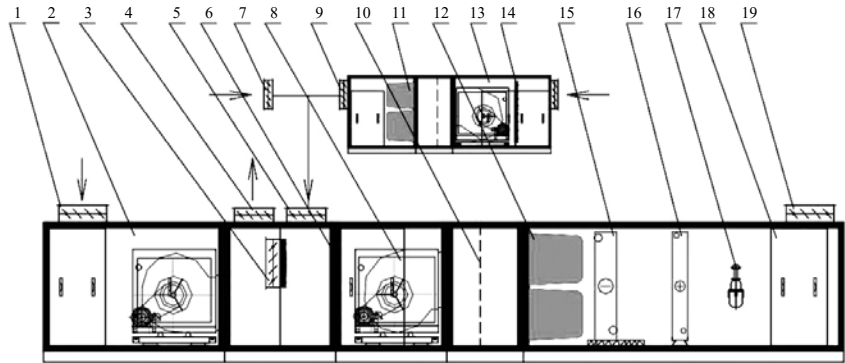


图 4 可变新风量净化空调机组

气过滤设施,增加运行能耗。

传统双风机空调机组造成的“手术室送回风量与房间压力失控”,主要涉及到风阀自身性能与控制系统两大问题。因为普通调节风阀是压力有关型,即管道压力波动会影响风量的控制。其次,风量调节靠阀门开度,如过去常用风阀连杆控制三个风阀的风量,难以精确控制或调节风量。本文提出的可变新风量净化空调机组的新风阀、回风阀与排风阀采用了与压力无关的文丘里控制阀,以及独特的 PLC 控制系统。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,在调节新风量 QF 的过程中,由静压传感器保证了送、回风量不变。PLC 按下式算式相应计算出循环风量 QC 与排风量 QE 的数值,然后直接对新风风量阀、循环风量风量阀与排风量风量阀进行数值控制,精确维持差值风量 $Q\Delta$ 不变,保持了手术室内正压稳定。

$$\text{循环风量 } QC = \text{送风量 } QS - \text{新风量 } QF \quad (1)$$

$$\text{排风量 } QE = \text{新风量 } QF - \text{差值风量 } Q\Delta \quad (2)$$

可变新风量净化空调机组的空气处理过程采用了简单有效的一次回风冷却除湿后再加热,这种恒温恒湿控制措施由于先用大量冷量冷却除湿后,再消耗大量的再加热量,达到控制状态点,这种冷热抵消通常被认为是极为耗能的。如果再加热量是充分利用配置的多功能四管制热泵在制冷过程中同时产生的大量热量,这种空气处理过程不应再被认为是耗能,而应该视为节能减排^[7]。由于一次回风冷却除湿后再加热处理系统大大提高了机器露点,无需在机组内加装直膨式制冷机组,或低温冷冻水的特殊冷水机组,降低了整个系统的运行能耗,而且使室内状态控制简便、有效、稳定。

至于手术过程中频繁启停不同的手术装备,启停对室内热负荷影响很大,使得室内热湿比变化较快。本机组采用的水盘管快速响应水阀执行器与 PLC 控制实现了实时准确控制机器露点,及快速补偿再加热量,以维持室内恒温恒湿,避免了现有手术室常出现的湿度超标的现象。

复合手术以微创手术为主。早期手术大多采用气体麻醉,麻醉余气释放量较大,需独立排风。如今气体麻醉使用案例越来越少,即使气体麻醉,自带的排气装置的性能也越来越好,使得麻醉余气逸漏量很少。因此可变新风量净化空调机组采用集中回风,在回风机组内排风(即系统排风)。不会影响手术室内空气品质,避免了在手术室内设置独立排风系统。而且在变新风量工况时,更容易使排风

量作相应变化,以保持稳定的差值风量。

可变新风量净化空调机组也可根据实施室内手术类型对手术环境的要求,通过送风机的变频器直接改变送入室内的总送风量,或按设定的洁净度级别改变各手术区特定的非诱导送风装置^[6]的送风量,或仅向个别需要实施手术的手术区送风,其他手术区不送风,同时通过 PLC 系统控制回风机的变频器设定的相应回风量,以及新风量、循环风量与排风量,保证室内正压不变,降低了手术室的运行能耗。

4 结论

我国《规范》推荐的湿度优先控制的方法,避免了传统的恒温恒湿控制中再加热的耗能弊病,便于洁净手术部各手术室独立控制与自行调节,以及有序梯度压差控制,有力地推动了我国洁净手术室的建设和发展。

鉴于目前洁净手术部普遍配置的多功能四管制热泵所产的热水量富余,以及复合手术室面积大,人员多,进出频繁,手术时间长,对空气品质要求高,通常独立配置净化空调机组。本文提出了基于可变新风量净化空调机组的集中式全空气系统,由送风机组、回风机组、可以选配的新风机组以及 PLC 控制系统所集成。机组自带的 PLC 控制器可实时控制送风机组、回风机组以及可以选配的新风机组最佳运行。无论运行工况如何变化可始终保持新风与排风间差值风量的恒定控制。能在变新风量节能运行期间,维持手术室总送风量与正压不变。即使通过变频减少送风量来改变手术区洁净度级别,仍可维持正压不变。机组对被调空气采用一次回风再加热的空气处理过程,不仅保证了恒温恒湿,更有效地控制了手术环境。而且消耗富余的热水量,充分利用了多功能四管制热泵的冷热水就是最大的节能减排^[7]。

可变新风量净化空调机组不需要超低温冷冻水,不需要在机组中增设直膨式盘管,不需要技术夹层,不需要在手术室上方设置净化空调机组、不需要将风、水、电管线引入技术夹层,构成复杂的管线系统。机组可以设置复合手术室附近,只要将机组的送、回风管与设置在复合手术室内各手术区上方的送风装置以及室内回风口相连通,即可运行,十分简便。本可变新风量净化空调机组已申请了专利,已由克萊门特捷联制冷设备(上海)有限公司批量生产。

可变新风量净化空调机组也适用于人员较为密集的医疗科室,如医院中洁净手术室,重症监护病房 ICU,门急诊大厅,输液大厅等场所。

参考文献

[1] 沈晋明,俞卫刚. 手术室建设发展趋势与对策 [J].

中国医院建筑与装备,2012(10):30-33.

[2] 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.

[3] 朱青青,沈晋明,陆文. 用于湿度优先控制的新型新风机组 [J]. 制冷技术,2008(3):36-40.

[4] 沈晋明,李洪欣. 集中式全空气空调系统该如何发展 [J]. 暖通空调,2007,37(5):61-64.

[5] 刘初名,刘燕敏. 洁净手术室变新风运行经济性

分析初探 [J]. 暖通空调,2014,44(增刊 1):87-91.

[6] 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.

[7] 罗伟涛,沈晋明. 医院节能与冷热源新技术 [J]. 中国医院建筑与装备,2007(7):26-29.

褶皱型空气过滤介质结构参数对其压力损失影响的规律研究

朱景晶, 钱付平, 叶蒙蒙, 魏 民, 韩云龙, 鲁进利

(安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽马鞍山 243032)

[摘 要] 构建 52 个褶皱型空气过滤介质微观物理模型及 6 个宏观物理模型, 共计设计 285 种工况, 对褶皱型空气过滤介质的压力损失进行计算流体动力学 (CFD) 分析, 探究结构参数与压力损失之间的数学关系, 得到了具有实际应用价值的褶皱型空气过滤介质压力损失的数学模型。所得数学模型同实验数据进行对比发现, 最大处误差不超过 8%。同时, 分析讨论了褶皱型空气过滤介质结构参数对内部流场的影响, 结果表明孔隙率 ε 、褶尖角 θ 、褶高 h 等均与介质两端压力损失存在明显的数学关系; 褶尖角区域在过滤过程中发挥的作用有限, 但是有效过滤体积会随着褶尖角的增大而增大。褶皱型空气过滤介质本身存在最优结构使得压力损失最小。本研究对褶皱型空气过滤介质的理论研究及结构优化研究具有重要的参考价值和指导意义。

[关键词] 褶皱型空气过滤介质; 压力损失; 数学模型; CFD

0 引言

褶皱型空气过滤介质相对于平板型过滤介质来说过滤面积更大、过滤效率更高、所占空间更小, 但是, 其内部流场也更加复杂。因此, 平板型空气过滤介质的研究相对已经成熟, 而对于褶皱型空气过滤介质来说, 具有直接利用价值的研究成果相对较少。在褶皱型空气过滤介质研究的早期, 研究者会基于单纤维理论对压力损失展开研究。早在 1959 年, Kuwabara 和 Happel^[1,2] 就采用胞壳模型对单纤维过滤性能进行了预测, 获得可被接受的预测值, 认为气流函数可以用斯托克斯近似值来表示。1856 年法国工程师 Darcy 提出了著名的达西定律^[3], 有研究者将达西定律应用在空气过滤介质研究当中。在达西定律的应用过程中, 无量纲压力损失关联式成为研究者们关注的重点。Davies^[4] 提出了预测平板型空气过滤介质无量纲压力损失的重要关联式。Banks^[5] 则基于 Davies 的研究成果, 结合单纤维理论, 考虑了纤维轴向与气流方向的夹角 (非零), 将达西定律成功的引入到褶皱型空气过滤介质的研究当中, 得出应用范围更广的无量纲压力表达式, 可用于洁净过滤阶段褶皱型空气过滤介质的压力损失计算。目前, 褶皱型空气过滤介质的理论研究仍在继续, 研究者们致力于简化数学模型形式, 研究重点转移到褶皱型空气过滤介质结构参数与压力损失的关系上来。Fabbro 等^[6] 得到了由结构参数构成的表达式。付海明等^[7] 通过理论分析认为压力损失可以拆分计算。查文娟等^[8] 基于响应曲面法分析了不同褶高、褶间距和过滤风速对褶皱滤芯阻力的影响并得到预测模

型。Saleh 等^[9] 通过对褶皱型空气过滤介质的结构分析, 导出关于压力损失的表达式, 可用于褶皱型空气过滤介质的结构设计。Félicie 等^[10] 研究了不同的褶结构对纤维表面速度场的影响, 进而分析了褶的结构参数对压力损失的影响。Li 等^[11] 则对褶皱型空气过滤介质的有效过滤面积进行了讨论, 并力求建立一个有效的数学模型来描述褶的结构参数与压力损失之间的关系。

目前, 褶皱型空气过滤介质因其结构及流场较为复杂, 理论研究成果太过繁杂, 实用性不强。同时, 由于实验的局限性, 褶皱型空气过滤介质内部流动机理研究成果不多, 关于其结构的优化大多只是停留在宏观层面, 如褶高与褶开口距的比例优化、褶数的优化等^[12-15]。本研究通过对褶皱型空气过滤介质的多尺度研究, 研究洁净过滤状态下介质主要结构参数与压力损失之间的数学关系, 力求得到一个具有实际应用价值的数学模型。通过对微观尺度下褶皱型空气过滤介质内部流场的分析, 提出了有效过滤体积的概念来解释褶皱型空气过滤介质的宏观表现, 并借此为褶皱型空气介质的结构优化与应用提供理论支持和指导。

1 褶皱型过滤介质的经验理论及数值计算

1.1 达西定律

达西定律 (Darcy's law)^[3] 可用于描述低速层流状态下流体流经多孔介质时渗流速度与压力损失之间的关系, 又称线性渗流定律。1856 年由法国工程师达西通过实验总结得到。目前, 工程界普遍认为达西定律只适用层流状态流体, 而本研究所有工况均属于层流, 因此可以依据达西定律进行相关研究。1852~1855 年, 达西进行了水通过饱和砂的

基金项目: 安徽省科技重大专项 (18030801109)。

实验研究,发现了渗流量 Q 与上下游水头差 (h_2-h_1) 和垂直于水流方向的截面积 A 成正比,而与渗流厚度 t 成反比关系,即:

$$Q = \frac{K \cdot A \cdot (h_2 - h_1)}{t} \quad (1)$$

其中: K 为渗透率。

同时,由流体力学基本规律可知,通过某一断面的流量 Q 等于流速 u 与过水断面 A 的乘积,即:

$$Q = A \cdot u \quad (2)$$

由上述式 (1) 和式 (2) 可以得到:

$$ut = K(h_2 - h_1) \quad (3)$$

其中: 渗透率 K 只取决于渗流材料系统自身的结构特性和流体自身特性两种因素。因此,将上述公式应用在褶皱型空气过滤介质的研究中,此处可以将介质两端压力损失 Δp 定义为:

$$\Delta p = f_1(s, l) \cdot ut \quad (4)$$

其中: $f_1(s, l)$ 表示结构特性与流体特性对介质两端压力损失的影响。本文正是对于褶皱型空气过滤介质的结构参数以及流体特性参数与压力损失之间的关系展开研究。

对于一维低速流动, $f_1(s, l)$ 对介质两端压力损失的影响主要是粘性阻力产生影响,粘性阻力可以表示为^[16]:

$$\alpha = \frac{\Delta p}{\mu ut} \quad (5)$$

其中: α 为粘性阻力系数, μ 动力粘度。

同时,褶皱型空气过滤介质的阻力也可以拆分为结构阻力和流动阻力两部分来表示,其两端压力损失也可以由结构阻力造成压力损失 Δp_s 和由流动阻力造成压力损失 Δp_l 来表示^[7],即:

$$\Delta p = \Delta p_s + \Delta p_l \quad (6)$$

其中,影响多孔介质结构特性的主要结构参数有介质总体积 V , 孔隙率 ε 、介质厚度 t 、褶尖角 θ ; 影响介质特性主要为流体密度 ρ 。

结合 (4)、(5) 与 (6) 式可以推出介质两端压力损失与各结构参数之间的关系为:

$$\frac{\Delta p}{\mu ut} = f_2(s) + f_3(l) = f_2(V, \varepsilon, \theta) + f_3(\rho) \quad (7)$$

因此,褶皱型空气过滤介质的压力损失可表示为:

$$\Delta p = F(V, \mu, u, t, \varepsilon, \theta, \rho) \quad (8)$$

即,褶皱型空气过滤介质的压力损失可表达为体

积 V , 动力粘度 μ , 流速 u , 介质厚度 t , 孔隙率 ε 、褶尖角 θ 、流体密度 ρ 等因素的函数^[7]。

1.2 数值计算

本研究为确定褶皱型空气过滤介质各参数与压力损失之间的数学关系,建立了微米尺度的微观拟态化模型;为将数学关系推广至宏观尺度,同时还建立了宏观尺度的数值计算模型。

微观尺度层面,为了使建立的模型更加接近真实纤维滤料的结构,本研究结合编程软件 Matlab 与 CFD 前处理软件重建出褶皱型空气维过滤介质的三维微观拟态化模型,如图 1 (a), (b) 所示^[17],重建的三维模型与真实滤料结构相似,从而为基于微观结构模拟计算纤维过滤介质的过滤性能奠定了重要基础。

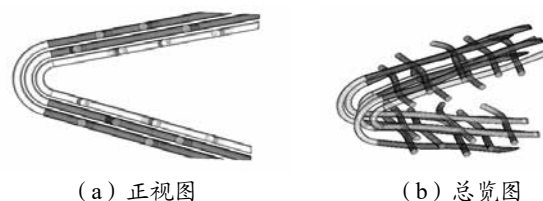


图 1 褶皱型空气维过滤介质三维微观拟态化模型

宏观尺度层面,本研究参考真实褶皱型纤维滤材,建立 V 型单褶宏观模型。

图 2 为单褶的三维结构模型。

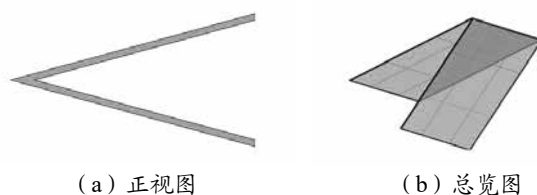


图 2 褶皱式滤芯单褶的三维结构模型

因为微尺度物理模型结构尺寸相对于宏观尺度结构来说相差 100 倍以上,因此可以认为微观尺度物理模型为宏观尺度模型的一个体积单元。

为研究褶皱型空气过滤介质结构参数与压力损失之间的关系,在洁净过滤阶段对微米尺度的微观拟态化模型进行 CFD 计算。计算模型区域示意图及部分相关尺寸如图 3 所示。为保证进出口断面气流的均匀性,计算域上下游长度各取 $100\mu\text{m}$ 的流体区域;计算区域四周的边界则根据纤维滤料结构特点设为对称边界条件;纤维表面边界设置为无滑移固壁边界条件;

本次研究参考实际情况,以褶皱型空气过滤介质的褶尖角 θ (1° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 45° 、 50° 、 55° 、 60°) 与孔隙率 ε (75% 、 80% 、 85% 、 90%) 为变量,共建立 52 个微观模型,

改变迎面风速 u (0.4m/s、0.6m/s、0.8m/s、1.0m/s、1.2m/s) 对上述 52 个模型在洁净过滤状态下进行仿真模拟, 共计 $13 \times 4 \times 5 = 260$ 种工况, 研究不同结构条件下迎面风速与介质两端压力损失之间的关系。

为研究介质体积对两端压力损失的影响, 在洁净过滤阶段对宏观尺度的结构模型进行 CFD 模拟。计算模型区域示意图及部分相关尺寸如图 4 所示。为保证进出口断面气流的均匀性, 计算域上下游长度各取 50mm 的流体区域; 计算区域四周的边界则根据褶皱型滤料结构特点设为对称边界条件; 过滤介质内部设为多孔区域 (porous zone) 模型。

本次研究参考实际工程情况, 以褶皱型空气过滤介质的褶皱高 h (20mm、40mm、60mm、80mm、100mm) 为变量, 其它结构参数保持一致, 共计建立 5 个宏观模型, 改变迎面风速 u (0.4m/s、0.6m/s、0.8m/s、1.0m/s、1.2m/s) 对上述 5 个模型在洁净过滤状态下进行数值模拟, 共计 25 种工况, 研究不同褶皱高条件下迎面风速与介质两端压力损失之间的关系。

2 分析与讨论

2.1 压力损失数学模型

通过微观尺度模拟, 采用控制变量法对得到的 260 组数据进行分析, 发现各结构参数对过滤介质的

压力损失都有着较为明显的数学关系。在低速条件下, 压力损失随着迎面风速的增加而线性增加, 改变介质孔隙率得到了一致的结论, 如图 5 所示。并且低速条件下, 介质孔隙率与压力损失也呈现较为明显的线性关系, 压力损失随孔隙率的增大而减小, 以褶皱尖角为 15° 时的模型为例, 数据趋势如图 6 所示。压力损失与孔隙率的线性关系证明本研究取局部纤维进行拟态化建模, 进行周期性研究是合理的。

基于 1stopt 软件处理上述 260 组数据由微观尺度模拟得到的数据, 以合适的公式形式, 采用麦夸特法 (Levenberg-Marquardt) 和通用全局法对数学模型进行优化得到褶皱型空气过滤介质洁净过滤状态下单位体积内的压力损失计算公式:

$$\frac{\Delta p}{\mu u^{1.05}} = (98244516\epsilon^3 - 266633056\epsilon^2 + 245503083\epsilon - 77118033)(-8349\sin^{-0.2}\theta - 7866\cos^{48}\theta) + \rho^2 \quad (9)$$

此处, 定义

$$f(\epsilon) = 98244516\epsilon^3 - 266633056\epsilon^2 + 245503083\epsilon - 77118033 \quad (10)$$

$$f(\theta) = -8349\sin^{-0.2}\theta - 7866\cos^{48}\theta \quad (11)$$

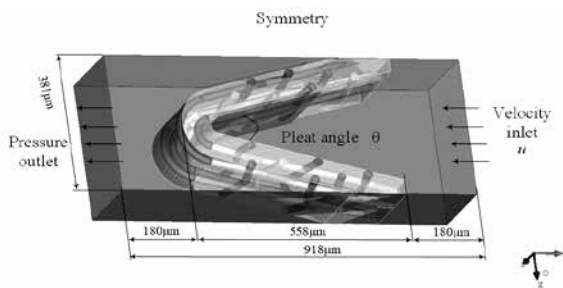


图3 褶皱型空气过滤介质微观模型边界条件

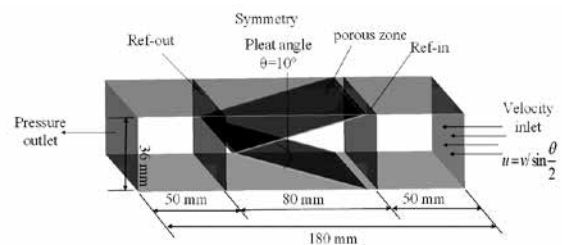


图4 褶皱型空气过滤介质宏观模型边界条件

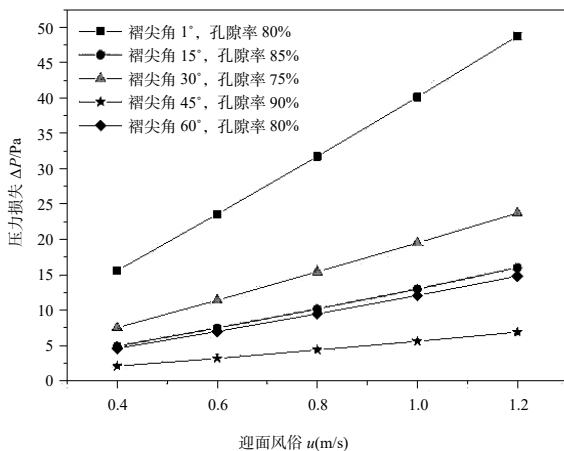


图5 迎面风速与压力损失关系图

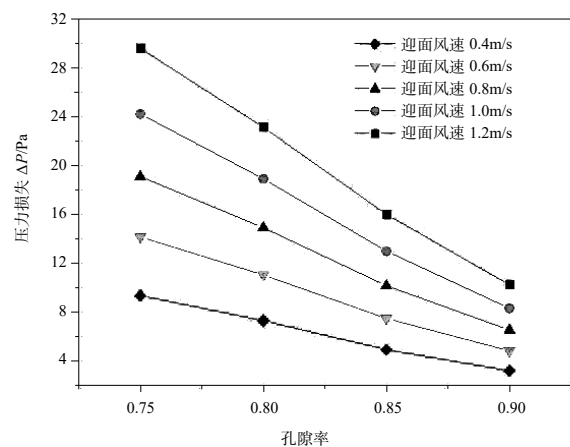


图6 孔隙率与压力损失关系图

$$f(\rho) = \rho^2 \quad (12)$$

$$u' = u^{1.05} \quad (13)$$

则有:

$$\frac{\Delta p}{\mu u'} = f(\varepsilon)f(\theta) + f(\rho) \quad (14)$$

褶皱型空气过滤介质在褶尖角 θ 和褶厚 t 确定的前提下, 褶高 h 可以决定整个褶皱型空气过滤介质的体积。因此, 数学关系向宏观尺度的推广, 即确定体积 V 对压力损失的影响研究可以转化为褶高 h 与介质两端压力损失之间的关系研究。宏观尺度仿真结果表明, 在迎面风速一定的情况下, 随着褶高的增加, 压力损失先增大后减小, 之后趋于稳定, 稳定阶段会有不明显的增长趋势, 并且压力损失存在一个明显的峰值。迎面风速越大, 此现象表现越为明显, 如图 7 所示。上述现象存在的原因是当褶尖角 θ 、褶厚 t 以及迎面风速 u 一定时, 褶高 h 会影响褶的开口距 p , 进而基于式 (2) 影响到断面流量 Q , 即随着褶高的增加, 断面流量 Q 不断增大。但是, 随着褶高的增加, 有效过滤面积也会不断增大。前者会使得压力损失增加, 而后者则会导致压力损失减小。当褶高 h 相对较小时, 有效过滤面积集中在开口段, 变化不是特别明显, 但是因为褶高 h 相对较小, 介质内部流体活动空间相对狭小, 断面流量 Q 对压力损失产生较大的影响。因此这一阶段断面流量 Q 对压力损失的变化起主导作用, 会使得压力损失逐渐增大。当褶高 h 增加到一定值时, 随着褶高的增加, 介质内部流体活动空间不断扩大, 有效过滤面积也会明显增加, 并且随着褶高 h 的增加, 气流的速度受阻影响会表现明显, 气流的动能会随之衰减。此时, 有效过滤面积对压力损失变化的影响逐渐占据主导, 因此导致压力损失在达到峰值后逐渐减小。最后, 当有效过滤面积趋于稳定后,

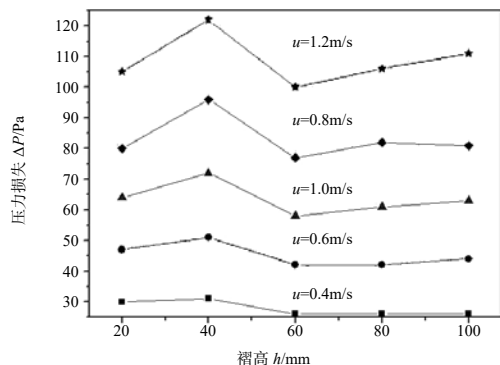


图 7 褶高 h 与介质两端压力损失关系图

压力损失变化趋于稳定, 但是受断面流量 Q 及气流长距离动能衰减等多因素综合影响, 压力损失变化呈现稳中有升的现象。上述有效过滤面积是指过滤介质中可以有效过滤的部分面积的总和, 本研究中具体表现为有效阻止气流通过的部分的面积。宏观尺度有效过滤面积概念对应后文微尺度研究中的有效过滤体积概念, 将在后文做相应介绍。

基于宏观尺度仿真结果, 利用 MATLAB 软件进行数据拟合处理, 得到介质两端的压力损失值与褶高 h 和迎面风速 u 存在数学关系, 如式 (15) 所示:

$$\Delta p \propto u^{1.05} \cdot h^{-0.02} \quad (15)$$

即压力损失正比于 $u^{1.05}$ 与 $h^{-0.02}$ 的乘积。

结合式 (14), 不难得到:

$$h^{0.02} \cdot \frac{\Delta p}{\mu u'} = f(\alpha)f(\theta) + f(\rho) \quad (16)$$

其中褶高 h 与褶尖角 θ 对压力损失的共同影响即为体积 V 对压力损失影响的数学体现。上述数学模型与公式 (8) 保持一致, 证明本文得到的数学模型具有理论依据。

褶皱型空气过滤介质结构参数对压力损失值具有很大的影响, 近年来关于褶皱型空气过滤介质的研究文献^[9-11]大多都会提及孔隙率与褶的高宽比对介质过滤性能的影响, 褶的高宽比即褶高 h 与褶的开口距 p 的比值, 如图 8 所示。实际上褶高 h 与褶的开口距 p 的比值即为褶尖角的另一种形式的体现, 如式 (17) 所示。因此, 关于褶的结构优化可以直接以孔隙率与褶尖角对压力损失的综合影响来表示。

$$\theta = 2 \arctan \frac{p}{2h} \quad (17)$$

基于本研究得到的数学模型式 (14) 可以看出, $f(\alpha)$ 与 $f(\theta)$ 的乘积与压力损失之间呈现正比关系, 因此, 孔隙率与褶尖角对压力损失的综合影响的研究可以转化为 $f(\alpha)$ 与 $f(\theta)$ 乘积的变化规律研究。此

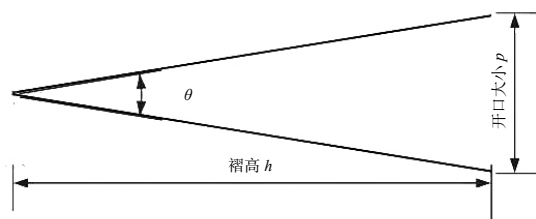


图 8 单褶的结构示意图

处定义：

$$M=f(\alpha)f(\theta) \tag{18}$$

M 为孔隙率与褶尖角对压力损失的综合影响因子， M 值越大说明孔隙率与褶尖角对压力损失的综合影响越明显，压力损失越大。

基于本研究得到的数学模型式（14），利用 Matlab 软件对 M 进行数学分析，结果如图 9 所示。研究发现，随着褶尖角和孔隙率的增大，孔隙率与褶尖角对压力损失的综合影响逐渐减弱，最终褶尖角和孔隙率对压力损失的贡献将趋于稳定。具体表现为在小角度、低孔隙率的结构条件下，介质两端的压力损失最大，但是随着褶尖角和孔隙率的增大，压力损失会明显减小，最终会趋于稳定。基于图 9 分析，当褶尖角在 0.5 到 0.7（弧度值）之间，即约 30° 到 40° 之间时，压力损失会趋于稳定，即在此区间内，褶型空气过滤介质结构会达到最优值。

2.2 数学模型可靠性验证

为验证仿真数据及数学模型的可靠性，将数学模型计算结果与实验数据^[18]进行对比，实验工况如表 1 所示，改变迎面风速 u （0.5m/s，1.0m/s，1.5m/s，

褶高 h 及褶开口距 p 表示。对比结果如图 10 所示。

表 1 实验工况

参数名称	数值	单位
孔隙率 ε	0.88	—
褶厚 t	3.8×10^{-3}	m
褶高 h	2.5×10^{-3}	m
褶开口距 p	3.2×10^{-3}	m

通过对比发现，本研究得到的数学模型计算结果与实验数据基本重合，最大处误差不超过 8%；因此，可以认为本研究得到的数学模型真实、可靠，具有实用和推广价值。

上述验证过程中，实验条件已经超越了层流状态，进入过度阶段或紊流阶段。事实证明，本文得到的数学模型可以有效应用在褶型空气过滤介质层流阶段及过渡阶段的研究中。

2.3 流场分析

基于微观尺度仿真结果发现，孔隙率相同的情况下，压力损失随褶尖角的增大先减小后趋于平缓。以孔隙率为 85% 时的工况为例，结果如图 11 所示。

针对上述现象，本研究对褶型空气过滤介质的内部流场做出定量分析。以下是在不同褶尖角（其它结构参数保持不变）情况下的压力分布云图。

通过图 12 分析发现，小角度时，压力损失有着明显的阶梯式分布，褶型空气过滤介质的压力损失主要是由褶开口段区域的纤维集合造成的。并且小角度时，褶尖角区域几乎没有压力损失，甚至压力损失值出现负值。随着褶尖角角度的增加，特别是褶尖角在 35° 之后，开口段区域压力损失值分布趋向均匀，褶尖角区域也开始出现压力损失分布。这说明褶尖角在 35° 之后，褶型空气过滤介质的内部气流组织与压力分布更加合理，纤维集合发挥的作用趋向最大化，即从压力分布角度分析，褶型空气过滤介质最优角度出现在 35° 左右。

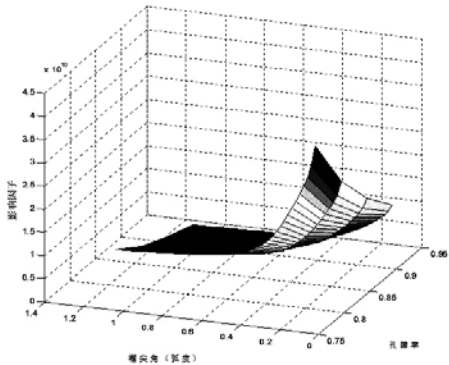


图 9 褶的结构参数对压力损失的综合影响结果示意图

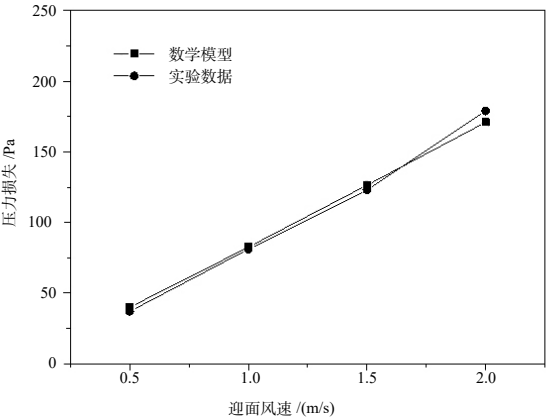


图 10 数学模型验证对比图

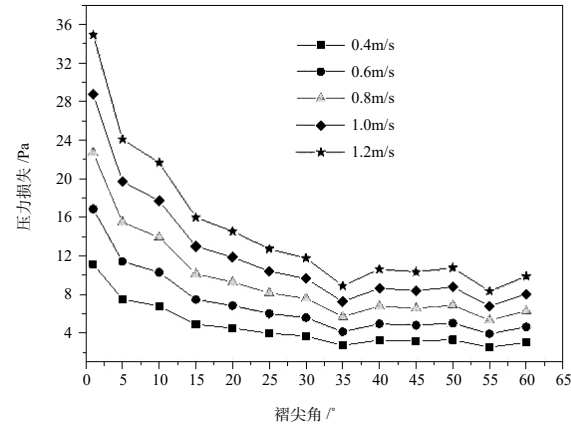


图 11 褶尖角与压力损失关系图

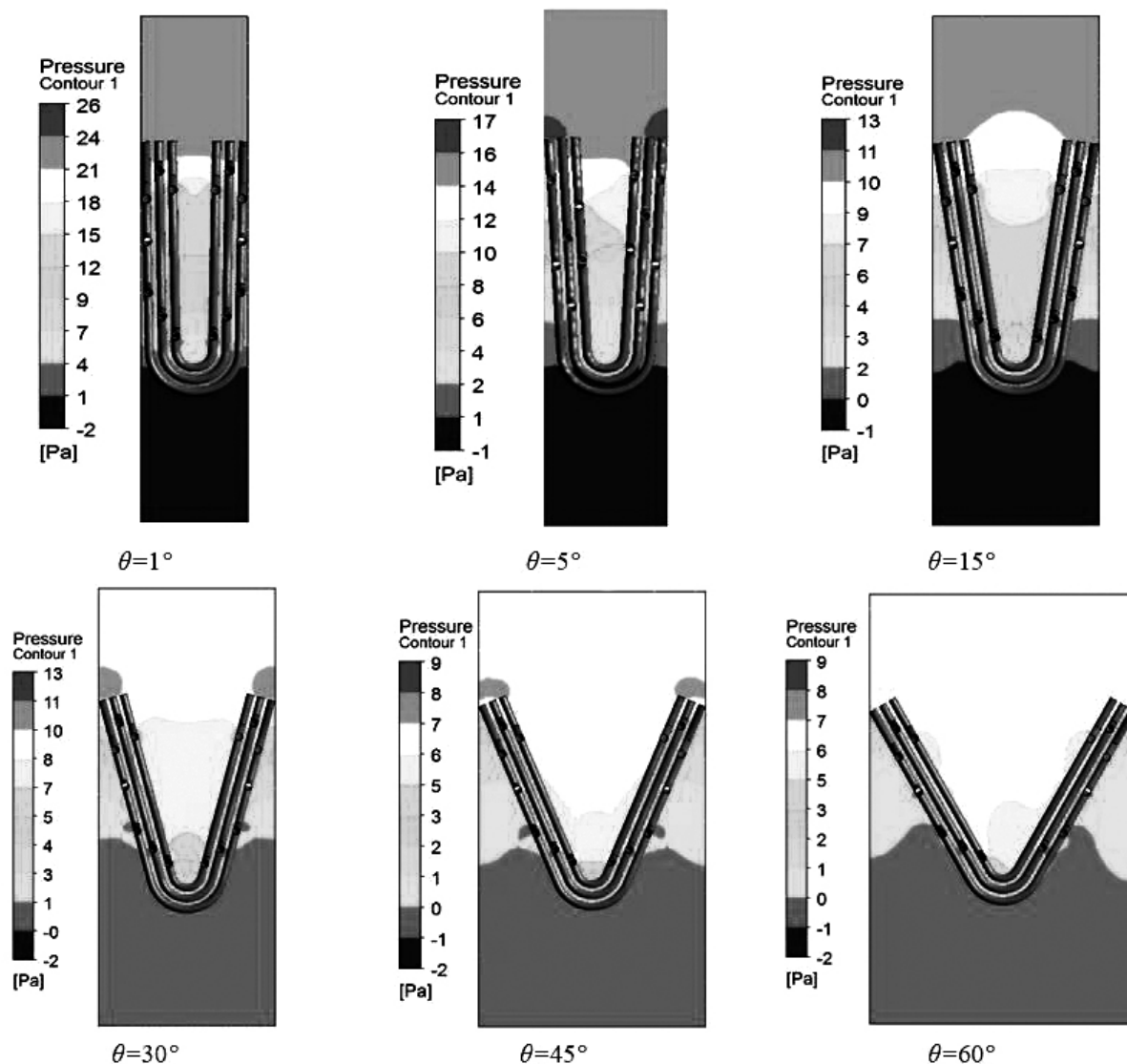


图 12 不同褶尖角结构下微观尺度压力云图

域，褶尖角区域对介质整体的压力损失影响仍然是比较小的，即褶尖角区域纤维集合的利用效率相对较低。基于上述现象，本研究进一步对通过褶型空气过滤介质内部气流速度分布作出分析，图 13 所示为在迎面风速为 0.6m/s 时纤维内部的速度分布情况。

研究发现，褶尖角区域的气流速度明显高于褶开口段区域的速度，并且流场内部气流有向褶的两边纤维集合区域行进的趋势。这说明褶开口段区域相的纤维集合相对于褶尖角区域来说更加有效地阻止了气流的通过，降低了气流的动能。

因此，结合图 12 及图 13 发现，褶尖角区域相对于褶开口段区域来说其利用效率相对较低。因此，提高褶尖角区域的利用效率将会对增大褶型空气过滤介质过滤体积，减小压力损失，提高过滤效率有

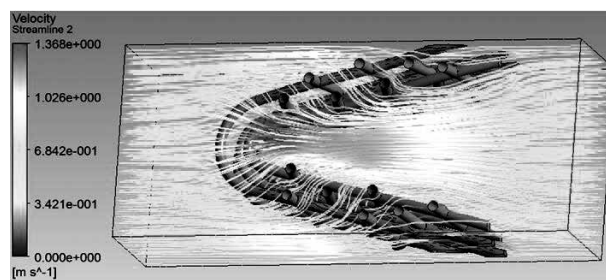


图 13 微观尺度褶型空气过滤介质速度流线图

着积极的实际意义。

气流经过褶型空气过滤介质时，介质两边的纤维集合会产生一个有效阻止气流的区域，即从三维空间上来说因气流作用而产生压力的部分，此处可定义为有效过滤体积，如图 14 所示。有效过滤体积

的截面积为类似直角梯形的形状。随着褶尖角的增大,直角梯形的上底边和下底边会不断向褶角处延伸,导致有效过滤体积不断增大。当褶尖角增加到一定程度时,有效过滤体积的变化则会趋于稳定。其截面的变化如下图 15 所示。有效过滤体积变化的宏观表现即为有效过滤面积的变化^[11]。

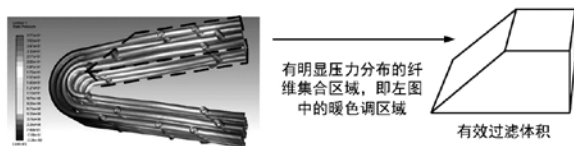


图 14 有效过滤体积示意图

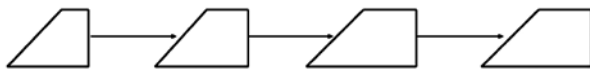


图 15 有效过滤体积随褶尖角的增大截面积变化示意图

结合图 12 发现,当褶角小于 35° 的时候,随着褶尖角角度的增加,有效过滤体积会随之增加。但是同时,过滤风速 v 也会随褶尖角的增加而变大。过滤风速 v 与迎面风速 u 之间的关系如式 (19) 所示。

$$v = u \sin \frac{\theta}{2} \quad (19)$$

但是在小角度时,有效过滤体积对介质两端压力损失的影响大于过滤风速 v 的影响,占据主导地位,因此在图 11 中表现为压力损失值逐渐减小。

当褶角大于 35° 时,介质的有效过滤体积将会趋于稳定。但是随着褶角的增大,过滤风速仍然会有不明显的增长,因此在图 11 中表现为压力损失曲线稳中有升。

基于上述分析,因压力损失相对于孔隙率及迎面风速均为线性变化,而褶尖角对于压力损失来说存在最优解,因此洁净过滤状态下,褶型空气过滤介质结构存在最优褶角。通过分析本研究得到的最优褶角在 35° 左右,该值验证了前文数学模型得到的最优褶角在 30° 到 40° 之间的结论,同时最优褶角的存在也证明宏观层面褶型空气过滤介质的褶高与开口大小存在最优比例。

3 结论

本研究基于计算流体动力学对褶型空气过滤介质展开多尺度研究,分析了褶型空气过滤介质内部流场规律,得到以下结论:

(1) 总结了褶型空气过滤介质洁净过滤阶段压力损失数学模型,与实验数据对比发现本研究总结的数学模型真实、可靠,具有实际应用价值;

(2) 褶型空气过滤介质结构参数与压力损失之间均存在数学关系。压力损失会随着迎面风速的增加而线性增加;会随孔隙率的增大而线性减小;会随着褶高的增加,先增大后减小,之后趋于稳定。综合以上因素判断,褶型空气过滤介质存在最优结构使得压力损失最小。

(3) 褶尖角区域对褶型空气过滤介质来说利用效率较低,因此如何提高褶尖角区域的利用效率对褶型空气过滤介质的结构优化具有重要意义。

(4) 在褶尖角较小的情况下,褶尖角引起的有效过滤体积的变化对压力损失的影响占据主导地位。但是随着褶尖角的增加,有效过滤体积趋于稳定,多因素综合作用下褶型空气过滤介质压力损失值趋于稳定。

参考文献

- [1] Kuwabara S. The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders of spheres in a viscous flow at small Reynolds number [J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1959, 14(4):527-532.
- [2] Happel J. Viscous flow relative to arrays of cylinders [J]. AIChE Journal, 1959, 5(2):174-177.
- [3] Bear J. Dynamics of fluids in porous media [J]. Engineering Geology, 1972, 7(2):174-175.
- [4] Davies C N. Air Filtration [M]. London: Academic Press, 1973. 47(1):267.
- [5] Banks D O. Stokes flow through a system of parallel infinite cylinders with Aaxes Ooriented at angle to the direction of mean flow [J]. Particulate Sci. Technol., 1987, 5(3):339-353.
- [6] Fabbro L D, Laborde J C, Merlin P, et al. Air flows and pressure drop modeling for different pleated industrial filters [J]. Filtration & Separation, 2002, 39(1):34-40.
- [7] 付海明, 徐芳, 晋瑞芳. 褶型气溶胶过滤器过滤阻力与结构参数关系 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2010, 31(3):307-312.
- [8] 查文娟, 钱付平, 鲁进利, 等. 基于阻力的 V 型褶式滤芯结构参数的响应面法优化 [J]. 过程工程学报, 2013, 13(5):771-775.
- [9] A.M. Saleh, H. Vahedi Tafreshi, B. Pourdeyhimi et al. An analytical approach to predict pressure drop and collection efficiency of dust-load pleated filters [J]. Separation and Purification Technology, 2016, 166:80-87.
- [10] Théron F, Joubert A, Coq L L. Numerical and experimental investigations of the influence of the pleat geometry on fibrous filter performances for submicronic

aerosol depth filtration [J]. *Separation & Purification Technology*, 2017, 182:69–77.

[11] Li S, Hu S, Xie B, et al. Influence of pleat geometry on the filtration and cleaning characteristics of filter media[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 210:38–47.

[12] 袁惠新, 刘明爽, 吕浪, 等. 褶型筒式空气过滤器过滤压降的数值模拟 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(5):2946–2950.

[13] Chen S W, Wang Q, Chen D R. Effect of pleat shape on reverse pulsed-jet cleaning of filter cartridges [J]. *Powder Technology*, 2017, 305(2017): 1–11.

[14] Chen S W, Chen D R. Annular-slit nozzles for reverse flow cleaning of pleated filter cartridges [J]. *Separation & Purification Technology*, 2016, 177(28): 182–191.

[15] 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.

[16] 邓彩华, 童亮, 陈壁峰, 等. 多孔介质流动的直接数值模拟 [J]. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2011, 35(6):1257–1260.

[17] 黄乃金, 钱付平, 查文娟, 等. 基于微观结构的褶式滤芯拟态化模型及其过滤性能的数值模拟 [J]. *过程工程学报*, 2014, 14(3):402–408.

[18] Tronville P, Sala R. Minimization of Resistance in Pleated-Media Air Filter Designs: Empirical and CFD Approaches [J]. *HVAC&R Research*, 2003, 9(1):95–106.

浅谈医院手术室开关门对洁净环境的影响

吴 骁¹, 周 斌¹, 薛 科¹, 丁丽丽¹, 吴小泉²

(1. 南京工业大学, 南京 210009; 2. 南京天加环境科技有限公司, 南京 210028)

[摘 要] 在医院洁净手术室进行手术过程中, 手术质量取决于患者自身情况、手术技术水平高低和手术环境好坏。暖通空调专业从业人员通过设计、施工和检测为营造良好的手术环境提供了保障。经过调研发现洁净手术室实际使用过程中手术室开关门行为很普遍。由于洁净手术室在动态条件下的特征比空态和静态更具有实际意义, 为此, 本文将通过数值模拟手段研究手术室和邻室之间同时存在温差和压差情况下, 开关门过程中手术门界面处的流场和气溶胶扩散特性。结果表明: 门关闭阶段的渗透风量远大于门开启阶段的渗透风量, 所以建议适当加快门的关闭速度, 以减小污染物的侵入量。当手术室温度高于邻室的时候, 可以有效减少污染物的侵入, 并将污染物控制在手术室的下部空间。

[关键词] 洁净手术室; 建筑通风; 气溶胶; 温差; 压差

0 引言

手术部位感染 (Surgical Site Infections, SSIs) 是一种常见的手术并发症, SSIs 会增加患者的死亡率及医疗支出, 造成的直接和间接经济损失非常可观。这给患者自身及其家庭、医疗单位以及整个社会都带来严重的影响。

减少 SSIs 风险的策略主要集中在: 提高患者自身免疫力、提高手术技术水平和提高手术环境三个方面。相关研究表明, 空气途径传播是微生物进入切口的最重要途径之一。目前洁净手术室通常采用通风稀释、定向送风气流组织、房间压力控制和空气过滤等洁净技术营造洁净的手术环境。

洁净手术室的净化空调系统性能检测, 需要关注在何种状态下进行, 即空态、静态和动态。空态指的是室内净化空调设施及功能齐备, 但室内没有医疗设备和人员的状态。静态指的是室内净化空调设施及功能齐备并运行, 如有医疗设备, 医疗设备已安装并可运行, 但无工作人员的状态。动态指的是设施以规定的状态运行, 有规定的人员在场, 并在商定的状况下进行工作。GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》将空态和静态规定为工程检验和定期检验的两种状态^[1]。根据 GB 50591-2010《洁净室施工及验收规范》的要求, 当建设方需要进行洁净室使用验收时, 在“工艺全面运行, 操作人员在场”的动态条件下由建设方组织进行^[2]。

根据南京工业大学科研团队的现场调研和文献分析, 发现医院中因为医疗过程的需要, 人员经常在室内走动引起室内流场和颗粒物浓度分布发生变化^[3-13], 而且医护人员会进出洁净手术室, 导致手术门经常启闭。根据《空气洁净技术原理》可知, 在初始压差为 15Pa 的洁净室中, 外开门、内开门和平移门开门过程中内外压差具有一定的时间特性^[14]。

由于手术室邻室的污染物浓度较高, 开关门行为会导致室内外之间正压差的波动, 室内特定的气流组织是否会失去原有的保护效果? 为此, 本研究将采用数值模拟方法, 研究手术室门开关过程中室内外压差、温差因素作用下引起的手术室与邻室之间气流交换规律, 以及污染物随气流迁移扩散的机理。

1 研究对象

本文研究的洁净手术室模型包括两个部分: 手术室和前室。由于本研究侧重于研究污染物从前室到手术室的入侵扩散机理, 所以建模时将室内的布置简化处理, 忽略室内污染源, 即不考虑手术医生、护士等医护人员以及手术医疗设备的影响。手术室内只留下手术灯和手术床, 因为这两者都位于单向流送风口的正下方, 会对送风气流形式产生较大的影响, 需要将这影响考虑在内。手术台位于手术室正中间。手术室与前室之间通过隔墙分隔, 隔墙厚度为 0.30m(L)。

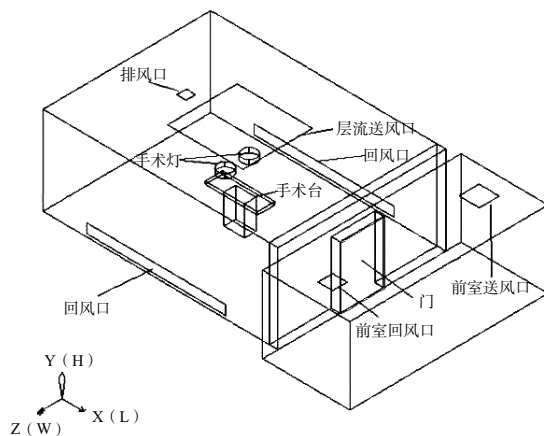


图1 手术室与前室布局示意图

2 边界设置和工况对比

本模型的边界条件设置如表 1 所示。

表 1 边界条件设置参数

模型种类	尺寸/m	边界类型	相关参数
手术室	7.80(X)×5.80(Z)×3.00(Y)	无滑移壁面	绝热
前室	3.00(X)×6.80(Z)×2.60(Y)	无滑移壁面	绝热
单向流送风口	2.60(X)×2.40(Z)	速度入口	0.45m/s, 23℃
手术室回风口	4.80(X)×0.32(Y)	速度出口	0.84m/s
手术室排风口	0.30(X)×0.30(Z)	速度出口	1.00m/s
前室送风口	0.70(X)×0.70(Z)	速度入口	0.25m/s
前室回风口	0.50(X)×0.50(Z)	出流	—
门	1.50×2.10×0.05	无滑移壁面	绝热
手术灯	直径 0.40, 厚 0.15	无滑移壁面	发热量: 200W/m ²
手术台	台面 1.8(X)×0.6(Z), 高 1.1	无滑移壁面	绝热

在前室环境中,人员是颗粒物最主要的散发源,其次,地面、四周墙面以及吊顶也会散发颗粒物。依据文献 [14] 中的建议值,取人员静止时的平均发尘量为 1×10^5 个/(人·min),人员活动时的平均发尘量为 5×10^5 个/(人·min)。并且,室内围护结构表面发尘量,以地面为准,其发尘量为: 8m^2 地面的发尘量大约与一个静止的人的发尘量相等^[14],则地面及围护结构的发尘量取为 1.25×10^4 个/(min·m²)。假设前室中有一位医护人员正在活动,则前室环境中的颗粒物总的散发量为: 18100 个/s。考虑到数值模拟过程的难度,忽略颗粒物的沉降和悬浮效应,而对前室散发的颗粒物作简化处理,认为这些颗粒物散发后会比较均匀地悬浮在前室环境中。门开启前,先在前室中释放 30s 时间的颗粒物,以便在前室环境中形成比较均匀的初始颗粒物浓度场。本课题在研究过程中将取 $1\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 四种不同粒径的颗粒物来进行模拟,以探究不同粒径大小的颗粒物从前室到手术室的迁移扩散效果。

手术室内维持 $450\text{m}^3/\text{h}$ 的正压风量,相对于前室可以形成 6Pa 的稳定正压。在数值模拟的过程中,维持这 6Pa 的恒定正压。为了简化计算,且考虑到手术室的空间比较小,则忽略室内温度的分层和不均匀分布,认为两室内都可以形成均匀的温度场。

本研究对比了两种工况:

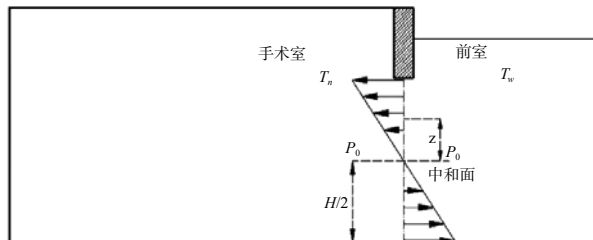


图 2 手术室与前室之间仅有温差作用时手术门界面处的气流模型

(1) 手术室依据层流送风温度而形成 23°C 的均匀温度场,通过设置不同的前室送风温度来形成不同的前室温度,从而形成不同的温差工况。此种情况时,手术室温度 (T_n) 低于前室温度 (T_w),具体的温差工况设置见表 2。

(2) 手术室依据层流送风温度而形成 23°C 的均匀温度场,通过设置不同的前室送风温度来形成不同的前室温度,但此种情况时,手术室温度 (T_n) 高于前室温度 (T_w),具体的温差工况设置见表 3。

表 2 手术室与前室的温差工况设置 ($T_n < T_w$)

工况	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5
前室温度 T_w (°C)	24	25	26	27	28
温差 ΔT (°C)	1	2	3	4	5

表 3 手术室与前室的温差工况设置 ($T_n > T_w$)

工况	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
前室温度 T_w (°C)	22	21	20	19	18
温差 ΔT (°C)	1	2	3	4	5

3 理论模型

本模型中手术室和邻室之间仅有温差时的示意图如图 2 所示。在正压压差和温差同时作用下的示意图如图 3 所示。

经过理论计算,可以得到手术室与前室之间仅有温差作用时,通过手术门的门洞一半面积的气流量计算公式^[13]:

$$Q = C \frac{W}{3} \left(g \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} \right)^{1/2} \cdot H^{3/2} \quad (1)$$

式中: C 为流量系数,取值为 0.5; W 为门洞宽度; H 为门洞高度; g 为重力加速度; $\Delta \rho$ 为两室空气的密度差; $\bar{\rho}$ 为两室空气的平均密度。

手术室与前室之间同时存在温差和正压作用时,通过门洞从前室渗透进入手术室的气流量计算公式^[13]:

$$Q_m = \frac{CW}{3} \cdot \frac{\bar{\rho}}{g \Delta \rho} \left(g \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} H - V_x^2 \right)^{3/2} \quad (2)$$

同理,也得到通过门洞从手术室流出到前室的气流量计算公式^[13]:

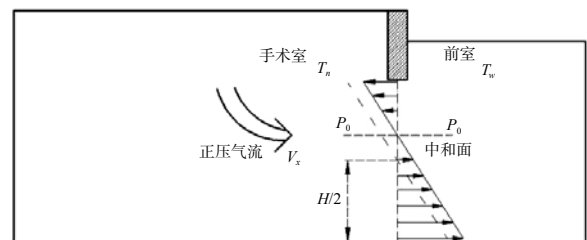


图 3 手术室与前室之间同时存在温差和正压作用时手术门界面处的气流模型

$$Q_{out} = \frac{CW}{3} \cdot \frac{\bar{\rho}}{g\Delta\rho} \left(g \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} H + V_x^2 \right)^{3/2} \quad (3)$$

式中: C 为流量系数, 取值为 0.5; W 为门洞宽度, H 为门洞高度; g 为重力加速度; $\Delta\rho$ 为两室空气的密度差; $\bar{\rho}$ 为两室空气的平均密度; V_x 为手术室内正压送风气流所形成的风速。

4 模拟结果

4.1 $T_n < T_w$ 时不同工况下的气流交换规律和颗粒物扩散机理研究

当手术室温度小于前室温度 ($T_n < T_w$) 时, 手术室与前室之间的气流交换量分别如图 4 和图 5 所示。

温差效应的增强贯穿于整个门开关过程之中, 由图 5 和图 5 可以看出, 在工况 1-1~工况 1-5 的不同阶段, 门关闭阶段的渗透风量远大于门开启阶段的渗透风量。就各个温差工况平均而言, 门关闭阶段的渗透风量约为门开启阶段的 3 倍。然而门的开

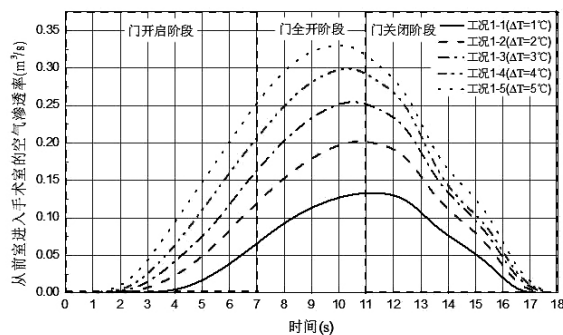


图 4 工况 1-1~1-5 时从前室进入手术室的空气渗透率随时间变化图

启过程和门的关闭过程关于门全开阶段而言是两个对称的运动过程, 但在这两个阶段中的渗透风量却有如此大的差别, 这还是归因于温差效应随着门开关过程不断增强的这一现象。所以温差效应的凸显是一个动态的过程, 其作用会随着门开关的过程不断增强, 而并不是维持不变的。

当手术室温度小于前室温度 ($T_n < T_w$) 时, 手术室与前室之间的颗粒物扩散特性 ($t=11s$ 时刻位于 $Z=3.4m$ 平面) 如图 6 所示。颗粒跟随气流扩散进入手术室后, 都聚集于手术室靠近门洞的上部空间, 在手术室上部的积聚的颗粒物可能会对手术区造成潜在的威胁。并且温差越大, 所侵入颗粒物的量越多, 侵入程度更严重 (侵入更深)。

4.2 $T_n > T_w$ 时不同工况下的气流交换规律和颗粒物扩散机理研究

当手术室温度高于前室温度 ($T_n > T_w$) 时, 手术室与前室之间的气流交换量分别如图 7 和图 8 所

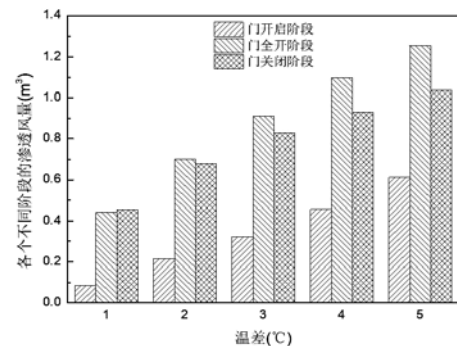


图 5 $T_n < T_w$ 时工况 1-1~1-5 的各个不同阶段的渗透风量图

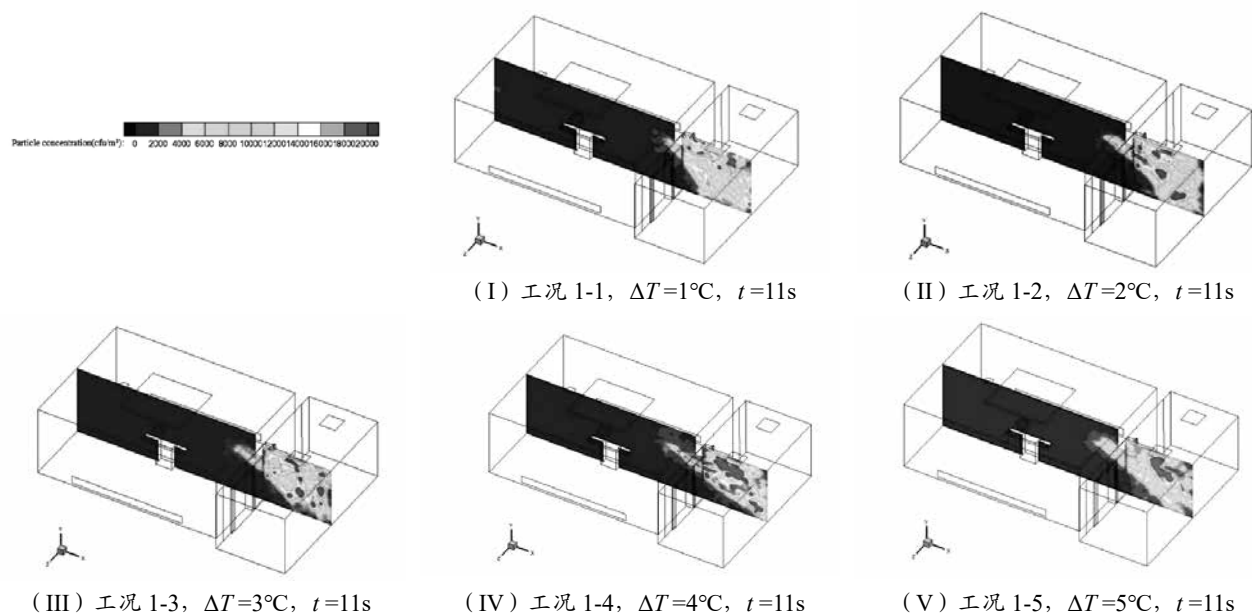


图 6 $T_n < T_w$ 时工况 1-1~1-5 的颗粒物浓度云图

示。从工况 2-1 至工况 2-5, 门关闭阶段的渗透风量也远大于门开启阶段的渗透风量。就不同工况平均而言, 门关闭阶段的渗透风量约为门开启阶段的 4.7 倍。这同样归因于温差效应随着门开关过程不断增强的这一现象。但不同的是, 在温差为 3℃、4℃、5℃ 这三个工况下, 门关闭阶段的渗透风量甚至超过了门全开阶段的渗透风量。因为 $T_n > T_w$ 时, 正压送风气流与温差对流的相互“抵消”现象使得温差效应的显现过程减慢了, 在这种情况下, 温差效应到了门关闭阶段才达到最强的效果。

当手术室温度高于前室温度 ($T_n > T_w$) 时, 手术室与前室之间的颗粒物扩散特性 ($t=11s$ 时刻位于 $Z=3.4m$ 平面) 如图 9 所示。当温差为 2℃ 时, 由于出流在门洞交界面处起到的“屏障”作用, 很好的阻隔了从前室到手术室的气流, 同时也阻隔了颗粒物的入侵。当温差为 3℃、4℃、5℃ 时, 颗粒随着气流进入手术室内而积聚在“三角”涡流区内, 且

温差越大, 三角涡流区的范围越大。在这种情况下, 颗粒物的侵入深度仅为 0.5m 左右, 侵入的颗粒物被控制在手术室空间的下部, 这比较符合手术室的环境控制理念。并且同第一种情况 ($T_n < T_w$) 相比而言, 颗粒物的侵入范围以及侵入深度更小。

4.3 气流交换量的理论预测值和数值模拟值的对比验证

如图 10 所示, 在工况 2-3 下, 利用公式 (2) 计算了 3℃ 的情况下从前室进入手术室的空气渗透量, 并与模拟结果所得出的计算值进行了对比。由图可知, 模拟计算所得的空气渗透率与理论计算所得的空气渗透率随着门开关过程呈现出相同的变化趋势。但是理论计算值相比模拟计算值而言较大, 尤其是在门的开启阶段。这是因为, 如前所述, 在模拟计算过程中, 温差效应是随着门开启过程而不断增强的。而在理论计算中, 温差效应从一开始就达到最强的效果, 并不随门开关过程发生变化。所

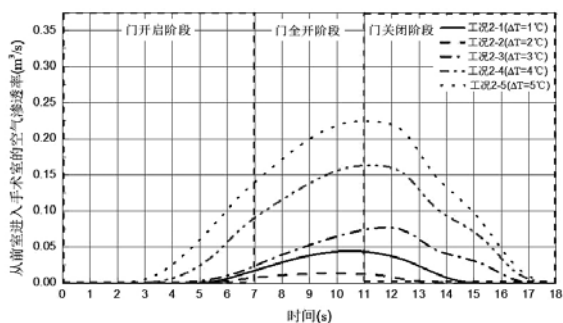


图 7 工况 2-1~2-5 时从前室进入手术室的空气渗透率随门开关过程的变化

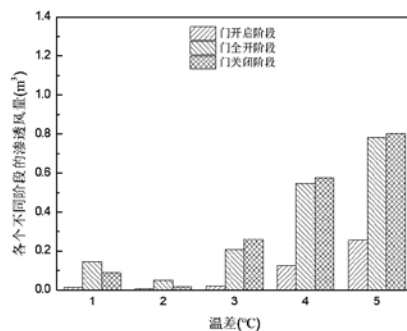


图 8 $T_n > T_w$ 时工况 2-1~2-5 的各个不同阶段的渗透风量图

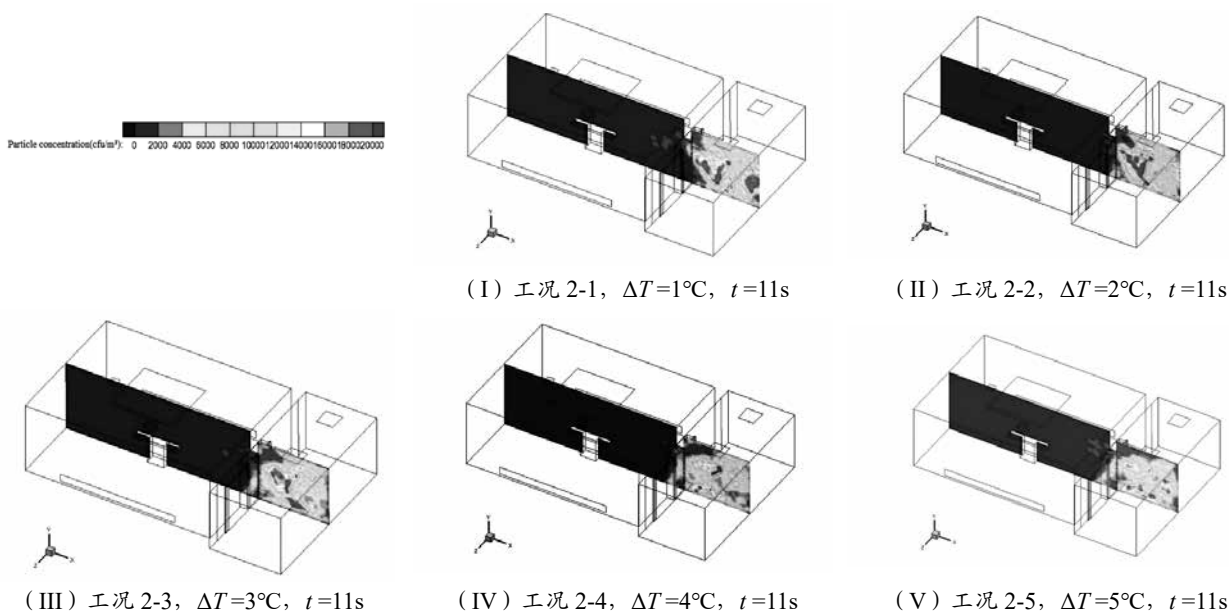


图 9 $T_n > T_w$ 时工况 2-1~2-5 的颗粒物浓度图

以导致了理论计算值偏大,但是在大多数时间段内,理论计算值与模拟计算值的误差都在 10% 以内。而在另一方面,通过模拟值与理论计算值的对比,也进一步验证了本文模拟所选湍流模型的可靠性。

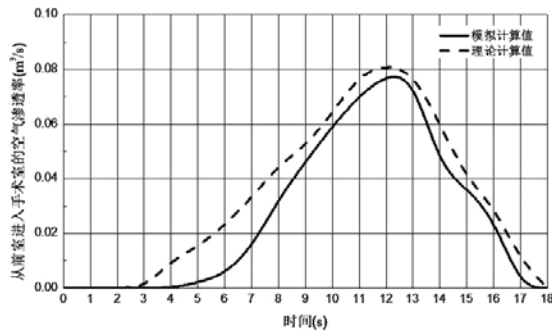


图 10 工况 2-3 下从前室进入手术室的空气渗透率的模拟与理论计算值对比

5 结论和讨论

本文研究了手术门开关过程中在手术门界面处的气流和颗粒物扩散特性,发现当手术室温度高于邻室时,将有利于该动态过程中手术室内洁净环境的营造,并得到以下主要结论:

(1) 温差效应随着门开关过程而不断增强。所以,这就导致了在门关闭阶段的渗透风量比门开启阶段的渗透风量更大。就各个温差工况平均而言,当手术室温度低于前室时,门关闭阶段的渗透风量约为门开启阶段的 3 倍;当手术室温度高于前室时,门关闭阶段的渗透风量约为门开启阶段的 4.7 倍。所以,建议适当加快门的关闭速度,以减小污染物的侵入量。

(2) 当手术室温度低于邻室的时候,温差对流与手术室正压出流是相互“叠加”的效果。这会导致大量的渗透风携带着污染物进入手术室,侵入深度达到 1.5m,且颗粒物都积聚在手术室的上部空间。这与手术室环境控制理念相违背,不利于保护手术室的洁净环境。

(3) 当手术室温度高于邻室的时候,温差对流与手术室正压出流是相互“抵消”的效果。这种情况下,出流在门洞交界面处起到的“屏障”作用,有效减少了从前室到手术室的渗透气流,同时也减少了污染物的侵入,侵入深度约为 0.5m。并且侵入的污染物被控制在手术室的下部空间,这比较符合手术室的环境控制理念。同时,建议将手术室与邻室之间的温差控制在 1~2℃ 之间,能够达到减少污染物侵入量的最佳效果。

6 致谢

感谢南京天加环境科技有限公司提供手术室实

验场地,同时感谢国家自然科学基金项目(51508267)和江苏省第十四批“六大人才高峰”高层次人才项目(JNHB-043)的资金支持。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 中华人民共和国住房和城乡建设部. 医院洁净手术部建筑技术规范: GB 50333-2013[S], 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 洁净室施工及验收规范: GB 50591-2010[S], 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] Mousavi Ehsan S., Grosskopf Kevin R. Airflow patterns due to door motion and pressurization in hospital isolation rooms[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2016, 22(4): 379-384.
- [4] Kalliomaki Petri, Saarinen Pekka, Tang Julian W., et al. Airflow patterns through single hinged and sliding doors in hospital isolation rooms - Effect of ventilation, flow differential and passage[J]. Building and Environment, 2016, 107:154-168.
- [5] Wu Yan, Gao Naiping. The dynamics of the body motion induced wake flow and its effects on the contaminant dispersion[J]. Building and Environment, 2014, 82:63-74.
- [6] Hang, J, Li, Y, Jin, R. The influence of human walking on the flow and airborne transmission in a six-bed isolation room: Tracer gas simulation[J]. Building and Environment, 2014, 77:119-134.
- [7] Tsang-Jung Chang, Ting-Shing Hua. Transport mechanisms of airborne particulate matters in partitioned indoor environment[J]. Building and Environment, 2008, 43(5):886-895.
- [8] Tin-Tai Chow, Jinliang Wang. Dynamic simulation on impact of surgeon bending movement on bacteria-carrying particles distribution in operating theatre[J]. Building and Environment, 2012, 57(3):68-80.
- [9] Bin Zhao, Caiqing Yang, Chun Chen. How Many Airborne Particles Emitted from a Nurse will Reach the Breathing Zone/Body Surface of the Patient in ISO Class-5 Single-Bed Hospital Protective Environments?—A Numerical Analysis[J]. Aerosol Science and Technology, 2009, 43(10):990-1005.
- [10] 沈晋明, 唐喜庆, 李洪欣. 人体活动对医院关键科室空气污染控制的影响 (1): 综述 [J]. 暖通空调, 2007, (07):1-6.
- [11] 唐喜庆, 沈晋明, 聂一新. 人体活动对医院关键

科室空气污染控制的影响 (2): 背景风速为零情况下的行走模拟 [J]. 暖通空调, 2007, (10):25-30.

[12] Cao Shi-Jie, Cen Dongdong, Zhang Weirong, et al. Study on the impacts of human walking on indoor particles dispersion using momentum theory method[J]. Building and Environment, 2017, 126:195-206.

[13] Bin Zhou, Lili Ding, Fei Li, Ke Xue, Peter V. Niel-

sen, Yang Xu, Influence of opening and closing process of sliding door on interface airflow characteristic in operating room, Building and Environment, 2018, 144, 459-473.

[14] 许钟麟. 空气洁净技术原理 (第四版) [M]. 科学出版社. 2014. P298.

欧洲骨科通仓手术室气流组织评价与优选

刘燕敏, 李晓颖

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201800)

[摘要] 随着医疗技术的快速发展, 现代手术室能耗不断增加, 如何降低手术环境运行能耗一直是讨论的热点。而通仓手术室是降低每次手术成本与能耗的最好例证之一。本文采用计算流体力学(CFD)方法, 利用欧拉-拉格朗日法对英、德两国通仓手术室不同气流组织的流场与颗粒物分布进行模拟。通过对不同运行工况的比较与分析, 认为德国通仓手术室模型, 在其上部与下部回风比例为2:1时最佳, 推荐作为我国骨科通仓手术室合适的设计方案, 这对我国通仓手术室的环境控制与节能有较大的理论意义与工程应用价值。

[关键词] 骨科通仓手术室; 计算流体力学; 气流组织; 污染物分布; 温度分布

0 引言

随着医疗技术的日益进步, 高科技装备不断被采用, 现代手术室造价与能耗势必不断地增加, 成为能量使用强度高(Higher energy use intensity)的场所。如何降低手术环境运行的能耗一直是被关注的热点。如果采用文献1提出的“每次手术的成本与能耗”的评价指标^[1], 将推动医院努力提高手术效率, 缩短手术时间, 加快手术周转率(Turnover time), 加大手术量次(surgery throughput), 从而有效地降低每次手术的成本与能耗。通仓手术室就是降低每次手术成本与能耗的最好例证之一。

上世纪60年代, 全髋关节与全膝关节置换手术创立, 到90年代髋关节与膝关节置换手术需求量大增, 为了最好发挥经验丰富的高级外科医生与麻醉师的作用, 在一间大手术室内设置4台手术, 同时指导4台手术有序进行, 就形成了通仓手术室。进入21世纪, 关节置换技术进一步成熟, 手术过程已变为单一、重复以及再手术率低的标准化操作程序, 通仓手术室也成为提高手术量次、降低每次手术能耗的最佳平台^[2]。以英国为例, 仅有6600万人口就有1780万人患有关节炎或肌肉骨骼疾病, 预计这一数字将来会增长。仅在膝盖骨关节炎患者人数预计将在2010年至2035年间翻一番, 从470万增加到830万。不断增长的医疗需求促进了通仓手术室在欧洲进一步发展。

近年来我国髋关节与膝关节置换手术等骨科手术发展迅速, 建造通仓手术室已经提到议事日程上了, 髋关节与膝关节置换手术需求量也日益增长, 但我国《医院洁净手术部建筑技术规范》GB 50333-2013(以下简称《规范》)尚未涉及, 欧洲特别是英德两国骨科通仓手术室的的不同设计模式与

参数值得我国探讨与借鉴。由于通仓手术室不仅需要各自手术环境的控制问题, 还需要注意大空间中手术台之间的相互干扰问题。特别是有机、合理地配置通仓手术室内的各种风口以期形成的良好气流组织, 是实现手术环境有效控制的前提, 是提高手术效率、降低每次手术能耗的保证。本文针对英德两国不同设计的通仓手术室, 通过计算流体力学(computational fluid dynamics CFD)模拟两者的流场与颗粒物分布, 进行分析与比较, 提出适合我国骨科通仓手术室的设计方案, 将具有十分重要的意义。

1 研究方法

近30年来, 随着计算机硬件性能的大幅提升, CFD已经成为建筑复杂气流组织与通风系统科学研究与工程实践的一部分^[3]。

本文采用Realizable湍流模型来预测室内不可压缩流体流动情况。

控制方程为:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi \tag{1}$$

其中, ρ 为流体密度(kg/m^3); ϕ 为物理量; u 为速度矢量(m/s); Γ_ϕ 为 ϕ 扩散系数; S_ϕ 为 ϕ 源项。

表1 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型控制方程^[4]

名称	ϕ	扩散系数	源项
连续性方程	1	0	0
x方向动量	u	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z})$
y方向动量	v	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial z})$
z方向动量	w	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial z}) - \rho g$
湍流动能	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k + G_b - \rho \epsilon$
湍流动能耗散率	ϵ	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$\rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b$
温度	T	$\mu + \frac{\mu_t}{Pr}$	S_T (根据实际问题确定)

表1中, P 表示压力; u , v 和 w 分别为 x , y 和 z 方向速度; μ , μ_t 和 μ_{eff} 分别为动力粘性系数、

基金项目: 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: 2018YFC070520X)。

湍流粘性系数和有效粘性系数; P_r 为普朗特数; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的普朗特数; σ_T 为湍流普朗特数; $G_k = \mu_t S^2$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$, $S_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$, 为湍流应力或速度梯度引起的 k 产生项; $G_b = \beta g \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial Y}$, 表示由浮升力引起的 k 产生项。控制方程中各系数取值为: $C_{1\varepsilon} = 1.44$; $C_2 = 1.9$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.2$ 。

其中, $C_1 = \max[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}]$, $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ 。

湍流粘性系数 μ_t 计算公式如下:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

其中, C_μ 不是常数而是 k , ε 与平均切应力等变量的函数。

表 1 中空气密度变化, 采用 Boussinesq 假设, 将除动量方程外其余方程中的密度处理为常量, 而动量方程中的重力项转换为:

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (3)$$

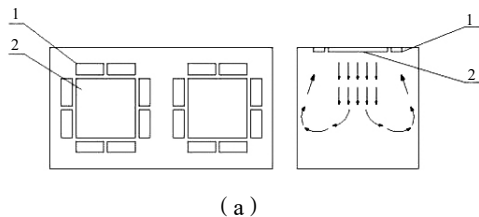
其中: ρ_0 为恒定流体密度 (kg/m^3); T_0 为操作温度 (K); β 为热膨胀系数 ($1/\text{K}$)。

研究颗粒物沉降与空间分布特性一般可以采用欧拉法与拉格朗日法。欧拉法广泛应用于预测室内颗粒物浓度分布, 而拉格朗日法多用于研究粒子运动与扩散过程。Zhao 等人采用 Chen 实验模型进行模拟计算, 针对采用拉格朗日法与欧拉法下颗粒物分布结果进行比较, 指出拉格朗日 DRW 模型以及欧拉法滑移通量模型均能够与实验数据吻合较好, 而混合模型效果不理想^[6]。由于手术室颗粒物计算不仅需要考虑浓度场同样需要考虑颗粒物运动轨迹, 因此本文选用朗格朗日法进行离散相计算。

2 模拟设置

2.1 方案设置

骨科通仓手术室不同于普通手术室, 由于手术室长度长, 不能按我国《规范》要求在手术台长边的双侧设置下回风, 且需要考虑各个手术之间的干扰作用。英、德两国的通仓手术室采用完全不同的设计思路, 两者的气流组织设计方案如下表 2 与图 1 所示。



(a)

表 2 英国和德国的通仓手术室设计方案

方案	主送风装置	上回风	下回风
英国	循环风 + 新风	主送风装置四周设置上部回风口	无
德国	循环风 + 新风	主送风装置四周端设置上部回风	短边两侧设置下部回风

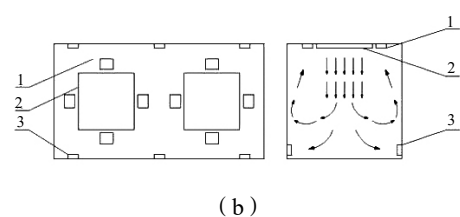
图 1 (a) 表示英国设计方案, 主送风装置进行送风, 在主送风装置四周设置上部回风口, 形成上送上回的气流组织形式; 图 1 (b) 表示德国设计方案, 主送风装置进行送风, 在主送风装置四周设置上部回风口, 并在手术台短边双侧设置下部回风口, 形成上送上下回的气流组织形式。

近年来, 许多国家出台医疗建筑的相关通风标准。根据德国 DIN 1946-4 以及英国 HTM 03-01 标准, I 级手术室送风口尺寸为, 该区域使患者、器械桌与手术人员处于洁净气流形成主流区内。并在送风装置四周设置高度为 800mm 的围挡, 对送风装置送出的洁净气流起到良好的控制作用。

2.2 模型设置

骨科通仓手术室通常在室内设置 2 个或 4 个手术仓^[2]。本文建立的是设置 2 个手术仓的模型 (可通过镜面效应来反映设置 4 个手术仓的通仓手术室)。面积为, 层高 3.0m, 室内温度设定为 24℃。本文在建模过程中按照髋关节置换手术真实情况布置医用设备以及人员位置, 并对设备、人员进行适当简化, 按照长方体对其进行建模。室内人员共计 17 人, 其中手术医生 8 名, 麻醉师 2 名, 护士 5 名以及 2 名患者。人员尺寸为, 麻醉机尺寸为, 器械桌尺寸为, 无影灯直径, 厚度。医护人员散热量为 77W, 患者散热量为 60W。室内布置有麻醉机、器械桌等医用散热设备, 麻醉机散热量取 200W, 无影灯悬挂在手术台两侧, 表面温度为 34℃, 墙壁设为绝热边界条件。在本文中所有显热热量全部以对流换热的形式散发, 这种处理是对实际过程中辐射换热与对流换热共存的简化, Chow 等人指出这样的简化对模拟的结果几乎没有影响^[6]。手术室内部人员与设备平面布置图见图 2 (a)。

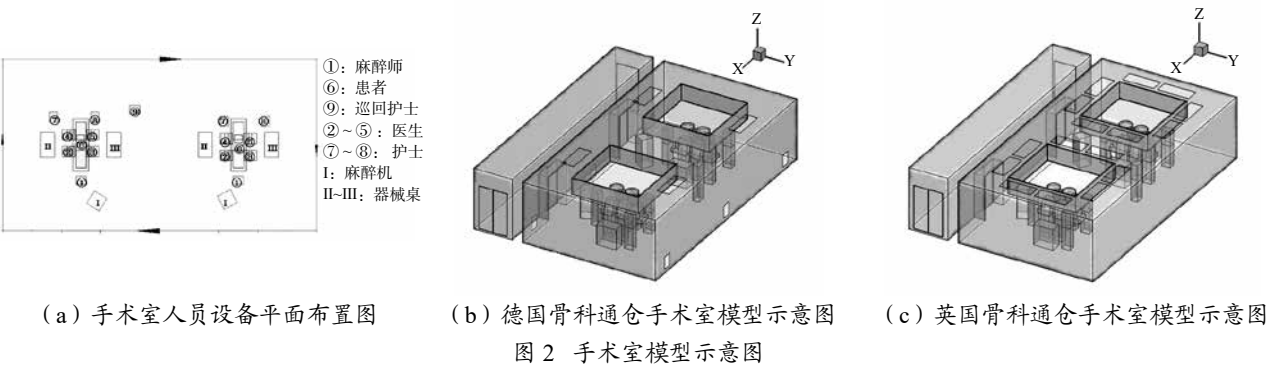
骨科通仓手术室利用手术床上方送风天花向室



(b)

1- 上回风口; 2- 送风装置; 3- 下回风口

图 1 通仓手术室风口示意



内送入洁净空气，并经由回风口排出。整个模型不仅包含手术室，同时也涵盖手术室外部走廊，走廊两端设置有门缝。各送风口面积及送风风速见表 4。将送风口设置为速度入口，送风口沿 Z 轴负方向以均一速度 0.407m/s 送风，送风温度为 23.8℃。模型示意图见图 2 (b) 与图 2 (c)。

对于手术室，污染源主要为人体散发皮屑等颗粒物，文献指出当仅考虑悬浮颗粒物时，约有 27% 颗粒粒径大于 20 μm ，11% 颗粒粒径小于 5 μm ^[7]。同时有研究人员整理汇总不同国家学者关于洁净室人员发菌量研究结果并对不同粒径的粒子进行对比模拟，发现 5~10 μm 范围内粒径的模拟结果没有明显差异^[8]。在本文中认为散发颗粒物为单一粒径，粒径均为，密度为 1000kg/m³。在模拟过程中不考虑患者发散量，医护人员发散量见表 3。认为颗粒物从风口“逃逸”，并且颗粒物到达器械桌上表面、患者表面、创口表面以及手术床表面时被“捕获”。

计算过程中，采用单精度分离隐性算法器和 SIMPLE 算法，压力离散格式为体积力加权算法，分速度方程、k 与方程采用二阶迎风差分。对模型进行不同疏密程度网格划分，划分网格量分别为 62 万、128 万、186 万、235 万以及 308 万，经过独立性检验，确定选择 186 万网格量网格进行计算。

表 3 手术室人员发菌量^[8]

人员	上半身 CFU/(p·min)	下半身 CFU/(p·min)
手术医生	200	400
护士	150	350
麻醉师	200	400

本模拟主要目的是比较英、德两国通仓手术室气流组织形式，并在此基础上，针对德国气流组织方案，比较不同上下回风比例对室内流场与颗粒物轨迹的影响。以提出适合我国骨科通仓手术室的设计方案。

根据德国 DIN1946-4 标准，I (a) 级手术室总风量不低于 8800m³/h；英国 HTM 03-01 标准，I (a)

级手术室总风量不低于 11900m³/h。英国通仓手术室设计方案中，不存在下部回风。而德国通仓手术室设计方案中，同时存在上部与下部回风，下部回风口尺寸为 400mm×600mm，均匀地分布在手术室两侧。参考上述标准与实际设计方案确定模拟风量表见表 4。

表 4 通仓手术室气流组织设计方案风量分配

工况	风口类型	风量 / (m ³ /h)	风口尺寸 (mm×mm)	数量 / 个	风速 / (m/s)
英国工况 1	主送风装置	15000	3200×3200	1	0.407
	上回风口	14300	1500×600	8	0.552
	下回风口	—	—	—	—
德国工况 2-1	主送风装置	15000	3200×3200	1	0.407
	上回风口	7150	750×600	4	1.103
	下回风口	7150	400×600	3	2.758
德国工况 2-2	主送风装置	15000	3200×3200	1	0.407
	上回风口	10010	750×600	4	1.545
	下回风口	4290	400×600	3	1.655
德国工况 2-3	主送风装置	15000	3200×3200	1	0.407
	上回风口	12870	750×600	4	1.986
	下回风口	1430	400×600	3	0.552
德国工况 2-4	主送风装置	15000	3200×3200	1	0.407
	上回风口	14300	750×600	4	2.206
	下回风口	—	—	—	—

3 模拟结果与分析

3.1 温度场

Farhad Memarzadeh 等人通过比较手术室不同通风方式以及换气次数对手术创口处污染物沉积情况进行分析，指出当回风口位于手术室上部时，室内通风系统以及房间中心热羽流联合作用，有利于手术室内颗粒物从上部回风口排出，并且由于手术创口温度 (37.78℃) 导致热羽流能够保护创口免受医护人员散发带菌颗粒物的影响^[9]。Jena Hertberg 等人对手术室气流组织相关文献进行回顾指出，空气传播感染性疾病以及开放性伤口领域的研究认为伤口附近局部热源形成的热羽流可能提供足够的反向动力来阻止经空气传播的病原体的沉积。同时指出手术部位的主要热源为医务人员及无影灯，在手术

环境中使用散热量低的 LED 灯进行手术照明, 将有利于减少手术室产热, 降低无影灯周围形成热羽流的可能性^[10]。

因此有必要对模拟工况的骨科通仓手术室不同气流组织方案进行温度分布比较分析。

图 3 (a) 与 (b) 分别表示工况 1 与工况 2-1 在 $Z=1.2\text{ m}$ 处截面温度分布图, (c) 与 (d) 分别表示工况 1 与工况 2-1 在 $Z=1.5\text{ m}$ 处截面温度分布图。经计算, 麻醉机表面平均温度大约为 40°C 左右, 医生表面平均温度大约为 34°C 左右, 麻醉师表面平均温度大约为 31°C 左右, 护士表面平均温度大约为 32°C 左右。根据图 3 可以看出在手术关键区, 医护人员作为主要散热源, 导致该区域温度明显高于周边区; 并且医护人员与散热设备周边均具有一定程度的温升。

图 3 (a) 与 (b) 可以看出, 工况 2-1 较工况 1 医护人员周围温升区域面积小, 这一现象在 $Z=1.5\text{ m}$

处截面更为明显。除此之外, 图 3 (c) 与 (d) 可知, 在患者上方温度较其他区域更高。

图 4 (a) 与 (b) 分别表示工况 1 与工况 2-1 在 $X=3.0\text{ m}$ 截面处温度分布。可以看出, 在无影灯区域下方较周围区域出现温升, 而该区域风速较周围区域风速低。并且可以看出患者附近区域以及无影灯附近区域温升最大。医护人员附近区域随着距离增加温升逐渐降低。

图 5 (a) 与 (b) 分别表示工况 1 与工况 2-1 在 $Y=-0.4\text{ m}$ 截面处温度分布, 可以看出由医护人员包围的区域出现明显温升, 并且在靠近医护人员上半身、患者表面以及无影灯表面附近区域温升最大。从 Y 截面温度分布图可以看出, 在工况 2-1 情形下, 医护人员上半身温升区域较工况 1 大, 并且其手术床下方的温升也较工况 1 大。图 6 表示在德国骨科通仓手术室风口配置条件下, 在改变上下部回风口风量比例的工况下, $X=3.0\text{ m}$ 处截面的温度分布, 图

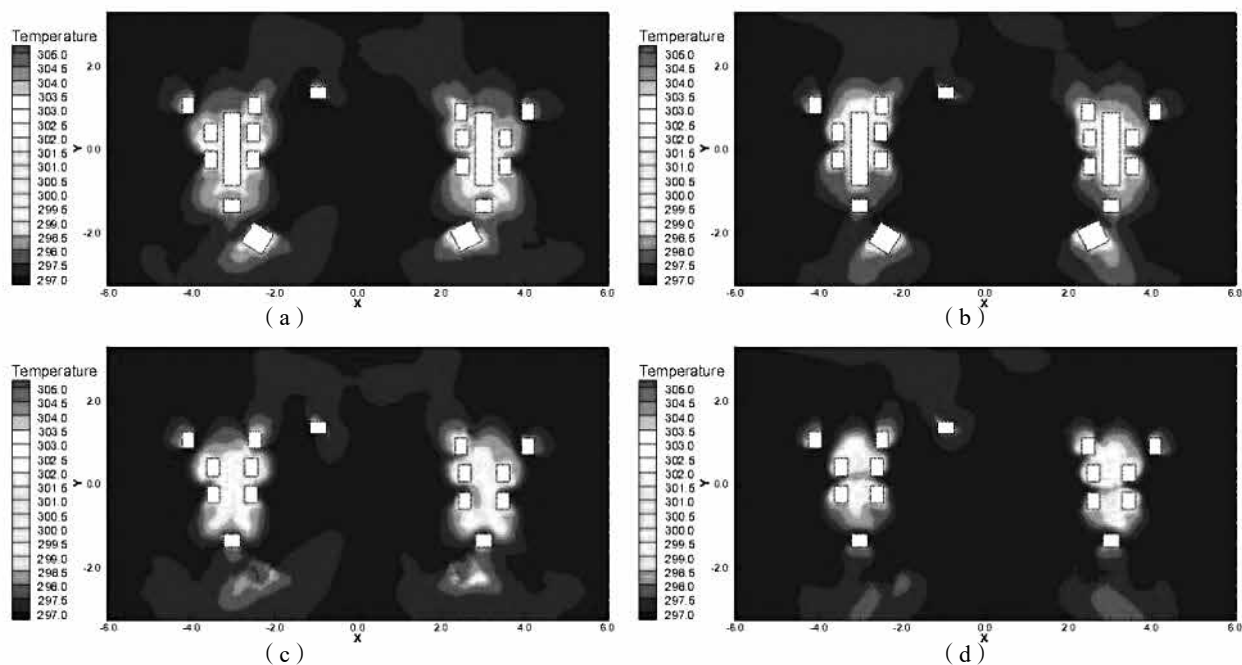


图 3 Z 方向截面温度分布图

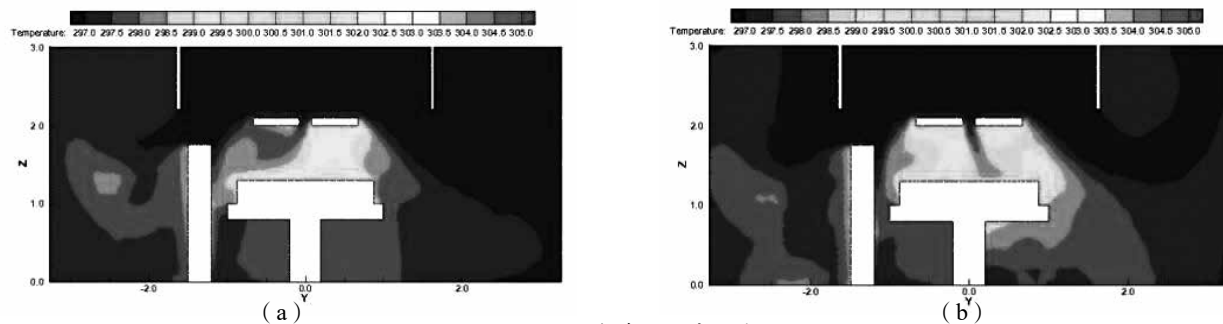


图 4 X 方向截面温度分布

6 也反映出在医护人员与无影灯包围区域会出现温升, 并且随着上下部回风口回风量比率的增高, 手术室周边区温度升高范围增大。

3.2 速度场

3.2.1 不同方案模拟

在相同手术室换气次数和平面布局情况下, 模拟手术室四周上部回风以及上下部回风的各种工况

(其中上下部回风工况设置为其上部与下部回风的比例为 50%), 比较分析两者流场的特点与差异。

图 7 (a)、(c) 分别代表工况 1 与工况 2-1 中 $Z=1.2\text{m}$ 处截面速度分布图, (b)、(d) 分别表示工况 1 与工况 2-1 中 $Z=0.5\text{m}$ 处截面速度分布图。从 (a)、(c) 图可以看出由于主送风装置送入洁净气流在 Z 方向上呈环形状, 将送风天花面积下手术

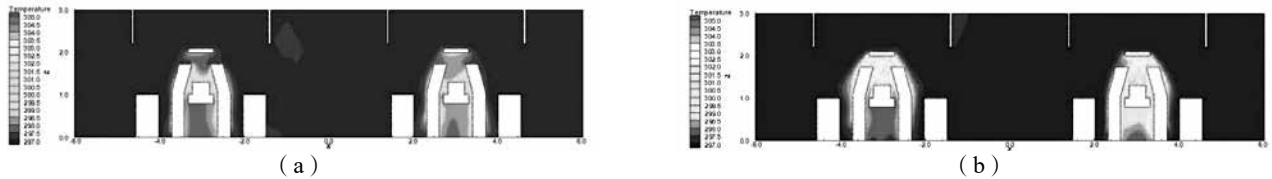


图 5 Y 方向截面温度分布

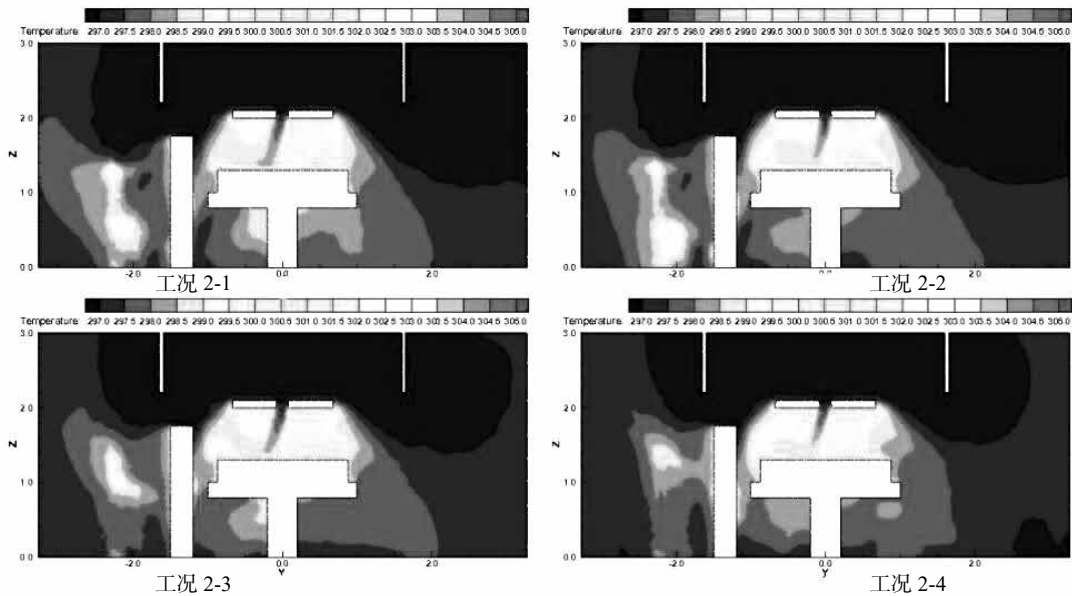


图 6 德国骨科通仓手术室不同工况 X 方向截面温度分布图

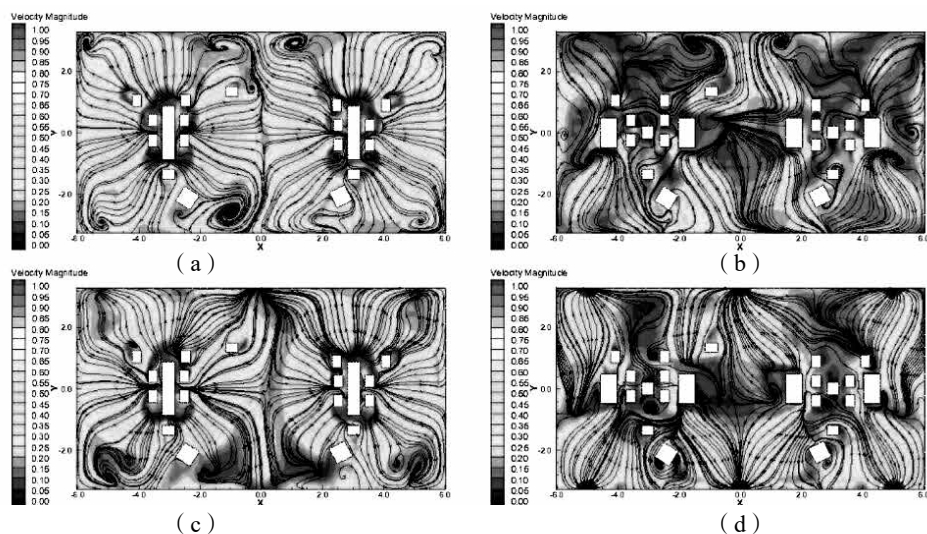


图 7 Z 方向截面速度分布

区完全覆盖,且手术区气流流速明显高于周边区域,气流从手术区流向周边区。但工况 2-1 在 1.2m 平面上环形覆盖区域(洁净区域)略小于工况 1。

在高度较低的 0.5m 截面处差异较为明显。由于工况 2-1 同时采用上下部回风,因此工况 2-1 中下部气流能够从下回风口排出。流线由中央向四个角扩散,且手术室四周风速较大,出现涡旋较少。而工况 1 在 0.5m 截面处整体流速较低,在墙角与墙体附近涡旋较多,易出现二次扬尘并导致污染空气滞留。并且两个手术台气流之间分界不明显,出现了一个手术仓气流流向另一个手术仓的现象,可能会导致靠近通仓手术室共享区域器械桌的污染。

图 8 (a)、(b) 分别表示工况 1 与工况 2-1 中 $Y=0.4\text{ m}$ 处截面速度分布图。从图 8 可以看出在相同送风面积与送风速度下,工况 2-1 覆盖手术区面积较大,并且能够输送距离较远,而工况 1 中手术医生后背及头部出现明显涡旋。这主要是由于工况 1 采用四周上部回风对主送风装置送风有一定影响,造成主送风装置送入洁净气流不能到达器械桌下方,同时其与热羽流共同作用造成该区域出现向上气流,增大器械桌污染的可能性。

但在手术室上方靠近围挡的位置,工况 2-1 较

工况 1 出现涡旋,并且在手术区共享区域中,并未出现高速气流分隔区域。这主要是由于,工况 1 依赖主送风装置周边 8 个上部回风口进行排风,排风量远大于工况 2-1 布置的上部风口排风量。

图 9 (a)、(c) 表示工况 1 与工况 2-1 在 $X=-3.0\text{ m}$ 处速度分布。根据图 (a) 与 (c) 可以看出由于无影灯阻碍作用以及人员、设备散热引起热羽流,导致患者上方流速下降,并出现涡旋。同时由于上部回风口风速均高于 0.5 m/s 。导致洁净气流流线在 1.0 m 高度处出现偏转。工况 2-1 由于上回风口速度高于工况 1 上部回风口风速 1 倍,并且下部回风口承担部分回风,在污物通道下部区域出现涡旋较小。但由于其上回风速度较高造成其手术区与周边区交界处风速略低于工况 1。图 9 (b)、(d) 表示工况 1 与工况 2-1 在通仓手术室共享区域截面速度分布。可以看出由于设计风口配置使得共享区域之间基本形成自然向上的“空气幕”,这导致了两个手术区域之间形成了明显的分界,避免相互之间干扰,图 7 与图 8 也反映了相同的现象。图 7 可以看出通仓手术室共享区域出现明显分界线,只是由于工况 1 无下回风口导致在靠墙区域出现涡旋。而根据图 8 由于工况 2-1 仅在手术室短边方向设置

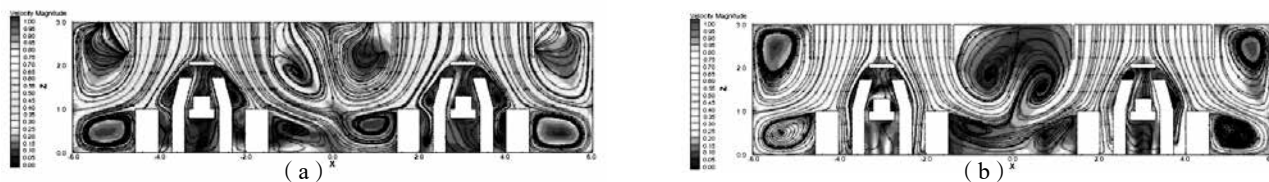


图 8 $Y=0.4\text{ m}$ 处截面速度分布

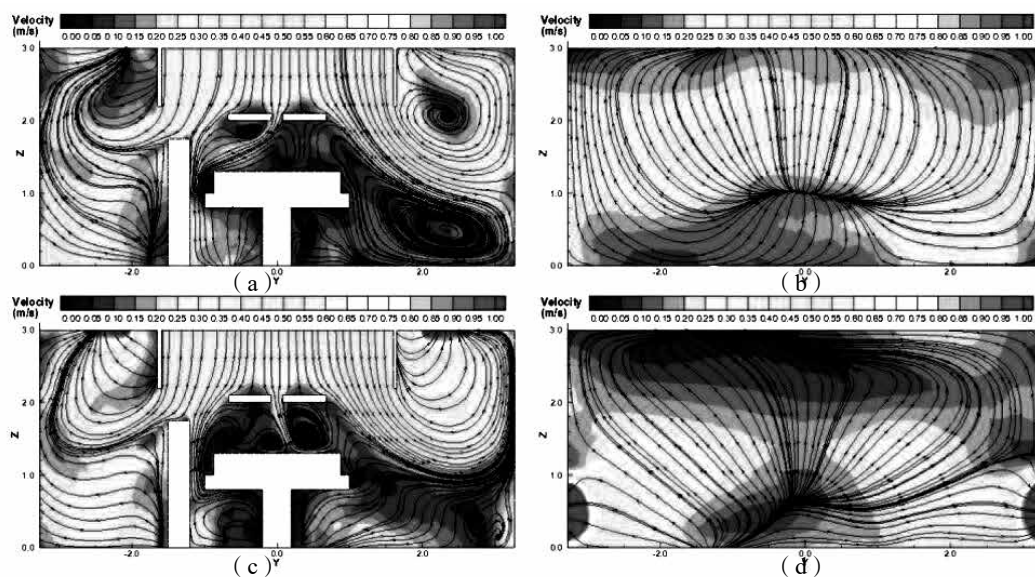


图 9 X 方向截面速度分布

上回风口, 相较工况 1 导致气流在手术室共享区域上方出现较大的涡旋。尽管工况 1 与工况 2-1 均在共享区域 1.5m 以上区域出现涡旋, 但因手术区边界气流流速大且方向基本保持向下, 能够抵抗其干扰。

3.2.2 不同工况模拟

针对德国通仓手术室的上下回风的设计, 逐步增大上回风比例进行模拟, 以分析不同上下回风比例对手术室流场的影响。

图 10 分别反映了不同上下回风比例下 $X=-3.0\text{m}$ 截面处速度分布。可以看出随着上回风比例不断增大, 靠近上回风口处空气路径越短, 并且手术室下部向上的空气流速越大, 导致主送风装置送入呈喇叭口形状的洁净气流覆盖面积越小, 下送距离越

低。图 11 也能反映出随着上回风比例地不断增大, 1.2m 截面处手术区与周边区交界处呈圆形的气流高速区范围不断变小并且此处风速也在不断降低。从侧面反映出主送风装置送入洁净气流下降高度越来越高。同时不同手术区之间的共享区域气流流速逐渐减弱, 并且较大速度区域范围不断缩小。

3.3 颗粒物轨迹追踪结果

根据拉格朗日法计算颗粒物轨迹, 在相同换气次数的条件下, 5 种方案颗粒物逃逸与捕获百分比均不相同。图 12 表示手术室医务人员散发颗粒物去向。可以看出 5 中不同工况下, 颗粒物通过风口排出比例均在 85% 以上。其中工况 2-1 逃逸率明显低于其他 4 种工况, 这主要是由于在模拟过程中假设颗粒

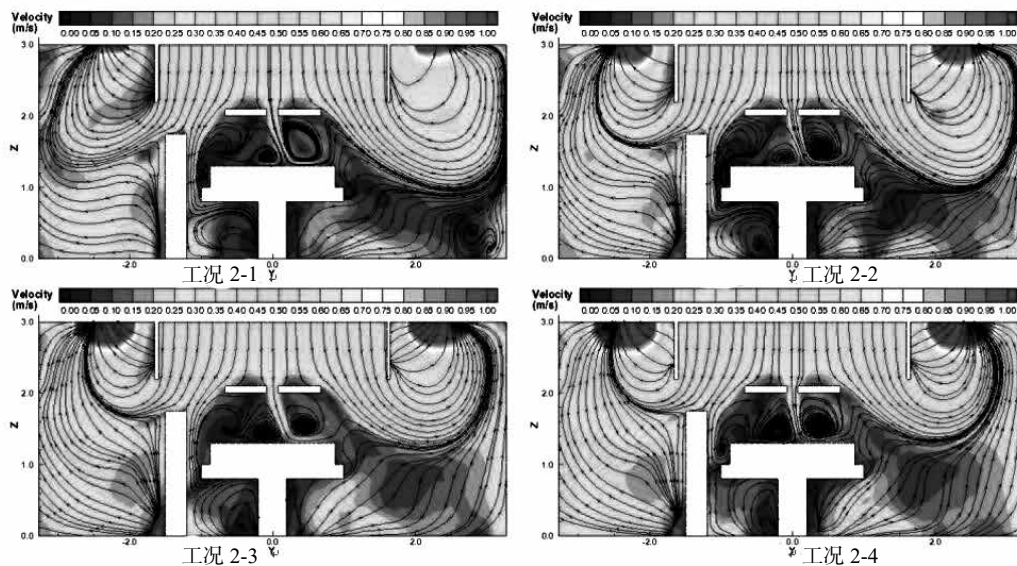


图 10 变工况模拟 $X=-3.0\text{m}$ 截面处速度分布

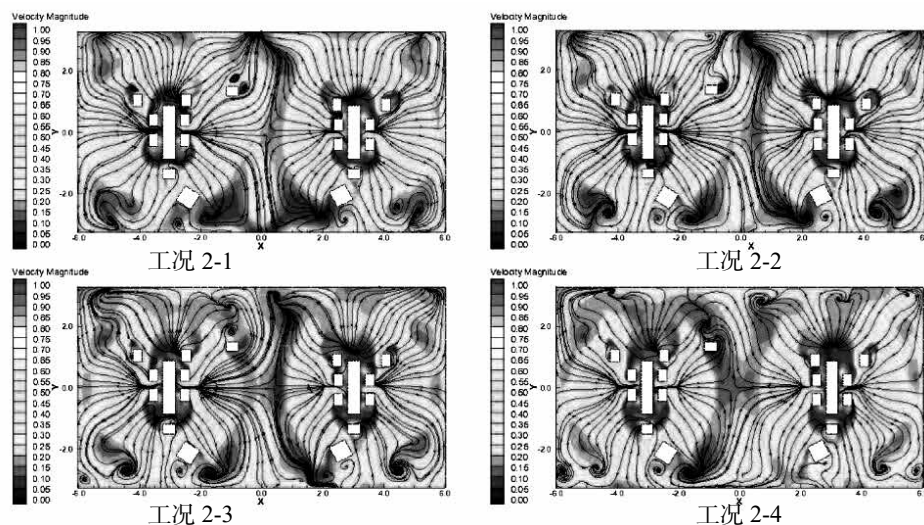


图 11 变工况模拟 $Z=1.2\text{m}$ 截面处速度分布

物附着在手术床下方造成,而工况 2-1 下回风比例最高,导致较大数量的颗粒物沉积在手术床下表面。工况 2-2 颗粒物逃逸量最大,而工况 2-4 逃逸量相较工况 2-2 与工况 2-3 略微下降。同时工况 2-2 具有最低的捕获率,工况 2-1 具有最大的捕获率。并且可以看出在上下同时回风的工况下,随着上回风比例的不断增大,颗粒物捕获量逐渐下降,但当上下回风量超过一定比例时,颗粒物捕获量上升。图 13 表示不同工况下捕获颗粒物的组成情况,可以看出工况 2-2 中患者表面、手术床上表面以及创口表面颗粒物捕获率在所有工况中最低,且工况 2-1 至工况 2-4 器械桌上表面几乎没有捕获颗粒物。

图 14 (a)、(b) 分别表示医生和护士以作为颗粒物散发源时,被捕获颗粒物的去向以及比例。由于手术医生距离患者较近,因此手术医生所散发的颗粒物被捕获的量在三种散发源中最大。由于器械桌放置在手术区边缘,根据前述不同工况气流组织特点,造成工况 1 器械桌捕获到手术医生散发颗粒物,且工况 2-1 至工况 2-4 捕获手术医生散发颗粒物百分比按照上回风比例的不断增大而增大。护士散发颗粒物被捕获率在除了工况 1 的其他工况下均低于 1%。这主要是由于在不同设计方案中,工况 2-1 至工况 2-3 下回风风口靠近护士站立区域;工况 2-4 设置为全部进行上回风,此时相较于工况 2-1 至工况 2-3,其护士散发颗粒物被捕获率上升,可以得出

在本文手术室平面布置情况下,下回风有利于排出护士散发颗粒物。

4 结论

本文在建立了英、德两国不同的通仓手术室模型的基础上,通过计算流体力学模拟了 2 类模型、5 种运行工况的流场与颗粒物分布,对其不同特性进行了比较分析,并以此作为评价与优选的依据,在手术室相同换气次数及相同平面布置条件下进行分析比较,可以得出以下结论:

(1) 在相同换气次数条件下,英德两国不同回风口布置会造成较大的颗粒物沉降百分比差异,但颗粒物捕获率均低于 4%。将模拟工况下颗粒物捕获率从高至低排序,其顺序为:工况 2-1 > 工况 1 > 工况 2-4 > 工况 2-3 > 工况 2-2,并对医生及护士散发颗粒物分别进行追踪,这两种散发源散发颗粒物在英国设计方案中捕获率最高,表明在上下回风的比例大于 1 时,德国通仓手术室气流组织方案优于英国方案。相对而言,德国通仓手术室设计方案比较接近我国《规范》要求。

(2) 根据不同工况模拟结果显示,上下部同时回风的气流组织方案不仅能够降低器械桌表面颗粒物沉降,而且能够大幅度降低患者表面颗粒物沉降。上下部回风方案的不同回风比例的工况模拟结果表明,当换气次数为 63.6 次/h,上下回风比例为 1 时,颗粒物控制效果最差,当上下回风比例在 2:1 左右时,

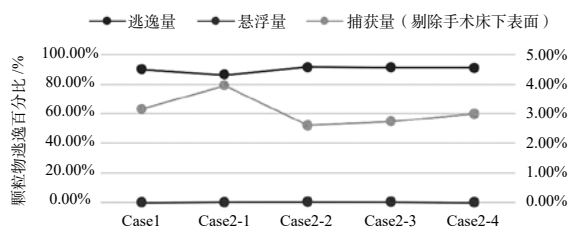
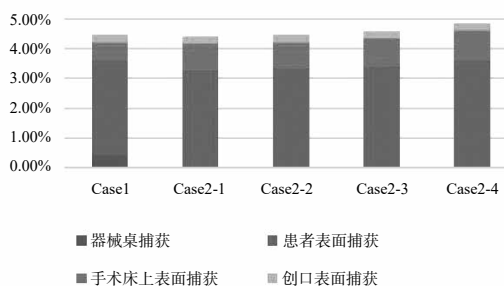


图 12 颗粒物去向百分比



(a)

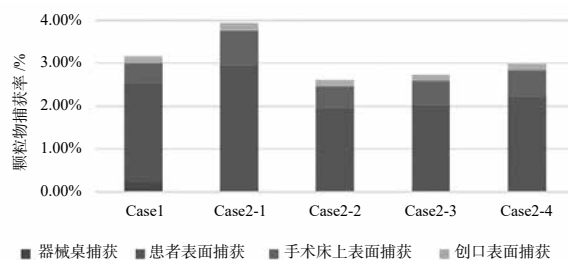
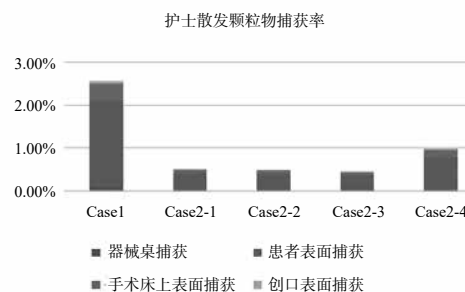


图 13 不同工况捕获颗粒物组成



(b)

图 14 不同散发源颗粒物捕获去向及比例

污染物控制效果最佳;当上回风风量不断加大时,污染物控制效果逐渐下降,并对护士散发颗粒物的控制效果急剧下降。通过以上不同运行工况的评价与优选,认为德国上下部回风比例为 2:1 的通仓手术室模型,可以推荐为我国骨科通仓手术室合适的设计方案,这对我国通仓手术室的环境控制与节能有较大的理论意义与工程应用价值。

(3) 患者表面颗粒物沉降量与污染源位置相关,污染源越靠近患者,其造成沉降量越大。因此手术医生在手术过程中要适当注意自己的操作体位以及站立位置,尽量减少对患者的影响。

(4) 人体及设备散热造成热羽流及其阻碍作用对气流组织影响较大,因此对颗粒物的运动产生较大影响。这要求设计通仓手术室应配置气流阻挡系数小、发热量少的多头 LED 无影灯。

参考文献

- [1] 沈晋明,刘燕敏,俞卫刚.从设施角度谈降低医院手术成本的措施[J].暖通空调,2014,44(3):43-47.
- [2] 沈晋明,刘燕敏.德国医疗建筑手术部通风与空调系统的应用研究[J].中国医院建筑与装备,2017(3):33-37.
- [3] Nielson P.V. Computational fluid dynamics and room air movement. Indoor Air,2004,14(7):134-143.
- [4] 高乃平,董昆,朱彤,向阳.房间内强自然对流的两方程模型模拟研究[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(04):601-609.
- [5] Bin Zhao, Caiqing Yang, Xudong Yang, Shangke Lu. Particle dispersion and deposition in ventilated rooms: Testing and evaluation of different Eulerian and Lagrangian models [J]. Building and Environment, 2008, 43: 388-397.
- [6] T.T. Chow, Zhang Lin, Wei Bai. The Integrated Effect of Medical Lamp Position and Diffuser Discharge Velocity on Ultra-clean Ventilation Performance in an Operating Theatre[J]. Indoor and Built Environment, 2006, 15(4):315-331.
- [7] Noble W C. Dispersal of skin microorganisms[J]. The British Journal of Dermatology, 1975, 93(4).
- [8] 张蕊.手术室内气流组织与生物粒子控制的研究[D].天津大学,2005.
- [9] Farhad Memarzadeh, Andrew P. Manning. Comparison of operating room ventilation systems in the protection of the surgical site[J]. ASHRAE Transaction, 2002, 108:4549-4562.
- [10] Jena Hertberg, Wade Smith, Greg Quinn, et al. experimental investigation of hospital operating rooms(OR) air distribution. ASHRAE Research Project Report 1397-RP.2013.

建设医院日间手术中心（部）

沈晋明

（同济大学，上海 200092）

〔摘要〕本文重点介绍了日间手术作为一种高效率、低成本、低能耗的手术模式，在国内外发展情况。提出改变医疗模式，提高非能源效率，重视和规范日间手术中心（部）设施建设。

〔关键词〕日间手术；非能源效率；医疗设施

0 引言

日间手术（Ambulatory Surgery, One-day Surgery, Same day Surgery）是一种高效率、低成本、低能耗的手术模式，是提高医疗覆盖面良好的医疗模式。是一种典型的提高非能源效率的医疗模式。最早是由英国内科医生 James H. Nicoll 提出，后来在美国与欧洲大陆得到推广，直到 90 年代才进入中国。2015 年，柳叶刀委员会在《全球手术 2030》中对日间手术做出这样的评价：日间手术是实现普及、安全和充分外科治疗的关键途径。

许多国家都在大力推广日间手术。在国际上一些率先推广的国家，日间手术占择期手术比例已经达到 60% 以上，英国和美国更是高达 80%。日间手术从几间手术室也发展到拥有十多间手术室的日间手术中心（Ambulatory Surgery Center ASC），甚至更大。

日间手术的优越性具体体现在：^[1]

（1）在经济上，日间手术释放了资源，日间手术更加节约资源，这是因为日间手术时间更短，手术周期降低，流程化的管理模式可以减少人员配备，能更有效地使用手术室设备和用品，将住院设施资源留给更复杂和紧急情况患者。

（2）促进健康全覆盖的更好实现，可减少同一国家内不同区域与不同国家之间的卫生健康不平等。

（3）患者从日间手术中获得的益处包括：住院时间以小时而不是以天计算，这使得更多的患者能获得治疗并减少等待时间。日间手术减少了对患者日常生活的干扰，减少离岗或被护理的时间，使患者身体能够尽快恢复到正常功能。

可见，日间手术发展已是大势所趋，已成为未来发展的手术模式。

鉴于国外日间手术已经发展十分成熟。在美国，日间手术的医疗设施在《医院和卫生设施的建造和装备指南》（Guidelines for Construction and Equip-

ment of Hospital and Medical Facilities）中的门诊设施章节中有详细的规定。由于独立的门诊设施的发展，2018 版的指南，以三个独立文本出版，即“医院设计与建造指南”“门诊设施的设计和建造指南”和“养老卫生、护理和辅助设施建造”。

目前已有日间手术的相应导则，如美国日间手术与麻醉指南（GUIDELINES FOR AMBULATORY ANESTHESIA AND SURGERY），欧盟的日间手术手册（Ambulatory Surgery Handbook），英国卫生部的日间手术设施（Health Building Note 10-02: Day surgery facilities）。规范了日间手术设施的建设，推动日间手术的发展。^[2]



图1 国外日间手术设施相关导则

2013 年，国家卫计委卫生发展研究中心牵头成立的中国日间手术合作联盟。根据联盟的定义，日间手术指病人在一日（24h）内入院、出院完成的手术或操作。联盟特别注明：日间手术是对病人有计划进行的手术和操作，不含门诊手术。目前联盟推荐的日间手术以常见病，无合并症和并发症和相对简单的病种为主，共计 56 个，计划今年遴选出第二批。

近年来，手术技术的迅速发展，医疗装备的日新月异，新的麻醉设备、药物、技术的不断进步。特别是微创手术出现与发展，为医院选择和扩大日间手术病种创造了条件，日间手术量日益增多。例如，上海交通大学仁济医院、四川大学华西医院等是我国首批开展日间手术的单位。经过这几年的努力，已经把开展日间手术的病种扩大到了 300 多个。使得有限的资源服务于更多需要手术的患者。据卫计委统计数据，截至 2016 年底，日间手术占择期手术

基金项目：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”（2018YFC0705205）资助。

比例达 11%，有 396 家医疗机构设置日间手术中心，较 2015 年增加了近 300 家。^[3]

今年年初，国家卫计委召开了 2018 年全国卫生计生工作会议，制定了来年的十大重点工作任务。其中，“三级医院扩大日间手术试点”作为第二项重点工作被单独列出。国家层面上的支持与推广，近几年日间手术会有更大发展，将会出现更多的日间手术中心（部）。

1 改变医疗模式，规范日间手术中心（部）设施建设

日间手术是将原来需要住院完成的手术的在院时间缩短至 24 小时以内，涉及的病种较多，从普外到较复杂的手术，目前正大力促进开展三级或四级的日间手术。另一方面，微创手术已得到极大发展，微创手术切口缩小，手术时间缩短，出血减少，降低了对手术环境的要求。使得过去在洁净手术室开展的手术现在可以在一般手术室中开展。

另外，日间手术对流程的要求非常精细，术前检查、筛选、评估，术中麻醉技术的运用和手术人员的配合，术后安全性的确保等等。为了保障日间手术中心（部）良好运转，术后复苏室与手术室配比要高于目前的所建的手术部。

从目前我国医院开展日间手术的设施来看，主要有两种模式：

（1）在综合医院内设独立的日间手术中心（部），集中收治，集中管理。类似于医院内独立的科室（如洁净手术部），中心拥有自己的复苏床位、手术室，有独立的中心主任（通常由外科医生或麻醉科医生担任）、医生团队、护士长和护士，由中心集中收治各专科符合条件的病人。这种模式可以独立运行日间手术，便于做大做强，需要建立一套完善的管理制度与实施方案。日间手术发展成熟后，建设这种设施模式会越来越多。

（2）从医院洁净手术部中划归出几个手术室，专做日间手术。分散收治，统一管理，由全院统一安排日间手术。日间手术由医务处管理，包括定制度，控制准入等。各病房自己收病人，根据医务处安排，排队进行日间手术。手术室通常是各专科分散收治，由一名主任（或护士长）统一管理、安排手术，病人术后回到各专科安排术后相关工作。这种模式在开展日间手术的初级阶段易于管理与实施，但难以做大。

也有的医院日间手术采取集中和分散收治相结合的模式。目前像国外一样建设完全独立的日间手术诊所（One-day Surgery Clinics）、日间医院（One-day Surgery Hospital）或门诊设施（Outpatient Facilities）可能还需有一段时间。如果缺乏强大的医

疗技术和后勤支持，术后病患一旦出现并发症或其他意外，其风险很难把控，特别是跨机构转诊的流程。

2 重视建设日间手术中心（部）设施，提高非能源效率。

目前我国尚未有关日间手术中心（部）设施的建设标准，许多日间手术中心（部）设施的建设只能参照 GB 50333-2002 医院洁净手术部建筑技术规范，有些地方并不一定符合日间手术中心（部）特点与要求，不利于日间手术中心（部）发展与相应设施的规范建设。无论在综合医院内设独立的日间手术中心（部），还是在院内洁净手术部中设置日间手术区，需要编制《日间手术中心（部）设施建设标准》来规范其平面布局、人流物流流程、手术室与辅房配置，区域环境以及不同手术环境控制等问题，这对提高日间手术中心（部）运营效率与避免交叉污染十分有益，同时也可有效地降低造价与运行费用。

日间手术对我国是新的，确定符合我国国情的日间手术中心的医疗工艺、医疗流程与平面布局，这是重点。因为医疗工艺与流程必须符合国情，我国收治的病患多，病患与医护人员的比例等与国外差异较大。无法直接引用国外日间手术导则中医疗这一块。不像洁净手术部全国基本上模式差不多，各地日间手术中心的医疗工艺与流程不一样，这也是好事，多少年运行下来积累了不少经验教训。所以要大家集思广益，深入探讨，找出最佳、适合国情的医疗工艺与流程，以便建筑师将它变成建筑语言。^[4]当然日间手术中心平面布局基本原则基本一致，一个精心设计的日间手术中心应避免手术前区域和手术后区域的交叉。患者应该能够以单线方式通过该设施，从主入口进入的患者必须与接送术后患者离开的门厅分开。等待手术的患者与术后的患者不应相见，以免引起心理上不必要的障碍。因此，平面布局的关键词：术前与术后区域不交叉；人流的单向路线（环形走廊，国内俗称“跑道式”）；患者入院接待厅与出院厅分开。

我们必须清醒看到发展日间手术重点在于成熟手术，提高效益、降低成本，而非追求实施复杂、高难度的前沿手术。这是我们建设日间中心的基点。日间手术中心（部）一般不需要 I 级洁净手术室，常常需要一般手术室和洁净手术室。一个手术中心（部）同时存在一般手术室和洁净手术室这是一个新课题。因为洁净手术室是区域控制理念，要遵循 GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》的规定。而一般手术室仅要求单室控制，要满足 GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》的

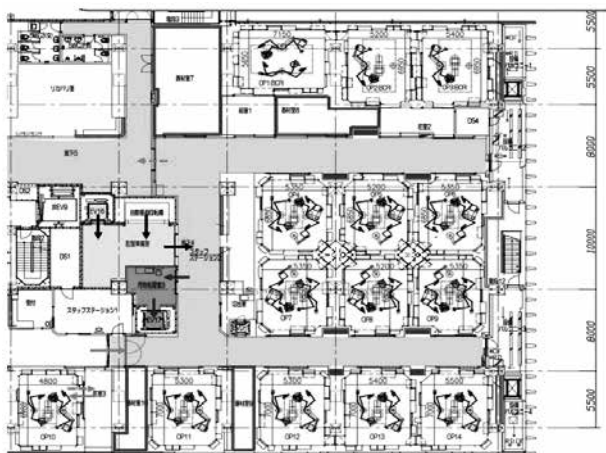


图2 日本组合手术部的平面布局

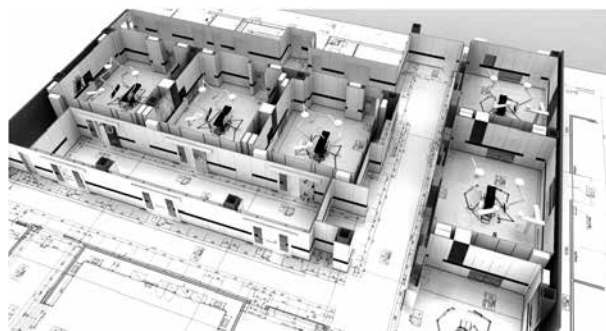


图3 美国组合手术部的平面布局

要求。将一般手术室和洁净手术室组合在一起,也许创造一种新的架构,不妨先称为组合手术部。这需要根据日间手术中心(部)的特点研究平面布局、人流物流流程、手术室与辅房配置,区域环境以及不同手术环境控制等问题。美国最新颁布的ASHRAE170-2017《医疗设施通风标准》中,要求手术室(原B级和C级)区域控制,即要求手术室必须设置在限制区内,需要通过半限制区进入,而一般手术室(原A级手术室)不需要区域控制,可以设置限制区外。国外定义的限制区是有级别的控制区域,半限制区域是无级别的受控区域,^[5]非限制区域是一般区域(非受控区域)。限制区与半限制区与我国GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》的规定中洁净区与非洁净区差不多。

将一般手术室和洁净手术室同时组合在一个手术中心(部)日本、美国等先进国家已有许多模式,值得我们借鉴(见图2与图3)。

3 结语

日间手术中心是一种高效率、低成本、低能耗的手术模式,是一种典型的提高非能源效率的医疗模式。日间手术使得过去在住院洁净手术室中开展的许多手术现在可以在一般手术室中开展。手术环境控制的能耗大大降低。日间手术周期更短,待院时间(或耗能时间更少)是以小时而不是以天计算。简化了流程化的管理模式,减少人员配备,更有效地使用现有的手术室装备和设施系统。提高手术效率,加大手术周转量。如果以一个手术周期来计算能耗,仅仅改变了医疗模式,这种非能源效率降低

的总能耗大大多于能源效率。^[6]而且将住院设施资源留给更复杂和紧急情况需要手术的患者。

我国开展日间手术已经有十多年了。认真总结多年来医院开展日间手术以及建设日间手术中心(部)的实践经验,为编制日间手术中心奠定了基础。目前,中国医学装备协会已同意并批准了编制《医院日间手术部建设标准》。编制组将在标准编制过程中,将进行广泛深入的调查研究,广泛征询意见。并积极吸收国外日间手术中心的医疗实践的先进经验,采纳相关的科研成果,参照有关国内外的相应的建设标准(指南)和技术规范,积极开展编制工作。预计《医院日间手术部建设标准》编制工作将在一年内完成。

参考文献

- [1] 马洪升. 日间手术[M]. 北京:人民卫生出版社,2016.
- [2] 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.
- [3] 赵蓉,杨丽,张薇薇等. 上海市级医院日间手术发展现状评估[J]. 中国医院,2015,19(4):7-9.
- [4] 龙灏,王玉婕,张程远. 基于医疗工艺流程的综合医院日间手术中心设计初探[J]. 城市建筑,2017,9:28-31.
- [5] 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.
- [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(已录用).

风机过滤单元 (FFU) 性能试验方法

——CRAA 标准 (报批稿) 解读

林忠平, 王 登

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 200092)

[摘 要] 介绍了 CRAA 标准《风机过滤单元试验方法》(报批稿) 的编制背景, 对该标准的应用范围、主要内容以及特点等概况进行了说明, 重点介绍了标准中规定的各种性能试验方法, 包括空气动力及能耗性能试验、面风速均匀性试验、噪声性能试验、振动性能试验、谐波性能试验以及机箱漏风量试验。

[关键词] 风机过滤单元; 性能试验方法; CRAA 标准报批稿

0 引言

风机过滤单元 (Fan Filter Unit, FFU) 是一种由风机和空气过滤器组成的空气净化设备, 具有整体设计灵活、安装施工方便、密封方式简单有效以及易于控制等优点, 在洁净室尤其是电子洁净厂房中得到广泛应用^{[1-2][3]}。以近年来国内迅速发展的液晶面板行业为例, 一条 5 代面板生产线需要约 12000 台 1200×1200mm (4×4 ft) FFU, 6 代线需要约 25000 台, 8 代线需要约 42000 台, 而 10 代线则需要约 80000 台。此外, 设备端风机过滤单元 (EFU) 的需求量也不少。随着市场需求的不断增加、生产能力的不断提升和生产技术的不断进步, 对 FFU 的性能要求也越来越高。然而, 市场上不同制造商的 FFU 产品性能参差不齐, 采用的性能试验方法也不尽相同, 结果缺乏可比性。因此, 编制科学合理、统一规范的 FFU 性能试验方法标准, 对于帮助用户合理选用 FFU 产品, 以及推动 FFU 制造行业良性发展都十分重要。

2012 年, 中国建筑科学研究院参考美国环境科学与技术学会 (IEST) 最初的 FFU 试验方法草案编制了 FFU 产品标准 JG/T 388-2012^[4], 2014 年, IEST 正式发布了 FFU 试验方法标准 IEST-RP-CC036.1:2014^[5]。目前, 国内尚无专门的 FFU 性能试验方法相关标准, 另一方面, JG/T 388-2012 和 IEST-RP-CC036.1:2014 并未对 FFU 的振动、谐波和机箱漏风量等性能参数的试验方法进行规定, 而随着工艺的进步, 用户对 FFU 的这些性能也提出了要求, 相关的试验方法亟需制定并统一。

在此背景条件下, 2016 年 9 月中国制冷空调工业协会 (CRAA) 立项编制《风机过滤单元试验方法》标准, 同济大学负责起草, 共 34 家包括高等院校、

科研院所、设计院、设备制造商 (涵盖 FFU、过滤器、滤材、风机及测试设备等) 及工程承包商等单位参与编制, 通过吸收国外先进理念, 广纳多方意见, 在大量的试验与循环对比试验及相关研究工作的基础上, 于 2018 年 11 月完成了 CRAA 标准《风机过滤单元试验方法》(报批稿)。该标准的主要目的是为 FFU 的用户及供应商提供必要的协议, 用以规范 FFU 性能的测试及报告, 使不同制造商生产的 FFU 产品的性能直接进行比较。

1 标准概况

1.1 应用范围

该标准所规定的性能试验方法适用于在任何方向上过滤器尺寸不大于 1.5m (5 英尺) 的 FFU, 其他尺寸规格的 FFU 及设备端风机过滤单元 (EFU) 则可参照采用此标准。该标准对交流电机、直流无刷电机、具有定风量控制以及不具有定风量控制功能的 FFU 均适用。

作为自愿性标准, 用户双方可将该标准作为买卖协商的依据, 可根据实际使用情况协商确定标准中具体参数的规定。该标准不排除其他相关标准, 当与用户持有的其他标准不一致时, 可由用户决定采用。

1.2 主要内容

该标准的内容结构如表 1 所示。其核心为试验方法部分, 规定了体积风量、外部静压 (余压)、电参数 (电流、电压、总输入功率和功率因数)、面风速均匀性、噪声 (声功率级)、振动 (振动速度)、电流总谐波畸变率和机箱漏风量等性能参数的试验设备和必要的试验程序。

各项性能的测试应包括 FFU 样品附属设备对其性能的影响。试验装置及 FFU 的安装应保证气密性, 且推荐使用同一套试验设备来进行各项性能的测试。

1.3 标准特点

与 JG/T 388-2012 和 IEST-RP-CC036.1: 2014 等

基金项目: 国家重点研发项目《洁净空调厂房的节能设计与关键技术设备研究》(2018YFC0705202)。

表 1 标准的内容结构

部分	说明
前言	对标准编制的背景及归口单位等进行说明。
范围	对标准的主要内容、适用范围以及主要目的进行说明。
规范性引用文件	对标准所引用的相关标准和引用方法进行说明。
术语与定义	对标准中所用到的术语和定义进行规定。
符号和缩略语	对标准中所用到的符号和缩略语进行说明。
试验要求和条件	对试验项目、试验设备和试验环境的相关要求和条件进行规定。
试验方法和仪器	对体积风量、外部静压（余压）、电参数（电流、电压、总输入功率和功率因数）、面风速均匀性、噪声（声功率级）、振动（振动速度）、电流总谐波畸变率和机箱漏风量等性能参数的试验设备和必要的试验程序进行规定。
报告	对试验报告应包含的具体内容进行了规定，并给出了可供参考的报告格式。
附录（资料性）	• 附录 A：给出了一个按照该标准进行 FFU 综合性能测试的示例，包括测试要求示例、数据记录示例和最终报告示例。 • 附录 B：对风机过滤单元进行概述，包括组成结构、应用场合、供电方式和转速控制方式等。 • 附录 C：介绍了一种体积风量、外部静压（余压）和电参数测试的备选方法。 • 附录 D：介绍了一种 FFU 噪声性能评价的备选方法。 • 附录 E：介绍了一种声功率级测试的备选方法。 • 附录 F：介绍了 FFU 的设计和制造时对检漏时 FFU 过滤器上游气溶胶加载均匀性的考虑。

其他 FFU 相关标准相比，该标准具有以下特点：

（1）根据最新试验研究成果^[6]，对 FFU 的面风速均匀性试验方法参数进行了改进，引入了面风速均匀性自动化扫描测量手段，可使测试结果更加准确、过程更加高效。

（2）增加了对 FFU 振动性能试验方法的规定，以满足生产工艺方面对环境微振评估的需要。

（3）增加了对 FFU 谐波性能试验方法的规定，以满足电力方面在评判和预防谐波危害时的需求。

（4）增加了对 FFU 机箱漏风量试验方法的规定，以评价机箱的密封性。

（5）规定了 FFU 性能试验的报告内容，给出了参考的报告格式，以及完整的试验示例，使性能试验报告的撰写更加清晰、规范和容易。

2 空气动力及能耗性能试验方法

FFU 的应用具有数量大、持续不断运行的特点，FFU 的运行效率和能耗是用户非常关心的问题。体积风量、外部静压（即余压）以及电参数（电流、电压、总输入功率和功率因数）三项参数共同用于评价 FFU 的空气动力及能耗性能，且此三者的测量通常同步进行，故此处将其总结为空气动力及能耗性能试验。

典型的 FFU 性能试验装置如所示。通过变频器控制辅助风机和调节阀门可以改变 FFU 的运行风量和余压，通过调速器可以改变 FFU 的转速，两者结合即可实现将 FFU 调节到任意的工况。

FFU 的风量通常以面风速给定，体积风量等于面风速乘以过滤器有效空气流通面积。风量的测量通过喷嘴组进行，喷嘴的数量和尺寸应适当，以保证喷嘴前后静压差不小于 100Pa。外部静压也称余压，是指 FFU 气流通道上的外部设备所引起的静压损失，也即是克服过滤器、箱体结构等自身阻力后，FFU

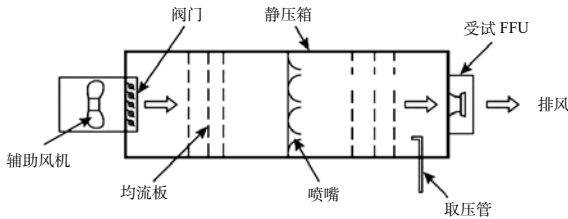


图 1 典型的 FFU 性能试验装置示意图

提供的可供机外通风系统使用的空气静压值。由于 FFU 出风风速通常较低，动压很小，因此忽略动压值，用静压代替全压。余压的测量在靠近 FFU 进风口的静压箱内进行，由于 FFU 出口与大气相联通，因此静压箱内的静压绝对值便是余压。在测试体积风量、余压的同时，应测试并记录电流、电压、总输入功率 and 功率因数等电参数。电参数测量仪器应连接在 FFU 和外部电源之间，以保证所测结果包括 FFU 风机和 FFU 箱体内部其他耗能设备的电耗（如内部控制模块及指示灯）。

如果 FFU 具有多档风速调节，建议对每个风机转速分别进行测试；对于无级调速的 FFU，可将 FFU 风机设定为不同的转速分别进行测试。每一个转速下，应测量出一组不同的风量，同时记录相应的余压和电参数。

最终报告时，采用两项指标来综合评价 FFU 的空气动力及能耗性能：空气动力效率和能耗性能指数。空气动力效率是指一定工况下，FFU 空气动力功率占总输入功率的比值，如式（1）所示。

$$E = \frac{Q \times ESP}{N} \cdot \frac{100}{3600} \quad (1)$$

其中：E 为空气动力效率（%）；Q 为 FFU 输

送的空气流量 (m^3/h); ESP 为 FFU 提供的余压 (Pa); N 为 FFU 的总输入功率 (W)。

FFU 能耗性能指数则指一定工况下, FFU 输送单位空气流量时所消耗的总输入功率如式 (2) 所示。

$$EPI = \frac{N}{Q} \times 60 \quad (2)$$

其中: EPI 为 FFU 能耗性能指数 ($\text{W}/(\text{m}^3/\text{min})$); N 为 FFU 的总输入功率 (W); Q 为 FFU 输送的空气流量 (m^3/h)。

需要指出的是, 为了增加 FFU 性能试验结果的可比性, 并使其应用到其他环境工况条件, 应测量并记录试验环境的空气温度、相对湿度和大气压力, 在报告中将试验结果换算成标准工况 (标准大气压、空气温度 20°C)。

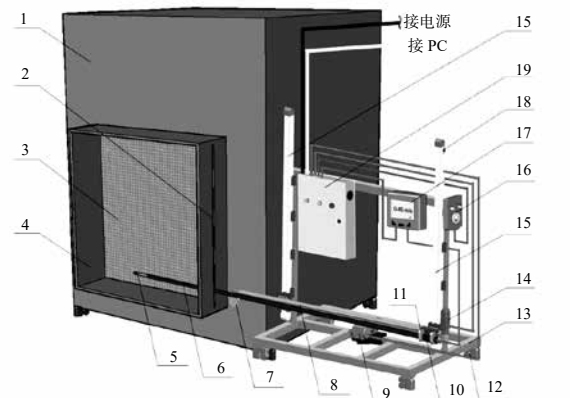
3 面风速均匀性试验方法

面风速均匀性是 FFU 最重要的性能参数之一, 它直接影响到洁净空间的气流组织和洁净度, 尤其是对单向流洁净室而言更为重要。

测量时, 应在 FFU 有效出风面的四周设置高度为 46cm 的围挡, 以减少外界气流对出风气流的影响。在距离 FFU 过滤器出风面 15cm 处的断面上, 从距离过滤介质边界 5cm 开始, 将有效流通区域划分成面积相等的网格, 取每个网格的中心作为风速测点。对于网格尺寸的大小, IEST-RP-CC036.1:2014 中规定网格尺寸最小为 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$, 最大不超过 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 。但最新研究^[6]表明, 测点间距在 $10\text{cm} \sim 20\text{cm}$ 之间变化对面风速均匀性测试结果具有显著影响。较小的间距意味着较多的测点, 单点所代表的网格区域更小, 测试结果理应更可靠。研究表明, 间距为 20cm 时测试结果的代表性较差, 间距在 15cm 以下时测试结果相对较可靠。因此, 本标准中将网格允许最大尺寸从 20cm 降低至 15cm , 规定网格尺寸最小为 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$, 最大不超过 $15\text{cm} \times 15\text{cm}$, 并建议宜选取较小的网格尺寸进行测点布置。

风速测量可以使用单点热线风速仪或电子微压计, 不应使用多测点平均风速测量仪。风速仪探头必须固定, 不能手持, 以减少人员误差。考虑到风速的波动性, 每个测点的风速测量应持续至少 5s , 当读数稳定时记录速度。编者成功研制了 FFU 面风速均匀性自动化扫描测试装置, 如所示。考虑到手工测试误差大和效率低的缺点, 本标准建议宜采用风速自动扫描测量装置进行面风速均匀性试验, 以提高测试的准确度及效率。自动测试装置的采用也使得较小的网格尺寸划分更易于接受。

FFU 的面风速均匀性采用面风速不均匀度作为



- 1- 静压箱; 2- 槽孔; 3-FFU 出风面; 4- 四周挡板;
5- 热线风速仪探头; 6- 探头测量杆 (加长); 7- 测量杆支撑件 (滚动); 8- 横向导轨 (一级运动件); 9- 伺服电机 (抱闸, 竖向驱动); 10- 横向滑块 (二级运动件); 11- 测量杆固定件; 12- 滚轮 (带固定和水平调节, 四个); 13- 结构框架; 14- 伺服电机 (标准, 横向驱动); 15- 竖向导轨; 16- 控制手柄; 17- 风速变送器; 18- 限位开关 (光电传感器, 六个); 19- 控制柜

图 2 FFU 面风速均匀性自动扫描测试装置示意图

评价指标, 即全部测点风速实测值的相对标准差, 按式 (3) 进行计算。

$$RSD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 / (n-1)}}{\bar{v}} \quad (3)$$

其中: RSD 为所有测点风速的相对标准差; v_i 为任一测点的实测风速; $\bar{v}$ 为所有测点风速的平均值; n 为测点数。

4 噪声性能试验方法

噪声性能也是 FFU 的一项重要性能参数。洁净室内通常有大量的 FFU 同时运行, 噪声的叠加使得环境噪声的控制变得棘手。在评价 FFU 产品的噪声性能时, 宜测量和报告其声功率级 ($1/3$ 倍频程), 这样可以根据测量结果及 FFU 的位置和数量来分析预测洁净室的声环境。

声功率级的测试应采用声强法进行, 可参照 ISO 9614-1 或 ANSI/AMCA 300-08 中所规定的方法。前者通过在包络声源的测量表面的垂直方向上测量声强以确定声源声功率级。只要测试环境中具有包络声源的测试表面, 且声源产生的噪声在该测试表面不随时间变化, 无论是实验室测试还是现场测试均可采用该方法。后者需要采用特殊的装置进行测试, 通常只能在实验室测试中采用。该方法未考虑振动与噪声的直接影响关系, 仅限于测量空气传声。由于声压的测量相对较容易, 故该标准在附录中给出了一种声功率级测试的备选方法。该方法先测量声压级然后再转化成声功率级。

事实上,不管是采用上述哪种方法,声功率级的测试对环境的要求都较高,且过程和步骤都较复杂。当不具备声功率级的测试条件时,该标准在另一份附录中提供了一种噪声性能测试的备选方法,以进行简便快速的评价。该方法测量并报告 FFU 的 A 计权声压级。如所示,噪声测点正对 FFU 过滤器出风面中心,距离 1.5m。噪声主要与 FFU 风机的转速有关,通常随着转速的增加而增大。测试时将 FFU 余压设置为 0Pa,并根据实际需求指定风机转速。

5 振动性能试验方法

在一些洁净场合中,工艺要求对于环境的微振有特别限制。FFU 本身作为振动源,其振动性能需要进行测试评价。FFU 风机的转速通常在 1500 转/min 以下,且实际使用中一般不会低于 600 转/min,属于中频振动,因此,采用振动速度作为表征 FFU 振动强度的标准。

测试时,应根据制造商的安装指南按照实际应用情形安装 FFU。由于振动主要与 FFU 风机的转速有关,并且试验发现振动强度并非总是随着转速的增加而增强。因此,测试时将 FFU 余压设置为 0Pa,并根据实际需求指定风机转速。为全面反映 FFU 在不同方向上的振动情况,按所示的方式进行测点布置。为衡量风机轴向方向上的振动情况,在 FFU 机箱的进风侧表面布置 4 个测点,分别位于表面的四个角上,距离相邻两边的距离均为 10cm;为衡量风机径向方向上的振动情况,在 FFU 机箱四个侧面的中心位置各布置 1 个测点。读数稳定后读取振动速度值。取 8 个测点中的最大振动速度作为振动性能的评价值。

6 谐波性能试验方法

谐波畸变会影响电能质量,可能导致电力变压器和电力线缆发热、低压配电设备工作异常,并对

电子设备造成干扰。FFU 作为用电设备,在运行时会向公共电网中注入谐波电流,是谐波源之一。大型洁净厂房中,通常有上万台 FFU 同时连续不断运行,其对电网谐波畸变的影响应该得到重视。因此,需要对 FFU 的谐波性能进行测试评价。

FFU 设备的谐波性能通常以电流总谐波畸变率表征,即全部谐波电流含量方和根与基波电流有效值之比,其反映了电流波形相对正弦波的畸变程度。电流总谐波畸变率可采用电能质量分析仪进行测量。测量时,应将仪器的电流、电压钳型传感器应连接在外部电源通向 FFU 的供电线路上。试验研究表明,电流总谐波畸变率随 FFU 的运行风量和余压变化显著,如图 5 所示。因此,测量时应根据实际需求指定受试工况。

7 机箱漏风量试验方法

FFU 的机箱外框由多块材料铆接拼合而成,电源线与电机的连接、信号线与控制模块的连接都会穿透机箱。这些地方都存在密封问题,而在许多 FFU 的应用场合,特别是现代集成电路生产厂房内,密封胶由于可能产生化学污染而不允许使用。机箱密封性不好会导致漏风问题,对 FFU 的空气动力及能耗性能造成不良影响。因此,需要对 FFU 机箱漏风量进行测试评价。

FFU 机箱漏风量定义为在一定静压下通过机箱本体结构及其接口,单位时间内泄出或渗入的空气体积量。漏风量与额定风量之比称为漏风率。测试时,拆除高效或超高效过滤器,封闭 FFU 机箱进风口,将漏风量测试仪连接到 FFU 机箱进口,如所示。调节机箱内静压达到设计工作压力并保持,稳定后记录漏风量,计算漏风率。设计工作压力定义为 FFU 全生命运行过程中 FFU 箱体出现的最大工作压力。FFU 运行时,机箱内最大正压出现在风机

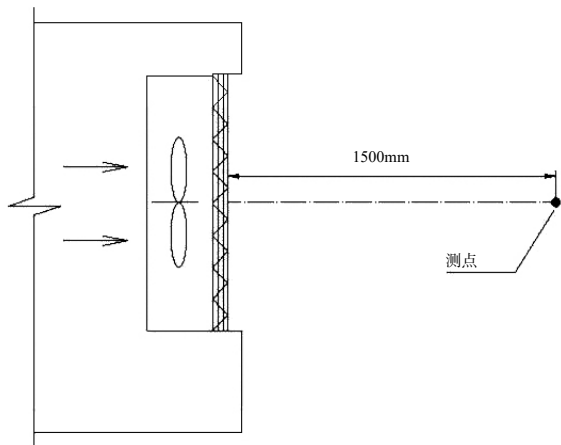


图 3 FFU 噪声测点布置示意图

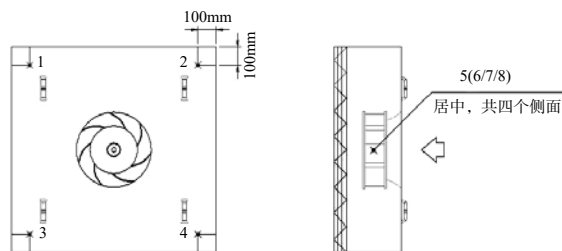


图 4 FFU 振动测点布置示意图

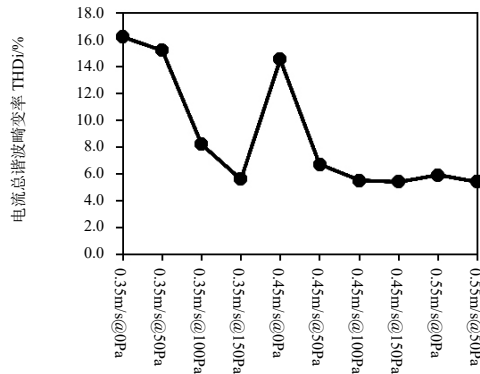


图5 某4×4FFU 的电流总谐波畸变

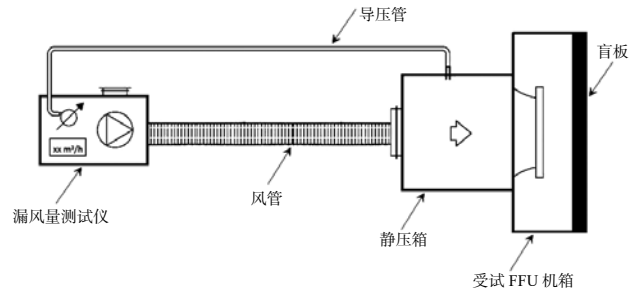


图6 FFU 机箱漏风量测试示意图

后,可估计为“洁净环境设计压力+设计风量下过滤器终阻力”;最大负压出现在风机前,可估计为“洁净环境设计压力-FFU 设计最大余压-设计风量下FFU 进风口压力损失”。设计工作压力可取以上两者绝对值中的较大者。若出于安全考虑,设计工作压力也可取设计风量下过滤器终阻力与FFU 设计最大余压之和。当然,也可通过改变机箱内的静压,测量出漏风量/漏风率与静压之间的关系曲线,以更全面地反映机箱的漏风情况。

8 总结

FFU 优点突出,在空气洁净领域的应用前景广阔。国内市场上不同制造商的FFU 产品性能参差不齐,采用的性能试验方法也不尽相同。洁净环境下生产工艺的进步对FFU 的性能提出了一些新的要求。CRAA 标准《风机过滤单元试验方法》(报批稿)作为国内首部专门的FFU 性能试验方法标准,对FFU 的空气动力及能耗性能试验、面风速均匀性试验、噪声性能试验、振动性能试验、谐波性能试验

以及机箱漏风量试验均进行了清晰、合理、完备的规定。该标准的最终发布与实施将有助于促进FFU 产品的性能与制造水平的进一步提升,推动洁净行业的良性发展。

参考文献

- [1] 周翔. FFU 应用方式及相关的问题 [J]. 洁净与空调技术, 2002(2):34-37.
- [2] 张利群. FFU 的应用 [J]. 洁净与空调技术, 2003(3): 46-49.
- [3] Flaherty R. Clean rooms: Continuing evolution of fan filter units for clean rooms[J]. Filtration + Separation, 2011, 48(4):33-37.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JG/T388-2012, 风机过滤器机组 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [5] IEST-RP-CC036.1:2014, Testing Fan Filter Units[S].
- [6] 王登. 《风机过滤器机组 (FFU) 面风速均匀性测试与评价研究》. 同济大学硕士学位论文, 2019.

高效空气过滤器国标体系主要修订内容解读

冯 昕¹, 江 锋², 张 惠¹, 曹冠朋¹, 梁 磊¹, 孟令坤¹

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 清华大学, 北京 100084;)

[摘 要] 本文为 2015~2017 年间高效空气过滤国标体系修订过程的研究工作技术总结, 文章通过对近 10 年来国内外对高效空气过滤器性能测试研究的进展以及国际技术标准体系的发展进行梳理, 总结了现行国家标准体系所存在的主要技术问题, 并对标准修订工作针对所述问题所开展的主要研究工作进行了介绍, 对标准体系主要修订内容进行了相应解读。

[关键词] 高效及超高效过滤器; 空气净化; 过滤器性能测试; 高效过滤器分级; 高效过滤器生命周期评价

0 引言

高效及超高效过滤器是各类型洁净受控环境用于保护室内环境、工作人员以及周边环境安全的关键性净化处理措施, 被广泛应用于微电子、制药、食品、医疗卫生、检验检疫以及航空航天等诸多国民经济支柱性产业。我国高效空气过滤器于上世纪 60 年代研制成功, 80 年代, 我国借鉴英国的钠焰法(火焰光度计法)以及前苏联的油雾法初步建立高效空气过滤器的效率测试标准 GB 6165《高效空气过滤器性能试验方法 效率和阻力》, 90 年代形成涵盖高效空气过滤器产品设计、生产、技术要求以及相应检测方法的完整产品技术标准 GB 13554《高效空气过滤器》。2008 年, 我国参考欧美发达国家在 2000 年前后开始采用的计数法, 建立分别针对过滤器以及过滤材料的 MPPS 效率测试方法, 将对过滤器的效率检测范围提高到 99.99999% 以上的超高效过滤器范畴。

截至 2015 年, 一方面国内空气净化行业在 7 年的国标运行使用过程中对于旧版国标体系的一些存在问题取得了新的认识与积累, 另一方面, 2011 年国际标准化组织 ISO 也以欧洲标准为蓝本形成并正式颁布了首份全球通用国际标准 ISO29463《High-efficiency filters and filter media for removing particles in air》, 因此, 有必要对当时标准存在的主要技术问题进行梳理, 并对新国际标准环境下提高国标体系与国际标准体系的适应性和对接性进行改进提升。因此标准主编单位会同行业内主要技术研发机构、高校、生产厂家以及检测机构等有关单位成立标准修订编制组并开展了大量的比对测试以及基础技术改进评估工作, 于 2017 年底完成了新一轮国标体系修订稿的标准审查与报批工作。本文将对国标体系修订过程所面临的主要问题、技术研发工作以及所形成的主要修订内容进行介绍, 供行业各领域专家批评指正。

1 当前国标体系主要存在的问题

通过对近年来国标体系使用情况以及终端用户、生产厂家、检测机构的信息反馈汇总, 我国旧版国标体系主要存在的技术问题包括:

(1) 产品性能分级标识体系与国际分级体系不适应。

表 1 08 版国标分级体系与国际标准比对^[1-4]

最高效率	EN 1822 计数法	GB/T13554		EN1822-1		ISO 29463 计数法
		钠焰法	计数法	光度计法	计数法	
99.90%	H13	A		A	H	ISO 3500
99.95%				B (双风管测试) F (单管)	I (双风管测试)	
99.97%				C (需扫描检测)	J (需扫描检测)	ISO 4000
99.99%				D (需扫描检测)	K (需扫描检测)	ISO 4500
99.995%	H14	C (需扫描检测)	B (需扫描检测)		F (需扫描检测)	ISO 5000 (需扫描检测)
99.999%	H15				G (需扫描检测)	ISO 5500 (需扫描检测)
99.9995%						ISO 6000 (需扫描检测)
99.9999%	H16		E (需扫描检测)			ISO 6500 (需扫描检测)
99.99995%						ISO 7000 (需扫描检测)
99.99999%						ISO 7500 (需扫描检测)
99.999995%	H17		F (需扫描检测)			ISO 8000 (需扫描检测)

表 1 给出了 08 版国标高效分级体系与欧、美以及 ISO 标准分级体系的比对。从中可以看出 08 版国标分级体系的主要不足包括:

第一, 在抛弃不同标准体系中检测方法的差异性前提下, 08 版分级体系高效过滤器的起始值(99.9%)低于国际标准体系(99.95(欧盟及 ISO 标准)、99.97%(美国标准))。考虑到 08 版国标体系采用钠焰法为标准试验方法, 而钠焰法的效率测试结果一般高于国际上流行的计数法测试结果, 因此, 08 版标准分级体系中 A 级高效过滤器其实际效率相当于国际标准分级中的亚高效过滤器, 这种差异不利于满足过滤器所应用各类洁净室行业进行符合生产工艺要求的风险控制需求。

第二, 从国际标准体系的发展来看, 过滤器分级标识体系从早期的单纯效率数值标识体系向更丰

富信息层次发展, 现代的过滤器标识体系除效率级别外, 倾向与通过尽可能简洁的符号标识传递用户所需要的必要信息, 如具体效率测试结果、所采用测试方法以及检漏方法还希望体现过滤器出厂检测的核心试验方法等。例如, 欧洲标准以及 ISO 标准中的 U 组过滤器, 即表示过滤出厂必须经过扫描检漏测试, 而在 ISO29463 的制定讨论过程中, 针对 H 组别过滤器若出厂为扫描检漏测试是否标识为 U 组也曾有过广泛的讨论。08 版国标体系在此方面则存在不足。

(2) 08 版国标体系的效率标准试验方法——钠焰法粒径分布与过滤器最易穿透粒径 (Most Penetrate Particle Size, MPPS) 存在较大偏差, 因此试验结果与国际上通行的计数法试验结果存在偏差。

钠焰法作为我国高效过滤器效率检测的传统方法, 采用火焰光度计对经喷雾干燥发生过程获得的多分散 NaCl 固体气溶胶进行质量浓度进行测试、比较, 进而获得被测过滤器的效率检测结果。图 1 给出了采用粒径频谱仪所获得的传统钠焰法测试气溶胶粒径分布, 其计数中值粒径为 40~50nm, 计重中值粒径约为 300nm, 同时粒径分布较为分散。因此, 其实际测试结果与国际通行计数法相比存在较为明显的差距。

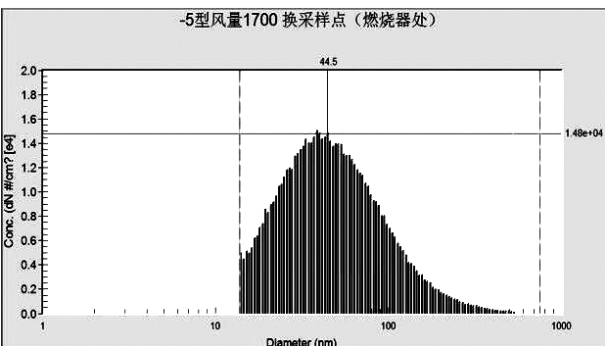


图 1 传统钠焰法测试 NaCl 气溶胶粒径分布

(3) 08 版国标体系中包含有针对特殊行业的特殊性能需求。我国的高效过滤产品及标准化测试方法均源于核工业的特殊要求, 因此, 过滤器产品标准 GB/T 13554 中一直保留了部分针对核工业行业特定的特殊产品强度要求, 例如要求高效过滤器能在 10 倍阻力下运行一定时间并保持完好等。时至今日, 一方面当前我国高效过滤器产品已经广泛应用于微电子、液晶面板、精密加工制造、医药、卫生等诸多科技行业, 而另一方面国内核工业已经以美国标准体系为蓝本完成了相应国标^[5]的制定并应用至今。因此, 作为通用产品技术标准, 不宜再保留相应的特殊性能要求。

2 新版国标体系主要修订内容及相应研究基础工作介绍

2.1 对国内现有高效过滤器试验台开展样本传递试验 (Round Robin Test), 了解当前各试验台差异性现状, 提升标准在试验台质量控制要求。

过滤器试验装置的基础性能参数, 如风量稳定性、风速均匀性、气溶胶浓度均匀性、稳定性以及管道气密性等, 均需要有较为严格并且一致的规定, 方能避免不同试验台的测试结果偏差。但在 08 版国标体系中, 钠焰法、计数法以及油雾法三种试验方法均对试验装置基础性能参数有各自要求, 各自所要求指标项目以及允许数值均存在偏差, 因此容易导致不同试验台在测试同一样品时存在偏差, 造成数据结果的不可比对。为明确国内目前在用过滤器试验台性能差异, 国标修订编制组于 2016 年组织国内现有部分高效过滤器试验台的测试结果比对传递试验 (Round Robin Test, RRT 测试), 传递试验采用过滤器 (效率测试标件) 和金属孔板 (阻力标件) 同时进行。图 2 给出了采用金属孔板作为阻力标件的部分试验台测试结果, 图中, 1#~5# 为参与传递试验的试验台编号, CV 为各试验台测试结果差异系数。表 2 给出了 4 台计数法试验台对传递过滤器的效率测试结果比较。从各试验台的效率及阻力测试比较结果来看, 各试验台间存在较为明显的差异性, 不同试验台对同一阻力标件的测试结果差异明显, 1#、2#、5# 试验台测试结果基本相当, 3# 试验台测试结果明显低于其它, 4# 试验台测试结果明显高于其它, 在高效空气过滤器常用风量范围 (500~1700m³/h), 各试验台总体差异系数 15% 左右, 相比发达国家较为成熟的技术水平存在一定差距。而对于效率标件的传递比对测试结果, 各试验台间的差异性结果要略好于阻力, 同为计数法的 4 台试验台中, 对同一台过滤器的透过率测试结果最大值

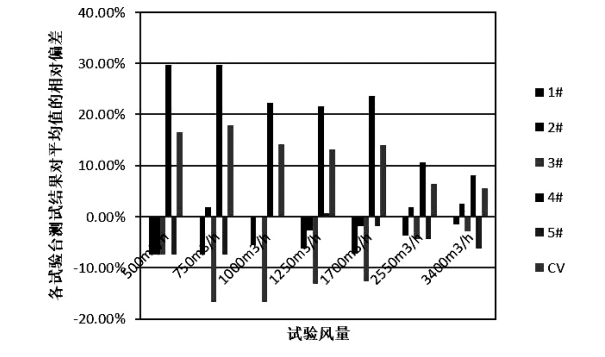


图 2 使用金属孔板作为阻力标件的各实验室测试结果间相对偏差^[6]

与最小值偏差 4~5 倍，效率测试结果偏差则超过半个 9。由于在新版 ISO 国际标准中高效及超高效过滤器分级体系以半个 9 划分级别，因此，这种差异最终将导致同一台过滤器在不同试验台上的测试结果出现级别差异。

为了进一步规范试验台设计、建设和使用维护，逐步缩小不同生产厂家、实验室试验台间的差异性，新版国标体系的修订过程中，统一提出了试验台的基础性能参数要求，表 3 给出了新版修订国标体系所提出的过滤器试验台性能及标定维护要求。所要求的基础性能参数中，除管道密封性、混匀性等传统的常规要求外，相比与国际标准体系，新增了对于阻力标件以及参考过滤器的定期回溯要求，希望可以为国内生产厂家提升产品质量控制水平提供助力。

2.2 完善高效过滤器的钠焰法测试方法

钠焰法是我国进行高效过滤器检漏测试的传统方法，也是旧版国标体系的效率基准测试方法，相比于 2000 年左右开始广泛应用的计数法测试，钠焰法的优势与劣势同等突出，其主要优点包括：采用 NaCl 作为测试气溶胶，安全并且对人员健康及环境无负面影响；采用火焰光度计作为测试手段，只针对含钠颗粒物进行测试，环境气溶胶对测试结果的影响小；与美国目前仍在使用的 DOP 光度计法一样，第一代光度法测试方法虽然试验方法相对粗糙，但试验台之间微小差异对试验结果的影响较计数法小，因此更容易实现不同试验台对相同测试样品的测试结果稳定性。而钠焰法的主要劣势在于：其测试结

果高于计数法，并且二者测试结果不具备可比性。这是由于钠焰法采用多分散 NaCl 气溶胶粒径分布特征与过滤元件 MPPS 粒径范围（最易穿透粒径，传统玻纤滤材一般为 100nm~250nm，PTFE 滤膜则一般为 50~70nm）存在明显偏差，同时，测试手段采用质量浓度而非计数浓度测试，因此大粒子尤其是粒径大于 1 μ m 的粒子对于效率测试结果的贡献会显著高于 MPPS 粒径范围的小粒子。另一方面，测试气溶胶中的 Na 及 Cl 会破坏电子芯片绝缘层从而影响产品成品率和可靠性^[7]。

为改善钠焰法测试气溶胶的粒径分布，标准编制组对不同 NaCl 气溶胶发生制备参数（溶液浓度以及喷雾压力）进行大量测试，并利用中效过滤元件的 MPPS 特性进一步对发生 NaCl 气溶胶进行筛选从而获得分布更接近于 MPPS 范围的测试气溶胶，图 3 给出了使用 Laskin 喷嘴喷雾发生 NaCl 固体气溶胶，再经不同级别过滤器筛选所得到多分散气溶胶计数峰值粒径，试验所使用 NaCl 溶液浓度 10%，喷雾压力 0.2~0.6MPa。由测试结果可见，随着筛选过滤器效率级别的提高，筛选后多分散 NaCl 气溶胶的粒径分布越来越接近于高效过滤器的 MPPS 范围，但过高的筛选过滤器级别会导致 NaCl 气溶胶质量浓度下降过多，不利于高效过滤器的效率检测，经比较权衡，F7、F8 级别的中效过滤器就足以满足测试需求。图 4 为使用 WPS 测试得到的改进后钠焰法试验气溶胶粒径分布，相比于传统钠焰法的测试气溶胶粒径分布（图 1），改进后的试验尘粒径分布更集中，也更接近过滤器 MPPS 范围。

表 2 国内 4 台在用计数法高效过滤器试验台效率传递比较测试结果^[6]

参与试验室	LQ-01（亚高效）			LQ-02（高效）		
	测试粒径/ μ m	效率	透过率	测试粒径/ μ m	效率	透过率
1#	0.1~0.2	98.46%	1.54%	0.1~0.2	99.9946%	0.0054%
3#	0.14	99.18%	0.82%	0.14	99.9968%	0.0032%
5#	0.1~0.2	99.50%	0.50%	0.1~0.2	99.9980%	0.0020%
6#	0.2~0.25	97.42%	2.58%	0.15~0.2	99.9917%	0.0083%
1#（传递后复测）	0.1~0.2	97.05%	2.95%	0.1~0.2	99.9980%	0.0020%

表 3 新版修订国标所规定的高效过滤器试验台性能及标定维护要求

项目	标定周期	要求
管道密封性	试验台建成及重大结构调整时	2000Pa 压力下漏风量不大于 1.64m ³ /(h·m ²)
风量稳定性	每次试验	稳定于设定值的 $\pm$ 2%
上游采样截面风速均匀性	每 2 年	各测点实测值与各测点平均值之间的偏差不应大于 10%
上游采样截面浓度均匀性	每 2 年	各测点实测值与各测点平均值之间的偏差不应大于 10%
上游气溶胶浓度稳定性	每年	30min 内所测气溶胶质量浓度或给定粒径范围计数浓度波动不应大于 10%
流量测试装置	每年	符合国家法定计量规程要求
压力测试装置	每年	符合国家法定计量规程要求
计数器、光度计及油雾仪	每年	符合国家法定计量规程要求（油雾仪标定要求由本标准附录给出）
上下游采样相关系数	每试验日	各粒径档相关系数应为 1.00 $\pm$ 0.03
阻力标件	每 3 个月	每一风量状态点下的阻力测试结果与标定值的偏差不应大于 3%
参考过滤器	每 3 个月	参考过滤器每次效率测试值与标定值的尾数（效率值第一个非 9 数值）偏差不应超过 $\pm$ 5

图 5 为改进后的钠焰法与传统方法的测试结果比对, 可见改进方法确实可在一定程度上降低钠焰法对于过滤器效率测试结果, 使之进一步接近计数法测试结果。但同时我们仍必须看到改进后的钠焰法测试结果与计数法仍有相当差距 (图 6), 未来对于钠焰法的性能改进与提升仍是标准工作组需要持续努力与技术投入的方向之一。关于这部分工作的详细技术内容请读者参考张惠及曹冠朋二位的文章^[8、9]。

2.3 完善高效过滤器检漏试验方法

高效过滤器的检漏测试是过滤器最为关键的性能测试之一, 其重要性与过滤效率测试相当, 但在国内外不同技术标准中对于检漏测试方法以及试验

参数的技术规定一直存在差异, 这就时常会导致不同实验室、实验装置试验结果判定存在差异。以测试粒径为例, 欧洲标准强调测试气溶胶粒径应与过滤器最易穿透粒径 (MPPS) 接近^[10], 美国标准则采用大粒子进行测试 (计数中值直径 $0.4\mu\text{m}$, 计重中值直径 $0.7\mu\text{m}$)^[11], ISO 洁净室测试标准规定当使用光度计进行测试时, 气溶胶粒径分布与美国标准一致, 当使用光学粒子计数器进行测试时, 测试气溶胶计数中值直径应为 $0.1\sim 0.5\mu\text{m}$ ^[12]。针对上述问题, 国内在 2010 年以来开展了诸多理论分析^[13]以及实际试验验证^[14-16]等研究工作, 为上述问题的解决提供了有力的技术支撑。现有的研究成果主要解决与澄清了下列认识:

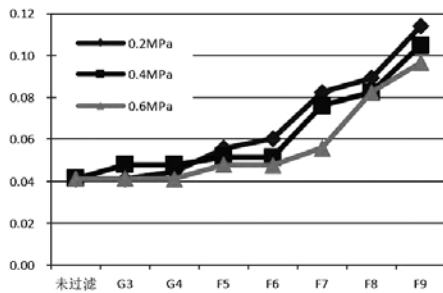


图 3 喷雾发生的 NaCl 颗粒物经不同等级过滤器筛选后的计数峰值粒径 (NaCl 溶液浓度 10%)^[8]

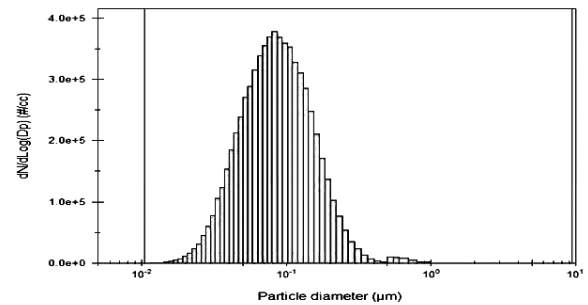
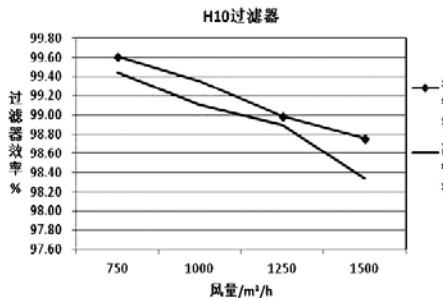
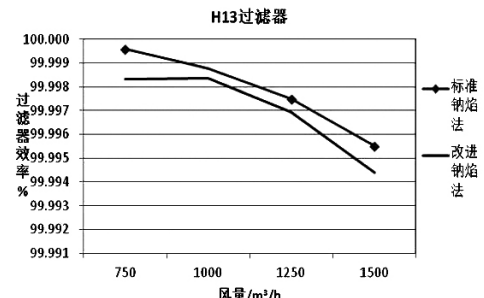


图 4 改进后的钠焰法试验粉尘粒径分布

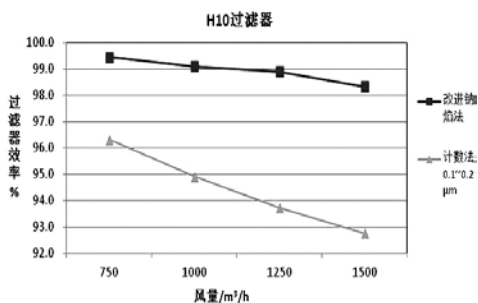


(a)

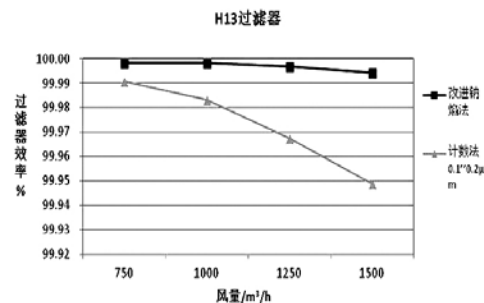


(b)

图 5 改进后的钠焰法与传统方法的测试结果比对^[9]



(a)



(b)

图 6 改进后的钠焰法与计数法的测试结果比对^[9]

(1) 与完好过滤器不同,一旦过滤器存在局部漏泄缺陷,则漏点对于不同尺寸粒子的通过不具有选择性,均呈现出一致的局部透过率,因此无论是同一测试方法选择不同的测试粒径进行试验,还是不同的试验方法均不影响漏泄缺陷的判定结果;

(2) 采用 20% 及 100% 额定风量效率测试比较的检漏试验方法仍具有一定的实际应用意义。在旧版国标体系中,20% 风量下的效率试验是作为过滤器效率试验的一部分,但这一试验的主要问题在于一方面 100% 风量下的效率试验足以表征过滤器的整体净化能力,另一方面,大多数试验台在进行双风量切换时操作较为麻烦,耗时长,会较为严重的影响生产企业的生产效率,因此在 20 多年的产品国标使用历史中,很少有生产企业会在生产检测中执行双风量效率测试。但在近年来的试验研究中发现,对于 W 密摺型(V-Bank)、圆筒型等扫描检漏试验灵敏度低的异型过滤器,采用双风量测试对于探查潜在漏泄缺陷的灵敏度更高。但对于双风量测试的检漏评判依据,传统观点认为有局部漏泄缺陷的过滤器在低风量下测试时效率会低于 100% 风量下的测试结果,因此美国标准要求低风量下效率测试结果与 100% 风量下结果保持一致即为合格。但近年来较多的试验研究表明,成品过滤器与滤材试验一样,在完好并且不存在局部漏泄缺陷的情况下,随着风量的降低其效率升高,试验风量降低 50% 时,其效率测试结果上升接近 1 个 9,因此,对于完好过滤器,其 20% 风量下的效率试验结果相比 100% 风量应升高约 2 个 9,而对于有漏点的过滤器,其 20% 风量下的效率试验结果与 100% 风量下试验结果相当,见表 4 所给出某批次密摺型高效过滤器的检漏试验比对结果。

因此,在本次国标体系修订中,双方量效率试验被明确为针对异型过滤器的检漏试验方法,在结果判定上,低风量效率测试结果应相比 100% 风量测试结果至少高 1 个 9 方判定检漏测试结果为合格。

2.4 新增高效过滤元件的生命周期综合能效评价试验方法与要求

对于空气净化及洁净室行业,传统观点一般认为高效过滤器的整个生命周期能效评价意义不大,

做好预过滤的保护措施即可保证高效过滤器在相当长的运行时间内以接近清洁状态的条件低下阻运行。因此,国内外的高效过滤器测试标准一直没有如何评价高效过滤器的生命周期性能评价方法。但近年来,一方面 PTFE 纳米纤维为代表的新型膜过滤材料的出现^[17],虽然高效过滤器的阻力获得大幅度降低,但也同时产生了如何比较传统深层过滤材料与新兴材料在整个生命周期内综合能效的比较需求^[18、19];另一方面,面对当前迅速发展的工业建筑尤其是各类洁净室进行绿色建筑评价以及综合运行能耗评价的市场需求,作为通风空调系统中的重要能耗部件,用户需要对高效过滤器在整个运行周期内的综合能耗表现建立更为科学的认识,净化行业也需要为用户提供更为清晰科学的产品评价与标识体系。

而要建立一个科学的高效过滤元件生命周期综合能效评价试验方法,就必须解决 2 个核心问题:

第一,采用什么样的负荷试验粉尘来实现对于过滤器全生命周期的加速模拟,负荷尘的主要特征应符合高效过滤器日常使用环境负荷粉尘核心特征,因此,针对各类洁净室中高效过滤器的使用环境特点,我们需要找到这样一种试验粉尘:固体、粒径分布特征符合应用环境特点,从而可以科学的对粉尘在滤材纤维结构上堆积的过程模拟。

第二,核心试验参数的明确,主要包括试验粉尘的浓度等,高粉尘试验浓度有利于缩短试验时间,降低过滤器生产厂家的试验成本。但过高的粉尘浓度会导致试验尘在过滤材料表面的快速堆积,从而使得试验结果与实际偏离较远。

针对上述的试验尘源问题,使用改进后的钠焰法试验尘可以较好的解决,通过使用中效过滤器筛选方式获取的固体试验粉尘在粒径分布特征上与高效过滤器实际处理粉尘一致,较为容易获得用户以及生产企业的认可,图 7 给出了使用上述尘源进行高效过滤器生命周期模拟试验后的过滤器滤材剖面电镜照片,照片显示的由过滤器迎风面至滤材内部不同深度(由左至右)的粉尘堆积情况,由照片可见,尽管大多数粉尘仍主要堆积在滤材表层及浅层结构,但在滤材内部仍存在不同程度的粉尘堆积现象,表

表 4 某批次密摺型高效过滤器的检漏试验比对结果

产品编号	光度计扫描检漏 测试结果	双方量效率试验结果				
		100% 风量		20% 风量		结果判定
		平均效率	置信度为 95% 的下限效率	平均效率	置信度为 95% 的下限效率	
C01-1	合格	99.79%	99.79%	99.81%	99.80%	不合格
C01-2	合格	99.982%	99.981%	99.99964%	99.99945%	合格
C01-3	合格	99.982%	99.981%	99.99975%	99.99959%	合格
C01-4	合格	99.979%	99.978%	99.99971%	99.99955%	合格

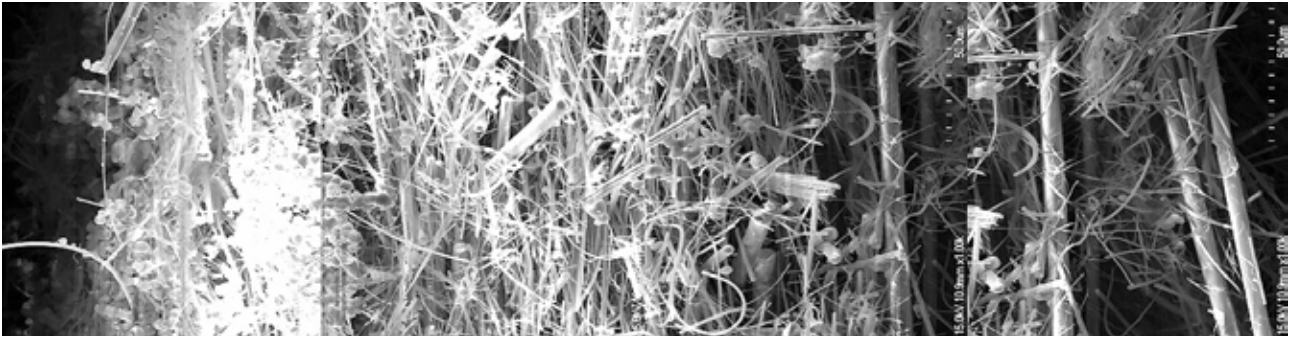


图7 生命周期试验后的高效过滤器滤材样品截面电镜结果 (NaCl 尘源) [20]

明试验粉尘对于模拟深层过滤材料的全生命周期具有一定的科学合理性。

2.5 调整过滤器效率测试基准方法, 并采用 ISO 国际标准的过滤器分级体系, 实现国内产品标识与国际市场的基本接轨。

如前文所述, 尽管本次国标体系修订工作中对我国传统的效率基准试验方法——钠焰法进行了较多研究及改进提升, 但比对试验显示钠焰法效率测试结果仍高于国际通行的计数法, 在此前提下, 不适宜将钠焰法仍规定为国标基准方法, 因为这会使得按国标体系标识的过滤器实际性能低于同等级别标识的国际标准体系产品, 不利于实现下游洁净室行业的环境控制及产品质量控制需求。所以在本次国标体系修订中, 经过充分的协调与讨论, 将计数法调整为过滤器效率测试的基准试验方法。在过滤器级别标识体系上, 新版国标在首个 ISO 国际标准 ISO29463 系列标准分级标识体系的基础上, 采用两位数字标识过滤器效率级别, 并附加 1~2 位字母标识效率试验方法和检漏试验方法。在效率级别上, 新版国标体系与 ISO 标准一致, 从而实现国内过滤器标识体系与国际体系的接轨, 例如, 国标体系的“35J”等同于 ISO 标准体系的 ISO35(H), 也等同于欧洲 EN1822 标准的 H13 级过滤器, 均表示采用计数法测试, 效率测试结果不低于 99.95% 的高效过滤器。相比国际标准体系更进一步的是, 新版国标体系增加了过滤器检漏试验方法的标识, 上述“35J”高效若采用扫描检漏试验方法则标识为“35JS”, 推动促进国内生产厂家采用更严格的扫描检漏试验方法, 进一步提升我国过滤器行业的产品质量控制水平。

3 结论

本次高效过滤器国标体系修订工作历时三年, 标准修订工作组对现行国标体系的主要存在问题、近 10 年来国际标准化体系的发展情况及主要技术争议内容进行了较为系统的梳理, 对标准拟修订内容

做了大量、扎实的试验研究及验证工作, 充分保证了新版国标技术体系的科学性、合理性, 反映我国当前空气净化行业的主流技术现状, 并为行业未来的技术水平提升提供帮助、指引方向。标准修订工作组也诚挚希望行业各有关生产厂家、检测实验室、各专家及工程技术人员能在未来的工作中对标准技术内容充分评价审视, 随时向工作组反馈意见, 为我国高效过滤器标准体系的持续发展提升共同努力。

参考文献

- [1] CEN, EN1822-1:2009, High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - Part1: Classification, performance testing, marking[S], CEN,2009.
- [2] 中国建筑科学研究院, GB/T 13554-2008, 高效空气过滤器 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [3] Institute of Environment Science and Technology(I-EST), IEST-RP-001.4:2005, HEPA and ULPA filters[S], IEST, 2005.
- [4] International Standard Organization (ISO), ISO 29463-1:2011, High efficiency filters and filter media for removing particles from air -- Part 1: Classification, performance, testing and marking[S], ISO, 2011.
- [5] 河南核净洁净技术有限公司. GB/T 17939-2015, 核级高效空气过滤器 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [6] 张惠, 冯昕, 孟令坤. 不同高效空气过滤元件测试台效率及阻力传递比对结果与分析 [C], 2017 全国净化学术年会论文集, 西安: 316-325.
- [7] 秦学礼, 8”、12”集成电路厂房洁净室设计探讨 [J]. 洁净与空调技术, 2004,43(3):45-50.
- [8] 张惠, 冯昕, 曹冠朋. 高效空气过滤器测试特征粉尘的改进提升研究, 待发表.
- [9] 曹冠朋, 冯昕, 张惠, 江锋. 测试气溶胶对高效空气过滤器效率测试结果的影响研究, 待发表.
- [10] CEN, EN 1822-4:2009 High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - part4: determining leakage

of filter element (scan method)[S]. CEN, 2009.

[11] Institute of Environment Science and Technology(IEST), IEST-RP-CC034.2 HEPA filter and in-place leak testing standard[S]. IEST, 2005.

[12] International Standard Organization (ISO), ISO 14644-3:2005 Cleanrooms and associated controlled environments - part 3: test methods[S]. ISO,2005.

[13] Xu Zhonglin, Cao Guoqing, Feng Xin, Zhang Yizhao. Une nouvelle méthode qualitative pour la recherche des fuites sur filters HEPA et ULPA installés[J], SALLES PROPRES (77):41-48.

[14] 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.

[15] 高龙、冯昕, 光度计与计数器测试方法在高效过滤器检漏测试中的对比研究 [J]. 暖通空调, 2015, 45(2):107-110.

[16] 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, 2015,31(6):145-151.

[17] 汤浅久史, 林将, 神山三枝, 等. Prediction of nanofiber/micronfiber mixed filter performance and its optimization[C]. 32nd annual Tech. meeting on air cleaning and contamination control, Japan air cleaning association, 2015.

[18] 包理, 小林诚, 青海秀树, 等. Performance evaluation of the HEPA filter made of depth filtration nanofiber media[C]. 32nd annual Tech. meeting on air cleaning and contamination control, Japan air cleaning association, 2015.

[19] 神山三枝, 小林美一. Research for design of long life about high porous structure filter[C]. 32nd annual Tech. meeting on air cleaning and contamination control, Japan air cleaning association, 2015.

[20] 曹冠朋, 冯昕, 张惠, 江锋. 高效空气过滤元件生命周期综合能耗评价实验研究, 待发表.

解读工程建设行业标准《住宅新风系统技术标准》

杨英霞, 王智超, 徐昭炜

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

[摘要] 介绍 JGJ/T 440-2018《住宅新风系统技术标准》的编制背景和主要内容。重点介绍了住宅新风系统的设置条件、新风量设计、室外风口设计、净化处理设计、通风器安装、风管安装、通风效果检验和运行维护。标准对住宅新风系统的设计、施工、验收和运行维护做了全方面的规定, 对于保证住宅新风系统的工程质量和改善住宅室内空气质量具有重要意义。

[关键词] 住宅; 新风系统; 设计; 施工; 验收; 运行维护; 解读

1 标准编制背景

在室内装修污染、室外大气环境与噪声污染和建筑节能标准提高的背景下, 传统的开窗通风已不是室内获得新风换气最好的选择方式, 新风系统开始逐渐在我国住宅中应用并迅速发展^[1]。然而住宅新风系统不同于大型的通风空调系统, 住宅通风系统大多为分户式, 系统风量较小(一般只有几百个立方米每小时), 风管的尺寸较小, 所用的风口、风阀等部件也不同, 现有建筑通风空调系统方面的标准如 GB 50736-2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》、GB 50243-2016《通风与空调工程施工质量验收规范》等无法满足住宅新风系统的要求。住宅新风系统在实际应用中存在着设计不合理、施工安装质量差、运行维护跟不上等问题, 使得新风系统效果无法真正实现。因此有必要制订住宅新风系统技术标准, 以规范住宅新风系统的设计、施工、验收和运行维护。JGJ/T 440-2018《住宅新风系统技术标准》(以下简称《标准》)于 2018 年 12 月 18 日发布, 2019 年 5 月 1 日起实施。

2 标准的主要技术内容解读

《标准》共分为 8 章, 分别为: 1 总则、2 术语、3 基本规定、4 设计、5 设备材料、6 施工安装、7 检验、调试及验收、8 运行维护。

《标准》适用于新建住宅和既有住宅的新风系统的设计、施工、验收和运行维护。

《标准》规定了新风系统、无管道新风系统、集中式新风系统、分户式新风系统、单向流新风系统、双向流新风系统和热回收新风系统等术语定义。

《标准》规定了住宅新风系统设置和系统选型等的基本规定。

《标准》规定新风系统的设计包括新风量计算、新风系统设置、室外风口和室内气流组织设计、风管系统设计、净化处理设计和监测与控制等。

《标准》规定了新风系统的通风器安装、风管及部件的安装、过滤设备安装和监控系统施工等。

《标准》规定新风系统在投入使用之前应进行系统的调试, 调试完成后进行通风效果检验, 经验收合格后方可办理竣工验收手续。

《标准》规定了住宅新风系统运行维护实施要求和内容。

2.1 住宅设置新风系统的条件

我国从 20 世纪 80 年代开始进行建筑节能标准化工作, 建筑节能标准由最初的节能率 30% 到节能率 50%, 再到目前的节能率 65%^[2], 目前, 有些地方标准如北京、河北等地方已达节能率 75%, 近零能耗建筑节能标准也已开始实施^[3], 住宅的气密性随着建筑节能标准的提高而越来越好, 外窗气密性等级达到国家标准 GB/T 7106-2008《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法》中规定的 7 级时, 室内通风换气次数约 0.25 次/h^[4], 门窗密闭无法满足室内通风换气需求, 因此需要设置新风系统。

当室外严重污染时, 如果开窗自然通风会加剧室内环境的污染。设置新风系统, 可以将新风净化处理后送入室内, 保证人们吸入的是新鲜的空气并保证室内空气质量。对于室外严重污染的界定, 目前没有统一的标准。参考我国空气质量指数技术标准^[5](见表 1), 以达到“良”的低限 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 为标准, 统计住宅所在地区室外 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度大于 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的天数, 如果天数占比不少于全年 20% 时, 可认为室外污染严重, 应通过设置新风系统来改善室内空气质量。统计的我国部分城市 2014 年~2016 年室外 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度大于 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的天数及占比如表 2 所示。近年来随着我国对大气污染治理力度的加大, 整体大气环境好转, 因此, 每个城市每年的日平均浓度大于 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的天数及占比也在不断变化中, 设计时可统计近三年的数据进行分析。

此外, 对于住宅的建筑布局、室内布局等不易实现自然通风量, 也应设置新风系统对室内进行通风换气。

表 1 空气质量指数类别

序号	空气质量指数类别	PM _{2.5} 24h 平均浓度 (μg/m ³)
1	优	0~35
2	良	35~75
3	轻度污染	75~115
4	中度污染	115~150
5	重度污染	150~250
6	严重污染	> 250

表 2 我国部分城市 2014-2016 年室外 PM_{2.5} 日平均浓度大于 75μg/m³ 的天数及占比

序号	城市名称	室外 PM _{2.5} 日平均浓度大于 75μg/m ³ 的全年天数及占比					
		2014 年		2015 年		2016 年	
		天数	比例	天数	比例	天数	比例
1	石家庄	224	61.40%	175	47.90%	168	45.90%
2	济南	192	52.60%	193	52.90%	141	38.50%
3	郑州	181	49.60%	203	55.60%	131	35.80%
4	北京	160	43.80%	140	38.40%	133	36.30%
5	天津	172	47.10%	125	34.20%	112	30.60%
6	武汉	160	43.80%	119	32.60%	89	24.30%
7	合肥	156	42.70%	101	27.70%	82	22.40%
8	太原	120	32.90%	105	28.80%	103	28.10%
9	沈阳	128	35.10%	120	32.90%	78	21.30%
10	成都	116	31.80%	101	27.70%	108	29.50%
11	哈尔滨	119	32.60%	114	31.20%	77	21.00%
12	长沙	140	38.40%	90	24.70%	75	20.50%
13	乌鲁木齐	92	25.20%	96	26.30%	115	31.40%
14	西安	123	33.70%	66	18.10%	113	30.90%
15	南京	143	39.20%	77	21.10%	64	17.50%
16	长春	107	29.30%	95	26.00%	54	14.80%
17	杭州	93	25.50%	69	18.90%	60	16.40%
18	重庆	94	25.80%	57	15.60%	68	18.60%
19	上海	69	18.90%	79	21.60%	47	12.80%
20	兰州	67	18.40%	50	13.70%	69	18.90%
21	西宁	76	20.80%	44	12.10%	51	13.90%
22	银川	44	12.10%	41	11.20%	70	19.10%
23	南昌	64	17.50%	50	13.70%	40	10.90%
24	南宁	66	18.10%	37	10.10%	16	4.40%
25	贵阳	44	12.10%	22	6.00%	11	3.00%
26	广州	40	11.00%	17	4.70%	14	3.80%
27	福州	9	2.50%	4	1.10%	5	1.40%
28	深圳	10	2.70%	5	1.40%	1	0.30%
29	昆明	6	1.60%	2	0.50%	1	0.30%
30	拉萨	0	0.00%	2	0.50%	4	1.10%

2.2 新风量的设计

《标准》中不但规定了新风系统最小设计新风量,还规定了卧室和起居室的新风量设计,对新风系统的设计新风量规定,既保证了住宅整体的新风量,又保证了住宅的卧室、起居室等各功能空间的新风量。

以某住宅为例进行说明。该住宅层高 3.0m,有 3 个卧室、1 个起居室和 1 个书房,各室的居住面积如表 3 所示,总居住面积 86m²。在进行最小设计新风量计算时需要计算人均居住面积,《标准》2.0.10

条定义“居住面积”为除厨房和卫生间之外的其他功能房间的使用面积的总和。

表 3 某住宅各室的使用面积

序号	功能房间	使用面积 /m
1	主卧	18
2	次卧 1	14
3	次卧 1	12
4	起居室	32
5	书房	10
合计		86

(1) 新风系统最小设计新风量。

按换气次数法计算最小设计新风量:

$$Q_{\min} = F \times h \times n \quad (1)$$

式中: $Q_{\min}$ 为最小设计新风量 (m³/h); F 为居住面积 (m²); h 为房间净高 (m); n 为最小设计新风量设计换气次数 (次/h)。

该住宅为新建,设计人数按 3 人计,则人均居住面积 F_p 为 86/3=28.7m²。按照《标准》中表 4.2.1,最小设计新风量设计换气次数取 0.5 次/h,则按式 (1) 计算得到最小设计新风量为 86×3×0.5=129m³/h。

(2) 各功能房间新风量计算。

虽然该住宅的设计人数只有 3 人,但在进行卧室、书房和起居室计算时应按照各房间实际应用的人数进行计算。对于主卧按 2 个人计,次卧 1、次卧 2 和书房分别按 1 人计。

根据标准 4.2.2 规定的卧室新风量设计方法进行主卧、次卧 1、次卧 2 和书房的计算。

以主卧为例:

(1) 卧室人均居住面积 F_p 为 18/2=9m²。按照《标准》中表 4.2.1,新风量设计换气次数取 0.7 次/h,则按式 (1) 计算得到卧室设计新风量为 $Q_{\text{主卧}}=18 \times 3 \times 0.7=37.8\text{m}^3/\text{h}$ 。

(2) 室内 CO₂ 浓度限值为 0.1%。主卧按 2 个成人考虑,按睡觉状态考虑,每人呼出的 CO₂ 量为 14.4L/h,则室内 CO₂ 浓度限值所需要的新风量按式 (2) 计算:

$$Q_b = 0.1 \times \frac{x_c}{y_{c2} - y_{c0}} \quad (2)$$

式中: Q_b 为卧室新风量 (m³/h); x_c 为室内 CO₂ 散发量 (L/h),按室内人数和每人呼出的 CO₂ 量进行计算; y_{c2} 为室内 CO₂ 浓度限值(%),取 0.1%; y_{c0} 为室外 CO₂ 浓度(%),取 0.04%。

将设计参数代入式 (2) 得到主卧新风量:

$$Q_b = 0.1 \times \frac{2 \times 14.4}{0.1 - 0.04} = 48\text{m}^3/\text{h}.$$

(3) 主卧按换气次数计算的新风量与室内 CO₂

浓度限值所需的新风量进行比较,取较大值 $48\text{m}^3/\text{h}$ 作为主卧的新风量设计值。次卧 1、次卧 2 和书房按相同的方法计算得到的新风量如表 4 所示。在此需要说明的是,在进行住宅卧室的新风量计算时,按人在睡觉状态下;而对于书房,按人在轻度活动状态下,每人呼出的 CO_2 量为 23L/h 进行计算。

对于起居室,根据《标准》4.2.2 规定的方法计算。起居室人均居住面积 $32/3=10.7\text{m}^2$,按标准表 4.2.1,换气次数取 0.6 次/h,则起居室的设计新风量为 $Q_{\text{起居室}}=32\times 3\times 0.6=57.6\text{m}^3/\text{h}$ 。该住宅卧室和起居室计算的新风量如表 4 所示。

(3) 设计新风量。

按换气次数计算的最小设计新风量为 $129\text{m}^3/\text{h}$,按卧室和起居室计算的新风量之和为 $191.1\text{m}^3/\text{h}$,根据《标准》4.2.3 规定,示例住宅的新风系统的设计新风量取 $194.1\text{m}^3/\text{h}$ 。按表 4 进行各功能房间新风量设计。

表 4 示例住宅卧室和起居室新风量

序号	功能房间	新风量 (m^3/h)
1	主卧	48
2	次卧 1	25.2
3	次卧 2	25
4	起居室	57.6
5	书房	38.3
合计		194.1

2.3 室外新风口、排风口的布置

对于分户式新风系统,室外新风口和排风口布置不合理,容易造成新风和排风的短路。根据流体力学理论,室外新风口的气流动近似于流体力学中所说的汇流,根据汇流的特点,随着离开汇点距离的增大,流速呈二次方衰减。因此,室外新风口速度的影响范围是以风口中心为中心,半径为风口直径的半球面。新风口的直径一般不大,影响范围很小。而室外排风口的气流流动类似于自由射流,冬夏季时,由于排风口温度与室外温度不同,形成热射流

和冷射流。冷射流时,射流发生变形向下弯曲。根据模拟计算分析,垂直方向上,排风口至少高于进风口 1.0m 以上,排风口的气流才不会影响进风口气流。如果新、排风口在同一高度,为了避免相互影响,新风口和排风口宜在不同方向设置,且水平距离不小于 1.0m 。室外新风口和排风口的布置如图 1 所示。

2.4 净化处理设计

当住宅所处地区室外空气污染严重时,新风系统应增加过滤设备对新风进行净化处理。《标准》4.6.1 规定新风系统净化处理设计时,过滤设备的效率应根据当地室外空气质量选择。对 $\text{PM}_{2.5}$ 的综合净化效率宜按下式计算:

$$E_{2.5} = (1 - \frac{C_{\text{in}}}{C_{\text{out}}}) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $E_{2.5}$ 为过滤设备对 $\text{PM}_{2.5}$ 的综合净化效率(%) ; C_{in} 为设计室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ; C_{out} 为设计室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ,取历年平均不保证 5d 的日平均浓度。

对于 $\text{PM}_{2.5}$ 的综合净化效率计算时设计室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度取值,可统计至少近三年的室外 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度,将每年不保证 5d 的日平均浓度取平均值即得历年平均不保证 5d 的日平均浓度。比如北京市统计 2014 年、2015 年和 2016 年三年的室外 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度,每年不保证 5d 的日平均浓度分别为 $316\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $288\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $297\mu\text{g}/\text{m}^3$,则历年平均不保证 5d 的日平均浓度为 $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

$\text{PM}_{2.5}$ 的综合净化效率是指新风系统设计粗效、中效、高效等多级过滤设备的总体净化效率。计算出 $\text{PM}_{2.5}$ 的综合净化效率之后,再进行各级过滤设备净化效率的设计和选型过滤设备。

新风系统的过滤设备的容尘量反映了过滤设备的使用寿命,容尘量过小会使得在新风系统运行中频繁更换和清洗过滤设备,增加新风系统的运行维护成本。《标准》4.6.2 规定,过滤设备的容尘量宜

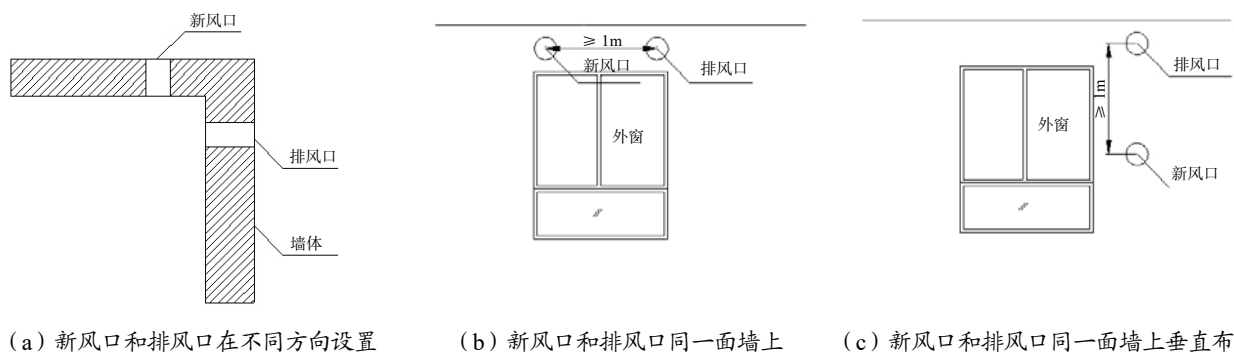


图 1 分户式新风系统室外新风口和排风口布置示意图

按下式计算:

$$D = C_x \times E_x \times Q_d \times t / 1000 \quad (4)$$

式中: D 为过滤器的设计容尘量 (g); C_x 为室外颗粒物年平均浓度 (mg/m^3), 对粗效过滤器、中效过滤器和高中效及以上过滤器, 分别取项目所在地近三年的室外的 TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物年平均浓度的平均值; E_x 为粗效过滤器、中效过滤器和高中效及以上过滤器分别对 TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的净化效率 (%); Q_d 为新风系统设计新风量 (m^3/h); t 为过滤器更换时间 (h)。

比如北京某住宅新风系统设计新风量为 $200\text{m}^3/\text{h}$, 设计粗效过滤器对 TSP 的净化效率为 50%, 统计北京 2016~2018 三年室外的 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度的平均值为 $61\mu\text{g}/\text{m}^3$, 根据文献 [6], $\text{PM}_{2.5}$ 与 TSP 比值的年均为 29%, 则北京 2016~2018 三年室外 TSP 颗粒物年平均浓度的平均值为 $0.209\text{mg}/\text{m}^3$, 如果想要粗效过滤器 3 个月更换一次, 则该粗效过滤器的设计容尘量应该为 180g。根据容尘量的计算公式, 如果知道采用过滤器的容尘量, 也可计算得出过滤器的更换时间。

2.5 通风器的安装

通风器作为新风系统的动力源, 主要有吊顶式、落地式、壁挂式、墙式和窗式等几种类型, 安装时主要靠建筑的吊顶、地面或屋面、墙体承重, 因此, 为保证安全, 《标准》规定通风器安装时要校核通风器运行重量对吊顶、地面或屋面、墙体结构荷载的影响。

对于吊顶式通风器的安装, 一般通过吊杆、膨胀螺栓与楼板相连接, 吊杆和膨胀螺栓的受力应能满足通风器的重量。因此, 《标准》规定在安装时应根据通风器重量在选择吊杆的规格尺寸, 螺栓锚固深度和构造措施应满足行业标准《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145 的规定。

根据《室内管道支架及吊架》03S402, 几种规格吊杆的拉力允许值如表 5 所示。

表 5 不同尺寸吊杆的允许拉力值

吊杆直径 /mm	10	12	16	20
拉力允许值 /N	3250	4750	9000	14000

几种规格膨胀螺栓最大受力如表 6 所示。

表 6 不同型号膨胀螺栓的最大静止受力

螺栓型号	M6	M8	M10	M12
最大静止受力 /kg	120	170	320	510

关于膨胀螺栓的锚固, 行业标准《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145-2013 中的规定如下:

第 3.1.1 条, 锚栓锚固基材可为钢筋混凝土、预

应力混凝土或素混凝土构件。

第 3.1.4 条, 对既有混凝土结构, 基材混凝土立方体抗压强度标准值宜采用检测结果推定的标准值, 当原设计及验收文件有效, 且结构无严重的性能退化时, 可采用原设计标准值。

第 7.1.1 条, 对于膨胀型锚栓和扩底型锚栓, 混凝土基材的厚度 h 不应小于 $2h_{ef}$, 且 h 应大于 100mm。 h_{ef} 为锚栓的有效埋置深度。

第 7.1.3 条, 锚栓不应布置在混凝土保护层中, 有效锚固深度 h_{ef} , 不应包括装饰层或抹灰层。

第 9.1.4 条, 锚栓或植筋施工前, 宜检测基材原钢筋的位置, 钻孔不得损伤原钢筋。当设计孔位与钢筋相碰或锚栓完全处于混凝土保护层内时, 应通知设计单位, 采取相应的措施。

2.6 风管的安装

在新风系统的实际安装中, 存在着风管随意穿墙和穿梁的现象, 给住宅建筑结构安全造成隐患。根据相关标准对于剪力墙水平和竖向分布钢筋间距的规定, 对孔洞直径进行了规定。《标准》6.3.1 和 6.3.1 中规定, 当新建住宅的风管穿外墙时, 孔洞宜预留, 预留位置应正确; 当既有住宅的风管穿外墙时, 孔洞施工应采取抑尘措施, 且不应破坏墙体内主筋, 孔洞直径不应大于 200mm; 既有住宅的风管不应穿梁, 过梁时可采用过梁器; 新建建筑穿梁应预留孔洞; 新建住宅的风管穿过室内墙时, 墙上宜预留孔洞, 孔径不应大于 100mm。

此外, 对于风管穿外墙时一定要设计坡向室外的坡度, 以避免室外雨水或凝水通过风管流入通风器, 影响通风器的运行。

2.7 通风效果检验

为了保证住宅新风系统的实际运行效果, 《标准》中规定了新风系统调试完成后应进行通风效果检验, 通风效果检验的项目包括室内 CO_2 浓度和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。住宅新风系统的主要目的是为人们呼吸提供新鲜的空气, 检验室内 CO_2 浓度可以检验设计的新风量是否满足要求。如果新风系统设计时设置了过滤设备, 检验 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度可以在保证新风量的前提下检验设计的过滤设备净化效率是否满足要求。

《标准》中规定了新风系统通风效果的连续监测和检测方法。新风系统在实际运行时, 室外的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度是实时变化的, 为了正确评价新风系统的通风效果, 规定了采用连续监测的方法。采用检测的方法, 检测时室外空气质量太好则无法评判新风系统的除 $\text{PM}_{2.5}$ 效果。由于在设计新风系统过滤设备的 $\text{PM}_{2.5}$ 净化效率时, 考虑了全年 5 天的不保证率, 因此如果检测选择室外空气质量特别差的天气进行

时,可能会超出过滤器设计的净化能力,也不能正确反映住宅设计新风系统的除 $\text{PM}_{2.5}$ 效果,因此,规定对有除 $\text{PM}_{2.5}$ 要求的新风系统,应根据设计室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度选择适宜的天气进行,选择测试天气的室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度应与设计室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度偏差不大于 20%。

2.8 运行维护

住宅新风系统的运行维护对于保证通风效果具有重要的作用,实际运行中存在着新风系统维护保养不到位而影响通风效果的问题,因此,《标准》规定了新风系统的日常维护保养内容和定期维护保养内容。对于定期保养中过滤器的清洗和更换是基于目前的过滤器产品的容尘技术水平和不同地区的室外空气质量做出的规定,实际运行中应根据当地的室外空气状况和使用的过滤器品牌进行过滤器的清洁和更换。

住宅新风系统实际应用中一般在验收前进行通风效果的检验,而后就不再进行检验,这就使得新风系统运行几年后新风效果根本达不到设计的要求,因此,《标准》规定宜每年对新风系统运行效果进行检验,以保证新风系统的长期运行效果。

3 结语

《标准》结合我国不同地域的室内外空气质量

现状、新风系统工程的应用现状和新风系统技术水平,首次从住宅新风系统的设计、设备材料、施工安装、检验、调试及验收和运行维护进行了全方位的规定,对于新风系统在住宅中的推广应用,以及推动和规范新风行业的发展具有重要的作用和意义。

参考文献

- [1] 王智超,王宏恩,唐冬芬.住宅的通风问题及其对策[J].住宅科技,2006,10:51-56.
- [2] 邹瑜,郎四维,徐伟,等.中国建筑节能标准发展历程及展望[J].建筑科学,2016,32(12):1-5.
- [3] 中国建筑科学研究院.近零能耗建筑技术标准:GB/T 51350-2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [4] 丰晓航,燕达,彭琛,等.建筑气密性对住宅能耗影响的分析[J].暖通空调,2014,44(2):5-14.
- [5] 环境保护部.环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行):HJ 633-2012[S].北京:中国环境科学出版社,2012.
- [6] 杨复沫,贺克斌,马永亮,等.北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化特征及其与 PM_{10} 、TSP 的关系[J].中国环境科学,2002,22(6):506-510.

吴小泉

(南京天加环境科技有限公司, 南京 210028)

【关键词】 洁净室；节能；ISO1 级；数值模拟；气流组织；洁净度；FFU

中国集成电路市场规模在全球市场中占比超过50%^[1], 产业规模居世界第一^[2, 3]。《国家集成电路产业发展推进纲要》及《中国制造 2025》均指出要大力发展集成电路等高科技行业^[4, 5]。随着电子行业的发展, 电子厂房洁净室也得到了广泛的应用^[6]。由于电子厂房生产工艺的特殊性, 其能耗巨大, 洁

净空调设备能耗占工厂总能耗的 40% 以上^[7], 而在 ISO 5 级以上的洁净室内, 空调设备能耗约占总能耗的 50% 以上。电子厂房的空调设备节能意义重大。目前行业开展了一系列的电子厂房节能设计和应用, 如微环境、气流组织形式、避免空气处理过程的冷热抵消、温湿度与洁净度功能分离、风机变频和 FFU 采用无刷直流电机、采用低阻力过滤器、预热

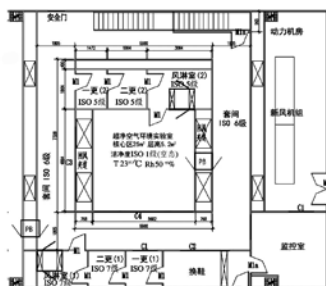


图 1 系统平面布局



图 2 系统的剖面结构示意图



图 3 核心区与周边区



图 4 核心区 FFU 满布



图 5 核心区洁净度测试



图 6 ISO/TC 209 WG13 专家组访问

回收等。但是在 ISO1 级环境中,在保证洁净度需求情况下,对 FFU 采取间隙运行从而实现 FFU 运行过程节能的研究,却未见公开报道。而研究其气流组织特性,对于洁净室的节能和优化具有突出意义^[8],其分析结果对指导 FFU 的间歇运行具有重要作用。本文采用数值模拟方法,对其气流组织特性进行分析研究。

1 ISO 1 级系统简介

实际测试数据:

- 洁净度(空态)优于 ISO 1 级,粒子计数器所有通道($0.1\mu\text{m}$, $0.2\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$, $5.0\mu\text{m}$)计数结果均符合 ISO 14644-1 标准中最高级 ISO1 级标准要求。

- 化学污染物浓度控制到 pptM 级,总酸性化合物: 50~100ppt; 总碱性化合物: 50~250pptM。

2 模型简化及数学模型选择

2.1 模型简化方法

核心区气流为稳态、不可压缩的湍流流动;

核心区内气密性好,不考虑渗透风量;

FFU 满布,所有 FFU 出口截面风速均匀,且不考虑出口边框对气流的影响;

FFU 的出口作为几何模型的进口;

由于核心区高架地板开孔率高且满布,忽略高架地板对气流的影响(高度 1m)。

2.2 数学模型选择

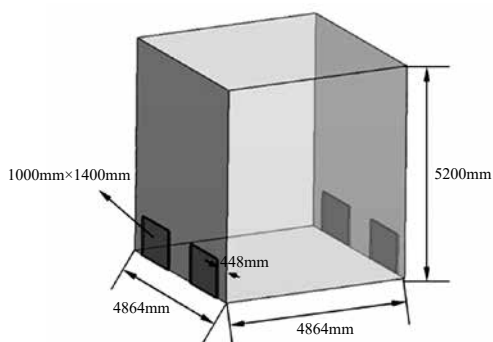


图 7 研究对象的简化几何模型

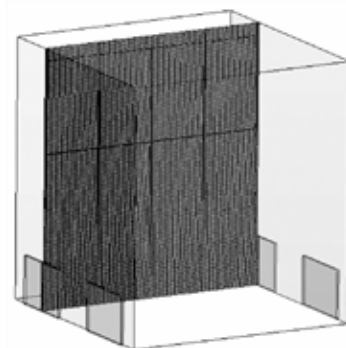
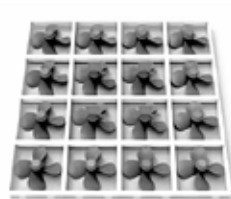
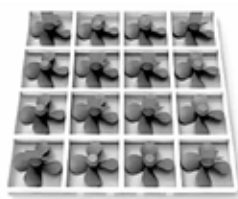


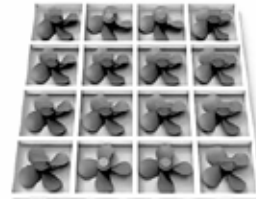
图 8 划分网格截图



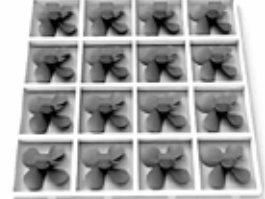
25%FFU



50%FFU



75%FFU



100%FFU

图 9 不同 FFU 运行数量的示意

针对本模拟的湍流模型,主要选择 $\kappa-\varepsilon$ 模型,该模型是目前使用最广泛的湍流模型。即在已有湍动能 κ 方程的基础上,引入了有关湍动耗散率 ε 的方程,而形成 $\kappa-\varepsilon$ 两方程模型,称为标准的 $\kappa-\varepsilon$ 模型。该模型可以提供较好的预测效果^[9]。

3 几何模型建立及网格划分

3.1 几何模型

本文研究的是该系统的核心区的气流组织特性,几何模型尺寸如图 7。

3.2 网格划分及边界条件设置

由于核心区在简化后形状比较规则,同时为了网格划分的简单化,因此采用结构化网格中的六面体网格进行划分,其 spacing 网格间距约 3mm,网格总数量约 441 万。边界条件设置按照速度进口,静压出口。划分网格模型如图 8。

4 数值模拟结果与分析

4.1 数值模拟方案

FFU 进行间隙运行,一般有两种方案:变 FFU 转速及恒定转速下变 FFU 运行数量。

该两种方案,分别如:

方案 1: 变 FFU 转速,即考虑 5 种不同的进口风速, 0.2m/s 、 0.29m/s 、 0.35m/s 、 0.41m/s 、 0.5m/s ;

方案 2: 恒定转速,变 FFU 数量,即恒定进口风速 0.41m/s ,FFU 运行数量分别按照 25%、50%、75% 及 100%。如图 9。

4.2 不同入口风速下的数值模拟分析

4.2.1 数值模拟结果

不同入口风速下的数值模拟结果，三维流线图对比如图 10。

流线正视图如图 11。

4.2.1 数值模拟分析

洁净室的流线平行度整体都比较好，仅有底部会出现较大尺度的涡结构，但随着送风速度的增加，涡结构出现的区域高度会变低；由图可以看出，当送风速度达到 0.41m/s 时，涡结构绝大部分处于回风区，即高架地板下方，因而可以保证高架地板上方均为单向流。此外，我们还可以观察到，在高架地板上方 1m 处高度，除了 0.2m/s 的风速外，其他风速基本为单向流区域，如果设备作业高度均在高架地板上方 1m 及以上，可以降低 FFU 的运行转速，

保证单向流的同时，实现降低能耗的目的。

4.3 恒定风速下不同运行 FFU 运行数量的数值模拟分析

4.3.1 数值模拟结果

3D 流线图对比如图 12。

该数值分析结果流线正视图如图 13。

4.3.2 数值模拟分析

通过数值分析的流线图，可以观察到：

(1) 当 FFU 台数较少时 (25%、50%FFU)，洁净室高架地板上方会出现较大尺度的涡结构，高架地板上方流线平行度也会受到很大影响；

(2) 75%FFU 时，相比于 50%FFU，其洁净室两侧的流线平行度变差，但是由于左右两侧的 4 个送风口的开启，使得中间区域流线平行度较好；

(3) 100%FFU 时，整个洁净室的流线平行度

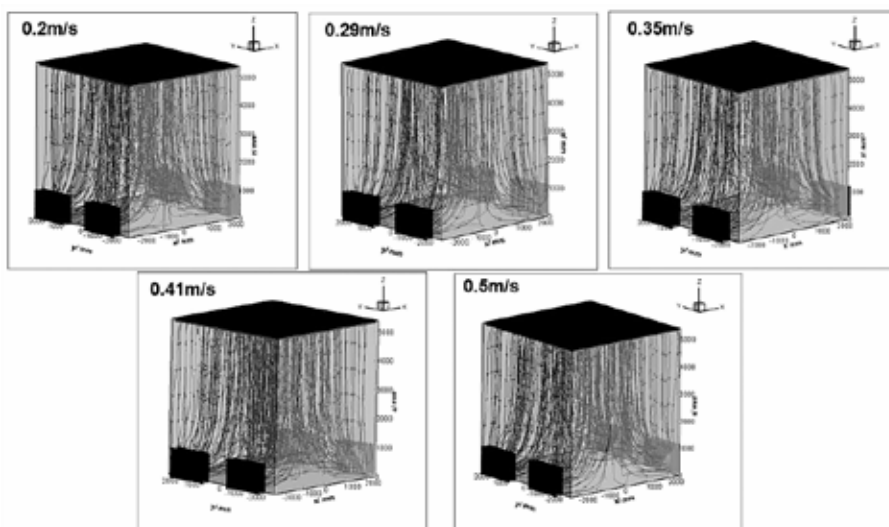


图 10 不同入口风速下的 3D 流线图

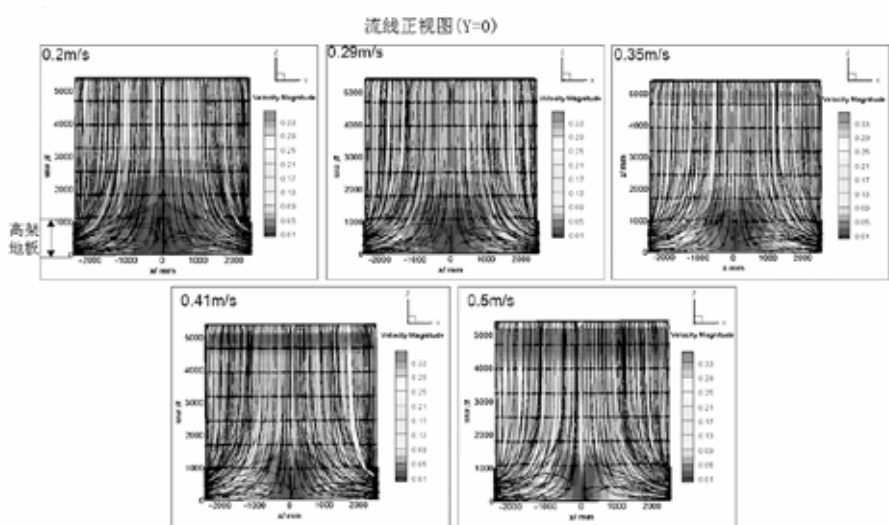


图 11 流线正视图

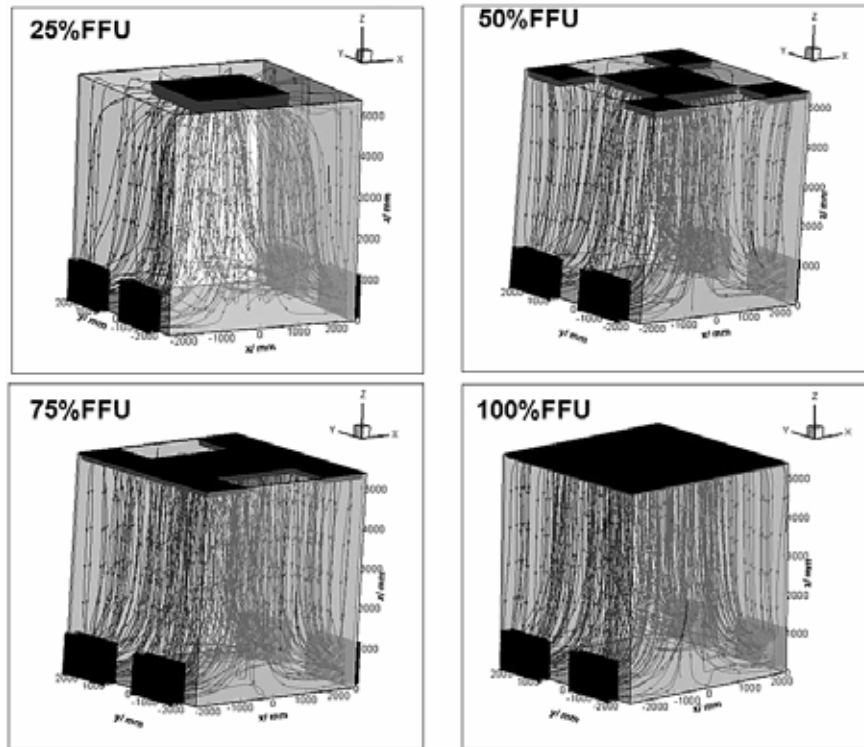


图 12 不同 FFU 运行数量的流线图

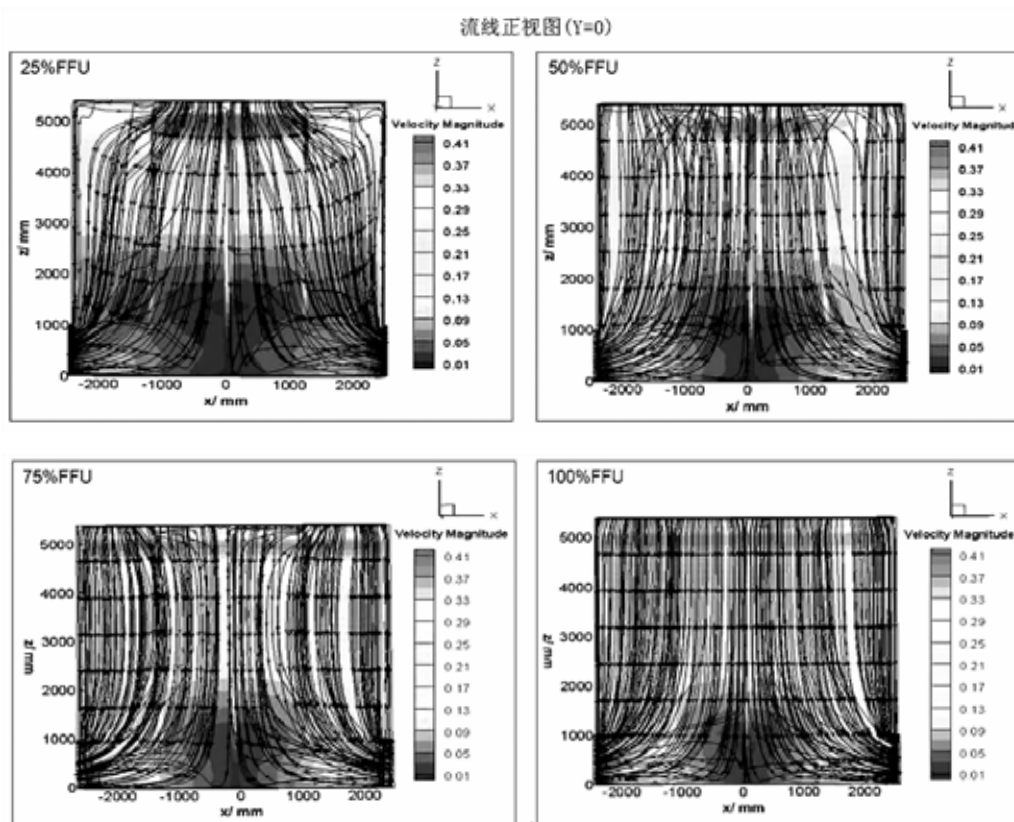


图 13 不同 FFU 运行数量的流线正视图

都非常好,底部的涡结构基本只存在于高架地板下方。因此对于洁净度要求比较高要求的,通过减少FFU运行数量实现节能和洁净度可控的目的是不可行的。

4 总结

我国是全球最大的集成电路市场。由于电子厂房生产工艺的特殊性,其能耗巨大,在ISO1级环境中,通过采取FFU的间隙运行,对降低能耗具有重大意义。本文通过现有ISO1级空态情况下的环境进行简化,并通过数值模拟方法,分析得出了变FFU转速及恒定转速下变FFU运行数量的气流组织特性。

(1)在给定的几种风速中,除0.2m/s的风速外,其他风速基本为单向流区域,如果设备作业高度均在高架地板上方1m及以上,可以降低FFU的运行转速,保证单向流的同时,实现降低能耗的目的。

(2)在给定的满布FFU的ISO1级微环境中,在给定的风速条件下,只有100%FFU运行时,流线平行度效果好,是单向流。因此,对于洁净度要求非常高的洁净室,通过减少FFU运行数量实现节能和单向流可控的目的是不可行的。

参考文献

[1] 贺苏凝,姜雨彤.集成电路行业研究.电气时代,

2018,4:22-31.

[2] 迎九.2017中国半导体市场回顾及2018展望. ELECTRONIC ENGINEERING & PRODUCT WORLD, 2018,6:5-9.

[3] 李书玮.我国集成电路产业发展的金融支持研究.商务部国际贸易经济合作研究院,2019硕士论文.

[4] 王龙兴.2018年我国集成电路产业发展的展望.集成电路应用,第35卷第2期,2018,2:6-9.

[5] 贺正楚,潘红玉.德国“工业4.0”与“中国制造2025”[J].长沙理工大学学报(社会科学版), 2015,30(3):105-110.

[6] 张华廷,吴蔚兰,向灵均.CFD在电子洁净室节能设计中的应用.制冷与空调,2013,27(6).

[7] 石静宜.半导体厂房空调系统节能研究[D].西安:西安科技大学,2014:14-16.

[8] 李九如,李想,等.洁净室典型气流组织特性模拟.哈尔滨理工大学学报,2018,第23(6).

[9] 黄远东,王守生,金鑫等.城市街道峡谷内污染物扩散模拟中不同湍流模型的比较研究[J].水动力学研究与进展,2008,23(2):189-191.

静电型过滤材料的效率实验探讨

江 锋

(清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

[摘 要] 本文通过对两种静电型过滤材料动态过滤性能、过滤效率和阻力实验研究, 对制作、保存和使用中如何保持静电过滤材料过滤效率的稳定性提出探讨。。

[关键词] 静电型; 过滤材料; 过滤效率

静电型过滤材料具有广泛的应用市场, 但是在制作、保存和使用中如何保持静电型过滤材料过滤效率的稳定性是广大净化同行非常关注的话题。

对于 PP 滤料, 静电效应在其过滤效率中所占比例之高是早已形成共识的。我们团队多年前的一项研究表明: 有一款初始效率为 99.9% 的 PP 滤料, 在完全消除了静电效应之后, 效率下降到 40%。

但是, 这个实验结果并不能导致以下结论: PP 滤料只能作为低中效滤料使用。

不过, 从另一方面来说, 把初始效率达到亚高效甚至高效的 PP 滤料完全等同于玻纤滤料, 也是有风险的。

那么, 如何更好地制作、保存和使用静电型过滤材料, 通过研究掌握其工作特性, 充分发挥其优势, 是过滤行业共同面临的课题。

本实验使用了两种静电型过滤材料, 包括聚丙烯 (PP) 滤料和静电棉 (FH) 滤料。

从图 1 中可以看到, 两张 PP 滤料的效率 - 时间曲线均呈 V 形, 而两张 FH 滤料的效率 - 时间曲线均为单调减。

我们分析: 形成这种现象的原因, 是滤料所带静电的消减与滤料积尘两个因素的此消彼长而致。

我们由图 1 和图 2 的 PP 滤料的效率 - 时间曲线提出了两个问题:

(1) 效率 - 时间曲线出现了下降趋势和最低效率点! 那么初始效率能作为出厂效率值吗?

(2) 虽然效率 - 时间曲线出现了下降趋势, 但是出现了拐点! 随后持续上升。我们分析可能是由

于滤料中的静电场保持得比较好, 静电丢失速度低于滤料积尘的速度, 所以效率在有所下降之后出现拐点, 持续上升。

而两张 FH 滤料的初始效率与 PP 滤料相比并不低, 但是其效率却随时间持续下降, 没有出现拐点。表明 FH 滤料中的静电丢失速度超过了滤料积尘的速度。

结合图 3 可以看出: PP 滤料的阻力一直在增加, 说明 PP 滤料上的粒子一直在沉积, 使得滤料的过滤效率得以保持, 不因静电的丢失而大幅下降。而 FH 滤料的阻力几乎没有增加, 说明在静电丢失的同时, FH 滤料上的粒子的沉积速度缓慢, 不足以弥补因静电的丢失而导致的效率下降。

相比于常规的过滤技术研究, 即滤料初始的、静态的过滤性能或是滤料的容尘量性能的研究, 本研究侧重于滤料的动态过滤性能 - 过滤效率和阻力随时间的变化趋势。这或许为静电型过滤材料的研究工作引入了一个新的视角!

上述实验只是个起步, 希望我们的实验结果及分析能起到抛砖引玉的作用。

在静电型滤料和实验气溶胶种类的选取、实验参数的调变、以及理论计算模型的建立和计算分析等方面还有许多可以开展的研究工作。

我们期待与同行共同关注静电型过滤材料在制作、保存和使用中的各个重要因素。通过实验和理论研究, 让静电型过滤材料充分发挥其应有的作用, 更好地应用于净化行业。

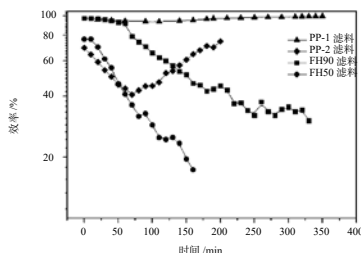


图 1 两种静电型过滤材料的效率 - 时间曲线

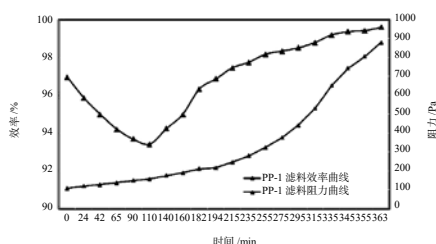


图 2 PP-1 滤料的效率及阻力 - 时间曲线

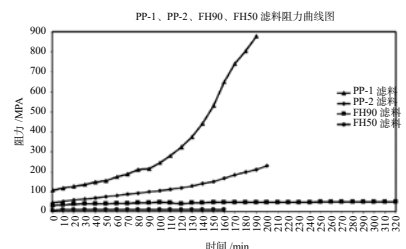


图 3 两种静电型过滤材料的阻力 - 时间曲线

既有医院洁净手术室最大可调新风量的研究

牛维乐¹, 侯守源²

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 河北省沧州市青县自来水公司, 沧州 062650)

[摘要] 本文以手术室内的压力值不超标为限制条件, 通过理论计算得出手术室的理论最大新风量; 总结既有医院手术室的压力随着新风量的变化的现场测试数据, 得出既有医院在不做系统调整的情况下最大可调的实际新风量数值; 综合理论最大新风量和最大可调的实际新风量的数值得出既有医院最大新风量的建议, 为既有医院手术室更好的利用新风来节省能源的消耗提供理论依据。

[关键词] 既有医院; 洁净手术室; 新风量

0 引言

既有医院洁净手术室大都处于建筑的內区(远离建筑外墙, 没有外窗), 并且室内热湿负荷很大, 全年冷负荷的运行时间很长, 甚至是全年都是冷负荷状态。目前使用最多的消除冷负荷的措施是制冷机制冷方式, 制冷系统在温度低的过渡季和冬季的制冷效率很低, 冬季停机状态下还会造成室外的制冷机、水管、阀门冻坏的问题, 既不利于医院的节能, 又影响这些医疗用房正常运行, 同时给医院增加了很大一部分的运行维护费用。文献[1]通过对既有医院洁净手术室各种冬季冷却方式的技术经济比较, 证明了在全国七个气候区, 变新风量冷却方式的经济性要优于制冷机制冷方式^[1]。在过渡季和冬季, 室外的新风就是天然的免费的冷源, 对于既有医院洁净手术室能多大限度的使用这个天然冷源, 就是本文要回答的问题。

1 既有医院手术室最大新风量理论计算

手术室压力的大小和渗风量存在以下的函数关系:

$$Q_s = \mu F \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)^{[2]}$$

式(1)中: Q_s 为手术室渗风量 (m^3/s); μ 为流量系数, 通常取 0.3~0.5; F 为缝隙的总面积 (m^2); ΔP 为手术室的静压差 (Pa); ρ 为空气的密度 (Kg/m^3)。

2.1 正压手术室的确定

正压的手术室的渗风量等于新风量和排风量的差。即:

$$Q_s = Q_x - Q_p \quad (2)$$

式(2)中: Q_s 为手术室渗风量 (m^3/s); Q_x 为手术室新风量 (m^3/s); Q_p 为手术室排风量 (m^3/s)。

手术室通常处于清洁走廊的内侧, 清洁走廊的正压通常为 +10Pa, 依据老规范正压手术室和清洁走廊之间的压差最小为 +5Pa, 最大为 +30Pa。正压手术室的相对压力为 +5Pa 时的状态为状态 1, 状态

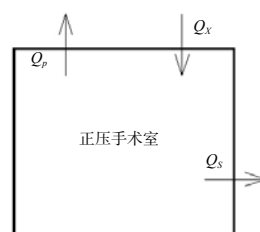


图 1 正压手术室模型

1 相对应的渗风量、新风量、排风量、绝对压力分别为 Q_{s1} 、 Q_{x1} 、 Q_{p1} 、 $\Delta P_1=5\text{Pa}$ 。正压手术室的相对压力为 +30Pa 时的状态为状态 2, 状态 2 相对应的渗风量、新风量、排风量、绝对压力分别为 Q_{s2} 、 Q_{x2} 、 Q_{p2} 、 $\Delta P_2=30\text{Pa}$ 。

依据式(1)、式(2)可得:

$$\frac{Q_{x1}-Q_{p1}}{Q_{x2}-Q_{p2}} = \frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = \sqrt{\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2}} = \sqrt{\frac{5}{30}} \approx 0.408 \quad (3)$$

由式(3)可得:

$$Q_{x2} = \frac{Q_{x1}-Q_{p1}+0.408Q_{p2}}{0.408} \quad (4)$$

手术室的排风量通常是固定的, 即 $Q_{p1}=Q_{p2}=Q_p$ 。

则式(4)简化为:

$$Q_{x2} = 2.451Q_{x1} - 1.451Q_p \quad (5)$$

若 $Q_p=200\text{m}^3/\text{h}$ 则:

$$Q_{x2} = 2.451Q_{x1} - 290.2 \quad (6)$$

对于任何一间已有的手术室, 在已知正常运行状态的绝对压力、最大允许压力、新风量和排风量时, 均可以按照上述计算过程得到最大的新风量。

式(6)中的 Q_{x1} 为正压手术室的绝对压力为 +5Pa 时的新风量, 也就是手术室夏季和冬季低温状态正常运行时的新风量。 Q_{x1} 的大小反映了手术室围护结构的密封程度, Q_{x1} 越大, 手术室围护结构的密封性能越差, Q_{x1} 越小, 手术室围护结构的密封性能越好。

式(6)中的 Q_{x2} 为正压手术室的绝对压力为+30Pa时的新风量,也就是手术室在过渡季和冬季非低温状态运行时的新风量,也就是不至于影响手术室声环境的手术室最大的新风量。 Q_{x2} 的大小和 Q_{x1} 是相关的, Q_{x1} 越大, Q_{x2} 越大, Q_{x1} 越小, Q_{x2} 越小。 Q_{x2} 反映了手术室围护结构的密封程度,手术室围护结构的密封性能越差, Q_{x1} 越大,手术室围护结构的密封性能越好, Q_{x1} 越小。

对于一间排风量为200m³/h,满足老规范^[3]最小新风量运行的手术室来说可依据式(6)得出其新风可调的最大值,见表1:

表1 手术室计算最大可调新风量

手术室级别	每间最小新风量/(m ³ /h)	每间最大新风量/(m ³ /h)	增大的倍数
I级	1000	2161	2.16
I级(眼科)	800	1671	2.09
II级、III级	800	1671	2.09
IV级	600	1180	1.97

将表1绘制成图2:各级正压手术室最大可调新风量图。

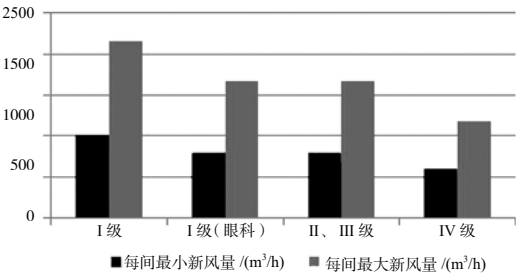


图2 各级手术室计算最大可调新风量图

由表1可见,手术是最大可调新风量为最小新风量的1.97~2.16倍。

2.2 负压手术室的确定

负压的手术室的渗风量等于排风量和新风量的差:

负压手术室:

$$Q_s = Q_p - Q_x \tag{7}$$

从式(7)可以看出,维持一个比较稳定的负压值,需要排风量和新风量同向变化并且他们之间的差值变动不大,增大多少新风量就要增加多少排风量。因此,对于排风量不能增加的负压手术室不建议采取增大新风量来补偿过渡季和冬季的冷负荷。如果需要增大新风量来补偿过渡季和冬季的冷负荷,在进行设计时就要考虑排风量可以调节的措施并且和新风量的变化保持同步。

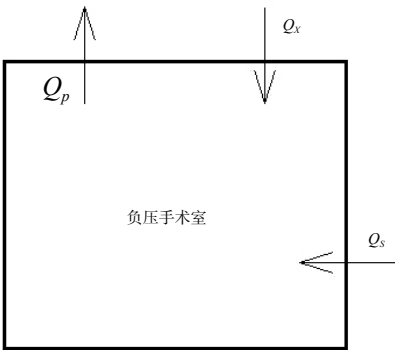


图3 负压手术室模型

2 既有医院手术室最大新风量的实际测试

为了摸清实际建成的手术室的新风量的可调范围,我们对全国几十家医院已经建成的手术室进行了现场测试,从中选取了5家医院共计8间手术室的测试数据,归纳成表2。表2中的压力为手术室绝对压力,手术室和走廊之间的压力在5~10Pa之间。

表2 实际建成的洁净手术室新风量变化范围调查结果

医院名称	手术室编号	手术室级别	体积/m ³	新风量/(m ³ /h)	新风换气次数/(次/h)	压力/Pa
医院1	1号手术室	II级	87	600	6.9	34
				800	9.2	41
				1000	11.5	53
				1200	13.8	60
				1300	14.9	73
医院1	2号手术室	II级	102	400	3.9	22
				600	5.9	29
				800	7.8	35
				1000	9.8	38
				1200	11.8	44
医院2	1号手术室	I级	144	1300	12.7	53
				2252	15.6	8
				2774	19.3	8
				2905	20.2	8
				1575	11.3	14
医院3	1号手术室	I级	140	1925	13.8	19
				2565	18.3	27
				3690	26.4	46
				933	5.1	5
				1406	7.7	8
医院3	2号手术室	I级	182	1742	9.6	18
				2362	13.0	24
				3624	19.9	44
	3号手术室	I级	135	864	6.4	3
				1057	7.8	8
医院4	1号手术室	I级	120	1506	11.2	16
				2174	16.1	48
				2340	17.3	69
				1008	8.4	3
				1498	12.5	9
医院5	1号手术室	I级	168	1699	14.2	12
				2160	18.0	15
				2592	21.6	18
				1519	9.0	6
				1670	9.9	8
医院5	1号手术室	I级	168	1880	11.2	12
				1987	11.8	15

从表 2 可以看出：

(1) 医院 2 的 1 号手术室的压力在新风量增大时基本没有变化，说明该手术室的密封性能不好。医院 5 的 1 号手术室的新风量可调范围较小，压力变化也不是很明显，见图 4 所示。

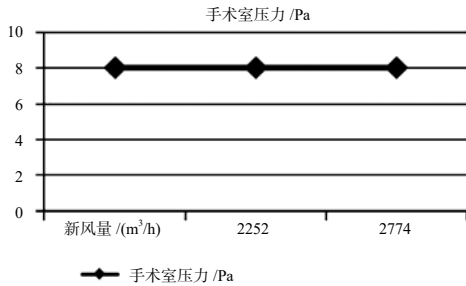


图 4 医院 5 的 1 号手术室压力随新风量的变化

(2) 除医院 2 的 1 号手术室外的其他手术室随着新风量的增加，房间的压力逐渐增高，见图 5 和图 6 所示。图 5 为医院 1 的 2 号手术室压力随新风量的变化图，图 6 为医院 3 的 2 号手术室压力随新风量的变化图。医院 1 的 2 号手术室为 III 级手术室，医院 3 的 2 号手术室为 I 级手术室。图 4 的曲线斜率小于图 5 的曲线斜率，说明医院 3 的 2 号手术室的密闭性优于医院 1 的 2 号手术室，实际工程中由于 I 级手术室的洁净等级最高，通常其围护结构的密闭性也是最好的。

(3) 表 2 中每个医院第一行蓝色黑体字的数据为符合老标准^[3]的正常运行的的新风量和压力值，表 2 每个医院第二行红色黑体字的数据为符合老标

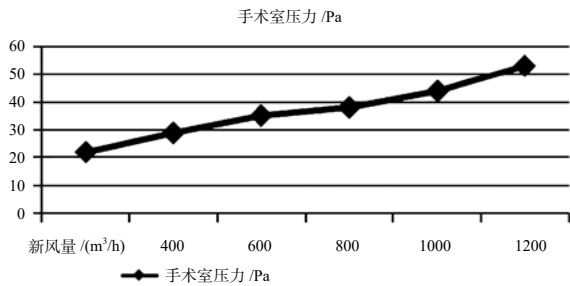


图 5 医院 1 的 2 号手术室压力随新风量的变化

准^[3]的最大新风量时的新风量和压力值，我们把上述数据统计成表 3。从表 3 中的数据来看，随着手术室的新风量的增加，手术室的压力在逐渐的增大，手术室的新风量调大的倍数范围为 1.526~2.343，压力调大的倍数范围为 1.5~4.313。理论计算的数值也包含在上述范围之内。

3 既有医院洁净手术室调大新风量的可行性分析

已经建成的医院洁净手术室的新风系统主要有两种形式：集中设置的新风系统和分散设置的新风系统。集中设置的新风系统为若干个手术室空调系统供应新风，通常会在每个手术室空调系统的新风管上设置定风量风量控制阀门。分散设置的新风系统则每个手术室空调系统设置独立的新风入口。

分散设置的新风系统由于设置了独立的新风入口，加大新风量可以通过开大新风管上的阀门或者关小回风管上的阀门来实现。新风量的加大范围要视手术室的围护结构的密封性确定，新风量实际可调的最大值以手术室的压力升高不至于产生噪声、不至于影响手术室的声环境为前提条件。

集中设置的新风系统要想加大新风就必须对新风系统加以改造。首先要确定每个手术室的可以调整到的最大新风量（以手术室的压力升高不至于产生噪声、不至于影响手术室的声环境为前提条件），按照每个手术室可以调整到的最大新风量之和来确定集中设置的新风机组的风量，同时将设置在每个手术室空调系统新风管上的定风量风量控制阀门改成两态风量风量控制阀门，低限风量为手术室正常运行时的最小的新风量，高限风量为手术室可以调

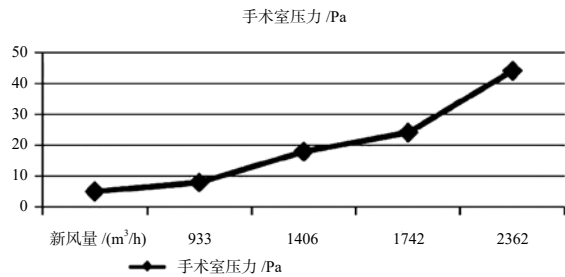


图 6 医院 3 的 2 号手术室压力随新风量的变化

表 3 实际建成的洁净手术室新风量和压力变化比率

医院名称	手术室编号	手术室级别	正常新风量/(m³/h)	最大新风量/(m³/h)	新风量调大的倍数	正常压力/Pa	最大压力/Pa	压力调大的倍数
医院 1	1 号手术室	II 级	800	1300	1.625	41	73	1.780
	2 号手术室	II 级	800	1300	1.625	35	53	1.514
医院 3	1 号手术室	I 级	1575	3690	2.343	14	46	3.286
	2 号手术室	I 级	1742	3624	2.080	18	44	2.444
	3 号手术室	I 级	1506	2340	1.554	16	69	4.313
医院 4	1 号手术室	I 级	1699	2592	1.526	12	18	1.500

整到的最大新风量,新风机组设计成可以变风量运行的机组。

从理论计算和实际测试的数据分析来看,既有医院洁净手术室的围护结构的密封性是影响手术室最大可调新风量的重要因素。国内目前的医院洁净手术室受到设计水平、施工工艺、运行管理水平等因素的限制,围护结构的密封性能差异很大,密封性好的手术室在排风量不能调节的前提下,新风量可调范围小,密封性差的手术室在排风量不能调节的前提下,新风量可调范围较大,每间手术室的可调最大风量要依据手术室的现状确定,可以参照本文通过实际测试总结出来的结论:新风量调大的倍数在 1.5~2.4 之间。

4 既有医院洁净手术室最大新风量的建议

通过上述理论的分析并结合对医院手术室实际测试结果的研究,可以得出如下结论:

(1) 对于已经建成的正压洁净手术室,在排风量不可调的条件下,新风量也是可以适当调大的。已经建成的正压洁净手术室的新风量调大的倍数在 1.5~2.4 之间,当手术室的围护结构密封性能比较好时,新风量调大的倍数可以取低值,当手术室的围护结构密封性能比较差时,新风量调大的倍数可以取高值。

(2) 对于已经建成的正压洁净手术室,在排风

量不可调的条件下,建议采用在主要的洁净操作区和走廊之间、走廊和室外大气之间、洁净区直接对外的房间和室外之间加装余压阀;在空调系统回风管上增设带排风机的支路,将部分回风排至室外,用来保持房间内的压力状况在可以接受的范围内。

(3) 对于已经建成的正压洁净手术室,分散设置的新风系统的空调系统新风量调节比较方便可行。集中设置的新风系统的空调系统新风量的调节受到新风系统性能的限制,需要对新风系统加以改造。

(4) 新建医院洁净手术室空调系统,应考虑为了在过渡季充分利用新风的冷量,新风量可以加大的补偿措施,如果新风量加大的范围会造成手术室声环境的破坏,则需要把手术室的排风系统设计成变风量可调的排风系统。

参考文献

- [1] 陈清莹,梁磊.医院手术室冬季冷却方式探讨.北京.建筑科学.2015.第 31 卷.增刊.
- [2] 许钟麟著,空气洁净技术原理(第三版),270,北京:科学出版社,2003.
- [3] 中华人民共和国卫生部.医院洁净手术部建筑技术规范 GB 50333-2002[M].北京.中国建筑工业出版社.2002.

空气中甲醛含量的测定及不确定度评定

杨志远, 杨英霞, 李 强, 徐昭炜, 王智超

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

[摘 要] 通过酚试剂分光光度法测定了能力验证考核样品中甲醛的含量并对测量结果进行了不确定度评定。根据《化学分析中不确定度的评估指南》提供的不确定度分析思路, 系统分析了影响测量不确定度的各个因素, 对测量结果的不确定度进行分析、评定和表述。本次测量结果的扩展不确定度为 $0.015\text{mg}/\text{m}^3$, 主要由标准溶液的配制、标准曲线的拟合以及样品采集过程产生的不确定度所引起。因此, 实验室应规范做好标准溶液的配制、工作曲线的绘制及样品采集几个关键环节, 以保证测量结果准确、可靠, 提高检测工作质量。

[关键词] 酚试剂分光光度法; 能力验证; 甲醛; 不确定度评定

0 引言

甲醛是一种挥发性很强的有毒物质, 它对皮肤和黏膜有强烈的刺激作用, 世界卫生组织已确定其为一类致癌和致畸物质。由于室内装修材料及家具使用的粘合剂大多为酚醛树脂或脲醛树脂, 使得甲醛成为室内空气污染的主要污染物之一^[1-2]。甲醛含量作为一项重要的环境安全指标, 已引起人们高度重视, 准确检测室内空气中甲醛含量以及正确评估其测量不确定度对人体健康具有重要意义。

测量不确定度是表征合理地赋予被测量量值的分散性, 与测量结果相联系的参数^[3]。测量不确定度不仅可以客观地描述实验室某项试验的有效性、可靠性, 而且还可以定量说明一个实验室技术水平以及管理水平的高低。特别是对测量值处于标准限临界值时, 不确定度对符合性判断的影响尤为重要^[4]。

本文依据 GB/T 18204.2-2014《公共场所卫生检验方法第 2 部分: 化学污染物》, 我们以酚试剂分光光度法测定能力验证考核样品中甲醛的含量, 并对测量结果进行了不确定度评定, 找出了影响测定结果可靠性的关键环节和主要因素。本研究对于规范实验室甲醛检测以及提高分析测试质量具有重要的意义^[5-6]。

1 实验部分

1.1 材料与方法

1.1.1 样品

来自于北京地区 2018 年“空气中甲醛的测定(分光光度法)”能力验证项目, 铝制气瓶包装, 将气瓶中的气体充入到采样袋中, 再使用采样器从采样袋中采集气体样品用于检测。

1.1.2 试剂

水中甲醛标准物质购于中国计量科学研究院, 编号 BW3450, 批次编号为 17001, 标准值 $9.6\text{mg}/\text{mL}$, 相对扩展不确定度为 3% ($k=2$)。

1.1.3 仪器

UV-2600 型分光光度计, 透射比的最大允许误差为 $\pm 0.3\%$; QC-6H 型大气采样仪, 流量示值误差为 2.67% , 计时误差为 $\pm 0.2\%$ 。

1.1.4 测试方法与原理

依据 GB/T 18204.2-2014《公共场所卫生检验方法第 2 部分: 化学污染物》标准中的酚试剂分光光度法, 甲醛与酚试剂反应生成嗪, 嗪在酸性溶液中被高铁离子氧化形成蓝绿色化合物, 在 630nm 波长下进行比色定量。

1.2 实验结果

1.2.1 标准曲线制备

按照标准 GB/T 18204.2-2014《公共场所卫生检验方法第 2 部分: 化学污染物》中规定的方法配制甲醛标准系列, 重复测定二次取平均值, 测试结果见表 1。以甲醛含量(μg)为横坐标, 吸光度平均值(A)为纵坐标, 绘制标准工作曲线, 得到如下直线方程:

$$y = 0.3575x + 0.0184 \quad (1)$$

其中, 斜率 $b=0.3575$, 截距 $a=0.0184$, $R^2=0.9994$, 则计算因子为 $2.797\mu\text{g}/\text{吸光度}$ 。

表 1 甲醛溶液吸光度检测数据

含量(μg)	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0
吸光度(A)	1#	0.017	0.049	0.088	0.167	0.243	0.318	0.382	0.564
	2#	0.009	0.050	0.084	0.159	0.238	0.308	0.372	0.553
吸光度平均值(A)		0.013	0.050	0.086	0.163	0.240	0.313	0.377	0.558

1.2.2 样品测试结果

标准曲线制备完成后, 对能力验证考核样品进行测试, 检测结果见表 2。

表 2 甲醛浓度检测结果

检测项目	检测结果		
	1	2	平均值
吸光度	0.132	0.121	0.126
甲醛浓度(mg/m^3)	0.114	0.110	0.112

2 不确定度评定

2.1 建立数学模型

依据 GB/T 18204.2-2014《公共场所卫生检验方法 第2部分：化学污染物》中规定的测试方法建立如下数学模型：

$$C = \frac{(A-A_0) \cdot B_s}{V_0} \quad (2)$$

式中： C 为空气中甲醛浓度（ mg/m^3 ）； A 为样品溶液的吸光度； A_0 为空白溶液的吸光度； B_s 为标准曲线回归得到的计算因子（ $\mu\text{g}/\text{吸光度}$ ）； V_0 为换算成标准状态下的采样体积（L）。

$$V_0 = V_t \cdot \frac{T_0}{273+T} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (3)$$

式中： V_0 为标准状态下的采样体积（L）； V_t 为采样体积（L）；采样体积（L）=采样流量（L/min）×采样时间（min）； T_0 为标准状态的绝对温度（273K）； T 为采样时采样点的温度（℃）；（注：为了与后面的时间 t 进行区分，此处写为 T ）； P_0 为标准状态的大气压力（101.3kPa）； P 为采样时采样点的大气压力（kPa）。

2.2 不确定度来源分析

空气中甲醛浓度测试过程中的不确定度包括A类不确定度和B类不确定度。由数学模型可知，空气中甲醛含量测定的B类不确定度主要来源于吸光度、计算因子以及标准采样体积三个分量。

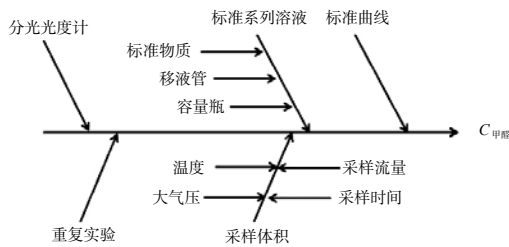


图1 不确定度来源分析图

2.3 标准不确定度分量的评定

2.3.1 A类不确定度的评定

检测过程中，在重复性条件下对样品进行2次检测，以平均值给出检测结果。由于样本数少，所以采用极差法进行A类标准不确定度的评定。

$$u_A = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{R/c}{\sqrt{n}} = \frac{(0.114-0.110) \div 1.13}{\sqrt{2}} = 0.0025 \text{mg}/\text{m}^3 \quad (4)$$

2.3.2 B类不确定度的评定

2.3.2.1 吸光度测量引入的标准不确定度

从UV-2600紫外分光光度计检定证书可知，透射比的最大允许误差为 $\pm 0.3\%$ ，可认为是均匀分布，

则由分光光度计引入的B类相对标准不确定度分量 $u_{Brel}(A)$ ：

$$u_{Brel}(A) = \frac{0.3\%}{\sqrt{3}} = 0.0017 \quad (5)$$

所以，在使用UV-2600紫外分光光度计进行分光光度计测试 A 、 A_0 过程中产生的B类标准不确定度分别为：

$$u_B(A) = \frac{0.3\%}{\sqrt{3}} A \quad (6)$$

$$u_B(A_0) = \frac{0.3\%}{\sqrt{3}} A_0 \quad (7)$$

所以在 $(A-A_0)$ 测试过程中引入的标准不确定度 $u_B(A-A_0)$ 为：

$$u_B(A-A_0) = \sqrt{\left(\frac{0.3\%}{\sqrt{3}} A\right)^2 + \left(\frac{0.3\%}{\sqrt{3}} A_0\right)^2} = 0.0002 \quad (8)$$

2.3.2.2 标准曲线引入的不确定度评定

标准曲线制作过程中，不确定度来源于：标准物质、标准溶液制备、标准曲线拟合、分光光度计读数。

(1) 标准系列溶液制备引入的不确定度

标准系列溶液的配制过程：

准确移取1mL的甲醛溶液标准物质（9.6mg/mL）至1000mL容量瓶中，稀释定容后得到1#标准物质稀释溶液（9.6 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）；准确移取10.4mL的1#标准物质稀释溶液至100mL容量瓶中，稀释定容后得到2#标准物质稀释溶液（1 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）；分别使用1mL、2mL、5mL移液管，按照标准GB/T 18204.2-2014中要求移取适量的2#标准物质稀释溶液制备标准系列溶液。配制过程中所用量具的相对不确定度见表3。

① 甲醛溶液标准物质引入的不确定度

由甲醛溶液标准物质证书可知，其相对扩展不确定度为3%（ $k=2$ ），则其B类相对标准不确定度 u_{Brel21} 为：

$$u_{Brel21} = \frac{0.3\%}{2} = 0.015 \quad (9)$$

② 1#标准物质稀释溶液配制过程中使用到了1mL移液管和1000mL容量瓶，二者的相对不确定度值见表3，1#标准物质稀释溶液（9.6 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）引入的B类相对标准不确定度 u_{Brel22} 为：

$$u_{Brel22} = \sqrt{u_{Brel21}^2 + 0.0002^2 + 0.005^2} = 0.0158 \quad (10)$$

③ 2#标准物质稀释溶液（1 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）配制过程中使用到了1mL移液管和100mL容量瓶，二者的相对不确定度值见表3，2#标准物质稀释溶液（1 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）引入的B类相对标准不确定度 u_{Brel23} 为：

$$u_{Brel23} = \sqrt{u_{Brel22}^2 + 0.0006^2 + 0.005^2} = 0.0166 \quad (11)$$

分别使用 1mL、2mL、5mL 移液管，按照标准 GB/T 18204.2-2014 中要求移取适量的 2# 标准物质稀释溶液制备标准系列溶液。则由标准系列溶液制备过程引入的 B 类相对标准不确定度 u_{Brel2} 为：

$$u_{Brel2} = \sqrt{u_{Brel23}^2 + 0.005^2 + 0.007^2 + 0.003^2} = 0.0189 \quad (12)$$

表 3 标准系列溶液制备所用量具的相对标准不确定度

规格	容量允许误差	相对标准不确定度
1000mL 容量瓶	±0.40mL	0.0002
100mL 容量瓶	±0.10mL	0.0006
1mL 移液管	±0.008mL	0.005
2mL 移液管	±0.025mL	0.007
5mL 移液管	±0.025mL	0.003

(2) 标准工作曲线拟合引入的不确定度

标准曲线拟合不确定度数据处理结果见表 4，计算工作曲线的标准偏差 $S_{y/x}$ 为：

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_2} (y_{ij} - \bar{y})^2}{n_2 - 2}} = \sqrt{\frac{1.161 \times 10^{-3}}{9 \times 2 - 2}} = 0.0085 \quad (13)$$

工作曲线引入的相对标准不确定度 u_{rel13} 为：

$$\begin{aligned} u_{Brel13} &= \frac{S_{y/x}}{b \cdot \bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{(x - \bar{x}_i)^2}{\sum_{j=1}^{n_2} (x_i - \bar{x}_i)^2}} \\ &= \frac{0.0085}{0.3575 \times 0.316} \times \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{9 \times 2} + \frac{(0.316 - 0.733)^2}{7.238}} \\ &= 0.0573 \end{aligned} \quad (14)$$

式中： n_1 为样品的测定次数； n_2 为标准溶液的测定次数（ $n_2 = i \cdot j = 9 \times 2 = 18$ ）； x_i 为各标准系列中甲醛含量的平均值（ μg ）； $\bar{x}$ 为样品中甲醛含量的平均值（ μg ）； b 为工作曲线的斜率。

(3) 标准曲线引入的不确定度来源于：分光光度计读数（5）、标准溶液制备（12）以及标准曲线拟合（14），所以标准曲线引入的相对标准不确定度分量 $u_{Brel}(Bs)$ 的合成：

$$\begin{aligned} u_{Brel}(Bs) &= \sqrt{(u_{Brel}(A))^2 + (u_{Brel2})^2 + (u_{Brel3})^2} \\ &= \sqrt{0.0017^2 + 0.0189^2 + 0.0573^2} \\ &= 0.0604 \end{aligned} \quad (15)$$

所以由标准曲线引入的标准不确定度 $u_B(Bs)$ 为：

$$\begin{aligned} u_B(Bs) &= 0.0604 B_s = 0.0604 \times 2.797 \\ &= 0.1689 \mu\text{g} / \text{吸光度} \end{aligned} \quad (16)$$

表 4 标准工作曲线不确定度计算数据处理

序号	甲醛含量 $x_i(\mu\text{g})$	吸光度 $y_i(A)$	代入工作曲线的吸光度 $y'(A)$	$(y_i - y')^2$	甲醛含量均值 (μg)	$(x_i - \bar{x})^2$
1	0	0.017	0.018	0.1×10^{-5}	0.733	0.537
		0.009		8.1×10^{-5}		0.537
2	0.1	0.049	0.054	2.5×10^{-5}	0.733	0.401
		0.050		1.6×10^{-5}		0.401
3	0.2	0.088	0.090	0.4×10^{-5}	0.733	0.284
		0.084		3.6×10^{-5}		0.284
4	0.4	0.167	0.161	3.6×10^{-5}	0.733	0.111
		0.159		0.4×10^{-5}		0.111
5	0.6	0.243	0.233	1.0×10^{-4}	0.733	0.018
		0.238		2.5×10^{-5}		0.018
6	0.8	0.318	0.304	2.0×10^{-4}	0.733	0.004
		0.308		1.6×10^{-5}		0.004
7	1.0	0.382	0.376	3.6×10^{-5}	0.733	0.071
		0.372		1.6×10^{-5}		0.071
8	1.5	0.564	0.555	8.1×10^{-5}	0.733	0.588
		0.553		0.4×10^{-5}		0.588
9	2.0	0.733	0.733	0	0.733	1.605
		0.711		4.8×10^{-4}		1.605
Σ				1.161×10^{-3}		7.238

2.3.2.3 标准采样体积引入的不确定度评定

本次测试以 0.3L/min 的流量采集 10min 气体样品，测试温度为 20.9℃，大气压力为 102.3kPa。标准采样体积为：（注：公式 3 中对各物理量有详细标注）

$$V_0 = V_i \cdot \frac{T_0}{(273 + T)} \cdot \frac{P}{P_0} = 2.81\text{L} \quad (17)$$

(1) 采样流量测量标准不确定度

大气采样仪经计量检定，其流量示值误差为 2.67%，假设为均匀分布，则由采样流量引入的 B 类标准不确定度：

$$u_B(Q) = \frac{2.67\%}{\sqrt{3}} \cdot Q \quad (18)$$

(2) 采样时间引入的标准不确定度

大气采样仪的计时误差为 ±0.2%，假设为均匀分布，则采样时间引起的 B 类相对标准不确定度分量为：

$$u_B(t) = \frac{0.2\%}{\sqrt{3}} \cdot t \quad (19)$$

(3) 采样时大气压引入的标准不确定度

由大气压变送器的检定证书结果可知，该仪器测量结果符合 0.2 级，由检定标准 JJG 882-2004 《压力变送器检定规程》查得其最大允许误差为 ±0.2%，按均匀分布计算，则由大气压引起的 B 类相对标准不确定度：

$$u_B(P) = \frac{0.2\%}{\sqrt{3}} \cdot P \quad (20)$$

(4) 采样时温度引入的标准不确定度

由温湿度表的校准证书可知, 温度校准结果的扩展不确定度 $U(t)=0.2^{\circ}\text{C}$, $k=2$ 。由采样温度引起的 B 类标准不确定度:

$$u_B(T)=\frac{0.2\%}{2}=0.1^{\circ}\text{C} \quad (21)$$

(5) 采样体积引入的 B 类标准不确定度分量的合成:

由 V_0 的计算公式 (3) 可得:

$$V_0=Q \cdot t \cdot \frac{T_0}{273+T} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (22)$$

将公式 (22) 化简整理可以得出:

$$V_0=C' \cdot Q \cdot t \cdot P \cdot T^{-1} \quad (23)$$

式中, C' 为常数, 进行求导计算各分量的灵敏系数如下:

$$C_Q=\frac{V_0}{Q}、C_t=\frac{V_0}{t}、C_P=\frac{V_0}{P}、C_T=-\frac{V_0}{T}$$

则由采样体积引入的 B 类标准不确定度为:

$$\begin{aligned} u_B(V_0) &= \sqrt{(0.0154^2+0.0012^2+0.0012^2+0.0048^2) \cdot V_0^2} \\ &=0.0456\text{L} \end{aligned} \quad (24)$$

2.3.3 标准不确定度分量汇总

由 C 的计算公式可以得出:

$$C=C' \cdot (A-A_0) \cdot B_s \cdot V_0^{-1} \quad (25)$$

各分量的灵敏系数为:

$$C_{(A-A_0)}=\frac{C}{A-A_0}、C_{B_s}=\frac{C}{B_s}、C_{V_0}=-\frac{C}{V_0}$$

表 5 标准不确定度分量统计表

符号	来源	类别	$u_B(x_i)$	$u_i(V_0)=C_i \cdot u_B(x_i)$
u_A	测量重复性	A 类	/	0.0025mg/m ³
$u_B(A-A_0)$	分光光度计	B 类	0.0002	0.0002mg/m ³
$u_B(B_s)$	标准曲线	B 类	0.1689μg/吸光度	0.0068mg/m ³
$u_B(V_0)$	采样体积	B 类	0.0456 L	0.0018mg/m ³

2.4 合成标准不确定度

合成标准不确定度:

$$\begin{aligned} u_c(C) &= \sqrt{0.0025^2+0.0002^2+0.0068^2+0.0018^2} \\ &= 0.0075\text{mg/m}^3 \end{aligned} \quad (26)$$

95% 概率下, 取包含因子 $k=2$, 计算扩展不确定度为:

$$U=0.0075 \times 2=0.015\text{mg/m}^3 \quad (27)$$

3 结论

(1) 通过对各不确定度分量评定结果分析, 此次采用酚试剂分光光度法测定能力验证考核样品中甲醛含量过程中, 标准溶液配制以及工作曲线拟合引入的不确定度分量最大, 测量重复性引入的不确定度分量次之, 再次是标准采样体积的不确定度分量。

(2) 在样品检测过程中, 在标准溶液配制时, 首先选择浓度合适的标准物质, 并对玻璃仪器进行符合性检查, 选择准确度及精密度好的玻璃仪器使用, 尽量减少配制步骤。

(3) 在样品采集过程中, 要保证采样仪器经过准确的流量校准, 保证最佳使用状态, 以减少此项不确定度分量, 提高样品检验的准确度。

(4) 由于能力验证考核气体样品的数量有限, 而且浓度又低, 只进行 2 次平行测试, 所以只能采用极差法进行测量重复性引入不确定度的评定。由于测试样本少, 不能充分消除系统误差, 所以测量重复性引入的不确定度势必会增大。

参考文献

- [1] 贺林燕, 戴春岭, 赵欣蕊. 紫外可见分光光度法测定环境空气中甲醛含量的不确定度评定 [J]. 河北工业科技, 2015, 32(05):458-462.
- [2] 张敏, 劳宝法, 肖珺, 周睿. 分光光度法测定室内空气中甲醛含量的不确定度 [J]. 上海预防医学, 2010, 22(07):377-380.
- [3] JJF 1059.1-2012, 测量不确定度的评定与表示 [S].
- [4] CNAS-GL006:2018, 化学分析中不确定度的评估指南 [S].
- [5] 朱佐刚, 胡玢, 赵寿堂. 分光光度法测定室内空气中甲醛含量不确定度评定 [J]. 分析科学学报, 2009, 25(02):238-240.
- [6] 宋向东, 吴丙毅, 刘西红. 酚试剂分光光度法测定空气中甲醛含量不确定度评定 [J]. 现代测量与实验室管理, 2006, (05):36-37+18.
- [7] 汤晓芸. 酚试剂分光光度法测定空气中甲醛含量的测定不确定度评定 [J]. 现代测量与实验室管理, 2004, (05):40-44.
- [8] 李焕明, 奈世杰, 姜红, 牟文超, 苏凯军, 刘安栋. 酚试剂分光光度法测定公共场所空气中甲醛的不确定度评定 [J]. 广州化工, 2018, 46(04):101-103+148.
- [9] 戴攀, 戴贵生. 酚试剂分光光度法测定空气

中甲醛浓度不确定度评定 [J]. 中国卫生工程学, 2011,10(01):65-66+68.

[10] 代晓佳, 温春, 郭彬. 酚试剂分光光度法测定甲醛浓度的不确定度评定 [J]. 科技信息, 2011,(01):329-330+245.

[11] 王玮, 高洋洋. 酚试剂法测定能力验证样品

中甲醛含量不确定度评定 [J]. 职业与健康, 2017, 33(14):1914-1917.

[12] 李明. 民用建筑工程室内空气污染物甲醛浓度检测不确定度分析 [J]. 河南建材, 2017(03):24-25+28.

[13] 郭文慧. 室内环境污染物甲醛浓度检测采样体积的不确定度评定 [J]. 广东建材, 2009(04):159-160.

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

孟令坤

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

[摘要] 本文通过实验的方法, 测试风机盘管加过滤器对于病房空气净化效果。选取 2 家医院, 分别随机选取 1 间实验病房和 1 间对照病房, 实验病房风机盘管加过滤器, 对照病房风机盘管不加过滤器。医院 1 实验病房细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 浓度平均为 $63\mu g/m^3$, 浮游菌浓度平均为 $196cfu/m^3$; 对照病房内 $PM_{2.5}$ 浓度平均为 $262\mu g/m^3$, 浮游菌浓度平均为 $479cfu/m^3$ 。医院 2 实验病房 $PM_{2.5}$ 浓度平均为 $45\mu g/m^3$, 浮游菌浓度平均为 $272cfu/m^3$; 对照病房内 $PM_{2.5}$ 浓度平均为 $105\mu g/m^3$, 浮游菌浓度平均为 $479cfu/m^3$ 。说明风机盘管加过滤器可有效降低医院病房内 $PM_{2.5}$ 浓度和浮游菌浓度。

[关键词] 风机盘管; 过滤器; 细颗粒物; 浮游菌

0 引言

病房内空气污染是造成医院院内感染的重要因素之一, 医院病房内空气品质的检测和控制逐步引起了医院感控人员、患者及患者家属的重视。传统的病房空气消毒的方法, 如紫外线照射、臭氧消毒、甲醛熏蒸等只是对病房空气进行静态消毒灭菌, 消毒结束后, 病人和医护人员的活动会使病房内空气中细菌的菌落数再次升高, 从而造成污染, 没有持续的净化效果。此外, 长时间使用消毒液, 使得细菌和病毒的抗药性不断增加, 消毒效果逐渐降低, 并最终失效^[4]。动态空气净化消毒是空气净化最有效的方法之一^[1]。本文采用风机盘管加过滤器的方法, 通过阻隔过滤的原理, 对空气进行循环消毒净化, 从根本上消除细菌病毒的载体——尘埃粒子, 达到净化医院病房内空气的目的。

本文针对现有采用风机盘管的病房的实际情况 (不改变原系统任何参数), 通过只在原风口位置加过滤器的方法对医院病房内实际环境的净化效果进行测试比较, 如实反映这一措施的状况, 为后续措施提供依据。

1 风机盘管加过滤器对病房空气净化效果的实验检测

选取北京市 2 家三甲医院, 对医院病房内的细颗粒物及浮游菌浓度进行现场测试和分析。实验时间为 2017 年 6 月至 2017 年 9 月, 每 20 天进行一次现场测试。每家医院随机选取结构相同、楼层相同、面积相近、室内床位数量一致、朝向相同的 2 间病房作为实验场所。2 家医院各选取 1 间病房, 在其风机盘管的回风入口处安装过滤器, 作为实验组; 另外 1 间病房不安装过滤器, 作为对照组。实验组过滤器安装方式见图 1。

实验组过滤器安装并连续运行 1 个月以后进行相关检测。

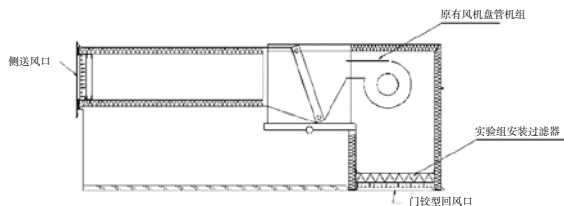


图 1 实验组过滤器安装方式

实验过程中选用的过滤器额定风量为 $250m^3/h$, 额定初阻力为 $26.2Pa$, 额定风量下对 $PM_{2.5}$ 的一次通过净化效率约为 80%。

1.1 $PM_{2.5}$ 浓度测试

按 JGJ/T 309-2013《建筑通风效果测试与评价标准》中第 4.5 条要求进行 $PM_{2.5}$ 浓度测试, 并记录测试结果。采样点的数量根据监测室内面积和现场情况确定, 以期能正确反映室内空气污染物的水平。面积小于 $50m^2$ 的房间设 3 个采样点; $50\sim 100m^2$ 的房间设 5 个采样点。采样点对角线或梅花式均匀分布。采样点避开通风口, 离墙壁距离大于 $0.5m$ 。采样点的高度与人的呼吸高度一致, 相对高度在 $0.5\sim 1.5m$ 之间。测试过程中使用的仪器为 TSI 8352 粉尘仪, 采样流量为 $28.3L/min$, 采样周期为 $5min$, 每个采样点连续采样 3 个周期, 取平均值。

1.2 浮游菌浓度测试

参考 GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》和 GB/T 16293-2010《医药工业洁净室 (区) 浮游菌的测试方法》, 浮游菌浓度测试采样点设置与 $PM_{2.5}$ 浓度测试方法相同。

测试过程中使用两级微生物采样器, 采样流量为 $28.3L/min$, 采样周期为 $5min$, 每个采样点采样 1 个周期。培养皿尺寸为 $\Phi 90mm$ 。

2 测试结果与分析

2.1 实验测试 1

医院 1 实验病房面积为 35m^2 ，病房高度为 2.7m ，设有 3 个床位。病房朝向南，有一扇平开外窗。病房由 1 组风机盘管进行空气处理。风机盘管回风口为门铰式单层百叶风口，尺寸为 $300\text{mm}\times 300\text{mm}$ ；送风口为单层百叶风口，尺寸为 $1000\text{mm}\times 100\text{mm}$ 。未安装过滤器时，风机盘管送风量为 $429\text{m}^3/\text{h}$ ，房间换气次数约为 4.6h^{-1} ；安装过滤器后，风机盘管送风量为 $250\text{m}^3/\text{h}$ ，房间换气次数约为 2.7h^{-1} 。实验过程为动态测量，实验过程中门窗处于关闭状态，偶尔有人由门进出。各次实验室外 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度见表 1，病房内人数及测试结果见表 2。

表 1 医院 1 室外 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度测试结果

实验编号	$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 / ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	205
2	80
3	677
4	523
5	391
6	185
平均值	344

表 2 医院 1 实验病房室内空气测试结果

实验编号	病房内人数	$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 / ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	浮游菌浓度 / (cfu/m^3)
1	10	50	200
2	9	65	151
3	9	75	247
4	10	62	251
5	11	54	198
6	7	69	124
平均值	10	63	196

医院 1 对照病房面积为 33m^2 ，病房高度为 2.7m ，设有 3 个床位。病房朝向南，有一扇平开外窗。病房由 1 组风机盘管进行空气处理，风机盘管不安装过滤器，送风量为 $350\text{m}^3/\text{h}$ ，房间换气次数约为 4.0h^{-1} 。实验过程为动态测量，实验过程中门窗处于关闭状态，偶尔有人由门进出。医院 1 对照病房内人数及测试结果见表 3。

表 3 医院 1 对照病房室内空气测试结果

实验编号	病房内人数	$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 / ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	浮游菌浓度 / (cfu/m^3)
1	7	160	321
2	8	98	189
3	11	523	247
4	10	354	904
5	9	242	238
6	11	196	307
平均值	9	262	368

2.2 实验测试 2

医院 2 实验病房面积为 35m^2 ，病房高度为 2.7m ，设有 6 个床位。病房朝向南，有两扇推拉外窗。病房原有 3 组风机盘管，风机盘管回风口为门铰式回风口，尺寸为 $400\text{mm}\times 400\text{mm}$ ，送风口为方形散流器，尺寸为 $400\text{mm}\times 400\text{mm}$ 。为了便于实验控制，选取其中的 2 组风机盘管安装过滤器，不安装过滤器的风机盘管在实验中不开启。安装过滤器前，2 组风机盘管的风量分别为 $425\text{m}^3/\text{h}$ 和 $434\text{m}^3/\text{h}$ ，房间换气次数约为 9.1h^{-1} ；加装过滤器后，2 组风机盘管的风量分别为 $310\text{m}^3/\text{h}$ 和 $405\text{m}^3/\text{h}$ ，房间换气次数约为 7.5h^{-1} 。实验过程为动态测量，实验过程中门窗处于关闭状态，偶尔有人由门进出。各次实验室外 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度见表 4，病房内人数及测试结果见表 5。

表 4 医院 2 室外 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度测试结果

实验编号	$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 / ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	182
2	94
3	188
4	11
5	27
6	155
平均值	110

表 5 医院 2 实验病房室内空气测试结果

实验编号	病房内人数	$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 / ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	浮游菌浓度 / (cfu/m^3)
1	11	35	268
2	8	60	88
3	15	75	230
4	15	14	386
5	11	24	403
6	10	59	258
平均值	12	45	272

医院 2 对照病房面积为 36m^2 ，病房高度为 2.7m ，设有 6 个床位。病房朝向南，有两扇推拉外窗。同样有 3 组风机盘管，实验中只开启 2 组。2 组风机盘管风量分别为 $420\text{m}^3/\text{h}$ 和 $435\text{m}^3/\text{h}$ ，房间换气次数为 8.9h^{-1} 。实验过程为动态测量，实验过程中门窗处于关闭状态，偶尔有人由门进出。医院 2 对照病房内人数及测试结果见表 6。

表 6 医院 2 对照病房室内空气测试结果

实验编号	病房内人数	$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 / ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	浮游菌浓度 / (cfu/m^3)
1	10	120	342
2	10	105	230
3	10	209	410
4	10	15	250
5	9	42	1240
6	9	142	400
平均值	10	105	479

3 讨论

(1) 由 2 家医院实验病房和对照病房的数据可以看出, 风机盘管加装过滤器的实验病房内的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和浮游菌浓度平均值均小于风机盘管不加装过滤器的对照房间。

(2) 实验病房风机盘管送、回风口面积约 0.1m^2 , 远小于一般空调系统中送、回风口的面积, 运行时迎面风速约 2m/s , 较大。考虑到风口面积和迎面风速为设备自身参数, 可以理解。本次实验直接在现有风机盘管回风口加过滤器, 以测试过滤效果如何, 所以过滤器运行阻力较大, 使得实验病房送风量下降较多。若按照风机盘管机组作净化送风的正常设计, 应增加送、回风口面积, 一般在顶棚另开风口, 送、回风口保证一定距离, 在满足送风量的条件下, 降低迎面风速, 保证过滤器在较低的阻力下运行。

(3) 本次实验过程中使用的过滤器运行阻力较大, 风机盘管风量降低较多, 如果条件允许, 使用效率更高、阻力更小的过滤器, 例如超低阻高中效过滤器, 病房空气净化效果会更好^[3]。这方面已有很多应用实例, 例如原解放军总医院某区重症监护病房采用超低阻高中效过滤器 (尺寸为 $500\text{mm}\times 400\text{mm}\times 60\text{mm}$, 风量 $570\text{m}^3/\text{h}$ 时阻力为 15Pa , 对 $\geq 0.5\mu\text{m}$ 微粒的过滤效率为 85%), 房间洁净度设计为 10 万级, 结果达到 2 万级以内^[5]。

(4) 风机盘管的热交换器、肋片、阀门等位置经常滞留凝结水, 在停机期间因温度升高, 成为适合微生物繁殖的环境。微生物繁殖产生大量气体由

于系统的启动而释放到病房内, 严重影响病房内的空气品质^{[1][2]}。所以如有可能, 应首先考虑在空调系统的回风口加过滤器, GB 51039-2014《综合医院建筑设计规范》也有同样的要求。当风机盘管压头能够达到 50Pa 以上时, 送、回风口可同时安装过滤器, 则效果更好 (这样的实例很多)。

(5) 2 家医院病房均设有独立新风, 由于检测条件限制, 本次实验过程未能对新风条件进行测试。

4 结语

原有病房内普通空调设施加装中效空气过滤器, 可使室内细菌浓度降低一半, 说明“空调+净化”对于病房控制环境污染是有效的。如果进行正规设计, 效果会更好。

参考文献

- [1] 许钟麟. 空气洁净技术原理 [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2014:136-177.
- [2] 许钟麟. 医院洁净手术部建筑技术规范实施指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014:145-148.
- [3] 许钟麟. 洁净室及其受控环境设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008:25-36.
- [4] 武迎宏. 医院洁净手术间不同时段空气质量检测结果分析 [J]. 中华医院感染学杂志, 2010,20(20):3155-3157.
- [5] 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.

洁净手术部检测调试的几点思考

谭 鹏，曹国庆

(中国建筑科学研究院有限公司，北京 100013)

[摘 要] 对洁净手术部的冷热源、空调系统的常用方案进行分析。分析了洁净手术部冷源系统设置适量余量的必要性，对比了手术室空调系统与新风系统分设与合用的优缺点，较为复杂的系统的调试难度增大。分析了高效过滤器更换机时的确定，受多个参数的影响。本文通过实测数据表明超低阻高中效过滤器的有效性。
[关键词] 洁净手术部；冷源容量；高效过滤器寿命；系统维护；超低阻高中效过滤器

0 引言

随着全国各地医疗卫生事业的发展，近三年全国各地新建了一大批各类医院园区。从各地检测调研发现新建的项目已经按照 GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》^[1]（以下简称 GB 50333）的指导进行设计施工，设计施工工艺已经日臻完善。另一方面，根据 2002 版及 2013 版 GB 50333 指导施工检测验收的项目已实际运行多年，许钟麟提出的非诱导型的低湍流度置换流顶部集中送风方式在中国医院洁净手术室中已获得成功应用^[2]，该规范经受住了时间和工程实际的检验。

本文从我国洁净手术部的工程特点，结合笔者部门多年来对相关新建及既有项目的检测调试经验，将一些经验进行简单总结。为相关项目的设计、施工、调试、运行及改造提供一些思路，同时针对一些常见误区进行探讨。

1 冷热源设计

GB 50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》^[1]的表 4.0.1 对手术部内常见房间的温湿度限值进行规定，需要合理的设置冷热源保证室内温湿度参数。

1.1 冷热源设置方案

表 1 手术部（或整个洁净区域）冷热源设置常用方案

	冬季及过渡季冷源	夏季冷源	热源	夏季或过渡季热源
1	自用风冷式	与普通区共用	市政或普通区共用	与普通区共用
2	自用风冷式	自用风冷式	市政或普通区共用	与普通区共用
3	自用风冷式	自用风冷式	市政或普通区共用	自用风冷式
4	自用风冷式	自用风冷式	自用风冷式	自用风冷式

分析对比表 1 中的几种方案可看出：

(1) GB 50333 中 8.1.2 要求，高级别洁净手术室净化系统送风温度宜低于室温。考虑洁净区域内的产热源为常年热负荷，绝大部分情况下空调净化系统均需要冷源。医院往往不设置常年冷源，因此冬季及过渡季的冷源几乎都单独设置冷水机组或一体式风冷机组。

(2) 医院的热源基本是全年运行，所以部分项

目空调处理中加热加湿所需蒸汽也可以直接医院大楼系统，可保证全年运行。也有少数项目的冷热源都选用冷热一体式风冷机组。

(3) 风冷式机组填补了过渡季的供冷空白。风冷式冷水机组或直膨机组体量较小，安装运行方便，使用条件灵活，尤其适合一些非夏季时间供冷面积较小的情况。因此风冷式成为目前国内最常见的净化系统过渡季冷源。

(4) 不同项目的冷源设置方案应因地制宜，特殊情况应灵活处理。某医院原设计水冷机组制冷站位于地下 2 层，整个大楼的净化空调集中在首层至 6 层，原设计从制冷站分水器单独分出一根支管负责整个净化系统。但后期方案调整在 16 层增设一块 NICU 区域，根据改造方案，直接将新设置区域与底层净化区域合用一根支管，并换用更大扬程的水泵。这个方案造成了很多问题和隐患，首先由于水力失调，16 层水流量达不到要求；其次，实际运行中，发现 16 层空调机组供水管压力约 0.2MPa，而底层供水管压力已高达 1.2MPa，如此高的水压力形成一定的安全隐患。其实，在条件允许的情况下，为 16 层单独设置一套风冷机组不失为更合理的解决方案。

1.2 冷热源容量设计

民用空调设计中负荷计算过程十分重要，它决定了整个空调系统的冷热源容量。洁净手术部往往设置于建筑内区，冬季热负荷很少出现抱怨或改造需求，我们的研究主要集中在冷源容量选择上。近年笔者参与了几个大中型医院洁净手术部制冷问题诊断咨询及改造设计项目，问题往往集中在夏季出现湿度大，甚至墙面析出凝结水。分析其原因如下：

(1) 节能意识深入人心，现有的设计理念往往优先考虑节能要求，没有考虑特殊医疗用房的特殊性来增加足够的备用。极端高温高湿天气环境下，手术部的工作不能停摆，医护人员不能减少衣物，既不安全，又不舒适。实际运行中，医护人员着厚厚的手术服，进行长时间高强度的手术操作，体感温度往往偏高，笔者经常发现室内温湿度被调到

18℃ 之后抱怨湿度过高。

(2) 审核现有净化空调设计图纸, 室外气象参数选择的都是空调室外计算干球温度及湿球温度, 即历年平均不保证 50 小时的室外温度^[2]。使得冷源的容量更加捉襟见肘。

(3) 现有设计一般采用 7/12℃ 或 6/13℃ 为冷水供回水设计温度。而大量现场检测发现, 即使是新建系统, 也极少有能保证 8℃ 以下的供水温度。尤其是与非洁净区合用大楼制冷站的, 冷水供水温度甚至达到 10℃ 以上。过高的冷水温度不止影响系统的除湿能力, 还造成供冷量不足。

1.3 冷量不足的预防与改造

洁净手术部关乎广大人民生命健康卫生之大计, 其安全性、稳定性的要求应先于节能及造价的节约。近年运行中出现大量由于冷量设计不足出现的室内温湿度过高的问题。设计、改造中应综合考虑室外极端天气的参数进行选型。现给出改造可行方向:

(1) 夏热冬暖及以南地区新建手术部, 新风机组应选用新风深度除湿机。夏热冬冷及以北地区根据室外参数及项目重要性要求, 分析是否需要设新风深度除湿机。此方法同样适用于安装空间充足的改造项目。

(2) 对于没有条件设置新风深度除湿机或室内冷负荷过大的情况, 可以考虑在空调循环机组增设制冷盘管。增加的盘管可以是冷水盘管, 也可以是氟冷媒盘管, 只作调峰时使用。

(3) GB 50333 的 8.1.9 中要求, 冷热源设备不宜少于 2 台, 但没有要求必须设置冗余备用。是否需要额外为备用, 备用的量有多大就要方案阶段制定好, 决不能直接按照民用规范要求直接乘以 0.9 倍, 只有这样才能在设计初期就预留够充足的条件。笔者曾受国内某医院委托既有冷源增容, 作为既有项目改造, 需考虑电力、结构、建筑、上下水等多个方面, 造价很高, 难度大, 施工影响范围广。

2 净化空调通风系统设计

目前洁净手术部的最常见空调方式为全空气系统。但是普遍认为全空气净化空调系统相对耗能、造价偏高, 因此, 在一些净化要求不高的净化区域, 普通空调系统加超低阻高中效过滤器得到了应用^[4]。

2.1 净化空调系统新风系统

净化空调系统的室内负荷属于常年负荷变化很小, 其负荷变化主要来源于新风部分。为了保证循环空调系统的稳定运行, 建议优先选用独立的新风机组。在一些系统较小, 或安装空间有限的情况, 不设置单独的新风系统, 采用空调循环机组自吸新风。

新风机组与空调循环机组一拖一方案使用相对较少, 往往只有采用新风深度除湿方案才会使用。文献 [5] 中通过估算得出循环机组一拖多比一拖一更加省初投资, 但对于同时使用系数偏低的项目, 运行成本偏高, 新风机组的结论相似, 但这里可以靠变频有效降低能耗。另外, 空调循环机组进口设有定风量阀, 有效控制系统运行稳定。

2.2 净化空调系统循环系统

净化空调系统的循环空调系统是整个系统的核心部分, 围绕着整个洁净手术部和其他净化区域, 依托其他系统, 有效的完成加热/表冷、加湿/除湿、中效过滤、风量调节、压差控制等功能。

2.2.1 净化空调系统手术室循环机组组合

实际工程应用中, 高级别手术室不允许合用循环机组, III 级、IV 级手术室循环机组合用情况较多, 一拖二或一拖三能有效降低机组初投资费用。通过合理的手术排班保证合用的手术室同时启停, 可有效避免能源浪费。

但一拖多的调试难度较大, 无论初调节和运行故障调试难度均增大。拿相对压力调节举例, 当发现手术室安装的压差表压力不符合要求时, 一拖一的循环机组形式调试相对容易, 只需调节机组新风管上的定风量阀即可(假设其他参数均符合要求); 分析一拖三情况, 三间手术室中有一间出现压力不足时, 就不应该直接调节新风阀, 而应该单独调节该手术室送风或回风的支管阀门, 往往需要调试人员从手术室内拆除室内洁净灯钻进夹层进行调节。调试工作往往需要熟悉系统及现场情况专业的调试人员进行。

2.2.2 净化空调系统手术室净化系统维护

机组的自控系统往往会设计很多自控、报警功能, 能在一定情况下增加系统的自适用性, 减少维护工作量。但同样, 维护的难度和技术要求也增加了。

某医院现场检测发现大部分手术室排风量均为零, 现场配合查故障发现排风机接线正常, 风机无故障, 风管阀门全开, 但排风机无电无法开启。后经验证, 系统将排风机与手术室电动门进行了连锁: 电动门关闭启时触点连通排风机才会通电开启。手术部建成后多年, 触点故障, 变为常断, 同时手术部未进行定期检测, 没有发现故障, 导致室内空气质量下降, 影响医护人员及病患的健康。

2.2.3 净化空调系统高效过滤器更换周期

现场检测中, 与医院维护人员沟通, 发现医院非常关心高效过滤器的寿命问题, 也常常被问到, 多长时间更换合适。这里我们不能机械的制定 1 年或 2 年。这个问题涉及的条件较多, 这里进行分析。

(1) 多数手术室使用的高效过滤器都不防水, 出现过水事故, 必须马上进行全面清洁处理后更换, 不得使用。

(2) 高效过滤器安装后经过长时间使用, 边框密封胶条(或果冻胶)会因为形变或变性出现泄漏, 检漏周期建议不超过 12 个月。

(3) 高效过滤器安装完好之后, 一般无外力造成形变, 高效过滤器滤芯出现泄漏较少, 而且随着过滤集尘量的增加, 过滤效率会有所提高。但高效过滤器的阻力也会升高, 使得送风量下降, 一般过滤器终阻力 $\leq$ 初阻力的 2 倍。需要定期综合检测各种参数, 保证送风量、静压差等参数满足使用要求,

我国实际应用中, 往往注重新建, 不注重维护保养, 一些医院甚至依靠没有专业技术经验的队伍负责维护整个净化空调系统。个别医院出现半年不清洗初效滤网却两年一换高效过滤器之乱象, 净化系统的作用没得到有效发挥。

2.3 超低阻高中效过滤器

时至今日, 净化空调系统仍会因为其能耗造价被视为洪水猛兽。我们将净化空调的功能进行解耦: 净化空调 = 空调 + 净化。超低阻高中效过滤器能在保证一定的净化功能的前提下, 显著降低造价和能耗。500 $\times$ 400 $\times$ 100 的 CJL-I 型过滤器在 570m³/h 风量下阻力只有 10Pa^[6]。这对于常用的高静压型风机盘管的送风量影响在可接受范围内。

表 2 为某医院风机盘管送回风系统安装超低阻高中效过滤器后的室内含尘浓度实测值。可以看到在实际应用中, 这种系统形式完全能满足辅助净化区的净化要求(10 万级)。

表 2 在 ICU 病房中安装超低阻高中效过滤器效果

名称	房间设计级别	含尘浓度 粒/L			
		点平均最大值		室平均统计值	
		$\geq 0.5\mu\text{m}$	$\geq 5.0\mu\text{m}$	$\geq 0.5\mu\text{m}$	$\geq 5.0\mu\text{m}$
一次性物品	10 万级	443.3	2.9	459.3	3.3
换车	10 万级	481.7	4.7	535.7	5.0
无菌准备	10 万级	650.3	6.1	656.2	7.7
四人间 1	10 万级	350.9	2.8	364.0	3.5
附: 手术室规范参考值	10 万级	≤ 3520	≤ 29	≤ 3520	≤ 29

风机盘管加超低阻高中效系统, 应优先考虑新风单独设置风口送入室内, 不应按常规习惯将新风接入风机盘管送风管送入室内。因为此类系统的风机盘管关停后, 新风会从风机盘管回风口反吹, 造成室内二次污染。

4 探讨

4.1 适宜的余量并非浪费

上文提到, 洁净手术部以其特殊的功能, 对它的环境提出更高的要求。不应直接照搬一般民用建

筑的节能设计思路。适当的余量与备用是必要的。具体设置多大的余量, 一时一地一论。

当然我们不是说洁净手术部的节能不重要, 恰恰相反, 作为能源使用的大户, 洁净空调系统的节能更加重要。合理的余量只针对系统容量而言, 有效的自控系统与合理的设定参数才能保证系统运行节能。

4.2 日常监测的必要性

洁净系统建设调试完毕, 对日常运行单位提出更高的要求。日常部分参数的监控与记录(如对手术室相对压差、洁净度的定期监控), 出现故障后的排查, 不同运行工况的切换, 都需要运行团队的专业素质和针对本项目的了解。

4.3 综合参数检测

日常维护能保证诸如压差、洁净度等直观易测的参数在监控之下, 但更多的参数没有条件直接测得, 可能是仪器操作难度、仪器费用或测试换算方法复杂等原因。定期对整个净化系统进行检测, 对系统的整体性能进行评估。

5 结论

(1) 净化手术部的冷热源和空调系统的设置组合多样, 最常用的方式未必适合某个特定项目, 需要经过严谨的方案可行性分析。

(2) 净化手术部的手术部宜根据实际要求设置充足的余量与备用, 运行良好的自控系统能有效降低能耗。

(3) 净化手术部的高效过滤器更换时机应综合考虑边框安装状态、运行阻力、风量平衡、压差等参数来确定。

(4) 净化手术部的净化系统的长期稳定运行, 需要专业技术团队长期磨合调试。这是一个复杂的系统, 影响条件多, 故障类型也多种多样, 故障的排查与排除也需要很高的专业能力与经验。一些没有条件采用或培养专业技术团队进行日常维护的项目, 不宜选用复杂难调的系统。

(5) 净化手术部的日常监控十分重要, 部分参数(如压差、洁净度)比较直观易测, 建议尽量缩短自测周期, 这样能在一定程度下降低风险。

(6) 净化手术部系统往往长期运行很少有停止, 因此需要定期由专业技术团队对其运行状态进行综合检测并给出评价报告。

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] 许钟麟, 沈晋明. 中国手术室集中送风方式的应用 [J]. 暖通空调, 2018, 48(07): 40-46.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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] 龚伟, 孙鲁春. 新型重症监护病房净化空调系统的应用 —— 空调净化系统污染控制与节能关系系列研讨之一 [J]. 暖通空调, 2009, 39(12): 107-108+106.
- [5] 赖永贤. 关于洁净手术部工程建设的几点建议 [J]. 中国医院建筑与装备, 2012, 13(07): 85-87.
- [6] 许钟麟. 空气洁净技术的应用与发展 (下) [J]. 中国医院建筑与装备, 2009, 10(04): 24-29.

BIM 技术在医院净化工程建设中的应用

蒲辉辉

(西安四腾环境科技有限公司, 西安 710075)

[摘要] 随着时代的发展, 社会的进步, 现代医学的发展和医院洁净工程的建设要求已经越来越高, 传统的医院洁净工程建设方法已经不能高效、快捷的满足医疗洁净工程的基本需求, 洁净工程建筑中需要多专业之间的协作, 传统的方式流程多专业间的协作不能做到可视化, 而 BIM 技术可以有效的解决这些问题, 从而促进工作效率的提升, 能更好的服务于工程建设的各个阶段, 从设计 - 深化 - 施工 - 运维等各个阶段可以做到无缝衔接大大节约工程建设中人力、财力的投入同时提高工程建设的进度和准确度以满足国家规范的要求。

[关键词] BIM 技术; 洁净工程; 技术应用

0 引言

随着时代的发展人们的环保和自我保护意识的增强, 各行各业都出现了关于空气净化的相关规范, 净化工程建设也成为十分重要的一项举措。净化工程所特别设计的房间, 不论外在空气条件如何变化, 室内均具有维持原先所设定要求之洁净度、温湿度及压力等性能。根据应用又分为了工业净化工程、生物净化工程等; 空气净化工程是一整套系统。在诸多行业中其中以医药工业、医院工程尤为重要。因为在医院净化工程建设中所蕴含的专业比较多, 医护人员看不懂图纸, 图纸不形象直观, 所以需要新的技术、方法来解决这些问题。BIM 技术就应运而生, BIM 技术也是解决之道, 2002 年 BIM 这一方法和理念由欧特克公司提出, 近几年, BIM 在中国的许多大型建筑中得到使用, 从而延伸到工程建设的各个行业, 实际有效的解决了很多问题, 但其在国内没有得到全面运用, 主要是国内的推广力度不够、缺乏明确的技术规范支持, 同时没有形成行之有效的应用模式, 导致了 BIM 技术在国内建筑领域的局限性。

1 BIM 技术在医疗净化建设领域的应用

BIM 的核心是通过建立虚拟的建筑工程三维模型, 利用数字化技术, 为这个模型提高完整的、与

实际情况一致的建筑工程信息库。该信息库包含建筑物的几何、非几何、文字数字、空间以及运动关系等之间的信息。借助这个包含建筑工程信息的 4D 模型, 大大提高了建筑工程的信息集成化程度, 从而为建筑工程项目的相关利益提供了一个工程信息交换和共享的平台。通过将 BIM 技术引入医疗净化建设工程, 可以在工程的各个阶段(投标设计、造价、施工、运维)持续发挥作用。

1.1 投标设计阶段

医院净化工程是一个多专业相互协同合作的一个项目工程, 其中蕴含了强电、弱电、空调、送风、水、气、智能设备等各个系统, 需要彼此相互关联和配合, 组成完整的净化系统。还需要与建筑、结构等专业相互协调了解各专业之间的相互关系, 有效充分的利用建筑空间, 达到更完美的方案。

在整个系统的运行中, 要求业主方、设计方、监理方、总包方、分包方、供应方多渠道和多方位的协调, 通过 BIM5D 模型进行线上的协同管理。BIM 具有五大特点可视化、协调性、模拟性、优化性和可出图性。在投标设计阶段, 进行方案设计以医疗行为的流程为主导, 医疗流程是一个连点成线, 由线到面的不断生成的过程, 直观的布局流程也方便方案的讨论和优化。

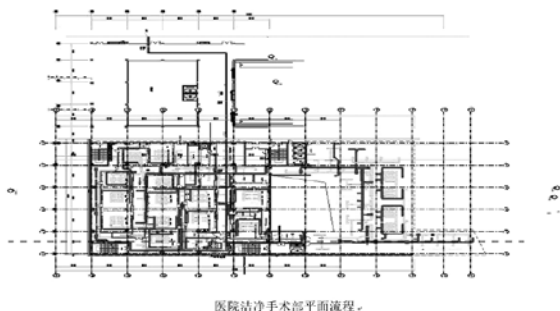


图 1 医院洁净手术部平面流程

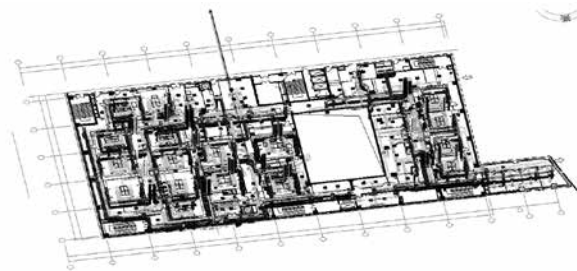


图 2 医院洁净手术部三维平面流程

采用 revit 软件建立三维信息化模型, 搭配 NavisWorks 等建筑施工动画软件创建虚拟的场景漫游向业主全面形象的展示建筑项目的施工组织方案和施工进度演示成果, 同时进行项目全过程的把控, 还可以模拟和分析施工过程, 提高设计可行性。运用 3D 模型将时间信息与建筑信息结合在一起, 形成 4D 模型, 从而直观准确的反映施工过程的进度与状况, 在施工过程中可以将项目划分为各个阶段, 在各个阶段运用 BIM 技术进行演绎快速计算出不同施工阶段所需的人力、物力成本, 从而制定合理的施工方案, 并且可以形象的展示给业主。最后重难点部位的设计施工(管线综合)可以进行碰撞检查和处理过程, 施工现场与三维效果进行对比。

两幅图主要体现的是 BIM 既可以通过三维观察, 也可以出平面图, 更加方便讨论和修改。能直观的看到管线综合之间的关系, 分析建筑的空间位置关系。

设计师利用软件制作出来的 BIM 模型不仅能使人获得建筑物外部 360° 的视觉效果, 也能身临其境一般走进建筑物从各个方位观看建筑物的内部构造。这些模型还能根据建筑物所处的位置, 装饰物位置和材质, 以及光源的类型与位置来模拟不同时间的光照和阴影, 给人以强烈的真实感。在手术室和 ICU 病房的前期设计中使设计师提前了解空

间、时间、光照之间的关系分析仪器设备的布置合理性, 使用便捷性, 空间是否满足医疗要求一目了然, 可以及时发现设计中的不足, 修改减少损失。

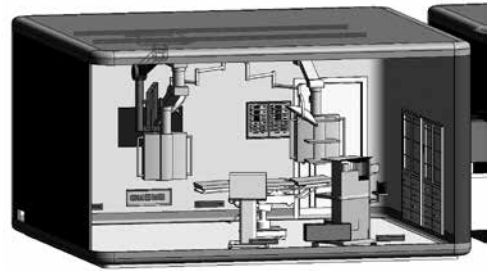


图3 手术室室内布置图

1.2 造价阶段

BIM 技术的特点是参数化建模, 可以利用这一特点将各类所需要的数据有序的储存在 BIM 模型中。BIM 集成了工程项目中的各种相关信息, 预算人员可以在 BIM 模型中快速的编辑添加数据, 提取他们所需的信息, BIM 参数化模型是基于对历史项目数据及市场信息的积累, 有助于施工企业高效利用工作人员根据相关标准、经验及规划资料建立的拟建项目信息模型, 快速生成业主方需要的各种进度报表、结算单、资金计划, 避免施工单位每月花大量时间核实这些数据。

BIM 技术将建筑信息统一到一个平台, 从数据

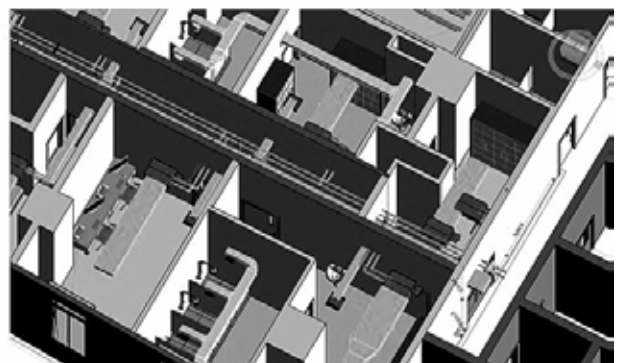
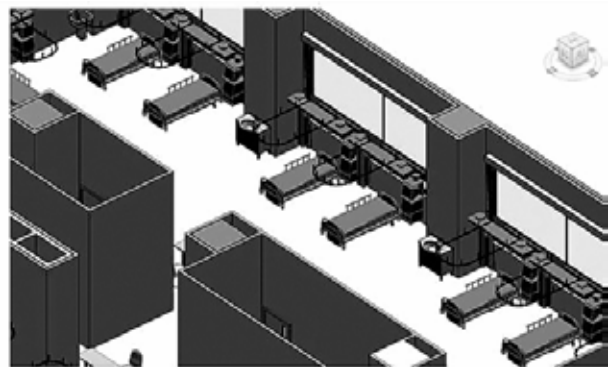
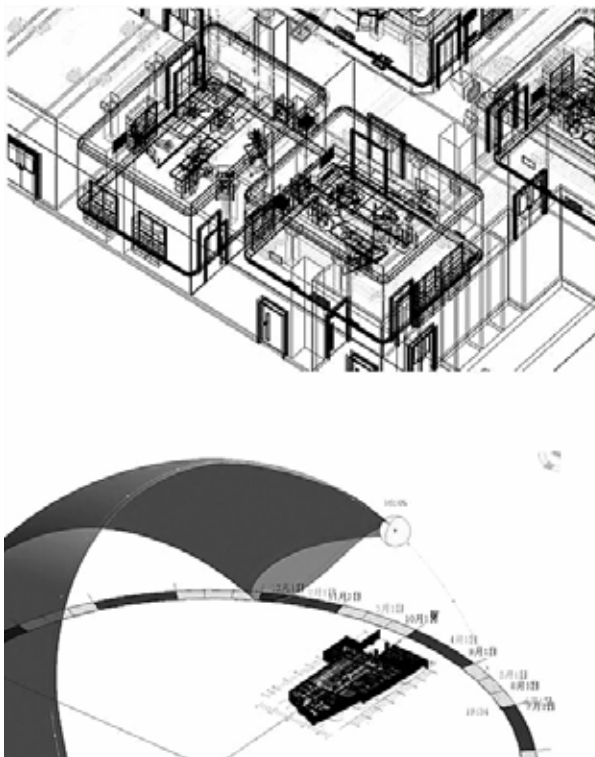


图4 手术室、ICU 各专业协同办公

基础上保证了统一性,并且和工程造价信息相结合,按照标准化流程进行掌控,可以大大提高造价管理的效益。

通过 BIM 平台实现各专业、阶段协同合作。建设工程造价管理实施过程中,各阶段、参与方之间存在许多需要协调解决的问题,利用 BIM 可视化、信息集合、可追溯性特点,能够有效促使全过程造价管理中各阶段之间的问题,打破了传统沟通过程中信息出现单向传递,无法查证的弊端,实现了造价管理的全面性。

将设计过程中的获取的工程量数据与国内造价软件“广联达”实现数据互导,运用模型于造价软件进行比对,提取准确的工程量清单,同时根据材料清单也可以进行精确的提料与下单工作,提高材料采购方面的效率。

序号	项目名称	综合单价组成(元)						单位	综合单价	数量	合价
		主材费	人工费	辅材费	机械费	管理费	利润				
1	矩形镀锌钢板风管制作安装 200mm×130mm, δ=0.5mm	21.34	18.40	8.12	10.03	2.95	M2	60.87	3651	22289.71	
2	矩形镀锌钢板风管制作安装 100mm×60mm, δ=0.15mm	21.34	18.40	8.12	10.03	2.95	M2	60.87	2987	18180.64	
3	矩形镀锌钢板风管制作安装 1000mm×1300mm, δ=1.0mm	15.54	17.02	4.25	7.30	2.16	M2	48.30	3628	162423.91	
4	风管调节阀 200*200	10.53	8.85		4.95	1.47	只	25.80	4	103.20	
5	风管调节阀 200*200	10.53	8.85		4.95	1.47	只	25.80	4	103.20	
6	风管调节阀 400*320	10.53	8.85		4.95	1.47	只	25.80	22	587.60	
7	风管调节阀 500*320	10.53	8.85		4.95	1.47	只	25.80	24	619.20	
8	风管调节阀 800*320	10.53	8.85		4.95	1.47	只	25.80	18	464.40	
9	风管调节阀 800*320	10.53	8.85		4.95	1.47	只	25.80	26	670.80	
10	风管调节阀 1200*400	11.70	11.17		5.90	1.64	只	30.01	3	90.03	
11	风管调节阀 1600*400	11.70	11.17		5.90	1.64	只	30.01	3	90.03	
12	电动调节阀 600*500	10.53	8.85		4.95	1.47	只	25.80	2	51.60	
13	电动调节阀 800*500	10.53	8.85		4.95	1.47	只	25.80	3	77.40	
14	电动调节阀 1000*600	10.53	8.85		4.95	1.47	只	25.80	12	309.60	
15	电动调节阀 1200*600	11.70	11.17		5.90	1.64	只	28.27	7	197.89	

图 5 自动生成的工程量清单

20	内墙-20	✓	1
20	内墙-20	✓	1
20	内墙-20	✓	1
20	内墙-20	✓	1
20	内墙-20	✓	1
20	内墙-20	✓	1
20	内墙-20	✓	1
20	内墙-20	✓	1
120	内墙120(内保温板)	✓	1
120	内墙120(内保温板)	✓	1
120	内墙120(内保温板)	✓	1
120	内墙120(内保温板)	✓	1
120	内墙120(内保温板)	✓	1
120	内墙120(内保温板)	✓	1
120	内墙120(内保温板)	✓	1
540	内墙540	✓	1

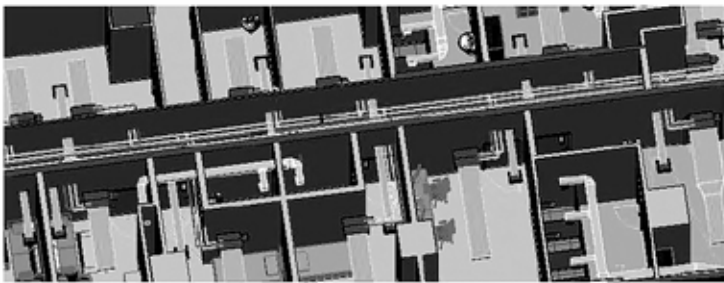


图 6 自动生成的材料明细表 (revit)



图 7 碰撞检查

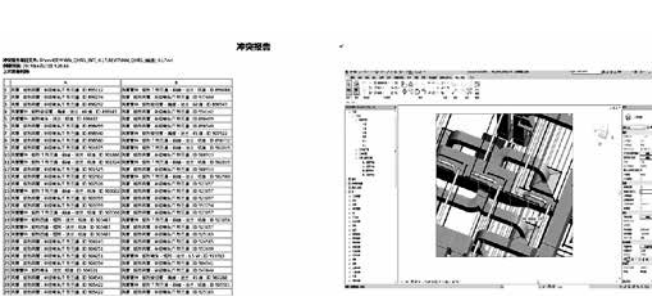


图 8 基于 BIM 碰撞检查报告

证各专业与部门之间的信息共享。

三维直观发现碰撞错误,对设计方案进行检测分析,对施工方案进行模拟分析,找到存在的问题加以优化,在施工前就采取预防措施得到最佳施工方案,保证施工进度和施工质量,节约成本。

通过管线碰撞发现问题,然后进行空间优化,使通风、给排水、医气、电气、消防的各个系统在洁净工程项目中的位置布置关系合理。

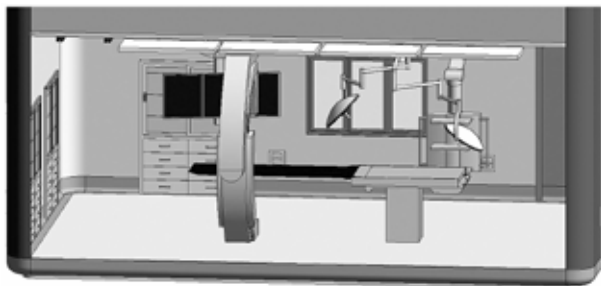


图9 DSA 手术室

手术室里要具备心血管造影机、高压注射器、移动式B超机等设备。要检查送风天花、无影灯、吊塔、电气管线碰撞情况,手术室之间的相对关系,模拟实际手术室的工作环境,检查室内设施的相对位置,满足操作要求,在不违反规范的前提下,优化各个设施之间的距离,合理运用空间。而其中杂交手术室的设备安装过程比较复杂,设备厂商对净化系统不熟悉,安装过程中会出现各种问题(设备运送、安装配合、装饰等等)没有一个整合平台,BIM技术就是一个很好的解决手段,通过5D模型在施工前期就进行各专业的整合,然后优化设计模拟位置关系、施工流程以及施工工艺,加快施工进度,避免施工过程中大量返工,同时根据可视化功能,直接展示各专业安装顺序、施工方案及完成后的最终效果给使用科室以及业主进行全面的展示。

实现大型构件的虚拟拼装,节约大量施工成本:现在医疗进化工程中的类似钢结构这种高、大、重结构越来越多,根据传统的施工方式,钢结构在加工厂焊接好需要进行预拼接,检查构件间的误差,而通过BIM技术可以在计算机上进行构件的模拟拼装,这样就节约了大量的人力和物力投入。

通过BIM技术可以创建一个无限契合现实的虚拟建筑空间模型,模拟太阳的升起降落,人员可以在虚拟建筑空间内感受阳光不同时间不同角度照射在建筑内的感受,业主、设计师都可以直观的感受这些变化。

1.4 运维阶段

BIM技术对医疗净化工程的运用,运维数据集

成将后勤设备全生命信息记录、能耗数据汇总、医疗设备监控、物流数据、消防报警、门禁管理、物业管理等集成基础平台,与楼宇自动化系统有效连接,进行数据分析通过数据收集平台,进行医疗净化数据智能分析。依据信息记录,为设备制定维修保养计划,并确定故障设备的及时反馈以及设备的定期保养。保证所有净化设备运行阶段设备运行维护管理的全面有序,为运维管理者提供合理计划,为设备的预制维修提供帮助。

通过BIM模型于运维管理系统集成一体化后,可向医护人员和使用者提供所需要的一系列数据,如设备安装位置、强弱电部署、接入点等等,使用人员只需在计算机平台上利用BIM可视化的特点直接进行读取,在后期管理中现场巡检记录是一项比较耗时费力的事情,基于BIM模型可以进行平台统一管理提供最优的巡检路线自动优化安排,并利用3D效果进行展示,利用连接的移动终端设备可对现场的设备进行扫描,自动录入数据。

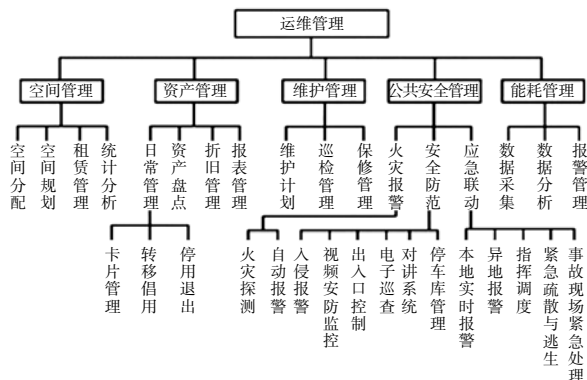


图10 运维管理导图

2 BIM技术在工程建设施工中的成果和发展趋势

2.1 BIM在工程建设施工中的成果

BIM这一理念和方法从提出到现在经历了17年的推广和发展,在各行各业中的运用和作用也是越来越多,国家和有关部门也是越来越重视BIM技术的运用,特别是在工程建设领域尤为突出,在医疗净化工程中也会不断的加强和推进,住建部建筑业“十二五”信息化发展纲要中明确提出要推进BIM协同工作等技术应用,普及可视化、参数化、三维模型设计,以提高设计水平,降低工程投资,实现从设计、采购、建造、投产到运行的全过程集合运用。

从整个建筑行业来看,最开始运用BIM技术的是一些设计院,组建团队大胆尝试,经过不断发展,现在好多地产公司、施工单位乃至各行各业都在积极探索,不断发觉BIM技术在行业内的作用,以此来提高设计水平和施工能力,不断壮大这一技术的

探索道路。所以我认为在医疗净化工程建设中我们也应该大胆尝试,不断学习运用 BIM 技术来不断提高净化工程的技术水平,争取可以在净化工程建设中取得非凡的成果,使设计能力、施工水平、人力资源、物资投入等达到合理的状态。

2.2 BIM 在工程建设施工中的发展趋势

BIM 以后的发展趋势是 IPD 模式,简单来说就是在项目开始之前,业主就召集设计方、施工方、材料供应商、监理方等一起做出一个 BIM 模型,这个模型就是竣工模型,即所见即所得,然后各方就按照这个模型来做自己的工作就行了。

在这种模式下,施工过程一旦开始是不需要再返回设计院改图,材料供应商也不会随便更改材料进行方案变更。这种模式虽然前期投入时间精力多,但是一旦开工就基本不会再浪费人、财、物、时在方案变更中,最终的结果是可以节约相当长的工期和不小的成本。这种模式在美国、澳大利亚等发达国家已经普及,但在国内还有很长的一段路要走。

BIM 技术人才短缺,不是说会用软件、懂 BIM 概念就是 BIM 人才,软件永远只是一个辅助工具,而最核心的永远是人的专业知识和管理水平,随着从业人员的素质提高,信息化必然是一个大趋势。BIM 不仅是虚拟模型、虚拟可视化更是一种建筑信息化概念,它可以涵盖生活方方面面,比如建筑机器人、互联网、3D 建筑打印技术等等,是一种思想,一种看待分析事物的思想。

3 结论

BIM 技术的运用对建筑净化工程全生命周期的

各个环节和各个专业之间的协同合作起到了巨大的协调推动作用。在建筑的全生命周期中,BIM 模型越精细越深入,其产生的作用价值也就越大,对业主和施工单位的帮助也就越大。

医疗净化工程的特点是需要集成很多专业知识,除了建筑各专业知识以外,还要包含医疗净化、洁净度、压力、气流速度与分布、医疗服务、医学人文等各项知识,满足标准和规范仅仅是通过评审的最低配置要求,若要满足经营需求,考虑运营效率、运营成本、人性化需求,就必须采用高于标注和规范的非标准化设计条件。借助 BIM 或许是目前最为有效的方式之一。

建筑工程市场也因为 BIM 的运用,使得竞争更加的激烈,很多大型企业都已经将 BIM 技术融入工程采购招标系统中,不具备 BIM 能力的厂商无法参与投标,可见 BIM 技术的发展运用迫在眉睫,在医疗净化工程建设中也会慢慢普及。BIM 是一种管理工具,无法取代技术人员的专业知识,需要专业技术人员在了解 BIM 后,结合自身需求整理出适合自己的方式和方法,让项目在实施过程中实现利益最大化。

参考文献

- [1] 张华.全国医院 BIM 技术应用与交流大会.2018(12).
- [2] 鲍兆帅.济南.山东中大净化工程有限公司,BIBIM 技术在净化工程施工的应用.2016(08)
- [3] 肖晶.厦门.BIM 在医院建设项目中的应用.2018(11).
- [4] 《医院手术室进化工程 - 医疗洁净室解决方案》.

手术部气体灭火系统设计探讨

王 杰

(西安四腾环境科技有限公司研发中心, 西安 710075)

[摘 要] 医疗建筑中的灭火系统设置相当重要,《建筑设计防火规范》8.5.1-4 条规定,医院中任一楼层建筑面积大于 1500m² 或总建筑面积大于 3000m² 病房楼、门诊楼、手术部应设置自动灭火系统,宜采用自动喷水灭火系统。

《高层民用建筑设计防火规范》对灭火设备的设置(7.6 节)规定,二类高层建筑的公共活动用房(包括医院)、办公室、库房等应设置自动喷水灭火系统。但是喷水灭火必然会对手术室的设备及洁净环境造成影响。

手术部作为医疗建筑中的特殊科室,对其灭火系统的设置有必要进行深入的分析。

[关键词] 手术部; 洁净手术室; 气体灭火系统; 火灾预防

随着社会的进步,生活水平的提高,对医院洁净区域的空间,卫生条件要求也越来越高。因此同层排水系统也更多的应用到医院排水系统中。同层排水具有使用、安装、维修、装修和改造方面的优越性,有效的提高了排水系统的卫生安全条件,解决了卫生间排水对环境的影响,很好的满足了现代化建筑对环境、卫生、噪音等方面的高要求。

1 手术部特点

(1) 手术室装修要求高,设备昂贵,一旦造成火灾损失较大。

(2) 手术台的部位上方不希望有水的存在。一旦有水进入患者的手术部位,容易引起感染。

(3) 手术部需要有洁净的要求,在建筑的布局上因感染管理的流程,对疏散造成一定影响;同时,手术部的使用人员相对固定,对建筑功能的环境较熟悉,但患者的疏散速度相对较慢。

(4) 火灾的过火面积可以控制,但火势的蔓延几乎是瞬间的。

(5) 《医院洁净手术部建筑技术规范》9.0.4 条也规定,当需要设置自动喷水灭火系统时,可不在手术室内布置洒水喷头。因此,手术室应属于不宜用水扑救的部位。

2 手术部火灾隐患

- 手术室设备多为电气设备,如:手术床、麻醉机、高频电刀、监护仪等,设备使用年限长,宜老化,加之通电时间过长,宜造成设备或电源插头局部高温。电路短路和漏电是手术室火灾隐患之一;

- 手术室内有大量可燃物及助燃物,毛发、服装、消毒敷料、纸张、胶布、塑料、橡胶、含有酒精的消毒液。从助燃剂的角度有医用氧气,麻醉诱导用的笑气,消毒用的过氧化氢。也是手术室火灾隐患之一;减少弯头、存水管等管件,排水更顺畅,降低堵塞几率;

- 手术过程中使用的电刀头、腔镜光源、激光等操作不当也是手术室火灾隐患之一。

3 手术部灭火方式选择

- 消火栓系统直接用水对手术室灭火,会对洁净要求造成影响以及导致手术室贵重设备的损坏。

- 手提式灭火器需要人为操作,仅适用于初期火势较小,扑救范围有限,灭火器内的粉尘或泡沫会对患者造成污染,还会破坏手术室洁净。

- 自喷系统不设置于手术室内部。

- 气体灭火系统安全可靠,仅设置于手术室内部,自动控制,火灾初期快速反应,疏散手术室内人员,设备联动,关闭空调、风机、防火阀、门窗等,释放灭火气体(二氧化碳、混合气体、七氟丙烷),灭火气体对患者及医护人员没有危害或危害很少,局部释放灭火气体,不扩散。灭火完成后,关闭气体灭火系统,打开净化空调系统,恢复手术室内的洁净要求。

4 灭火气体的选择

气体灭火系统所适用的场所,一般都是经常有人活动的场所,因此选用低毒性的灭火剂是非常重要的。灭火效能方面,应选择适宜效能的灭火剂,灭火效能的高低是选择灭火剂的重要因素之一。混合气体(IG541)灭火系统为惰性气体,系统压力高,输送距离远,由于灭火机理为物理方式,所以灭火效率高,而且其环保性能和对设备的安全性较好。因为七氟丙烷和二氧化碳都有低毒性,混合气体无毒,所以手术室采用混合气体(IG541)作为灭火气体。

5 气体灭火系统的设计

根据本设计方案的特点选择具有自动,手动及机械应急启动三种控制方式。各防护区均设置两种火灾探测器,发生火灾时,气体灭火控制器接收到第一个火灾报警信号后,启动防护区内的火灾声报警器(警铃),警示处于防护区域内的人员撤离;接

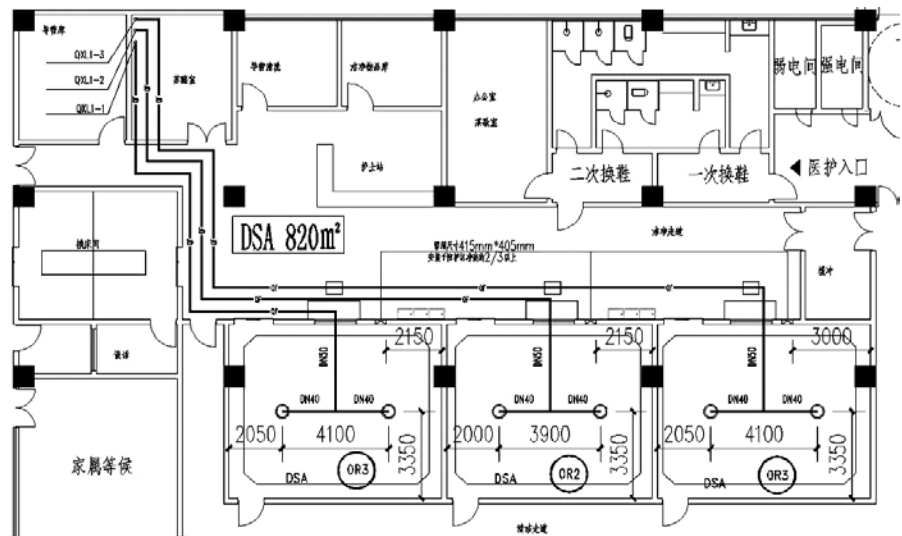
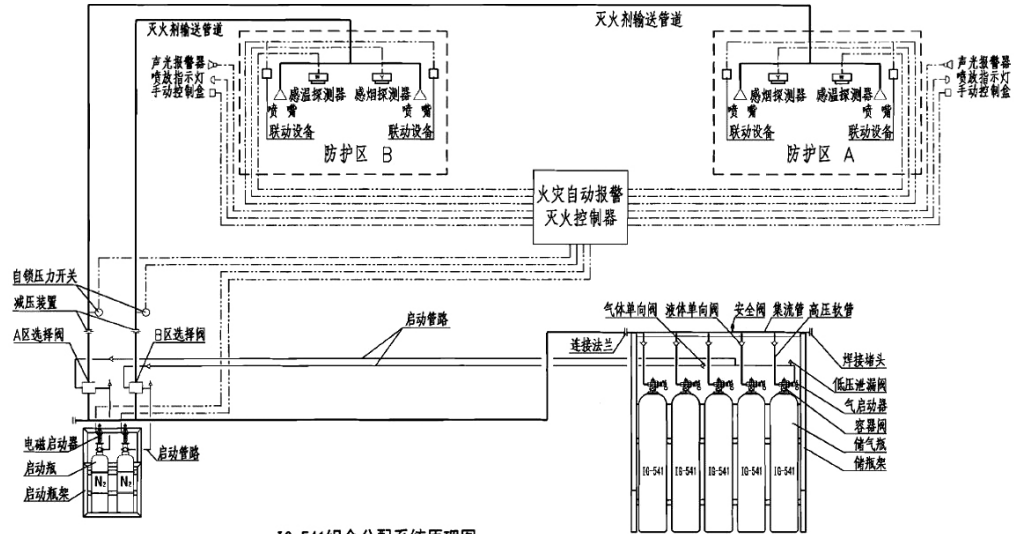


图 1



IG-541组合分配系统原理图

图 2

收到第二个火灾 报警信号后（类型不同），联动关闭排风机、防火阀、空气调节系统、启动防护区域开口封闭装置等，并根据人员安全撤离 防护区的需要，延时不大于 30s 后启动电磁阀，驱动瓶内的气体开启选择阀和灭火剂储罐瓶头阀，灭火剂喷出实施灭火，同时启动安装在防护区门外的指示灭火剂喷放的火灾声光报警器、喷放指示灯；压力开关动作信号反馈给气体灭火控制器。当气体灭火控制器处于手动状态时，气体灭火控制器只发出报警信号，不输出动作信号，由值班人员确认火警后，按下气体灭火控制器控制面板上的应急启动按钮或保护区门口处的紧急启停按钮，即系统进入自动灭火程序模式，启动系统喷放 IG541 灭火剂实施灭火。

本设计方案平面布置及系统原理见图 1，2。

6 结束语

手术部传统的水灭火方式已经很难满足现在医院的消防灭火要求。但是随着 IG541 等气体灭火系统的设计成熟，能够进一步的保护手术部的设备安全以及洁净要求。因此，必须对手术部的气体灭火方式加以重视。

参考文献

[1] 《气体灭火系统设计规范》GB50370-2005.
[2] 《气体灭火系统施工及验收规范》GB50263-2007.
[3] 《火灾自动报警系统设计规范》GB50116-2013.
[4] 综合医院建筑设计规范，2007 报批。

典型洁净医学实验室空调系统设计要点分析

牛维乐¹, 侯守源²

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 河北省沧州市青县自来水公司, 沧州 062650)

[摘要] 本文介绍了 4 类典型洁净医学实验室及其技术指标, 统计了典型洁净医学实验室的工艺设备, 总结了洁净医学实验室空调系统设计的要点。

[关键词] 洁净医学实验室; 空调系统设计

1 典型洁净医学实验室

洁净医学实验室承担着各类医疗机构的样本检测、医疗科学和医疗技术研究、医疗人才培养等重要工作, 是各类医疗机构建设不可缺少的组成部分, 本文所涉及的洁净医学实验室主要包括以下类型的实验室: 无菌实验室、PCR 实验室(基因扩增实验室)、生物治疗中心、PET 中心(正电子发射计算机断层显像中心)、生物安全实验室。无菌实验室主要是指用于微生物学、生物医学、生物化学、动物实验、基因重组以及生物制品等研究使用的实验室, 这类实验室通常为正压实验室, 主要的参考标准为《洁净厂房设计规范》GB 50073-2013^[1]、《洁净室施工及验收规范》GB 50591-2010^[2]。PCR 实验室(基因扩增实验室)是指通过扩增检测特定的 DNA 或 RNA, 进行疾病诊断、治疗监测和预后判定等的实验室, 这类实验室通常为负压或者相对负压实验室, 主要的参考标准为《临床基因扩增检验实验室管理暂行办法》(卫医发〔2010〕194 号)^[3]。PET 中心(正电子发射计算机断层显像中心)是集核物理、放射化学、分子生物学、医学影像学 and 计算机等高新技术之大成, 从分子水平上反映人体的生理、病理变化、代谢改变的显像实验室, PET 中心设计的主要的参考标准为《药品生产质量管理规范(2010 年修订)》^[4]、《开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范》EJ380-1989^[5]。生物安全实验室是从事对实验人员和环境有一定危害的生物因子操作的实验室, 生物安全实验室根据所从事的生物因子的危害性分为 4 个级别, 这类实验室通常为负压实验室, 主要的参考标准为《实验室生物安全通用要求》GB 19489-2008^[6]、《生物安全实验室建筑技术规范》GB 50346-2011^[7]、《医学实验室安全认可准则》CNAS-CL36(ISO15190:2003)^[8], 生物治疗中心和 HIV 实验室(性病、艾滋病实验室)均属于生物安全实验室, 生物治疗中心是指采用生物免疫疗法治疗各类疾病的实验室, HIV 实验室(性病、艾滋病实验室)是指从事性病、艾滋病研究的实验室。

2 典型洁净医学实验室的空调技术指标

洁净医学实验室由于涉及的实验领域比较宽泛, 应该根据具体的实验工艺要求确定其各项技术指标。无菌实验室的洁净等级通常为万级, 主要的操作间可以设计成万级背景下的局部百级; PCR 实验室的洁净等级通常为十万级; PET 中心的洁净度通常为万级; 生物安全实验室的为十万级或者万级, 具体的洁净度等级依据实验室的具体操作要求确定。没有局部排风的正压十万级实验室换气次数宜为 10~15 次/h; 有局部排风的正压十万级实验室换气次数应考虑局部排风量的大小确定。没有局部排风的正压万级实验室换气次数宜为 15~25 次/h; 有局部排风的正压十万级实验室换气次数应考虑局部排风量的大小确定。局部百级的截面风速宜为 0.2~0.4m/s。实验室的夏季室内温度宜为 24~28℃, 冬季室内温度宜为 20~24℃。实验室的夏季室内相对湿度宜为 50%~65%, 冬季室内相对湿度宜为 30%~50%。实验室的主要操作间的平均照度宜大于等于 300lx, 辅助区的照度宜大于等于 200lx。没有局部排风设备的实验室的噪声宜小于等于 60dB(A), 有局部排风设备的实验室噪声宜小于等于 65dB(A)。正压洁净室对外的静压差值应大于等于 10Pa, 不同级别之间的相邻相通房间之间静压差值大于等于 5Pa, 有工艺要求维持相对负压的房间之间静压差值大于等于 5Pa。负压洁净室的压力梯度按照《实验室生物安全通用要求》GB 19489-2008 和《生物安全实验室建筑技术规范》GB 50346-2011 确定。正压实验室的新风量要满足大于等于 40m³/(人·h)的最低要求, 同时兼顾局部排风和维持正压的要求。PCR 实验室和 PET 中心负压实验室采用全新风直流式空调系统, 全送全排。负压实验室和生物安全实验室依据实验室工艺要求、《实验室生物安全通用要求》GB 19489-2008 和《生物安全实验室建筑技术规范》GB 50346-2011 确定是否采用全新风空调系统。

3 典型洁净医学实验室的工艺设备

洁净医学实验室的空调系统设计应该从室内冷热负荷的计算开始, 了解各类洁净医学实验室都要

布置何种工艺设备,了解实验各个工艺环节和工艺技术要求。

无菌实验室常用的实验仪器有:恒温培养箱、二氧化碳培养箱、普通冰箱(冰柜)、低温冰箱(冰柜)、超低温冰箱(冰柜)、摇床、离心机、超净工作台、层流罩等。PCR实验室(基因扩增实验室)常用的实验仪器有:普通冰箱(冰柜)、低温冰箱(冰柜)、超低温冰箱(冰柜)、离心机、电泳槽、PCR仪、超净工作台、通风橱、生物安全柜等。PET中心(正电子发射计算机断层显像中心)常用的实验仪器有:热室分装箱。生物安全实验室常用的实验仪器有:恒温培养箱、二氧化碳培养箱、普通冰箱(冰柜)、低温冰箱(冰柜)、超低温冰箱(冰柜)、摇床、离心机、洗板机、酶标仪、电泳槽、程序降温系统、超净工作台、生物安全柜、层流罩、可移动式消毒锅、单扉消毒锅、双扉消毒锅等。

生物安全实验室设计要充分了解生物因子的危险等级,根据不同的危险等级选择不同的防护装备、设计相应的防护设施、选择适宜的建筑、结构、空调、上下水、配电及自动控制设施。洁净医学实验室要设计好三类流线:人员流线、洁物流线、污物流线。尽可能做到人员流线和货物流线分开,尤其是洁物入口、污物出口和人员进出口需要分开设置。在建筑面积有限的场所物流出入口可采用传递窗代替。三级和四级生物安全实验室的人流路线应符合空气洁净技术关于污染控制和物理隔离的原则。无菌室、PCR实验室和PET中心所采用的传递窗可以设普通的传递窗,传递窗内设置紫外消毒灯。生物安全实验室所采用的传递窗需要根据不同的实验室等级和传递窗的安装部位确定,实验区对外的传递窗密封性要好,并且可以自带洁净、消毒功能,实验区内部的传递窗可以采用普通传递窗。

4 典型洁净医学实验室空调系统设计

洁净医学实验室的室内环境均为人工受控环境,通过为洁净医学实验室设置净化空调系统来维持洁净医学实验室的内环境,保持一定的空气温度和相对湿度、换气次数、压力状况、空气的洁净度,为实验人员提供舒适的工作环境。医学洁净实验室的空调净化系统的划分应依据操作对象的危害程度、平面布置等情况经过经济技术比较后确定,并应采取有效措施避免污染和交叉污染。空调净化系统的划分应有利于实验室的消毒、灭菌、自动控制系统的设置和节能运行;医学洁净实验室的空调净化系统应能承担实验室内各类实验设备、实验人员的热湿负荷;医学洁净实验室的空调机房不应距离实验室过远,净化空调系统的风机应选用风压变化较大

时风量变化较小的离心风机;洁净区内不应设置分体空调、风机盘管、多联机分散的室内空调。无菌实验室可以采用全空气一次回风、二次回风空调系统,新风量大的空调器系统可以采用全空气一次回风空调系统,新风量小的空调器系统可以采用全空气二次回风空调系统,空调系统的运行模式可以采用湿度控制优先的策略。不管是一次回风空调系统还是二次回风空调系统均要预留足够的夏季再热量,夏季再热优先采用热水、蒸汽,在夏季没有热水、蒸汽的场合可以用电再热。

PCR实验室和PET中心的空调均要采用全新风直流式空调系统,全送全排。空调送风系统和排风系统之间可设置非接触式的热回收系统,如乙二醇热管热回收系统,乙二醇溶液的浓度依据冬季的室外最低级气温确定。空调系统均要预留足够的夏季再热量,夏季再热优先采用热水、蒸汽,在夏季没有热水、蒸汽的场合可以用电再热。

洁净的生物安全实验室空调均要采用全新风直流式空调系统,全送全排。空调送风系统和排风系统之间可设置非接触式的热回收系统,如乙二醇热管热回收系统,乙二醇溶液的浓度依据冬季的室外最低级气温确定。空调系统均要预留足够的夏季再热量,夏季再热优先采用热水、蒸汽,在夏季没有热水、蒸汽的场合可以用电再热。

洁净医学实验室空调系统的设计应根据洁净医学实验室的使用功能、实验种类、设施的平面系统划分进行划分和设置,对于有生物安全要求的洁净医学实验室,需符合《生物安全实验室建筑技术规范》GB 50346的规定。空调系统的划分和空调方式选择应经济合理,并有利于洁净医学实验室的消毒、自动控制、系统设置、节能运行,同时避免互相影响。洁净医学实验室空调系统的负荷计算应充分考虑建筑围护结构、人员、实验设备的冷、热、湿负荷。洁净医学实验室的送风系统应设置粗、中、高效三级空气过滤器。为防止经过中效空气过滤器的送风再被污染,中效空气过滤器宜设在空调机组的正压段,对于全新风系统,可在表面冷却器前设置一道保护用中效过滤器。送排风系统中的粗、中效空气过滤器宜采用一次抛弃型,粗、中效空气过滤器对送风起预过滤的作用,其过滤效果直接关系到高效空气过滤器的使用寿命,避免频繁的更换高效过滤器,因为高效空气过滤器的更换费用要比初、中效空气过滤器高得多。空调机组的安装位置应考虑日常检查、维修及过滤器更换等因素。对于寒冷地区和严寒地区,应考虑水冷式换热设备的冬季防冻问题。对于水冷式换热设备的防冻问题着重考虑新风

的防冻问题,可以采用设新风电动阀并与新风机连锁、设防冻开关,同时设置辅助电加热器等方式。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。

洁净医学实验室的气流组织宜采用上送下回(排)方式。采用上送下排的气流组织形式,对送风口和排风口的位置要精心布置,使室内气流合理,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。洁净医学实验室的回(排)风口下边沿离地面不宜低于 0.1m,上边不宜高于 0.5m;回(排)风口风速不宜大于 2m/s。室内排风口高度必须低于工作面。这是一般洁净室的通用要求,回(排)风口下边太低容易将地面的灰尘卷起。送风系统新风口的设置应符合下列要求:

(1) 新风口应采取有效的防雨措施。

(2) 新风口处应安装防鼠、防昆虫、阻挡绒毛等的保护网,且易于拆装。

(3) 新风口应高于室外地面 2.5m 以上,同时应尽可能远离排风口和其他污染源。

洁净医学实验室宜选用干蒸汽加湿器、电极式加湿器、电热式加湿器,加湿设备与其后的过滤段之间应有足够的距离。为防止过滤器受潮而有细菌繁殖,并保证加湿效果,加湿设备应和过滤段保持足够距离。减少产生、积尘的机会。洁净医学实验室送风系统的消声器或消声部件的材料应能不产生、不易附着灰尘,其填充材料不应使用玻璃纤维及其制品从湿度控制。洁净医学实验室的房间或区域需单独消毒时,其送、回(排)风支管应安装气密阀门,安装气密阀门的作用是防止在消毒时,由于该房间或区域与其它房间共用空调净化系统而污染其它房间。

洁净医学实验室的空调系统的能耗比普通空调

系统高得多,运行费用相当可观,往往很多单位是建得起用不起。因此,在空调设计时,必须把“节能”作为一个重要条件来考虑,在满足使用功能的条件下,尽量降低运行费用。

5 结语

洁净医学实验室的空调系统设计的目标是为医疗人员提供一个满足医疗检测的规程、满足国家相关规范和标准、洁净舒适的工作环境。洁净医学实验室的空调系统设计要在了解空调技术指标的基础上,依据洁净医学实验室的工艺要求,结合洁净医学实验室的实际情况确定设计方案,进行详细的冷、热、湿负荷计算,选择适宜的空调系统形式和气流组织形式,合理设计空调风系统和水系统,尽量采取节能环保设计。

参考文献

- [1] 中国电子工程设计院 .GB 50073-2013 洁净厂房设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社 .2013.
- [2] 中国建筑科学研究院 .GB 50591-2010 洁净室施工及验收规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社 .2010.
- [3] 中华人民共和国卫生部 . 医疗机构临床基因扩增检验实验室管理办法 [Z].2010-194.
- [4] 中华人民共和国卫生部 . 药品生产质量管理规范 (2010 年修订) [Z].2011-01-17.
- [5] 中国核工业总公司第二设计院 .EJ380-1989 开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范 [S].1989.
- [6] 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 .GB 19489-2008 实验室生物安全通用要求 [S]. 北京 .2008.
- [7] 中国建筑科学研究院 .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.
- [8] 中国合格评定国家认可委员会 .CNAS-CL36(ISO 15190:2003) 医学实验室安全认可准则 [Z].2007.

高等级生物安全实验室压差控制技术与策略研究

高 鹏, 曹国庆

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

[摘 要] 本文首先介绍了高等级生物安全实验室压力方面主要技术指标及实验室压力扰动因素, 其次以我国已建的高等级生物安全实验室的压差控制方式为重点, 并结合现场实际的测试结果, 对每种方式的优点及不足的地方进行说明。其中实验室 A 的定风量控制方式的巧妙处理突破了其不能在较高严密性要求的实验室使用的束缚; 实验室 B 的双调节阀压差控制方式为实验室围护结构严密性很高且送排风量均较大的实验室建设提供了参考; 实验室 C 的变风量 (VAV) 压差控制方式为常规控制方式在高等级生物安全实验室压差控制方面的应用提供了先例。

[关键词] 高等级生物安全实验室; 定风量控制; 双调节阀压差控制; 变风量压差控制

0 引言

根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四级。文中高等级生物安全实验室指的是 ABSL-3 中的 b2 类实验室及 BSL-4、ABSL-4 实验室, 在其内所操作的均是有极强传染性的病原微生物, 而通过压差控制可以有效防止病原微生物对操作人员及环境造成的危害。但是因实验室产生的生物污染物造成的生物安全事故也有发生的先例, 因此通过压差控制防止病原微生物对操作人员及环境造成的危害是确保实验室生物安全的关键。

1 高等级生物安全实验室主要技术指标

1.1 绝对压力及相对压力的要求

标准 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》中规定, ABSL-3 中的 b2 类实验室相对于大气的最小负压为 -80Pa, BSL-4 实验室相对于大气的最小负压为 -60Pa、ABSL-4 实验室相对于大气的最小负压为 -100Pa; ABSL-3 中的 b2 类实验室及 BSL-4、ABSL-4 实验室与室外方向上相邻相通房间的最小负压差均为 -25Pa。

1.2 工况验证时绝对压力及相对压力的要求

标准 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》中 10.1.12 规定, 生物安全实验室应进行工况验证检测, 有多个运行工况时, 应分别对每个工况进行工程检测, 并应验证工况转换时系统的安全性, 除此之外还包括系统启停、备用机组切换、备用电源切换以及电气、自控和故障报警的可靠性验证。在做工况验证时核心工作间绝对压力不允许出现逆转; 核心工作间与相邻缓冲间之间的相对压力建议不要出现逆转, 但受设计、设备、施工及调试等条件限制时, 允许出现短时间 ($\leq 1\text{min}$) 较低压力的逆转。

2 高等级生物安全实验室压力扰动因素分析

2.1 围护结构严密性的影响

由于高等级生物安全实验室围护结构严密性要

求较高, 文献 [7] 指出: 在等量空气扰量的作用下, 气密性实验室的压差变化可达到普通实验室的 3.6 倍, 同时围护结构气密性越好, 压差变化值增大速率加大, 即气密性越好, 压差波动越大。可说明高等级生物安全实验室围护结构严密性的较高要求使得其压差控制的难度远大于普通实验室。

2.2 内设关键防护设备的影响

高等级生物安全实验室内的关键防护设备能对实验室压力造成扰动, 主要是因为其有局部排风设备的启停或瞬间往密闭环境内增加一定体积的流体。能产生影响的主要有以下关键防护设备: II B2 型生物安全柜、动物隔离设备、独立通风笼具 (IVC)、正压防护服、化学淋浴消毒装置等。

2.3 工况转换

高等级生物安全实验室不仅要求在正常工况下运行, 在突发状况下, 依然能维持一定时间的正常运行或者维持一定的负压隔离环境。一般情况下系统会设有备用送风机、备用排风机等。这就要求在备用送风机切换、备用排风机切换时, 核心实验室内维持绝对负压, 实验室与室外方向上相邻相通房间尽可能不要出现相对压力逆转。

2.4 其他因素

其他一些因素比如开关门、温度波动、大气压力波动、管网工况及风阀的选择也会对系统压力造成影响。在压力控制方式和系统配置形式的选取时也是必须考虑的因素。

3 高等级生物安全实验室压差控制技术与策略对比分析

3.1 目前国内高等级生物安全实验室压差控制技术与策略对比见表 1。

3.2 压差控制技术与策略分析

3.2.1 实验室 A 控制形式

定风量 (CAV) 压差控制是一种间接式的压差

表 1 高等级生物安全实验室压差控制技术与策略对比

项目		名称		
		实验室 A 武汉	实验室 B 哈尔滨	实验室 C 昆明
压差控制方式		定风量控制	双调节阀压差控制	变风量压差控制（常规 PID 控制）
围护结构形式		不锈钢围护结构	钢筋混凝土浇筑结构	钢筋混凝土浇筑结构
关键防护设备配置		II A2 型生物安全柜、动物隔离笼具、独立通风笼具（IVC）、正压防护服、化学淋浴系统	II B2 型生物安全柜、正压防护服、化学淋浴系统	II B2 型生物安全柜、动物隔离笼具、独立通风笼具（IVC）、正压防护服、化学淋浴系统
实验室平面布局		化学淋浴与核心实验室直接相邻	化学淋浴与核心实验室直接相邻	核心实验室前有缓冲并未与化学淋浴直接相邻
系统配置形式	排风系统	各系统排风机组均设置三台，其中编号为 a、b 的排风机组是同等规格的大风机，同时运行，互为备用；编号为 c 的排风机是与 a、b 排风机组并联运行的小风机，无论系统运行与否，均保持运行，可始终保持实验室防护区为负压状态。	各净化空调系统均设置排风机组 1 台，内设两台排风机，互为备用，交替运行。	各系统排风均设置 2 套排风机组，每套机组内设两台直驱式无蜗壳风机，4 台排风机同时使用，且互为备用。
	送风系统	各系统送风机组均设置 2 台，同时运行，互为备用。	各净化空调系统均设置 1 台送风机组，内设两台送风机，互为备用，交替运行。	各系统送风均设置 2 套送风机组，互为备用，交替运行。
控制策略		通过永动小排风机维持房间相对高负压值，依靠相对高负压值来弱化压力扰动因素产生的影响。	双调节阀粗精调的控制策略，通过大流量调节阀调整风量，通过小流量调节阀调整压力。	主动式压力控制策略，通过电动风量调节阀实时对排风量进行调节，以达到并维持所设定压差。

控制形式，在运行过程中并不以室内压差作为目标进行调节，而是通过控制实验室的送排风量保持一定风量差（等同于所设定压差下实验室的漏风量）来实现实验室的压差控制，基本上采用机械式定风量阀或自动式定风量阀来进行调节。

但实验室 A 的定风量控制方式还区别于普通的定风量控制方式。因为其不锈钢围护结构，围护结构严密性很高，漏风量很小，只通过机械式定风量阀或自动式定风量阀来进行调节，很难精确的控制到很小的风量差，来实现实验室压差控制。实验室 A 并不追踪房间压力、风量等进行调节，而是通过初期调试确定相应房间的送排风量、送排风机组频率及增加永动小排风机等方式给予房间相对较高的负压值。在实际运行中，完全依靠相对较高的负压值来弱化压力扰动因素产生的影响。同时实验室 A 会监视核心工作间的压力，只有当系统运行一段时间后，核心工作间的压力偏离设定值过大时，才会通过改变送排风机组频率来对核心工作间的压力进行调整。

该方案是借鉴法国的设计理念，系统非常简洁。优点在于其并不依赖于房间压力，当相关压力扰动因素产生作用时，风量的控制并不会受较大影响，压差不会出现较大幅度的波动。但是该控制方式也有些许不足的地方，比如这种控制方式适应性稍微差些，在配备关键防护设备时有一定的局限性（如避免配备 II B2 型生物安全柜），以免因增加局部排风设备破坏实验室风量平衡，使压差出现较大偏差。

从实际测试结果来讲，该方案能达到相对稳定的控制效果，并且在应对较强的压力扰动因素时也能表现出比较好的稳定性。以压力扰动因素中影响最强的备用排风机切换为例，对某核心间进行监测，

切换过程中永动小排风机始终保持运行状态，完全依靠相对较高的负压值来弱化压力扰动因素产生的影响，房间绝对压力未出现逆转现象，核心工作间与相邻缓冲间之间的相对压出现短时间（≤ 1min）较低压力的逆转，具体见图 1。

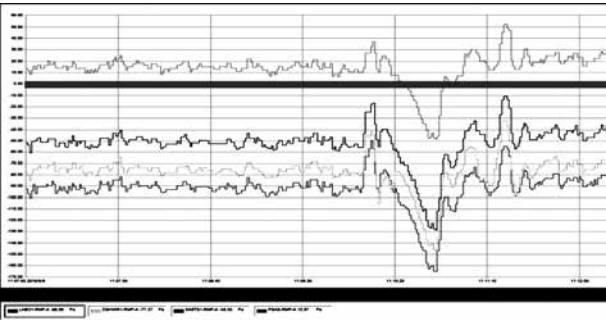
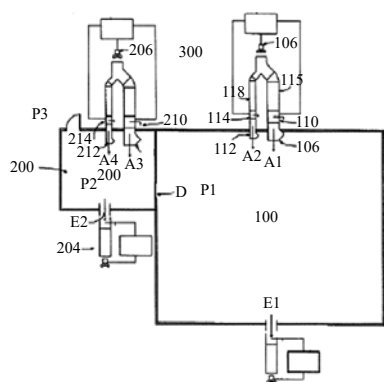


图 1 系统备用排风系统切换可靠性检验结果
（其中浅蓝色直线表示绝对压力零点，紫色线表示正压房间绝对压力曲线，其余曲线表示核心间及相邻缓冲等受控房间绝对压力曲线。）

3.2.2 实验室 B 系统形式

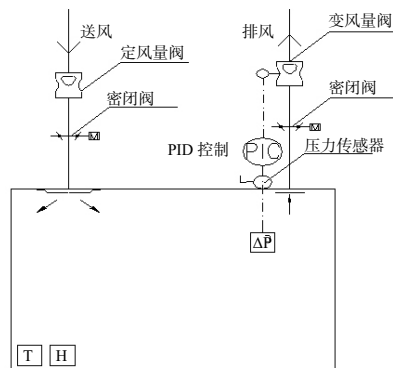
双调节阀压差控制方式是指在送风或者排风管道上并联安装两只风量调节阀（见图 2^[7]、3），并且通过两只风量调节阀相互配合调节来实现对实验室的压差控制。两只风量调节阀一般分为大流量调节阀和小流量调节阀，通常大流量调节阀为定风量（CAV）调节阀，主要用于调整风量；小流量调节阀为变风量（VAV）调节阀，主要用于调整压差。

实验室 B 为钢筋混凝土浇筑结构，采用的是双调节阀压差控制方式，由于高等级生物安全实验室围护结构严密性很高，且送排风量均较大，通过单一的大口径风量调节阀调节，控制精度及灵敏度可能不太理想。实验室 B 系统为变送定排，在核心工



作间送风管道安装双调节阀,通过大流量调节阀调节送风量来满足实验室换气次数的要求并且实现压力的粗调,小流量调节阀对送风进行微调来实现对实验室压差的调节,能高效快速的实现实验室压差控制,提高实验室压差控制精度。这种设计理念不仅考虑到高等级生物安全实验室气密性较高,漏风量很小的前提,通过小流量调节来满足压差控制,还兼顾了送排风量均较大的特点,通过大流量调节来满足实验室换气次数的常规要求。但是小流量调节阀的选取也受到一定限制,实验室的压差应处于小流量调节阀调节能力范围内且尽可能保持小流量调节阀在线性较好的区域工作,而且初期的投入相对其他形式要高。

从实际测试结果来讲,该方案能达到相当稳定、灵敏的控制效果,并且在应对较强的压力扰动因素时也能表现出较高的稳定性。以压力扰动因素中影响最强的备用排风机切换为例,对某核心间进行监测,切换过程中,核心工作区各房间绝对压力均未出现逆转现象,核心工作间与相邻缓冲间之间的相对压出现短时间($\leq 1\text{min}$)较低压力的逆转,具体见图4。



但常规 PID 控制存在的问题, 较快的响应能力与系统的稳定性必须要进行取舍, 两者无法同时兼顾。对于高等级生物安全实验室, 往往系统的稳定性显得更为重要一些, 这在一定程度上就降低了系统的快速响应能力, 同时会出现一定的超调和小幅振荡。同时在实际检测中也发现另外一个很关键问题, 就是压力传感器的零点漂移问题。实测过程中发现会由部分压力传感器发生零点漂移, 对房间压力的监控产生直接的影响。所以各种探头、传感器的配置、校准也是设计、调试及运维方不容忽视的问题。

从实际测试结果来讲, 该方案能达到较为理想的控制效果, 并且在应对较强的压力扰动因素时也能表现出较高的稳定性。以压力扰动因素中影响最强的备用排风机切换为例, 对某核心间进行监测, 切换过程中, 核心工作区各房间绝对压力均未出现逆转现象, 核心工作间与相邻缓冲间之间的相对压出现短时间 ($\leq 1\text{min}$) 较低压力的逆转, 具体见图 7。

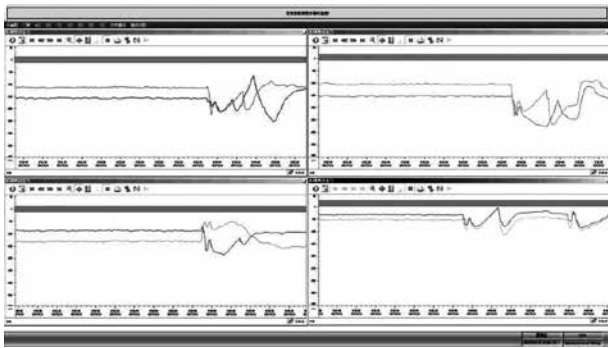


图 7 系统备用排风系统切换可靠性检验结果
(其中浅蓝色直线表示绝对压力零点, 其余曲线表示核心间及相邻缓冲等受控房间绝对压力曲线。)

3.2.4 小结

以上三种压差控制方式及系统配置形式各有各的优点也各有各的不足之处, 均可以为以后实验室建设作为参考。总的来说, 实验室 A 的控制方式最为简洁; 实验室 B 和实验室 C 的控制方式较为复杂, 但控制的精度会较高些。高等级生物安全实验室的建设及压差控制方式、系统形式要综合考虑“控制的有效性”、“实验室运行的安全性”及“建设成本加运行成本”, 要综合考虑进行权衡, 方可选取合适的方案。

除以上压差控制方式外, 我国学者还提出了人为附加漏风控制策略^[7]、变风量压差控制 (模糊 PID 控制)^[7]等。其中人为附加漏风控制策略与实验室 A 控制形式类似, 即人为增加实验室漏风量; 变风量压差控制 (模糊 PID 控制) 是在变风量压差控制 (常规 PID 控制) 控制方式上的升级, 可以根据压差运行的不同状态, 实时调整 PID 参数, 可以同时保证良好稳定性与快速反应性。这两种方式还有待在高等级生物安全实验室建设中进一步实践。

4 结论

4.1 定风量控制是最简洁的控制策略, 双调节阀压差控制方式、变风量压差控制 (常规 PID 控制) 也具有自己能更加精准调控的优势, 控制方式的选取依赖于围护结构形式、关键防护设备配置、系统配置形式、建设成本及运行成本等多方面因素, 要综合考虑进行权衡。

4.2 实验室 A 定风量控制方式在高等级生物安全实验室的成功应用, 为高等级生物安全实验室的建设及控制选择提供了新的思路, 突破了定风量控制方式不能在较高严密性要求的实验室使用的束缚。

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.
- [2] 中国国家认证认可监督管理委员会 .RB/T 199-2015 实验室设备生物安全性能评价技术规范 [S]. 北京: 中国标准出版社.
- [3] EN12021 Respiratory protective Devices--Compressed air for breathing apparatus.
- [4] Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories (BMBL) 5th Edition.
- [5] 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 GB 19489-2008 实验室生物安全通用要求 [S]. 北京: 中国标准出版社.
- [6] 中国合格评定国家认可委员会 .CL53 实验室生物安全认可准则对关键防护设备评价的应用说明.
- [7] 张宗兴. 气密性生物安全实验室压差控制技术与策略研究 [D]. [博士学位论文], 天津: 军事医学科学院卫生装备研究所 .2013.

高等级生物安全实验室自控系统设计探讨

张岳东, 曹国庆

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

[摘要] 目前建设的高等级生物安全实验室送、排风机均采用了备份冗余, 而其自控系统却没有相应的冗余备份结构。分析高等级生物安全实验室自控系统设计和实施中经常遇到的系统冗余模式设计优化、传感器和执行机构选型要点等问题, 结合实际工程设计和检测经验探讨一些简单易行的解决方法, 以期设计高等级生物安全实验室自动控制系统设计提供一些有益的参考。

[关键词] 高等级生物安全实验室; 自控系统; 系统冗余; 负压环境; 压力梯度控制; 硬件级双机热备; 总线级双机热备; 软件级双机热备

0 引言

生物安全实验室是指通过防护屏障和管理措施, 达到生物安全要求的生物实验室和动物实验室, 相关国家标准 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》^[2] 规定的微生物生物安全实验室 BSL-3、BSL-4 级和动物生物安全实验室的 ABSL-3、ABSL-4 实验室是生物安全防护要求非常严格的实验室 (以下简称为高等级生物安全实验室)。实验中所涉及的病原体具有很高的传染性和对人及动物的致病性, 致病后一般没有有效的治疗措施。防止实验室内的病原微生物向周围环境扩散, 是确保实验室运行时生物安全的关键, 实验室内任何工况的运行和切换, 都要求保证核心实验室工作的负压环境及负压梯度要始终得以保持, 设计一套高效、安全、抗风险能力强、高可靠性、操作维护简单实用的自控系统, 达到和实现国家规范验证要求的环境防护功能, 有着极其重要的核心作用。

相比于普通建筑的空调自控系统, 高等级生物安全实验室自控系统具有如下特点: 实验室运行工况多, 工况切换频繁; 温湿度控制精度高, 各实验室温湿度及压差参数均要求实时监测; 严格的压力梯度控制 (生物安全防护的关键); 拥有良好的空气过滤系统, 高效过滤器要能够检测验证; 很高的系统稳定性和可靠性, 能耐受实验室内各种不安全因素的风险冲击; 整个控制系统的可靠性和稳定性需经过专业检测机构的风险评估和检测验证。

目前国内建设的高等级生物安全实验室的送、排风机全部采用了规范要求的备份冗余, 而对于为其控制和调节的自控系统却没有采用相应的冗余备份结构的控制模式, 二者在整个机电控制环节并没有协调和统一, 这样对整个建筑的生物安全保障会

产生一定程度的风险, 本文针对此方面问题进行一些探讨。

1 规范要求及工程现状

1.1 标准规范要求

依据高等级生物安全实验室的建筑特点, 国家标准 GB 19489-2008《实验室 生物安全通用要求》^[1] 和 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》^[2] 对高等级生物安全实验室的自控系统提出了明确要求, 《实验动物 环境及设施》GB 14925-2010^[3] 对动物实验间和屏障环境监测提出了基本配置要求, 具体关键内容如表 1 所示。

1.2 工程现状

从表 1 可以看出, 规范要求高等级生物安全实验室的送、排风机采用备份设置, 实际工程中, 也都设计了备用冗余式送、排风机组, 但是为其提供控制和调节的自控系统却采用的是单一的 DDC 或 PLC 控制系统, 究其核心原因是, 国家规范对于高等级生物安全实验室自控系统本身是否需要备份和冗余, 并没有做出任何的规范要求和条文说明, 如果在高等级生物安全实验室运行过程中发生自控系统受到外界干扰或是本身原因而故障宕机, 将会导致所有备份的送、排风机组无法运行或切换, 所有生物安全型密闭阀无法关闭, 同时, 实验室核心区域所有压力梯度都将消失, 生物安全屏障无法得到基本的技术保障。

排风风机和相关的电动机产生故障的几率要远远低于电子类服务器和控制器的故障几率, 高等级生物安全实验室自控系统设计热备份冗余结构更能抵御各类自控系统本身带来的故障风险, 为确保整个实验建筑的安全、可靠运行, 自控系统配置对生物安全风险考虑理应在规范的有关条文中得到更好的体现, 并对自控系统之于高等级实验室安全风险进行全面评估, 并作出相适应的技术规定。

控制和调节整个实验室运行的核心自控系统应考虑热备份和冗余结构模式。

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题“室内微生物污染源头识别监测和综合控制技术”(编号: 2017YFC0702800)。

表 1 国家标准对高等级生物安全实验室的自控系统关键点要求

标准编号	控制要求	条文号	条文要求
GB 19489-2008	门禁授权控制	6.3.8.1	进入实验室的门应有门禁系统，应保证只有获得授权的人员才能进入实验室。
	时序连锁控制	6.3.8.4	启动实验室通风系统时，应先启动实验室排风，后启动实验室送风；关停时，应先关闭生物安全柜等安全隔离装置和排风支管密闭阀，再关实验室送风及密闭阀，后关实验室排风及密闭阀。
	热备切换	6.3.8.5	当排风系统故障时，应有机制避免实验室出现正压和影响定向气流。
	压力梯度维持	6.3.8.7	应通过对可能造成实验室压力波动的设备和装置实行连锁控制等措施，确保生物安全柜、负压排风柜（罩）等局部排风设备与实验室送排风系统之间的压力关系和必要的稳定性，并应在启动、运行和关停过程中保持有序的压力梯度。
	连续检测显示过滤器压差值	6.3.8.8	应设置连续监测送排风系统 HEPA 过滤器的阻力，需要时，及时更换 HEPA 过滤器。
GB 50346-2011	机电冗余	5.2.3	BSL-3 实验室宜设置备用送风机。
	机电冗余	5.2.4	ABSL-3 实验室和四级生物安全实验室应设置备用送风机。
	机电冗余、压力梯度保持	5.3.5	三级和四级生物安全实验室防护区应设置备用排风机，备用排风机应能自动切换，切换过程中应能保持有序的压力梯度和定向流。
	压力梯度控制、温湿度控制、连锁控制	7.3.2	三级和四级生物安全实验室的自控系统应具有压力梯度、温湿度、连锁控制、报警等参数的历史数据存储显示功能，自控系统控制箱应设于防护区之外。
	有风检测与电加热连锁控制	7.3.11	当空调机组设置电加热装置时应设置送风机有风检测装置，并在电加热段设置监测温度的传感器，有风信号与温度信号应与电加热连锁。
	压差传感器采样管应设置高效过滤装置	7.3.13	四级生物安全实验室防护区室内外压差传感器采样管应配备与排风高效过滤器过滤效率相当的过滤装置。
GB 14925-2010	氨浓度动态监测	7.3.14	三级和四级生物安全实验室应设置监测送风、排风高效过滤器阻力的压差传感器。
		5.2.1 5.2.2	动物生产间、实验间氨浓度 ≤ 14mg/m ³
	噪音动态监测	5.2.1	动物生产间、实验间噪音 ≤ 60dB（A）
		5.2.2	

建议生物安全实验室建筑技术规范在下一轮修编时，对控制系统的冗余和备用结构能予以讨论和规范，将高等级生物安全实验室控制系统的每一个需要热备冗余的环节设计考虑周全，以降低控制系统故障时对高等级生物安全实验室运行所造成的风险。

在实际工程检测中，高等级生物安全实验室动物房的氨浓度动态检测和噪声的动态检测，也往往被忽视和遗漏。另外，高等级生物安全实验室的高效过滤器前后应采用压差传感器，实时检测并显示高效过滤器阻力的前后压差状态，而不应设计为压差报警开关。对于高效过滤器数量不多的情况，建议所有高效过滤器都设置压差传感器；对于高效过滤器数量很多，建议选择有典型特征的，高效过滤器比较容易堵塞的关键的重点区域加装压差传感器，实时监测高效过滤器的阻力状态。

2 系统冗余模式设计优化

针对高等级生物安全实验室控制系统的现状，依据生物安全防护等级的工艺要求，按照安全首位、科学合理的原则，考虑其核心控制系统的各个环节出现故障时产生风险的可控性和承受力来设计服务

器、控制器及传感器的冗余控制模式，最终确定选用冷备冗余还是热备冗余，选择热备冗余又应该采用哪一种双机热备控制方案。

2.1 热冗余控制系统选型比较

针对高等级生物安全实验室的运行安全等级，设计时可以参照实际的安全防护要求，选用热冗余控制系统的某一种控制模式，如表 2 高等级生物安全实验室热冗余控制系统配置一览表所示。

双机热备份方案中，根据两台服务器的工作方式分为双机双工模式、双机互备模式和双机热备模式三种不同的工作模式。

双机双工模式，是目前集群控制模式的一种形式，两台服务器和整个控制系统均为在线运行，同时进行相同的监测和控制，保证控制系统整体的性能，也实现了负载均衡和互为备份，利用了磁盘柜存储技术。在双机双工模式下，服务器、工业交换机、现场控制器、传感器和执行机构各结构设备为相互独立的两个系统，工作时，两套系统同时工作，如果一套系统出现故障，均能实现实时切换，以保证整个控制系统工作的持续性和高度的可靠性。

双机互备模式，是两个相对独立的控制系统及

表 2 高等级生物安全实验室热冗余控制系统配置一览表

序号	热冗余控制模式	控制系统冗余结构	冗余切换特点	适用范围
1	双机双工模式	服务器、工业交换机、现场控制器、传感器和执行机构	优点：实时切换，持续性和可靠性最高。缺点是初次投资成本较高。	BSL-4、ABSL-4、ABSL-3 中的 b2 类实验室
2	双机互备模式	服务器、工业交换机、现场控制器（信号分支器 + 传感器）	优点：故障时实时接管，持续性和可靠性较高。缺点是传感器没有冗余热备。	BSL-3、ABSL-3
3	双机热备模式	服务器、工业交换机、现场控制器（信号分支器 + 传感器）	优点是可以手动切换，缺点是故障时延时接管，持续性和可靠性较低。传感器没有冗余热备。	BSL-3

两台服务器同时运行,但彼此均设为备机,当某一台服务器出现故障时,另一台服务器可以在短时间内将故障服务器的应用接管过来,从而保证了整个控制系统的持续性。双机互备模式下,控制系统的传感器可以使用单一模式配置,在控制柜内采用信号分支器,将前端的传感器信号作为信号分支器的输入信号,将信号分支器的输出信号分别接至两台互为冗余的现场控制器,以节约传感器的建设成本。

双机热备模式,即主控/待机方式,主控服务器处于工作状态;而待机服务器处于监控准备状态,所有数据同时往两台服务器写入,通常各服务器采用 RAID 磁盘阵列,保证数据的即时同步。当主控服务器出现故障的时候,通过软件诊断或手工方式将待机服务器激活,保证应用在短时间内完全恢复正常使用。由于其中一台服务器长期处于后备的状态,从计算资源方面考量,就存在一定的浪费。故障切换的时间和方式无法达到高等级生物安全实验室对控制系统运行切换的要求,故不推荐使用。

2.2 冗余控制器选型要点

冗余式控制器,主要是依据机架结构,机架电气连接的独立性,互备模式及切换速度,I/O 输入输出模块是否支持带电插拔,以及是否支持 I/O 输入输出模块状态预置,来加以区别。

目前市面上冗余结构的工业控制器很多,从软、硬件结构分为硬件级双机热备、总线级双机热备、软件级双机热备。用户可以根据自己的风险控制等级和建设的需求,对这些技术要素和特点来甄别选择。对于主流的热备冗余控制器的比较,详见表 3 控制器双机热备冗余结构形式比较。

从表 3 可以看出,依据高等级生物安全实验室的风险控制特征,在投资成本许可的情况下,笔者建议优先考虑硬件级双机架双机热备系统,发生故障时切换速度快,整个系统测试、验证方便,便于检修和维护,更符合高等级生物安全实验室对控制系统冗余可靠性的运行要求。

3 传感器和执行机构选型要点

3.1 传感器选型

高等级生物安全实验室自控系统环境监测使用

的传感器包括:温度传感器、湿度传感器、房间风压力传感器、过滤器压差传感器、露点温度传感器、动物房氨浓度传感器、动物房噪声探测器等。

传感器的选择和主要技术参数选型参考如下技术要点:测量目的、测量对象以及测量环境的要求;被测位置对传感器体积的要求、测量方式和信号方式要求;量程的大小及线性范围;灵敏度的选择及频率响应特性;传感器测量精度及标定的难易度;安装方式及运行的稳定性。

在工程检验中发现,很多传感器是不进行标定的,测量范围超出实际需求太大,使得传感器的测量精度过低,测量显示的数据稳定性差。另外,传感器的测量精度满足整个控制系统的测量要求即可,不必追求越高越好,传感器精度越高其造价也更贵。在成本合理的条件下,选择具有良好的稳定性和较强的环境适应性的传感器,传感器的各项性能指标要均衡考虑后选型。

3.2 执行机构选型

高等级生物安全实验室自控系统执行机构包括:生物安全密闭风阀执行器、变风量调节阀执行器、水阀执行器和蒸汽加湿器调节阀执行器等。

执行机构是一种能提供直线或旋转运动的驱动装置,它利用某种驱动能源并在某种控制信号作用下工作,它首先要与被执行的阀门或机构的运行机制匹配。

执行机构使用液体、气体、电力或其它能源并通过电机、气缸或其它装置将其转化成驱动作用。其基本类型有三种驱动方式:部分回转(Part-Turn)、多回转(Multi-Turn)及直行程(Linear)。目前市场上主要是气动、电动、液压这三种驱动动力源,高等级生物安全实验室的执行机构主要使用气动或电动动力源,二者在驱动性能、造价、工程维护等方面各有优点。

执行机构选型时主要考虑下列技术要素:驱动能源(气动或电动)、阀门主体(被执行机构)的类型、力矩计算、执行机构的满行程运行速度和开关频率、控制方式(开关控制、连续调节控制或数字通讯控制)、调节特性(连续调节执行机构的线性调节范围

表 3 控制器双机热备冗余结构形式比较

序号	冗余方式	结构型式	结构描述	切换速度
1	硬件级双机热备	单机架双机热备	同一块机架上插双电源,双 CPU,有 1 套或 2 套热备单元,一般还可以插双通讯模块(如以太网单元)。CPU 的数据交换通过机架底板电路。一般不是 RIO 式的分布式结构。	切换速度快,一般在 50ms 以下。
		双机架双机热备	主、从两个机架,两套完整独立的系统,两套机架上的热备单元一般通过光纤通讯。	切换速度很快,一般在 25~50ms。
2	总线级双机热备	基于总线级的数据通讯	总线通讯单元兼有热备切换功能。主 CPU 故障时,从 CPU 接管 I/O 的控制,夺取 I/O 总线的控制权。	切换速度在 150~300ms。
3	软件级双机热备	完整独立的两套系统, RIO 结构	依靠软件实现切换,这种结构的切换速度跟程序量、I/O 点数、总线速度都有关,速度最容易受外界影响而差异较大。	250~500ms、750~1500ms、1~3s,不同厂商热备软件差异较大。

与精度)、执行机构的防护等级及安全等级、性价比与工艺适应性、安装维护简易性。

对于高等级生物安全实验室各类执行机构除了以上需要考虑的要素之外,还要在设计时考虑阀门执行机构在满行程开关或调解过程中要满足实验室内各类运行工况切换时的时间要求,以及某些特定阀门执行机构是否具有快速预置定位功能等。

高等级生物安全实验室空调系统控制原理图如图 1 所示。图 1 中,系统中 M1~M8 应采用快速执行机构,采用气动执行机构单程动作时间应小于 1s,电动执行机构单程动作时间应小于 2s; M9~M10、M12~M15 执行机构的单行程动作时间不应大于 10s,才能满足系统切换时的安全控制要求。

另外,工程中不能为了节省建设成本而将阀门

执行机构的监测定位装置(反馈模块单元)取消,阀门执行机构的检测模块主要是对执行机构的电源、微型电机和阀门的工作状态进行检测,并将检测的信号及时上传到上位机,当执行机构出现故障时能够及时发现和处理,防患于未然,大大提高整个控制系统的可靠性。

4 问题探讨

针对高等级生物安全实验室典型控制系统功能模块、控制环节及工艺要求,各洁净区域的使用时间、要求的温湿度、各区间风压差各不相同,空调系统划分大多很细致化,各个实验室要求独立控制与调节,这就要求控制系统配备细致、高效、可靠,针对现场调查检测时发现的一些实际问题进行分析,提出了一些相对应的措施和建议,参见表 4。

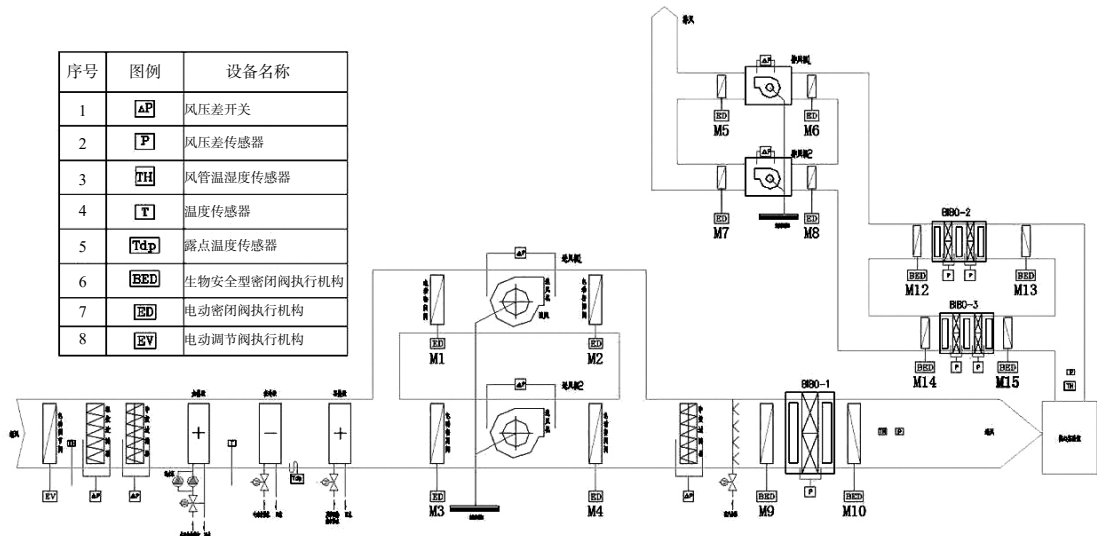


图 1 高等级生物安全实验室空调系统控制原理图

表 4 生物安全实验室控制系统设计常见问题及建议

序号	问题要点	故障及风险描述	措施与建议
1	上位机服务器没有热备冗余	上位机系统故障或崩溃,运行数据丢失,系统失控,严重影响整个实验室运行。	建议按热冗余结构设计,抵御各类上位机系统故障风险。
2	控制器、传感器没有热备冗余	控制系统故障或崩溃,压力梯度消失,风机及各类阀门失控,生物安全风险极大。	建议参照排风机热冗余模式设计,抵御各类控制器故障风险。
3	现场控制器距离机组或设备太远	传感器信号衰减,易受电磁干扰。	传感器至现场控制器直接连接距离不宜超过 50m,合理选择控制柜安装位置。
4	调节水阀安装二次甚至三次变换直径安装	阀门本体二次甚至三次变换直径安装,占用额外的安装空间,给施工带来难度。	阀门的流量调节范围必须和机组的设计流量相匹配,合理选择水管分支局部比摩阻,以降低阀门前后安装管径的变化次数。
5	阀门密封件渗漏	阀门本体密封件在运行一段时间后,密封件损坏。	选择足够大扭矩的电动阀执行机构,避免阀门在调解过程中产生谐振。热水循环系统,还应考虑热水温度对水阀执行器扭矩大小的影响,同时应考虑阀门主体的系统承压值。
6	阀门执行机构选配不合理	生物安全密闭阀关闭不到位,或是开关速度不满足阀门的切换要求。	首先考虑阀门执行器的安装环境,精确计算阀门的开关或调节力矩,考虑余量系数和阻力匹配系数,应大于力矩计算值的 1.5~2 倍。
7	采样管没有配备高效过滤装置	存在生物安全风险	应配备与排风高效过滤器过滤效率相当的过滤装置,预留相应的安装位置,并具备检测条件。
8	加湿器加湿初期,加湿过快	送风道内结存大量凝结水,影响洁净空调系统正常运行	加湿初期加湿量过高,遇冷结露。系统停运超过 4h 重新启动运行时,加湿量应严格控制在相对湿度 75% 以下,冬季风道温度很低,相对湿度还应降低。低风速时,应避免局部功能段高温高湿。
9	穿墙密闭器的位置不合理,预留不充分	干扰功能房间设备布置,布线系统无扩展性。	应考虑穿墙密闭器的安装空间及穿墙密闭器在核心间内的出线位置,便于泄漏检测检验,配合协调核心实验室的管线槽布置,预留 20% 左右的余量。
10	核心试验区内蒙敷设的电气管线选型不合理	造成打压时空气泄漏率不达标,管线易遭腐蚀。	管线选型应考虑穿墙密闭器压紧时的抗挤压效应,压紧后线缆的空气泄漏率要满足打压要求。电气管线应能满足所有实验的使用环境洁净、防潮、防腐等要求。

从表4可以看出,服务器和现场控制器是整个高等级生物安全实验室的控制核心和中枢,生物安全实验室建筑对负压实验室送、排风风机均设计备份冗余的空调系统理应同等设计热备份冗余的控制系统结构,以应对控制系统本身故障对高等级生物安全实验室带来的安全风险。

高可靠的控制系统是依赖于电气设计师对高等级生物安全实验室控制环节出现故障后的风险评估、分析和把控,通过精心细致的设计措施和系统方案来实现的,并且在系统正常运行维护时得到可靠的技术保障,具备完善的控制系统知识,系统运行的各个环节出现问题和故障都能够及时有效解决,防患于未然。

5 结语

(1) 自控系统是高等级生物安全实验室稳定运行的灵魂和核心,建议从服务器、控制器、传感器和执行机构各个环节,从控制风险的角度设计选择热冗余备用模式,保障高等级生物安全实验室的运行安全。

(2) 传感器选型应该从实验室实际工作环境和具体的工艺要求出发,列表甄别各类制约因素,合理选择测量的量程范围和精度,同时要设计好传感器安装时的各种生物安全防护结构,确保在实验室生物安全检验过程中传感器安装部位不出现各类生物安全的遗漏风险。

(3) 执行机构选型时应着重考虑执行机构和被控阀体的安装配合,细致计算并选择全行程范围内的力矩,保有合适的裕量系数,并且在整个系统运行过程中,执行机构的执行速度应能满足实验室各

类工况切换和各类风险冲击时的控制要求,使整个实验室的压力梯度始终满足规范验证要求,从而使得自控系统的可靠性和适应性进一步提高。

参考文献

- [1] 中国合格评定国家认可中心,等. 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.
- [2] 中国建筑科学研究院,等. 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.
- [3] 全国实验动物标准化技术委员会. GB 19425-2010 实验动物 环境及设施 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [4] 上海现代建筑设计(集团)有限公司. GB 50314-2015 智能建筑设计标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [5] SIEMENS. 暖通产品和楼宇自控系统 [R], 2015.
- [6] BELIMO. 风门执行器产品技术资料 第7版 [R], 2013.
- [7] 施耐德电气. Modicon Quantum 自动化平台和 Unity 软件产品目录 [R], 2011.
- [8] SIMENS. SIMATIC S7-400 可编程序控制器产品样本 [R], 2008.
- [9] 三菱电机. MELSEC Q 系列冗余系统 [R], 2016.
- [10] OMRON. CS1D 双机系统操作手册 [R], 2003.
- [11] Rockwell Automation. SLC500 控制系统选型指南 [R], 2013.
- [12] GE. Fanuc Automation 系列 S90™-70 可编程控制器设计指南 [R], 2006.

高等级生物安全实验室 UPS 设计及风险分析

张岳东，曹国庆

（中国建筑科学研究院有限公司，北京 100013）

〔摘要〕着重从设计角度浅析高等级生物安全实验室供配电系统设计中不间断电源 UPS 灾备冗余供电设计的可靠性和可行性，并对高等级生物安全实验室 UPS 运行的各类风险进行分析，以期在设计最高安全等级的生物安全实验室的供配电系统时，能够合理选择与高等级生物安全实验室设备控制工艺相适应的不间断电源系统。

〔关键词〕生物安全实验室；UPS；负荷等级；一级负荷；灾备冗余；分布式冗余 UPS；负载率；风险分析

0 引言

大动物 ABSL-3 及四级生物安全实验室（以下简称高等级生物安全实验室）是防护等级和安全性最高的生物安全实验室，可有效阻止传染性病原体释放到环境中，同时为研究人员提供安全保证。为高等级生物安全实验室提供电力供应的电气系统，应确保所有系统能够协同运行以满足生物安全防护的三大基本要求，即保护工作人员、保护实验室安全运行、保护环境和附近区域安全。

国家标准对高等级生物安全实验室的供配电负荷等级和配置给出了明确要求，但在实际工程实践中仍存在理解偏差的情况。本文着重探讨电气供电系统不间断电源（Uninterruptible Power Supply，UPS）的重要性、设计方案、存在的问题、思路措施和防护方案，以期能为相关人员提供一些有益的参考。

1 标准要求

GB 19489-2008《实验室 生物安全通用要求》^[1]和 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》^[2]

对高等级生物安全实验室的供配电负荷等级、冗余和 UPS 配置提出了明确要求，GB 50052-2009《供配电系统设计规范》^[3]对一级负荷和一级负荷中特别重要负荷进行了界定，汇总如表 1 所示。

从表 1 可以看出，高等级生物安全实验室的供电负荷等级应为一级负荷，应采取双重电源供电，应急电源采用 UPS 电源和备用柴油发电机组设备。结合我国目前已建的高等级生物安全实验室设计和建设要求，其设施设备特别重要负荷汇总如表 2 所示，一级负荷中特别重要负荷应配备 UPS 电源。在高等级生物安全实验室供配电系统的设计和建设过程中，应充分验证实验室的供电可靠性、电能质量、可用性、冗余度、主动“热”备用、被动备用、一般冗余、多样性冗余、可扩展性。

2 UPS 结构形式

不间断电源 UPS 按照系统结构形式可分为 4 种类型，如表 3 所示。目前国内已建高等级生物安全实验室大多采用第 1 类“单一式 UPS 系统”及第 3 类“并联式 UPS 系统”。

表 1 国家标准对高等级生物安全实验室的供配电要求

标准	供电要求	条文号	条文要求
GB 19489-2008	冗余	6.3.6.1	电力供应应满足实验室的所有用电要求，并应有冗余。
	配置 UPS	6.3.6.2	生物安全柜、送风机和排风机、照明、自控系统、监视和报警系统应配备不间断备用电源，电力供应应至少维持 30 min。
GB 50346-2011	一级负荷及一级负荷中特别重要负荷供电	7.1.3	ABSL-3 中的 b2 类实验室和四级生物安全实验室必须按一级负荷供电，特别重要负荷应同时设置不间断电源和自备发电设备作为应急电源，不间断电源应能确保自备发电设备启动前的电力供应。
GB 50052-2009	一级负荷中特别重要负荷	3.0.1	在一级负荷中，当中断供电将造成重大设备损坏或发生中毒、爆炸和火灾等情况的负荷，以及特别重要场所的不允许中断供电的负荷，应视为一级负荷中特别重要的负荷。
	一级负荷中特别重要负荷供电	3.0.3	一级负荷中特别重要的负荷供电，应符合下列要求：1 除应由双重电源供电外，尚应增设应急电源，并严禁将其它负荷接入应急供电系统。2 设备的供电电源的切换时间，应满足设备允许中断供电的要求。

表 2 高等级生物安全实验室特别重要负荷一览

建筑类别	供电要求	一级负荷中特别重要负荷
生物安全四级实验室	冗余式 UPS	防护区的生命支持系统、化学淋浴系统、气密门充气系统、生物安全柜、动物隔离设备、送风机、排风机、照明系统、自控系统、监视和报警系统等用电负荷
ABSL-3 中的 b2 类实验室	冗余式 UPS	建筑内大小动物房、实验室内照明、插座、所有维持负压的净化空调机组、极寒防冻热水循环泵、安防系统、门禁系统电源、气密门充气系统及所有控制系统用电

基金项目：“十三五”国家重点研发计划课题“室内微生物污染全过程控制关键技术及设备”（编号：2017YFC0702804）。

2.1 UPS 并机系统

由两台相同型号的 UPS 组成“1+1”并机系统，见表 3 中的第 3 类（并联式不间断电源系统）。该供电方式每台 UPS 单机输出功率等于负载功率的 50%，整个系统可提供 2 倍的标称输出功率；该系统中当某台 UPS 出现故障时，UPS 将从系统中快速脱机执行“选择性脱机跳闸”操作，待维修完毕后，将故障机重新并入系统。

冗余并机（双机带载）优点为瞬间过载能力强、自动均分功率。缺点是：存在设备间环流，不同的并机系统具有不同的设备间环流；环流增加了 UPS 的无功损耗，降低了 UPS 系统可靠性；不管采用哪一种并机系统方案，均需要增加 UPS 设备之外的辅助电路，增加了投资成本，同时也增加了故障点。

2.2 模块化 UPS 并机系统

模块化 UPS 并机系统结构形式见表 3 中的第 4 类（并联冗余式不间断电源系统）。通常采用模块

化 UPS 设备实现机内冗余，是为了更高的安全性和更节省的成本。对于传统 UPS，模块化 UPS 结构形式可在线扩容，提供带载冗余，在线维修维护等优势。模块化 UPS 整机节约初投资成本，降低设备整机的维护成本，设备安装占地面积小等优势，模块化 UPS 整机设备比传统 UPS 具有更安全和更高的性价比。

2.2.1 共用直流系统的模块化 UPS

目前市场上有多种模块化的 UPS，图 1 是一种共用直流系统的模块化 UPS 结构。

该模块化 UPS 设备由一个操作面板和双 CPU 控制器组成，逆变功率模块实现层叠冗余，功率模块不具备独立控制能力，由公共操作面板中的控制器来控制；为了消除单 CPU 故障带来的整机系统崩溃，采用了两个 CPU 单元，实现控制器 CPU 的备份冗余：当一个 CPU 出现故障时，整个 UPS 主机的功率模块无缝切换至另外一个完好的 CPU 控制，

表 3 UPS 电源系统结构形式^[4]

序号	系统方式	系统图	简要说明
1	单一式不间断电源系统		因只有一台不间断电源设备，一般用于系统容量较小，可靠性要求不高的场所。
2	冗余式不间断电源系统		因增设了一台或几台不间断电源设备作为备用，确保了供电的连续性，一般用于系统容量较小的系统中。
3	并联式不间断电源系统		可组成大型 UPS 供电系统，供电可靠性高，运行比较灵活，便于检修。
4	并联冗余式不间断电源系统		可组成大型 UPS 供电系统，供电可靠性高。运行灵活方便，便于检修。可用于高等级生物安全实验室，互联网数据中心，银行结算中心等重要场所。

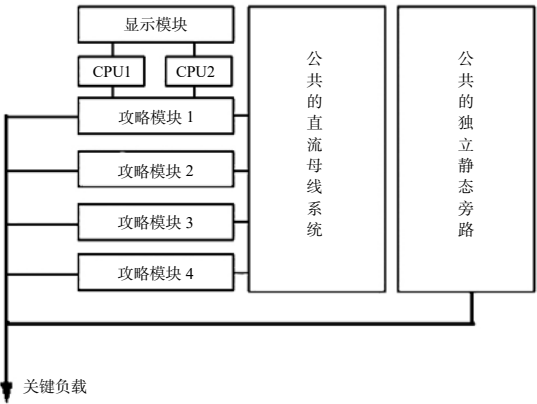


图 1 共用直流系统模块化 UPS 结构

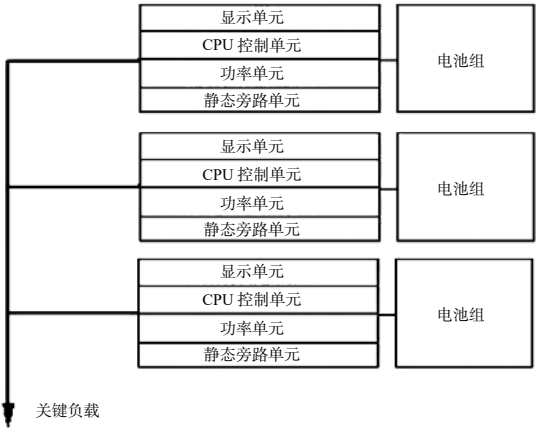


图 2 完全并联冗余结构 UPS 结构

以保持 UPS 整机继续运行。4 个功率模块如图 1 排列，每一个功率模块互为冗余，如果一个模块失效，其它模块可以继续工作；4 个模块都从公共的直流电池总线上获取电能；整个 UPS 主机只有一个静态旁路。该类型 UPS 只有整机的控制器 CPU 和功率逆变模块具备灾备冗余，其他部件和系统没有实现冗余。因此，如果这些没有设计冗余的组件发生故障，整体 UPS 系统的运行可靠性就会降低。在某些更为严重的情况下（比如静态旁路短路出现故障时），整个 UPS 整机就会宕机，整个 UPS 供电系统就会中断供电。

这种形式的模块化 UPS 只是实现了一部分功能模块冗余，对于高可靠性供电要求的实验室，这类 UPS 对 UPS 故障几率的防范并不完全，在运行中依然存在一定的故障隐患。

2.2.2 完全并联冗余式 UPS

完全并联冗余式 UPS 设备结构如图 2 所示，实现了完全意义上的模块化 UPS 结构，又称为分布式并行结构（DPA）。这种完全并联冗余 UPS 系统中每一个功率逆变模块都含有操作面板、CPU 控制单元、功率模块、静态旁路单元和独立的电池组。也就是说，它是由若干互为冗余的独立 UPS 小单元构成，实现了完全的整机内部备份和冗余。每个功率模块中都含有静态旁路，电池组也互相独立。这也就意味着这种完全并联冗余结构的 UPS 对系统所有的组件都提供了应急备份冗余，因此它比共用直流系统的模块化 UPS 具有更高的冗余性和安全性。

这种结构的 UPS 模块均实现了在线热插拔更换，主机控制模块采用工业总线控制方式，由两块备份冗余的可热插拔控制模块单元实现对 UPS 整机系统的控制管理。当某一个控制模块故障不会影响

到整个 UPS 系统的正常工作。功率模块和电池组的并联也由冗余控制单元集中管理，采用高速 CPU 控制单元采样控制，实现各项电气参数的匹配和统一，大大减少了环流等各方面不利因素，一个单元系统模块故障可自动退出并联系统，不会对整个 UPS 整机的并联系统造成危害，大大提高了 UPS 整机的可靠性。

3 UPS 冗余方式比较

目前市场上实现冗余 UPS 供电系统的方式主要有 5 类，如表 4 所示。经过工程现场检验统计，目前国内已建成使用的高等级生物安全实验室有些是采用第 1 类“单机 / 并机冗余式 UPS 系统”，有些根本没有设计 UPS 冗余供电系统，而其余冗余方式的 UPS 结构形式也较少使用。

如表 4 所述，在一套 UPS 配电系统中，从 UPS 到其最终保护的负载之前，通过其下口的各分配电柜和其它的电气开关之间会有一个较长的能量通路，其间就存在着一些可能导致整个系统出现问题的故障点，理想的 UPS 电源系统应该是 UPS 的输出直接连接后端需要保护的关键设备，在分区电源系统中，UPS 更加靠近负载，在几种电源系统冗余方式中，它的可靠性及可用性级别最高。在这种工作方式中，即使其中某个或者几个区域的电源系统出问题，也不会出现整个电源系统崩溃的情况。

基于高等级生物安全实验室的供电系统安全性和可靠性的要求，建议优选考虑使用分区电源分配方式，同时采用分布式 UPS 冗余相结合的供电方式。分布冗余 UPS 的设计目标是使电源设备至负载设备的整个供电系统的每一个环节都具有冗余。而且，冗余的配电系统部分应尽可能地接近负荷等级最高的负载设备。

表 4 UPS 冗余结构形式

序号	冗余方式	结构描述	运行特点	缺点及隐患
1	单机 / 并机 满载冗余	由普通非冗余式 UPS 并联而成，UPS 接在电网与负载之间对负载进行保护，是最基本、最简单的保护模式。	投资成本低；负载过载，UPS 切换到旁路方式运行。负载在市电直通方式下运行，对 UPS 进行维修时，一般采用外部旁路（维修旁路配电箱）对 UPS 进行隔离，以便在负载不断电的方式下进行 UPS 的维修。	当 UPS 工作在旁路方式下时，缺乏可靠的电气保护。
2	隔离冗余	隔离冗余方式是指 1 台或者多台 UPS 作为一级电源保护设备，另外一台 UPS 作为二级电源，备份使用。一级电源有各自的负载总线，二级电源为所有一级电源设备提供旁路电源。工作时二级电源空载运行。	在一个周波的时间内要求可以承担 0%~100% 的负载。当一级电源从市电模式切换到旁路模式时，转换开关会自动将其与二级电源断开。	对切换时间有很高的要求，对设备的不间断运行有很大的隐患。
3	N+1 并联 冗余	由 2 台或者多台相同功率的 UPS 组成，负载均分。	向负载提供的 UPS 电源总容量至少是单台电源容量的 2 倍。这种工作方式与单机工作方式及并机满载冗余方式相比更为可靠。	当系统内其中一台 UPS 出现故障，它即自动退出并机队列，剩下 UPS 则继续为负载供电，此时对故障 UPS 无法及时维护和更换。
4	完全 并联冗余	又称分布式冗余，是目前业内公认的最可靠及可行的工作方式，整个系统内部的 UPS 单元各自独立，互为备份。整个实验室不间断电源由一个 UPS 供电总站供给。	此种冗余方式最基本的配置是 2 台完全冗余式 UPS 并联，各自独立输入，不共享数据，但是均分承担负荷，因此仍然是并联运行。	初期投资成本较高，UPS 系统电源供给距离较远。
5	分区分布式 冗余	按负荷分布，分区域建立完全并联冗余式 UPS 电源系统。冗余式 UPS 更加靠近负载。	当出现其中某个或者几个区域的 UPS 电源系统出问题，不会出现实验室整个不间断电源系统崩溃的情况。线路损耗小，运行能耗低，整个 UPS 供电系统的安全和可靠性最高。	占地面积分散，UPS 设备初期投资成本高。

4 UPS 设计建设要求

4.1 UPS 设计选型要点

常见的 UPS 供电系统如图 3 所示, 所有电源回路最后都作用于 UPS 电源系统, UPS 电源系统是整個供电环节的独立节点, 一旦 UPS 主机控制系统发生故障, 在市电正常时也往往因主控板卡故障而不能切换至 UPS 旁路为负载供电, 此时无法保证所带负载的持续供电可靠性, 对实验室的安全运行带来极大风险。故 UPS 电源系统型式应充分考虑抵御风险的冗余结构。

设计选用 UPS 时, 除了考虑负荷的额定功率外, 还应考虑负荷的同时系数和功率因数。设计初始阶段, UPS 的容量须留有余地, 考虑未来扩展增加负荷的可能性; 采用模块化设计, 通过模块并联扩大容量, 有利于系统更新和升级, 为实验室增添设备和系统提供应急能源支持。

需要注意的是, 不允许把不同技术的 UPS 产品并联使用, 即使是同一厂家的 UPS 产品, 也无法保证新老产品之间的兼容性。选择蓄电池系统时, 要选择免维修的密封式铅酸蓄电池, 同时需预留足够通风空间。

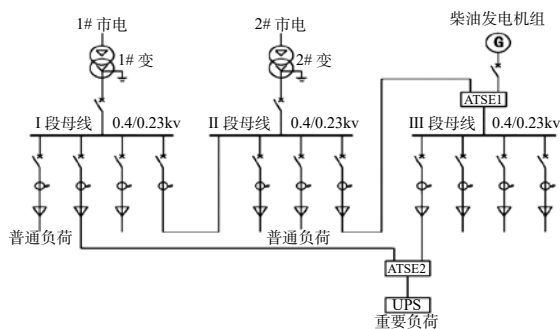


图 3 常见 UPS 供电系统结构图

UPS 应优先考虑采用并机系统或模块化 UPS 系统, UPS 并机系统或模块化 UPS 是为了电气故障时的灾备和冗余, 我国三、四级生物安全实验室通风空调净化系统的送风机、排风机往往配有备用风机作为备份冗余, 作为安全电源的电力电子设备更应该考虑热备份和热冗余设计, 用户可以根据自身的经济承受能力和风险控制程度来选择模块化 UPS 并机系统的类型。分布式并联冗余 UPS 电源系统的可靠性更高, 更便于系统维护, 抵御电源风险能力更强。

4.2 UPS 电源系统负载率

单机 UPS 电源输出负载控制在 60% 左右为最佳, 可靠性最好。在实际应用时的负载只是 UPS 额定输

出的 30% 甚至更少, 有的实际负载连 UPS 额定输出的 10% 都不到, 这不但造成了巨大的浪费, 也会影响到 UPS 的使用寿命, 使 UPS 主机不能正常检测到输出电流, 而使 UPS 始终工作在起始的临界状态。

实际操作表明, 单台非并机 UPS 选择 50%~80% 的负载率为最佳, 并机 UPS 系统工作在 30%~40% 的负载率较为理想。

5 结论

(1) 在设计高等级生物安全实验室的 UPS 供电系统时, 应根据实际负荷分布优先考虑选用分区分布冗余式 UPS 供电系统。

(2) 在设计建筑过程中, 应充分考虑 UPS 充放电及维护的空间, 由于电池的寿命随环境温湿度的升高而缩短, 应实时监测 UPS 室工作环境的温湿度值是否满足 UPS 正常工作的温湿度指标要求。

(3) 在高等级生物安全实验室的实际运行过程中, 应采取 UPS 主机智能充放电模式, 定期定时对 UPS 电池进行充放电, 同时监测电池的温度和状态, 定期统一更换电池, 保证 UPS 工作正常, 保持电池活性, 使电池保有预定的后备时间。

参考文献

- [1] 中国合格评定国家认可中心, 国家质量监督检验检疫总局科技司, 中国疾病预防控制中心, 等. 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.
- [2] 中国建筑科学研究院, 江苏双楼建设集团有限公司. GB 50346-2011 生物安全实验室建筑技术规范 [S]. 北京: 中国工业出版社, 2012.
- [3] 中国联合工程公司. GB 50052-2009 供配电系统设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [4] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册 [M]. 第 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [5] 施耐德电气 Symmetra® PX 模块化 UPS 使用手册.
- [6] ABB Conceptpower DPA™ S2 30-250 kVA 用户手册 © 版权 2013 ABB.
- [7] 艾默生 iTrust Industry UPS 单机及 “1+1” 冗余并机系统 用户手册; HIPULSE U 系列 UPS 单机及 “1+N” 并机系统 120/160/200/300/400kVA 用户手册.
- [8] 伊顿 EATON ARRAY 系列 3A3 PRO UPS 使用手册.
- [9] Rittal-Systematic, modular UPS: 威图 - 系统化, 模块化 UPS 产品资料.

生物安全二级兽用生物制品动物实验设施 设计要点分析

牛维乐¹, 孟令坤¹, 陈清莹¹, 张岳东¹, 张丽娜¹, 李 炫¹, 王书要², 张冬冬², 杨 峰²,
王群芳², 孙建军², 侯守源³

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 中国建筑技术集团有限公司, 北京 100013;

3. 河北省沧州市青县自来水公司, 沧州 062650)

[摘 要] 兽用生物制品动物实验设施是生物制药厂的重要功能单元, 生物安全二级兽用生物制品动物实验设施是每个生物制药厂最常用的动物实验设施, 本文从工艺、装修、空调、给排水、电气及自动控制五个方面总结了生物安全二级兽用生物制品动物实验设施的设计经验。

[关键词] 生物安全二级; 兽用生物制品; 动物实验设施; 设计要点

1 概述

兽用生物制品动物实验设施是生物制药厂的重要功能单元, 生物安全二级兽用生物制品动物实验设施是每个生物制药厂最常用的动物实验设施, 是按照生物安全二级实验室的标准建设的。生物安全二级兽用生物制品动物实验设施的设计既要考虑生物安全二级实验室的设计标准, 又要兼顾动物实验的要求, 主要包括办公区、配套区和实验区组成, 实验区通常包含检疫区或者动物入口、安检区、免疫区和攻毒区。生物安全二级兽用生物制品动物实验设施设计的主要参考标准为: 《实验室 生物安全通用要求》GB 19489-2008^[1], 《生物安全实验室建筑技术规范》GB 50346-2011^[2], 《实验动物 环境及设施》GB 14925-2010^[3], 《实验动物设施建筑技术规范》GB 50447-2008^[4]。本文从工艺、装修、空调、给排水、电气及自动控制五个方面总结了生物安全二级兽用生物制品动物实验设施的设计经验。

2 工艺设计

兽用生物制品动物实验设施是每个动物疫苗生产企业必备的实验单元, 各类动物疫苗在获得政府批准上市之前均要经过动物实验来考察疫苗的功效和安全性。生物制品动物实验设施的主要操作对象为各类实验动物, 因此其设计要考虑动物福利的要求, 同时攻毒区由于涉及到生物安全的操作, 因此需要按照生物安全的要求进行设计。生物安全二级兽用生物制品动物实验设施是各类动物疫苗生产企业最常用的实验动物设施, 主要用于二类病原微生物的操作, 通常对人、动物或者环境不构成严重危害, 传播风险有限, 实验室感染后很少引起严重疾病、并且具备有效治疗和预防措施的微生物操过程^[1]。

生物安全二级兽用生物制品动物实验涉及的常



图1 鼠用 IVC



图2 鸡隔离器



图3 大动物围栏

用动物种类有小鼠、大鼠、豚鼠、兔子、鸡、猪、牛, 其中小鼠、大鼠、鸡均为 SPF 动物, 其他动物均为普通动物。SPF 动物的实验设施均为屏障环境, 空气洁净度等级为 7 级, 小鼠、大鼠的饲养设施为 IVC 笼架或者隔离器, 鸡的饲养设施为鸡隔离器。普通动物的实验设施均为普通环境, 没有空气洁净度等级的要求, 豚鼠的饲养设施为 IVC 笼架或者鼠笼, 兔子的饲养设施为兔笼, 猪的饲养设施为猪床或者开放式饲养 (动物围栏限制的区域), 牛的饲养设施开放式饲养 (动物围栏限制的区域)。每种动物对于实验环境的要求可以参照参照《实验动物环境及设施》(GB 14925-2010)^[3]、《实验动物设施建筑技术规范》GB 50447-2008^[4]。

生物安全二级兽用生物制品动物设施通常包括办公区、配套区和实验区组成。办公区包括办公室、卫生间、会议室。配套区包括空调机房、中控室、配电室、污水处理间、污物处理间。实验区是生物安全二级兽用生物制品动物设施的主要功能区,通常包含检疫区或者动物入口、安检区、免疫区和攻毒区,动物入口、安检区、免疫区为常压实验区,攻毒区为负压实验区,该区的动物房要求设置前后缓冲,该区的排风需要设置两级高效过滤器过滤后高空排放,该区的排水需要经过高温消毒处理后排放,该区的污物和动物均需要经过双扉高压锅高温灭菌后运出动物设施,该区的设置主要参考《实验室 生物安全通用要求》(GB 19489-2008)^[1]、《生物安全实验室建筑技术规范》(GB 50346-2011)^[2]。

生物安全二级兽用生物制品动物设施的实验动物入口通常会设置检疫区,动物在此区通常会饲养一段时间,用来观察动物是否健康,是否适合用来作动物实验。经过检疫合格的动物会进入安检区和免疫区。由于生物制品大部分是用活的微生物制备

而成,有些微生物本身就是强毒或残余一定毒力,另外在制品生产过程中也可能由原材料、设备或操作过程造成外源毒素或微生物污染,如果没有严格的控制手段和检验标准有可能对人畜和环境造成危害,因此兽用生物制品质量标准规定:对于预防、治疗用途的兽用生物制品必须进行安全检验。安检动物在检验期间如有死亡时,必须及时解剖,明确原因,确属意外死亡时,作无结果论;如检验结果可疑,难以判定时,应以加倍的该种动物重检;如不安全,则该批制品应于报废。

免疫区和攻毒区是兽用生物疫苗效力检查的两个实验单元,实验动物首先在免疫区接种疫苗,观察合格后进入攻毒区进行攻毒实验观察动物的发病情况。攻毒区的平面设计要严格按照动物生物安全二级实验室的标准进行设计,《实验室 生物安全通用要求》^[1]的第 6.5.1 条、第 6.5.2.1 条到第 6.5.2.4 条对动物生物安全二级实验室的建设进行了规范:动物饲养间应与建筑物内的其他区域隔离,动物饲养间应在出入口处设置缓冲间,应在邻近区域配备高压蒸汽灭菌器^[1]。

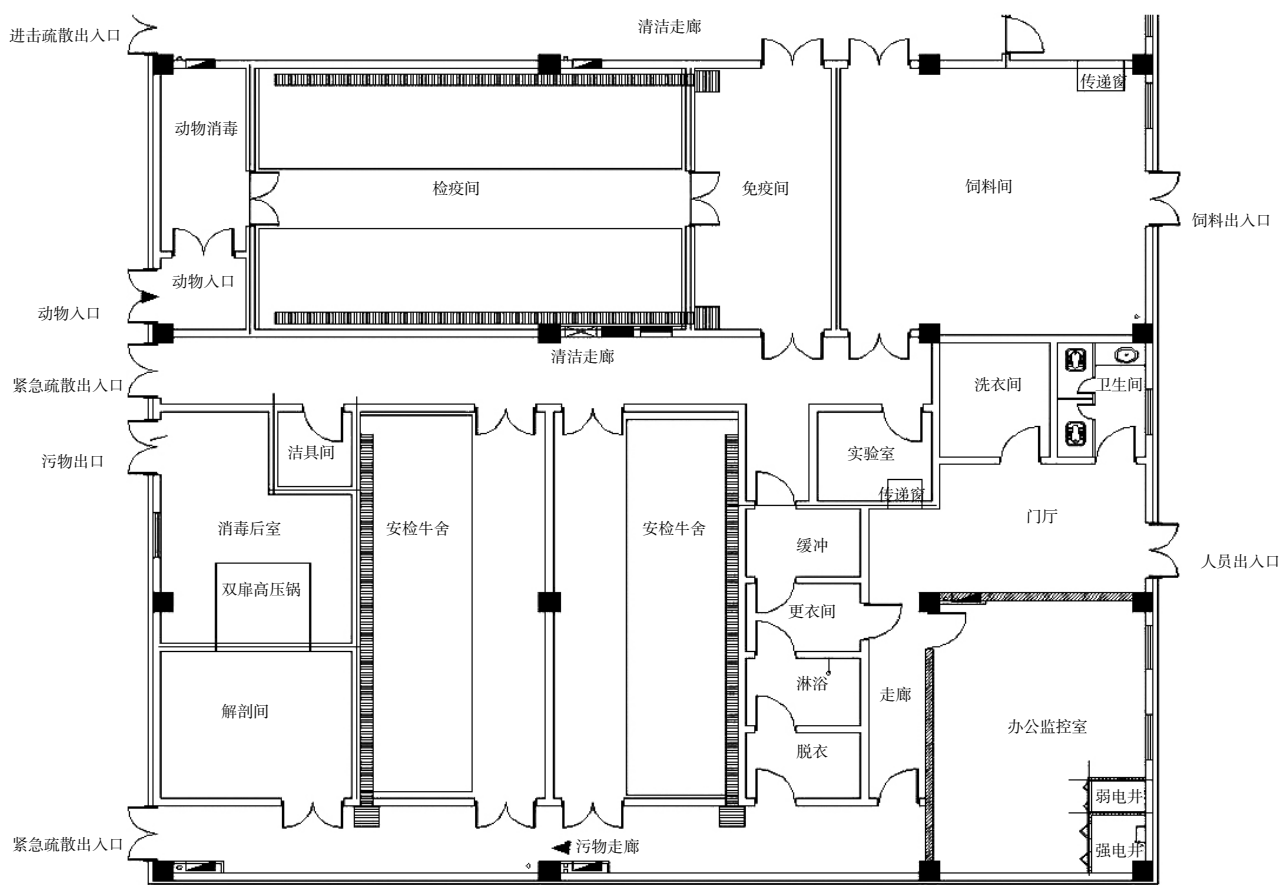


图4 牛动物房检疫区和安检区工艺布局图

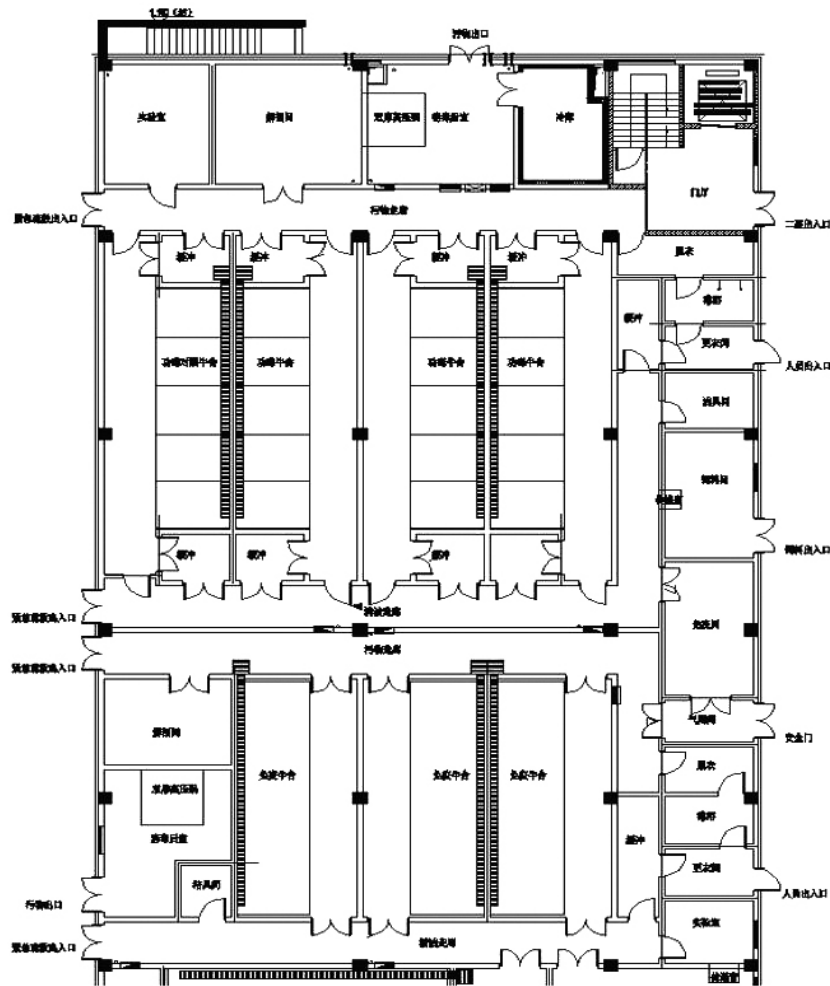


图5 牛动物房免疫区和攻毒区工艺布局图

3 装修设计

生物安全二级兽用生物制品动物实验区的装修设计应严格按照《生物安全实验室建筑技术规范》GB 50346-2011^[2]的第4.1.1条、第4.2.2、第4.1.14、第4.2.3、第4.2.4、第4.2.5、第4.2.6、第4.2.8条进行设计。小鼠、大鼠、鸡的生物安全二级兽用生物制品动物实验区通常按照7级（万级）洁净室设计，其围护结构通常为满足防火性能的轻质复合钢板结构，地面采用自流平地面或者PVC卷材地面。猪、牛的生物安全二级兽用生物制品动物实验区围护结构通常为砌块墙结构，地面采用水泥地面、自流平地面或者防滑地砖地面。

4 空调系统设计

对于生物安全二级兽用生物制品动物实验设施来讲，空调系统是设计中的至关重要的环节。动物房需通过空调系统来维持满足要求的环境，确保实验结果不受外部条件的影响。良好的气流组织能够

有效控制污染物，避免交叉污染。生物安全二级兽用生物制品动物实验设施的办公区和配套区可以采用普通空调系统，例如风机盘管加新风系统、VRV空调系统、分体空调系统。生物安全二级兽用生物制品动物实验设施的检疫区、安检区、免疫区、攻毒区的空调系统为全新风直流式空调系统。有洁净度要求SPF动物实验区送风采用高效过滤风口上送风，单层百叶排风口侧墙下排风或者上排风。

攻毒区的空调系统设计要严格按照《实验室生物安全通用要求》^[1]的第6.5.2.5条到第6.5.2.9条进行设计：攻毒区排风需要经过双极高效过滤器过滤后高空排放；攻毒区要维持绝对负压状态并要设置一定的压力梯度，气流流向为洁净走廊—动物饲养间—污物走廊—动物解剖间，洁净走廊-5Pa，动物饲养间-15Pa，污物走廊-25Pa，解剖间-30Pa。

空调系统新风通过空调机组进行热湿处理并送入房间，由排风机组高空排放。考虑到动物饲养过

程中粪便等散发出的气味对周围环境的影响,排风系统需要设置活性炭过滤器,吸附气味。动物房的温湿度通过监测排风总管内的温湿度,调节盘管的电动两通阀,从而达到满足要求的温湿度。

动物房采用全新风的空调系统,冷热消耗都很大,如果直接排放,会造成很大的能量浪费。为了避免新风和排风的参混对室内空气品质的影响,可以利用乙二醇热回收系统回收排风的冷热量,对能量进行回收,在寒冷地区,冬季的乙二醇热回收可以作为新风的预热手段,对加热盘管起保护作用。

攻毒区考虑动物实验区的消毒要求,可以设置消毒排风机对动物房进行循环消毒。

5 给排水系统设计

给水系统包括动物饮用水给水和普通生活生产给水,普通动物饮水应符合现行国家标准《生活饮用水卫生标准》GB5749^[5]的要求。屏障环境设施的净化区和隔离环境设施的用水应达到无菌要求。小动物(鼠、鸡)的饮用水应达到无菌要求,小动物

饮用水水量参照规范《实验动物设施建筑技术规范》中给出的水量计算。大动物(猪、牛)的饮用水水量按照动物重量计算,即每百千克动物重量,每天的饮水量为10L。进入攻毒区的给水管道均应设置倒流防止器,避免给水系统的回流污染。

动物实验室排水系统包括普通生活生产废水排水、安检、免疫区动物房冲洗污水排水、攻毒区动物房冲洗的有毒污水排水、灭菌柜的高温排水。大动物舍排水参照规范《建筑给水排水设计规范》GB 50015-2009 菜市场地面冲洗及保鲜用水量计算,即每平方米每日20L。兔、羊等实验动物设施的排水管道管径不宜小于DN150;屏障环境设施净化区内的地漏应采用密闭型。攻毒区污水的处理装置可采用化学消毒或高温灭菌方式。大动物实验室冲洗动物舍排水含大量动物粪便,用排水管道直接排水,容易造成管道堵塞,故在每个动物舍内设置集水坑,对粪便进行收集。

动物实验室室内有毒污水与普通污水分流,卫生间污水排水直接排至室外,经化粪池处理后接入厂区污水管网,安检、免疫区动物房冲洗污水排水,经室内集水坑沉淀后排至室外,经化粪池处理后接入厂区污水管网。安检、免疫区的灭菌柜高温排水排至室外厂区热废水管网,经厂区降温池后,温度小于等于40℃再排入厂区废水管网。

攻毒区的排水要严格按照《实验室生物安全通用要求》GB 19484-2008^[1]的第6.5.2.10条进行设计:攻毒区动物房冲洗的有毒污水排水,经集水坑沉淀后排至地下一层活毒废水处理间,攻毒区产生的废

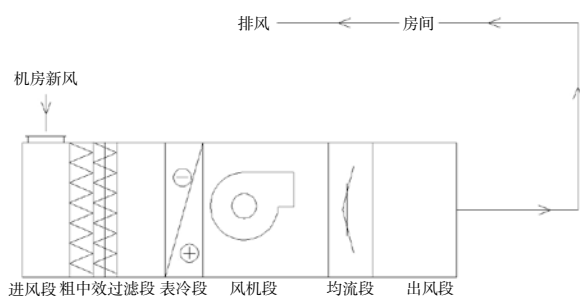


图6 空调机组大样图

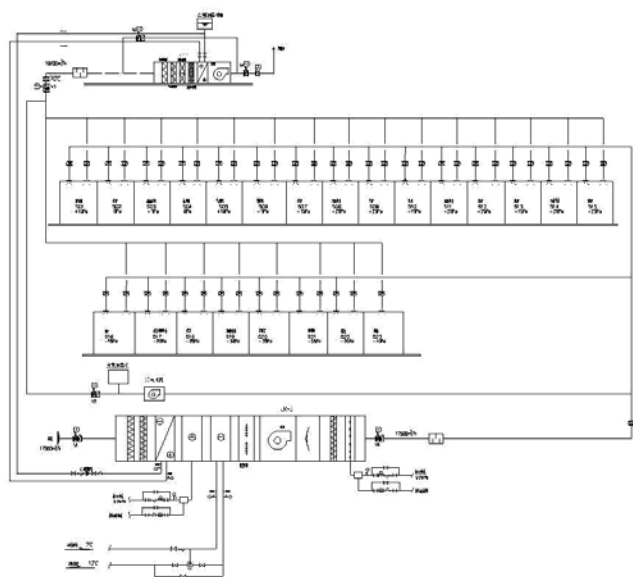


图7 牛动物房攻毒区空调原理图

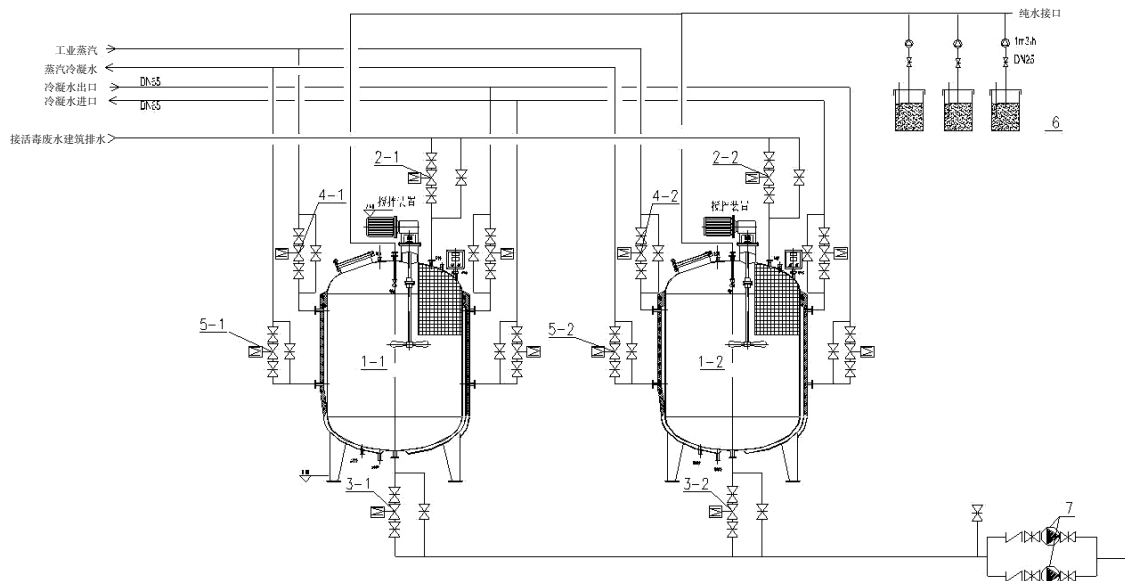


图8 牛动物房攻毒区污水处理原理图

水直接排至地下一层活毒废水处理间，待处理达标后再提升外排至厂区废水管网，攻毒区收集的动物粪便经高压灭菌柜灭菌后处理。

6 电气及自动控制系统设计

生物安全二级兽用生物制品动物实验设施电气专业设计内容主要包括：照明设计（工作照明、应急照明、动物照明）、插座及工艺设备配电、空调机组及动力设备配电、电话网络及安防系统、火灾自动报警系统、防雷接地及等电位接地系统、动力配电系统、空调机组自动控制系统。电气供电系统为生物安全二级动物实验设施提供能源，应确保所有系统能够协同运行以满足生物安全防护的基本要求：保护工作人员、保护实验室安全地运行保护环境和附近区域安全。

电气供电系统按照负荷分级的类别，应设计各自不同的供电系统方案，一级负荷应有双重电源供电，一级负荷中的特别重要负荷应由双重电源+在线式不间断电源（UPS）供电；二级负荷应有双回路电源供电。三级负荷由普通市电供电即可。在生物安全二级动物实验设施中，安检区、免疫区及其辅助区的照明、插座、空调机组配电为三级负荷；攻毒区及其辅助区的照明、插座、空调机组送风机组配电为二级负荷，建筑内的应急照明，消防用电负荷等为二级负荷；为满足攻毒区内负压环境要求，攻毒区及其辅助区的排风机组宜为一级负荷。

规范《实验动物设施建筑技术规范》GB 50447中对不同动物所需要环境指标各不相同，需要根据实验设施内的动物的数量及用电负荷的开启或关闭

来调节空调机组的送风温湿度，根据房间门的开启开关及过滤器的堵塞程度来调节空调机组送、排风机的运行频率。

7 结语

生物安全二级兽用生物制品动物实验设施设计要充分考虑动物饲养、实验等工艺要求（《实验动物 环境及设施》GB 14925-2010^[3]，《实验动物设施建筑技术规范》GB 50447-2008^[4]）；攻毒区要严格按照各项生物安全标准（《实验室 生物安全通用要求》GB 19489-2008^[1]，《生物安全实验室建筑技术规范》GB 50346-2011^[2]）对于工艺、装修、空调、给排水、电气及自动控制的设计要求。生物安全二级的建设标准对于兽用生物制品动物实验设施的设计，尤其是攻毒区的设计具有标准、实用的指导意义。

参考文献

- [1] 中国实验室国家认可委员会 .GB 19489-2008 实验室生物安全通用要求[S].北京: 中国标准出版社.2008.
- [2] 中国建筑科学研究院 .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.
- [3] 全国实验动物标准化技术委员会 .GB 14925-2010 实验动物环境及设施[S].北京: 中国标准出版社.2010.
- [4] 中国建筑科学研究院 .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.
- [5] 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所 .GB 5749-2006 生活饮用水卫生标准[S].北京: 中国标准出版社.2008.

生物安全实验室间气溶胶传播风险分析

周 权¹，冯 昕¹，曹国庆¹，梁 磊¹，张彦国¹，宋冬林²

(1. 中国建筑科学研究院有限公司，北京 100013；2. 中国科学院武汉病毒研究所，武汉 430071)

[摘 要] 本文借助生物安全实验室设计工程，利用动态隔离理论，在假设的污染物扩散条件下，适当提高房间换气次数，可以有效避免污染物对核心工作间的污染。

[关键词] 生物安全实验室；隔离系数；污染物浓度

0 引言

生物安全实验室，即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。(1-50346-2011) 2003 年非典后，我国生物安全领域进入了高速发展期。2004 年发布了《国家高级别生物安全实验室建设规划》，我国已经形成了高级别生物安全实验室体系的基本框架，大量的生物安全三级实验室通过检测并投入使用，到目前为止也建成了若干个生物安全四级实验室，由此构成了我国高级别生物安全实验室的基本框架，为我国防范重大传染病、生物安全风险，以及促进相关领域的国产化、工业化发展做出了重要贡献。在众多生物安全实验室之中，由于操作不当等原因造成的实验室感染(LAIs—laboratory-acquired infections)事故也层出不穷。Pike 等，早在 1978 年就针对已记录的 4000 多次实验室感染事故进行了分析，未知原因实验室感染比例高达 82%，并认为是由于感染性气溶胶在空气中的扩散而造成的。^[1] 2000~2009 年，实验室感染报道病例 83 例，感染途径以摄人和吸入性感染为主。^[2]

本文通过实际案例，对影响生物安全实验室中气溶胶传播的关键因素进行分析，以控制污染风险，确保生物安全实验室防护等级的实现。

1 项目概况

本项目为国内某科研单位的三级生物安全实验室的改造项目，位于原建筑一层东侧，建筑面积 2450m²，吊顶高度为 2.6m，轻质分隔墙体及吊顶均

为 50mm 厚彩钢岩棉复合板，十字中置铝连接。

三级生物安全实验室按照分析病毒的种类划分为三个独立区域，以 A 区为例，其平面图如图 1 所示，此区域为单走廊形式，并联设置了多套主实验室及缓冲间。实验室辅助工作区包括一更、缓冲；实验室防护区包括淋浴、二更、防护走廊、主实验室及其缓冲间、灭菌区。

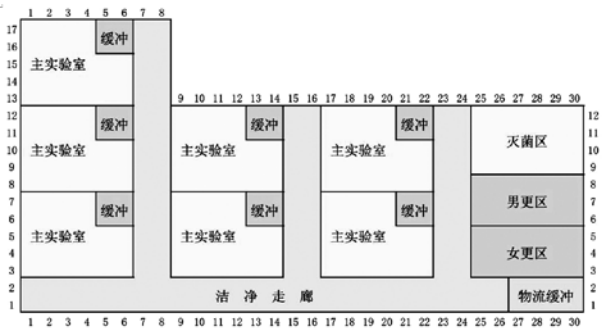


图 1 三级生物安全实验室平面示意图

2 关键因素分析

生物安全实验室内气溶胶的传播受到很多因素的影响，例如，主实验室内气流组织形式，相邻房间的压力差、温度差，主实验室的消毒方式，实验人员的密度等等。

2.1 压差

生物安全实验室相对外部环境应处于负压状态，这样才能有效的防止污染物向外泄露。

现行国内外规范关于相邻房间压力梯度的要求及相关说明，详见表 1。

表 1 国内外生物安全实验室标准关于房间压力的要求

序号	规范名称	条文及内容
1	《生物安全实验室建筑技术规范》GB 50346-2011	表 3.3.2 ● ABSL-3 中的 a 类和 b1 类相当于大气的最小负压为 -60Pa，与室外方向上相邻相通房间的最小负压差为 -15Pa； ● ABSL-3 中的 b2 类相当于大气的最小负压为 -80Pa，与室外方向上相邻相通房间的最小负压差为 -25Pa；
2	Biotechnology-Laboratories for research, development and analysis-Guidance for containment of animals inoculated with microorganisms in experiments (BS EN 12738:1999) ^[3]	7.1.4 (ACL3-Animal containment level 3) 动物区的某些房间应采用机械通风的方式维持房间负压，应设置独立的排风管道，且排风必须经过高效过滤器过滤后排放。通风系统应能够防止任何区域出现反向气流和正压的情况。
3	Canadian Biosafety Standard (2 Edition) 2016 ^[4]	3.5.2 通风空调系统应能够在各房间或区域之间形成向内的气流 (IDA-Inward directional airflow)。

2.2 温差

生物安全实验室各房间的使用功能各有差别，主实验室内工艺设备配置数量及种类差别较大，造成内热源散热量相差较大，且国内净化空调系统中基本不采用送风末端电加热形式，使得同一个净化空调系统中各房间的室温存在差异。相邻房间的温度差，将会加速气溶胶的扩散。表1为某生物安全三级实验室的实测结果，7个净化空调系统主实验室与其缓冲间的测试温度和温度差，如下表所示：

表2 某生物安全动物三级实验室各系统房间温度汇总表

系统序号	1	2	3	4	5	6	7
主实验室温度/℃	23.6	22.9	23.9	24.8	23.9	23.8	23.2
相邻缓冲间温度/℃	24.5	23.9	24.4	25.4	24.9	24.1	23.5
温度差/℃	0.9	1.0	0.5	0.6	1.0	0.3	0.3

根据以上实测数据，各系统房间最大温差值为1.0℃；从上述实测数据可以发现各系统中缓冲间温度一般都高于其主实验室房间温度，分析其原因，风阀线性调节区间较小或系统不平衡率相差较大，造成实际换气次数无法达到设计值。

3 隔离系数计算与分析

3.2 根据动态隔离理论，隔离系数的β_{5,2}^[5]计算式：

β_{5,2} = (N₁ / N₅) = (V₂V₃V₄V₅α⁴ / (Q₁Q₂Q₃Q₄(e^{-n(t₁+t₂+t₃)/60})) (1)

式(1)中：N_{1,5}为房间1,5的污染物浓度(个/m³(CFU/m³))；V_{2,3,4,5}为房间2,3,4,5的体积，10.8m³、78m³、10.4m³、67.6m³；Q₁为1房间门开启后由1房间进入到2房间的风量(m³)；Q₂为2房间门开启后由2房间进入到3房间的风量(m³)；Q₃为3房间门开启后由3房间进入到4房间的风量(m³)；Q₄为4房间门开启后由4房间进入到5房间的风量(m³)；α为混合系数，取0.9；n为换气次数(次/h)；t₁为自打开1房间门至人员走到2房间外门前所用的时间(min)；t₂为自打开2房间外门至人员走到4缓冲间门前，并经过门禁确认后，

开启外门进入缓冲间所用的总时间(min)；t₃为人员经过4房间，开启5房间门并进入主实验室所用的总时间(min)。

房间吊顶高度为2.6m；由开门对流、开门卷吸以及人员走动共同作用下，风量Q₁取值为1.62m³^[5]，设Q₁=Q₂=Q₃=Q₄=1.62m³。

一般成年人的行走速度为1.4m/s^[6-8]，因实验人员在防护区内穿着相应的个人防护装备，行走速度会大幅度降低，设实验人员的步速为1.0m/s。

在生物安全实验室换气的自净作用下，瞬时浓度计算公式如下：

(N_t / N₀) = e^{-nt/60} (2)

式(2)中：N₀为t=0时，房间污染物浓度(个/m³(CFU/m³))；N_t为t时刻，房间污染物浓度(个/m³(CFU/m³))。

根据温占波等，对实验室产生微生物污染风险进行的定量研究，在高浓度吹吸、培养瓶意外跌落和注射工图意外喷出产生的气溶胶污染浓度高达10³~10⁴CFU/m³。^[7]根据以上理论计算方法，通过以下假设两种特殊情况进行计算与分析。

假设1：

敞开式污染源位于主实验室(房间1)内，各主实验室污染物浓度计算如下：

隔离系数的β_{5,2}，如下式计算结果：

β_{5,2} = (10.4×26×10.4×67.6×0.9⁴ / (1.62⁴×(e^{-20×5.1/60}))) = 99128

此时1房间内的浓度为N_t，如下式计算结果：

N_t = 10⁴ × e^{-20×5.1/60} = 1889

隔离系数的β_{5,3}，如下式计算结果：

β_{5,3} = (26×10.4×67.6×0.9⁴ / (1.62³×(e^{-20×5.1/60}))) = 99128

如表3所示：

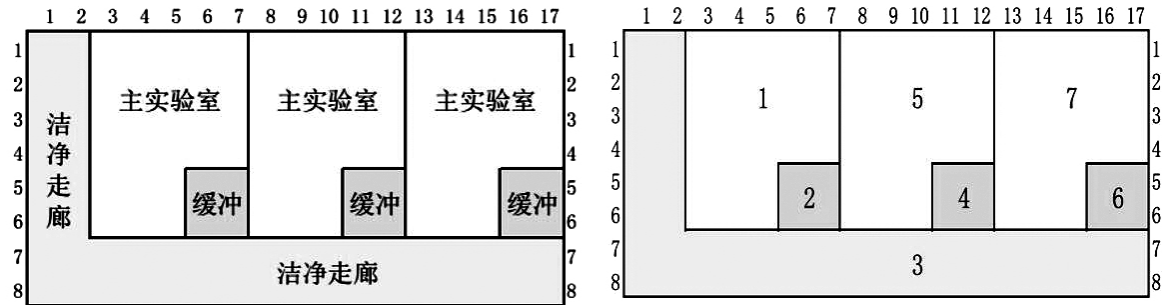


图2 计算核心单元示意图

表3 敞开式污染源位于主实验室内

工况描述	房间污染物浓度 (CFU/m ³)		
	1 房间	5 房间	7 房间
门全部关闭	10 ⁴	0	0
1 房间 1 人出, 其它门均关闭	1889	0	0
1 房间 1 人出, 4、6 房间门开	1827	0	0

此时, 房间换气次数为 20 次/h, 考虑实验人员对污染现场的处理时间, 隔离系数计算采用的总时间为 2.1min。

假设 2: 敞开式污染源位于走廊 (房间 3) 内, 各主实验室污染物浓度计算采用上述计算公式, 计算结果, 如表 4 所示:

表4 敞开式污染源位于走廊内

工况描述	房间污染物浓度 (CFU/m ³)		
	3 房间	5 房间	7 房间
门全部关闭	10 ⁴	0	0
1 房间 1 人出, 4、6 房间门开	1827	2	1

此时, 房间换气次数为 20 次/h, 考虑实验人员对污染现场的处理时间, 隔离系数计算采用的总时间为 2.1min。

依据以上计算方法, 当选取更大的换气次数, 计算结果如图 3 所示:

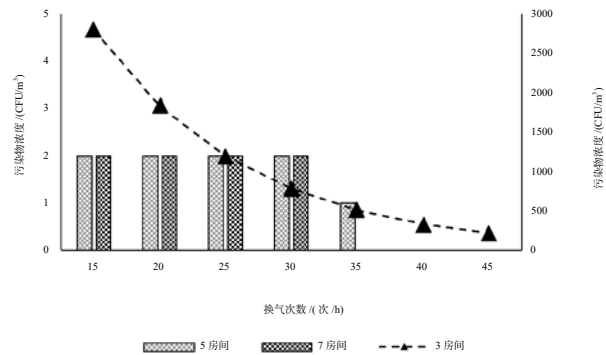


图3 敞开式污染源位于主实验室内

我国规范规定, 三级生物安全实验室, 若二级屏障的洁净度等级为 7 级时, 建议最小换气次数为 15 次/h, 在实际项目设计中, 可能需要增大换气次数消除室内余热, 或者为补充局部排风量而增加新风量, 势必都会造成房间的实际换气次数远超过规范中的推荐值, 有些甚至达到 60 次/h, 这就需要设计师准确核对设备清单, 详细的负荷计算, 且不可套用推荐数值一带而过。

3.2 计算结果分析

(1) 缓冲间应设置送风

当缓冲间无送风是 α_1 , 可按照 0.35 计算, 此时降低隔离能力高达 43.7 倍。若缓冲间未设置送风, 在打开主实验室门时可能会造成气流的反向流动, 增加了气溶胶传播的风险, 且与规范相抵触。

(2) 适当提高换气次数, 隔离效果越好

当污染源位于某间主实验室时, 其他主实验室并未受到影响, 此时提高换气次数并无实际意义; 当污染源位于走廊时, 依据如上计算, 在换气次数达到

35~45 次/h, 其他主实验室污染物浓度降低至 0;

可见适当增加房间换气次数, 能够降低房间的污染物浓度, 但是, 应当注意到当换气次数达到某临界值时, 对隔离系数的影响并不大, 设计师不必一味追求很高的换气次数。

(3) 本项目各核心实验室仅设置了一个缓冲间, 从理论和实践上都能够满足使用要求, 确实没有必要再增加气闸室等同类的人流缓冲间, 既可以节约投资, 又能够保证房间的洁净度, 顺利通过验收。

4 结论

当污染源处于不同位置时, 利用动态隔离理论, 计算得出核心间的隔离系数及污染物浓度, 可知, 设置缓冲间可将隔离能力提高 43.7 倍; 当房间的换气次数提高到 35~45 次/h, 在假设的条件下, 主实验室均不会被污染, 但过高的房间换气次数, 不会显著提高隔离系数, 即不会显著提高系统隔离能力; 设计师应准确计算核心间内热源发热量, 修正负荷计算, 不可仅仅套用标准推荐换气次数。

参考文献

- [1] Pike RM. Laboratory-associated infections: incident, fatalities, causes and prevention[J]. Annu Rev Microbiol, 1979, 33: 44-66.
- [2] 魏强, 李晓燕, 王雷, 等. 近年病原微生物实验室获得性感染病例分析及其控制策略的初步研究 [J]. 中华实验和临床病毒学杂志, 2011, 25(5): 390-392.
- [3] Biotechnology-Laboratories for research, development and analysis-Guidance for containment of animals inoculated with microorganisms in experiments (BS EN 12738), 1999: 6.
- [4] Canadian Biosafety Standard (2 Edition), 2016: 36.
- [5] 许钟麟著, 隔离病房设计原理 [M], 82, 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] Browning, R.C., Baker, E.A., Herron, J.A. and Kram R. Effects of obesity and sex on the energetic cost and preferred speed of walking. Journal of Applied Physiology, 2006, 100(2): 390-398.
- [7] Mohler, B.J., Thompson, W.B., Creem-Regehr, S.H., Pick, H.L., Jr, Warren. Visual flow influences gait transition speed and preferred walking speed. Experimental Brain Research, 2007, 181(2): 221-228.
- [8] Levine, R.V. & Norenzayan, A. The Pace of Life in 31 Countries. Journal of Cross-Cultural Psychology, 1999, 30(2): 178-205.
- [9] 温占波, 陈咏, 杜茜, 等. 病原微生物实验室实验操作对室内空气产生微生物污染的研究 [J]. 军事医学, 2013, 37(1): 1-5.

某生物安全三级检验用动物舍电气系统设计

杨 峰

(中国建筑技术集团有限公司, 北京 100013)

[摘 要] 根据 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》、农业部第 2573 号公告《兽用疫苗生产企业生物安全三级防护标准》和 GB 19489-2008《实验室 生物安全通用要求》对于生物安全三级检验用动物舍的要求, 详细介绍了生物安全三级检验用动物舍电气配电系统、自控系统。阐述了生物安全三级检验用动物舍温度、相对湿度、压力梯度的自控方法, 报警系统的设置方案, 给出相关的节能、报警及安全防范措施。

[关键词] 生物安全三级; 检验用动物舍; 自控; 节能

1 工程概况

该项目位于新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市, 是按照 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》、农业部第 2573 号公告《兽用疫苗生产企业生物安全三级防护标准》、GB 19489-2008《实验室 生物安全通用要求》设计的生物安全三级检验用动物舍。

检验用动物舍为独立建筑。占地面积 2559.33m², 建筑面积 10390.56m², 其中地上建筑面积 7800.28m², 地下建筑面积为 2590.28m²。检验用动物舍为多层结构形式, 地下 1 层主要为活毒废水处理间 / 尸体处理间, 其余部分为管道夹层; 1 层为检验用动物舍, 1 层和 2 层之间为技术夹层, 主要布置检验用动物舍的送、排风高效过滤单元 (BIBO), 2 层为空调机房, 布置了检验用动物舍的空气处理机组和排风机组。

如图 1 所示。

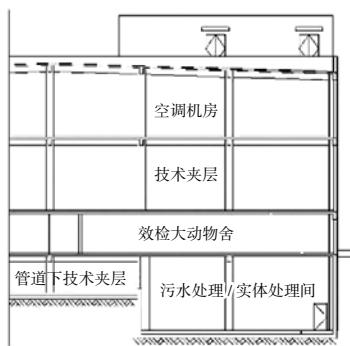


图 1 检验用动物舍剖面图

2 工艺流程简介

本项目工艺流程按照兽药生产质量管理规范、农业部第 2573 号公告并结合 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》和 GB 19489-2008《实验室 生物安全通用要求》进行设计。图 2 为本项目工艺平面示意图。

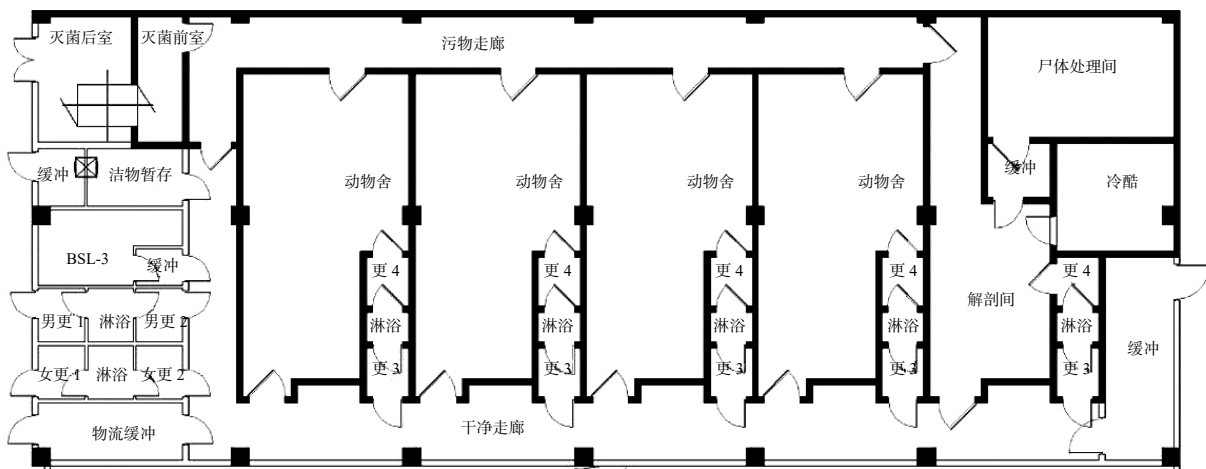


图 2 工艺平面示意图

人流: 更 1→淋浴→更 2→洁净走廊→更 3→淋浴→更 4→动物舍。
物流: 缓冲→洁物暂存→洁净走廊→动物舍→灭菌前室→双扉灭菌柜→灭菌后室。
动物流: 动物缓冲→干净走廊→动物舍→污物走廊→解剖间→尸体处理间。

3 配电系统

本次设计的检验用动物舍生物安全等级上属于动物生物安全三级实验室中的 b2 类,即不能有效利用安全隔离装置进行操作的实验室。根据 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》7.1.3 的要求,ABSL-3 中的 b2 类实验室和四级生物安全实验室必须按一级负荷供电,特别重要负荷应同时设置不间断电源和自备发电设备作为应急电源,不间断电源应能确保自备发电设备启动前的电力供应。

3.1 供电系统

考虑项目所在园区实际电源情况,本次设计采用双路 10kV 供电,线路互为备用;设置两台 800kVA 变压器,低压侧两段母线设置联络开关;对于特别重要负荷:检验用动物舍的送风机、排风机、气密门充气系统、生物安全柜、动物隔离设备、照明系统、自控系统、监视和报警系统等供电,设置 UPS 不间断电源和常载功率 600kW 柴油发电机组作为应急电源。如图 3 所示。

3.2 照明系统

动物舍设置不少于 30 分钟的应急工作照明,以便紧急情况发生时工作人员对未完成的实验进行处理。

动物舍内设置动物照明,大动物舍动物照度要求为 100~200lx,小动物舍照度要求为 15~20lx。小动物舍的动物照度很低,需要设置调光开关以满足标准要求。大动物舍和小动物舍的动物照明均需设

置定时开关,以便模拟白天和夜晚的生活状态。

4 自控系统

4.1 温湿度控制系统

空调机组冷热盘管独立设置,冬季、夏季控制策略由人工进行切换。制冷控制模式:根据排风温度实测值,通过调节表冷器电动两通阀,调节表冷器盘管水流量,对室内温度进行控制。供热加湿控制模式:乌鲁木齐市冬季空调计算室外温度 -23.7°C ,考虑到防冻要求,加热盘管水系统设置电动三通阀,保证加热盘管流量恒定,降低盘管内水结冰的风险。根据排风湿度的实测值,调节电动三通阀控制混水比,对室内温度进行控制。加湿量根据排风湿度实测值,调节加湿盘管的电动两通阀,对室内湿度进行控制。

4.2 压差控制系统

检验用动物舍属于 ABSL-3 实验室,根据 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》为保证 ABSL-3 实验室的长期运行和维持合理的压力梯度的要求,送、排风系统均设置了备用风机。备用风机可自动切换,切换过程中能够保持有序的压力梯度。各房间均设置对大气的压力传感器,对房间压力进行监控,保证房间的压力梯度。

动物舍,解剖间和尸体处理间等核心工作间采用定送风量,变排风量的控制模式,排风量根据房间压力变化调整,从而维持房间压力稳定。如图 4(a)所示。辅助房间采用定送风量,定排风量的控制模式,房间通过保证送、排风量的差值,来维持房间压力的稳定。如图 4(b)所示。

4.3 报警系统

根据 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》7.3.3 的要求,自控系统报警分为重要参数报警和一般参数报警。重要参数报警应为声光报警和显示报警,一般参数报警应为显示报警。动物舍内设置紧急报警按钮。

过滤器阻力增大、风机正常切换、温湿度偏离正常值等为一般参数报警,在动物舍的入口处和动物舍内设置显示屏,一般参数报警会显示在动物舍的入口处和动物舍内的显示屏上,并且在监控室上位机上显示。

动物舍出现正压、压力梯度持续丧失、风机切换失败、停电、火灾等,对安全有影响,需要考虑是否让实验活动终止的报警为重要参数报警,发生重要参数报警,动物舍和监控室内声光报警同时报警,以便相关人员能尽快撤离动物舍。

动物舍内设置紧急报警按钮,以便需要时实验人员可向监控室发出紧急报警。

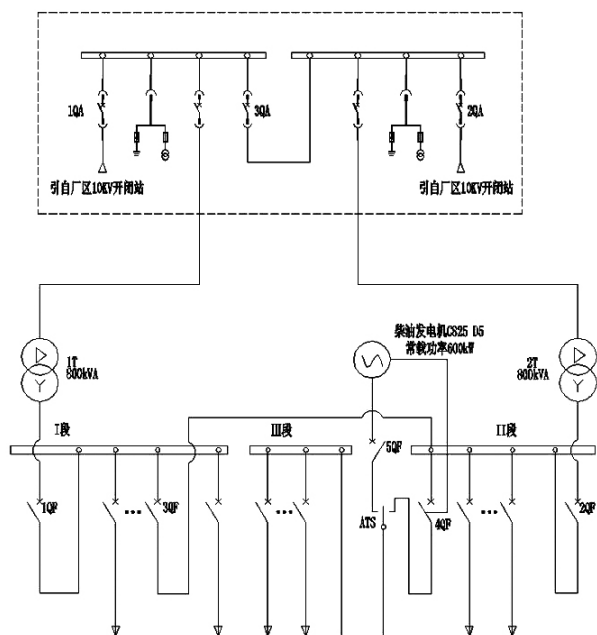
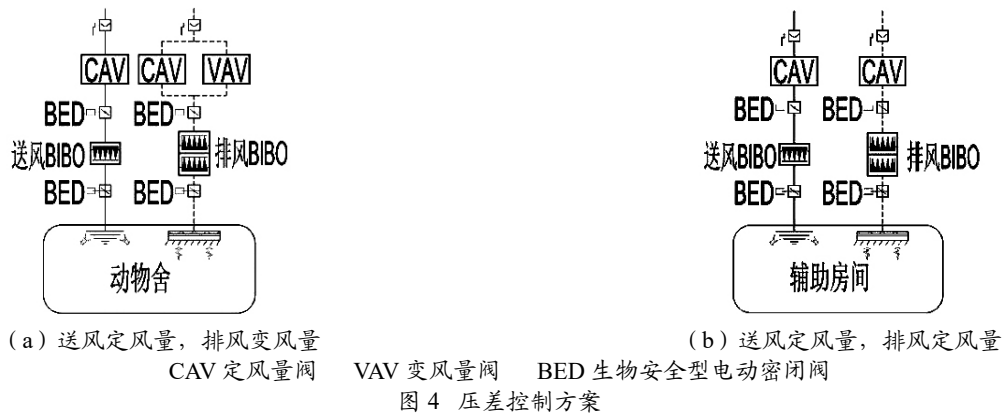


图 3 检验用动物舍配电单线系统图



5 安全防范和通信系统

动物舍的更衣间、缓冲间、淋浴间等房间的门采用互锁措施, 为了减少污染物外泄、保持压力梯度, 互锁后能保证不同压力房间的门不能同时打开。

互锁门上设置紧急手动解除互锁开关, 中控系统具有解除所有门或指定门互锁的功能。在紧急逃生时, 为了避免影响人员撤离, 可通过中控系统解除所有门或指定门的互锁, 每扇门上设置的紧急手动解除互锁开关, 可以使工作人员手动解除互锁。

动物舍的淋浴间设置强制淋浴设备, 强制淋浴以淋浴间内侧门出门开启按钮为触发信号, 过 10s 淋浴头水阀自动打开, 强制淋浴 5min 后, 淋浴系统关闭, 第二道门方能打开。

为减少外部因素对动物舍内工作人员的影响, 监控室内的电话为开关式, 动物舍内采用电话面板, 减少工作人员与通话设备的接触, 使工作人员可以随时方便的与监控室人员通话。

6 消防

生物安全三级检验用动物房属于动物生物安全三级实验室中的 b2 类, 且为独立建筑。根据 GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》8.0.7 和 8.0.8 的规定, 防护区不设置自动喷水灭火系统和机械排烟系统, 且送风、排风系统不设置防火阀。只设置火灾自动报警系统。

7 节能、报警及安全防范措施

(1) 使用时各分区可以分别运行工作, 不用时运行按值班工况节约能源。

(2) 送排风机采用变频调节控制, 节约能源; 变频器采用集成 EMC 滤波器的成套产品, 同时设置变频器专用滤波器, 使 $THDi \leq 5\%$, 减少对电网和环境的电磁干扰和电磁污染。

(3) 照明采用高效 T5 日光灯管, 以确保相关区域的照度要求同时满足建筑节能的要求。

(4) 本工程采用 2 代非晶质变压器, 能有效过

滤谐波, 低噪音、低能耗。

(5) 在进入动物舍的入口, 动物舍内均设置压力显示装置和声光报警器, 工作照明采用 UPS 不间断电源供电, 使得工作人员可以在紧急情况下安全撤离。

8 结语

(1) 风机变频控制室检验用动物舍有效节能措施之一, 根据运行实际情况调节送、排风机可有效节能;

(2) 检验用动物舍压力梯度控制是安全运行和污染控制的保证, 自控系统合理设计是维持检验用动物舍合理压力梯度的必要条件;

(3) 动物舍的报警方案设计异常重要, 不漏报、不误报、分轻重缓急、传达到位, 工作人员在安全的状态下进入动物舍, 在紧急的情况下撤离, 保证工作人员的安全。

本文仅对检验用动物舍电气系统的设计进行了介绍, 检验用动物舍是一个综合的系统工程, 需要根据检验用动物舍的特点, 各专业相互配合, 共同完成。

参考文献

- [1] 许钟麟. 空气洁净技术原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] GB 50346-2011 生物安全实验室建筑技术规范 [S].
- [3] GB 19489-2008 实验室 生物安全通用要求 [S].
- [4] 农业部第 2573 号公告 兽用疫苗生产企业生物安全三级防护标准 [S].
- [5] 曹国庆, 张益昭等. BSL-3 实验室空调系统风机配置运行模式探讨 [J]. 环境与健康杂志, 2009, 6(26).
- [6] 曹国庆, 刘华等. 由生物安全实验室检测引发的有关设计问题的几点思考 [J]. 暖通空调, 2007, 37(10).
- [7] 牛维乐. 电加热对生物安全三级实验室压力影响的理论探讨 [J]. 洁净与空调技术, 2013, 1.

化学淋浴系统现场检测及评价方法研究

党 宇

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

[摘 要] 介绍了高等级生物安全实验室化学淋浴系统的构成, 依据现有标准规范 RB/T 199-2015《实验室设备生物安全性能评价技术规范》, 结合现场实际检测数据对化学淋浴系统的综合性能进行了分析, 对检测过程中遇到的问题进行了探讨, 给出了相应的解决方案。

[关键词] 生物安全实验室; 化学淋浴系统; 检测项目; 风险

0 引言

近年来, 随着我国经济水平及科学技术的发展, 我国许多生物安全实验室进行了改造或重建, 逐渐建设起一批高等级生物安全实验室。随着高等级生物安全实验室的建成, 生物安全研究领域也随之扩大化, 研究对象的危险性也随之加剧。各实验室为了保证实验人员的安全及公共卫生安全, 对高等级生物安全实验室的硬件要求也有了相应的提高。化学淋浴系统是高等级生物安全实验室中一个关键的防护设备, 适用于身着防护服的人员消毒, 在人员离开高污染区防止可能产生的污染。笔者结合化学淋浴系统的测试项目, 给出了化学淋浴系统检测中应注意的问题, 期待可以为化学淋浴系统的可靠性

验证提供一些有益的参考。

1 结构及操作步骤

1.1 结构

化学淋浴系统主要包括: 不锈钢封闭箱体、两道互锁式气密门(常规为充气式气密门)、加药系统、喷淋系统、控制系统、送/排风系统、排水系统及供气系统(提供给正压防护服)。化学淋浴系统工艺见图 1, 化学淋浴系统主要构件实物图见图 2。

1.2 操作步骤

操作步骤分成两大类, 第一类是人员从辅助工作区进入污染区的步骤:

(1) 操作人员从辅助工作区, 准备进入化学淋浴间。

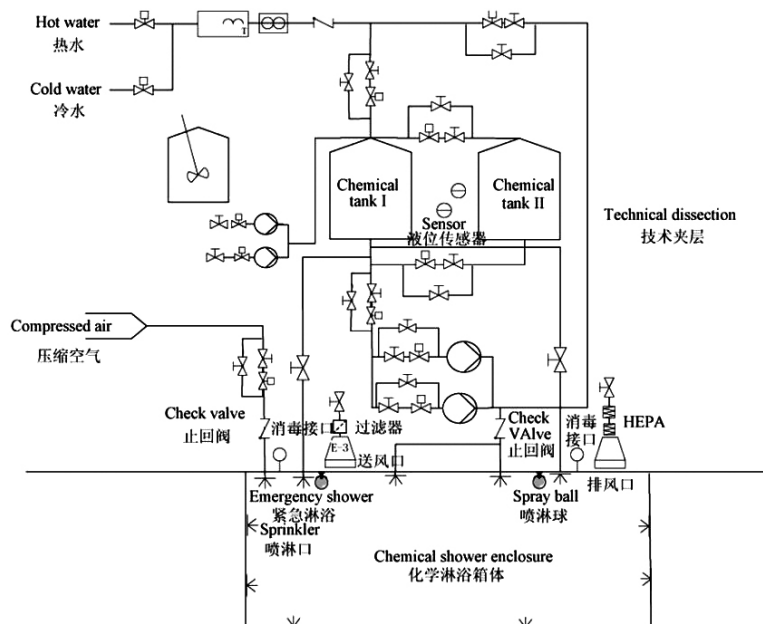
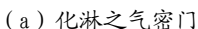


图 1 化学淋浴系统工艺图

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“生物安全关键技术研发专项”课题“高等级病原微生物实验室风险评估体系建立及标准化研究”(编号: 2016YFC1202202)。

(2) 操作人员从化学淋浴间进入污染区。

(3) 启动化学淋浴消毒模式, 对化学淋浴间进行消毒。因为操作人员从化学淋浴间进入污染区时, 两个区域空气联通, 必然有污染区内空气进入化学



(c) 化淋之排水系统防回流
气动阀图

(d) 化淋之送、排风系统

图 2 化学淋浴系统主要构件实物图

第二类是人员从污染区进入辅助工作区的步骤:

(2) 工作人员事先在淋浴系统的控制面板上进行各项淋浴参数的设定(也可以提前统一设置)。

(3) 按下进口处气密门的开启按钮, 充气门放气后断电解锁 (以充气式气密门为例), 人员打开门进入到淋浴间。关闭充气门后, 两扇气密门在消毒程序结束之前都是锁上的。

(5) 按下淋浴间内的消毒程序启动按钮, 系统自动开始运行。如果中途遇到紧急突发状况, 可按下中止按钮, 停止淋浴。

(6) 安置在淋浴内部超声喷雾喷头定量 喷出 5~10 微米的含有化学药剂的雾气, 会有效的附着在防护服外表面上, 对操作人员进行完全消毒, 喷雾时间以设定为准, 一般为 60 秒。

(7) 在喷雾阶段之后, 冲洗喷头开始运行, 对人员进行冲洗, 冲掉人员身上试剂形成的水珠, 时间可以调节, 这是人员必须的最后一道净化程序。一般情况下 2 分钟。

(8) 之后空气喷淋可以运作，对防护衣上的残余水滴进行吹干。

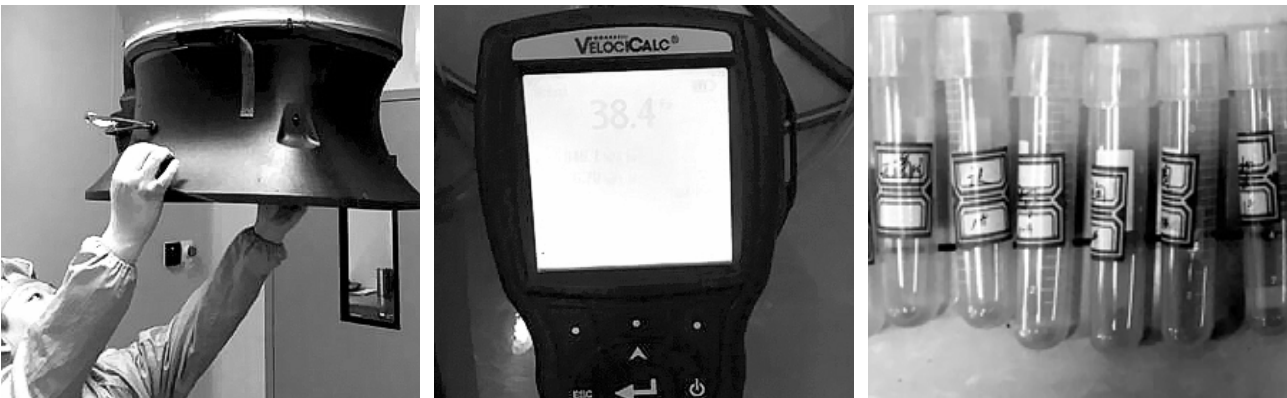
(9) 待系统自动停止一切程序后, 人员开启另一侧气密门离开淋浴间。

(10) 根据需要, 可以设定淋浴系统进行自清洗, 对淋浴间内表面进行消毒。

(11) 操作人员脱除防护服进入洁净区。

对于化学淋浴系统的测试方法及评价标准主要依据 RB/T 199—2015《实验室设备生物安全性能评价技术规范》^[1]进行,该规范分别对箱体内外压差、换气次数、给排水防回流措施、液位报警装置、箱体气密性、送风高效过滤器检漏、排风高效过滤器检漏及消毒效果验证。具体测试方法及评价标准见表1,部分检测项目现场测试见图3。

序号	测试项目	评价标准	测试方法	测试仪器
1	箱体内外压差	箱体内外压差应满足送排风系统正常运行时, 箱体内外与室外方向上相邻房间的最小负压差应不低于-10Pa。	应符合 RB/T199-2015 相应条款规定	压差计
2	换气次数	换气次数不应小于 4 次 /h。	应符合 GB 50346 或 GB 50591 相应条款	风量罩或风速仪
3	给排水防回流措施	给排水防回流措施应对照说明书, 检查化学淋浴消毒装置供水(消毒水和清洁水)和排水管道是否采取了防回流措施。	应符合 RB/T199-2015 相应条款规定	现场观察
4	液位报警装置	在化学淋浴消毒装置药液储罐内加水至高位或排水至低位时, 自控系统可声光报警。	应符合 RB/T199-2015 相应条款规定	现场验证
5	箱体气密性	密封化学淋浴消毒装置的门、给水(气)及排水口和送排风口后, 箱体在-500Pa 压力下, 20min 内自然衰减的压力小于 250Pa。	应符合 GB 50591 压力衰减检测法相应条款	压差计, 气泵
6	送 / 排风高效过滤器检漏	对于扫描检漏测试, 被测过滤器滤芯及过滤器与安装边框连接处任意点局部透速率实测值不得超过 0.01%; 对于效率法检漏测试, 当使用气溶胶光度计进行测试时, 整体透速率实测值不得超过 0.01%; 当使用离散粒子计数器经行测试时, 置信度为 95% 的透速率实测值置信上限不得超过 0.01%。	应符合 GB 50346 或 GB 50591 相应条款	气溶胶光度计或激光尘埃粒子计数器
7	消毒效果验证	正压防护服表面(头部、前胸、后背、腋下、裤裆、脚底)及箱体必要部位消毒效果验证, 所有样本的杀灭对数值不小于 3。	应符合消毒技术规范相应条款	指示微生物及培养箱



(a) 换气次数测试 (b) 压力测试 (c) 消毒效果验证

图3 现场测试验证

3 实测数据及分析

3.1 静压差、换气次数及气密性

表2中给出了3个品牌化学淋浴系统箱体内外压差、换气次数及箱体机密性3个参数的实测值，可以看出这3个参数都是满足规范要求的（国产品牌是在生产车间内进行检测，没有用在实际工程中，所以没有与相邻房间的压差）。但是化学淋浴的换气次数及化学淋浴与相邻房间的压差均远远大于规范中的要求，这是因为调试过程中主要考虑到穿正压防护服进入化学淋浴间的工作人员，当把正压防护服接入生命支持系统后，就相当于向化学淋浴箱体内送风，为了不让化学淋浴箱体出现压力逆

转，调试人员在调试过程中把化学淋浴箱体的换气次数及相对压差放大，避免出现化学淋浴压力逆转。

3.2 送 / 排风高效过滤器检漏

化学淋浴系统箱体内的送 / 排风高效检漏方法主要有扫描检漏、全效率检漏两种^[2-3]，按照《洁净室施工及验收规范》GB 50591-2010^[4]及《生物安全实验室建筑技术规范要求》GB 50346-2011^[5]中规定对于采用扫描检漏的高效过滤器，上游 $\geq 0.5\mu\text{m}$ 粒子浓度在不小于4000Pc/L的情况下，下游 $\geq 0.5\mu\text{m}$ 的粒子浓度不应超过3Pc/2.83L；对于不能进行扫描检漏的高效过滤器，上游0.3~0.5 μm 粒子浓度在不小于200000粒的情况下，下游0.3~0.5 μm 粒子的史

表2 实测3个品牌箱体内外压差、换气次数及箱体气密性

品牌	序号	房间名称	换气次数 (次/h)	静压差最小值（静态值） (Pa)	静压差稳定值（动态值） (Pa)	起始测试压力 Pa	终止测试压力 Pa	测试时间 min
法国某品牌	1	化学淋浴间 1	25.0	-33（对正压更衣 1） -65（对大气）	-61（对大气）	—	—	—
	2	化学淋浴间 2	28.5	-36（对正压更衣 2） -55（对大气）	-43（对大气）	—	—	—
	3	化学淋浴间 3	26.1	-27（对正压更衣 3） -64（对大气）	-35（对大气）	—	—	—
	4	化学淋浴间 4	25.2	-23（对正压更衣 4） -51（对大气）	-42（对大气）	-500	-408	20
德国某品牌	1	化学淋浴间 1	159.4	-23（对防护服更换 1） -105（对大气）	-95（对大气）	-500	-280	20
	2	化学淋浴间 2	128.1	-31（对防护服更换 2） -111（对大气）	-101（对大气）	-500	-400	20
	3	化学淋浴间 3	163.8	-28（对防护服更换 3） -108（对大气）	-95（对大气）	-500	-440	20
	4	化学淋浴间 4	155.5	-30（对防护服更换 4） -110（对大气）	-105（对大气）	-500	-295	20
	5	化学淋浴间 5	151.1	-31（对防护服更换 5） -109（对大气）	-101（对大气）	-500	-431	20
	6	化学淋浴间 6	146.8	-23（对防护服更换 6） -106（对大气）	-105（对大气）	-500	-511	20
	7	化学淋浴间 7	186.4	-28（对防护服更换 7） -110（对大气）	-100（对大气）	-500	-416	20
	8	化学淋浴间 8	183.6	-25（对防护服更换 8） -105（对大气）	-101（对大气）	-500	-426	20
	9	化学淋浴间 9	167.4	-22（对防护服更换 9） -104（对大气）	-99（对大气）	-500	-405	20
国产某品牌	1	化学淋浴间	31.8	-79（对大气）	-80（对大气）	-513	-476	20

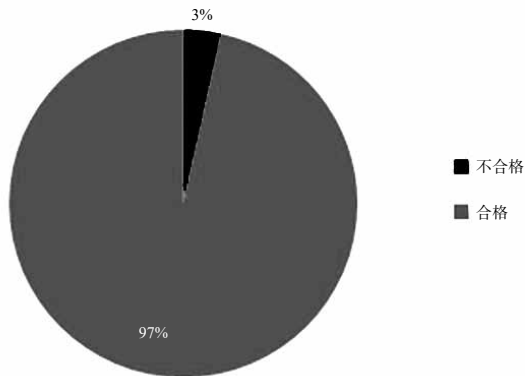


图4 高效过滤器完整性合格率分布情况

册计数效率及置信度为95%的下限效率均不应低于99.99%。

按照GB 50591-2010《洁净室施工及验收规范》及GB 50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范要求》对三个品牌的14套送/排风高效过滤器检漏检测进行分析,发现测试样本中的送、排风高效过滤器检漏合格率为97%,见图4。

从测试结果可以看出,送、排风高效过滤器检漏合格率较高,其主要原因是因为目前应用在化学淋浴上的高效过滤器,所选用的材料及工艺安装形式较为成熟(油槽或者气动压紧式),加之大部分厂家在现场安装完毕后均对该项目进行自检,减少滤芯破损及安装边框泄漏现象的发生。而对于样本中有3%不合格的过滤器,主要还是过滤器安装过程中不仔细导致过滤器破损造成的,见图5。

4 探讨

通过化学淋浴系统的现场测试及对化学淋浴运行模式的深入了解,发现有些测试验证方法仍不能很好的降低使用过程中的风险,存在问题举例如下:

(1) 目前调研的三个厂家化学淋浴消毒装置药液储罐内加水至高位或排水至低液位时,自控系统声光报警均正常,均能满足规范中的要求。但是如果实验室人员刚进入化学淋浴,储罐就发生低液位报警了,而此时实验室人员还是要进行化学淋浴的。如果储罐内剩余的液体不能满足化学淋浴一次完整消毒所需要的用液量,那么就意味着实验室人员的防护服上消毒不彻底,就可能把实验室内的病菌带出污染区,从而增大风险。建议调试和现场验证时,储罐低液位报警后,再测试下剩余液体可否满足化学淋浴系统一次完整的消毒(人员数量按照预先设定的最多可能人数),从而避免风险。

(2) 化学淋浴系统的消毒效果验证条件不明确,



图5 高效过滤器滤芯破损

有的只针对正常情况下的化学淋浴系统的效果进行了验证,缺少紧急淋浴时的消毒效果验证。目前化学淋浴系统都有一套紧急淋浴系统,当化学淋浴自控系统出现问题时,操作人员可以在化学淋浴间进行消毒。建议紧急淋浴系统的消毒效果验证也应该明确要求,必须达到消毒要求,从而避免风险。

5 结语

高等级生物安全实验室的化学淋浴系统作为辅助工作区与污染区之间的重要屏障,对保证污染区内污染物不扩散至辅助工作区起到至关重要的作用。做好化学淋浴系统的维护和定期检测,对保证实验室正常运行、减少实验室内污染物外溢风险具有非常重要的意义。

参考文献

- [1] 中国国家认证认可监督管理委员会.RB/T 199-2015 实验室设备生物安全性能评价技术规范[S].北京:中国标准出版社,2016,3-4.
- [2] 许钟麟主编.空气洁净技术原理.北京:科学出版社,2014,1:269.
- [3] 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,2015,31(6):145-151.
- [4] 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 50591-2010 洁净室施工及验收规范[S].北京:中国建筑工业出版社.
- [5] 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.
- [6] 陈咏.生物安全高级别实验室化学淋浴技术工艺浅谈.中国比较医学杂志,2013,6.

湿度控制：抑制微生物生长的一种工具

Martin Ginty, 郑丽丽

(蒙特空气处理设备(北京)有限公司, 北京 101318)

[摘要] 有害微生物的生长一直困扰着许多行业领域, 尤其是食品和药品制造商。它们无处不在且难以消除, 不断地威胁着人类的健康。霉菌的生长与环境的温度和湿度有着密切的关系, 只要将环境的温湿度控制在合理的范围内便可有效抑制霉菌的生长。若湿度控制能将相对湿度控制在 50% 以下, 那么所有微生物的生长都会受到抑制。蒙特在湿度控制领域拥有 60 多年的丰富经验, 已经推出了一系列的解决方案, 在任何规模的生产或存储设施中, 均可通过降低相对湿度抑制微生物的生长。

[关键词] 微生物无处不在; 健康效果; 水分; 相对湿度; 蒙特; 湿度控制专家

有害微生物的生长一直困扰着许多行业领域, 尤其是食品和药品制造商。虽然严格的卫生程序、气候控制和员工意识都有助于控制微生物生长, 但湿度控制却是另一种宝贵的潜在对策。

1 微生物无处不在。

不论采取多少措施保持生产空间的洁净, 微生物也会继续顽强抵抗, 这是不可避免的事实。虽然并不是所有的微生物都是有害的, 但是它们却会污染生产和存储环境, 从而获得立足之地。

为了让您切身感受它们存在的范围之广, 您知道吗? 您现在呼吸的空气中每立方米有 10,000 至 1,000,000 个真菌孢子。这些孢子可以在没有水分的情况下保持休眠状态, 休眠期甚至可以长达数十年。如果可以获得水分和食物来源, 孢子便会萌芽并迅速繁殖。它们不需要液态水也能繁殖, 只需固体或潮湿的空气中所含的水分即可。

不受控制的霉菌滋生会迅速造成产品质量下降, 生产区域需要采取全面的清洁措施。例如, 据联合国粮食与农业组织 (FAO) 预计, 全球有 25% 的粮食作物感染了霉菌毒素 (霉菌分泌的有毒副产物), 每年造成的粮食损失达 10 亿公吨。所以, 任何能够控制霉菌和其它微生物滋生的对策都会提高企业的利润, 减少应对措施所耗费的时间。

2 健康效果

对霉菌敏感的人, 患有过敏症、哮喘的人, 或免疫系统受损并且居住在潮湿发霉的建筑中的人, 更容易出现健康问题, 比如因霉菌孢子、其副产物和其它挥发性有机成分造成的炎症和毒性反应。

人类对于霉菌的反应取决于:

- (1) 敏感性和其它健康状况
- (2) 空间中存在的霉菌量
- (3) 霉菌或霉菌副产物的类型
- (4) 接触时间

最常见的健康问题是过敏反应, 严重的过敏反

应虽很少见, 但仍有可能发生。有些霉菌, 比如葡萄穗霉, 会产生严重威胁健康的霉菌毒素。接触高浓度的霉菌毒素会导致神经受损, 有时甚至会导致死亡。

3 湿度控制如何能消除微生物呢?

任何生物的生长都离不开水分, 但是霉菌不需要水分也能生长——水蒸气浓度达到相对湿度 80% 以上即可。

一旦相对湿度低于 65%, 几乎不可能滋生霉菌。如果室内的相对湿度未得到控制, 在一天中的不同时间段或者随着季节变化, 相对湿度会相应改变, 霉菌繁殖的风险也会增加。

一旦形成有利的条件, 有些霉菌可以将游离水运输到干燥的区域。另外, 霉菌的表面积较大, 具有很高的吸湿性。因而它们能直接从空气中滤吸水分子。一旦霉菌在冷壁上滋生, 这一过程会进一步增强。

降低相对湿度能够显著降低霉菌滋生的可能性, 但温度变化的影响却相对较低, 尤其是当生产和存储区域的操作工人的首选舒适温度范围是在 20°C 至 25°C 时。

之前的数据说明霉菌经过多代繁殖才会显现出一些潜在的问题。各种霉菌的具体特点也各不相同。具体示例请参见图 3 和图 4。

虽然图 1 和图 2 展示了一般霉菌生长的可能性 (最坏情况), 但图 3 和图 4 却显示, 所选的 3 种霉菌并没有达到这些一般的生长和萌芽水平。因此, 使用最坏情况的方法能够确保, 如果相对湿度足够低, 绝大多数霉菌的生长都会受到抑制。

建筑材料也在霉菌的生长和萌芽期起到重要的作用, 一般而言, 易潮的材料 (比如壁纸、织物) 是细菌滋生的良好基质。

4 外界条件中的微生物

水分对于微生物的生长至关重要, 所以要留意生产内任何可能产生水蒸汽的地方:

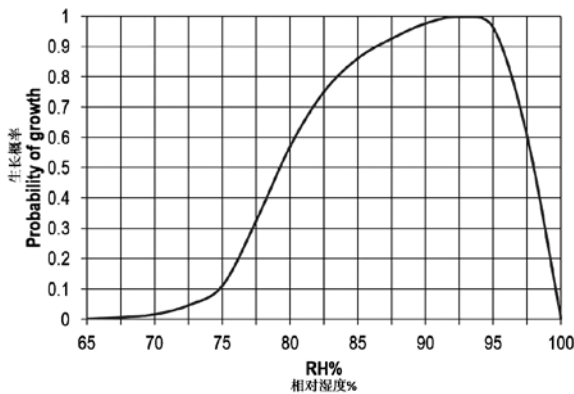


图1 相对湿度对霉菌生长的影响

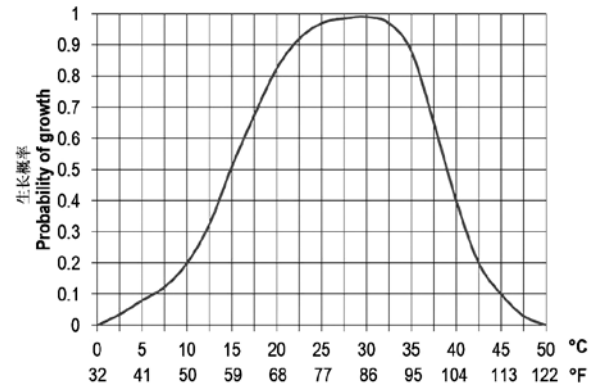


图2 温度对霉菌生长的影响

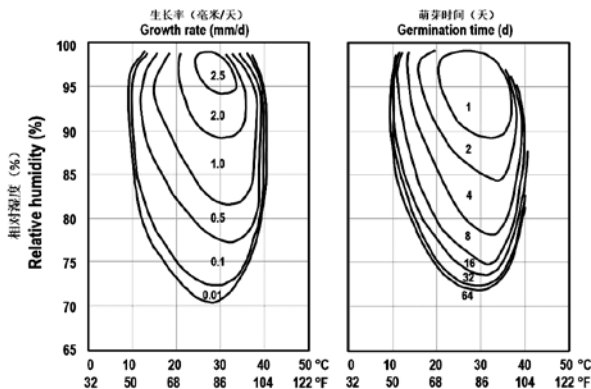


图3 局限曲霉生长速率和萌芽的等值线图

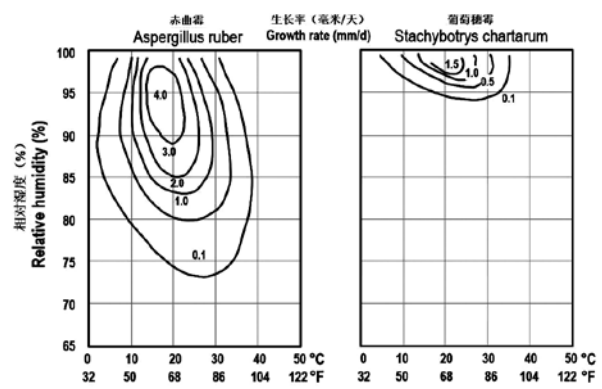


图4 赤曲霉和葡萄穗霉生长速率的等值线图

- (1) 空气/水蒸气中
- (2) 进浸
- (3) 建筑湿度
- (4) 清洗过程
- (5) 产品和生产工艺
- (6) 燃烧副产物(燃气供热、发动机)
- (7) 包装
- (8) 原材料
- (9) 生产人员
- (10) 由于加热和通风不良造成湿度过高
- (11) 隔热差,尤其是在热桥区
- (12) 意外事故,比如溢漏
- (13) 泄漏
- (14) 极端气候

只要有水分和食物来源,任何地方都会滋生霉菌,而且往往是在难以清洁的位置:

- (1) 设备、柜子或隔板后面的冷水管;
- (2) 相对湿度达到 70% 以上或者因过冷形成水滴的空气处理管道系统;
- (3) 装置和存储设备下方;
- (4) 在看不到的地方堆积的污垢、灰尘和废弃物中;

- (5) 天花板中;
- (6) 外墙和门上;
- (7) 窗户周围。

一般而言,环境空气或处理后的空气的相对湿度高于 50%,就会滋生一定的微生物。冷表面上的冷凝也会促使微生物生长。

若湿度控制能将相对湿度控制在 50% 以下,那么所有微生物的生长都会受到抑制。较高的相对湿度(高达 70%)会降低微生物的生长速度,但是根据当地环境、所生产的产品、清洁工艺等,也可以接受较高的相对湿度。单纯控制温度是不够的,因为有些微生物能在极端温度下生存。应当注意,除湿和正常的空气处理不会去除环境中现有的细菌或孢子——细菌滋生问题将继续存在。使用适当的过滤器将降低空气处理系统中残留的孢子量(表 1)。

5 冷藏(高于 0°C/32°F)

尤其是在 2 至 8°C/35 至 46°F 的温度范围内冷藏时,会遇到微生物滋生的难题。如果没有控制湿度,那么冷藏空间中的相对湿度会超过 90%。冷表面会发生冷凝,如果置之不理,会引发其它的问题。比如,在冷藏空间中,照明装置和制冷装置风扇出口附近的顶板以及制冷装置上会形成水滴。这些水珠偶尔

表 1 常见室外空气颗粒的粒径

序号	粒子	粒径（微米）	序号	粒子	粒径（微米）
1	大气微尘	0.001~40	10	霉菌	3~12
2	汽车尾气	1~150	11	霉菌孢子	10~30
3	细菌	0.3~60	12	花粉	10~1000
4	海滩泥沙	100~10000	13	植物孢子	3~100
5	水泥粉尘	3~100	14	淀粉	3~100
6	粘土	0.1~50	15	糖	0.0008~0.005
7	燃烧相关——机动车、木材燃烧、露天燃烧、工业工艺	高达 2.5	16	典型的大气微尘	0.001~30
8	杀虫剂粉尘	0.5~10	17	酵母菌细胞	1~50
9	磨粉、磨碎的谷物	1~100			

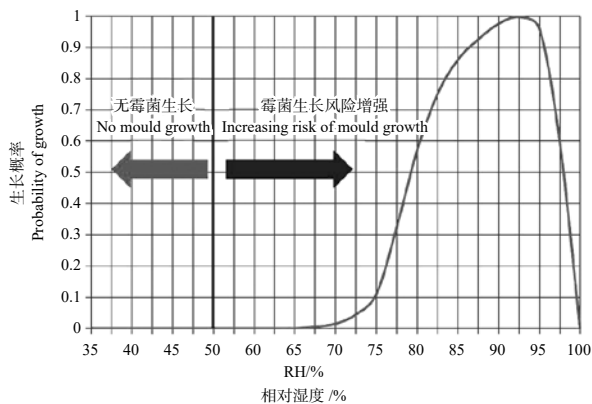


图 5 霉菌生长相对于相对湿度变化的概率

会滴下，而水滴可能会把顶板上滋生的任何霉菌、细菌或酵母菌携带至滴落表面上，从而导致交叉污染。庆幸的是，使用湿度控制可以很容易地解决这一问题。

6 结论

蒙特在湿度控制领域拥有 60 多年的丰富经验，已经推出了一系列的解决方案，在任何规模的生产

性能评级	粒径（微米）					过滤器类型
Rating Performance	10	5	1	0.5	0.1/0.3	Filter type
G1	90%	60%	20%	0%	0%	Pre-filter 预过滤器
G2	96%	75%	30%	10%	0%	Pre-filter 预过滤器
G3	97%	85%	45%	25%	0%	Pre-filter 预过滤器
G4	98%	92%	58%	35%	5%	Pre-filter 预过滤器
F5	98%	97%	70%	45%	20%	Secondary 精过滤器
F6	99%	98%	82%	62%	40%	Secondary 精过滤器
F7	99.90%	99%	88%	72%	55%	Secondary 精过滤器
F8	99.90%	99.90%	97%	88%	78%	Secondary 精过滤器
F9	99.96%	99.99%	98%	95%	93%	Secondary 精过滤器
H10-14	100%	100%	100%	100%	99.99%	HEPA 高效空气过滤器
U15-17	100%	100%	100%	100%	100%	ULPA 超高效空气过滤器

图 6 过滤器类型及其对于滤除不同粒径颗粒的有效性

或存储设施中，均可通过降低相对湿度抑制微生物的生长。湿度控制是保持无菌和非无菌工作区清洁的另一种有效的常用方法，应当在任何新设施的设计阶段加以考虑。出现任何上述问题的现有设施也可以通过这种方法加以处理，当生产增加、建筑通风或外部环境发生变化，从而导致生产或存储区内会发生湿度变化时，也可以采用湿度控制。

某洁净厂房高架地板布置率优化设计

关子谦, 樊洪明

(北京工业大学建筑工程学院, 北京 100022)

[摘要] 结合某实际工程, 通过比对分析洁净厂房的实际测试结果与 CFD 数值仿真软件 scSTREAM 对洁净厂房气流组织仿真结果的方法, 论证数值仿真的合理性。二者结果相符, 证实 CFD 技术可用于洁净室设计, 并可对洁净室设计提供指导。通过比对分析优化设计前后的洁净室内速度场, 可以看出通过增加近壁面侧与设备间高架地板开孔率, 可以减少气流偏转, 从而针对性的提出优化设计方案并通过数值仿真加以论证。针对洁净厂房的高架地板设计提出设计要点。

[关键词] CFD; 气流组织; 洁净厂房; 速度场; 高架地板

0 引言

随着工业技术日新月异的进步, 大量工业产品在其加工过程中都包含精密、微型的加工过程。为满足电子芯片的生产过程、生物药品生产过程、精密机械加工过程等等需要高洁净度的操作过程, 洁净技术是十分重要的^[1]。洁净厂房的设计是洁净技术的重要组成部分, 洁净室及相关受控环境保证空气中悬浮粒子被控制在合适的级别, 并将室内温度、湿度、空气洁净度、压差、噪声、照度及气流分布等其他有关参数控制在规定的范围内, 以确保完成需高洁净度的相关生产活动。为保证工作区域满足严格的设计要求, 必须通过合理的气流组织形式及时排放污染物。但在具体的洁净厂房设计过程中, 由于洁净厂房内的气流组织是无法直接观察, 设计者在设计过程中便无法直观地审视洁净厂房的气流组织是否合理, 会造成局部气流组织不合理使污染物无法及时排放, 影响相关的生产活动。

针对此问题, 在设计过程中可采用 CFD 软件进行气流组织的数值仿真, 根据 CFD 软件的仿真结果对设计方案进行优化^[2-3]。本文结合某洁净室的具体设计, 使用 scSTREAM 软件对该洁净室进行数值仿真。通过给定工艺布置和送风条件, 获得的洁净室

的速度场及压力场结果, 并通过对洁净室的实际测量验证仿真结果。通过比较分析高架地板在不同铺设情况下气流组织合理性, 提出较为合理的洁净厂房高架地板布置方案。为洁净厂房的气流组织优化和布局设计提供指导。

1 项目概况

某洁净室如图 1 所示。该洁净室长 220m, 宽 180m, 高 17.5m。洁净室高 7.8m。上夹层 3.1m, 下夹层 5.3m。在洁净室边界区域设有含表冷器的回风匝道。在洁净室顶板处设有不同布置率的恒定流量风机, 风机空隙部分铺设盲板, 如图 2 所示。

2 数值仿真与实测数据比对

2.1 数值仿真

2.1.1 边界条件

针对洁净厂房的以下具体特点, 一洁净厂房内的空气流动是低速的不可压缩的, 二洁净厂房内部的速度场是定常流动。根据洁净厂房的具体特点并结合洁净厂房气流组织设计原则^[4], 对仿真模型进行合理的优化:

(1) 壁面边界条件。主要是室内的墙壁、天花板、地板等。固定壁面的速度分量为零。

(2) 流动边界条件。即入流边界条件给出的是

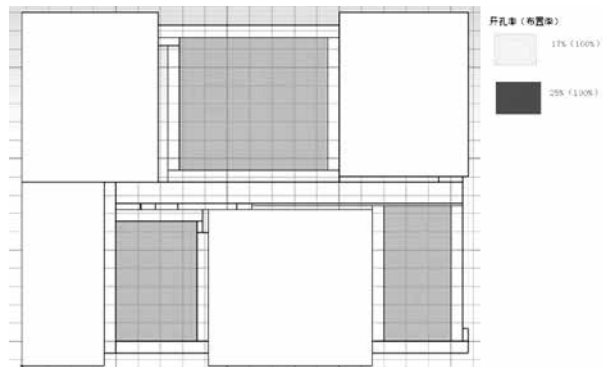


图 1 某洁净厂房与地板铺设示意图

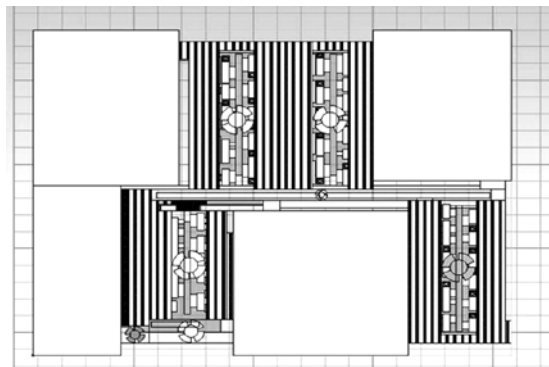


图 2 恒定流量风机与盲板布置图

入口处的速度、温度以及湍流动能和湍流动能耗散率等参数；出流边界条件，按照出口单向流动考虑。

(3) 不考虑空气渗漏问题。

本仿真模型仅关注此洁净厂房气流组织是否合理，故只对气流组织进行数值仿真。风机过滤机组的风速按分区设置，速度分别为 0.35m/s 和 0.4m/s，方向垂直向下。带有设备风机过滤单元的设备根据其风量在每个设备顶部布置轴流风机，并考虑设备风机过滤单元工艺提供布置率及平均风速。对回风匝道下端表冷器设定阻力系数。

2.1.2 计算网格划分

网格单元最大 x, y, z 尺寸分别为 0.3m, 0.3m, 0.2m 为提高计算速度和计算精度，模拟送风口网格局部加密，网格总计 467.4 万个。压力松弛因子为 0.7，动量松弛因子为 0.3。针对本模型，各方向上保证各边界处与网格线重合，例如设备边界、风机边界等。靠近边壁和风口处加密，每个风口划分相同网格数。总网格数为 467.4 万。开始计算后 242 步达到收敛。

2.1.3 模拟结果分析

图 3、图 4 分别为 X 方向 48m 处，X 方向 190m 处的断面气流分布图。可以发现洁净室内操作区域内气流较均匀，大部分为单向流，只有少部分近墙侧与近器械侧有少量非单向流，工作区气流速度为 0.4~0.5m/s，工作区内无涡流。

根据数值仿真结果可得结论，在洁净室工作区

被已基本无上返气流，整体区域的气流情况较好，某些近墙壁侧存在偏转气流。根据气流偏转情况具体调整地板具体位置的开孔率。

2.2 实测数据

测试的数据、所用仪器及其精度具体见表 1。

表 1 测试所用仪器与其精度

测试内容	风速 /(m/s)	风量 /(m³/h)
仪器名称	空气速度测试仪	风量罩
仪器型号	TSI 9515	TSI 8710
仪器精度	误差 ±3%	误差 ±3%

由于测试过程受到现场具体情况限制，对各部分测试分别在洁净室的两个区域进行多次测试，将多次测试数据进行数据处理，分别得出两个区域的测试值。

高架地板阻力系数测试：对 17%、25% 开孔率地板进行测试，测试时受到下夹层管道的限制，还受到实际 17%、25% 开孔率地板布置的限制，只针对现有布置率的 17%、25% 开孔率的单块地板进行测试。阻力系数根据测试结果计算得出。测试结果见表 2。

表 2 不同高架地板开孔率下的测试结果

地板开孔率	断面风量 /(m³/h)	地板进出口口断面压差 /Pa	出口断面平均风速 /(m/s)	阻力系数
17%	614	5.7	0.17	305
25%	839	5.3	0.23	179

表冷器阻力系数测试：在回风夹道内，选择标高 0~2m 的测点进行测试。根据风量罩的测试结果

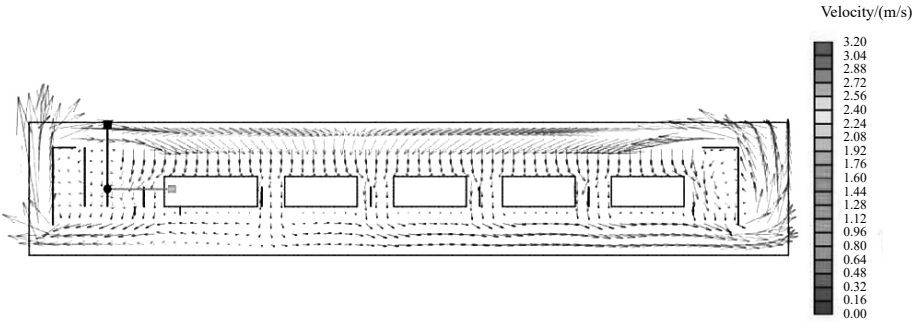


图 3 X=48m 处截面速度场

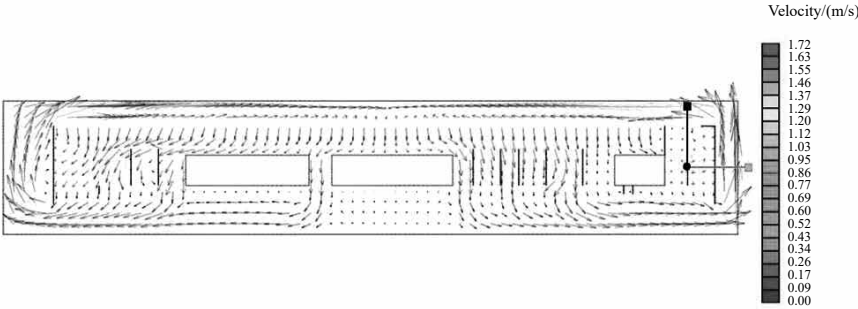


图 4 Y=190m 处截面速度场

进行计算，将风量罩测得的各点风量求得平均值，再进一步求出断面平均风速，利用断面平均风速得到表冷器部分的阻力系数。结果见表 3。

表 3 不同位置表冷器的测试结果

测点	单位面积表冷器出口断面风量 / (m³/h)	表冷器断面平均风速 / (m/s)	表冷器进风侧与出风侧压差	阻力系数
1	3369	0.94	9.6	18
2	3547	0.99	9.3	15.8

风机过滤机组压差测试：测试人员与设备均置于盲板上，测试结果见表 4。

表 4 不同位置的风机过滤机组的测试结果

风机过滤机组位置	频率 / Hz	单位面积风机过滤机组出口断面风量 / (m³/h)	风机过滤机组平均风速 / (m/s)	风机过滤机组进风侧与出风侧压差 / Pa
1	50	1275	0.35	40.4
2	50	1203	0.33	44.6

在本次测试中，得到了在动态下主要部件的流动及阻力情况，计算得到阻力系数，包括 17%、25% 高架地板开孔率阻力系数、表冷器阻力系数及风机过滤机组进风口与出风口两侧压差。

2.3 数值仿真结论与实测数据对比

图 5 为 X 方向 48m 处的压力分布图，其中明显可见在回风匝道内部为负压状态，在洁净室内为正压状态。通过对仿真结果进行处理，得出在仿真结果中包括 17%、25% 高架地板开孔率，表冷器与侧压差，风机过滤机组压差，具体数值与同实测数据（取实测数据平均值）的对比及结果见表 5。

表 5 实测数据与仿真结果对比

数据种类	17% 开孔率的高架地板进出口压差 / Pa	25% 开孔率的高架地板进出口压差 / Pa	表冷器两侧压差 / Pa	风机过滤机组压差两侧 / Pa
实测数据	5.7	5.3	9.5	42.2
数值仿真结果	6.2	5.5	8.2	36.8

通过实测数据与数值仿真结果的比对，二者差值在数值仿真可允许的差值范围内，认为模型是准确的，仿真结果是可靠的。

3 方案优化

3.1 优化思路

通过上文中的仿真结果可知，在洁净室工作区

被已基本无上返气流，整体区域的气流情况较好，某些近墙壁侧存在偏转气流。在进行方案优化设计时，综合考虑洁净室内设备布置情况与在仿真结果中所发现的气流组织不合理处，对地板开孔率进行具体调整。

3.2 优化方案边界条件

室内仿真空间位置，各设备的边界条件，模型计算中的松弛因子与网格划分均不改变。对近墙壁侧存在气流扰动对应区域的高架地板开孔率尽可能增大。由于需考虑设备承重情况，设备下的高架地板开孔率不变，对不承重的高架地板开孔率增加至 50%。

3.3 优化方案仿真结果分析

为方便对比，优化方案同样截取 X 方向 48m 处，X 方向 190m 处的断面气流分布图（图 6，图 7）。可见气流组织情况有所好转。通过增加近壁面侧高架地板的开孔率，近壁面侧的气流不在扰动。通过增加设备间空隙处的高架地板开孔率，可见在设备间的气流通路更加明显。

通过对高架地板的开孔率的针对性调整，气流组织更加合理，减少了近壁面侧的扰动，气流流动更贴近设要求。

4 结论

4.1 CFD 的好处

通过前文中对洁净室的实际测试我们看到，采用 scSTREAM 的数值模拟结果与实际测试数据相符合。通过对洁净厂房气流组织进行具体仿真，我们不但的得出了更为准确的设计参数，同时我们队洁净厂房进行了优化，使其气流组织更加合理。数值仿真可为设计提供良好的数据支持。对于洁净厂房的设计借助 CFD 工具可设计的使其更加合理

4.2 方案优化

通过对气流组织不合理处（如近墙壁侧，设备间空隙处）对应高架地板进行开孔率的调整，将近壁面侧开孔率从 17% 调整至 25%，将设备间空隙处的开孔率调整到 50%。减少了近壁面侧的扰动，设

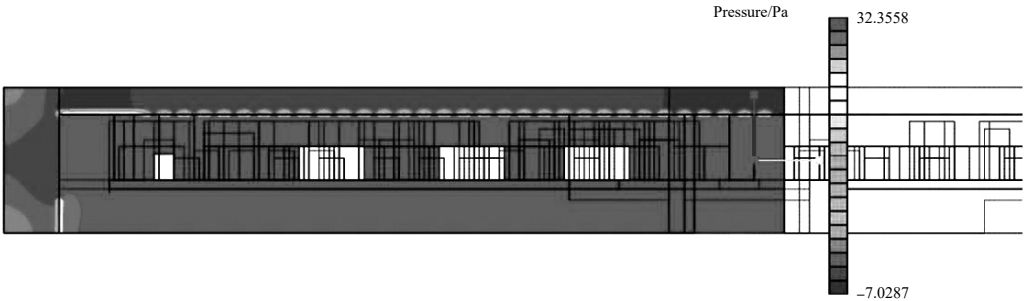


图 5 X=48m 处截面压力分布图

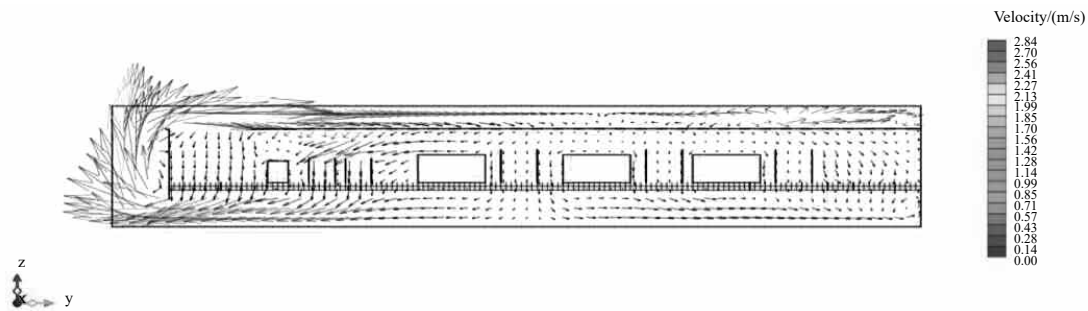


图 6 X=48m 处截面优化方案速度场

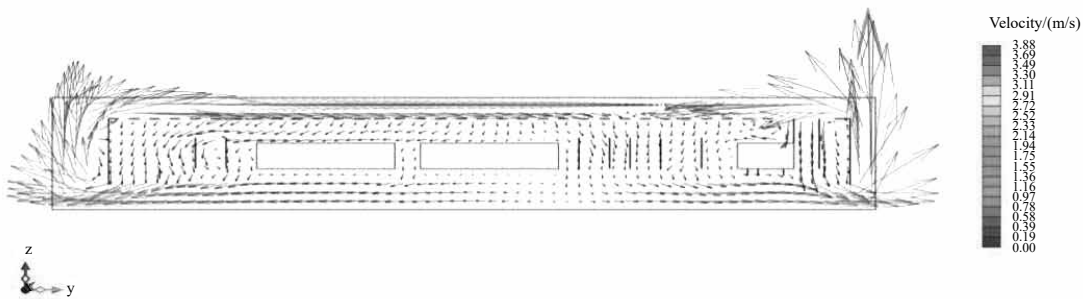


图 7 Y=190m 处优化方案速度场

备间的气流通路也更加明显。通过对高架地板的开孔率的针对性调整, 气流组织更加合理, 气流流动更贴近设计要求。通过调整高架地板开孔率可有效调整局部气流组织, 使其成为单向流。

参考文献

[1] 吕清欣. 洁净厂房的分类与设计 [J]. 建材世界, 2018,39(02):107-110.

[2] 黄闻华, 魏琪, 卢启明. CFD 技术在洁净室气流组织设计中的应用 [J]. 洁净与空调技术, 2006(02):7-11.

[3] 满孝新, 高甫生. 高大洁净厂房分层空调气流模拟与浓度场分析 [J]. 暖通空调, 2004(08):94-98.

[4] 中华人民共和国信息产业部. GB 50073-2001 洁净厂房设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2001: 21-23.

模块化装配式静脉药物调配中心

申辉宇

(苏州沈氏净化设备有限公司, 苏州 215216)

[摘要] 本文重点介绍了模块化装配式 PIVAS 主要特点。

[关键词] 模块化; 装配式; PIVAS

1 概念

随着时代的发展, 卫生部门对配液环境的要求已越来越严格, 很多医院都在新建静脉用药集中调配中心 (pharmacy intravenous admixture service, 简称 PIVAS), PIVAS 的诞生一是改变了各种临床静脉输液加药混合配制的传统做法, 今天我们就来谈一谈 PIVAS 的建设问题。传统的 PIVAS 建设存在施工周期长、噪音污染大等一系列问题; 而模块化装配式 PIVAS 是将建设所需的构件按照洁净要求进行标准化、模块化, 进行工厂工业化集中生产, 到现场进行装配、组装而成的满足洁净要求的 PIVAS。

2 模块化装配式 PIVAS 主要特点

(1) 模块化装配式 PIVAS 将传统的洁净工程转化为了产品, 具有“工业定制生产、现场快速拼装、空间功能可变、绿色环保节能、成本投入节约”等五大特点。

(2) 工程转换为以集成体的形式组装完成, 采用模数化、模块化、标准化设计, 确保 PIVAS 的建造和使用质量得到安全保证。

(3) 相对于传统 PIVAS 建设现场安装的模式, 具有质量稳定且可控、品质普遍较高、施工周期短、施工交叉少、施工成本低、施工环境优、升级换代易、智能化程度较高的优点。

(4) 每一个功能单元可使空气尘埃粒子、细菌浓度、风压、风速、温度、湿度、噪音等满足 PIVAS 洁净度要求。

3 模块化装配式 PIVAS 构成及装配特点

模块化装配式 PIVAS 主要由围护结构、净化系统、配套设施三部分构成。

(1) 围护结构主要是以金属洁净壁板装配而成的气密封顶墙面、顶面及 PVC 橡胶地板组成的密闭空间。

(2) 净化系统由高效过滤送风口、洁净式空调机组、送回排风管路、空调调节系统等组成。

(3) 装配式 PIVAS 内的配套设施主要生物安全柜、超净工作台等。

4 模块化装配式 PIVAS 主要构件及设施的技术要求

模块化装配式 PIVAS 的构件和设施应满足洁净

室的技术要求。

(1) 基本要求: ① 应满足功能区域的 PIVAS 工艺要求, 实现应有的功能; ② 应满足洁净室相关的技术标准和验收标准; ③ 围护结构和配套设施应实现标准化、模块化、一体化、集成化, 构件应具有多元化的品规, 具有一定灵活性; ④ 工厂化生产, 现场模块组装, 以定制的框架为支撑, 将复合板和相关装置装配构成吊顶、墙体、地板等, 形成自成一体、可拆装调整的围护结构。

(2) 围护结构要求: ① 围护结构表面应光滑平整, 易于清洁; ② 保证足够的强度和刚性, 表面处理应满足相关要求; ③ 防火等级应满足消防要求; ④ 在使用过程中表面不应产生冷桥和结露现象。

(3) 连接与转接件要求: ① 围护结构用的转接件与连接件应有足够的可靠性与承载力; ② 墙与顶、墙与墙、顶与顶之间的交接处应有合理的结构, 保证密封, 防止开裂; ③ 易于拆卸和恢复, 以便于进行清洁、检查和试验, 所有可拆卸的连接件在拆卸后应易于用手工连接和紧固。

(4) 密封件的要求: ① 拼缝一般采用嵌入式材料密封, 密封材料烟毒性的安全级别不低于 GB 20285-2006 规定的 ZA2 级; 具有离火自熄性, 自熄时间不大于 5s; ② 围护结构间的缝隙和在围护结构上固定、穿越形成的缝隙, 各种管路、线路与围护结构的接口应密封; ③ 门与门框、柜体、控制复合板等之间的密封应符合 GB 50591-2010《洁净室施工及验收规范》具体条款的相关要求; ④ 密封胶条公差为 $\pm 0.3\text{mm}$, 收缩率: $\leq 0.5\%$ 。具备弹性回复能力。

5 模块化装配式 PIVAS 主要材料的耐火、耐腐蚀性能需满足相关规范要求

(1) 耐火极限: 用于装配式 PIVAS 围护结构, 其耐火极限应符合 GB 50073-2001 的规定, 时间应不小于 60 分钟;

(2) 安全性能 (产烟毒性): 金属壁板、框架应符合国标“材料产烟毒性危险分级”GB/T 20285-2006 中规定的安全 AQ1 级 (安全一级) 的要求; 在减少非热损毁方面, 还应符合 ANSI/FMRC

FM 4910:2004 中规定的烟尘损害指数 $SDI \leq 0.4(m/s^{1/2})/(kW/m)^{2/3}$ 的要求。

(3) 抗腐蚀性能要求: 围护结构所用材料应足够抗腐蚀。所有材料应能承受在携带或置于规定条件下测试, 经试验处理后, 金属壁板应良好, 无变色。

(4) 抗紫外线辐射性能: 围护结构所用材料应足够抗紫外线辐射。所有材料应能承受规定条件的紫外辐射照射, 经试验处理后, 复合板应良好, 无变色。

(5) 耐渗透性: 围护结构所用材料应能耐受制造商推荐的清洗剂和消毒剂, 在清洗和消毒后, 金属壁板表面应良好, 无变色, 无明显损伤。

6 模块化装配式 PIVAS 建设的实施

模块化装配式 PIVAS 实施一般包括项目前期阶段、实施阶段和运维阶段。

模块化装配式 PIVAS 项目前期阶段重点是医疗策划、设计任务编制、设计推进、招投标相关工作。可以将其作为设备采购来招标。

(1) 医疗策划主要是医院方进行战略规划、学科规划、功能定位的过程, 确定 PIVAS 工程的建设目标、功能、规模、业务流程。

(2) 设计任务编制主要是设计需求调研、设计原则确定以及不同类型洁净工程的功能、规模、用房数量、流程、医疗工艺条件等。

(3) 设计推进包括概念设计、初步设计和施工图设计。设计深度应满足相关设计规范要求, 设计标准应满足医疗工艺要求和专项规范要求(洁净室相关规范), 设计内容应适应装配式 PIVAS 工程的特点和安装要求。

(4) 招投标相关工作包括工程量清单编制、造价控制和标书编制和招投标组织工作。

项目实施阶段重点是施工工艺控制和施工的组织管理和项目验收。

(1) 施工组织: ① 设计工程师应该按每种材料的尺幅进行排板设计, 有了初稿排板图后, 工程师应到现场指导施工人员放线, 并进行尺寸校核, 重新生成排板图, 此图是生产下单的依据。② 由设计工程师或材料预算员根据此排板图进行材料预算下单, 装配式整装模块化生产厂家根据此单进行模块

化结构的生产。③ 合格产品经包装运输到现场, 现场施工员根据工程师给的排板图进行顺序组装。组装时应详细产品特性和组装工艺文书。④ 安装完成的结构表面应注意成品保护, 表面的保护膜应到各专业工作均已完成去除, 但应注意保护膜的有效期, 以免长期暴露无法顺利去除。

(2) 施工工艺控制涉及生产与现场安装两个环节。施工企业应有相应的生产标准、质量控制标准和实施规范。

(3) 围护结构的组装: 组装中尺寸的允许偏差应符合相关国标规定; 围护结构中, 金属壁板须可靠连接; 墙板和吊顶板在安装之前应对板材的材料、品种、规格尺寸、性能进行检查、核实是否能满足设计要求; 必要时对抽样进行性能测试(耐火性、安全无毒性、抗弯强度、变形量等性能); 墙板安装应垂直, 吊顶板安装应水平, 板面平整, 位置正确; 吊顶板和墙板的板缝应均匀一致, 板缝的间隙误差应不大于 0.5mm, 板缝应用密封胶条均匀密封, 密封处应平整、光滑、略高于板面; 与门窗、柜体、各种接口及其相关装置的衔接处要平整(高差 $\pm 1mm$)、不产生且密封。

(4) 目验收重在项目的过程检查验收。过程验收主要为以下方面, 其中装饰结构板安装应符合下表:

表 1 装配式洁净工程装饰结构板安装验收要求

检查项目	允许偏差
竖缝及墙面垂直度	1.5mm
立墙面垂直度	1.5mm
接缝垂直度	1.0mm
两相邻板之间高低差	0.5mm

(5) 竣工验收重在功能性验收、综合性能验收和整体环保验收。功能性验收主要为: 各设施设备是否满足使用功能要求, 是否达到医疗需求; 综合性能验收主要为净化指标是否满足规范要求; 整体环保验收主要为建成后的洁净房间内的甲醛、苯等有机挥发物是否满足要求。

装配式 PIVAS 运维与传统洁净室项目基本相同, 主要为净化空调部分, 电气部分, 给排水部分, 装饰部分等的运行维护应符合相关规范要求。



中国建筑科学研究院有限公司
China Academy of Building Research

建筑环境与节能研究院
Institute of Building Environment and Energy

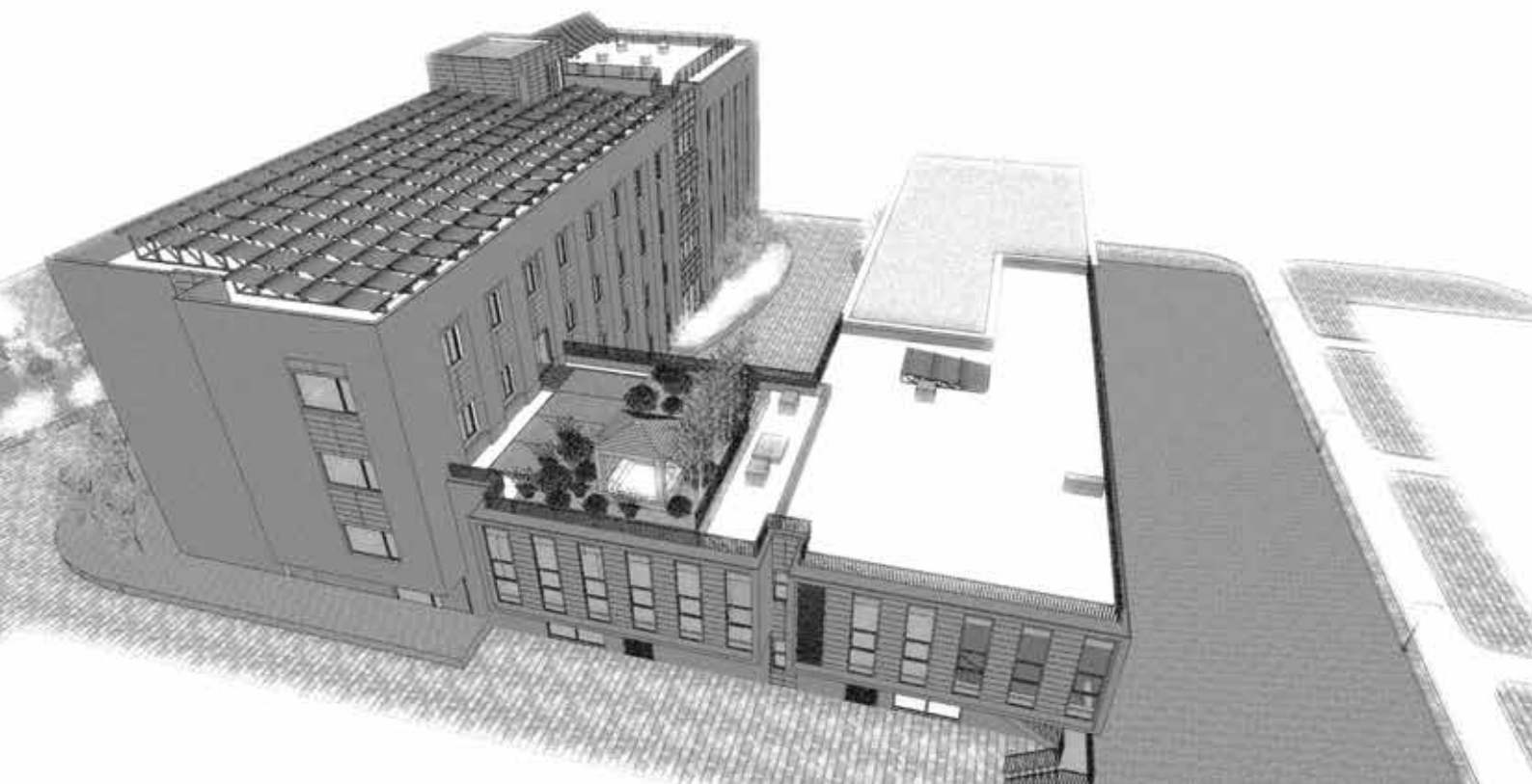
EE ENVIRONMENT
+
ENERGY

中国建筑科学研究院有限公司建筑环境与节能研究院（以下简称“环能院”）由空气调节研究所和建筑物理研究所于 2006 年 8 月整合成立，以建筑环境、建筑节能、绿色建筑、智能建筑等领域的应用研究和技术开发为主，致力于解决暖通空调、建筑声光热工程中的关键技术问题。

环能院开展多项建筑环境和建筑节能等方面行业所需的共性及公益性技术研究，负责编制我国主要的暖通空调和建筑环境工程与产品标准，承担国家建筑节能工程、供热空调、太阳能的质量监督检查和测试任务，为国家和社会提供具有法律效力的工程、产品检测鉴定和质量仲裁。

环能院是国内从事建筑节能和建筑环境领域历史最悠久、专业门类最齐全，服务范围最广泛的专业机构。

环能院公众号



鑫吉海医疗为您提供全新理念 手术室整体解决方案

欧盟绿色环保
模块化手术室
艺术化钢化玻璃手术室



宁夏鑫吉海医疗工程有限公司

总部地址：北京市朝阳区慧忠北里天创世缘A座1103室
电话：010-64802519/20/21

传真：010-64802501
网址：www.xinjihai.com

