

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-937-07

负压病房防护通风设计要点及影响因素分析

刘字峻¹ 池燕燕² 艾帅¹ 潘嘉信¹

(1. 中建中原建筑设计院有限公司 郑州 450004;

2. 河南东森市政工程有限公司 郑州 450004)

【摘要】 从压力梯度确定、换气次数计算、渗透风量计算、房间送、排风量计算四个方面,系统分析了负压隔离病房防护通风的设计方法和步骤。同时结合实际工程项目,总结了负压病房风量计算时其他主要的影响因素。为负压病房类项目的防护通风设计提供了一定的参考意义。

【关键词】 负压隔离病房; 渗透风量计算; 风量平衡; 影响因素分析

中图分类号 TU246 文献标识码 A

The Key Points and Influence Factors of Protective Ventilation Design in Negative Pressure Isolation Ward

Liu Zijun¹ Chi Yanyan² Ai Shuai¹ Pan Jiabin¹

(1. CSCEC Zhongyuan Architectural Design Institute Co., Zhengzhou, 450004;

2. Henan Dongsen Municipal Engineering Co., Zhengzhou, 450004)

【Abstract】 Systematically analyzing the design method and steps of protective ventilation in negative pressure isolation wards from four aspects: determination of pressure gradient, calculation of ventilation rate, calculation of infiltration air volume and calculation of room air supply and exhaust volume. At the same time, combined with the actual project, summed up the negative pressure ward air flow calculation of other major factors. This paper provides a reference for the ventilation design of negative pressure wards.

【Keywords】 Negative pressure isolation ward; Infiltration air volume calculation; Air volume balance; Influence factor

0 引言

本文以郑州市第一人民医院应急传染病医院和三门峡第二传染病医院为例,总结了负压隔离病房防护通风设计的要点,希望为同类项目的设计提供一定的参考意义。

1 负压隔离病房防护通风设计的意义

根据医学临床经验和研究表明, Covid-19, SARS 等呼吸道传染病主要传播途径为接触传播、飞沫传播、气溶胶传播、母婴传播等^[1]。负压隔离病房的防护通风系统主要实现三种防止病毒传播

的功能:(1)有效的压力梯度—严防带菌气体的泄露;(2)合理的换气次数—稀释房间带菌气体浓度;(3)合理的气流组织—降低医护人员感染风险。防护通风系统对降低污染源扩散范围,稀释病区污染物浓度,减少医护人员感染风险有着重要的作用,是防止负压隔离病区各类呼吸道传染病传播的重要手段。

2 建筑功能分区布置和人员流线

建筑一般按照“三区两通道”布局,分别设置清洁区(包含医办、护办、值班、会诊、示教等功

基金项目:综合医院复杂科室水暖深化设计及新技术应用研究(课题编号:ZJZYJZSJY-2021-N-05)

作者(通讯作者)简介:刘字峻(1981-),男,硕士研究生,E-mail:449323957@qq.com

收稿日期:2022-07-01

能), 潜在污染区(护士站、处置室、治疗室、医护走道等)、污染区(负压隔离病房、患者走道), 且在清洁区与潜在污染区、污染区与潜在污染区设

置缓冲间^[2]。负压隔离病房人流流线及“三区两通道”如图 1、2 所示。

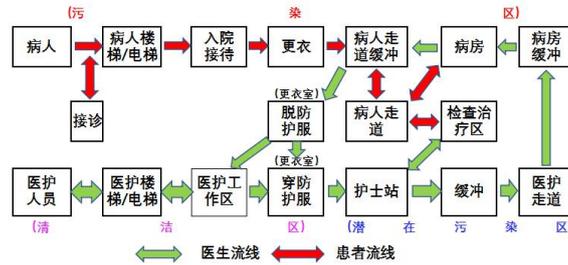


图 1 负压隔离病房医生、患者流线

Fig.1 Doctors and patients streamline in negative pressure isolation ward

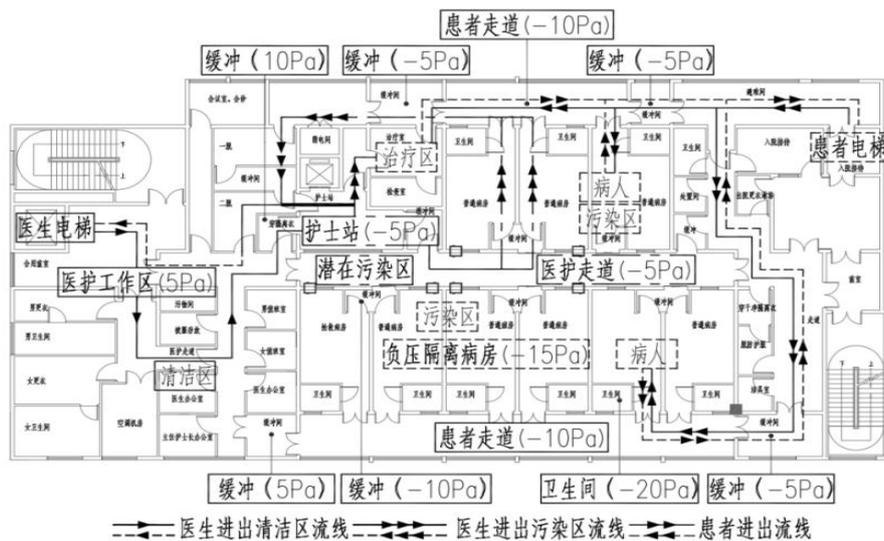


图 2 负压隔离病房“三区两通道”及医生、患者进出流线

Fig.2 Three zones and two channels and doctors and patients streamline in negative pressure isolation ward

图 2 中有两个区域值得注意: (1) 为了方便医护人员和患者进入治疗区, 建筑一般把治疗室、检查室等治疗功能设置于护士站与患者走道之间, 并且把这部分区域划分为潜在污染区。根据负压隔离病房日常管理规定, 一般不允许病人进入医护走道, 但治疗区却是病人可以进入的区域, 因此笔者认为相对医护走道, 治疗室、处置室等房间的交叉感染风险比较大, 这些区域设计时, 建议相对于医护走道保持一定的负压梯度。(2) 医护人员经医护走道、病房、患者通道、脱衣后返回时有两个流线, 一个流线是经清洁区的退出流线, 另一个流线是进入护士站的返回流线。

建筑的功能分区划分和流线布置是判断气流流向和压力梯度的基本依据, 是通风系统设计是否合理的关键, 因此暖通专业对建筑功能分区的设置

和人流流线必须有足够的了解, 以确保气流流向的合理性和压力梯度的准确度, 从而能够降低交叉污染的风险, 有效保护医护人员。

3 负压隔离病房通风设计要点及影响因素分析

负压隔离病房各房间风量计算分六个步骤:

- (1) 确定压力梯度;
- (2) 确定换气次数;
- (3) 计算渗透风量;
- (4) 计算房间送、排风量;
- (5) 分析其他风量计算影响因素;
- (6) 确定风机风量。

3.1 压力梯度的确定

负压隔离病房各区域的压力梯度是防护通风设计的关键点, 负压值过小不能有效阻止污染区空气向清洁区扩散; 负压值过大会引起风量增加, 导致设备容量及管道尺寸增大, 系统投资和能耗增

加。目前各个国家对负压隔离病房负压梯度执行的标准差异性较大, 澳大利亚传染病控制常务委员会给出的压力梯度需满足 >10Pa, 其中病房负值为 -45±5Pa, 病房卫生间为 -30±5Pa, 缓冲间的负压值为 -15±5Pa; 美国 ASHRAE Standard 170-2017 标准规定要求相对洁净的空间与邻室最小压差为 2.5Pa^[3]; 我国《医院隔离技术规范》规定病室负压值宜为 -30Pa, 缓冲间负压值宜为 -15Pa^[4]; 《传染病医院建筑设计规范》规定负压隔离病房与其相邻房间、缓冲、走廊压差应不小于 5Pa; 《医院负压隔离病房环境控制要求》进一步采用示意图的方式明确了各功能区的压力梯度^[5], 各功能分区的压力梯度取值如图 3 所示。

国内近两年设计的负压隔离病房, 压力梯度一般按照《医院负压隔离病房环境控制要求》的压力梯度取值。由图 2 和图 3 对比可知, 《医院负压隔离病房环境控制要求》没有明确治疗区和护士站的压力梯度, 考虑治疗区是医患流线交叉的区域, 笔者建议治疗区按照相对于护士站 -5Pa 的压差设计, 护士站与医护走道压差值取值可以统一, 但建议中

间加设缓冲间。

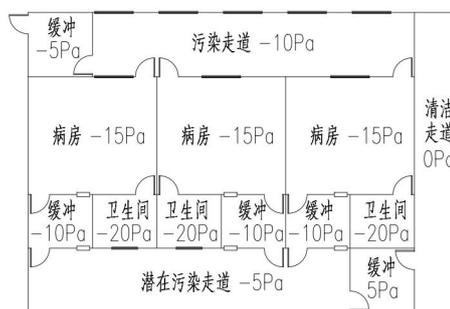


图 3 各功能分区压力梯度示意

Fig.3 Schematic diagram of pressure gradient in each functional zone

3.2 换气次数的确定

任何房间都遵循风量平衡的基本原则, 即送风量+∑渗入风量=全面排风量+局部排风量+∑渗出风量。为了有效稀释房间带菌气体浓度, 保证通风效果, 一般正压房间的全面排风量, 负压房间送风量按照换气次数计算。各区域换气次数参照《传染病医院建筑设计规范》^[6]和《医院负压隔离病房环境控制要求》^[5], 详见列表 1。

表 1 负压隔离病房计算风量

Table 1 Calculated air volume of negative pressure isolation ward

房间名称	送风	排风	房间名称	送风	排风
清洁区 (5Pa)	按风量平衡计算	6 次/h	负压隔离病房 (-15Pa)	12 次/h	按风量平衡计算
清洁区、潜在污染走道缓冲 (0Pa)	按风量平衡计算	6 次/h	潜在污染走道与病房缓冲 (-10Pa)	12 次/h	按风量平衡计算
潜在污染走道 (-5Pa)	12 次/h	按风量平衡计算	病房卫生间 (-20Pa)	—	按风量平衡计算
污染走道 (-10Pa)	12 次/h	按风量平衡计算			

3.3 渗透风量计算

渗透风量的理论计算公式来自《流体力学》中孔口淹没出流的伯努利方程^[7], 公式如下:

$$H_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = H_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \xi \frac{v_c^2}{2g} + \xi_{se} \frac{v_c^2}{2g} \quad (1)$$

渗透风量包含以下三种: (1) 门窗缝隙、围护结构缝隙造成的漏风量, (2) 开关门引起的漏风量, (3) 开关传递窗引起的漏风量。前面表 1 中给出的各个区域的压差指的是房间的静态压差, 即不考虑开关门和传递窗引起的漏风, 这些漏风在压力梯度要求严格的房间之间, 需要通过设置缓冲间等动态隔离措施来保证。

渗透风量有缝隙法、压差法和换气次数法三种计算方式, 分别如下:

$$Q_{\text{漏}} = a \sum (ql) \quad (\text{缝隙法})^{[8]} \quad (2)$$

$$Q_{\text{漏}} = 3600 \mu A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (\text{压差法})^{[9]} \quad (3)$$

$$Q_{\text{漏}} = 1 \text{次/h} \sim 2 \text{次/h} \quad (\text{换气次数, 压差按 } 5\text{Pa})^{[8]} \quad (4)$$

$$Q_{\text{漏}} = 3600 \times 0.827 \times 1.25 A \sqrt{\Delta P} \quad (\text{压差法})^{[10]} \quad (5)$$

公式中各参数代表的含义及单位如表 2 所示。

表 2 渗透风量参数含义及对应数据

Table 2 Meanings and corresponding data of infiltration air volume parameters

渗透风量参数含义及对应数据			
参	含义	单位	备注
$Q_{\text{漏}}$	门窗及围护结	m^3/h	
a	安全系数	—	1.1~1.2
q	单位长度渗漏	$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$	
l	围护结构缝隙长	m	

续表 2 渗透风量参数含义及对应数据

渗透风量参数含义及对应数据			
参数	含义	单位	备注
μ	流量系数	—	0.3~0.5
A	门窗或缝隙面	m^2	
ΔP	室内外压力梯	Pa	根据表 1 取值
ρ	空气密度	kg/m^3	1.2

以郑州市第一人民医院应急传染病医院负压隔离病房为例，建筑有南北两侧对称布置的 16 间病房，一侧污染走道共有 4 扇外窗，1 个室外疏散门，两端缓冲对称布置，房间均采用长宽高 $3m \times 6m \times 2.8m$ 的箱式板房拼装而成，各区域门窗尺寸如图 4 所示。

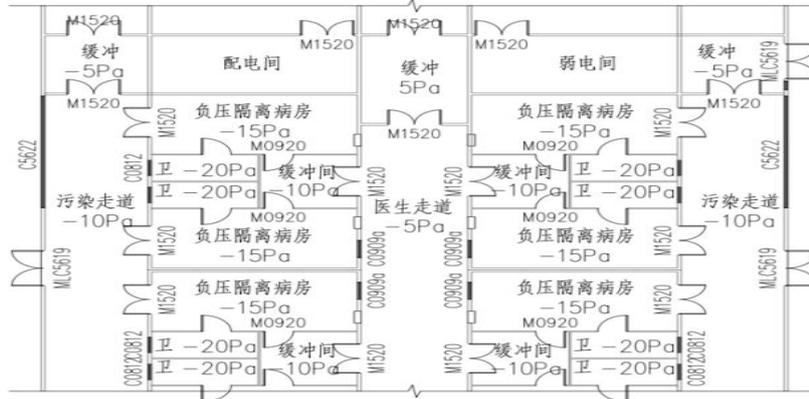


图 4 负压隔离病房示意图

Fig.4 Schematic diagram of negative pressure isolation ward

以一个尺寸为 $1.2m \times 2.1m$ 的双扇非密闭门为例，采用上述四个公式分别计算出的典型门窗渗透风量对比结果如表 3 所示。

由表 3 对比可知，采用不同的计算方法，结果差异性非常大，在实际项目中，笔者建议依据公式 5 进行渗透风量计算，原因见本文后续分析。

表 3 典型门窗渗透风量计算结果对比

Table 3 Comparison about infiltration air volume calculation results of typical doors and Windows

压差	计算公式			
	(2)	(3)	(4)	(5)
5Pa				
计算风量 (m^3/h)	159.12	162.12	100.8	259.63

注：风量计算时，各公式中系数均按最大值选取。

以隔离病房为例，由公式 (5) 计算出来的渗透风量详见表 4。

表 4 隔离病房通风量计算汇总

Table 4 Summary of ventilation calculation in isolation ward

门窗位置	门窗缝隙面积 m^2	与相邻房间压差 Pa	渗入计算风量 m^3/h	渗出计算风量 m^3/h
与缓冲间之间门	0.0232	-5	193	—
与医生走道普通窗	0.0144	-10	169	—
与医生走道传递窗	0.0048	-10	40	—
与污染走道门	0.036	-5	299	—
与卫生间门	0.0232	5	—	193
累加风量	—	—	701	193

3.4 房间送、排风量计算

房间换气次数和渗透风量确定后，即可按照图 2、图 3 中各区域压力梯度要求，按照风量平衡公式，进一步计算房间送、排风量。

房间风量计算时，有以下三种类型房间：(1) 相对周边区域均为正压的房间，渗入风量为零，公

式简化为：送风量=全面排风量+局部排风量+ Σ 渗出风量；(2) 相对周边区域均为负压的房间，渗出风量为零，公式简化为：全面排风量=送风量-局部排风量- Σ 渗入风量；(3) 介于上述两种情况的房间，既有相对正压房间的渗入风量，又有相对负压房间的渗出风量，需要按公式分别计算。

仍以郑州市第一人民医院应急传染病医院隔离病房为例, 根据《传染病医院建筑设计规范》要求, 隔离病房最小换气次数需按 12 次/h 计算, 根据风量平衡公式: 送风量+∑渗入风量=全面排风量+局部排风量+∑渗出风量

则该房间排风量=送风量+∑渗入风量-(局部排风量+∑渗出风量)

$$=604+701-193=1112 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

采用上述计算方法, 经过计算, 各房间通风量计算结果统计结果如表 5 所示。

表 5 各房间通风量计算结果统计

Table 5 Statistics of ventilation calculation results of each room

房间名称	静压 Pa	送风量 m ³ /h	渗入风量 m ³ /h	渗出风量 m ³ /h	排风量 m ³ /h	送风折算换气次数 次/h	排风折算换气次数 次/h
隔离病房卫生间	-20	0	420	0	420	0	35
负压隔离病房	-15	604	701	193	1112	12	20
污染走道	-10	2628	6883	4204	5307	12	17.5
医生走道	-5	7561	847	8408	0	25	0

根据以上计算结果对比分析, 在负压隔离病房各房间通风量计算时, 有以下几个问题需要注意:

(1) 计算公式的选取。《传染病医院建筑设计规范》规定的送排风之间 150m³/h 的差值是基于 2.5Pa 的压差且围护结构密封好的情况下的经验数据, 公式 (4) 也是上述情况; 而公式 (2)、(3) 出自门窗严密性要求较高的洁净厂房或者手术室。根据《传染病医院建筑设计规范》及卫健委文件要求, 负压隔离病房要尽可能考虑自然通风, 门窗严密性达不到 (2)~(4) 所适用场合, 因此笔者建议依据公式 (5) 对负压隔离病房进行渗透风量计算。

(2) 正负压房间风量计算。对于规范有明确换气次数要求的房间, 为了稀释房间带菌气体浓度, 减少感染风险, 当房间为负压时, 以换气次数作为

送风量计算依据, 在此基础上, 根据风量平衡计算排风量, 如表 4 所示。正压房间则计算方式相反。

(3) 渗透风量对送、排风量的影响。由表 5 计算可知, 医生走道渗出风量远大渗入风量的房间, 虽为负压房间, 但仅需送风即可满足相对负压要求。因此, 对于与其他区域有大量门窗相连的公共空间, 渗透风量会起到主导作用。

3.5 影响风量计算的其他因素分析

计算风量确定后, 在进行风机风量选型前, 还需要考虑其他不可见缝隙、管道连接方式、过滤器阻力变化等因素对风机选型影响, 从而最终确定送、排风机风量、风压。

3.5.1 其他不可见缝隙对渗透风量的影响



图 5 病房围护结构缝隙处理前后压差值变化

Fig.5 Change of pressure difference before and after treatment of cracks in ward envelope

除门窗缝隙外, 房间还存在一些其他诸如墙体、吊顶、管道等缝隙。这些缝隙对于施工周期和

施工质量有保证的项目,可能不会对风量计算有较大影响。但如果受建设周期影响,围护结构形式不够严密,管道密封不到位,这类缝隙会导致房间压力梯度达不到预期效果。以郑州市第一人民医院应急传染病医院为例,建筑采用箱式板房结构,房间吊顶为扣板吊顶,图 5 为负压隔离病房与缓冲之间压差表在病房围护结构缝隙采用密封处理前后的对比,处理前后压差增加了 5Pa (图中为正压表,调试时设定 30pa 为基准值),可见围护结构密封性对渗透风量的影响之大。

3.5.2 风管连接方式漏风率对通风量的影响

可用作通风系统的风管材质包含金属风管、非金属风管和复合金属风管;风管板材连接方式根据风管材质的不同可采用咬口连接、焊接和胶接等多种形式,风管连接形式有角钢法兰连接、共板法兰连接、承插连接等形式。《洁净室施工及验收规范》对排放含有害化学气溶胶和致病生物气溶胶空气的风管的连接方式、风管严密性要求、漏风率均有明确要求。但《传染病医院建筑设计规范》对负压

隔离病房洁净度等级及风管连接方式均未做明确要求,因此笔者参与设计的两个医院均采用热镀锌钢板风管共板法兰连接,受加工方式和时间周期影响,后期进行严密性实验时,均不甚理想。因此笔者建议风管连接有条件时尽量采用角钢法兰连接,设备选型计算时可在计算风量的基础上,参照《建筑防烟排烟系统技术标准》要求的 1.2 的系数考虑漏风率。

3.5.3 过滤器阻力变化对通风量影响

负压隔离病区各房间过滤器配置如表 6 所示。各级过滤器的初、终阻力详见国家标准《空气过滤器》和《高效空气过滤器》^[11,12]。过滤器的阻力随迎面风速和积尘量的增加而增大,过滤器阻力变化对风机风量的影响示意如图 6 所示。计算过滤器阻力时,《传染病医院建筑设计规范》规定按过滤器的终阻力计算^[6],《洁净室及其受控环境设计》建议按照初阻力加一定数值或者 2 倍初阻力计算^[9]。为了保证负压隔离病区各房间压差值,笔者建议按照过滤器终阻力选取,并在送、排风支管辅以定风量阀。

表 6 负压隔离病房过滤器配置

Table 6 Filter configuration of negative pressure isolation ward

功能区域	区域	过滤器配置	过滤器设置位置
负压隔离病房区	清洁区送风	粗效 (G4) + 中效 (F9) 过滤器	送风机组内
	潜在污染区送风	粗效 (G4) + 中效 (F9) + 亚高效 (H12) 过滤器	送风机组内
	污染区病房送风	粗效 (G4) + 中效 (F9) + 亚高效 (H12) 过滤器	送风机组内
	污染区病房排风	高效 (H14 高效过滤器)	病房下部排风口
	污染区病房卫生间排风	高效 (H14 高效过滤器)	卫生间上部排风口
	污染区病人通道	高效 (H14 高效过滤器)	上部排风口

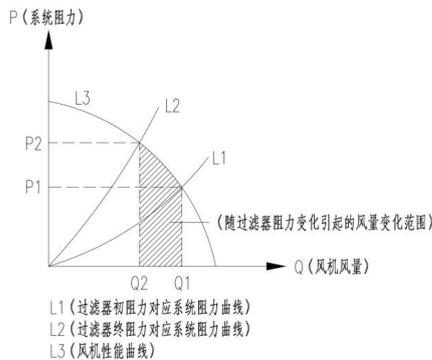


图 6 过滤器阻力变化对风机风量的影响

Fig.6 Influence of filter resistance change on fan air volume

3.5.4 气流组织对通风量影响

负压隔离病房防护通风有两个主目的:(1) 通过在各区域设置合理的压力梯度,防止带菌气体的泄漏;(2) 通过合理的送、排风风口位置 and 不同形式组合,在换气次数确定的前提下,创建合理的气流组织形式,有效稀释房间带菌气体浓度,减少带菌气溶胶的无序流动和二次污染,达到事半功倍的效果。

本文在郑州市第一人民医院应急传染病医院风口布置形式(两个百叶风口顶送,一个排风口侧下排)的基础上,通过调整送、排风口数量、角度及位置,经过气流组织模拟,最终得出较为理想的

气流组织形式。风口布置形式及其气流组织模拟结果如图7所示。这种气流组织形式,有效的降低了送风流线过长、易产生涡流的问题,且风口角度的设置,有利于新鲜空气送入医护人员头部,经患者呼吸区排至排风口,有效的提高了通风效率。这种气流组织形式在三门峡第二传染病医院得到采用并取得了一定的实际效果。

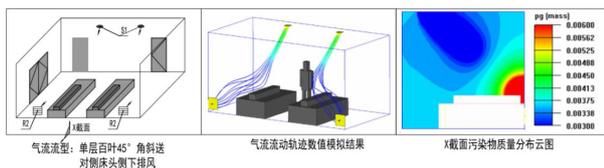


图7 风口布置形式及其气流组织模拟

Fig.7 Simulation of tuyere layout and air distribution

3.6 风机风量的确定

经过以上分析,风量的选择需要综合考虑压力梯度、渗透风量、管道连接方式、过滤器阻力等各种因素的影响,并结合医院建设周期带来的不确定因素(风机实际参数与设计参数有出入等因素),综合考虑后确定。值得说明的是,考虑后期运行成本控制及节能要求,风机建议选用变频风机,以实现病房的平疫转换运行。

4 结语

郑州市第一人民医院应急传染病医院和三门峡第二传染病医院均为笔者参与设计建造的负压隔离病房项目。经过两个项目的建设,经验总结如下:

(1) 负压隔离病房压力梯度的确定与建筑功能流线有密不可分的联系,暖通设计人员在设计时,除了依据规范规定外,尚应对建筑房间功能及其交叉感染风险进行足够的分析避免部分规范无明确规定的区域压力梯度时,设计风量偏小或者压差不对,加大医护人员感染风险。

(2) 房间计算风量受压力梯度、渗透风量、

管道连接方式、过滤器阻力等各种因素的影响,在风机风量及机外余压选择时,要进行综合判定并保证适当余量,以免因风机参数选择不当导致后期调试无法达到预期效果。

希望通过两个负压隔离病房通风系统设计的对比分析和总结,为以后的负压隔离病房设计提供一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 翟萌,姜惠芬.新冠病毒 COVID-19 的传播途径及预防和防护[J].基因组学与应用生物学,2020,(10):4895-4898.
- [2] 20Z001-1,应急发热门诊设计示例(一)[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [3] 祁建城,王健康,王政等.传染病负压隔离病房设计、建造与管理(四)[J].医疗卫生装备,2004,(4):4.
- [4] WS/T311-2009,医院隔离技术规范[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [5] GB/T35248-2017,医院负压隔离病房环境控制要求[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [6] GB50849-2014,传染病医院建筑设计规范[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [7] 刘鹤年,刘京.流体力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [8] GB50073-2013,洁净厂房设计规范[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [9] 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.
- [10] GB51251-2017,建筑防烟排烟系统技术标准[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [11] GB/T14295-2019,空气过滤器[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [12] GB/T13554-2020,高效空气过滤器[S].北京:中国标准出版社,2020.