

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-613-12

防疫应急医院典型房间室内气流模拟研究

方 宇¹ 毕海权² 彭治霖¹ 李孟柯²

(1. 中国建筑西南设计研究院 成都 610042; 2. 西南交通大学 成都 610031)

【摘 要】 通过对防疫应急医院的双人负压病房在不同通风、空调末端设计布置方案下进行 CFD 气流模拟分析比较, 在满足常规热舒适性指标的同时, 以降低医护人员在工作时的感染风险为目标, 寻求控制室内污染物浓度分布的最佳通风、空调末端设计布置方案, 并在研究结果基础上, 提出相关设计建议。

【关键词】 双人负压病房; 气流组织模拟; 感染风险; 设计建议

中图分类号 TU24 文献标识码 A

Study on Indoor Airflow Simulation of Epidemic Prevention Engineering

Fang Yu¹ Bi Haiquan² Peng Zhilin¹ Li Mengke²

(1.China Southwest Architectural Design And Research Institute Co., Ltd, Chengdu, 610042;

2.Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Through the CFD simulation analysis and comparison of the double pressure wardss in the emergency hospital for epidemic prevention under different ventilation and air conditioning terminal system design schemes. In order to reduce the risk of infection of medical staff at work while meeting the conventional thermal comfort indexes, the optimal design scheme of ventilation and air conditioning terminal to control indoor pollutant concentration distribution was sought, and related design suggestions were put forwards based on the research results.

【Keywords】 double negative pressure wardss; simulation of air distribution; risk of infection; design suggestions

0 引言

防疫应急医院作为紧急应对疫情的重要医疗资源, 其良好的气流组织对保障室内人员舒适性及降低医护人员感染风险具有重要意义。

目前国内外针对传染病医院污染物扩散的研究主要采用现场测试和数值模拟两种方法。其中示踪气体是现场测试的主要研究方法, 例如赵越^[1]利用六氟化硫作为示踪气体, 研究了不同送排风方式和换气次数对负压隔离病房污染物扩散的影响; Luke 等^[2]利用二氧化碳作为示踪剂, 研究了典型医疗房间的通气率对病毒感染风险的影响; Hua Qian 等人^[3]利用示踪气体研究自然通风在控制医院病

房感染方面的可行性。此外, 烟雾测试由于其优越的可视化效果也常配合示踪气体法用于研究人体呼吸气流^[4,5]。

除现场测试外, 示踪气体和颗粒物在病房的数值模拟中也有广泛应用^[6-11]。Zhengtao Ai^[12]等人在全面比较示踪气体与颗粒物两种方法优劣势后, 指出示踪气体代替飞沫核是研究其在建筑环境中传播的合适方法。目前, 对新冠病毒物化性质研究仍十分有限, 大量研究也证实了采用示踪气体来模拟气溶胶颗粒(飞沫核)扩散的可靠性。

由于测试法研究的可操作性、可视化效果受限, 本文将利用示踪气体模拟工程室内患者呼吸产

基金项目: 基于两山医院的防疫工程建设集成技术及产业化研究(课题编号: CSCEC-2020-Z-6)

作者(通讯作者)简介: 方 宇(1968.3-), 男, 本科, 教授级高级工程师, E-mail: fang_yud@163.com

收稿日期: 2021-08-31

生的污染物。

1 研究对象、物理模型及求解方法简介

本研究通过 CFD 模拟对典型房间通风、空调末端系统不同设计布置方案进行 CFD 气流模拟分析比较, 获得不同设计方案条件下的速度场、温度场、压力场、污染物浓度场。基于模拟结果, 寻求最佳通风、空调末端设计布置方案, 为防疫应急医院产品结构体系设计提供理论支撑。

本研究从房间的重要性、典型性、医护感染风险控制等方面出发, 对双人负压病房、负压隔离病房、诊室的通风空调不同布置方案分别进行了 CFD 气流模拟分析研究。限于篇幅, 本文选取双人负压病房的相关研究作介绍。

本研究采用商用计算流体软件 ANSYS-

FLUENT 进行模拟, 数值模拟选择基于压力求解器的稳态计算, 求解方式选择 SIMPLE 算法。并假设房间内空气为可压缩的理想气体, 湍流模型选择 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 同时由于污染物的扩散伴随着组分的运输, 因此需要开启组分运输模型。

2 通风、空调末端方案、模型及边界条件

本研究中, 双人负压病房的空调方案有风管机+新风方案(以下简称“风管机方案”)及壁挂机+新风方案(以下简称“壁挂机方案”)。

2.1 风管机方案

风管机方案中, 病房内新风与风管机的送风共用出风口; 排风采用下部排风, 设置于床头侧。风管机方案的具体平面布置、三维模型、末端系统参数以及模拟边界条件如下。

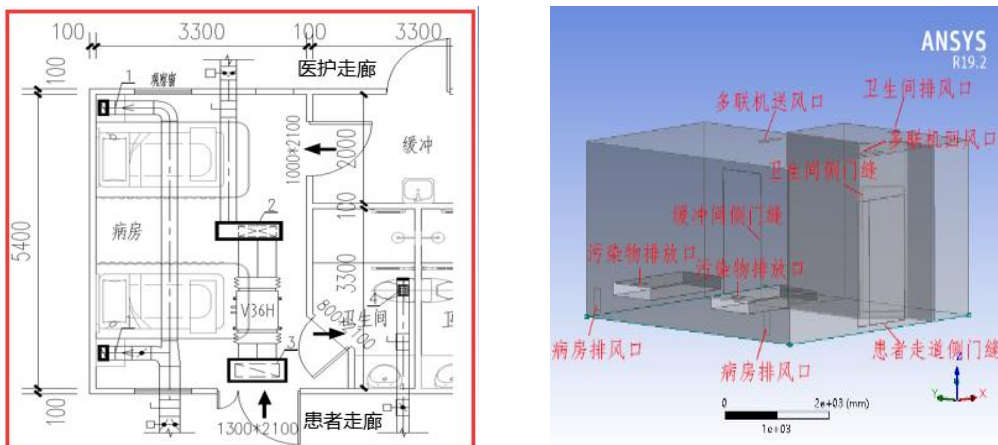


图 1 双人负压病房末端系统布置平面图、三维模型图(风管机方案一)

Fig.1 Layout plan and three-dimensional model of terminal system of double negative pressure wards (scheme I of air duct fan)

表 1 双人负压病房末端系统参数及速度边界条件(风管机方案一)

Table 1 Terminal system parameters and velocity boundary conditions of double negative pressure wards (scheme I of air duct fan)

编号	材料名称	规格 (mm)	风量 (m ³ /h)	风速 (m/s)	温度 (K)	数量 (个)
1	单层百叶风口(病房排风口)	200*400	模拟获得	模拟获得	/	2
2	双层百叶风口(送风口)	600*200	870	2.88	292.15	1
3	单层百叶风口(回风口)	750*250	560	1.27	/	1
4	单层百叶风口(排风口)	160*200	232	2.52	/	1

注: 风速计算原则: 双层百叶风口有效面积系数取 0.7; 单层百叶有效面积系数取 0.65; 卫生间排风口的有效面积系数取 0.8。

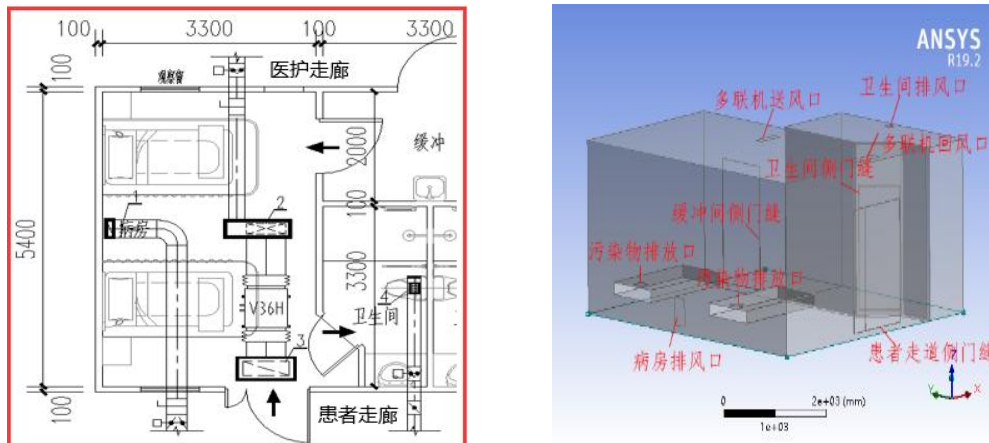


图 2 双人负压病房末端系统布置平面图、三维模型图 (风管机方案二)

Fig.2 Layout plan and three-dimensional model of terminal system of double negative pressure wards (scheme II of air duct fan)

表 2 双人负压病房末端系统参数及速度边界条件 (风管机方案二)

Table 2 Terminal system parameters and velocity boundary conditions of double negative pressure wards (scheme II of air duct fan)

编号	材料名称	规格 (mm)	风量 (m ³ /h)	风速 (m/s)	温度 (K)	数量 (个)
1	单层百叶风口 (速度边界)	300*500	模拟获得	模拟获得	/	1
2	双层百叶风口 (速度边界)	600*200	870	2.88	292.15	1
3	单层百叶风口 (速度边界)	750*250	560	1.27	/	1
4	单层百叶风口 (速度边界)	160*200	232	2.52	/	1

注: 风速计算原则: 双层百叶风口有效面积系数取 0.7; 单层百叶有效面积系数取 0.65; 卫生间排风口的有效面积系数取 0.8。

表 3 双人负压病房其它模拟边界条件

Table 3 Other simulated boundary conditions of double negative pressure wards

污染物 (质量入口): 每位患者产生的 CO₂ 质量流量: 3.5e⁻⁵kg/s (根据既往研究经验, 污染物的分布情况采用二氧化碳作为示踪气体进行模拟^[1,3,6,7,12,13,14])

门缝压力、温度边界: 缓冲间及患者走廊压力-10Pa, 温度 299.15K

房间散热量: 2402.5W

压力梯度: 病房相对于缓冲间及患者走廊维持 5Pa 的相对负压。

换气次数: 病房新风量按 6 次/h 换气次数计算, 卫生间的排风量按 15 次/h 换气次数计算。

几何尺寸: 房间平面尺寸详平面图, 吊顶高度 2.8m; 病床尺寸为 2.0m*1.0m, 距地高度 0.6m, 厚度 0.2m; 污染源尺寸为边长 0.2m 的正方形区域; 门缝宽度 4mm。

注: 本表适用于所有风管机及壁挂机方案。

2.2 壁挂机方案

壁挂机方案中, 新风独立送入房间; 排风采用下部排风, 设置于床头侧。壁挂机方案的具体平面

布置、三维模型、末端系统参数以及模拟边界条件如下。

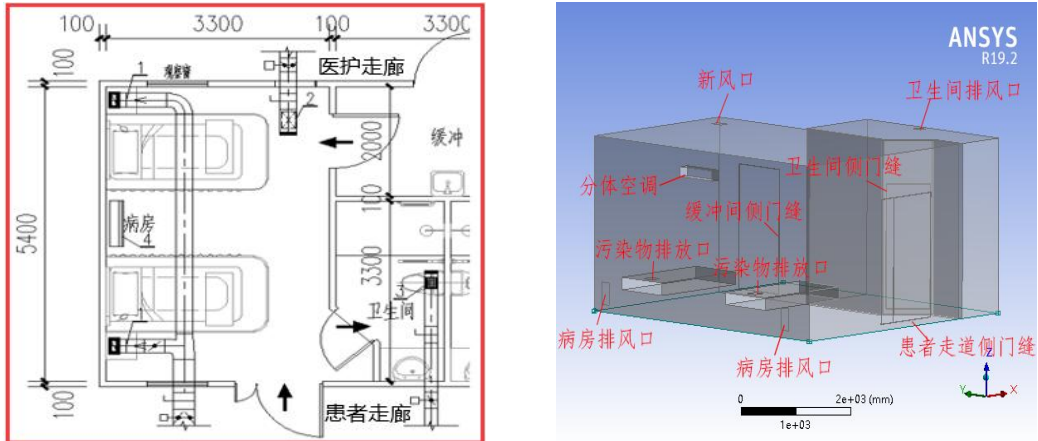


图 3 双人负压病房末端系统布置平面图、三维模型图（壁挂机方案一）

Fig.3 Layout plan and three-dimensional model of terminal system of double negative pressure wards (wall hanging scheme I)

表 4 双人负压病房末端系统参数及速度边界条件（壁挂机方案一）

Table 4 Terminal system parameters and velocity boundary conditions of double negative pressure wards (wall hanging scheme I)

编号	材料名称	规格 (mm)	风量 (m³/h)	风速 (m/s)	温度 (K)	数量 (个)
1	单层百叶风口（速度边界）	200*400	模拟获得	模拟获得	/	2
2	双层百叶风口（速度边界）	200*300	310	2.05	289.15	1
3	单层百叶风口（速度边界）	160*200	232	2.52	/	1
4	壁挂机	1.5P	600	1.302	289.15	1

注：风速计算原则：双层百叶风口有效面积系数取 0.7；卫生间排风口的有效面积系数取 0.8。

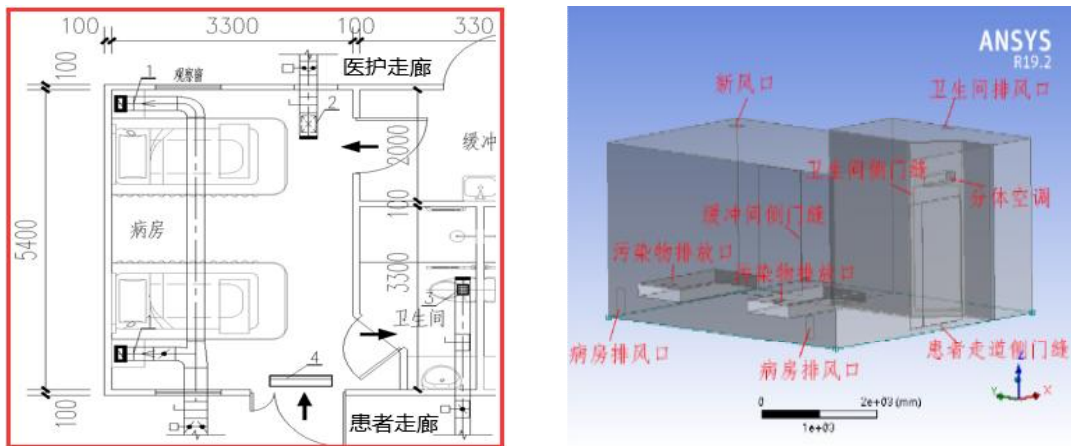


图 4 双人负压病房末端系统布置平面图、三维模型图（壁挂机方案二）（末端系统参数及速度边界条件同表 4）

Fig.4 Layout plan and three-dimensional model of terminal system of double negative pressure wards (wall hanging scheme II) (terminal system parameters and speed boundary conditions are the same as table 4)

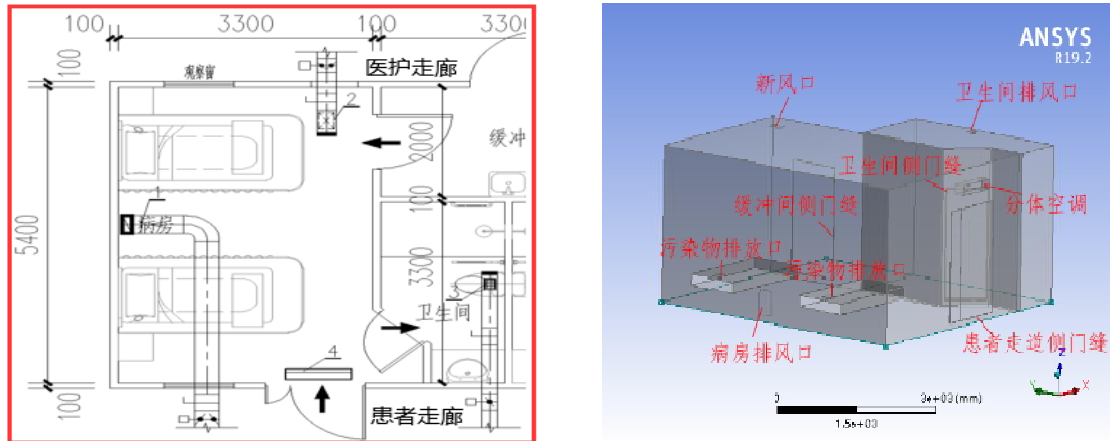


图 5 双人负压病房末端系统布置平面图、三维模型图 (壁挂机方案三)

Fig.5 Layout plan and three-dimensional model of terminal system of double negative pressure wards (wall hanging scheme III)

表 5 双人负压病房末端系统参数及速度边界条件 (壁挂机方案三)

Table 5 Terminal system parameters and velocity boundary conditions of double negative pressure wards (wall hanging scheme III)

编号	材料名称	规格 (mm)	风量 (m ³ /h)	风速 (m/s)	温度 (K)	数量 (个)
1	单层百叶风口 (速度边界)	300*500	模拟获得	模拟获得	/	1
2	双层百叶风口 (速度边界)	200*300	310	2.05	289.15	1
3	单层百叶风口 (速度边界)	160*200	232	2.52	/	1
4	壁挂机	1.5P	600	1.302	289.15	1

注: 风速计算原则: 双层百叶风口有效面积系数取 0.7; 卫生间排风口的有效面积系数取 0.8。

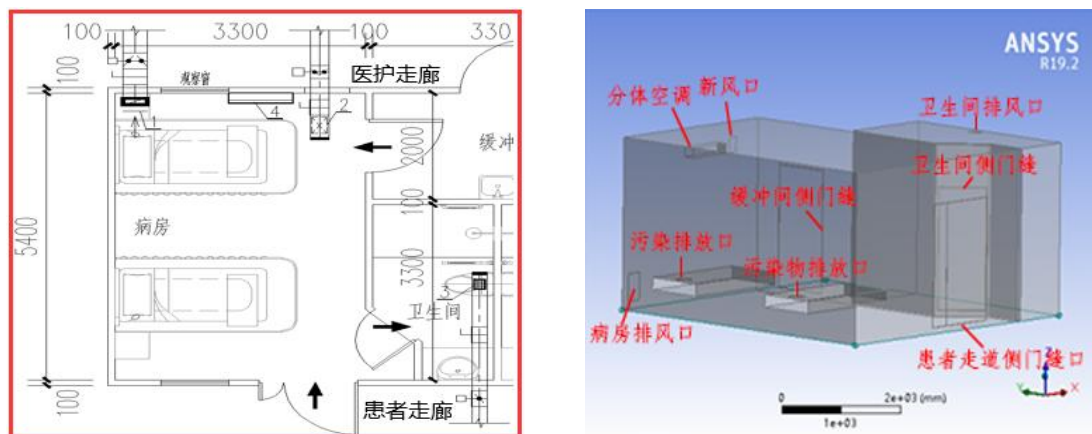


图 6 双人负压病房末端系统布置平面图、三维模型图 (壁挂机方案四) (末端系统参数及速度边界条件同表 5)

Fig.6 Layout plan and three-dimensional model of terminal system of double negative pressure wards (wall hanging scheme IV) (terminal system parameters and speed boundary conditions are the same as those in table 5)

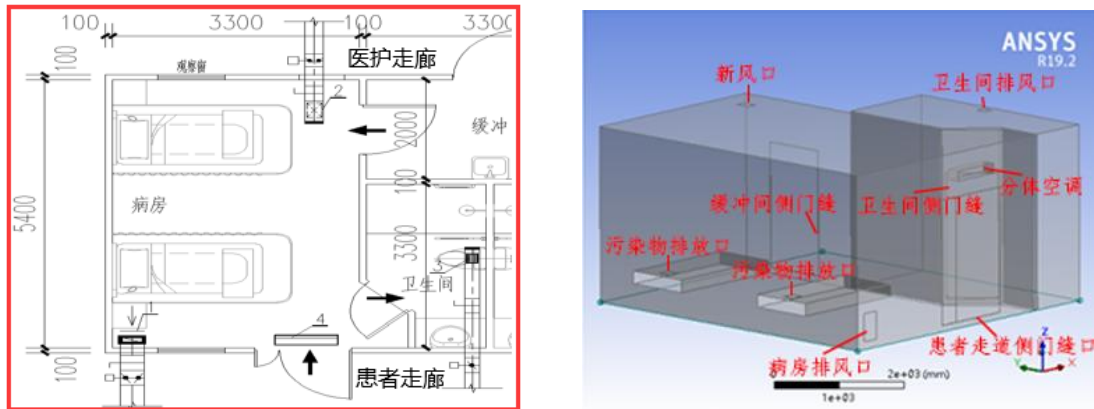


图7 双人负压病房末端系统布置平面图、三维模型图（壁挂机方案五）（末端系统参数及速度边界条件同表5）

Fig.7 Layout plan and three-dimensional model of terminal system of double negative pressure wards (wall hanging scheme V) (terminal system parameters and speed boundary conditions are the same as table 5)

壁挂机的其他模拟边界条件详表3。

3 模拟结果及分析

3.1 负压病房温度场及速度场模拟结果及分析

根据模拟结果，该典型房间的所有空调方案的温度场及速度场均满足《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736-2012) [15]规定的舒适性

要求，限于篇幅，这里不给出具体的结果，本文只讨论污染物浓度分布。

3.2 负压病房压力场模拟结果及分析

根据模拟结果，该典型房间的压力场整体分布均匀、稳定，限于篇幅要求，不对压力场的分布展开描述，这里重点讨论门缝压差渗透风量问题。

表6 双人负压病房压差、门缝渗透风量计算及模拟结果

Table 6 Calculation and simulation results of pressure difference and door seam infiltration air volume in double negative pressure wards

压差关系	相对压差		门尺寸	计算风量与模拟风量			
	设计值	模拟结果		L_1 (m ³ /h)	L_2 (m ³ /h)	L (m ³ /h)	L/L_1
病房相对医护缓冲间	-5Pa	-4Pa~-6Pa	1m*2m (单扇)	200	102	238.99	1.19
病房相对患者走廊	-5Pa	-4Pa~-6Pa	1.3m*2m (双扇)	286	146.2	343.64	1.2
病房相对卫生间	/	12Pa~13Pa	0.8m*2m (单扇)	/	/	/	/

注： L_1 （门缝渗透计算风量）：采用《建筑防排烟系统技术规程》(GB 51251-2017) [16]3.4.7 条的计算公式；压差采用设计值；门缝宽度按4mm进行计算（单扇门按4条缝进行计算，双扇门按5条缝进行计算）。

L_2 （门缝渗透计算风量）：采用《洁净厂房设计规范》(GB 50073-2013) [17]6.2.3 条的条文说明表7中非密闭门的参数进行计算（单扇门按4条缝进行计算，双扇门按5条缝进行计算）。卫生间的计算风量及模拟风量按卫生间15次换气次数确定。

L （为模拟风量）： L =门缝面积*门缝平均风速。

压力场的分布与空调、通风风口的布置关系较小，仅门缝射流处及送风口正下方因风速变化加大出现细微差别，压力的分布整体与送入、排出房间以及门缝渗透风风量有关；因此保证形成相对压差的渗透风量是设计应该重点关注的问题，通过模拟结果及现行压差计算依据进行汇总分析（见表6），

本研究建议设计时采用规范《建筑防排烟系统技术规程》GB 51251 的相关公式进行计算，并在该计算基础上乘以1.25的安全系数。

3.3 负压病房污染物模拟结果及分析

3.3.1 风管机方案

风管机不同工况的污染物浓度分布场如下。

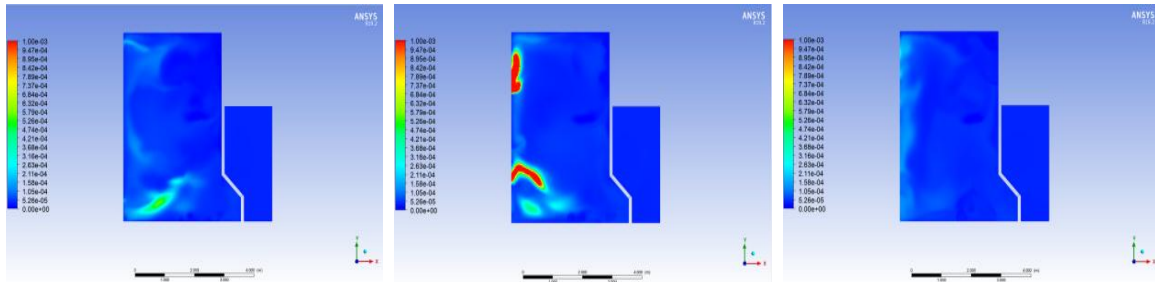


图 8 方案一 (0.35m、0.75m、1.6m) 水平截面污染物浓度分布图

Fig.8 Pollutant concentration distribution diagram of horizontal section in scheme I (0.35m, 0.75m, 1.6m)

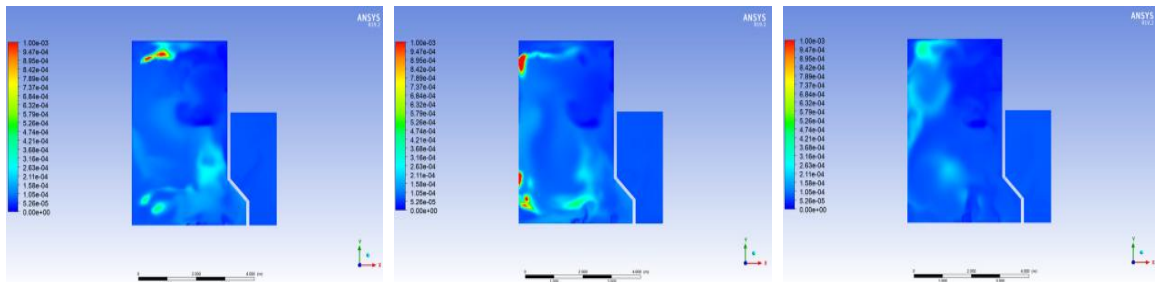


图 9 方案二 (0.35m、0.75m、1.6m) 水平截面污染物浓度分布图

Fig.9 Pollutant concentration distribution diagram of horizontal section in scheme II (0.35m, 0.75m, 1.6m)

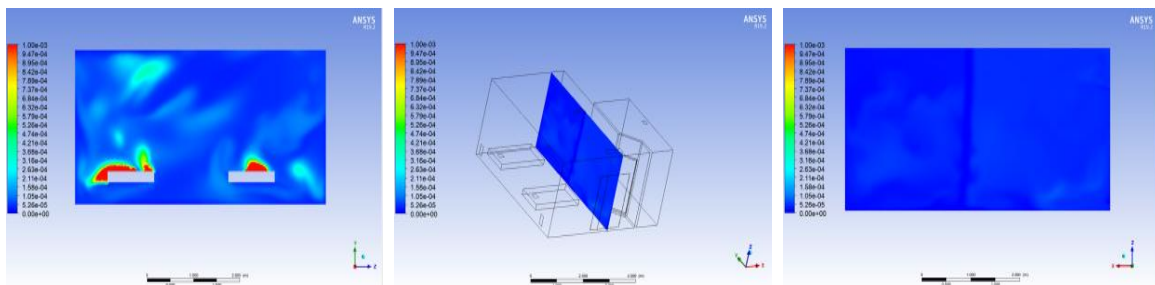


图 10 方案一 (床头剖面、床尾剖切位置、床尾剖面) 污染物浓度分布图

Fig.10 Pollutant concentration distribution diagram of scheme I (bed head section, bed tail section position and bed tail section)

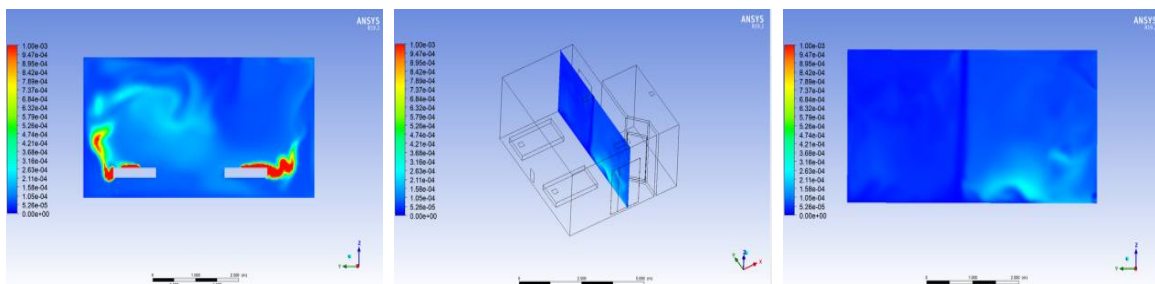


图 11 方案二 (床头剖面、床尾剖切位置、床尾剖面) 污染物浓度分布图

Fig.11 Pollutant concentration distribution diagram of scheme II (bed head section, bed tail section position and bed tail section)

对比污染物浓度分布图可知: 方案一中的污染物浓度在不同水平高度上明显低于方案二, 尤其是医护人员活动频繁的床尾及病床之间的区域; 方案

一中的污染物浓度在床尾处沿垂直高度上分布明显低于方案二。

风管机送风口位于两病床之间的中间位置, 室

内气流整体由中间向两侧流动，流动规律详图 10、图 11。方案一的排风口布置位置更利于污染物的排除。

3.3.2 壁挂机方案

壁挂机不同工况的污染物浓度分布场如下。

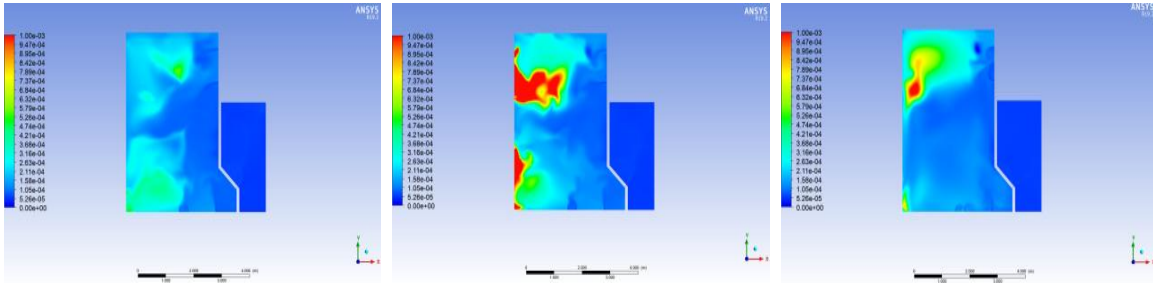


图 12 方案一 (0.35m、0.75m、1.6m) 水平截面污染物浓度分布图

Fig.12 Pollutant concentration distribution diagram of horizontal section in scheme I (0.35m, 0.75m, 1.6m)

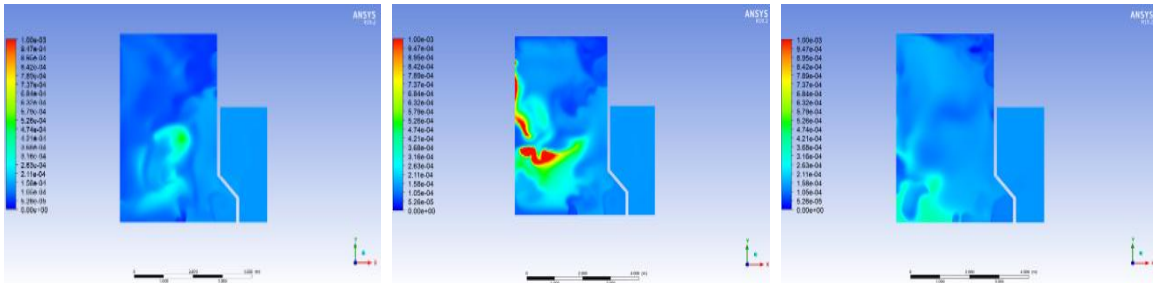


图 13 方案二 (0.35m、0.75m、1.6m) 水平截面污染物浓度分布图

Fig.13 Pollutant concentration distribution diagram of horizontal section in scheme II (0.35m, 0.75m, 1.6m)

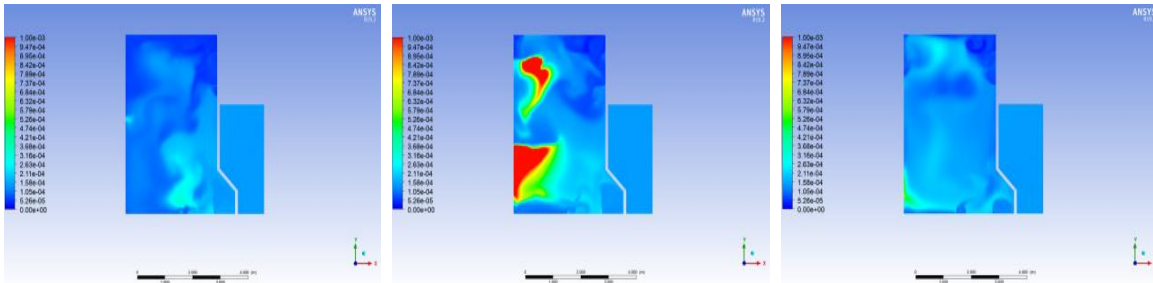


图 14 方案三 (0.35m、0.75m、1.6m) 水平截面污染物浓度分布图

Fig.14 Pollutant concentration distribution diagram of horizontal section in scheme III (0.35m, 0.75m, 1.6m)

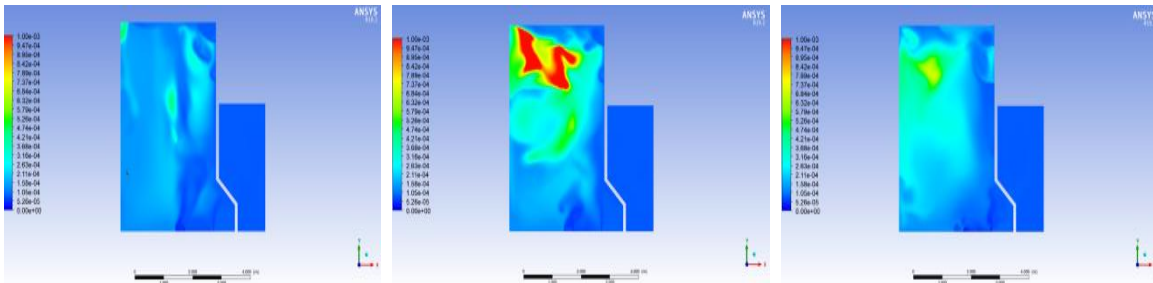


图 15 方案四 (0.35m、0.75m、1.6m) 水平截面污染物浓度分布图

Fig.15 Pollutant concentration distribution diagram of horizontal section in scheme IV (0.35m, 0.75m, 1.6m)

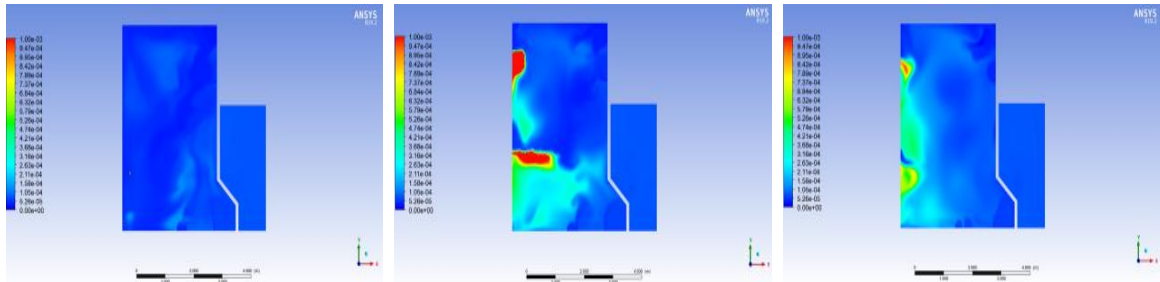


图 16 方案五 (0.35m、0.75m、1.6m) 水平截面污染物浓度分布图

Fig.16 Pollutant concentration distribution diagram of horizontal section in scheme V (0.35m, 0.75m, 1.6m)

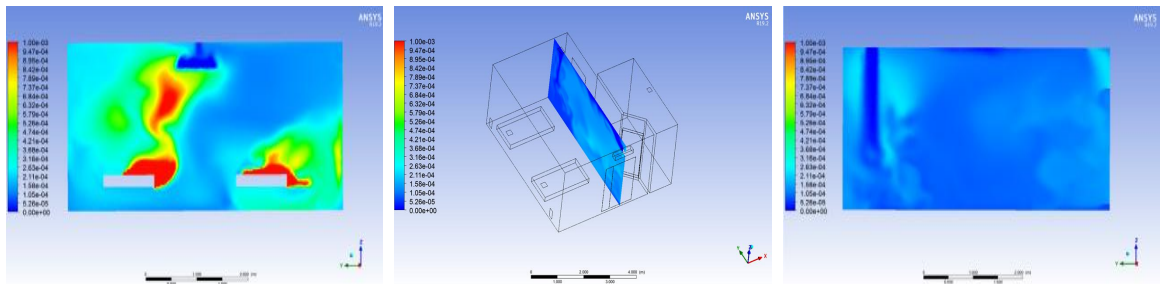


图 17 方案一 (床头剖面、床尾剖切位置、床尾剖面) 污染物浓度分布图

Fig.17 Pollutant concentration distribution diagram of scheme I (bed head section, bed tail section position and bed tail section)

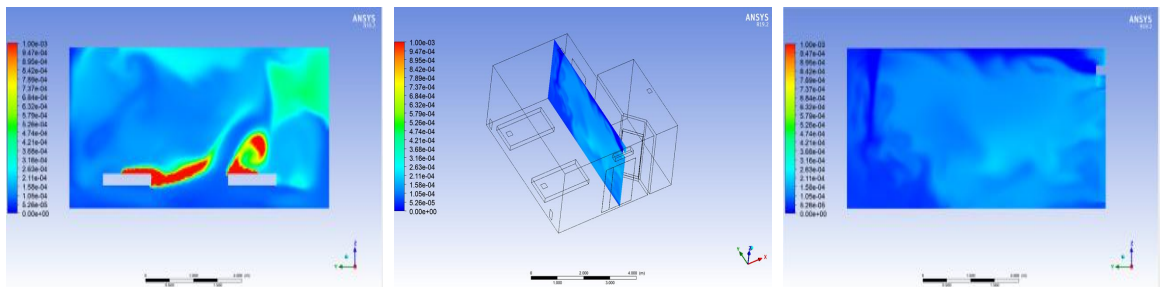


图 18 方案二 (床头剖面、床尾剖切位置、床尾剖面) 污染物浓度分布

Fig.18 Pollutant concentration distribution diagram of scheme II (bed head section, bed tail section position and bed tail section)

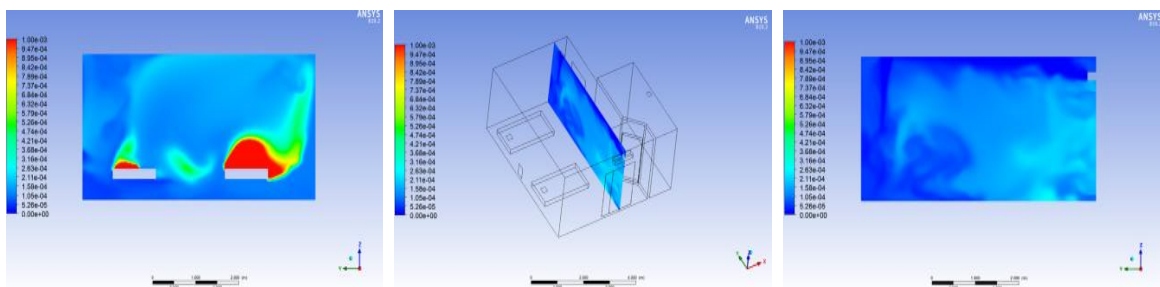


图 19 方案三 (床头剖面、床尾剖切位置、床尾剖面) 污染物浓度分布

Fig.19 Pollutant concentration distribution diagram of scheme III (bed head section, bed tail section position and bed tail section)

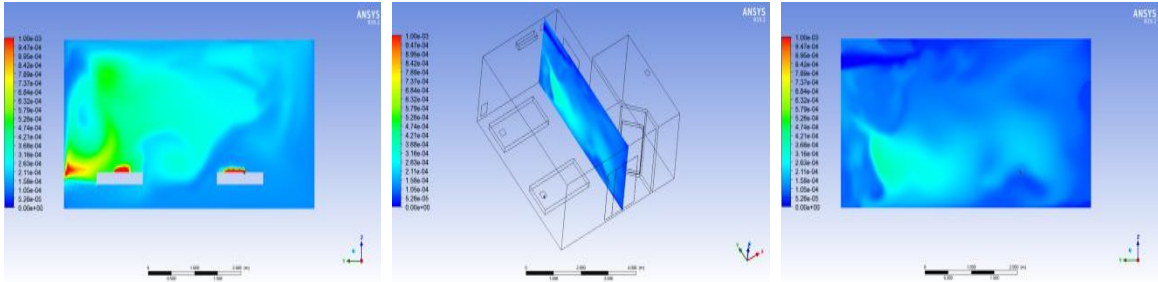


图 20 方案四（床头剖面、床尾剖切位置、床尾剖面）污染物浓度分布

Fig.20 Pollutant concentration distribution diagram of scheme IV (bed head section, bed tail section position and bed tail section)

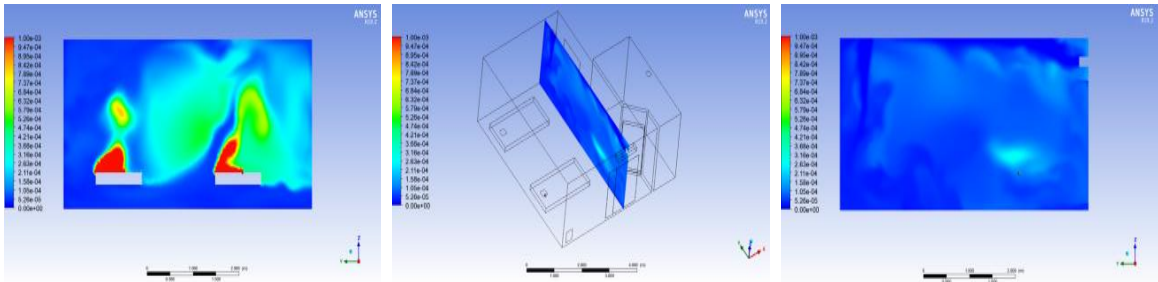


图 21 方案五（床头剖面、床尾剖切位置、床尾剖面）污染物浓度分布

Fig.21 Pollutant concentration distribution diagram of scheme V (bed head section, bed tail section position and bed tail section)

对比污染物浓度分布图可知：方案一~方案四中的污染物浓度在不同水平高度上明显高于方案五，尤其是医护人员活动频繁的床尾及病床之间的区域；方案五中的污染物浓度在床尾处沿垂直高度上分布明显低于其他方案。

方案一的排风口位于污染物扩散路径的末端，但送风气流受对侧壁面的影响大（送风口距对侧壁面太近），使得送风口气流不能充分的发展，便以较高的速度撞击壁面，进一步加剧了室内空气的紊乱度，造成污染物快速扩散上扬。

方案二与方案三空气的流态有所改善，但排风

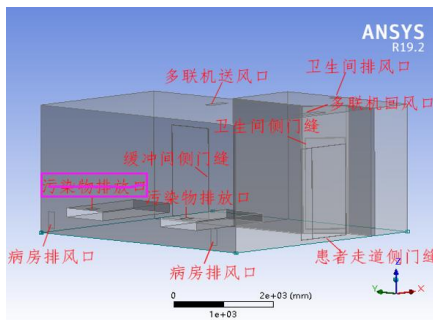
口均未在正对污染物来流方向的末端。

方案四的排风口位于送风口同侧，室内空气排除前已与污染物均匀混合。

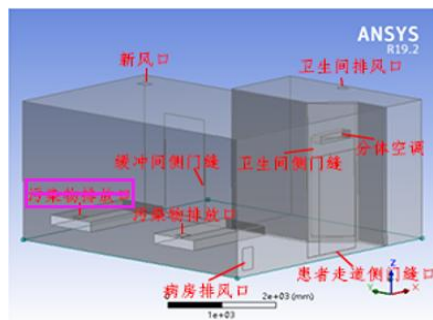
方案五气流稳定性更好，且排风口在正对污染物来流方向的末端，污染物控制效果最优。

4 新风量确定的建议

为进一步探讨新风量与患者数量的关系，现在负压病房风管机方案一及壁挂机方案五基础上，关闭缓冲间侧污染源得到相应的新风对比工况。



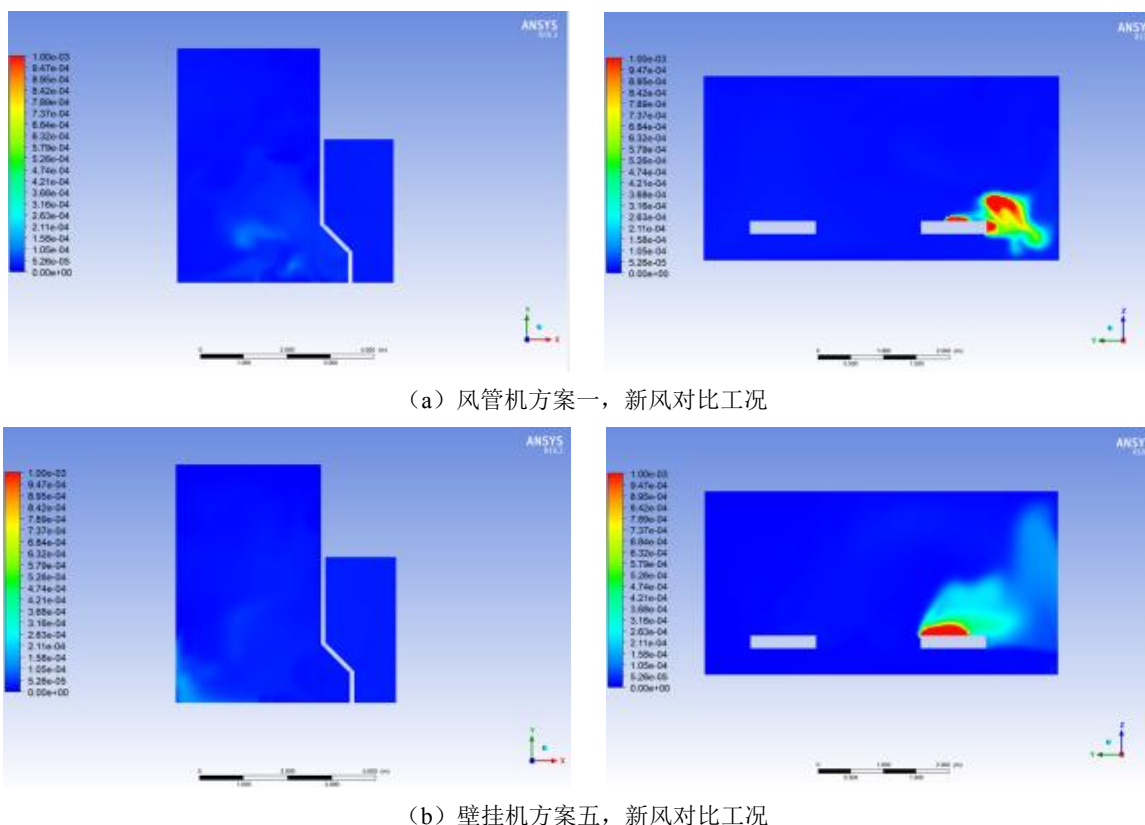
(a) 风管机（方案一），新风对比工况



(b) 壁挂机（方案五），新风对比工况

图 22 双人负压病房仅住一位患者时新风方案

Fig.22 Fresh air scheme when only one patient lives in double negative pressure wards



(a) 风管机方案一, 新风对比工况

(b) 壁挂机方案五, 新风对比工况

图 23 水平截面 (1.6m)、床头处剖面污染物浓度分布图

Fig.23 Horizontal section (1.6m) and profile pollutant concentration distribution at the head of the bed

由上图可知,在减少一个污染源后病房内空气整体的洁净程度显著提高。参考世界卫生组织(WHO)发布的《怀疑发生新型冠状病毒感染时医疗机构的感染预防和控制临时指导文件》^[18]可知,每位患者的最小新风量至少是 60L/s。按照我国现行规范呼吸道传染病负压病房最小新风换气次数为 6 次/h^[19]。本项目负压病房面积 18.5m²,净高 2.8m,单人患者入住时,患者人员新风量 86L/s;双人患者入住时,患者人员新风量为 43L/s,该风量低于 WHO 指导文件的建议取值;因此建议设计新风量的计算按患者人员新风量和换气次数取两者大值。

5 结论及建议

(1) 由于防疫工程中的病房、诊室等面积较小,室内温度场、速度场、压力场均较为均匀和稳定,不同空调方案均能满足舒适性要求,应重点关注气流组织对污染物排除效率的影响。

(2) 负压病房的风管机方案中,建议采用方案一;壁挂机方案中建议采用方案五;在风管机及壁挂机方案均有实施条件时,优先选用风管机方案

一。

(3) 排风口应尽量靠近污染源,可有效提高污染物的排除效率。

(4) 由于双人负压病房的房间空间较小,难以形成稳定的定向流动,气流组织的优化仅能控制气流流动的整体趋势,降低污染物扩散的风险。

(5) 设计计算压差风量时,建议采用规范 GB 51251 中 3.4.7 条的相关公式进行计算,并在该计算基础上乘以 1.25 的安全系数。

(6) 在当下和未来变异新冠病毒的感染浓度控制还不明确的情况下,建议设计负压病房时,新风量按《怀疑发生新型冠状病毒感染时医疗机构的感染预防和控制临时指导文件》(WHO)中患者人员最小新风量和现行《传染病医院建筑设计规范》GB 50849-2014 规定的新风最小换气次数(6 次/h)计算结果取大值,降低病房污染物浓度及医护人员感染风险。

参考文献:

[1] 赵越.气流组织对负压隔离病房污染物扩散的影响研

- 究[D].天津:天津大学,2012.
- [2] Luke D Knibbs, Lidia Morawska, Scott C Bell, et al. Room ventilation and the risk of airborne infection transmission in 3 health care settings within a large teaching hospital[J]. *American Journal of Infection Control*, 2011,39(10):866-872.
- [3] Hua Qian, Yuguo Li, W H Seto, et al. Natural ventilation for reducing airborne infection in hospitals[J]. *Building and Environment*, 2009,45(3):559-565.
- [4] Bjørn E, Nielsen P V. Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms[J]. *Indoor air*, 2002,12(3):147-164.
- [5] Berlanga F A, Olmedo I, Ruiz de Adana M. Experimental analysis of the air velocity and contaminant dispersion of human exhalation flows[J]. *Indoor air*, 2017,27(4):803-815.
- [6] 吴亚楠,贾海军,张伟,等.隔离病房污染物排出有效性分析[J].*计算机仿真*,2017,(4):235-240.
- [7] 嵇赟喆,王晓杰,李晓静,等.呼吸道传染性疾病预防病房带菌飞沫和 CO₂ 分布特性的模拟比较研究[J].*护理学杂志*,2011,26(21):1-5.
- [8] Taesub Lim, Jinkyun Cho, Byungseon Sean Kim. The predictions of infection risk of indoor airborne transmission of diseases in high-rise hospitals: Tracer gas simulation[J]. *Energy & Buildings*, 2010,42(8):1172-1181.
- [9] Yang C, Yang X, Zhao B. Person to person droplets transmission characteristics in unidirectional ventilated protective isolation room: The impact of initial droplet size[J]. *Building Simulation*, 2016,9(5):597-606.
- [10] P H Kao, R J Yang. Virus diffusion in isolation rooms[J]. *Journal of Hospital Infection*, 2006,62(3):338-345.
- [11] 李宁,饶冬生.昆明某新冠病毒隔离病房气流组织模拟分析[J].*制冷与空调*,2021,35(4):542-546.
- [12] Zhengtao Ai, Cheuk Ming Mak, Naiping Gao, et al. Tracer gas is a suitable surrogate of exhaled droplet nuclei for studying airborne transmission in the built environment[J]. *Building Simulation*, 2020,13(prepublish): 1-8.
- [13] 朱士芸.用 CO₂ 作示踪气体在风工程中的应用[J].*同济大学学报(热能工程版)*,1995,(6):671-676.
- [14] Knibbs L D, Morawska L, Bell S C, et al. Room ventilation and the risk of airborne infection transmission in 3 health care settings within a large teaching hospital[J]. *American journal of infection control*, 2011,39(10):866-872.
- [15] 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.
- [16] GB 51251-2017,建筑防排烟系统技术标准[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [17] GB 50073-2013,洁净厂房设计规范[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [18] World Health Organization. (2020). Infection prevention and control during health care when novel coronavirus (nCoV) infection is suspected: interim guidance, 25 January 2020. World Health Organization[EB/OL]. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/330674>.
- [19] GB 50849-2014,传染病医院建筑设计规范[S].北京:中国计划出版社,2014.