

文章编号:1673-9469(2025)03-0082-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.03.011

夏热冬冷地区学生宿舍内不同通风策略气溶胶扩散特性研究

肖伟,刘东旭,刘春元*,徐展飞,卢彩苗,莫景然

(上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院,上海 201418)

摘要:以人员密集的学生宿舍为研究场所,通过数值模拟方法研究四种通风策略下传染源咳嗽释放气溶胶的扩散特性。结果表明,不同通风策略下,气溶胶在室内的影响范围和质量浓度存在差异,室内通风面积的大小会影响咳嗽气溶胶的扩散速度,通风面积越大,颗粒在室内的扩散速度越快。四种通风策略下室内气溶胶颗粒残余率排序依次为,门窗小缝通风>开门通风>开窗通风>门窗全开通风。在门窗全开通风和门窗小缝通风策略下,房间下铺学生的的气溶胶相对捕获率高于上铺学生。这些结果对于了解不同通风策略对室内空气质量和学生健康的影响具有重要意义。

关键词:学生宿舍;气溶胶;通风策略;扩散特性;计算流体力学

中图分类号:TU831

文献标识码:A

Research on the Aerosol Diffusion Characteristics of Different Ventilation Strategies in Student Dormitories in Hot Summer and Cold Winter Areas

XIAO Wei, LIU Dongxu, LIU Chunyuan*, XU Zhanfei, LU Caimiao, MO Jingran

(College of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Using densely populated student dormitories as the research site, numerical simulation methods were used to study the diffusion characteristics of infectious cough aerosols under four ventilation strategies. The results indicate that there are differences in the impact range and mass concentration of aerosols indoors under different ventilation strategies. The size of indoor ventilation area will affect the diffusion rate of cough aerosols, and the larger the ventilation area, the faster the diffusion rate of particles indoors. The ranking of indoor aerosol particle residual rates under the four ventilation strategies is as follows: small gap ventilation of doors and windows>open door ventilation>open window ventilation>fully open door and window ventilation. Under the ventilation strategies of fully opening doors and windows and small gaps in doors and windows, the relative aerosol capture rate of students in the lower bunk of the room is higher than that of students in the upper bunk. These results are of great significance for understanding the impact of different ventilation strategies on indoor air quality and student health.

Key words: college dormitory; aerosols; ventilation strategy; diffusion characteristic; Computational Fluid Dynamics

呼吸道传染病主要的传播途径包括飞沫传播和接触传播,而在相对密闭的环境中也可通过气溶胶传播^[1]。气溶胶能够长时间悬浮在空气中,

当人体呼出不同粒径液滴携带的病毒浓度相等时,气溶胶传播的风险远大于飞沫传播^[2]。我国传统高校学生宿舍多为内廊式,走廊两边的房间

收稿日期:2024-04-24

基金项目:上海市联盟计划(2019043);上海市自然科学基金资助项目(18ZR1438100)

第一作者:肖伟(2000—),男,山西阳泉人,硕士研究生,研究方向为室内污染物扩散。

*通信作者:刘春元(1976—),女,河北唐山人,博士,副教授,研究方向为建筑环境污染物控制。

并排相对。宿舍空间通常人口稠密、通风不良,在冬季,学生在宿舍的通风习惯不同,部分宿舍通风效果较差,存在呼吸道传染病交叉感染的隐患。病毒通过气溶胶传播导致学校宿舍出现聚集性感染的报道屡见不鲜,学生宿舍存在较高的气溶胶传播风险,应当引起重视。

封闭的室内环境被认为是气溶胶传播的高风险场所。随着计算机性能的提高以及仿真模拟软件的发展,计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的方法被广泛用于室内气溶胶扩散的研究。目前对于气溶胶扩散的研究场所包括医院诊室、高级会议室等建筑,如 Zhou 等^[3]对医院诊室进行模拟研究发现,通风系统去除气溶胶颗粒的能力随着进风速度的增大而增强,室内的通风形式对人体吸入气溶胶的百分比有重要影响。此外还包括高铁、轿车、飞机客舱等交通工具,如 Zhang 等^[4]模拟高铁车厢内人体咳嗽产生的气溶胶迁移过程,结果表明,人体咳嗽产生的气溶胶会跟随人体热羽流向车厢上部空间运动,如果车厢内部存在纵向贯通的通风气流,气溶胶的去除效率会显著增加,但扩散距离也会增加。张晋哲等^[5]采用欧拉-拉格朗日法对人体气溶胶在轿车内的传播过程进行数值模拟,结果表明,提高空调送风速度更容易控制气溶胶的运动轨迹,也更利于排出轿车室内的气溶胶颗粒。

目前对于气溶胶在学生宿舍内扩散特性的研究还较少,学生宿舍作为人员密集场所之一,了解学生之间气溶胶传播的机制对于学生宿舍制定防控措施非常重要,本文通过计算流体动力学的方法,基于离散相模型,对人体咳嗽气溶胶在学生宿舍内的扩散进行数值模拟,通过研究学生不同的通风策略对气溶胶运动路径和分布特征的影响,有利于降低学生之间的传播风险,从而避免高校学生宿舍出现呼吸道传染病聚集性感染。

1 数值计算方法

1.1 几何模型及通风策略设计

本文以上海市某高校学生宿舍为研究对象,根据实测结果,使用 Spaceclaim 绘制学生宿舍几何模型。房间尺寸为 3 m×5 m×3 m,房间体积为 45 m³,下铺床板距离地面 0.5 m,上铺床板距离地面 1.8 m。宿舍的气流组织形式通过改变通风策略来实现,学生在宿舍的通风行为习惯分为四种,分别是开窗通风、开门通风、门窗全开通风、门窗

小缝通风,本章对这四种通风策略作为模拟工况进行研究,如图 1 所示。

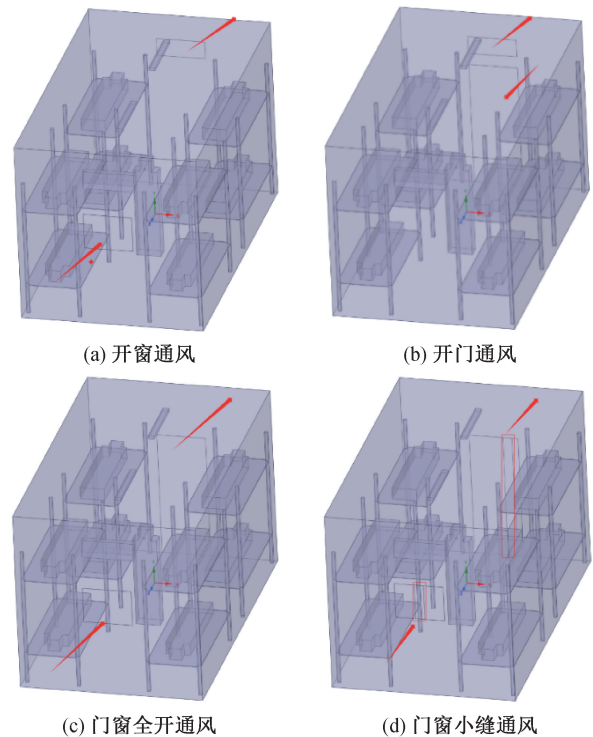


图 1 宿舍模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dormitory model

学生身高假定为 1.7 m,将人体头部简化为正方体,躯干简化为长方体^[6]。宿舍内有 4 张上下铺床,床上各躺着 1 名学生,假定只有室内中心呈站立状态的学生为传染源,其余学生均处于健康状态。传染源口部简化为矩形出口,宿舍内相关布置物及人体尺寸见表 1。

表 1 宿室内布置物及人体尺寸

Tab. 1 Indoor decoration and human body size

名称	数量/个	长/mm	宽/mm	高/mm
床板	8	2 000	900	50
床柱	16	50	50	2 300
空调	1	850	100	300
灯具	2	1 000	100	50
门	1	800	—	2 100
外窗	1	800	—	600
廊窗	1	800	—	300
头部	9	200	200	200
躯干	9	400	200	1 500
口部	1	30	30	—

为了直观地对比不同位置的学生受人体咳嗽气溶胶的影响,对宿舍 8 个位置的学生进行标记,上铺的学生从左至右分别标记为 1—4,下铺学生对应为 5—8,如图 2 三视图所示。

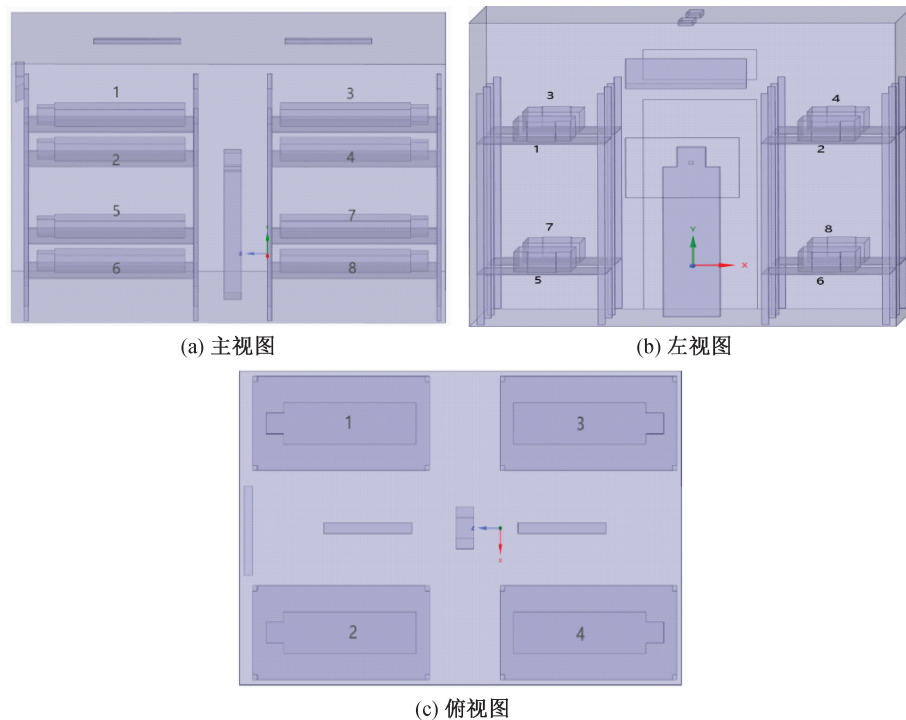


图2 学生位置标记

Fig. 2 Marking of student positions

1.2 边界条件及求解器设置

人体咳嗽产生脉冲射流,在 0.12 s 左右出现最大射流速度约为 9 m/s,一次咳嗽的持续时间约为 0.4 s,咳嗽射流速度随时间的变化如图 3 所示^[7]。

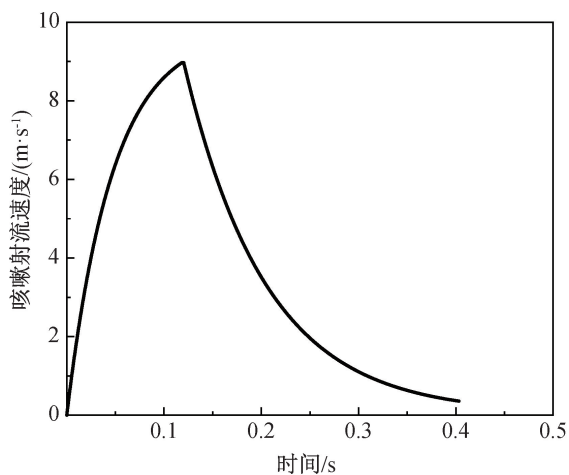


图3 咳嗽射流速度随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curve of cough jet velocity with time

将图 3 的射流曲线拟合两个方程式,式(1)为 x 从 0 至 0.12 s 的拟合方程,式(2)为 x 从 0.12 s 至 0.4 s 的拟合方程。

$$y = -625x^2 + 150x \quad (1)$$

$$y = 87x^2 - 70x + 16 \quad (2)$$

式中: x 为时间,s; y 为咳嗽射流速度,m/s。

本文采用 DEFINE_PROFILE 宏来定义咳嗽射流速度,粒径较大的颗粒受重力的影响较大,因此计算域设置必要的重力条件^[8],重力加速度取 9.80 m/s^2 。本文对人体咳嗽产生气溶胶的过程进行简化:将人体口部看作一个面射流源^[9],颗粒沿垂直于人体口部的方向喷出,颗粒类型设置为液滴,蒸发相的质量分数设为 91.5%^[10],颗粒密度取 1100 kg/m^3 ,气溶胶质量流率设为 $5.2e^{-11} \text{ kg/s}$ ^[11],气溶胶的粒径范围在 $1 \sim 15 \mu\text{m}$,平均粒径为 $10 \mu\text{m}$,采用 Rosin-Rammler 分布对气溶胶粒径进行拟合^[12]。本文边界条件设置如表 2 所示。

表 2 边界条件

Tab. 2 Boundary condition

名称	边界设置	离散相边界条件
传染源口部	0~0.4 s 为速度入口	逃逸(escape)
	0.4 s 后为壁面	捕获(trap)
进风口	速度 1 m/s、温度 4.2 °C	逃逸(escape)
出风口	压力出口,0 Pa	逃逸(escape)
人体表面	定热流密度 23.8 W/m^2	捕获(trap)
灯具	定热流密度 100 W/m^2	捕获(trap)
其余壁面	绝热	捕获(trap)

本文采用离散相模型 (Discrete Phase Model, DPM) 追踪气溶胶颗粒的运动轨迹, 人体咳嗽产生的气溶胶在空气中的扩散过程受室内流场、咳嗽时间、咳嗽角度等诸多因素的影响, 作如下假设: 假设室内初始气溶胶浓度值为 0, 进风气流的的气溶胶浓度值为 0; 忽略气溶胶中病菌的存活和衰减特性^[13], 忽略气溶胶颗粒间的凝聚和破碎现象^[14]; 颗粒在室内扩散的过程中始终保持球形^[15]。本研究采用非稳态模拟, 求解器的具体设置如表 3 所示。

表 3 求解器设置

Tab.3 Settings of solver

设置项	设定
求解器类型	压力基
湍流模型	RNG k-ε 模型
壁面函数	标准壁面函数
求解方法	SIMPLE 算法
初始化方法	标准初始化
空间离散格式	二阶迎风离散格式

1.3 网格划分及无关性验证

采用 Fluent Meshing 进行网格划分, 网格类型为多面体网格, 在靠近壁面的位置添加边界层网格, 对人体口部、进风口、出风口附近区域进行局部加密, 其他位置采用较大的网格尺寸, 网格划分效果如图 4 所示。

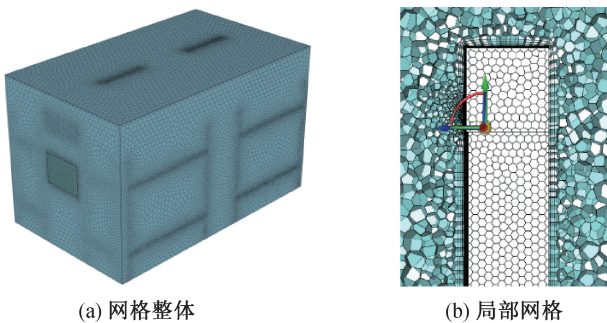


图 4 网格划分图

Fig. 4 Diagram of grid division

本文选取 78.4 万、103.8 万、123.7 万、167.2 万四种数量的网格进行无关性验证, 在室内中心位置设置一条气流速度测线, 读取该线上的速度分布, 结果如图 5 所示, 可以看到 78.4 万和 103.8 万网格的速度分布曲线在一定范围内偏差较大; 123.7 万和 167.2 万网格条件下的速度分布较为类似, 只有细微差别。综合考虑计算

机性能和运算时间, 本文选择 123.7 万的网格进行仿真。

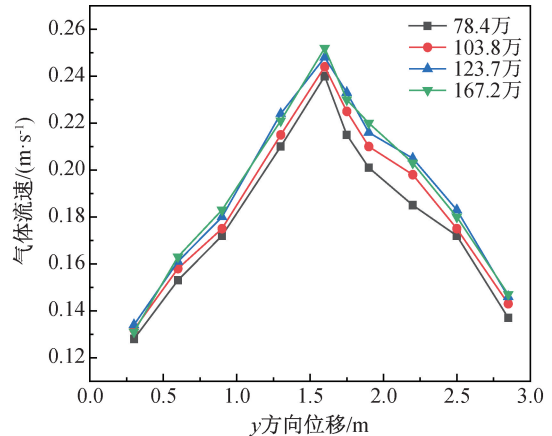


图 5 网格无关性验证图

Fig. 5 Verification diagram of grid independence

1.4 数值模型验证

对气溶胶颗粒在咳嗽射流作用下的扩散特性进行验证, 将模拟结果与 Liu 等^[16]建立的咳嗽液滴核理论模型进行对比分析。室内环境温度为 20 °C, 相对湿度为 0%, 模拟初始粒径为 10 μm 的气溶胶颗粒以 10 m/s 的速度从人体口部喷出, 结果对比如图 6 所示, 仿真模拟结果与文献计算结果较为接近, 可以较好预测大部分气溶胶颗粒的扩散距离, 绝大多数颗粒处于咳嗽射流边界中, 仅个别颗粒存在一定偏差, 从而验证了本文模型的合理性。

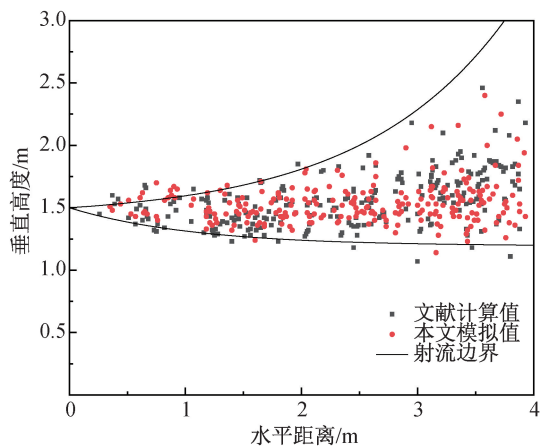


图 6 气溶胶扩散特性验证

Fig. 6 Verification of aerosol diffusion characteristic

2 结果与讨论

2.1 室内气流组织分布

将宿舍纵截面作为监测面, 模拟得到四种通

风策略的气流速度矢量图,如图7所示。从结果可知,开窗通风策略下,室外冷空气进入房间后,周围的空气不断被卷入,射流范围略微扩大,并逐渐下沉。传染源背侧及左侧底部位置存在多个形状及大小不一的涡旋。整体来看,窗户和廊窗附近

空气流速偏大,其余位置空气流速较小。开门通风策略下,空调上方拐角处以及传染源左侧空间存在多个涡旋,涡量大小和涡线轨迹均不相同。由于开门的通风面积较大,室内整体流速高于开窗通风,廊窗附近风速最大,房间门附近其次。当房间的外窗和门同时开启时,室内形成对流,即“穿堂风”。门窗全开通风策略下,进风气流接触传染源后向下运动,并沿地板和左侧墙壁流动,当靠近左侧窗户时,少部分空气被吸入进风口处,剩余空气沿进风射流方向继续流动,在房间左侧形成局部回流。整体来看,房间左侧进风口附近风速最大,右侧出风口、地板壁面附近风速偏大,其余位置风速较为均匀。门窗小缝通风策略下,进风气流下移的位置相比门窗全开有所提前,整体上看,门窗小缝策略下室内气流组织分布不均,房间底部以及顶部空间存在较多的小涡旋,这些小涡旋会阻碍气溶胶颗粒的排出。

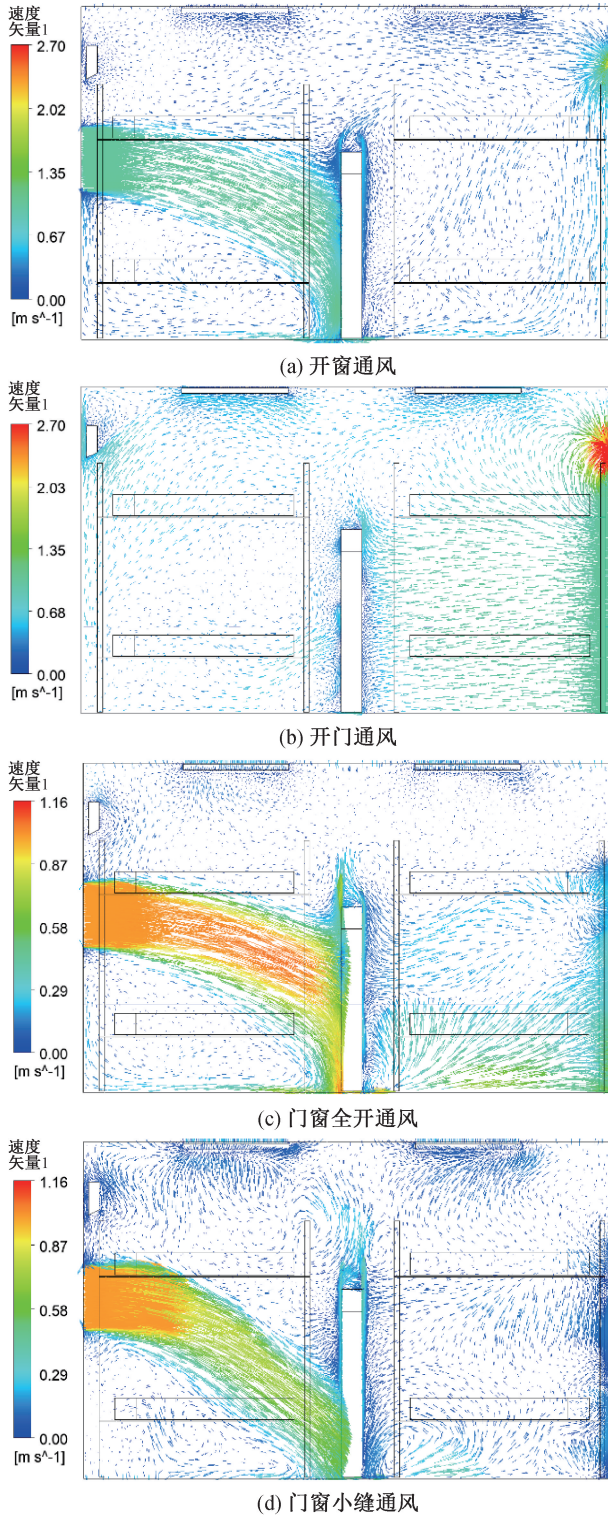


图7 气流速度矢量图

Fig. 7 Vector diagram of airflow velocity

2.2 气溶胶质量浓度分布

将宿舍纵截面作为监测面,从传染源咳嗽产生气溶胶开始,记录四种通风策略60 s时监测面的气溶胶浓度分布云图,如图8所示,红色区域为质量浓度最高,黄色、绿色、蓝色区域浓度依次降低。开窗通风策略下,气溶胶扩散60 s时,房间右侧气溶胶颗粒影响范围大于房间左侧。开门通风策略下,由于进风口在右侧,气溶胶在短时间内受气流影响较小,颗粒聚团性较明显。气溶胶扩散60 s时,气溶胶在房间左侧的影响范围大于右侧,廊窗附近气溶胶质量浓度较低。门窗全开策略下,气溶胶向左侧的扩散距离小于门窗小缝策略。气溶胶扩散60 s时,门窗全开策略房间整体气溶胶影响范围小于门窗小缝策略。综合来看,如果在宿舍同时开启门和窗,通风面积的大小会影响咳嗽气溶胶的扩散速度,通风面积越大,颗粒在室内的扩散速度越快。

2.3 各位置学生呼吸平面的气溶胶平均浓度

本文将0.3 m的垂直高度作为下铺学生平躺时的呼吸平面高度,1.6 m的垂直高度作为上铺学生的呼吸平面高度,在学生平躺状态下的呼吸平面高度上截取1 700 mm×800 mm的长方形截面,分析该平面上气溶胶平均浓度随时间的变化情况,绘制如图9所示的折线图。

从图9中可以看出,开窗通风策略下,4号、5号、7号和8号学生呼吸区内气溶胶平均浓度在

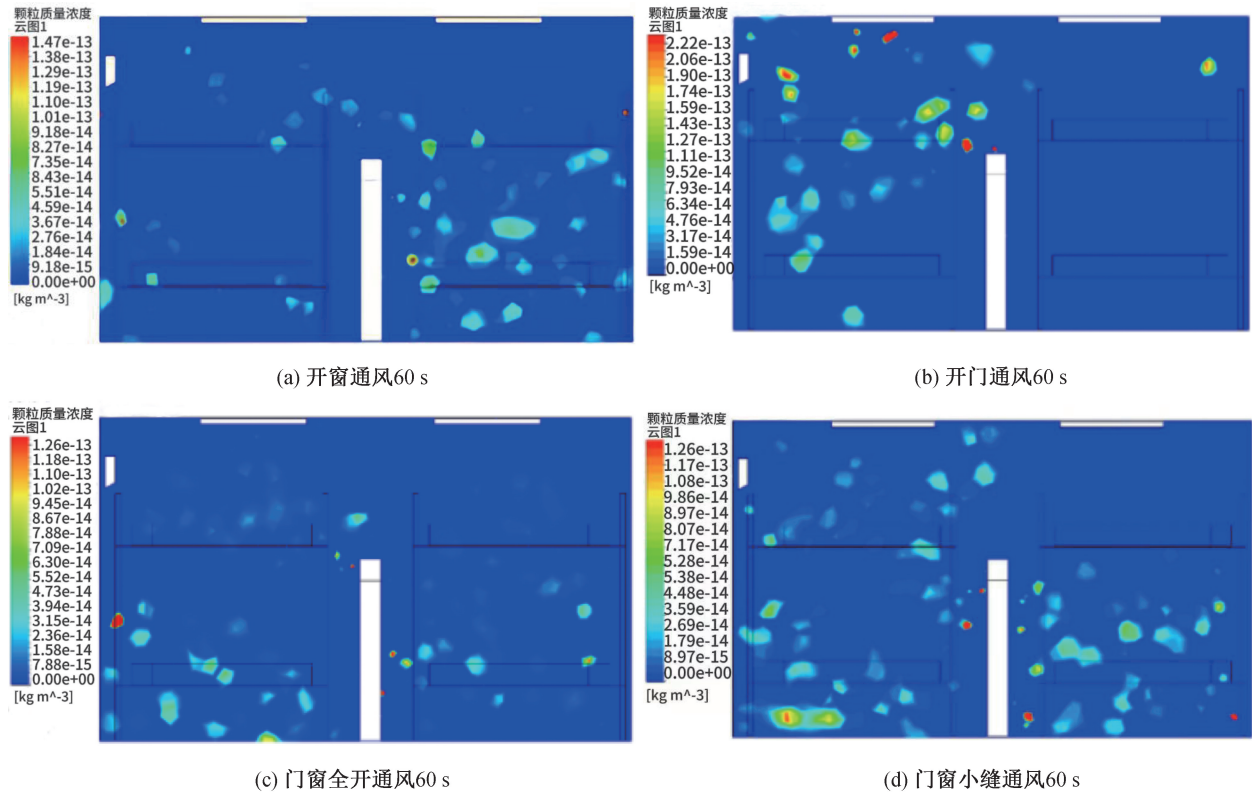


图 8 气溶胶质量浓度分布云图 ($x=0$ m)

Fig. 8 Cloud diagram of aerosol mass concentration ($x=0$ m)

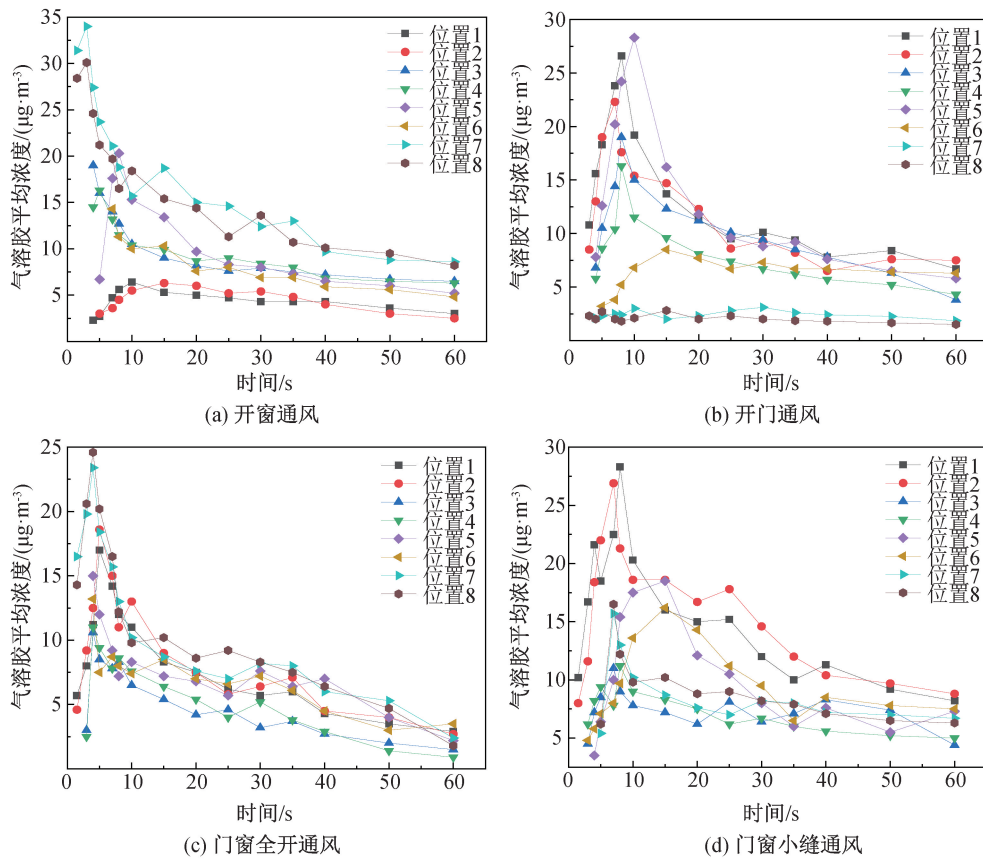


图 9 不同时刻各位置学生呼吸平面的气溶胶平均浓度

Fig. 9 Average concentration of aerosols in the respiratory plane of students at different times and locations

0~10 s内达到峰值,10 s后气溶胶平均浓度随时间整体呈下降趋势。1号和2号学生呼吸区气溶胶平均浓度达到峰值的时间在10~15 s之间,随后浓度变化趋势较为平缓。气溶胶扩散60 s时,2号学生呼吸区内的气溶胶平均浓度为所有位置中最低。开门通风策略下,7号和8号学生呼吸区气溶胶平均浓度整体趋势较为平缓。气溶胶扩散60 s时,2号学生呼吸区气溶胶平均浓度为所有位置中最高,7号和8号学生呼吸区气溶胶平均浓度显著低于其余位置。室内门窗的开启程度可以显著影响宿舍同一位置学生呼吸区气溶胶平均浓度的变化趋势。整体上看,所有学生呼吸区气溶胶平均浓度均是先快速上升,再逐步下降。门窗全开通风策略下,7号和8号学生呼吸区气溶胶平均浓度在7 s时显著高于其余位置。门窗小缝通风方案下,1号和2号学生呼吸区气溶胶平均浓度在5~10 s内达到峰值,5号和6号学生呼吸区气溶胶平均浓度在10~15 s内达到峰值;扩散60 s时,两种通风策略下,3号和4号学生呼吸区气溶胶平均浓度低于其他位置,且门窗小缝方案下各个位置学生呼吸区气溶胶平均浓度均低于门窗全开策略。

2.4 室内气溶胶残余率对比

气溶胶颗粒在空间中的状态包括逃逸、捕获和悬浮,分别代表颗粒在气流影响下从出风口完成逃逸,颗粒被人体表面及房间壁面所捕获,剩余部分气溶胶颗粒则长时间悬浮在空气中^[17]。本研究将传染源咳嗽释放的气溶胶颗粒数量作为总颗粒数量,作如下定义:室内气溶胶残余率=室内悬浮颗粒数量/总颗粒数量 $\times 100\%$ 。

不同通风策略下室内气溶胶残余率随时间的变化如图10所示。随着扩散时间的增加,四种通风策略下气溶胶颗粒在宿舍室内的悬浮数量整体呈下降趋势。开窗通风策略下,在0~25 s内,室内悬浮气溶胶颗粒数量变化较大,室内气溶胶残余率快速下降。开门通风策略下,在0~25 s和45~60 s内,气溶胶颗粒悬浮数量下降较为平缓。开窗通风与开门通风策略的区别主要是受进风口位置的影响,进风口位置不同导致入射气流产生不同方向的扰动,气溶胶在进风气流的影响下被附着到物体表面或排出室内,从而使得气溶胶悬浮数量下降。

门窗全开和门窗小缝策略下,室内气溶胶残余率曲线下降趋势较为相似。两种策略下,气溶

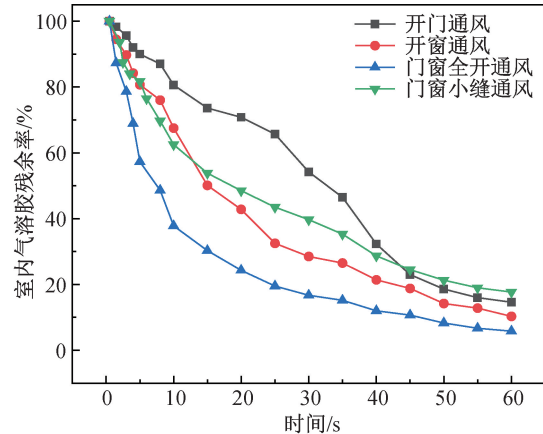


图10 室内气溶胶残余率随时间的变化

Fig. 10 Variation of indoor aerosol residual rate with time

胶扩散1~10 s内的室内气溶胶数量变化较大,室内气溶胶残余率急剧下降,扩散10 s后气溶胶悬浮数量下降趋于平缓,颗粒减少量降低。这主要是受通风面积影响,由于通风面积小,门窗小缝策略下,室内的许多拐角处和人体附近存在较多的小涡流,这些小涡流会阻碍气溶胶排出室内。

2.5 气溶胶相对捕获率对比

当气溶胶颗粒接触人体表面、各种部件表面及房间内壁面时,会被捕获并立即终止计算^[18]。为了评价宿舍内各个位置的学生的的气溶胶接触风险,对不同通风策略下各个位置学生的的气溶胶相对捕获率进行对比。为评价宿舍内各个位置的学生的的气溶胶接触风险,作如下定义:气溶胶相对捕获率=该位置人体壁面气溶胶捕获颗粒数量/8个位置人体壁面捕获的颗粒总数量 $\times 100\%$,结果如图11所示。

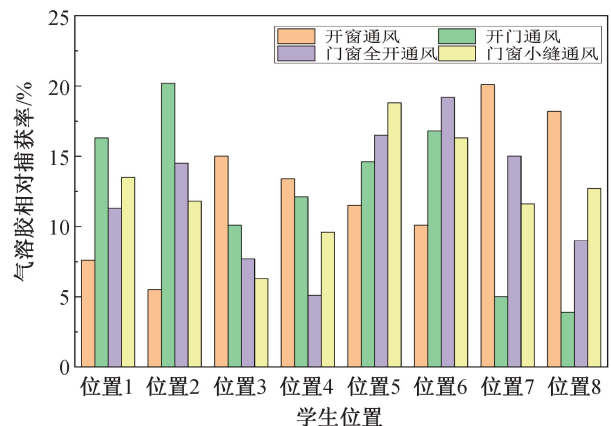


图11 不同位置学生的的气溶胶相对捕获率

Fig. 11 Aerosol relative capture rates of students at different locations

在较短时间内,落在学生表面的气溶胶颗粒数量较少,随着气溶胶的扩散,被各个位置学生捕获的颗粒数量逐渐增多。气溶胶扩散 60 s 时,从结果可知,当房间采用开窗通风时,7 号为所有位置中最高,2 号学生的的气溶胶相对捕获率最低,1 号和 2 号学生的的气溶胶相对捕获率显著低于其余学生;开门通风策略下,2 号学生的的气溶胶相对捕获率最高,7 号和 8 号学生的的气溶胶相对捕获率显著低于其余学生;门窗全开和门窗小缝较相似,各个位置学生的的气溶胶相对捕获率较为接近,采用门窗全开策略时,6 号学生的的气溶胶相对捕获率最高,4 号学生最低;门窗小缝策略下,5 号学生的的气溶胶相对捕获率最高,3 号学生最低,门窗全开和门窗小缝策略下,3 号和 4 号学生的的气溶胶相对捕获率显著低于其他位置。

综合来看,当房间采用开窗通风时,房间右侧学生的的气溶胶相对捕获率较高,开门通风策略下,房间左侧学生的的气溶胶相对捕获率较高,门窗全开通风和门窗小缝通风策略下,房间下铺学生的的气溶胶相对捕获率高于上铺学生。该结果对于了解不同通风策略对室内空气质量和学生健康的影响具有重要意义。

3 结论

1) 开门通风策略下的房间整体气流速度大于开窗通风策略。门窗小缝通风室内气流组织分布不均,房间底部及顶部空间存在较多小涡旋,进风气流下移的位置相比门窗全开通风有所提前。

2) 房间采用的不同通风策略下,气溶胶在室内的影响范围和质量浓度存在差异。室内通风面积的大小会影响咳嗽气溶胶的扩散速度,通风面积越大,颗粒在室内的扩散速度越快。

3) 在气溶胶扩散 60 s 时,四种通风策略下室内气溶胶颗粒残余率排序依次为门窗小缝通风>开门通风>开窗通风>门窗全开通风。在门窗全开通风和门窗小缝通风策略下,房间下铺学生的的气溶胶相对捕获率高于上铺学生。这些结果对于了解不同通风策略对室内空气质量和学生健康的影响具有重要意义。

参考文献:

[1] 韩鹏宇,郑慧芳,滕艳霞,等. 传染病气溶胶经呼吸途径传播的研究进展[J]. 中国人兽共患病学报, 2023, 39(2): 153-160.

- [2] 李景明,张震宇. 亭式核酸采样环境飞沫传播风险影响因素研究[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1958-1964.
- [3] ZHOU Y, JI S. Numerical study of airborne droplets propagation inside a hospital consulting room[J]. Fluid Dynamics Materials Processing, 2021, 17(1): 189-200.
- [4] ZHANG L, LI Y. Dispersion of coughed droplets in a fully-occupied high-speed rail cabin[J]. Building & Environment, 2012, 47: 58-66.
- [5] 张晋哲,陈硕. 飞沫污染物在轿车车室内的传播[J]. 计算机辅助工程, 2023, 32(1): 27-32.
- [6] 杨亚锋,汪怡平,陈志鑫,等. 大巴车飞沫扩散特性及乘客感染风险预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(1): 161-167.
- [7] 郑立捷,许建,吴方良,等. 通风模式对住舱人员咳嗽液珠扩散过程的影响[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(2): 12-20.
- [8] 栾一刚,殷越,李永曦,等. 公共场所空间内气溶胶的扩散特性研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2021, 53(5): 1-9.
- [9] 刘鹏. 病房飞沫污染物的浓度变化特征及污染控制[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- [10] NICAS M, NAZAROFF W W, HUBBARD A. Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2005, 2(3): 143-154.
- [11] LI X, SHANG Y, YAN Y, et al. Modelling of evaporation of cough droplets in inhomogeneous humidity fields using the multi-component Eulerian-Lagrangian approach[J]. Building & Environment, 2018, 128:68-76.
- [12] 罗婷,胡卓焕,杨莱. 有限空间内飞沫颗粒传播规律的数值研究[J]. 流体机械, 2021, 49(7): 83-90.
- [13] 苗露. 电梯轿厢内气溶胶传播特性研究及通风方案优化[D]. 济南:山东建筑大学, 2023.
- [14] 韩龙娜. 基于风冷冷凝器喷雾降温装置的实验研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2015.
- [15] 徐任泽,伍钒,刘欢,等. 高速列车客室内呼吸道飞沫传输规律的数值模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(5): 2049-2059.
- [16] LIU L, WEI J, LI Y, et al. Evaporation and dispersion of respiratory droplets from coughing[J]. Indoor Air, 2017, 27(1): 179-190.
- [17] 苗露. 电梯轿厢内气溶胶传播特性研究及通风方案优化[D]. 济南:山东建筑大学, 2023.
- [18] 周玉,纪坤,张冬青,等. 诊室内飞沫颗粒传播对人体感染风险的数值研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(2): 217-222.

(责任编辑 张爱丽)