

# 高速列车内飞沫传播特性及抑制方法研究

刘雯<sup>1☆</sup> 李徽<sup>1</sup> 李林蔚<sup>1</sup> 鞠胜军<sup>2△</sup>

(1. 中车工业研究院有限公司, 北京 2. 中国科学院力学研究所, 北京)

**摘要:** 采用基于 Euler-Lagrange 的数值模拟方法, 对高速列车车厢内气流组织及飞沫扩散传播特性进行了研究, 提出并验证了合理的抑制飞沫传播扩散方法。研究表明: 高速列车上下送回的通风方式会在车厢内形成大范围的旋涡结构, 对飞沫的传播扩散影响较大; 通过在车厢顶部加装整流网的方式, 可以使飞沫的传播距离缩短 34.5%, 减少乘客间的交叉感染。控制方案可为高速列车的车厢通风系统设计及保障旅客健康安全方面提供参考。

**关键词:** 高速列车; 计算流体力学; 飞沫传播; 流动控制; 通风系统

## 0 引言

高速铁路的快速稳定发展, 促进了区域间的经济发展、文化交流与城市建设。其快速、准点、便捷的特性, 使得高铁乘客人数逐年增多, 2022 年国家铁路完成客运发送量 16.1 亿人次<sup>[1]</sup>。旅客人数的增加使得人员来源变得复杂, 乘客流动性大幅度提高, 给狭小、密闭的车厢内的卫生安全防护带来了挑战。若封闭车厢内出现严重流行性呼吸道传染病, 如新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 等<sup>[2]</sup>, 不仅严重威胁了人们的生命健康与财产安全, 也给列车运营造成了较大的影响<sup>[3-4]</sup>。从 2003 年非典型肺炎 (SARS)<sup>[5]</sup> 的迅速传播, 到 2012 年沙特发现的中东呼吸综合征 (MERS)<sup>[6]</sup> 病毒, 再到 2020 年的 COVID-19, 这 17 年间国内外学者在针对携病毒飞沫传播的研究方法、传播规律和抑制传播等方面作了大量的研究<sup>[6-7]</sup>。

飞沫作为病毒的载体, 传播的影响因素包括飞沫粒径、呼吸状态、环境气流参数、污染源位置和通风换气量等, 研究病毒的飞沫传播过程主要有实验和数值模拟 2 种方法。Zhu 等人通过粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 和粒子阴影示踪测速 (particle shadow tracking velocimetry, PSTV) 展示了平静室内环境中咳嗽引起的飞沫颗粒运动的时空演变过程, 分析了飞沫颗粒的分布形态及输运特性<sup>[8]</sup>。实验研究的优点是可以得到最准确可靠的飞沫传播运动信息, 但对于高铁车厢等真实环境, 面临着大型实验平台难以搭建、需要昂贵的实验仪器及人力等困难。数值模拟方法则凭借其微观流动现象强大的捕捉能力, 可以弥补实验研究的缺陷。魏方等人通过多相流仿真手段, 对机械通风房间内人与人之间的飞沫传播特性进行了数值模拟, 并用实验数据与数值模拟结果进行了对比, 验证了数值模拟方法的可靠性<sup>[9]</sup>。You 等人通过数值模拟的方法, 对多种送风工况下飞机座舱内的流场特性及飞沫颗粒的传播轨迹进行了研究, 并分析了流场特性对于飞沫颗粒传播的影响<sup>[10]</sup>。汪新智等人<sup>[11]</sup>和王飞等人<sup>[12]</sup>通过模拟通风环境中飞机客舱和室内的飞沫颗粒扩散过程及颗粒浓度分布, 对 Euler-Euler 法和 Euler-Lagrange 法进行了评估, 结果表明 Euler-Lagrange 法能够精确地模拟颗粒相与气体相相互渗透的运动过程。

目前, 已有研究多集中于地铁、客车等车厢内的飞沫传

播, 缺乏对高铁车厢这类复杂空间中飞沫传播的精准定量研究, 不足以形成应对公共交通突发传染病事件的完整体系。本文采用 Euler-Lagrange 气液两相流数值仿真技术, 分析了高速列车车厢内气流组织及其对飞沫传播的影响, 并提出了在车厢顶部加装整流网用于抑制飞沫传播的流动控制方案。本研究对防止病毒在高铁车厢内的传播、保障旅客健康安全方面具有重要意义。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 几何模型

选择空调开启状态下的标准动车组列车作为研究对象, 列车的通风系统包括 1 个送风口、2 个回风口和 1 个废排口, 分布方式如图 1 所示。送风量为 4 800 m<sup>3</sup>/h, 回风量为 3 000 m<sup>3</sup>/h, 废排风量为 1 800 m<sup>3</sup>/h。

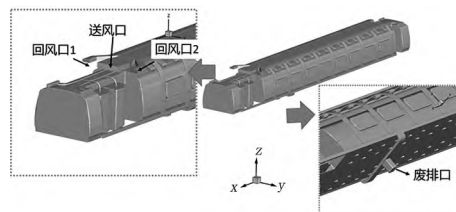


图 1 车厢外通风系统分布图

车厢内共有 19 排座位, 每排 5 个座位, 整节车厢满员状态为 95 人, 3 联排靠近窗户的座位号为 A, 2 联排靠近窗户的座位号为 F。

### 1.2 数值模型

基于 Euler 方法进行空气连续相的计算<sup>[13]</sup>, 不可压缩的控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程, 具体形式如下。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中  $u_i$  为空气在  $i$  方向的速度分量;  $x_i$  为  $i$  方向的位移分量。

☆ 刘雯, 女, 1992 年生, 工程师

△ 鞠胜军 (通信作者)

100191 北京市海淀区北四环西路 15 号

E-mail: optju@imech.ac.cn

收稿日期: 2023-06-06

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中  $\rho$  为空气密度;  $t$  为时间;  $u_j$  为空气在  $j$  方向的速度分量;  $p$  为静压;  $\tau_{ij}$  为切应力张量;  $x_j$  为  $j$  方向的位移分量。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial[\rho u_i (E + p)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \tau_{ij} \right) \quad (3)$$

式中  $E$  为总能量;  $k$  为导热系数;  $T$  为热力学温度。

基于 Lagrange 方法进行飞沫离散相的计算<sup>[14-15]</sup>, 并充分考虑气体流动对颗粒物扩散的影响, 飞沫运动方程的具体形式如下:

$$\frac{\partial(m_D U_i)}{\partial t} = F_{G,i} + F_{B,i} + F_{D,i} + F_{T,i} \quad (4)$$

式中  $m_D$  为飞沫质量;  $U_i$  为飞沫  $i$  方向的速度分量;  $F_{G,i}$  为飞沫  $i$  方向的重力分量;  $F_{B,i}$  为飞沫  $i$  方向的浮力分量;  $F_{D,i}$  为飞沫  $i$  方向的拖曳力分量;  $F_{T,i}$  为飞沫  $i$  方向的热泳力分量。

根据蒸发平衡理论, 采用 Langmuir 公式<sup>[16]</sup> 来描述飞沫颗粒的蒸发过程及计算蒸发时间。

$$I = \frac{dm}{dt} = \frac{2\pi D M d_p}{RT} (p_0 - p_e) \quad (5)$$

式中  $I$  为飞沫蒸发质量速率;  $D$  为溶剂分子的扩散系数;  $M$  为蒸汽分子的摩尔质量;  $d_p$  为飞沫颗粒直径;  $R$  为气体常数;  $p_0$  为表面的饱和蒸汽压力;  $p_e$  为环境空气中局部蒸汽压力。

飞沫采用多组分颗粒模型<sup>[17]</sup>, 其中蒸发相为水, 质量分数为 96.464%, 假定剩余包含病毒的非蒸发相为氯化钠盐, 质量分数为 3.536%。

忽略传染源的吸入过程, 主要考察其呼出的飞沫在周围环境中的扩散。根据文献调研, 人咳嗽时飞沫的喷射速度为 10 m/s, 飞沫喷出的持续时间为 1.0 s, 飞沫的粒径在 22~50  $\mu\text{m}$  之间非均匀分布<sup>[18]</sup>。根据实验相关数据, 采用 Rosin-Rammler-Logarithmic 拟合飞沫的粒径分布<sup>[19]</sup>。计算采用非结构网格, 对壁面进行了边界层的加密, 如图 2 所示, 总网格数量为 1 500 万个左右。

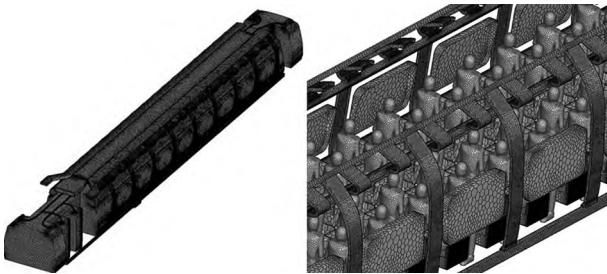


图 2 计算网格整体及内部图

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 车厢内气流组织分析

图 3、4 显示了典型位置处车厢内空气流场速度分布。可以看出, 车厢内整体呈现为上送下回的通风方式, 空气通

过送风口在车厢内部车顶处交汇, 形成速度较大的纵向气流, 进而在车厢的左右两侧的乘客区域形成较大的旋涡流动结构。

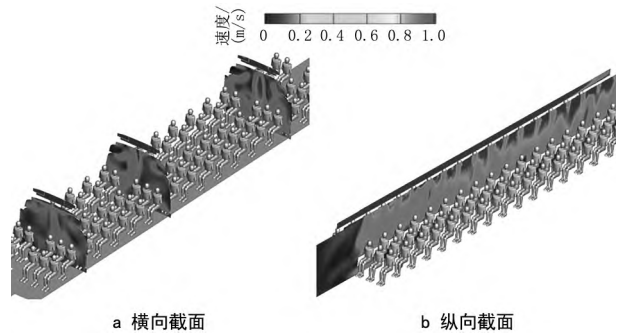


图 3 车厢内流场速度分布云图

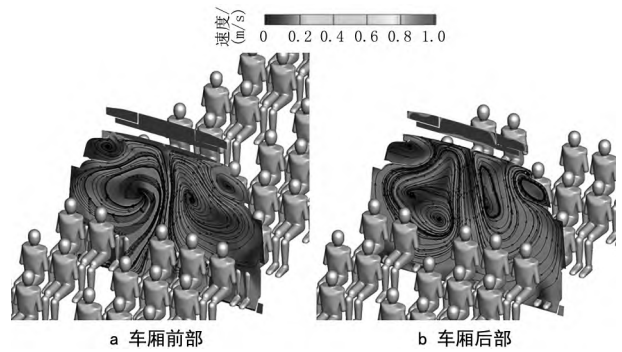


图 4 不同横向截面速度分布云图

图 5 为车厢内不同速度等值面图, 由于出风口的位置位于车厢顶部, 在车厢顶部的气流速度整体偏高, 车厢中流场内的大部分区域气流速度在 0.1~0.5 m/s 之间, 且大部分流场区域气流速度介于 0.1~0.2 m/s 之间。

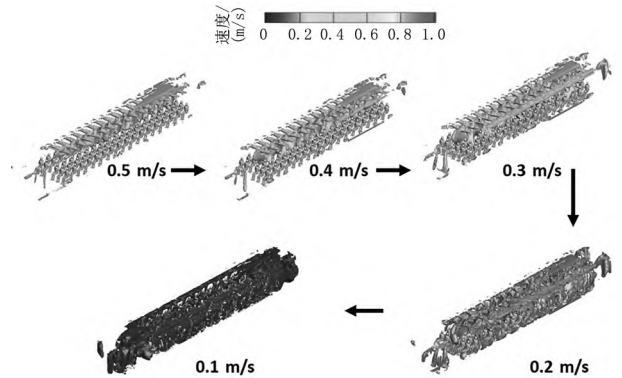


图 5 车厢内不同速度等值面图

### 2.2 车厢内飞沫扩散分析

通过对车厢内气流组织分析, 可以看出, 在靠近车厢后部位置, 有明显的旋涡流动结构, 因此选取车厢的第 17 排 B 号座位这个典型位置乘客作为咳嗽飞沫源, 总时长为 20 s, 产生飞沫源的乘客位置如图 6 所示。

图 7 显示了不同时刻飞沫在车厢内的分布。当飞沫喷出时间  $t=1$  s 时, 飞沫从乘客口中呈现伞状迅速喷出; 当飞

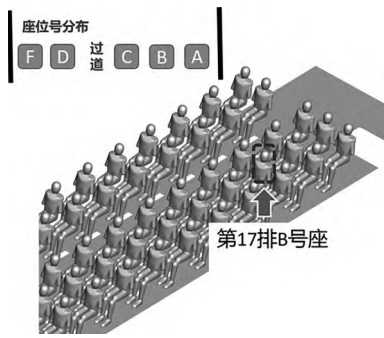


图 6 产生飞沫源乘客位置

沫喷出时间  $t=5\text{ s}$  时,飞沫受车厢内气流组织的作用,在车厢内迅速扩散传播;当飞沫喷出时间  $t=10\text{ s}$  时,飞沫持续在车厢内进行扩散,但部分飞沫已经通过通风系统排出车外或粘在车厢内的座位、车底等部位,飞沫在车厢空间内的分布浓度明显降低;当飞沫喷出时间  $t=20\text{ s}$  时,车厢空间内飞沫的数量进一步降低。

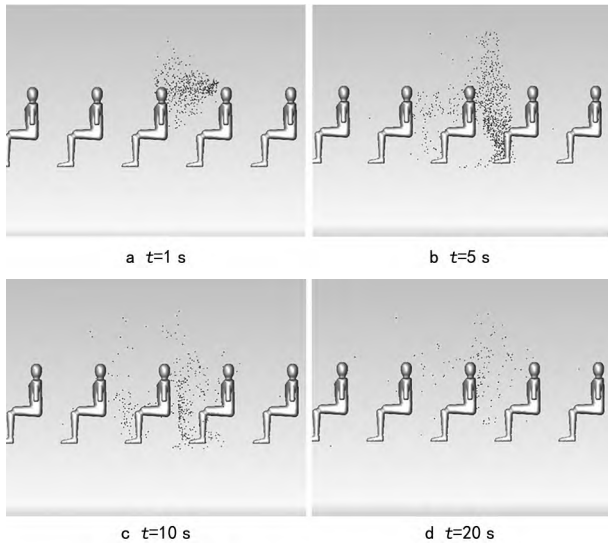


图 7 不同时刻下飞沫扩散情况

图 8、9 分别显示了飞沫在车厢内的传播距离及逃逸质量随时间的变化,可以看出:飞沫在喷出的 1 s 内传播距离迅速增加,之后随着时间的缓慢延长,最远传播距离达到 2.75 m;飞沫在 1~7 s 之间逃逸质量处于较高的数值,其中在 2 s 左右有一个峰值,此时飞沫喷出后多数落在座位或乘客身体等位置;飞沫的逃逸质量在 6 s 左右处于另外一个峰值处,此时飞沫多数落在地板或直接随气流排到车外。

图 10 给出了飞沫喷出后 20 s 内飞沫的蒸发质量随时间的变化过程,可以看出整个蒸发过程发生在飞沫喷出后 2 s 内,之后飞沫达到了最小粒径尺寸,飞沫不再继续蒸发。

### 2.3 抑制飞沫传播方式

由于车厢内有旋涡结构,致使飞沫的扩散传播距离较远,通过在车顶加装整流网的流动控制方式,让车内气流更加“平稳”,抑制车内大的旋涡流动,进而抑制飞沫的传播,整流网的构型及安装位置如图 11 所示。

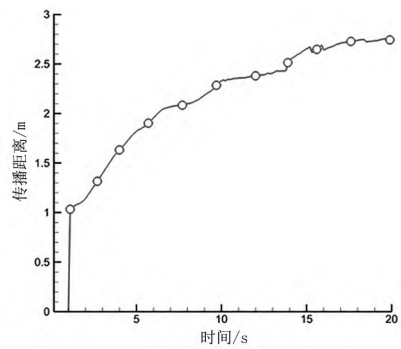


图 8 飞沫传播距离

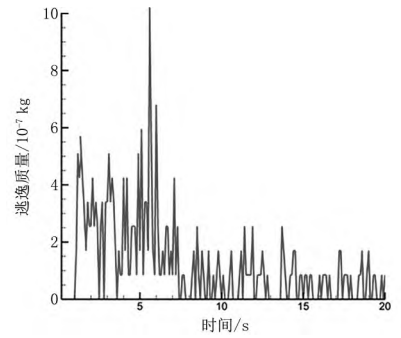


图 9 飞沫逃逸质量

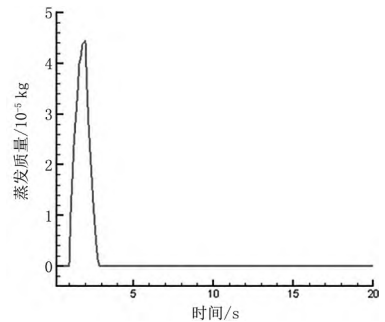


图 10 飞沫蒸发质量

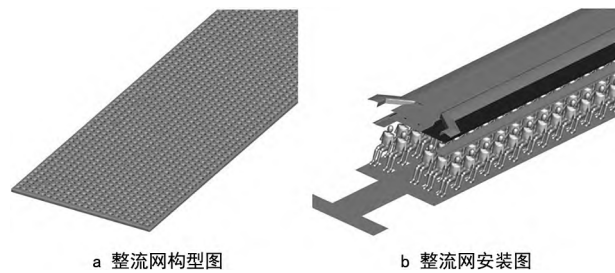


图 11 整流网构型及安装示意图

在安装整流网后,同样选取车厢的第 17 排 B 号座位的乘客作为咳嗽飞沫源,进行总时长为 20 s 的数值模拟。安装整流网后不同时刻飞沫在车厢内的分布如图 12 所示,与图 7 中各个时刻的飞沫扩散图进行对比。可以看出:当  $t=1\text{ s}$  时,飞沫同样呈现伞状迅速喷出;当  $t=5\text{ s}$  时,加装整流网后飞沫的扩散高度得到明显的抑制;当  $t=10\text{ s}$  时,飞沫的扩散高度被进一步抑制,飞沫明显呈现出整体向下的运

行趋势,传播距离得到了缩短;当  $t=20\text{ s}$  时,车厢空间内飞沫的数量有所降低,但比同一时刻没有加装整流网的飞沫颗粒数量要多一些,这是由于加装了整流网后,抑制了车厢内旋涡流动的同时,也降低了车厢内的气流速度。

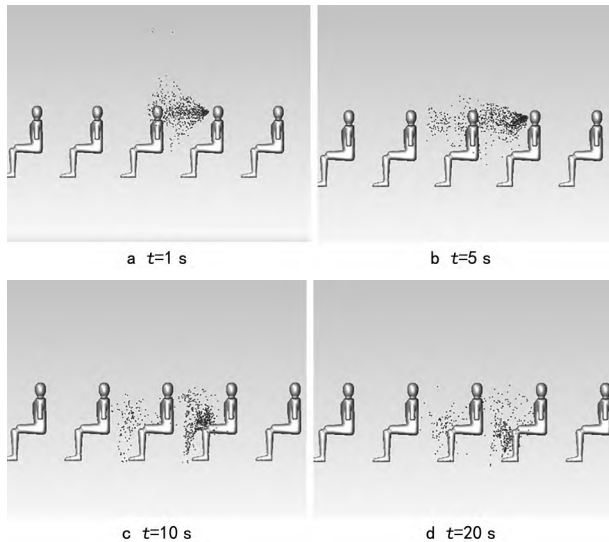


图 12 加装整流网后不同时刻下飞沫扩散情况

图 13 显示了安装整流网前后飞沫传播距离的对比,可以看出,安装整流网后,在各个时刻飞沫的传播距离明显缩短,最远传播距离由  $2.75\text{ m}$  缩短到  $1.80\text{ m}$ ,缩短了  $34.5\%$ ,有效抑制了飞沫的传播。

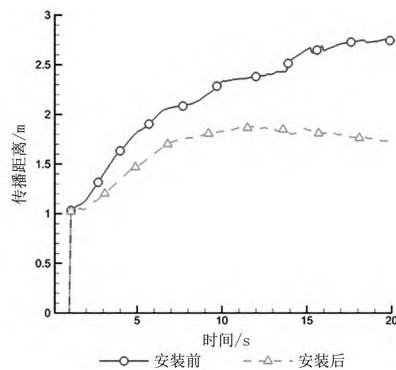


图 13 安装整流网前后飞沫传播距离对比

图 14 显示了安装整流网前后车厢后部横截面的速度分布。可以看出,安装整流网后,车顶中部气流速度明显降低,车厢内速度分布明显变均匀,旋涡流动得到了抑制,进而抑制了飞沫的扩散传播。

### 3 结论

1) 高速列车现有的上送下回的通风方式会在车厢内形成明显的旋涡结构,旋涡结构会加剧车厢内气流紊流程度,增加飞沫的扩散传播距离,是影响车厢内飞沫传播扩散的关键因素。

2) 通过在车厢顶部安装整流网的方式,可以大幅度抑制车厢内的旋涡结构,最远传播距离由  $2.75\text{ m}$  缩短到  $1.80\text{ m}$ ,有效缩短了飞沫的传播距离。

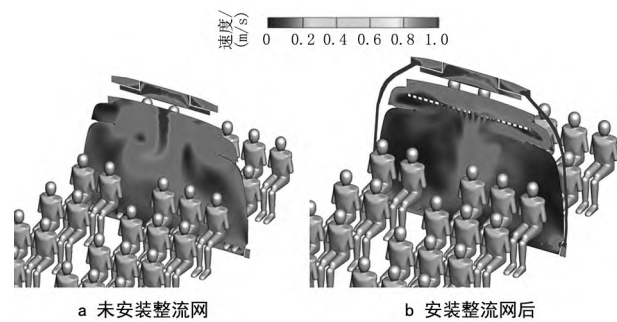


图 14 安装整流网前后车厢后部横截面速度分布云图

### 参考文献:

- [1] 邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022(3):455-530.
- [2] IQBAL M M, ABID I, HUSSAIN S, et al. The effects of regional climatic condition on the spread of COVID-19 at global scale[J]. Science of the total environment, 2020, 739:140101.
- [3] WELLS C R, SAH P, MOGHADAS S M, et al. Impact of international travel and border control measures on the global spread of the novel 2019 coronavirus outbreak[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2020(13). 112-119.
- [4] 李光熙, 陶文铨, 孙晓娟. 非典型肺炎病毒在空气中传播过程的初步数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(7):764-764.
- [5] 朱翠云, 沈银忠, 卢洪洲. 中东呼吸综合征冠状病毒感染的流行、传播与预防[J]. 中国感染与化疗杂志, 2014(4):353-356.
- [6] SHRIVASTAVA S, SHRIVASTAVA P. Minimizing the risk of international spread of coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak by targeting travelers [J]. Journal of acute disease, 2020, 9(2).
- [7] GE Z Y, YANG L M, XIA J J, et al. Possible aerosol transmission of COVID-19 and special precautions in dentistry [J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE B, 2020, 21(5). 35-42.
- [8] ZHU S, KATO S, YANG J H. Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment [J]. Building and environment, 2006, 41(12):1691-1702.
- [9] 魏方, 周娅, 周军, 等. 咳嗽飞沫核携带病毒在病房机械通风条件下经空气传播的人工模拟技术研究 [J]. 中国感染控制杂志, 2020, 19(9): 765-772.
- [10] YOU R, LIN C, WEI D, et al. Evaluating the commercial airliner cabin environment with different air distribution systems[J]. Indoor air, 2019, 29(5): 15-23.

- [11] 汪新智, 任安星, 武永吉, 等. 基于欧拉-拉格朗日方法的携病毒飞沫扩散过程的数值模拟[J]. 自然杂志, 2020, 42(3):239-248.
- [12] 王飞, 高文峰, 李琼, 等. 核酸采样室携带病毒颗粒物扩散的模拟与通风方案优化[J]. 计算机辅助工程, 2022(1):031:69-73.
- [13] 李丹. 病房人体飞沫污染源及传播特性[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [14] 张桉康, 张华玲, 刘鹏. 普通病房飞沫污染物传播特性与评价[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(3): 82-92.
- [15] 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.
- [16] 刘鹏, 张华玲, 李丹. 人体飞沫室内传播的动力学特性[J]. 制冷与空调(四川), 2016(4): 371-376.
- [17] 薛宇, 叶蔚, 张旭. 地铁车厢内病原体佩戴口罩对飞沫病毒传播抑制效果的模拟研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(10):114-119.
- [18] LIU L, WEI J, LI Y, et al. Evaporation and dispersion of respiratory droplets from coughing[J]. Indoor air, 2017, 27(1):179-190.
- [19] CHAO C, MAN P W, MORAWSKA L, et al. Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening[J]. Journal of aerosol science, 2009, 40(2): 47-55.