

文章编号: 1671-6612 (2023) 05-625-10

冬季邮轮客舱不同通风方式对空气环境营造 及人际间新冠肺炎传染风险的数值比较

李育超 季文慧 袁艳平

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 邮轮客舱因空间密闭且缺少自然通风, 可能成为冬季新冠肺炎 (COVID-19) 疫情爆发的高风险场所, 有必要探索合适的通风方式。采用计算流体力学 (CFD) 方法, 以双人客舱为研究场景, 模拟了混合通风、置换通风和贴附射流通风三种通风设计对室内空气品质、舒适水平以及健康风险的性能。结果表明, 在降低交叉感染风险方面, 贴附射流效果显著, 相比混合通风和置换通风, 客舱内同乘人员的吸入暴露比 (IF) 分别降低了 75% 和 88.9%。同时, 贴附射流通风也能够显著改善人体头部水平的空气质量并为人周围提供更高的热舒适水平。

【关键词】 邮轮客舱; 新冠肺炎; 室内空气质量; 热舒适; 计算流体力学

中图分类号 TU834/R181 文献标识码 A

Numerical Comparison with Different Ventilation Methods on the Creation of Indoor Air Environment and COVID-19 Interpersonal Transmission Risk of Cruise Ship Cabins in Winter

Li Yuchao Ji Wenhui Yuan Yanping

(Southwest Jiaotong University, School of Mechanical Engineering, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Cruise ship cabins are at high risk of a winter outbreak of Corona Virus Disease2019 (COVID-19) due to their confined spaces and lack of natural ventilation, and it is necessary to investigate appropriate ventilation options. This paper applies computational fluid dynamics (CFD) method to simulate the performance of three ventilation designs, namely hybrid ventilation, displacement ventilation and wall-based attachment ventilation, on indoor air quality, comfort level and health risks using a two-passenger cabin as a study scenario. The results show that wall-based attachment ventilation is highly effective in reducing the risk of cross-infection, the intake fraction (IF) for the occupant is reduced by 75% and 88.9% compared to hybrid ventilation and displacement ventilation, respectively. Simultaneously, wall-based attachment ventilation also significantly improves air quality at head level and provides higher level of thermal comfort around the human body.

【Keywords】 Cruise ship cabin; Corona Virus Disease2019; Indoor air quality; Thermal comfort; Computational fluid dynamics

0 引言

2020 年初, 全球邮轮旅游业受到新型冠状病毒病

毒肺炎 (COVID-19) 疫情的严重冲击, 包括“钻石公主号”“大公主号”和“红宝石公主号”在内

基金项目: 四川省科技计划省院省校合作项目 (编号: 2022YFSY0051); 国家自然科学基金青年基金项目 (编号: 52108096); 船舶动力工程技术交通运输行业重点实验室开放基金项目资助 (编号: KLMPET2020-04)

作者简介: 李育超 (1997.02-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: lycnd18797@163.com

通讯作者: 袁艳平 (1973.06-), 男, 博士, 教授, E-mail: ypyuan@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-06-04

的多艘邮轮均爆发了聚集性感染事件^[1]，“钻石公主号”邮轮上的人员感染率甚至达到了 19%^[2]。研究表明，作为 COVID-19 病原体的新冠病毒（SARS-CoV-2），能够附着在人类呼出的飞沫和飞沫核的表面，并在空气中传播扩散，最终被健康个体吸入呼吸道而引发感染^[3]。

缺少必要的通风设计可能是 COVID-19 感染率高的主要原因。以钻石公主号上的客舱为例^[4]，内舱房空间狭小且没有通风窗，海景房内也只有可供观赏海景的景观窗，同样缺少必要的自然通风。因此，舱室几乎密闭以及缺少新鲜空气的供应，给 COVID-19 的防控带来了不利影响。另外，已有研究证实^[5]，冬季寒冷的天气条件能够加剧 COVID-19 流行病的传播。结合 2020 年初的传染病集中爆发时间，冬季邮轮的疫情防控值得重视。

疫情爆发以来，关于通风条件下的气流模式对人体呼出污染物的分散和空气传播的影响，已有大量计算流体力学（CFD）模拟和实验研究。例如：Zhang 等人^[6]模拟了隔离室内病人呼出污染物的扩散过程，发现贴附射流通风在污染物的排除方面比传统混合通风更具优越性；Kong 等人^[7]研究了不同送、回风口设计条件下，医护人员对病人呼出的细小颗粒的暴露水平；Liu 等人^[8]针对办公环境，对感染颗粒在混合通风和置换通风两种通风方式下分布进行了模拟。同时，SARS-CoV-2 空气传播的 CFD 仿真也涉及交通人工环境，但研究场景主要是巴士的密闭空间^[9,10]，关于邮轮舱室的通风防疫的研究相对较少。

文献调研发现，以往对邮轮舱室空气环境的营造已有一定的研究。赵明明^[11]模拟了不同风口结构条件下舱室的气流分布，研究考察了空气龄及预测平均舒适投票（PMV）等指标。刘家兴^[12]基于室内热舒适性评价，调查了辐射供暖加新风系统应用的可行性。柏铁朝等人^[13]选取 PMV 指标，针对混合通风的送风速度及送风温度进行优化设计。邮轮航行时间长，客舱是乘客长时间停留的场所，良好的热环境对旅客非常重要，因此以邮轮客舱作为研究对象，还需对其通风热环境的营造开展进一步研究。

如上所述，邮轮客舱的通风设计值得关注和研究，以减少乘客的大面积感染。有必要寻找更加合适的通风方式，探究其在密闭的邮轮客舱环境中应

用的有效性。同时也应注意到，通风策略的选取虽以防疫和健康需求为主要目的，也应关注室内空气品质和舒适性环境的营造^[14,15]。

本文针对冬季的密闭船舱，对混合通风、置换通风和贴附射流通风形式下的气流分布模式和携带 SARS-CoV-2 的颗粒扩散特征进行 CFD 仿真，并结合空气质量、热舒适及感染风险进行通风性能的综合评价。从而为邮轮舱室通风系统的实际工程设计提供理论依据，以防止邮轮上 COVID-19 的大范围感染传播。

1 数值模拟方法及验证

本文采用 ANSYS FLUENT 15.0 软件，对不同气流模式下的流场分布及人体呼出颗粒物在空气中的扩散机制进行仿真，求解在欧拉-拉格朗日框架下进行^[16,17]。

1.1 气流分布模拟

研究使用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型来模拟邮轮客舱内的空气流动^[18]，同时为了精确捕捉近壁区域的湍流特征，采用了增强壁面处理的方法^[19]。在欧拉参考系下，稳态气流分布的求解遵循如下流体流动的基本控制方程：

$$\operatorname{div}(\rho \bar{U} \phi) = \operatorname{div}(\Gamma_{\phi} \operatorname{grad} \phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

式中： ρ 为空气密度， kg/m^3 ； $\bar{U}$ 为速度矢量； ϕ 为通用标量，可以代表速度分量 u_x 、 u_y 、 u_z ，空气温度 T 、湍动能 k 和湍流动能耗散率 ε 等变量； Γ_{ϕ} 为有效扩散系数； S_{ϕ} 表示源项。

控制方程的求解采用 SIMPLE 算法，并对压力项采用标准离散格式，其他项采用二阶迎风格式。同时采用 Boussinesq 近似法模拟室内自然对流的浮升效应^[20]。

1.2 颗粒运动模拟

感染个体呼出颗粒运动的模拟在室内稳态流场分布的基础上进行^[19]。正常的呼吸过程，以往研究发现，人体在正常的呼吸过程中产生的颗粒大多数小于 $1\mu\text{m}$ ^[21]，因此，本文以 $1\mu\text{m}$ 的飞沫核为研究对象。同时考虑到细小飞沫核蒸发时间很短^[22]，将人体呼吸道飞沫核简化为球形固体颗粒，其密度为 2170kg/m^3 ^[9]。

采用基于拉格朗日框架的离散相模型（DPM）

来求解本文的气-固两相流问题^[23], 并选择随机游走 (DRW) 模型来预测湍流随机波动对飞沫核扩散轨迹的影响。在拉格朗日参考系下, 单个飞沫核的运动轨迹根据式 (2) 计算得到:

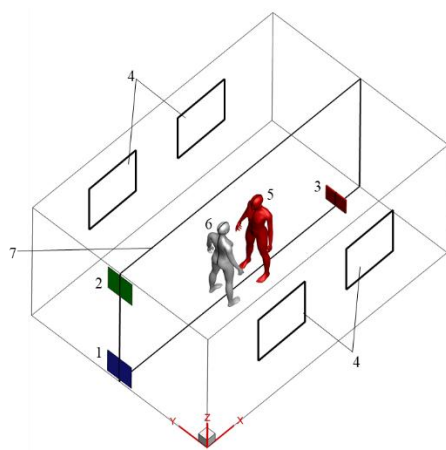
$$\frac{du_{px}}{dt} = \sum F_x = F_{\text{drag},x} + F_{g,x} + F_{a,x} \quad (2)$$

式中: u_{px} 为飞沫核在 x 方向的速度, m/s; t 为时间, s; $\sum F_x$ 为施加在单位质量飞沫核上的合外力, m/s²; $F_{\text{drag},x}$ 为曳力, m/s²; $F_{g,x}$ 为重力, m/s²; $F_{a,x}$ 为附加作用力, m/s²。对于直径小于 10 μm 亚微米级的颗粒, 应考虑布朗力、Saffman 升力和热泳力对颗粒的作用, 其他附加可以忽略不计^[8]。

感染源口腔以每秒释放 166 个飞沫核的速率连续释放 600s^[9], 数值模拟中共计追踪 99600 个飞沫核的运动轨迹, 计算中追踪的颗粒数量足够多, 有利于实现室内充分发展的颗粒分布^[24]以及统计的准确性^[23]。

1.3 模型验证

采用张毅^[25]对洁净室内气流分布及人际间飞沫扩散的研究结果, 对本文的模拟方法进行验证。如图 1 所示, 洁净室尺寸为 5.0m×3.5m×2.5m (长×宽×高), 感染源和易感者的人体模型面对面站立, 加热板用以模拟室内热分层, 气流组织形式采用置换通风。详细的边界条件可从文献^[25]中获得。验证过程首先计算参考线各测点的温度值, 测点的位置如图 2 所示。



1.送风口; 2.排风口; 3.加热板; 4.观测窗; 5.传染源;
6.易感者; 7.房间中心截面

图 1 洁净室几何模型

Fig.1 Geometry of clean room

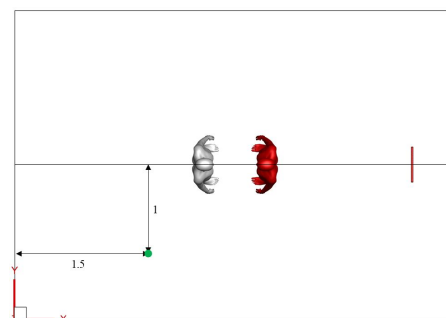
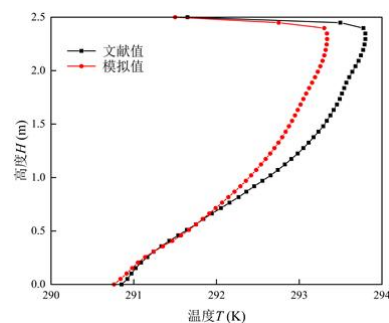


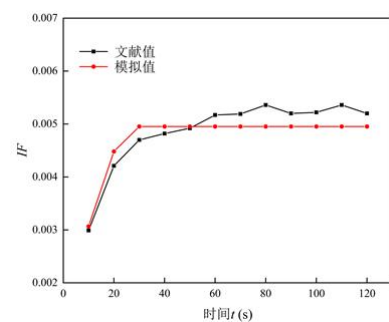
图 2 空气温度测点的位置 (单位: m)

Fig.2 Measurement locations for air temperature
(Unit: m)

流场计算完毕后, 携带病原体的 5 μm 飞沫从传染源口部释放, 并在流场中瞬态运动。采用吸入暴露比 (IF) 结果来验证颗粒运动轨迹预测的准确性, 其定义为易感者吸入的颗粒数量占传染源呼出颗粒总数的比例。



(a) 空气温度



(b) 吸入暴露比

图 3 数值模拟结果与文献数据的验证

Fig.3 Verification of numerical simulation results against data in literature

图 3 显示了参考线上的温度分布及 IF 的文献结果与数值模拟结果。空气温度的模拟值与文献值在洁净室下部的吻合度较好, 数值模拟在上部则低估了空气温度; IF 的计算结果在 0 到 20s 呈现同文献结果一致的快速上升趋势, 20s 后文献值和模拟

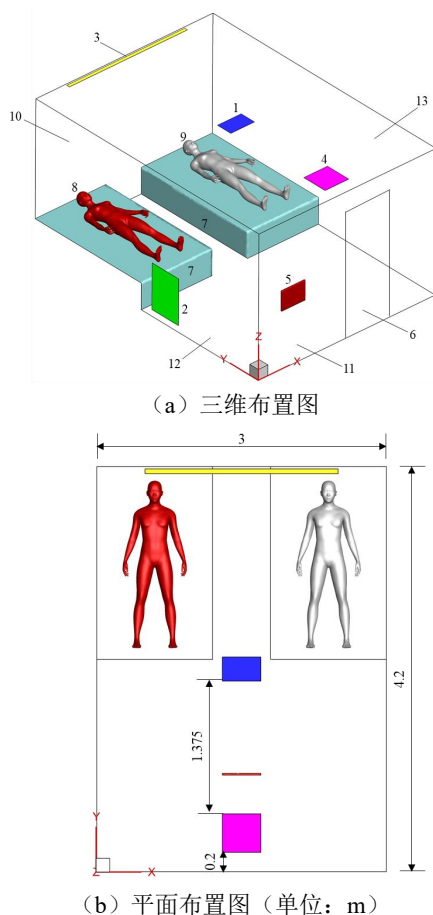
数据之间的差异并不明显。

形成差异的原因主要是本研究的网格划分及人体模型与文献并不完全相同,但数值差异还是可接受的。*Realizable k-ε*模型和 DPM 模型能够有效预测邮轮客舱的气流流动及呼气颗粒的扩散。

2 数值模拟设置

2.1 邮轮客舱模型

图 4 所示为采用 ICEM CFD 15.0 建立了低矮、狭长的双人公共客舱^[26],尺寸为 5.0m×3.5m×2.5m (长×宽×高)。房间内建立了一块加热板来模拟室内温度分层。COVID-19 感染个体与健康个体采用激光扫描技术建模,人体模型均面朝天花板,仰卧在单人床上。模型不考虑通风窗,符合内舱房与海景房的情况。



- 1.混合通风送风口; 2.置换通风送风口; 3.条缝型送风口;
4.排风口; 5.加热板; 6.门; 7.单人床; 8.感染个体;
9.易感个体; 10.外墙; 11.后墙; 12.左墙; 13.右墙

图 4 CFD 几何模型

Fig.4 CFD model geometry

研究中设置了混合通风、置换通风以及贴附射流通风三种机械通风方式。混合通风送风口位于天花板的中心;置换通风送风口安装在左墙下部靠近单人床的位置;条缝型风口靠近外墙,其中轴线与贴附墙壁(外墙)的距离与风口宽度 $s/b=1$ 。三种通风策略的排风口共用。模型主要物体的尺寸见表 1。

表 1 邮轮住舱内主要物体的详细尺寸

Table 1 Physical dimensions of major objects in the cabin

名称	x 方向长度 (m)	y 方向长度 (m)	z 方向长度 (m)
单人床	1.2	2.0	0.4
门	0.8	0	1.9
混合通风 送风口	0.4	0.25	0
置换通风 送风口	0	0.5	0.7
贴附射流 送风口	2.0	0.05	0
排风口	0.4	0.4	0
加热板	0.4	0.02	0.3

2.2 边界条件设置

双人客舱送风量按照最小换气次数 8 次/h 设计^[27]。对于混合通风及贴附射流通风,送风速度为 0.56m/s;对于置换通风,送风速度为 0.16 m/s。送风口处的湍流边界采用湍流强度及水力直径来定义,其中将湍流强度设定为 5%^[24,28],水力直径可由公式(3)给出^[29]:

$$D_H = \frac{2ab}{a+b} \quad (3)$$

式中: a 、 b 为风口的长度和宽度, m。

送风温度的设定基于室内热负荷与显热平衡,冬季散热设备的热源强度可以在负荷计算时忽略不计^[27],因此不考虑加热板的散热量,在夏季应用中,可以考虑不同的热源强度。显热平衡关系式如下:

$$Q = K_{env} A_{env} (T_{in} - T_{out}) = q_m c_p (T_s - T_{in}) \quad (4)$$

式中: Q 为房间的热负荷, W; K_{env} 为外墙的总传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, 取 0.75^[27]; A_{env} 为外墙面积, m^2 ; T_{in} 和 T_{out} 分别表示舱内设计温度和室外设计温度, K; q_m 为送风质量流量, kg/s ; c_p 为空气定压比热, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; T_s 为送风温度, K。按

照设计温度的规范值^[27], 送风温度设为 298.1K。

两名乘客的总热量为 0.8 met^[30], 本文只考虑对流换热, 因此将人体表面对流散热量设为 23.3W/m²^[31]。研究中所有内墙及单人床均采用绝热边界, 外墙边界条件依据显热平衡确定, 数值为 -36.9W/m²。

为了简化模型, 对两名乘客采用了速度稳定的呼吸模式。假设感染者口部连续稳定地呼气, 易感者口部持续吸气^[32]。呼气温度设定为 307K^[33], 两名乘客呼吸过程速度为 0.83m/s, 数值与 Qian 等人^[33]的研究相近, 呼吸气流方向与 z 轴平行。

本文设置了离散相边界条件来描述飞沫核与模型各边界接触后的行为, 其中对送风口、排风口以及传染源口腔使用 *escape* 边界, 对易感者口腔及所有固体壁面使用 *trap* 边界, 即颗粒与固体壁面接

触后不发生反弹。

2.3 网格独立性验证

研究选用 414 万 (粗)、543 万 (中) 和 662 万 (细) 三种不同数量的非结构化四面体网格进行网格独立性验证。以贴附射流工况为例, 对靠近健康个体床铺的垂直参考线上各点的空气速度和温度的预测结果进行比较, 参考线位置见图 5 (a)。

独立性测试结果见图 5 (b) 和图 5 (c)。在一些测点上, 我们发现粗网格和细网格存在一定数值误差, 而中等网格与细网格的预测值基本一致, 差异很小。因此, 选择 543 万的中等网格用于本研究的模拟。网格划分的细节如图 6 所示。对三种送风口和排风口及其周围进行网格加密, 见图 6 (a); 同时细化人体表面网格, 并在人体表面生成 10 层边界层网格以精确捕捉羽流特征, 见图 6 (b)。

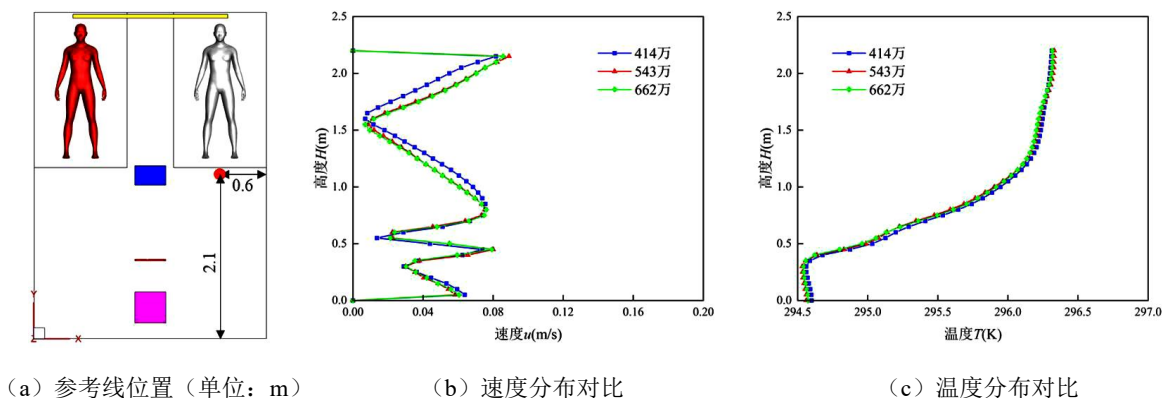


图 5 网格独立性测试

Fig.5 Grid independence test

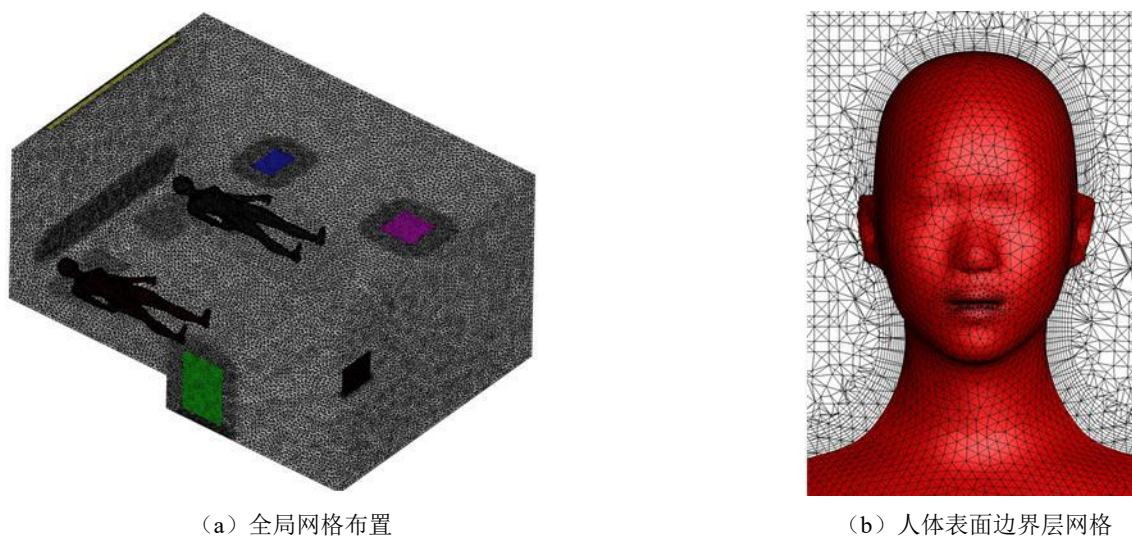


图 6 网格划分示意图

Fig.6 Diagram of the mesh arrangements

3 结果与分析

3.1 稳态流场分布

图 7 为三种通风方式下出风口截面及传染源中心截面的温度场和流线。对于混合通风, 8 次/h 换气次数对应的送风初始动量较小, 因此暖风并不能有效扩散至地板附近, 但混合通风依然能够为人体仰卧位置提供接近 295K 的温度。对于置换通风, 低速气流在浮升力的作用下向上偏转, 使得热量趋向于堆积在上部区域, 而不能直接为舱室下部空间所利用。如图 7(d), 人体表面附近的温度只有 294K

左右, 这不利于冬季热量的有效利用。另外, 还发现在上述两种通风模式下, 传染源呼出的上升气流受到外墙内表面下降的冷气流流动的抑制左右, 见图 7(b) 和图 7(d)。在贴附射流模式下, 呼出气流的流动基本没有受到影响。条缝型风口距离乘客头部较近, 虽然送风速度较近, 但还是能够为头部附近提供较高的空气温度。此外, 相比混合通风及置换通风, 当应用贴附射流通风时, 排风口对人体热羽流和房间上部空气的诱导作用更加明显, 见图 7(e) 和图 7(f)。

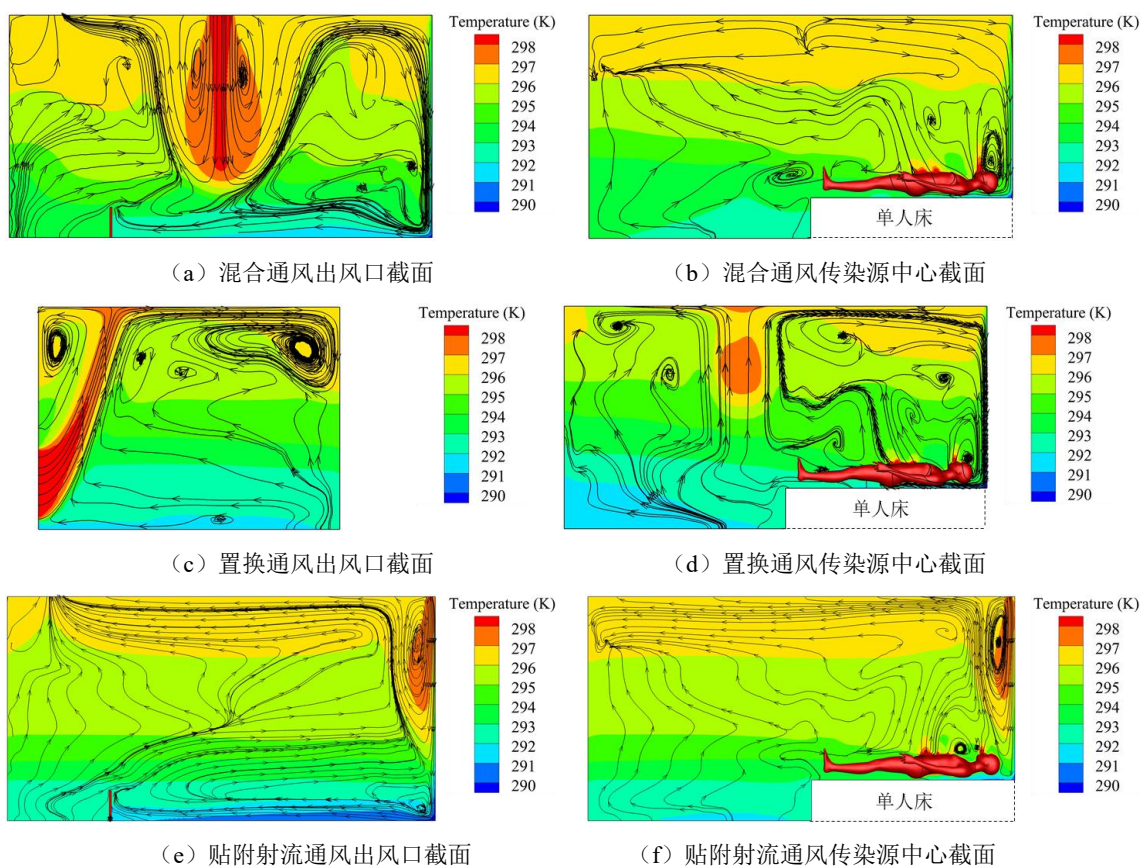


图 7 不同通风方式下的舱内流场特性与温度分布

Fig.7 Airflow patterns and temperature under different ventilation types

3.2 飞沫核分布

图 8 为三种通风方式下舱室空间中悬浮的颗粒物的分布特征。颗粒的颜色随诞生时刻 (Particle Birth Time) 不同而变化, 颗粒颜色接近蓝色表示颗粒释放 (诞生) 时刻距离计算的初始时刻较短, 且在空气中悬浮的时间较长, 而颗粒越接近红色则意味着诞生时刻越接近 600 秒。从中可以看出, 对于混合通风和置换通风, 携带 SARS-CoV-2 的细小颗粒在外墙内表面附近下降气流的抑制作用下, 大

量聚集在感染个体周围及客舱下部空间, 同时有部分飞沫核向右墙及健康乘客的表面附近扩散, 对比图 8(a) 和图 8(b), 也发现在置换通风策略下, 呼气飞沫核的“浮升”受到的气流阻碍作用更大一些。飞沫核在贴附射流通风工况下则较好地遵循了其气流分布模式, 呼气颗粒有一条明显上升通道, 见图 8(c)。在排风口诱导作用下, 飞沫核上升至天花板, 并向后墙及排风口附近扩散, 从而远离人体。与混合通风及置换通风相比, 易感者周围也只

有极少量的飞沫核分布, 表明 SARS-CoV-2 对健康

个体的影响更小。

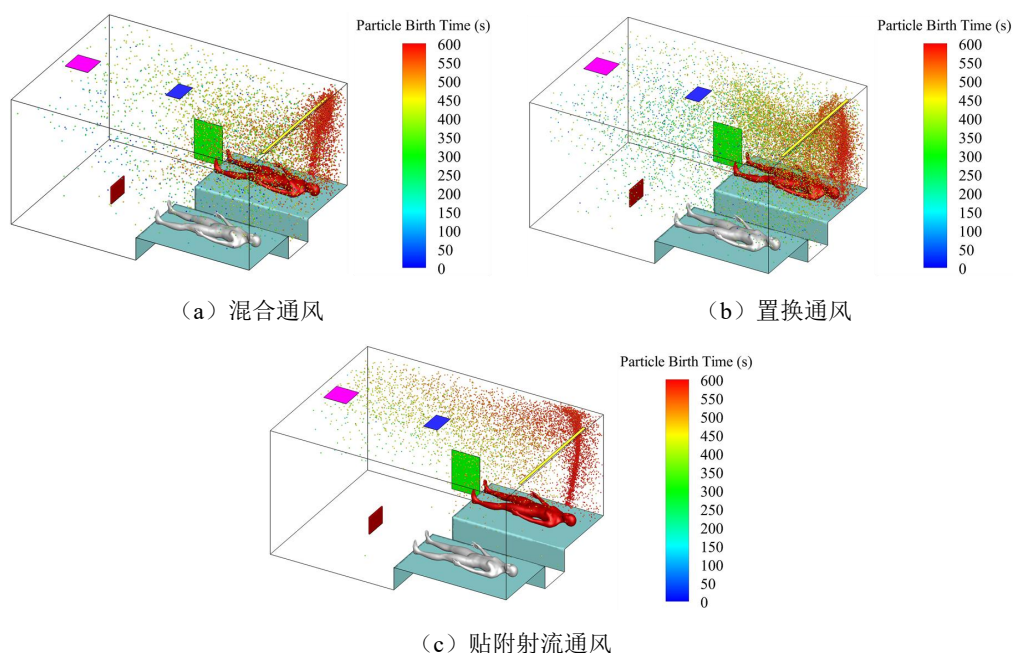


图 8 不同通风策略下的悬浮飞沫核分布

Fig.8 Distribution of suspended droplet nuclei with three ventilation design strategies

呼气颗粒在空气中运动的最终状态包括沉积于固体表面、从排风口处逃逸以及悬浮在空气中。图 9 直观展示了不同最终状态下飞沫核的百分比, 从中可以看出, 在所有通风方式下, 表面沉积在飞沫核排除方面起着主导作用。然而, 置换通风模式下悬浮的颗粒数量是最大的, 即 18.79%, 超过混合通风和贴附射流通风工况的 2 倍。在贴附射流模式下, 4.91% 的飞沫核经由排风口排除, 几乎达到混合通风和置换通风的 3 倍, 通风效果更佳。

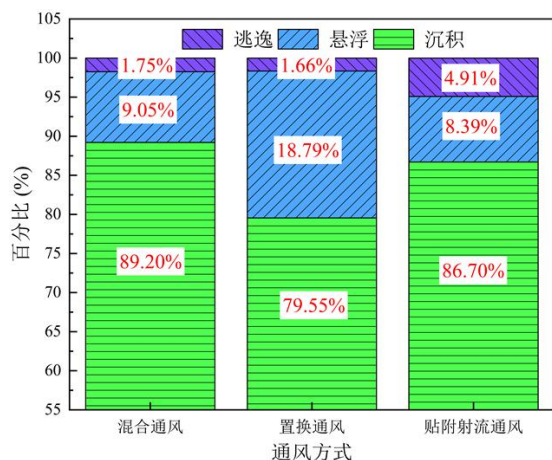


图 9 不同通风策略下飞沫核的最终状态

Fig.9 The ultimate statuses of droplet nuclei with three ventilation design strategies

3.3 平均空气龄

室内空气质量可以通过平均空气龄 (MAA) 来评估。在人体模型周围的区域, 如果 MAA 较短, 则表明空气质量较好, 室内人员更容易获得新鲜空气。MAA 可以通过下列输运方程求解得到^[34]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x \text{MAA}) = \frac{\partial}{\partial x} \left[2.88 \rho \times 10^{-5} + \frac{\mu_{eff}}{Sc} \right] \frac{\partial \text{MAA}}{\partial x} + S_p \quad (5)$$

式中: μ_{eff} 为空气有效粘性系数; Sc 为湍流施密特数^[24-27]; S_p 为空气密度的源项。

利用用户自定义函数 (UDF) 功能, 可添加空气龄输运方程并实现求解, 其结果如图 10 所示。首先从图中可以看出, 乘客周围的 MAA 普遍短于远离乘客的一侧。其中贴附射流工况的差异性最大, 主要是由于风口后墙较远, 新鲜空气的动量较小, 难以扩散至远离人体一侧的下部空间, 但在易感者头部水平, MAA 为 197s, 送风射流能够以较短的路径送到人体仰卧位置, 从而提高了呼吸区域的空气品质。对于混合通风及置换通风, 浮力效应对暖射流的影响很大, 导致 MAA 分别上升至 396s 和 550s。

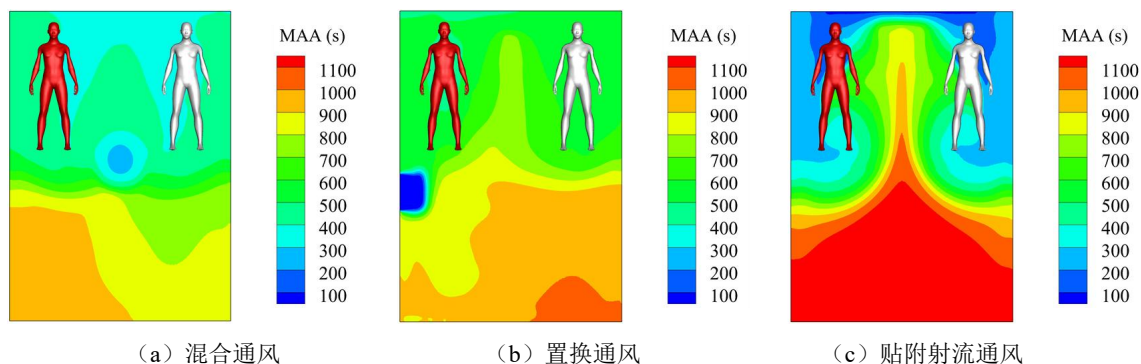


图 10 人体仰卧位置的平均空气龄分布

Fig.10 MAA distribution in a supine position

3.4 局部吹风不满意率

本文采用 Fanger 等人^[35]提出的由吹风引起的不满意百分比 (PD) 作为舒适性指标, 其定义式如下:

$$PD = [34 - (T_i - 273)](u_i - 0.05)^{0.6223} (3.143 + 0.3696u_i T_u) \quad (6)$$

式中: T_i 为局部空气温度, K; u_i 为局部风速, m/s; T_u 为湍流强度, %。

ISO 7730^[36]规定, 室内最低舒适等级的 PD 上限值不应超过 30%。

在人体仰卧位置上的局部吹风不满意率的模拟结果如图 11 所示。混合通风及置换通风模式

下 PD 的最大值均分布在外墙内表面附近, 这是由于下降的冷气流所致。而贴附暖射流为人体头部后方提供了更高的温度, 从而改善了一定的舒适程度。

从乘客身体的角度来看, 对于混合通风工况, 最高的 PD 发生在乘客的肩部区域, 为 19%; 对于置换通风工况, PD 的最大值同样为 19%, 分布在乘客的颈部区域; 贴附射流风口虽然距离人体更近, 但感染乘客右肩及易感乘客左肩观察到的最大值只有 14%。根据 ISO 标准, 不同通风方式下人体周围的热环境均处于舒适等级的范围内, 但贴附射流通风在人体各部位上产生的吹风感较为微弱, 舒适性的营造效果明显更好。

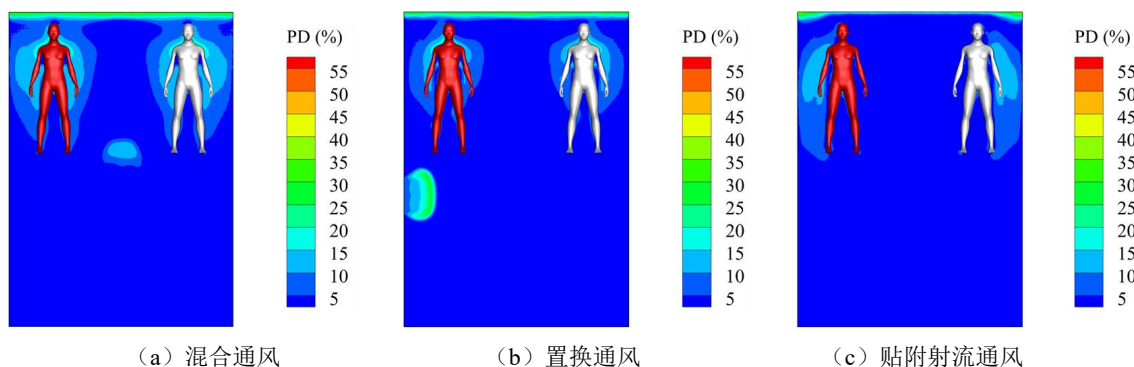


图 11 人体仰卧位置的局部吹风不满意率分布

Fig.11 PD distribution in a supine position.

3.5 吸入暴露比

考虑到细小的飞沫核进入呼吸道及肺泡后, 能够构成更大的健康威胁^[37]。研究中采用前述 1.3 节讨论的吸入暴露比 (IF) 来评估易感者对携带 SARS-CoV-2 的颗粒的吸入暴露与交叉感染风险。较小的 IF 值表明对人类健康更小的威胁。600s 的计算时长完成后, IF 可由下式定义^[23,25]:

$$IF = \frac{\text{易感者口腔吸入的飞沫核数量}}{\text{COVID-19 传染源呼出的飞沫核数量}} \quad (7)$$

图 12 显示了易感者对飞沫核的吸入暴露量的数据对比。从数量上看, 三种通风形式的 IF 分别为 4.016×10^{-5} 、 9.036×10^{-5} 和 1.004×10^{-5} 。从中可以看出, 贴附射流策略下的吸入暴露水平最低, 并且与混合通风及置换通风相比, IF 分别下降了 75% 和 88.9%。因此, 贴附射流通风的设计能够大大降

低 COVID-19 空气传播的概率和交叉感染的风险。

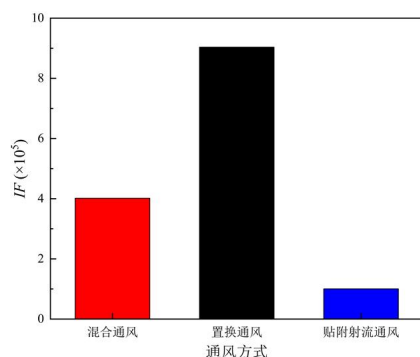


图 12 不同通风条件下易感者的吸入暴露比

Fig.12 IF of susceptible individual under different ventilation conditions

4 结论与展望

4.1 结论

本研究以密闭的双人邮轮客舱为研究对象,提出了混合通风、置换通风以及贴附射流通风三种机械通风方式,并对室内空气质量、热舒适性能以及人体健康风险进行综合比较。主要结论如下:

(1) 贴附射流通风为乘客的头部水平提供了更高的空气质量,其平均空气龄从混合通风模式下的 396s 及置换通风模式下的 550s 缩短至 197s。

(2) 贴附射流模式在人体各部位产生了最微弱的吹风感,为人体周围营造了更高舒适水平的热环境。

(3) 贴附射流的设计达到了三种通风策略中最佳的排除呼吸道颗粒物的效果,从而大幅降低健康人员感染 COVID-19 的风险,与混合通风及置换通风相比,吸入暴露比分别降低了 75%和 88.9%。

4.2 不足与展望

本文的研究表明了新型的贴附射流通风在冬季邮轮客舱空气环境的营造及疫情控制方面的有效性,但研究仍有一定局限性:

(1) 建模中考虑了传染源面向天花板仰卧的情形,实际可能存在传染源面向易感乘客侧卧的姿势,此时呼气气流正对易感乘客,不同通风方式的差异性可进一步研究。

(2) 由于较大粒径的飞沫在人体呼吸过程释放颗粒物的占比很小,本文只基于 $1\mu\text{m}$ 的飞沫核来评估较差感染风险,后续可以考虑将大粒径的飞沫纳入感染风险的预测中。

(3) 本文仅针对冬季供热条件探索兼具空气环境营造效果及 COVID-19 防疫效果的气流组织形式,后续可对需要排除人体及散热设备显热量的夏季工况开展通风适应性研究。

参考文献:

- [1] LIU X, CHANG Y C. An emergency responding mechanism for cruise epidemic prevention—taking COVID-19 as an example[J]. Marine Policy, 2020,119: 104093.
- [2] YAMAGISHI T, OHNISHI M, MATSUNAGA N, et al. Environmental Sampling for Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 During a COVID-19 Outbreak on the Diamond Princess Cruise Ship[J]. The Journal of Infectious Diseases, 2020,222(7):1098-1102.
- [3] MORAWSKA L, TANG J W, BAHNFLETH W, et al. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?[J]. Environment International, 2020,142: 105832.
- [4] XU P, JIA W, QIAN H, et al. Lack of cross-transmission of SARS-CoV-2 between passenger's cabins on the Diamond Princess cruise ship[J]. Building and Environment, 2021,198:107839.
- [5] LANDIER J, PAIREAU J, REBAUDET S, et al. Cold and dry winter conditions are associated with greater SARS-CoV-2 transmission at regional level in western countries during the first epidemic wave[J]. Scientific Reports, 2021,11(1):12756.
- [6] ZHANG Y, HAN O, LI A, et al. Adaptive Wall-Based Attachment Ventilation: A Comparative Study on Its Effectiveness in Airborne Infection Isolation Rooms with Negative Pressure[J]. Engineering, 2022,8:130-137.
- [7] KONG X, GUO C, LIN Z, et al. Experimental study on the control effect of different ventilation systems on fine particles in a simulated hospital ward[J]. Sustainable Cities and Society, 2021,73:103102.
- [8] LIU S, KOUPRIYANOV M, PASKARUK D, et al. Investigation of airborne particle exposure in an office with mixing and displacement ventilation[J]. Sustainable Cities and Society, 2022,79:103718.
- [9] YANG X, OU C, YANG H, et al. Transmission of pathogen-laden expiratory droplets in a coach bus[J].

- Journal of Hazardous Materials, 2020,397:122609.
- [10] MEI D, DUAN W, LI Y, et al. Evaluating risk of SARS-CoV-2 infection of the elderly in the public bus under personalized air supply[J]. Sustainable Cities and Society, 2022,84:104011.
- [11] 赵明明.邮轮住舱气流分布的数值模拟与风口结构优化研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [12] 刘家兴.辐射供暖加新风系统在邮轮住舱的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
- [13] 柏铁朝,许建,郑立捷,等.船舶住舱热环境优化设计分析[J].中国舰船研究,2022,17(2):49-56.
- [14] ELSAID A M, AHMED M S. Indoor Air Quality Strategies for Air-Conditioning and Ventilation Systems with the Spread of the Global Coronavirus (COVID-19) Epidemic: Improvements and Recommendations[J]. Environmental Research, 2021,199:111314.
- [15] CAO S, LI X, YANG B, et al. A review of research on dynamic thermal comfort[J]. Building Services Engineering Research and Technology, 2021,42(4):435-448.
- [16] ZHANG L, LI Y. Dispersion of coughed droplets in a fully-occupied high-speed rail cabin[J]. Building and Environment, 2012,47:58-66.
- [17] WANG H, LIN M, CHEN Y. Performance evaluation of air distribution systems in three different China railway high-speed train cabins using numerical simulation[J]. Building Simulation, 2014,7(6):629-638.
- [18] LATEB M, MASSON C, STATHOPOULOS T, et al. Comparison of various types of $k-\epsilon$ models for pollutant emissions around a two-building configuration[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013,115:9-21.
- [19] HAN Z, SZE TO G N, FU S C, et al. Effect of human movement on airborne disease transmission in an airplane cabin: study using numerical modeling and quantitative risk analysis[J]. BMC Infectious Diseases, 2014,14(1):434.
- [20] COOK M J, JI Y, HUNT G R. CFD Modelling of Natural Ventilation: Combined Wind and Buoyancy Forces[J]. International Journal of Ventilation, 2003,1(3): 169-179.
- [21] EDWARDS D A, MAN J C, BRAND P, et al. Inhaling to mitigate exhaled bioaerosols[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004,101(50):17383-17388.
- [22] XIE X, LI Y, CHWANG A T Y, et al. How far droplets can move in indoor environments? revisiting the Wells evaporation?falling curve[J]. Indoor Air, 2007,17(3): 211-225.
- [23] WANG L, DAI X, WEI J, et al. Numerical comparison of the efficiency of mixing ventilation and impinging jet ventilation for exhaled particle removal in a model intensive care unit[J]. Building and Environment, 2021,200:107955.
- [24] LIU Z, WANG T, WANG Y, et al.. The influence of air supply inlet location on the spatial-temporal distribution of bioaerosol in isolation ward under three mixed ventilation modes[J]. Energy and Built Environment, 2023,4(4):445-457.
- [25] 张毅.置换通风温度分层对人际间飞沫传播的影响机理研究[D].西安:西安建筑科技大学,2019.
- [26] 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.
- [27] GB/T 13409-1992,船舶起居处所空气调节与通风设计参数和计算方法[S].北京:中国标准出版社,1992.
- [28] AGANOVIC A, STEFFENSEN M, CAO G. CFD study of the air distribution and occupant draught sensation in a patient ward equipped with protected zone ventilation[J]. Building and Environment, 2019,162: 106279.
- [29] 张亿先.空调房间飞沫气溶胶颗粒运动规律研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2016.
- [30] WANG J, CHOW T T. Numerical investigation of influence of human walking on dispersion and deposition of expiratory droplets in airborne infection isolation room[J]. Building and Environment, 2011, 46(10):1993-2002.
- [31] SATHEESAN M K, MUI K W, WONG L T. A numerical study of ventilation strategies for infection risk mitigation in general inpatient wards[J]. Building Simulation, 2020,13(4):887-896.