

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-017-09

水平动态送风气流下人体呼出飞沫核的 扩散特性研究

赵凯玥¹ 柏茜¹ 程勇^{2,3}

(1. 重庆大学土木工程学院 重庆 400045;

2. 重庆大学国家级低碳绿色建筑联合研究中心 重庆 400045;

3. 重庆大学绿色建筑与人居环境营造教育部国际合作联合实验室 重庆 400045)

【摘要】 水平动态送风气流相较于稳态送风有潜力改善人体热舒适。为研究其对室内交叉感染风险的影响,在水平动态送风条件下,以CO₂模拟替代人体呼出飞沫核,利用CFD软件进行数值模拟,分析室内气流组织分布特性、人体呼出飞沫核扩散特性以及不同工况对于室内交叉感染的影响。结果表明,水平动态送风气流组织会加强空气在房间左右两侧的回流及气流向房间后侧的掺混,且在一个送风周期内,低速期长时间较高速送风能有效降低室内交叉感染风险。

【关键词】 水平送风; 动态送风; 空气品质; 瞬态CFD

中图分类号 TU834.8 文献标识码 A

Diffusion Characteristics of Human Exhaled Droplet Nuclei in Horizontal Dynamic Air Flow

Zhao Kaiyue¹ Bai Xi¹ Cheng Yong^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400045;

2. Joint International Research Laboratory of Green Buildings and Built Environments, Chongqing University, Chongqing, 400045;

3. National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings, Ministry of Science & Technology, Chongqing University, Chongqing, 400045)

【Abstract】 Pulsating air supply combined with stratum ventilation has more potential to improve human thermal comfort than steady air supply. To analyse its impact on the risk of indoor cross infection, in this paper, under the condition of horizontal dynamic air supply, CO₂ simulation was used to replace the human exhaled droplet nucleus, and CFD software was used for numerical simulation to analyze the indoor air distribution characteristics, human exhaled droplet nucleus diffusion characteristics and the impact of different working conditions on indoor cross infection. The results show that the horizontal dynamic air distribution can enhance the air return on the left and right sides of the room and the mixing of air flow to the back of the room, and in a supply cycle, the low-speed period is longer than the high-speed wind energy, which can effectively reduce the risk of indoor cross infection.

【Keywords】 stratum ventilation; dynamic ventilation; air quality; transient CFD

基金项目: 重庆市大学生创新训练项目“水平动态送风气流下人体呼出飞沫核的扩散特性研究”(S202010611357)

作者简介: 赵凯玥(2000-),女,在读本科生, E-mail: 1216746736@qq.com

通讯作者: 程勇(1985-),男,博士,副教授, E-mail: yongcheng6@cqu.edu.cn

收稿日期: 2021-06-16

0 引言

封闭的空间是空气传播的高危场所^[1], 2003年

的 SARS 流行病，2009 年 H1N1 流感，2013 年的 H7N9 禽流感病毒以及 2020 年的新型冠状病毒肺炎都说明了防治传染病和预防未知突发性感染病，尤其是空气传染病的重要性。通风被广泛认为是控制室内空气传播最具有影响力的工程方法^[2,3]，因此气流组织形式对于室内人员交叉感染的影响重大。张林等采用数值模拟的方法对教室内某一人员呼出的液滴在水平送风、置换通风以及混合通风三种送风方式下呼吸区液滴浓度变化规律进行了研究，得出水平送风条件下呼吸区液滴浓度最低，感染风险最低^[4]。Ai 等通过实验对水平气流分布的房间进行了人员之间交叉感染的研究，得出水平气流分布的应用将有效地消除近距离人群交叉感染的高风险^[1]。这些研究得出：水平送风能有效降低室内交叉感染风险，但均是在稳态送风条件下进行的，针对于水平动态送风气流对人与人之间空气传播的影响，还有待进一步研究。

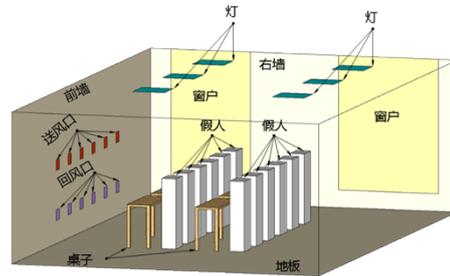
水平动态送风气流相较于稳态送风有潜力改善人体热舒适^[5]，但水平送风模式与动态送风模式的结合可能会对室内交叉感染产生不同的影响：高速期内送风速度大可能会加快人体呼出飞沫核的排除，降低交叉感染风险；同时也可能会加强人体呼出飞沫核与周围气流的掺混，加剧交叉感染风险。因此本文在水平动态送风条件下，针对 7 个工况，利用 CFD 软件进行数值模拟，分析室内气流组织分布特性、人体呼出飞沫核扩散特性以及不同工况对于室内交叉感染的影响，为创造一个热舒适良好且交叉感染风险低的室内环境提供参考。

1 研究方法

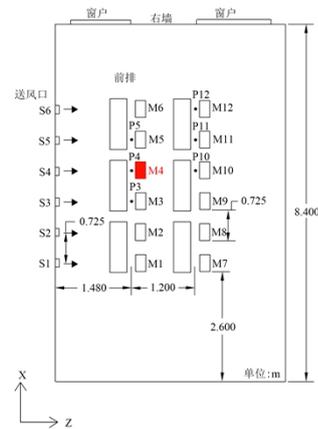
1.1 物理模型

以一间 8.4m 长×5.4m 宽×2.6m 高的教室为模拟对象，房间形状见图 1 (a)。在工作区内布置 6 张桌子及 12 个人体 M1-M12，桌子距离地面 0.735m，尺寸为 1.2m 长×0.4m 宽，为改善计算网格质量以提高计算的精准度，将人体简化为 0.4m 长×0.25m 宽×1.2m 高的长方体，其表面积与一个坐姿成年人的表面积相同。6 个方形送风口及 6 个方形回风口对称布置于西侧墙壁的下部，且均匀分布在人体前侧，送风口距离地面 1.25m，回风口距离地面 0.395m，尺寸均为 0.17m×0.17m。房间的右

外墙上设有两扇窗户，前侧窗户尺寸为 2.3m×1.45m，后侧窗户尺寸为 2.3m×1.76m。此外，室内还有 6 盏均匀布置于工作区上方的白炽灯，尺寸为 0.555m×0.555m。在假人前方 0.1m 处设置测点 P3、P4、P5、P10、P11、P12，测点高度为坐姿人体头部呼吸区高度 1.1m，如图 1 (b) 所示。



(a) 室内布置



(b) 测点分布

图 1 物理模型

Fig.1 Physical model

为建立准确的 CFD 模型以保证数值模拟计算结果的准确性及可靠性，课题组前期进行了实验研究。实验在香港城市大学成都研究院的实验室中进行，通过控制风机频率改变送风速度，控制冷水流量改变送风温度，进而调节各水平动态送风工况的送风参数。在不同工况下，对人体前三个高度 (0.1m、0.6m、1.1m)、送风口及回风口的空气速度和温度进行了实验测量，测量时长为三个送风周期，同时室内温度及房间北侧壁面温度在实验全程进行不间断的测量，所有仪器在测量前均进行了校准，实验中所采用的仪器及其参数如表 1 所示，详细的实验步骤和方法，请参考文献[13]。

表 1 实验仪器参数

Table 1 Information on measurement instruments

仪器	参数	精度	量程	图片
SWEMA 03+万向微空气速度仪	速度	±0.03m/s	0.5~3.00m/s	
	速度	±0.02m/s	0.07~0.5m/s	
	温度	±0.2°C	10~40°C	
KIMO VT 100 万向微空气速度仪	速度	±0.1m/s	<3m/s	
	温度	±0.3°C	-20~80°C	
WZY-1 温度自记仪	温度	±0.3°C	-20~80°C	

1.2 CFD 模型

根据文献[6]及文献[7], 直径在 0.5~10μm 之间的颗粒物能在空气中停留较长时间, 其在空气中的运输模式与气体类似, 且飞沫核的直径为 0.25 到 42μm 不等, 其中 97%分布在 0.5 到 2μm 之间, 虽然人体呼出的含有病原体的飞沫核是颗粒物, 但示踪气体所表征的污染物分布与颗粒物的分布相似。因此, 本文所建立的 CFD 模型采用 CO₂ 示踪气体来模拟人体呼出飞沫核, 并采用 Species 组分输运模型模拟 CO₂ 在室内的扩散。

本文主要研究室内速度场及温度场, 对物理模型做如下假设: 室内气体为不可压缩气体; 室内气流流动状态为湍流状态; 室内空气满足 Boussinesq 假设, 即除动量方程的浮力项外, 其他项的密度按常数处理。采用标准壁面函数来模拟近壁面区域的湍流流动, 采用 DO (discrete ordinate) 辐射模型来计算不同壁面 (外墙、外窗、人体表面、灯) 之间的热传递, 采用标准 k-ε 湍流两方程模型来模拟室内环境。

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_N - \rho \varepsilon \quad (1)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

其中: $C_\mu = 0.09$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ 。

1.3 模拟设置

本研究在进行 CFD 数值模拟时运用的软件是 ANSYS Fluent 2020 R2。在进行模拟计算时, 控制方程离散化方法采用有限体积法^[8]。采用 SIMPLE 法作为压力-速度耦合算法^[9]。采用二阶迎风格式进行离散化, 二阶隐式格式用于时间离散化^[10]。在模拟过程中, 动量残差的收敛准则设为 10⁻⁴, 质量残差、湍流动能残差、湍流耗散残差、能量残差和辐射强度残差的收敛准则设为 10⁻⁶^[11]。

本研究采用 Airpak 软件进行了网格划分, 网格为六面体网格, 对速度和温度梯度较大的位置如风口、热源及热壁面的局部网格进行了细化。本文根据网格独立性检验原则, 采用了网格数量为 193 万、255 万、316 万的网格进行检验, 综合考虑时间成本和计算精度, 本文采用网格数量为 255 万的网格进行水平动态送风模型的数值模拟。为分析人

体呼出飞沫核的扩散特性,在网格数量为 255 万的网格基础上,进一步对人体嘴巴附近的网格进行了局部加密,加密后网格数量为 293 万。

模拟边界条件设置如表 2 所示。外墙的壁面温度值确定为 302K,其余壁面视为绝热。对于脉动送风,由于送风速度与时间相关,通过用户自定义函数(UDF)来设定送风速度的边界条件。设教室内人员 M4 呼出气体中含有污染物,以 CO₂ 代替呼出飞沫核进行模拟,设置人员嘴巴尺寸为 0.01m×0.01m,边界条件为速度入口(velocity-inlet),假设人员恒定呼出污染物,参照文献[12],设置其速度为 0.89m/s,浓度为 40000ppm,同时设置风口送风的 CO₂ 浓度为 400ppm^[12]。

表 2 边界条件设置

编号	名称	条件设置
1	送风口	均匀速度入口 (inlet velocity)
2	回风口	自由出流 (outflow)
3	外窗	定壁温, 302K
4	外墙	定壁温, 303K
5	人体	定热流密度, 56.8W/m ²
6	灯	定热流密度, 93.75W/m ²
7	其余壁面	绝热
8	嘴巴	均匀速度入口 (inlet velocity)

1.4 工况设置

现有研究表明,在送风温度 21.5℃和周期平均送风速度 1.5m/s 的水平动态送风工况下,热舒适情况较好^[13]。因此,本研究依据相关研究^[13]中所比较的 26 个工况,选取了热舒适较好的 7 种工况,如表 3 所示。

表 3 工况设置

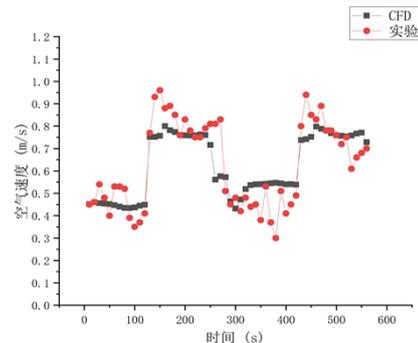
工况编号	送风	周期平均	周期	高速期	低速期
	温度 (°C)	送风速度 (m/s)	总时长 (min)	时长 (s) 速度 (m/s)	时长 (s) 速度 (m/s)
1			5	150 1.95	150 1.05
2				100 2.25	200 1.13
3	21.5	1.5		60 1.95	60 1.05
4			2	40 1.65	80 1.43
5				1.95	1.28

6		2.25		1.13
7	24	1.95	96	1.39

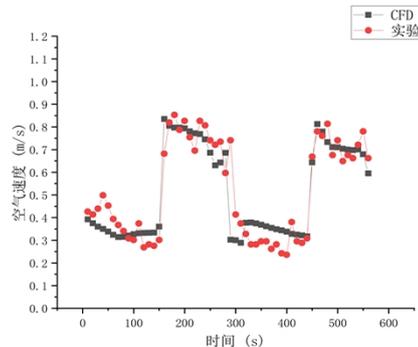
2 结果及分析

2.1 数值模拟验证结果

为保证数值模拟的可靠性,本研究利用课题组前期研究所得的实验数据对 CFD 模型进行验证。实验工况的周期平均送风速度为 1.7m/s,送风温度为 21.5℃,取人体头部呼吸区高度 1.1m 的两测点 P3、P5 处的数据进行验证,对 600s 内的空气速度及 450s 内的空气温度的变化趋势进行对比,验证结果如图 2 和图 3 所示。



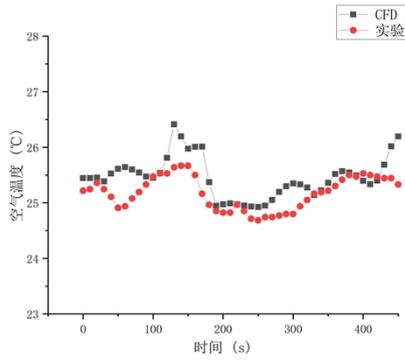
(a) 测点 P3



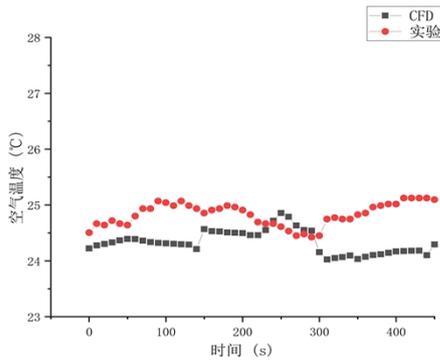
(b) 测点 P5

图 2 Y=1.1m 处空气速度的实验和模拟结果对比

Fig.2 Comparison of experimental and simulation results of air velocity at Y=1.1m



(a) 测点 P3



(b) 测点 P5

图 3 Y=1.1m 处空气温度的实验和模拟结果对比

Fig.3 Comparison of experimental and simulation results of air temperature at Y=1.1m

由空气速度和温度的对比结果可知,模拟结果和实验结果的趋势相近,拟合程度相对较好。对于空气速度及温度,模拟结果和实验结果的最大速度差在 0.3m/s 左右,最大温度差在 1°C 左右,与相关研究^[13]内的最大偏差相同,根据相关研究^[13],空气速度差和空气温度差在合理误差范围内,该模型模拟验证结果良好,故该模型可用于进一步计算分析气流组织特性和污染物扩散特性。

2.2 气流组织特性分析

本节以典型工况 5 为例,讨论水平动态送风条件下的气流组织特性。图 4 是工况 5 下不同送风速度时期,呼吸区截面 (Y=1.1m) 及竖直方向截面 (X=5.1m) 处的速度分布,房间的左右侧以呼吸区截面 (Y=1.1m) 的左右侧为准,位于送风上游的人员视为前侧人员。可以看出:室内气流经风口水平送出后,流经前排人员呼吸区,受人体阻力和气流卷吸的影响发生一定程度的速度衰减,在与人体碰撞后,绕前排人员周围区域流动,抵达后排人

员呼吸区后,在室内形成左右两侧的回流,由壁面处的排风口排出。在低速期,如图 (c) 所示,室内气流经风口送出后,速度衰减较明显,气流显著下落,使大部分新风直接送入前排人员头部呼吸区,且气流向左右两侧形成的回流现象较明显。在高速期,如图 (d) 所示,射流长度明显大于低速期射流长度,气流经风口送出后速度衰减效果降低,先抵达人体头部上侧,导致气流在与人体头部碰撞后,部分向下流动至前排人员呼吸区。

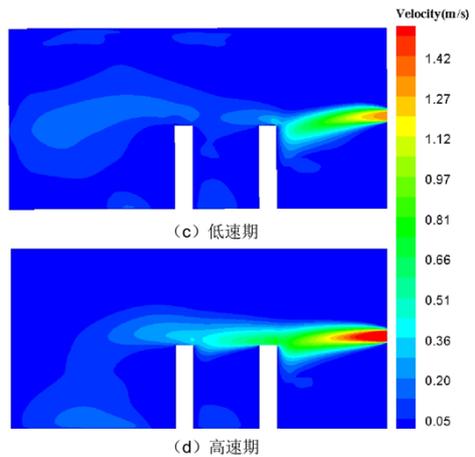
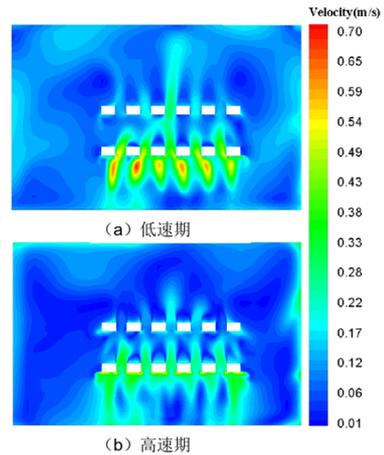


图 4 工况 5 呼吸区截面 (Y=1.1m) 及竖直方向截面 (X=5.1m) 处的速度分布

Fig.4 Velocity distribution at the section of breathing area (Y=1.1m) and vertical section (X=5.1m) in case 5

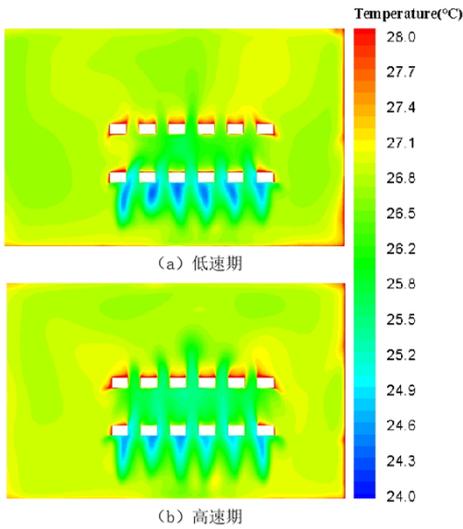


图 5 工况 5 呼吸区截面 (Z=1.1m) 处的温度分布

Fig.5 Temperature distribution at the cross section of breathing area (Z=1.1m) in case 5

图 5 是工况 5 下不同送风速度时期,呼吸区截面 (Z=1.1m) 处的温度分布。可以看出:前排人员呼吸区内空气温度明显低于后排人员呼吸区空气温度,随着送风速度的增大,进入人员工作区的新风增多,进一步扩大了 26°C 左右的温度范围,且除工作区外,室内左右两侧的温度分布更加均匀。

2.3 飞沫核扩散特性分析

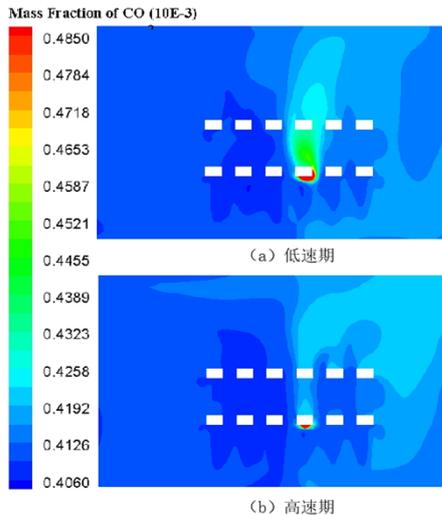


图 6 工况 5 下 CO₂ 的分布情况

Fig.6 Distribution of CO₂ under condition 5

为探究同一工况下高、低速期的人体呼出飞沫核扩散特性,选取典型工况 5 进行具体分析。图 6 是工况 5 感染人员呼出 CO₂ 的分布情况。根据气流组织特性分析,气流在房间左侧产生了回流现象,

由于其作用范围内无感染人员,左侧房间的污染物浓度分布维持在较低水平,如图所示。右侧气流经风口送入室内,流经感染人员 M4 后裹挟 CO₂ 抵达人员 M10 的呼吸区,在回流的影响下,气流向右发生偏移,部分携带 CO₂ 的气流流动至人员 M11、M12 周围,另一部分流经房间后侧及右侧区域后从排风口排出。在低速期,室内空气速度水平较低,射流长度较低,感染人员 M4 呼出的 CO₂ 被稀释扩散的效果不明显,且 CO₂ 主要分布于感染人员 M4 及其后排人员 M10 附近,右侧气流的回流对 CO₂ 的浓度分布无显著影响。在高速期,空气速度水平较高,射流长度高于低速期射流长度,感染人员 M4 呼出的 CO₂ 在高速气流的裹挟下,被迅速传递至后排人员 M10、M11、M12 周围,且在右侧气流的回流作用下,携带 CO₂ 的气流与房间后侧空气充分混合,使得 CO₂ 在房间右后方浓度分布较为均匀,在房间右侧整体浓度水平较高。在送风周期内,人员 M10-M12 周围具有高于其他人员周围的 CO₂ 浓度,因此认为人员 M10-M12 为高危人员。

2.4 工况对比

2.4.1 送风周期总时长对比

本文所选 7 个工况中存在两种不同送风周期总时长,即 300s 和 120s,本节在送风速度及高速期与低速期之比相同时,对不同送风周期总时长的工况下室内人员 M4、M10-M12 周围 CO₂ 的分布进行分析,如图 7 所示为工况 1 (300s) 和工况 3 (120s) 的对比。

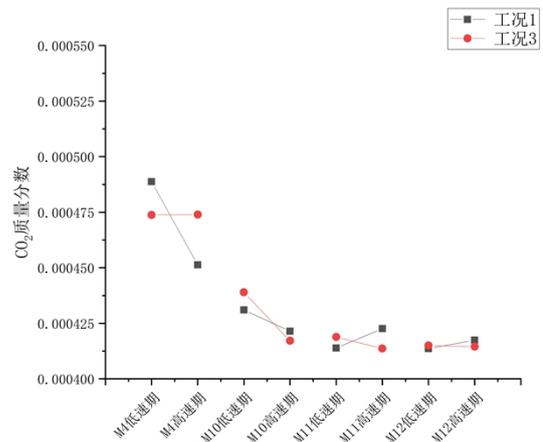


图 7 各人员在不同送风周期总时长的工况下 CO₂ 质量分数的变化

Fig.7 Variation of CO₂ mass fraction of each person

under different total duration of air supply cycle

由图可知, 对于感染人员 M4, 送风周期总时长较短的工况 3 高低速期转变并未对其周围 CO₂ 质量分数分布情况产生明显影响, 送风周期总时长较长的工况 1 在低速期内由于长时间低速送风造成了感染人员 M4 周围 CO₂ 的积累, 导致其质量分数水平较高; 在高速期内长时间高速送风有利于感染人员 M4 周围 CO₂ 的排除, 而质量分数呈现较低水平。对于高危人员 M10-M12, 低速期内由于工况 1 长时间低速送风使感染人员呼出的 CO₂ 没有及时扩散, 因此高危人员 M10-M12 周围 CO₂ 质量分数相对于工况 3 较低; 高速期内由于工况 3 高速送风的时长较短, 感染人员呼出的 CO₂ 扩散程度弱, 对于高危人员 M10-M12 的影响相对于工况 1 较小。综合来看, 当送风速度与高速期和低速期时长比值相同时, 总时长 300s 和总时长 120s 的工况对于高危人员 M12 周围的 CO₂ 分布的影响情况差别不大, 对于感染人员 M4 以及高危人员 M10、M11 周围 CO₂ 分布的影响略有差别。

2.4.2 高速期与低速期时长比值对比

在本文所选择的送风周期总时长为 120s 的 5 个工况中, 送风高速期与低速期时长之比有 1、0.5、0.25 三种, 本节选择高速期送风速度相同的工况 3 (比值为 1)、工况 5 (比值为 0.5) 以及工况 7 (比值为 0.25) 进行对比分析, 如图 8 所示。

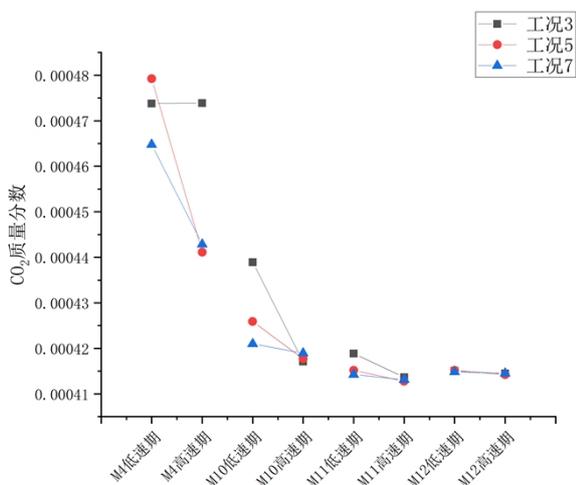


图 8 各人员在高速期与低速期时长比值不同的工况下 CO₂ 质量分数的变化

Fig.8 Variation of CO₂ mass fraction under different duration ratio of high speed period and low speed period

工况 3 的送风高速期与低速期时长比值为 1, 在工况 3 送风条件下, 感染人员 M4 恒定呼出 CO₂, 低速期大量积累 CO₂, 高速期内人体持续呼出的以及低速期积累的 CO₂ 的扩散程度相对较小, 故人员 M4 周围 CO₂ 质量分数在高低速期转变时无明显变化。对于上述 3 个工况, 高速期内送风速度相同, 送风时间: 工况 3>工况 5>工况 7, 高速期内除工况 3 对于感染人员 M4 周围 CO₂ 的消除能力较差外, 其余情况下感染人员 M4, 高危人员 M10-M12 周围 CO₂ 的消除均呈现较好效果。低速期内送风速度: 工况 7>工况 5>工况 3, 送风时间: 工况 7>工况 5>工况 3, 四位人员周围的 CO₂ 质量分数均在工况 7 下呈现最低水平。因此低速期内长时间较高速送风能够有效消除感染人员 M4, 高危人员 M10-M12 周围的 CO₂。

2.4.3 高速期与低速期不同送风速度对比

上节所讨论的 3 种工况高速期送风速度相同, 本节的讨论对象是送风周期总时长为 120s, 高速期与低速期时长比值为 0.5, 高低速期送风速度不同的工况 4、工况 5 以及工况 6, 对这 3 种工况下的室内感染及高危人员周围的 CO₂ 分布进行对比分析, 如图 9 所示。

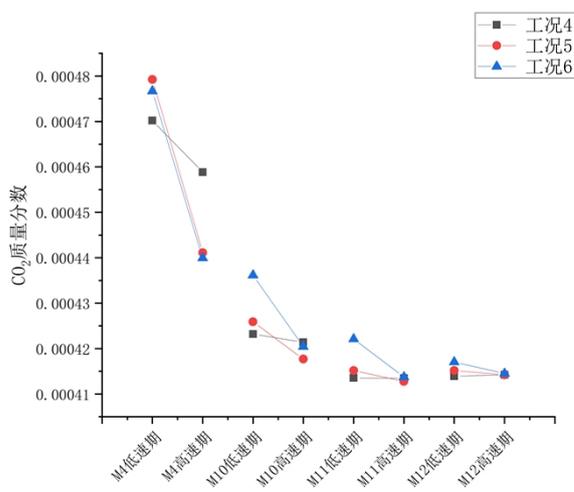


图 9 各人员在不同送风速度的三种工况下 CO₂ 质量分数的变化

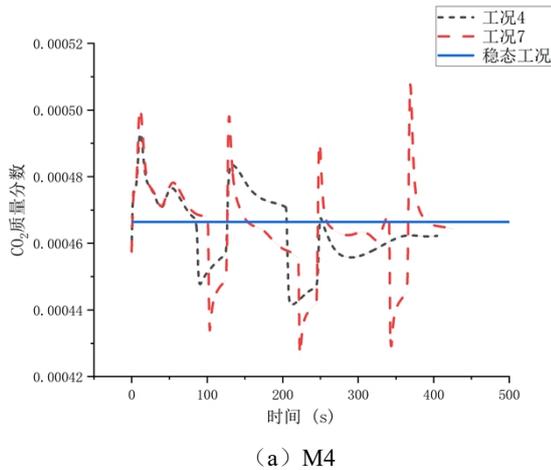
Fig.9 Variation of CO₂ mass fraction under three working conditions of different air supply speed

低速期内, 送风速度: 工况 4>工况 5>工况 6, 四位人员周围的 CO₂ 质量分数均在工况 4 下呈现最低水平, 可见低速期内较高速送风对于感染人员

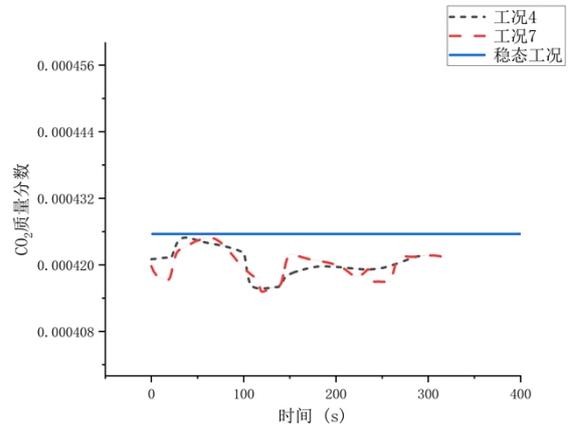
M4、高危人员 M10-M12 周围 CO₂ 消除效果显著。高速期内，送风速度：工况 6>工况 5>工况 4，在感染人员 M4 周围，工况 4 的高速期送风速度最低，使感染人员呼出的 CO₂ 的扩散作用较弱而部分 CO₂ 仍然积累在其周围，导致其周围 CO₂ 分布水平高于其他 2 种工况；高危人员周围的 CO₂ 分布在 3 种工况下均呈现较低水平。综上：相同送风时长的情况下，高速期送风速度对室内交叉感染的影响较小，低速期内较高速送风能有效降低室内交叉感染风险，如工况 4。

2.4.4 与稳态工况对比

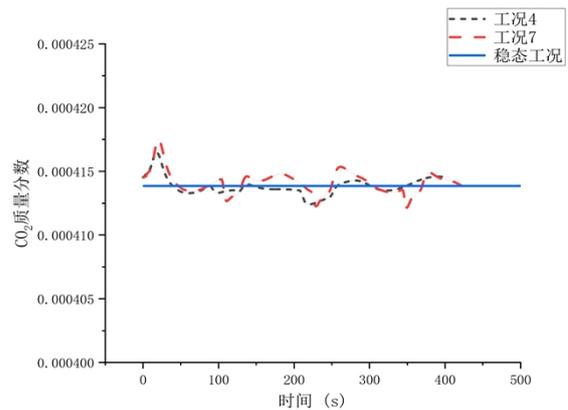
由上述分析可知，高速期内送风速度与送风时长对室内交叉感染情况影响较小，低速期内长时间较高速送风能有效降低室内交叉感染风险，工况 4 的低速期为 80s，送风速度为 1.43m/s；工况 7 的低速期为 96s，送风速度为 1.39m/s，且二者的低速期送风速度为 7 个工况低速期中较高水平，室内人员周围 CO₂ 的分布水平在这两种工况下也呈现较低水平，因此认为工况 4 和工况 7 为较优工况，能有效降低室内交叉感染风险。将其与稳态送风工况条件下的感染人员与高危人员周围的 CO₂ 质量分数进行对比，如图 10 所示。



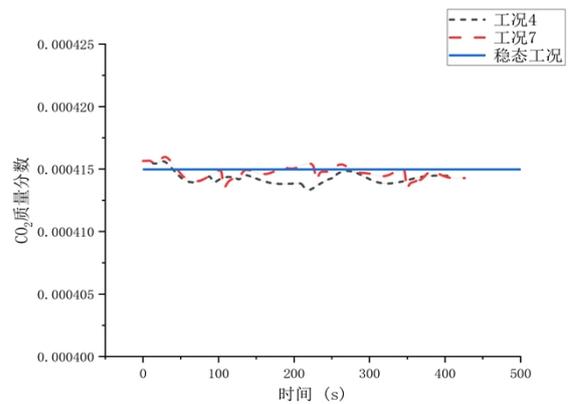
(a) M4



(b) M10



(c) M11



(d) M12

图 10 各人员在三种工况下 CO₂ 质量分数的变化

Fig.10 Changes of CO₂ mass fraction of each personnel under three working conditions

由图可知，四位人员在工况 4 和工况 7 下的污染物浓度变化趋势大致相同。工况 4、工况 7 对感染人员 M4 周围 CO₂ 的降低效果在高速期优于稳态送风工况，在低速期弱于稳态送风工况。工况

4、工况 7 下高危人员 M10 周围的 CO₂ 分布水平低于稳态送风工况, 高危人员 M11、M12 周围的 CO₂ 分布水平与稳态送风工况相近。而本文所探究室内交叉感染风险, 相对于已感染人员 M4, 更关注高危人员 M10-M12 周围的 CO₂ 分布水平, 因此综合得出: 工况 4 和工况 7 相对于稳态送风工况能更有效降低室内交叉感染风险。

根据文献[13]中对水平动态送风不同工况的热舒适性评价可知, 工况 4 的热舒适性优于工况 7, 结合两种工况对室内污染物浓度分布的影响, 认为工况 4 能在保障室内热舒适性的条件下, 有效降低室内交叉感染风险。

3 结论

本文的主要结论如下:

(1) 水平动态送风工况相对于稳态工况有利于降低室内交叉感染风险, 并且对于水平动态送风, 高速期的送风速度与送风时长对室内交叉感染情况影响较小, 低速期内长时间较高速送风能有效降低室内交叉感染风险。

(2) 根据污染物浓度分布情况和热舒适评价指标综合来看, 当高速期时长与低速期时长之比为 1:2, 高速期的速度为 1.65m/s, 低速期的送风速度为 1.43m/s 时, 既能满足室内热舒适要求, 又能有效降低室内交叉感染风险。

参考文献:

- [1] Z T Ai, T Huang, A K Melikov. Airborne transmission of exhaled droplet nuclei between occupants in a room with horizontal air distribution. *International Centre for Indoor Environment and Energy*[J]. *Building and Environment*, 2019,163:106328.
- [2] Y Li, G M Leung, J W Tang, et al. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment—a multidisciplinary systematic review[J]. *Indoor Air*,2007,17:2-18.
- [3] V Kaushal, PS Saini, AK Gupta. Environmental control including ventilation in hospitals[J]. *JK Sci.*, 2004,6: 229-232.
- [4] Zhang Lin, Jinliang Wang, Ting Yao, et al. Numerical comparison of dispersion of human exhaled droplets under different ventilation methods[J]. *World Review of Science, Technology and Sust. Development*, 2013, 10(1/2/3).
- [5] Xue Tian, Sheng Zhang, Zhang Lin, et al. Experimental investigation of thermal comfort with stratum ventilation using a pulsating air supply[J]. *Building and Environment*, 2019,165:106416.
- [6] Jian Hang, Yuguo Li, WH Ching, et al. Potential airborne transmission between two isolation cubicles through a shared anteroom[J]. *Building and Environment*, 2015,89: 264-278.
- [7] J P Duguid. The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei[J]. *J. Hyg.*, 1946, 44(6)471-479.
- [8] 马建垒. 三种主要通风空调送风方式下室内热舒适性模拟[D].重庆:重庆大学,2015.
- [9] Shao X, Wang K, Li X, et al. Potential of stratum ventilation to satisfy differentiated comfort requirements in multi-occupied zones [J]. *Building and Environment*, 2018,143:329-338.
- [10] van Hooff T, Blocken B. Mixing ventilation driven by two oppositely located supply jets with a time-periodic supply velocity: A numerical analysis using computational fluid dynamics [J]. *Indoor and Built Environment*, 2019,29(4):603-620.
- [11] Wu C, Ahmed N A. A novel mode of air supply for aircraft cabin ventilation [J]. *Building and Environment*, 2012,56:47-56.
- [12] Yalin Lu, Majeed Oladokun, Zhang Lin. Reducing the exposure risk in hospital wards by applying stratum ventilation system[J]. *Building and Environment*, 2020,183:107204.
- [13] 田雪.脉动送风与层式通风耦合下室内热舒适研究[D].重庆:重庆大学,2020.