



脉动送风对大空间建筑室内污染物 通风效率和流动分布的影响

李景汁¹, 王海东¹, 刘 岩²

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘 要: 为提高大空间建筑室内的空气品质, 将脉动送风应用于大空间喷嘴送风中, 以 CO_2 为示踪气体, 基于实验分析喷嘴送风的流场特征, 并以校核后的计算流体力学(CFD)模拟结果, 研究脉动送风在不同振幅和周期下对大空间建筑室内污染物通风效率和流动分布的影响。研究表明: 脉动送风的 CO_2 浓度衰减曲线呈现波动下降的趋势, 大周期脉动送风的通风效率低于定风速送风; 与定风速送风相比, 脉动送风可有效降低室内污染物的极大值, 增强新风对室内污染物的稀释范围, 喷嘴下方和排风口附近的污染物浓度有明显的降低; 在大空间喷嘴送风建筑中, 推荐随时间波动变化快、幅度小的小周期小振幅的脉动送风。该研究可为实际大空间通风系统优化设计提供参考。

关键词: 大空间建筑; 脉动送风; CFD 模拟; 室内污染物; 通风效率; 流动分布

中图分类号: TU834.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2024) 05-0399-08

引文格式: 李景汁, 王海东, 刘岩. 脉动送风对大空间建筑室内污染物通风效率和流动分布的影响[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(3): 399-406.

Reference Format: LI Jingzhi, WANG Haidong, LIU Yan. Influence of pulsating air supply on ventilation efficiency and flow distribution of pollutants in large-space buildings[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(3): 399-406.

Influence of pulsating air supply on ventilation efficiency and flow distribution of pollutants in large-space buildings

LI Jingzhi¹, WANG Haidong¹, LIU Yan²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: To improve the indoor air quality of large-space buildings, the pulsating air supply method was applied to the large-space nozzle air supply, and CO_2 was used as the tracer gas. By analyzing the characteristics of the flow field of the nozzle air supply based on the experiments, the effects of pulsating air supply on the ventilation efficiency and flow distribution of pollutants in large-space buildings at different air supply amplitudes and periods were investigated according to experimentally calibrated computational fluid dynamics (CFD) simulation results. The results show that the CO_2 concentration decay curve of pulsating air supply shows a fluctuating downward trend, and the ventilation efficiency of large-period pulsating air supply is lower than that of fixed-velocity air supply; however, compared with the fixed-velocity air supply, the pulsating air supply can effectively reduce the maximum of indoor pollutants, and enhance the dilution range of indoor pollutants in the fresh air, with the pollutant concentration below the nozzle and near the exhaust outlet being significantly reduced; in large-space nozzle air supply buildings, a pulsating air supply with small period and small amplitude that changes fast

收稿日期: 2023-11-20 网络出版日期: 2024-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278116)

作者简介: 李景汁(1999—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事脉动送风对室内污染物影响的研究。

通信作者: 王海东, E-mail: whd@usst.edu.cn

with time fluctuation is recommended. This study can provide reference for the optimized design of the actual large-space ventilation systems.

Key words: large-space buildings; pulsating air supply; CFD simulation; indoor pollutant; ventilation efficiency; flow distribution

0 引言

全球化和现代交通加剧了流行病毒在全世界扩散,对经济和人类健康构成重大威胁^[1-2]。研究表明,呼吸道传染病借助患者呼出的微滴,在空气和物体表面实现传播^[3-4]。公共室内空间具有人员流动频繁和围护结构相对封闭的特征,是较容易发生大规模流行病毒感染的场所^[5-6],特别是以大空间形式布局的大型公共基础服务设施,如火车站、机场等。为了降低流行病毒在公共空间的传染风险,室内环境系统需要及时去除潜藏在室内空气中的传染病病毒,降低全空间区域内的病毒浓度峰值^[7]。大空间建筑常以机械通风作为改善室内空气品质的主要手段。通风系统的气流组织会直接影响建筑室内环境的空气质量^[8]。根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736—2012)建议,对于高大空间,由于喷口送风风速大,气流射程长,与室内空气强烈掺混,布置少量风口即可满足气流均布的要求;高大空间的气流组织常设计成喷口侧送风下部排风的方式。但是,受到建筑进深和建筑内饰影响,喷口风速和喷口位置受到限制,导致实际室内气流组织排污能力不满足设计要求,造成部分空调区出现气流滞止、局部空间污染物浓度过高等问题。因此,探寻新式通风方式、改进大空间通风系统对提高公共空间室内空气品质具有重要意义。

脉动送风是一种新型通风模式,因其具有不改变喷口位置即可实现室内流场均匀混合的特点而逐渐引起学者们的关注^[9-10]。Hou等^[11]提出了一种能够产生周期性脉动送风的喷口系统,在等温自由射流下,相较于定风速送风,该喷口系统能产生更强的湍流并使风速衰减更为缓慢,在改善室内空气质量上具有显著优势。Van Hooff等^[12]利用数值模拟脉动送风在IEA Annex 20模型内污染物流动分布情况,发现脉动送风能够有效抑制室内污染物滞止区的形成。实验与数值模拟结果表明,脉动送风相对定风速送风,在去除封闭空间内的污染物具有较高的能力。部分学者将脉动送风技术特性与各类工程项目相结合,林家泉等^[13]将脉动送风应用在客机机舱空调中,代替定风速送风模拟客机机舱内

NO₂的浓度变化,发现脉动送风有助于提高机舱内空气的混合程度、增强气流流动性。任松等^[14]将脉动送风方法应用于螺旋隧道中,发现脉动送风可有效减少螺旋隧道内涡流区面积,优化隧道风流流场。

脉动送风对室内污染物去除能力取决于多种因素,包括脉动频率、峰值流速、房间尺寸与布局。针对大空间建筑室内环境和污染物,需要进行具体的设计和实验验证,以确定脉动送风最佳的运行参数。本研究以缩尺的大空间室内污染物为研究对象,采用经实验数据验证的计算流体动力学(CFD)方法,通过改变喷口送风参数,即送风速度以不同振幅、脉动周期,探究不同脉动送风对室内污染物流动影响;以通风效率和室内污染物浓度平均值、极大值作为通风性能的评价指标,得出适用于大空间喷口送风的最佳脉动送风类型,为脉动送风在大空间通风系统防疫设计参数确定提供指导。

1 研究方法

在实际大空间建筑中进行实验测试需要耗费较大的人力物力,同时浓度数据测量容易受到建筑气密性的影响而导致得到的数据不够准确可靠。因此,本研究以某大空间实验室为原型^[15],依据相似理论制作了大空间喷口送风缩尺实验室,通过实验确定喷口送风在缩尺环境下的流场特征,并建立数学模型来描述流场内各物理参数之间的关系。

1.1 实验测量

大空间喷口送风缩尺实验室的内部场景如图1所示,实验室为坡屋顶结构,实验系统及尺寸如图2所示,其原型建筑与缩尺模型实验室的几何比例为4:1。实验室含有8个直径为0.043 m的圆形送风喷口和1个0.34 m×0.34 m的方形排风口,喷口中心距地面高1.00 m,实验室的围护结构采用气密性良好的材料搭建,防止室外渗透风对室内流场的影响。为了研究喷口送风对室内污染物浓度分布的影响,实验以CO₂作为示踪气体^[16],通过传感器监测室内测点风速和CO₂浓度在风机启动后的变化情况。在实验室中心距喷口1.00 m测线P0上,每隔0.40 m高度设置1个风速传感器,5个CFWSW-1无线风速仪测点布置图如图2(a)所示;在测线P1、

P2、P3 上每隔 0.40 m 高度设置 1 个 CO₂ 浓度传感器,6 个 HOBO CO₂ 温湿度测试仪测点分布图如图 2(b)所示。在风机启动前,先向室内注入 CO₂ 气体,并开启风扇促进室内 CO₂ 气体混合,待 HOBO CO₂ 温湿度测试仪显示 3000 ppm(ppm 是气体体积浓度单位,通过 CO₂ 摩尔质量和 CO₂ 气体摩尔体积换算得到,1 ppm≈1.96 mg/m³)左右时停止输入 CO₂ 气体,等待室内气流稳定,直到 CO₂ 温湿度测试仪浓度值只在一定范围内波动后开启风机。



图 1 大空间喷口送风缩尺实验室照片

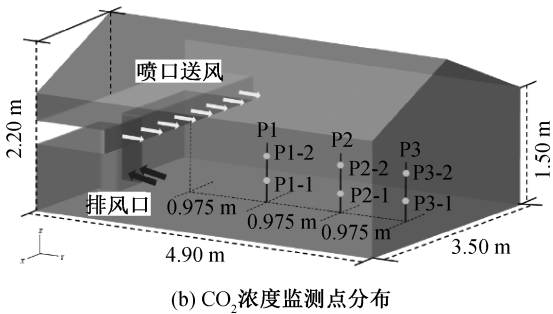
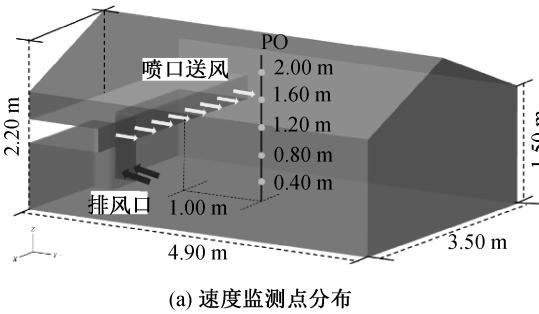


图 2 大空间喷口送风缩尺实验室构造及监测点分布示意图

实验过程中通过变频调节风机转速实现喷口送风速度的变化,当实验风机转速为 25.00 Hz 时,测量喷口送风速度为 2.38 m/s,换气次数约为 3.3 次/h,满足大空间建筑换气次数在 1.0~5.0 次/h 的设计要求。风机以 2.38 m/s 送风速度开启后,室内 CO₂ 浓度在 0~1800 s 各监测点的变化曲线如图 3 所示。测线 P1 上的两个监测点 P1-1 和 P1-2 在 0~300 s 内浓度高于其他位置上的监测点,主要原因是该测点距离送风喷口和排风口较近,流场运动剧烈。室内 CO₂ 浓度在新风通入的影响下逐渐降低,并随着时间推进降至稳定状态。图 3 表明,在 2.38 m/s 定风速喷口送风下,室内 CO₂ 排除的过程主要发生在 0~600 s,600 s 后的室内 CO₂ 浓度变化幅度较小。因此,为了突出通风对室内 CO₂ 浓度分布的影响和节省计算资源,后续研究基于风机开启后 0~600 s 室内的流场变化展开。

1.2 数学模型

本研究采用 CFD 方法模拟室内气流和污染物流动。气流视为不可压缩流体,可用连续性方程和动量方程描述流体流动,并采用有限体积法对方程进行数值求解。室内气流的连续性方程和动量方程用式(1)和式(2)表示:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i}=0$$

(1)

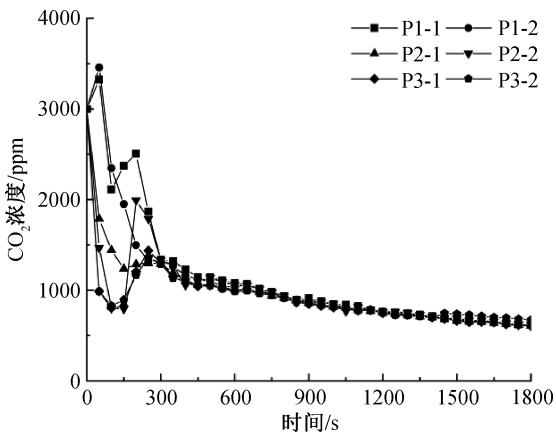


图 3 0~1800 s 定风速送风实验下各监测点的浓度变化曲线

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = -U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{F_i}{\rho}$$

(2)

其中: U 表示速度矢量, m/s; x 表示空间坐标, m; $i, j=1, 2, 3$ 表示三维坐标的 3 个方向; ν 是运动黏度, m²/s; ρ 是密度, kg/m³; P 是压力, Pa; F_i 表示外力, kg/(m²·s²)。

为了对污染物的流动扩散进行计算,在数值模型中加入组分守恒方程,该方程描述微元体内化学组分 b 的质量浓度的时间变化率等于通过微元体界面的组分 b 净扩散流量与通过化学反应产生的组分

b 的生产率之和,可用式(3)表示:

$$\frac{\partial(\rho c_b)}{\partial t} + \text{div}(\rho U c_b) = \text{div}(D_b \cdot \text{grad}(\rho c_b)) + S_b$$

(3)

其中: c_b 为组分 b 的体积浓度, L/m^3 ; ρc_b 为该组分的质量浓度, kg/m^3 ; D_b 为该组分的扩散系数; S_b 为单位时间内单位体积通过化学反应产生的该组分的质量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

2 CFD 数值模拟

本研究利用 ICEM 2020 绘制大空间喷口送风缩尺实验室的几何模型并划分网格,运用 CFD 软件 Fluent 2020 计算脉动送风工况下室内流场物理参数变化情况,建立评价通风系统排污能力和混合程度指标。

2.1 边界条件设置

根据实验工况,本研究中设置模型壁面为绝热边界层,室内温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,喷口送风速度为 2.38 m/s ;排风口边界条件设置为压力出口。湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型^[17-18],压力速度解耦选用

SIMPLE 算法,时间步长设置为 0.5 s ,速度残差、质量残差、湍流动能残差、湍流耗散残差的收敛准则设置为 1.00×10^{-3} ,能量残差的收敛准则设置为 1.00×10^{-5} ,最大迭代数为 70 次,模拟 $0 \sim 600\text{ s}$ 的室内瞬态流场。

2.2 网格无关解和模型验证

网格划分质量直接影响模型结果的准确性,如图 4 所示,本研究采用结构化网格对模型进行划分,在圆形喷口处对网格进行 O 型切分,同时在喷口、排风口、壁面处进行局部加密。网格数量过少容易造成数值结果偏离实际,而网格数量过多会造成计算资源的浪费。因此,本研究选取 34 万、43 万、54 万、65 万、76 万网格求解模型的网格无关解。图 5 给出了不同网格数量下,房间中线距喷口 1.00 m 处的第 600 s 时刻定风速测线上的速度值以及实验测量得到的 5 个监测点速度值。从图 5 中可以发现,除了 34 万网格整体速度预测结果偏低以外,其他网格模型计算结果接近。根据实验数据对比和计算消耗时间考虑,选取 43 万数量的结构性网格进行后续模拟研究。

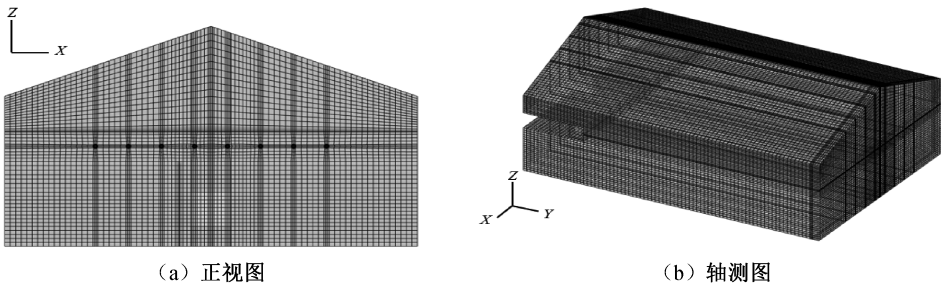


图 4 数值模型网格示意图

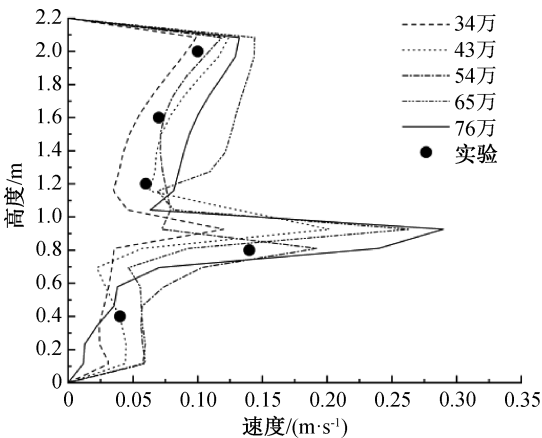


图 5 模型网格无关解的速度曲线

2.3 研究工况

正弦送风是脉动送风的基本形式,送风速度的不同频率、相位、振幅对于室内流场产生不同影响。从上节实验数据可知,送风速度为 2.38 m/s 的定风

速送风在 $0 \sim 600\text{ s}$ 内除去 CO_2 速度较快,为了研究脉动送风与定风速去除污染物的对比效果,将定风速送风速度设置为 1.0 m/s ,即换气次数约为 1.4 次/h 。为了探究频率和周期对脉动送风影响室内污染物通风效果的关系,利用 Fluent 中的 UDF 功能编译脉动送风输入函数,设置送风速度函数关系如表 1 所示,其送风速度随时间变化曲线如图 6 所示。脉动送风的周期设置为 60 s 和 120 s ,即在 600 s 分别进行 10 个周期和 5 个周期的速度脉动变化。本研究设置一组送风速度不随时间变化的工况一作为参照,设置工况二和工况三作为研究脉动送风振幅对室内风场影响的对比组;设置工况三和工况四作为研究脉动送风周期对室内风场影响的对比组。室内初始 CO_2 浓度为 5000 ppm ,喷口新风 CO_2 浓度为 600 ppm ,取 $0 \sim 600\text{ s}$ 的模拟结果进行对比分析。

表 1 各工况下的送风速度与时间的函数关系

工况	送风速度 $v/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	周期 T/s	振幅 $A/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
工况一	$v=1.00$		
工况二	$v=1.00+0.20\times\sin(0.10\times t)$	60	0.20
工况三	$v=1.00+0.50\times\sin(0.10\times t)$	60	0.50
工况四	$v=1.00+0.50\times\sin(0.05\times t)$	120	0.50

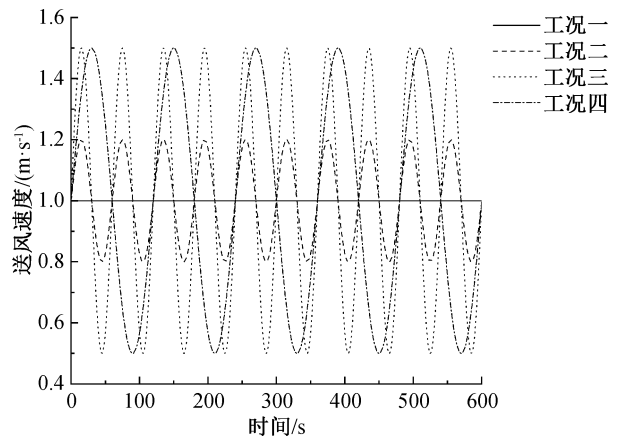


图 6 各工况喷口送风速度随时间变化曲线

2.4 评价指标

本研究采用通风效率^[19]来评价不同送风方式的排污能力,用室内 CO_2 浓度平均值和室内 CO_2 浓度极大值来反映室内 CO_2 混合程度,送风工况的通风效率由式(4)计算获得:

$$\theta = \frac{C_e - C_s}{\bar{C} - C_s} \tag{4}$$

其中: θ 为通风效率; C_e 为 CO_2 浓度出口浓度, ppm; C_s 为送风气流中的 CO_2 浓度, ppm, 式中 $C_s=600$ ppm,即 $1178\text{ mg}/\text{m}^3$; \bar{C} 为室内 CO_2 平均浓度, ppm。当通风效率大于 1.00 时,即排风口 CO_2 浓度大于室内 CO_2 平均浓度,气流组织利于气体排出;当通风效率小于 1.00 时,即排风口 CO_2 浓度小于室内 CO_2 平均浓度, CO_2 在室内堆积,不易排出。

室内 CO_2 浓度平均值和极大值可以通过式(5)和式(6)计算得到:

$$C_{a,t} = \text{average}(C_i, t) \tag{5}$$

$$C_{m,t} = \max(C_i, t) \tag{6}$$

其中: $C_{a,t}$ 为 t 时刻下室内 CO_2 浓度平均值, ppm; $C_{m,t}$ 为 t 时刻下室内 CO_2 浓度极大值, ppm; C_i 为网格单元中心处的 CO_2 浓度值, ppm; t 表示非稳态工况下的模拟时间, s。平均值反映不同送风工况排除室内 CO_2 含量的多少,极大值反映不同送风工况对 CO_2 室内均匀程度的大小。

3 结果分析

非稳态模拟计算得到各个工况 0~600 s 内的室内流场变化,通过 CFD 后处理提取计算结果,计算各个工况的通风效率、室内 CO_2 浓度平均值和极大值,并绘制室内流场云图,分析不同送风工况对室内 CO_2 通风效率和流动分布的影响。

3.1 脉动送风对室内污染物通风效率的影响

图 7 为 0~600 s 定风速送风和不同脉动送风工况下,各监测点 CO_2 浓度值逐时排除下降的变化情况。从图 7 中可以发现,各个工况的 CO_2 浓度衰减曲线呈非线性变化,即使是定风速送风,也存在不同程度上的波动。该现象是由于室内流场湍流和 CO_2 分子自身的流动扩散的表现,导致 CO_2 气体在室内不会按照固定的流线移动。在图 7(a)测点 P1-1 处,工况一和工况二出现 CO_2 浓度局部时间段上升的现象,其原因可能是 CO_2 分子受喷口射流喷射挤压、回流和自身密度大于空气的影响, CO_2 分子逐渐在排风口处堆积。从 0~600 s 时间内,4 种送风工况都将 5000 ppm 的 CO_2 浓度降低到了 4250 ppm 以下。以 600 s 作为结束点,工况三排污能力最弱,在多个位置的 CO_2 浓度高于其余三者。

图 8 为 0~600 s 内各工况的通风效率随时间的变化情况,工况一和工况二的通风效率逐渐增大,曲线几乎重合且平均通风效率分别为 1.07 和 1.06,说明振幅小的脉动送风排污能力与定风速送风接近。工况三和工况四的通风效率呈现周期性上升和下降的特点,其周期与正弦函数的周期相对应,工况三与工况四的平均通风效率分别为 0.96 和 0.94。对比工况二和工况三,相同周期不同振幅的脉动送风通风效率存在明显的差异;对比工况三和工况四,相同振幅不同周期的脉动送风通风效率接近,说明振幅对脉动送风的通风效率影响比周期大。

3.2 脉动送风对室内污染物流动分布的影响

图 9 为第 600 s 时各送风工况在 $Z=0.4\text{ m}$ 水平面和 $X=1.75\text{ m}$ 垂直面的 CO_2 浓度分布情况。总体看来,所有送风工况下,喷口射流方向的 CO_2 浓度都处于较低状态,而喷口下方和排风口附近的 CO_2 浓度最高,浓度梯度分界线向排风口凹陷,喷口射入新鲜空气与室内 CO_2 进行混合,并从排风口处排出。对比 4 个工况可以发现,工况一的射流方向附近 CO_2 排除效果最好,射流区域 CO_2 浓度低于 3700 ppm 的面积最大,与上节工况一的通风效率最高相一致,但是工况一喷口下方和排风口附近

的 CO_2 浓度聚集现象最为严重,浓度仍有处于 4400 ppm 的现象,而脉动送风工况室内 CO_2 整体分布比

定风速送风更加均匀,工况三喷口下方和排风口周围的 CO_2 聚集问题得到很好的改善。

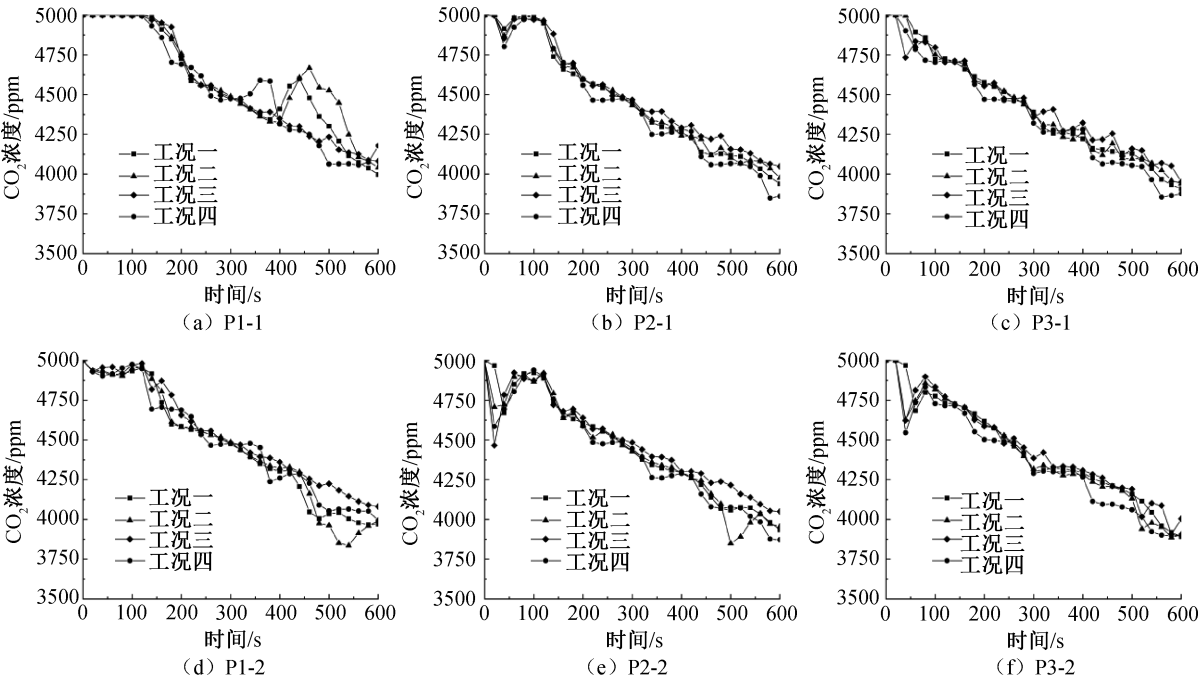


图 7 0~600 s 各工况的各测点位置 CO_2 浓度模拟值随时间的变化曲线

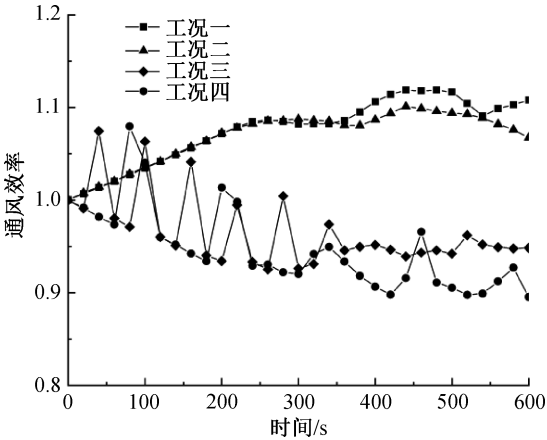


图 8 0~600 s 各工况的通风效率随时间变化曲线

图 10 为各送风工况第 600 s 时室内 CO_2 浓度平均值和极大值,脉动送风下室内 CO_2 的平均浓度略高于定风速送风,但 4 个工况相差不大,最大差值仅为 18 ppm,说明在相同送风量的情况下,以脉动形式变化的喷口送风对室内 CO_2 排除含量上没有明显增强。但是,工况二和工况三室内 CO_2 浓度极大值比工况一和工况四出现明显差异,最大差值为 143 ppm。工况一的室内 CO_2 极大值最大,工况四次之,说明相比于定风速送风,以小周期变化的脉动送风有利于新风与室内 CO_2 的混合,而振幅对室内 CO_2 混合的影响较小。

4 结 论

本研究通过实验分析喷口送风的流场特征,利用 CFD 数值模拟的方法,研究了不同振幅和周期下的脉动送风对大空间喷口送风缩尺实验室内污染物的通风效率和流动分布影响,得出了振幅和周期在通风效率和污染物分布的作用程度,为大空间建筑通风系统选型和优化设计提供参考。实验和数值模拟分析得出的主要结论如下:

a)定风速送风和脉动送风在去除室内 CO_2 过程中,不同位置的 CO_2 浓度呈现非线性下降现象,这是 CO_2 在空气中扩散和喷口射流作为紊态流动共同作用的结果。

b)在相同的送风量下,定风速送风具有最高的通风效率,振幅小的脉动送风通风效率与定风速送风接近,振幅大的脉动送风通风效率低于定风速送风,且通风效率随时间周期波动,波动周期与正弦函数一致。脉动送风的振幅对通风效率影响大,即振幅越大,脉动送风的通风效率越低,而周期对送风通风效率影响较小。

c)脉动送风能有效降低喷口下方和排风口周围的 CO_2 浓度,减轻定风速送风局部 CO_2 聚集的现象。相同周期的脉动送风工况二和工况三,室内 CO_2 浓度极大值最小,说明随时间波动变化快幅度小的小周期的脉动送风能够促进室内污染物的混合。

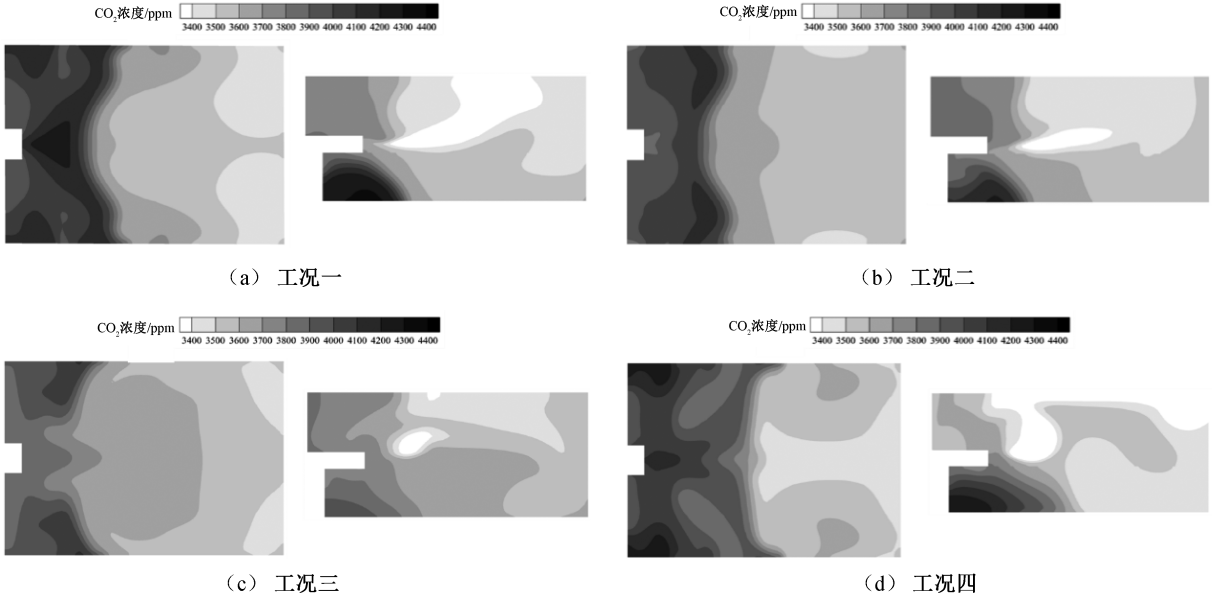


图 9 600 s 时各工况下 CO₂ 在 Z = 0.40 m 水平面和 X = 1.75 m 垂直面的浓度分布云图

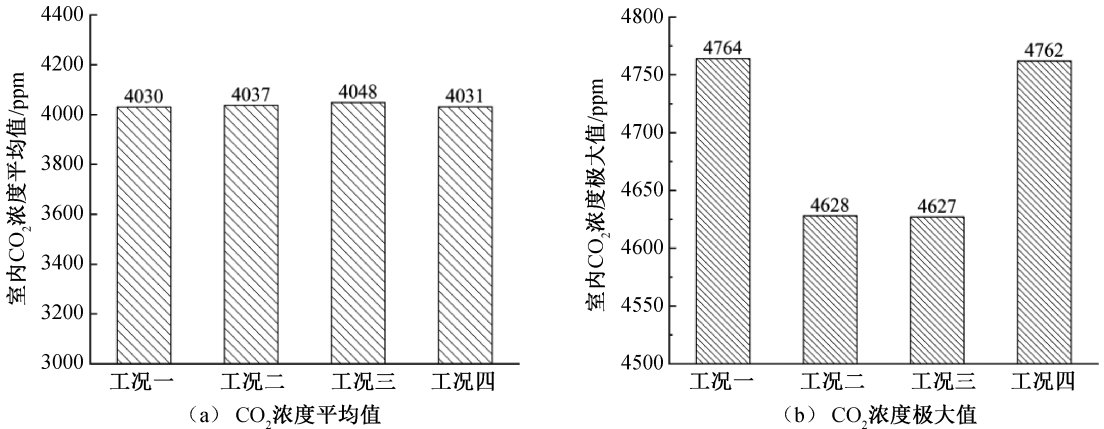


图 10 600 s 时各工况室内 CO₂ 浓度平均值和极大值直方图

参考文献:

[1] 吴俣,刘珏,刘民,等. 新型冠状病毒 Omicron 变异株亚型 BA. 4 与 BA. 5 的流行病学特征及防控研究[J]. 中国全科医学, 2022, 25(30): 3721-3725.

[2] 孙泽宇,柴佳彤,许建成. 新冠病毒变异株“奥密克戎”的研究进展[J]. 病毒学报, 2023, 39(2): 517-527.

[3] 郭明月,许鹏,肖桐,等. 应对新型冠状病毒国内外暖通相关指南对比[J]. 暖通空调, 2020, 50(11): 13-20.

[4] 李玉国,程盼,钱华. 新型冠状病毒的主要传播途径及其对室内环境设计的影响[J]. 科学通报, 2021, 66(S1): 417-423.

[5] 周敏,苏晓宁,宋晗,等. 西安咸阳国际机场 T3 航站楼空调系统新冠病毒传播风险分析[J]. 暖通空调, 2023, 53(6): 85-90.

[6] 钟玮. 公共建筑通风空调系统平疫结合设计探讨[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(5): 73-75.

[7] 戎向阳,刘希臣. 交通建筑中新型冠状病毒的空气传播风险与室内环境控制策略[J]. 暖通空调, 2020, 50(6): 12-18.

[8] 关航,许鹏,肖桐. 针对新型冠状病毒肺炎的暖通空调系统研究现状[J]. 制冷技术, 2021, 41(6): 73-78.

[9] Zhu Y X, Luo M H, Ouyang Q, et al. Dynamic characteristics and comfort assessment of airflows in indoor environments: A review [J]. Building and Environment, 2015, 91: 5-14.

[10] Mesenhöller E, Vennemann P, Hussong J. Unsteady room ventilation: A review [J]. Building and Environment, 2020, 169: 106595.

[11] Hou Y C, Li A G, Zhang Y. Air-fluctuation nozzle and its periodic, wave-like air distribution evaluation [J]. Indoor and Built Environment, 2020, 29(2): 196-207.

[12] Van Hooff T, Blocken B. Assessment of time-periodic

mixing ventilation using a sine function and a step function[C]//Healthy Buildings Europe 2017. Lublin, Poland. International Society of Indoor Air Quality and Climate, 2017: 0055.

[13] 林家泉,李波,邱岳恒. 基于空调正弦送风的清除客舱引气污染物方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(5): 1009-1016.

[14] 任松,牟其博,李玉,等. 脉动通风在螺旋隧道施工期的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(11): 144-151.

[15] 王海东,胡浩,朱杰克,等. 大空间建筑下送风分层空调系统区域间换热特性研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(2): 89-96.

[16] 赵凯玥,柏茜,程勇. 水平动态送风气流下人体呼出飞沫核的扩散特性研究[J]. 制冷与空调(四川), 2022, 36(1): 17-25.

[17] Shen C, Gao N P, Wang T Q. CFD study on the transmission of indoor pollutants under personalized ventilation[J]. Building and Environment, 2013, 63: 69-78.

[18] 栾一刚,张力敏,殷越,等. 大型室内场所的通风结构优化与病毒扩散规律[J]. 环境工程, 2022, 40(12): 180-186.

[19] 刘岩,王海东,汤毅,等. 周期性动态送风对室内污染物分布和通风效率的影响[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(5): 59-67.

(责任编辑:康 锋)