

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.04.002

基于正交试验的风-热耦合效应下 高层建筑交叉污染模拟研究

任柯宇¹, 刘晓平¹, 吴梅², 杨满江³, 胡淋翔⁴

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室), 安徽 合肥 230031; 3. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430070; 4. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 四川 成都 610095)

摘要:针对高层建筑环境下的气相污染物传播问题,文章采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟方法并引入正交试验法进行方案设计,研究风-热耦合效应下源项位置、受热壁面温差、受热壁面位置、通风方式4种因素对高层建筑单元间污染物传播路径的影响,利用极差分析得出各因素对高层建筑单元间污染物扩散影响的显著程度排序。引入无量纲参数理查森数 R_i ,对常规认为难以判定强制对流还是自然对流占主导地位的 $0.1 < R_i < 10.0$ 区间进行细分,分析各因素对高层建筑污染物传播的影响机制。结果表明,通风方式对污染物聚集的影响最为显著,而相较于 $0.1 < R_i < 0.5$ 情况下, $0.5 < R_i < 3.0$ 和 $3.0 < R_i < 10.0$ 区间内受热壁面位置的影响大于受热壁面温差的影响。在该研究的双侧通风案例中,高点源位置释放的污染物扩散情况较明显,从顶层延伸到底层,单侧通风下建筑物开口处的污染物质量浓度比其他2种通风方式高出1个数量级。

关键词:正交试验法;计算流体力学(CFD);高层建筑;污染物

中图分类号:X51 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)04-0439-09

Simulation of cross-contamination in high-rise buildings under wind-thermal coupling effects based on orthogonal experimental method

REN Keyu¹, LIU Xiaoping¹, WU Mei², YANG Manjiang³, HU Linxiang⁴

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center(Anhui Energy Laboratory), Hefei 230031, China; 3. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430070, China; 4. China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610095, China)

Abstract: This study investigates the dispersion of gaseous pollutants in high-rise building environments through computational fluid dynamics(CFD) numerical simulations coupled with orthogonal experimental design. The impact of four key factors, source location, heated wall temperature difference, heated wall position and ventilation method, on the inter-unit pollutant dispersion pathways in high-rise buildings is analyzed in the presence of wind-thermal coupling effects. Range analysis is applied to assessing the significance of the influence of each factor on the inter-unit pollutant dispersion in high-rise buildings. By introducing the dimensionless parameter, the Richardson number R_i , this study subdivides intervals $0.1 < R_i < 10.0$, conventionally regarded as challenging for determining the dominance of forced convection versus natural convection. The influence mechanisms of various factors on pollutant dispersion in high-rise buildings within each of these intervals are analyzed. The findings indicate the pronounced influence of ventilation method on pollutant aggregation, the influence of heated wall position is greater than that of heated wall temperature difference in intervals 0.5

收稿日期:2024-02-02;修回日期:2024-02-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52274184)

作者简介:任柯宇(2000—),男,安徽亳州人,合肥工业大学硕士生;

刘晓平(1978—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

$<R_i < 3.0$ and $3.0 < R_i < 10.0$, compared to the interval $0.1 < R_i < 0.5$. In the dual-sided ventilation cases, the pollutant dispersion originating from elevated source locations is notably pronounced, extending from the top floor to the bottom floor. Under single-sided ventilation, the pollutant concentrations at the building openings are an order of magnitude higher than those under the other two ventilation methods.

Key words: orthogonal experimental method; computational fluid dynamics(CFD); high-rise building; pollutant

随着城市化的迅速发展,高层建筑在城市中越来越普遍。近年来,严重急性呼吸综合征(severe acute respiratory syndromes, SARS)、H1N1 流感、COVID-19 等疾病威胁居民的生命财产安全。研究表明,污染物或微生物等可在高层建筑内部不同住户间进行传播,引起不同楼层居民的快速交叉感染^[1-3]。某卫生部门关于典型高层住宅内 SARS 爆发的调查结果显示,同一街区位于不同楼层的住户均有不同程度感染,10 层以上的高层住户比低层住户感染情况更严重。文献[4]研究表明,病毒由室内排出后在浮力和风力的共同作用下向上扩散,是不同楼层住户被感染的主要原因。探究高层建筑形态下的城市风场特性和高层建筑单元间污染物扩散路径,对改善城市空气环境、控制污染物传输、预防高层住户交叉感染具有重要意义。

国内外学者对高层建筑风-热环境下污染物扩散过程中的重要参数(如风速^[5-8]、源项特征^[9-11]、热效应程度^[12-17]等)进行大量的研究。一些研究发现,强风可起到空气幕的作用,阻止热量和物质在单元间传递。文献[5]发现当墙体与空气存在 5 K 温差时,随着环境风速从 0.5 m/s 增加到 2.0 m/s,从房间内释放的污染物羽流靠近窗户上部,当风速增加到 4.0 m/s 时,浮力流的发展受到限制;文献[9]在风洞中进行的一系列模拟烟囱排放的实验表明,在相同的实验条件下,不同的源项位置释放的污染物扩散路径有所不同,影响范围也有差异。在研究非等温流场和污染物扩散时,加热强度是最常见的因素^[12-15],文献[16]研究证明壁面温升对单体建筑周围通风的重要性;文献[17]研究了建筑外墙受热情况下,不同位置释放时的污染物扩散路径。在过渡季节,居民建筑的通风以单侧开窗的自然通风为主,污染物可被气流携带从开窗的房间扩散至另一个房间,不同的通风方式对室内气流组织和污染物扩散有很大影响^[18-21]。因此,本文考虑了通风方式对高层建筑单元间污染物扩散的影响。

为衡量风-热耦合效应下强制对流和自然对流

的相对重要性,本文选取理查森数 R_i 作为评估标准:当 $R_i < 0.1$ 时,自然对流可以忽略;当 $R_i > 10.0$ 时,强制对流可以忽略;当 $0.1 < R_i < 10.0$ 时,自然对流和强制对流均无法忽略。本文将常规无法判定强制对流和自然对流主导地位的 R_i 区间进一步细化成 3 个小区间,利用正交试验法对源项位置、受热壁面温差、受热壁面位置、通风方式这 4 种因素对高层建筑单元间污染物扩散的影响进行计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟试验。在细化后的 3 个 R_i 区间内,通过极差对比分析 4 种因素影响的显著程度。

1 计算模型及方法

1.1 建筑模型

本文采用的实尺模型,建筑模型及计算域示意图如图 1 所示。高层建筑模型共有 10 层,每层包含 6 个单元,沿着公共走廊对称分布。所有房间的尺寸($L \times W \times H$)均相同,均为 3.1 m \times 2.4 m \times 3.0 m。每个房间的窗户尺寸($H \times W$)为 1.20 m \times 0.75 m,门的尺寸($H \times W$)为 0.8 m \times 2.0 m。窗口底部距地面 0.9 m。采用 CO₂ 作为示踪气体,使其从不同楼层的单元 1.2 m 高度处的点源以 8.0 mg/s^[5]的速率连续释放。在所有算例设置中,污染物均选取迎风侧中间单元进行释放。

计算域入口距建筑 3H,出口距建筑 15H,计算域顶部和两侧距建筑 5H。计算域入口处采用自由流动速度,出口采用零法向梯度,建筑表面、地面设置为无滑移壁面,计算域的两侧设置为对称边界。本文的来流风剖面采用对数律,通过用户自定义函数定义速度入口的对数速度剖面 U_z 、湍动能 k_z 和湍流耗散率 ϵ 如下:

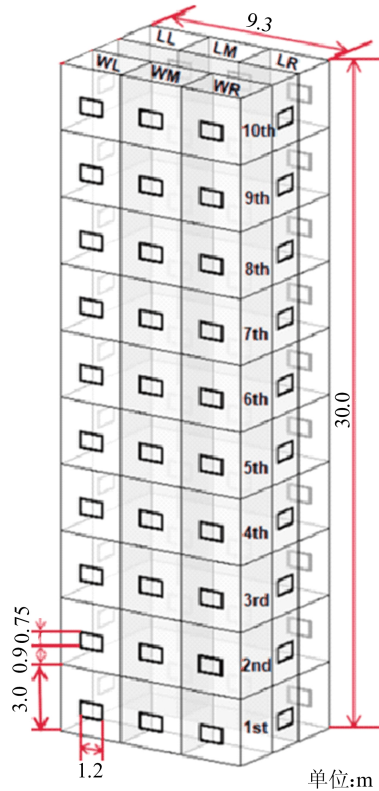
$$U_z = (u_* / \kappa) \ln[(z + z_0) / z_0] \quad (1)$$

$$k_z = [I_u(z) / U_z]^2 \quad (2)$$

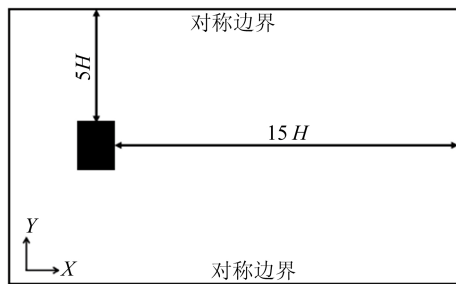
$$\epsilon = u_*^3 / [\kappa(z + z_0)] \quad (3)$$

其中: U_z 为距离地面 z 处的风速; u_* 为摩擦速度; κ 为 von Karman 常数,一般取 0.42; z_0 为粗糙高度; z 为距离地面某一高度。本文中湍流强度是

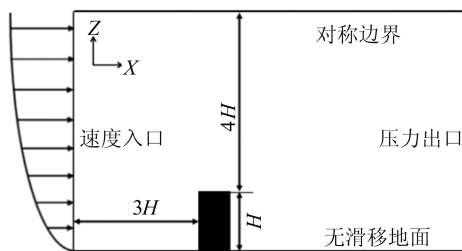
根据实测流向湍流强度的垂直廓线来定义的, I_v 为纵向湍流强度。



(a) 建筑模型



(b) 计算域顶视图



(c) 计算域侧视图

图 1 建筑模型及计算域示意图

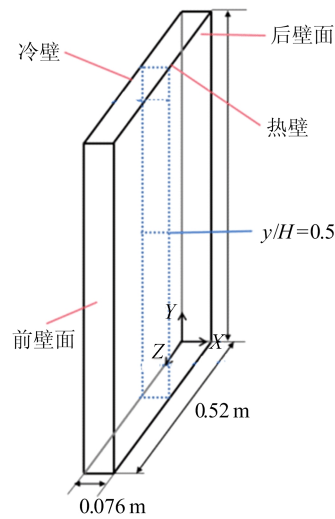
本文数值模拟均采用 ANSYS Fluent 19.0、压力基求解器, 选用 SST $k-\omega$ 模型^[22], 增强壁面函数, 压力耦合方程组的半隐式方法 (semi-implicit method for pressure linked equations, SIMPLE) 求解压力-速度耦合方程, 选用二阶迎风格式进行空间离散, X、Y、Z 方向上的动量和 $k、\epsilon$ 方

程的残差达到 10^{-5} , 能量方程和组分输运方程的残差低于 10^{-7} 认为计算达成了收敛。

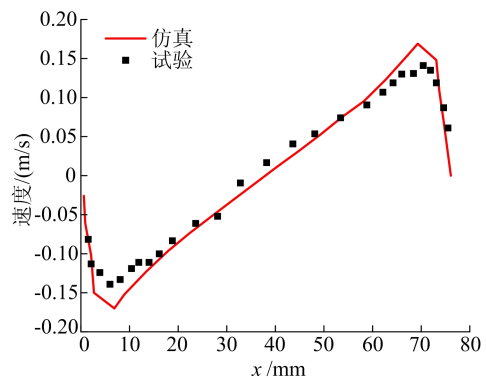
1.2 模型验证

本文选取文献[23]的空腔内空气自然对流的实验进行验证。空腔高 2.18 m、长 0.52 m, 冷热壁之间宽 0.076 m。热壁面温度为 $34.7\text{ }^\circ\text{C}$, 冷壁面温度设为 $15.1\text{ }^\circ\text{C}$, 上下壁为绝热。

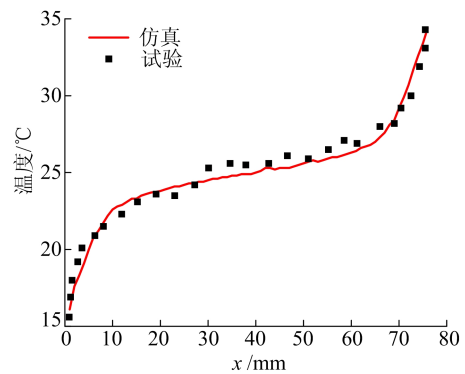
模型和模拟结果如图 2 所示。验证结果表明, 本节使用的计算模型和数值模拟方法对于风-热耦合效应下流场和温度分布预测具有较高的准确性。



(a) 空腔模型



(b) $y/H=0.5$ 位置Y方向速度分布



(c) $y/H=0.5$ 温度分布

图 2 验证模型及结果对比

1.3 正交试验设计

现实条件下,影响结果的因素往往不是单一的,随着因素和水平数量的增加,试验次数也会随之急剧上升,在此背景下,正交试验法被广泛运用,并取得良好效果^[24]。正交试验法利用正交表安排多因素试验,确定试验方案,具有“均衡分散,整齐可比”的特点^[25]。

为了更直观展现风-热效应的影响,本文采用 R_i 比较浮力和机械力的强弱, R_i 定义为:

$$R_i = \frac{g\beta(T_w - T_{ref})H}{U_H^2} \quad (4)$$

其中: T_w 为壁面温度; T_{ref} 为参考温度(环境温度); g 为重力加速度; β 为气体体积膨胀系数; H 为参考高度; U_H 为环境风速。利用不同风速下的同一受热壁面温差,使工况均处于 $0.1 < R_i < 10.0$ 的区间内,在常规认为无法判断浮力和机械力主导地位的 R_i 数值区间内分析高层建筑的单元间传播特性,各工况下 R_i 见表 1 所列。

表 1 不同风速及受热壁面温差对应的 R_i

组别	受热壁面温差/°C	$U_H/(m/s)$	R_i
1	3	1.0	3.010 2
	6		6.020 5
	9		9.030 7
2	3	2.0	0.752 6
	6		1.505 1
	9		2.257 7
3	3	5.0	0.120 4
	6		0.240 8
	9		0.361 2

根据正交设计理论以及试验次数的合理性安排,本文将源项位置(A)、受热壁面温差(B)、受热壁面位置(C)、通风方式(D)这 4 种影响因素分别划分成 3 种水平值,各类影响因素及水平见表 2 所列。

表 2 影响因素水平表

水平	A	B	C	D
1	3 层	3 °C	迎风面	单侧通风
2	6 层	6 °C	背风面	双侧通风
3	9 层	9 °C	迎风面+背风面	全面通风

单侧通风表现为迎风面窗户全开,其余开口全部关闭;双侧通风表现为迎风面和背风面及走廊内门全部开启,走廊窗户关闭;全面通风则是所

有开口全部开启。选取 $L_9(3^4)$ 正交表进行设计,在每一个风速范围下进行 9 次试验,共进行 27 次数值模拟,正交设计的方案见表 3 所列。

表 3 正交试验设计方案

方案	方案设计
1	A1B1C1D1
2	A1B2C2D2
3	A1B3C3D3
4	A2B1C2D3
5	A2B2C3D1
6	A2B3C1D2
7	A3B1C3D2
8	A3B2C1D3
9	A3B3C2D1

2 结果与讨论

本节将常规无法判定强制对流和自然对流主导地位的 R_i 区间进一步细化成 3 个小区间,分析 4 种因素对高层建筑单元间污染物扩散的影响。选取建筑开口(门和窗口)处的污染物质量浓度总和作为单元间传播效应指标,评估污染源所在单元对其他单元的传播强度。选取合计值、均值和极差作为正交试验法的统计指标。合计值和均值用以衡量各因素对结果的影响是否显著,较大的合计值和均值表示该因素影响更显著。极差是用于衡量因素水平之间差异程度的统计指标,表示同一因素在不同水平之间的最大差异。

2.1 $0.1 < R_i < 0.5$ 区间下的正交试验分析

建筑高度处风速为 5.0 m/s,即 $0.1 < R_i < 0.5$ 区间内时,各因素合计值、均值和极差见表 4 所列。

表 4 $0.1 < R_i < 0.5$ 区间正交试验设计结果

参数	A	B	C	D
K_1	131.406	130.620	130.712	194.697
K_2	41.960	42.055	29.536	3.319
K_3	28.742	29.436	41.862	4.095
k_1	43.802	43.540	43.571	64.899
k_2	13.987	14.018	9.845	1.106
k_3	9.581	9.812	13.954	1.365
极差	34.221	33.728	33.726	63.534

根据极差对各因素影响程度排序,对开口位置污染物质量浓度影响由大到小依次是通风方

式、源项位置、受热壁面温差和受热壁面位置。本节重点分析通风方式。

$0.1 < R_i < 0.5$ 区间内归一化质量浓度 ρ 云图如图3所示。在单侧通风方案(方案1、5、9)中,污染物均通过迎风面窗口向外扩散。当源项位置处于低点位(3层)时,污染物垂直向下扩散,

对2层中单元及1层左右两侧单元的影响相对较大;当源项位置处于中点位(6层)时,污染物向下扩散的范围较低源项位置变小,仅影响到5层,且左右两侧单元较中单元的污染程度更重;当源项位置处于高点位(9层)时,受上升气流主导,污染物仅影响顶楼单元。

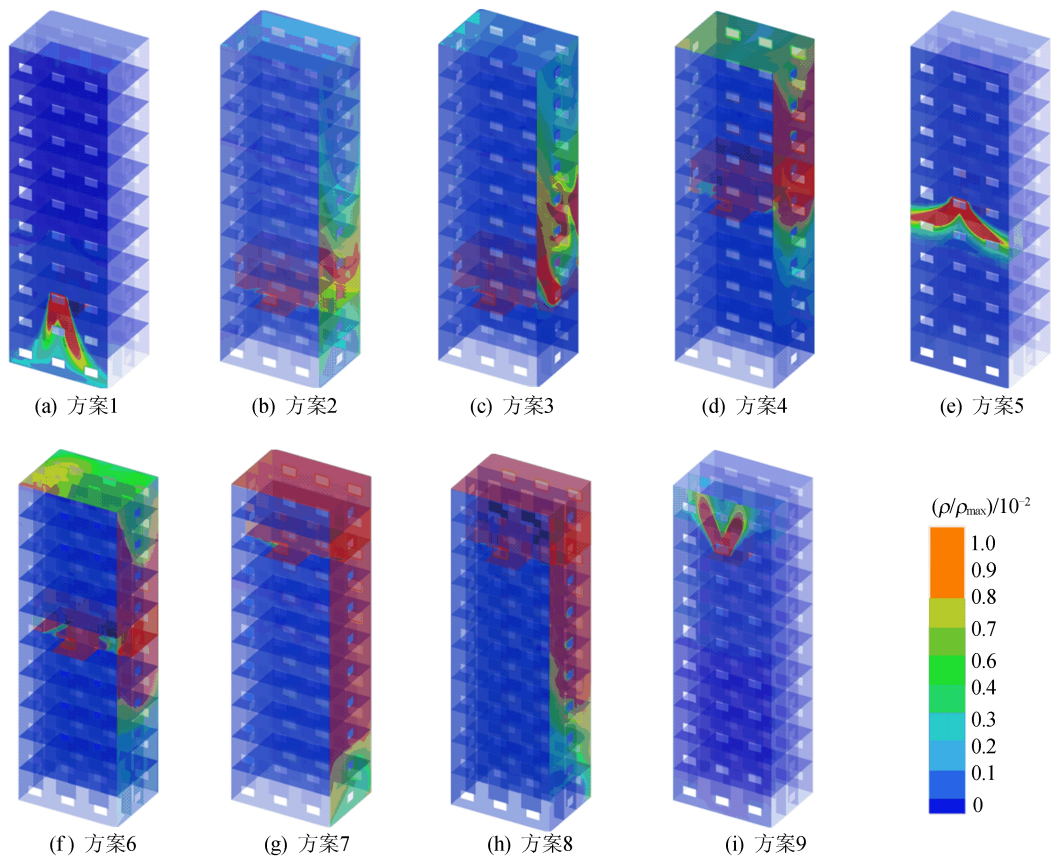


图3 $0.1 < R_i < 0.5$ 区间内归一化质量浓度云图

在双侧通风方案(方案2、6、7)中,污染物在低、中、高3个位置释放时,均会扩散至同层背风面单元及走廊内,建筑左右两面均有不同程度的污染物聚集,且高点源位置释放的污染物几乎布满了整个建筑侧壁,从顶层延伸到了底层。

在全面通风方案(方案3、4、8)中,由于走廊两端的窗户均处于打开状态,建筑两侧的污染物扩散范围相较双侧通风均有所变小。

2.2 $0.5 < R_i < 3.0$ 区间下的正交试验分析

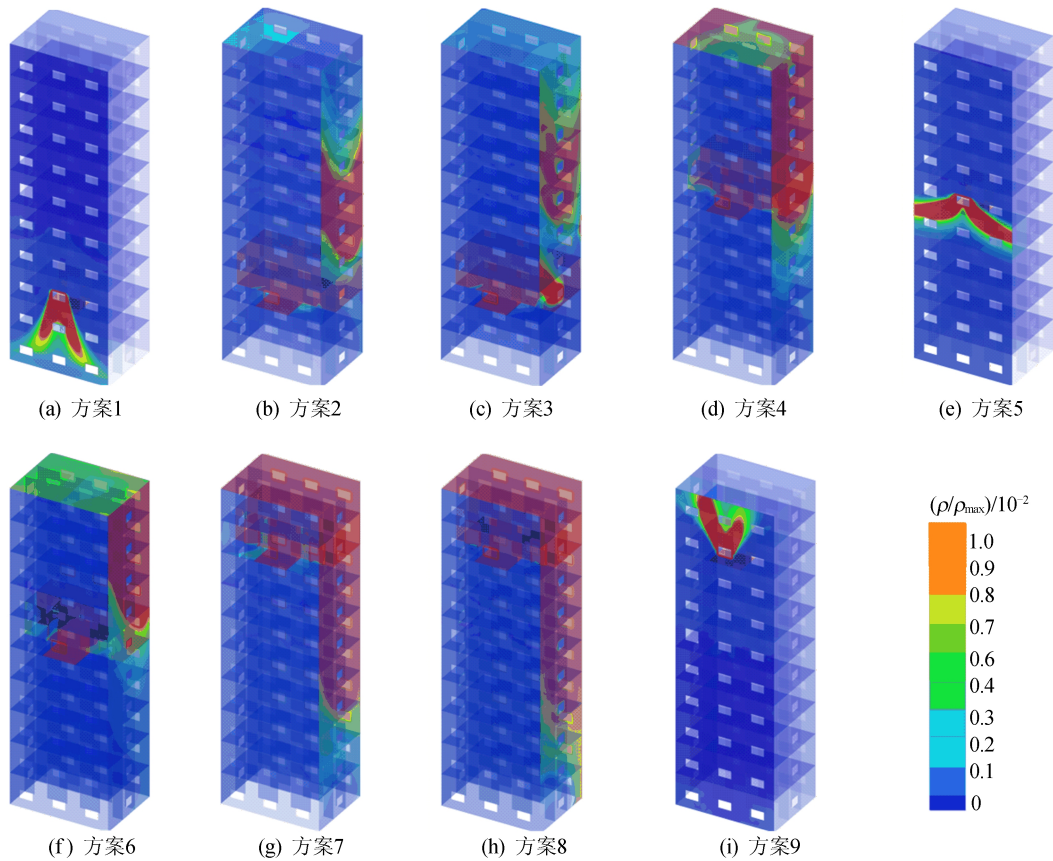
建筑高度处风速为 2.0 m/s , 即 $0.5 < R_i < 3.0$ 区间内时,各因素合计值、均值和极差见表5所列,归一化质量浓度云图如图4所示。

根据极差对各因素影响程度排序,对开口位置污染物质量浓度影响由大到小依次为通风方式、源项位置、受热壁面位置、受热强强度。相较于 $0.1 < R_i < 0.5$ 区间下的正交试验结果,受热壁

面温差和受热壁面位置的影响程度排序发生变化。此区间下,所有方案中的污染物扩散路径与前一区间基本保持不变,所有开口位置处的质量浓度均有不同程度的升高。值得注意的是,方案1的质量浓度与前一区间保持相近,说明风速大小对于低源项、单侧通风,迎风面低温升情况下的污染物传播影响较为微弱。

表5 $0.5 < R_i < 3.0$ 区间正交试验设计结果

参数	A	B	C	D
K_1	134.905	132.303	132.272	310.794
K_2	150.557	150.561	48.478	9.591
K_3	46.502	49.100	151.214	11.579
k_1	44.968	44.101	44.091	103.598
k_2	50.186	50.187	16.159	3.197
k_3	15.501	16.367	50.405	3.860
极差	34.685	33.820	34.246	100.401

图 4 $0.5 < R_i < 3.0$ 区间内归一化质量浓度云图

2.3 $3.0 < R_i < 10.0$ 区间下的正交试验分析

建筑高度处风速为 1.0 m/s , 即 $3.0 < R_i < 10.0$ 区间内时, 各因素合计值、均值和极差见表 6 所列。

根据极差对各因素影响程度排序, 对开口位置污染物质量浓度影响由大到小依次是通风方式、源项位置、受热壁面位置和受热壁面温差。这一影响程度排序和 $0.5 < R_i < 3.0$ 区间下的正交试验是相同的。相关归一化质量浓度云图如图 5 所示。

表 6 $3.0 < R_i < 10.0$ 区间正交试验设计结果

参数	A	B	C	D
K_1	169.036 9	161.784 3	164.420 3	351.444 0
K_2	151.291 5	149.466 1	80.660 8	19.386 5
K_3	73.527 6	82.605 6	148.774 9	23.025 5
k_1	56.345 6	53.928 1	54.806 8	117.148 0
k_2	50.430 5	49.822 0	26.886 9	6.462 2
k_3	24.509 2	27.535 2	49.591 6	7.675 2
极差	25.921 3	22.286 8	22.704 7	109.472 8

在单侧通风方案(方案 1、5、9)中, 低源项释放的污染物向下扩散影响到了 2 层单元; 中源项释放的污染物扩散集中在当前楼层单元, 且左右

两单元房间内均有一定程度的污染物聚集; 高源项释放的污染物向上扩散并集中于垂直向上的单元, 即 10 层中间单元。

在双侧通风方案(方案 2、6、7)中, 低源项释放时, 除污染源所在楼层的走廊和背风面单元内有污染物聚集现象, 背风面高层单元窗口位置处均有不同程度的污染, 建筑侧面的污染物聚集集中在 6 到 8 层位置; 中源项释放时, 背风面高层单元窗口处有不同程度的污染, 侧面污染程度较低; 高源项释放时, 污染物的扩散范围涵盖了背风面所有窗口位置和整个建筑侧面, 且高层的污染物聚集现象相较低层更强。

在全面通风方案(方案 3、4、8)中, 低源项释放时, 迎风面没有显著的污染物聚集, 背风面的污染物从 3 层一直扩散到了 7 层; 中源项释放时, 背风面和建筑侧面的污染物扩散覆盖了 6 层至顶层, 向下扩散不显著; 高源项释放时, 背风面的污染物主要聚集在 9、10 层的窗口位置, 低楼层的污染物聚集效应不显著, 建筑整个侧面均有不同程度的污染物聚集现象, 与方案 7 变化情况相似。

不同 R_i 数区间下影响因子排序汇总见表 7 所列。

从表 7 可以看出,通风方式对污染物聚集的影响最为显著,改变通风方式能更有效地减少室内污染物质量浓度;其次是源项位置,随着释放点位的变化,污染物扩散的方向随之出现变化;最后,在 $0.1 < R_i < 0.5$ 区间内,受热壁面温差对于

污染物聚集影响程度大于受热壁面位置,而在 $0.5 < R_i < 3.0$ 和 $3.0 < R_i < 10.0$ 这 2 个区间内,两者影响因子排序发生了交换。可见,随着浮力作用的增强,受热壁面位置对污染物聚集影响的显著程度是大于受热壁面温差的。

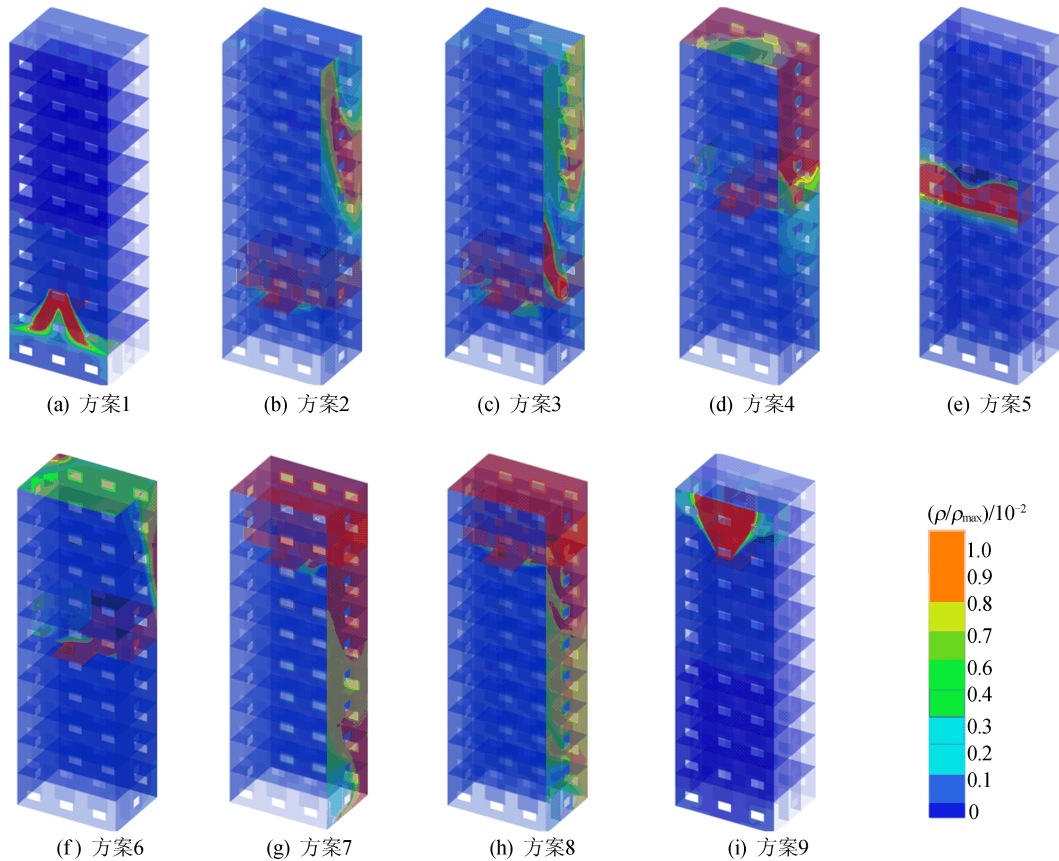


图 5 $3.0 < R_i < 10.0$ 区间内归一化质量浓度云图

表 7 不同 R_i 数区间下的影响因子排序汇总

R_i 数区间	影响因子排序
$0.1 < R_i < 0.5$	通风方式 > 源项位置 > 壁面温差 > 壁面位置
$0.5 < R_i < 3.0$	通风方式 > 源项位置 > 壁面位置 > 壁面温差
$3.0 < R_i < 10.0$	通风方式 > 源项位置 > 壁面位置 > 壁面温差

2.4 R_i 数对高层建筑单元间传播影响分析

上述分析都是在给定的 R_i 数区间范围内分析的正交试验结果,本节将对比分析不同的工况条件下,仅改变 R_i 数后的污染物扩散情况变化。

在方案 1 中,当 R_i 数为 0.120 4 时的扩散出现了显著的不对称性,这类在几何对称位置出现扩散不对称的现象在风洞实验中也有被观测过。在方案 2 下,随着 R_i 数从 0.240 8 增加到 6.020 5,建筑内的污染物扩散范围基本相同,而污染物扩散影响的建筑侧面区域高度逐渐上升。在方案 3 中,污染物对 1 层到 2 层的区域基本没

有影响,污染物在建筑侧面和背风面的扩散都随着 R_i 数的增大逐渐上移。

相较于低源项位置的释放情况,方案 4 在中源项位置处释放时, R_i 数变化对污染物扩散造成的影响相对较小。方案 5 中,单侧通风情况下,中源项释放对 R_i 数的变化敏感度更高,且污染物仅局限在迎风侧的单元内。方案 6 展现了和方案 3 相同的变化趋势,但是当 R_i 数增加到 9.030 7 时,污染物质量浓度明显降低。

高源项释放时,双侧通风的方案 7 结果表明,污染物几乎布满了背风面所有单元。而全面通风的方案 8 使得建筑侧壁的污染物聚集情况有所降低,建筑侧壁窗户开启使得一部分污染物通过窗户向外扩散。而方案 9 中污染物仅向上部进行扩散,垂直向上的单元室内污染的无量纲质量浓度超过 1.0%,左、右 2 个单元室内也达到 0.5%,提

示了此时的顶层迎风面 3 个单元的感染风险需要特别关注。

3 结 论

1) 基于正交试验设计理论,完成风-热耦合效应下高层建筑单元间传播影响试验设计,有效减少了试验次数,并为多因素多水平的影响研究提供了有效的分析手段,便于对风-热耦合效应下高层建筑垂直传播复合作用规律进行研究,为预防高层建筑住户交叉感染提供了新的思路。

2) 通过极差分析确定了各个影响因素对高层建筑开口处位置处的污染物质量浓度的影响程度和排序。在 $0.1 < R_i < 0.5$ 区间内,通风方式对污染物聚集的影响最为显著,其次是源项位置和受热壁面温差,受热壁面位置影响较小;而在 $0.5 < R_i < 3.0$ 和 $3.0 < R_i < 10.0$ 这 2 个区间内,通风方式对开口处的污染物质量浓度影响依旧是最大的,源项位置其次,而受热壁面位置影响提升到了第 3 位,受热壁面温差作用最微小。

3) 在不同通风方式下,由于污染物的扩散路径导致在典型位置处的聚集效应差异显著。以双侧通风为例,高源项位置释放的污染物可在沿建筑侧壁传播至接近底层的位置,因而对建筑周围较大面积区域产生影响;以全面通风为例,建筑物两侧的污染物扩散范围相对双侧通风变小。以单侧通风为例时,开口处污染物质量浓度相较于其他 2 种通风方式均高出 1 个数量级。

[参 考 文 献]

- [1] YIP C, CHANG W L, YEUNG K H, et al. Possible meteorological influence on the severe acute respiratory syndrome (SARS) community outbreak at Amoy Gardens, Hong Kong [J]. *Journal of Environmental Health*, 2007, 70(3): 39-47.
- [2] TELLIER R. Review of aerosol transmission of influenza a virus [J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2006, 12(11): 1657.
- [3] WANG Q, LI Y, LUNG D C, et al. Aerosol transmission of SARS-CoV-2 due to the chimney effect in two high-rise housing drainage stacks [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 421: 126799.
- [4] YU I T S, LI Y, WONG T W, et al. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus [J]. *New England Journal of Medicine*, 2004, 350(17): 1731-1739.
- [5] GAO N, NIU J, PERINO M, et al. The airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings; tracer gas simulation [J]. *Building and Environment*, 2008, 43: 1805-1817.
- [6] HUANG Y D, XU N, REN S Q, et al. Numerical investigation of the thermal effect on flow and dispersion of rooftop stack emissions with wind tunnel experimental validations [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 11618-11636.
- [7] MU D, GAO N, ZHU T, et al. CFD investigation on the effects of wind and thermal wall-flow on pollutant transmission in a high-rise building [J]. *Building and Environment*, 2018, 137: 185-197.
- [8] PARK J, SUN X, CHOI J I. Effect of wind and buoyancy interaction on single-sided ventilation in a building [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 171: 380-389.
- [9] HUANG X, HUANG Y D, XU N, et al. Thermal effects on the dispersion of rooftop stack emission in the wake of a tall building within suburban areas by wind-tunnel experiments [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 205: 104295.
- [10] MU D, SHU C, GAO N, et al. Wind tunnel tests of inter-flat pollutant transmission characteristics in a rectangular multi-storey residential building, part B: effect of source location [J]. *Building and Environment*, 2017, 114: 281-292.
- [11] YASSIN M F, ALHAJERI N S, ELMI A A, et al. Numerical simulation of gas dispersion from rooftop stacks on buildings in urban environments under changes in atmospheric thermal stability [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193: 1-19.
- [12] ZHOU X, YING A, CONG B, et al. Large eddy simulation of the effect of unstable thermal stratification on airflow and pollutant dispersion around a rectangular building [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 211: 104526.
- [13] VALGER S. Estimation of pollutant dispersion around a building within non-isothermal boundary layer using detached eddy simulation [J]. *Thermal Science*, 2022, 26(2C): 2013-2025.
- [14] GUO D, YANG F, SHI X, et al. Numerical simulation and wind tunnel experiments on the effect of a cubic building on the flow and pollutant diffusion under stable stratification [J]. *Building and Environment*, 2021, 205: 108222.
- [15] RICHARDS K, SCHATZMANN M, LEITL B. Wind tunnel experiments modelling the thermal effects within the vicinity of a single block building with leeward wall heating [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(8): 621-636.
- [16] NARDECCHIA F, GUGLIERMETTI F, BISEGNA F. How temperature affects the airflow around a single-block isolated building [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 118: 142-151.
- [17] LIU X, WU M, AN Z, et al. Study on the combined effect of wind and buoyancy on cross-unit contamination around a high-rise residential building [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 82: 103860.

(下转第 454 页)

- [3] MING Y, CHEN J, DONG G G. Weak fault feature extraction of rolling bearing based on cyclic wiener filter and envelope spectrum[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(5): 1773-1785.
- [4] LI Q, JI X, LIANG S Y. Incipient fault feature extraction for rotating machinery based on improved ar-minimum entropy deconvolution combined with variational mode decomposition approach[J]. *Entropy*, 2017, 19(7): 317-342.
- [5] GUO T, DENG Z M. An improved EMD method based on the multi-objective optimization and its application to fault feature extraction of rolling bearing[J]. *Applied Acoustics*, 2017, 127: 46-62.
- [6] JIN Z, HE D, CHEN Y, et al. Research on fault diagnosis method of train rolling bearing based on variational modal decomposition and bat algorithm-support vector machine[J]. *Journal of Physics(Conference Series)*, 2021, 1820(1): 012170.
- [7] YAN, X A, JIA M P. A novel optimized svm classification algorithm with multi-domain feature and its application to fault diagnosis of rolling bearing [J]. *Neurocomputing*, 2018, 313: 47-64.
- [8] XIAO M H, LIAO Y B, BARTOS P, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on back propagation neural network optimized by cuckoo search algorithm[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 81(2): 1567-1587.
- [9] LIU H H, HAN M H. A fault diagnosis method based on local mean decomposition and multi-scale entropy for roller bearings[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 75: 67-78.
- [10] ALI J B, FNAIECH N, SAIDI L, et al. Application of empirical mode decomposition and artificial neural network for automatic bearing fault diagnosis based on vibration signals[J]. *Applied Acoustics*, 2015, 89: 16-27.
- [11] WU Y P, WU W B. Analysis of wavelet decomposition properties of wind turbine signal[J]. *Science Direct*, 2021, 7(7): 873-879.
- [12] QIU X H, YE Z W. Fault diagnosis of analog circuits based on wavelet packet energy entropy and DBN[J]. *IOP Conference Series (Earth and Environmental Science)*, 2021, 632(4): 042018.
- [13] 向北平, 周建, 倪磊, 等. 基于样本熵的改进小波包阈值去噪算法[J]. *振动、测试与诊断*, 2019, 39(2): 410-415.
- [14] SHEN C Q, QI Y M, WANG J, et al. An automatic and robust features learning method for rotating machinery fault diagnosis based on contractive[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, 76: 170-184.
- [15] QIANG W A, YU W A, YW A, et al. Ablation state assessment of SF₆ circuit breaker contacts based on BP neural network and mean impact value[J]. *Science Direct*, 2022, 8(5): 874-883.
- [16] LUO Q Y, LI J X, ZHANG H. Drag coefficient modeling of heterogeneous connected platooning vehicles via BP neural network and PSO algorithm[J]. *Neurocomputing*, 2022, 487: 117-127.
- [17] ZHOU G B, ZHOU Y C. Analysis on mass flow rate of R22 and R407C through coiled adiabatic capillary tubes with GA and PSO optimized BP networks[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(8): 3445-3455.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 446 页)

- [18] NIKAS K S, NIKOLOPOULOS N, NIKOLOPOULOS A. Numerical study of a naturally cross-ventilated building [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42: 422-434.
- [19] CHU C R, CHIU Y H, TSAI Y T, et al. Wind-driven natural ventilation for buildings with two openings on the same external wall [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 108: 365-372.
- [20] FAN S, WYKES M S D, LIN W E, et al. A full-scale field study for evaluation of simple analytical models of cross ventilation and single-sided ventilation [J]. *Building and Environment*, 2021, 187: 107386.
- [21] WU M, ZHANG G, AN Z, et al. Modelling of hazardous chemical gas building ingress and consequence analysis during a leak accident[J]. *Indoor and Built Environment*, 2023, 32(4): 783-796.
- [22] LARSEN T S, HEISELBERG P. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(6): 1031-1040.
- [23] BETTS P L, BOKHARI I H. Experiments on turbulent natural convection in an enclosed tall cavity[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, 21(6): 675-683.
- [24] 吴启光. 关于正交试验法的优良性[J]. *应用数学学报*, 1978(4): 283-299.
- [25] 施富清, 史如琴, 肖锋, 等. 正交试验法与模拟计算[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2001, 24(增刊 1): 777-781.

(责任编辑 吴 亮)