

基于 PHOENICS 的某公共建筑在自然通风条件下室内环境研究

王凯, 闵杰, 王海涛

(安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 对某公共建筑在自然通风情况下的室内环境进行数值模拟。根据 $k-\varepsilon$ 湍流模型的控制方程及当地最多风向、基本风速等因素对该建筑在自然通风情况下的夏季和过渡季室内环境进行数值模拟。得出: 夏季及过渡季时, 室内空气分布比较均匀, 空气流动死角区域小, 换气次数大于 16 次/h 的房间面积占比达到 95%, 风速变化较小, 且新风量较大, 室内空气品质较好; 在过渡季, 由于自然通风充分, 室内主要功能区域温度基本在 22℃ 左右。该建筑室内环境达到了绿色建筑的评价标准, 可以为绿色建筑的规划和设计提供参考。

关键词: 自然通风; 数值模拟; 建筑节能

中图分类号: TU391

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2021) 01-049-07

PHOENICS-based indoor environment research of a public building under natural ventilation

WANG Kai, MIN Jie, WANG Haitao

(School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: The indoor environment of a public building under natural ventilation is simulated numerically. According to the control equation of the $k-\varepsilon$ turbulence model, the most local wind direction, basic wind speed and other factors, numerical simulation of the indoor environment of the building in summer and transition season under natural ventilation. It is concluded that in summer and transition seasons, the indoor air distribution is relatively uniform, the dead area of air flow is small, room area with more than 16 air changes/h accounted for 95%, wind speed change is small, and fresh air volume is large, indoor air quality is better; In the transition season, since sufficient natural ventilation, the indoor temperature substantially major functional areas about 22 °C. The indoor environment of the building has reached the evaluation standard of green building, which can provide reference for the planning and design of green building.

Key words: natural ventilation; numerical simulation; building energy efficiency

室内空气品质和热湿环境构成室内环境,而营造合理的通风组织是保障良好室内环境的常用方式^[1]。通风主要分为机械通风和自然通风,其主要目的是为室内送进新风和排出污染空气^[2]。现代人每天将超过 70% 的时间花在室内,这强调了舒

适室内环境的重要性^[3]。与机械通风相比,自然通风是一种简单、低成本的方法^[4],是可持续健康室内环境的重要被动建筑设计策略^[5]。

国内外学者对于建筑室内自然通风进行了大量研究,李立力等^[6]研究表明,建筑物内外表面压

收稿日期: 2020-07-02

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目 (201904a07020072;202004a07020019;202004a07020049)

作者简介: 王凯 (1994-), 男, 硕士生, 主要研究方向为暖通空调与系统节能。

力差小于 5 Pa,有利于夏季自然通风并且符合冬季防风的要求。杨丽等^[7]通过 CFD 软件模拟分析了不同通风方式对室内空气环境质量的影响,得出转换通风在速度场、热舒适性和改善室内空气品质方面都明显优于传统的上送上出通风方式。Benni 等^[8]在意大利进行了一项二维研究,发现最佳的自然通风配置是带有封闭迎风屋顶的开放侧壁,此种配置消除了室内 64% 的热量。

自然通风对建筑节能十分重要。但是在夏热冬冷地区的夏季,通过自然通风对室内热环境进行调节存在一个室外气象温度上限^[6]。由于公共建筑室内环境相对复杂,室内通风组织受各种因素影响,揭示其分布规律比较困难,通过实验研究不仅耗资巨大,而且受各种条件限制,实验周期很长,并且难以得到室内空气流动的全部特征,局限性很大^[9]。现阶段由于计算机技术已经有了很大的发展,发展出了计算流体力学方法,这种方法通过计算机建立物理分析模型并进行数值计算和后处理得到的图像显示,以更经济的成本提供快速和精确的模拟,对包含流体流动和热传导等相关物理现象的系统进行分析^[10]。

基于此,本文使用 CFD 方法通过对某公共建筑在夏季和过渡季的室内风环境的变化进行模拟以及评价其是否达到绿色建筑标准,同时进行了分析,对该建筑的气流组织速度场、室内空气龄场、室内温度场等指标进行了评价,为该地区的绿色建筑建设和设计提供一定的参考。

1 项目介绍

该项目总建筑面积 185 687 m²,其中地上总建筑面积为 148 693 m²,地下建筑面积为 36 994 m²,地上建筑包含主楼、辅楼、门卫、二期工程。容积率 1,建筑密度 15%,绿地率 40%。项目设置地上停车位 200 个,地下停车位 700 个。

其中绿色建筑规划设计仅包含主楼,建筑功能地上为办公、新闻发布中心、调度中心、职工娱乐、职工健身、图书馆及配套用房。地下二层主要为机动车停车库及大楼配套设备用房。地下一层主要为职工设施包括职工活动、图书馆、职工休息、健身房及商店等。



图 1 某办公中心效果图

2 数值模拟方法

2.1 原理介绍

自然通风是一种由自然风压和室内外温差造成的热压提供动力的通风方式^[11]。建筑的自然通风是通过围护结构上的门、窗等开口,利用开口处的空气温差、空气密度差促使空气流动,引导建筑室内外空气进行流动交换^[12]。建筑的自然通风受风速、风向及围护结构开口面积等因素直接影响,具有较大的变化性和不可控性。

建筑自然通风模拟属于室内不可压缩流体三维稳态问题。基于空气湍流特性的微观解析,主要方法是采用 Launder 及 Spalding 等提出的一种平均湍流能量模型—— $k-\epsilon$ ^[13],在处理室内自然通风问题时,该模型具有收敛稳定性良好且速度较快的特点,选用该模型能够在保证计算质量的同时适当地节约计算资源。在 $k-\epsilon$ 双方程模型求解湍流对流换热问题中,由动量方程、能量方程、连续性方程以及 $k-\epsilon$ 方程组成控制方程。

(1) 连续性方程,流入该微元体的净质量即等于微元体中流体质量的增量,对不可压缩流体,简化为:

$$\text{div}(U) = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程,即作用在微元体上各种力之和等于其流体动量的增值,简化为:

$$r\text{div}(uU) = \text{div}(\eta \text{grad}u) + S_u - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$r\text{div}(vU) = \text{div}(\eta \text{grad}v) + S_v - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$r\text{div}(wU) = \text{div}(\eta \text{grad}w) + S_w - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

(3) 能量方程,即微元体热力学能的增量等

于进入微元体的净热流量对微元体所做的功,简化为:

$$\operatorname{div}(UT)=\operatorname{div}\left(\frac{\lambda}{\rho c p} \operatorname{grad} T\right)+\frac{ST}{\rho}$$

(5)

式中:λ——导热系数。

2.2 物理模型

根据平面设计图,采用 Auto CAD 软件进行建模。并进行了合理的简化,如覆盖设备用房、楼梯间等。自然界的平均风速随着高度增加而增大,故进行建筑室内自然通风数值模拟时宜选取最不利于建筑室内自然通风的楼层,主楼一层和塔楼五层分别是主楼最低层和塔楼最低层,以此典型楼层建立物理几何模型(图 2~图 5):

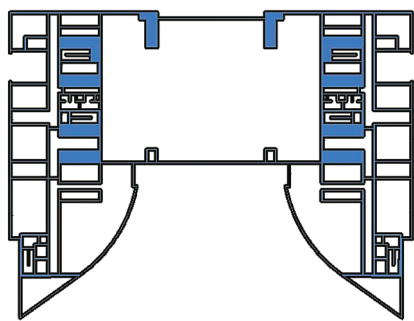


图 2 主楼一层几何模型

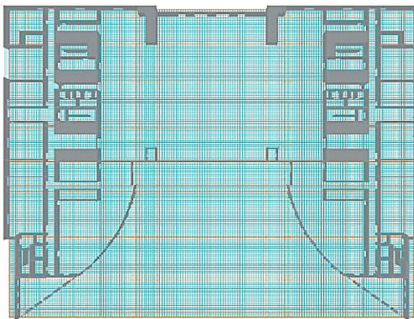


图 3 主楼一层计算网格图

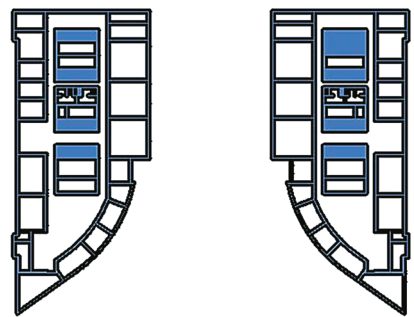


图 4 塔楼五层几何模型

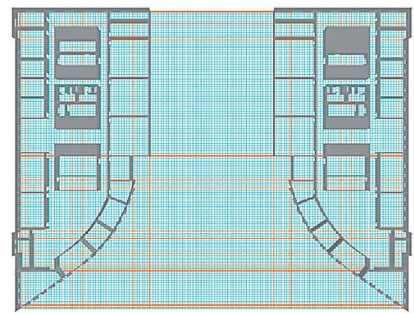


图 5 塔楼五层计算网格图

2.3 气象参数

地理位置:该地区建筑气象分区为夏热冬冷,经度:117.02,纬度:32.47,海拔:18.7m;^[14]

夏季工况:夏季大气压力 1002.6 hPa,通风室外干球温度 31.3℃,通风室外相对湿度为 66%,最多风向为 CE,最多风向平均风速 2.8 m/s;^[14]

过渡季工况:过渡季大气压力 1012.6 hPa,通风室外干球温度 21℃,通风室外相对湿度为 57%,最多风向为 CE,最多风向平均风速 3.1 m/s;^[14]

2.4 初始边界条件设置

在数值模拟中,前处理包括建立物理模型、建立反应问题各量之间的微分方程以及定解条件即设置边界条件,能否正确设置边界条件直接影响到计算过程能否收敛与模拟结果的准确性。本次模拟根据当地夏季和过渡季的主导风向及主导风向下的平均风速(表 1),以及相对应的室外通风干球温度作为模拟的温度边界。采用室外风环境模拟的最不利工况下的压力分布(图 6~图 9),作为室内自然通风窗口的压力边界。

表 1 某地主导风向及主导风向下的平均风速

季节	主导风向	平均风速
夏季	C E	2.8 m/s
过渡季	C E	3.1 m/s

图 6 和图 7 分别为本项目夏季东南侧和西北侧的表面压力分布云图。室外风压值为 -10~6.25 Pa,可以看到,建筑东南侧与西北侧存在至少 10 Pa 的表面压力差。李立力等^[6]研究表明,建筑表面压力差不小于 5 Pa 就可以满足室内自然通风。图 8 和图 9 分别为本项目过渡季东南侧和西北侧的表面压力分布云图,如图所示,在过渡季,建筑物东南侧与西北侧的压力差值大约为 5 Pa,在这种条件下能够满足过渡季的室内通风要求。



图 6 夏季东南侧表面压力分布云图

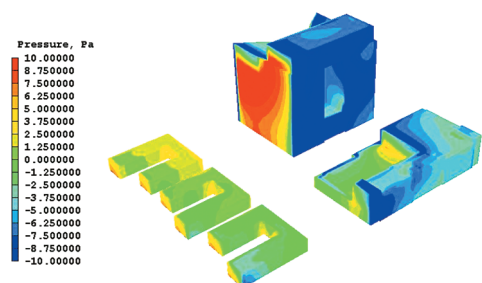


图 7 夏季西北侧表面压力分布云图



图 8 过渡季东南侧表面压力分布图

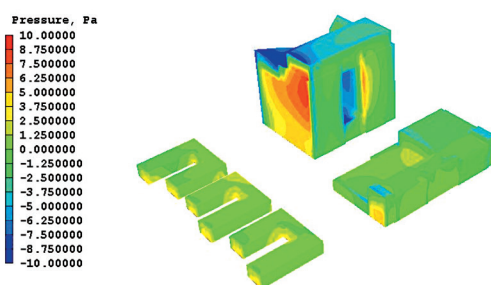


图 9 过渡季西北侧表面压力分布图

2.5 数值计算方法

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 的基本原理是用有限个离散点的变量值来表示原来连续的物理量, 用其集合来表示物理量的场 (如温度场、压力场、速度场), 通过求解由特定原则建立的代数方程组来获得场的近似值^[15]。此次

选用 PHOENICS 软件进行边界条件设计、计算及后处理, 然后使用 Photoshop 软件进行结果处理。

3 模拟结果分析

根据物理分析模型特征和数值模拟, 主要分析夏季与过渡季建筑典型层室内在自然通风条件下的风环境和热环境, 如室内 1.2 m 高度 (坐姿呼吸区) 自然气流的风压、风速、空气龄等室内关键风环境指标以及坐姿呼吸区的室内温度场。

3.1 夏季自然通风情况

为充分反映室内风环境对人体的影响, 在夏季室外模拟风压下针对室内 1.2 m (坐姿呼吸区) 处进行模拟计算 (图 10 ~ 图 15)。

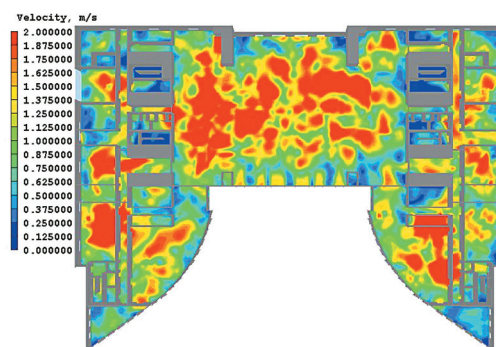


图 10 主楼一层夏季室内速度云图

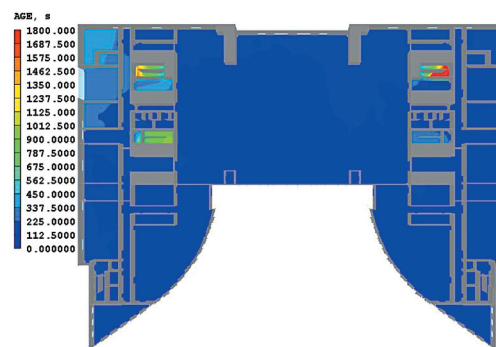


图 11 主楼一层夏季室内空气龄云图

如图 10 所示, 在夏季, 办公一层楼主要功能空间 1.2 m 高度 (坐姿呼吸区) 风速基本在 2 m/s 以下, 极小部分死角区域风速小于 0.25 m/s; 塔楼五层楼 1.2 m 高度 (坐姿呼吸区) 风速基本在 1.4 m/s 以下, 局部死角区域风速偏小, 辅助机械通风之后, 不影响人员室内活动; 图 12 和图 15 为室内温度云图, 可以看到, 室内温度基本与当地室外通风计算温度

持平,局部区域略高于 31.3°C 。图 11 和图 13 为建筑模拟楼层室内的空气龄云图,通过观察发现,办公一层楼和塔楼五层楼由于自然通风得到的空气龄大致在 $110\sim 225\text{ s}$ 之间,只有局部死角区域空气龄在 900 s 以上。由于室内外压差较大,门窗开启比较充分,室内通风顺畅,室内主要功能房间通风换气次数在均在 16 次/h 以上,远远大于绿色建筑标识设计要求的至少 2 次/h 。经过计算,满足 2 次/h 换气次数要求的房间面积比例达到 95% 。

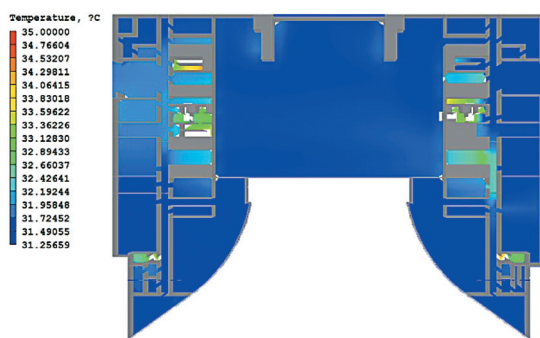


图 12 主楼一层夏季室内温度云图

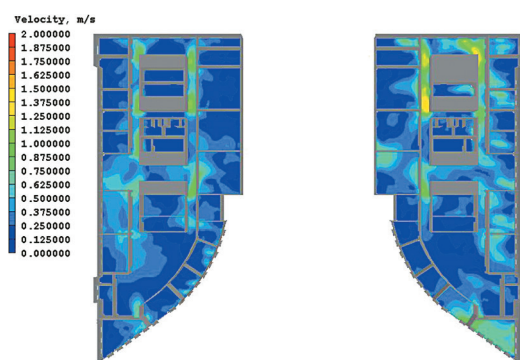


图 13 塔楼五层楼夏季室内速度云图

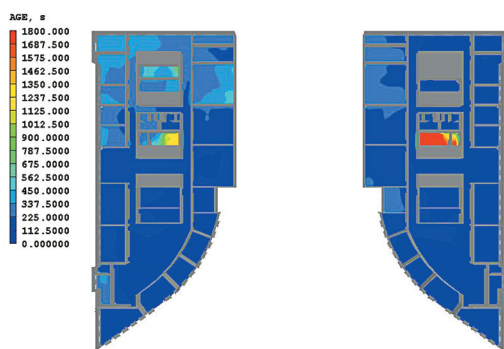


图 14 塔楼五层楼夏季室内空气龄云图

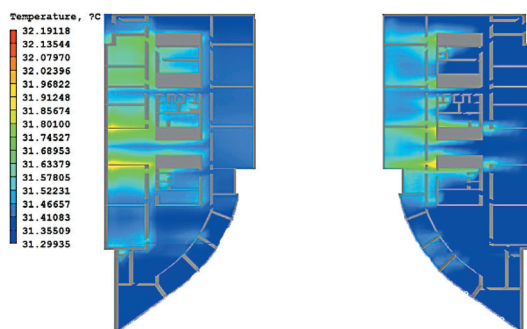


图 15 塔楼五层夏季室内温度云图

3.2 过渡季自然通风情况

过渡季室外模拟风压下针对室内 1.2 m 高度处进行模拟计算(图 16 至图 21)。

在过渡季,办公一层楼 1.2 m (坐姿呼吸区)最大风速为 2 m/s ,大部分区域空气速度在 1.2 m/s 以上,塔楼五层楼坐姿呼吸区平均风速为 0.35 m/s ,局部死角区域风速偏小,辅助机械通风之后,不影响人员室内活动。图 18 和图 21 为室内温度云图,由于自然通风充分,室内主要功能区域温度基本在 22°C 左右,主楼一层极少部分区域超过 26°C ,该区域面积占比为 6.3% 且均为资料室或办公室死角。图 17 和图 20 为模拟楼层室内的空气龄云图,通过观察发现,办公楼一层和塔楼五层楼由于自然通风得到的空气龄基本在 225 s 以下,办公楼一层北部和塔楼五层西南角空气龄在 600 s 以上,局部死角区域空气龄在 1000 s 以上。虽然局部空气龄较大,但也基本满足 3 次/h 的通风换气要求。由于室内外压差较大,门窗开启比较充分,室内通风顺畅,室内主要功能房间通风换气次数均能满足大于 3 次/h 。

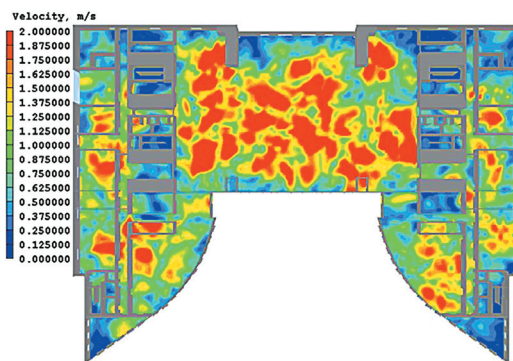


图 16 主楼一层过渡季室内速度云图

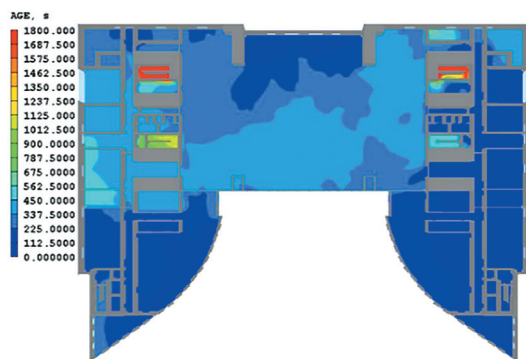


图 17 主楼一层过渡季室内空气龄云图

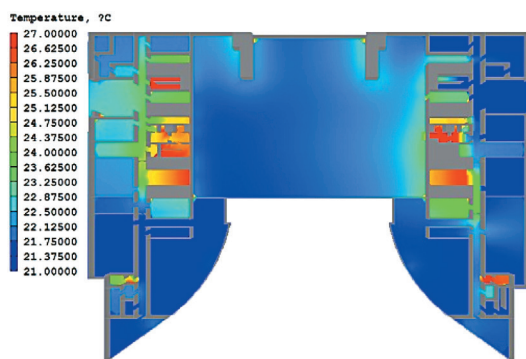


图 18 主楼一层过渡季室内温度云图

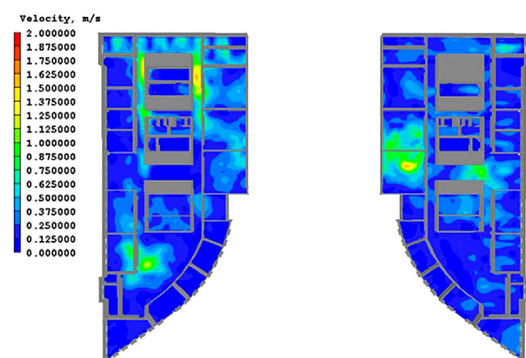


图 19 塔楼五层楼过渡季室内速度云图

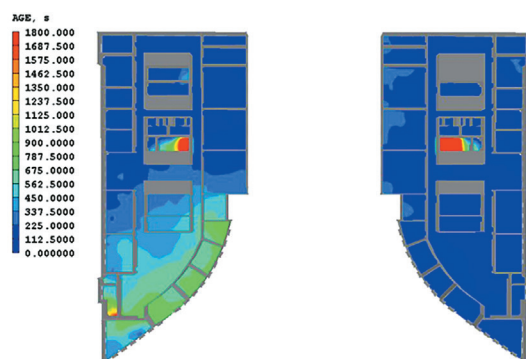


图 20 塔楼五层楼过渡季室内空气龄云图

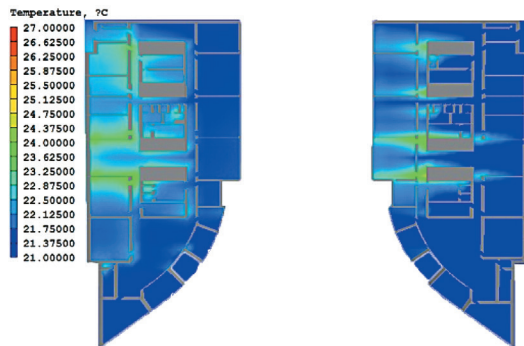


图 21 主楼一层过渡季室内温度云图

4 结论

(1) 夏季及过渡季时,室内空气分布比较均匀,空气流动死角区域小,换气次数大于 16 次/h 的房间面积占比达到 95%,风速变化较小,且新风量较大,室内空气品质较好。在夏季,由于建筑物内外表面压差在 5 Pa 以上,达到自然通风的压差要求,可以满足建筑空间内一定程度的温湿度要求,风速均小于 2 m/s,能够达到标准。但夏季采用自然通风对室内环境进行调节存在一个室外气象温度上限^[16],超过此上限仅采用自然通风无法达到营造室内良好舒适风环境的目的,需要采用空调系统和新风系统来维持。

(2) 在过渡季由于自然通风充分,室内主要功能区域温度基本在 22 °C 左右。过渡季在室外风环境相对稳定均匀的初夏或秋季,使用自然通风调节可完全替代空调系统来维持室内良好的热环境。

(3) 该建筑室内环境达到了绿色建筑的评价标准,通过合理的建筑布局营造出符合国家标准的良好室内环境,可以为该地区绿色建筑项目的规划和设计提供参考。室内环境是绿色建筑评价中的重要指标,在规划设计的初期就要重视项目的室内环境的分析、优化,为建造舒适环保的室内空间提供理论支持。

参考文献:

- [1] 王敏,秦旋,莫懿懿. 基于利益相关者视角的绿色建筑挑战因素差异性和关联性的实证分析[J]. 土木工程学报,2014,47(12):130-138.
- [2] 杨元华,赵辉,杨修明. 绿色建筑技术创新的现状与建议[J]. 建筑经济,2019,40(8):94-96.
- [3] Fusaro G, Yu X, Kang J, et al. Development of metacage for noise control and natural ventilation in a window system[J].

Applied Acoustics, 2020, 170:107510.

- [4] McCartney L, Lefsrud M G. Field trials of the natural ventilation augmented cooling (NVAC) greenhouse[J]. Biosystems Engineering, 2018, 174:159-172.
- [5] Gough H L, Barlow J F, Luo Z, et al. Evaluating single-sided natural ventilation models against full-scale idealised measurements: Impact of wind direction and turbulence[J]. Building and Environment, 2020, 170:106556.
- [6] 李立力, 张亮亮, 刘纲, 等. 某绿色建筑风环境数值模拟分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(S2):215-218.
- [7] 杨丽, Bing Wang. 不同通风方式与室内空气环境质量的数值模拟分析[J]. 建筑科学, 2014, 30(4):78-83.
- [8] Benni S, Tassinari P, Bonora F, et al. Efficacy of greenhouse natural ventilation: Environmental monitoring and CFD simulations of a study case[J]. Energy and Buildings, 2016, 125:276-286.
- [9] 疏志勇, 吴志敏, 魏燕丽, 等. 夏热冬冷地区被动式超

低能耗绿色建筑室内热湿环境营造及实测分析[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(5):146-151.

- [10] 姚征, 陈康民. CFD 通用软件综述[J]. 上海理工大学学报, 2002, 24(2):137-144.
- [11] 杨丽, 钱锋, 宋德萱. 建筑室内空间环境舒适性的数值模拟研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(8):129-134.
- [12] 韩彰. 安徽省某住宅小区室内自然通风优化研究[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2019, 19(6):26-30.
- [13] 黄昌辉. 绿色和谐生态住宅室内环境设计研究[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2017.
- [14] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- [15] 尹思艺. 用CFD模拟分析优化室内通风效果[J]. 城市开发, 2010(18):80-81.
- [16] 王亮, 周彤云, 刘东, 等. 室内自然通风环境热舒适性研究[J]. 热科学与技术, 2018, 17(5):425-429.

(上接第48页)

与空气充分接触而中间部位燃烧被限制,从而侧边温度普遍大于中心区域温度。

(3)随着玻璃幕墙角度的增加,受限空间构型两侧和底部空气卷吸效应变弱以及玻璃热反射作用的减小,火焰在竖直方向的延伸高度逐渐降低。在建筑幕墙设计和安装时,考虑火焰对建筑钢架结构稳定性的影响,通过改变幕墙倾斜角度降低火焰高度,减少火焰对建筑的炙烤。

(4)随着幕墙倾斜角度增大,夹层空间的热积累现象增强,熔融液滴落频率增加,易引燃未燃区域增加火灾危险性。大部分幕墙存在空腔结构,上下贯通的空腔会导致建筑整体着火,通过采取每层楼板、隔墙间填充防火封堵材料等分隔措施,有效避免熔融液滴落产生的危害。

参考文献

- [1] 刘激扬, 沈纹, 倪照鹏, 等. 沈阳皇朝万鑫大厦火灾调查与启示[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(6):156-159, 163.
- [2] 章涛林, 周晓冬, 雷杲, 等. 高层建筑典型外墙保温材料火蔓延特性数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(2):230-234.
- [3] 郭峰, 朱国庆. EPS 外保温系统竖向火蔓延特性[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(7):853-856.
- [4] 徐亮, 伍卫军, 丁严艳. 典型热塑性聚合物热解行为研

究[J]. 火灾科学, 2010, 19(3):143-149.

- [5] 王禹. 火灾下玻璃幕墙破裂行为的实验和数值模拟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2016.
- [6] 王经纬, 方廷勇, 涂然, 等. 风速对聚氨酯泡沫垂直逆流火蔓延的影响[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(8):1059-1061.
- [7] Ma X, Tu R, An WG, et al. Experimental study of interlayer effect induced by building facade curtain wall on downward flame spread behavior of polyurethane[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 167:114694.
- [8] 黄新杰, 纪杰, 张英, 等. 拉萨和合肥环境下不同厚度保温材料 EPS 火蔓延特性研究[J]. 灾害学, 2010, 25(S1):136-139, 153.
- [9] Ma X, Tu R, Ding C, et al. Experimental study on thermal safety analysis of flexible polyurethane at various facade inclined structures under low ambient pressure condition[J]. Engineering Structures, 2018, 176:11-19.
- [10] E.E. Zukoski, Properties of Fire Plumes, Combustion Fundamentals of Fire[M]. London:Academic Press, 1995:101-219.
- [11] 薛岩, 方俊, 王静舞. 低压下聚乙烯绝缘层导线火蔓延熔融滴落实验分析[J]. 火灾科学, 2017, 26(4):191-197.
- [12] AN W G, PAN R L, MENG Q X, et al. Experimental study on downward flame spread characteristics under the influence of parallel curtain wall[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128:297-305.