

高层住宅内天井烟气蔓延特性与开窗临界耐火温度研究 ——以南京雨花台建筑火灾事故为例

刘佳玲¹, 张淇厚¹, 陈颖², 李思成²

(1. 中国人民警察大学研究生院, 廊坊 065000; 2. 中国人民警察大学防火工程学院, 廊坊 065000)

摘要: 采用 FDS 火灾数值模拟, 设定 3 个火源位置和 3 种火源功率共计 9 种工况, 对架空层用作电动自行车停车棚的高层住宅建筑展开研究, 以南京“2·23”火灾事故所涉建筑为例, 分析不同火源位置和火源功率下高层住宅天井内的烟气蔓延特性, 探究天井内不同开窗位置处的温度和 CO 浓度。研究表明: 烟气在几乎蔓延至整个架空层后最终通过窗口溢流的形式蔓延至所有天井内。火源位置不同, 蔓延进入不同天井的先后顺序有所差异, 随着火源功率的增大, 烟气进入天井的速度加快。当火源靠近单元门或位于候梯厅一侧时, 3 个天井内都会产生烟囱效应; 火源在架空层一角时, 3 个天井内几乎没有烟囱效应产生。随着火源功率的增大, 3 个天井内的烟囱效应逐渐增强。总的来说, 天井内侧向开窗的危险性大于正向开窗, 窗玻璃的最低耐火温度随火源位置、火源功率、开窗位置变化而有所不同。

关键词: 高层住宅; 天井; 耐火温度; 火灾烟气; 蔓延特性

中图分类号: TU998.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)03-0339-14

Smoke Spread Characteristics of Patios and Critical Fire Resistance Limit of Window Opening in High-rise Residential Buildings: Taking Nanjing Yuhuatai Building Fire Accident as an Example

Liu Jialing¹, Zhang Qihou¹, Chen Ying², Li Sicheng²

(1. Graduate School, China People's Police University, Langfang 065000, China;

2. School of Fire Protection Engineering, China People's Police University, Langfang 065000, China)

Abstract: FDS fire numerical simulation was utilized to establish 9 working conditions comprising of 3 fire source locations and 3 fire source powers. A study was conducted on a high-rise residential building with an overhead floor utilized as an electric bicycle parking shed. The building involved in the Nanjing “2·23” fire accident was taken as an example to analyze the smoke spread characteristics in the patio of a high-rise residential building under different fire source locations and fire source powers. The study aimed to explore the temperature and CO concentration at different window positions in the patio. The research findings suggest that smoke spreads to almost the entire mezzanine floor and eventually spreads to all patios through window overflow. The order in which the smoke spreads into different patios varies depending on the location of the fire source. The speed at which smoke enters the patio increases with the power of the fire source. If the fire source is close to the unit door or located on the side of the

收稿日期: 2024-05-27.

基金项目: 河北省重点研发计划资助项目(22375418D).

作者简介: 刘佳玲(2001—), 女, 硕士研究生, 2023904003@coppu.edu.cn.

通信作者: 陈颖, 女, 硕士, 副教授, chenying@coppu.edu.cn.

elevator lobby, a chimney effect will occur in all the three wells. However, if the fire source is in a corner of the mezzanine floor, almost no chimney effect will occur in the three wells. The chimney effect in the three wells gradually strengthens as the fire power increases. Overall, lateral windows in the patio pose more danger than frontal windows, and the minimum fire resistance limit of window glass varies depending on the location of the fire source, the power of the fire source, and the window position.

Keywords: high-rise residential building; patio; fire resistance limit; fire smoke; spread characteristics

随着城镇化进程的快速推进和建筑技术的不断提升,高层住宅建筑越来越多。CTBUH 发布的《2020 高层建筑年度回顾》报告显示,截至 2020 年底,我国超过 24 m 的高层建筑有 34.7 万栋,高层住宅建筑数量高达 26.4 万栋^[1]。近年来高层住宅建筑火灾时有发生。2023 年 4 月 3 日凌晨 2 时 55 分,江苏省南京市江宁区大里聚福城小区怡景园高层住宅天井发生火灾,火情造成一名居民昏迷,经送医抢救无效身亡。2024 年 2 月 23 日凌晨 4 时 39 分,南京市雨花台区明尚西苑 6 栋发生火灾,截至 23 日 24 时,事故共造成 15 人遇难,44 人住院治疗。经初步分析,火灾为 6 号楼建筑地面架空层电动自行车停放处起火引发。类似采光井、天井等消防安全问题层出不穷,多起火灾都暴露出天井等竖向通道存在极大的消防安全隐患,高层住宅建筑内天井的火灾特性及设计需要进一步探讨和研究。

为了提高高层建筑的垂直稳定性,同时保证人员疏散的安全性,核心筒结构凭借其设置灵活的特点广泛应用于高层建筑。但由于核心筒的设置影响了部分住户的采光和通风,同时又要满足 GB50096-2011《住宅设计规范》^[2]7.1.3 和 7.2.1 的要求,因此高层住宅往往会设置连廊和天井。目前国家标准仅对天井进行了防护栏杆、降噪等方面的要求,并未明确防火方面的相关规定。但不少地区根据自身情况对天井做了规定,江苏省 DB32/3920-2020《住宅设计标准》^[3]9.8.1 对非封闭天井侧向窗到连廊开口的直线距离做了要求,规定直线距离过小时应采用耐火完整性不低于 1.00 h 的防火玻璃窗;海南省琼公消〔2018〕第 117 号《海南省消防技术规范难点问题操作技术指南(暂行)》^[4]7.3 对天井的尺寸和开窗做了要求,天井尺寸过小时,开向天井的窗洞口应采用固定或火灾时可自行关闭的甲级防火窗。《浙江省消防技术规范难点问题操作技术指南(2020 版)》2.3.17 对天井的尺寸和连廊等做了更详细的规定,但对天井内开窗耐火方面没有规定^[5]。2024 年 2 月 27 日,安徽省住房和城乡建设厅发布《关于加强高层住宅天井和住宅电动自行车停放场所消防设计审查验

收工作的通知》,规定高层住宅不得设计四周完全封闭的内天井。

由此可见,部分地区已经对开向天井内的窗做了耐火方面的要求,但要求设置防火窗的判断标准各不相同,其临界数值的参考性也有待考究。另外,架空层与天井连通时,由于架空层的复杂功能导致其危险性大大增加,而标准中有关防火窗的规定是否满足此种危险情况还有待探究。

在此之前,已有学者针对高层住宅天井的烟气蔓延展开了研究。李德成等^[6]采用数值计算的方法对使用小天井与外廊结构的高层住宅楼进行模拟,发现采取使用防火玻璃将小天井和外廊进行分隔的消防措施,不利于外廊烟气的排放和人员疏散;陈艳秋等^[7]提出了采用内天井底部与外界环境压差量化内天井烟囱效应强度的方法,通过数值模拟得出内天井底部与外界环境压差和烟囱效应之间的关系;张露等^[8]利用 FDS 数值模拟研究火源位置、火源功率和内天井的高度、长度对超高层住宅楼内天井自然排烟的影响;袁满等^[9]探究了非封闭式天井的形状对烟气蔓延特征以及外廊安全性的影响。但是总的来说,有关天井内开窗耐火温度方面的研究还比较少。

2 高层住宅建筑模型及参数设置

2.1 模型建立

本文通过梳理国内标准中有关天井和连廊的规定,结合南京市雨花台区明尚西苑 6 栋 2 单元楼层平面图进行建模。为更好地体现天井和连廊结构的烟气蔓延规律,减少建模复杂性,将楼层布置进行相应的简化。该模型共 15 层,层高 2.8 m,建筑总体高度 45 m。首层为架空层,四周均处于开敞状态。标准层每层 8 户,入户门皆与走廊直接相连。该建筑采用偏置式核心筒布局模式,核心筒内有 3 部电梯和一部剪刀楼梯,电梯和楼梯间开口均直通走廊。走廊整体采用外窗进行封闭,为满足中间住户采光需求设置 3 个采光井,尺寸为 3 m × 3 m,3 个采光井皆与一层架空层相通。火灾发生时,入户门、楼梯间门、开向天井内

的窗均处于关闭状态,架空层单元门处于敞开状态.简化后的标准层平面图和实际建模图如图 1 和图 2 所示.

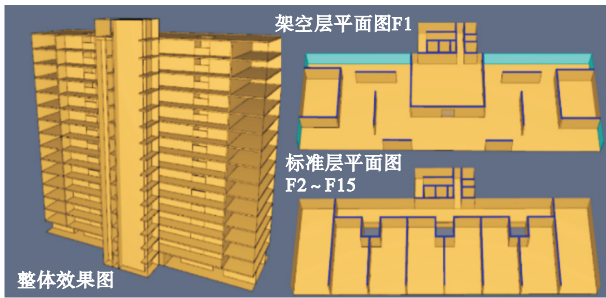


图 1 建模整体效果图、架空层效果图及标准层效果图

Fig.1 Modeling overall renderings, overhead renderings and standard floor renderings

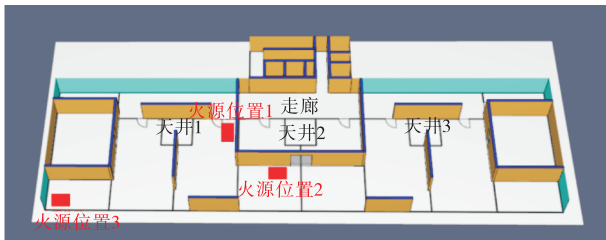


图 2 简化标准层平面图

Fig.2 Simplified standard floor plan

假设电动自行车起火原因为电气线路发生故障,此时的发烟材料初期为电气线路绝缘材料,后期为车身塑料件燃烧产物^[10].电动自行车车身和坐垫的材料基本来源于聚亚安酯(polyurethane),其燃烧过程会产生大量的 CO.因此设置火源燃烧反应为 POLYURE-THANE 反应.通过查阅资料及相关测验^[11-12],根据电动自行车实际尺寸设置单个火源大小(长×宽×高)1 m×0.2 m×0.6 m,单位表面积的热释放速率为 610 kW/m²,即单个火源热释放速率为 1 MW.为了更好地还原实际情况,参考表 1 的 t² 火灾模型增长模式,设置快速 t² 火进行模拟.设置初始环境温度 20 °C,环境压强 0.1 MPa.

表 1 t²火灾模型增长模式

Tab.1 t² fire model growth pattern

火灾增长模式	$\alpha/(kW \cdot m^{-2})$	t/s	可燃材料举例
慢速	0.002 931	600	整齐叠放的纸张
中速	0.011 27	300	棉与聚酯纤维床垫
快速	0.046 89	150	塑料泡沫、纸箱、堆积的木板、板条架
超快速	0.187 8	75	油池火、轻质窗帘、易燃家具

2.2 网格独立性验证

FDS 计算应该先使用较粗糙的网格,然后逐渐细化网格,直至两次模拟结果比较接近,则可以选择

相似度较高的两种网格尺寸之一作为网格尺寸^[13].网格尺寸的经验值为 $1/4D^* \sim 1/16D^*$,应用中可以取 $1/8D^* \sim 1/12D^*$.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

式中: D^* 为特征火焰直径; \dot{Q} 为火源的热释放速率; ρ_{∞} 为空气密度,取 1.2 kg/m³; c_p 为空气比热,取 1 kJ/(kg·K); T_{∞} 为环境空气温度,取 293 K; g 为重力加速度,取 9.81 m/s².

本文最大热释放速率为 15 MW,通过计算最佳网格尺寸在 0.153 ~ 0.355 m 之间,在此范围内选取 0.2 m、0.25 m、0.3 m、0.4 m 等 4 种网格尺寸进行比较.通过比较不同网格尺寸时各楼层稳定燃烧阶段的平均温度,发现网格尺寸 0.2 m 和 0.25 m 相似度较高.为了更好地还原实际情况,在算力允许的条件下选择网格精度 0.2 m 进行模拟计算,网格一致性检验情况如图 3 所示.

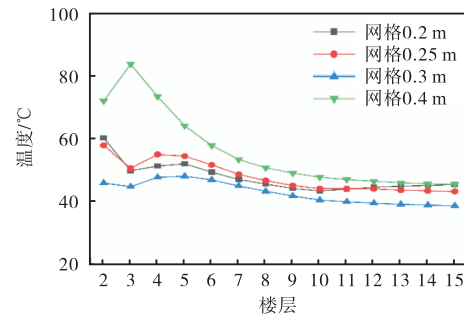


图 3 网格一致性检验

Fig.3 Mesh consistency check

2.3 工况设置

为了研究火源位置和火源功率对高层住宅楼内天井烟气蔓延和天井内开窗耐火温度的影响,共设置了 9 组模拟工况,如表 2 所示.在架空层选取两个电动自行车密集区域(候梯厅西侧和靠近单元门)和对烟气蔓延最不利区域(架空层一角),分别聚集摆放 5 辆(5 MW)、10 辆(10 MW)、15 辆(15 MW)电动自行车,模拟时间 1 200 s.

表 2 模拟工况

Tab.2 Simulation working condition table

工况	火源位置	火源功率/MW
1-1	候梯厅西侧	5
1-2		10
1-3		15
2-1	靠近单元门	5
2-2		10
2-3		15
3-1	架空层一角	5
3-2		10
3-3		15

2.4 危险判据

住宅外窗常用普通玻璃、安全玻璃(符合现行国家标准的钢化玻璃、夹层玻璃及由钢化玻璃或夹层玻璃组合加工而成的其他玻璃制品,如安全中空玻璃等)等. 发改运行[2003]2116号《建筑安全玻璃管理规定》第六条中规定,7层及7层以上建筑物外开窗必须使用安全玻璃,以保证行人的安全,高于6层的建筑物6层及以下楼层不受此限制. 普通玻璃炸裂的急剧温差在70~120℃,钢化玻璃可以达到200℃左右. 因此,本文假定1~6层的玻璃对烟气防护作用失效的临界温度为70℃,7层及以上楼层的玻璃对烟气防护作用失效的临界温度为200℃. 一旦超过这个温度,烟气就可能从窗蔓延到室内,对高层住宅内居民的人身财产安全造成威胁. 本文将烟气温度60℃、能见度10m、CO体积分数 500×10^{-6} 、CO₂体积分数0.01作为判断是否对人员产生危险的标准.

3 模拟结果与讨论

下面将分别探究火源位置和火源功率变化对烟气整体蔓延趋势以及天井内蔓延特征和烟囱效应强弱的影响.

3.1 天井内烟气蔓延特征

3.1.1 火源位置对天井内烟气蔓延规律的影响

火源位置的变化可能会影响烟气在高层住宅天

井内的蔓延路径,不同天井内烟囱效应对烟气蔓延驱动作用也可能会因火源位置的改变而有所差异. 图4展示了火源功率为5MW,火源位置分别位于单元门附近、候梯厅西侧和架空层一角时,不同时刻3个天井内的烟气蔓延情况.

当火灾发生在单元门附近时,烟气在几乎蔓延至整个架空层后,在40s左右以窗口溢流的形式率先进入井1和井3. 由于候梯厅墙壁对烟气起到一定的阻挡作用,80s后烟气才逐渐蔓延至井2. 但由于着火点距离井2较近,且候梯厅具有一定的蓄烟能力,加上架空层四周通风良好,一段时间后,井2内的烟气浓度明显高于其他两井.

当火灾发生在候梯厅西侧时,由于火源位置距离井1较近,烟气在28s左右率先进入井1,随后逐渐蔓延至整个架空层. 由图4可以看出,随着时间的变化,井2和井3内虽有烟气进入,但由于候梯厅对烟气的阻挡作用,烟气难以进入井2. 而井3距离火源较远,且与火源之间有候梯厅墙壁阻隔,烟气很快通过架空层四周开口溢出,因此两井内的烟气浓度一直处于较低水平.

当火源位于架空层一角时,由于架空层开放边界具有良好的通风性,烟气不易蔓延至天井内. 但随着时间积累,由于井1距离火源较近,烟气会蔓延进入井1. 在观察全阶段烟气蔓延过程后发现,井1内的烟气浓度一直处于较低水平.

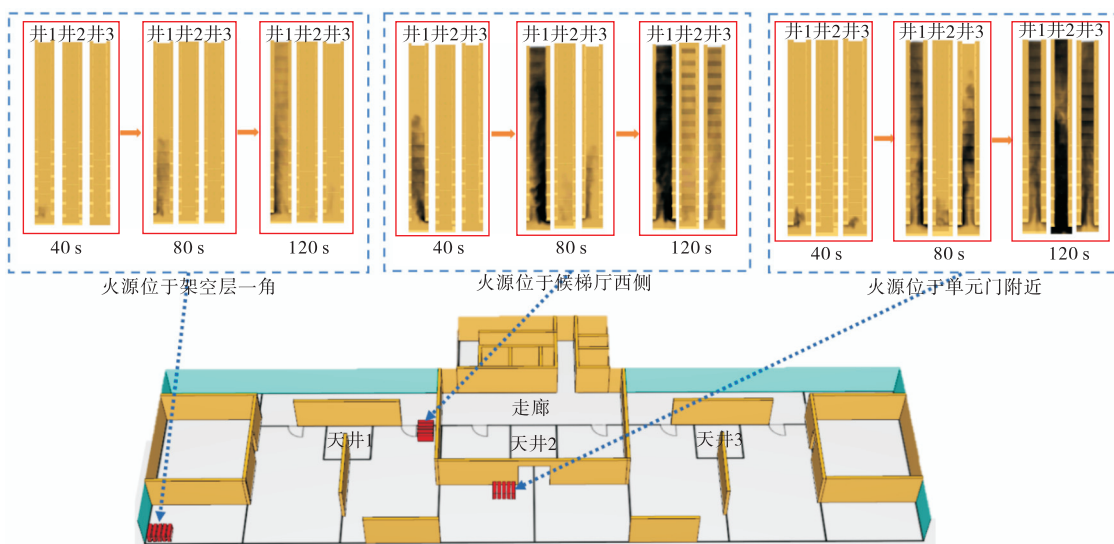


图 4 不同火源位置下天井内烟气蔓延情况

Fig.4 Smoke spread in the patio at different fire source locations

天井底部和顶部的压差可以定量反映天井内烟囱效应情况^[14]. 图5为火源功率为5MW,火源位置分别位于单元门附近、候梯厅西侧和架空层一角时,

天井中心轴线上上下压差随时间的变化曲线. 通过对数据进行分析可知,天井上下压差整体上随时间增加先快速增大,约150s后逐渐在不超过5Pa的稳定范

围内波动。这说明在火灾初期, 烟囱效应先逐渐增大, 烟气进入天井后向顶部蔓延的速度在短时间内快速上升。当燃烧到达稳定状态, 天井上下压差达到平衡, 烟囱效应基本保持在固定水平, 烟气蔓延速度也将保持稳定, 烟气浓度在小范围内波动, 烟气蔓延状态趋于平稳。

另外, 通过对比图 5 中 3 幅图的数据可知, 当火源靠近单元门时, 3 个井内压差及其变化趋势最大, 说明此时烟囱效应对烟气上升的影响最大, 候梯厅西侧次之。这是由于靠近单元门位置相对处于中心位

置, 这时候梯厅墙壁对烟气的阻挡作用最差, 烟气最容易蔓延至 3 个井内。火源位于架空层一角时, 3 个井内压差变化都不大, 说明烟囱效应在这种情况下基本不起作用。这是因为在这种情况下, 由于良好的通风条件, 烟气很快与室外空气掺混, 难以蔓延至天井内。由于该建筑结构具有对称性, 可以初步判断, 火源位置的危险性由高到低依次为靠近单元门、候梯厅两侧、架空层一角。因此如若必须在架空层停放电动自行车, 应尽可能靠外侧停放, 避免靠近单元门口停放。

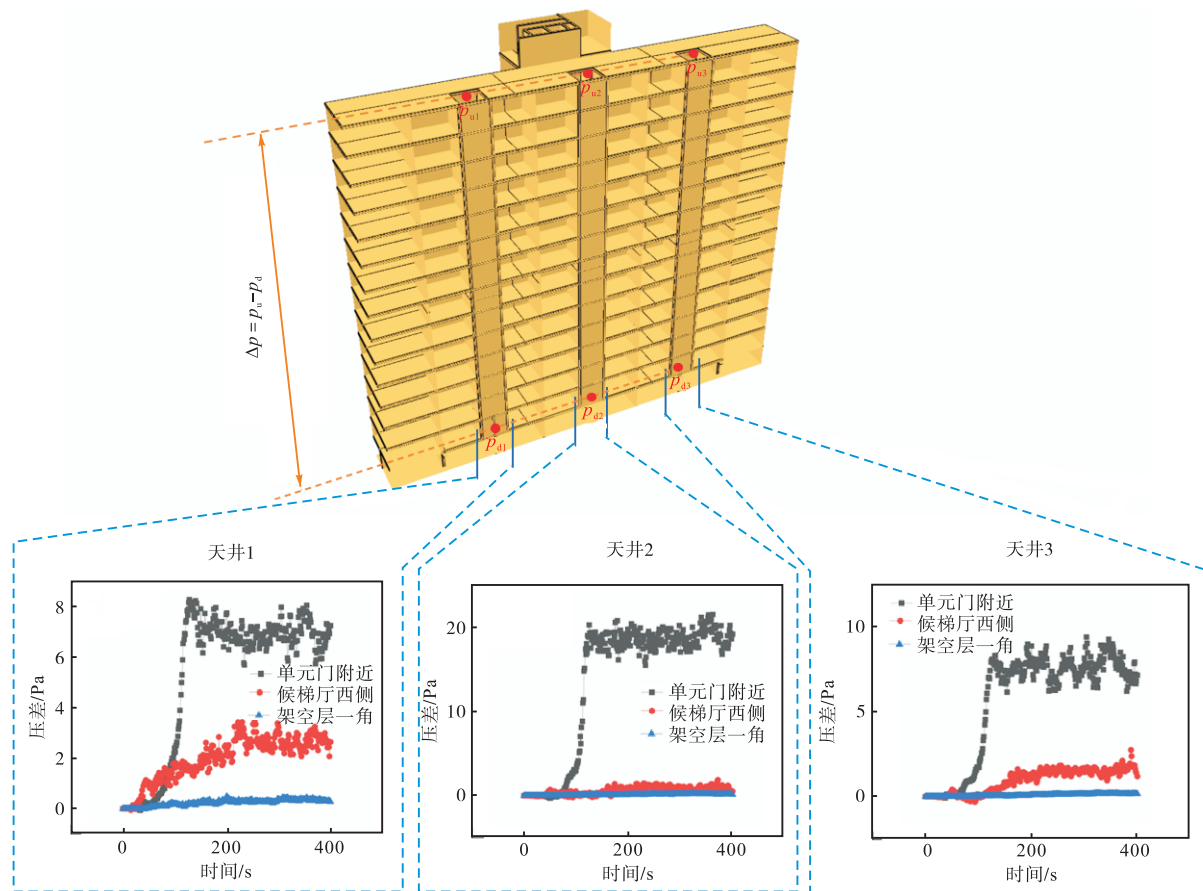


图 5 不同火源位置下天井上下压差随时间变化曲线

Fig.5 The pressure difference curve between the upper and lower parts of the patio over time under different positions of the fire source

3.1.2 火源功率对天井内烟气蔓延规律的影响

架空层内停放电动自行车数量不同时, 不同天井内烟囱效应对烟气驱动作用大小也可能有所差异^[15-16]。图 6 展示了火源位于单元门附近, 火源功率分别为 5 MW、10 MW、15 MW 时, 不同时刻 3 个天井内的烟气蔓延情况。

可以看出, 在不同火源功率情况下, 烟气整体蔓延趋势及路径基本一致, 烟气在几乎蔓延至整个架空层后, 以窗口溢流的形式率先进入井 1 和井 3。火源功率为 5 MW、10 MW、15 MW 时烟气分别在 80 s、

72 s、67 s 左右蔓延至井 2, 随后充满 3 个天井, 且在 120 s 之后的时间内, 井 2 中的烟气浓度明显高于其他两井。有所不同的是, 随着火源功率的增大, 烟气进入各个井内的速度有明显提升。通过观察烟气蔓延图像可知, 在 120 s 时, 3 个井内的烟气浓度随火源功率的增大明显增大。

图 7 为火源位于单元门附近, 火源功率分别为 5 MW、10 MW、15 MW 时, 天井中心轴线上上下压差随时间的变化曲线。通过对数据进行分析可知, 天井上下压差整体上随时间增加先快速增大, 约 150 s 后

逐渐在不超过 5 Pa 的稳定范围内波动. 这说明在火灾初期, 烟囱效应先逐渐增大, 烟气进入天井后向顶部蔓延的速度在短时间内快速上升. 当燃烧到达稳

定状态时, 天井上下压差达到平衡, 烟囱效应基本保持在固定水平, 烟气蔓延速度也将保持稳定, 烟气浓度在小范围内波动, 烟气蔓延状态趋于平稳.

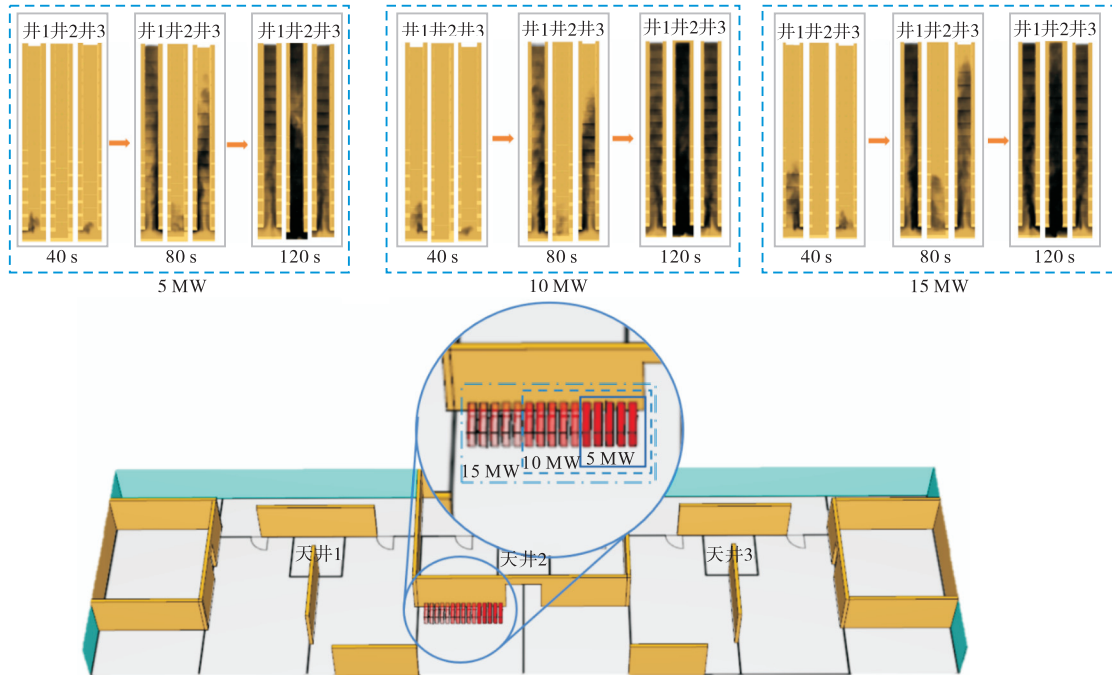


图 6 同一位置不同火源功率下天井内烟气蔓延情况

Fig.6 Smoke spread in the patio under different fire source powers at the same location

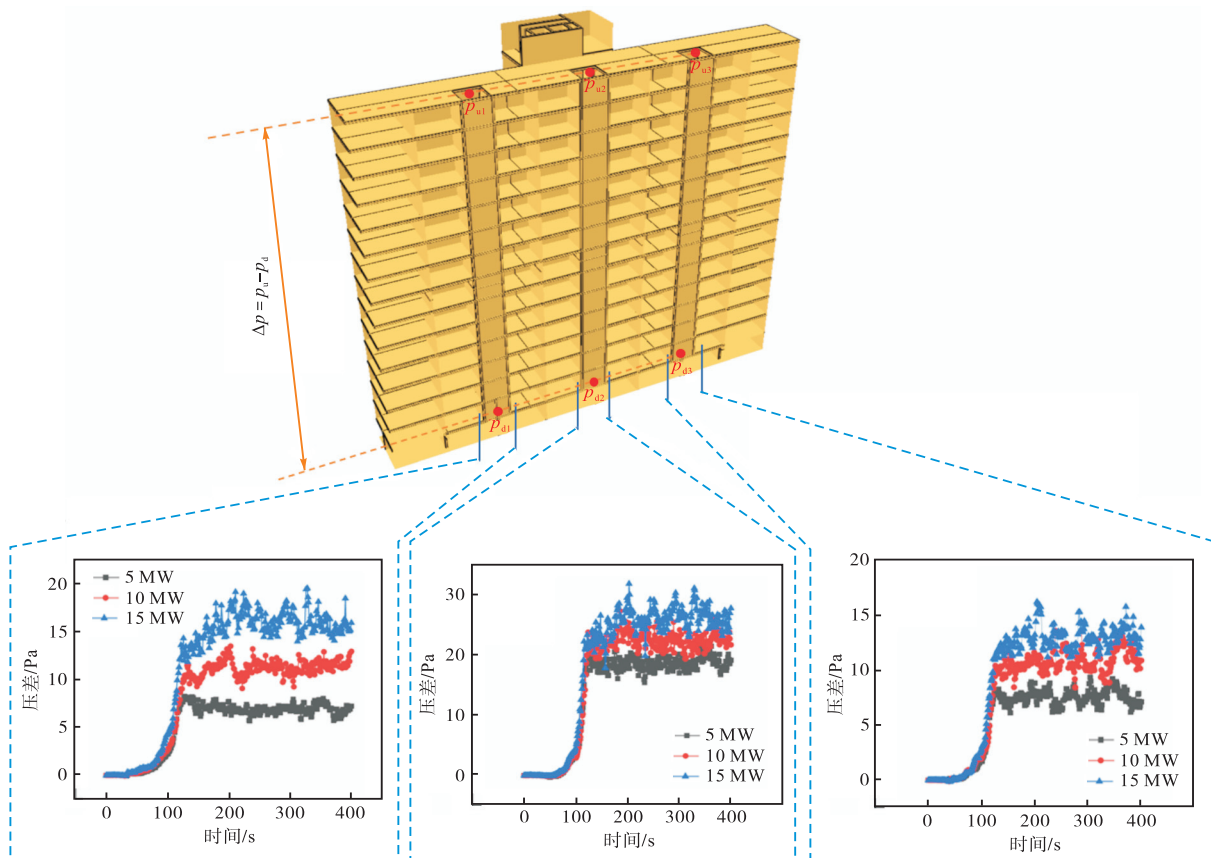


图 7 不同火源功率下天井上下压差随时间变化曲线

Fig.7 The pressure difference curve between the upper and lower sections of the patio changes over time for varying fire source powers

从位置上看,不同火源功率下井 2 内的压差要略高于其他两井,说明井 2 内烟囱效应的作用最明显,这是由于火源位置此时距离井 2 较近,烟气较容易突破候梯厅墙壁阻碍进入候梯厅,进而通过窗口溢流形式进入井 2。

从火源大小上看,3 个井内的上下压差都随火源功率增大而变大,说明烟囱效应对火灾烟气蔓延的作用随火源功率增加而增大,烟气上升速率随火源功率增大而加快。因此为了保证住宅住户的安全,应尽量少地在架空层停放电动自行车。

综上所述,烟气在几乎蔓延至整个架空层后最终通过窗口溢流的形式蔓延至所有天井内。火源位置不同,蔓延进入天井的速度有所差异。当火源靠近单元门时,3 个井内都会产生烟囱效应,烟气对 3 个天井的威胁程度都较大;当火源位于候梯厅一侧时,3 个井内的烟囱效应相比于火源靠近单元门时有所减弱,烟气对靠近候梯厅一侧的天井威胁程度较大;火源位于架空层一角时,3 个井内几乎没有烟囱效应产生,烟气对 3 个天井几乎没有影响。随着火源功率的增大,3 个井内的烟囱效应逐渐增强,烟气对 3 个井的威胁逐渐变大。

3.2 天井内窗口下沿特性参数变化

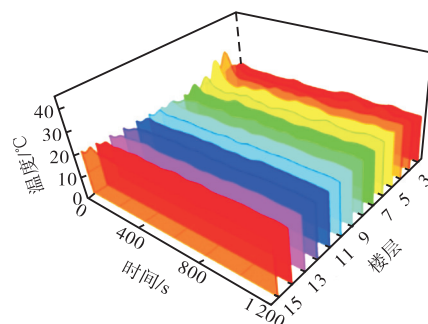
烟气具有高温、毒害等特性^[17],研究天井内窗口下沿温度随时间的变化规律可以帮助确定不同楼层开向天井内窗的临界耐火温度^[18-19]。火灾烟气中含有 CO、CO₂、SO₂ 等多种有害气体,特别是 CO 中毒,往往是导致火灾事故中人员伤亡的一个重要因素。因此天井内窗口下沿 CO 浓度是判断烟气对人是否产生不利影响的一个重要判据。此类研究目前相对较少,下面将探究火源位置和火源功率变化对天井内窗口下沿温度和 CO 浓度的影响。

3.2.1 火源位置对天井内窗口下沿特性参数的影响

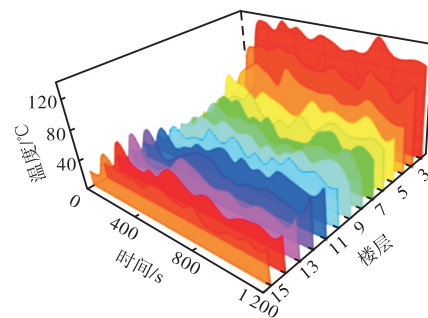
前文已经探究了火源位置变化对烟气蔓延特性的影响,并得出当火源位于单元门附近时,烟囱效应对烟气上升驱动作用最强,3 个井内危险性最大的结论。同时通过观察可知,当火源位于候梯厅西侧时,井 1 中烟气流动速度和烟气浓度也较大,而在其他情况下无论是烟粒子浓度还是烟囱效应的作用都不大。图 8 绘制了火源位于单元门附近时天井内不同高度处的温度变化,可以基本看出不同高度处温度随时间的变化趋势。各楼层温度基本在 200 s 内随时间快速升高,后趋于平稳。楼层越低,火灾初期温度变化越大,趋势越明显。

在清楚温度随时间的基本走向后,选取本文设定的最大火源功率 15 MW,绘制火源处于不同位置时 3

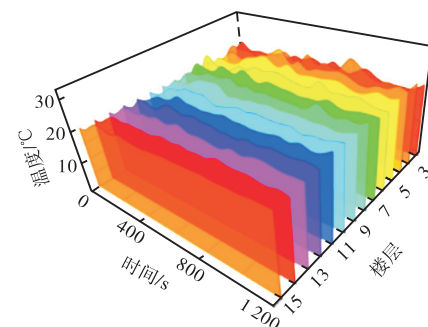
个井内中心轴线不同高度处在 50 s、100 s、150 s、200 s、300 s、400 s 时的温度曲线,如图 9 所示。



(a) 天井 1



(b) 天井 2

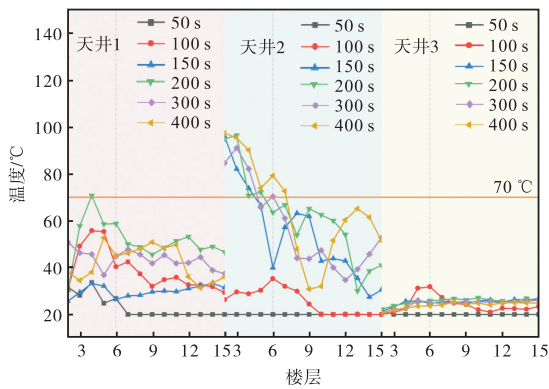


(c) 天井 3

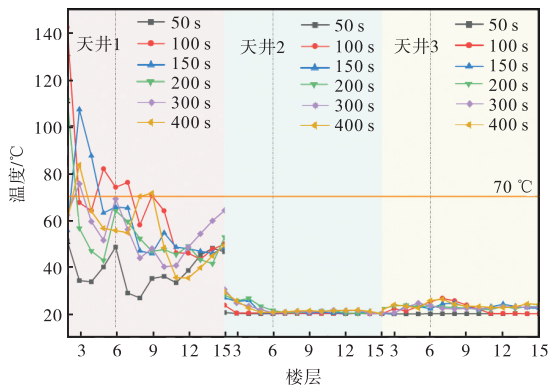
图 8 火源位于单元门附近时天井内不同高度处温度变化
Fig.8 Temperature changes at different heights in the patio when the fire source is near the unit door

根据 2.4 节确定的危险判据,1~6 层的玻璃对烟气防护作用失效的临界温度为 70 °C,7 层及以上楼层的玻璃对烟气防护作用失效的临界温度为 200 °C。由图 9 可知,火源功率为 15 MW 时,无论火源位于何处,7 层及以上楼层都未超过 200 °C,而 7 层以下楼层的情况并不乐观。当火源位于单元门附近时,天井 1 内 4 层高度处虽在 200 s 时的温度略微超过了 70 °C,但整体未有突破临界温度的趋势。但天井 2 在 150 s 时,5 层以下高度处的温度就已超过 70 °C,400 s 时 7 层以下高度处的温度都超过了 70 °C。火源位于候梯厅西侧时,早在 100 s 时天井 1 内 2 层的温度就远超 70 °C,5 层和 6 层也在 70 °C 以上。因此,想

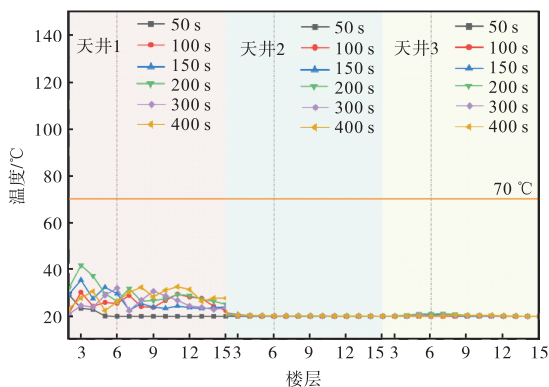
要探究天井内开窗的临界耐火温度,应重点研究火源位于单元门附近时井2和火源位于候梯厅西侧时井1内6层及以下楼层的温度分布情况。



(a) 单元门附近



(b) 候梯厅西侧



(c) 架空层一角

图9 不同火源位置下天井内不同高度处温度变化

Fig.9 Temperature changes at different heights in the patio under different fire source locations

3.2.2 火源功率对天井内窗口下沿特性参数影响

本节主要研究火源位于单元门附近时井2和火源位于候梯厅西侧时井1内6层及以下楼层天井内正向和侧向开窗的温度和CO浓度分布情况,旨在探究6层及以下楼层在正向和侧向开窗时是否会到达

普通玻璃破裂的临界温度,并探究破裂时的CO浓度是否会对室内人员的生命安全产生威胁。天井内正向和侧向开窗示意如图10所示。

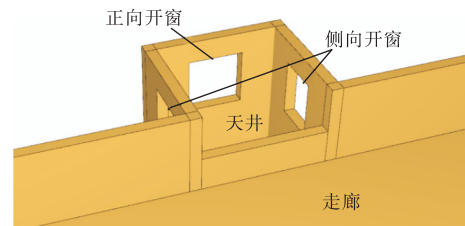
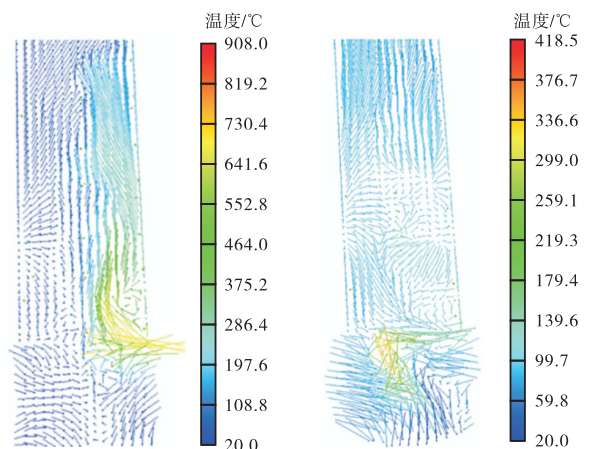


图10 天井内正向和侧向开窗示意

Fig.10 Diagram of front and side windows in the patio

图11(a)和(b)分别为火源位于候梯厅西侧时井1和火源位于单元门附近时井2在某一特征时刻天井中心剖面温度矢量分布。由图可知,火源位于单元门附近时,井2内2~6层的温度和烟气流动基本呈对称形态,东西两侧差异不大;火源位于候梯厅西侧时,井1内2~6层东侧的温度和烟气流动明显强于西侧,因此在探究各楼层的温度和CO浓度变化规律时,使用天井北侧窗和东侧窗的测点数据分别分析正向窗和侧向窗的参数变化。



(a) 候梯厅西侧

(b) 单元门附近

图11 特征时刻天井中心剖面温度矢量分布

Fig.11 Temperature vector distribution diagram of the central section of the patio at characteristic moments

火灾发生时,烟气会卷吸周围空气形成烟羽流。Marshall^[20]通过研究发现烟气在竖井内向上运动时会在靠近壁面一侧形成壁面羽流,在远离壁面的一侧形成烟气次旋流。Mercier等^[21]进一步研究发现烟气随着流速的变化会产生不同的流动现象。火源位于候梯厅西侧时,天井1内的烟气流动与几位学者所观察到的现象类似。另外,火源功率本身并不稳定。因此,由于火源功率的波动和烟羽流的流动特

征,可能导致同一点在相邻时刻的温度和 CO 浓度变化幅度较大。

图 12~14 为不同火源功率下火源位于单元门附近时,天井 2 内不同高度处正向和侧向温度、CO 体积分数变化曲线。由图可知,3 种火源功率下,2~6 层在天井内正向和侧向开窗,窗户都有破裂的可

能。火源功率为 5 MW 时,除 6 层外,其他楼层侧向开窗都会在不同时刻到达 70 °C,其他两种火源功率下,所有楼层都将受到威胁。从图可以推断,正向开窗的安全性明显高于侧向开窗。3 种火源功率下,正向开窗时都只有 2 层和 3 层会受到威胁。

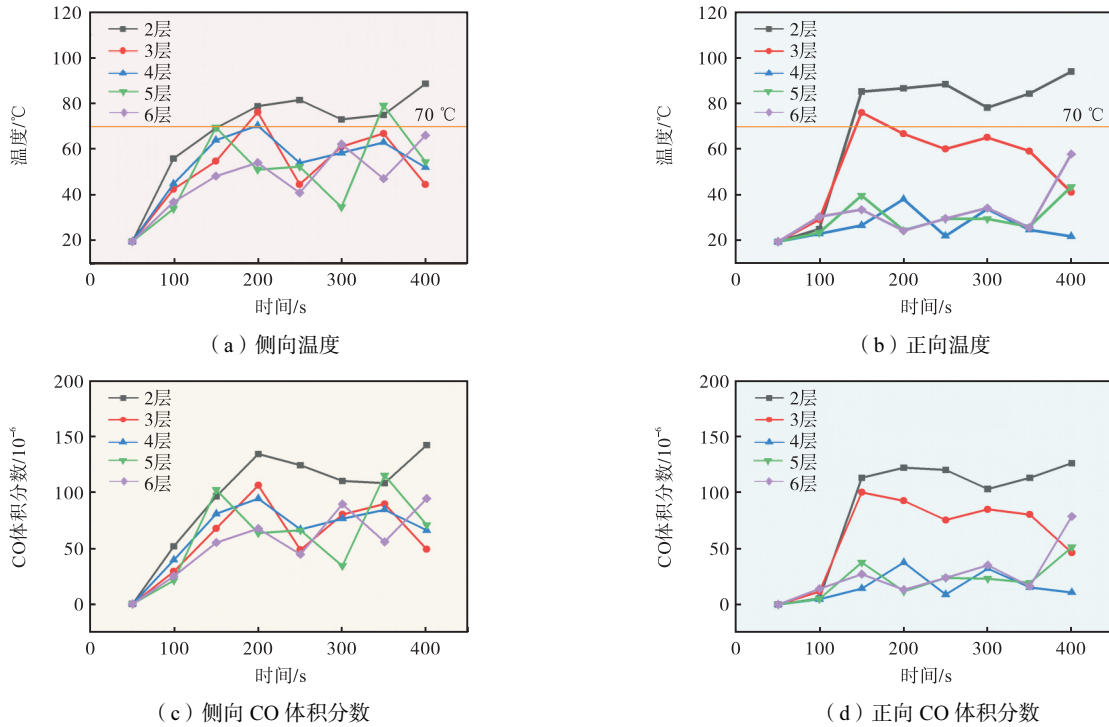


图 12 5 MW 时火源位于单元门附近时天井 2 内不同高度处温度、CO 体积分数变化

Fig.12 Changes in temperature and CO concentration at different heights in patio 2 when the fire source is near the unit door

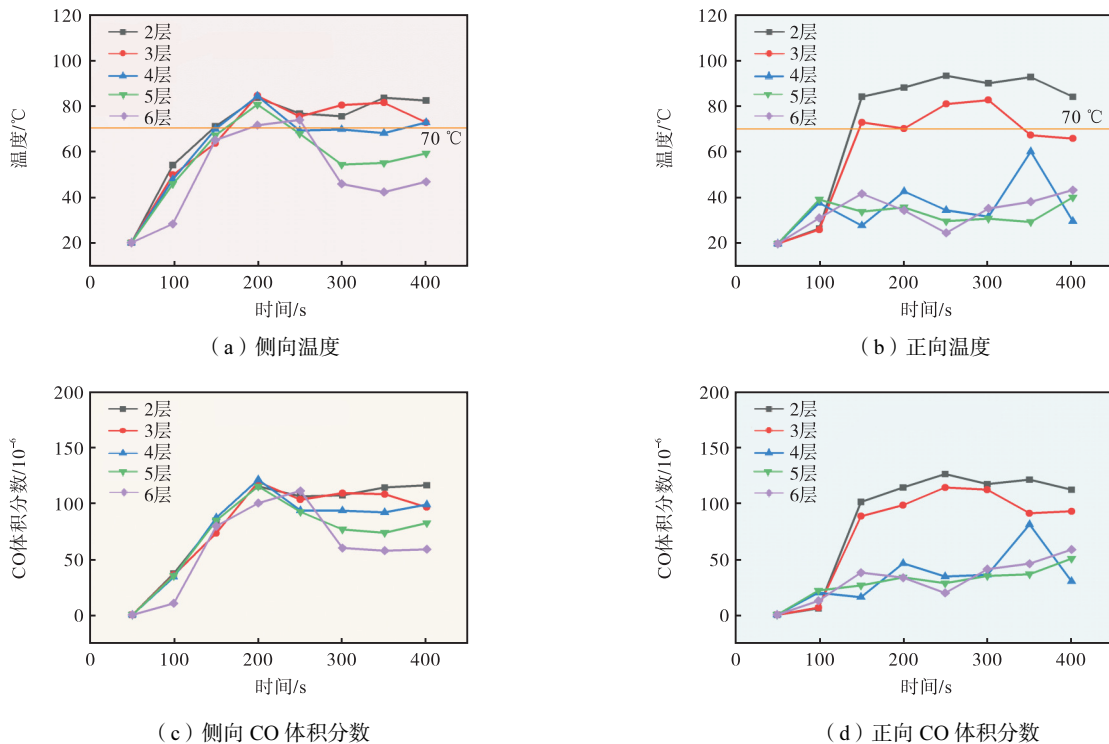


图 13 10 MW 时火源位于单元门附近时天井 2 内不同高度处温度、CO 体积分数变化

Fig.13 Changes in temperature and CO concentration at different heights in patio 2 when the fire source is near the unit door

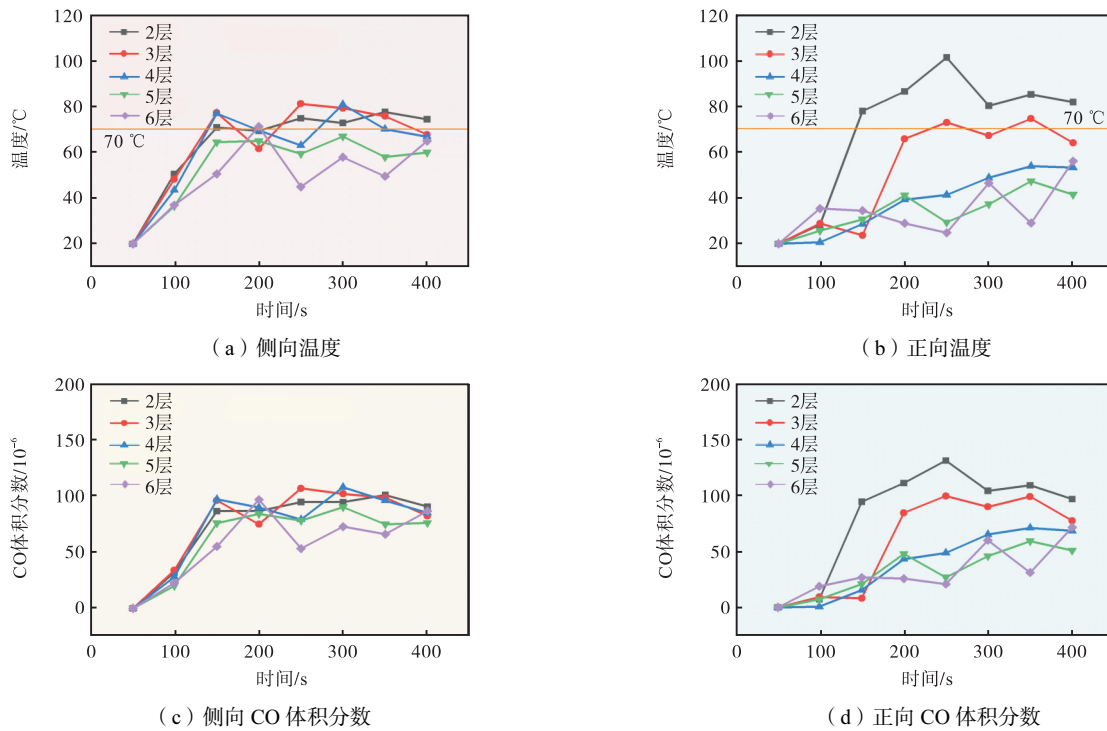


图 14 15 MW 时火源位于单元门附近时天井 2 内不同高度处温度、CO 体积分数变化

Fig.14 Changes in temperature and CO concentration at different heights in patio 2 when the fire source is near the unit door

从 CO 体积分数上看,当窗户失效时,CO 的体积分数都未达到威胁人生命安全的 500×10^{-6} . 但无论 CO 体积分数是否达到 500×10^{-6} ,窗户失去对烟气的阻挡作用时的温度都已经超过了 60°C ,即已对人的生命造成威胁的温度. 因此当电动车停放在单

元门附近,电动自行车数量小于 15 辆时,2~6 层在天井内侧向开窗不能使用普通玻璃,2~3 层正向开窗不能使用普通玻璃,选用耐火温度大于 120°C 的玻璃比较安全.

图 15~17 为不同火源功率下,火源位于候梯厅

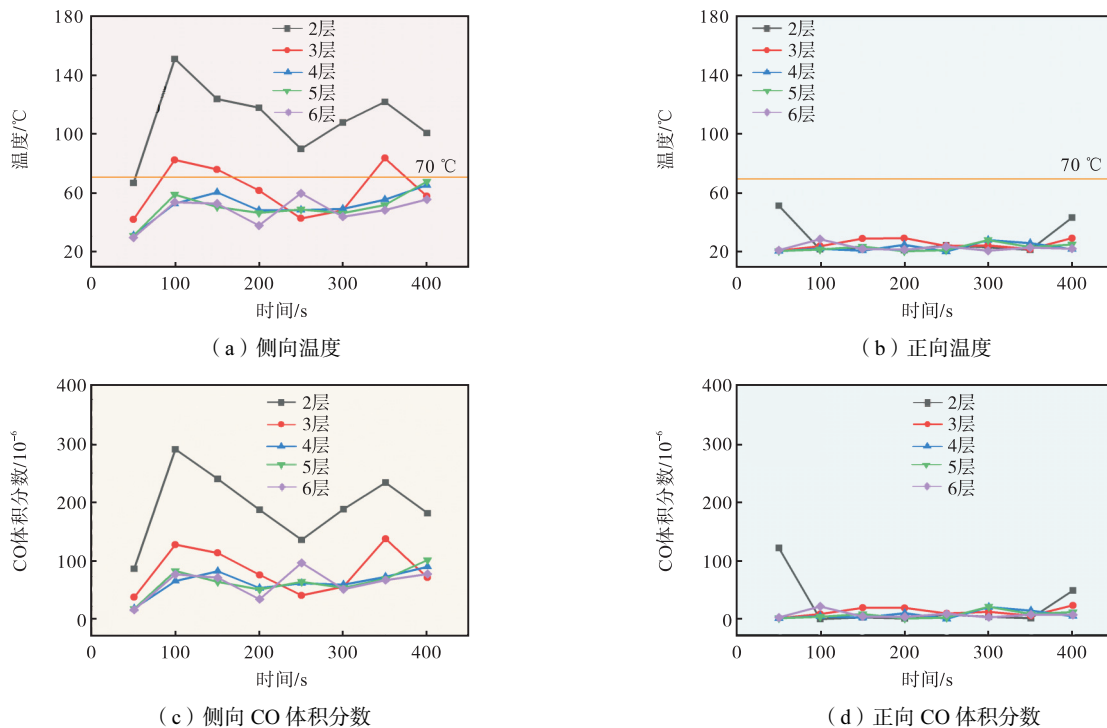


图 15 5 MW 时火源位于候梯厅西侧时天井 1 内不同高度处温度、CO 浓度变化

Fig.15 Changes in temperature and CO concentration at different heights in patio 1 when the fire source is located on the west side of the elevator lobby

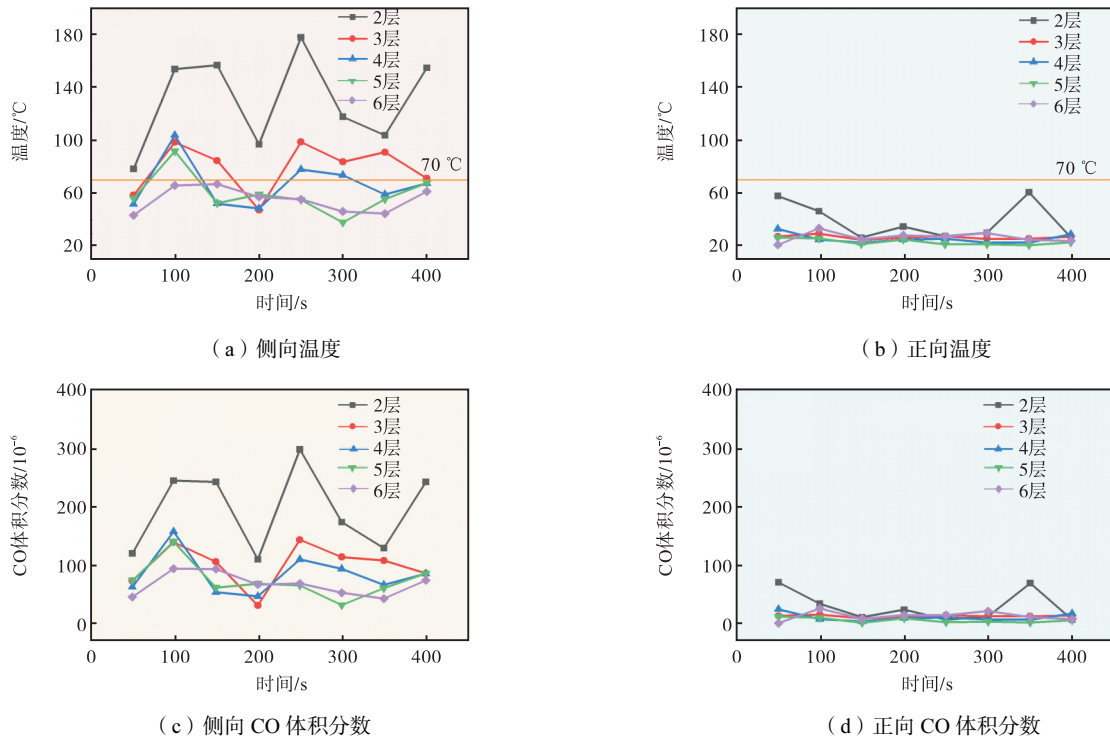


图 16 10 MW 时火源位于候梯厅西侧时天井 1 内不同高度处温度、CO 浓度变化

Fig.16 Changes in temperature and CO concentration at different heights in patio 1 when the fire source is located on the west side of the elevator lobby

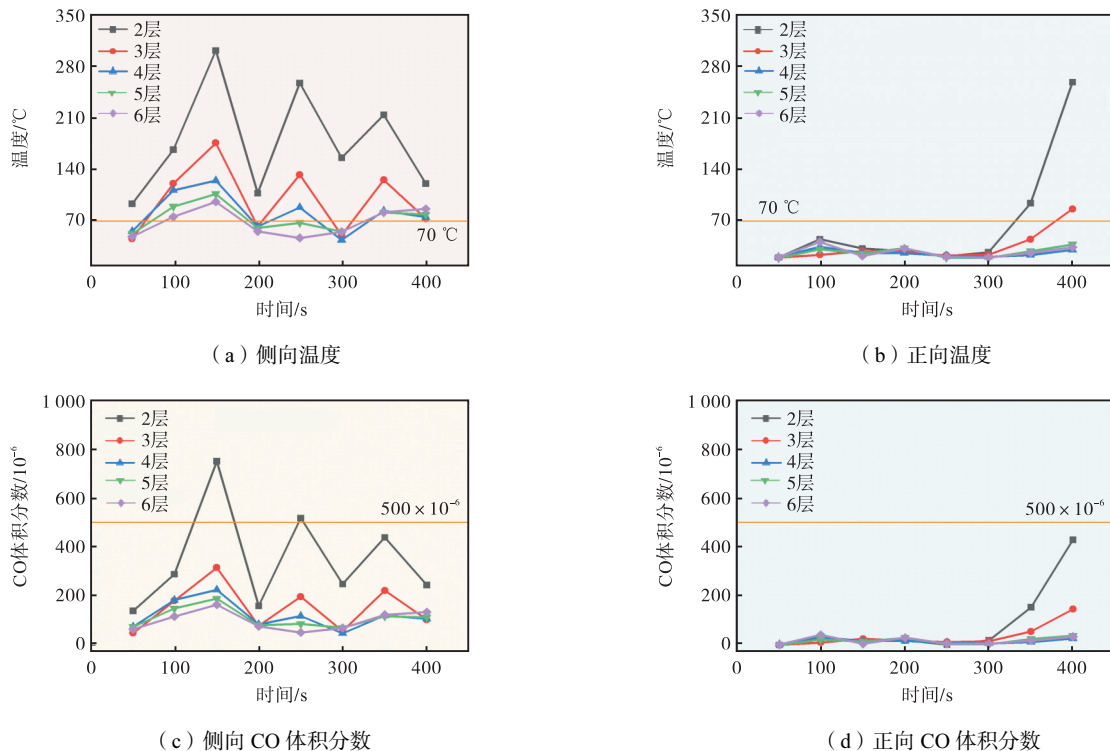


图 17 15 MW 时火源位于候梯厅西侧时天井 1 内不同高度处温度、CO 浓度变化

Fig.17 Changes in temperature and CO concentration at different heights in patio 1 when the fire source is located on the west side of the elevator lobby

西侧时,天井 1 内不同高度处正向和侧向温度、CO 体积分数变化曲线.从 3 幅图可以看出,火源功率为 5 MW 和 10 MW 时,正向开窗选用普通玻璃问题不

大.但侧向开窗时,火源功率为 5 MW 时 2 层和 3 层的温度将超过 70 °C,其他楼层也有要超过临界温度的趋势;火源功率为 10 MW 时,6 层及以下楼层几乎

全部受到破坏,不适宜使用普通玻璃,采用耐火温度大于 200 °C 的玻璃比较安全. 火源功率为 15 MW 时,2 层和 3 层的正向开窗和 2~6 层的侧向开窗都将破裂,且 2 层侧向开窗处的 CO 体积分数远超 500×10^{-6} ,对人员生命财产安全造成极大威胁,此时侧向开窗最低耐火温度不宜低于 320 °C,2 层和 3 层正向开窗最大耐火温度不宜小于 280 °C.

如果在候梯厅一侧停放的电动自行车数目不超过 10 辆,靠近候梯厅一侧天井内侧向开窗宜使用耐

火温度大于 200 °C 的玻璃;超过 10 辆但不超过 15 辆时,该天井正向开窗时 2 层和 3 层玻璃的最低耐火温度不低于 280 °C,侧向开窗时玻璃的最低耐火温度不低于 320 °C.

综上所述,天井内开窗临界耐火温度要求汇总如表 3 所示. 在其余位置开窗时,在符合发改运行[2003]2116 号《建筑安全玻璃管理规定》的前提下,暂不存在天井内开窗的耐火温度不满足实际需求的情况.

表 3 天井内开窗耐火温度要求

Tab.3 Fire resistance requirements for windows in patios

电动车停放位置	单元门附近	候梯厅一侧	
天井位置	候梯厅内	靠近候梯厅一侧	
电动车数目	≤15 辆	≤10 辆	11~15 辆
侧向开窗	2~6 层耐火温度 ≥120 °C	2~6 层耐火温度 ≥200 °C	2~6 层耐火温度 ≥320 °C
正向开窗	2~3 层耐火温度 ≥120 °C	不限	2~3 层耐火温度 ≥280 °C

4 结论与展望

本文通过数值模拟,研究了架空层用作电动自行车停车棚的高层住宅建筑在不同火源位置和火源功率下的烟气蔓延特性,探究了天井内不同位置开窗的耐火温度,得出的主要结论如下:

(1)火源位置不同,烟气蔓延进入天井的速度有所差异. 当火源靠近单元门时,3 个井内都会产生烟囱效应且烟囱效应较强;当火源位于候梯厅一侧时,3 个井内的烟囱效应有所减弱;火源位于架空层一角时,烟气对 3 个天井几乎没有影响.

(2)侧向开窗危险性大于正向开窗. 在单元门附近停放 5 辆及以上电动自行车时,井 2 内 6 层及以下楼层侧向开窗都将破碎,正向开窗仅 2、3 层破碎. 在候梯厅一侧停放 10 辆及以上电动自行车,靠近该火源的天井内 6 层及以下楼层侧向开窗都将破碎,正向开窗仅 2、3 层在停放 15 辆及以上电动自行车时破碎.

(3)在候梯厅一侧停放 15 辆及以上电动自行车时,靠近该火源的天井内 2 层侧向开窗处 CO 浓度会超过对人体产生威胁的临界 CO 浓度,其余情况下各楼层 CO 浓度处于安全水平.

本文仅探究了天井内无可燃物时的情况,如果天井内如窗台处摆放有其他可燃物质,所得出的烟气蔓延特性可能会有所差异,最终得出窗的临界耐火温度可能会更高. 另外,本文仅研究了单一火源位置和 3 种火源功率下的情况,在实际情况中,火源可能会分布在多个位置,且可燃物质并不一定单一,所得结果

可能会产生叠加效应. 后续还可针对天井内存在可燃物、多火源位置和多种可燃物的情况进行研究. 以及可以对设置挡烟垂壁、挡烟垂帘等隔烟措施的作用效果做进一步研究.

参考文献:

- [1] Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Annual Review of Tall Buildings[EB/OL]. <https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404598764802277453&sudaref=www.baidu.com>, 2021-01-29.
- [2] 中国建筑设计研究院. GB50096—2011 住宅设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
China Architectural Design and Research Institute. GB50096—2011 House Design Code [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011 (in Chinese).
- [3] 南京长江都市建筑设计股份有限公司, 东南大学建筑设计研究院有限公司. DB32/3920—2020 住宅设计标准[S]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2021.
Nanjing Changjiang City Architectural Design Co., LTD, Southeast University Architectural Design and Research Institute Co., LTD. DB32/3920—2020 House Design Standard[S]. Nanjing: Jiangsu Phoenix Science and Technology Press, 2021 (in Chinese).
- [4] 海南省消防救援总队. 海南省消防技术规范难点问题操作技术指南[Z]. 海口: 海南省公安消防总队, 2018.

- Hainan Provincial Fire and Rescue Corps. Hainan Province Fire Technical Code Difficult Problems Operation Technical Guide[Z]. Haikou: Hainan Provincial Public Security Fire Brigade, 2018 (in Chinese).
- [5] 浙江大学建筑设计研究院有限公司. 浙江省消防技术规范难点问题操作技术指南(2020版)[Z]. 杭州: 浙江省消防救援总队, 2020.
- Zhejiang University Architectural Design and Research Institute Co., LTD. Technical Guide for Operation of Difficult Problems in Zhejiang Fire Technical Code(2020 edition)[Z]. Hangzhou: Zhejiang Provincial Fire Rescue Corps, 2020 (in Chinese).
- [6] 李德成, 周天念, 陈钦佩, 等. 高层住宅楼小天井与外廊结构的消防安全问题研究[J]. 火灾科学, 2015, 24(4): 209-220.
- Li Decheng, Zhou Tiannian, Chen Qinpei, et al. Investigation on fire safety of high-rise residential building with small patio and verandah[J]. *Fire Safety Science*, 2015, 24(4): 209-220 (in Chinese).
- [7] 陈艳秋, 袁满, 陈龙飞. 高层住宅内天井烟囱效应的量化及影响因素研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(5): 636-640.
- Chen Yanqiu, Yuan Man, Chen Longfei. The quantification and influencing factor study of stack effect in courtyards in high-rise residential buildings[J]. *Fire Science and Technology*, 2019, 38(5): 636-640 (in Chinese).
- [8] 张露, 姚斌. 超高层住宅楼的内天井尺寸对自然排烟影响的数值模拟研究[J]. 火灾科学, 2018, 27(4): 230-235.
- Zhang Lu, Yao Bin. Numerical simulation study on the impact of patio dimension upon natural smoke exhaust in super high-rise residential buildings[J]. *Fire Safety Science*, 2018, 27(4): 230-235 (in Chinese).
- [9] 袁满, 韩峥, 陈艳秋, 等. 非封闭式天井形状对烟气蔓延影响的模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2021, 27(1): 29-34.
- Yuan Man, Han Zheng, Chen Yanqiu, et al. Impact of shaft shape on smoke movement in unsealed shafts[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2021, 27(1): 29-34 (in Chinese).
- [10] 饶球飞, 甘卫锋. 电动自行车起火风险分析和起火特征研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(11): 1597-1602.
- Rao Qiufei, Gan Weifeng. Fire risk analysis and fire characteristics study of electric bicycle[J]. *Fire Science and Technology*, 2023, 42(11): 1597-1602 (in Chinese).
- [11] 赵运涛, 张心玉. 楼梯间电动自行车火灾逃生时间的研究[J]. 消防技术与产品信息, 2017(12): 30-33.
- Zhao Yuntao, Zhang Xinyu. Study on fire escape time of electric bicycle in stairwell[J]. *Fire Technology and Product Information*, 2017(12): 30-33 (in Chinese).
- [12] 李泽弘, 华菲. 基于数值模拟的电动自行车火灾亡人原因分析[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(1): 135-140.
- Li Zehong, Hua Fei. Analysis on death cause of an electric bicycle fire based on numerical simulation[J]. *Fire Science and Technology*, 2021, 40(1): 135-140 (in Chinese).
- [13] 李胜利, 李孝斌. FDS火灾数值模拟[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- Li Shengli, Li Xiaobin. *FDS Fire Numerical Simulation*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019 (in Chinese).
- [14] Jo J H, Lim J H, Song S Y, et al. Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(1): 263-277.
- [15] 李逸舟, 王自龙, 黄鑫炎. 建筑外立面火灾测试的腔室火与溢流火特性研究[J]. 燃烧科学与技术, 2023, 29(2): 127-134.
- Li Yizhou, Wang Zilong, Huang Xinyan. Characteristics of compartment fire and spilled flame in facade fire standard tests[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(2): 127-134 (in Chinese).
- [16] 白天阳, 郭根苗, 管伟, 等. 喷嘴几何结构对涡线空化特性影响的数值模拟研究[J]. 燃烧科学与技术,

- 2024, 30(3): 295-301.
- Bai Tianyang, Guo Genmiao, Guan Wei, et al. Numerical study of effect of geometric parameters on the characteristics of vortex cavitation inside diesel injector nozzles[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2024, 30(3): 295-301 (in Chinese).
- [17] Stefanidou M, Athanasis S, Spiliopoulou C. Health impacts of fire smoke inhalation[J]. *Inhalation Toxicology*, 2008, 20(8): 761-766.
- [18] 张毅, 陈潇, 陆守香. 火源贴壁情况下顶部开口舱室内烟气温度预测研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(3): 287-294.
- Zhang Yi, Chen Xiao, Lu Shouxiang. Wall fire smoke temperature prediction in the compartment with horizontal opening[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(3): 287-294 (in Chinese).
- [19] 李权, 陈宇航, 苗延利, 等. 坡度条件下不同长宽比矩形火源燃烧火焰贴地长度实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2024, 30(1): 75-81.
- Li Quan, Chen Yuhang, Miao Yanli, et al. Flame attachment length of rectangular fire sources with different aspect ratios under slope conditions[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2024, 30(1): 75-81 (in Chinese).
- [20] Marshall N R. Air entrainment into smoke and hot gases in open shafts[J]. *Fire Safety Journal*, 1986, 10(1): 37-46.
- [21] Mercier G P, Jaluria Y. Fire-induced flow of smoke and hot gases in open vertical enclosures[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1999, 19(2): 77-84.