

自动喷淋系统对羽流火焰高度影响的数值模拟研究

王宇,张敬义,李世鹏

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究自动喷淋系统对窗口羽流火焰高度的影响,揭示羽流火焰与喷水强度之间的变化规律,为高层建筑防火隔离区高度的设置提供理论基础. 方法 利用火灾动态模拟软件 PyroSim 对有自动喷淋系统的窗口羽流火焰进行数值模拟研究,改变喷水强度,引入危险温度 $T = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T_1 = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $T_2 = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$,综合分析窗口温度曲线及等温线数据. 结果 自动喷淋系统能有效降低窗口羽流火焰高度,喷水强度分别为 $6\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 、 $7.5\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 、 $9.2\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 和 $10.9\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 时,单窗口危险温度 T 的高度与无自动喷淋系统相比降低了 $1.2\sim 1.6\text{ m}$,危险温度 T_1 的高度相比降低了 $0.61\sim 1.43\text{ m}$,危险温度 T_2 的高度相比降低了 $0.38\sim 1.56\text{ m}$. 结论 随着喷水强度的增加,羽流火焰高度明显降低;喷水强度能够抑制羽流火焰融合,故自动喷淋系统对于此类高层建筑外部火蔓延可以起到防控作用.

关键词 安全工程;自动喷淋系统;羽流火焰;外部火蔓延;喷水强度

中图分类号 X932

文献标志码 A

Numerical Simulation of Effect of Automatic Sprinkler System on Height of Plume Flame

WANG Yu, ZHANG Jingyi, LI Shipeng

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The influence of automatic sprinkler system on the height of window plume was studied, and the variation rule between plume flame and water jet strength was revealed, which provided the theoretical basis for the height of fire isolation zone in high-rise building. Fire simulation software PyroSim was used to simulate the plume flame at a building window with automatic sprinkler system. The water temperature was changed to $T = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_1 = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $T_2 = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$. And the temperature curve and isotherm data near the window were analyzed. The results show that the automatic sprinkler system can significantly reduce the window plume flame height. As the water spray intensity were $6\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$, $7.5\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$, $9.2\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ and $10.9\text{ L}/$

收稿日期:2018-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目(11672190);“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC1504303);辽宁省重点研发计划指导计划项目(2017Z31009)

作者简介:王宇(1977—),男,副教授,主要从事高层建筑防火、结构抗震等方面研究.

($\text{min} \cdot \text{m}^2$) for the single window, respectively, the height of the dangerous temperature T was from 1.2 to 1.6 m lower than that without automatic sprinkler system, the height of dangerous temperature T_1 was reduced from 0.61 to 1.43 m, and the height of dangerous temperature T_2 is reduced from 0.38 to 1.56 m, respectively. With the increase of the spraying intensity, the height of plume flame significantly decreases. As the spraying intensity can inhibit the plume flame, ASS can prevent and control the external fire spread of such high-rise buildings.

Key words: safety engineering; automatic sprinkler system (ASS); plume flame; external fire spread; water spray intensity

随着我国经济的快速发展,城镇化的进程不断加快,高层建筑大量出现。然而建筑中大量使用可燃性的装饰物,造成火灾的损害随之增大。而水喷淋系统作为目前公认的最有效方便的消防保护设施,具有结构简单易行、灭火稳定可靠、安装方便等优点,因此研究水喷淋对窗口羽流火焰高度的影响具有十分重要的意义^[1-2]。

按照火灾蔓延的位置来分,包括内部和外部两种形式。当室内火灾发展到一定程度时,内部火会随高温烟气将窗口破碎,蔓延至外部,并将上层建筑外墙保温材料引燃,进而将上层建筑窗口破碎,形成羽流火焰,由于外部火与空气充分接触,燃烧不受限制,故其对高层建筑危害极大。游宇航^[3]等通过数值模拟的方法,发现水喷淋的启动可以控制火灾的发展,降低室内的烟气温度,增加烟气的生成量。同时,随着水喷淋的压力增加,室内的烟气温度继续下降,烟气生成量也会继续增加。赵恒泽^[4]采用实验研究与理论分析相结合的方法,研究水喷淋对保温材料火灾的抑制作用,揭示水喷淋作用下建筑外立面火蔓延特征规律及水喷淋对外立面保温材料燃烧蔓延的抑制机理。S. Nam^[5]对具有水喷淋系统高层建筑物室内火灾场景进行了数值模拟分析,并构建实验模型,采集实验数据,对比分析发现数值模拟结果与实验分析结果能很好的吻合。A. I. Karpov^[6]建立了水喷淋系统下的耦合燃烧模型,并模拟了不同喷水强度下的灭火时间。还有部分学者选取不同的水喷淋场景开展了研究,得到了更加适合于实

际工程的自动水喷淋系统及其灭火规律。

目前我国在火灾防护领域的研究较少,主要是水喷淋系统对烟气流动、有害气体分布、外墙保温材料燃烧等方面的研究,缺少对羽流火焰高度与喷水强度之间的变化规律研究。基于此,笔者利用火灾动态模拟软件 PyroSim 对有自动喷淋系统的窗口羽流火焰进行数值模拟研究。通过分析热电偶和切片的温度数据,探究自动喷淋系统喷水强度对窗口羽流火焰高度的影响,为确定高层建筑外部防火隔离区的高度提供理论指导。

1 模型数据

1.1 几何尺寸

火灾模拟工况为“一梯两户”的高层民用住宅,层高 3.0 m,楼板厚 0.1 m,墙体厚 0.2 m。火源位于卧室,卧室的尺寸为 3.3 m × 3.9 m。火源位于卧室,窗槛墙高 0.9 m,窗口尺寸 2.1 m × 1.5 m。数值模拟中的燃烧反应类型为聚氨酯燃烧反应。在设置工况时,假设火灾荷载密度、火源热释放速率及可燃物布置方式均相同。喷头布置在距窗口 1 m,屋顶 0.2 m 处;喷水强度分别设置为 6 L/($\text{min} \cdot \text{m}^2$)、7.5 L/($\text{min} \cdot \text{m}^2$)、9.2 L/($\text{min} \cdot \text{m}^2$)和 10.9 L/($\text{min} \cdot \text{m}^2$),作为对单窗口羽流火焰高度的影响参数。笔者对单窗口的羽流火焰进行数值模拟,将 $T = 540\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_1 = 350\text{ }^\circ\text{C}$ 及 $T_2 = 250\text{ }^\circ\text{C}$ 定义为危险温度。其中, T 为判定羽流火焰融合的温度、 T_1 为外墙保温材料发生燃烧时的临界温度、 T_2 为窗口玻璃发生破碎时的临界温度。

1.2 网格划分

网格划分是对所建模型进行计算的前提条件. PyroSim 对所建立模型进行网格划分时,可以根据具体火灾工况将模型网格划分为立方体网格、非立方体网格和多重网格. 为了保证模拟结果的精度,单元格进行划分时,三个方向的尺寸应尽量接近^[8-12]. 研究发现,在火灾动态仿真模拟软件 PyroSim 中,网格尺寸小于 $0.1D^*$ (D^* 为火源特征直径) 时,经计算文中建筑火灾模型的网格尺寸设置为 $0.25\text{ m} \times 0.25\text{ m} \times 0.25\text{ m}$; 此时模拟结果满足所需精度要求. 火源特征直径计算式为

$$D^* = \left(\frac{Q^*}{\rho_0 c_0 T_0 \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}. \quad (1)$$

式中: Q^* 为火源热释放速率, W ; ρ_0 为空气密度, kg/m^3 ; c_0 为空气比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T_0 为室内温度, K ; g 为重力加速度, m/s^2 .

FDS 以计算流体力学为理论基础进行仿真模拟. 研究表明,通风口位置对模拟结果影响很大,为模拟结果与实际相符合,笔者在同侧网格边界设置通风口,计算模型如图 1 所示.

1.3 火源热释放速率

参考文献[7]中的建议,火源热释放速率选取 6 MW . 为了模拟真实的火势发展过程,选用非稳态的 t^2 模型^[12],其表达式为

$$Q^* = \alpha t^2. \quad (2)$$

表 1 民用建筑和工业厂房的系统设计参数

Table 1 System design parameters for civil and industrial plants

火灾危险等级	级别	净空高度/m	喷水强度/ $(\text{L} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^2)^{-1})$	作用面积/ m^2
轻危险级	—	18	4	168
中危险级	I 级	18	6	168
	II 级	18	8	168
严重危险级	I 级	18	12	260
	II 级	18	16	260

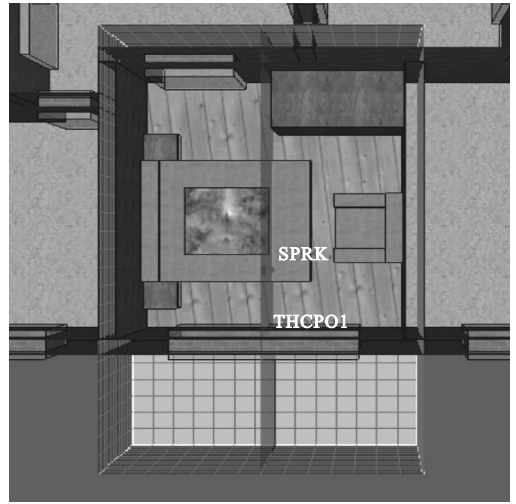


图 1 计算模型

Fig. 1 Computational model

式中: α 为火灾增长系数, kW/s^2 ; t 为有效增长时间, s .

火灾增长系数是衡量火灾进程的重要性指标,参考美国消防协会 NFPA 的《排烟和排热标准》^[9],文中选取快速火作为火灾发展级别,即热释放速率达到 6 MW 时,所需时间大约为 355 s .

1.4 自动喷淋系统喷水强度

根据建筑物内各场所的实际情况确定系统选型与火灾危险等级. 参照文献[13]的规定,文中火灾建筑模型属于中危险级 I 级,故喷水强度分别设置为 $6\text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 、 $7.5\text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 、 $9.2\text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 和 $10.9\text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$. 民用建筑和工业厂房的系统设计参数见表 1.

2 模拟结果分析

创建完成建筑火灾模型后,在建筑火灾模型的第一、二层窗口中心位置处布置热电偶,得到窗口处的温度情况.在网格横向中心位置放置温度切片,得到单窗口羽流火焰温度分布情况.查阅文献得知,以 540 °C 等温面判定羽流火焰高度,采用火源窗口的中性面作为羽流火焰临界位置^[14-16].又由于仅以 540 °C 外轮廓线方法确定单窗口羽流火焰高度具有局限性^[17-20],故将 $T = 540\text{ °C}$ 、 $T_1 = 350\text{ °C}$ 及 $T_2 = 250\text{ °C}$ 定义为危险温度.考虑 T 时,羽流火焰的高度由温度分布等温线图可直接确定.由于

T_1 和 T_2 分别表示外墙保温材料及窗口玻璃的临界温度,而且羽流火焰温度从内至外呈现出梯度性分布;故考虑 T_1 和 T_2 时,羽流火焰的高度需要同时结合窗口温度时间历程曲线和窗口温度分布等温线两组数据确定.

2.1 无自动喷淋系统羽流火焰

经过计算,得出无自动喷淋系统建筑的单窗口羽流火焰的窗口温度曲线如图 2(a) 所示,图中 THCP 和 THCP1 分别表示设置在第 1、2 层窗口的热电偶.通过数据整合软件 fds2ascii 及 Tecplot10 分析高层建筑窗口羽流火焰的纵向温度分布情况,得到温度分布等温线如图 2(b) 所示.

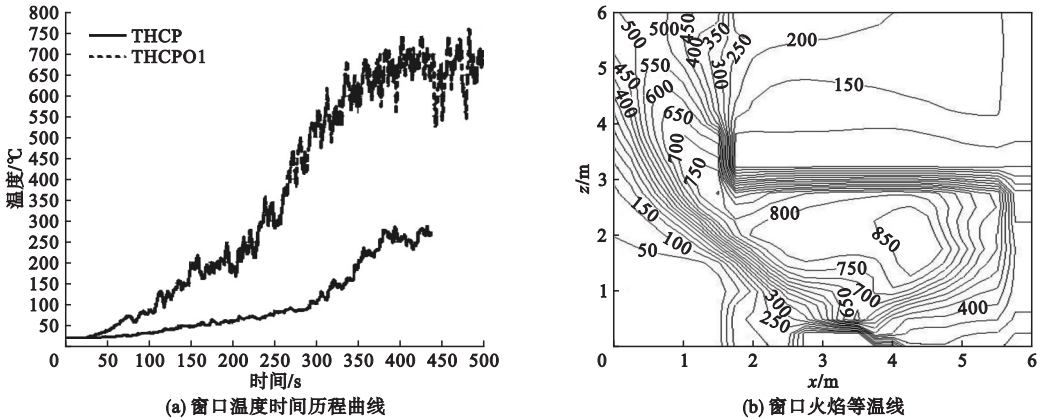


图 2 无自动喷淋系统窗口温度时间历程曲线和窗口火焰等温线

Fig. 2 The temperature time histories and flame isotherms of the window (without ASS)

2.2 喷水强度为 6 L/(min·m²) 羽流火焰

通过模拟计算,喷水强度为 6 L/(min·m²)

时的温度时间历程曲线和温度分布等温线如图 3 所示.

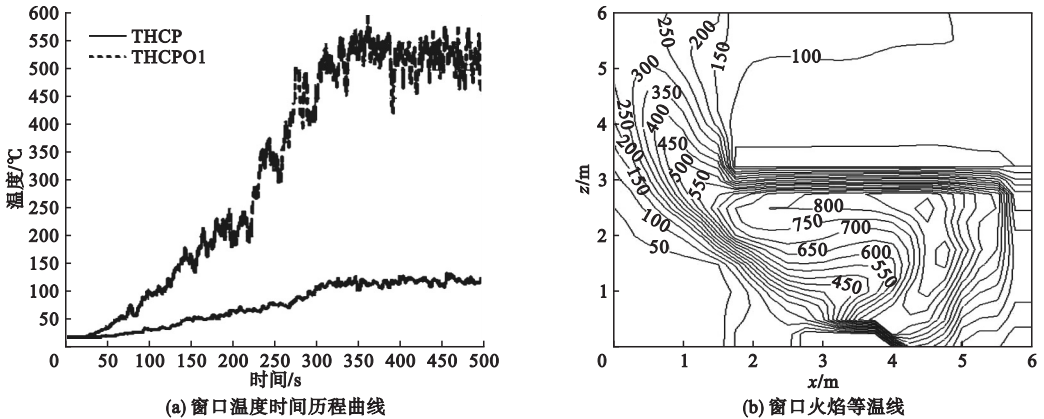


图 3 6 L/(min·m²) 时窗口温度时间历程曲线和窗口火焰等温线

Fig. 3 The temperature time histories and flame isotherms of the window (6 L/(min·m²))

对图3 分析可得:

(1)单窗口 T 对应的羽流火焰高度达到 1.35 m, T_1 对应的羽流火焰高度达到 2.29 m, T_2 对应的羽流火焰高度达到 3.49 m.

(2)喷水强度为 $6 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 时,纵向多窗口羽流火焰将不会出现融合现象,窗口

羽流火焰会点燃上一层外墙保温材料,进而通过外墙保温材料蔓延,窗口羽流火焰也会将上一层窗口玻璃烧碎,进而从室内蔓延.

2.3 喷水强度为 $7.5 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 羽流火焰

通过模拟计算,喷水强度为 $7.5 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 时的温度时间历程曲线和温度分布等温线如图4所示.

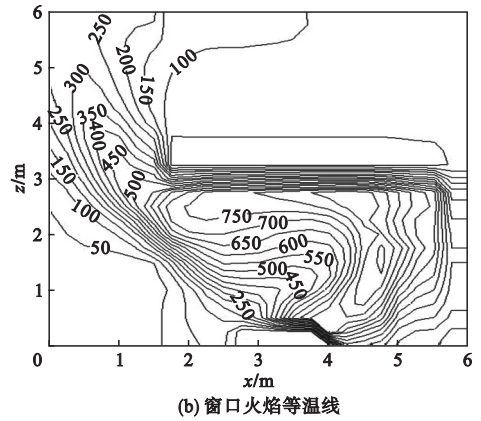
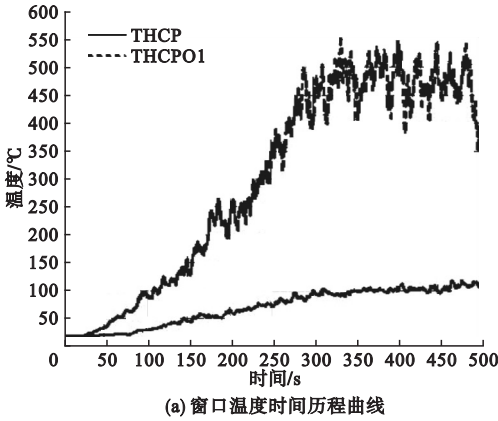


图4 $7.5 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 时窗口温度时间历程曲线和窗口火焰等温线

Fig. 4 The temperature time histories and flame isotherms of the window($7.5 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$)

对图4 分析可得:

(1)单窗口 T 对应的羽流火焰高度达到 2.6 m, T_1 对应的羽流火焰高度达到 3.68 m, T_2 对应的羽流火焰高度达到 4.68 m.

(2)喷水强度为 $7.5 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 时,纵向多窗口羽流火焰将不会出现融合现象,窗口羽流火焰不会点燃上一层外墙保温材料,

但窗口羽流火焰会将上一层窗口玻璃烧碎,进而从室内蔓延.

2.4 喷水强度为 $9.2 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 羽流火焰

通过模拟计算,喷水强度为 $9.2 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 时的温度时间历程曲线和温度分布等温线如图5所示.

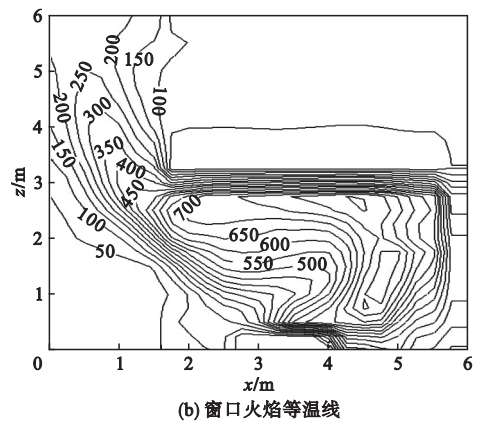
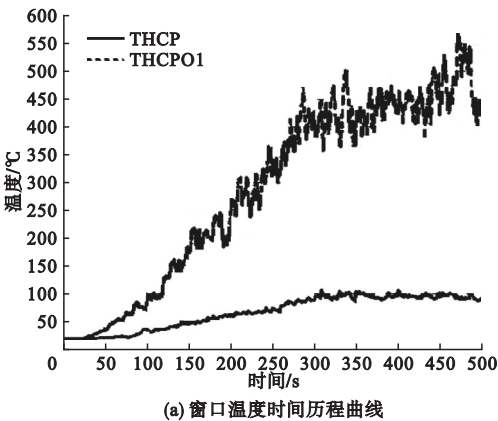


图5 $9.2 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 时窗口温度时间历程曲线和窗口火焰等温线

Fig. 5 The temperature time histories and flame isotherms of the window ($9.2 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$)

对图5分析可得:

(1)单窗口 T 对应的羽流火焰高度达到 2.55 m, T_1 对应的羽流火焰高度达到 3.34 m, T_2 对应的羽流火焰高度达到 4.13 m.

(2)喷水强度为 $9.2 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,纵向多窗口羽流火焰将不会出现融合现象,窗

口羽流火焰不会点燃上一层外墙保温材料,但窗口羽流火焰仍会将上一层窗口玻璃烧碎,进而从室内蔓延.

2.5 喷水强度为 $10.9 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 羽流火焰
通过模拟计算,喷水强度为 $10.9 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时的温度时间历程曲线和温度分布等温线如图6所示.

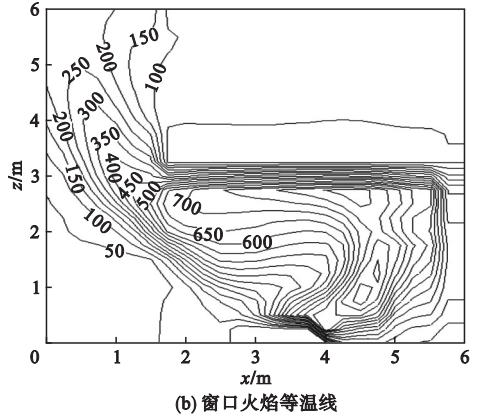
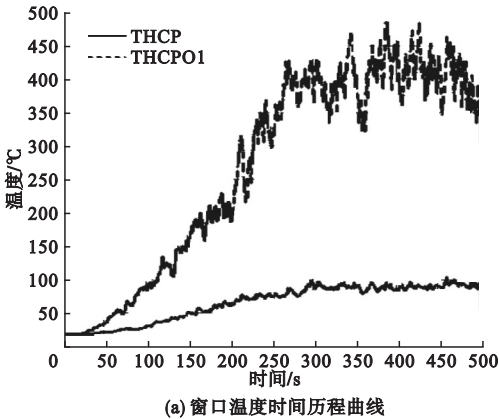


图6 $10.9 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时窗口温度时间历程曲线和窗口火焰等温线

Fig. 6 The temperature time histories and flame isotherms of the window ($10.9 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$)

对图6分析可得:

(1)单窗口 T 对应的羽流火焰高度达到 2.53 m, T_1 对应的羽流火焰高度达到 3.12 m, T_2 对应的羽流火焰高度达到 3.96 m.

(2)喷水强度为 $10.9 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,纵向多窗口羽流火焰将不会出现融合现象,窗口羽流火焰不会点燃上一层外墙保温材料,窗口羽流火焰也不会将上一层窗口玻璃烧碎.

(2)当喷水强度达到 $6 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,羽流火焰危险温度 T 明显降低,且其高度无法达到上一层,即无法形成融合火焰.当喷水强度达到 $9.2 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,羽流火焰危险温度 T_1 明显降低,且其无法燃烧上一层外墙保温材料,故其无法通过外墙蔓延.当喷水强度达到 $10.9 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,羽流火焰危险温度 T_2 降低至其无法将上一层窗口玻璃烧碎,即无法通过室内进行蔓延.

(3)由于喷水强度具有对羽流火焰抑制的作用,因此对于此类高层建筑外部火蔓延的防控,需要综合考虑喷水强度与外部防火隔离区的高度.

3 结论

(1)自动喷淋系统能有效降低窗口羽流火焰高度,与无自动喷淋系统相比,喷水强度分别为 $6 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 、 $7.5 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 、 $9.2 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 、 $10.9 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,单窗口的危险温度 T 对应的羽流火焰高度降低了 $1.2 \sim 1.6 \text{ m}$,危险温度 T_1 对应的羽流火焰高度降低了 $0.61 \sim 1.43 \text{ m}$,危险温度 T_2 对应的羽流火焰高度降低了 $0.38 \sim 1.56 \text{ m}$.

参考文献

- [1] 杨培培. 喷淋对建筑火灾流场影响的数值模拟研究[D]. 合肥:安徽理工大学,2013. (YANG Peipei. Spray on the fire field of numerical simulation [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2013.)
- [2] 张俊伟. 基于FDS的纵向多窗口火焰蔓延模型研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2015. (ZHANG Junwei. Research on vertical multi-

- window flame propagation model based on FDS[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)
- [3] 游宇航, 李元洲, 霍然, 等. 水喷淋控制下小室火灾的数值模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2006, 25(5): 613 - 617.
(YOU Yuhang, LI Yuanzhou, Huo Ran, et al. Numerical simulation of chamber fire control under water spray [J]. Journal of fire science and technology, 2006, 25(5): 613 - 617.)
- [4] 赵恒泽. 水喷淋对竖直外壁面典型保温材料燃烧蔓延抑制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
(ZHAO Hengze. Study on spraying propagation of typical thermal insulation materials on vertical outer wall surface by water spray [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.)
- [5] NAM S. Numerical simulation of the penetration capability of sprinkler sprays [J]. Fire safety journal, 2009, 5(32): 307 - 329.
- [6] KARPOV A I, GALAT A A, NOVOZHIL V, et al. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles [J]. Fire science and technology, 2010, 29(4): 259 - 282.
- [7] 公安部上海消防科学研究所, 上海市消防局. 建筑防排烟技术规程: DGJ08—88—2006 [S]. 上海: 上海市建设和交通委员会, 2006.
(Shanghai Fire Science Research Institute of Ministry of Public Security, Shanghai Fire Department. Technical specification for building smoke control: DGJ08—88—2006 [S]. Shanghai: Shanghai Construction and Transportation Committee, 2006.)
- [8] LEE Y P. Heat fluxes and flame heights on external facades from enclosure fires[D]. Ulster: University of Ulster, 2006.
- [9] American Nuclear Society Specification. Standard for Smoke and Heat Venting: NFPA 204 [S]. Quincy: National Fire Protection Association, 2012.
- [10] DELICHATSIOS M A, LEE Y P, TOFILO P. A new correlation for gas temperature inside a burning enclosure [J]. Fire safety journal, 2009, 44(8): 1003 - 1009.
- [11] 陆凯华. 不同开口与侧墙限制边界条件下火焰溢出卷吸行为与火焰高度模型研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
(LU Kaihua. Studies on facade flame entrainment and flame height from a compartment under various opening and side wall constraint boundary conditions [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.)
- [12] HESKESTAD G. Engineering relations for fire plumes [J]. Fire safety journal, 1984, 7(1): 25 - 32.
- [13] 中华人民共和国公安部. 自动喷水灭火系统设计规范: GB50084—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
(Ministry of Public Security of the People's Republic of China. Design specification for automatic sprinkler system: GB50084—2017 [S]. Beijing: China Planning Publishing Press, 2017.)
- [14] OLESZKIEWICZ I. Heat transfer from a window fire plume to a building facade [J]. Collected papers in heat transfer, 1989(5): 75 - 86.
- [15] SEIGEL L G. The projection of flames from burning buildings [J]. Fire technology, 1969, 5(1): 43 - 51.
- [16] THOMAS P H, LAW M. The projection of flames from buildings on fire [J]. Fire prevention science and technology, 1972(10): 19 - 26.
- [17] 李龙. 高层建筑窗口喷火竖向蔓延的控制研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2014.
(LI Long. The control measure of vertical fire spread through hing-rise building window plume [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2014.)
- [18] 崔崧. 竖直壁面条件下常用有机外墙保温材料的火灾行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
(CUI Yu. Fire behavior of commonly used organic exterior insulation materials under vertical wall condition [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.)
- [19] 陈爱平. 通过外墙喷出火焰问题的研究[J]. 火灾科学, 1998, 7(3): 53 - 60.
(CHEN Aiping. Research into the problem of extrusive flame through window in exterior wall [J]. Fire safety science, 1998, 7(3): 53 - 60.)
- [20] MCGRATTAN K, HOSTIKKA S, MCDERMOTT R, et al. Fire dynamics simulator, user's guide [M]. Washington: Nist Special Publication, 2013.

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)