

多窗口羽流火焰高度计算公式及其影响因素

王宇,梁云峰,李世鹏

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究高层建筑纵向相邻多窗口羽流火焰的融合机制,引入危险温度 T 、 T_1 及 T_2 ,分析危险温度高度与各影响因素之间的变化规律.方法 采用软件 PyroSim 对不同窗口尺寸、火灾荷载密度以及纵向窗口数量等因素影响下的火灾建筑模型进行数值模拟,并根据模拟所得数据绘制窗口温度时间历程曲线与纵向温度分布等温线.结果 纵向相邻多窗口羽流火焰出现了融合现象;危险温度 T_1 和 T_2 所处高度在纵向相邻两窗口比单窗口提升了 2.1~4.0 m,纵向相邻三窗口比纵向相邻两窗口提升了 0.05~0.8 m.结论 纵向相邻两窗口羽流火焰的危险温度 T_1 和 T_2 所处高度与纵向相邻三窗口相似,对于同类型的高层建筑外部火蔓延的防控,考虑纵向相邻两窗口的危险温度分布即可满足要求.

关键词 羽流火焰;危险温度;火灾荷载密度;外部火蔓延;安全因子

中图分类号 X932

文献标志码 A

The Practical Formulas and Influence Factors for the Height of the Windows Plume Flame

WANG Yu, LIANG Yunfeng, LI Shipeng

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

Abstract: The purpose of this paper is to study the fusion mechanism of vertically adjacent multi-window plume flame in high-rise buildings. First, the dangerous temperatures of the plume flame T , T_1 and T_2 are introduced in this paper. Second, the changing rules of the dangerous temperatures and the influencing factors are analyzed. The software PyroSim was used to study the numerical simulation of the fire building models under the different conditions such as the window size, fire load density and the number of vertical windows and other factors. Based on the data from simulation, we drew curves of changing temperatures and the vertical temperature isotherms. The result shows the fusion phenomenon of the vertical adjacent multi-window plume flame. The height of dangerous temperature T_1 and T_2 in the vertical two windows is increased by 2.1 ~ 4.0 m compared with the single window. The height of dangerous temperature T_1 and T_2 in the vertical three windows is increased by 0.05 ~ 0.8 m compared with the two windows. The height of the danger-

收稿日期:2018-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(11672190);辽宁省自然科学基金项目(201602628)

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

ous temperatures T_1, T_2 in the vertical two windows are similar to the three windows. For the prevention and control of the fire spreading outside the high-rise buildings of the same type, the dangerous temperature distribution of two adjacent windows in the vertical direction can be met. Based on the simulation research and previous research, applicable formulas of dangerous temperatures T_1 and T_2 are obtained. The concept of safety factors is introduced and the range of its value is determined.

Key words: plume flame; dangerous temperatures; fire load density; external fire spread; safety factors

高层建筑在城市建设方面发挥着积极作用的同时,其面对火灾所暴露出来的弊端也越来越成为亟待解决的难题.高层建筑的火灾蔓延方式主要可分为内部火蔓延与外部火蔓延两种形式^[1],而外部火蔓延相较于内部火蔓延速度更快、破坏性更强、救援更困难.高层建筑的外部火蔓延大多由窗口羽流火焰引起.事实证明,纵向相邻多个窗口形成的羽流火焰能够相互融合,融合后的羽流火焰温度及高度与单窗口羽流火焰相比呈倍数增长.

K. Himoto 等^[2]通过试验建立了窗口火焰行为模型,从控制微分方程导出无量纲参数,并结合该参数,推导了窗内火焰射出轨迹的表达式以及特征火焰宽度的数学模拟表达式;Y. Ohmiya 等^[3-5]研究得到可燃物的燃烧速率与窗口羽流火焰热释放速率之间的关系,得出羽流火焰的热释放速率取决于室外多余可燃物燃烧的结论;M. A. Delichatsios 和 Y. P. Lee 等^[6-8]研究了燃烧室内外温度随火源及窗口位置等条件变化下的分布规律,得出羽流火焰与火源热释放速率之间的关系;刘琼^[9]确立了适用范围更广的多火焰融合的临界判断依据,揭示了多火源燃烧的变化规律与动力学机理.基于此,笔者运用有限元软件 PyroSim 对单窗口、纵向相邻两窗口以及纵向相邻三窗口的羽流火焰进行数值模拟研究,并改变窗口尺寸、火灾荷载密度等影响因素.通过综合分析模拟所得数据,并参考前人的研究成果,探究危险温度高度的实用计算公式,得到了外墙窗口羽流火焰蔓延

的规律,为今后外墙火灾防护控制提供了可行性的理论依据.

1 数值模型

1.1 影响因素

室内火灾能否形成窗口羽流火焰、羽流火焰形成后的火焰高度以及纵向相邻多窗口羽流火焰能否相互融合,这些现象与火灾荷载密度、窗口尺寸等影响因素有关.笔者通过固定室内开间而改变火源热释放速率中热值的方式,体现火灾荷载密度的变化.参考《建筑防排烟技术规程》(DGJ08-88-2006)中各建筑的热释放速率的要求(见表1),火源热释放速率分别设置 6 MW、7 MW、8 MW,其对应的火灾荷载密度分别为 0.47 MW/m²、0.54 MW/m² 与 0.62 MW/m².根据目前对火灾发展的认识,热释放速率曲线采用能够真实体现火灾的发展过程的非稳态 t²模型^[10-11].

表1 建筑防排烟技术规程

Table 1 Technical specification for building smoke control

建筑类型	热释放速率 Q^*/MW
设有喷淋的办公室、客房	1.5
设有喷淋的中庭	1
设有喷淋的公共场所	2.5
无喷淋的办公室、客房	6
无喷淋的中庭	4
无喷淋的公共场所	8

随着外墙窗口玻璃因达到耐火极限而破碎,当室内空气不足以继续支持火焰燃烧,火

灾便会发展至通风控制阶段,进而形成窗口羽流火焰.而窗口尺寸直接影响室内火灾能否发展至通风控制阶段.因此,笔者分别设置窗口尺寸为 $2.1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 、 $2.1\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 、 $2.4\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 和 $2.4\text{ m} \times 1.8\text{ m}$.其中, 2.1 m 和 2.4 m 为窗口的宽度,而 1.5 m 和 1.8 m 则为窗口的高度.

1.2 建筑模型

火灾建筑模型为8层住宅楼,其楼层高度为 3.0 m ,墙体厚度为 0.2 m ,窗槛墙高度为 0.9 m ,火源所在卧室的开间尺寸为 3.3 m ,进深尺寸为 3.9 m .在每个窗口的中心位置设置热电偶,并布置温度切片,由此可以通过数据整合软件形成相应的窗口温度时间历程曲线及纵向温度分布等温线.笔者假设 T 为羽流火焰高度的判定温度, T_1 为聚苯乙烯泡沫外墙保温材料的点燃温度, T_2 为普通窗口玻璃破碎的耐火极限温度,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,其对应的高度为危险温度高度.单窗口的危险温度高度以火源所在窗口的中性面作为底部,纵向相邻多窗口的危险温度高度以火源所在最高楼层窗口的中性面作为底部.为保证模型空间的正常空气流通,在窗口通常网格边界设置通风口.建筑模型如图1所示.

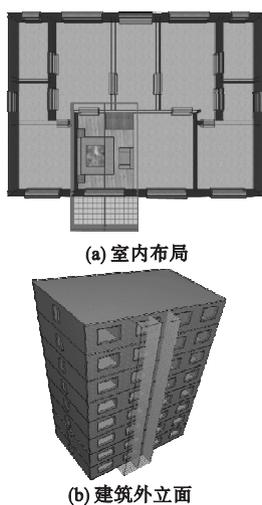


图1 建筑模型

Fig. 1 Building model

2 模拟结果与分析

2.1 危险温度高度

危险温度 T 的高度可以直接通过观察纵向温度分布等温线确定.由于 T_1 和 T_2 的影响范围在外墙保温材料及窗口玻璃,而火焰温度从内至外呈现梯度分布状态,因此其高度需要结合窗口温度时间历程曲线和纵向温度分布等温线两组数据确定.通过分析数值模拟所得到的窗口温度时间历程曲线和纵向温度分布等温线,得到火灾荷载密度为 $0.47\text{ MW}/\text{m}^2$ 时单窗口羽流火焰、纵向相邻两窗口羽流火焰以及纵向相邻三窗口羽流火焰的危险温度高度如表2所示,火灾荷载密度为 $0.54\text{ MW}/\text{m}^2$ 时单窗口羽流火焰、纵向相邻两窗口羽流火焰以及纵向相邻三窗口羽流火焰的危险温度高度如表3所示,火灾荷载密度为 $0.62\text{ MW}/\text{m}^2$ 时的单窗口羽流火焰、纵向相邻两窗口羽流火焰以及纵向相邻三窗口羽流火焰的危险温度高度如表4所示.

由于对高层建筑外部火蔓延造成直接促进作用的是危险温度 T_1 和 T_2 ,因此笔者着重分析这两个危险温度高度的实用计算公式.窗口尺寸为 $2.1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 时,危险温度 T_1 和 T_2 的高度在纵向相邻两窗口比单窗口提升了 $2.1 \sim 3.15\text{ m}$,纵向相邻三窗口比纵向相邻两窗口提升了 $0.1 \sim 0.8\text{ m}$;窗口尺寸为 $2.1\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 时,纵向相邻两窗口比单窗口提升了 $2.15 \sim 3.2\text{ m}$,纵向相邻三窗口比纵向相邻两窗口提升了 $0.35 \sim 0.75\text{ m}$;窗口尺寸为 $2.4\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 时,纵向相邻两窗口比单窗口提升了 $3.0 \sim 3.55\text{ m}$,纵向相邻三窗口比纵向相邻两窗口提升了 $0.05 \sim 0.6\text{ m}$;窗口尺寸为 $2.4\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 时,纵向相邻两窗口比单窗口提升了 $3.1 \sim 4.0\text{ m}$,纵向相邻三窗口比纵向相邻两窗口提升了 $0.1 \sim 0.8\text{ m}$.

表2 火灾荷载密度 $0.47 \text{ MW}/\text{m}^2$ 的危险温度高度Table 2 The height of dangerous temperature with $0.47 \text{ MW}/\text{m}^2$ fire load density

窗口数量	窗口宽×高/m	危险温度 T 的高度/m	危险温度 T_1 的高度/m	危险温度 T_2 的高度/m
单窗口	2.1×1.5	2.50	2.80	3.75
	2.1×1.8	2.70	2.85	3.75
	2.4×1.5	1.75	2.40	3.60
	2.4×1.8	2.00	2.10	3.00
纵向相邻两窗口	2.1×1.5	5.75	5.95	6.75
	2.1×1.8	6.50	6.05	6.85
	2.4×1.5	4.75	5.95	6.80
	2.4×1.8	4.90	6.10	6.90
纵向相邻三窗口	2.1×1.5	5.75	6.40	6.95
	2.1×1.8	6.60	6.80	7.25
	2.4×1.5	5.25	6.00	7.10
	2.4×1.8	6.00	6.25	7.20

表3 火灾荷载密度 $0.54 \text{ MW}/\text{m}^2$ 的危险温度高度Table 3 The height of dangerous temperature with $0.54 \text{ MW}/\text{m}^2$ fire load density

窗口数量	窗口宽×高/m	危险温度 T 的高度/m	危险温度 T_1 的高度/m	危险温度 T_2 的高度/m
单窗口	2.1×1.5	3.75	3.90	4.25
	2.1×1.8	3.10	3.30	4.00
	2.4×1.5	2.15	2.65	3.95
	2.4×1.8	2.50	2.80	4.00
纵向相邻两窗口	2.1×1.5	5.25	6.10	6.90
	2.1×1.8	6.60	6.20	7.05
	2.4×1.5	4.75	6.15	6.95
	2.4×1.8	5.10	6.25	7.10
纵向相邻三窗口	2.1×1.5	5.75	6.70	7.70
	2.1×1.8	7.60	6.80	7.55
	2.4×1.5	6.75	6.75	7.55
	2.4×1.8	7.10	6.50	7.90

表4 火灾荷载密度 $0.62 \text{ MW}/\text{m}^2$ 的危险温度高度Table 4 The height of dangerous temperature with $0.62 \text{ MW}/\text{m}^2$ fire load density

窗口数量	窗口宽×高/m	危险温度 T 的高度/m	危险温度 T_1 的高度/m	危险温度 T_2 的高度/m
单窗口	2.1×1.5	5.05	4.10	4.65
	2.1×1.8	5.10	3.75	5.05
	2.4×1.5	3.05	3.25	4.15
	2.4×1.8	3.10	3.25	4.15
纵向相邻两窗口	2.1×1.5	6.25	6.20	7.05
	2.1×1.8	6.60	6.35	7.20
	2.4×1.5	4.75	6.25	7.15
	2.4×1.8	4.60	6.40	7.30
纵向相邻三窗口	2.1×1.5	10.25	6.30	7.20
	2.1×1.8	9.10	6.70	7.65
	2.4×1.5	7.05	6.30	7.75
	2.4×1.8	5.90	6.50	7.95

2.2 纵向温度分布

在窗口尺寸与火灾荷载密度都相同的条件下,纵向相邻两窗口与纵向相邻三窗口的危险温度高度相似,因此仅需探讨纵向相邻两窗口的危险温度 T_1 及 T_2 高度与窗口尺

寸、火灾荷载密度等影响因素之间的变化规律,得到纵向相邻两窗口羽流火焰的窗口温度时间历程曲线如图 2 所示,纵向温度分布等温线如图 3 所示.

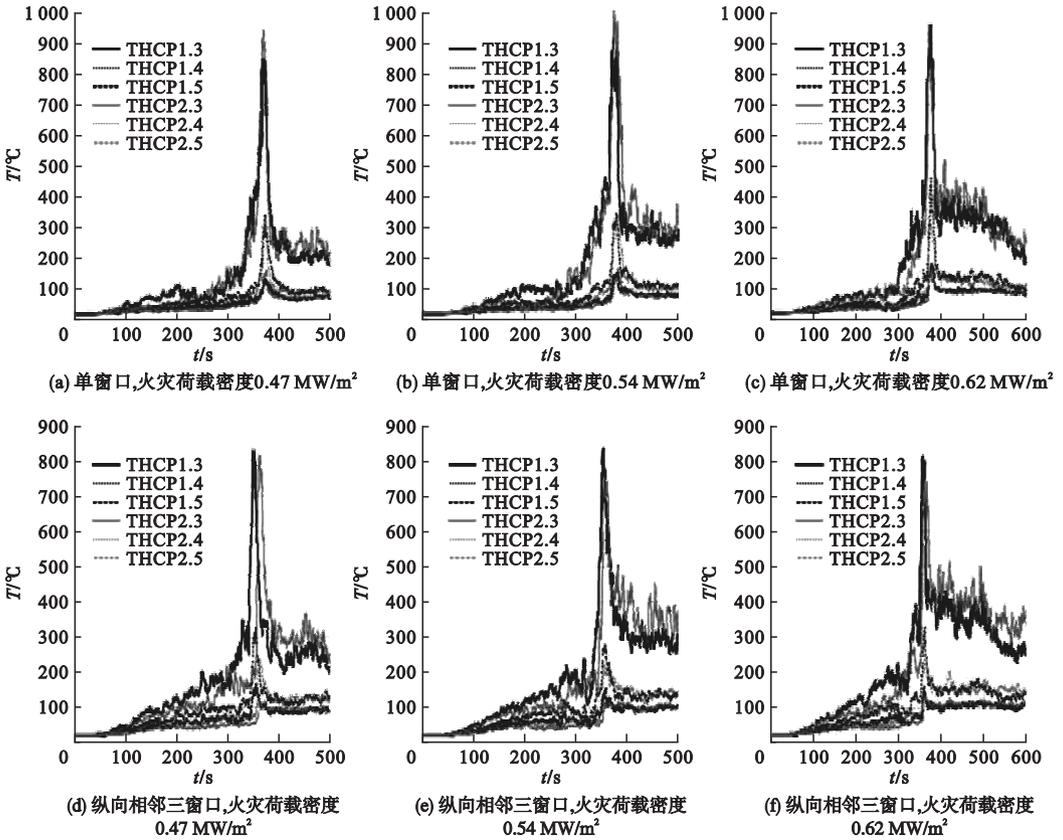


图 2 窗口温度时间历程曲线

Fig. 2 The history curves of temperature at the windows

图 2 中的横坐标代表火灾模拟的运算时间,纵坐标代表温度,THCP1.2、THCP1.3、THCP1.4、THCP1.5、THCP1.6 分别代表设置在窗口尺寸为 $2.1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 模型的二层、三层、四层、第五层以及第六层窗口的热电偶记录的温度曲线,THCP2.2 至 THCP2.6 分别表窗口尺寸为 $2.1\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 模型的二层至第六层窗口的温度曲线,THCP3.2 至 THCP3.6 分别代表窗口尺寸为 $2.4\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 模型的二层至第六层窗口的温度曲线,THCP4.2 至 THCP4.6 分别代表窗口尺寸为 $2.4\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 模型的二层

至第六层窗口的温度曲线。
图 3 纵坐标代表模型沿纵向的高度距离,横坐标代表模型房间进深方向的长度距离,等高线分布曲线为温度等温线.其中图 3 (a)、(b)、(c)分别为相应窗口尺寸 $2.1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的纵向温度分布等温线,图 3 (d)、(e)、(f)分别为相应 $2.1\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 的纵向温度分布等温线,图 3 (g)、(h)、(i)分别为相应 $2.4\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的纵向温度分布等温线,图 3 (j)、(k)、(l)分别为相应 $2.4\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 的纵向温度分布等温线.

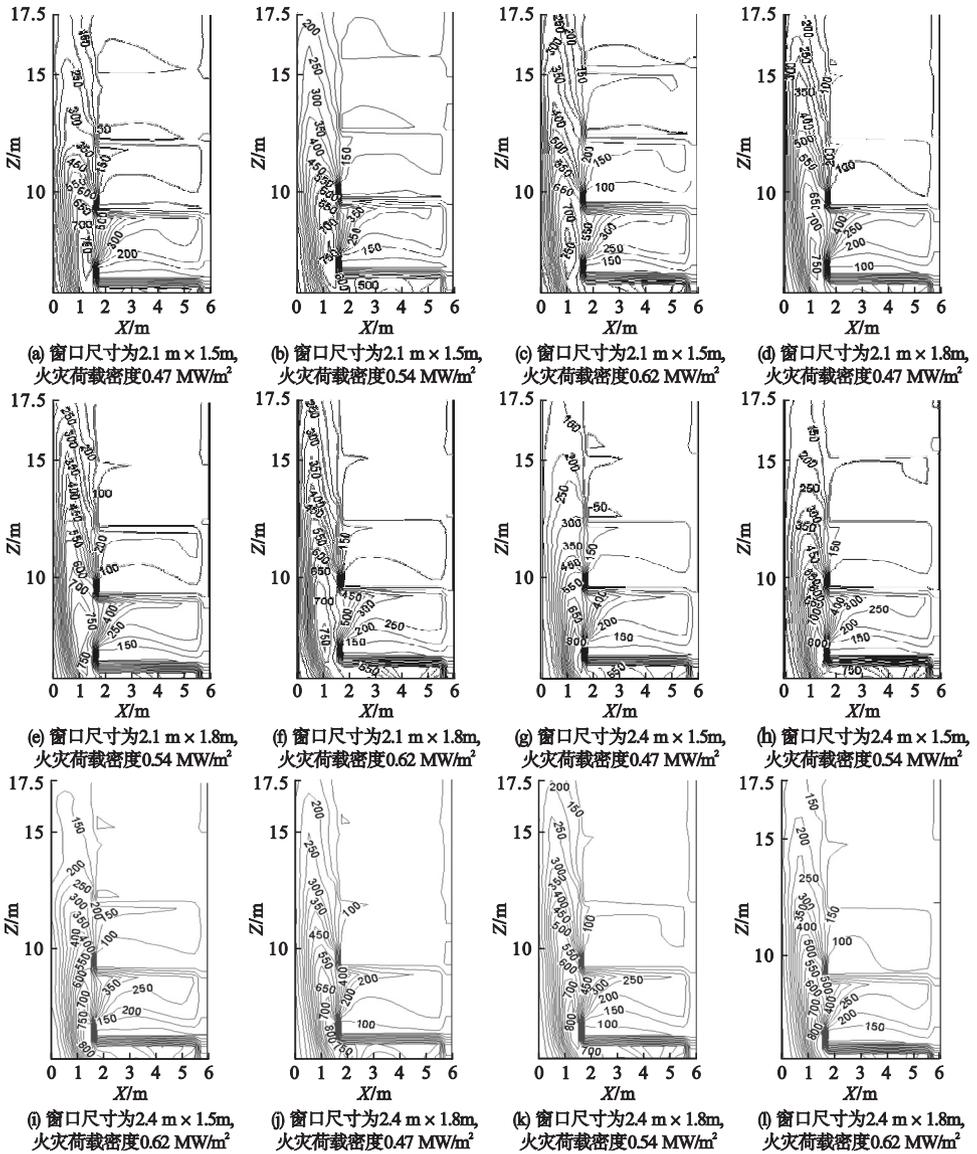


图3 纵向温度分布等温线

Fig. 3 The isotherm of temperature distribution

3 危险温度高度的计算公式

经过综合分析模拟计算所得到的数据,并参考 Y. P. Lee 和 M. A. Delichatsios 等^[6-8]的研究成果,得到纵向相邻三窗口危险温度 T_1 和 T_2 高度与各影响因素的实用计算公式为

$$Z_1 = \frac{0.11l^2 \cdot g \cdot \rho + 2.5l^2 \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot T_0}{\rho_0 \cdot c_0 \cdot T_0 \cdot l}, \quad (2)$$

$$Z_2 = \frac{0.12l^2 \cdot g \cdot \rho + 2.7l^2 \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot T_0}{\rho_0 \cdot c_0 \cdot T_0 \cdot l}. \quad (3)$$

式中: $t = 10s$, $l = (A \cdot \sqrt{H})^{\frac{2}{5}}$; Z_1 为危险温度 T_1 的高度; Z_2 为危险温度 T_2 的高度; t 为模拟过程中危险温度在纵向出现极限高度的时间选取范围; g 为重力加速度; ρ 为火灾荷载密度; l 为窗口特征长度; ρ_0 为空气密度; c_0 为空气比热容; T_0 为室内环境温度; A 为窗口面积; H 为窗口高度。

为弥补纵向相邻三窗口与纵向相邻两窗口危险温度高度的微小差异,在计算得到的危险温度高度的基础上需要乘以一个大于

1.0的系数,该系数即安全因子.其中与 Z_1 相对应的安全因子 $n_1 \geq 1.17$,与 Z_2 相对应的安全因子 $n_2 \geq 1.21$.

4 结 论

(1)纵向相邻多窗口羽流火焰出现了融合现象,危险温度 T_1 和 T_2 的高度在纵向相邻两窗口比单窗口提升了2.1~4.0 m,纵向相邻三窗口比纵向相邻两窗口提升了0.05~0.8 m.因此纵向相邻两窗口 T_1 和 T_2 的高度与纵向相邻三窗口 T_1 和 T_2 的高度相似.

(2)通过数值模拟研究,分析了窗口温度时间历程曲线以及纵向温度分布等温线等数据,探讨危险温度高度与各影响因素之间的作用关系,得到危险温度 T_1 和 T_2 高度的计算公式.为弥补误差而引入安全因子的概念,并确定了安全因子取值范围.

参考文献

- [1] 苏朗.高层建筑窗口喷出火焰竖向蔓延的抑制研究[D].大连:大连理工大学,2010.
(SU Lang. Study on the inhibition of vertical spread flame ejected from window of high-rise building [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.)
- [2] HIMOTO K, TSUCHIHASHI T, TANAKA Y, et al. Modeling thermal behaviors of window flame ejected from a fire compartment[J]. Fire safety journal, 2009, 44(2): 230 - 240.
- [3] OHMIYA Y, TANAKA T, WAKAMATSU T. A room fire model for predicting fire spread by external flames[J]. Fire science and technology, 2007, 18(1): 11 - 21.
- [4] OHMIYA Y, HORI Y, SAGIMORI K, et al. A study on smoke behavior in a compartment with sprinkler system activation-simple predictive method on mass flow rates based on experimental study[J]. Fire science and technology, 2009, 28(3): 88 - 105.
- [5] OHMIYA Y, YANAGISAWA A. Behavior of fire plume ejected from opening with soffit [J]. Fire science and technology, 2007, 26(4): 529 - 535.
- [6] LEE Y P. Heat fluxes and flame heights on external facades from enclosure fires[D]. Northern Ireland: University of Ulster, 2006.
- [7] LEE Y P, DELICHATSIOS M A, SILCOCK G W H. Heat fluxes and flame heights in facades from fires in enclosures of varying geometry [J]. Proceedings of the combustion institute, 2007, 31(2): 2521 - 2528.
- [8] 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.
- [9] 刘琼.多火源燃烧动力学机制与规律研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.
(LIU Qiong. Dynamical mechanism and behaviors of multiple fires burning [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.)
- [10] 张小翠.建筑火灾场景模拟中计算区域的影响研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.
(ZHANG Xiaocui. Effects of computational domain on field modeling of building fires [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.)
- [11] HESKESTAD G. Engineering relations for fire plumes [J]. Fire safety journal, 1984, 7(1): 25 - 32.
- [12] SAHU D, KUMAR S, JAIN S, et al. Full scale experimental and numerical studies on effect of ventilation in an enclosure diesel pool fire[J]. Building simulation, 2016, 10(3): 1 - 14.
- [13] 付佳佳.建筑外墙不同防火构造下窗口火竖向蔓延的阻隔机制研究[D].北京:中国建筑科学研究院,2016.
(FU Jiajia. Studies on the inhibition mechanism of vertical ejecting fire spread under different building facade fire protection constructions [D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2016.)
- [14] National Fire Protection Association. Standard for smoke and heat venting: NFPA 204—2002 [S]. Quincy, USA: National Fire Protection Association (NFPA), 2002.
- [15] 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 high-rise building window plume [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2014.)
- [16] 李建涛,岩维纲.高层建筑外立面U型结构火蔓延特性数值模拟研究[J].火灾科学, 2012, 24(2): 175 - 179.
(LI Jiantao, YAN Weigang. Numerical simulation study on fire spread characteristics of U structure in facade of high-rise building [J]. Safety science, 2012, 24(2): 175 - 179.