

侧墙结构多窗口羽流火焰的数值模拟分析

王宇,李世鹏,杨舜博

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 探究侧墙结构对横纵向多窗口羽流火焰及其融合的影响,分析在侧墙上设有窗口条件下羽流火焰的温度分布情况,为同类高层建筑外部火蔓延的防控提供参考依据。方法 采用火灾动态仿真模拟软件 PyroSim 对侧墙上设有窗口的建筑类型进行火灾模拟,通过对所设置工况的数值模拟研究,分析窗口温度曲线及温度等温线,并引入危险温度 T 、 T_1 及 T_2 。结果 横向相对两窗口及纵向相邻两窗口的羽流火焰未互相融合;横纵向四窗口、纵向相邻三窗口及横纵向六窗口的羽流火焰能够相互融合,危险温度高度比单窗口提升了 4~9 m;单侧纵向多窗口的危险温度能够影响到对向侧墙外立面。结论 侧墙结构引起的烟囱效应与羽流火焰相互作用,提升了危险温度高度;单侧纵向多窗口羽流火焰融合后的危险温度能够危及对向侧墙。

关键词 侧墙结构;羽流火焰;外部火蔓延;危险温度;烟囱效应

中图分类号 TU352.5;X932

文献标志码 A

Numerical Simulation on the Windows Plume Flame in Side Wall Structure

WANG Yu, LI Shipeng, YANG Shunbo

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

Abstract: The purpose of this paper is to investigate the influence of side wall on plume flame, which is distributed on the surface of the transverse and vertical windows. The temperature distribution model of the plume flame is proposed under different conditions. This research provides a reference for the prevention and control of fire propagation in the high-rise building. The plume flame under different working conditions is simulated by fire dynamic simulation software PyroSim. The dangerous temperatures of T , T_1 , T_2 are analyzed by the temperature curve and the isotherm curve in this paper. Results show that the plume flames can merge under conditions of four transverse vertical windows, three vertical windows, and six transverse vertical windows. However, they do not merge with each other under conditions of two transverse windows and two vertical windows. The chimney effect interacting with the plume flame raises the height of dangerous temperatures. And the dangerous temperature is increased by 4 m~9 m compared with the single window. The dangerous temperatures of vertical windows in one side can affect the external of oppo-

收稿日期:2017-07-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51604175);辽宁省自然科学基金项目(201602628)

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

site side.

Key words: side wall structure; plume flame; external fire spread; dangerous temperatures; chimney effect

随着我国经济的繁荣发展,高层建筑如雨后春笋般出现在各城镇当中,高层建筑可有效解决城市发展过程中出现的人口压力和土地资源紧张等问题.就高层建筑的外立面型式而言,无侧墙的口字型建筑及有侧墙的凹字型建筑最为常见.并且,有侧墙的凹字型建筑当中存有在侧墙上设置窗口的建筑类型.对于高层建筑而言,对其威胁最大的灾害之一便是火灾,其起火因素多、火灾危害大、救援困难^[1].建筑火灾大多由房间内部起火引起,当窗口玻璃因达到温度极限而破碎,且室内火灾发展至通风限制阶段,火焰即随高温烟气从窗口溢出,形成窗口羽流火焰^[2].事实证明,由窗口羽流火焰引起的高层建筑外部火蔓延,相较于内部火蔓延,速度更快、破坏性更强^[3].因此,对高层建筑外部火蔓延机理的研究,显得越发紧要.

近年来,国内外部分学者对高层建筑的外部火蔓延做了一定的研究,李建涛等^[4]采用数值模拟的方法,发现侧墙结构起到了烟囱效应的作用,加快了火蔓延速度,且烟囱效应的影响程度与侧墙结构因子成正比. Seigel L G 等^[5-7]创造性地提出以 540℃等温面作为火焰高度的判断依据.安伟光^[8]利用实体试验与理论分析相结合,对不同影响因素条件下建筑外墙 PS 保温材料的燃烧及火蔓延特性进行了系统分析.

目前,相关研究多涉及外墙保温材料及单窗口羽流火焰方面,而对侧墙结构多窗口的羽流火焰融合,尤其是侧墙上设置窗口条件下的羽流火焰融合,鲜有提及.基于此,笔者采用火灾动态仿真模拟软件 PyroSim 对侧墙上设置窗口的横纵向多窗口羽流火焰及其融合进行数值模拟研究,通过对模拟结果的分析,探究侧墙结构对横纵向多窗口羽流火

焰及其融合的影响,分析在侧墙上设有窗口条件下羽流火焰的温度分布情况,为同类高层建筑外部火蔓延的防控提供参考依据.

1 数值模型

1.1 模型概况

火灾建筑模型采用有侧墙结构的 8 层住宅楼,侧墙宽度为 3.3 m,侧墙间距为 2.4 m,火源室内开间尺寸为 3.3 m×3.9 m,窗口尺寸为 2.1 m×1.5 m,窗槛墙高度为 0.9 m,楼层高度为 3.0 m.笔者分别对单窗口、纵向相邻两窗口、横向相对两窗口、横纵向四窗口、纵向相邻三窗口及横纵向六窗口的羽流火焰及其融合行为进行数值模拟研究.在每个窗口的中心位置设置热电偶,并布置横向温度切片. Seigel L G 等通过试验对比发现,以 540℃等温面确定羽流火焰形状与试验结果相符合.因此笔者采用 540℃等温面确定羽流火焰高度,以火源所在窗口的中性层作为羽流火焰底部^[9].考虑到仅以火焰高度作为火灾危害判断依据具有片面性,笔者将 $T = 540\text{℃}$ 、 $T_1 = 350\text{℃}$ 及 $T_2 = 250\text{℃}$ 定义为危险温度,与之对应的高度即为危险温度高度.其中: T 为羽流火焰高度的判断温度、 T_1 为常用建筑外墙保温材料聚苯乙烯泡沫的点燃温度、 T_2 为普通窗口玻璃破碎的极限温度.

建筑模型如图 1 所示.已有研究表明,网格尺寸的划分与模拟精度成正比.并且,当网格尺寸小于 $0.1D^*$ 时(D^* 为火源特征直径^[10]),PyroSim 软件能够很好地模拟火灾的温度分布情况.因此,网格尺寸设置为 $0.25\text{ m} \times 0.25\text{ m} \times 0.25\text{ m}$,能够满足精度要求.表达式为

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

(1)

式中: Q^* 为火源热释放速率; ρ_0 为空气密度;
 c_0 为空气比热容; T_0 为室内温度; g 为重力
加速度.

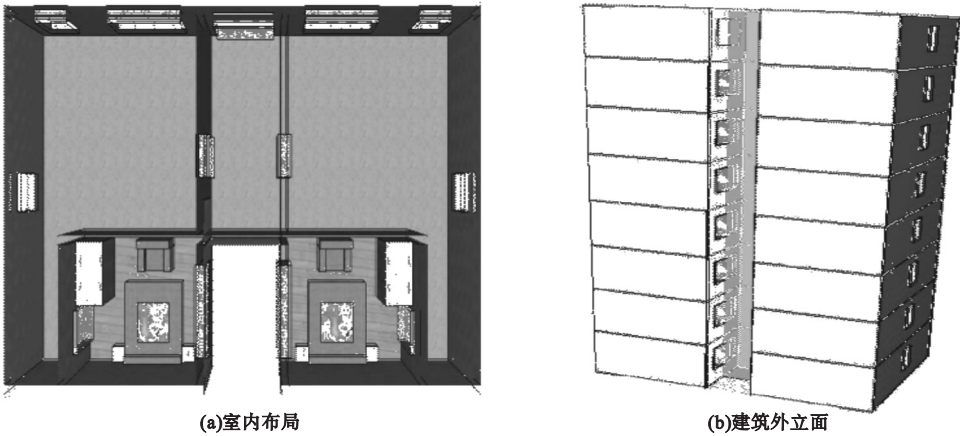


图1 建筑模型
Fig.1 Building model

1.2 热释放速率

热释放速率作为火源释放热量的能力,表示了火源释放热量的大小及快慢^[11],取值见表1. 根据文献[12]的要求,文中所涉及火灾类型属于无喷淋设备的客房,因此热释放速率为6 MW. 在通风受限条件下,当室内热释放速率超过通风因子时,火灾发展至通风限制阶段,进而形成窗口羽流火焰^[13-15]. 通过计算可以得知,笔者所设置的窗口尺寸及火源热释放速率能够形成窗口羽流火焰. 表达式为

$$Q^* > 1\,500\,A\sqrt{H}.$$
 (2)

式中: A 为窗口面积, m^2 ; H 为窗口高度, m .

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/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

根据目前对火灾发展的认识,热释放速

率曲线的确定通常采用稳态与非稳态两种假设方式. 其中稳态假设,即在火灾发展的全过程中,热释放速率始终保持不变,显然这一假设并不适用于文中的模拟需要. 而非稳态的 t^2 模型能够真实体现火灾的发展过程^[16]. 表达式为

$$Q^* = \alpha t^2, \quad 0 \leq t \leq t_1.$$
 (2)

式中: α 为火灾增长系数, kW/s^2 ; t 为火灾发展时间, s ; t_1 为达到最大火源热释放速率的时间, s .

火灾增长系数 α 是衡量火灾发展速度的重要参数,取值见表2^[17]. 模拟中火灾发展级别为快速火,则火源热释放速率达到6 MW所需时间约为355 s.

对于建筑火灾的研究主要有实体试验及有限元软件模拟两种方式. 小尺寸试验难以模拟真实情况下的火灾特征,全尺寸试验经济投入巨大、危险性高. 而有限元软件模拟则在保证精度的同时,弥补了试验的不足之处. 火灾动态仿真模拟软件 PyroSim 是在 FDS 基础上发展起来的,它以计算流体力学为理论依据,适用于模拟低速和热驱动流的火灾场景,可以准确地模拟火灾温度分布、有毒有害气体浓度分布及火灾烟气流动^[18]. Pyro

表2 排烟、排热标准

Table 2 Standard for smoke and heat venting

火灾增长分级	可燃物种类	火灾增长系数 $\alpha/(\text{kW}\cdot\text{s}^{-2})$	热释放速率达到 1 MW
			所需时间/s
慢速火	粗木条、厚木板等	0.002 931	600
中速火	棉花、聚酯纤维等	0.011 720	300
快速火	塑料、泡沫、纸箱、胶合板等	0.046 890	150
超快火	油池、轻质窗帘、易燃装饰家具等	0.187 600	75

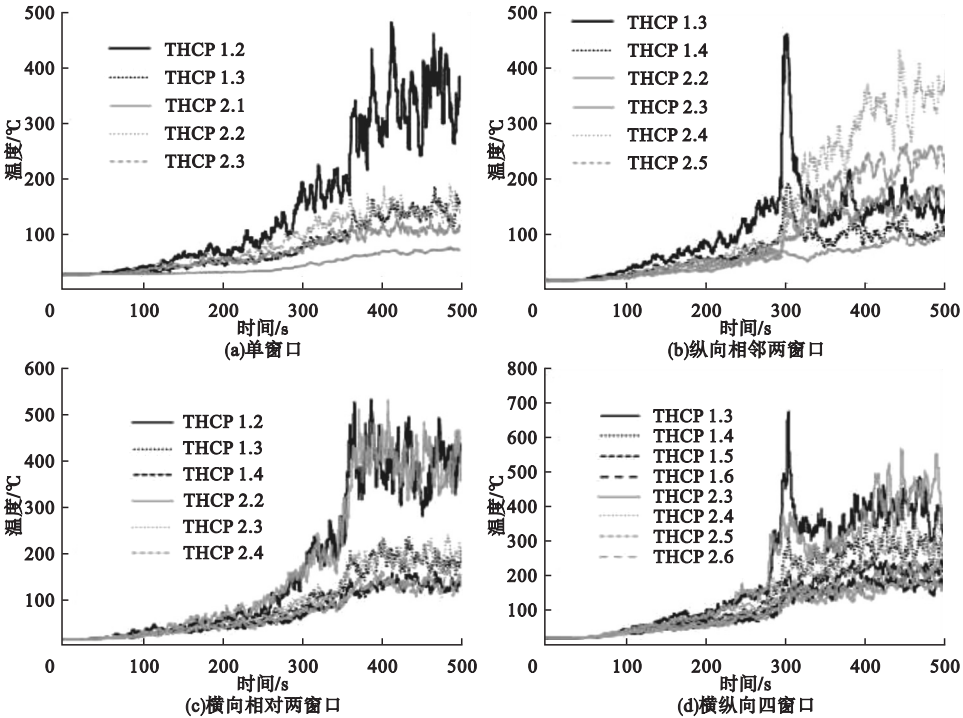
Sim 软件以空气动力学原理为基础运算求解,因此必须保持空间空气的正常流通.根据实际相应建筑火灾发展状态,笔者在两侧墙之间网格边界设置通风口.

2 模拟结果与分析

2.1 温度曲线

高层建筑的外部火蔓延主要有两种方式:一种方式是窗口羽流火焰的高温导致上层窗口玻璃破碎,进而引燃室内物品^[19];另一种方式是窗口羽流火焰引燃高层建筑外墙保温材料^[20].在各窗口中心位置设置热电偶探测设备,收集设备监测到的数据结果,可用以分析危险温度 T_1 和 T_2 的分布情况.通过

对设置在各窗口热电偶所记录数据的整理,得到单窗口、纵向相邻两窗口、横向相对两窗口、横纵向四窗口、纵向相邻三窗口及横纵向六窗口羽流火焰及其融合的窗口温度曲线如图 2 所示.图 2 中 THCP1.2、THCP1.3、THCP1.4、THCP1.5、THCP1.6、THCP1.7、THCP1.8 分别为设置在左侧墙第 2、3、4、5、6、7、8 层窗口的热电偶,THCP2.2、THCP2.3、THCP2.4、THCP2.5、THCP2.6、THCP2.7、THCP2.8 分别为设置在右侧墙第 2、3、4、5、6、7、8 层窗口的热电偶.其中单窗口、纵向相邻两窗口及纵向相邻三窗口的火源都是设置在左侧墙房间内.



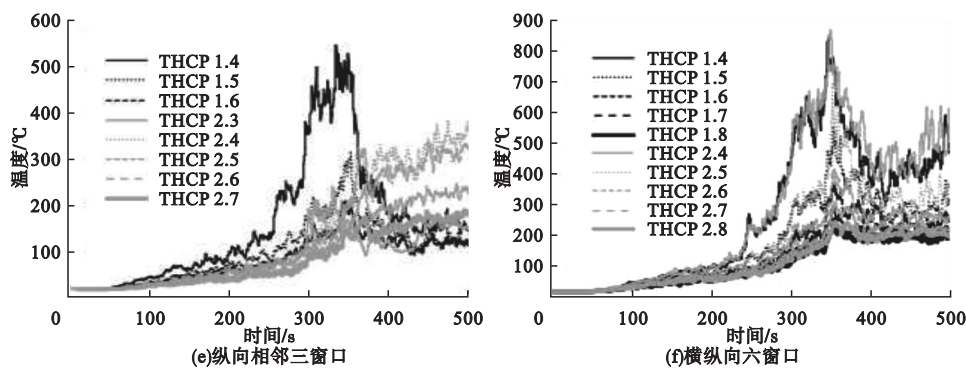


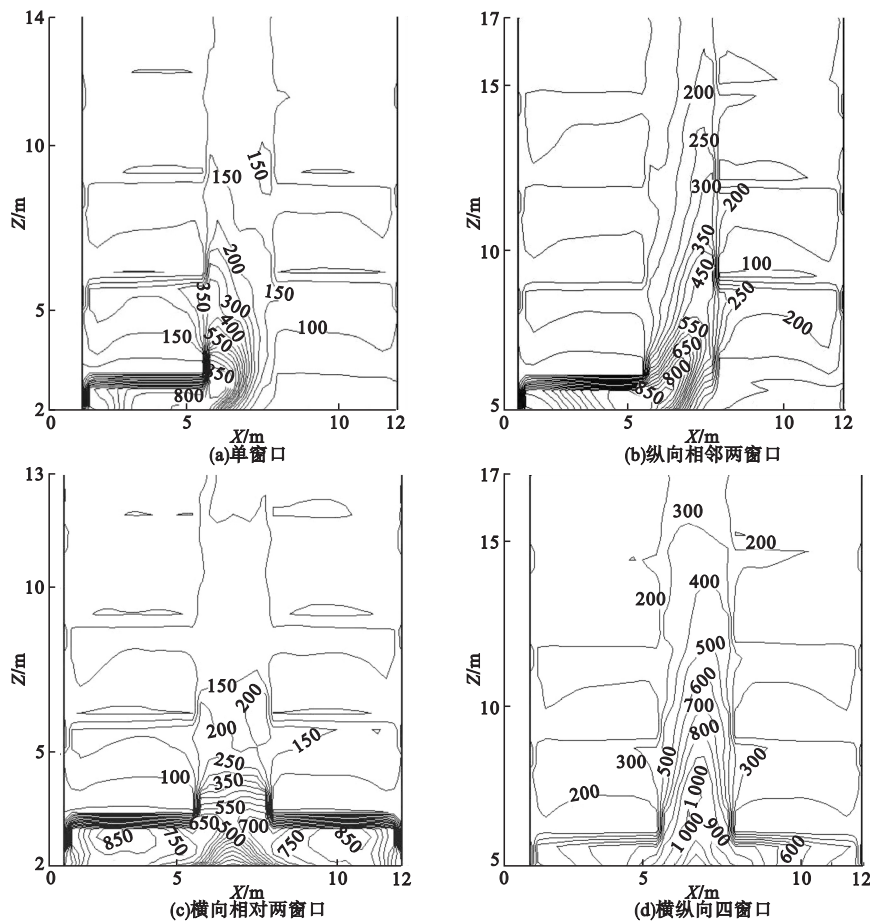
图2 窗口温度曲线

Fig.2 The window temperature curves

2.2 温度等温线

温度切片可以记录轴对称平面上的温度数据,能够直观体现建筑外立面的温度分布情况.将切片数据通过 fds2ascii 及 Tecplot10 等软件整合,得到单窗口、纵向相邻两窗口、横向相对两窗口、横纵向四窗口、纵向相邻三窗口及横纵向六窗口的羽流火焰及其融合的

温度分布等温线如图3所示.图中横纵坐标对应方向距离,等温线数据为温度分布情况.因羽流火焰温度从内到外呈现梯度分布,且考虑到 T_1 和 T_2 的影响范围在建筑外墙保温材料 and 窗口玻璃,其高度需要结合窗口温度曲线和等温线两组数据确定.



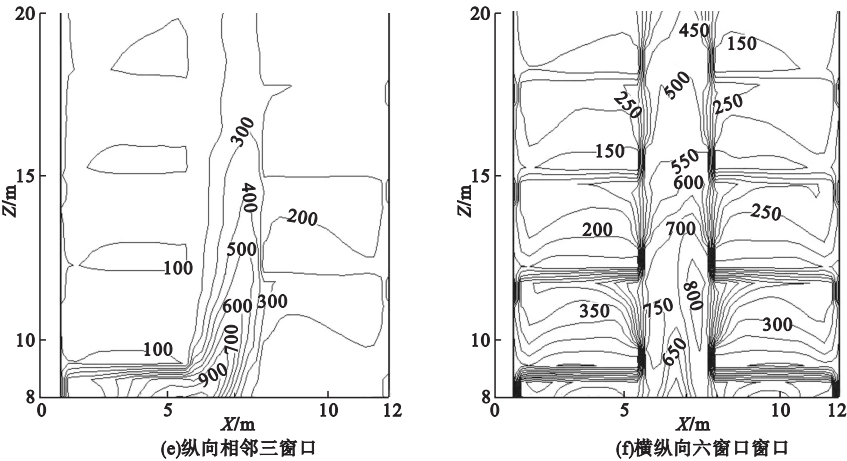


图3 等温线

Fig. 3 The isotherms

2.3 结果分析

- (1)单窗口条件下, T 高度达到2.45 m;左侧墙 T_1 高度达到4.1 m, T_2 高度达到5.1 m;右侧墙未受到左侧窗口羽流火焰影响。
- (2)纵向相邻两窗口条件下, T 高度达到2.75 m;左侧墙 T_1 高度达到4.2 m, T_2 高度达到5.4 m;右侧墙 T_1 高度达到4.15 m, T_2 高度达到6.25 m。
- (3)横向相对两窗口条件下, T 高度达到1.75 m;左侧墙 T_1 高度达到4.2 m, T_2 高度达到5.4 m;右侧墙 T_1 高度达到4.2 m, T_2 高度达到5.4 m。
- (4)横纵向四窗口条件下, T 高度达到6.75 m;左侧墙 T_1 高度达到5.0 m, T_2 高度达到9.25 m;右侧墙 T_1 高度达到6.25 m, T_2 高度达到9.15 m。
- (5)纵向相邻三窗口条件下, T 高度达到4.25 m;左侧墙 T_1 高度达到5.25 m, T_2 高度达到7.5 m;右侧墙 T_1 高度达到3.15 m, T_2 高度达到7.5 m。
- (6)横纵向六窗口条件下, T 高度达到7.75 m;左侧墙 T_1 高度达到8.75 m, T_2 高度达到14.8 m;右侧墙 T_1 高度达到10.45 m, T_2 高度达到14.9 m。

3 结 论

- (1)侧墙的存在阻隔了羽流火焰从窗口正面及两侧卷吸空气的能力,对窗口上方卷吸空气能力增强,由此产生烟囱效应。单窗口、横向相对两窗口及纵向相邻两窗口的羽流火焰向上卷吸空气的强度不足,其他方向卷吸空气能力又受到限制,因此羽流火焰未互相融合,这三种工况下的危险温度高度相似;横纵向四窗口、纵向相邻三窗口及横纵向六窗口的羽流火焰向上卷吸空气能力足以造成羽流火焰相互融合,烟囱效应与羽流火焰融合的共同作用使危险温度高度提高了4~9 m;单侧纵向多窗口羽流火焰的危险温度能够影响到对向侧墙的外立面,点燃其外墙保温材料、烧碎窗口玻璃,导致火蔓延更加立体。
- (2)同类型高层建筑室内应设置防火门窗,延缓火灾的内部蔓延,控制横纵向多窗口羽流火焰的产生;侧墙长度不宜过大,减小烟囱效应的影响;增加侧墙间距,防止火灾从外部蔓延至对面侧墙。

参考文献

[1] 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.)
- [2] 亓延军, 崔崧, 赵艳萍, 等. 窗口溢流火焰燃烧试验与数值模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(5): 144–148.
- (QI Yanjun, CUI Yu, ZHAO Yanping, et al. Numerical simulation as well as experimental study of burning flames pushing out from the building openings[J]. Journal of safety and environment, 2011, 11(5): 144–148.)
- [3] 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.)
- [4] 李建涛, 闫维纲, 朱红亚, 等. 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, 21(4): 167–173.
- (LI Jiantao, YAN Weigang, ZHU Hongya, et al. Numerical simulation on the fire spread in high-rise buildings with U-shaped outside-facade structure [J]. Fire safety science, 2012, 21(4): 174–180.)
- [5] SEIGEL L G. The projection of flames from burning buildings[J]. Fire technology, 1969, 5(1): 43–51.
- [6] THOMAS P H, LAW M. The projection of flames from buildings on fire[J]. Fire prevention science and technology, 1972(10): 19–26.
- [7] OLESZKIEWICZ I. Heat transfer from a window plume to a building facade[J]. Collected papers in heat transfer, 1989(5): 75–86.
- [8] 安伟光. PS 建筑外墙保温材料燃烧及火蔓延行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- (AN Weiguang. Investigation of combustion and flame spread behaviors of PS insulation materials applying to building exterior wall [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.)
- [9] 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.)
- [10] 李俊梅, 赵德朝, 李炎峰, 等. 阳台喷射羽流热动力特性的数值模拟研究[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(12): 1278–1282.
- (LI Junmei, ZHAO Dechao, LI Yanfeng, et al. Numerical studies on thermal aerodynamics of balcony spill plumes[J]. Journal of Beijing university of technology, 2007, 33(12): 1278–1282.)
- [11] 王金平, 朱江. 常用建筑材料及家具的热值及其火荷载密度的确定[J]. 建筑科学, 2009, 25(5): 70–72.
- (WANG Jinping, ZHU Jiang. Heat value of commonly-used building materials and furniture and calculation of fire load density [J]. Building science, 2009, 25(5): 70–72.)
- [12] 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: GDJ08-88—2006 [S]. Shanghai: Shanghai Construction and Transportation Committee, 2006.)
- [13] 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.
- [14] LEE Y P. Heat fluxes and flame heights in external facade fires [D]. Northern Ireland: University of Ulster, 2006.
- [15] 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.
- [16] 王志刚, 倪照鹏, 王宗存, 等. 设计火灾时火灾热释放速率曲线的确定[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(增刊1): 50–54.
- (WANG Zhigang, NI Zhaopeng, WANG Zongcun, et al. Determination of heat release rate curve when designing [J]. Journal of safety and environment, 2004, 4(S1): 50–54.)
- [17] NFPA 204. Standard for Smoke and Heat Venting[S]. Quincy: National Fire Protection Association, 2002.
- [18] 毕然. 钢筋混凝土框架结构耐火性能全过程数值模拟[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
- (BI Ran. Numerical simulation of the whole process of the fire resistance of reinforced concrete frame structure [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 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] 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.)