

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.08.007

建筑外立面水平分隔物下方的开口溢流火焰长度分析

阳 东^{1a,1b}, 赵 聪^{1a}, 郭源浩^{1a}, 蒋亚强²

(1.重庆大学 a.低碳绿色建筑国际联合研究中心;b.三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045;
2.公安部四川消防研究所,成都 610036)

摘 要:在不同房间火源功率与开口尺寸条件下,研究了水平分隔物对开口溢流火焰结构的影响。通过图像处理的方法对实验获得的溢流火焰视频图像进行了捕捉和量化。利用实验与理论分析相结合的方法,建立了描述水平分隔物下方溢流火焰流动与燃烧状况的数学模型,并确定了水平分隔物下方溢流火焰的质量卷吸系数约为 0.12,而其燃烧过剩空气系数约为 3.7。基于研究确定的燃烧与流动关键参数,获得了水平分隔物下方溢流火焰长度的预测公式,可为水平分隔物尺寸的确定提供参考依据。

关键词:开口溢流火焰;水平分隔物;火焰传播速度;火焰长度;外立面燃烧;消防工程;火灾防控系统

中图分类号:X928.7;TF055 文献标志码:A 文章编号:1000-582X(2014)08-046-07

Analysis on the lengths of spill flame under a horizontal projection at the building façade

YANG Dong^{1a,1b}, ZHAO Cong^{1a}, GUO Yuanhao^{1a}, JIANG Yaqiang²

(1a. National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings;

1b. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Sichuan Fire Research Institute of Ministry of Public Security, Chengdu 610036, China)

Abstract: The effects of heat release rate and opening size on the structure of spill flame beneath a horizontal projection are investigated. The lengths of the spill flame are obtained from digital videos combined with an image processing method. The theoretical model that describes the flow and combustion dynamics of spill flame under a horizontal projection is established. The air entrainment coefficient and the excess air ratio are determined by combing the theoretical model and the measured temperatures, which are about 0.12 and 3.7, respectively. The prediction formula for the flame length under a horizontal projection is thus obtained, which provides references for the passive fire prevention design by using horizontal projections.

Key words: opening spill flame; horizontal projection; flame propagation speed; flame length; facade combustion; fire protection; fire control systems

收稿日期:2014-04-08

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(cstc2011jjA00007);国家自然科学基金资助项目(51106189);中央高校基本科研业务费资助项目(106112012CDJZR210015)

作者简介:阳东(1982-),男,重庆大学副教授,主要从事建筑环境与消防工程方面的研究,(E-mail)yangdong@cqu.edu.cn。

建筑火灾是造成人员伤亡与财产损失的主要灾害之一^[1-2]。建筑外立面的开口溢流火焰是建筑火灾充分发展以后,未在室内燃尽的可燃成分从房间溢出并在外部持续燃烧所形成的特殊现象。开口溢流火焰是导致建筑火灾竖向蔓延扩大的重要途径。

中国近几年的几次高层建筑特大火灾与开口溢出火焰有很大关系,如:2008年乌鲁木齐德汇国际广场火灾,死亡5人,直接经济损失超过5亿元;2009年元宵节中央电视台北配楼特大火灾,造成了1名消防员牺牲,7人受伤,直接经济损失约为6~7亿元;2010年,上海胶州路的教师公寓特大火灾造成53人死亡。由于开口溢流火焰对于建筑消防安全的重要性,国内外学者对于其形态、温度分布与火焰高度等参数进行了研究^[3-7]。近几年,抑制开口溢流火焰或烟气蔓延的措施也是建筑消防领域关注的热点^[8-12]。其中,不燃材料构成的水平分隔物(如防火挑檐等)是抑制开口溢出火焰及阻隔火灾竖向蔓延的传统手段。《高层民用建筑设计防火规范》对这种被动防火措施的技术参数也作了一定的规定,如,建筑物直通室外的安全出口上方,应设置宽度不小于1m的防火挑檐^[13]。从防火原理上讲,水平分隔物的作用是将溢出未燃气体限制在分隔物下方进行燃烧;当溢出未燃气体在分隔物下方完全燃尽时,火焰不对着火层上方的外立面构成直接影响,其防火性能达到最优(如图1、2所示)。由此可见,确定水平分隔物下方的平均火焰长度对于合理选取分隔物的尺寸至关重要。当水平分隔物长度不小于其下方的平均火焰长度时,可以有效阻隔开口溢出火焰的竖向蔓延。实际燃烧条件下,水平分隔物下方的火焰长度受到包括开口尺寸、火源热释放速率、房间面积与火源面积等因素的影响。然而,现有设计规范对于防火挑檐等分隔物的尺寸参数规定较为笼统,其主要原因是国内外缺乏对挑檐下方火焰行为的研究。

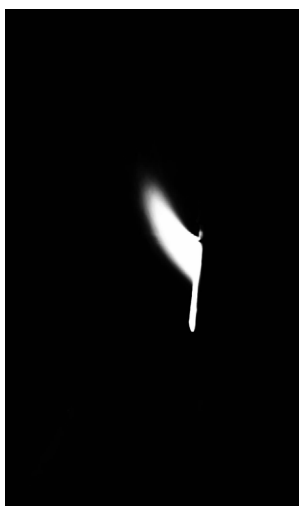


图1 无防火挑檐的溢流火焰形状

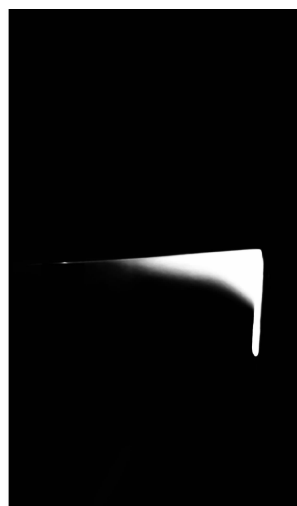


图2 开口上沿加装挑檐对火焰的抑制效果

相对于自由空间的开口溢出火焰,水平分隔物的存在导致其下方可燃气体的流动、卷吸与燃烧特性均发生明显改变,进而使得对火焰结构的定量描述变得更为复杂。笔者设计了小尺寸腔室燃烧实验台,针对水平分隔物下方的开口溢流火焰结构进行了理论分析与实验研究,着重关注开口尺寸与火源热释放速率对于水平分隔物下方溢流火焰平均长度的影响。

1 实验装置及火焰图像表征

1.1 实验装置

本实验为缩尺模型,其比例尺为1:6(见图3)。腔体外部尺寸为1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm,腔体内部尺寸为500 mm×500 mm×500 mm,维护结构为250 mm厚的隔热岩棉板。开口位于中部位置,开口尺寸可以变化。实验自行设计了尺寸为200 mm×200 mm的不锈钢孔板燃烧器模拟火源(见图4),其位于腔体底部的中央,燃烧气体为天然气。水平分隔物



图3 实验装置实拍图

为陶瓷纤维板,位于开口上沿,尺寸为 1 000 mm×1 200 mm(见图 5)。实验采用 2 种不同的窗口尺寸,代表不同的开口通风因子 $A\sqrt{H}$ 。实验中采用涡街燃气流量计(精度:±0.18%)控制和监测总热释放速率。前人的研究^[5]证明室内燃烧产生的热释放速率为 $1\ 500 A\sqrt{H}$ kW。因此,本实验将各工况的总热释放率均控制在 $1\ 500 A\sqrt{H}$ kW 以上,以保证火焰能够溢出到开口以外。各实验工况的窗口尺寸及总热释放速率见表 1。

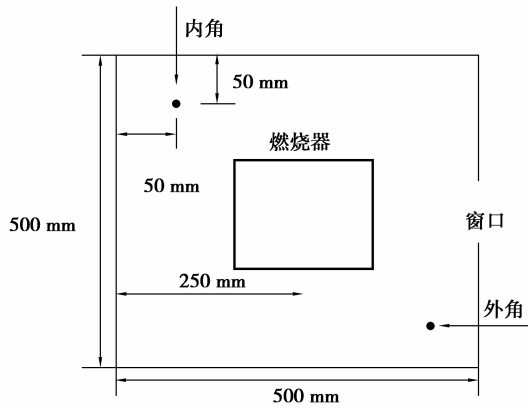


图 4 腔体内部模型和温度测量位置

表 1 实验工况及实验参数表

实验 工况	窗口尺寸		总热释放 速率/kW
	宽/m	高/m	
1	0.15	0.25	30
2	0.15	0.25	40
3	0.15	0.25	50
4	0.20	0.20	30
5	0.20	0.20	40
6	0.20	0.20	50

利用 K 型铠装热电偶(误差 2%)测量腔体内温度以及水平遮挡物下方火焰温度。腔体内的两簇热电偶分别位于腔体内的外角与内角,各热电偶与腔体底部的距离分别为 100,200,300,400 mm,距离两侧墙 50 mm(见图 5)。水平分隔物下方有 15 根热电偶,热电偶间的水平间距为 50 mm;起始热电偶距离开口 5 mm,热电偶整体呈水平直线分布且保证淹没在火焰内部。图 6 给出了水平分隔物下方与开口不同水平距离处的温度。温度沿火焰传播方向明显变化,据此可以推算出燃烧的过剩空气系数,将在第 2 节中作详细分析。

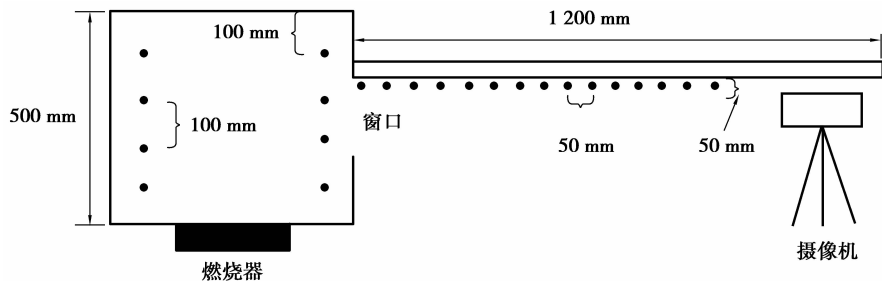


图 5 腔体外部模型和温度测量位置

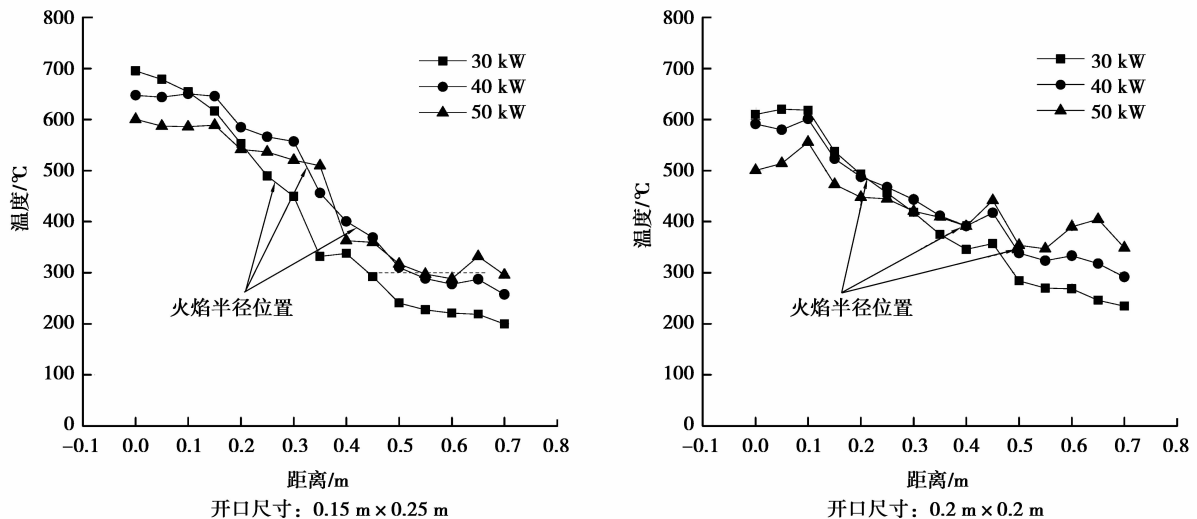


图 6 水平分隔物下方火焰温度

1.2 溢流火焰图像表征

采用数码摄像机采集开口溢流火焰图像。数码摄像机每秒拍摄 50 帧,图像像素为 $1\,920 \times 1\,080$ 。在不同实验工况下,连续记录并获取火焰图像,利用图像处理技术将火焰图像转换成灰度图和黑白图,并将灰度图进行二值化处理。将 500 幅连续的灰度图进行平均处理,获得如图 2 所示的火焰结构图。根据 Audouin 的方法^[14],认为出现概率为 0.5 以上的区域为火焰区。表 2 给出了在水平分隔物作用下溢流火焰在水平方向上的长度。可以看出,热释放速率与开口尺寸是影响火焰平均长度的重要因素。

2 理论分析

2.1 水平分隔物下方火焰形状的假设

首先对水平分隔物下方的火焰形状作合理的假设,以便对其建立数学模型。Babrauskas^[15]提出了 3 种火焰撞击顶棚以后在顶棚下方可能形成的几何形状。根据实验观察,并结合 Babrauskas 对于顶棚下方火焰的形状假设条件,本研究认为在水平分隔物的限制下,从开口溢出的火焰近似呈现径向蔓延,其基本结构如图 7 所示。

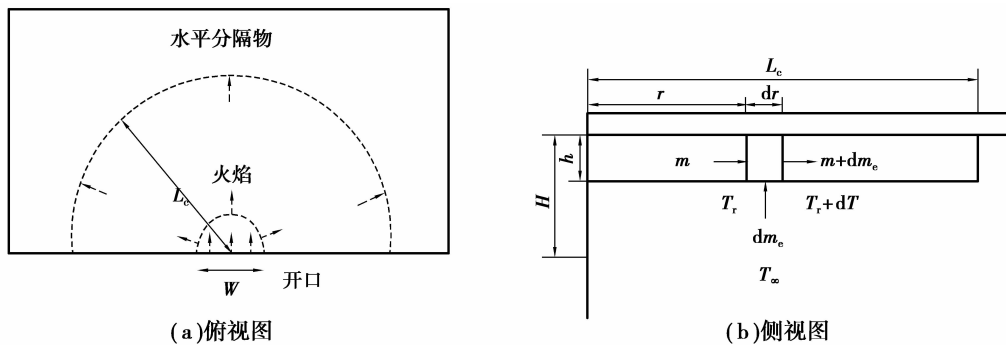


图 7 水平分隔物下的溢流火焰形状假设

2.2 腔体内外热释放速率

具有开口的腔体的总热释放速率可以分成两部分:一部分是在腔体内燃烧释放的热量为 \dot{Q}_{inside} ;另一部分是由于进入的空气量不足而在腔体外消耗的热量为 \dot{Q}_{ex} 。前人的研究^[4-5]给出了从开口进入腔体的空气量与开口尺寸的关系

$$\dot{m}_a = 0.133 \rho_\infty A \sqrt{gH} = 0.5A \sqrt{H}, \quad (1)$$

式中: \dot{m}_a 为空气流入速率,kg/s; A 为窗口面积, m^2 ; ρ_∞ 为空气质量, kg/m^3 ; H 为窗口高度,m。

根据开口进入腔体的空气量,可以得出腔体内的热释放速率

$$\dot{Q}_{\text{inside}} = 0.133 \frac{\Delta H_{\text{ox}}}{c_p T_\infty} c_p T_\infty \rho_\infty A \sqrt{gH} = 3\,000 \times 0.5A \sqrt{H} = 1\,500A \sqrt{H}, \quad (2)$$

式中: \dot{Q}_{inside} 为腔体内热释放率,kW; ΔH_{ox} 为腔体内消耗每单位质量空气的热释放率,kJ/kg; T_∞ 为环境温度,K; c_p 为常压下空气比热容。

因此,腔体外的热释放速率

$$\dot{Q}_{\text{ex}} = \dot{Q} - \dot{Q}_{\text{inside}} = \dot{m}_f \Delta H_f - \dot{Q}_{\text{inside}}, \quad (3)$$

式中: \dot{Q} 为总热释放速率,kW; \dot{m}_f 为燃料供应速率,kg/s; ΔH_f 为消耗每单位质量燃料的热释放率,kJ/kg; \dot{Q}_{ex} 为腔体外的热释放率,kW。

2.3 火焰在水平分隔物下方传播速度

室内未消耗的气体可燃物从开口溢出以后,卷吸室外空气并再次燃烧。与自由空间的溢出火焰不同的

是:1)水平分隔物的约束作用使得火焰在水平方向上沿径向蔓延;2)在温差与燃烧反应共同的作用下,溢出火焰仅通过下表面卷吸空气(见图 7)。因此,溢出火焰在水平发展过程中,可燃气体质量流率减少,燃烧产物质量流率增加,溢流横截面积增大。上述因素均导致火焰传播速度沿程变化。

火焰传播速度在径向上的变化受到卷吸量与火焰横截面积变化的综合影响,在截面上的平均速度可表示为

$$v = \frac{\dot{m}_e + \dot{m}_f + \dot{m}_a}{\rho_T \pi r h} = \frac{\int_0^r \rho_\infty k_e v \pi r dr + \dot{m}_f + \dot{m}_a}{\rho_T \pi r h}, \quad (4)$$

式中: v 为火焰径向传播速度, m/s; \dot{m}_e 为卷吸空气质量流量, kg/m³; ρ_T 为出口溢流火焰密度, kg/m³; h 为中性面与窗口上沿距离, m; r 为火焰半径长度, m; k_e 为卷吸系数。

对式(4)进行求解,并结合溢流出口径向蔓延起始点的边界条件

$$v \Big|_{r=w/2} = \frac{\dot{m}_f + \dot{m}_a}{\rho_T h \pi \frac{w}{2}}, \quad (5)$$

式中 w 为窗口宽度, m。

径向蔓延速度可表示为:

$$v = \exp\left(\frac{\rho_a k_e}{\rho_T h} \left(r - \frac{w}{2}\right)\right) \frac{1}{r} \frac{\dot{m}_f + \dot{m}_a}{\rho_T h \pi}. \quad (6)$$

值得注意的是,分隔物下方火焰对空气的卷吸量受到浮力差与燃烧的共同作用。根据式(6),并结合火焰长度末端的边界条件

$$v \Big|_{r=L_c} = \frac{ns \dot{m}_{ex}/Y + \dot{m}_f + \dot{m}_a}{\rho_T h \pi L_c} = \exp\left(\frac{\rho_a k_e}{\rho_T h} \left(L_c - \frac{w}{2}\right)\right) \frac{1}{L_c} \frac{\dot{m}_f + \dot{m}_a}{\rho_T h \pi}, \quad (7)$$

式中: n 为过剩空气系数; s 为天然气燃烧化学当量比; Y 为氧气占空气质量百分数; \dot{m}_{ex} 为剩余可燃气体质量流量, kg/s。

可得到卷吸系数 k_e 与火焰长度 L_c 的关系

$$k_e = \ln \left[\frac{ns \dot{m}_{ex}}{Y(\dot{m}_f + \dot{m}_a)} + 1 \right] \frac{\rho_T h}{\rho_a \left(L_c - \frac{w}{2}\right)} = \text{fun}(n), \quad (8)$$

式中 L_c 为火焰长度, m。

2.4 溢流火焰燃烧的过剩空气系数

虽然前人对开放空间溢流的卷吸系数与过剩空气系数等的取值有过一定研讨^[7],但是未对水平分隔物下方火焰的相关参数作深入研究。水平分隔物下方溢出火焰的过剩空气系数 n 与卷吸空气系数 k_e 的确定方法如下所示。

若溢流火焰燃烧完全,针对图 7(b)的微元体建立能量守恒关系

$$T_r C_p \dot{m} + T_\infty C_p d \dot{m}_e + d \dot{m}_e \frac{Y}{ns} \Delta h_f = C_p (T_r + dT) (\dot{m} + d \dot{m}_e), \quad (9)$$

式中: T_r 为距离开口 r 位置处的火焰温度, K; \dot{m} 为某一位置的质量流量, kg/s。

将式(9)整理成如下:

$$\dot{m} = C / \left((T_r - T_\infty) - \frac{Y}{ns C_p} \Delta h_f \right), \quad (10)$$

式中: T_∞ 为环境温度, K; C 为积分常数。

结合溢流出口径向蔓延起始点的边界条件

$$\dot{m} \Big|_{r=0} = C / \left((T_r - T_\infty) - \frac{Y}{ns C_p} \Delta h_f \right) = \dot{m}_f + \dot{m}_a. \quad (11)$$

得到不同位置处质量流量 \dot{m} 与温差 ΔT 、过剩空气系数 n 的关系

$$\dot{m} = (\dot{m}_f + \dot{m}_a) \left((T_1 - T_\infty) - \frac{Y}{nsC_p} \Delta h_f \right) / \left((T_r - T_\infty) - \frac{Y}{nsC_p} \Delta h_f \right) = fun(\Delta T, n), \quad (12)$$

式中, T_1 为火焰起始温度,K。

同时,根据质量守恒关系,不同位置处的质量流量亦可表示为

$$\dot{m} = fun(n) = \int_0^r \rho_a k_e v \pi r dr + \dot{m}_f + \dot{m}_a. \quad (13)$$

图(6)给出了各工况的火焰末端温度,将其代入式(12)可获得火焰末端位置($r=L_c$)处的质量流量与过剩空气系数 n 的关系,再与式(13)联立即可获得各工况的过剩空气系数 n 。最后,利用式(8)可得到应的卷吸系数 k_e 。表2给出了通过该方法所确定的水平分隔物下方溢流火焰的过剩空气系数与卷吸系数。由表2可知,由于过剩空气系数与卷吸系数主要决定于燃烧方式与流动特性,各工况具有相近的过剩空气系数值与卷吸系数值。

表2 实验获取的溢流火焰主要参数

实验工况	实验测量临界半径值/ m	过剩空气系数 n	卷吸空气系数 k_e
1	0.27	3.82	0.11
2	0.31	3.57	0.12
3	0.45	3.17	0.10
4	0.21	4.25	0.13
5	0.42	3.61	0.09
6	0.53	3.58	0.10

2.5 水平分隔物下方火焰半径的理论预测

根据燃烧反应的质量守恒关系,并结合2.4节所确定的火焰卷吸系数与过剩空气系数,可建立如下方程:

$$\frac{ns}{Y} \dot{m}_{ex} = \int_0^{L_c} \rho_a k_e v \pi r dr. \quad (14)$$

将实验中确定的各工况的平均过剩空气系数 $n=3.7$ 与平均空气卷吸系数 $k_e=0.12$ 代入式(6),可得径向蔓延速度 v 的表达式,再将径向蔓延速度 v 代入式(14)中,可得式(15):

$$\frac{3.7s}{Y} \dot{m}_{ex} = \int_0^{L_c} 0.12 \rho_a \exp\left(\frac{0.12 \rho_a}{\rho_T h} \left(r - \frac{w}{2}\right)\right) \frac{1}{r} \frac{\dot{m}_f + \dot{m}_a}{\rho_T h \pi} \pi r dr. \quad (15)$$

根据式(15),水平分隔物下方火焰半径可量化为

$$L_c = \frac{\rho_T h}{0.12 \rho_a} \ln \left[\frac{3.7 s \dot{m}_{ex}}{(\dot{m}_f + \dot{m}_a) Y} + \exp\left(-\frac{0.06 \rho_a w}{\rho_T h}\right) \right] + \frac{w}{2}. \quad (16)$$

由此,可以确定,能够将开口溢出火焰完全限制在水平分隔物下方的分隔物长度为

$$L_p \geq L_c. \quad (17)$$

3 结论

水平分隔物对于建筑外立面溢出火焰引起的火灾竖向蔓延具有抑制作用。燃烧总热释放速率与建筑开口尺寸被证明是影响水平分隔物下方火焰长度的重要因素。笔者通过实验与理论分析相结合的办法,获得了水平分隔物下方溢流火焰的质量卷吸系数与过剩空气系数等参数,并由此获得了分隔物下方溢流火焰的理论预测公式。实验结果有助于开口溢流火焰动力学基础数据的积累,而提出的分隔物下方溢流火焰长度模型引入燃料供应质量流率与建筑开口尺寸作为自变量,为外立面被动防火构件的设计选型提供了参考。

参考文献:

- [1] 王厚华,熊杰,胡洋. 建筑火灾温度的场网复合模拟[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2009,32(4):447-452.
WANG Houhua,XIONG Jie,HU Yang. Hybrid field-network simulation of temperature in a building fire[J]. Journal of Chongqing University,2009,32(4):447-452.
- [2] Shi W X, Ji J, Sun J H, et al. Experimental study on influence of stack effect on fire in the compartment adjacent to stairwell of high rise building [J]. Journal of Civil Engineering and Management,2014,20(1):121-131.
- [3] Yokoi S. Study on the prevention of fire-spread caused by hot upward current[M]. Building Research Institute, Ministry of Construction,1960.
- [4] Lee Y P, Delichatsios M A, Ohmiya Y. The physics of the outflow from the opening of an enclosure fire and re-examination of Yokoi's correlation[J]. Fire Safety Journal,2012,49:82-88.
- [5] 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.
- [6] Tang F, Hu L H, Delichatsios M A, et al. Experimental study on flame height and temperature profile of buoyant window spill plume from an under-ventilated compartment fire[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2012,55(1):93-101.
- [7] Himoto K, Tsuchihashi T, Tanaka Y, et al. Modeling the trajectory of window flames with regard to flow attachment to the adjacent wall [J]. Fire Safety Journal,2009,44(2):250-258.
- [8] Xing X F, Zhang J Y, Li Y F. A computational study on structural barrier to vertical spread of window spill plume along building exterior facade [J]. Procedia Engineering,2013,52:475-482.
- [9] Wang Y, Wu Y, Wang Q S, et al. Numerical study on fire response of glass facades in different installation forms[J]. Construction and Building Materials,2014,61:172-180.
- [10] Chow C L. Numerical studies on smoke spread in the cavity of a double-skin façade[J]. Journal of Civil Engineering and Management,2011,17(3):371-392.
- [11] 庄蕊. 窗槛墙和防火挑檐对外墙火灾蔓延影响分析[J]. 消防科学与技术,2011,30(8):686-689.
ZHUANG Rui. Analysis on the influence of windowsill wall and fire canopy to exterior wall fire spreading[J]. Fire Science and Technology,2011,30(8):686-689.
- [12] 赵楠,张靖岩,邢雪飞,等. 室外风下建筑外立面火溢流阻隔技术研究[J]. 消防科学与技术,2013,32(10):1079-1082.
ZHAO Nan,ZHANG Jingyan,XING Xuefei, et al. Study on structural barrier to vertical spread of window spill plume along building exterior facade under external wind[J]. Fire Science and Technology,2013,32(10):1079-1082.
- [13] 国家技术监督局,中华人民共和国建设部. GB50045—95 高层民用建筑设计防火规范(2005 版)[S]. 北京:建设标准定额研究所,2005.
- [14] Audouin L, Kolb G, Torero J L, et al. Average center line temperatures of a buoyant pool fire obtained by image processing of video recordings [J]. Fire safety journal,1995,24(2):167-187.
- [15] Babrauskas V. Flame lengths under ceilings [J]. Fire and Materials,1980,4(3):119-126.

(编辑 郑 洁)