

侧向风作用下上悬窗腔室火灾室内温度分布与 转折临界研究

谭欣龙, 张晓磊, 孙协鹏, 唐 飞

(中国科学技术大学火灾安全全国重点实验室, 合肥 230026)

摘要: 外立面上悬窗这一窗户类型因安全性能佳以及防雨被众多城市建筑选择。前人对无风以及正向风作用下的上悬窗腔室火灾进行了研究, 但是现实中也会存在侧向风, 侧向风相较正向风而言显著区别主要体现在正向风情况下腔室内部背风侧温度和迎风侧温度对称分布, 同一高度处背风侧与迎风侧没有明显温度差, 而侧向风作用下腔室内部同一高度处迎风侧和背风侧存在显著温度差异, 因此有必要研究侧向风作用下上悬窗腔室火灾行为规律。本文利用 1:8 比例的缩尺寸实验台, 研究了不同环境风速、开口尺寸、开窗角度条件下腔室火灾室内温度分布与转折行为。结果表明, 腔室内部火焰随着热释放速率的增加从迎风侧移动到背风侧, 同一高度室内温度从迎风侧温度高于背风侧, 转变为背风侧温度高于迎风侧温度。把腔室内部背风侧温度高于迎风侧温度时的热释放速率定义为临界热释放速率, 临界热释放速率随着侧向风速的增加而减小, 随着开窗角度的增大而增大。这种转变是由于热浮力与侧向风的惯性力互相竞争而导致的, 基于两者的耦合作用机制分析, 推导了侧向风作用下表征温度转折临界热释放速率的特征长度 \bar{l} , 建立了室内温度转折临界热释放速率与新定义的弗劳德数之间的关系模型。

关键词: 上悬窗; 侧向风; 腔室火灾; 室内温度; 临界转折

中图分类号: TU998.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2026)01-0019-10

Temperature Profile and Transition Behavior Inside Fire Compartment with a Top-Hung Window Under the Effect of Lateral Wind

Tan Xinlong, Zhang Xiaolei, Sun Xiepeng, Tang Fei

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Top-hung windows are a type of window favored by many urban buildings due to their safety and rain protection. Previous studies have been carried out on the compartment fire behaviors with a top-hung window under no wind or facing wind. However, there is lateral wind (parallel to the facade) in reality. The significant difference between lateral wind and facing wind is that for facing wind, there is no obvious temperature difference between the leeward side and the windward side at the same height. However, for lateral wind, there is a significant temperature difference between the windward side and the leeward side at the same height in the compartment. So, it is necessary to study the fire behavior of the top-hung window compartment under the action of lateral wind. In this paper, the temperature evolution and tran-

收稿日期: 2025-05-26.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2024YFC3014702); 国家自然科学基金资助项目(52276140); 统筹推进世界一流大学和一流学科建设专项资金资助项目(YD2320002007).

作者简介: 谭欣龙(2000—), 男, 硕士研究生, txlad@mail.ustc.edu.cn.

通信作者: 张晓磊, 男, 博士, 副教授, zxlejc@ustc.edu.cn.

sition behavior inside the compartment under various opening sizes, window opening angles and lateral wind velocities are studied by using a 1:8 scale compartment. The results show that with the increase of the heat release rate, the flame inside the compartment moves from the windward side to the leeward side, and the temperature inside the compartment changes accordingly. The temperature of the windward side is higher than that of the leeward side at first, and after the transition, the temperature of the leeward side is higher than that of the windward side. The critical heat release rate for the temperature transition decreases with the increase of the lateral wind speed and it increases with the increase of the window opening angle. This transition is interpreted based on the analysis of the coupling effects of heat buoyancy and the lateral wind inertial force. A characteristic length \tilde{l} is derived, and a model for the critical heat release rate is proposed based on the characteristic length and a newly derived wind Froude number.

Keywords: top-hung window; lateral wind; compartment fire; gas temperature inside compartment; critical transition

室内温度是腔室火灾的重要参数。在无风状态下,腔室内部可燃物发生燃烧,在热浮力作用下,腔室内部未燃气体从开口上方流出,在腔室外部燃烧,由于压力差,腔室外的冷空气通过开口下部进入腔室。现实生活中的建筑火灾,往往受到外界环境风的影响,改变腔室火灾演化规律。

针对腔室火灾室内温度,国内外学者开展了大量的研究工作。McCaffrey、Quintiere 和 Harkleroad^[1]建立了燃料控制阶段(火焰未溢出至室外)室内温度预测的 M-Q-H 模型;Foote、Pagni 等^[2]在 Quintiere 等提出模型的基础上,建立了强制通风条件下的室内温度分布模型;Delichatsios 和 Lee^[3-7]提出了经典的中性面虚拟矩形火源的理论模型,提出了室内温度的计算新方法;Tang 等^[8]开展了通风控制条件下(火焰溢出至室外)室内温度的实验研究,提出了室内温度与开口因子的关系模型。近年来,国内外学者开展了环境风作用下腔室火灾演化规律研究,Himoto 等^[9]揭示了环境风作用下腔室火灾室内温度分布规律;任飞等^[10-13]研究了正向风作用下腔室内部火灾演化及转折临界行为,揭示了火焰溢出临界热释放速率随风速的变化规律;Sun 等^[14]进一步建立了侧向风作用下自由开口腔室火灾室内温度转折模型。

前人对于腔室火灾室内温度的研究,主要以完全打开的自由开口为主,没有考虑到现实生活中更为常见的悬窗开口,如图 1 所示。根据《中国上悬窗行业市场现状及未来发展趋势与投资战略研究报告》^[15]显示,得益于新兴经济体快速的城市化进程以及发达国家对既有建筑进行绿色改造的需求增加,预计到 2027 年全球上悬窗市场规模达到 60 亿美元。但是上悬窗对于火灾演化的影响机制研究还有待完善,最近,杨勇等^[16-17]研究了无风及正向风作用下上悬窗腔

室火灾室内温度的演化规律,并提出了无风状态下腔室火灾室内温升模型,但并未涉及实际火灾场景中可能存在的侧向风作用。本文利用 1:8 缩尺寸实验台,开展侧向风作用下上悬窗腔室火灾的室内温度分布规律以及转折临界特征研究,建立表征室内温度转折的临界热释放速率模型,室内温度是衡量火灾风险的重要参数,建立侧向风作用下上悬窗腔室火灾室内温度转折的临界热释放速率模型,为评估建筑火灾风险提供了模型支撑,同时为高层建筑火灾演化预测及防控提供基础。

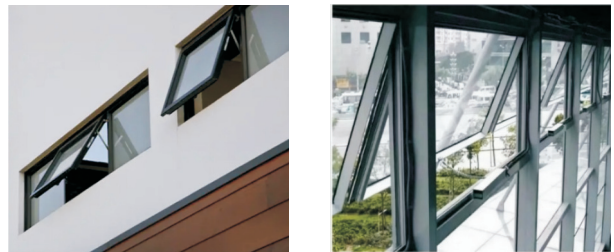


图 1 建筑中的上悬窗

Fig.1 Top-hung windows in the building

1 实验设计

图 2 给出的是 1:8 缩尺寸实验台,包括燃烧腔室和外立面(高 2 m,宽 1.6 m)。该燃烧腔室的外部尺寸为 0.4 m × 0.4 m × 0.4 m,室内壁嵌有 3 mm 厚的陶瓷纤维板,其导热率为 0.18 W/(m · K),比热为 1390 J/(kg · K),腔室内部尺寸为 0.34 m × 0.34 m × 0.34 m。腔室开口可以更换,从而改变开口尺寸,并利用角度调节装置控制开口上方的上悬窗打开角度。将边长为 0.2 m 的方形多孔燃烧器作为火源放置在燃烧室的中央,其顶部上表面与腔室底部在同一表

面上,实验过程中使用丙烷作为燃料.利用精度为 0.01 SLPM,量程为 100 SLPM 的质量流量计来控制供气流量,从而达到控制室内热释放速率的作用.

采用长 72.0 m、高 1.3 m、宽 1.5 m 的风洞提供侧向风,腔室中心距离风洞出口 60 cm,腔室开口与风速方向平行.风洞出口位置设置了 4 个风速探头,用以测量水平侧向风的实时风速,其稳定状态下风速波动小于 5%^[18].图 3 给出的是风洞出口处以及开口处的风速,通过图 3 可以看出,开口处风速与隧道出口处风速二者之间差异不明显,所以利用风洞出口处风速描述侧向风惯性力.腔室内部分别在迎风侧和背风侧布置了两个热电偶树,每个热电偶树上有 4 个直

径为 0.05 mm 的 K 型热电偶,从上往下分别定义为 1、2、3、4,两个热电偶布置在上层,距腔室顶部分别为 5 cm、10 cm,两个布置在下层,距离腔室底部分别为 5 cm、10 cm,本文中定义远离风洞出口位置的热电偶树是背风侧($T_{背风}$, L-1, L-2, L-3, L-4),靠近风洞出口的热电偶树是迎风侧($T_{迎风}$, W-1, W-2, W-3, W-4),热电偶树距离侧壁 5 cm.对于温度测量,选择在室内燃烧达到稳定状态之后进行采样,采样频率为 1 Hz,测量时长共 40 s,将稳定段温度进行算术平均得到每组工况下腔室内不同位置的温度,用于后续分析.

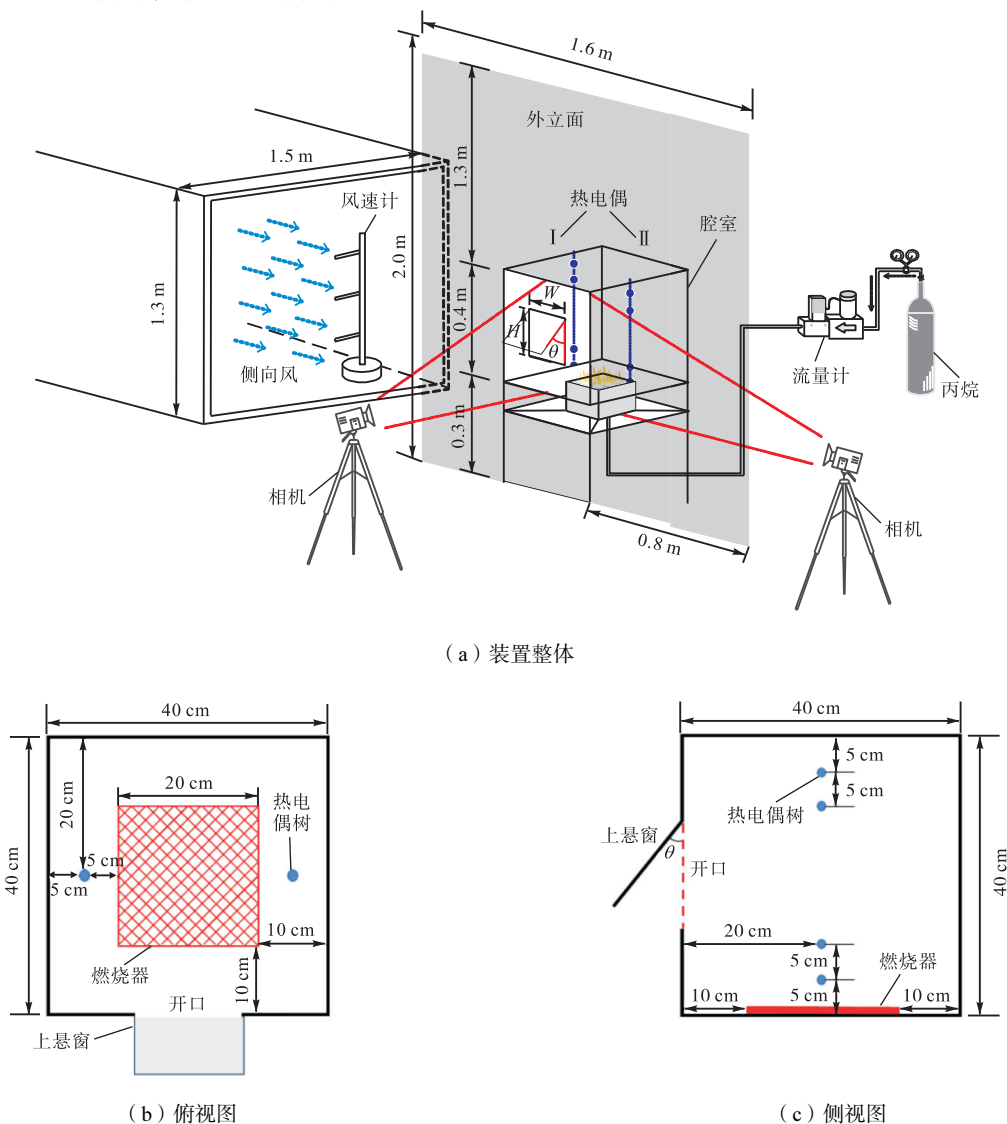


图 2 实验装置示意
Fig.2 Experimental setup

实验工况如表 1 所示,实验所用开口尺寸有两种,根据 GB51251-2017《建筑防烟排烟系统技术标准》以及前人的文章^[19],开窗角度大于等于 60°后,可以认为开口处进气与完全打开时相差不大,所以开

窗角度设置分别为 10°、20°、30°、40°、50°、60°,侧向风风速范围控制在 0~2.0 m/s 之间,以 0.5 m/s 的间隔增加.每种实验工况重复 3 次,平均值用以数据分析,避免实验随机性对实验分析带来的影响.

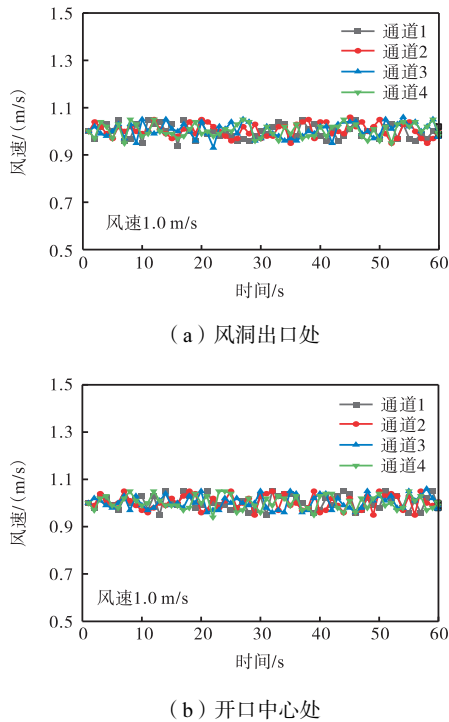


图 3 不同位置处的风速
Fig.3 Wind speed at different locations

表 1 实验工况
Tab.1 Test conditions

开口尺寸 宽度 × 高度/ (cm × cm)	风速 U_w / (m/s)	开口角度 θ / (°)	热释放 速率/kW
20 × 20	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	10, 20, 30, 40, 50, 60	6.16 ~ 46.2
15 × 20	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	10, 20, 30, 40, 50, 60	6.16 ~ 46.2

2 结果与分析

2.1 室内温度分布规律

图 4 所示为腔室内部火焰位置随热释放速率的变化, 开口尺寸为 20 cm × 20 cm, 开口角度为 60°, 侧向风速为 2 m/s. 从图中可以看出侧向风作用下, 腔室内部的火焰最初处在迎风侧, 随着功率的增加, 火焰向背风侧移动, 并发生火焰溢出.

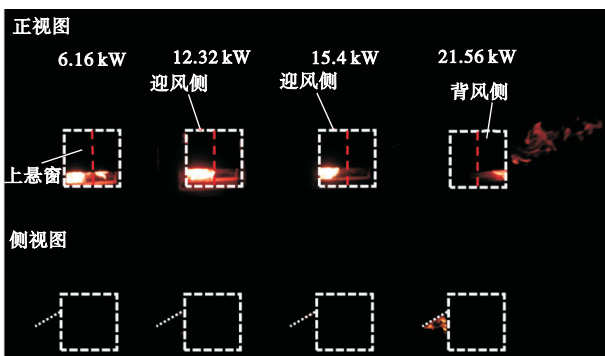


图 4 室内火焰位置随热释放速率的变化
Fig.4 Flame transition with heat release rate

图 5 给出了不同侧向风速下, 腔室内部迎风侧和背风侧温度以及同一高度处, 迎风侧和背风侧的温度差值随热释放速率的变化情况 (开口尺寸: 20 cm × 20 cm, 开口角度: 60°).

随着侧向风速不断增加, 室内迎风侧和背风侧两侧的温度呈现如下的变化规律: 在风速为 0 m/s 的情况下, 迎风侧与背风侧的温度随热释放速率变化的演化趋势一致, 随着热释放速率增加, 腔室内部温度整体先上升达到最大值后缓慢下降, 这是因为腔室燃烧初期, 处于燃料控制状态, 室内温度随着热释放速率的增加而不断升高, 后进入通风控制状态, 氧气不足以维持室内燃料燃烧, 未燃燃料溢出至室外燃烧, 室内温度下降, 这与前人研究结果一致^[20]. 上部温度高于下部, 是由于火羽流撞击顶棚, 从顶部向下扩展导致的.

随着侧向风速的增加, 迎风侧温度随着热释放速率增加先缓慢下降, 直到与背风侧温度相等之时, 发生骤减, 最后一直下降, 背风侧温度随着热释放速率增加先上升达到最大值后逐渐下降. 在小功率条件下, 背风侧的温度低于同一高度下迎风侧的温度, 这是因为此时腔室内部火焰热浮力较弱, 侧向风对室内气体流动循环具有重要影响, 由于侧向风自身的水平动量, 向背风侧运动, 撞击到背风侧墙壁后形成偏转, 改变室内气体流动循环, 火焰受到向迎风侧的动量后偏转集中在迎风侧燃烧, 所以整体上背风侧的温度低于迎风侧. 随着热释放速率的增加, 腔室内部氧气不足以维持燃料完全燃烧, 此时新补入的空气会在背风侧与未燃燃料反应, 背风侧的燃料被消耗, 迎风侧燃料会持续向背风侧移动, 在背风侧形成稳定燃烧, 所以同一高度下背风侧的温度逐渐高于迎风侧的温度.

随着侧向风速不断增加, 室内的最高温度呈现如下的变化规律: 室内的最高温度随着风速的升高, 先上升, 在风速 1 m/s 时达到最大值, 然后随着风速的继续增加而降低. 室内迎风侧与背风侧温度相等前迎风侧温度随风速的变化, 以及室内迎风侧与背风侧温度相等后背风侧温度随风速的变化也体现了这一演化规律. 这是由于风速较低时, 环境风对腔室的燃烧起到补气促流的作用, 风速增加, 补气效果越好, 腔室内火焰燃烧越充分, 最高温度越大. 当风速超过 1 m/s 时, 侧向风从开口进入腔室内部起到冷却作用^[20], 侧向风的补气促流作用不再占据主导地位, 导致腔室内部最高温度随风速逐渐降低.

由此可以看出, 腔室内部存在温度转折临界, 在热释放速率达到转折临界之前, 腔室火焰多集中于迎

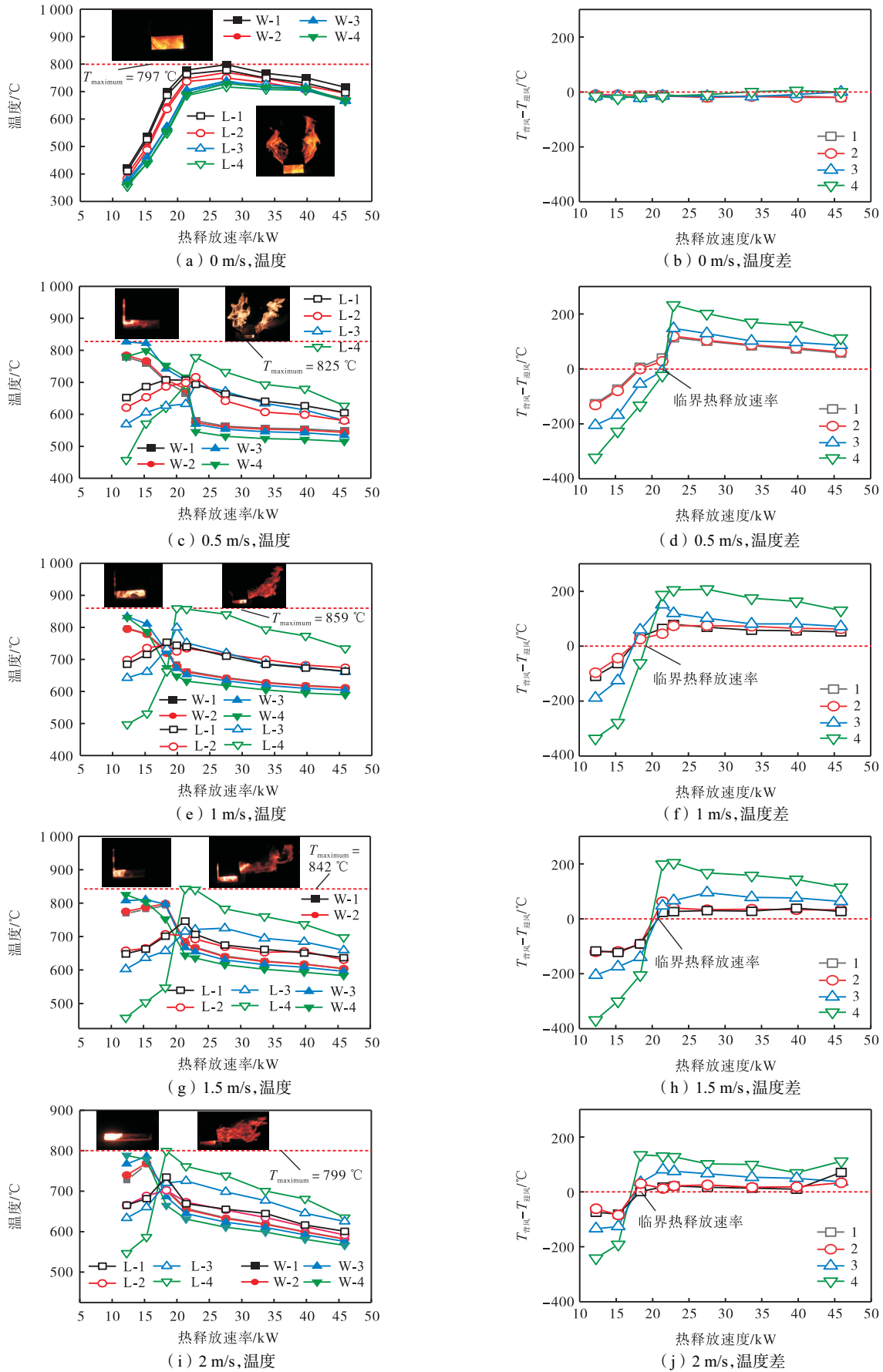


图 5 侧向风作用下室内迎风、背风侧温度及同一高度下两侧温度差值随热释放速率的演化规律

Fig.5 Evolution of temperature inside the compartment and temperature difference between the leeward and windward sides with the heat release rate at the same height under lateral wind

风侧,随着热释放速率的增加,达到临界之后,火焰转移到背风侧燃烧,进而影响室内温度分布.接下来将研究该温度转折对应的临界热释放速率.

2.2 室内温度转折临界

在本文中,定义室内的不同高度处背风侧和迎风侧温度达到相同时,即两条温度曲线的交点对应的热释放速率为该高度处的温度转折临界热释放速率,如图 5 所示.通过实验数据(图 5),可以发现 4 个高度处迎风侧温度和背风侧温度发生转折的热释放速率数值相近,所以在本文中定义四个高度中温度发生转折的最大的临界热释放速率作为室内温度转折的临界热释放速率,其代表了当达到该热释放速率时,腔室整体燃烧发生了转变,完成了由迎风侧向背风侧转移的过程.

图 6 给出了不同开口尺寸及不同开窗角度的室内温度转折对应的热释放速率随风速的变化规律,可以发现:①室内温度转折对应的临界热释放速率随着风速的增加而降低,这是进入腔室内部的侧向风影响了室内流场,因为侧向风速越大,流场流速更快,更容易带动火焰从背风侧向迎风侧移动,更容易发生转折.②同一开窗角度下,开口尺寸越大,进入腔室的氧气越多,腔室内部燃料燃烧更充分,腔室内部温度更难发生转折,所以达到发生温度转折时的临界热释放速率更高.

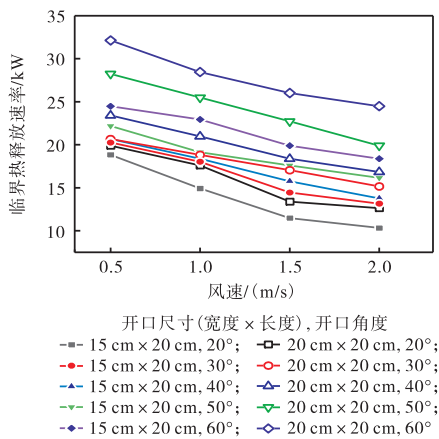


图 6 室内温度转折临界热释放速率随侧向风速的演化规律

Fig.6 Variation of the critical heat release rate for temperature transition with lateral wind speed

对于上悬窗角度为 10°的情况,在图 6 中并未给出,这是因为在这个开窗角度下,在实验所用的不同开口尺寸以及不同风速的情况下,都没有发生温度的转折.如图 7 所示,对于开窗角度 10°,在实验设置功率范围内都是迎风侧的温度高于背风侧的温度,说明在这种情况下,侧向风不足以使迎风侧火焰向背风侧

偏移,没有发生温度的转折(开口尺寸:20 cm × 20 cm,侧向风速:1.5 m/s).如图 5(a)所示,风速为 0 m/s 时,没有环境风的影响,腔室内部流场不受扰动,迎风侧和背风侧火焰燃烧同样没有明显转折,不存在代表室内两侧温度转折的临界热释放速率.

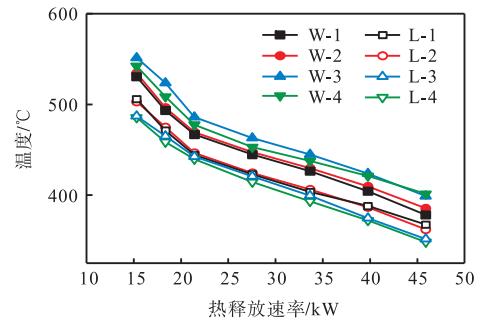
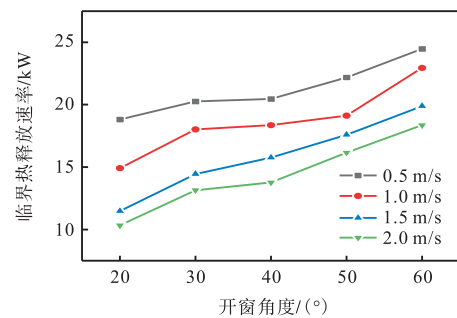


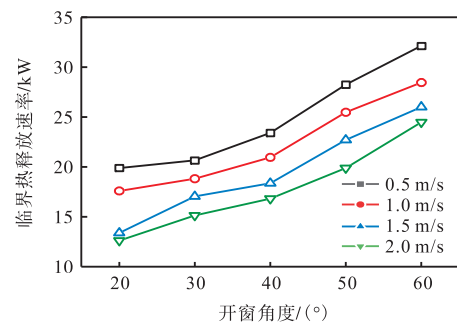
图 7 开窗角度 10°条件下室内迎风、背风侧温度随热释放速率的演化规律

Fig.7 Evolution of temperature on windward and leeward sides inside the compartment with heat release rate at 10° window opening angle

图 8 给出了两种不同开口尺寸的腔室火灾室内温度转折临界热释放速率随开窗角度的变化规律,可以发现室内温度转折临界热释放速率随着开窗角度的增加而上升,这是因为开窗角度越大,腔室内部整体的通风效果越好,腔室内部燃料燃烧更充分,腔室内部温度更难发生转折.



(a) 开口尺寸(W × H) (15 cm × 20 cm)



(b) 开口尺寸(W × H) (20 cm × 20 cm)

图 8 室内温度转折临界热释放速率随开窗角度的演化规律
Fig.8 Variation of the critical heat release rate for temperature transition with window opening angle

由图 6 及图 8 可以发现,在上悬窗条件下,腔室内部温度转折所对应的临界热释放速率受到侧向风速、开窗角度、开口尺寸的影响. 在上悬窗的影响下,火焰从开口两侧溢出,而由于通风条件发生改变,经典的自由开口矩形火源假设理论^[5-7]不再适用,针对自由开口提出的腔室火灾通风因子以及特征长度无法描述上悬窗腔室温度分布. 针对无风条件,杨勇等^[16-17]提出了考虑开口尺寸以及开窗角度的上悬窗腔室火灾新通风因子 ψ (如图 9 所示)以及新的特征长度 $l_{1,\theta}$.

$$\psi = A_{\Delta} \sqrt{H_{\Delta}} \quad (1)$$

$$l_{1,\theta} = (A_{\Delta} \sqrt{H_{\Delta}} / 2)^{2/5}$$

$$H_{\Delta} = H - H_n \quad (2)$$

$$A_{\Delta} = (H - H_n) \tan \theta \times (H - H_n)$$

式中: H_{Δ} 是三角形烟气出气通道的竖直高度; H_n 是中性面高度(在中性面以上为出气区,在中性面以下为进气区); A_{Δ} 是两侧三角形气体流出面积. 为上悬窗两侧溢出火焰高度处各有一个虚拟的矩形火源; $l_{1,\theta}$ 是垂直于外立面且包含上悬窗开窗角度以及开口尺寸影响的特征长度.

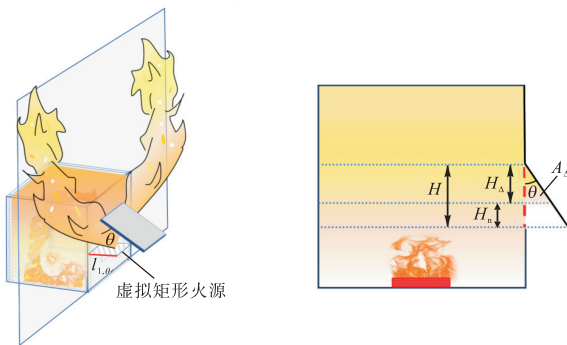


图 9 上悬窗特征长度模型

Fig.9 characteristic length of the top-hung window

本文中使用的 H_n 是利用相机拍摄得到的火焰图像进行处理得到的. 图 10 给出了中性面高度 H_n 随着风速、开口角度以及开窗角度的变化规律曲线.

图 11 给出了临界热释放速率与新通风因子之间的关系,发现相同风速下新通风因子越大,临界热释放速率越大,与之前发现的规律一致,并且相同通风因子下,不同风速临界热释放速率有明显的分层,风速越大临界热释放速率越小.

式(3)给出了无量纲热释放速率和侧向风惯性力与热浮力的比值之间的函数关系:

$$\frac{\dot{Q}_{critical}}{3000 A_{\Delta} \sqrt{H_{\Delta}}} = fcn \left(\frac{M_w}{M_0} \right) \quad (3)$$

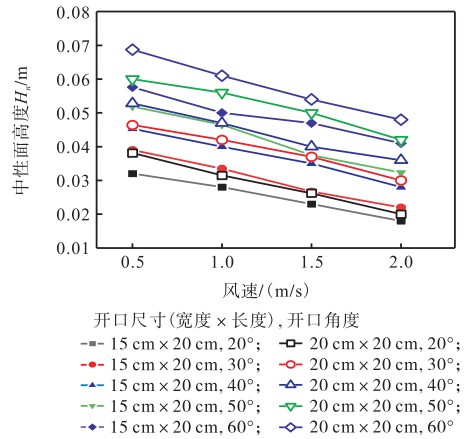


图 10 火焰溢出中性面高度

Fig.10 Flame ejection neutral plane height

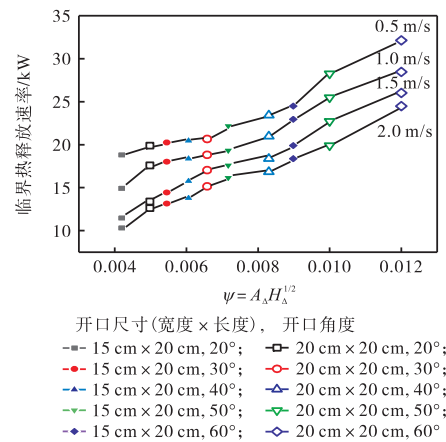


图 11 表征室内温度转折的临界热释放速率随新通风因子的演化规律

Fig.11 Evolution of the critical HRR for the temperature transition inside the compartment with the new ventilation factor

式中: fcn 表示函数关系,基于无量纲分析,室内温度转折临界热释放速率 $\dot{Q}_{critical} = f(U_w, T, \rho, g, H, W, \theta)$,其中 U_w 是侧向风速, T 是温度, ρ 是密度, g 是重力加速度, H 是开口高度, W 是开口宽度, θ 是开窗角度, $3000 A_{\Delta} \sqrt{H_{\Delta}}$ 包含了 H 、 W 、 θ ,将其左移构成等式(3)左侧的表达式,等式(3)右侧是侧向风作用下惯性力(M_w)与开口溢出气体热浮力通量(M_0)的无量纲比值,包含了 U_w 、 T 、 ρ 、 g 、 H 、 W . 该式主要也表达了室内温度转折临界热释放速率受到开口处气体热浮力和风的惯性力共同影响. 利用腔室从燃料控制阶段转变为通风控制阶段的热释放速率(可以用 $3000 A_{\Delta} \sqrt{H_{\Delta}}$ 表征^[17])对腔室温度转折临界热释放速率进行无量纲表征,这是因为前面温度转折机制分析所述,其转折主要是由于室内空气不足,背风侧流入的环境气流促进了火焰向背风侧移动,而无风情况下的临界热释放速率($3000 A_{\Delta} \sqrt{H_{\Delta}}$)也表征了无风时室

内空气不足的状况。

侧向风对迎风侧和背风侧的气体流动产生了影响,尤其是迎风侧的出气量受到较大影响,通过模拟发现无风状态与侧向风作用下溢出气体总流量近似相同,侧向风对于整体的出气量影响不大,即 \dot{m}_w 在无风情况下和侧向风作用下变化不大,考虑到 $l_{1,\theta}$ 是描述出气流量的特征长度尺度,由出气流量决定,侧向风作用下,悬窗两侧的出气量随着风速增加动态变化,难以量化,因此在理论分析过程中采用无风条件下的模型,用来表征侧向风作用面的特征长度. 两侧开口溢出的热气体的浮力通量 (M_0) 可以表示为

$$M_0 \approx \dot{m}_g v \quad (4)$$

对于无风条件,两侧开口溢出的热气体的质量流率 (\dot{m}_g)^[16]为

$$\dot{m}_g = \frac{8\sqrt{2}C_d}{15} \rho_\infty \sqrt{g} \sqrt{\frac{(T_g - T_\infty)T_\infty}{T_g^2} (H - H_n)^{5/2} \tan \theta} \quad (5)$$

式中: C_d 为流动系数出气速度; ρ_∞ 为空气密度; ρ_g 为室内热气体的密度; T_g 为室内烟气的温度; T_∞ 为环境温度. 通过模拟可以发现无风和侧向风条件下的溢出气体总量变化不大,即 \dot{m}_g 在无风和侧向风情况下近似相等,考虑到侧向风作用下的浮力通量难以量化,本文假设火焰温度为定值,利用无风情况下的质量流量来计算浮力通量. 将式(5)代入式(4),可以得到:

$$M_0 \approx \rho_\infty \sqrt{g} \sqrt{\frac{(T_g - T_\infty)T_\infty}{T_g^2} (H - H_n)^{5/2} \tan \theta} \cdot \sqrt{2g(H - H_n) \frac{\rho_\infty - \rho_g}{\rho_g}} \quad (6)$$

$\sqrt{\frac{(T_g - T_\infty)T_\infty}{T_g^2}}$ 与 $\sqrt{\frac{\rho_\infty - \rho_g}{\rho_g}}$ 可以认为是定值,故进一步化简得到:

$$M_0 \sim g(H - H_n)^3 \tan \theta \sim gH_\Delta^3 \tan \theta \quad (7)$$

同时侧向风的动量影响可以用风的惯性力 (M_w) 表示:

$$M_w \approx \dot{m}_w U_w \sim \rho_\infty U_w l_2 H U_w = \rho_\infty U_w^2 l_2 H \quad (8)$$

式中: l_2 代表溢出火焰垂直于外立面方向运动的水平距离; $l_2 H$ 表征了环境风在溢出火焰上的作用面积,在本文中则利用杨勇提出的适用于无风上悬窗条件下腔室火灾特征长度 $l_{1,\theta} = (A_\Delta \sqrt{H_\Delta} / 2)^{2/5}$ 来表征,得到新的表征风惯性力的公式为

$$M_w \approx \dot{m}_w U_w \sim \rho_\infty U_w^2 l_{1,\theta} H_\Delta \quad (9)$$

将式(7)和式(9)代入式(3)后可得到:

$$\frac{\dot{Q}_{critical}}{3000 A_\Delta \sqrt{H_\Delta}} \sim \text{fcn} \left(\frac{U_w^2 l_{1,\theta} H_\Delta}{g H_\Delta^3 \tan \theta} \right) = \text{fcn} \left(\frac{U_w^2}{g H_\Delta \tan \theta^{3/5}} \right) \quad (10)$$

该式表明无量纲临界热释放速率 $\left(\frac{\dot{Q}_{critical}}{3000 A_\Delta \sqrt{H_\Delta}} \right)$ 和与

侧向风有关的无量纲数 $\left(\frac{U_w^2}{g H_\Delta \tan \theta^{3/5}} \right)$ 存在函数关系,该无量纲数与侧向风速、重力加速度、开口尺寸、

开窗角度有关,由于弗劳德数表征风的惯性力与热浮力的比值 (u^2 / gl),该无量纲数与其形式上相近,因此提出了一个新的侧向风弗劳德数,如式(11)所示:

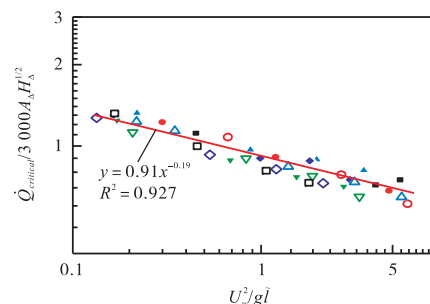
$$Fr = \frac{U_w^2}{g H_\Delta \tan \theta^{3/5}} = \frac{U_w^2}{g \tilde{l}} \quad (11)$$

其中, \tilde{l} 表示侧向风作用下上悬窗火溢流开口特征长度:

$$\tilde{l} = H_\Delta \tan \theta^{3/5} \quad (12)$$

式中综合考虑了开口尺寸、中性面以及上悬窗开启角度对于临界热释放速率的影响. 图 12 是基于式(9)得到的侧向风作用下上悬窗室内温度转折临界热释放速率与定义的弗劳德数之间的关系模型(见式(13)),实验数据与模型吻合较好,角度对临界热释放速率的影响与图 6 的结果一致,同一个开口,开窗角度越大,临界热释放速率越高.

$$\frac{\dot{Q}_{critical}}{3000 A_\Delta \sqrt{H_\Delta}} = 0.91 \left(\frac{U_w^2}{g H_\Delta \tan \theta^{3/5}} \right)^{-0.19} = 0.91 \left(\frac{U_w^2}{g \tilde{l}} \right)^{-0.19} \quad (13)$$



开口尺寸(宽度×长度), 开口角度
 ■ 15 cm × 20 cm, 20°; □ 20 cm × 20 cm, 20°;
 ● 15 cm × 20 cm, 30°; ○ 20 cm × 20 cm, 30°;
 ▲ 15 cm × 20 cm, 40°; △ 20 cm × 20 cm, 40°;
 ▼ 15 cm × 20 cm, 50°; ▽ 20 cm × 20 cm, 50°;
 ◆ 15 cm × 20 cm, 60°; ◇ 20 cm × 20 cm, 60°

图 12 侧向风作用下上悬窗室内温度转折临界热释放速率模型

Fig.12 Model of the critical heat release rate of the temperature transition in the compartment with top-hung window under lateral wind

3 结 论

本文利用了 1:8 的缩尺寸实验台研究了侧向风作用下, 上悬窗腔室火灾室内温度分布规律, 揭示了不同风速、开口尺寸以及开窗角度情况下, 室内温度的演化转折。主要的研究发现和结论如下:

(1) 开窗角度为 10° 的条件下, 在实验所用功率范围内腔室内部不会发生温度转折; 开窗角度大于 10° 时, 腔室内部火焰会由迎风侧向背风侧移动, 温度也由迎风侧高于背风侧转变为背风侧高于迎风侧, 腔室内温度转折临界热释放速率随着开窗角度和开口尺寸的增加而增加, 随着环境风速的增加而减小。

(2) 提出了侧向风作用下表征上悬窗腔室火灾温度转折的特征长度, 基于该特征长度定义了新的风速弗劳德数, 建立了腔室内温度转折临界热释放速率与新弗劳德数之间的关系模型。

参考文献

- [1] McCaffrey B J, Quintiere J G, Harkleroad M F. Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations[J]. *Fire Technology*, 1981, 17(2): 98-119.
- [2] Foote K, Pagni P, Alvares N. Temperature correlations for forced-ventilated compartment fires[J]. *Fire Safety Science*, 1986, 1: 139-148.
- [3] Delichatsios M A, Lee Y P, Tofilo P. A new correlation for gas temperature inside a burn in enclosure[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(8): 1003-1009.
- [4] Lee Y P. Heat Fluxes and Flame Heights on External Facades from Enclosure Fires[D]. Belfast: University of Ulster, 2006.
- [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] Lee Y P, Delichatsios M A, Ohmiya Y. The study for the physics of the outflow from the opening of a burning enclosure[C]//*Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Edinburgh, UK, 2007: 23-27.
- [7] Lee Y P, Delichatsios M A, Ohmiya Y, et al. Heat fluxes on opposite building wall by flames emerging from an enclosure[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2551-2558.
- [8] Tang F, Hu L, 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(1-3): 93-101.
- [9] Himoto K, Akimoto Y, Hokugo A, et al. Risk and behavior of fire spread in a densely-built urban area [C]//*Fire Safety Science-Proceedings of the 9th International Symposium*. University of Karlsruhe, 2008: 267-278.
- [10] 任 飞. 不同通风及上下双层腔室火灾演化与开口火溢流行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019. Ren Fei. Studies on Fire Development inside Compartment and the Associated Ejected Facade Flame Behavior under Different Ventilation and Two-floor compartments Condition[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019(in Chinese).
- [11] Ren F, Hu L, Sun X, et al. An experimental study on vertical temperature profile of facade fire plume ejected from compartment with an opening subjected to external wind normal to facade[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 130: 94-99.
- [12] Ren F, Hu L, Sun X. Experimental investigation on lateral temperature profile of window-ejected facade fire plume with ambient wind[J]. *Fire Technology*, 2019, 55(3): 903-913.
- [13] Ren F, Hu L, Zhang X, et al. Temperature evolution from stratified-to well-mixed condition inside a fire compartment with an opening subjected to external wind[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 4495-4503.
- [14] Sun X, Zhang X, Hu L, et al. Temperature evolution and transition inside fire compartment with an opening subject to external sideward wind[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3869-3877.
- [15] 北京中道泰和信息咨询有限公司. 中国上悬窗行业市场前景及发展趋势与投资战略研究报告(2024-2030 版)[R]. 北京: 北京中道泰和信息咨询有限公

- 司, 2024.
- Beijing Zhongdao Taihe Information Consulting Co. Ltd. China Window Industry Market Development Prospects and Investment Strategy Research Report (2024-2030 Edition) [R]. Beijing: Beijing Zhongdao Taihe Information Consulting Co. Ltd., 2024 (in Chinese).
- [16] 杨 勇. 无风及正向风作用下上悬窗开口火溢流行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- Yang Yong. Studies on Facade Flame Behavior Ejected from a Top-Hung Window of Fire Compartment Under No Wind and Normal Wind[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019 (in Chinese).
- [17] Zhang X, Yang Y, Sun X, et al. A reduced-scale experimental investigation of facade flame behavior ejected from a top-hung window of fire compartment[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(3): 3673-3681.
- [18] Hu L, Sun X, Zhang X, et al. Facade flame height and horizontal extending distance from opening of compartment fire with external sideward wind[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3859-3867.
- [19] 刘 博, 王春雨, 耿伟超, 等. 上、下悬窗阻风能力对比研究[J]. 火灾科学, 2021, 30(4): 224-231.
- Liu Bo, Wang Chunyu, Geng Weichao, et al. The comparative research on natural smoke exhaust capacity of top and bottom hung windows[J]. *Fire Safety Science*, 2021, 30(4): 224-231 (in Chinese).
- [20] 胡隆华, 唐 飞, 陆凯华, 等. 建筑外立面开口火溢流动力学与基础理论[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- Hu Longhua, Tang Fei, Lu Kaihua, et al. *Fundamental Theory and Mechanism of Compartment-facade Fire*[M]. Beijing: Science Press, 2020 (in Chinese).