

中文引用格式:李治含,张国维,王降雪,等.不同着火区域下玻璃窗背火面温度场特性研究[J].中国安全科学学报,2026,36(2):209-217.

英文引用格式:LI Zhihan,ZHANG Guowei,WANG Jiangxue,et al. Characteristics of temperature field on fire-unexposed surface of window glass under varying fire locations [J]. China Safety Science Journal,2026,36(2):209-217.

不同着火区域下玻璃窗背火面温度场特性研究^{*}

李治含¹,张国维^{**1,2}教授,王降雪¹,于龙飞¹,李俊毅³

(1 中国矿业大学 公共安全与消防研究所,江苏 徐州 221116; 2 中国矿业大学 深圳研究院,广东 深圳 518000; 3 中国安全生产科学研究院 城市安全研究所,北京 100012)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0500

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFC3090503);国家自然科学基金青年科学基金资助(52204245);深圳市科技重大专项项目(KCXFZ20240903094204007);江苏省自然科学基金面上项目资助(BK20221548)。

【摘要】为解决高层建筑火灾着火区域定位难题,搭建全尺寸室内火灾试验平台并开展试验研究,探索基于玻璃窗背火面温度场的着火区域反演方法的可行性;通过改变着火区域的位置和热释放速率,获取玻璃窗背火面温度场和火场参数数据,研究室内不同着火区域条件下的玻璃窗背火面温度场特性。研究结果表明:不同着火区域条件下,较高位置、着火区域侧的玻璃展现出明显的升温速率优势;着火480 s后不同位置工况下玻璃背火面的温度不均匀系数均不小于33.52%,着火区域与窗距离的减小会提升背火面的温度不均匀系数;当热释放速率增大时,背火面各区域升温速率增幅的离散系数普遍超过10%,且该差异随热释放速率增大而扩大;当着火区域与窗的法向距离减小时,较高位置、着火区域侧的玻璃会有更高的升温速率增幅;当着火区域与窗的径向距离减小时,较高位置玻璃的升温速率增幅显著高于着火区域侧的玻璃。

【关键词】着火区域;玻璃窗;背火面;温度场;火灾试验

Characteristics of temperature field on fire-unexposed surface of window glass under varying fire locations

LI Zhihan¹, ZHANG Guowei^{1,2}, WANG Jiangxue¹, YU Longfei¹, LI Junyi³

(1 Institute of Public Safety and Fire Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 2 Shenzhen Research Institute, China University of Mining and Technology, Shenzhen Guangdong 518000, China; 3 Urban Safety Institute, China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: To address the challenge of locating the fire source in high-rise building fires, a full-scale indoor fire test platform was constructed and a series of tests were conducted to investigate the feasibility of inferring fire locations from the temperature field on the fire-unexposed surface of window glass in high-rise building fires. By varying the fire location and heat release rate, the temperature field on fire-unexposed surface and fire environment parameters were obtained, and the characteristics of fire-unexposed surface

* 文章编号:1003-3033(2026)02-0209-09; 收稿日期:2025-10-19; 修稿日期:2025-12-20

** 通信作者:张国维(1987—),男,山东临沂人,博士,教授,主要从事城市火灾防护理论及城市应急救援技术方面的研究。E-mail: zgw119xz2@163.com。

temperature field under different scenarios were analyzed. The results show that window glass regions at higher elevations and on the fire side exhibit significantly higher temperature rise rates under different fire location conditions. At 480 s after ignition, the temperature non-uniformity coefficient of fire-unexposed surface under different fire location conditions is not less than 33.52% , and reductions in the distance between fire location and window lead to a marked increase in the temperature non-uniformity coefficient on the fire-unexposed surface. With increasing heat release rate, the coefficient of variation of the increase in temperature rise rates across different glass regions on the fire-unexposed surface generally exceeds 10% , and this disparity becomes more pronounced with increasing heat release rate. When the normal distance between the fire location and the window decreases, window glass at higher elevations and on the fire side exhibits a greater increase in temperature rise rate. When the radial distance between the fire location and the window decreases, the increase in temperature rise rate at higher elevations is significantly greater than that on the fire side.

Keywords: fire location; glass windows; fire-unexposed surface; temperature field; fire test

0 引言

近年来,我国高层建筑火灾逐年增加^[1],消防无人机技术为高层建筑火灾防控提供了新的解决方案^[2],而精准识别室内着火区域对无人机有效执行灭火任务至关重要。

室内着火区域的定位主要依赖于建筑内置的温度/烟雾传感器阵列和视觉监控系统^[3-6],但在实际火灾救援过程中,受浓烟、高温干扰及设备可靠性影响,难以获取支撑现有着火区域定位模型稳定运行的可靠数据^[7]。相比之下,建筑窗玻璃背火面的温度场能够更直接地反映火灾的特征信息,并可通过无人机搭载的红外热像仪在建筑外部空间对其实现非接触式实时监测^[8-9]。玻璃窗背火面温度场的演化主要受室内火焰及烟气的耦合影响。孙昊等^[10]模拟研究发现,墙边火源的烟气产生速率低于中央火源。JEONG 等^[11]发现火源的壁面效应越显著,热烟气层温度与平均火焰高度越高,且火灾达到稳态所需时间越长。李子龙^[12]的小尺度腔室火灾试验研究表明:腔室内火焰形态的演化特征受火源位置的影响显著。当前室内火灾场景下窗户玻璃的相关研究主要聚焦于其热破裂行为及其内在机制,侧重于分析玻璃暴露区与边框遮蔽区的温差。张嫵妮等^[13]探究了不同火源位置对浮法玻璃热破裂行为的影响。WANG Yu 等^[14-15]发现,火源位置对不同安装方式下的玻璃有显著影响,但其模型假设与室内火灾典型的温度分布特征存在差异。SHIELDS^[16-17]得到了全尺寸试验条件下的火源热释放速率(Heat Release Rate,HRR)和玻璃表面温度分布等数据。

上述研究均未系统性地改变着火区域的位置,

且对火灾过程中窗户玻璃背火面二维温度场演变的监测不足。因此,笔者拟开展多组变着火区域全尺寸室内火灾试验,研究建筑室内火灾早期着火区域及 HRR 变化下玻璃窗背火面的温度场特性,以期为基于高层建筑玻璃窗温度场的室内着火区域定位方法的发展提供基础数据和理论支撑。

1 着火区域全尺寸火灾试验

1.1 全尺寸室内火灾试验平台搭建

全尺寸室内火灾试验平台如图 1 所示。试验房间尺寸为 3.0 m(宽)×7.0 m(长)×2.5 m(高),由钢制结构构成,房间内部墙壁、顶棚以及地板均覆盖防火板。在 2 个 7.0 m×2.5 m 的侧壁上分别设置 1.3 m×1.3 m 的试验窗(距地面高 1.0 m,采用 8 mm 厚的单层钢化玻璃)、观察窗和 2.0 m×0.8 m 的防火门(试验过程中保持关闭)。

采用试验木垛并将其置于盛有约 160 mL 正庚烷的油盘中^[18],以模拟室内火灾的着火区域。3 组高温 K 型热电偶布置如图 2 所示,A 组 3 个热电偶布置在木垛正上方 20、40 和 60 cm 处,以测量火焰平均温度;B 组热电偶布置在顶棚 5 个相同高度的位置(中心及 4 个与侧壁距离相同的角落位置),以测量烟气层温度,每处设 2 个热电偶(间隔 15 cm);C 组热电偶布置在试验窗背火面。所有热电偶的测量范围为 -20 ~ 1 000 ℃ 精度为 ±1.5 ℃。在木垛正下方布置质量传感器,测量精度为 0.5 g/s。热流计布置在试验窗向火面的正中央位置,量测范围 0 ~ 100 kW/m²,误差不超过 ±3%。在 3.0 m×2.5 m 侧壁的中间位置布置高清

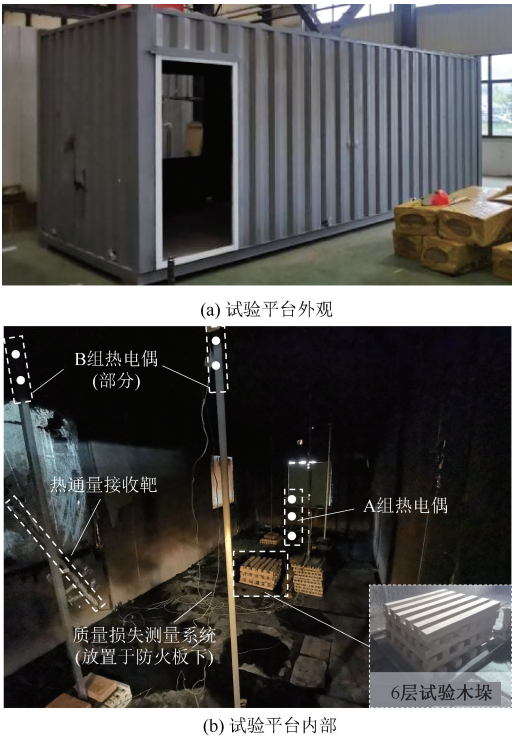


图 1 全尺寸室内火灾试验平台

Fig. 1 Full-scale indoor fire test platform

摄像头。红外热像仪架设在试验房间外部,高度为 1.65 m、距试验窗 3.15 m,确保红外热像仪视角能完整覆盖试验窗背火面。

1.2 着火区域工况设置

试验工况设置见表 1。9 个着火区域工况如图 3 所示,鉴于着火区域正对玻璃窗工况下玻璃背火面温度分布已有充分研究,故重点关注偏离玻璃窗中心线的着火区域。分别选取 4 层、6 层和 8 层木垛,木垛 HRR 峰值范围为 50~300 kW(包括纸板箱、废纸篓和餐椅等常见可燃物)。

表 1 试验工况

Table 1 Experimental conditions		
着火区域	木垛 HRR	工况数
L1—L9	6 层木垛	9
L5	4、6、8 层木垛	3

试验过程中,除侧壁底部的孔洞开启,房间相对封闭,以模拟室内火灾早期、玻璃尚未因火势过大而破裂时的通风匮乏情况。所有测量设备均在点火前启动,试验时长为 20 min。每个工况进行 3 次重复试验,试验数据取 3 次重复试验的均值。

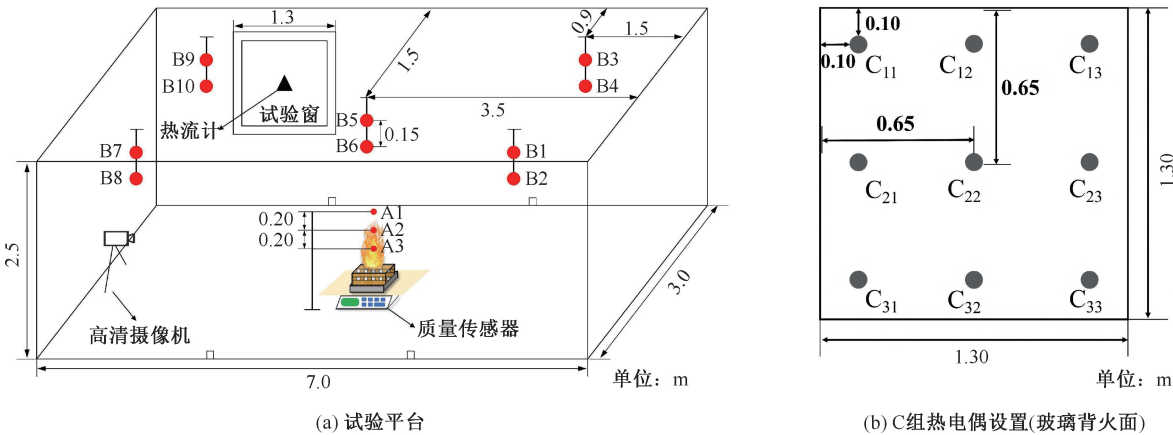


图 2 试验设置

Fig. 2 Experimental setup

2 玻璃窗背火面温度场特性分析

2.1 室内火灾演化

L2 工况下木垛质量变化曲线及 HRR 曲线如图 4 所示。可以看出,HRR 曲线分为快速增长阶段 I、稳定发展阶段 II 和衰退阶段 III,火灾 HRR 在 609 s 达到峰值。图 5 为室内火灾的演化过程,点火后仅底层木垛被正庚烷引燃;随着火灾发展,正庚烷燃烧耗尽,木垛上方形成稳定的周期性脉动火焰,烟气层不断积聚、沉降,室内能见度随之降低;平均火

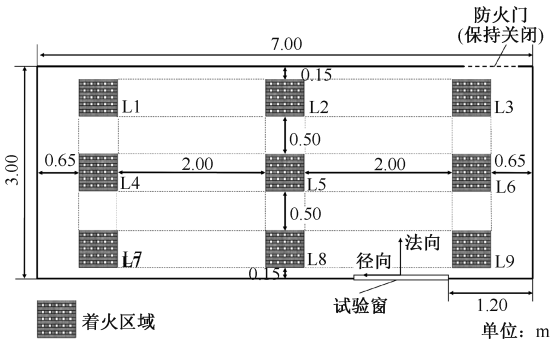


图 3 着火区域设置

Fig. 3 Schematic diagram of fire location setup

焰高度在 631 s 达到峰值,之后火焰高度逐渐降低;1 200 s 时,烟气在房间内实现较充分掺混,室内能见度极低。顶棚烟气层平均温度在 1 050 s 达到峰值 217.1 ℃,随后以 0.156 ℃/s 的降温速率降至 193.7 ℃。

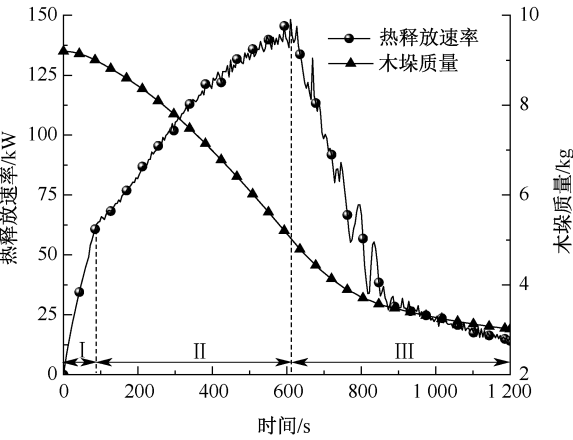


图 4 L2 工况下木垛质量变化曲线及 HRR 曲线
Fig. 4 Variation of wood crib mass and HRR curve under L2 condition

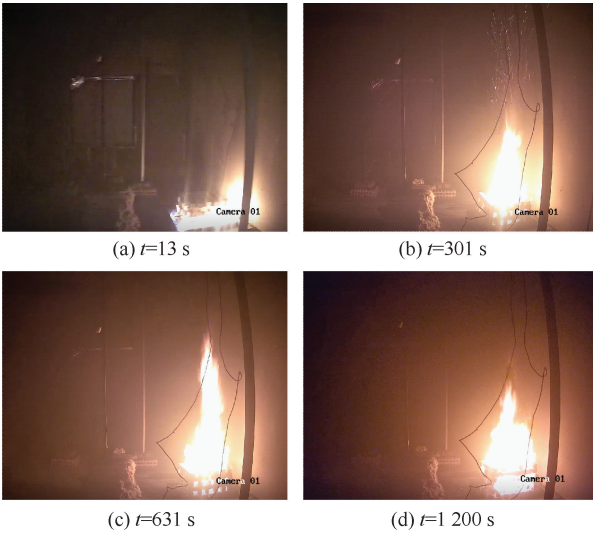


图 5 L2 工况下室内火灾演化过程
Fig. 5 Indoor fire evolution process under the L2 condition

2.2 着火区域位于试验窗两侧工况试验结果分析

图 6 为 L2 和 L3 工况下 C 组测点的温度变化。L2 和 L3 为着火区域位于试验窗两侧的典型情况,L2、L3 与试验窗所在侧壁的法向距离相等。可以看出,C 组测点温度约在 200 s 后明显上升,之后保持线性增长。这是由于玻璃材料的热阻大,背火面的升温相较于向火面存在明显滞后;即使火灾进入衰退阶段,热烟气与玻璃界面之间仍存在温度梯度并

驱动玻璃背火面持续升温。

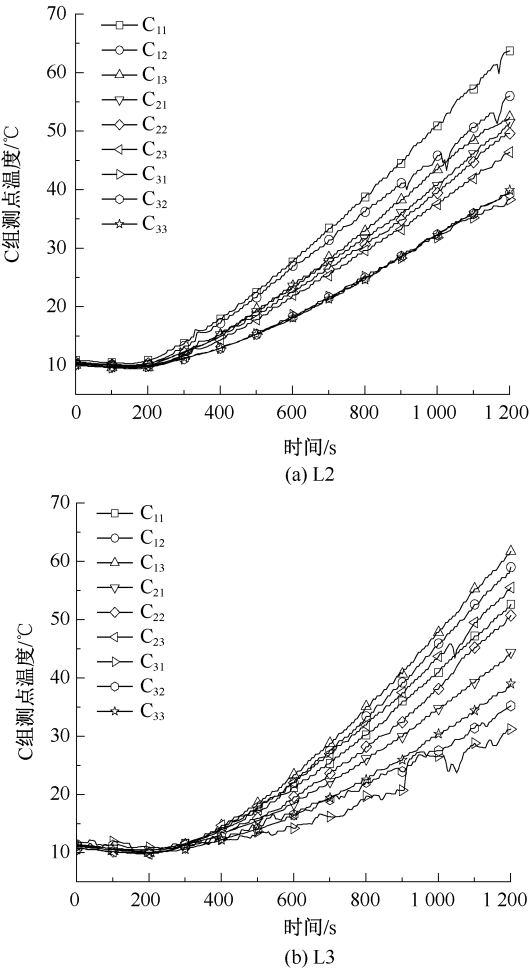


图 6 L2 和 L3 工况下 C 组测点温度曲线
Fig. 6 Temperature curves of Group C measurement points under L2 and L3 conditions

火灾进入稳定发展阶段后,L2 工况下 C 组测点的升温速率沿高度方向呈递增趋势。试验窗背火面上部测点 C_{11} 、 C_{12} 和 C_{13} 的升温速率均值最大 (0.048 6 ℃/s),中部测点 C_{21} 、 C_{22} 和 C_{23} 次之 (0.040 3 ℃/s),下部测点 C_{31} 、 C_{32} 和 C_{33} 最小 (0.030 5 ℃/s)。这是由于热烟气在顶棚积聚并下沉过程中,与上部玻璃接触更早、更充分,热交换更显著。在水平方向上,测点 C_{11} 、 C_{21} 和 C_{31} 的升温速率均值分别比过渡区 C_{12} 、 C_{22} 、 C_{32} 和远离着火区域的 C_{13} 、 C_{23} 、 C_{33} 高 7.23% 和 58.52%,这是由于火焰热辐射的距离衰减效应及烟气层温度沿着火区域向外侧逐渐递减特性^[19],二者共同作用使着火区域侧玻璃的升温速率高于远离着火区域的玻璃。L2 和 L3 工况下位于上部及着火区域侧的测点 (C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{21} 、 C_{31}) 的升温速率较其余 C 组测点分别高出 18.03%~72.21%,表明较高位置和着火区域侧的玻

璃具有明显的升温优势。

图 7 为 L2 和 L3 工况下背火面红外热像图演化。可以看出,在 360 s 时 L2 工况背火面上部测点 C₁₁、C₁₂ 处首先形成高温区域,随后高温区域主要沿 2 个方向扩展:沿 C₁₁—C₁₃ 方向快速延伸,以及向着火区域侧的 C₂₁ 缓慢扩展,进一步印证了较高位置和着火区域侧玻璃的升温优势。最终玻璃背火面的温度梯度呈现出从较高位置-着火区域侧的交角向较低位置-远离着火区域一侧的交角递减的分布特征。经对称处理后,L3 工况下背火面温度场的分布特征及时空演化与 L2 工况基本一致。

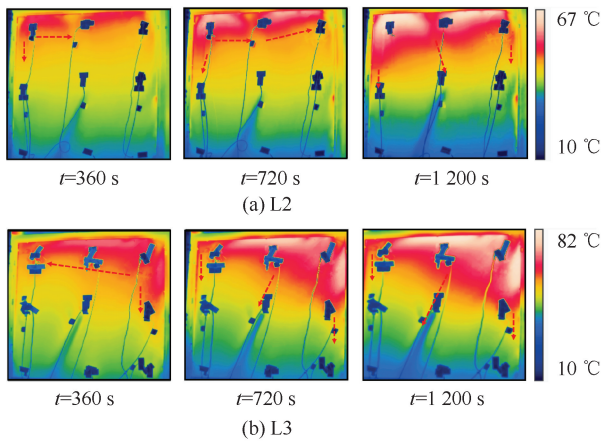


图 7 L2 和 L3 工况下背火面红外热像图演化

Fig. 7 Evolution of infrared thermograms on fire-unexposed surface under L2 and L3 conditions

2.3 着火区域位于试验窗同侧工况试验结果分析

图 8 为 L3、L6 和 L9 工况下 C 组测点温度曲线。3 个工况与窗的法向距离递减的典型情况。火

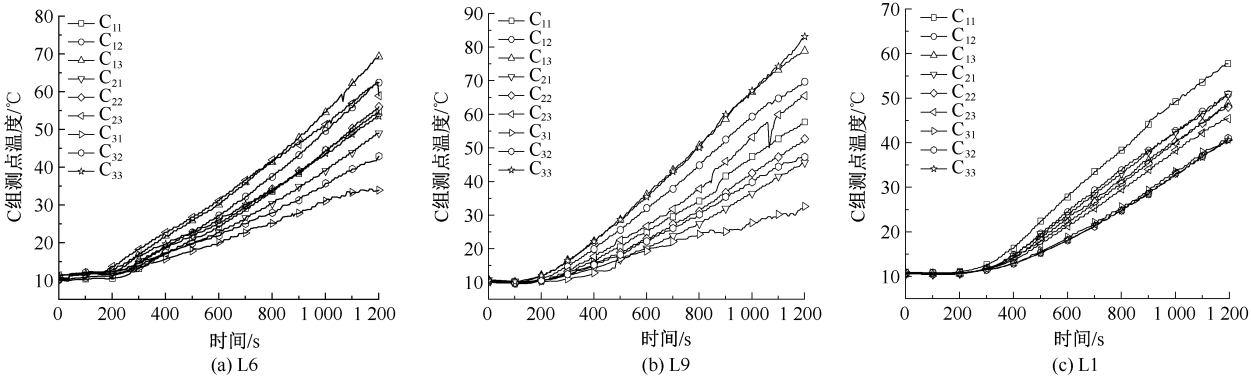


图 8 着火区域位于试验窗同侧工况下 C 组测点温度曲线

Fig. 8 Temperature curves of group C measurement points under the condition with fire location on the same side as the test window

2.4 试验窗背火面的非均匀温度场

基于 C 组测点温度数据计算温度不均匀系数:

$$U = (t_{\max} - t_{\min}) / t_a \times 100\% \tag{1}$$

式中:U 为温度不均匀系数,%; t_{max} 和 t_{min} 为 C 组测

灾进入稳定发展阶段后,在高度方向上,试验窗背火面上、中、下 3 部分 C 组测点的升温速率均值随着火区域与窗之间法向距离的减小而提高,且下部测点增长幅度最大,从 L3 到 L6 提升 23. 19%,从 L6 到 L9 进一步提升 44. 14%。在水平方向上,着火区域侧测点(C₁₃、C₂₃、C₃₃)的升温速率均值增长幅度最大,相应两次移动分别提高 3. 82% 和 39. 88%。位于下部及着火区域侧的测点(C₃₁、C₃₂、C₃₃、C₁₃、C₂₃)具有更大的升温速率增长幅度,其增长幅度较其余 C 组测点高 4. 84%—28. 21%。

图 9 为 1 200 s 时着火区域位于试验窗同侧工况下背火面红外热像图。可以看出,L9 工况下较低位置-着火区域侧的玻璃(C₃₃ 测点处)形成了新的高温区域,并改变了背火面温度梯度的方向。这是由于着火区域与试验窗间的法向距离减小,火焰的热辐射作用增强,窗所在壁面与火羽流中心轴的距离减小,窗上方的烟气温度上升,从而强化了火焰-热烟气对窗的耦合传热。此外,L9 工况下火焰的壁面效应使得热烟气层的温度以及木垛的平均火焰高度进一步提高^[11]。

L1、L2 工况代表着火区域位于窗同侧、与窗的径向距离改变的典型情况。火灾进入稳定发展阶段后,与 L2 工况相比,L1 工况下背火面温度场整体衰退,高温区域范围缩小,C 组测点升温速率普遍降低。例如 L1 工况下较高位置和着火区域侧玻璃的升温速率均值较 L2 工况分别下降 8. 40%、2. 09%。类似地,相较于 L5、L8 工况,L4、L7 工况下背火面温度场均出现整体衰退。

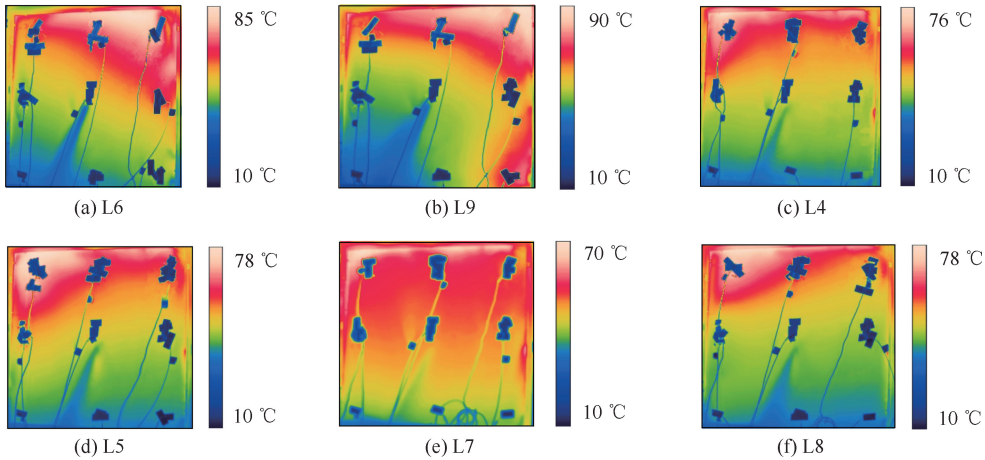


图9 着火区域位于试验窗同侧工况下背火面红外热像图(1 200 s)

Fig. 9 Infrared thermograms of fire-unexposed surface (at 1 200 s) under the condition with fire location on the same side as the test window

点温度最大值和最小值,℃; t_a 为C组测点温度平均值,℃。

图10为不同着火区域工况下背火面温度不均匀系数变化。可以看出,着火480 s后所有工况下的温度不均匀系数均在33.52%以上且随火势发展总体呈增长趋势。减小着火区域与试验窗之间法向或径向距离均会提高背火面的温度不均匀系数,且法向距离的影响更为显著。L1工况在火灾后期出现下降且变化幅度最小,这是由于该工况中着火区域距离试验窗过远,其热辐射作用微弱,热量传递主要依靠烟气层完成。

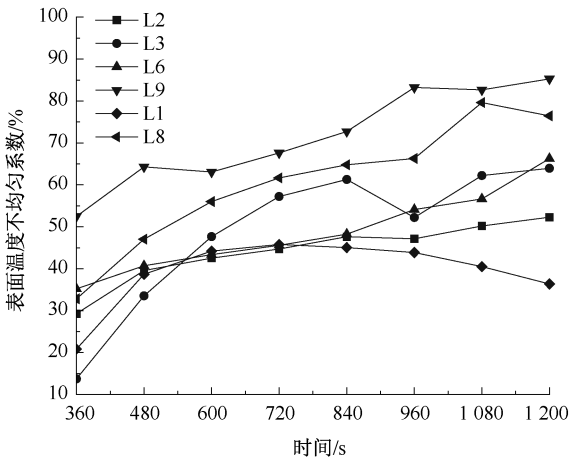


图10 不同着火区域工况下背火面温度不均匀系数变化

Fig. 10 Uneven temperature coefficient on fire-unexposed surface with different fire locations

2.5 HRR 工况试验结果分析

图11为1 200 s时变HRR工况下背火面红外热像图,从中可以看出,随着木垛HRR增大,背火面

温度场呈现整体增强趋势。以 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 测点为例,其升温速率在6层木垛工况时较4层工况分别提高15.19%、20.75%、19.29%,相应的增幅离散系数为12.76%;当木垛增至8层时,各测点升温速率进一步提高,较6层工况分别提升26.16%、26.45%、18.07%,增幅离散系数增大至16.46%。其余玻璃区域的升温速率和增幅离散系数变化趋势相似。

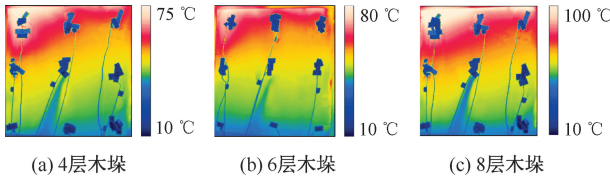


图11 1 200 s时变HRR工况下背火面红外热像图

Fig. 11 Infrared thermograms of fire-unexposed surface at 1 200 s under the varying HRR conditions

2.6 向火面热流密度理论计算方法

试验条件下,窗玻璃受着火区域与高温烟气层的耦合传热作用。采用修正固体火焰模型^[20]估算某时刻火焰对玻璃的定向热辐射(火源HRR低于437 kW时)。试验窗玻璃向火面接受的火焰辐射热流密度 $\dot{q}_f$ (kW/m²)为:

$$\dot{q}_f = \tau F E_f \quad (2)$$

$$E_f = 0.8 \pi d_0 H \delta T_f^4 [1 - \exp(-1.8 \kappa_f d_0)] + \frac{10}{3} \frac{\pi H}{d_0} \delta T_f^4 \int_0^{0.6 d_0} x [1 - \exp(-3 \kappa_f x)] dx \quad (3)$$

式中: E_f 为火焰表面发射的热辐射通量,kW/m²; F 为几何视角因子; τ 为环境对热辐射的透过率; T_f 为火焰平均温度,K; κ_f 为火焰的吸收-发射系数,m⁻¹; δ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, 5.67×10^8 W/(m²·K⁴);

d_0 为火焰底部半径, m ; H 为火焰高度, m ; x 为火焰根部中心到边缘的距离, m 。通过试验获得的火焰高清图像获取火焰高度及相关尺寸的时序数据、通过着火区域位置和试验窗的空间坐标确定 F, T_f 用 A 组测点的平均温度代表。

某时刻烟气层与玻璃向火面的对流热密度 $\dot{q}_c$ (kW/m^2) 为:

$$\dot{q}_c = h_i W (T_s - T_i) \tag{4}$$

式中: h_i 为热烟气与玻璃向火面间的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; W 为窗户宽度, m ; T_s 为热烟气温度, K ; T_i 为玻璃向火面某位置的温度, K 。 T_s 需根据窗一侧 B 组测点温度设置。

根据 B 组热电偶的 5 个位置将顶棚热烟气层划分为 5 个温度均匀分布的有限表面, 某时刻热烟气层对玻璃向火面的辐射热流密度 $\dot{q}_s$ (kW/m^2) 为^[21]:

$$\dot{q}_s = \sum_i \dot{q}_{s_i} \tag{5}$$

$$\dot{q}_{s_i} = \varepsilon_s \delta T_{s_i}^4 \int_0^{s_i} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi R^2} dS_i \tag{6}$$

式中: $\dot{q}_{s_i}$ 为第 i 个热烟气表面投射到玻璃某微元的辐射热流密度, kW/m^2 ; ε_s 为烟气层的辐射率; T_{s_i} 为第 i 个热烟气表面的平均温度, K ; θ_1 和 θ_2 分别为烟气层微元法线、被辐射微元法线与两微元连接线的夹角; R 为烟气层微元与被辐射微元的空间直线距离, m 。

因此, 某时刻试验窗玻璃向火面接受的总热流密度 $\dot{q}_g$ (kW/m^2) 为:

$$\dot{q}_g = \dot{q}_f + \dot{q}_s + \dot{q}_c \tag{7}$$

式中: $\dot{q}_f$ 为该位置接收的火焰辐射热流密度, kW/m^2 ; $\dot{q}_s$ 为该位置接收来自热烟气层的辐射热流密度, kW/m^2 ; $\dot{q}_c$ 为烟气层与该位置的对流热流密度, kW/m^2 。

图 12 为向火面中央位置处试验和理论热流密度。可以看出, 理论值在变化趋势和数值量级上与试验测量值良好吻合。理论方法的误差在 $\pm 24.04\%$ 范围内 (85% 以上的数据点位于 $\pm 20\%$ 误差带内), 且理论方法整体上低估了火灾前期的热流密度值, 这是由于修正固体火焰模型忽略了火羽流的辐射贡献^[20]。

2.7 理论方法下向火面热流密度分布

若玻璃未破碎, 火灾中玻璃的导热过程可简化为一维导热模型^[22]。因此, 玻璃向火面的热载荷分

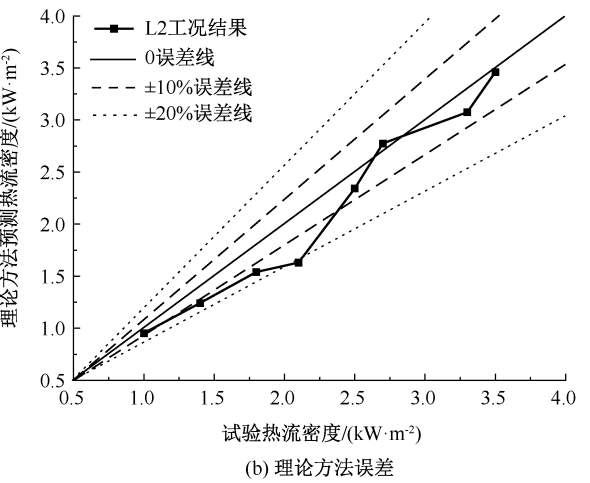
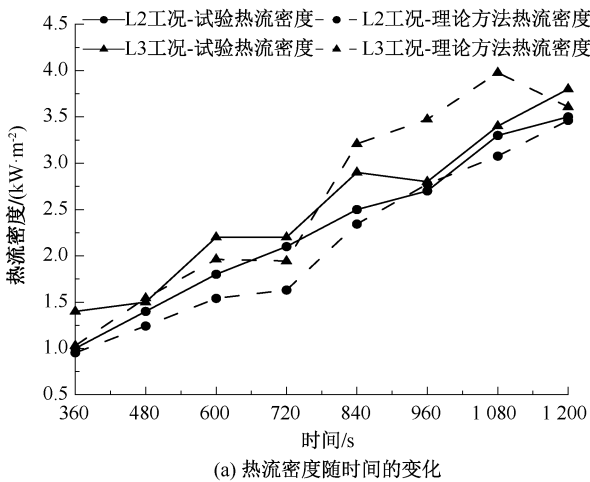


图 12 向火面中央位置试验和理论热流密度
Fig. 12 Experimental and theoretical heat flux density at the central location of fire-exposed surface

布决定了背火面的温度场分布。L2 工况下试验窗向火面的热流密度分布如图 13 所示。较高位置玻璃接受的热流密度相比较低位置提升 18.72% ~ 42.13%, 着火区域侧玻璃接受的热流密度较远离着火区域的玻璃增加 2.65% ~ 27.54%, 这是由于火焰热辐射的距离衰减效应和高温烟气层形成的垂直温度梯度。较高位置和着火区域侧玻璃的升温优势本质上是空间差异性热载荷叠加作用的结果: 高度方向上, 高温烟气层的垂直温度梯度主导了向火面的热流密度分布; 水平方向上, 热流密度分布则由火焰热辐射的距离衰减效应主导。这种复合的传热模式引发该区域形成更高水平的热传递, 进而引发更快速的升温。

图 14 为较低位置-着火区域侧玻璃接受的火焰辐射热流密度变化。随着着火区域与试验窗法向距离的减小, 该玻璃区域接受来自火焰的辐射热流密度提升 10.14% ~ 60.1%, 同时, 其在该玻璃区域接

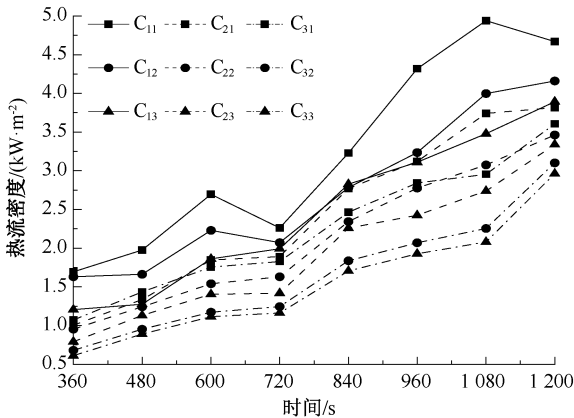


图 13 理论方法获取的试验窗向火面热流密度分布
Fig. 13 Heat flux density distribution toward the fire-exposed surface of test window obtained by theoretical method

受的总热流密度中的比例也提升 7.89%~39.28%，表明 L9 工况下较低位置-着火区域侧玻璃 (C₃₃ 测

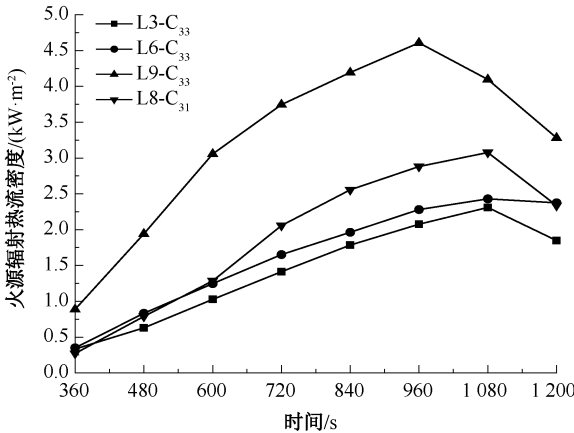


图 14 较低位置-着火区域侧玻璃接收的火焰辐射热流密度变化
Fig. 14 Variation of flame radiation heat flux received by lower position-glass on fire side

点处)新高温区域的形成主要源于火焰辐射热流密度的提升,并由火焰热辐射主导升温。

L8 工况下,较低位置-着火区域侧玻璃无论是接受的火焰辐射热流密度还是火焰辐射热流密度在总热流密度中占比,均远低于 L9 工况,且未出现新的高温区域。L8 工况下火焰与较低位置-着火区域侧玻璃间的几何视角因子较 L9 更小,导致火焰热辐射的效果受限。因此,即便着火区域与玻璃窗的法向距离足够小,若其之间存在一定径向距离,也无法在较低位置-着火区域侧玻璃引发剧烈升温并改变温度梯度,这与火焰表面和玻璃单元间的几何视角因子直接相关。

3 结 论

1) 火灾稳定发展阶段,较高位置和着火区域侧玻璃的升温速率比其他玻璃区域高 18.03%~72.21%,且较高位置玻璃的升温速率高于着火区域侧玻璃。

2) 玻璃背火面温度场具有明显的非均匀分布特征,480 s 后所有着火区域工况下玻璃背火面的温度不均匀系数均不小于 33.52%,且该系数随窗与着火区域之间距离的减小而增大。

3) 当着火区域与窗的法向距离减小时,较低位置和着火区域侧玻璃会有更高的升温速率增幅,相比其他玻璃区域高 4.84%~28.21%。当着火区域与窗的径向距离减小时,背火面温度场会出现整体增强,且较高位置玻璃的升温速率增幅大于着火区域侧玻璃。

4) 同一着火区域下,玻璃背火面的升温速率随木垛热释放速率的增大而提高,但不同玻璃区域的升温速率增幅离散系数普遍大于 10%,该升温速率增幅差异随木垛热释放速率的增大而扩大。

参 考 文 献

[1] SONG Lizhuo, ZHU Jing, LIU Shaotong, et al. Recent fire safety design of high-rise buildings[J]. Journal of Urban Development and Management, 2022, 1(1): 50-57.
[2] WANG Kai, YUAN Yingfeng, CHEN Mengmeng, et al. A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings[J]. Fire, 2022, 75: DOI: 10.3390/fire5030075.
[3] GE Quanbo, WEN Chenglin, DUAN Shengan. Fire localization based on range-range-range model for limited interior space[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(9): 2 223-2 237.
[4] CHU Yanyan, LIANG Duan, KODUR V K R, et al. A probabilistic inferential algorithm to determine fire source location based on inversion of multidimensional fire parameters[J]. Fire Technology, 2017, 53: 1 077-1 100.
[5] 段锁林,高仁洲,刘福,等.多观点火源三维定位算法研究[J].消防科学与技术,2018,37(12): 1 690-1 693.

- DUAN Suolin, GAO Renzhou, LIU Fu, et al. Study of the fire localization algorithm based on multi-view[J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(12):1 690–1 693.
- [6] AFSAH L, CHUNG H. Fire detection and spatial localization approach for autonomous suppression systems based on artificial intelligence[J]. Fire Technology, 2023, 59(5):2 621–2 644.
- [7] WANG Zilong, ZHANG Tianhang, WU Xiqiang, et al. Predicting transient building fire based on external smoke images and deep learning[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 47: DOI: 10.1016/j.job.2021.103823.
- [8] ELMAHDY A H, DEVINE F. Laboratory infrared thermography technique for window surface temperature measurements[J]. Ashrae Transactions, 2005, 111(1):561–571.
- [9] HOU Fujin, ZHANG Yan, ZHOU Yong, et al. Review on infrared imaging technology[J]. Sustainability, 2022, 14: DOI: 10.3390/su141811161.
- [10] 孙昊,王佰顺. 火源位置的不同对自然排烟的影响[J]. 消防科学与技术,2012,31(1):23–26.
SUN Hao, WANG Baishun. The effects of different fire source position on natural smoke exhaust[J]. Fire Science and Technology, 2012, 31(1):23–26.
- [11] JEONG J Y, RYOU H S. A study on smoke movement in room fires with various pool fire location[J]. KSME International Journal, 2002, 16:1 485–1 496.
- [12] 李子龙. 火源位置对腔室火特性影响的实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2019.
LI Zilong. Experimental study on influence of fire locations on compartment fire characteristics[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [13] 张婉妮,杨丹,温心宇,等. 火源位置对浮法玻璃热破裂行为规律影响研究[J]. 中国安全生产科学技术,2021, 17(8):143–149.
ZHANG Yanni, YANG Dan, WEN Xinyu, et al. Study on influence of fire source location on thermal fracture behavioral laws of float glass [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(8):143–149.
- [14] WANG Yu, WANG Qingsong, SHAO Guangzheng, et al. Fracture behavior of a four-point fixed glass curtain wall under fire conditions[J]. Fire Safety Journal, 2014, 67:24–34.
- [15] WANG Yu, WANG Qingsong, SUN Jinhua, et al. Influence of fire location on the thermal performance of glass façades[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106:438–442.
- [16] SHIELDS T J, SILCOCK G W H, FLOOD M F. Performance of a single glazing assembly exposed to enclosure corner fires of increasing severity[J]. Fire and Materials, 2001, 25(4):123–152.
- [17] SHIELDS T J, SILCOCK G W H, FLOOD M. Performance of a single glazing assembly exposed to a fire in the centre of an enclosure[J]. Fire and Materials, 2002, 26(2):51–75.
- [18] GB/T 25972—2010, 气体灭火系统及部件[S].
GB/T 25972—2010, Gas fire extinguishing systems and components[S].
- [19] 张国维. 高大空间钢结构建筑火灾全过程性能化防火设计方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2015.
ZHANG Guowei. Research on performance-based fire protection design methodology for tall space steel structure buildings during entire fire process [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [20] ZHOU Kuibin, LIU Naian, ZHANG Linhe, et al. Thermal radiation from fire whirls: revised solid flame model[J]. Fire Technology, 2014, 50(6): 1 573–1 587.
- [21] 范维澄. 火灾学简明教程[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1995:73–103.
FAN Weicheng. Concise tutorial of fire science[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1995: 73–103.
- [22] 陆伟. 火灾中不同种类和外界风条件下玻璃幕墙破裂特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2022.
LU Wei. Study on the breakage characteristics of glass curtainwall under different types and external wind conditions in fire[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.

作者简介: 李治含 (2000—),男,山东德州人,博士研究生,研究方向为高层建筑火灾防护及智慧消防。E-mail:austlizhihan@163.com。

