

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202102020

## 喷水灭火过程中足尺钢框架房屋温度场试验研究\*

徐 阳<sup>1</sup>, 宋振森<sup>1,2</sup>, 赵金城<sup>1,2</sup>, 华 莹<sup>1</sup>, 阮诗鹏<sup>1</sup>

(1.上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240; 2.上海市公共建筑和基础设施数字化运维重点实验室,上海 200240)

**摘要:**喷水灭火行为引起的火场局部温度骤降,有可能引起房屋结构破坏。为研究火灾及消防过程中温度场的分布和变化情况,设计建造了足尺钢框架房屋,根据实际火灾及消防场景设计火灾荷载和消防系统,模拟了真实火灾下窗户玻璃破碎和喷水灭火对火灾温度场的影响。试验过程中利用热电偶测量火灾及消防全过程的火场温度,得到了火场中不同位置的温度变化曲线。根据试验结果,并结合火灾动力学分析了火场温度的空间分布和变化规律。研究表明:火灾过程中,火场在垂直方向上存在明显的温度梯度,空气温度随高度增加而升高;框架平面沿水平方向越靠近起火点,升温速率越快,能达到的最高温度越高,垂直方向温度梯度越大;玻璃破碎增大了通风口面积,对通风控制型火灾的温度场有显著影响,靠近通风口处温度略有降低,而远离通风口的火场纵深处温度大幅上升;消防喷水能迅速抑制火场燃烧,降低火场温度,降温速率随喷水灭火时间增长而减小;开始灭火的短时间内,火源附近温度骤降,降温速率最高达到391 °C/min。

**关键词:**喷水灭火;温度场;钢框架结构;足尺试验

**中图分类号:** TU998.1   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0813-10

## Experimental Research on Temperature Field of Full-scale Steel Frame Building during Firefighting by Water Spraying

XU Yang<sup>1</sup>, SONG Zhensen<sup>1,2</sup>, ZHAO Jincheng<sup>1,2</sup>, HUA Ying<sup>1</sup>, RUAN Shipeng<sup>1</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Key Laboratory for Digital Maintenance of Buildings and Infrastructure, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** A sudden drop of local fire temperature field due to water spraying during firefighting may cause damage in steel frame buildings. In this study, a full-scale steel frame building was designed and constructed for investigating the distribution and variation of temperature field under fire as well as during firefighting process. The fire load and firefighting system were designed according to actual fire and firefighting scenarios, respectively. The influences of window glass broken and water spraying on fire temperature field were simulated in the test. During testing, the temperature distributions throughout the whole fire and firefighting processes were carefully measured by thermocouples, and the temperature-time curves at various positions of the fire site were obtained. The experimentally obtained spatial distribution and variation of fire temperature field were analyzed in the present study based on

\* 收稿日期:2021-02-20;修回日期:2021-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51678358)、工信部研发专项(MC-201620-H01-04)资助

作者简介:徐阳(1995—),男,硕士研究生。主要从事钢结构抗火研究。E-mail: yancyxu@sjtu.edu.cn

通讯作者:宋振森(1970—),男,副教授。主要从事钢结构稳定和抗火研究。E-mail: songzts@sjtu.edu.cn

fire dynamics theories. The results indicate that there is an obvious temperature gradient in the vertical direction of the fire site, and the air temperature increases with the increase of height. In the frame plane, the closer to the fire point, the bigger the heating rate, the higher the maximum temperature, and the greater the temperature gradient in the vertical direction were recorded. The broken glass increases the vent area, as a result significantly influences the temperature field of a ventilation-controlled fire; the temperature near the vent decreases slightly, while the temperature in deep of the fire field far away from the vent increases significantly. Water spraying can significantly suppress the fire field combustion and reduce the temperature of the fire site. The cooling rate decreases with the prolongation of the water spraying time. Within a short time after firefighting started, the temperature near the fire source drops sharply, and the cooling rate reaches a maximum value of 391 °C/min.

**Keywords:** water spraying; temperature field; steel frame structure; full-scale experiment

## 引言

火灾是在时间或空间上失去控制的一种燃烧现象<sup>[1]</sup>。建筑火灾是最常见的火灾,发生次数最多,造成损失最大。喷水灭火是控制火灾规模,减少人员伤亡和财产损失的重要手段。对于钢结构建筑,在灭火过程中,消防水的冲刷容易造成构件局部急速冷却,引起构件收缩变形,并使已经进入热塑性状态的部分材料硬化,导致结构内力和变形重新分布,容易出现结构破坏。孙冬明等<sup>[2]</sup>在约束钢梁降温试验中发现,泼水冷却会导致梁端轴向支撑在收缩拉力作用下发生断裂。夏云春等<sup>[3]</sup>通过试验研究提出,喷水位置对高温约束钢柱的受力和变形有巨大影响。相关研究关注到了降温对构件的不利影响,而对实际火灾和消防过程中的房屋温度场及结构响应的研究却很少见。

为研究结构在火灾升温阶段的力学响应,各国学者对火灾温度场进行了广泛研究。对于一般室内火灾,提出了瑞典曲线<sup>[4]</sup>、ASCE模型<sup>[5]</sup>、马忠诚模型<sup>[6]</sup>以及IOS834标准升温曲线<sup>[7]</sup>等,针对高大空间建筑火灾特点,李国强团队<sup>[8]</sup>回归分析得出了相应的空气升温公式。传统的火灾温度曲线中,降温阶段多为火灾衰退阶段的自然降温曲线,极少考虑消防灭火行为下的快速降温。

为研究喷水灭火时火灾温度场的变化,建造了足尺钢框架房屋,研究了火灾及消防全过程中的火场温度空间分布及随时间的变化规律,为进一步分析钢结构在消防灭火过程中的结构响应提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 房屋概况

试验房屋为双层双跨钢框架结构,其中局部二层为门式刚架,首层层高 3.3 m,跨度 6.3 m,柱距 5.6 m,首层框架布置如图 1 所示。钢材牌号 Q355B,构件均为热轧 H 型钢,主梁截面 HN400×200×8×13,次梁截面 HN300×150×6.5×9,首层柱截面 HW300×300×10×15,二层柱截面 HM294×200×8×12。楼板为现浇组合楼板,混凝土等级 C30。建造中的房屋结构如图 2 所示。

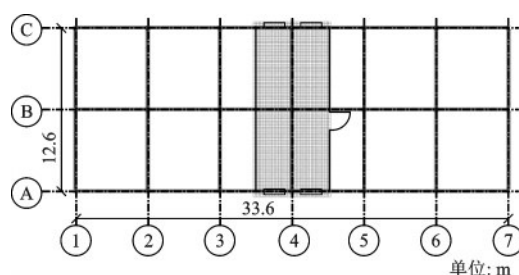


图1 首层框架布置

Fig.1 Layout of the first floor



图2 房屋结构

Fig.2 Building structure

试验选取4号轴线的一榀框架为研究对象,采用轻钢龙骨和硫氧镁防火板,分隔出一个柱距的完整空间作为试验放火及消防灭火房间,试验房间如图1中阴影区域所示。硫氧镁防火板标准尺寸为 $2.5\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 0.01\text{ m}$ ,导热系数为 $0.12\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,具有较好的隔热性能。本试验火灾类型可由下式判断<sup>[9]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \frac{A_v \sqrt{H_v}}{A_t} &\geq 0.07, \text{燃料控制型火灾} \\ \frac{A_v \sqrt{H_v}}{A_t} &< 0.07, \text{通风控制型火灾} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $A_v$ 为通风口面积, $\text{m}^2$ ; $H_v$ 为通风口高度, $\text{m}$ ; $A_t$ 为房间内所有内表面积之和, $\text{m}^2$ 。

试验房间门洞尺寸为 $1.2\text{ m}\times 2.1\text{ m}$ ,4个窗洞尺寸均为 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ ,达到稳定燃烧阶段时,本试验火灾为通风控制型火灾,火灾热释放速率主要取决于房间通风开口尺寸,消防灭火前通风口的变化会对火场产生较大的影响。

## 1.2 火灾荷载布置

受火空间内所有可燃物质完全燃烧时释放的热量值称为火灾荷载,单位房间地面面积内的火灾荷载称为火灾荷载密度,可燃物持续燃烧的时间以及火场温度的变化都受火灾荷载密度的影响。对于普通建筑火灾,室内可燃物主要为纤维类材料,因此选用木垛作为试验的可燃物,能够获得较为稳定的火场,便于掌握火源热释放速率以及火灾升温情况<sup>[10]</sup>。

试验房间按照办公楼的场景计算火灾荷载,根据欧洲规范<sup>[11]</sup>,火灾荷载密度设计值为:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad (2)$$

式中, $q_{f,k}$ 为火灾荷载密度特征值,对于办公楼取 $420\text{ MJ}/\text{m}^2$ ; $m$ 为燃烧因子,一般取值 $0.8$ ; $\delta_{q1}$ 为考虑房间大小对火灾风险的影响系数,根据房间面积取值 $1.4$ ; $\delta_{q2}$ 为考虑建筑物用途对火灾风险的影响系数,对于办公楼取值 $1.0$ ; $\delta_n$ 为考虑火灾过程中主动消防措施的综合影响系数,按下式计算:

$$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{n_i} \quad (3)$$

根据本试验的情况,综合考虑一般办公楼内的消防措施,如楼梯安全通道、消防设施、火灾探测及报警系统、排烟系统等, $\delta_n$ 计算为 $0.81$ 。

本试验选用的木材为白松,表观密度为 $450\sim 500\text{ kg}/\text{m}^3$ ,试验前置于存储间放置约一个月,含水

率约为 $16\%$ 。根据欧洲规范<sup>[11]</sup>中提供的部分固体材料参数,木材的净热值约为 $17.5\text{ MJ}/\text{kg}$ ,计算得木材的用量为 $3\text{ m}^3$ 左右。将木材加工为尺寸 $0.05\text{ m}\times 0.05\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 的木条,按照纵横交错的方式摆放,木垛高度 $0.5\text{ m}$ 。两跨区域各布置六堆木垛,相互间隔 $0.5\text{ m}$ ,实际摆放如图3所示。



图3 房间内的火灾荷载  
Fig.3 Fire load inside a room

## 1.3 试验装置及布置

### 1.3.1 数值模拟预测

为预估试验进入稳定燃烧阶段的时间和可能达到的最高温度,确定合适的灭火时刻,采用火灾动力学模拟软件FDS<sup>[12]</sup>(Fire Dynamics Simulator)对试验场景进行数值模拟。FDS采用数值方法求解热驱动下低速流动的N-S方程,主要用于模拟火灾中的烟气流动和热传递过程,其分析结果得到了国内外众多学者的试验验证。

根据试验房屋的实际尺寸建立FDS三维模型,可燃物选用松木,并采用复杂热解模型和单步混合控制燃烧模型考虑固体火的燃烧和蔓延。火灾发展阶段的热释放速率按照时间平方变化,火灾增长系数取 $0.01172\text{ kW}/\text{s}^2$ ,为中速火。根据试验设计模拟了单跨起火的火灾场景,计算了 $3600\text{ s}$ 的燃烧过程,重点考察了顶棚附近起火跨和蔓延跨钢梁跨中的空气温度,其温度曲线如图4所示。

从模拟结果可知,预计火灾发展 $20\text{ min}$ 后进入稳定燃烧阶段, $45\text{ min}$ 左右可达到最高温度,在此时刻前后进行消防灭火可能出现降温幅度较大的工况。根据模拟结果预估的最高温度约为 $850\text{ }^\circ\text{C}$ ,试验中温度测量可选用量程为 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 的K型热电偶。两条数值模拟温度曲线在稳定燃烧阶段温度差异较大,试验中宜同时在房间内不同区域布置测点,以考察温度的不均匀分布。

### 1.3.2 测温系统布置

为得到火场全过程温度的分布及变化情况,采用K型热电偶测量温度,配合TST3826E静态应变

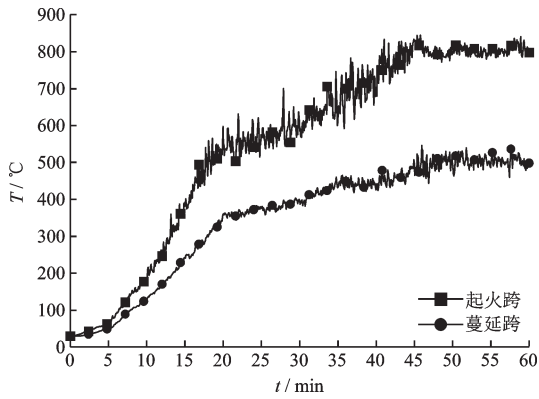


图4 数值模拟温度曲线

Fig.4 Temperature-time curves obtained by numerical simulation

测试分析系统与EX3000系列多路温度巡检仪采集和记录数据。

空气温度测点均布置在试验房间内,分布在四个热电偶树上及框架附近。热电偶树的平面位置及编号如图5所示,每个热电偶树上布置3个测点,高度分别为1.0、2.0、3.0 m。T1热电偶树上的测点由低到高依次编号T1-1至T1-3,其余热电偶树上的测点按同样的顺序编号。框架附近测点位置与编号如图6所示,位于梁柱腹板的中线附近,距离腹

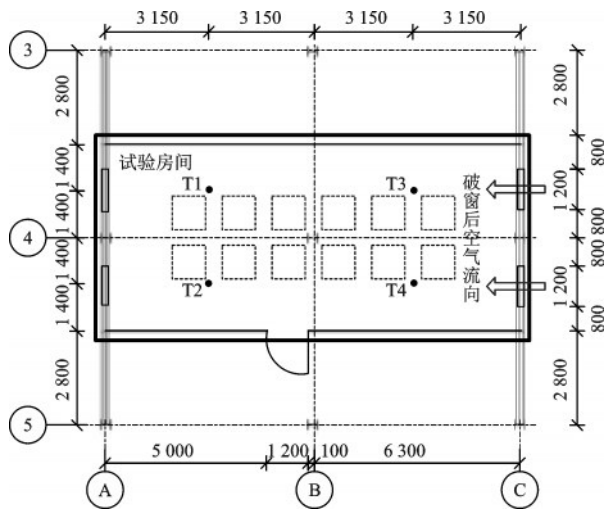


图5 热电偶树平面布置

Fig.5 Layout plan of thermocouple sets

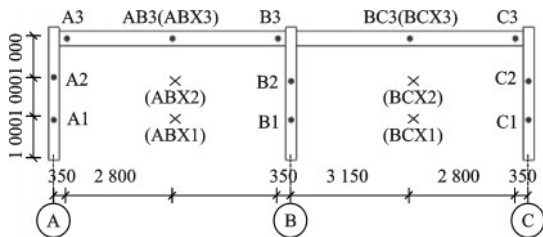


图6 框架附近测点布置

Fig.6 Arrangement of measuring points near the frame

板表面0.2 m。

### 1.3.3 消防系统布置

一般建筑火灾发生后,温度迅速升高,消防力量到达前,窗户玻璃可能在高温作用下碎裂,影响通风控制型火灾的发展<sup>[13]</sup>。因此在试验喷水灭火前设置破窗通风过程,研究通风口增大对火灾温度场及消防灭火的影响。

消防系统由水泵、消防水带、电磁流量计以及消防水枪组成。为与实际消防场景一致,选用一支KY65型直流开关水枪及配套的直径65 mm消防水带,水枪接口公称直径65 mm,喷嘴口径19 mm。电磁流量计测量口径选用65 mm,可读取实时流量与累计流量。电磁流量计通过两端长度为5倍口径的金属直管接于消防水带之间,以确保流量计内水流稳定。

消防水枪布置于房屋C柱外侧,灭火时从窗口向房间内燃烧的木垛喷水,如图7所示。

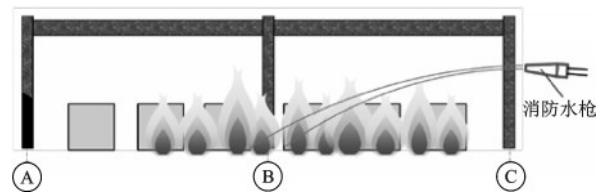


图7 消防灭火布置

Fig.7 Arrangement of firefighting

## 2 试验过程

试验时先点燃BC跨的木垛,逐渐蔓延至AB跨,当火灾发展到一定阶段时破窗灭火。试验共经历110 min,主要分为四个阶段:火灾发展及稳定燃烧阶段、破窗通风阶段、喷水灭火阶段、灭火后冷却阶段。

### 2.1 火灾发展及稳定燃烧阶段

试验开始时,仅开放房间的门,房间内四个窗口采用普通玻璃密封。确保各测点正常工作后,将BC跨区域的六堆木垛同时点燃。随着火势发展,火焰逐渐超过木垛顶面,同时生成的烟气迅速在顶棚聚集,并开始缓慢下降。火势继续发展,火焰高度明显升高,连续火焰区完全覆盖BC跨木垛的顶面,间断火焰区达到房间中部高度,在周围空气的不断补充下,火羽流形成轴对称的漩涡锥形体,火



图8 BC跨燃烧(A柱侧视角)

Fig.8 Combustion in the BC span (view from A column side)

焰呈现间歇性震荡燃烧,如图8所示。

火势的发展增强了火焰对壁面和可燃物的热辐射,C柱外墙两块窗户玻璃相继在7.5 min与9 min左右出现裂纹,火场外试验人员均有明显的灼热感。约20 min后,火焰间歇区触及梁底,AB跨木垛也逐步开始燃烧,房间内混凝土地面偶尔发出爆裂声。实时读取的温度数据显示,25 min左右,位于BC跨的T3-3与T4-3测点温度均达到了800℃,而位于AB跨的T1-3与T2-3测点温度在540℃左右。稳定燃烧阶段,火场最高温度出现在BC跨的BC3测点,达到了870.00℃。

## 2.2 破窗通风阶段

试验35 min左右,火焰蔓延到了AB跨的1/3木垛,T1-3与T2-3测点温度为560℃左右,T3-3与T4-3测点温度略有下降,火势不再增长,较为稳定,破窗通风时机成熟。

36 min时刻,将C柱外墙的两块窗户玻璃破除,试验进入破窗通风阶段。破窗后,高温烟气从窗口上边缘涌出,分体式风速测试仪读数显示,窗口附近的短时平均空气流速由破窗前的0.339 m/s增大为0.651 m/s。房间内AB跨火势增大,T1-1与T2-1测点短时间内升温迅速,温度升高至700℃以上,BC跨火焰高度开始降低,T3-3与T4-3测点温度逐渐降至600℃以下。破窗通风阶段,火场最高温度出现在AB跨的T1-1测点,破窗开始的短时间内达到了784.04℃。

## 2.3 喷水灭火阶段

破窗通风10 min后,试验进入喷水灭火阶段。灭火前,启动电磁流量计并清零读数,旋紧接口,打开水泵后,实时监测喷水流量,读数稳定在180 L/min左右。

灭火时,通过水枪控制水流由近及远喷射于燃烧的木垛上,如图9所示。开始灭火后,BC跨火焰先被扑灭,燃烧面积减小,随后AB跨火焰也在水流冷却下熄灭,并产生大量水蒸气,房间内能见度出现短时下降,火场外体感温度明显降低。大火熄灭后,持续喷水熄灭零散的余火。连续喷水10 min后停止,明火基本扑灭,四个热电偶的下部1号测点温度均降至100℃以下。

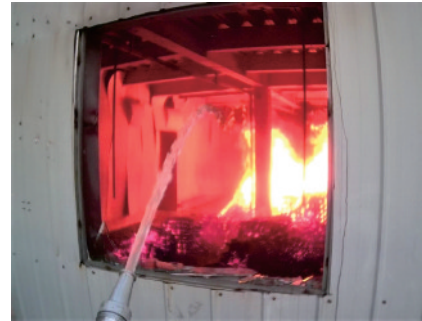


图9 喷水灭火(C柱侧视角)

Fig.9 Firefighting by water spraying (view from C column side)

## 2.4 灭火后冷却阶段

停止喷水后,试验即进入灭火后冷却阶段,火场与室外环境进行自然的传热过程,火场温度缓慢下降,烟气减少。

在喷水灭火阶段,由于中柱B的阻挡,距离喷水点最远的对角处木垛残留一部分阴燃的火星。停止喷水后,试验75 min左右,火星重新点燃了未燃尽的木垛,出现了复燃现象。说明在消防灭火后,要认真检查是否存在阴燃火源,并保留一定的战斗力监控火场,一旦有复燃征兆,立即采取灭火措施。

## 2.5 火灾后破坏情况

从火灾后现场照片(图10)可以观察到,位于BC跨的木垛燃烧较为彻底,随着火灾蔓延,AB跨木垛均被点燃,但未完全燃烧,仍保留木垛基本形状。火灾对房间具有较大的破坏,用于分隔房间的硫氧镁防火板发生了显著变形甚至脱落,混凝土地面出现爆裂,现浇组合楼板钢承板出现褶皱变形,梁柱构件防锈涂料发生明显变色,可推测钢构件表面温度可能达到600℃<sup>[14]</sup>。



图10 火灾后试验现场(A柱侧视角)

Fig.10 Post fire experimental site (view from A column side)

### 3 试验结果与分析

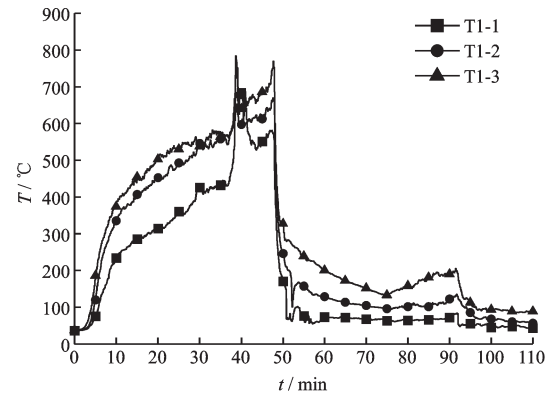
房间内热电偶树上的测点用于考察四个区域的空气温度变化情况,各测点随时间变化的温度曲线如图11所示,其中T2热电偶树的中部测点T2-2在试验过程中失效,图中未绘出。

由于试验房间的宽度不大,同时火灾荷载的布置、起火的位置、破除的窗口均以框架平面为基准镜像对称,故图11中T1与T2相同高度的测点、T3与T4相同高度的测点温度曲线十分接近,说明相同时刻沿房间宽度方向的温度分布差异不大。为研究框架平面的温度分布及变化情况,取相同时刻T1-3与T2-3测点的温度平均值绘制虚拟测点ABX3温度曲线,代表框架平面上AB跨中3 m高处的温度变化,取T3-3与T4-3测点数据处理得到虚拟测点BCX3温度曲线,经与实际位置的AB3和BC3测点对比,发现曲线基本吻合(图12)。同样方法得到虚拟测点ABX1、ABX2、BCX1、BCX2温度曲线,其中由于T2-2测点失效,ABX2曲线由T1-2温度值直接绘制。虚拟测点与框架附近实际测点位置如图6所示。将后四个虚拟测点与框架附近实际测点组合,绘制框架平面温度曲线,如图13所示,其中C3测点在试验过程中失效,图中未绘出。

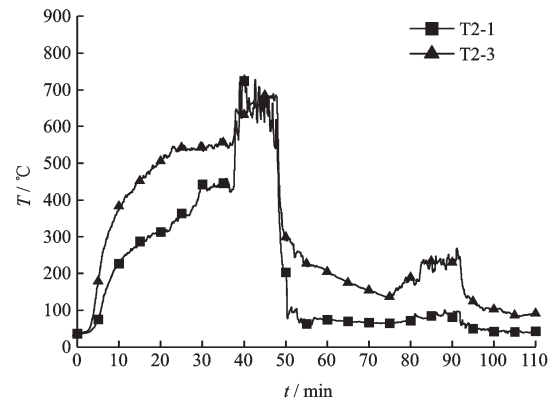
#### 3.1 火灾发展及稳定燃烧温度变化特点

火灾初期,空气温度迅速上升。起火10 min内,所有温度测点的升温速率都较快,随后升温速率逐渐减小,燃烧至25 min左右,各测点温度曲线逐渐平缓,火灾进入稳定燃烧阶段。

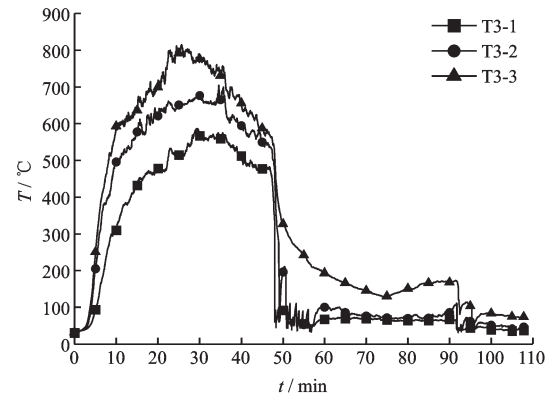
对比图11与图13中相同位置不同高度的测点温度曲线,火场沿房间高度存在明显的温度梯度。以图11(d)T4热电偶树为例,25 min时刻,T4-1测点 538.32 °C, T4-2 测点 753.42 °C, T4-3 测点 833.04 °C,测点温度随高度增加而升高。火灾动力



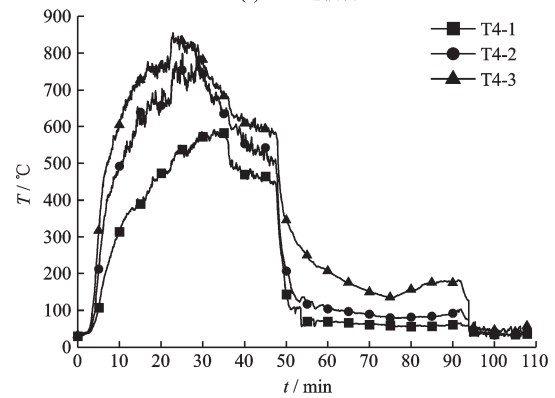
(a) T1热电偶树



(b) T2热电偶树



(c) T3热电偶树



(d) T4热电偶树

图11 热电偶树空气温度曲线

Fig.11 Air temperature-time curves obtained from thermocouple sets

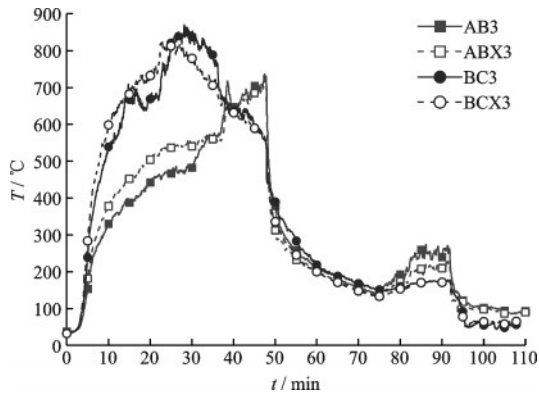


图12 虚拟测点与实际测点温度曲线

Fig.12 Air temperature-time curves of virtual points and actual points

学相关试验研究指出<sup>[15]</sup>,可燃物燃烧时产生的热烟气温度较高,比重较小,湍流和压力作用使周围空气卷吸到火羽流中,浮力作用会使流场表现出分层流动特征,上升的热烟气表现为顶棚射流沿房间顶部扩散而形成高温烟层,呈现火场空气温度随高度增加而升高的分布规律。进一步对比发现,上部测点与中部测点的温度差异小于中部测点与下部测点,表现为T4-2曲线更接近于上部的T4-3曲线,说明火场空气温度随高度增加而升高的变化是非线性的,顶棚高温烟气有一定的厚度,在与下部低温空气交界的附近,可能存在较大的温度梯度。

对比图13中框架平面的测点,由于点火位置在BC跨,距离火源较近的BC跨中测点升温速率最快,相同高度测点在稳定燃烧阶段所达到的最高温度也最高,火场最高温度出现在BC3测点,在30 min左右达到了870.00 °C。相比之下,两个边柱在稳定燃烧阶段达到的温度水平较低,仅在500 °C左右,且边柱各自的测点温度差异也较小,A1、A2与A3曲线几乎重合,说明火场边缘垂直方向的温度梯度不明显。单跨起火时,框架平面沿水平方向距离起火点越近,升温速率越快,能达到的最高温度越高,垂直方向温度梯度越大,温度不均匀分布越显著。

### 3.2 破窗通风温度变化特点

试验火灾为通风控制型,稳定燃烧阶段的热释放速率受到通风口尺寸限制。破窗后,通风口面积增大,大量新鲜空气通过C柱侧的两个窗口从室外涌入火场,引起了测点温度的变化。

由图11可以看出,靠近通风口的T3和T4热电偶测点温度出现小幅度下降,降温幅值在100 °C左右,而远离通风口的T1和T2热电偶测点温度升高,尤其下部测点出现了短时温度大幅上升的现象,在破窗通风的2.5 min内,T1-1测点温度升高了347.11 °C,T2-1测点温度升高了293.07 °C。这是因

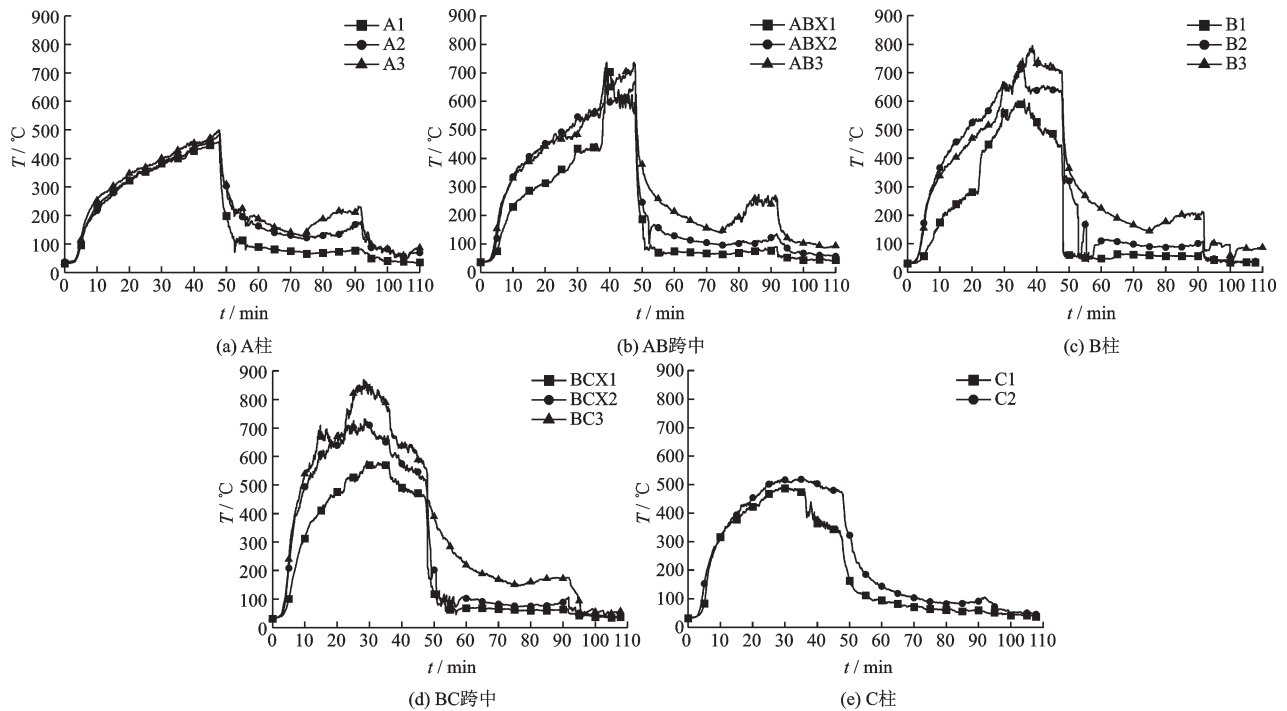


图13 框架平面空气温度曲线

Fig.13 Measured temperature-time curves of frame plane

为高温烟气导致的垂直方向温差层会引起垂直通风流量的压力差,在自由对流条件下,通风口中存在一个流量为零的高度,称之为中性面或中性带,远离中性带的通风口上下边缘气流速度较大,高温烟气从上边缘排向室外,室外空气自下边缘涌入火场<sup>[16]</sup>(图14)。靠近通风口的T3和T4热电偶测点由于低温空气的进入温度出现一定下降,且高度较低的T3-1与T4-1测点下降速率相对较快。空气的涌入一方面给火场补充大量氧气,增大了房间内部火势,另一方面将木垛热解产生的可燃性气体卷吸至AB跨区域,加之起火后火焰逐渐向未起火的AB跨蔓延,远离通风口的T1和T2热电偶测点温度大幅上升。

根据图13,计算框架平面各测点破窗后10 min时刻与破窗初始时刻的温度差值 $\Delta T_w$ ,并将相同高度测点的温度差值绘制为同一折线,如图15所示。沿框架平面水平方向,距离破窗位置最近的C1测点以及BC跨中三个测点降温幅值均超过100℃;靠里的中柱位置,B1测点下降148.69℃,B2测点下降91.45℃,B3测点下降32.00℃,框架上部空间降温较小;火场深处的AB跨中位置,结合图13(b)可知,下部ABX1测点温度大幅上升后逐渐下降,温度净值变化为升温,ABX2与AB3测点温度上升后出现小幅下降,随后继续上升,总体变化为升温,说明升温趋势开始占据主导;距离破窗位置最远处,A柱附近三个测点均为稳定升温。可见,距离破窗位置由近及远,火场空气温度先表现为大幅下降,随后高处降温幅值减小,再逐渐过渡到升温主导的波动变化,最后到稳定上升,而下部空间出现易降温的特征。由此可知,通风口增大后,能发挥一定的排烟散热作用,通风口附近的火场温度显著降低,另一方面也引入了新鲜空气,使得火灾更容易向房间内部蔓延,猛烈燃烧区向里移动,火场纵深处火势加

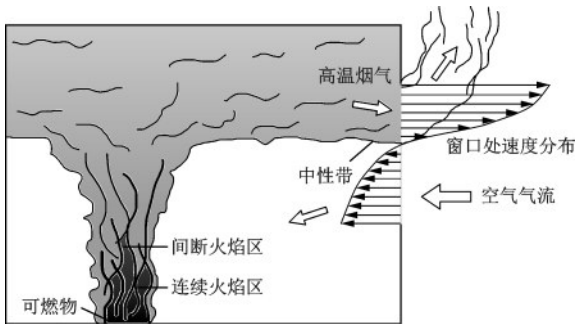


图14 破窗后气流状态

Fig.14 Airflow after windows broken

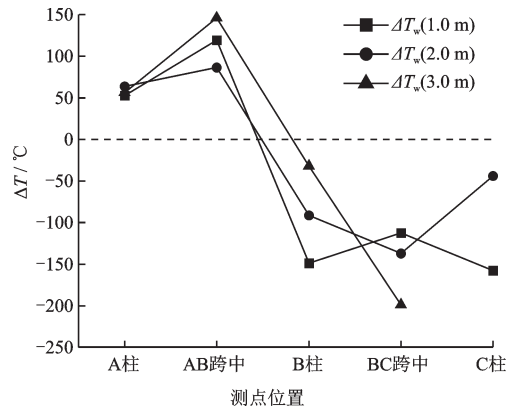


图15 破窗后框架平面空气温度变化折线

Fig.15 Air temperature variations of frame plane after windows broken

剧,温度大幅上升,火场下部空间温度变化复杂。

### 3.3 喷水灭火温度变化特点

喷水灭火时,消防水较大的比热容和较高的汽化热使其对整个火场产生了显著的冷却作用,各测点均出现“断崖式”的温度骤降现象。对比图13中框架平面测点灭火初始温度 $T_{s0}$ 与开始喷水后四个典型时刻的温度, $T_{s0.5}$ 、 $T_{s1}$ 、 $T_{s3}$ 和 $T_{s10}$ 各代表喷水30 s、1 min、3 min以及10 min的温度,将相同高度测点的温度值绘制为同一折线,如图16所示,并计算各时刻相对于灭火初始温度的降温幅值,结果见表1。

由表1可知,所有测点喷水1 min的降温幅值为喷水3 min降温幅值的50%以上,喷水3 min的降温幅值为喷水10 min降温幅值的60%以上,B1测点甚至在喷水30 s就基本完成了大幅降温的过程,降温幅值达到了390℃左右。可见火场大部分降温过程集中于灭火前期,在开始喷水灭火的瞬间,最容易出现温度骤降现象;随着喷水灭火时间增长降温幅值增大,而降温速率减小。

灭火时,一般以火源为喷水目标,尽可能将消防水喷射到燃烧的木垛上,降低其表面温度以迅速扑灭火焰。随着火灾向AB跨蔓延,灭火前火焰主要集中在B柱以及AB跨附近,B柱测点和AB跨中测点喷水前初始温度较高(图16)。根据表1,在消防水作用下,这6个测点1 min内的降温幅值均超过250℃,短时间降温现象明显。火场最快降温速率出现在B1测点,1 min内温度下降了391℃。相比之下,处于火场边缘的A柱和C柱测点初始温度相对较低,喷水后1 min内的降温幅值均未超过

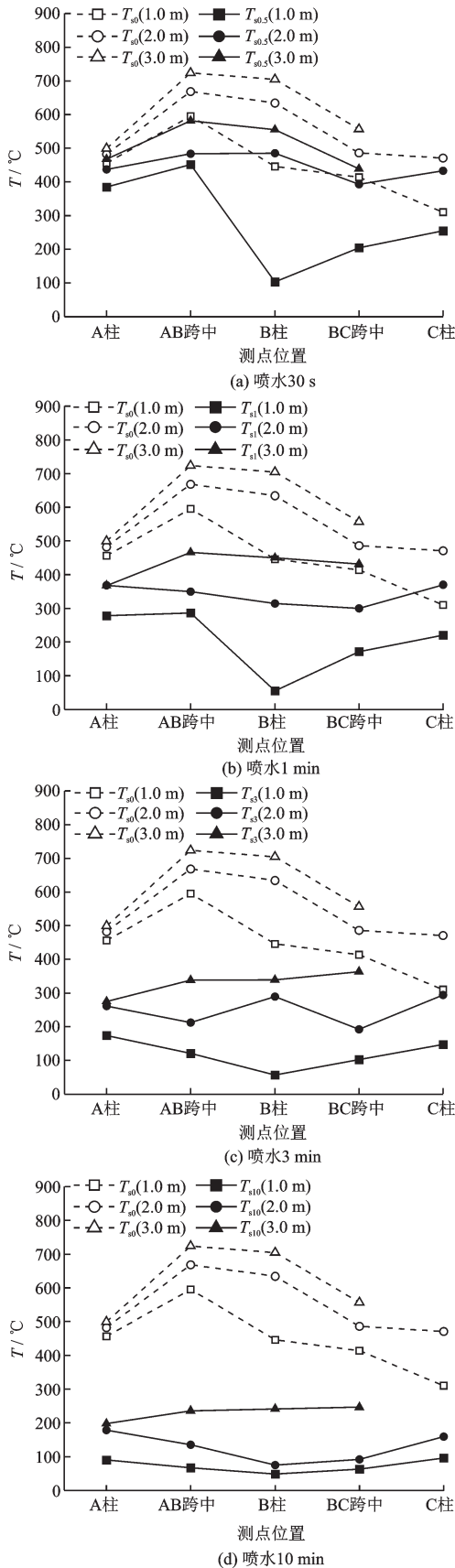


图 16 不同喷水灭火时间下框架平面空气温度  
Fig.16 Air temperature of frame plane in different water spraying time

表 1 喷水灭火时框架平面空气温度变化

Table 1 Air temperature variations of frame plane during water spraying

单位:  $^\circ\text{C}$

测点编号	灭火前温度	不同喷水灭火时间下温度变化			
		30 s	1 min	3 min	10 min
C1	310.14	-55.94	-89.39	-163.13	-213.84
C2	471.32	-38.45	-101.44	-177.18	-312.55
BCX1	413.57	-209.31	-242.03	-311.37	-350.89
BCX2	486.61	-94.27	-186.97	-293.98	-394.20
BC3	556.29	-117.26	-124.85	-193.11	-309.83
B1	445.73	-341.94	-391.10	-389.38	-397.36
B2	634.53	-149.28	-320.25	-345.37	-559.20
B3	704.66	-149.50	-254.50	-365.05	-462.76
ABX1	595.65	-144.08	-309.31	-475.37	-528.74
ABX2	668.36	-184.78	-318.69	-455.64	-533.52
AB3	724.04	-141.99	-258.02	-385.37	-488.52
A1	456.65	-72.49	-179.09	-282.88	-365.99
A2	482.54	-45.71	-114.43	-221.44	-304.22
A3	499.17	-31.77	-131.41	-224.11	-301.42

注:负号代表相对于灭火前温度的降温幅值

180  $^\circ\text{C}$ 。说明沿着框架平面水平方向,从火场两边到火源中心,越靠近火源,灭火前初始温度越高,短时降温幅值越大,易出现温度骤降现象。

对比表 1 中相同位置不同高度的测点,喷水灭火 3 min 内,一般下部 1 号测点同一时间的降温幅值最大,而上部 3 号测点降温幅值最小,说明开始灭火的短时间内喷水灭火行为对火场下部空间的温度影响更大。随着喷水灭火时间的延长,喷水 10 min 时,除了 A2 测点以外,其余中部 2 号测点降温幅值均大于上部和下部测点,这是由于在火灾发展及稳定燃烧阶段,火场持续燃烧,烟气层厚度较大,直到喷水灭火前,火场中部与上部温度均较高(图 16)。进入喷水灭火阶段后,燃烧被迅速抑制,来源于火羽流的高温烟气中断,加之喷水灭火行为使烟气层底部与下层低温空气的混合加强,烟气层厚度逐渐减小,中部 2 号测点逐渐暴露于下部的低温空气范围内,表现为图 16(d)中  $T_{s10}(2.0\text{ m})$  折线更接近于  $T_{s10}(1.0\text{ m})$  折线。而上部 3 号测点由于靠近顶棚,喷水灭火过程中残留的高温烟气仍聚集于这个高度,温度依然较高,喷水 10 min 时,AB3、B3、BC3 测

点温度仍有 240℃左右,在图 13 中各位置的 3 号测点曲线经过短时急速降温后,降温速率减小,降温段曲线相对中部和下部测点更加缓和。因此,喷水灭火短时间内,火场下部空间降温幅值最大,而燃烧被抑制后,由于烟气层厚度的变化,最大降温幅值可能出现在火场中部高度。

### 3.4 灭火后冷却温度变化特点

灭火后冷却阶段,框架各位置的上部测点温度缓慢下降,降温速率约为 5.6℃/min。中部和下部测点在喷水灭火结束时温度已经相对较低,同时由于上部空间温度较高,灭火后冷却过程中降温极为缓慢。

## 4 结 论

火灾是极为复杂的灾害现象,消防灭火行为对火灾温度场的影响,涉及大量的化学反应、能量传递、质量运输之间的相互作用及耦合。本文试验模拟了足尺钢框架房屋的火灾发展和消防灭火场景,测量了升降温全过程的火场温度分布及随时间变化情况,揭示了温度场在整个过程中的变化规律,为火灾及消防灭火行为下温度场的理论研究提供了试验参考。试验得到以下主要结论:

(1)火灾过程中,火场在垂直方向上存在明显的温度梯度,空气温度随高度增加而非线性升高,顶棚高温烟气与下部低温空气分界处可能存在较大温度梯度。

(2)单跨起火时,框架平面沿水平方向越靠近起火点,升温速率越快,能达到的最高温度越高,垂直方向温度梯度越大,温度不均匀分布越显著。

(3)玻璃破碎增大了通风口面积,对通风控制型火灾的温度场有显著影响。火场排出部分高温烟气并引入室外低温空气,通风口附近温度略有降低,而远离通风口的内部火势加剧,引起火场纵深处的温度大幅上升。

(4)消防喷水能迅速抑制火场燃烧,降低火场温度。在开始灭火的短时间内,火源附近温度骤降,降温速率最高达到 391℃/min。垂直方向上,喷水灭火短时间内,火场下部空间降温幅值最大,而上部和中部空间降温幅值较小;而燃烧被抑制后,由于烟气层厚度的变化,最大降温幅值可能出现在火场中部高度。

## 参考文献:

- [1] 消防词汇第 1 部分:通用术语:GB/T 5907.1—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.  
Fire protection vocabulary-Part 1: General terms: GB/T 5907.1—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)
- [2] 孙冬明,夏军武,常鸿飞,等.升降温全过程中约束钢梁的有限元与试验分析[J].防灾减灾工程学报,2010,30(1):71-76.  
Sun D M, Xia J W, Chang H F, et al. Finite element and experimental analyses of a restrained steel beam in complete process of heating and cooling[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(1):71-76. (in Chinese)
- [3] 夏云春,徐正朝.喷水快速冷却下高温约束钢柱抗火性能[J].建筑结构,2017,47(增1):799-805.  
Xia Y Ch, Xu Zh Ch. Fire resistances of high-temperature restrained steel column rapidly cooled by spray water[J]. Building Structure, 2017, 47(Sup 1):799-805. (in Chinese)
- [4] Magnusson S E, Thelandersson S. Temperature-time curves of complete process of fire development[R]. Bulletin of Division of Structural Mechanics and Concrete Construction. Sweden: Lund Institute of Technology,1970.
- [5] Babrauskas V. Structural fire protection: ASCE manuals and reports on engineering practice No.78[M]. New York: ASCE, 1992.
- [6] 马忠诚.火灾后钢筋混凝土结构损伤评估与抗震修复[D].哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1997.
- [7] International Standard ISO 834-1, Fire-resistance tests elements of building construction—Part 1: general requirements[S]. Switzerland: International Organization of Standardization, 1999.
- [8] 杜咏,李国强,黄珏倩.大空间建筑火灾中烟气温度计算模型比较[J].自然灾害学报,2007,16(6):99-103.  
Du Y, Li G Q, Huang J Q. Comparison of calculation models for smoke temperature in fire of large space building[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(6): 99-103. (in Chinese)
- [9] 李国强,韩林海,楼国彪,等.钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.  
Li G Q, Han L H, Lou G B, et al. Fire resistant design of steel structure and steel-concrete composite structure[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006. (in Chinese)

(本文责编:池营营)

(下转第 836 页)