

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220120001

钢框架房屋火灾消防过程温度场数值模拟研究*

王 婷¹, 宋振森^{1,2}, 徐 阳^{1,3}

(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; 3. 奥雅纳工程咨询(上海)有限公司, 上海 200031)

摘要: 钢结构在火灾消防过程中容易遭到破坏甚至发生倒塌, 而空间温度场是研究结构响应的基础。为了研究喷水消防对空间温度场的影响, 建立了三层三跨钢框架房屋模型, 在火灾动力学软件中利用水喷淋方式模拟了其消防灭火过程。分别研究了消防在火灾初期发展阶段和稳定燃烧阶段介入时, 火源及框架平面附近的温度场分布与发展规律, 对比分析了消防在不同火灾阶段介入后直接灭火跨与相邻跨的火场温度变化特性。研究表明: (1) 数值模拟结果与火灾消防试验结果吻合较好, 验证了数值模型中采用水喷淋方式模拟喷水消防过程获得温度场的可行性; (2) 消防在火灾初期发展阶段介入后, 直接灭火跨的温度发生骤降, 最大降幅约 350 °C, 约 20 s 后缓慢回升, 消防喷水有效减缓火灾发展进程, 抑制空间温度与梯度发展, 框架附近平面火场达到的最高温度相比无消防介入火灾低约 350 °C; (3) 消防在稳定燃烧阶段介入时, 空间温度较高、温度梯度较大, 消防介入后火场最高温度在 60 s 左右降低约 650 °C, 降温速率约 11 °C/s, 短时间内温度梯度变化剧烈; (4) 与在稳定燃烧阶段介入相比, 消防在火灾初期发展阶段介入可大幅降低火场最高温度, 且使温度梯度变化比较缓和。

关键词: 火灾; 消防; 温度场; 钢框架; FDS 模拟

中图分类号: TU998.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1100-12

Numerical Simulation Study on Temperature Field of Steel Frame Building during Firefighting

WANG Ting¹, SONG Zhensen^{1,2}, XU Yang^{1,3}

(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; 3. Arup International Consultants(Shanghai)Co., Ltd, Shanghai 200031, China)

Abstract: Steel structures may damage or even collapse during fires and firefighting. The temperature field is one of the critical factors affecting the structural response. In this paper, a three-story three-span steel frame building model was established to investigate the impact of firewater on the temperature field. The fire extinguishing process was simulated using water spraying in Fire Dynamics Simulator (FDS). The distribution and development law of the temperature field adjacent to the combustion source and the steel frame plane in different cases were studied in different scenarios, where firefighting intervention occurred during the initial development stage or the stable combustion stage. The char-

* 收稿日期: 2022-01-20; 修回日期: 2022-03-19

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: 王婷(1996—), 女, 硕士研究生。主要从事钢结构抗火研究。E-mail: wt1498167898@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: songzs@sjtu.edu.cn

acteristics of temperature variation in the fire-extinguishing span and its adjacent span after firefighting intervention in different fire stages were comparatively analyzed. The results show that: (1) Numerical simulation results matched well with the experimental results, proving that it is feasible to obtain the temperature field by simulating the firefighting process using water spraying in the numerical model. (2) After firefighting intervention in the initial stage, the temperature in the fire-extinguishing span decrease rapidly, with a maximum decrease of about 350 °C. After about 20 seconds, the temperature began to rise slowly. Firewater slowed down the development of fire, reduced the temperature gradient, lowered the maximum temperature by approximate 350 °C adjacent to the frame plane. (3) When firefighting intervention in the stable combustion stage, there were higher temperature and larger gradient in the fire field. The maximum temperature decreased by 650 °C in about 60 seconds with a rate of 11 °C per second. The temperature gradient changed greatly after firefighting intervention. (4) Compared to firefighting intervention in the stable combustion stage, firefighting intervention in the initial stage can significantly reduce the maximum temperature and result in a slower change in the temperature gradient.

Keywords: fire; firefighting; temperature field; steel frame; FDS simulation

0 引言

建筑物中人员聚集、可燃物品多,突发的建筑火灾容易造成严重的人员伤亡与重大的经济损失。钢结构建筑凭借其轻质高强、抗震性能优越、工业化程度高等优势被广泛应用于多高层建筑、工业厂房、体育场馆等多种类型建筑。然而,由于钢材的热传导系数较大,钢构件在火灾下快速升温,钢材的强度、弹性模量随之下降,钢结构建筑在火灾下容易遭到破坏甚至倒塌^[1]。消防过程中消防水的冲刷引起构件不均匀降温以及内力重分布也会加剧结构的破坏程度。夏云春^[2-3]通过开展对高温下约束钢构件喷水的试验,研究了喷水急速冷却作用下的构件与结构力学响应,发现温度骤降过程中钢构件产生更大的应力与变形,更易发生破坏。因此,钢结构建筑在火灾以及消防过程中的结构响应引起了国内外学者的重视。

空间温度场是研究结构响应的基础,各国学者对火灾升降温过程的温度场变化进行了广泛研究。张永恒^[4]用FDS计算钢框架结构在火灾下空气的实际升温曲线与ISO834标准升温曲线进行比较,并以实际升温曲线为环境温度分析了结构抗火响应。麻洪波^[5]用FDS模拟某钢框架结构火灾发生全过程的温度变化,并采用有限元计算分析了钢构件内部温度场。A. G. Li等^[6]采用缩尺试验和FDS数值模拟方法研究了廊道在不同热释放速率下的

火灾温度场以及烟气层高度,研究中试验结果与预测结果吻合良好。庞见^[7]用FDS模拟某办公室火灾时室内温度场,并分析了通风口对温度场影响。徐林雅等^[8]用FDS模拟了单室火灾的喷水灭火过程,发现消防介入后空间温度梯度极为不均。现有研究大多关注了火灾升温及自然降温过程,而对框架房屋整体消防骤冷的温度场时空发展规律涉及较少。

本文以三层三跨的钢框架房屋作为研究对象,采用基于场模型的火灾动力学模拟软件FDS(Fire Dynamics Simulator)对其进行火灾消防过程数值模拟,研究消防在火灾不同阶段介入后火源及框架平面附近的温度场发展与分布规律。本研究可为进一步分析钢结构在复杂消防灭火过程中的结构响应以及消防决策提供参考。

1 FDS模型验证

FDS软件通过求解适于热驱动的低速流动N-S方程,模拟火灾中的烟气流动和热传递过程。为了验证基于FDS模型求解钢框架房屋火灾消防过程温度场的可行性,对某二层钢框架房屋足尺火灾与消防试验过程^[9]进行数值模拟,并与试验结果对比。

1.1 试验概况

试验房屋为双层双跨钢框架结构,跨度为6.3 m,柱距5.6 m。梁柱构件采用热轧H型钢,楼板

采用现浇组合楼板。以房屋中间的一榀框架为研究对象,围绕该榀框架分隔出一个宽度与柱距相等的空间作为试验房间。可变荷载取值参照办公楼;一楼采用白松木条搭成的木垛作为火荷载,在两跨分别布置6堆木垛;二楼采用砂袋模拟可变荷载。试验模拟了单跨起火蔓延后由C柱一侧窗口喷水灭火的火灾及消防场景。试验共经历110 min,主要分为四个阶段:0~36 min为火灾发展及稳定燃烧阶段,36~47 min为破窗通风阶段,47~57 min为喷水灭火阶段,57~110 min为灭火后冷却阶段。在试验房间内布置4个热电偶,并在距框架梁柱腹板表面0.2 m处布置热电偶,测量房屋内不同区域及构件附近空气温度场分布及变化情况,首层框架平面及热电偶布置如图1所示,框架附近测点布置如图2所示^[9]。

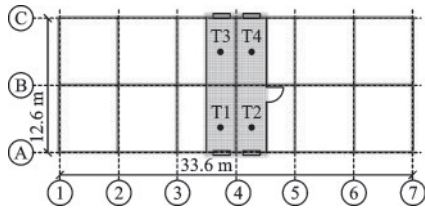


图1 试验房间布置^[9]

Fig.1 Layout of the testing room^[9]

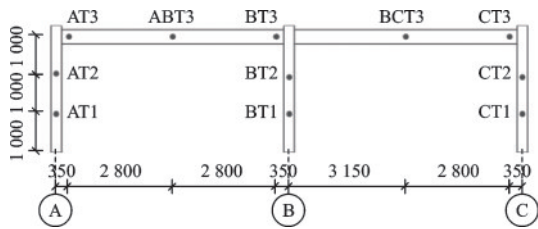


图2 框架附近测点布置^[9]

Fig.2 Arrangement of measuring points adjacent to the frame^[9]

1.2 FDS数值模型

对3至5轴线之间的试验房间建立FDS模型,如图3所示,模拟火灾发展及消防灭火过程。为展示试验房间内火灾荷载与温度测点的布置,将房屋的二楼楼面板、屋面板与外墙隐去。

FDS默认采用大涡模拟(LES),而涡的形成取决于网格的最长边大小,故网格在三个方向的尺寸应尽可能接近。此外,FDS在y轴和z轴上的部分计算采用基于快速傅里叶变换(FFT)的泊松求解器,要求这两个方向上的网格数量满足 $2^k \times 3^m \times 5^n$

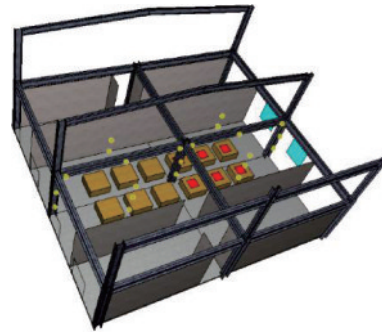


图3 试验房间FDS模型

Fig.3 FDS model of the test room

的形式,其中k、m和n为整数。兼顾计算耗时与精度要求,控制单元尺寸确定为 $0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$ 。

模型中采用水喷淋的方式模拟消防喷水,通过设置水喷淋的喷头位置、喷水流量、出水角度、出水速度等参数,近似模拟试验中的消防喷水的相应参数。考虑到消防灭火后期自然冷却时温度场变化比较缓慢,设置模拟时间为3 600 s。

模型中温度测点布置与试验相同,在图3中以圆点表示。可燃物为松木,布置与起火位置均与试验中一致。采用复杂热解模型和单步混合控制燃烧模型以考虑固体火的燃烧和蔓延,火灾初期发展阶段的热释放速率按照时间的平方关系增长,采用中速火,火灾增长系数取 0.01172 kW/s^2 。

1.3 数值模拟结果与试验结果比较

选取空气温度热电偶测点T4从下往上的第三个测点T43与构件附近空气温度测点BCT3比较数值模拟与试验结果,温度随时间变化曲线如图4所示。由于数值模拟中的热电偶没有热惯性,测点对火焰振荡燃烧等造成的空气温度变化较为敏感,T43与BCT3测点的模拟值呈现出一定程度的抖动。根据试验数据曲线特性,采用30点的相邻平均法(AAV)对模拟结果进行平滑降噪。在数值模型中,将试验中由木条纵横交错、分层摆放而成的木垛简化为长方体,木垛与空气接触的表面积变小,对木垛燃烧速率造成一定影响,使得火源上方的T43测点在火灾初期温度上升较试验略慢(图4(a))。在模拟喷水灭火时,一方面水通过热交换吸收可燃物的热量,延长其达到热解温度的时间,起到对火的抑制作用;另一方面FDS软件中通过折减热释放速率近似模拟水对燃烧的抑制作用,使得喷水灭火阶段数值模拟结果中的降温速率较试验中

略大(图4(a)、(b))。通过比较试验和平滑后的模拟结果,本模型在温度变化趋势、温度峰值及燃烧时间上总体较为接近,能够较好地模拟钢结构在火灾与消防过程中空间温度场变化与分布情况。后文均采用相邻平均拟合曲线替代模拟温度曲线。

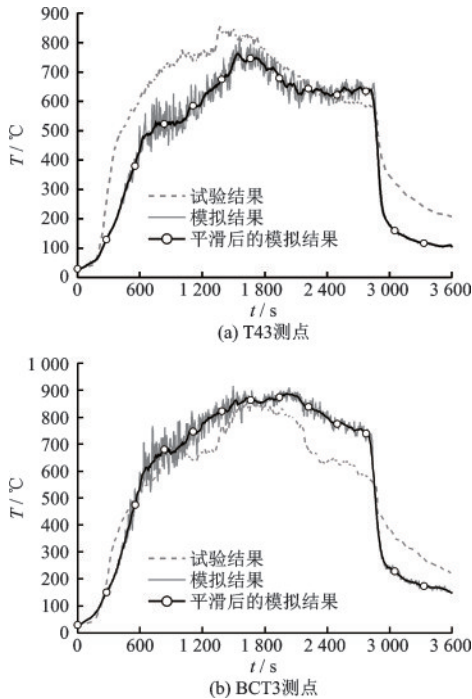


图4 测点温度变化曲线的模拟结果与试验结果比较
Fig.4 Comparison of simulation and experiment results of temperature-time historic curves of measuring points

2 钢框架房屋火灾消防过程模拟

2.1 模型建立和网格划分

为不失一般性,本文对多高层建筑中的典型子结构三层三跨钢框架进行火灾及消防全过程数值模拟。该房屋按办公楼设计,跨度为7.5 m,柱距为6.0 m,层高为3.3 m,楼面为100 mm厚的钢筋混凝土板,框架结构的平面布置以及立面如图5所示。以B轴线框架为火场中心,A轴线至C轴线之间6个开间区域依次编号为区域一至区域六。房屋采用侧面采光,按照Ⅲ类光气候区,以及采光等级Ⅲ确定窗地面积比为1/5。窗户均为外窗,通长设置于外围的相邻柱间,并处于打开状态。

火灾过程中承重结构和围护结构均不可燃烧,其作用主要是占据物理空间,限制火场气体流动,改变液滴运动轨迹,模拟中主要计算与其相关的传

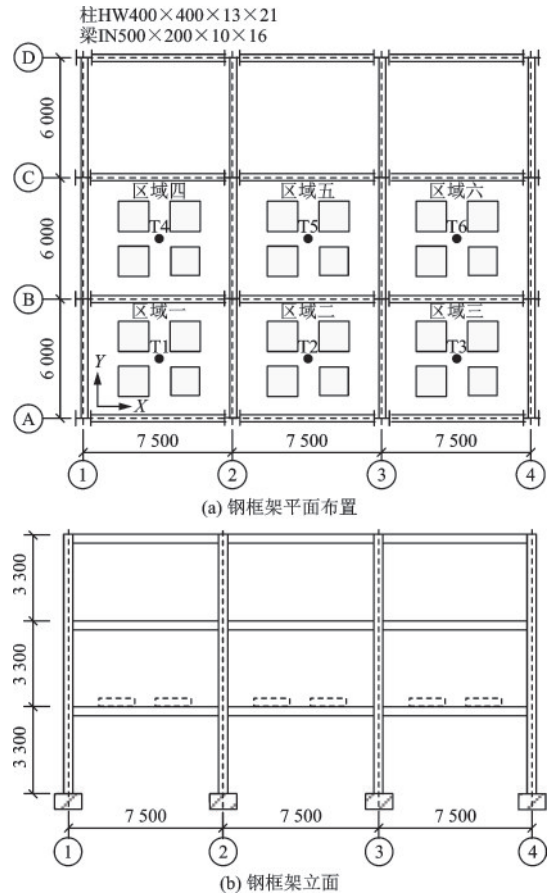


图5 钢框架示意

Fig.5 Configuration of the steel frame

热过程,故采用具有传热参数的网格边界代替复合墙板外墙,框架中的梁柱无防火保护。

2.2 火灾场景设置

为便于考察单层火灾对上下层的影响,将可燃物布置于二层,以B轴线框架为研究对象,故将火源与可燃物对称布置在B轴线框架两侧的区域一至区域六内,FDS模型如图6所示。选用松木作为可燃物,根据欧洲规范^[10],火灾荷载设计值 $q_{f,d}$ 可按下式计算:

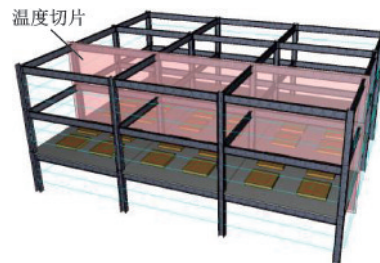


图6 框架结构FDS模型

Fig.6 FDS model of the steel frame building

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad (1)$$

式中, $q_{f,k}$ 为火灾荷载密度特征值, 对于办公楼取 420 MJ/m^2 ; m 为燃烧因子, 木材取 0.8 ; δ_{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 1.5 ; δ_{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 ; δ_n 为综合考虑火灾过程中不同主动消防措施的影响系数, 根据一般办公楼内的消防措施, 计算为 0.53 。

室内初始温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 开始时同时点燃所有可燃物, 选用时间平方火模拟火灾发展阶段热释放速率的变化, 火灾增长系数取 0.01172 kW/s^2 , 为中速火。

2.3 消防系统设置

喷水灭火时, 选择位于中间的 B 轴线二层框架为主要喷水冷却对象。根据《消防给水及消火栓系统技术规范》^[11], 我国大多数城市消防队第一出动力量到达火场时, 采用口径 19 mm 的水枪扑救建筑火灾, 当水枪的充实水柱长度为 $10 \sim 17 \text{ m}$ 时, 每支水枪的出水流量为 $4.6 \sim 7.5 \text{ L/s}$ 。本文采用一支水枪, 出水流量设置为 7.5 L/s 。根据《消防水枪》^[12],

低压直流水枪的工作压力范围为 $0.2 \sim 0.35 \text{ MPa}$, 根据本文中建筑结构模型所需的射程, 低压直流水枪的工作压力取 0.20 MPa , 出水速度为 20 m/s 。灭火时水枪位置固定在 A 轴二层中跨的外窗中心处, 出水角度为 $+Y$ 方向, 从窗外向窗内水平射入, 消防水在初速度和重力作用下作抛物线运动。

2.4 测点布置

在模型中设置热电偶测点记录空气温度变化, 设置温度切片考察空间温度分布。如图 5 所示, 六个区域中央分别布置一个虚拟热电偶树, 热电偶树对应依次编号为 T1~T6, 每个热电偶树上 3 个测点距楼面高度分别为 1.1 、 2.1 、 3.1 m , T1 热电偶树测点自下而上分别编号为 T11、T12、T13, 以此类推。距离 B 轴线框架梁柱腹板 0.2 m 处布置热电偶, 如图 7 所示, 框架柱编号自左至右为 Z1 至 Z4, Z1 柱上的热电偶编号自下而上为 Z11、Z22、Z23, 以此类推; 框架梁编号自左至右为 L1 至 L3, L1 上热电偶编号自左至右为 L11~L15, 以此类推。在 B 轴线附近设置平行于框架的温度切片以便于观察火场温度分布情况, 如图 7 所示。

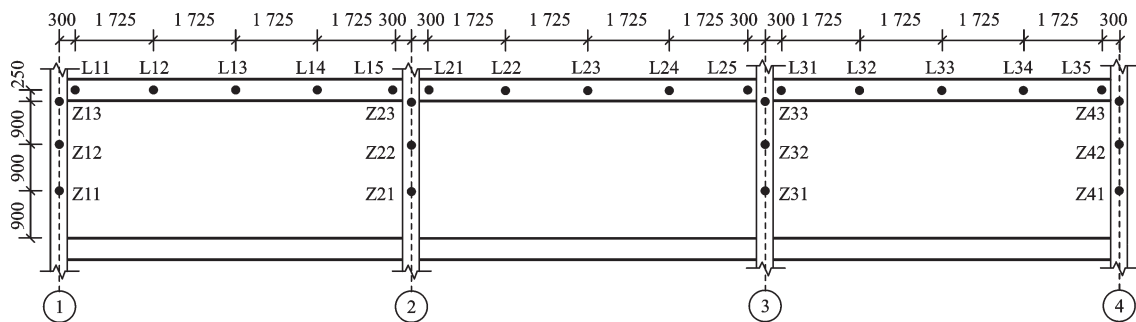


图 7 B 轴线二层框架附近空气温度测点布置

Fig.7 Arrangement of air temperature measuring points of the B frame on the second floor

2.5 模拟工况

为了确定合适的消防介入时刻、设计模拟工况, 先对无消防介入的火灾全过程进行模拟, 由于结构和可燃物的布置具有面对称性, 对称位置的构件附近测点温度曲线比较接近, 空间温度分布也具有一定的面对称性, 故选取轴线 1 至 3 之间的框架附近测点温度曲线列出, 如图 8 所示。火灾过程大致可分为三个阶段: $0 \sim 1500 \text{ s}$ 为初期发展阶段, 开始时温度上升速度较慢, 600 s 后温度上升加快; $1500 \sim 2100 \text{ s}$ 为稳定燃烧阶段, 温度不断上升但上

升速度减缓; $2100 \sim 3600 \text{ s}$ 为衰退阶段, 2100 s 左右各测点达到最高温度, 随后缓慢下降。

根据“15 min 消防时间”的要求, 我国消防站布局依据消防队接到出动指令后可按时到达其辖区边缘为原则确定^[12], 考虑到火灾初期不易被发现, 选取 1050 s 作为消防在初期发展阶段介入的时间, 定义为工况 1。根据火灾燃烧全过程在 2100 s 左右达到最高温度, 选取 2100 s 作为消防在稳定燃烧阶段介入的时间, 定义为工况 2。大部分灭火过程在 10 min 左右结束^[13], 故设置总模拟时间为 2700 s 。工况 1 和工况 2 分别作为研究消防在火灾初期发展

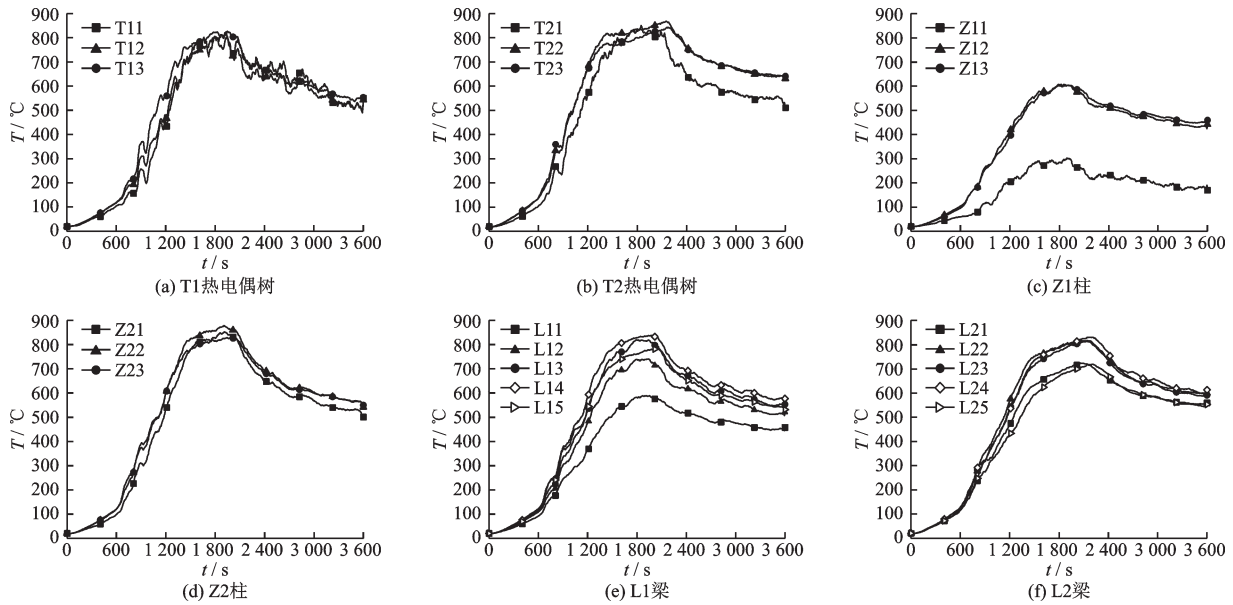


图8 火灾燃烧全过程测点温度曲线

Fig.8 Temperature-time historic curves of measuring points in fire

阶段和在稳定燃烧阶段介入时温度场变化及分布规律的典型工况。

3 数值模拟结果及分析

3.1 测点温度变化

工况1的T1、T2热电偶树及B轴线框架附近的测点温度曲线如图9所示,喷水后测点温度短时内骤降情况汇总于表1。对于T1与T2热电偶树,在

1 050 s喷水前各测点温度随空间高度的增加而升高,这是由于火灾开始后热烟气在浮力作用下上升,空间温度在高度方向出现分层现象;位于中跨的T2热电偶树各测点温度比边跨的T1热电偶树相同高度测点温度高约100℃。喷水后,中跨烟气在水颗粒的冷却作用和拖曳力作用下沉降,各测点温度短时内大幅下降,T2热电偶树在喷水后持续骤降20 s,中下部空间温度降幅较为接近,且高于上部空间;T1热电偶树骤降持续时间略短,约为16 s。这是由于中跨中下部空间空气受消防水直接作用

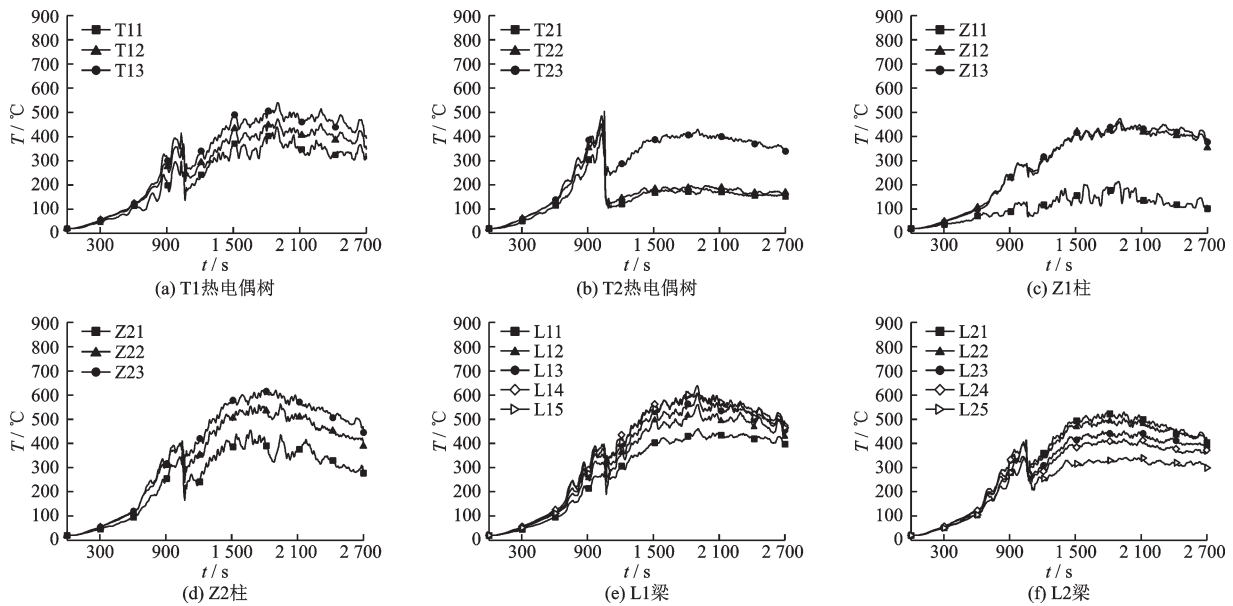


图9 工况1的部分测点温度曲线

Fig.9 Temperature-time historic curves of measure points in Case 1

表1 工况1喷水后测点温度骤降情况

Table 1 Rapid decrease of the temperature after water spraying of measuring points in Case 1 单位:℃

中跨				边跨			
测点编号	初始	20 s	骤降幅度	测点编号	初始	16 s	骤降幅度
T21	430	119	311	T11	244	136	108
T22	464	121	343	T12	318	216	103
T23	504	240	265	T13	370	223	147
Z21	364	165	199	Z11	129	68	61
Z22	410	240	171	Z22	289	234	54
Z23	411	283	128	Z23	281	233	48
L21	330	268	62	L11	282	190	92
L22	395	262	133	L12	327	240	87
L23	399	264	135	L13	359	253	106
L24	413	262	151	L14	397	269	128
L25	337	245	92	L15	380	288	93

后迅速降温,边跨中下部空间与靠近顶棚处的热空气向中跨流动,致使边跨温度有所下降,中跨上部空间温度降幅略低。可见,消防喷水使直接灭火跨温度产生较大降幅,中下部空间温度降幅大于上部空间;使相邻跨产生相对较小的温度降幅,上部空间降幅略大于中下部空间。随着边跨可燃物持续燃烧,热空气流向温度降低之处,因此T2与T1热电偶测点温度分别在喷水20s和16s后开始回升,温度升高速率较喷水前显著减缓,可以看出,消防喷水对所在跨的降温作用持续时间较周围空间更长,喷水不仅可以直接降低空间温度,还能有效减缓火灾发展速率。

中柱Z2附近空气温度对喷水响应迅速,持续喷水20s内温度降幅随空间高度的增加减小,这是由于中下部空间直接受到消防水的降温作用,而上部空间受到热空气从边跨流向中跨影响,降温幅度相对较小。边柱Z1远离火场中部灭火位置,灭火前柱附近空气温度较低,灭火喷水3s后温度才开始骤降,喷水持续16s后Z11、Z12、Z13测点温度降幅均在60℃以内,这是因为Z1柱离喷水位置较远,中跨喷水对边跨降温作用略有延迟,附近空气降温幅度较小且高度方向差异不大。

中跨L2梁附近各测点温度在喷水后3s内降幅不超过4℃,持续喷水20s后L21、L22、L23、L24、L25测点降幅在151℃以内,跨中降幅高于梁端。边跨L1梁喷水前跨中和靠近火场中部一侧温度更高,各测点温度排序为:L14>L15>L13>L12>L11,喷水后离火场中部较远的L11与L12测点在

前3s内仍在升温,持续喷水3s后温度开始下降,在持续喷水20s时各测点温度降幅差值与L2相比较小,喷水前测点温度较高的区域有更大的降幅,持续喷水20s后测点温度开始回升。

综上所述,消防在火灾发展初期介入后的火场温度经历骤降、缓慢回升、缓慢下降三个过程,直接灭火跨温度在喷水后迅速开始骤降,骤降持续时间约为20s;相邻跨在喷水持续3s后方开始骤降,骤降持续时间约为16s。由于边跨火源持续燃烧,各测点温度在骤降后继续回升,但上升速率较喷水前变慢。1800s后,火灾与无消防的火灾全过程相比提前300s进入衰退阶段,各测点温度曲线呈下降趋势。火灾与消防全过程火场中测点达到的最高温度为638℃,远低于无消防介入的火场最高温度。

工况2在火灾稳定燃烧阶段灭火,此时火场燃烧猛烈,灭火前火场最高温度超过900℃。灭火前后T1、T2热电偶及B轴线框架附近的测点温度曲线如图10所示,喷水后测点温度短小时内骤降情况汇总于表2。T2热电偶2100s时各测点温度达到834~868℃之间,喷水后温度骤降,持续喷水60s时中部与下部测点降幅接近,且大于上部测点降幅,降幅沿高度方向变化规律与工况1相似,但中部与下部测点温度降幅较工况1高出300℃以上。骤降后上部测点温度低于500℃,中部与下部测点均在200℃左右,此后各测点温度缓慢下降。T1热电偶各测点温度在652~690℃之间,喷水后各测点温度急剧下降,持续喷水60s时降幅随高度增加减小,与工况1中上部测点降幅更大不同,这是因为此

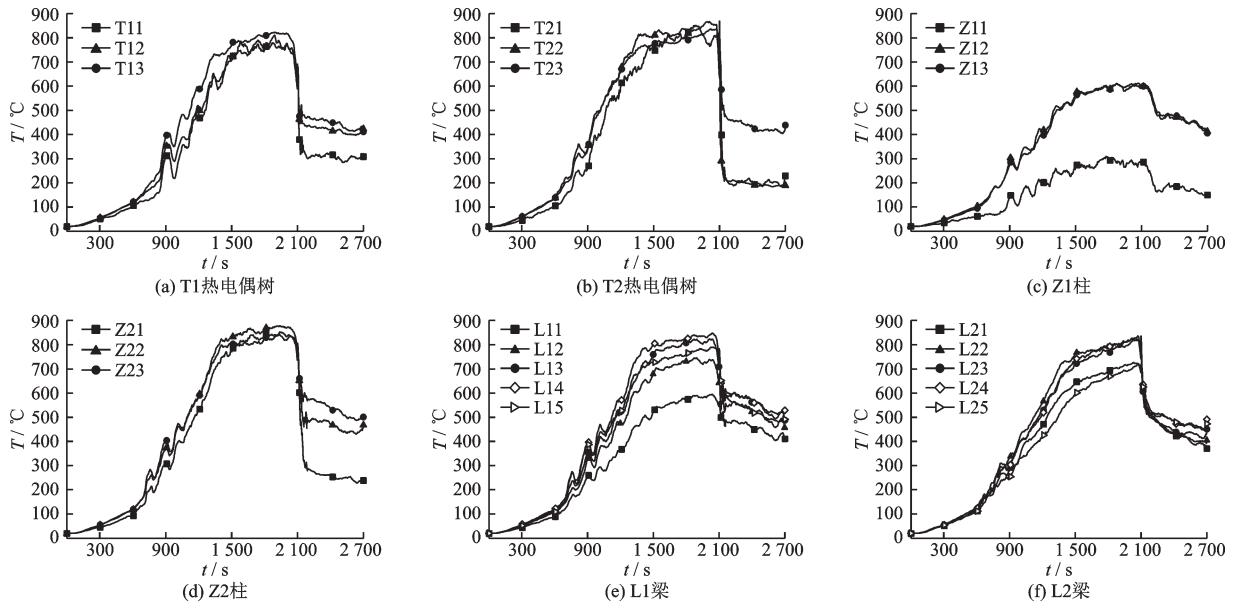


图 10 工况 2 的部分测点温度曲线

Fig.10 Temperature-time historic curves of measure points in Case 2

表 2 工况 2 喷水后测点温度骤降情况

Table 2 Rapid decrease of the temperature after water spraying of measuring points in Case 2

单位: °C

测点编号	中跨			边跨			
	初始	60 s	骤降幅度	测点编号	初始	60 s	骤降幅度
T21	851	212	639	T11	652	331	321
T22	868	216	652	T12	691	443	248
T23	834	473	361	T13	684	480	204
Z21	768	321	447	Z11	288	253	35
Z22	806	497	309	Z22	595	586	8
Z23	785	596	190	Z23	599	598	1
L21	564	489	75	L11	717	536	181
L22	666	556	110	L12	835	524	311
L23	741	597	144	L13	806	515	291
L24	784	611	173	L14	813	537	276
L25	757	592	164	L15	714	558	156

时热烟气聚集严重,各测点均上升至较高温度,中部与下部测点降温幅度增大。骤降后上部测点温度与中部测点接近,且均低于 500 °C,下部测点降至 300 °C 左右,此后温度缓慢下降。

中柱 Z2 附近测点空气温度灭火前在 768~806 °C 之间,持续喷水 60 s 时各测点温度骤降幅度随空间高度的增加而递减,此后缓慢下降。边柱 Z1 灭火前中部与上部测点温度较高,下部测点温度较低,由于远离喷水位置,各测点在喷水后未出现温度骤降,而是在波动中以较快速度下降,各测点持续喷水 180 s 时降幅约为 125 °C,此后温度曲线接近

水平,降温速率非常缓慢。

中跨 L2 梁 5 个测点灭火前温度较高,降温幅度也较大,在喷水 60 s 后各测点均降至 600 °C 以下,与工况 1 同样表现为跨中降幅高于两端。边跨 L1 梁 5 个测点灭火前温度分布规律与工况 1 类似,喷水持续 60 s 后降至 600 °C 以下,灭火前温度较高的测点降幅更大。温度骤降结束后各测点温度下降速度减缓,不同测点降温速度相近。

综上所述,消防在稳定燃烧阶段介入后的火场温度经历骤降、缓慢下降两个过程。在稳定燃烧阶段,热烟气层较厚,火场温度已达到 800 °C 以上,

直接灭火跨中下部由于直接受消防水冷却及蒸发的影响,局部温度在60 s内骤降幅度达600 °C以上,降温速率超过10 °C/s,上部空间的降温速率和降温幅度明显小于中下部,骤降后中部与下部测点温度接近。距离消防喷水位置较远的火场区域,温度骤降幅度随空间高度增加而减小,骤降后中部测点温度与上部测点更为接近。

为进一步对比消防介入阶段对于火场温度发展的影响,选取工况1和工况2中直接灭火跨的T2热电偶树与Z2柱附近测点温度进行比较,将这两个工况典型测点温度随时间变化曲线绘制在同一张图上,如图11所示。由图可知,消防介入前工况1与工况2测点温度发展情况基本一致。工况1在消防介入后温度先骤降后小幅回升,回升后温度未超过喷水前最高温度;工况2测点温度持续升高至800 °C以上,在消防介入后大幅骤降,骤降幅度超过工况1,骤降结束后各测点温度缓慢下降,与工况1中相同测点温度曲线变化趋势基本一致,但温度曲线普遍略高于工况1。可见,两种工况下火场温度都会经历骤降,但消防在稳定燃烧阶段介入的工况中火场经历的最高温度、温度骤降时长与骤降幅度均大于消防在初期发展阶段介入的工况,可能对结构造成不利影响。

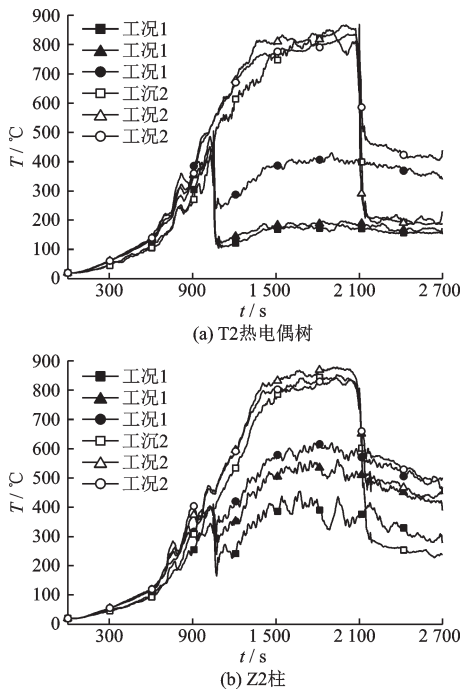


图11 工况1、工况2的部分测点温度曲线比较

Fig.11 Comparisons of temperature-time historic curves of Case 1 and Case 2

3.2 空间温度分布

工况1在不同时刻的B轴线框架附近温度切片云图如图12所示,同一热电偶树或构件附近测点最高与最低温度差值见表3。云图中可以看出,1 050 s开始喷水前火场整体温度较低,中跨温度略高于边跨,温度随高度增加而增加,但随空间位置变化较小,沿水平X方向分布较为均匀,边跨温度分布与中跨相比稍显不均匀(表3)。持续喷水1 min后,云图中火场沿高度方向出现明显分层,下部空间温度降至200 °C以下,上部空间温度降至300 °C以下,下部空间与上部空间之间温差较喷水前有所增大,由于喷水冷却作用,梁附近温度较高的位置被冷却,温度差值减小(表3),此时上部空间沿水平方向温度梯度较小。持续喷水10 min后,中跨木垛燃烧受到抑制,不再提供热量,但由于喷水位置固定,消防水降温作用区域有限,边跨木垛继续燃烧,热量通过辐射和对流向中跨传递,中跨温度有所回升,火场温度分布更不均匀,火灾消防过程中框架附近切片所在平面局部最高温度620 °C(图12),超过了灭火前的最高温度。综上所述,当消防在初期

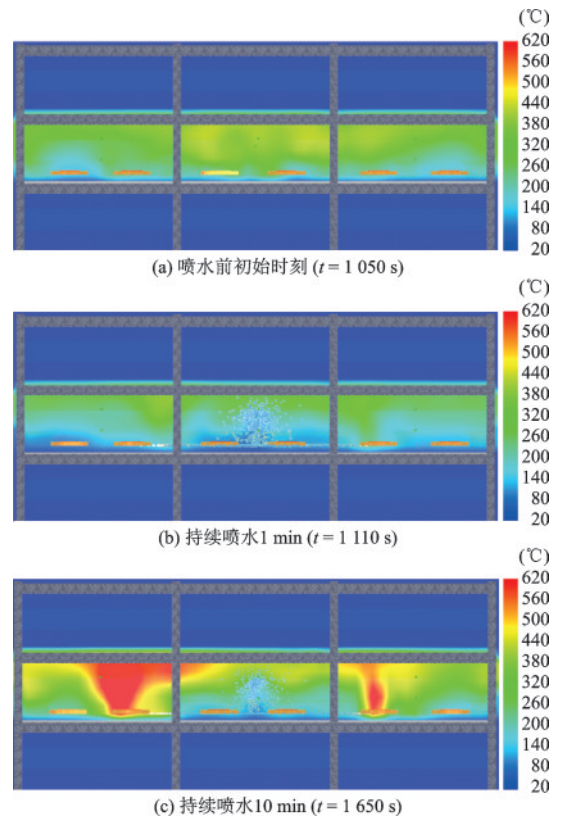


图12 工况1不同时刻温度切片云图

Fig.12 Temperature slices at different time of Case 1

发展阶段介入,向火场中部喷水可以抑制整个火场火灾发展,防止过高温度与过大温度梯度出现,火场温度分布变化较为缓和。

工况2不同时刻的温度切片云图如图13所示,同一热电偶树/构件附近测点最高与最低温度差值见表3。2100s时火场燃烧猛烈,高温区域由火源向上部空间延伸,呈倒锥形,框架附近切片所在平面局部最高温度达到970℃。由于此时火灾充分发展,烟气层较厚且沉降于下部空间,火场中部区域温度沿高度方向分层明显且分层高度较低。空间温度沿水平X方向存在较大温度梯度,中跨区域内梁跨中附近测点温度高于两端,边跨梁附近靠中跨一侧温度较高,建筑物边缘一侧温度较低,火场温度分布不均匀但具有对称性。持续喷水1min后,燃烧受到明显抑制,火场温度显著下降,降温后火场上部空间沿水平方向温度趋于相近,沿高度方向温度梯度较喷水前增大(表3),右侧边跨局部木垛尚在间歇性振荡燃烧,导致温度分布不对称。喷水10min时火场温度分布与喷水1min时接近,火场温度下降不明显(图13),Z2柱附近下部测点温度降至300℃以下,中上部温度仍超过500℃,Z1柱附近下部测点降至200℃以下,中上部空间温度超过

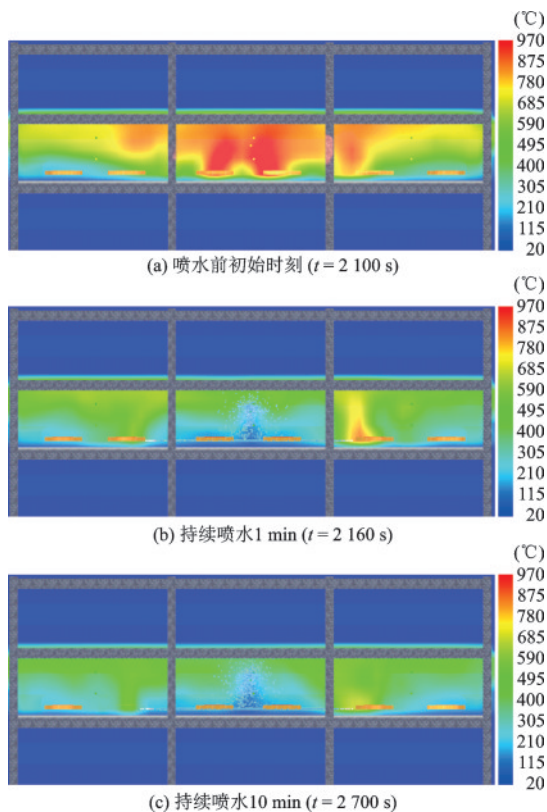


图13 工况2不同时刻温度切片云图

Fig.13 Temperature slices at different time of Case 2

表3 同一热电偶树/构件附近测点最大温差

Table 3 Maximum temperature difference of measuring points of the same thermocouple tree or adjacent to the same component 单位:℃

热电偶树/ 构件编号	不同喷水灭火时刻温度差值					
	工况1			工况2		
	初始	1 min	10 min	初始	1 min	10 min
T2	74	134	215	34	261	250
Z2	47	106	139	38	275	262
L2	83	90	162	220	122	120
T1	126	79	131	39	149	114
Z1	160	186	276	311	345	262
L1	115	92	144	121	43	117

400℃(图10)。由此可知,火灾进入稳定燃烧阶段时,火场温度较高,空间沿高度方向、水平方向都存在较大的温度梯度,喷水后的短时间内温度梯度变化剧烈,可能影响结构安全。

为进一步考察不同工况消防喷水后空间温度分布变化,将工况1与工况2相同高度测点温度值分别绘制为在同一幅折线图上进行比较,如图14所示。喷水前,工况1与工况2柱温度折线均呈现出对称性、近似“等腰梯形”,水平方向表现为中间温度高、两边温度低的分布规律,1.8m高度与2.7m高度的温度折线较为接近,说明上部空间沿高度方

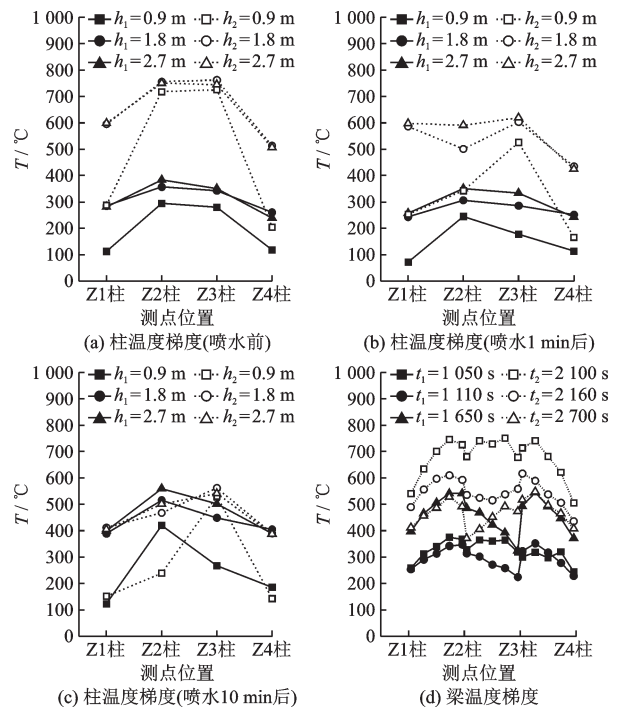


图14 工况1与工况2空间温度分布

Fig.14 Temperature distributions of Case 1 and Case 2

向温度梯度较小,0.9 m至1.8 m高度间边跨的温度梯度较中跨更大;喷水前梁温度分布同样存在对称性,中跨跨中温度高、梁端温度略低,边跨各测点中L14与L32测点(位置介于跨中与靠近中跨的梁端之间)温度最高,其原因可能为L14与L32既位于本跨跨中、同时又更靠近火场中部,受到的热辐射相对更多,温度梯度折线近似“三拱门形”。相较于工况1,工况2中跨温度更高、梯度更小,边跨梯度更大。喷水1 min后,工况1与工况2空间温度梯度的对称性均破坏,尤其是下部空间,说明消防喷水对空间的降温作用不均匀,工况2受温度骤降影响沿高度方向梯度变大,上部空间沿水平方向梯度有所变小,而工况1梯度变化较小。喷水10 min后,工况1与工况2相同高度温度接近且温度梯度分布接近。

4 结 论

本文采用FDS软件模拟了三层三跨钢框架房屋在不同消防工况下的火灾消防过程,分析了消防在不同火灾阶段介入对空间温度场发展与分布规律的影响。通过比较数值模拟结果与火灾消防试验结果,发现数值与试验结果吻合良好,验证了数值模型中采用水喷淋方式模拟消防过程获得温度场的可行性。主要得到以下结论:

(1)消防介入前,由于结构和可燃物的布置具有面对称性,空间温度场同样呈平面对称分布,柱相同高度温度梯度折线近似“等腰梯形”,中跨温度高、边跨温度低;梁梯度折线近似“三拱门形”。空间上部由于顶棚射流作用的影响,具有较高的温度水平,高温区域沿火源上方呈倒锥形;中跨由于受到更大的热辐射与热对流,温度较边跨更高。喷水后,温度分布对称性破坏。

(2)消防在火灾初期发展阶段介入后,火场温度经历骤降、缓慢回升、缓慢下降三个阶段,直接灭火跨骤降时长约20 s,相邻跨骤降时长约16 s,局部最大降幅约350℃、降温速率约17℃/s,框架附近平面火场能达到的最高温度比无消防的火灾全过程情况低350℃左右;消防介入有效减缓火灾发展速度,抑制空间温度与梯度发展。

(3)消防在稳定燃烧阶段介入后,火场温度经历骤降、缓慢下降两个阶段,喷水前火场温度较高,空间沿高度方向、水平方向都存在较大的温度梯度,喷水后温度骤降持续约60 s,局部最大降幅超过

600℃、降温速率约11℃/s,骤降结束后降温速率减小,空间温度分布变化缓慢。

(4)与在稳定燃烧阶段介入的工况相比,消防在火灾初期发展阶段介入时,火场达到的最高温度更低,温度骤降时间更短、降幅更小,空间温度梯度变化比较缓和。

参考文献:

- [1] 李耀庄,李昀晖.中国建筑火灾引起坍塌事故的统计与分析[J].安全与环境学报,2006,6(5):133-135.
Li Y Z, Li Y H. Survey and analysis on building collapses due to fire damage[J].Journal of Safety and Environment,2006,6(5):133-135.(in Chinese)
- [2] Xia Y C. The mechanics and deformation of high temperature steel frame rapidly cooled by spray water in fire fighting [J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2016, 6(4): 176-181.
- [3] 夏云春.局部喷水急速冷却下完全约束火灾高温钢梁力学响应行为[J].防灾减灾工程学报,2017,37(1):162-168.
Xia Y C. Response behavior of high temperature and fully constrained steel beam rapidly cooled by spray water in fire[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1):162-168. (in Chinese)
- [4] 张永恒.基于FDS模拟温度场作用下钢框架性能化抗火研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.
Zhang Y H. Research on performance of resistance to fire for steel frame based on FDS[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [5] 麻宏波.火灾下钢框架结构的温度场与整体效应分析[D].西安:西安建筑科技大学,2009.
Ma H B. The analysis of temperature field and allover effect of steel frame structure in fire [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009. (in Chinese)
- [6] Li A G, Zhang Y, Hu J, et al. Reduced-scale experimental study of the temperature field and smoke development of the bus bar corridor fire in the underground hydraulic machinery plant [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 41: 95-103.
- [7] 庞见.钢框架结构的火灾模拟及有限元分析[D].天津:天津理工大学,2015.
Pang J. The fire simulation and the finite element analysis of steel frame structure[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015. (in Chinese)

[8] 徐林雅,宋振森.消防灭火过程中火灾温度场研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2019,32(2):24-29.
Xu L Y, Song Z S. Study on fire temperature field during fire extinguishing[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2019, 32(2): 24-29.(in Chinese)

[9] 徐阳,宋振森,赵金城,等.喷水灭火过程中足尺钢框架房屋温度场试验研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):813-822,836.
Xu Y, Song Z S, Zhao J C, et al. Experimental research on temperature field of full-scale steel frame building during firefighting by water spraying[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 813-822, 836. (in Chinese)

[10] BS EN 1991-1-2: 2002, Eurocode 1: action on struc-

tures-part 1-2: general action-actions on structures exposed to fire [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.

[11] 消防给水及消火栓系统技术规范:GB 50974—2014 [S].北京:中国计划出版社,2014.

[12] 消防水枪:GB 8181—2005[S].北京:中国标准出版社,2005.

[13] 城市消防规划规范:GB 51080—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.

[14] 彭晨.消防响应时间统计规律及其与城市火灾规模相关性研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.
Peng C. The statistics law of fire response time and its correlation with the scale of urban fire[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)

(责任编辑:周小潭)



(上接第 1066 页)

[13] 卜凡洋.MRPC面层双面加固砌体墙抗震性能试验研究[D].济南:山东建筑大学,2018.
Bu F Y. Experimental study on seismic performance of masonry wall reinforced with MRPC surface double-sided reinforcement[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2018.(in Chinese)

[14] Liu G A, Wang X, Yang Z, et al. Experimental study on seismic performance of confined masonry walls with window openings strengthened by using hybrid-fiber modified reactive powder concrete[J]. Frontiers in Materials, 2022(9): 1-17.

[15] Wang X, Xie Q, Wu Z, et al. Experimental study on

seismic performance of strengthening masonry wall using hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete[J]. Earthquake Spectra, 2021(8): 1-21.

[16] 建筑抗震试验规程:JGJ/T 101-2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.

[17] 砌体结构设计规范:GB 50003-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

[18] 杨建江,高永孚,赵彤.带构造柱加圈梁小型混凝土砌块砌体抗剪强度分析[J].建筑结构学报,1998,19(3):64-70.
Yang J J, Gao Y F, Zhao T. Analysis of strength of concrete block masonry with Ring beams and constructional columns [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 19(3): 64-70.(in Chinese)