

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.002

# 高大空间建筑自动喷水灭火数值模拟研究

黄晓家<sup>1,2</sup>, 赵耀<sup>2</sup>, 谢水波<sup>2</sup>, 吴懂礼<sup>1</sup>, 杨世全<sup>2</sup>, 尧炜杰<sup>2</sup>

(1. 中国中元国际工程有限公司, 北京 100089; 2. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 基于实体灭火试验, 利用 FDS 数值模拟软件探究了净空高度为 18 m 的高大空间建筑自动喷水灭火系统不同喷水强度和响应时间指数(RTI)对灭火效果的影响。结果表明, 喷水强度为  $30 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  时, 自动喷水灭火系统能快速抑制火灾; 喷水强度为  $20 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  时, 喷头及时动作或开放多个喷头可实现控火; 喷水强度为  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  时, 由于喷水强度较小, 水滴直接送达燃料表面的量很少, 但在开放更多的喷头情况下, 水能有效湿润燃烧物周边的可燃物, 从而有效控火。根据不同参数下的真实物品数值模拟, 对喷头动作时间、启动个数、控火时间、过火面积、物品损失, 以及系统的可靠性等多方面比较, 提出了工程应用设计参数, 建议此类场所下喷头的喷水强度为  $20 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ , 喷头响应类型采用快速响应。

**关键词:** 高大空间建筑; 自动喷水灭火系统; 真实物品数值模拟; 标准燃烧物; 喷水强度; 响应时间指数

**中图分类号:** TU998.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)17-0006-07

## Numerical Simulation of Automatic Sprinkler in High Clearance Building

HUANG Xiao-jia<sup>1,2</sup>, ZHAO Yao<sup>2</sup>, XIE Shui-bo<sup>2</sup>, WU Dong-li<sup>1</sup>, YANG Shi-quan<sup>2</sup>, YAO Wei-jie<sup>2</sup>

(1. China IPPR International Engineering Co. Ltd., Beijing 100089, China; 2. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** Based on the physical fire extinguishing experiment, the effect of different sprinkler density and response time index (RTI) on fire extinguishment in a high clearance building with the clearance of 18 m was explored by using FDS numerical simulation software. When the sprinkler density was  $30 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ , the automatic sprinkler system could suppress the fire quickly and effectively. When the sprinkler density was  $20 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ , the automatic sprinkler system could act in time or open multiple sprinklers to control the fire. When the sprinkler density was  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ , water droplets could not reach the fuel surface directly due to the low sprinkler density. However, when more sprinklers were opened, the water was effective in wetting the combustibles around the burner and effectively controlled the fire. According to the numerical simulation of physical objects under different parameters, operating time of sprinkler, number of opening sprinklers, fire suppression time, overfire area, fire loss and system reliability were compared, and the design parameters of engineering application

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0807605)

通信作者: 黄晓家 E-mail: 13501165425@163.com

were proposed. It was suggested that the sprinkler density in high clearance building should be  $20 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ , and fast response of the sprinklers should be adopted.

**Key words:** high clearance building; automatic sprinkler system; numerical simulation of physical object; standard burning item; sprinkler density; response time index

随着经济社会的快速发展,会展中心、影剧院等高大空间建筑对自动喷水灭火系统的应用提出了严峻的挑战,我国1986版消防规范规定喷头有效灭火安装高度是8 m,2005年版《自动喷水灭火系统设计规范》(GB 50084—2001)提高到12 m。国际火灾保险人FM公司在净空高度为18.3 m的情况下进行了5次大规模的火灾试验,均取得了理想的灭火效果<sup>[1]</sup>,其后美国经过计算模拟完成了更高空间的设计参数,最早于2011年1月在FM公司的DS326标准中喷头安装高度提高到30 m,应急管理部天津消防研究所也进行了几组大型的火灾试验来探究自动喷水灭火系统在高大空间建筑的应用技术要求<sup>[2]</sup>。但仪器设备、试验场地以及高额的成本使得无法对每种情况都进行试验和验证。在工况众多的情况下,一种最有效的方法便是使用计算机开展真实物品的仿真模拟研究,并根据不同工程的具体情况,模拟获得有效工程设计参数。笔者利用FDS数值模拟软件对高大空间建筑的自动喷水灭火试验进行真实物品的仿真建模,并探究不同喷水强度和响应时间指数(RTI)对标准燃烧物的灭火性能,以期为工程和规范中设计参数的确定提供技术支持。

## 1 标准燃烧物建模

标准燃烧物由瓦楞纸箱、聚苯乙烯塑料杯和纸隔板组成<sup>[3]</sup>,瓦楞纸箱尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ ,箱内由125只空的聚苯乙烯塑料杯组成,每层25只,共5层,塑料杯之间用厚度为4 mm的纸隔板隔开,此标准燃烧物等同于国际保险人FM公司的箱装A组不发泡塑料,箱中塑料杯的质量为3.67 kg,标准燃烧物单体总质量为6.39 kg,理论火灾荷载为 $194 \text{ MJ}^{[2]}$ 。

采用FDS软件对标准燃烧物进行建模,建模原则是物质的质量守恒和能量守恒,模型中代表塑料杯的模块交替布置。标准燃烧物的物理化学参数如下:瓦楞纸箱的密度为 $1270 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、比热容为 $1.9 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、热导率为 $0.06 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、燃烧热为 $15 \text{ MJ}/\text{kg}$ 、引燃温度为 $298^\circ\text{C}$ ,聚苯乙烯塑料杯的密度为 $1050 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、比热容为 $1.33 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、

热导率为 $0.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、燃烧热为 $40 \text{ MJ}/\text{kg}$ 、引燃温度为 $450^\circ\text{C}$ 。标准燃烧物模型的数值模拟结果见图1。可以看出,所建标准燃烧物模型的热释放速率在294 s时达到最大值389 kW。标准燃烧物的实体燃烧热释放速率见参考文献[4]。笔者的仿真模拟结果与文献[4]的实体火灾试验结果相比,两者热释放速率峰值的误差为2.7%,达到热释放速率峰值的时间误差为8.8%;对真实物品仿真模拟的热释放速率曲线进行积分得出火灾荷载为189 MJ,与文献[5]的理论火灾荷载相差3%。从热释放速率峰值及其到达时间、火灾荷载等3个参数的对比分析可以得出,建立的标准燃烧物的真实物品仿真火灾模型能够替代实体燃烧的标准燃烧物。

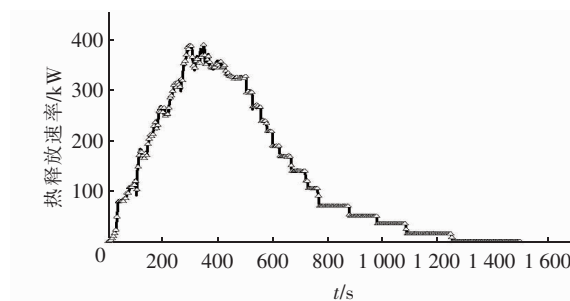


图1 标准燃烧物模型的热释放速率曲线

Fig. 1 Heat release rate curve of standard burning items model

## 2 自动喷水灭火仿真数值模拟

### 2.1 全尺寸灭火试验基本情况及结果

本组全尺寸灭火试验是在净空高度为18 m的情况下进行的,环境温度为 $14.3^\circ\text{C}$ ,采用CMSA喷头,喷头之间的间距为3 m,喷头处设置热电偶以测量热烟气的温度,喷头的感温元件为易熔合金,温级为 $74^\circ\text{C}$ ,工作压力为0.1 MPa,喷水强度为 $40 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)^{[6]}$ 。标准燃烧物燃料堆垛布置平面如图2所示,燃料堆垛的高度均为1.63 m,火灾荷载密度约为 $1920 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ,相当于自动喷水灭火系统火灾危险性分级中的中危险Ⅱ级<sup>[4]</sup>。

点火后火灾迅速发展,214 s时位于点火位置上方的喷头率先动作,此时只有中心4个燃料堆垛参与燃烧,由于试验中采用的喷水强度大,火焰瞬间被

压制下去,实现了火灾的有效抑制,同时水滴将周围的可燃物打湿;随着试验的进行,火焰又继续发展,8 min 时位于西部的目标堆垛被引燃;截至 30 min 时,只动作 1 个喷头即实现了火灾抑制。火灾损失仅限于中心燃料堆垛以及小部分西部目标堆垛。动作喷头处的温度曲线见图 3。可以看出,喷头动作后温度悬崖式快速下降至 20 °C 以下,并一直维持在该温度,没有继续增长。

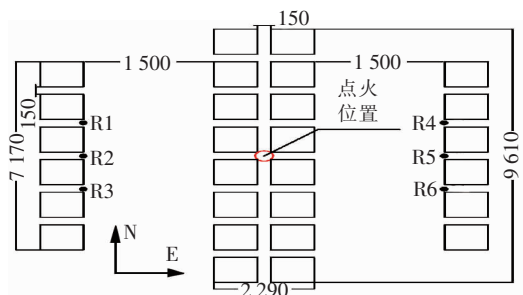


图2 燃料堆垛布置平面

Fig. 2 Plan view of fuel array

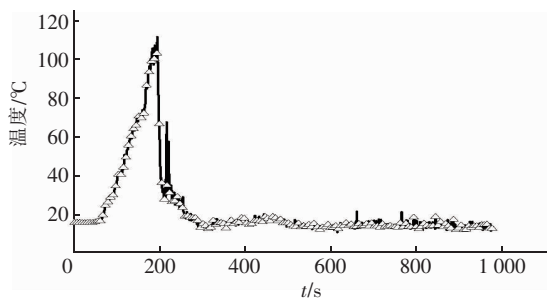


图3 动作喷头处的温度曲线

Fig. 3 Ceiling gas temperatures at opening sprinkler

## 2.2 自动喷水灭火仿真数值模拟

### ① 模型建立

模型网格尺寸为 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m, 网格四周全部为开放边界, 以保证氧气充足不影响自由燃烧。模拟中喷头安装高度为 17.7 m, 动作温度为 74 °C, 保护面积为 9.0 m<sup>2</sup>。

在点火位置的正上方设置温度热电偶, 热电偶从地面 0.1 m 处每隔 1 m 设置温度测点, 共布置 10 层, 形成热电偶树 A。在火源的正东方向 1、2、2.5 m 处设置热电偶树 B1 ~ B3, 同时在火源的正北方向 0.5、1、1.5、2、3、4 m 处设置热电偶树 C1 ~ C6, 在目标堆垛的 1.1 m 高度处布置辐射热测点 R1 ~ R6。热电偶树 B、C 以及辐射热测点记录的数据将用于指示火灾是否蔓延出 4 个点火堆垛。

### ② 数值模拟结果

全尺寸灭火试验中第 1 个喷头的启动时间为 214 s, 而仿真模拟中第 1 个喷头的启动时间为 257 s, 两者时间相差 43 s, 相对误差为 20.1%; 在喷头启动个数上, 40 L/(min · m<sup>2</sup>) 的喷水强度下模拟结果表明仅 1 个喷头动作, 这一点与灭火试验完全吻合。全尺寸灭火试验中喷头动作时喷头处的烟气温度为 110.4 °C, 仿真模拟中喷头动作时热烟气的温度为 93 °C, 相对误差为 15.8%。仿真模拟中损坏的燃料箱涉及中心 4 个燃料堆垛以及西部部分目标堆垛, 与全尺寸灭火试验一致。全尺寸灭火试验与仿真模拟中动作喷头处的温度曲线对比见图 4, 两条曲线的重叠拟合度能够体现灭火过程的一致性。

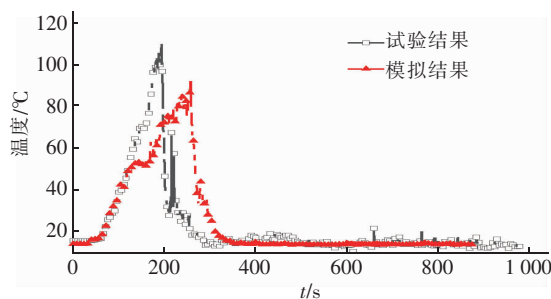


图4 全尺寸灭火试验与仿真模拟试验中动作喷头处的温度曲线对比

Fig. 4 Comparison of gas temperature curve at opening sprinkler of the full-scale fire test and numerical simulation

通过对喷头动作时间、喷头动作个数、喷头动作时热烟气的温度以及动作喷头处的温度曲线等各种灭火性能参数的对比分析, 表明自动喷水灭火仿真数值模拟可以替代全尺寸灭火试验, 数值模拟结果可用于工程设计的参数研究与分析比较。

## 3 自动喷水灭火系统设计参数模拟

为寻找最佳设计参数, 需要进行大量的真实物品仿真模拟研究, 按不同喷水强度和 RTI 值的灭火效果来评价, 分别选取 30、20、15 L/(min · m<sup>2</sup>) 这 3 种喷水强度的不同喷头热敏元件响应时间指数 [RTI 值分别取 28、60、150 (m · s)<sup>0.5</sup>] 共计 9 种工况进行仿真模拟, 并根据模拟结果分析其灭火效果。模型中物品布置形式、净空高度、喷头间距及测点布置同喷水强度为 40 L/(min · m<sup>2</sup>) 的模型一致, 环境温度 20 °C, 喷头动作温度设定为 68 °C。

### 3.1 喷水强度为 30 L/(min · m<sup>2</sup>) 时的模拟结果

当喷水强度为 30 L/(min · m<sup>2</sup>) 时, 3 种 RTI 值

条件下(工况1~3)都仅有1个喷头动作,动作的喷头位于点火位置正上方,喷头动作后能够及时抑制火焰,同时将燃烧的中心燃料堆垛周围的可燃物打湿,抑制火灾的蔓延,燃烧被有效限制在4个中心燃料堆垛,这说明当喷水强度足够大时,系统设计参数主要取决于喷水强度。3种RTI值工况下动作喷头处的温度曲线见图5。喷头动作后,温度悬崖式快速下降并维持在20℃左右。

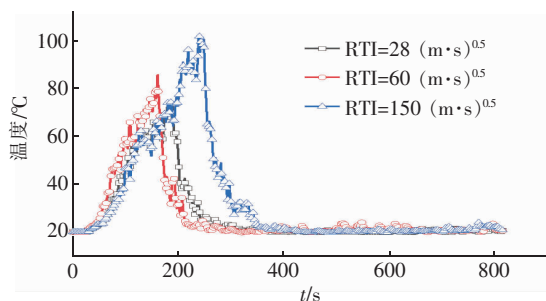


图5 喷水强度为30 L/(min·m²)时不同RTI值下动作喷头处的数值模拟温度曲线

Fig. 5 Simulated temperature curves at opening sprinkler with different RTI values under density of 30 L/(min·m²)

### 3.2 喷水强度为20 L/(min·m²)时的模拟结果

#### ① RTI=28 (m·s)⁰.⁵ (工况4)

点火后180 s,点火位置正上方的喷头率先动作。由于此工况采用的喷水强度较小,火焰产生的强大火羽流使得垂直下落的水滴四处飘移而无法直接到达燃料表面,部分水滴在火羽流的影响下向上运动。但是燃烧的物品仅限于中心4个燃料堆垛,随着燃料的消耗,火势逐渐减小,下落的水滴能够垂直下落直接到达燃烧的物品。模拟结束后,仅动作1个喷头,烧毁4个燃料堆垛,成功实现控火。此工况下动作喷头处的模拟温度曲线见图6。

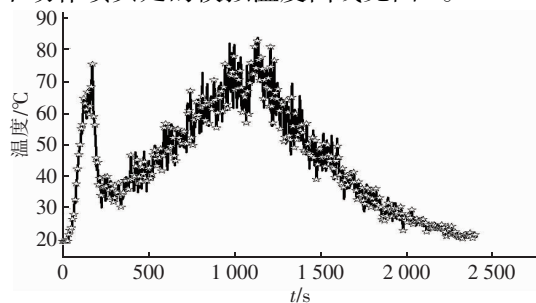


图6 喷水强度为20 L/(min·m²)、RTI值为28 (m·s)⁰.⁵工况下动作喷头处的模拟温度曲线

Fig. 6 Simulated temperature curve at opening sprinkler under density of 20 L/(min·m²) and RTI value of 28 (m·s)⁰.⁵

图6显示,喷头动作后温度上下浮动很大,说明水滴四处飘移情况严重。虽然成功控火,但燃烧时间是喷水强度为30 L/(min·m²)时的8~10倍,意味着喷水强度降低后火灾烧毁物品的数量会增多。

#### ② RTI=60 (m·s)⁰.⁵ (工况5)

点火后199 s,位于点火位置正上方的喷头启动,由于喷头动作比快速响应喷头慢,受火羽流的影响,下落的水滴向东南方向飘移不能直接到达燃料表面;随后火势越来越大,但只涉及中心4个燃料堆垛;随着燃料的不断消耗,火势逐渐减小,但在1648 s时,位于西侧的目标堆垛被引燃。模拟结束后,仅动作1个喷头,最终也成功控火。

#### ③ RTI=150 (m·s)⁰.⁵ (工况6)

点火后242 s,位于点火位置正上方的喷头率先动作,由于火势较大,垂直下落的水滴发生晃动飘移而无法直接到达燃料表面;1106 s时,第2个喷头动作,第3个喷头在1298 s动作,见图7。模拟结束后,共动作3个喷头,成功控火。烧毁的物品涉及中心4个燃料堆垛、北侧1个相邻堆垛以及西侧的3个堆垛。

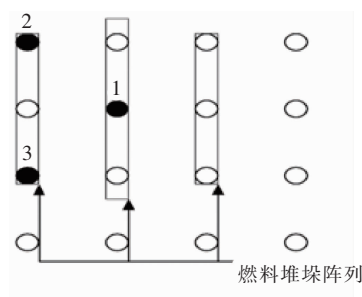


图7 喷水强度为20 L/(min·m²)、RTI值为150 (m·s)⁰.⁵工况下喷头启动顺序

Fig. 7 Operating sequence of sprinkler under density of 20 L/(min·m²) and RTI of 150 (m·s)⁰.⁵

### 3.3 喷水强度为15 L/(min·m²)时的模拟结果

#### ① RTI=28 (m·s)⁰.⁵ (工况7)

点火后45 s,火焰已经到达燃料堆的顶部,火焰高度约为1.6 m;153 s时,火焰大约有4 m高。3 min时,位于点火位置上方的喷头率先动作,由于所选择的喷水强度小,下落的水滴受到强烈的火羽流而向四处飘移无法到达燃料表面;8 min时,位于西侧的目标堆垛被引燃,火势越来越大;13 min时,第2个喷头启动,接下来的10 min内又启动了6个喷头,共启动8个喷头,喷头的启动顺序见图8,启动时间依次为180、780、814、818、819、847、898、1466

s。模拟结束后,中心4个燃料堆垛以及西侧的3个目标堆垛被烧完。图9显示了模拟中热电偶树A的温度变化,可以看出,大火在相当长的时间内依旧保持较高的强度。

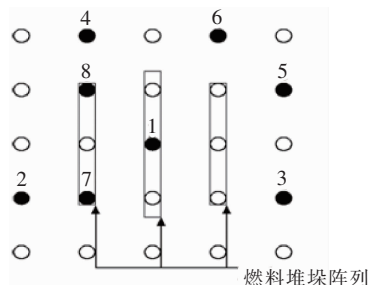


图8 喷水强度为  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 、RTI 值为  $28 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$  工况下喷头启动顺序

Fig. 8 Operating sequence of sprinkler under density of  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  and RTI of  $28 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$

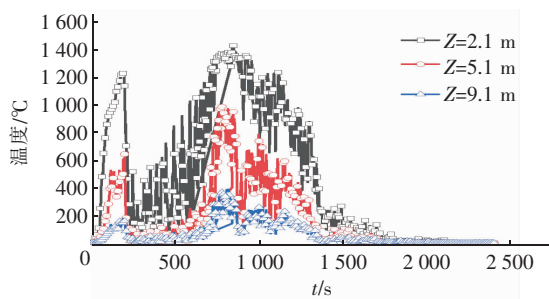


图9 喷水强度为  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 、RTI 值为  $28 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$  工况下热电偶树A测量的温度

Fig. 9 Temperature measurements at tree A under density of  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  and RTI of  $28 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$

### ② $\text{RTI} = 60 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$ (工况8)

该工况下喷头的启动顺序见图10。

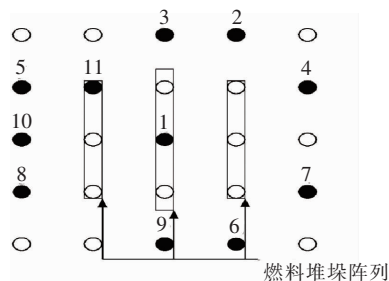


图10 喷水强度为  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 、RTI 值为  $60 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$  工况下喷头启动顺序

Fig. 10 Operating sequence of sprinkler under density of  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  and RTI of  $60 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$

点火后 204 s,位于点火位置上方的喷头率先启

动。由于喷水强度小,喷头动作对火势的发展几乎没有任何影响,火势越来越大,535 s时,第2个喷头启动,在接下来的4 min内,连续启动了9个喷头,共启动11个喷头,启动时间依次为204、535、540、574、583、602、622、638、658、679、768 s。图11显示了模拟中热电偶树A的温度变化,可以看出,大火在15 min中内丝毫没有减弱的迹象。

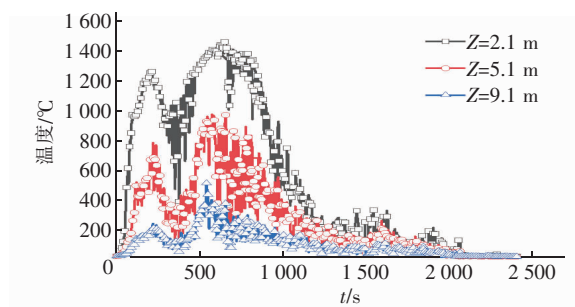


图11 喷水强度为  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 、RTI 值为  $60 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$  工况下热电偶树A测量的温度

Fig. 11 Temperature measurements at tree A under density of  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  and RTI of  $60 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$

### ③ $\text{RTI} = 150 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$ (工况9)

点火后 62 s,火焰已经到达燃料堆的顶部上方 1 m 处;242 s 时,位于点火位置正上方的喷头率先启动,由于此时火势较大,喷头动作对火焰高度以及火势发展没有任何影响;408 s 时,中心堆垛北面的堆垛被引燃;473 s 时第2个喷头启动,在此后的4 min内,连续启动了7个喷头,共启动了9个喷头。喷头的启动顺序见图12,启动时间依次为242、473、475、540、590、636、710、711、717 s。从图中可以看出,启动喷头基本上跳过了整个第2圈。图13显示了模拟中热电偶树A的温度变化,可以看出,即使启动了9个喷头,火灾强度依旧很大。

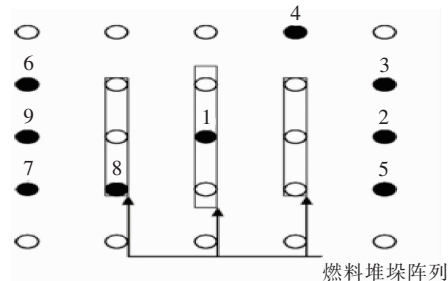


图12 喷水强度为  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 、RTI 值为  $150 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$  工况下喷头启动顺序

Fig. 12 Operating sequence of sprinkler under density of  $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  and RTI of  $150 (\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$

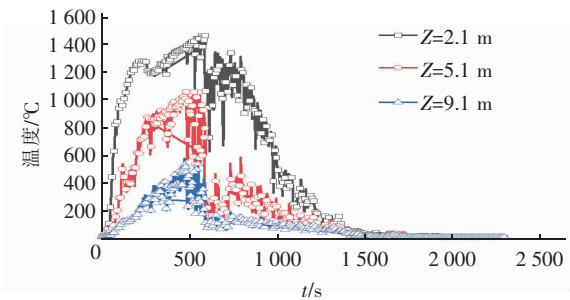
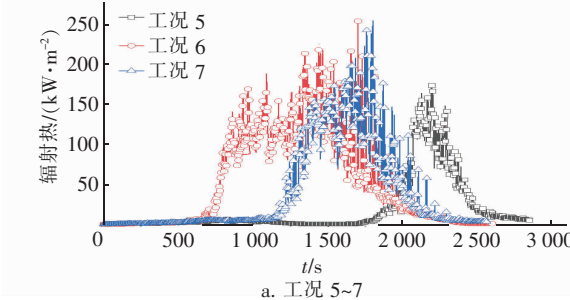


图13 喷水强度为 15 L/(min·m<sup>2</sup>)、RTI 值为 150 (m·s)<sup>0.5</sup> 工况下热电偶树 A 测量的温度

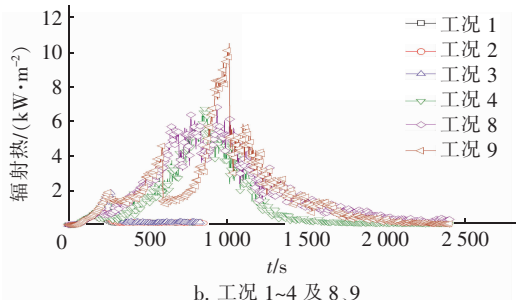
Fig. 13 Temperature measurements at tree A under density of 15 L/(min·m<sup>2</sup>) and RTI of 150 (m·s)<sup>0.5</sup>

3.4 辐射热

标准燃烧物被引燃的临界辐射热通量为 20 kW/m<sup>2</sup>。工况 5~7 火灾蔓延至目标堆垛,工况 1~4 及 8、9 没有蔓延至目标堆垛,其辐射热测点 R2 的值随时间的变化规律分别见图 14(a)和(b)。



a. 工况 5~7



b. 工况 1~4 及 8、9

图 14 辐射热随时间的变化曲线  
Fig. 14 Radiant heat flux curve with time

4 工程参数的确定

美国 FM 公司基于 11 组实体灭火试验颁布了 ESFR 喷头的工程设计标准,ESFR 系统的最大设计动作喷头数按 12 个计算,每个喷头的最大保护面积不应超过 9.3 m<sup>2</sup>,作用面积平均不应超过 9 m<sup>2</sup>;试验时工作压力为 345 kPa<sup>[5,7-8]</sup>,11 组试验中有 1 组包含 1 个喷头失效的情况,根据统计,启动 8 个喷头时,自动喷水灭火系统的灭火保证率为 90%,即自动喷水灭火系统在开放 8 个喷头的情況下系统可靠性为 90%,从而得出 ESFR 系统的安全系数为 1.5。通过对文献[1]中试验过火面积与作用面积的计算得出安全系数为 1.61、1.72、1.99。在本研究中,不同工况下的模拟计算结果见表 1。

表 1 不同工况下的模拟结果

Tab. 1 Simulation results under different working conditions

工况	喷水强度/ (L·min <sup>-1</sup> · m <sup>-2</sup> )	RTI/ (m·s) <sup>0.5</sup>	喷头动作 个数/个	过火面 积/m <sup>2</sup>	物品损 失量/个	向目标 堆垛蔓延	控灭火 时间/s	作用面 积/m <sup>2</sup>	设计作用面积/m <sup>2</sup>			
									安全系 数 = 1.5	安全系 数 = 1.61	安全系 数 = 1.72	安全系 数 = 1.99
1	30	28	1	4.4	4	否	277(抑制)	9	13.5	14.5	15.5	17.9
2		60	1	4.4	4	否	306(抑制)	9	13.5	14.5	15.5	17.9
3		150	1	4.4	4	否	347(抑制)	9	13.5	14.5	15.5	17.9
4	20	28	1	4.4	48	否	1 850(控)	9	13.5	14.5	15.5	17.9
5		60	1	7.2	60	是	2 980(控)	9	13.5	14.5	15.5	17.9
6		150	3	12.1	96	是	2 397(控)	27	40.5	43.5	46.4	53.7
7	15	28	8	11.1	84	是	2 203(控)	72	108.0	116.0	123.8	143.3
8		860	11	6.7	72	否	2 030(控)	99	148.5	159.4	170.3	197.0
9		150	9	6.7	72	否	2 148(控)	81	121.5	130.4	139.3	161.2

由表 1 可以看出,当系统设计参数喷水强度足够大时,喷头动作个数和过火面积不会受到 RTI 值的影响,而当喷水强度接近灭火喷水强度临界点时,受 RTI 值的影响显著;当喷头安装高度为 18 m 时,喷水强度为 20 L/(min·m<sup>2</sup>) 的普通响应喷头的过火面积最大,损失最多。因此从火灾损失和系统投

资的经济性比较,高大空间建筑采用喷头的热敏性能应与喷水强度相结合选用,否则可能会导致系统设计不合理,在本研究中,系统的经济性是喷水强度与作用面积的乘积即系统设计流量,火灾损失的判定是过火面积,因此从经济性和火灾损失两个因素比较来看,喷水强度为 20 L/(min·m<sup>2</sup>)、RTI 值为

$28(\text{m} \cdot \text{s})^{0.5}$ 的喷头是最佳选择方案。

## 5 结论

① 利用 FDS 软件,按照质量和能量守恒的原则对标准燃烧物进行真实物品仿真建模,解决了真实物品的火灾仿真模拟技术难题。火灾的2个重要参数,热释放速率峰值和火灾荷载的模拟与实体误差分别为2.7%、3%,仿真模拟很好地复原了真实物品的燃烧情况;达到热释放速率峰值的时间误差为8.8%,主要原因是点火方式模拟与实体火灾燃烧不同。

② 全尺寸自动喷水灭火试验与标准燃烧物仿真火灾模型下自动喷水灭火仿真模拟的对比结果表明,当喷水强度为 $40 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,喷头启动个数误差为0,喷头启动时间误差为20.1%,喷头启动温度误差为15.8%,实体火灾试验与仿真模拟结果吻合性很好,解决了高大空间建筑自动喷水灭火系统获得工程设计参数的难题。

③ 基于净空高度为18 m的实体灭火试验,探究了不同喷水强度和RTI值对灭火效果的影响。当喷水强度为 $30 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,自动喷水灭火系统能快速抑制火灾;当喷水强度为 $20 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,喷头及时动作或开放多个喷头可实现控火;当喷水强度为 $15 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,由于喷水强度较小,水滴直接送达燃料表面的量少,但在开放更多的喷头情况下,水能有效湿润燃烧物周边的可燃物,从而有效控火。通过对喷头动作个数、控火时间、过火面积、物品损失,以及可能的喷头遮挡、1个喷头打不开或溅水盘变形等故障影响灭火效果等多方面的分析比较研究,提出工程应用设计参数,建议此类场所下喷头的喷水强度为 $20 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ,喷头响应类型采用快速响应。

④ 通过仿真模拟分析比较研究确定,高大空间建筑的自动喷水灭火系统应根据喷水强度和RTI值双控参数选择喷头,判定标准是系统设计流量与火灾损失都处于合理的低值水平,系统投入少,火灾损失少。

## 参考文献:

- [1] Nam S, Braga A, Kung H C, *et al.* Fire protection for non-storage occupancies with high ceiling clearances[J]. Fire Safety Science, 2003, 7: 493 - 504.
- [2] 宋波, 杨丙杰, 李毅, 等. 高大净空场所火灾实体灭火试验研究[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(12): 912 - 915.
- [3] Song Bo, Yang Bingjie, Li Yi, *et al.* Research on the fire extinguishing experiment in big clear space [J]. Fire Science and Technology, 2009, 28(12): 912 - 915 (in Chinese).
- [4] GB/T 31413—2015, 灭火系统 A 类火试验用标准燃烧物[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [5] GB/T 31413 - 2015, Standard Burning Items for Class A Fire Test of Extinguishing System[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015 (in Chinese).
- [6] 宋波, 李毅. 自动喷水灭火系统在高大空间建筑中的应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2016.
- [7] Song Bo, Li Yi. Application of Automatic Sprinkler System in High Clearance Building[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2016 (in Chinese).
- [8] Cheng Y. The development of the ESFR sprinkler system [J]. Fire Safety Journal, 1988, 14(1/2): 65 - 73.
- [9] Kung H C, Song B, Li Y, *et al.* Sprinkler protection of non-storage occupancies with high ceiling clearance [J]. Fire Safety Journal, 2012, 54: 49 - 56.
- [10] FM 2008 - 2010, Approval Standard for Suppression Mode Automatic Sprinklers [S]. Johnston: Factory Mutual Insurance Company, 2010.
- [11] NFPA 13 - 2016, Standard for the Installation of Sprinkler Systems [S]. Quincy: National Fire Protection Association, 2016.



作者简介: 黄晓家(1964 - ), 男, 山东莱西人, 本科, 教授级高级工程师, 全国工程勘察设计大师, 主要研究方向为城市节水、海绵城市、建筑与工业给排水、消防工程。

E-mail: 13501165425@163.com

收稿日期: 2020 - 07 - 03