

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.01.018

净空高度为22、30 m高大空间自动喷水灭火仿真模拟

黄晓家^{1,2}, 杨舜³, 尧炜杰^{2,4}, 谢水波², 赵耀⁵, 王焱¹

(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; 3. 佛山市消防救援支队, 广东 佛山 528000; 4. 重庆城市科技学院 建筑管理学院, 重庆 402160; 5. 中建八局第一建筑公司, 山东 济南 250000)

摘要: 为研究非仓库类高大净空场所自动喷水灭火系统洒水喷头相关性能对灭火效果的影响,采用火灾动力学模拟软件FDS对净空高度为22、30 m的高大空间进行了自动喷水灭火仿真模拟,给出了安全可靠的工程设计参数。结果表明,在净空高度为22 m条件下,当喷头动作温度为74℃时,控火效果较差,喷头启动的临界热释放速率为6.9 MW;当喷头动作温度为68℃时,能较快抑制火灾,喷头启动的临界热释放速率为6.2 MW。在净空高度为30 m条件下,当喷水强度为55、50 L/(min·m²)时,喷头启动后火灾能迅速被抑制;随着喷水强度降低,燃料堆垛烧损加重,当喷水强度为45 L/(min·m²)时,控火失败。因此在30 m净空高度下,当采用快速响应喷头时,推荐喷水强度应不小于55 L/(min·m²)。

关键词: 高大空间; 自动喷水灭火系统; 净空高度; 动作温度; 喷水强度

中图分类号: TU998.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)01-0116-10

Simulation of Automatic Sprinkler Fire Extinguishing in Large Spaces with Clearance Height of 22 m and 30 m

HUANG Xiao-jia^{1,2}, YANG Shun³, YAO Wei-jie^{2,4}, XIE Shui-bo², ZHAO Yao⁵, WANG Yi¹

(1. China IPPR International Engineering Co. Ltd., Beijing 100089, China; 2. College of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China; 3. Foshan Fire Brigade, Foshan 528000, China; 4. School of Construction Management, Chongqing Metropolitan College of Science and Technology, Chongqing 402160, China; 5. China Construction Eighth Engineering Division Corp First Construction Co. Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: This paper investigated the influence of sprinkler design on fire extinguishing performance of automatic sprinkler system in non-warehouse high-clearance places, simulated the automatic sprinkler fire extinguishing in the large spaces with clearance height of 22 m and 30 m by using fire dynamics simulation (FDS) software, and proposed the safe and reliable engineering design parameters. When the clearance height and operating temperature of the sprinkler were 22 m and 74℃, poor fire control performance was obtained, and the critical heat release rate of sprinkler starting was 6.9 MW. When the sprinkler operating temperature was 68℃, the fire could be controlled quickly, and the critical heat release rate of sprinkler starting was 6.2 MW. When the clearance height was 30 m, and the spray intensities were 55 L/(min·m²) and 50 L/(min·m²), the fire could be quickly controlled after the sprinkler was started. The decreasing spraying intensity increased the burning loss of fuel stacking, and it

was fail to control the fire when the spray intensity was $45 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$. Therefore, the spraying intensity of fast response sprinkler should not be less than $55 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ when the clearance height was 30 m.

Key words: large space; automatic sprinkler system; clearance height; operating temperature; spray intensity

改革开放以来,我国经济有了巨大的发展,会展中心、大型购物中心的中庭空间、电影制片厂等非仓库类高大净空场所越来越多,地面和天花板之间的净高对自动灭火工程构成了独特的挑战,研究高大空间的自动喷水灭火系统工程设计参数,对于建设韧性城市有着积极意义。我国新版《自动喷水灭火设计规范》(GB 50084—2017)中对高大空间场所进行了规定,但是最大净空高度仅为18 m,而对超过18 m的高大空间未做相关说明。美国著名互助保险公司FM Global的相关标准《Property Loss Prevention Data Sheets 3-26》(2019版)中给出了净空高度为18~30 m的设计要求和工程参数,并规定必须采用湿式系统,喷水强度均设置为 $24 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,作用面积在 110 m^2 以内,当采用标准覆盖面喷头时,设置喷头数量为12个;当采用扩展覆盖面喷头时,设置喷头数量为6个。

目前,国内外对高大空间场所的实体火灾试验主要集中于12~18 m的净空高度,FM Global公司进行了5次大规模的火灾试验,确定了净空高度为18.3 m的非仓库类场所的自动喷水灭火保护要求^[1]。国内对非仓库高大空间场所的研究起步较晚,天津消防研究所宋波等^[2]开展了高度为12、16、18 m公共建筑的实体火灾研究。黄晓家团队在解决了塑料标准燃烧物仿真模拟的难题后,在国内首次利用火灾动力学模拟软件FDS对净空高度为18 m的高大空间自动喷水灭火系统的工程参数进行了仿真模拟^[3]。而高度超过18 m的高大空间研究对试验场地及各方面设施要求更高,故相关实体火灾试验极少。FM Global公司在一个净空高度达29.6 m的中心竞技场进行了实体火灾测试,发现对于该净空高度,当火灾功率达到15.5 MW时,没有任何一个喷头动作。

笔者通过实体火灾试验,验证净空高度为22 m的高大空间仿真模拟的可行性和科学性,并对净空高度为22、30 m的高大空间分别进行了1:1仿真模拟:①在净空高度为22 m条件下,进行了不同动作

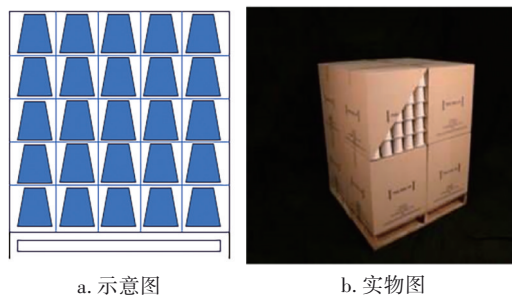
温度对喷水灭火效果的影响研究;②在净空高度为30 m条件下,探究不同喷水强度对喷水灭火能效的影响。以期对我国高大空间自动喷水灭火系统技术的探究和实施进行指导。

1 材料和方法

1.1 标准燃烧物

随着高大空间内物品种类的增加,可燃物的材料类型越来越多样化、复杂化,如:高分子聚合物(聚乙烯)、纸质、木材等。当采用实际燃烧物进行火灾试验时,对资源消耗较大,且不同物品燃烧存在较大差异,不利于试验研究。1992年末,代表零售商和产品制造商的A组塑料委员会成立,以解决大型仓库和商店提出的防火问题^[4];美国保险商实验室FMRC、全球检测认证机构UL及我国天津消防研究所等国内外研究机构,通过对实际燃烧场景的燃烧特性进行分析,研制了灭火试验专用的标准燃烧物^[5]。

黄晓家团队在2020年开展了塑料标准燃烧物仿真模拟,本研究在此基础上对纸质标准燃烧物进行了建模。纸质标准燃烧物每个纸箱尺寸为 $0.533 \text{ m} \times 0.533 \text{ m} \times 0.508 \text{ m}$,箱内包含125个隔间并以纸杯填充,每层25只,共5层。将8个纸箱装的纸质标准体以 $2 \times 2 \times 2$ 矩阵形式放置在一个木制托盘上,托盘负载的纸杯质量为10 kg,单个带有分隔板的空纸箱质量为21.8 kg,木制托盘的平面尺寸为 $1.07 \text{ m} \times 1.07 \text{ m}$,高为0.13 m,质量为23.1~24.1 kg。纸质标准燃烧物如图1所示,相关热参数见表1。



a. 示意图

b. 实物图

图1 纸质标准燃烧物

Fig.1 Paper standard combustible

表1 可燃物的相关热参数

Tab.1 Related thermal parameters of combustible

项目	瓦楞纸箱	纸杯
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 270	1 270
比热容/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1.9	1.9
导热/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.06	0.06
燃烧热/($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	15	15.3
引燃温度/ $^{\circ}\text{C}$	298	298
单位面积热释放速率/($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$)	550	265

对纸质标准燃烧物进行建模,模型见图2。

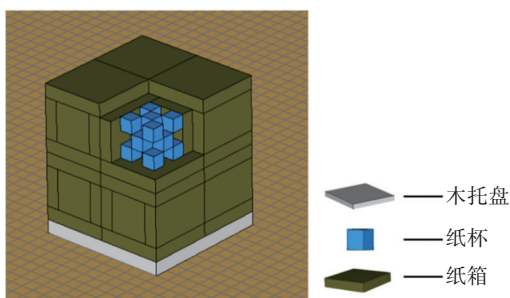


图2 纸质标准燃烧物FDS模型

Fig.2 FDS model of paper standard combustible

纸质标准燃烧物热释放速率曲线见图3。通过对比发现FDS模拟中热释放速率在449 s时达到峰值150 kW,试验结果与模拟结果误差对比见表2。可知,模拟的热释放速率曲线与实体火灾物品燃烧特性曲线的误差均在10%以内。

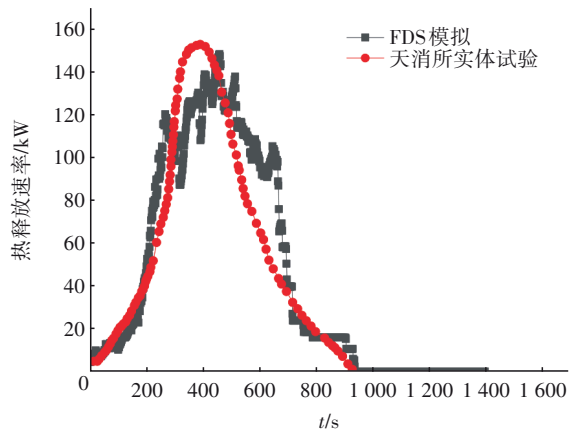


图3 纸质标准燃烧物热释放速率曲线

Fig.3 Heat release rate curves of paper standard combustible

表2 误差对比

Tab.2 Error comparison

项目	试验结果	模拟结果
热释放速率峰值/kW	155	150
到达峰值时间/s	410	449
火灾荷载/MJ	56.3	61.3

1.2 自动喷水仿真模型可靠性

为研究FDS自动喷水仿真模型的可靠性,黄晓家团队利用FDS对3~9 m空间、18 m的高大空间及3层高架仓库进行了自动喷水仿真模拟研究,发现其可以替代实体灭火试验,并可以用于自动喷水工程设计参数的研究和分析比较^[3,5];刘慧等^[6]通过FDS模拟真实试验,结果表明采用仿真模拟方法进行自动喷水灭火系统的工程应用研究是可行有效的。

2 22 m场所的喷水灭火仿真模拟

2.1 布置参数

对于净空高度为22 m的高大空间场所,设定环境温度为20 $^{\circ}\text{C}$,采用中危险等级I级建模,模拟方案见表3。根据《灭火系统A类火试验用标准燃烧物》(GB/T 31413—2015)可知,该模型火灾荷载密度约为650 MJ/m²,其标准燃烧物的布置方式见图4。

表3 净空高度为22 m的模拟方案

Tab.3 Simulation scheme of 22 m clearance height

项目	参数设置
燃料类型	标准燃烧物(纸箱+纸杯)
托盘、燃料布置总数/个	64,768
布置形式	堆垛,按8×8布置,托盘间距为0.15 m,每个托盘上放置12个燃料
燃料净高/m	单组0.5、3组共1.5(垂直放置)
托盘高度/m	0.1
燃料顶部与吊顶的距离/m	20.4
喷头流量系数	404
响应等级	快速响应,响应时间指数(RTI)为28 ($\text{m}\cdot\text{s}$) ^{1/2}
喷头安装方式	下垂型
喷头工作压力/MPa	0.07
喷头溅水盘与吊顶距离/mm	400
喷头间距/m	3
喷头布置个数/个	36(6×6)
点火位置	中间4个喷头正下方

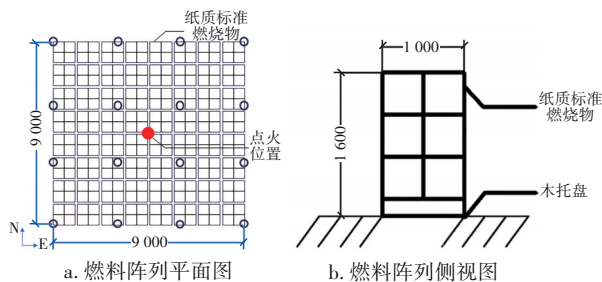


图4 22 m净空高度下标准燃烧物布置方式

Fig.4 Standard combustible arrangement at clearance height of 22 m

建立净空高度为22 m的自动喷水灭火仿真模型,如图5所示。

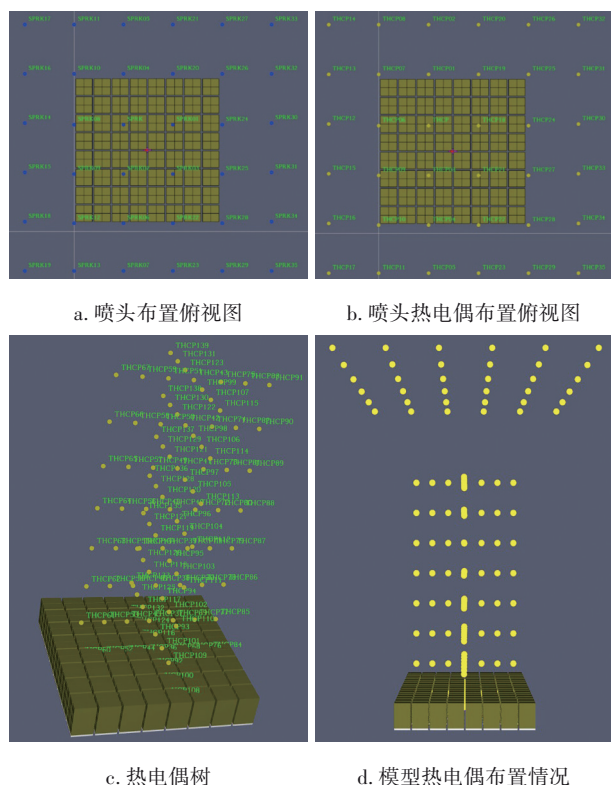


图5 22 m模型示意

Fig.5 Schematic diagram of 22 m model

模型中,在喷头和火源相互作用的中心区域及货架所在区域,使用的网格尺寸为 $0.1\text{ m}\times 0.1\text{ m}\times 0.1\text{ m}$,其余区域为 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$,网格总数为2 597 511。将四周进行开边界处理,允许空气自由流通,以满足燃烧条件。

在此模拟中,设有 6×6 共计36个喷头,如图5(a)所示,喷头间距为3 m,采用流量系数(K)为404的喷头,喷头设计流量为338 L/min。在每个喷头处均布置热电偶(与喷头重合),如图5(b)所示。热电偶从距地面3 m处,每隔1 m设置热电偶层,共布置8层,每层设 6×7 共计42个温度测点,形成热电偶树,如图5(c)所示。模型热电偶的布置情况如图5(d)所示。在该高度下进行了两次模拟,差异在于动作温度不同。工况1、工况2的喷头动作温度分别为 74°C 、 68°C 。

2.2 模拟情况

2.2.1 工况1

在该工况下,喷头动作温度为 74°C ,热释放速率和喷水灭火全过程云图分别见图6和图7。

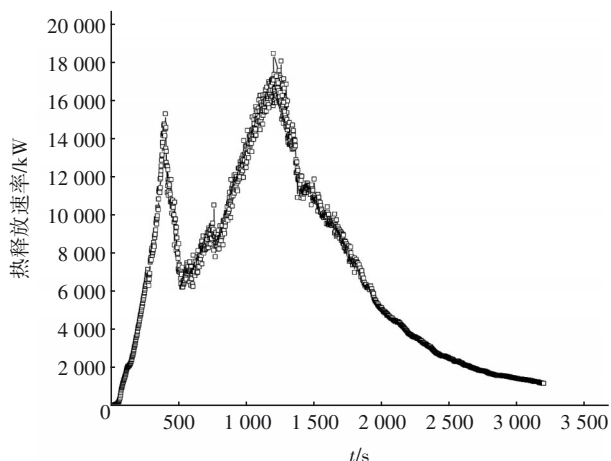


图6 工况1热释放速率曲线

Fig.6 Heat release rate curve of condition 1

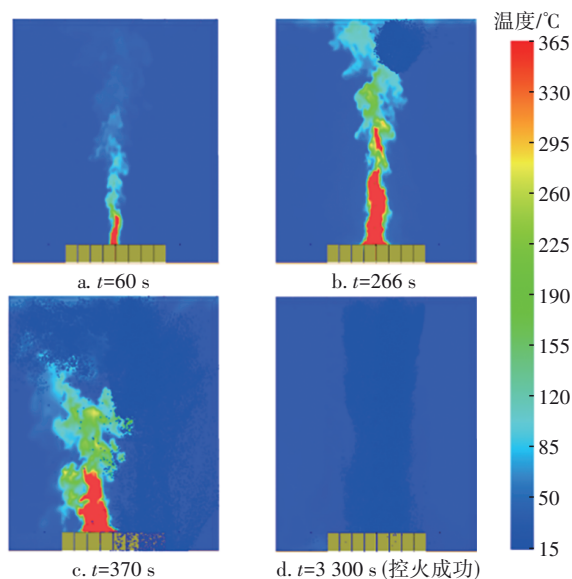


图7 工况1控火全过程温度云图

Fig.7 Temperature cloud chart of the whole process of fire control under condition 1

由图7可知,点火60 s后,火焰高度达到3 m,并持续增长。随后天花板射流和热烟气层导致产生了较高温区域,致使喷头感温元件迅速升温,266 s时第一个喷头动作,该喷头位于火源东南方向,此时热释放速率为6.9 MW。该喷头启动后由于此时热羽流浮力较大,仅有较少的水滴到达燃烧表面,火势向其他3个方向蔓延,导致更多的燃料被引燃,热释放速率持续增大。直到370 s,火灾功率达到15.7 MW,此时位于靠近中心火源西北方向的喷头到达动作温度,热敏元件破裂后开始喷水,火再次被压制。火灾功率在之后的140 s内持续下降至6 MW左右,随后又开始上升。由于靠近火源西北、东

南方向的喷头同时在工作,对喷头周围燃料阵列的预润湿成功防止了火焰从该区域蔓延至相邻的燃料堆。但由于东北方向喷头并未启动,西北、东南方向的喷头动作后射流将燃料蒸汽推向东北方向,火焰开始向堆垛东北方向移动。随着东北方向越来越多的燃料阵列卷入大火中,燃烧物表面形成燃料蒸汽丰富的核心区域,使火灾功率持续上升。直到1 215 s时,火灾功率增长至18.5 MW,此时位于靠近火源东北方向的两个喷头相继启动,启动顺序见图8。

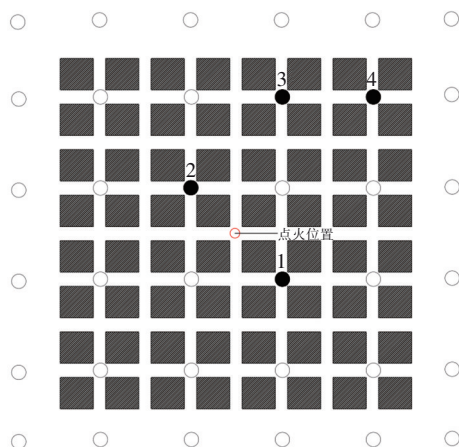


图8 工况1喷头启动顺序

Fig.8 Nozzle start sequence of condition 1

第4个喷头启动后,火再次被压制,火灾功率持续下降,火被扑灭,控火成功,但最终损耗了较多的标准燃烧物,如图9所示。

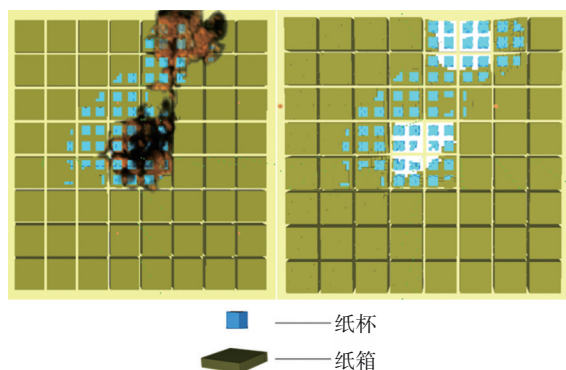


图9 工况1火灾蔓延和阵列损耗情况

Fig.9 Fire spread and array loss under condition 1

通过FDS模拟可知,喷头启动顺序出现了跳跃现象。由于位于东南方向的喷头受热气流影响,动作之后东南方向的火羽被压制,火势朝着西北方向移动,导致西北方向更多的标准体参与燃烧;西北方向喷头启动后,火势又朝着东北方向蔓延,虽然

最终控火成功,但是燃料堆垛的西北和东北部分损耗情况严重。

2.2.2 工况2

在该工况下,喷头动作温度为68℃。点火后约50 s,火羽到达燃料堆垛顶部,之后又经过大约160 s,火焰燃烧至燃料阵列顶部上方大约3 m的高度。第一个喷头在217 s时启动,该喷头位于中心火源正东南方向,此时热释放速率为6.2 kW。5 s后,位于中心火源正西北方向的喷头启动。224 s时,此时火灾功率为6 700 kW,火源中心正西南和正东北方向的喷头同时启动,启动顺序见图10。

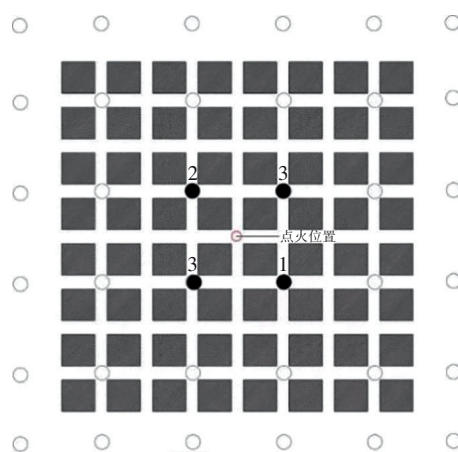


图10 工况2喷头启动顺序

Fig.10 Nozzle start sequence of condition 2

4个喷头启动后,其周围热电偶测得的烟气温度急剧下降,火势明显减弱,但此时被火焰吞没的中心4个燃料堆垛均被烧损,而其他燃料堆垛由于被湿润,阻碍了火势蔓延,最终在300 s时完成灭火,燃料堆垛烧损情况见图11。

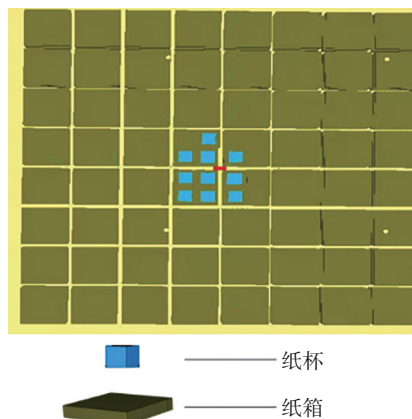


图11 工况2燃料堆垛烧损情况

Fig.11 Fuel stacking burning loss under condition 2

表4为两种工况的对比分析。

表4 两种工况下的模拟结果

Tab.4 Simulation results under two working conditions

项目	工况1	工况2
喷头动作温度/ $^{\circ}\text{C}$	74	68
$\text{RTI}/(\text{m}\cdot\text{s})^{1/2}$	28	28
喷水强度/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$	37.55	37.55
喷头动作数/个	4	4
第一个喷头动作时间/s	266	217
抑火时间/s	3 300	300
最大热释放速率/ kW	18 500	6 700
燃料堆垛损坏量/箱	130	34
过火面积/ m^2	16	2.5
自动喷水实际作用面积/ m^2	36	36
作用面积/ m^2	安全系数=1.5	54
	安全系数=2	72

由表4可知,工况1喷头的动作时间比工况2晚49 s。这也直接导致工况1只能控火,且控火效果较差,而工况2有较好的抑火效果。说明喷头动作温度对灭火效果有很大影响,当喷头动作温度为 74°C 时,致使喷头启动的火灾热释放速率阈值为6.9 MW;而当喷头动作温度为 68°C 时,喷头启动阈值为6.2 MW。

对于高大空间,第一个喷头的启动时间尤为重要。喷头动作温度越低,启动时间越早,能在火势发展初期启动,迅速控制火灾进一步发展,实现抑制灭火。对于22 m的中危险级Ⅰ级高大空间场所,当喷头动作温度为 74°C 时,可实现控火;当喷头动作温度为 68°C 时,系统可实现抑制灭火。从仿真模拟结果来看,喷头动作温度对自动喷水灭火的模拟是重大影响因子,工程设计时应慎重选择。

因此,22 m高大净空场所的过程设计参数推荐如下:喷头动作温度为 68°C ,喷水强度为 $37.55 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$,作用面积为 72 m^2 。

3 30 m场所的自动喷水灭火仿真模拟

对净空高度为30 m的高大空间进行模拟,设定环境温度为 20°C ,燃料堆垛布置采用中危险级Ⅱ级,堆垛布置方式如图12所示。

火灾荷载为 $1\,920 \text{ MJ}/\text{m}^2$,可模拟以会展中心为代表的公共建筑火灾,最大热释放速率依据研究所测该类标准体燃烧时的数据,为 $5.9 \text{ MW}^{[7-8]}$ 。在此模拟中使用的是快速响应喷头,设有 7×7 共计49个

喷头,喷头布置间距为 $3 \text{ m}\times 3 \text{ m}$,如图13(a)所示。单个喷头保护面积为 9 m^2 ,在每个喷头处均布置热电偶(与喷头重合),如图13(b)所示。另外,从距地面3 m处开始布置热电偶,每隔1 m设置温度测点,1~8层每层11个温度测点,9~20层每层5个温度测点,共布置20层,形成热电偶树,如图13(c)所示。模型热电偶布置情况如图13(d)所示。在距离中心堆垛1.2 m处设置了目标堆垛,并在目标堆垛每层货物中心布置了辐射热测点,形成了热辐射计树。喷水强度取值为55、50、45 $\text{L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$,分别对应工况3、4、5。

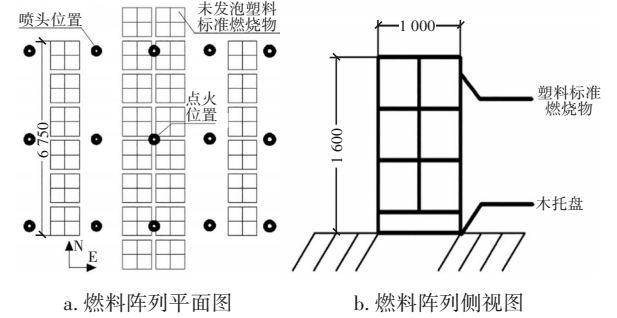


图12 30 m净空高度下标准燃烧物布置方式

Fig.12 Standard combustible arrangement at clearance height of 30 m

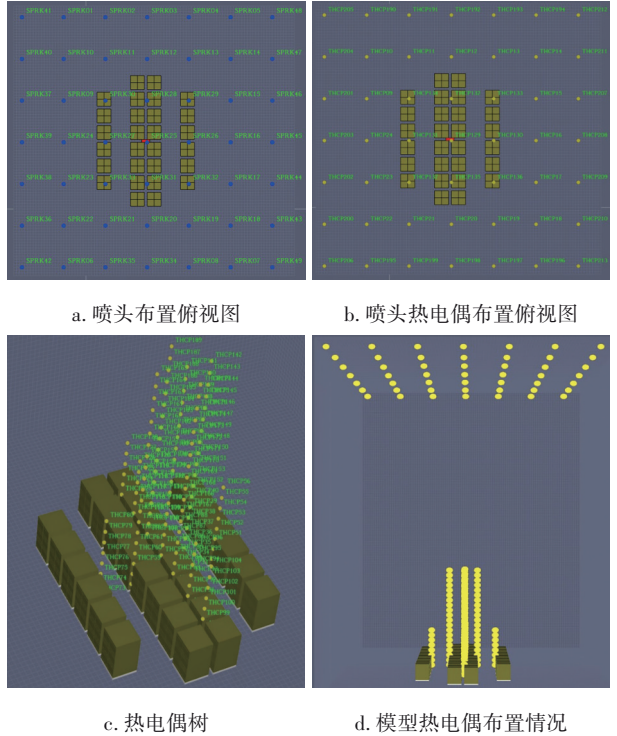


图13 30 m模型示意

Fig.13 Schematic diagram of 30 m model

净空高度为30 m的模拟方案见表5。

表5 净空高度为30 m的模拟方案

Tab.5 Simulation scheme of 30 m clearance height

项目	参数设置
燃料类型	标准燃烧物(纸箱+塑料杯)
托盘、燃料布置总数/个	28,336
布置形式	中间堆垛按8×2布置,托盘间距为0.15 m,每个托盘上放置12个燃料;距中心堆垛1.2 m处布置目标堆垛,按6×2布置
燃料净高/m	1.5(3个垂直放置)
托盘高度/m	0.1
燃料顶部与吊顶的距离/m	28.4
喷水强度/(L·min ⁻¹ ·m ⁻²)	55,50,45
响应等级	快速响应,RTI为28(m·s) ^{1/2}
喷头安装方式	下垂型
喷头溅水盘与吊顶距离/mm	400
喷头间距/m	3×3
喷头布置个数/个	49(7×7)
点火位置	1个喷头正下方

3.1 工况3

在该工况下,喷水强度为55 L/(min·m²)。点火后约58 s,火焰到达燃料堆垛的顶部;在230 s时,4个中心堆垛大部分被火焰吞没;在296 s时,位于中心堆垛右侧的目标堆垛也被引燃;在358 s时,位于中心火源正上方以西3 m和以东3 m的喷头同时动作,此时火灾热释放速率为12.7 MW。4 s后,中心火源正上方喷头启动,启动顺序见图14。

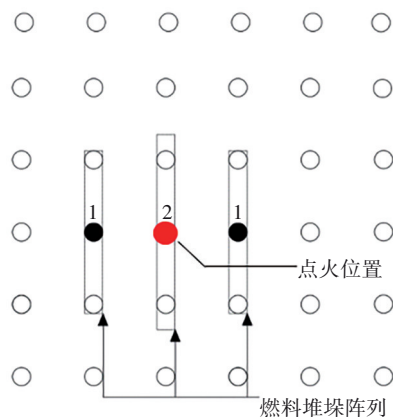


图14 工况3喷头启动顺序

Fig.14 Nozzle start sequence of condition 3

第3个喷头启动后,热释放速率迅速下降,图15为火源上方不同高度下热电偶温度曲线。可知,随着海拔高度的增加,羽流中心线温度降低,原因是越来越多的空气进入火羽流。最终火源上方温度

和动作喷头周围烟气温度稳定下降至室温,目标堆垛未被引燃,且标准燃烧物烧损量较少,表明控火成功,且控火效果较好。

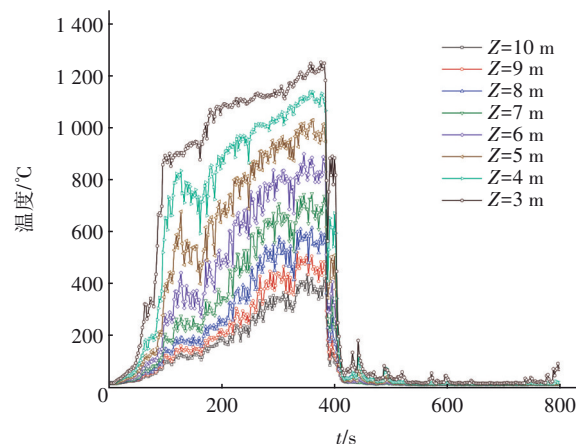


图15 工况3火源上方不同高度下热电偶温度曲线

Fig.15 Temperature curve of thermocouple at different heights above the ignition source under condition 3

3.2 工况4

在该工况下,喷水强度为50 L/(min·m²)。前期火势发展与工况3几乎一致,但喷头启动时间较工况3提前了8 s。在点火后350 s时,位于中心火源上方正西方向3 m处的喷头动作,此时热释放速率为12.8 MW。8 s后位于火源上方正东方向3 m处的喷头动作。在365 s时,火源上方正南和正北方向的喷头同时动作,5 s后火源正上方喷头启动。第5个喷头动作后,火场温度迅速下降至室温。在该工况下,位于中心正上方的喷头最后才启动,原因是烟气上升接触天花板后形成了顶棚射流,导致喷头启动发生了跳跃现象。喷头启动顺序见图16。火源上方不同高度的温度变化曲线见图17,可知控火成功。

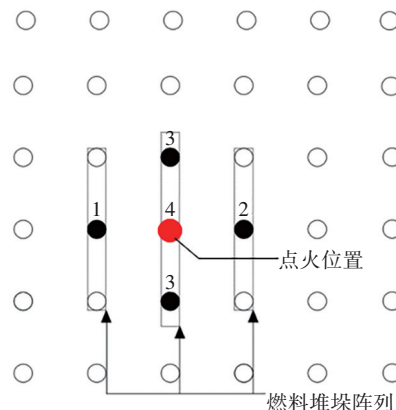


图16 工况4喷头启动顺序

Fig.16 Nozzle start sequence of condition 4

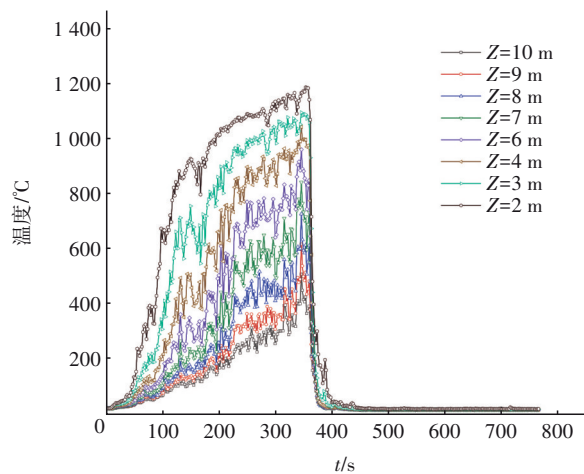


图17 工况4火源上方不同高度下热电偶温度曲线
Fig.17 Temperature curve of thermocouple at different heights above the ignition source under condition 4

3.3 工况5

在该工况下,喷水强度为45 L/(min·m²)。该工况火势前期发展与前两种工况均一致,直到348 s,位于中心2×2堆垛中心火源正上方以东3 m处喷头首先动作,这表明火羽流从几何中心线向东倾斜,此时热释放速率为12.5 MW。第一个喷头动作之后,喷出的液滴与烟气和火焰的相互作用、液滴的蒸发、辐射热的衰减以及水滴湿润物品等几个方面^[9],使火羽流从几何中心线又开始向西偏移。随着越来越多燃料堆垛卷入大火,火势持续增长。在348 s时,位于火源正上方的喷头受到烟气影响,喷头温度上升至动作温度,随后玻璃球破裂,喷头开始动作。该喷头启动后,火势并未受到太大影响,热释放速率在进行小段波动后持续增长,火继续向西偏移。在956 s时,火灾荷载达到了峰值27.5 MW,此时已经动作了14个喷头,喷头启动顺序如图18所示。由于中心堆垛消耗殆尽,热释放速率开始下降。激活的洒水喷头预湿了其余的燃料堆垛,阻止了火灾继续蔓延,但是已经动作的喷头并没有控火,此时作用面积达到了126 m²。FMDS326中规定,当场所净空高度为22~30 m时,作用面积最大为110 m²。最终中心堆垛和目标堆垛烧损严重,火源正上方温度见图19。可知,温度未稳定下降,故可认为灭火失败。

表6为3种工况的模拟结果。当喷水强度为55、50 L/(min·m²)时,堆垛损坏情况较为接近;当喷水强度为45 L/(min·m²)时,火灾损失增加1倍,最终

控火失败。图20为1 200 s时,3种工况下燃料堆垛烧损情况。可知,在1 200 s时,对于喷水强度为45 L/(min·m²)的工况,中心燃料堆垛几乎烧损殆尽,且左侧目标堆垛被引燃,烧损严重。

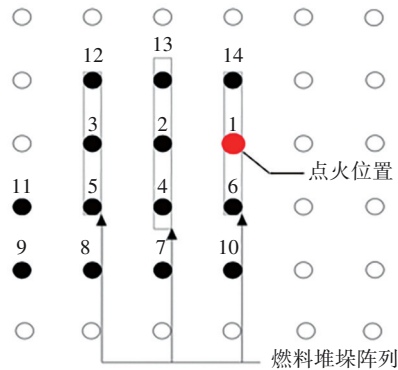


图18 工况5喷头启动顺序
Fig.18 Nozzle start sequence of condition 5

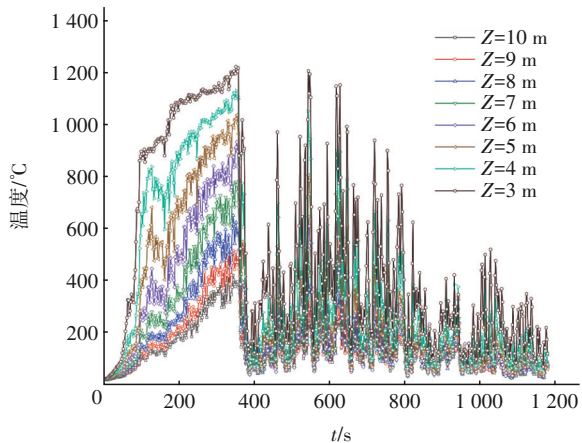


图19 工况5火源上方不同高度下热电偶温度曲线
Fig.19 Temperature curve of thermocouple at different heights above the ignition source under condition 5

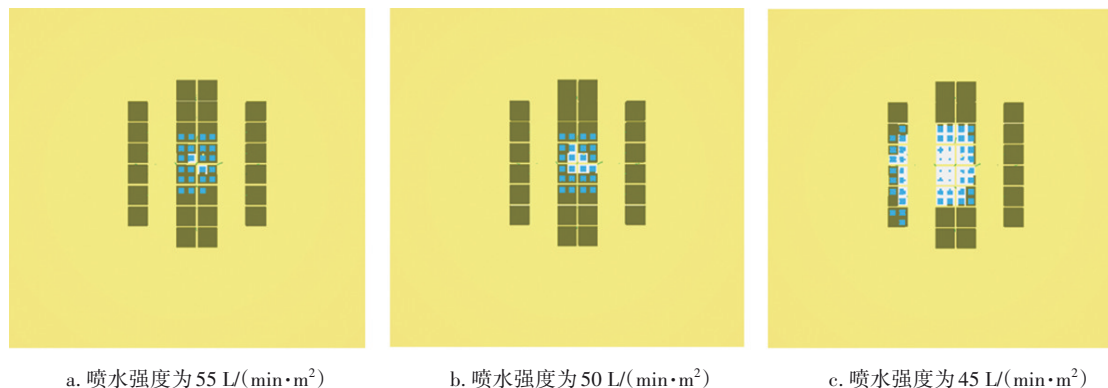
表6 3种工况下模拟结果

Tab.6 Simulation results under three conditions

项目	工况3	工况4	工况5
喷头动作数/个	3	5	14
喷水强度/(L·min ⁻¹ ·m ⁻²)	55	50	45
控火时间/s	602	674	—
最大热释放速率/kW	13 500	14 000	27 500
燃料堆垛损坏量/箱	50	60	120
过火面积/m ²	4	5	10
自动喷水实际作用面积/m ²	27	45	126
作用面积/m ²	安全系数=1.5	40.5	67.5
	安全系数=2	54	90

对于30 m高大净空场所,经分析采用喷水强度为55 L/(min·m²)和作用面积为54 m²是经济合理

的,建议工程中采用大喷水强度、小作用面积的抑制灭火模型。



a. 喷水强度为 $55 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$

b. 喷水强度为 $50 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$

c. 喷水强度为 $45 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$

图20 3种工况下燃料堆垛烧损情况

Fig.20 Fuel stacking burning loss under three conditions

4 对比分析

自动喷水灭火系统的工程参数为喷水强度和作用面积,首先是喷水强度要能实现抑制灭火和控制灭火,且必须符合这两种模型。抑制灭火需要的喷水强度比较大,能快速控制燃烧,开放喷头数量少,作用面积小;控制灭火所需喷水强度仅比临界灭火强度大,不能快速控制燃烧,但能逐步熄灭火灾,开放喷头数量多,作用面积大。工程参数应根据经济合理性和安全可靠综合确定:经济合理性根据两者的乘积进行判定,乘积越小越经济;安全可靠应根据喷水强度和作用面积参数的灭火效果和冗余度进行综合判定,喷水强度应大于临界灭火喷水强度和控火喷水强度,且该喷水强度应在仿真模拟中能够实现快速灭火。若要实现抑制灭火,在对应所需的喷水强度下,本研究认为应选取2倍的喷头开启面积为作用面积,即安全系数为2。

22 m净空高度空间场所,文献[1]的喷水强度为 $24 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,作用面积为 110 m^2 ,最小设计流量为 $2\,640 \text{ L}/\text{min}$;本研究中仿真模拟提出的抑制喷水强度为 $37.55 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,作用面积为 72 m^2 ,满足最小设计喷头6个的要求,最小设计流量为 $2\,703.6 \text{ L}/\text{min}$,模拟结果(最小设计流量)是文献[1]的1.02倍,系统仿真模拟参数结果与标准FMDS326相当,属于合理水平。

30 m净空高度空间场所,本研究中仿真模拟提出的抑制喷水强度为 $55 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,作用面积为 54 m^2 ,满足最小设计喷头6个的要求,最小设计流量为 $2\,970 \text{ L}/\text{min}$,模拟结果是文献[1]的1.125倍,

系统仿真模拟参数结果与标准FMDS326相当,属于合理水平。

5 结论

① 高大净空场所,喷头动作温度是决定系统灭火模型的重要影响因子,当净空高度为22 m时,在同一净空高度和物品布置下,探索了不同动作温度的灭火效果。当喷头动作温度为 74°C 时,控火效果明显降低,是控火模型;当喷头动作温度为 68°C 时,可实现抑制灭火,不同的动作温度对应不同的喷头启动时间,因此自动喷水灭火系统喷头的启动时间是核心参数之一。

② 在22 m净空高度下,当喷头动作额定温度为 74°C 、RTI为 $28 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$ 、环境温度为 20°C 时,火灾规模为6.9 MW,可使喷头动作;当喷头动作额定温度为 68°C 、RTI为 $28 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$ 时,火灾规模为6.2 MW,可使喷头动作。故工程设计参数如下:RTI为 $28 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$,喷头动作额定温度为 68°C ,喷水强度为 $37.55 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,作用面积为 72 m^2 ,喷头类型为快速响应喷头。

③ 在30 m净空高度下,当喷头动作额定温度为 68°C 、RTI为 $28 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$ 、环境温度为 20°C 时,火灾规模为12.5 MW,可使喷头动作。

④ 在30 m净空高度下,当喷水强度大于 $50 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,能较好地控火,是抑制灭火模型;当喷水强度为 $45 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 时,控火失败。建议净空高度为30 m的高大空间工程设计参数如下:RTI为 $28 (\text{m} \cdot \text{s})^{1/2}$ 的快速响应喷头,喷头强度应不小于 $55 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,作用面积应不小于 54 m^2 。

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.
- 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).
- [3] 黄晓家,赵耀,谢水波,等. 高大空间建筑自动喷水灭火数值模拟研究[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(17): 6-12.
- HUANG Xiaojia, ZHAO Yao, XIE Shuibao, *et al.* Numerical simulation of automatic sprinkler in high clearance building [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(17): 6-12(in Chinese).
- [4] NAM S. Actuation of sprinklers at high ceiling clearance facilities [J]. *Fire Safety Journal*, 2004, 39(7): 619-642.
- [5] KOIVISTO R, NIELSEN D. FIRE—a database on chemical warehouse fires [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1994, 7(3): 209-215.
- [6] 刘慧,刘朋,米海蓉. 自动喷水灭火工作过程的仿真模拟比较[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2008, 29(9): 918-923.
- LIU Hui, LIU Peng, MI Hairong. Evaluating the accuracy of simulations of automatic sprinkler system operation [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2008, 29(9): 918-923 (in Chinese).
- [7] 黄晓家,尧炜杰,谢水波,等. 基于FDS的高架仓库火灾自动喷水灭火研究[J]. *给水排水*, 2020, 46(12): 68-75.
- HUANG Xiaojia, YAO Weijie, XIE Shuibao, *et al.* Research on automatic sprinkler suppression fire in high-rack warehouse based on FDS [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(12): 68-75 (in Chinese).
- [8] KUNG H C. Cooling of room fires by sprinkler spray [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1977, 99(3): 353-359.
- [9] 赵耀,黄晓家,谢水波,等. 自动喷水灭火机理的回顾与展望[J]. *给水排水*, 2019, 45(6): 135-140, 144.
- ZHAO Yao, HUANG Xiaojia, XIE Shuibao, *et al.* Review and prospect of automatic sprinkler mechanism [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(6): 135-140, 144(in Chinese).

作者简介:黄晓家(1964—),男,山东青岛人,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:2021-09-10

修回日期:2022-02-05

(编辑:沈靖怡)

保护生态环境就是保护生产力

改善生态环境就是发展生产力