

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.017

模拟戊类仓库实体灭火试验研究

杨丙杰¹, 李毅¹, 刘欣¹, 于东兴¹, 王健强¹, 殷颖智²

(1. 应急管理部天津消防研究所, 天津 300381; 2. 安泛工程咨询<上海>有限公司, 上海 200040)

摘要: 为研究自动喷水灭火系统对戊类仓库火灾的控火和灭火性能,合理确定自动喷水灭火系统的设置要求,在前期构建火灾试验模型的基础上,分别在不同净空高度和储存方式下开展了3组自动喷水灭火系统全尺寸灭火试验,并采用火灾动力学原理分析了第1只喷头启动时的火灾热释放速率。结果表明,在顶板高度不超过9 m的情况下,采用9 L/(min·m²)的喷水强度能控制高度不超过3.5 m的堆垛火灾,采用32 L/(min·m²)的喷水强度无法控制高度不超过7.5 m的货架火灾,第1只喷头启动时对应的火灾热释放速率分别约为2.4和6.4 MW;在顶板高度不超过6 m的情况下,采用25 L/(min·m²)的喷水强度能有效控制高度不超过4.5 m的货架火灾,第1只喷头启动时的火灾热释放速率约为3.5 MW。

关键词: 戊类仓库; 火灾试验模型; 自动喷水灭火系统; 火灾蔓延; 火灾热释放速率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0106-05

Fire Extinguishing Test in a Simulated Class E Warehouse

YANG Bing-jie¹, LI Yi¹, LIU Xin¹, YU Dong-xing¹, WANG Jian-qiang¹,
YIN Ying-zhi²

(1. Tianjin Fire Science and Technology Research Institute of MEM, Tianjin 300381, China;

2. Anfan Engineering Consulting <Shanghai> Co. Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: This paper investigated the fire control and fire extinguishing performance of an automatic sprinkler system in a class E warehouse, and reasonably determined the setting requirements of the automatic sprinkler system. Based on the preliminary established fire test model, three groups of automatic sprinkler system full-size fire extinguishing tests were carried out under different clearance heights and storage modes respectively, and the heat release rate (HRR) was analyzed by fire dynamics principle when the first sprinkler was started. When the roof height was less than 9 m, 9 L/(min·m²) water spraying intensity was capable of controlling the stacking fire with a height less than 3.5 m. However, the water spraying intensity of 32 L/(min·m²) could not control the rack fire with a height less than 7.5 m. When the first sprinkler was started, the HRRs were 2.4 MW and 6.4 MW, respectively. When the roof height was less than 6 m, 25 L/(min·m²) spraying intensity could effectively control the rack fire with a height less than 4.5 m, and the HRR was 3.5 MW when the first sprinkler was started.

Key words: class E warehouse; fire test modeling; automatic sprinkler system; fire spread;

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0807605); 应急管理部天津消防研究所基本科研业务费项目(2019SJ11)

heat release rate

戊类仓库是指储存非燃烧物品的仓库,但允许可燃包装质量不超过物品本身质量的1/4或可燃包装体积不超过物品本身体积的1/2。2018年版《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)在耐火等级、平面布置、灭火救援等方面对戊类仓库做了详细规定,但在消防设施设置方面,仅规定部分丙、丁类仓库应设置自动喷水灭火系统。换言之,戊类仓库无论大小,均可不设置自动喷水灭火系统。

前人对仓库自动喷水灭火系统的研究多集中在ESFR自动喷水灭火系统试验方面,如宋波^[1]研发了适用于大空间和高危险性场所的ESFR喷头样机,并建立了一套完整的ESFR喷水灭火系统。包光宏等人^[2]开展了高架仓库ESFR自动喷水灭火系统的火灾模型试验。笔者所在课题组开展了不同高度货架仓库ESFR喷头全尺寸试验研究。

针对丁、戊类等火灾危险性较小的仓库,目前仅检索到笔者所在课题组开展的“丁、戊类仓库火灾危险性研究”项目,课题组通过构建戊类仓库的火灾试验模型,开展了不同工况下的火灾燃烧特性试验。研究发现,戊类仓库的外包装材料质量及是否采用木托盘承托等显著影响其火灾危险性,在有木托盘的情况下,其火灾规模、火灾增长速率及对相邻货架的影响均较大,因此建议对于采用木托盘承托的戊类仓库均应设置自动喷水灭火系统^[3]。

国外标准中,对于仓库的设防要求较为严格,如FMDS 8-1规定,除非仓库内无任何可燃物(包括承托的托盘),否则仓库内均应设置自动喷水灭火系统。为了研究自动喷水灭火系统对戊类仓库的控火和灭火性能,笔者开展了3组全尺寸实体灭火试验,进一步探索戊类仓库的火灾危险性,以合理确定自动喷水灭火系统的设置要求。

1 材料与方法

1.1 试验地点及设备

试验在燃烧试验馆内进行,试验馆长117.7 m、宽40.5 m,总容积约为 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3$,馆内建有模拟高大空间场所的全尺寸火灾试验平台,平台升降高度为3~24 m,可同时安装100只喷头。同时,在喷头处、平台正下方和正上方等不同位置布置热电偶,可有效测量不同位置喷头和不同梯次的火场温度。

平台下方安装供水系统,并采用环状管网供水,配水支管管径为DN80,配水管及配水干管管径为DN200,配水支管共10根,每根支管上可安装10只喷头,喷头间距为3 m×3 m。

1.2 火灾试验模型的选择

选用2种火灾试验模型:一种是以金属箱为内衬、纸箱包装的组合物体,金属箱规格为495 mm×495 mm×492 mm,质量为9.67 kg,纸箱采用AB楞,规格为500 mm×500 mm×500 mm,质量为1.8 kg;另一种采用FM Global规定的第2类可燃物(仅包含内层纸箱),纸箱规格为1 002 mm×1 002 mm×960 mm。

1.3 试验方案设计

结合前期研究和《自动喷水灭火系统设计规范》(GB 50084—2017),本研究开展了3组试验。

① 堆垛试验(试验1)

顶板高度为9 m,采用3层堆垛,通过托盘直接累积堆放,高度约为3.5 m。8个单体按2×2×2放置,在每个托盘上。主堆垛共布置12组,按2×6布置,两侧目标堆垛各布置4组,按1×4布置,通道宽度为2.4 m,如图1所示。

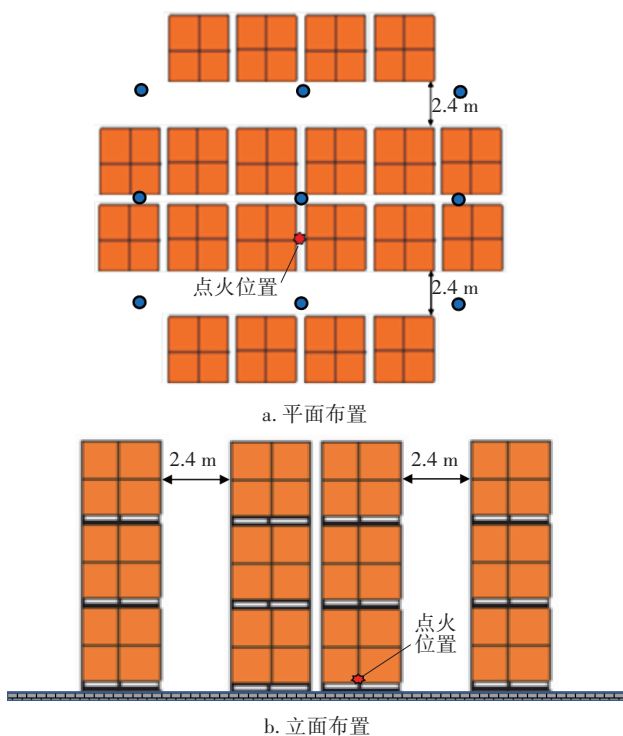


图1 试验布置

Fig.1 Arrangement of stacking test

② 货架试验(试验2和试验3)

试验2的顶板高度为6 m,其平面布置与试验1完全一致,不同的是竖向采用3层货架布置,货架高度为4.5 m。

试验3顶板高度为9 m,仍采用货架布置,但试验模型选用FM Global规定的第2类可燃物。每个托盘上放置1个单体,主货架共布置12组、按2×6布置,两侧目标货架各布置4组、按1×4布置。主货架和目标货架均为5层,高度为7.5 m,其布置情况与图1基本一致。

3组试验中,点火位置均向目标货架(堆垛)偏移1个纸箱,试验期间保持门、窗及通风系统关闭,无强制通风,基本情况见表1。

表1 试验基本情况

Tab.1 Basic test conditions

项目	喷头类型	溅水盘与顶板距离/mm	工作压力/MPa	喷头流量/(L·min ⁻¹)	喷水强度/(L·min ⁻¹ ·m ⁻²)
试验1	下垂型,K-80,标准响应,68℃	460	0.10	80	9
试验2	下垂型,K-161,标准响应,74℃	458	0.20	227	25
试验3	下垂型,K-161,标准响应,68℃	300(感温元件到顶板距离)	0.35	301	32

2 结果与分析

2.1 试验过程分析

① 试验1

点火后64 s,火焰蔓延至试验模型顶部;90 s时,火焰高度约为4.5 m,并一直沿主堆垛竖向燃烧;129 s时第1只喷头开启,火势有所减小,但仍继续燃烧;335 s和402 s时,第2只和第3只喷头相继开启,此时火势明显减小,并继续缓慢下降。试验共持续30 min,火势基本完全熄灭。本次试验较好地控制了火势的增长,未引燃目标堆垛,共开启了4只喷头,试验过程如图2所示。

图3为开启喷头处的温度变化曲线,在第1只喷头开启时,其附近的温度达到158℃,喷头开启后温度稍有下降,但由于喷水不均匀,温度随后又上升至229℃。随着第2只和第3只喷头开启,温度也

从127℃持续下降至室温,且未再上升。

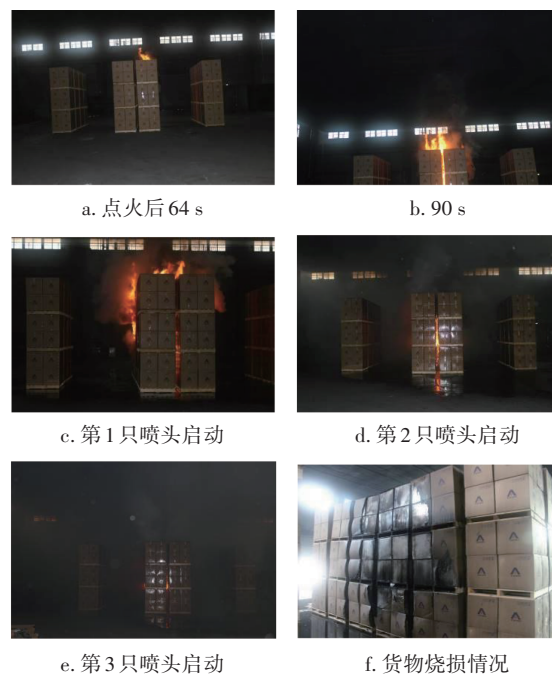


图2 试验1的过程

Fig.2 Process of test 1

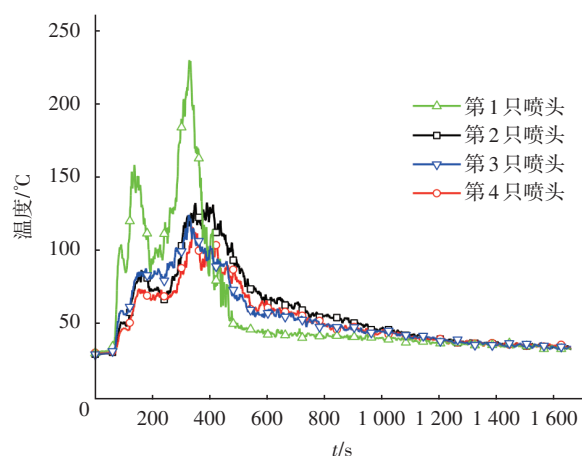


图3 试验1中开启喷头处的温度变化曲线

Fig.3 Temperature curve of operated sprinkler in test 1

② 试验2

点火后30 s,火焰上升至二层货架并引燃托盘;40 s时,上升至三层货架;45 s时上升至吊顶高度;46 s时第1只喷头开启,火势得到控制;70 s时,火焰被压制至三层货架高度,但在水平方向火势已蔓延至主货架外侧,随后火势继续被喷水压制;2 min时火势被压制至二层货架高度,此后火势逐渐减小;3 min时火势被压制至一层货架高度,且仅在货架中间部位燃烧;4 min时仅有少量明火;5 min时火势几

乎完全熄灭,未引燃目标货架。整个喷水时间持续15 min,试验共开启1只喷头,试验过程见图4。

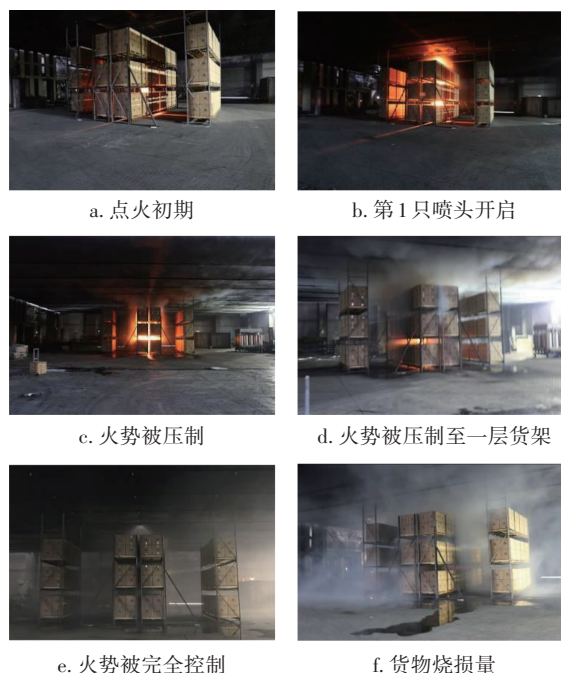


图4 试验2的过程

Fig.4 Process of test 2

图5为开启喷头处的温度变化曲线。与试验1相比,试验2由于储物顶部与顶板之间的净空高度较小,且采用货架布置,因此第1只喷头的开启时间较早,且火势的增长速度和温度上升速度明显更快。但由于喷头开启时间较早,因此仅开启1只喷头就成功控制了火势。

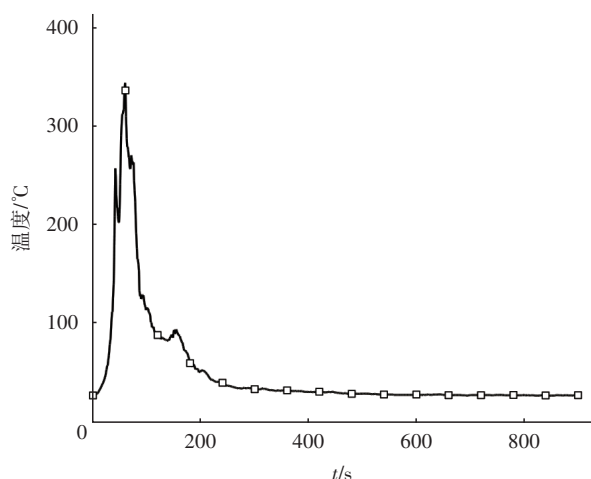


图5 试验2中开启喷头处的温度变化曲线

Fig.5 Temperature curve of operated sprinkler in test 2

③ 试验3

点火后30 s,火焰蔓延至二层货架;50 s时,火

焰蔓延至四层;1 min时,火焰蔓延至顶板;62 s时,第1只喷头开启,但是对火势的影响较小,火势沿着主货架水平蔓延,并穿越外表面;131 s时第2只喷头开启,向下压制烟气,另外还有4只喷头分别在135~152 s内相继开启;295 s时,东侧的目标货架在第二层被引燃,火势继续沿主货架蔓延;416 s时火势到达主货架的南侧边缘,而东侧的目标货架火势传播较慢,但最终还是蔓延至外表面;1 029 s时,火势蔓延至东侧货架外表面不久,第7只喷头开启。试验共进行30 min,最后人工扑灭了少量余火,共开启了7只喷头,控火效果不理想,试验过程见图6。

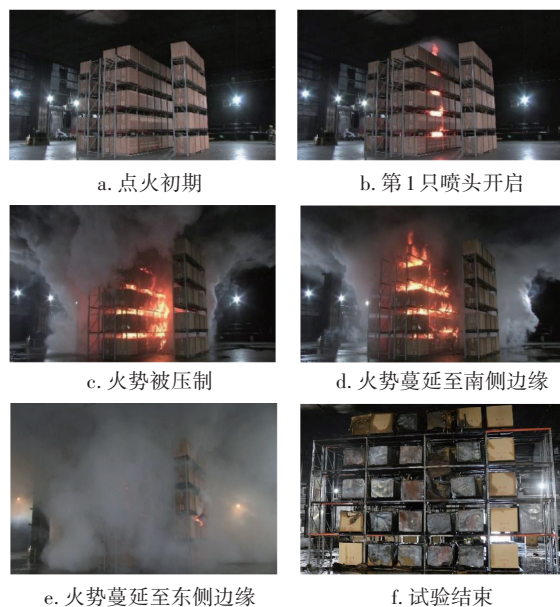


图6 试验3的过程

Fig.6 Process of test 3

2.2 自动喷水灭火系统的控火、灭火性能

① 水滴穿越火羽流的动力性能

美国消防工程师手册(SFPE)中提出了喷头水滴粒径与穿透能力的关系,即水滴粒径与喷头出水口径的1/3次方成正比,与喷水压力的1/3次方成反比,而喷水的表面积则与总喷水量和喷头粒径的比值成正比。根据上述内容可得出如下关系式:

$$A_s \propto (Q^3 PD^{-2})^{1/3} \quad (1)$$

式中: A_s 为喷头喷水的表面积; Q 为喷头的总喷水量; P 为喷头压力; D 为水滴粒径。在3次试验中,以试验1为基准,单只喷头喷水的相对表面积分别为1、29.1和118.9。

水滴下落过程中,受到火羽流速度及空气阻力的影响,其下落加速度可用下式计算:

$$m \frac{dU}{dt} = mg - \frac{C_D \rho_g (U + V)^2}{2S_i} \quad (2)$$

式中: U 为水滴下落速度; V 为火羽流上升速度; m 为水滴质量; ρ_g 为空气密度; g 为重力加速度; C_D 为阻力系数(当雷诺数 $Re < 600$ 时, $C_D = 18.5Re^{-0.6}$; 当 $Re > 600$ 时, $C_D = 0.44$); S_i 为水滴的前表面积。

② 第1只喷头启动时的热释放速率

在第1只喷头开启前,羽流的对流热释放速率是由羽流中心线上喷头周围温度计算获得的, Heskstad 给出了喷头开启前对流热释放速率 \dot{Q}_c 的计算公式^[4]:

$$\dot{Q}_c = C_{\Delta T_0}^{-3/2} (g/T_\infty)^{1/2} C_p \rho_\infty (z - z_0)^{5/2} \Delta T_0^{3/2} \quad (3)$$

$$z_0 = -1.6 + 0.094 \dot{Q}_c^{2/5} \quad (4)$$

式中: ΔT_0 为羽流中心线的温度变化; $C_{\Delta T_0}$ 为羽流修正系数, 本研究中取 $C_{\Delta T_0} = 11$ ^[5]; C_p 为空气的定压比热; z 为距羽流原点的高度(本研究中指距离货物顶部的高度); z_0 为虚源高度。

严格来说, 上述公式不适用于货架布置, 但考虑到3次试验的堆垛和货架通道相同, 且在喷头开启之前的时间较短, 因此本研究仍采用该公式进行计算。3次试验中, 第1只喷头启动时的温度分别为158、344和419℃, 通过迭代的方法, 求得3次试验中第1只喷头启动时对应的热释放速率分别约为2.4、3.5、6.4 MW。

从上述计算结果可知, 储物的布置方式显著影响火势的增长, 试验1由于采用堆垛堆放, 布置较为紧凑, 在喷头开启前的较长时间内由于燃烧不够充分, 火灾热释放速率仍然较小。试验2和试验3由于采用货架布置, 燃烧较为充分, 在喷头开启前的热释放速率增长较快, 且随着喷头开启时间的延迟, 火势的增长更为迅速, 进一步增大了系统的控火和灭火难度。

3 结论

① 在顶板高度为9 m、最大堆放高度为3.5 m, 喷水强度为9 L/(min·m²)的情况下, 以及在顶板高度为6 m、货架高度为4.5 m、喷水强度为25 L/(min·m²)的情况下, 火势未蔓延至目标堆垛, 喷头

开启数量较少, 系统能起到较好的控火和灭火作用。

② 在顶板高度为9 m、货架高度为7.5 m、喷水强度为32 L/(min·m²)的情况下, 喷头的开启数量在可控范围内, 但火势蔓延范围较大, 且蔓延至目标货架外侧, 采用K-161喷头控火效果不理想, 建议此类场所应采用ESFR喷头。

③ 货物的储存方式及货物与顶板之间的净空高度显著影响火势的增长速率及喷头的开启时间, 采用货架储存时的火灾增长速率明显快于堆垛布置, 且净空高度越大, 喷头开启时间越晚。

参考文献:

- [1] 宋波. ESFR自动喷水灭火系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
SONG Bo. Research on the ESFR Sprinkler System [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003 (in Chinese).
- [2] 包光宏, 王炯, 张文华. ESFR自动喷水灭火系统在高架仓库中的应用试验[J]. 西南科技大学学报, 2010, 29(3): 51-54.
BAO Guanghong, WANG Jiong, ZHANG Wenhua. Experimental studies on the ESFR sprinkler system in high rack warehouse[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2010, 29(3): 51-54 (in Chinese).
- [3] 宋波, 杨丙杰, 李毅, 等. 典型戊类仓库火灾危险性试验研究[J]. 火灾科学, 2017, 26(4): 232-238.
SONG Bo, YANG Bingjie, LI Yi, et al. Experimental study of fire risk in typical class E warehouses [J]. Fire Safety Science, 2017, 26(4): 232-238 (in Chinese).
- [4] HESKESTAD G. Engineering relations for fire plumes [J]. Fire Safety Journal, 1984, 7(1): 25-32.
- [5] NAM S. Actuation of sprinkler at high ceiling clearance facilities [J]. Fire Safety Journal, 2004, 39(7): 619-642.

作者简介: 杨丙杰(1978—), 男, 安徽界首人, 硕士, 副研究员, 主要从事建筑消防设施应用技术和消防标准化研究。

E-mail: 13920949023@163.com

收稿日期: 2020-11-19

修回日期: 2021-01-12

(编辑: 刘贵春)