

细水雾灭火影响因素改变对受限空间燃油热释放率的影响

李安桂, 彭 浩, 高 然, 成劲光

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 研究细水雾灭火影响因素, 包括改变油盘相对于喷头水平偏移距离、油盘与喷头垂直距离、油盘面积、预燃时间及喷头压力等。在全尺寸热释放率试验台的基础上, 搭建不同油盘空间位置, 细水雾条件下油池火燃烧实验台, 研究了受限空间内细水雾对乙醇燃烧过程中热释放率的影响。结果表明, 对于每个偏移距离存在一个最佳灭火位置, 在此位置下, 细水雾对热释放率的抑制效果最好; 乙醇热释放率峰值随油盘面积增大而增大, 随着细水雾喷头压力增大而减小; 乙醇预燃时间越短, 细水雾降低火源热释放率效果越好。该研究为受限空间内细水雾灭火设计提供了依据。

关键词: 热释放率; 细水雾; 受限空间; 油池火; 峰值到达时间

中图分类号: TU998.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0878-06

Influence of water mist fire extinguishing factors on fuel heat release in confined space

LI Angui, PENG Hao, GAO Ran, CHENG Jinguang

(School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The paper studies on factors affecting the fire suppression of water mist, including the horizontal distance of the oil pan relative to the nozzle, the vertical distance of the oil pan and the nozzle, the oil pan area, the pre-burning time and the pressure of the water mist nozzle. Establishes a pool fire experimental platform with different oil pan space and water mist based on the full-size heat release rate experimental table, studies the influence of the water mist on the heat release rate of ethanol fuel during combustion in the confined space. The results show that there is an optimal fire-extinguishing position for each offset distance. At this position, the fine water mist has the best effect on the heat release rate. The peak of the heat release rate increases with the increase of oil pan area and the increase of the water mist nozzle pressure. The shorter the pre-burning time of ethanol, the better the effect of water mist on reducing the heat release rate.

Key words: heat release rate; water mist; confined space; oil pool fire; peak arrival time

细水雾灭火技术具有用水量少、对被保护对象的冲击力小、对环境无损害和污染等特点, 细水雾灭火技术具有十分广阔的工程实际应用前景, 具有很大的社会效益和经济效益。细水雾灭火机理为: 当细水雾达到火焰区时, 由于细水雾总表面积相对较大, 吸收热量快, 迅速气化, 大量的气化潜热会降低燃料温度, 同时大量水蒸气的存在也会降低反应区的氧气浓度, 从而达到冷却燃烧反应和窒息燃烧反应双重物理灭火的效果^[1-3]。影响细水雾灭火效果主要因素有细水雾到达燃料表面的雾动量和雾通量、燃料的燃烧面积、燃料相对于喷雾射流的位置。细水雾灭火效果受多方面因素的影响, 在实际使用过程中, 需要根据选用的细水雾喷头和实际灭火场景进行灭火试验,

进而优化细水雾灭火系统的喷头布置, 以达到最佳的灭火效果。通过以上认识, 本文选择一种小流量喷头进行受限空间内细水雾灭油盘火的实验。

我国细水雾灭火技术的研究从 20 世纪 90 年代开始进行, 虽然晚于一些发达国家, 但在细水雾灭火技术理论及设计应用等方面得到了许多成果。陆强等人在进行细水雾灭火的实验结果中得出, 当液体燃料发生变化时, 细水雾的灭火机理也会随之有所变化, 并且细水雾的水雾特性是影响灭火机理差异的最主要因素^[5]。牛国庆等人进行了细水雾对油类火灾的灭火实验, 对细水雾灭火过程中温度场的变化进行分析, 指出细水雾熄灭油类火灾的作用过程分为两个阶段, 第一阶段细水雾灭火机理主要是是衰减热辐射作用和气相冷却机

收稿日期: 2018-03-15

修改稿日期: 2018-10-15

基金项目: 陕西省 13115 重大专项“西安地铁空间交错车站火灾排烟及其人员疏散预案编制理论基础与工程示范, 2009400”

第一作者: 李安桂(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑通风空调及建筑节能研究。E-mail: liag@xauat.edu.cn

理,第二阶段是细水雾对燃料表面进行冷却^[6]。浙江大学的周华等人对长宽高为4 m×3 m×3 m的小空间内细水雾对不同位置油池火的灭火效果进行研究,结果发现细水雾对位于喷头正下方的火源灭火效果最好,并且随这火源距离喷头横向偏移距离的增大细水雾灭火效果逐渐减弱^[7]。中国科技大学为了能进一步了解细水雾灭火技术的灭火效果,进行了“细水雾灭火实验模拟系统研制及应用”的课题研究,开展了细水雾特性实验测量研究、受限空间细水雾灭火的模拟实验研究等工作^[8-11]。

我国目前对细水雾灭火影响因素的实验研究较少,细水雾灭火技术与现实应用还存在一些差距。但作为比较先进的灭火技术,细水雾灭火系统在我国的应用将会越来越广泛。为了提高细水雾灭火效果,推动其在工程实践中的应用,有必要研究各因素对细水雾灭火效果的影响。本文通过实验研究了细水雾灭火特性的影响因素,以作为相关研究的参考。

1 实验装置和热释放率测量原理

1.1 实验装置

在全尺寸热释放率试验台的基础上搭建了细水雾条件下油池火燃烧实验平台,实验台的主要功能是测量受限空间内细水雾条件下油池火的热释放率。

实验室内尺寸6 m×3 m×3 m,实验装置由细水雾发生系统、油盘燃烧平台、串口线数据采集系统组成。实验中采用的是高压泵式细水雾发生方法,采用开式细水雾系统,动力由高扬程深井螺杆泵产生,扬程300 m,额定流量2.6 m³/h。喷头前设置压力表和阀门,方便调节流量和压力。喷头为标准角实心锥细水雾喷头, $K=1.0$,工作压力0.2~8.0 MPa,雾滴粒径一般为200~400 μm。数据采集系统包括电子质量称、连接线、电脑和数据记录软件,实验中使用的电子天平称读数精度为0.1 g。实验中燃油采取质量分数为95%的工业乙醇,每一工况量取200 ml的乙醇,质量为160 g。实验主要装置如图所示。

1.2 实验测量原理

热释放速率(HRR)是在单位时间内材料燃烧向外所释放的热量,是评价可燃物燃烧时火灾强度与规模的重要参数,被视为反映火灾场景,表征火灾过程最重要参数之一^[12-13],热释放速率是预测火灾行为、比较火灾行为以及评价火灾对附

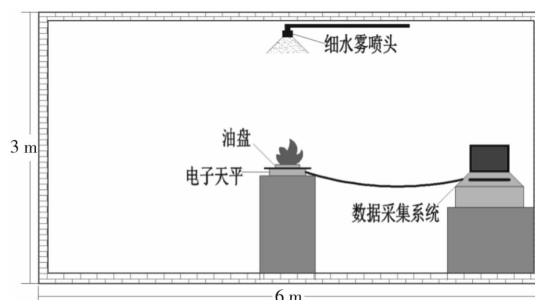


图1 实验系统设备布置

Fig. 1 Experimental system equipment layout



图2 实验装置照片

Fig. 2 Photo of the experimental device

近环境其他燃料影响最有用的数据,是确定消防设计的重要指标。测量热释放速率的方法有替换燃烧法、绝热箱法、耗氧量法、质量损失法,基于氧消耗原理的热释放速率测试方法和基于质量损失速率的热释放速率测试方法是最常用的两种方法^[14]。基于耗氧原理的测量方法是现在较为常用的一种测量方法,但在测量时必须将全部燃烧产物收集和转移,经过充分混合后在排气管下流测量气体的成份和流量,这种测量方法不适合本文设计的试验装置,本文采取质量损失法测量热释放率。

质量损失法(Mass Loss Rate Method,简称MLRM)是指利用测得的质量损失率和燃烧热值来计算热释放速率方法。质量损失率是指可燃物在燃烧过程中质量随时间的变化率,它反应了材料在一定火强度下的燃烧程度、热裂解及挥发。试验中可以通过数据采集系统直接测定可燃物的质量损失,并换算为可燃物的质量损失率,具体公式如下。

$$Q = \alpha \times m \times q \quad (1)$$

式中: Q 为火源的热释放率, kW; m 为燃料的质量损失速率; α 为可燃物的燃烧效率因子,完全燃烧为1,一般情况为0.3~0.9之间; q 为燃料的平均热值, kJ/kg(乙醇燃烧热值一般取 3×10^4 kJ/kg)。

质量损失速率的测量方法计算较为简单。实验时将盛有燃料的油盘放置在电子天平上,通过

数据采集系统可以直接测定燃料燃烧时的质量随时间的变化,并换算为燃料的质量损失速率 m ,因为本文细水雾雾滴直径小于 $400\text{ }\mu\text{m}$ 落于电子天平上的细水雾质量可以忽略不计,这样计算灭火过程中可燃物的热释放速率更为简便.

本文主要研究油盘相对于喷头水平偏移距离、油盘与喷头垂直距离、油盘面积、预燃时间等对乙醇燃烧过程中热释放率的影响.制定了相应的实验工况,见表 1.

表 1 实验工况列表
Tab. 1 List of experimental conditions

工况	油盘与喷头 垂直距离/m	油盘相对于喷头 水平偏移距离/cm	油盘面积/ m^2	预燃时间/s	燃料体积/ml	喷头压力/MPa
1	1.6	0	0.04	0	200	3
2	1.6	0	0.04	0	200	3
3	1.6	20	0.04	0	200	3
4	1.6	40	0.04	0	200	3
5	1.6	60	0.04	0	200	3
6	1.6	80	0.04	0	200	3
7	1.4	0	0.04	0	200	3
8	1.6	0	0.04	0	200	3
9	1.8	0	0.04	0	200	3
10	2	0	0.04	0	200	3
11	2.2	0	0.04	0	200	3
12	1.6	0	0.01	0	200	3
13	1.6	0	0.022 5	0	200	3
14	1.6	0	0.04	0	200	3
15	1.6	0	0.062 5	0	200	3
16	1.6	0	0.09	0	200	3
17	1.6	0	0.04	0	200	3
18	1.6	0	0.04	20	200	3
19	1.6	0	0.04	40	200	3
20	1.6	0	0.04	60	200	3
21	1.6	0	0.04	80	200	3
22	1.6	0	0.04	0	200	1.5
23	1.6	0	0.04	0	200	2
24	1.6	0	0.04	0	200	2.5
25	1.6	0	0.04	0	200	3

细水雾灭火的基本过程可以分为三个阶段,第一阶段:在施加细水雾初期时受限空间温度较高,雾滴不能穿过燃烧产生的热烟气层和高温火焰区达到燃料表面,容易被上升的火羽流带出火焰区,同时吸收火焰的热辐射和高温烟气形成高温水蒸气层,冷却燃料周围的空间,并且由于细水雾喷射过程中会卷吸周围空气,促进流场扰动,加剧空气与燃料混合,燃烧加剧燃烧,热释放率增大.第二阶段:更多的细水雾雾滴能够进入到燃烧区,吸收热量,降低火焰温度,抑制燃料燃烧,燃料火焰变小.在此阶段,大量细水雾雾滴快速吸热蒸发降温,汽化冷却作用占主导地位,且细水雾滴粒径越小,其相对表面积越大,蒸发

速率越快,吸收的热量越多,使燃油燃烧热释放率逐渐降低.第三阶段:火焰在细水雾的持续喷射下直至熄灭.经过第二阶段后火焰温度急剧下降,燃烧蒸发率随之降低,燃料释放的热量逐渐减少,火羽流的上升浮力减小,被卷吸进入火焰区的雾滴穿过热烟气层和火焰时并不能够完全蒸发,能够到达燃料的燃烧表面,起到表面冷却的作用,直至燃料燃烧完全熄灭^[15].

实验数据的误差主要由以下几个方面的因素引起:(1)油盘由于多次燃烧导致油盘底面不平整使燃油液面厚度不一致,导致燃烧后期燃油无法完全覆盖油盘底面,从而使燃烧速率降低,而且油盘面积越大时出现该状况越明显,且发生时间

越早;(2)房间不能做到完全密闭,门缝窗缝等缝隙所引起的渗透风量的不固定引起室内风量变化;(3)开始点燃时由于细水雾发生系统与数据采集系统无法做到完全同步启动,存在人为的反应时间差,从而易产生数据采集系统落后或超前1~2 s,影响对数据的准确性分析;(4)燃烧过程中由于火焰飘忽不定,以及电子天平受热后的稳定性变差,从而导致个别质量数据变大的坏值不符合燃烧时燃油质量逐时降低的客观规律。

主要通过以下数据处理方式减小实验误差:

(1)用厚钢板制作油盘及定期更换燃烧油盘,减小油盘形状及底面平整度变化所引起的实验误差;(2)尽可能地对门窗缝隙进行重复性密封,减少由于渗透风所引起的实验误差;(3)数据采集系统的开启时间提前于电子脉冲点火器1~2 s,这样可得到最初的质量数据,处理数据时可剔除掉开始记录时未发生变化的几个数据;(4)通过间隔5 s取质量数据值进行数据平滑处理,剔除个别异常数据,从而减小实验数据忽大忽小所引起的误差。

2 讨论与分析

2.1 油盘相对于喷头不同水平偏移距离下的热释放率

在油盘边长0.2 m,预燃时间0 s,喷头压力3 MPa,油盘与喷头垂直距离1.6 m条件下,进行工况1~工况6的实验,结果如图3所示。

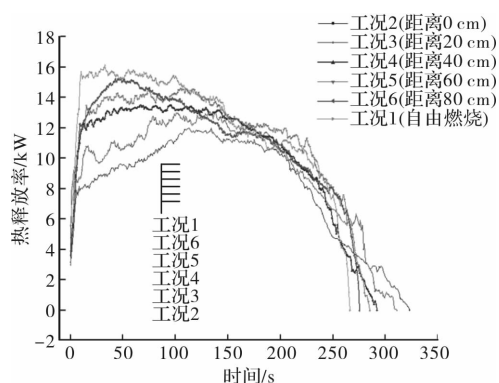


图3 油盘相对于喷头不同水平偏移距离下的热释放率的变化

Fig. 3 Changes in heat release rate of oil pan relative to the nozzle at different horizontal offset distances

对本文使用的喷头,其保护半径为80 cm,当油盘水平偏移距离大于80 cm时,细水雾不能到达油盘所处位置,此时乙醇为自由燃烧,因此,工况1为自由燃烧时乙醇的热释放率。燃烧过程所持续时间较短,热释放率稳定持续时间较短,但峰值较高;工况2~工况6为有细水雾情况下的燃烧

过程,第1阶段与第2阶段中随着距离的增大,热释放率增大,距离越大,热释放率越大,且热释放率峰值到达时间越早。

2.2 油盘相对于喷头不同垂直偏移距离下的热释放率

在油盘边长0.2 m,预燃时间0 s,喷头压力3 MPa,油盘在喷头正下方条件下,进行工况7~工况11的实验,结果如图4所示。

由图4可以看出;热释放率在燃烧第1阶段与第2阶段中随这喷头与油盘垂直距离增大而逐渐增大;且燃烧稳定期持续时间随着距离增大而缩短;由工况7、工况8的热释放率曲线可看出,当油盘与喷头垂直距离较小时,其热释放率变化较小,曲线走向趋势差别较小,热释放率峰值到达时间有较大的延迟,且热释放率稳定时间明显变长。

2.3 不同油盘面积下的热释放率

在预燃时间0 s,喷头压力3 MPa,油盘在喷头正下方且油盘与喷头垂直距离1.6 m条件下,进行工况12~工况16的实验,结果如图5所示。

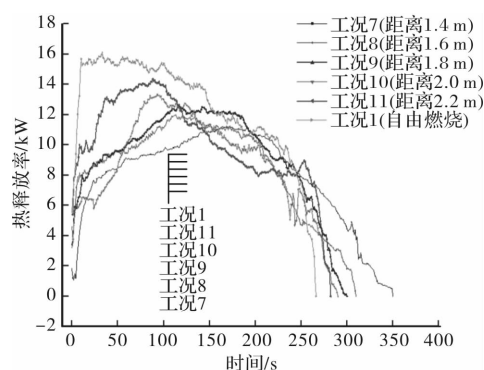


图4 油盘相对于喷头不同垂直偏移距离下的热释放率的变化

Fig. 4 Change sin heat release rate of the oil pan relative to the nozzle at different vertical offset distances

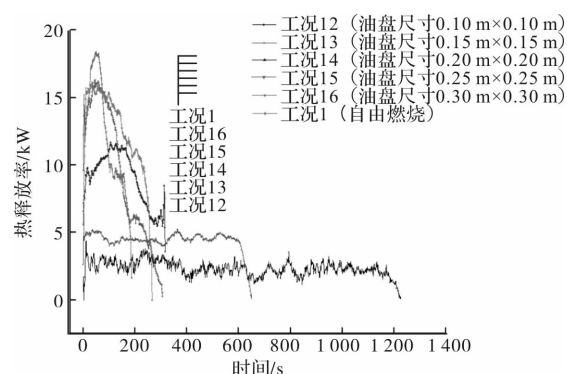


图5 不同油盘面积下的热释放率的变化
Fig. 5 Changes in heat release rate under different oil pan areas

由图可看出:在燃烧第1阶段与第2阶段中乙

醇热释放率随着油盘面积的增大而增大;相同质量的燃油燃烧所用的时间随着油盘面积增大而减小;而且随着油盘面积逐渐减小时,其燃油燃烧热释放率稳定时间逐渐变长,热释放率峰值到达时间随着油盘面积增大而逐渐提前。在燃烧衰减阶段,由图可发现,当面积越大时衰减阶段所需的时间越短,热释放率曲线斜率也越大。

2.4 不同预燃时间下的热释放率

在油盘边长 0.2 m, 喷头压力 3 MPa, 油盘在喷头正下方且油盘与喷头垂直距离 1.6 m 条件下, 进行工况 17~工况 21 的实验, 结果如图 6 所示。

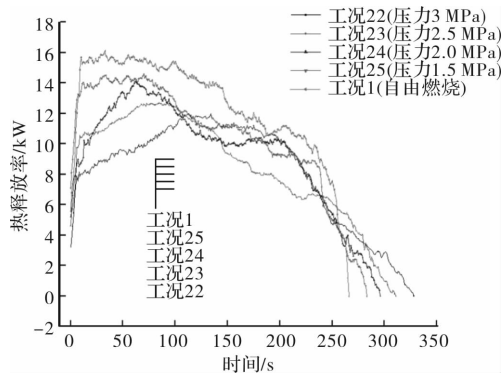


图6 不同预燃时间下的热释放率的变化

Fig. 6 Changes in heat release rate at different pre-ignition times

图6为不同预燃时间下热释放速率的变化曲线图,从图中可以看出,施加细水雾时间越早,乙醇火源热释放速率越小。从工况20,工况21可以看出,预燃60 s时施加细水雾,细水雾对乙醇火源热释放率抑制作用较小,因乙醇在点燃50 s后已达到稳定状态。实验表明,在雾通量一定的情况下,乙醇火未充分燃烧时,施加细水雾可以更为有效的抑制乙醇燃烧。

2.5 不同喷头压力下的热释放率

在油盘边长 0.2 m, 预燃时间 0 s, 油盘在喷头正下方且油盘与喷头垂直距离 1.6 m 条件下, 进行工况 22~工况 25 的实验, 结果如图 7 所示。

从图7中可以看出,随细水雾工作压力增大,乙醇热释放率下降幅度明显增大,这是因为压力增大后细水雾的雾通量随之增大,同时雾滴粒径变的更小,细水雾的粒径减小,雾滴动量增大,增大了细水雾穿透火羽流的能力,可以更加有效地冲击燃烧火焰的根部,切割、拉伸火焰并且限制火焰的发展。同时发现提高火焰区域细水雾通量,也可以使细水雾蒸发吸热和表面冷却作用得到强化。

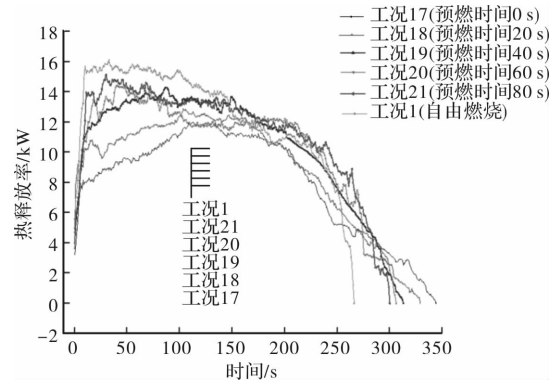


图7 不同喷头压力下的热释放率的变化

Fig. 7 Changes in heat release rate under different nozzle pressures

3 结论

研究了受限空间中细水雾条件下油盘相对于喷头水平偏移距离、油盘与喷头垂直距离、油盘面积、预燃时间、细水雾喷头压力等对乙醇燃烧过程中热释放率的影响,得到了如下结论

(1)在不同油盘相对于喷头水平偏移距离工况下,可以得到火源位于喷头正下方时,火源热释放率最小,热释放率峰值比乙醇自由燃烧时下降30%,细水雾能够有较好地灭火效果,而且随着细水雾喷头与火源水平距离的增大,火源热释放率越大,细水雾灭火效果越差。因此,采用适当的细水雾喷头喷射角度,可以增大细水雾喷头保护范围。

(2)在不同油盘相对于喷头垂直偏移距离工况下,可以得到火源位于喷头正下方时,随着细水雾喷头与火源垂直距离的减小,火源热释放率越小,细水雾灭火效果越好,油盘距离喷头1.4 m时热释放率峰值比距离2.2 m时下降37%。因此,采用适当的细水雾喷头安装高度,可以增大细水雾灭火效果。

(3)不同预燃时间工况下,在火源未充分燃烧时,施加细水雾对熄灭乙醇热释放率抑制效果最好,乙醇预燃时间0 s的热释放率峰值比预燃时间为80 s时下降26%。因此,当发生火灾时,要以最快时间开启细水雾灭火系统。

(4)在不同油盘面积工况下,在第1、第2阶段时热释放率峰值到达时间随着油盘面积的减小而推迟,热释放率峰值随着油盘面积的减小而减小,火源面积的大小对细水雾灭火效果有很大影响。

(5)不同喷头压力工况下,随细水雾工作压力增大,热释放率明显下降,喷头压力为3 MPa时乙

醇热释放率峰值比压力为1.5时下降21%。因此,增大细水雾喷头工作压力,可以增大细水雾灭火效果。

参考文献 References

- [1] 王庆娇. 细水雾灭火系统的实验研究[D]. 武汉:武汉大学,2004.
WANG Qingjiao. Experimental study on water mist fire extinguishing system [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [2] NDUBIZU C C, ANANTH R, TATEM P A, et al. Onwatermist fire suppression mechanism sinagaseous diffusion flame[J]. Fire Safety Journal, 1998, 31(3): 253-276.
- [3] 梁清水,梁清泉,徐文毅. 细水雾特性及其灭火机理分析[J]. 消防科学与技术, 2005, 24(4): 447-451.
LIANG Qingshui, LIANG Qingquan, XU Wenyi. Analysis of the characteristics of water mist and its fire extinguishing mechanism [J]. Fire Science and Technology, 2005, 24(4): 447-451.
- [4] 杜文锋,陈洁. 喷头水平偏移对细水雾灭油盘火影响研究[J]. 消防技术与产品信息, 2013(6): 32-34.
DU Wenfeng, CHEN Jie. Study on the influence of horizontal displacement of nozzle on oil mist elimination of fine water mist[J]. Fire Technique and Products Information, 2013(6): 32-34.
- [5] 汪军. 受限空间内高压细水雾灭火机理研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2016.
WANG Jun. Research on the mechanism of high pressure water mist extinguishing in confined space [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [6] 牛国庆. 细水雾抑制室内火灾的理论与试验研究[D]. 南京:中南大学, 2007.
NIU Guoqing. Theoretical and experimental study on suppression of indoor fire by water mist [D]. Nanjing: Central South University, 2007.
- [7] 周华,邓东,杨华勇. 封闭空间中细水雾灭油盆火的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(6): 1029-1035.
ZHOU Hua, DENG Dong, YANG Huayong. Experimental study on oil mist fire extinguishing in closed space[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(6): 1029-1035.
- [8] 苏海林,蔡小舒,许德毓,等. 细水雾灭火机理探讨[J]. 消防科学与技术, 2000(4): 13-15.
SU Hailin, CAI Xiaoshu, XU Dezhen, et al. Discussion on the mechanism of water mist fire extinguishing [J]. Fire Science and Technology, 2000(4): 13-15.
- [9] KIM SC, HONG SR. An experimental and numerical study on fire suppression using a watermist in an enclosure[J]. Building & Environment, 2003, 38(11): 1309-1316.
- [10] 秦俊,姚斌. 细水雾流场雾通量的APV测量研究[J]. 中国科学技术大学学报, 1999(3): 322-325.
QIN Jun, YAO Bin. APV measurement of fog flux in water mist flow field[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1999(3): 322-325.
- [11] 梁天水. 超细水雾灭火有效性的模拟实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2012.
LIANG Tianshui. Simulation experiment on the effectiveness of superfine water mist fire extinguishing [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [12] THORNTON W. The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds[J]. Philosophical Magazine and Journal of Science, 1917, 33(196): 19-23.
- [13] HUGGETT C. Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements[J]. Fire and Materials, 1980, 4(2): 61-65.
- [14] 李桐,高然,李安桂. 通风对受限空间燃油热释放率的影响[J]. 暖通空调, 2015, 45(12): 63-67.
LI Tong, GAO Ran, LI Angui. Effect of ventilation on heat release rate of fuel in confined space [J]. HVAC, 2015, 45(12): 63-67.
- [15] 马鸿雁. 超细水雾作用下乙醇火的抑制特性研究[D]. 郑州:河南理工大学, 2011.
MA Hongyan. Study on the inhibition characteristics of ethanol fire under the action of ultra-fine water mist [D]. Zhengzhou: Henan Polytechnic University, 2011.

(编辑 吴海西)