

细水雾对不同开口受限空间火灾的抑制作用

张培红¹, 韩超¹, 唐兴²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

摘要 目的 研究单、双开口受限空间自然通风条件下, 细水雾抑制酒精池火的机理和有效性. 方法 在 $3.6\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 的实验模型中部设置直径 500 mm 酒精作为火源, 距离火源中心 $1\ 100\text{ mm}$ 的位置布置高压细水雾喷头. 在自然通风工况下, 点火 8 min 后启动细水雾, 改变开口的位置、数量及细水雾施加压力, 对比分析不同开口条件下细水雾灭火的机理和有效性. 结果 对于双开口受限空间 175 kW 酒精池火, 6 MPa 及以下的细水雾可以有效抑制轰燃, 但不能实现灭火; 7 MPa 、 8.37 L/min 细水雾可在 54 s 内有效灭火, 比单开口受限空间灭火时间缩短了 56 s . 结论 细水雾熄灭双开口受限空间酒精火的主导机理是对火焰和热烟气层的冷却作用, 细水雾熄灭单开口受限空间火灾的主导机理是对地面接受到的热辐射的冷却作用.

关键词 细水雾; 受限空间; 轰燃; 抑制作用

中图分类号 X932

文献标志码 A

Suppression Effect of Water Mist on Fire in Confined Spaces with Different Vent Areas

ZHANG Peihong¹, HAN Chao¹, TANG Xing²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Railway Design Group Co. Ltd, Tianjin, China, 300142)

Abstract: A 3.6 m long, 1.5 m wide and 0.6 m high water mist fire suppression test model was set up with the spray nozzle $1\ 100\text{ mm}$ away from the main fuel. In the center of the experimental model, 500 mm diameter alcohol pool is set as the fire source. Under natural ventilation conditions, water mist was started after ignition 8 minutes . By changing location and quantity of the vent openings and water mist spray pressures, water mist fire suppression mechanisms and effectiveness were analyzed. The experimental results show that, for in confined spaces with double openings, water mist with 6 MPa and below the pressure can effectively inhibit the flashover, but cannot achieve 175 kW ethanol pool fire. When the spray pressure was increased to 7 MPa , 8.37 L/min water mist can effectively suppress the 175 kW fire with 54 s , which is about 1 minute earlier than the fire suppression time in the same confined test model with one single opening. The key mechanisms of water mist fire suppression in confined spaces with double openings are the water mist's cooling effect to the flame and the upper hot smoke layer. For the confined spaces with one single

收稿日期: 2016-11-23

基金项目: 国家十二五科技支撑计划项目(2015BAK16B01); 国家自然科学基金项目(51374050)

作者简介: 张培红(1969—), 女, 教授, 博士, 主要从事火灾动力学及防治关键技术研究.

openings, the key mechanisms are the attenuation to the radiant heat flux and the cooling effect to fuel surfaces.

Key words: water mist; confined spaces; the fire flashover; fire suppression effect

细水雾灭火技术具有效率高、耗水量低、环境污染小、净化烟气等优势,近年来,在国内外消防领域得到了广泛的推广和应用^[1-3].然而,受可燃物性质、受限空间结构特点、通风环境复杂多变等诸多因素的影响,目前关于细水雾抑制火灾的机理及有效性存在诸多不同的观点^[4-9]. G. MEENAKSHI^[10-11]等认为细水雾对火源热释放速率的抑制作用非常显著. E. PAOLO^[12]等认为燃料表面冷却是细水雾灭火的主导机理. 李权威等^[13]认为虽然增加细水雾的雾动量可以提高灭火效率,但是强化燃烧的现象也变得越来越明显. 乔林等^[14]发现增加细水雾的压力可以有效降低火焰温度和抑制火势的发展. 李营等^[15]认为当压力增加到一定程度时,随着压力的增高,细水雾灭火效果增加的趋势并不显著. 文献[16-20]利用实验和数值模拟,分析了不同纵向通风速度下细水雾灭火的临界条件. 考虑到工程实际中细水雾喷头不一定正对起火点,笔者选择以距离喷头1 100 mm处主火源为研究对象,点火后8 min启动细水雾,改变细水雾施加压力,分析双开口自然通风条件下受限空间火灾旺盛阶段施加细水雾的灭火机理与有效性,并与单开口条件下的实验结果进行对比,分析通风面积对细水雾灭火机理和有效性的影响.

1 细水雾灭火的理论基础

目前国内外公认的细水雾灭火机理主要表现为火焰冷却、燃料表面冷却、衰减热辐射、窒息作用和动力学作用等^[4-7].

利用双区域模型,假定受限空间顶部的烟气层混合均匀,温度为 T_f ,烟气层下方的壁面温度为 T_w ,建立细水雾作用下的火焰区能量平衡方程:

$$Q_{\text{fire}} = Q_f + Q_w + Q_v + Q_d. \quad (1)$$

式中: Q_{fire} 为火焰区的热增益,kW; Q_f 为加热燃料挥发气体、卷吸的空气的热损失以及烟气向燃料表面的辐射换热损失,kW; Q_w 为火羽流通过热辐射和对流换热传递给受限空间围护结构的换热量,kW; Q_v 是烟气经通风口的换热损失,kW,双开口受限空间 Q_v 与单开口受限空间对比增加显著,是细水雾灭火效率显著提高的主要原因之一; Q_d 为细水雾雾滴显热换热、气化潜热换热量以及烟气和雾滴的辐射热损失,kW.

$$Q_{\text{fire}} = \chi \dot{m}_f \Delta H_c. \quad (2)$$

式中: χ 为燃料燃烧效率; \dot{m}_f 为燃料的质量损失速率,kg/s; ΔH_c 为燃料的热值,kJ/kg.

$$Q_f = \dot{m}_f c_f (T_f - T_{fs}) + h \dot{m}_f c_a (T_f - T_a) + \varepsilon_f C_{fs} A_f (T_f^4 - T_{fs}^4). \quad (3)$$

式中: c_f 、 c_a 分别为燃料挥发气体、空气比热容,kJ/(kg·K),并假定二者都不随温度发生变化; h 为卷吸空气量与质量燃烧速率的比值; T_f 、 T_a 、 T_{fs} 分别为烟气温度、燃料温度和空气温度,K; ε_f 为火焰的辐射率; A_f 为火焰表面积,m²; C_{fs} 为烟气对雾滴的辐射形状因子,W/(m²·K⁴).

$$Q_w = h \dot{m}_f c_f (T_f - T_w) + \varepsilon_f C_{fw} A_f (T_f^4 - T_w^4). \quad (4)$$

式中: T_w 为烟气层下方壁面温度和液滴的温度,K.

$$Q_v = \int_{out} (\rho u_f c_f T_f ds) - \int_{in} (\rho u_0 c_a T_0 ds). \quad (5)$$

式中: u_f 、 u_0 分别为通风口烟气出流和空气入流速度; T_0 为环境的温度; s 为积分变量.

$$Q_d = x m_w [H_w + c_w (T_{wf} - T_w) + c_{wv} (T_f -$$

$T_{\text{wv}})] + \varepsilon_{\text{f}} C_{\text{fs}} A_{\text{f}} (T_{\text{f}}^4 - T_{\text{d}}^4) . \quad (6)$

其中,假定细水雾通过喷射作用进入火焰燃烧区后,有质量为 xm_{w} 的雾滴在火焰热辐射和热对流的作用下被蒸发. c_{w} 、 c_{wv} 分别为水和水蒸气比热容,并假定它们都不随温度发生变化; T_{wf} 、 T_{wv} 为细水雾的蒸发温度和水蒸气的初始温度; T_{d} 为液滴的温度, K; H_{w} 为水的气化潜热, kJ/kg.

2 实验模型搭建

2.1 建立模型

实验模型长宽高为 3.6 m × 1.5 m × 0.6 m,模型的两端底部各有一个开口 A 和 B,长宽均为 1.5 m × 0.2 m. 实验模型中部放置直径为 500 mm 的主油盘 M 内置酒精作为主燃料. 辅油盆 S 直径为 200 mm,内置长宽厚为 140 mm × 130 mm × 3 mm 橡胶作为待引燃燃料,辅油盆和主油盆中心距离为 400 mm(见图 1). 笔者采用流量系数为 $K = 1$

的开式喷头,即 C1、C2,喷头布置在受限空间模型的顶部,距主油盆中心距离 1 100 mm,距辅燃料盘中心 700 mm. 选用 25 根 $\varphi 1$ mm、量程为 $-50 \sim 1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 铠装 K 型热电偶组成 5 个热电偶树,即 1-T、2-T、3-T、4-T、5-T,分别布置在火源中心及两侧,每个热电偶树有五个测点,即 L-1、L-2、L-3、L-4、L-5,进行火焰和火场烟气温度监测,热电偶的短期工作温度为 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$,长期工作温度为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$,误差一般在 0.67% ~ 0.89%. 在辅油盆两侧布置 TS-30 型热流传感器对地板接收到的总辐射热流进行监测,即 R1、R2,TS-30 的灵敏度优于 $2\text{ }\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$,准确度均优于 3%. 在烟气层的上部和下部分别布置一个烟气分析探头 N,利用 VARIO PLUS 增强型烟气分析仪对上部烟气层和火源根部附近氧气浓度进行监测. 热电偶、辐射热流计、烟气分析仪探头的布置见图 1. 水雾的粒径为 $160 \sim 300\text{ }\mu\text{m}$.

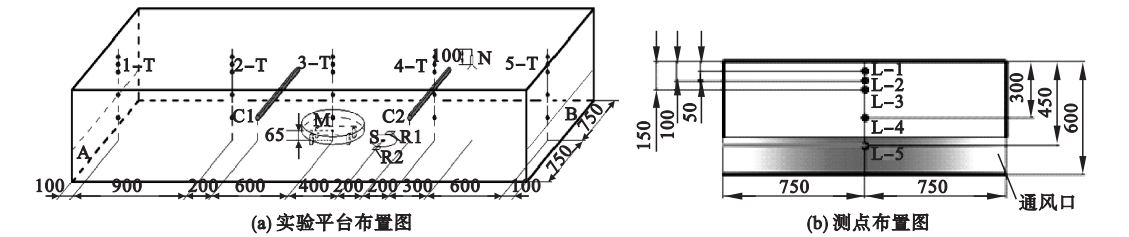


图 1 实验平台测点布置图

Fig. 1 Measuring points of test chamber

2.2 工况设计

在自然通风工况下,点火 8min 后启动细水雾,改变开口的位置、数量及细水雾施加压力,对比分析不同开口条件下细水雾灭火的机理和有效性. 实验工况及酒精池火抑制作用的实验结果如表 1 所示. 表 1 中 A、B 为两个出口的编号,A + B 表示开启了两个出口,A 或 B 表示只开启出口 A 或 B. 笔者以橡胶引燃与否的状态,“是”与“否”,表述细水雾对火灾发展的抑制情况;“否”表示辅油盆中的橡胶未能被主油盆中的酒精火引燃,细水雾有效抑制了火灾轰燃;反之,为“是”.

表 1 细水雾抑制双开口受限空间火灾的实验
工况及结果

Table 1 Water mist fire suppression test cases and results in confined spaces of double vent areas					
工况	开口情况	加雾压力/ MPa	主油盆燃烧 时间/s	橡胶引燃 与否	引燃 时间/s
1	A + B	0	808	是	588
2	A + B	2	1 248	否	—
3	A + B	3	1 211	否	—
4	A + B	4	1 183	否	—
5	A + B	5	1 168	否	—
6	A + B	6	1 219	否	—
7	A + B	7	534	否	—
8	A	0	968	是	680
9	A	7	590	否	—

3 细水雾控制双开口受限空间火灾的有效性分析

利用日本 AND 公司 GX-30K 精密电子天平,对不同开口条件下火源的质量损失速率进行标定.单开口条件下燃烧效率取值 0.765,双开口条件下取燃烧效率为 0.8,根据式(2)得到不同开口条件下火灾的热释放速率(见图 2).

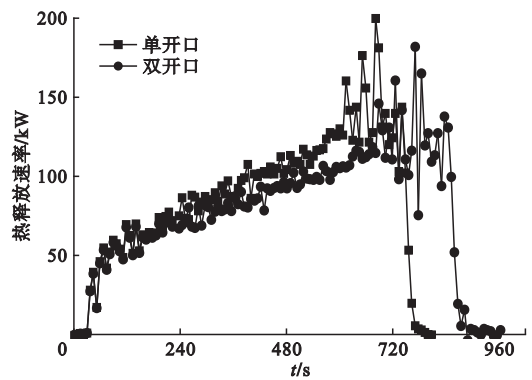


图 2 火源热释放速率

Fig. 2 Heat release rate without water mist

在双开口条件下,火灾初起阶段燃料的质量损失速率和热释放速率变化不大,火灾充分发展阶段,燃料质量损失和热释放速率迅速增加,说明通风条件的开善对火灾的发展起到了促进作用,双开口条件下火灾燃烧持续时间较短,燃烧的更充分.双开口条件下旺盛阶段火源热释放速率可达到 (175 ± 25) kW,高于单开口条件下旺盛阶段火源热释放速率 (150 ± 25) kW.不同开口情况下不同

压力细水雾对 $\varphi 500$ mm 酒精池火抑制作用的实验结果如表 1 所示.由表 1 可以看出,双开口条件下,对于 $K=1$ 的喷头,虽然工况 2~工况 6 可以有效抑制酒精池火引燃橡胶,抑制了轰燃的发生,但与未施加细水雾工况 1 相比,主燃料酒精池火的燃烧时间延长了 40%~50%,说明 6 MPa 及以下压力的细水雾无法实现有效灭火.双开口条件下,当在起火后 8 min 施加 7 MPa,8.37 L/min 细水雾,可以在 54 s 内有效熄灭 175 kW 火灾.对比单开口细水雾灭火实验工况 9 可知,同样的火源热释放速率条件下,虽然两种工况灭火所需的雾通量相同,双开口情况下灭火所需时间提前了 56 s.

4 细水雾控制双开口受限空间火灾的机理分析

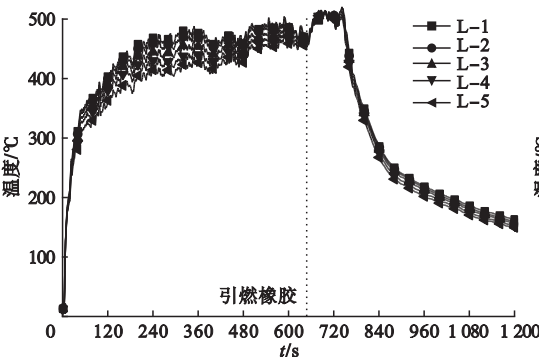
4.1 细水雾对上部热烟气层的冷却作用

双开口受限空间上部烟气层平均温度 T_{ave} 为

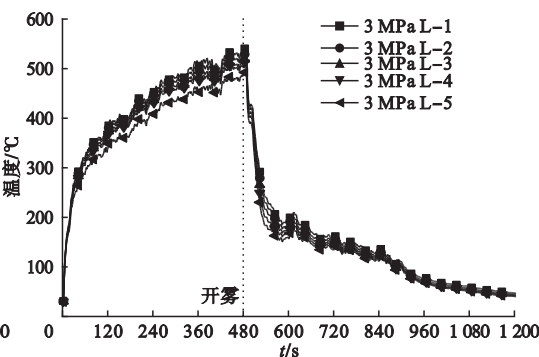
$$T_{ave} = \frac{H_r + H_i}{\sum_{j=1}^L \frac{h_{j+1} - h_j}{T_{j+1} + T_j} \ln\left(\frac{T_{j+1}}{T_j}\right)} \quad (7)$$

式中: H_r 、 H_i 为顶层和底层热电偶的相对高度,m; h_j 为相应的热电偶的高度,m; T_j 为相应的热电偶的温度.

图 3 为不同开口不同压力条件下,各烟气层平均温度以及上部热烟气层平均温度的对比.



(a) 不加细水雾时各层烟气的平均温度



(b) 3 MPa 细水雾作用下各层烟气的平均温度

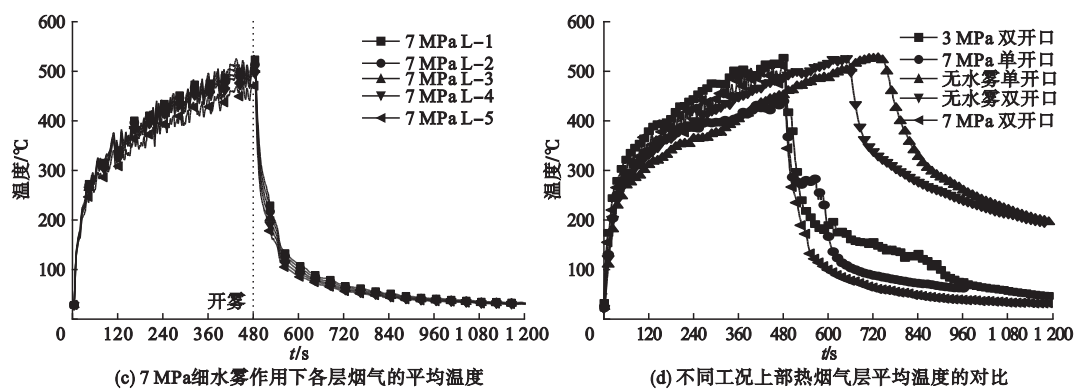


图3 不同工况烟气层温度分布

Fig. 3 Smoke layer temperature profile comparison

从图 3(a)可以看出,未施加细水雾的条件下,双开口受限空间内起火后 $t = 588$ s 时辅燃烧盘内橡胶表面开始燃烧,说明 588 s 时双开口受限空间发生轰燃.轰燃后顶棚下方 50 mm 到 300 mm 内测点 L-1 到 L-4 温度平均值在 (450 ± 50) °C.

从图 3(b) ~ (d) 可看出,在自然通风环境中,随着压力的增大,上部热烟气层平均温度的降温梯度也随之增高.3 MPa 情况下水雾开启 40 s,上部热烟气层平均温度降幅达到 57.2%,温度降低速率达 6.84 °C/s,而后有小幅的回升,其主要原因是由于 3 MPa 细水雾的动量不够,无法克服火羽流的浮力而大多滞留在上部,高温热烟气在模型中部聚集,导致烟气层温度小幅回弹,降温速度变缓.7 MPa 细水雾开启 40 s 后各烟气层温度降幅达到 64.6%,降温梯度达 8.5 °C/s.因此 7 MPa 相对于 3 MPa 对上部热烟气层的冷却效果更明显.从图 3(d) 中单双开口受限空间上部热烟气层平均温度曲线的对比可见,双开口条件下 7 MPa 细水雾对上部热烟气层的冷却作用更显著.

4.2 细水雾对火焰的冷却作用

图 4 为不同压力细水雾作用下单、双开口受限空间火焰平均温度的对比.

8 min 开启 3 MPa 细水雾,施加细水雾 100 s 后,火焰温度由 860 °C 降到 260 °C,此后火焰温度回升,在 330 °C 到 240 °C 内波动.

施加 7 MPa 细水雾 100 s 后,火焰温度降至 134 °C;火焰温度降至 90 °C 两种工况分别用时 440 s 和 170 s.3 MPa 细水雾未能实现有效灭火.压力增加至 7 MPa 后,火焰温度迅速下降,可有效灭火.从图 4 中 7 MPa 细水雾作用下,单、双开口受限空间火焰平均温度的对比可见,双开口受限空间中 7 MPa 细水雾对火焰的冷却作用更加显著和直接,不会出现单开口情况下的火焰温度反弹现象.

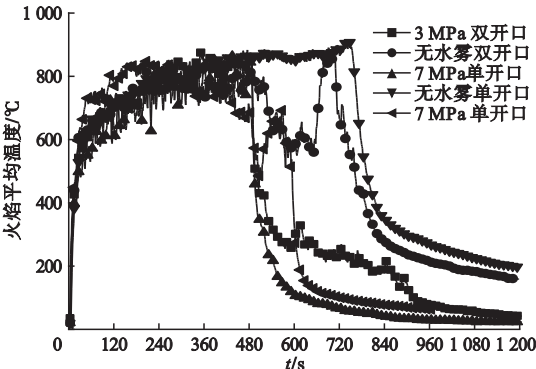


图4 不同细水雾压力下火焰温度分布

Fig. 4 Average temperature of main flame with water mist pressure

4.3 细水雾对热辐射的衰减作用

图 5 为不同压力细水雾作用下,单、双开口受限空间地面接受到的热辐射的对比.由图 5 可知,如果不施加细水雾,自然通风状态下双开口受限空间将于 588 s 发生轰燃,地面所接收的辐射热通量在 11.3 ~ 14.2 kW/m² 内波动,最大可达到 16.8 kW/m²,其平均值低于单开口条件.双

开口条件下,施加 3 MPa 和 7 MPa 细水雾对热辐射的衰减作用相似,开雾 20 s 后即可将地面接收到的热辐射降至 4 kW/m² 附近,之后在 4 ~ 7 kW/m² 小幅波动. 对比可知双开口条件下,增加细水雾施加压力,对地面热辐射的衰减作用不显著.

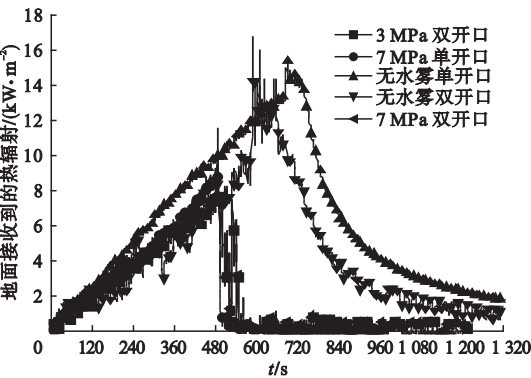


图5 地面所接收的辐射热通量对比

Fig. 5 Radiant heat flux floor to the floor

4.4 细水雾对燃料表面的冷却作用

图 6 为不同压力细水雾作用下,单、双开口受限空间燃料表面附近温度的对比. 由图 6 可知,如果不施加细水雾,自然通风状态下双开口受限空间轰燃发生的时间比单开口受限空间提前了 100 s 左右,其主要原因可以归结为双开口带来的通风效应. 双开口条件下,施加 3 MPa 细水雾造成燃料表面附近温度的小幅提升,这主要是由于 3 MPa 细水雾无法到达燃料表面附近,反而对受限空间流场产生了扰动,导致瞬时的强化燃烧现象. 双

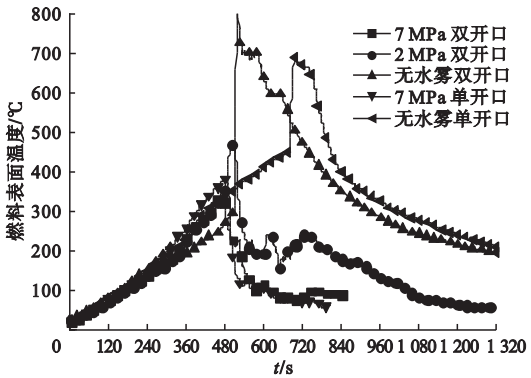


图6 燃料表面附近温度对比

Fig. 6 Temperature profile comparison near the fuel

开口条件下,7 MPa 细水雾对燃料表面的冷却作用不及单开口受限空间显著,也可以归结为双开口受限空间通风效应增加的影响.

4.5 窒息作用

图 7 表示不同开口条件和不同细水雾压力下火源附近空气中氧体积分数情况.

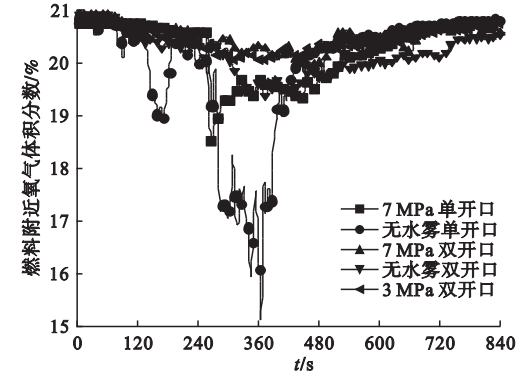


图7 燃料附近氧含量对比

Fig. 7 Comparison of oxygen concentration near the fuel

可见双开口情况下,细水雾对受限空间火灾的窒息作用不显著. 之所以施加细水雾工况的最低氧体积分数稍高,是因为细水雾很好地抑制和控制了火势的发展. 双开口的通风效应明显优于单开口条件.

5 结 论

(1) 双开口条件下,对于 $K = 1$ 的喷头,施加 6 MPa 及以下压力的细水雾,不会引燃作为辅助燃料的橡胶,但主火源酒精燃料的燃烧时间延长了 50% 左右,说明细水雾的施加有效抑制了轰燃的发生,但不能实现有效灭火;7 MPa 细水雾可以在施加细水雾 54 s 后有效实现灭火,与单开口受限空间相比,灭火时间提前了将近 1 min. 细水雾灭火的临界雾流量为 8.37 L/min.

(2) 细水雾熄灭双开口受限空间酒精火的主导机理是对火焰、热烟气层的冷却作用. 细水雾抑制单开口受限空间火灾的机理主要体现在对地面接收到的热辐射的衰减作用以及对燃料表面的冷却作用.

参考文献

- [1] DOUGAL D. An introduction to fire dynamics [M]. 3rd ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2011.
- [2] MAURICE A J. Fire protection systems [M]. New York: Delmar Cengage Learning, 2009.
- [3] MORGAN J H. SFPE Handbook of fire protection engineering [M]. 5th ed. New York: Springer, 2015.
- [4] JENFT A, COLLIN A, BOULET P, et al. Experimental and numerical study of pool fire suppression using water mist [J]. Fire safety journal, 2014, 67: 1–12.
- [5] NI Xiaomin, CHOW W K. Performance evaluation of water mist with bromofluoropropene in suppressing gasoline pool fires [J]. Applied thermal engineering, 2011, 31: 3864–3870.
- [6] YAO B, CONG B H, QIN J, et al. Experimental study of suppressing poly(methyl methacrylate) fires using water mists [J]. Fire safety journal, 2012, 47: 32–39.
- [7] LEONID A D, DEMBELE S, WEN X, et al. A simplified model for the shielding of fire thermal radiation by water mists [J]. International journal of heat and mass transfer, 2016, 96: 199–209.
- [8] PAOLO E S, PAOLO T. Full-scale experiments of fire suppression in high-hazard storages: A temperature-based analysis of water-mist systems [J]. Applied thermal engineering, 2012, 45/46: 99–107.
- [9] LUCA I, DANIELE E, GIOVANNI M, et al. Validation and assessment of a water mist multi-hole nozzle model for fire simulations [J]. Fire technology, 2014, 50: 505–524.
- [10] MEENAKSHI G, RAJORA R, SAHAI S, et al. Experimental evaluation of fire suppression characteristics of twin fluid water mist system [J]. Fire safety journal, 2012, 54: 130–142.
- [11] MEENAKSHI G, PASIA A, RAY A, et al. An experimental study of the effects of water mist characteristics on pool fire suppression [J]. Experimental thermal and fluid science, 2013, 44: 768–778.
- [12] PAOLO E S, BRYSON C J, REN Ning, et al. Suppression effectiveness of water-mist sprays on accelerated wood-crib fires [J]. Fire safety journal, 2014, 70: 98–111.
- [13] 李权威, 秦俊, 唐海东, 等. 细水雾抑制淬火油池火的小尺度实验 [J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(3): 274–280.
(LI Quanwei, QIN Jun, TANG Haidong, et al. Bench-scale experiment on quenching oil pool fire suppression with water mist [J]. Journal of combustion science and technology, 2010, 16(3): 274–280)
- [14] 乔林, 蒋军成, 孙智灏, 等. 压力对细水雾抑制汽油池火影响数值模拟 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 92–96.
(QIAO Lin, JIANG Juncheng, SUN Zhihao, et al. Numerical simulation of water mist pressure effects on pool fire suppression [J]. Journal of Nanjing university of technology (natural science edition), 2014, 36(1): 92–96)
- [15] LI Ying, PU Jinyun, WU Xiangjun. Experimental study on extinguishing effect of water mist in public transit [J]. Fire science and technology, 2014, 33(2): 321–324.
- [16] CHEN Lüyi, ZHU Wei, CAI Xin, et al. Experimental study of water mist fire suppression in tunnels under longitudinal ventilation [J]. Building and environment, 2009, 44: 446–455.
- [17] MAWHINNEY J R, JAVIER T. Testing water mist systems against large fires in Tunnels: Integrating test data with CDF simulations [J]. Fire technology, 2012, 48: 565–594.
- [18] BLANCHARD E, FROMY P, CARLOTTI I, et al. Experimental and numerical study of the interaction between water mist and fire in an intermediate test tunnel [J]. Fire technology, 2014, 50: 565–587.
- [19] ZHANG Peihong, TANG Xing, TIAN Xiangliang, et al. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces [J]. Applied thermal engineering, 2016, 94: 706–714.
- [20] 张培红, 李楠, 张新春, 等. 公路隧道排烟耦合细水雾灭火研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(1): 100–105.
(ZHANG Peihong, LI Nan, ZHANG Xinchun, et al. Study on fire suppression effects by coupling water mist with smoke exhaust in a highway tunnel [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2011, 27(1): 100–105.