

细水雾熄灭障碍物火的实验研究和数值模拟

余明高, 郭 明, 李振峰, 裴 蓓

(河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南焦作 454003)

摘要:为了研究细水雾灭火系统在网状和条状障碍物阻隔条件下的灭火效果, 采用全尺寸试验研究和数值模拟的方法研究了障碍物的形状、位置、遮挡面积以及细水雾工作压力对灭火效果的影响。实验结果表明:提高压力有助于快速有效地熄灭障碍物火;障碍物的位置是影响灭火效果的重要因素, 近距离的覆盖使细水雾难以进入火区, 障碍物下出现局部高温区, 余火难以扑灭, 灭火时间至少需要56 s;而障碍物距离火源较远时, 卷吸作用下细水雾仍能均匀的进入火区, 发挥冷却作用, 灭火时间在18 s以内;网状障碍物的遮挡面积, 对灭火效果影响不大;相同遮挡面积条件下, 条状障碍物火比较难熄灭。

关键词: 细水雾;障碍物;灭火效果;数值模拟

中图分类号: X932 **文献标识码:** A

0 引言

细水雾灭火技术以其无环境污染(不会损耗臭氧层或产生温室效应)、灭火迅速、耗水量低、对防护对象破坏小等特点,在喷水灭火系统中占有重要的地位,已被看做是卤代烷系列灭火剂的主要替代品^[1]。各国学者对其展开了广泛的研究,认为细水雾的灭火机理包括冷却(气相冷却与燃料冷却)、氧气置换、辐射削弱等。由于细水雾粒径小(通常在200 μm 左右),容易受到风流、障碍物等影响,使雾场偏移,难以直接作用于火源,影响细水雾系统灭火效果。当火源位于细水雾的作用范围内时,灭火时间较短,灭火性能较高;当火源位于细水雾的防护区域外时,灭火有效性显著降低^[2]。在火灾环境中,障碍物的遮挡使灭火变得更加困难,实验

证明障碍物的存在对预混火焰或者非预混火焰都有稳定作用。崔正心等人在风洞环境下研究水平凸台对细水雾灭火的影响,认为细水雾的表面冷却作用不能有效发挥^[3]。刘昶亚、房玉东等人研究了方形挡板在不同位置对细水雾灭火的影响,认为竖直障碍物影响火焰对细水雾的卷吸^[4,5]。

以上障碍物只是局部或全部阻挡细水雾,关于细水雾穿透网状和栅形障碍物的灭火的研究还鲜有报道。铁网和条形铁栅常作为防护罩使用,广泛安装在石油化工、电力机房等环境中。L. S. Hung等人研究了单个水滴与铁丝的碰撞过程,发现碰撞后较细的水滴将破碎成更小的水滴,较大的会暂时悬挂在铁丝上^[6]。在燃烧过程中,当存在障碍物时会在障碍物后形成回流区。回流区内流动速度较低,热量能

收稿日期:2008-05-08;修改日期:2008-06-16

基金项目:国家自然科学基金(50476033)、河南省高校新世纪优秀人才支持计划项目(2005HANCET-05)、河南理工大学研究生学位论文创新基金(644001)

作者简介:余明高(1963),男,四川泸州人,博士,教授。中国煤炭工业劳保学会火灾防治专业委员会及矿井通风专业委员会委员,河南省煤矿瓦斯与火灾防治重点实验室常务副主任,从事火灾防治理论与技术等方面的教学与科研工作。

够不断地循环送入火焰稳定区,并且在回流区内,燃料、氧化剂和燃烧产物的混合加强。由于以上诸多因素的影响,障碍物后的火焰燃烧非常稳定^[3]。研究细水雾穿透此类障碍物的灭火效果有助于深入理解细水雾的灭火机理,探讨细水雾在复杂环境下的应用。

1 实验装置及实验条件

实验是在 $2.5\text{m} \times 2.5\text{m} \times 3\text{m}$ 的标准受限空间内进行的,由钢化玻璃围成,受限空间顶部开有一个机械排烟窗口。采用丝径、孔宽不同的两张不锈钢方孔网和若干条形铁片做为障碍物。2号孔网(直径 0.8mm)的密度大于1号孔网(直径 1.2mm),对油面的遮挡率将近是1号孔网的2倍。1根宽度为 30mm 的条形铁片的遮挡率与1号孔网相近。实验时障碍物覆盖于油盆正上方,距离油面高度分别为 50mm 、 300mm 和 600mm ,分别在这3个位置进行实验,如图1所示。实验燃料盘放在受限空间地板的中心,燃料盘的直径为 300mm ,边缘高度约 60mm ,煤油作为燃料。细水雾喷头安装于

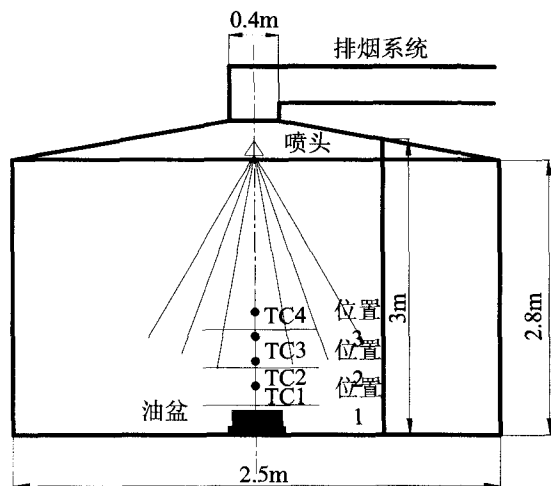


图1 受限空间示意图

Fig.1 Side view of standard confined compartment

距地板中心高 2.8m 处。喷头为压力型,工作压力在 $0-2\text{Mpa}$,实验时使用 1.8MPa 和 1.2MPa 。雾场参数采用 LS-2000 分体式激光粒度分析仪测量,两种压力下的粒径分别为 $176\mu\text{m}$ 和 $194\mu\text{m}$ 。燃料盘正上方沿中心线布置4个K型铠装热电偶,分别以 TC1, TC2, TC3 和 TC4 表示,与油面的距离分别为 100mm 、

250mm 、 400mm 和 550mm ,由数据采集卡每秒种采集1次数据并自动存入计算机。

实验工况列于表1,每次工况进行3次,实验取平均测量结果,室温 10°C 。实验开始时,使用闪点低的酒精使煤油着火,每次向油盆注入 500ml 的煤油。自由燃烧下让煤油达到稳定燃烧阶段,当热电偶的温度达到 600°C 时,开始施加细水雾。当火焰熄灭后,关闭供水阀,打开排烟通道,恢复初始实验条件,进行下一次实验。在实验中如果灭火时间超过 120s ,记录为灭火失败。最后对采集到的实验数据进行处理分析。

表1 实验工况

Table 1 The summary of test programs

工况	障碍物类型	遮挡率	障碍物位置
1			1
2	孔网 1	13%	2
3			3
4			1
5	孔网 2	21%	2
6			3
7			1
8	条形铁片	12.7%	2
9			3

2 实验结果与分析

2.1 障碍物在不同压力下细水雾

灭火有效性评价

在压力为 1.2Mpa 的9种工况下,细水雾只能抑制火焰的燃烧,火焰很难被扑灭。施加细水雾后火焰高度有不同程度的降低:当网状障碍物位于1号位置时,火焰由 0.8m 下降到 0.2m ;在2号和3号位置时,火焰高度下降到网面以下。对比此压力下无障碍物时,细水雾在 16s 内扑灭火焰。灭火失败的主要原因是:一方面障碍物阻挡了一部分细水雾达到火焰区域,削弱了细水雾对燃料表面的冷却作用,另一方面 1.2Mpa 的工作压力下细水雾的流量只有 2.27L/min ,雾通量和动量也较小,对障碍物的穿透力也不足。

增大压力到 1.8Mpa (流量 2.894L/min) 时,细水雾在9种工况下均能扑灭火焰,灭火时间如图2所示。可见提高压力对熄灭障碍物火

有明显的效果。随着细水雾的连续施加,火焰的紊流程度进一步增强;同时,细水雾不断吸热汽化,高温区域逐步缩小,直至火焰完全熄灭^[7]。

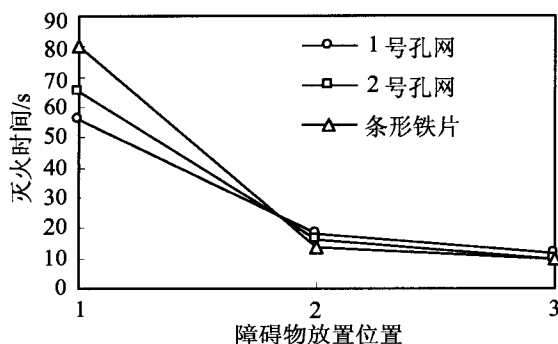
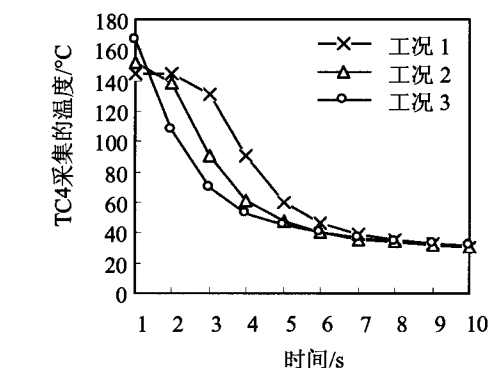


图2 1.8Mp 压力下各工况的灭火时间
Fig. 2 Extinguishment time of each program on the 1.8Mp water pressure



灭火时间越长,可见障碍物的位置对细水雾灭火的效果有较强的影响。以下以 1 号孔网为例。图 3 是 1 号孔网(工况 1,2,3)分别放置在 3 个高度时,施加细水雾后,4 个热电偶测得的温度曲线,从释放细水雾开始计时。从 TC4 和 TC3 测得的温度可以看到,5s 内温度均下降到 100 °C 以下,这说明细水雾有效地抑制了火羽流,这与实验中观察到火焰高度明显降低是一致的。工况 1 的降温速度慢于工况 2 和 3,主要因为工况 1 中铁网位置低,一直处在火焰包围中,有稳定燃烧的作用。工况 2 和 3 中,铁网位置高,细水雾初期的抑制作用已经将火焰压低到网面以下。

此后在细水雾的持续作用下,火焰高度继续降低,TC2 的数据显示 10s 时温度降到

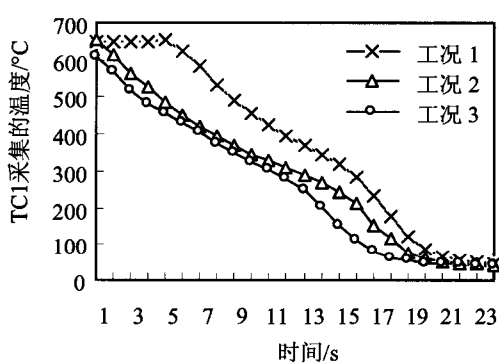
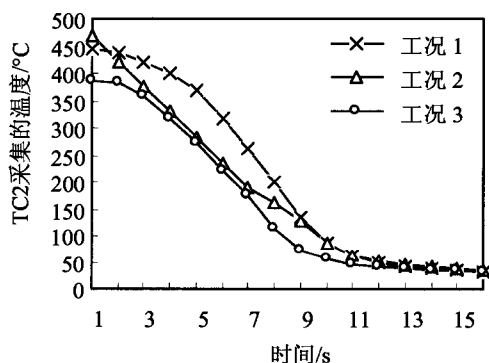
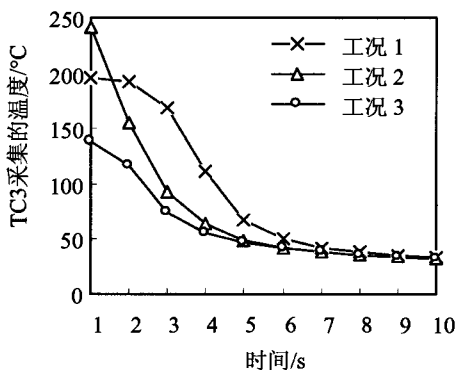


图3 工况 1,2,3 火焰温度变化曲线

Fig. 3 Flame temperature curve of program 1,2,3

2.2 障碍物在不同高度时细水雾灭火有效性评价

将障碍物分别放置在 3 个位置,考察障碍物在不同高度时细水雾灭火的有效性。在 2 号和 3 号位置(距油面 300mm 和 600mm)灭火时间在 18 s 以内,而在 1 号位置(距油面 50mm)时,灭火时间均在 50 s 以上,障碍物位置越低

100 °C 以下,此时可以观察到火焰紧贴油盆表面燃烧,且工况 2 和 3 中火焰晃动加剧。工况 2 和 3 分别在细水雾释放后 18s 和 12s 火焰熄灭。从 TC1 的数据可以看到工况 1 的降温仍然慢于其他工况,此时虽然细水雾完全压制住火焰,但余火很难灭掉,直到 56s 火焰才完全熄灭。这主要因为灭火后期,工况 1 中的铁网在

火焰包裹中,障碍物对细水雾的阻挡使得冷却作用难以充分发挥,障碍物下的局部温度较高,可燃蒸汽持续产生,余火难以熄灭。障碍物在火源上方近距离覆盖,不利于细水雾灭火作用的发挥。障碍物距离火源较远时,细水雾穿透障碍物后,在火焰的卷吸作用下,仍能较均匀的进入火焰区,发挥全面的冷却效果,因此灭火也较为迅速。

2.3 障碍物在遮挡面积不同时细水雾灭火有效性评价

在1号位置分别放置3种不同的障碍物,考察障碍物在遮挡面积不同时细水雾灭火有效性。2号孔网的密度和遮挡面积大于1号孔网,因此穿过孔网进入火焰区的雾通量必然不同,但在实验中降温曲线接近,灭火时间少于1号孔网,因此雾通量并不是灭火效能的关键因素,近距离的覆盖影响障碍物下方油温冷却,后期细水雾持续的施放对火源区域和油温的冷却使得火焰最终熄灭。

1号孔网的遮挡面积与1根条形铁片相近,但条形障碍物的灭火时间要长于网状障碍物,降温曲线也高于网状障碍物,如图4所示。在工况7的实验中,细水雾的持续作用下,有效抑制住火焰,火焰只能存在于铁片下方,虽然热电偶的温度都在 50°C 以下,但直到80s时余火才最终熄灭。主要由于条状障碍物遮挡面积比网状障碍物集中,细水雾难以作用到障碍物下方,出现面积较大的高温区。当在1号位置放置2块条形障碍物时,细水雾就难以扑灭火焰。过多的遮挡削弱了细水雾进入火区的数量,无法抑制熄灭火焰。

3 数值模拟

为了进一步验证并深入研究障碍物位置对细水雾灭火效果的影响,利用FDS 5.0对条形障碍物在1号位置时的实验过程进行数值模拟,研究障碍物下方可燃气体的温度和速度变化。采用混合分数模型来模拟燃烧过程,水雾液滴与火焰之间相互作用采用欧拉-拉格朗日模型^[8]。一般说来,网格数量越大,模拟结果越准确^[9],网格划分选择 $84 \times 84 \times 84$,能保证模拟结果具有足够的精度。

图5为40s时受限空间内的局部切面图,

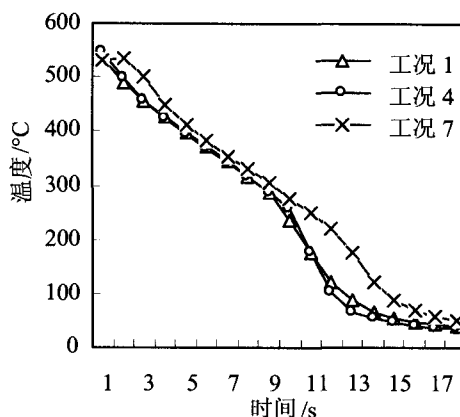


图4 TC1测得的火焰温度变化曲线

Fig.4 Flame temperature curve of TC1

切面位置在中心线上,分别表现了条状障碍物下方温度场和速度矢量场(条状障碍物的横截

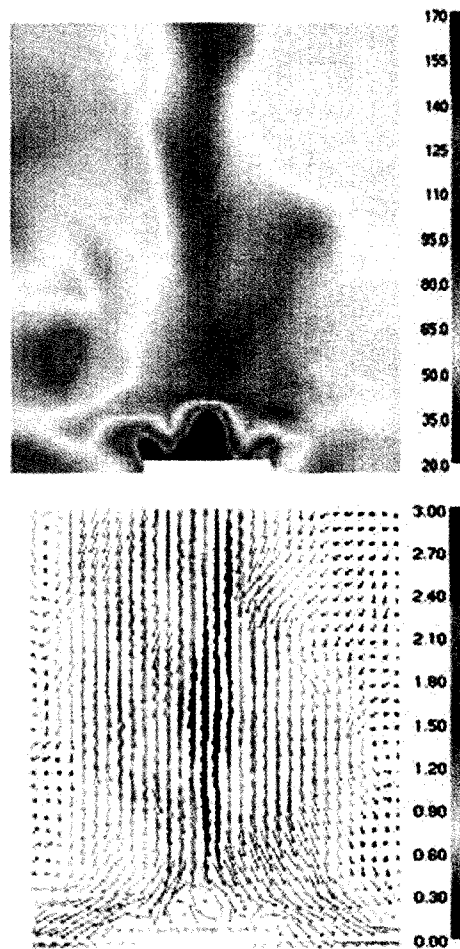


图5 26s时条状障碍物下方温度场和速度矢量场

Fig.5 The temporal contour plots of temperature and vector plots of velocity under the strip obstacle at 26 s (面图)。可以看到铁片下方的局部温度明显高于周围的温度,表明此处仍然有火焰存在,这是

余火形成的原因。在细水雾的冲击带动下,空气竖直向下运动,稀释了可燃气体,冷却可燃物,但由于障碍物的阻挡,使障碍物下方的可燃气体难以有效稀释,冷却作用难以充分发挥。从速度矢量图可以看到铁片下方仍有气体做上升运动,表明可燃蒸汽在此汇集,维持了油火燃烧。在数值模拟中提高铁片的高度如工况 9,重新运算的结果显示了细水雾穿过障碍物后,在火焰的卷吸下补充到障碍物下方,较均匀地冷却火焰。

4 结论

本文研究了细水雾灭火系统在网状和条状障碍物阻隔条件下的灭火效果,考虑到障碍物的形状,位置,遮挡面积以及细水雾工作压力对灭火效果的影响,研究表明:

1) 对于障碍物火,提高压力可以有效熄灭火焰,1.8 MPa 压力下细水雾灭火时间均在 80s

以内,低压不利于灭火。障碍物的存在对灭火效果有较大影响。

2) 障碍物的位置是影响灭火效果的重要因素,在火源上方 300mm 和 600mm 处,灭火时间在 18 s 以内,细水雾穿过障碍物后,由于卷吸作用仍然可以进入障碍物下方的火区,发挥冷却作用,灭火效果较好。而在火源上方 50mm 处,灭火时间在 56s 以上,近距离覆盖使得细水雾难以进入障碍物下方的火焰区,灭火时间较长。在安装细水雾系统时,应考虑到障碍物对易燃物近距离覆盖的影响。

3) 遮挡面积不同的网状障碍物,对灭火效果影响不大;相同遮挡面积条件下,条状障碍物火比较难熄灭。近距离遮挡的障碍物对火焰燃烧有稳定作用,对细水雾的阻挡使得在障碍物下出现局部高温区,条状障碍物的高温区面积较大,灭火难度增加。

参考文献

- [1] 刘江虹, 廖光焯, 范维澄, 等. 细水雾灭火技术及其应用[J]. 火灾科学, 2001, 10(1): 34 ~ 38.
- [2] 余明高, 李喜玲, 马科世, 等. 含添加剂细水雾熄灭油池火的机理及实验[J]. 河南理工大学学报(自然科学版)[J]. 2006, 25(6): 433 ~ 437.
- [3] 崔正心, 廖光焯. 细水雾抑制障碍物稳定火焰的试验研究[J]. 火灾科学, 2001, 10(3): 174 ~ 177.
- [4] 刘晔亚, 陆守香. 细水雾对障碍物挡板火灭火有效性的实验研究[J]. 中国工程科学. 2006, 8(5): 88 ~ 93.
- [5] 房玉东, 刘江虹. 细水雾抑制熄灭障碍物油池火的有效性研究[J]. 中国工程科学. 2006. 8(2). 75 ~ 79.
- [6] L. S. Hung, S. C. Yao. Experimental investigation of the impaction of water droplets on cylindrical objects [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25: 1545 ~ 1559.
- [7] 牛国庆, 余明高, 徐志胜, 等. 细水雾作用下受限空间油池火焰温度分布实验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版). 2007, 26(1): 6 ~ 10.
- [8] K. B. McGrattan, H. R. Baum, R. G. Rehm. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide [M]. NIST Special Publication 1019 ~ 5, 2007.
- [9] 郑立刚, 余明高, 贾海林. 标准受限空间内细水雾熄灭煤油火的实验和数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 81 ~ 85.

Experimental and Numerical Study on Fire Extinguishment Efficiency of Water Mist with Obstruction

YU Ming-gao, GUO Ming, LI Zhen-feng, PEI Bei

(School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan, 454003, China)

Abstract: The full scale tests and numerical simulations were carried out to investigate the validity of the obstacle fires extinguishment by water mist on the conditions of reticulation and strip obstacles. Shape, location, and shielding area of the obstacles and water pressure were considered as the main influencing factors on the extinguishment effect. The results show that increase of the pressure is helpful to improve the validity. Location of the obstacle is the crucial influencing factor. It is difficult to get into the flame for mist because of near coverage, and a partial high temperature zone occurs under the obstacle, so the remaining fire is hard to be put out. The extinguishment time is 56 s at least. With far coverage, water mist scatters equally over the flame relatively by entrainment. The cooling effect from mist is obvious; the extinguishment times are within 18s. There is little effect with different shielding area of the reticulation obstacles on the extinguishment. With the same shielding area, fires with strip obstacles are difficult to be extinguished.

Key words: Water mist; Obstruction; Extinguishment efficiency; Numerical simulation