

研究报告

细水雾对障碍物挡板火灭火有效性的实验研究

刘晔亚, 陆守香, 黄 玥, 陈国庆

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 在不同障碍物挡板阻隔条件下, 就细水雾对油池火的灭火效果进行了实验研究, 分析了不同空间位置的障碍物挡板对细水雾灭火效果的影响, 采用 FDS4.0 对细水雾与不同类型障碍物挡板油池火的相互作用过程的模拟结果表明: 障碍物结构与类型影响着细水雾直接作用于油池火上方的水雾通量, 油池火上方的水雾卷吸量越大, 细水雾对障碍火的灭火效果越明显。

[关键词] 细水雾; 障碍挡板; 灭火效果; 卷吸

[中图分类号] X932 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)05-0088-06

1 前言

细水雾灭火系统因其低成本、高效、无污染、对环境破坏小等特点, 近年来在哈龙替代灭火系统的研究中日益得到人们的重视, 有关船舶舱室细水雾灭火系统的应用研究近年来越来越多得到人们的关注^[1-5]。大量研究应用表明, 细水雾灭火效果由船舶舱室开口状况、火源类型、火源尺度以及火源在舱室空间位置、喷雾特性与水雾分布等因素所决定^[6]。对于不同类型火源, 在一定水雾特性条件下, 细水雾不但不能抑制火势的发展, 反而会使火焰加速膨胀, 尤其对于有障碍物阻隔条件下的油池火, 细水雾的灭火效果将会受到很大程度的影响^[7,8]。障碍物挡板的存在阻碍了直接作用于火源上方的水雾量, 使得细水雾灭火性能受到很大程度的限制。关于障碍物对细水雾灭火效果的影响, 也开展了一些相应的研究, 如 J. R. Mawhinney 通过实验研究了双流体细水雾喷头与液体油池火的相互作用, 实验结果表明细水雾从上方直接喷射于火焰面上, 其灭火效果更明显, 细水雾与火焰之间的障碍物会降低细水雾的灭火效果^[8]。Marttila 等人研

究了 2 个细水雾喷头正下方具有水平障碍物阻隔条件下的细水雾对油池火的灭火效果。实验结果表明当水雾不能直接作用于障碍火时, 细水雾灭火主要是由大量水雾颗粒蒸发使得火焰隔氧窒息作用的结果^[9]。崔正心等人则通过模型实验就水平喷射的细水雾对障碍物后部稳定火焰的影响进行了研究, 认为由于障碍物的阻隔使得细水雾冷却降温的作用减弱, 降低了细水雾灭火效果^[10]。

从文献上看, 有关不同障碍物类型对细水雾灭火效果的影响, 以及细水雾针对障碍火的灭火机理方面的研究少有报道。开展细水雾对障碍物挡板火的灭火效果的实验研究, 分析障碍物挡板对细水雾灭火的影响因素, 研究针对不同类型障碍火的细水雾设置原则方法, 可为细水雾在复杂环境条件下的应用提供理论支持。作者依据 IMO (International Maritime Organization) MSC668 “A 类船舶机舱和货舱涡轮机舱水基灭火系统评价的实验方法”的过渡性规范文件, 参照其中关于发动机模型阻隔 B 类油池火中水雾灭火有效性的试验方法设置^[11], 设计了不同遮挡方式的障碍挡板火实验装置, 对细水雾灭火系统的灭火有效性进行实验研究。

[收稿日期] 2005-03-14

[基金项目] 中国科学技术大学“十五”“221”资助项目

[作者简介] 刘晔亚 (1976-), 男, 河南平顶山市人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

2 实验装置

作者采用长 8.1 m，宽 5.4 m，高 4.7 m 的实验舱，门宽 1.5 m，高 1.9 m，可以根据需要启闭。舱室配有专门的进风口和排烟口，进风口用于在关闭舱门状态下向实验舱内补充空气，排烟口用于在预燃期内及时抽排舱室内的大量烟气，以使火源在充足的空气环境中预燃并达到稳定燃烧。所设计障碍火的水平挡板宽 0.4 m，长 1.0 m，垂直挡板高和宽均为 1.0 m，油池位于水平挡板下方。水平挡板根据需要可以水平移动，便于研究不同水平遮挡面积对细水雾抑制油池火的影响，作者实验主要研究的 4 种障碍物挡板结构如图 1 所示。

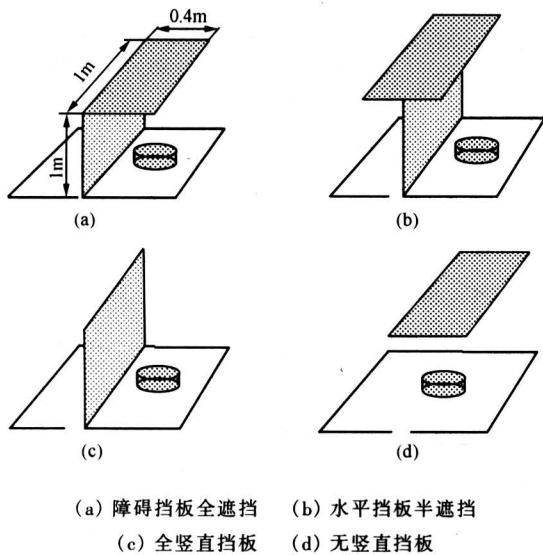


图 1 不同障碍挡板火模型示意图

Fig.1 Sketch of different obstacle

细水雾生成系统主要由水雾喷头管网、泵压系统、控制系统组成。水雾系统采用四喷头组正方形管网结构安装，相邻喷头间距为 1.0 m，障碍火位于水雾管网中心正下方，火源距地面高度为 0.8 m，喷头距火源中心点垂直高度变化范围为 3.0 m 至 1.5 m。试验所用喷头选择目前在美国海军舰船机舱中使用的雾滴直径分布在 25 μm 到 350 μm 的船用商业化细水雾 (water fog) 喷头，编号分别为 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 ，水雾喷头特性参数如表 1 所示。

在 1 MPa 和 3 MPa 喷雾工作压力条件下，所选用水雾喷头的雾滴直径分布如图 2 所示。

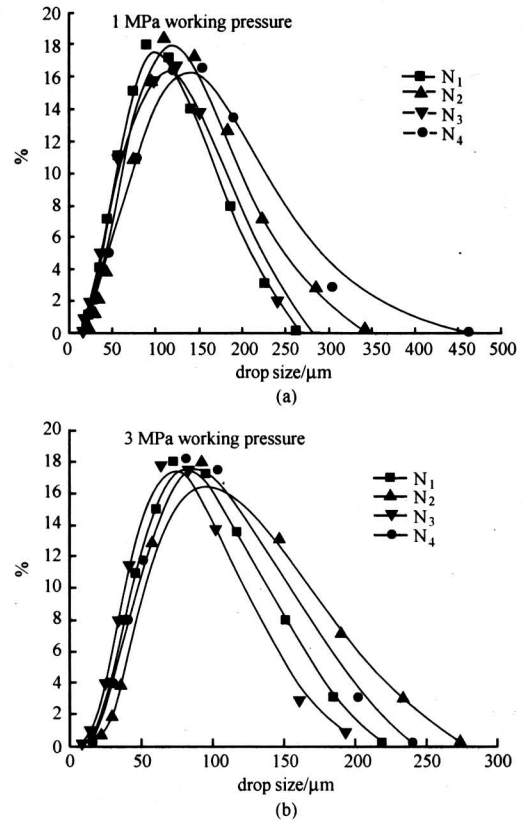
从图中可以看出随着喷雾压力的增大，喷头雾滴直径不断减小。其中 N_3 喷头雾滴直径在分布范

表 1 水雾喷头流量表

Table 1 Flux of the water mist nozzles

喷头 编号	$D_{0.99}$ / μm	雾锥角 / $^\circ$	K 系数	喷雾工作压力与流量 $V/L \cdot \text{min}^{-1}$			
				1 MPa	3 MPa	5 MPa	7 MPa
N_1	130	90	3.19	10.1	17.47	22.56	26.69
N_2	160	90	5.93	18.7	32.48	41.93	49.61
N_3	110	120	3.19	10.1	17.47	22.56	26.69
N_4	140	120	5.93	18.7	32.48	41.93	49.61

* 试验系统工作压力为 3 MPa。



(a) 1MPa 喷雾工作压力; (b) 3MPa 喷雾工作压力

图 2 各细水雾喷头 1 MPa 与 3 MPa 工作压力条件下雾特性曲线

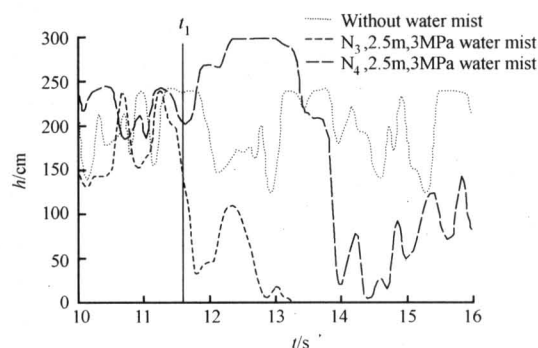
Fig.2 Characteristic size curves of the water mist nozzles on the 1 MPa and 3 MPa working pressure

围内是最小的，3 MPa 喷雾压力条件下雾滴直径 $D_{0.99}$ 分布在 75 μm 与 100 μm 之间；所选用的 4 种喷头随着喷雾雾锥角的增大，喷头雾滴直径相应都在减小，但在 1 MPa 较低压力条件下 120° 雾锥角喷头的大颗粒雾滴相应有所增大。其中 N_4 在 1 MPa 喷雾压力条件下，液滴直径在 250 μm 至 400 μm 的雾滴分布明显增加，液滴直径 400 μm 的液滴达到 1%

以上, 而 N_3 喷头最大液滴直径不超过 $300 \mu\text{m}$ 。

3 实验过程与现象

首先在无阻碍挡板条件下, 就细水雾对 B 类油池火的灭火过程进行实验研究。油池火油盘直径 300 mm , 深 100 mm , 壁厚 3 mm 。油池火燃料为 600 mL 工业正庚烷, 燃料层底部为 600 mL 的清水层, 油池火预燃 60 s , 预燃期间保持通风与排烟, 预燃结束 15 s 后开始水喷雾灭火试验。图 3 所示为无阻碍挡板条件下, N_3 、 N_4 喷头在 2.5 m 高, 3 MPa 喷雾压力下油池火火焰高度变化曲线。



t_1 时刻水雾开始喷放

图 3 无阻碍挡板条件下油池火火焰高度变化曲线

Fig.3 Pool fire flame height curve without obstacle

从图中可以看出, 无水雾作用时油池火火焰高度有规律地振荡变化, 火焰高度范围为 $1.3 \sim 2.5 \text{ m}$ 。在 N_4 喷头喷雾作用下, 油池火火焰瞬时膨胀, 火焰高度增大, 随后火焰高度迅速下降, 随着水雾的不断作用, 火焰逐渐被抑制; 在 N_3 喷头喷雾作用下, 火焰高度迅速下降, 火焰很快被熄灭。从实验中可以观察到: 在无阻碍挡板条件下, 当雾滴颗粒较小的细水雾 ($75 \sim 100 \mu\text{m}$) 作用于池火时, 水雾蒸发迅速, 火焰能很快被抑制; 当较大水雾液滴颗粒作用时 (大于 $300 \mu\text{m}$, 如 N_2 喷头初始喷雾压力较小时, 在喷雾范围的边缘部分), 火焰瞬时会产生跳动拉伸和撕裂的现象, 随着水雾量的不断增大, 油池火火焰逐渐被抑制, 直至熄灭; 当作用于火焰表面的水雾通量不足时, 池火火焰燃烧加速, 火焰膨胀增大, 火焰撕裂现象增强。

当在油池火上方设置障碍物挡板时, 实验步骤与前述油池火实验相同, 然而水雾作用所产生的现象却有些差异。图 4 所示为 N_4 喷头在高度 2.5 m , 间距 1.0 m 条件下, 熄灭带有竖直挡板, 水平挡板

半遮挡的障碍火的序列图片。从图中可以看出, 当水雾作用于障碍物上表面时, 间接作用于油池火表面的水雾液滴使得火焰燃烧膨胀, 在障碍物下方形成一个巨大的火球, 随着水雾的不断作用, 火焰四周水雾通量充足, 弥散的水雾液滴笼罩着整个障碍物与油池火表面, 随着大量蒸发的水蒸气和卷吸的水雾液滴完全覆盖障碍挡板下的油池火后, 火焰会逐渐脱离油池液面, 直至被完全熄灭。

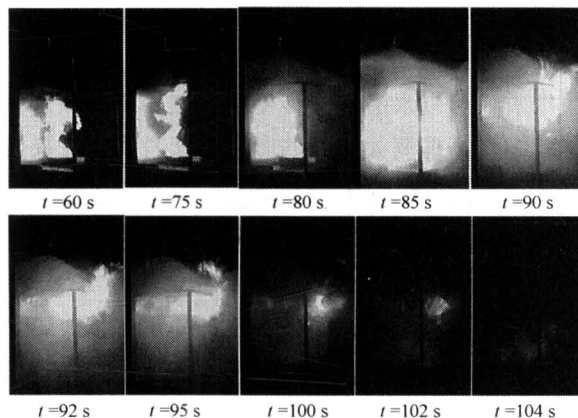


图 4 N_4 喷头细水雾熄灭障碍火图片

Fig.4 Pictures of obstacle fire extinguishments by water mist of nozzles N_4

根据实验所选用的障碍挡板类型及水雾喷头与障碍挡板的相对位置变化工况, 细水雾与障碍物油池火相互作用过程具有以下几种模式:

1) 瞬时熄灭模式 在障碍水平挡板下方, 当直接作用于火源上方的喷雾雾通量足够时, 障碍挡板下方油池火瞬时被熄灭。

2) 焰膨胀—加速燃烧模式 当直接作用于池火的水雾通量较小时, 少量水雾液滴通过弥散与空气夹带而作用于油池火, 使得火焰产生膨胀燃烧现象, 当夹带的水雾量较少时, 火焰不能被熄灭, 燃烧反而不断加速。

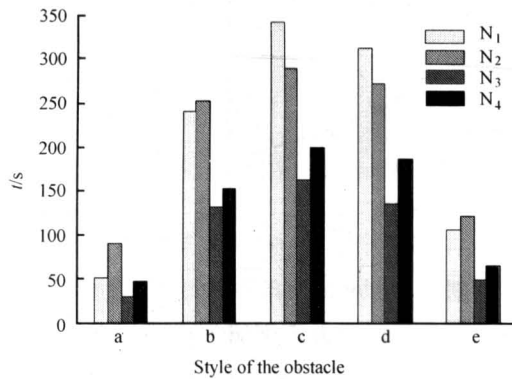
3) 焰瞬时膨胀—抑制增长模式 当遮挡火源的挡板面积减小时, 如图 1 (b) 水平挡板半遮挡型障碍火, 随着直接作用于火源的水雾量的增大, 火焰进入抑制增长模式。此时由于障碍物侧壁挡板的存在, 空气卷吸、夹带的水雾使得火焰偏向竖直挡板一侧, 火焰始终处于抑制增长的模式而不易熄灭, 直至油池燃料燃尽为止。

4) 火焰膨胀—火焰卷吸熄灭模式 随着水平挡板两侧空气卷吸水雾量的增大, 从侧壁直接作用

于火焰的雾通量加大，由于水雾的蒸发与吸热降温作用，火焰最终脱离油池液面而熄灭。

4 结果分析与讨论

对于局部细水雾灭火系统，对障碍挡板油池火的灭火效果不仅与水雾喷头的喷雾特性有关，而且水雾喷头与障碍挡板的相对位置、喷雾作用所覆盖的面积、障碍物挡板对火焰遮挡面积和遮挡方式也有很大的影响。图 5 为各喷头在距地面 2.5 m 高，3 MPa 喷雾工作压力条件下，不同障碍物挡板油池火的平均灭火时间图。从图中可以看出在无障碍挡板时，N₃ 喷头的灭火时间最短，其次为 N₄，N₁ 和 N₂ 喷头。当存在障碍物挡板时，细水雾对油池火的灭火性能受到限制，水雾灭火时间较无障碍物时均大幅延长，但其中具有较大雾锥角和较小液滴直径分布的 N₃ 喷头灭火效果要明显优于其他 3 种喷头。在 4 种不同类型的障碍物中，油池火侧壁垂直挡板障碍物的存在对细水雾灭火效果影响最为显著，从图中可以看出水平障碍挡板面积的变化对水雾灭火效果影响并不明显，但当垂直挡板去除之后，同样条件的细水雾却能在较短时间内抑制并熄灭油池火。



(a) 无障碍挡板; (b) 全竖直挡板; (c) 障碍挡板全遮挡; (d) 水平挡板半遮挡; (e) 无竖直挡板

图 5 各喷头 2.5 m 高度，3 MPa 喷雾压力条件下不同障碍物挡板火灭火时间图

Fig.5 Block diagram of obstacle fire extinguishments time under condition of nozzles 2.5 m height, 3 MPa working pressure

障碍挡板全遮挡时，水雾喷头高度对细水雾的灭火效果有明显的影 响。如图 6 所示，当水雾喷头距地面高度 2 m 时，大量水雾能从水平障碍挡板下

方直接作用于油池火，使得火焰迅速得到抑制以至熄灭，此时灭火成功概率也较高；当喷头距地面高度 2.5 m 以上时，水雾由于水平挡板而不能直接作用于火焰，水雾灭火时间延长，灭火成功概率较低。当大量水雾液滴不能直接作用于油池火火焰面时，随着舱室内上升热气流的不 断扰动，池火四周夹杂大量水雾液滴的冷空气被卷吸作用于油池火根部，使得油池燃烧火焰面与油池蒸发液面反应区的温度下降，从而迅速抑制并熄灭油池火。空间分布均匀，且雾滴颗粒较小的水雾，被空气卷吸作用于火焰的水雾量就越大，其灭火效果就越明显，例如 N₃ 喷头。当油池火侧壁存在垂直障碍物挡板时，油池火四周空气扰动所引起的水雾雾滴的空气卷吸作用相应减弱，此时被卷吸的冷空气以及夹杂的水雾液滴不足以使油池火火焰面与反应区温度迅速降低，作用于池火表面少量的水雾液滴与新鲜冷空气反而促进了燃烧的进行，使得侧壁障碍物挡板起到了稳定油池火燃烧的作用。

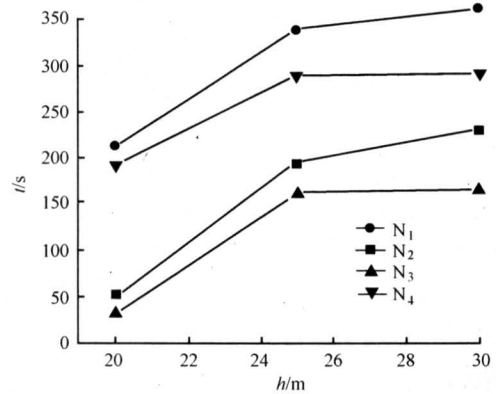


图 6 喷头安装高度与灭火时间变化曲线 (障碍物水平挡板全遮挡)

Fig.6 Extinguishment time curves varied with nozzles installation height (under the horizontal shutter)

为进一步验证并深入研究障碍物挡板类型对水雾灭火效果的影响，作者利用 FDS4.05 对该实验细水雾与障碍物油池火的相互作用过程进行数值模拟，计算并比较了 4 种障碍物挡板条件下作用于油池的水雾通量。FDS 采用大涡湍流模型以及混合物分数燃烧模型来模拟火焰蔓延过程，水雾液滴与火焰之间相互作用的两相流动采用欧拉-拉格朗日模型进行模拟。FDS 模型采用总数 81 × 54 × 48 网格进行计算，舱室结构与网格设置如图 7 所示。水雾系统根据 N₃ 喷头雾特性参数进行设置。由于 FDS

只能采用方形网格进行计算，舱室进排风与火源大小采用与原舱室等面积等量设定的原则进行设置。

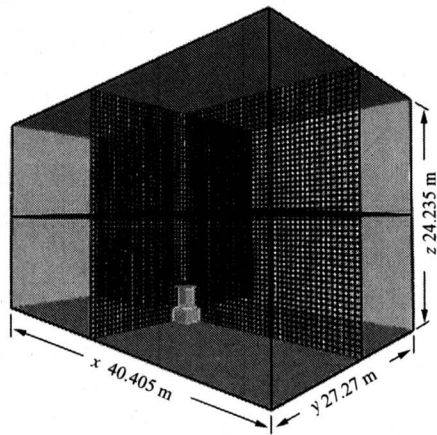
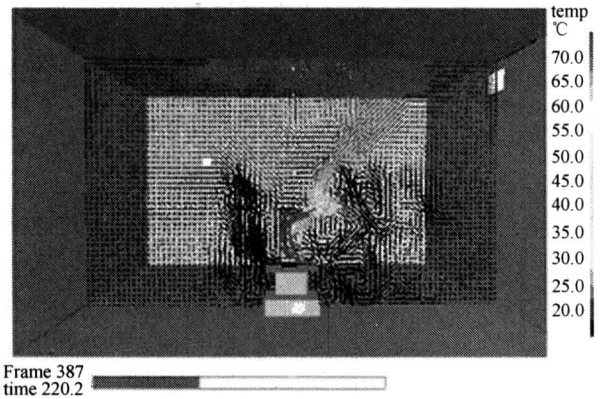


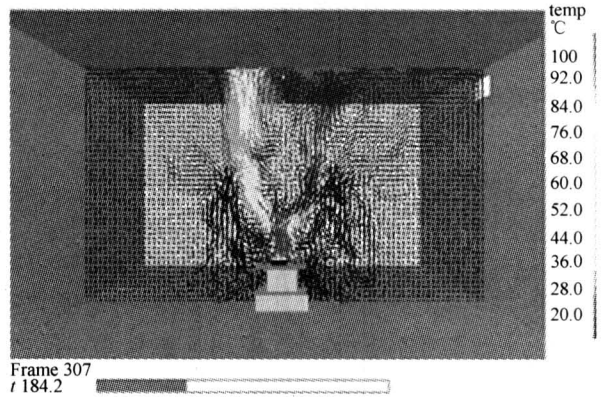
图 7 FDS 计算网格及舱室设计示意图
Fig.7 Sketch of cabin model and FDS grids

图 8 为水雾作用于 2 种不同类型障碍物挡板油池火的速度场矢量图，当存在竖直障碍物挡板时(图 8a)，由于侧壁障碍物挡板的影响，油池火燃烧形成的热气流很难在油池火四周形成较强烈的空气卷吸现象，作用于障碍物侧壁的大量水雾液滴也很难通过空气卷吸而直接作用于油池火火焰面，同时水雾蒸发形成的大量水蒸气随着火焰羽流不断形成上升运动的高温气流，也阻止了水雾小颗粒液滴与火焰的相互作用。伴随着水雾的不断吸热蒸发，大量水蒸气形成于障碍火周围，在一定程度上抑制了火焰的燃烧，但处于水平挡板与竖直挡板之间的小火焰却很难被熄灭。当不存在竖直障碍物挡板时(图 8b)，随着水雾的持续作用，燃烧形成的上升热气流使得油池火四周冷空气大范围扰动，大量蒸发的水蒸气与水雾液滴由于空气卷吸作用，由水平障碍物挡板下面直接作用于油池火火焰面与油池火根部，使油池火热释放速率迅速下降。随着水雾的持续作用，卷吸的大量水雾使得火焰逐渐熄灭。作用于油池单位面积上的水雾通量越大，大量蒸发的水蒸气对火焰的吸热降温与隔氧窒息的抑制效果就越明显。由于存在竖直障碍物挡板，作用于油池火的水雾通量受到较大影响，而油池火上方水平障碍物挡板的面积大小对作用于油池火水雾通量影响不大。图 9 为不同类型障碍物条件下，作用于油池单位面积上的水雾通量(WMPUA)随时间变化曲线。从图中可以看出，当不存在竖直障碍物挡板时，作

用于油池单位面积上的水雾量明显大于其他 3 种类型障碍物挡板。通过利用 FDS 对细水雾作用于不同类型障碍物挡板火灭火过程的模拟研究，验证了实验研究的结果，即竖直障碍物挡板对水雾灭火效果影响较大，其直接影响着卷吸入油池火的水雾通量，作用于油池火的水雾卷吸量越大，水雾对障碍物挡板火的灭火效果越明显。



(a) 障碍挡板全遮挡



(b) 无竖直挡板

图 8 细水雾作用下不同类型障碍物挡板火速度场矢量图

Fig.8 Velocity field vector diagram of different obstacle fire interacted with water mist

5 结论

利用自建的障碍物挡板火实验装置，研究了不同障碍物挡板遮挡方式下细水雾对油池火的灭火有效性。实验结果表明：障碍挡板油池火的灭火效果与直接作用于油池火的水雾卷吸量及水雾特性条件有关；当细水雾不能直接喷射于燃烧火焰面或池火根部时，油池火上方的水平挡板面积对细水雾灭火效果影响不大，而侧壁竖直挡板则是影响水雾对障碍挡板火灭火效果的关键因素；当障碍物侧壁与水

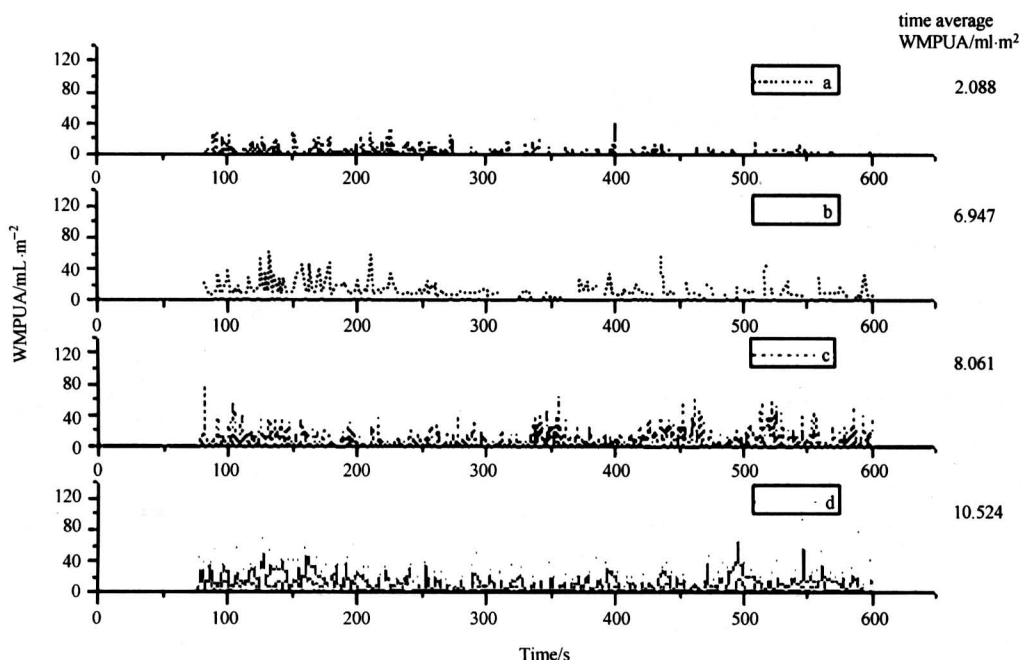


图9 不同障碍物挡板条件下，作用于油池火的单位面积上的水雾通量

Fig.9 Curves of water mist flux on the pool fires unit area under the different obstacle conditions

平挡板都存在时，水雾喷头与水平障碍挡板间的相对高度和水雾作用方向对水雾灭火效果影响较大。

由此，针对复杂空间内障碍挡板油池火，细水雾灭火系统的喷头设置应尽量避免出现竖直障碍物的遮挡。对于具有竖直挡板条件下的障碍火，水雾喷头布置应面向障碍物挡板垂直上喷或以局部加密方式从火源正面喷射，以提高水雾灭火效果。

致谢：实验研究得到中国科学技术大学“十五”“211”项目资金资助，特此感谢。实验过程得到汪金辉、任宁等的帮助，在此表示感谢。

参考文献

- [1] Darwin R L, Williams F W. The development of water mist fire protection systems for U. S. Navy ships[J]. Naval Engineers Journal, 2000,112(6):49~57
- [2] Fleming J W, Williams B A, Sheinson R S. Water mist fire suppression research: laboratory studies[A]. Second NRIFD Symposium[C]. Japan,2002(7)
- [3] Kim A. Overview of recent progress in fires suppression technology[A]. Second NRIFD Symposium[C]. Japan, 2002(7)
- [4] Liu Z G, Kim A K. A Review of water mist fire suppression technology: part II - application studies[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2001, 11(1) : 16~42
- [5] Braidech M M, Neale J A, Matson A F. The Mechanisms of Extinguishment of Fire by Finely Divided Water[M]. National Board of fire Underwriters, NY, 1955. 73
- [6] Liu Z G, Kim A K, Su J, Examination of performance of water mist fire suppression systems under ventilation conditions [J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2001, 11(3):164~193
- [7] Liu Xuanya , Lu Shouxiang , Qin Jun. Experimental study on suppression of methane flame propagating by water mist [A]. 2004 International Symposium on Safety Science and Technology[C]. Shanghai. 1493~1498
- [8] Mawhinney J R, Eng P. Engineering criteria for water mist fire suppression systems[A]. Proceedings of Water Mist Fire Suppression Workshop[C]. 1993
- [9] Marttila P K. Water mist in total flooding applications[A]. Proceedings of Halon Alternatives Technical working conference[C]. 1993. 309
- [10] 崔正心. 细水雾与障碍物稳定火焰相互作用的研究 [D]. 中国科学技术大学, 2001
- [11] MSC Circulars 668 and 728: Interim Test Method For Fire Testing Equivalent Water-Based Fire-Extinguishing Systems for Machinery Spaces of Category A and Cargo Pump-rooms.

(cont. on p.97)

参考文献

- [1] 霍然, 袁宏永. 性能化建筑防火分析与设计[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2003
- [2] 建筑设计防火规范(2001 修订版)GB J16-87[S]
- [3] 商业建筑设计规范 JGJ 48-38[S]
- [4] Kisko T M, Francis R L, Nobel C R. EVACNET4 USER'S Guide[M]. Florida: University of Florida
- [5] 费业泰. 误差理论与数据处理(第四版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000

A Method of Evaluating the Design of Evacuation Based on the Using Rate of Unit Effective Evacuation Width

Yang Jianpeng¹, Zhang Heping¹, Pan Zheng², Ma Ning³, Jiang Weicheng³

(1. State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China;

2. Dept. of Fire Protection, Zhejiang Fire General Brigade, Hangzhou 310014, China;

3. Ningbo Fire Detachment, Ningbo, Zhejiang 315016, China)

[Abstract] During designing a building, the design of evacuation is very important. The rationality of the design of evacuation determines whether people can evacuate from buildings. But the existing criterion does not relate to how to evaluate rationality of various designs of evacuation. This paper advances a method which uses the using rate of unit effective evacuation width as the major parameter to reflect the difference of various designs. And this method can give advices to adjust the design to profit personal evacuation.

[Key words] fire; evacuation; the using rate of unit effective evacuation width

(cont. from p.93)

The Validity Experimental Study of the Obstacle Fires Extinguishment by Water Mist

Liu Xuanya, Lu Shouxiang, Huang Yue, Chen Guoqing

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

[Abstract] The full scale simulation cabin and pumping pressure water mist system were employed to study the validity of the obstacle fires extinguishment by water mist on the conditions of different obstacles baffles. The validity of water mist system and main influencing factors on the extinguishment of the obstacle heptanes fires were analyzed. FDS (4.0.5) was employed to study the interaction of the water mist and obstacle oil fires and the extinguishing rules and factors were determined primarily. The experimental and simulation results show that the structure and style of the obstacle fires are important to influence the validity of the obstacle fires extinguishment by water mist. The more the water mist is entrained by the airflow, the more effective of the extinguishment by water mist.

[Key words] water mist; obstacle fires; validity of fire extinguishment