

# 新型细水雾添加剂成分对灭火性能影响研究

纪欢乐<sup>1,2</sup>, 张青松<sup>1,2</sup>, 吴斌斌<sup>1</sup>, 梁天水<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026;

2. 中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300)

[摘要] 为研究自制细水雾添加剂中主要成分对灭火性能的影响, 在开放空间, 进行了不同工作压力、不同浓度、不同燃料条件下含添加剂细水雾的灭火研究, 实验获取了灭火时间、火焰形态、火焰温度等灭火参数。通过对柴油和汽油两种不同燃料的灭火实验发现, 使用含添加剂的细水雾对低沸点、高蒸发速率的汽油灭火效果同样较好。根据加入不同浓度的氟表面活性剂的实验结果比照发现, 氟表面活性剂是自制添加剂中起到主要提升灭火性能作用的物质, 它通过改变细水雾物理性质使加入自制添加剂的细水雾的灭火性能显著提高。对比调整自制添加剂各物质含量的实验数据, 进一步确定添加剂各成分最佳灭火性能浓度。

[关键词] 细水雾添加剂; 灭火性能; 添加剂成分; 灭火机理

[中图分类号] TQ569 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)11-0082-06

## 1 前言

由于哈龙灭火介质灭火性低且具有较强的温室效应, 该类灭火器已经逐渐被淘汰, 对于新型灭火介质的研究逐渐加大。其中细水雾灭火技术因其无环境污染、成本较低等优点被视为哈龙灭火介质的主要替代物之一。然而在有些火灾场景下细水雾的应用存在不足, 如灭火效能低和较容易结冰等。在细水雾中加入各种不同的添加剂不仅可以利用细水雾降低氧含量和冷却作用, 同时还可以利用添加剂本身的性质弥补纯细水雾的一些缺陷。

近年来国内外逐渐开展对细水雾添加剂的研究, 主要在单一添加剂和复合添加剂两个方面上进行。目前对单一细水雾添加剂的研究主要包括: Daniel<sup>[1]</sup>选取了美国林业部门安全名单中4种物质作为添加剂进行了细水雾粒径、接触角等参数的研究; Andrew K Kim<sup>[2]</sup>研究了添加了发泡剂后, 细水雾灭火系统对于木垛火、油类火的灭火性能影响; 丛北华等<sup>[3]</sup>研究了含NaCl添加剂细水雾对不同燃料池火灭火性能的影响。而在复合添加剂方面的研究却

较少, 例如 Georges LeFort<sup>[4]</sup>研究的杜邦 Forafac WM 复合添加剂自身的毒性及其对于细水雾灭火性能、火焰复燃的影响; 而国内仅有中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室、河南理工大学火灾实验室等少数几个单位开展了相关实验<sup>[5-7]</sup>, 但就添加剂成分比例目前尚未形成普遍适用的理论与规律。对于自制复合型细水雾添加剂的灭火性能已经在之前得到了验证<sup>[8,9]</sup>, 本文对其组分进行了灭火效率随各成分浓度变化规律的研究, 力图从化学和物理及其两者耦合作用来探索添加剂的最佳成分配比, 并用实验与分析结果进行验证。

## 2 实验方法

实验在开放空间内进行, 尽量保证不受外部环境影响。燃料为柴油和汽油, 每次燃烧试样均为150 mL, 柴油预燃100 s, 汽油预燃60 s。燃料用边长为15 cm的正方形油盆盛装。细水雾喷头距离地面1 m, 放置在油盆正上方, 工作压力分别为0.3 MPa、0.5 MPa、0.7 MPa, 在油盆正上方表面中心处设置第一个热电偶, 然后沿着表面中心线向上每隔10 cm

[收稿日期] 2012-07-20

[基金项目] 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放课题资助项目(HZ2011-KF04)

[作者简介] 张青松(1977—), 男, 河北晋州市人, 副教授, 研究方向为民航安全、事故灾害模拟仿真; E-mail: nkzqsong@126.com

布置一个热电偶,共布置 5 个热电偶,分别编号为 1~5。热电偶的测量数据通过采集卡由电脑收集处理。实验系统见图 1。

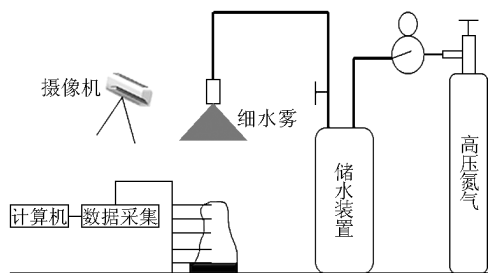


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic view of experiment

添加剂是由表 1 所示的物质构成的,实验中每次制备添加剂 200 g,稀释为 5 000 g 后添加到储水罐中。

表 1 细水雾添加剂成分

Table 1 Component of water mist additive

成分	质量百分浓度%
氟表面活性剂	1.0~6.0
烷基酚聚氧乙烯醚	1.5~3.0
尿素	4.0~6.5
三乙醇胺	0.3~0.5
N,N-二甲基酰胺	10.0~15.0
乳酸钠	1.0~1.5
水	67.4~80.2

对于添加剂成分,按照可能影响灭火性能程度且在添加剂中含量高低的顺序,按氟表面活性剂、尿素、乳酸钠、二甲基酰胺、烷基酚聚氧乙烯醚和三乙醇胺的顺序,在一定范围内调整它们在添加剂中的含量,通过实验结果与理论分析,得出各自对添加剂灭火性能的影响。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 碳氟表面活性剂对灭火性能的影响

含氟表面活性剂是指碳氢链中的氢原子全部或部分被氟原子替代,形成的具有碳氟链  $R_f$  憎水基的表面活性剂<sup>[10]</sup>。因为氟碳链  $R_f$  既疏水又疏油,氟碳链之间很弱的相互作用使含氟表面活性剂在水中呈现很高的表面活性,即有着非常低的表面张力,可以使氟表面活性剂溶液的表面张力下降到 20 mN/m 以下,而油的表面张力一般在 20~24 mN/m,因此添加剂的水溶液可抵消油/水的界面张力影响,单独在油

面上铺展。同时由于含氟表面活性剂的高表面活性和其他特殊性能,因此实际应用中其使用浓度很低,用量很少。本实验中选用的是季铵盐型碳氟阳离子氟表面活性剂,即 FC-4:  $CF_3CF_2CF_2O(CF(CF_3)CF_2O)_2-CF(CF_3)CONH(CH_2)_3N^+(C_2H_5)_3CH_3I^-$ 。

因为阳离子表面活性剂本身分子结构的主要部分是一个五价的氮原子,所以也称为季铵化物,其特点是水溶性大,在酸性与碱性溶液中较稳定,具有良好的表面活性作用,同时 FC-4 具有一些优良性能,具有憎水憎油的特性。能使水和多数溶剂的表面张力降到很低,而使用的浓度却很小。

从图 2 不含 FC-4 和含 0.24% FC-4 灭火添加剂的细水雾,在 0.5 MPa 下与柴油火作用的录像截图可以看出,在柴油自由燃烧时,火焰比较旺盛,高度比较高,与周围空气的卷吸作用比较强。在细水雾施加后,由于受到气流扰动的影响,火焰先是瞬时增大,随着细水雾逐渐进入火场,火势逐渐下降。对于含 0.24% 浓度 FC-4 添加剂的细水雾,在 2 s 时,火焰已经被抑制到油面附近,随即被完全扑灭。而对于添加剂中无 FC-4 时,在前 2 s 内,细水雾一直在抑制柴油火的阶段,在 10 s 时火焰高度刚下降到一半左右,完全扑灭火焰需要 20 s 之久。

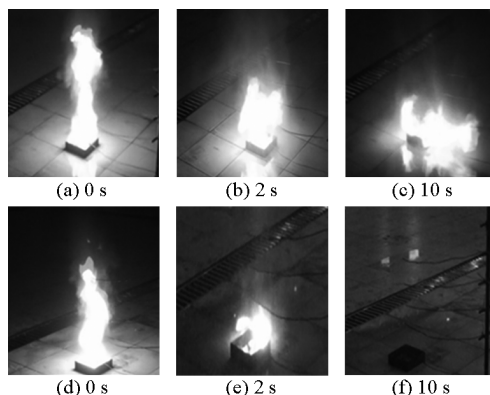


图 2 不含 FC-4 和含 0.24% FC-4 灭火添加剂的细水雾与柴油火的录像截图

Fig. 2 Video screenshot of without FC-4 and 0.24% FC additives water mist extinguishing diesel fire

一般情况下,含氟表面活性剂的使用浓度为 0.05% 左右即可达到很好的使用效果。实验中 1 号热电偶的温度最高,为了便于比较不同浓度下 FC-4 的冷却效果,以 1 号热电偶温度为冷却的特

征温度。图3为不同FC-4浓度下,0.5 MPa下汽油燃烧时施加细水雾后温度变化情况。从图中看出,火焰首先是自由燃烧阶段,温度持续上升,施加了不同浓度的FC-4细水雾之后,温度下降曲线有比较大的区别。在FC-4浓度为0,也就是没有添加FC-4时,温度下降最缓慢;当浓度为0.24%时,温度下降最为迅速。

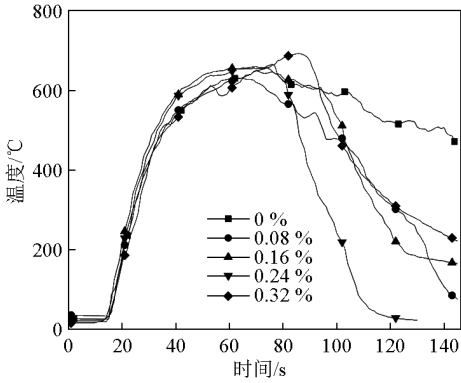


图3 0.5 MPa压力下汽油温度曲线  
Fig. 3 Flame temperature curve of gasoline under 0.5 MPa

图4和图5中为在不同压力下,含有不同浓度FC-4的平均灭火时间。对于柴油火,在0.3 MPa和0.5 MPa时,在浓度0.24%范围内,灭火效果随着FC-4浓度的增加而增加。随着浓度进一步上升,灭火效果又开始下降。而在0.7 MPa时,灭火效果主要受细水雾吹力的影响较大,灭火时间基本无区别。而对于汽油,由于其比柴油沸点低,在0.3 MPa时,含有添加剂的细水雾无法扑灭汽油火。在0.5 MPa和0.7 MPa压力下,灭火效果同样是随着FC-4的质量浓度增加呈现先上升后下降的趋势。

FC-4对添加剂的影响主要是减少添加剂表面张力,由韦伯数公式可知

$$W_e = \frac{\rho_l U_r^2 d}{\sigma_l} \quad (1)$$

式(1)中, $W_e$ 为韦伯数; $U_r$ 为气液相对速度,m/s; $\rho_l$ 为液体密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $d$ 为射流直径,m; $\sigma_l$ 为液体的表面张力, $\text{N}/\text{m}$ 。

图6为利用SL201型移动张力仪对不同FC-4浓度添加剂进行表面张力测定的结果。由图6可知,添加剂在FC-4浓度0%~0.05%之间迅速下降,之后基本稳定在20 mN/m。理论上对于含有添加剂的细水雾来说,当添加剂的表面张力降低时,在其他条件不变的情况下,表面张力降低导致水雾粒

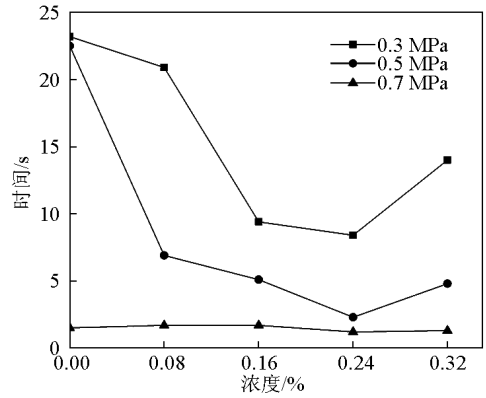


图4 不同FC-4浓度下柴油火灭火时间  
Fig. 4 Extinguish time of diesel fuel under different FC-4 concentration

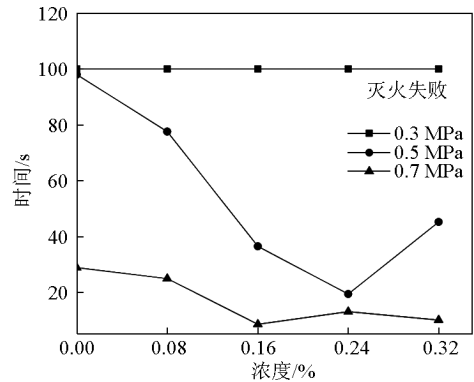


图5 不同FC-4浓度下汽油火灭火时间  
Fig. 5 Extinguish time of gasoline under different FC-4 concentration

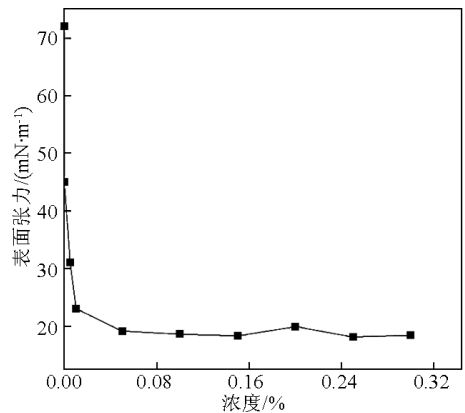


图6 不同FC-4浓度下表面张力值  
Fig. 6 Surface tension value of different FC-4 concentration

径降低,细水雾灭火的雾化能力增强。对于柴油火来说,更多的雾滴进入火羽流被蒸发,意味着火焰区的温度迅速降低,火焰被逐步压向油盆,最后雾滴达

到柴油表面,燃料表面温度降低,最后火焰被扑灭。对于汽油火来说,降低细水雾粒径能达到同样的效果,灭火时间先降低后增加。但是粒径要达到油池表面需要一定的压力,对于汽油火来说,在 0.3 MPa 时,粒径在未达到油池表面即全部被燃烧蒸发,因此在此工况下不能有效扑灭汽油火。

### 3.2 尿素对灭火性能的影响

添加剂中尿素属于受热易分解物质。温度高于 160 ℃, 尿素即受热分解,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 = \text{NH}_3 + \text{HCNO}$ 。同时,尿素溶于水后,同样可以产生  $\text{CO}_2$  和  $\text{NH}_3$ , 即  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2$ 。分解产生的  $\text{CO}_2$  和  $\text{NH}_3$  起到惰性气体灭火作用,并且吸收大量热,降低了火焰温度。因此尿素增强了细水雾的物理灭火作用。

由图 7 和图 8 可看出,不同尿素浓度下熄灭柴油火和汽油火的时间。在 0.24 % 浓度范围内,灭火效果随着尿素浓度的提高有一定程度的提高。但随着浓度的进一步提升,灭火效果均出现不同程度的下降。这种关系,反映了细水雾的物理作用与尿素的热分解作用之间的耦合关系。当加入尿素以后,尿素的热分解作用使得相同作用的液滴蒸发速率减小,就使得单位时间产生的水蒸气减少,从而使得细水雾的灭火性能降低,但同时因为还有一部分热量用来使得尿素热分解产生  $\text{NH}_3$  和  $\text{CO}_2$ , 从而使得热分解的作用增强,同时产生的其他气体可以减少周围空气氧气含量,综合起来使得灭火效能提升。随着尿素含量的增加,用于提供热分解的那一部分继续增加,而细水雾的蒸发速率进一步下降,当热分解的作用不足以抵消细水雾蒸发速率提供的效果时,

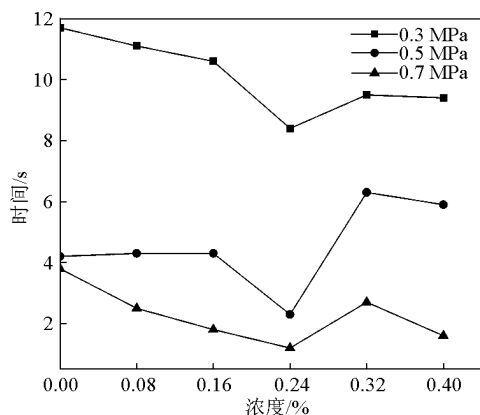


图 7 不同尿素浓度下柴油火灭火时间  
Fig. 7 Extinguish time of diesel fuel under different urea concentration

就体现在灭火性能的降低,这就可以理解随着尿素浓度在 0.24 % 以后灭火时间的延长。

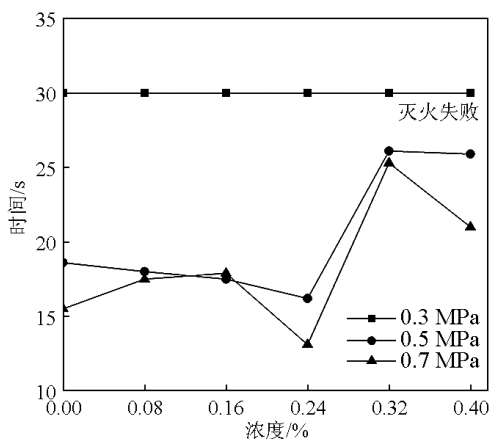


图 8 不同尿素浓度下汽油火灭火时间  
Fig. 8 Extinguish time of gasoline under different urea concentration

图 9 和图 10 是不含尿素和 0.24 % 尿素浓度下柴油火和汽油火温度。可以看出,当施加细水雾之后,柴油经过 100 s,汽油经过 60 s 后都已经开始完全燃烧,在 0.1 m 处的温度下降比较迅速,几乎是直线下降,0.5 m 处的温度浮动范围很小。由于添加剂对柴油火的灭火效果较好,在温度图上几乎体现不出尿素对于温度下降的影响,但从汽油火温度分布图中,可以看出加入了尿素以后,温度曲线斜率更大,也就是说加入了尿素的添加剂对于温度抑制的效果更好,能够在更短的时间内将油池温度降低,进而更快速地灭火。

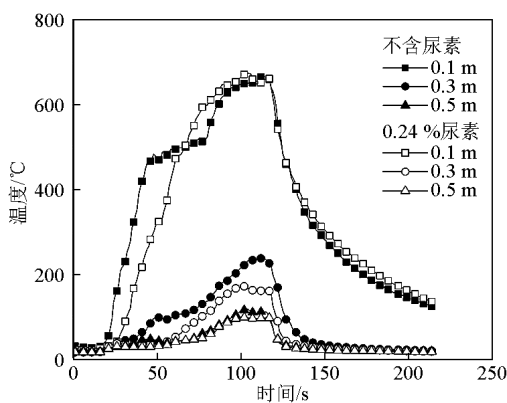


图 9 不含尿素与 0.24% 尿素添加剂作用下柴油火焰温度曲线  
Fig. 9 Flame temperature curve of without urea and 0.24% urea additives water mist extinguishing diesel fire

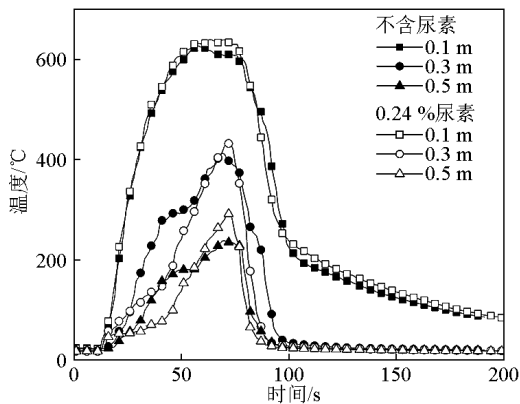


图 10 不含尿素与 0.24% 尿素添加剂作用下汽油火焰温度影响

Fig. 10 Flame temperature curve of without urea and 0.24% urea additives water mist extinguishing gasoline fire

## 4 其他成分对添加剂灭火性能影响

### 4.1 乳酸钠

乳酸钠溶液沸点为 140 °C, 在添加剂中乳酸钠受热分解析出钠离子, 在烃类燃烧反应链过程中:  $O_2 + H \rightarrow OH + O$ , 钠离子可以捕获反应中的 OH、H 和 O 自由基, 阻断链式反应。

从图 11 可看出, 在 0.5 MPa 压力下, 不同乳酸钠浓度对于柴油火和汽油火灭火时间的影响。原添加剂中乳酸钠稀释后含量为 0.06 %, 由于其质量含量较低, 在细水雾施加后未到油池火表面即被蒸发, 即使将细水雾中乳酸钠的含量调整到 0.6 %, 对于柴油火基本没有明显的灭火性能提升, 而对汽油火灭火时间提升幅度也在 20 % 以内, 大幅度提高乳酸钠含量效率并不高。因此, 本灭火剂中乳酸钠只是辅助灭火的作用, 将其在添加剂中质量浓度控制在 1.5 % 即可。

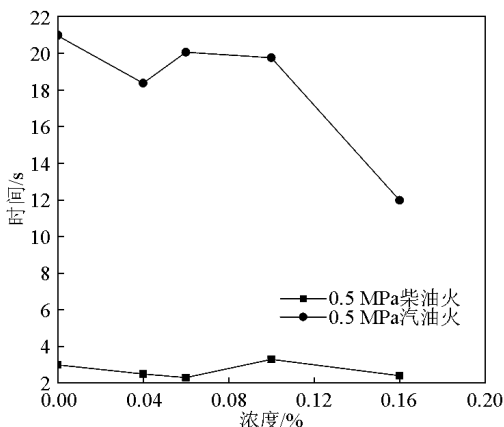


图 11 不同乳酸钠浓度细水雾作用下细水雾灭火时间

Fig. 11 Extinguish time under different sodium lactate concentration

### 4.2 N,N - 二甲基酰胺

二甲基甲酰胺 (DMF) 是一种透明液体, 能和水及大部分有机溶剂互溶。它是化学反应的常用溶剂。本添加剂因为成分较多, 为了使添加剂形成透明、均相溶液, 使用 DMF 作为溶剂。为了提高使用效率, 减少工业化后使用成本, 在一定范围内调整 DMF 的用量, 用最少的 DMF 来溶解以上所有成分。

经实验, 原配方成分含 DMF 为 15 %, 逐渐减少 DMF 用量, 观察融合后添加剂情况。实验发现, 使添加剂保持透明均一的 DMF 最少用量为 10 %, 且灭火性能不受影响。

### 4.3 烷基酚聚氧乙烯醚和三乙醇胺

烷基酚聚氧乙烯醚 (APE) 和三乙醇胺 (trolamine) 在本添加剂中均起到乳化剂的作用, 它们也是一种表面活性剂, 同时可以辅助起到使添加剂形成均匀透明状。对于这两种物质在添加剂中含量之和进行了从 0 % ~ 0.2 % 的含量调整并进行灭火实验。

从图 12 可看出, 烷基酚聚氧乙烯醚具有与三乙醇胺同样的浓度与灭火时间的趋势。即在一定浓度下, 烷基酚聚氧乙烯醚与三乙醇胺的存在可以缩短灭火时间, 提高灭火性能, 但随着浓度的增加灭火时间基本维持不变。

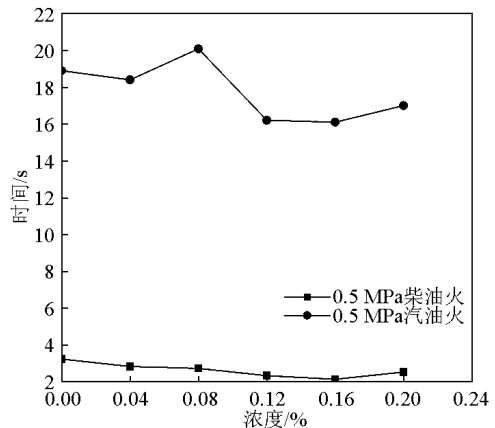


图 12 不同烷基酚聚氧乙烯醚与三乙醇胺浓度细水雾作用下细水雾灭火时间

Fig. 12 Extinguish time under different APE and trolamine concentration

## 5 结语

通过对复合灭火添加剂的实验可以发现: 普通细水雾中加入添加剂, 可以显著提高细水雾的灭火效果。氟表面活性剂可以降低添加剂的表面张力, 提高雾化效果; 尿素作为热分解物质影响灭火性能; 乳酸钠通过捕获燃烧中的 OH 等离子来提高灭火性

能;DMF 作为使溶液形成透明均一物质的溶剂;烷基酚聚氧乙烯醚和三乙醇胺则作为乳化剂辅助提高灭火性能。

1)不同燃料也会影响到含有添加剂细水雾的灭火性能,这与燃料的性质有关。使用含有添加剂的细水雾对低沸点、高蒸发速率的汽油灭火效果较好。细水雾喷头的压力情况对于灭火性能也有影响。

2)添加剂中对灭火性能起主要提升作用的是物理作用,由于实验设备材料的限制,FC-4 对细水雾雾化效果的影响无法具体测量,但最佳灭火浓度可以确定在 0.24 %。

3)不同燃料也会影响到含有添加剂细水雾的灭火性能,这与燃料的性质有关。柴油由于其沸点低、蒸发速率小,使用含有细水雾的添加剂灭火效果较好。而汽油相对来说比较难灭,细水雾喷头的压力情况对于灭火性能也有影响。

#### 参考文献

[1] Daniel Madrzykowski. Water additives for increased efficiency of

fire protection and suppression [C]// Fire Extinguishment and Fire Safety Engineering. Japan: Tokyo, 1998.

- [2] Andrew K Kim. The Effect of Foam Additives on the Fire Suppression Efficiency of Water Mist [M]. Ottawa: Institute for Research in Construction. National Research Council,1994.
- [3] 丛北华,毛涛,廖光焯. 含 NaCl 添加剂细水雾对不同燃料池火灭火性能的实验研究[J]. 热科学与技术,2004(3):65-70.
- [4] Georges LeFort. Forafac WM: Additive for water mist systems on class B fires [R]. Washington: University of Maryland,2005.
- [5] 赵乘寿,宫聪,汪鹏,等. 含磷酸二氢铵细水雾灭火有效性研究[J]. 消防科学与技术,2011,9(30):822-824.
- [6] 廖光焯,丛北华,况凯骞. 铁基添加剂增强细水雾灭火性能的实验研究[J]. 工程热物理学报,2005(26):273-276.
- [7] 况凯骞,丛北华,廖光焯. 含 FeCl<sub>2</sub> 添加剂细水雾灭火有效性的实验研究[J]. 火灾科学,2005,14(1):21-28.
- [8] 丛北华,周晓猛,廖光焯. 复合型添加剂增强细水雾灭火性能研究[J]. 中国科学技术大学学报,2006,1(36):20-25.
- [9] 刘江虹,金翔,廖光焯. 新型细水雾添加剂的制备及其灭火性能评价[J]. 中国工程科学,2010,9(12):58-62,68.
- [10] 郑忠,胡纪化. 表面活性剂的物理化学原理[M]. 广州:华南理工大学出版社,1995.

## Research of the effect of the component proportion in the new water mist additive to extinguishing performance

Ji Huanle<sup>1,2</sup>, Zhang Qingsong<sup>1,2</sup>, Wu Binbin<sup>1</sup>, Liang Tianshui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

[Abstract] Water mist technology provides efficient firefighting performance while there is still room for improvement, so varieties of additives have been studied recent years both abroad and domestic. The self-made additives are used to compare the firefighting performance of diesel and heptane fire in open space. By adjusting the concentration of substance in the additives and conducting the experiment under the pressure of 0.3 MPa, 0.5 MPa and 0.7 MPa, extinguishing time, flame shape and temperature are measured in the experiment. Through the experiments using different fuels, it can be found when the fuel is heptane who has a lower ignition point and a higher evaporation, the water mist additives can still significantly improve the firefighting performance. According to the data based on different concentrations of fluorinated surfactants, we can see fluorinated surfactants are the main substance to prove the performances by changing physical property of water mist. Maximize fire performance proportion of the additives are find by experiments results.

[Key words] water mist additive; fire fighting performance; additive proportion; fire extinguishing mechanism