

文章编号: 1004-4574(2007)02-0122-05

多组分细水雾对乙醇汽油的灭火效能研究

苏琳¹, 阙兴贵¹, 牛金贵², 杨志伟¹, 叶明生¹

(1 公安部上海消防研究所, 上海 200438; 2 哈尔滨铁路公安局, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 分析了细水雾灭火时液滴的吸热蒸发过程和汽油与乙醇汽油的燃烧特性, 进行了汽油、乙醇在封闭空间内从燃烧到自行熄灭时的含氧量变化测量。进行了多组分细水雾与细水雾的灭火性能比较, 和用多组分细水雾对汽油火、乙醇汽油火的灭火性能试验。研究表明, 多组分细水雾比普通细水雾具有更好的灭火效果, 乙醇汽油火的灭火难度要比汽油火的大, 多组分细水雾用于乙醇汽油场合灭火时, 其灭火工作压力要大于用于汽油的场合。

关键词: 消防; 多组分细水雾; 乙醇汽油; 灭火

中图分类号: TU 998.1 文献标识码: A

Research on polycomponent water mist's extinguishing efficiency against ethanol motor spirit

SU Lin¹, QUE Xing-gui¹, NIU Jin-gui², YANG Zhi-wei¹, YE Ming-sheng¹

(1. Shanghai Fire Research Institute, Shanghai 200438, China; 2. Public Security Department of Railway Bureau in Harbin Harbin 150000, China)

Abstract This paper analyses the heat absorption and evaporation process of the droplet, the combustion characteristic of motor spirit and ethanol motor spirit, and oxygen concentration of motor spirit and ethanol motor spirit was measured from burning to self extinguishing in the enclosed space. Comparison experiments of water mist with polycomponent water mist and the test on polycomponent water mist's extinguishing efficiency against ethanol and ethanol motor spirit fire were done. It is proved that polycomponent water mist has better extinguishment efficiency than water mist, it is more difficult to put out a ethanol motor spirit fire than a motor spirit fire, the work pressure what is needed to extinguish a ethanol motor spirit fire is higher than that for motor spirit fire.

Key words fire control; polycomponent water mist; ethanol motor spirit; fire suppression

乙醇汽油是一种新型的混合燃料, 也是经济实用的清洁环保燃料和可再生能源。乙醇汽油在巴西、美国、欧洲等国家和地区大面积使用已有 20 多年。在我国推广使用乙醇汽油, 有利于节约石油资源, 改善汽车尾气排放, 提高大气环境质量。汽车使用乙醇汽油和汽油相比, 尾气中一氧化碳排放量可下降 30% 以上, 碳氢化合物的排放量可下降 10% 以上。乙醇汽油是在汽油中混入一定比例的乙醇, 乙醇可以从农作物中提炼, 乙醇的大量使用, 还可以促进农业的发展。从 2003 年 4 月开始, 我国已在辽宁、吉林、黑龙江三省进行乙醇汽油大面积使用试点。一年多时间试验表明: 汽车用乙醇汽油和用汽油相比, 油耗变化不大, 动力性能也基本不变, 汽车运行平稳, 但尾气排放有较大改善, 节约石油资源和提高大气环境质量效果显著。

收稿日期: 2005-10-10 修订日期: 2005-12-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2001CB409609)

作者简介: 苏琳 (1979-), 女, 研究实习员, 主要从事消防装备的研究。E-mail: sunlinma@tm.com

因此,国家将继续扩大试点范围。总体而言,乙醇汽油在我国使用尚属于起步阶段,特别是对其火灾危险性的认识还很缺乏,相关标准也未制定。随着乙醇汽油在我国的大力推广使用,以上问题都需要逐步解决。本文通过多组分细水雾对乙醇汽油的灭火性能-效能研究,揭示了乙醇汽油与汽油火灾危险性的相同和不同。

1 相关概念

乙醇汽油:在汽油组分油中按体积混合比加入 10% 的变性燃料乙醇后作为燃料用的汽油。分 90#、93#、95# 三个牌号,用“E10乙醇汽油 90号”、“E10乙醇汽油 93号”、“E10乙醇汽油 95号”表示,其中 E10表示变性燃料乙醇加入量的体积分数为 10%。

多组分细水雾灭火机理:在水中加入几种组份,如表面活性剂、铵盐等添加剂,改变水的一些功能,使其不但有细水雾本身的冷却、窒息的作用,而且通过多组分细水雾对火灾的物理和化学的耦合作用,从而产生隔绝氧气效应、冷却吸热效应、游离基清除效应,消除了燃烧条件中的一个或几个要素,使燃烧减缓或停止。

2 理论分析

细水雾灭火过程中,液滴的吸热可分为以下 3 个阶段

(1) 吸热冷却过程

当液滴温度小于蒸发温度,即 $T_p \leq T_{vap}$; 液滴的质量小于等于不挥发分质量,即 $m_p \leq (1 - f_{v0})m_{p0}$ 时,在这里假定液滴的温度处处相等,使用一个热平衡公式来描述 T_p 和对流传热、热辐射之间的关系,公式如下:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (1)$$

其中: T_p 为液滴温度; f_{v0} 为液滴挥发分百分含量; m_{p0} 为液滴的初始质量; m_p 为液滴的当前质量; C_p 为定压比热 ($J/(kg \cdot K)$); A_p 为液滴表面积 (m^2); T_∞ 为连续相温度 (K); h 为对流传热系数 ($W/(m^2 \cdot K)$); ε_p 为液滴辐射系数; σ 为斯蒂芬-波耳兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$); θ_R 为辐射温度, $\theta_R = \left(\frac{I}{4\sigma}\right)^{\frac{1}{4}}$, I 为辐射强度。

(2) 一个分散相液滴的蒸发过程

液滴温度达到蒸发温度 T_{vap} , 即 $T_p \geq T_{vap}$; 液滴的质量大于不挥发分质量, 即 $m_p > (1 - f_{v0})m_{p0}$ 时,

当液滴温度达到蒸发温度 T_{vap} 时, 并一直保持到液滴温度到达液滴的沸腾温度 T_{bp} 或者到液滴的挥发份全部析出才会停止使用。一旦液滴蒸发作用开始(即液滴温度达到蒸发温度), 就会持续, 即使液滴温度小于蒸发温度 T_{vap} 也不会停止。只有在液滴温度低于露点温度时, 蒸发才会停止。

液滴的温度可以通过热平衡得出, 热平衡的计算式把液滴的焓变及两相间的对流传热、潜热互换联系起来, 公式如下:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) - \frac{dn_p}{dt} h_{fg} \quad (2)$$

其中: $\frac{dn_p}{dt}$ —— 液滴蒸发速率 (kg/s);

h_{fg} —— 汽化潜热 (J/kg)。

(3) 一个分散相液滴的沸腾过程

液滴温度到达液滴的沸腾温度 T_{bp} , 即 $T_p = T_{bp}$; 液滴的质量大于不挥发分质量, 即 $m_p > (1 - f_{v0})m_{p0}$ 时, 在这个过程中, 液滴温度将一直保持在沸腾温度, $dT/dt = 0$ 由式(2)

$$\frac{dn_p}{dt} h_{fg} = hA_p(T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (3)$$

不考虑热辐射, 则

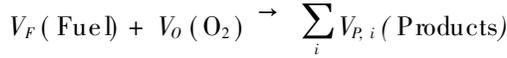
$$\frac{dn_p}{dt} h_{fg} = hA_p(T_\infty - T_p) \quad (4)$$

在灭火过程中, 细水雾主要处于 3 阶段和 2 阶段。

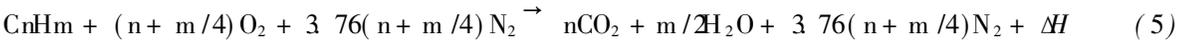
3 燃料燃烧特性对比及燃烧自灭试验

3.1 燃料的燃烧性质

燃料的燃烧反应如下:



那么燃料在空气中燃烧的方程式可以表示为



当燃料为乙醇时



消耗单位质量的氧气所释放的热量为 ΔH_{O_2} (kJ/kg)。那么耗费单位质量的燃料所释放的能量, 燃烧热 ΔH 可表示为

$$\Delta H \approx \frac{V_{\text{O}_2} M_{\text{O}_2}}{V M_f} \Delta H_{\text{O}_2}$$

其中: M —— 摩尔质量, kg/mol; V —— 摩尔数, mol; 下标“ f ”表示燃料。

从表 1 可看出, 乙醇和汽油的燃烧热 Q_L 相差较多, 但他们的混合气热值却很接近, 这是由于乙醇中含有较多的氧, 燃烧时所需的空气较少。所以用乙醇替代汽油应用于汽化器发动机, 从产生的动力来看, 只有很微小的降低 (低于 5%)。

3.2 乙醇和汽油的燃烧自灭试验

所谓燃烧自灭, 指的是燃料在全封闭空间进行一定时间的燃烧后, 由于部分氧气被燃烧掉, 燃烧会自行中止。试验箱是长 \times 宽 \times 高为 400 mm \times 400 mm \times 1 000 mm 的全封闭空间。试验油盘用 ϕ 100 mm。汽油和乙醇分别在密闭空间内从燃烧到自灭, 测量从燃烧到自灭时的含氧量变化。

试验结果表明: 乙醇燃烧持续 266 s, 氧含量最低达到 15.5%; 汽油燃烧持续 120 s, 氧含量最低达到 16.9%。由表 1 可见, 汽油的热值大, 所以汽油的燃烧速率就快。根据公式 (5), 汽油在单位时间单位面积的耗氧量大, 因此氧含量下降速率快, 在全封闭空间可持续燃烧的时间就短。而乙醇的热值小, 所以乙醇的燃烧速率就慢, 乙醇在单位时间单位面积的耗氧量小, 因此氧含量下降速率慢, 在全封闭空间可持续燃烧的时间就长。

表 1 车用汽油与乙醇的燃烧特性比较

Table 1 Comparison of combustion characteristic between ethanol motor spirit and common motor spirit

	车用汽油	乙醇
闪点 / $^{\circ}\text{C}$	- 58~ 10	11
最大燃烧速率 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.039	0.015
沸点 / $^{\circ}\text{C}$	110~ 150	78.4
燃烧热 Q_L ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	43 960	26 800
混合气热值 $Q_{\text{混}}$ /($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$)	83 860	81 200

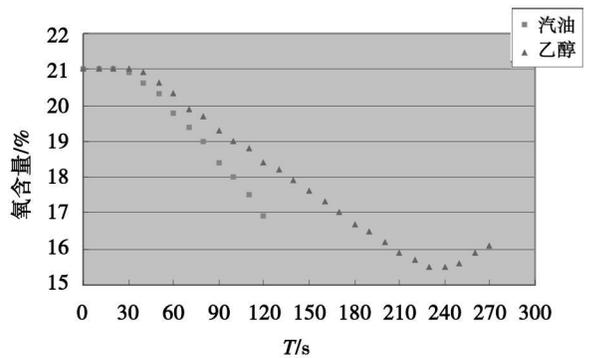


图 1 氧含量曲线

Fig 1 Oxygen content curve

间就长。从观察窗口观察到: 汽油燃烧一段时间后, 火势逐渐减小, 在燃烧 120 s 后, 汽油火就完全熄灭; 乙醇燃烧一段时间后, 火势也逐渐减小, 在燃烧 200 s 后, 乙醇火在液面微弱的燃烧, 直到 266 s 才完全熄灭。

4 多组分细水雾与细水雾对比试验

4.1 实验条件

实验室尺寸为: 长 6 m, 宽 4 m, 高 5 m。灭火对比试验过程中保持 2 m \times 2 m 的门处于打开状态。

燃料用柴油和汽油火,油盘直径为 $\phi 200$ mm,细水雾喷头距离油盘高 1 m,工作压力为 0.4 MPa,燃料预燃时间为 1 min。3种不同添加剂与纯水的比较试验结果如表 2。

表中纯水表示细水雾中未加添加剂,仅用普通自来水。#添加剂、2#添加剂、3#添加剂表示在自来水中添加的不同配方的添加剂。未加添加剂的细水雾称细水雾,添加添加剂的细水雾称多组分细水雾。

4.2 试验结果分析

由表 3 可见,未加添加剂的细水雾灭火时间最长,而且不能有效的扑灭汽油火。添加了添加剂的多组分细水雾灭火时间明显缩短,而且可以有效的扑灭汽油火。综合而言,#添加剂具有更好的灭火性能。以下的多组分细水雾均用 #添加剂。

5 多组分细水雾对汽油火、乙醇汽油火的灭火试验

5.1 试验条件

实验室尺寸长×宽×高为 10 m×10 m×6 m,顶部通风口长 2.4 m,宽 1.2 m。实验室布置见图 2。

试验用细水雾喷头性能:

$$K = 5$$

$$K: \text{流量系数, 单位: } L/m \cdot \text{in} \cdot \text{bar}^{\frac{1}{2}}, \left(\frac{q}{\sqrt{P}} \right)$$

喷雾角 $\theta = 120^\circ$

雾滴直径 $d_{32} < 200 \mu\text{m}$

灭火试验时,喷头压力分别为 10 bar、13 bar,喷头安装高度为 2.5 m,油盘直径为 0.8 m。汽油、乙醇汽油燃料的预燃时间为 1 min。

5.2 试验结果及分析

多组分细水雾对汽油、乙醇汽油的灭火时间见表 3。

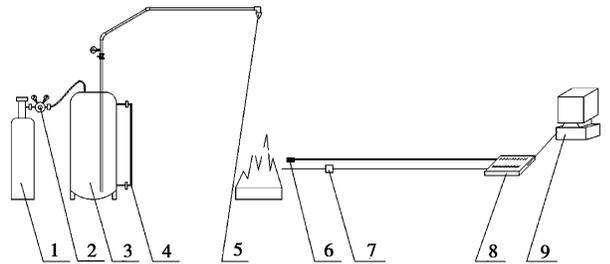
由表 3 可以看出工作压力在 10×10^5 Pa 时,多组分细水雾对汽油火的灭火时间为 138 s,而对乙醇汽油火却无法扑灭。当工作压力提高到 13×10^5 Pa 时,多组分细水雾可以扑灭汽油火和乙醇汽油火,扑灭汽油火的时间小于乙醇汽油。试验表明,用多组分细水雾扑灭乙醇汽油火时,灭火难度会比灭汽油火大,而且多组分细水雾灭火的工作压力也要提高,否则会出现无法扑灭乙醇汽油火的情况。

下面的图是在灭火过程中,测量点的温度和氧含量随时间的变化曲线。图中时间 $t = 0$ 为点火开始时刻, $t = 60$ s (虚线表示) 为多组分细水雾灭火开始时刻,曲线的终点为灭火结束。

图 3、图 4 表示的是细水雾分别在 10×10^5 Pa 和 13×10^5 Pa 压力下,灭乙醇汽油火时,温度随时间变化的对比曲线和氧含量随时间变化的对比曲线。可以看出,在灭火开始时,氧含量迅速的下降,在灭火 20 s 后又回升,这是由于在灭火开始阶段,环境温度最高,吸热蒸发作用最显著,水蒸气起到了稀释氧气的作用,但是由于外部空气的补充,同时温度降低水的蒸发速度降低,氧含量又回升。在 13×10^5 Pa 下,环境温度的下降趋势明显,而在 10×10^5 Pa 压力下,测量点的温度在降到 300°C ,氧含量在降到 19% 后,就不再下降,故火无法扑灭。

表 2 不同添加剂水雾灭火时间
Table 2 Fire-extinguishing time of water mists with different additives

水雾成分	柴油	汽油
纯水	41	灭不掉
1#添加剂	8	50
2#添加剂	13	83
3#添加剂	7	64



1—储气罐 (70L) 2—减压阀 3—储液罐 (250L)
4—液位计 5—细水雾喷头 6—氧浓度仪探头
7—热电偶 8—氧浓度测试仪 9—电脑 10—数据采集板

图 2 实验室布置图

Fig 2 Arrangement plan of laboratory

表 3 灭火时间

Table 3 Fire-extinguishing time

工作压力	10×10^5 Pa		13×10^5 Pa	
	汽油	乙醇汽油	汽油	乙醇汽油
灭火时间 / s	138	灭不掉	94	105

注:在试验中,对于在细水雾施放 3 min 后仍无法扑灭的火视为无法扑灭。

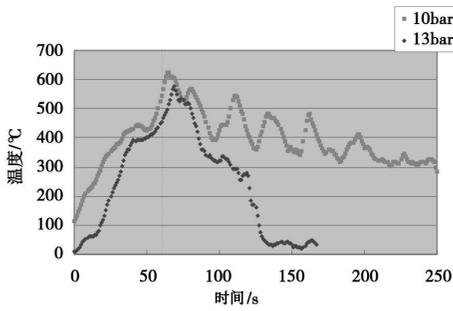


图 3 不同压力下乙醇汽油温度曲线

Fig 3 Temperature curves of ethanol motor spirit under different pressure

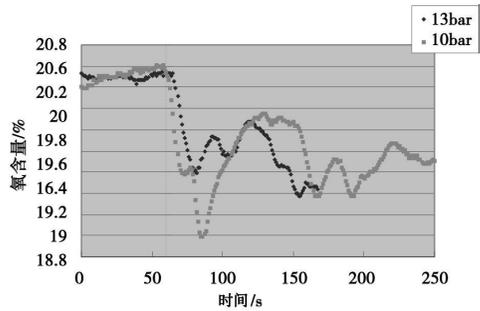


图 4 不同压力下乙醇汽油氧含量曲线

Fig 4 Oxygen content curves of ethanol motor spirit under different pressure

图 5 图 6 表示的是细水雾在 13×10^5 Pa 压力下, 分别灭乙醇汽油火和汽油火时, 温度随时间变化的对比曲线和氧含量随时间变化的对比曲线。可以看出乙醇汽油充分燃烧的温度要高于汽油, 温度下降趋势比较相近, 而乙醇汽油的灭火时间略高于汽油。

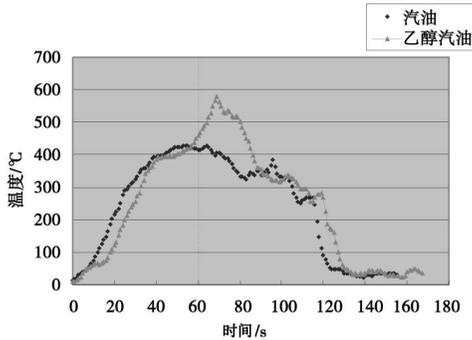


图 5 汽油和乙醇汽油的温度曲线

Fig 5 Temperature curves of motor spirit and ethanol motor spirit

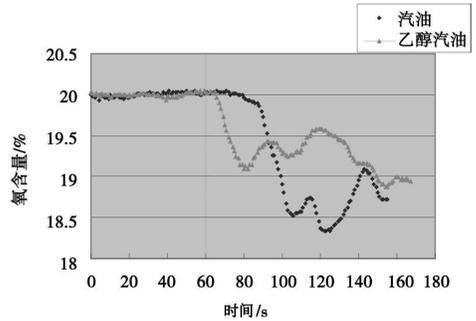


图 6 汽油和乙醇汽油的氧含量曲线

Fig 6 Oxygen content curves of motor spirit and ethanol motor spirit

6 结论

随着乙醇汽油在全国的推广使用, 其优越性将得到越来越多人的认同。本文通过试验证明: 多组分细水雾与普通细水雾相比具有更好的灭火性能。多组分细水雾可以有效的扑灭乙醇汽油火, 尤其是在相对敞开空间, 即可以发挥普通水的冷却窒息作用, 又可以发挥添加剂的物理和化学作用。因此在汽车库、停车库等由于乙醇汽油或汽油引发的火灾场所, 使用多组分细水雾灭火系统是适宜的。

由于乙醇汽油的沸点, 闪点, 火焰温度, 热值, 蒸发潜热, 密度等参数与普通汽油不同, 通过试验证明它的灭火难度要高于普通汽油。因此, 除了对现有灭火装备、灭火药剂进行改造外, 还要尽快制订出一套切实可行的设计方法、试验规范用于对使用和存放乙醇汽油场所进行改造, 为新产品的开发研制提供一个设计规范和试验标准。

参考文献:

[1] 中国消防协会队伍建设和灭火战术专业委员会. 灭火手册 [M]. 1版. 上海: 上海科学技术出版社, 1989.
 [2] 胡传平, 阙兴贵, 苏琳, 杨志伟. 低压细水雾在船舶 A 类机械处所中的应用研究 // [C]. 中国科协 2004 年会.
 [3] 苏琳, 阙兴贵. 添加剂对细水雾灭火有效性的影响 [J]. 消防科学与技术, 2005, (1).
 [4] 黄乙武. 液体燃料的性质和应用 [M]. 北京: 轻工业出版社, 1985.
 [5] 卡拉宾 A И. 工业设备中液体燃料的燃烧 [M]. 1964.
 [6] Kuo K K Y. Principles of Combustion, John Wiley and Sons, New York, 1986
 [7] Ranz W E, Marshall W R. Evaporation from drops Part I [J]. Chem. Eng Prog., 1952, 48(3): 141- 146
 [8] Ranz W E, Marshall W R. Evaporation from drops Part II [J]. Chem. Eng Prog., 1952, 48(4): 173- 180.
 [9] Chemisnoff N. Encyclopedia of Fluid Mechanics Volume 3 Gas- Liquid Flows [M]. Gulf Publishing