

文章编号:2095-0411(2016)05-0087-06

微乳化柴油池火焰蔓延特性研究

黄 勇^{1,2}, 解立峰², 鲁长波³, 安高军³, 熊春华³, 杨 克¹

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094; 3. 中央军委后勤保障部 油料研究所, 北京 102300)

摘要:为掌握微乳化柴油的阻燃性能,促进其配方的改进,对-10# 军用柴油、普通微乳化柴油和抑爆型微乳化柴油等 3 类 6 种柴油进行了点火和池火焰蔓延特性实验,并对它们的实验现象进行了对比、分析。结果表明:-10# 军用柴油比微乳化柴油易引燃,而相同含水量情况下,抑爆型微乳化柴油又比普通微乳化柴油容易引燃;抑爆型微乳化柴油与普通微乳化柴油相似,在受热过程中,油液表面将产生大量气泡阻挡主火焰蔓延前进。当气泡中蒸汽压力增大,水蒸汽冲破油膜束缚析出后,将稀释主火焰前方液面的油蒸气浓度,使池火焰呈脉动向前蔓延,火焰蔓延速度也明显比-10# 军用柴油小。微乳化柴油表面流的预热效果较差,主要因为本身粘性较大以及其中的水分吸热作用,造成油面升温速率低,油气蒸发慢,火焰难以持续向前蔓延。微乳化柴油的阻燃作用主要依赖水分,并且含水量越大,阻燃作用越强。

关键词:微乳化柴油;点火;池火焰;蔓延;表面流

中图分类号:X 932

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2016.05.016

Study on Pool Flame Spread Characteristics of Microemulsion Diesel Fuel

HUANG Yong^{1,2}, XIE Lifeng², LU Changbo³, AN Gaojun³, XIONG Chunhua³, YANG Ke¹

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. Beijing POL Research Institute, Beijing 102300, China)

Abstract: In order to grasp the fire suppression performance and improve its formulation, ignition and pool flame characteristics, experiments of -10# military diesel fuel, ordinary microemulsion diesel fuel and an explosion suppression microemulsion diesel fuel were carried out and the experimental phenomena were contrasted and analyzed. The results show that -10# military diesel fuel is easily to ignite than that of microemulsion diesel fuel, but so is the explosion suppression microemulsion diesel fuel relative to ordinary microemulsion diesel fuel with the same water content. In the process of pool flame spread, the oil surface can produce a large number of steam-in-oil bubbles because the water is heated to evaporation and steam dilutes the oil vapor concentration when the steam pressure of the bubble increases to break through the oil films, which hinder the pool flame spread in a row and lead to smaller spread speed of pool flame than that of -10# military diesel fuel. And surface flow preheating effect of microemulsion diesel fuel is poor due to higher viscosity and water heat-absorbing action. The velocity of temperature rise and the vaporability of fuel oil surface are low, causing the flame difficult to spread forward. On the whole,

收稿日期:2016-05-06。

基金项目:国家科技部国际科技合作重大专项资助(2013DFR60080);江苏省科技支撑计划项目(BE2014735)。

作者简介:黄勇(1978—),男,江苏南京人,博士,工程师,主要从事燃烧、爆炸及其作用机理、化工安全技术研究。

fire suppression performance of the explosion suppression microemulsion diesel fuel is not stronger than that of ordinary microemulsion diesel fuel. The performance largely depends on water in the oil and the greater water content is, the stronger fire suppression performance is.

Key words: microemulsion diesel fuel; ignition; pool flame; spread; surface flow

柴油被广泛用作大型车辆、舰船和武器装备的燃料,一旦车辆发生交通事故或装甲车辆、装备遭受炮火袭击,都可能会引燃引爆油料造成重大人员伤亡和财产损失。因此,从 20 世纪 60 年代开始,美国、俄罗斯两国先后开展了阻燃功能柴油技术的研究^[1]。这种具有阻燃功能的柴油是以微乳化体系为基础的含水柴油,动力性能基本保持不变,作用是通过微乳化柴油自身的防火性能使其不易着火。近年,国内鲁长波等^[1]学者在美、俄微乳化体系含水柴油中添加高分子聚合物抑爆剂,制备成一种新型抑爆微乳化柴油,目的是加强其抑爆作用,但其阻燃功能并没有被掌握。

本文开展-10#军用柴油、普通微乳化柴油和抑爆型微乳化柴油的点火和池火焰蔓延实验、火焰蔓延液面温度实验,对 3 类柴油的最小引燃能量、火焰蔓延过程和液面温度进行对比、分析,掌握微乳化

柴油的池火焰蔓延过程以及其中水分对其引燃、池火焰蔓延过程的影响。

1 实验部分

1.1 实验样品

实验样品为-10#军用柴油、普通微乳化柴油和抑爆型微乳化柴油等 6 种柴油,编号为 1 号的柴油为-10#军用柴油。其他 5 种柴油按照普通微乳化柴油、抑爆型微乳化柴油分类,可以分为两个系列,即系列 I:普通微乳化柴油,水分的质量分数(简称:含水量)分别为 5%、10%、15%,为 2 号、3 号、4 号柴油;系列 II:含水量为 5%且另外添加了 0.2%、0.4%抑爆剂的抑爆型微乳化柴油,为 5 号、6 号柴油。6 种柴油的组成(ω 为组分的质量分数)和 20℃ 的理化性质如表 1 所示。

表 1 柴油样品的组成和理化性能

Table 1 Component and physical & chemical properties of diesel fuel samples

实验样品编号	$\omega/\%$				密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	运动黏度 $\times 10^6$ / ($\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	黏性系数 $\times 10^3$ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	表面张力 $\times 10^3$ / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
	-10#军用柴油	表面活性剂	水	抑爆剂				
1 号	100	0	0	0	794.1	3.934	3.124	31.64
2 号	84.27	10.73	5	0	803.8	6.477	5.206	32.53
3 号	79.83	10.17	10	0	847.1	7.390	6.260	31.08
4 号	73.00	12.00	15	0	849.8	10.208	8.675	31.44
5 号	84.27	10.73	5	0.2	843.5	12.011	10.131	32.11
6 号	84.27	10.73	5	0.4	832.4	22.240	18.513	33.48

1.2 实验装置

1.2.1 点火和池火焰蔓延实验装置

点火和池火焰蔓延实验装置主要由燃烧槽、单反相机、脉冲高压点火器、点火杆等组成。

燃烧槽的长 \times 宽 \times 高为 27.5cm \times 8.5cm \times 4cm,材质为 20 号钢。高压点火器及其点火杆布置在燃烧槽一端,Nikon D90 型单反相机设置在燃烧槽正上方约 2.5m 处,从上方竖直向下拍摄柴油池火焰的蔓延情况,实验装置如图 1 所示。

1.2.2 液面温度实验系统

池火焰蔓延液面温度实验系统主要由油池、单反相机、Mikronscan 7200V 型红外热成像仪和温度采集系统等组成。文献[2]认为液体燃料火蔓延火焰由点燃发展至稳定蔓延,长度需要 15cm 距离,宽度至少大于 1cm,而液面下表面流厚度为 5cm。因此,实验油池的尺寸需要满足火焰稳定蔓延条件,采用的油池的长 \times 宽 \times 高为 100cm \times 4cm \times 12cm。油池中部是由高硼硅酸盐耐火玻璃构成的观察窗,观察窗的长 \times 高为 40cm \times 12cm,油池其他部位由厚度为 0.4cm 的钢板构成。距离端面 3cm 处设置

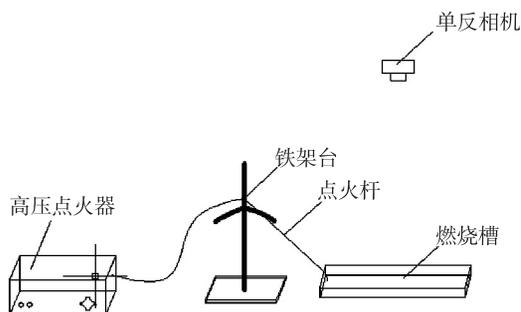


图1 点火和池火焰蔓延实验装置图

Fig.1 Experiment setup for ignition and spread of pool flame

1个高14cm,宽4cm的可抽挡板,将点火区和火焰蔓延区域分开。油液温度采集系统包括5根 $\phi 1\text{mm}$ 的K型铠装热电偶,测量范围 $0\sim 900^\circ\text{C}$,热响应时间最小为0.1s。热电偶与油液面等高。

1.3 实验方法

点火和池火焰蔓延实验:将30mL油样倒入燃烧槽中,并随燃烧槽放入水浴锅中加热。当油样加热至实验温度时,将燃烧槽迅速取出,并擦干外部,放置在指定位置,然后运用高压点火器在燃烧槽一端进行点火,等点火区燃烧稳定后将点火区的挡板抽出以便池火焰蔓延。

火焰蔓延液面温度实验:水浴加热到 35°C 的柴油样品注入油池至10cm高后,在油池一端的点火区注入少量92#汽油,待汽油完全燃烧引燃柴油样品至稳定燃烧后,将挡板抽出,使火焰沿液面自由蔓延,同时记录和采集火焰蔓延过程、油面温度等情况。

2 实验结果与分析

2.1 点火方式和最小引燃能量

采用电火花、蘸上柴油的石棉绳等方式均不能引燃1号柴油,因此进一步增大引燃能量,采用火焰多级点火方式,即首先利用高压点火器电火花引燃92#汽油(点火前将少量92#汽油注射到燃烧槽一端的1号柴油中),形成能量较大的引燃火焰,再使用该火焰引燃1号柴油直至持续燃烧,实现燃烧工况,并得到最小引燃能量。最小引燃能量指能够引燃液体燃料,并且使它发生持续燃烧或蔓延的最小能量。图2反映的是样品初始温度为28、45、60 $^\circ\text{C}$ 和77 $^\circ\text{C}$ 所需的最小引燃能量 E_0 。

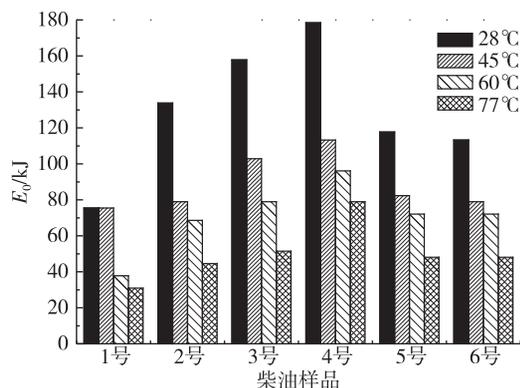


图2 不同初始温度柴油样品所需的最小引燃能量

Fig.2 Minimum ignition energy of diesel fuels at different initial temperatures

由图2可知,总体上随着柴油样品初始温度的升高,油样被引燃所需要的能量越少。1号柴油在各个温度下均是最容易引燃的,它在28 $^\circ\text{C}$ 和45 $^\circ\text{C}$ 时的最小引燃能量几乎相同,约为75.46kJ。

系列I普通微乳化柴油随着含水量的增加,油样最小引燃能量也越大,说明油样中的水分对其引燃难易程度有重要影响,尤其油样在初始温度较低时,水分的影响更大。随着初始温度的升高,油样中水分的蒸发失去以及油蒸气浓度更高,水分的影响将减小,例如,4号柴油在其初始温度为28 $^\circ\text{C}$ 和45 $^\circ\text{C}$ 时,最小引燃能量相差65.17kJ,而在其初始温度为45 $^\circ\text{C}$ 和60 $^\circ\text{C}$ 、60 $^\circ\text{C}$ 和77 $^\circ\text{C}$ 时,最小引燃能量相差均只有17.15kJ。

系列II抑爆型微乳化柴油的最小引燃能量明显小于系列I普通微乳化柴油,这是因为其中的抑爆剂促进了油样的燃烧。抑爆型微乳化柴油中的高分子聚合物在燃烧过程中会产生多环芳香烃,多环芳香烃又将进一步聚合生成碳黑颗粒,碳黑颗粒在火焰中会造成火焰热辐射损失。然而,抑爆型微乳化柴油中蒸发出的水蒸汽,将分解更多的 $\text{H}\cdot$ 、 $\cdot\text{O}\cdot$ 和 $\cdot\text{OH}$ 自由基^[3], $\cdot\text{OH}$ 自由基是燃烧火焰中碳黑粒子的主要氧化剂^[4],高浓度的 $\cdot\text{OH}$ 自由基氧化碳黑前驱体,抑制碳黑颗粒的形成,将减少热辐射损失,导致燃烧加强^[5]。

2.2 主火焰蔓延过程

为了统一实验条件,选定引燃初始温度为28 $^\circ\text{C}$ 的4号油样所需的引燃能量(178.36kJ)作为池火点火源。图3是6种油样在初始温度为28、77 $^\circ\text{C}$ 时黄色主火焰锋面的运动轨迹图,它表示不同时刻的主

火焰锋面位置到点火初始点的距离 s 。追踪主火焰

锋面运动轨迹使用的是 ProAnalyst 软件。

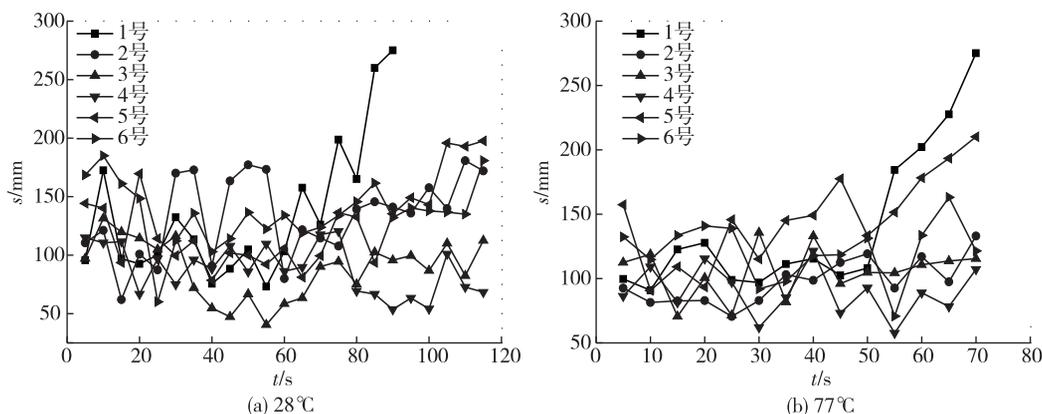


图 3 主火焰锋面的运动轨迹图

Fig.3 The trajectories of main flame front

从图 3(a)可以看出,28℃下 1 号柴油的主火焰是以一种“前进一后退一前进”的模式脉动向前蔓延的,即 1 号柴油主火焰锋面向前蔓延后又会后退,然后是更大幅的前进,因此在 90s 时即达到了燃烧槽另一端,这类脉动蔓延方式的产生,主要是由于燃油初温较低时,柴油表面的可燃蒸气浓度不够支持火焰的持续向前蔓延。其他 5 种油样的火蔓延模式是相近的,火焰是以“前进一后退一前进”和“前进一停滞一后退一前进”等模式相结合的形式向前蔓延,主火焰在蔓延过程中有明显的停滞现象。含水量越高,停滞阶段越长,显然这是因为水分蒸发吸热,导致油温较低,主火焰前方液面的蒸发速度较小,而且水蒸发形成的水蒸汽稀释了油面上方的油蒸气浓度,勉强达到燃烧下限。

由图 3(b)可见,油样初始温度为 77℃时,同一个油样的同时刻火焰蔓延距离要大于 28℃时的距离,如 1、5、6 号柴油在 70s 时已达到或接近燃烧槽的另一端。但是,含水量较大的 3、4 号柴油火焰蔓延距离仍较小,而且其前进一后退幅度的波动较大,说明含水量大的油样析出大量水蒸汽稀释了主火焰前方液面的油蒸气浓度,当火焰蔓延至前方液面,由于油蒸气浓度不足,造成主火焰又后退。因此,微乳化柴油的含水量对其池火焰蔓延速度有决定性的影响。

图 4 是 1、2、4、6 号的柴油在 28℃初始温度下的火焰蔓延过程图片。28℃下 1 号柴油比其它 3 种柴油的主火焰蔓延过程更连续。2、4、6 号柴油均含有一定水分,在主火焰蔓延过程中,闪火焰区和无火焰的液面被加热,由于水的沸点较低,水分子首先汽化,大量的水蒸汽要穿过油层向液面上浮,但在油膜

的束缚下形成大量油包气的气泡,气泡阻挡主火焰蔓延通道,阻碍了其连续蔓延。特别是含水量最大的 4 号柴油,其主火焰蔓延过程与其它柴油相比有明显区别,它从 60s 时开始火焰锋面前就产生了气泡,80s 时气泡越来越多,阻挡了蔓延通道,主火焰在气泡没有破裂前只能从燃烧槽两侧气泡较少处向前蔓延,并且可以观察到此时有少量的气泡,其内部蒸气受热膨胀产生的巨大压力冲破了油膜的束缚,达到沸点的水蒸汽带着蒸发、燃烧的油液一起沸腾,出现沸溢现象。因此,图 4 的实验现象与图 3(a)的主火焰蔓延距离曲线结果较为一致,80~110s 阶段 4 号柴油的主火焰蔓延总体呈后退趋势,其蔓延距离小于初始阶段的蔓延距离,主要是水蒸汽的析出导致主火焰前方液面上方的油蒸气浓度下降,小于燃烧下限。5、6 号抑爆型微乳化柴油含水量较小,主火焰蔓延速度较 4 号柴油稍大,但也出现明显的火焰蔓延停滞现象,因此火焰蔓延除了受到水蒸汽稀释油蒸气浓度影响外,还受火焰锋面前方燃料表面温度分布和温升过程控制影响,水分子吸热导致主火焰下面的油液温度低于含水量小油液的温度,影响前方油面的油蒸气蒸发,抑制了主火焰蔓延前进。

2.3 火焰蔓延液面温度

2.3.1 主火焰蔓延控制机制

通过实验发现,-10# 军用柴油火焰蔓延模式从液相控制到气相控制的临界温度约为 102℃,即此刻火焰的蔓延基本不受燃料初始温度的影响,主要依赖于柴油蒸气浓度大小,因此初始温度为 35℃的柴油样品火焰蔓延为液相控制。液相控制模式下

火焰前方燃料表面存在和火焰蔓延方向一致的表面流^[6-7]。表面流是燃料表面浮力和表面张力共同作用的结果,由于火焰下方燃料表面的局部升温,沿着燃料表面存在温度梯度,在燃料表面张力的推动下表面流向前运动,同时在表面浮力的作用下靠近燃

料表面的热流体将被提升和稳定下来^[8-10]。表面流的预热作用是液相控制火焰发生脉动蔓延的主要机制,这种作用提高了燃料蒸发速率,在主火焰作为点火源情况下,产生紧贴燃料表面的脉动蔓延的闪燃火焰。

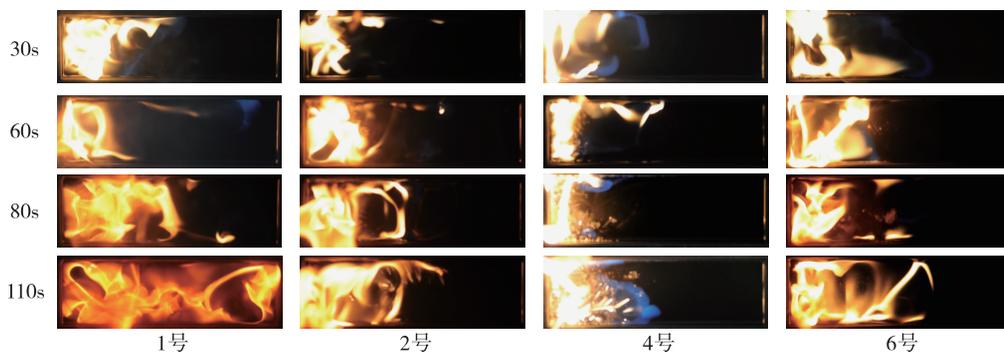


图 4 主火焰蔓延过程

Fig.4 The course of main flame spread

2.3.2 表面流预热的油面升温情况

燃料火蔓延过程中的火焰结构还可分为主火焰区、闪火焰区和预热区等 3 个区。预热区是表面流通过的路径,即火焰通过表面流预热前方燃料的区域,因此预热区为闪火焰面至前方液体表面温度降低至燃料初温的位置。预热区燃料表面温度 θ 的范围为 $\theta_s < \theta < \theta_i$, θ_s 指燃料初始温度, θ_i 指燃料开杯闪点,燃料表面温度随着燃料初始温度不断升高,但燃料表面上方可燃蒸气浓度无法达到燃烧极限,燃料表面上方没有燃烧现象^[7]。

通过红外热成像仪拍摄火焰蔓延过程可以看到主火焰区、闪火焰区和预热区的油面温度分布,如图 5 所示。从热成像图中可以看出,颜色最深处温度最高,为主火焰区,然后逐渐过渡到闪火焰区和预热区。由预热区燃料表面温度范围可知,柴油液面从 102℃ 处到液面浅色部分直至深色部分(表示柴油初始温度)均为预热区。

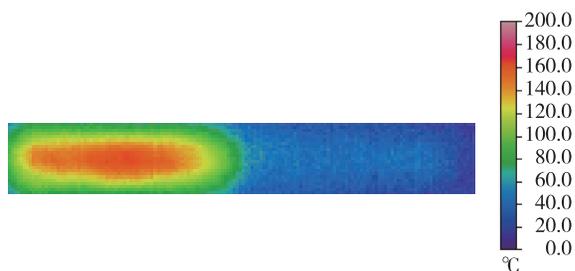


图 5 柴油液面温度热成像图

Fig.5 Infrared image of surface temperature of diesel fuel

运用 Micronscan 7200V 型红外热成像仪自带的图像处理软件在热成像图火焰蔓延方向上取中心线,即可以得到中心线上火焰前方油面的温度分布,如图 6 所示。从图 6 中可以看出在火焰前方存在长度约为 200mm 的预热区。预热区的温度总体是离火焰越远,温度越低,温度衰减速率也越大。

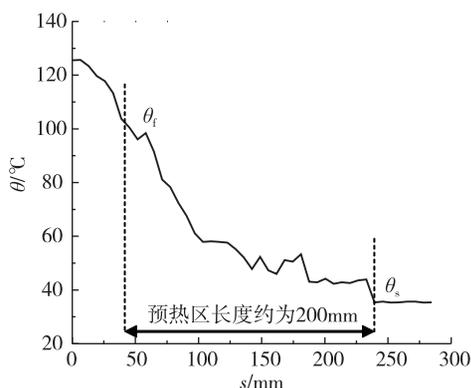


图 6 油池中线温度分布及预热区长度

Fig.6 The length of preheating zone and temperature distribution of the midline of fuel pool

选取第 3 根热电偶采集到的温度数据,对比、观察 6 种油样该点油面受到表面流预热的情况,如图 7 所示。

图 7 中显示的油面温度曲线上升的阶段即为表面流作用开始预热该点油面直到主火焰蔓延至该点油面。从图 7 中可以看出同样实验条件、同处油面、不同油样油面的温度变化规律:1 号柴油油温上升最快,并且主火焰下方柴油液面的最高温度超过

120℃。3、4号柴油温度上升较缓慢,而且主火焰下方液面的最高温度也只有75℃左右,这是由于它们的含水量较高,部分热量会被水分吸收。6号柴油虽然含水量只有5%,不及3、4号柴油,但是它的粘性更高,表面流与6号油液之间的对流运动比较困难,热交换效率低,因此6号柴油油温上升最缓慢,而且6号柴油蒸发速率低,闪火焰脉动过程时间长,主火焰到达该点总共需要近70s,主火焰下方液面的最高温度也只有63.9℃。

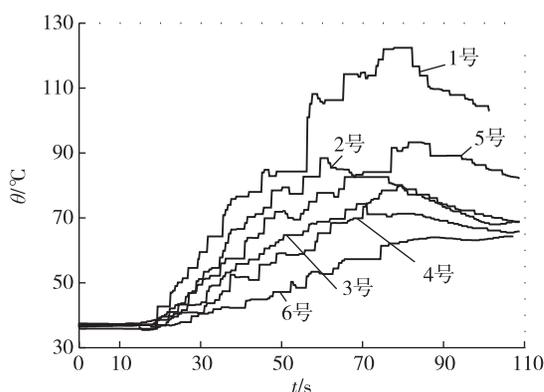


图7 油面温度随时间变化曲线

Fig.7 The variation of fuel surface temperature with time

另外4根热电偶测得的油面温度上升规律与第3根热电偶测得的油面温度变化规律相近。因此,普通微乳化柴油、抑爆型微乳化柴油主火焰蔓延速度低,火焰停滞时间长、不连续的主要原因之一就是表面流的预热效果差,油面的温度较低,油液蒸发速率较小,上方的蒸气不能支持火焰持续向前蔓延。

3 结论

1)微乳化柴油比-10#军用柴油难引燃,并且随着含水量增加,微乳化柴油的最小引燃能量逐渐增大。相同含水量情况下,抑爆型微乳化柴油要比普通微乳化柴油容易引燃,主要原因是抑爆型微乳化柴油中的抑爆剂有强化燃烧的作用。

2)微乳化柴油受热过程中,油液表面产生大量气泡阻挡主火焰蔓延前进,并且当气泡中蒸汽压力增大,水蒸汽冲破油膜束缚析出后将稀释主火焰前方液面的油蒸气浓度,使池火焰不能连续蔓延,并且含水量越大,微乳化柴油池火焰蔓延速度越小。

3)微乳化柴油表面流的预热效果远比-10#军用柴油差,其油面升温速率低,油气蒸发慢,火焰难以持续向前蔓延。

4)抑爆型微乳化柴油的阻燃作用没有普通微乳化柴油显著,它的阻燃作用仍主要依赖水分,含水量越大,阻燃作用越强。

参考文献:

- [1] LU C B, AN G J, XIONG C H, et al. Progress on fire and explosion suppression technologies for light petroleum fuel [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 84: 384-393.
- [2] WHITE D, BEYLER C L, FULPER C, et al. Flame spread on aviation fuel [J]. *Fire Safety Journal*, 1997, 28 (1): 1-31.
- [3] 傅维镛, 龚景松, 侯凌云. 含水燃料的燃烧 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [4] NEOH K G, HOWARD J B, AAROFIM A F. Effect of Oxidation on the Physical Structure of Soot [C]//20th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh: Elsevier Inc, 1984.
- [5] 江治. 纳米材料在高能燃料中燃烧机理和水雾对聚合物燃烧特性影响的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- [6] AKITA K, FUJIWARA O. Pulsating flame spread along the surface of liquid fuels [J]. *Combustion and Flame*, 1971, 17(2): 268-269.
- [7] 陈国庆. 航空煤油火焰蔓延特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [8] LI M H, LU S X, GUO J, et al. Effects of pool dimension on flame spread of aviation kerosene coating on a metal substrate [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 84: 54-60.
- [9] 郭进, 陆守香, 周劭波, 等. 不同初始温度对航空煤油表面火蔓延的影响 [J]. *燃烧科学与技术*, 2011, 17(2): 165-169.
- [10] 郭进. 航空煤油表面火焰脉动及表面流特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.

(责任编辑:殷丽莉)