

# 喷油温度对生物柴油雾化特性的影响研究\*

石复习 陈军

(西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为准确了解生物柴油温度对雾化效果的影响规律,通过自制高响应温度传感器,测试了大豆脂肪酸甲酯(SFAME)在S195型发动机额定工况下盛油槽温度的变化;在共轨喷油系统上模拟发动机工作时的喷油温度,使用马尔文粒径测试仪,测取了不同喷油温度下雾滴粒径分布的变化情况。结果表明:S195型发动机在稳定的额定工况下,喷油温度在喷油始点为281℃,喷油过程中呈下降趋势;通过控制供油管路上的加热装置,提高喷油温度可使雾滴的索特平均直径(SMD)减小,但随着喷油温度升高雾滴直径的减小趋势减缓;预热喷油器前的生物柴油,能提高喷雾过程后期的喷油温度,有利于改善雾化效果。

**关键词:** 生物柴油 喷油温度 雾化特性

中图分类号: TK46<sup>+</sup>4; TK421<sup>+</sup>.43 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)07-0033-06

## Influence of Injection Temperature on Atomization Characteristics of Biodiesel

Shi Fuxi Chen Jun

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence law of injection temperature on biodiesel atomization effect accurately, using self-designed high response thermocouple, the filled trough temperature variation of the soybean fatty acid methyl ester (SFAME) were measured under the rated conditions of S195 engine. In the common rail fuel injection system, the injection temperature under engine working condition was simulated. With the Malvin particle measuring instrument, the variation of droplet diameter distribution was measured under different injection temperatures. The experimental results showed that the injection temperature was 281℃ at fuel injection beginning under the stable rated conditions of S195 engine, and presented a downtrend during the injection duration. With the control of heating device of oil supply line, the Sauter mean diameter (SMD) could be decreased by increasing the injection temperature, but increase trend of SMD was slow down with the increasing injection temperature. The preheating of biodiesel before injector will increase injection temperature in the spray process later and improve the atomization effect.

**Key words:** Biodiesel Injection temperature Atomization characteristics

### 引言

燃油的雾化质量由喷油系统内的液体动力学特性、喷油器的几何结构、燃油本身的物理属性及其在雾化环境中气体动力作用共同决定;使用相同的喷油系统和雾化参数时,由于生物柴油的粘度、表面张

力、密度、体积弹性模量和饱和蒸气压等物理特性,与石化柴油存在差异,造成生物柴油比石化柴油的雾化效果差。

Chhetri等<sup>[1]</sup>和Mustafa等<sup>[2]</sup>验证了生物柴油的粘度与温度的关系符合改进的安德拉德方程。Carlos等<sup>[3]</sup>给出了基于温度的生物柴油密度和粘度

收稿日期: 2013-01-26 修回日期: 2013-03-06

\* 国家自然科学基金资助项目(61101210)和公益性行业(农业)科研专项资金资助项目(201203016)

作者简介: 石复习,博士生,主要从事智能化农业装备研究,E-mail: shifuxi2008@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 陈军,教授,博士生导师,主要从事智能化农业装备研究,E-mail: chenjun\_jdxy@nwsuaf.edu.cn

的预测模型。Esteban 等<sup>[4]</sup>研究了生物柴油在发动机上使用的温度范围,以及通过密度推断表面张力的关系式。张建明等<sup>[5]</sup>给出了柴油粘度、密度、体积弹性模量和饱和蒸气压等与温度和压力的函数关系式。这些研究指出:生物柴油的粘度、密度和表面张力随压力增加而增加,随温度的升高而减小。据文献[6]试验数据,压力对生物柴油粘度的影响较温度影响作用小,随着压力的增加,压力对粘度的影响效果明显降低,高温时可被忽略。文献[7]通过对 80℃ 时 7 种生物柴油及其 17 种混合油表面张力、粘度和密度的分析,阐明生物柴油物理特性与雾化粒径之间的关系,指出粘度差异对索特平均直径(SMD)的影响程度达到约 90%,而密度的影响只占 2%,降低粘度成为改善生物柴油雾化效果的首选。

文献[8~11]等进行了油箱预热、喷前温度检测等研究,表明提高生物柴油温度对雾化效果和发动机性能有改善作用。文献[2]指出较低密度和粘度的生物柴油在喷射时表现出更短的启喷延时和较低的峰值喷射率;粘度和表面张力的减小能改善雾化效果。文献[6]详细分析了燃油温度对喷孔内气穴和喷雾形成的影响机理。这些研究说明在特定的喷油系统中,提高喷孔前生物柴油温度,降低了喷射时生物柴油的粘度、密度和表面张力等物理参数值,使雾化效果得到改善。

在固定结构的发动机喷油系统中,相同物性燃料的雾化效果由喷孔前盛油槽内的燃油压力和温度决定<sup>[12]</sup>;发动机工作时,高压油管内的燃油温度会升高,喷油器置于温度交变的气缸内,其喷孔端温度会更高,喷射燃油被喷油器持续加热,喷油雾化效果也相应发生变化。将喷油器盛油槽内的燃油温度定义为喷油温度,能更直接反映燃油喷射时的温度状态。本研究以大豆脂肪酸甲酯(SFAME)为燃料,测取不同工况下的喷油温度,并探讨使用辅助加热方法改变喷油温度时,生物柴油雾化粒径的变化趋势;讨论燃油喷射温度对雾化机理的影响。

## 1 试验设置和过程

为获得发动机工作温度下的喷油粒径分布,首先通过改造 S195 型发动机试验台,分别在油箱出口、喷油器入口和针阀座设置 3 个铠装热电偶,在喷油器内埋植自制快速响应镍铜-镍铬表面热电偶,实现对盛油槽温度的快速测量,不同工况下的油箱温度、喷油器入口温度、针阀座温度和喷油温度的测量;其次,将 S195 型发动机的高压油管和喷油器整体移植到共轨喷油试验台上,根据发动机试验测得的供油管路各点温度,通过 3 组加热器 R1、R2、R3

的协调加热,实现对额定工况时管路温度拟合与调整,并使用马尔文粒径测试仪,测取喷油温度变化时定容弹内生物柴油索特平均直径的相应变化。

### 1.1 发动机工作状态喷油温度测量

喷油器内部的盛油槽温度测量存在两个难点:首先,针阀偶件内的盛油槽结构空间狭小、配合精密,要求温度传感器结构尺寸小;其次,在 2000 r/min 额定转速下,喷油持续时间约为 1.25 ms,曲轴转角 1°CA 对应的时间约为 83 μs,根据采样规律  $f \geq 2f_0$  的要求,热电偶的时间常数在 42 μs 以内,才能实现 1°CA 曲轴转角范围内的温度采样<sup>[13]</sup>。

#### 1.1.1 表面热电偶的标定

为试验制作的镍铜-镍铬表面热电偶,溅射膜厚度 5 μm,直径 2 mm,适合针阀偶件内狭小空间布置。对热电偶进行检定炉静态标定<sup>[14]</sup>,如图 1 所示;经线性回归分析,决定系数  $R^2$  为 0.998 4,表明制作的热电偶测温线性度较好,并且其热电势输出值较大。

使用文献[15]的薄膜热电偶电加热法进行动态标定,如图 2 所示,测得热电偶 0℃ 到 300℃ 阶越时的时间常数为 42 μs,满足本试验测试要求。

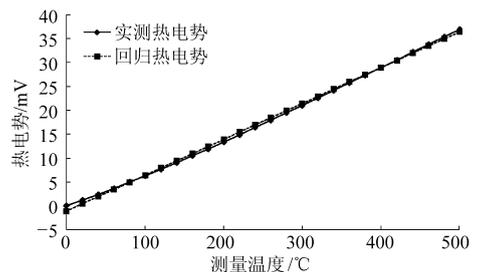


图 1 静态电势测量结果

Fig. 1 Result of static potential measurement

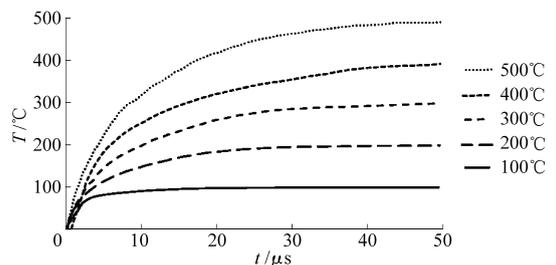


图 2 热电偶动态响应曲线

Fig. 2 Curves of dynamic potential measurement

#### 1.1.2 喷油器内热电偶的布置

根据 S195 喷油器的结构特点,在喷油器上打孔将直径为 2 mm 的传感器嵌入,热电偶感温端通过针阀座上 3 个进油道中的 1 个,深入到针阀座内的盛油槽,直接测量盛油槽燃油的实时喷油温度  $T_1$ ,如图 3a 所示;为防止泄漏,喷油器阀体与热电偶间用 XZ-T002 型耐高温粘合剂进行密封。

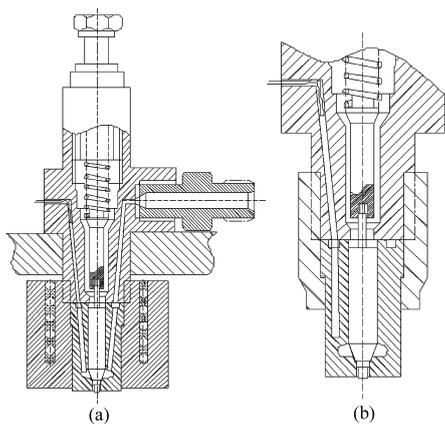


图 3 热电偶及加热器的安装位置

Fig.3 Installation position thermocouple and heater

(a) 盛油槽温度传感器及加热器安装位置

(b) 针阀座温度传感器安装位置

针阀座温度  $T_2$  测量选用普通 K 型铠装热电偶, 时间常数 90 ms, 探头部分直径 2 mm, 安装方法与油温测量热电偶相同, 但探头部分埋植于针阀座内, 温度探头顶端距离盛油槽壁面 2 ~ 3 mm, 如图 3b 所示。

### 1.1.3 工作状态喷油温度的测取

使用 S195 型发动机试验台, 安装内置两个测温热电偶的喷油器; 盛油槽油温  $T_1$  信号经偏压电路, 由 FY73 型交直流放大器进行信号放大, 利用 YB4328DF 双踪示波器进行采集; 针阀座温度  $T_2$  直接由补偿导线接入 KS50-1 温控器, 显示数值; 喷油器入口燃油温度  $T_3$  和油箱温度  $T_4$ , 采用与  $T_2$  相同的 K 型热电偶,  $T_3$  热电偶使用 T 型管接头置于高压油管和喷油器之间,  $T_4$  热电偶浸没在油箱内。试验中, 发动机在 25%、50%、75%、100% 负荷及空载等工况稳定运行时, 测取  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  的数值, 结果如图 4 所示。

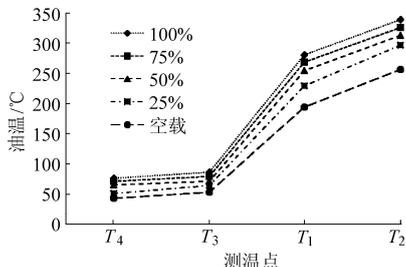


图 4 各工况供油系温度分布

Fig.4 Temperature distribution of fuel supply line under different working conditions

本试验在 S195 型发动机额定工况下, 喷油压力 12.5 MPa, 喷油区间为  $-18^\circ \sim -5^\circ$ , 喷油温度在喷油始点时最高达到  $281^\circ\text{C}$ , 且在喷油过程中呈下降趋势, 结果如图 5 中  $T_{1a}$  所示。这是由于盛油槽容积与循环喷油量的比值范围为 1:10 ~ 1:15, 而喷射持

续时间与单次工作循环时间的比值约为 1:30, 使喷油器内燃油静止加热时间长, 温升较大, 而来自喷油器外的大部分燃油温度较低, 使喷射过程中喷出燃油温度不断降低, 但由于喷油器所处的高温状态, 燃油在喷油器内被加热, 喷油结束时最低  $267^\circ\text{C}$ 。

图 5 中的曲线  $T_{1b}$  是在使用加热器 R3 加热高压油管, 使喷油器入口温度  $T_3$  达到  $214^\circ\text{C}$  时取得的, 这时喷油过程中喷油温度  $T_{1b}$  基本维持  $281^\circ\text{C}$ ; 这表明提高喷油器入口燃油温度, 可以改变喷射过程中的喷油温度。两种状态下, 由于 K 型热电偶的响应时间较长, 测得的针阀座温度  $T_2$  基本保持  $339^\circ\text{C}$  不变。

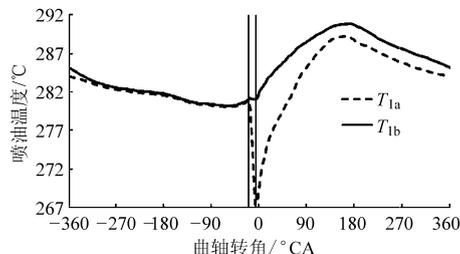


图 5 额定负荷喷油温度调整效果

Fig.5 Adjustment result of injection temperature under rated condition

## 1.2 高温喷雾特性测试

对高温下的喷雾粒径进行缸外测量, 需要对供油管路工作温度进行拟合, 使用定容弹和马尔文设备来实现。

### 1.2.1 工作喷油温度的拟合方案

如图 6 所示, 设置油箱水浴加热、高压油管和喷油器电阻加热; 经过试验验证, 根据表 1 方案可对发动机 5 种工况的喷油温度  $T_1$  进行拟合。由于  $T_1$  在喷油持续期变化较大, 取喷油始点和喷油终点温度的算术平均值为拟合目标值。

表 1 工作状态喷油温度模拟方案

Tab.1 Injection temperature simulation scheme in working

发动机工况/%	100	75	50	25	0
喷油温度 $T_1/^\circ\text{C}$	281	269	254	229	194
油箱温度 $T_4/^\circ\text{C}$	76	71	65	51	43
加热器 R1 利用率/%	87	79	66	58	51
入口温度 $T_3/^\circ\text{C}$	86	79	71	64	53
加热器 R3 利用率/%	43	38	32	26	21
阀座温度 $T_2/^\circ\text{C}$	339	326	313	297	256
加热器 R2 利用率/%	62	59	55	51	45

### 1.2.2 额定工况喷油温度的拟合和调整方案

为了解供油管路不同位置温度调整对特定工况下喷油温度和雾化粒径的影响程度和效果, 试验中对供油管路各点组合的加热方案如表 2 所示。

表2 升温时喷油温度模拟方案

Tab.2 Injection temperature fitting scheme at elevating temperature

喷油温度 $T_1/^\circ\text{C}$	275( $T_{1a}$ )	281( $T_{1b}$ )	291( $T_{1c}$ )	22( $T_{1d}$ )
油箱温度 $T_4/^\circ\text{C}$	86	86	86	22
加热器 R1 利用率/%	92	92	92	0
入口温度 $T_3/^\circ\text{C}$	86	214	243	22
加热器 R3 利用率/%	2	95	99	0
阀座温度 $T_2/^\circ\text{C}$	339	339	351	22
加热器 R2 利用率/%	62	48	46	0

根据表2数据进行拟合加热,喷雾试验中喷油温度的变化情况如图6所示。喷油温度  $T_{1d}$  为常温下的喷油状态,整个供油管路温度均为  $22^\circ\text{C}$ ;  $T_{1a}$  为拟合发动机额定工况时的喷油温度;  $T_{1b}$  为提高喷油器入口燃油温度时,维持喷油温度基本不变的状态;  $T_{1c}$  为同时提高喷油器入口燃油温度和针阀座温度时,喷油温度提高且基本稳定的状态。

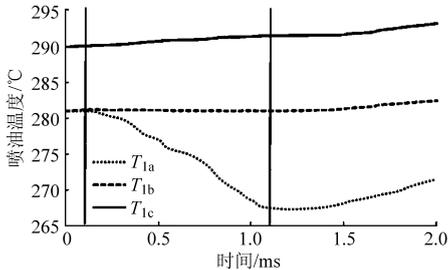


图6 喷油温度拟合效果

Fig.6 Fitting curves of injection temperature

### 1.2.3 高温燃油 SMD 测取

喷雾试验使用高压共轨系统,可提供  $6 \sim 20 \text{ MPa}$  的喷油压力,高压油管和喷油器使用 S195 型发动机部件;喷油器上加热装置安装如图3a所示,将装有2个温度传感器的喷嘴,从定容弹的预留孔穿入,紧固嵌入加热器的锁紧螺母,通过侧面接线柱及绝缘连线,给加热器通电。在充氮背压为  $3 \text{ MPa}$  的定容弹内进行喷雾,使用马尔文粒径测试仪测量喷雾液滴 SMD 的时间分布,如图7所示。

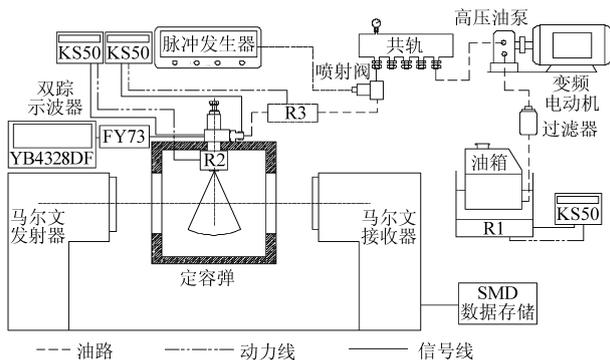


图7 热喷粒径测试系统原理图

Fig.7 Schematic of droplet measuring system

累计体积分布和累计数目分布;配备  $750 \text{ mm}$  光学镜头,测量粒径范围  $2 \sim 2000 \mu\text{m}$ ,可测量遮光度 95% 的高浓度喷雾,标准采样频率  $2.5 \text{ kHz}$ ,最高可达  $10 \text{ kHz}$ 。试验时在距离喷孔  $50 \text{ mm}$  处进行测量,使用 5% 遮光度启动模式,  $10 \text{ kHz}$  采样频率;由于  $2000 \text{ r/min}$  时的喷油持续时间为  $1.04 \text{ ms}$ ,因此,喷油持续时间选用  $1 \text{ ms}$ ,这样可取得 11 次粒径数据,并把数据按时序排列。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 不同工况下喷雾粒径差异

发动机启动后,机体内外的所有部件和所携带燃油都处于不断升温的过程中,直到某个稳定工况达到动力平衡和热平衡。如图4所示,随负荷的增加供油管路上各处的温度、盛油槽内喷出的燃油温度也升高。

5种工况下,喷油压力为  $12.5 \text{ MPa}$ ,喷油持续时间为  $1 \text{ ms}$ 。马尔文粒径测试仪测得的喷雾过程的总体 SMD 如图8所示。随着喷油温度的升高,SMD 呈明显下降趋势,粒径的分布趋于集中;表明喷油温度的提高有利于雾化效果的改善。但拟合喷雾试验中,针对不同工况还需要充分考虑喷油压力、启喷角和喷油持续时间变化带来的影响。

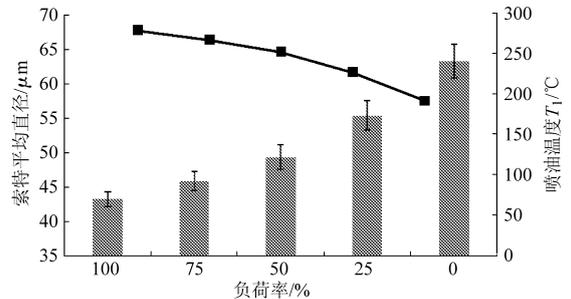


图8 不同工况时的 SMD

Fig.8 SMD under different conditions

### 2.2 提高喷油温度对 SMD 的影响

在图6所示的3种拟合喷油温度以及常温下,马尔文粒径测试仪测得的喷雾过程总体 SMD 的分布情况如图9所示。喷油压力为  $12.5 \text{ MPa}$ ,喷油持续时间为  $1 \text{ ms}$ ,喷射间隔时间为  $29 \text{ ms}$ 。随着喷射温度的升高 SMD 呈下降趋势。  $T_{1b}$  和  $T_{1c}$  的粒径偏差分布较  $T_{1a}$  更为集中。

常温下  $T_{1d}$  和喷油温度  $T_{1a}$  稳定在  $281^\circ\text{C}$  时的单次喷射 SMD 时序分布比较如图10所示。两种情况下,喷油过程中喷油均维持不变,但喷油温度差约为  $260^\circ\text{C}$ ,数据显示两种情况雾化过程的粒径尺寸差平均约为  $29 \mu\text{m}$ 。因此,升高喷油温度,可以减小喷雾粒径;在常温试验台上测取的雾化效果与发动机工

马尔文粒径测试仪用来测试喷雾中液滴粒径的

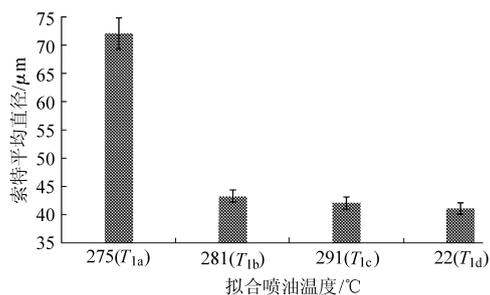


图 9 不同拟合喷油温度时的 SMD

Fig. 9 Variation of SMD under different fitting injection temperatures

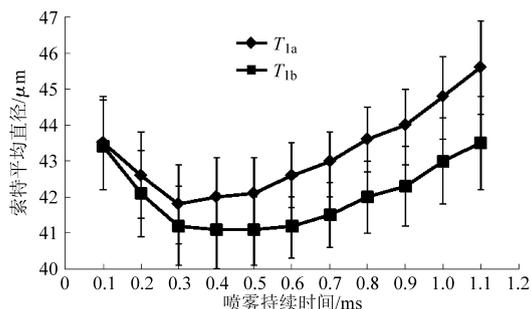


图 12 拟合稳定喷油温度变化时的 SMD

Fig. 12 SMD at fitting different stabilized injection temperature

作状态的雾化效果有较大差异,不能相互替代。

图 11 反映了喷油温度  $T_{1b}$  稳定和喷油温度  $T_{1a}$  持续下降时喷雾粒径的差别。从图中可以看出,喷油过程中喷油温度不断下降时,喷雾过程中 SMD 差值不断增加,且与两者喷油温度差值变化有一定对应关系;当喷油温度稳定时,喷油过程的粒径差异减小。因此,通过加热器的配合工作,在喷射过程中维持喷油温度基本稳定,使喷射过程的 SMD 变化幅度减小,改善了雾化效果。

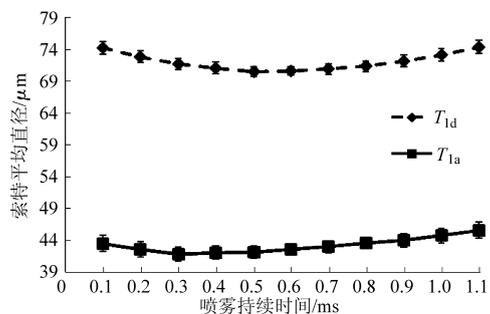


图 10 拟合常温与额定工况喷油温度时的 SMD

Fig. 10 SMD at injection temperature under fitting and rated condition

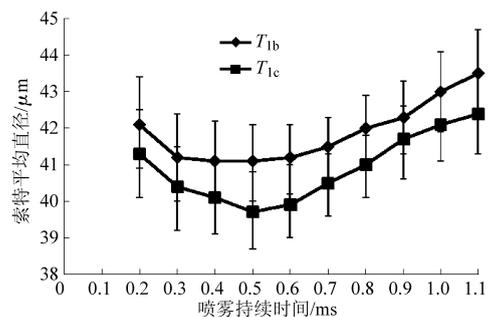


图 11 拟合喷油温度稳定前后的 SMD

Fig. 11 SMD at stabilized and unstabilized fitting injection temperature

$T_{1b}$  和  $T_{1c}$  两种稳定喷油温度时单次喷射过程的 SMD 时序分布情况如图 12 所示。两种情况下的粒径变化趋势基本一致,但与图 10 中喷油温度  $T_{1d}$  和  $T_{1a}$  相比较, $T_{1b}$  和  $T_{1c}$  的温差较小,约为  $10^{\circ}\text{C}$ ,喷雾粒径平均约为  $1\ \mu\text{m}$ 。因此,喷油温度差越大,平均索特直径差越大;但随着温度的升高,粒径差异减小。

### 2.3 燃油温度对喷雾粒径的影响

燃油喷出喷孔前,在高压管路内属于一维非定常流动,其流动状态和压力传播由喷射压力、燃油物理特性及喷嘴内腔的几何形状共同决定。此时,高压管路内燃油温度的提高降低了生物燃油的运动粘度,引起流动阻力减小和雷诺数增加,从而使燃油的湍流强度增强,有助于圆射流的碎裂;同时燃油温度的持续升高使燃油体积膨胀,其在高压管路内产生膨胀压力,与油泵泵油传播压力叠加,提高了喷射压力,这有助于喷射速度的提高。

根据波动破碎理论,当圆柱射流从喷孔高速喷出,在流体动力和环境气体动力的综合作用下,先进进行初级雾化,连续液柱分裂成为液片和大液滴,再进行二级雾化,逐步碎裂成大量细小的雾滴。在整个雾化过程中,提高生物柴油温度,降低了粘度和表面张力,使雾化过程中抑制碎裂的液体内部的粘性力和液体的表面张力降低,雷诺数和韦伯数减小,相同气体动力作用下液滴更容易碎裂<sup>[16-17]</sup>。同时,较高温度的圆射流喷入气体介质,增加了射流的热不稳定性,也有助于雾化效果的改善<sup>[18-19]</sup>。

## 3 结论

提高生物柴油喷油温度,可使雾化过程中生物柴油的粘度、密度和表面张力降低,从而使特定状态下的 SMD 减小。本研究得出以下结论:

(1) S195 型发动机在稳定的额定工况下,喷油温度在喷射过程中呈下降趋势,喷油始点时为  $281^{\circ}\text{C}$ ,到喷油终点时为  $267.5^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 提高喷油器前高压油管段的生物柴油温度到  $214^{\circ}\text{C}$ ,可使额定工况下的喷油温度在喷油过程中保持稳定;提高喷射后期的喷油温度,喷油过程的粒径差异减小,有利于改善雾化效果。

(3) 通过控制供油管路上和喷油器上的加热装置,提高喷油温度可使雾滴的 SMD 减小,但随着喷油温度升高,雾滴 SMD 的减小趋势变缓。

## 参 考 文 献

- 1 Chhetri A B, Watts K C. Viscosities of canola, jatropha and soapnut biodiesel at elevated temperatures and pressures[J]. *Fuel*, 2012, 102(12): 789 ~ 794.
- 2 Mustafa E T, Gerpen J H V. The kinematic viscosity of biodieseland its blends with diesel fuel[J]. *JAACS*, 1999, 76(12): 1 511 ~ 1 513.
- 3 Carlos A N J, Filipe X F, Fabiano A N F. Densities and viscosities of binary mixtures of babassu biodiesel + cotton seed or soybean biodiesel at different temperatures[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2010, 55(11): 5 305 ~ 5 310.
- 4 Esteban B, Riba J R, Baquero G, et al. Characterization of the surface tension of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines [J]. *Fuel*, 2012, 102(2): 231 ~ 238.
- 5 张建明, 张卫刚, 王亚伟, 等. 柴油高压物理特性的研究[J]. *高压物理学报*, 2005, 19(1): 41 ~ 44.  
Zhang Jianming, Zhang Weigang, Wang Yawei, et al. Study on high pressure physical properties of diesel oil[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005, 19(1): 41 ~ 44. (in Chinese)
- 6 Aleiferis P G, Serras-Pereira J, Augoye A, et al. Effect of fuel temperature on in-nozzle cavitation and spray formation of liquid hydrocarbons and alcohols from a real-size optical injector for direct-injection spark-ignition engines [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(21 ~ 22): 4 588 ~ 4 606.
- 7 Ejim C E, Fleck B A, Amirfazli A. Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector: surface tension and viscosity effects[J]. *Fuel*, 2007, 86(10 ~ 11): 1 534 ~ 1 544.
- 8 Bari S, Lim T H, Yu C W. Effects of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system, performance and emission of a diesel engine[J]. *Renewable Energy*, 2002, 27(3): 339 ~ 351.
- 9 Kalam M A, Masjuki H H. Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 27(10): 289 ~ 297.
- 10 Gong Chen[美]. 燃油温度对直喷式柴油机燃料喷射、燃烧和排放的影响[J]. 颜光耀, 译. *国外内燃机车*, 2009(6): 23 ~ 29.
- 11 Nwafor O M I. Emission characteristics of diesel engine running on vegetable oil with elevated fuel inlet temperature[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 27(12): 507 ~ 511.
- 12 曹建明. 喷雾学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 13 郭七一. 内燃机瞬态测温技术与直喷式柴油机缸内局部瞬态传热研究[D]. 北京: 北京理工大学, 1991.
- 14 张建国. 快速响应薄膜温度传感器技术研究[D]. 武汉: 国防科技大学, 2008.
- 15 钱兰, 陈宁. 薄膜热电偶动态响应特性的实验研究[J]. *内燃机学报*, 1998, 16(2): 251 ~ 252.  
Qian Lan, Chen Ning. Thin-film thermocouple dynamic response characteristic experiment research[J]. *Transactions of CSICE*, 1998, 16(2): 251 ~ 252. (in Chinese)
- 16 Weber C. Disintegration of liquid jets[J]. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik and Mechanik*, 1931, 11(2): 136 ~ 154.
- 17 Reitz R D, Bracco F V. Mechanism of atomization of a liquid jets[J]. *Physics of Fluids*, 1982, 25(10): 1 730 ~ 1 742.
- 18 Skiepkowski J. On the stability of an evaporation viscous jet[J]. *Archives of Mechanics*, 1991, 443(1): 41 ~ 47.
- 19 杜青, 刘宁, 张建新, 等. 液体燃料射流破碎的热不稳定性分析[J]. *燃烧科学与技术*, 2005, 11(4): 323 ~ 328.  
Du Qing, Liu Ning, Zhang Jianxin, et al. Analysis of thermal instability for the breakup of liquid jets [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2005, 11(4): 323 ~ 328. (in Chinese)

(上接第 32 页)

- 10 Park C, Kim C, Choi Y. Power output characteristics of hydrogen-natural gas blend fuel engine at different compression ratios [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(10): 8 681 ~ 8 687.
- 11 Chen L, Shiina R, Araki N, et al. Effect of CO<sub>2</sub> dilution on the combustion characteristics of a spark-ignition engine fuelled with individual component of bio-gas[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 2010(10): 1 629 ~ 1 636.
- 12 Chen Lei. Performance and emissions of a spark-ignition engine operated with gaseous fuels modeled for low-temperature gasification of biomass[D]. Gunma: Gunma University, 2011.