

# 生物柴油/柴油混合燃料喷雾特性

耿莉敏,曹建明,王磊,庄严,边耀璋

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**为了研究生物柴油及其与柴油混合燃料的雾化质量,在燃油雾化质量评价理论的基础上,采用高分辨率数码照相机对纯柴油、纯生物柴油以及两者混合燃料的喷雾特性进行了对比研究;计算分析了喷雾锥角、喷雾油滴的尺寸数目分布、尺寸累计体积分布、平均直径、特征直径和发散边界。结果表明:随着生物柴油掺混比的增大,喷雾锥角减小,喷雾油滴的平均直径增大,油滴尺寸数目分布曲线和累计体积分布曲线向大颗粒方向偏移,发散边界减小;大颗粒油滴数目增多和油滴的发散程度缩小,说明混合燃料中生物柴油的掺混比越大,雾化质量越差。

**关键词:**汽车工程;生物柴油/柴油混合燃料;喷雾;尺寸分布

**中图分类号:**U473.12

**文献标志码:**A

## Atomization characteristics of biodiesel/diesel blend fuel

GENG Li-min, CAO Jian-ming, WANG Lei, ZHUANG Yan, BIAN Yao-zhang

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the atomization quality of biodiesel and biodiesel/diesel blend fuel, on the basis of atomization quality evaluation theory for fuel, the comparison among biodiesel/diesel blend fuel was analyzed by using high resolving power digital camera. This paper calculated the cone angle of the sprays, droplet size number distribution of the sprays, cumulative droplet size distribution based on volume, mean diameter, representative diameter and dispersion boundary. Results indicate that when biodiesel mixed ratio increases, cone angles decrease, mean diameters of the fuel droplet of the sprays increase, curves of fuel droplet size number distribution and cumulative droplet size distribution based on volume move toward larger diameters, dispersion boundary reduces. The number of large fuel droplets increases and dispersed degree reduces. It shows that the higher the biodiesel mixed ratio is, the worse the spray quality is. 5 tabs, 4 figs, 6 refs.

**Key words:** automobile engineering; biodiesel/diesel blend fuel; spray; size distribution

## 0 引言

生物柴油是一种原料来源非常广泛的绿色环保可再生能源,可与柴油以一定比例混合后直接在柴

油机上使用<sup>[1]</sup>。作为柴油的替代燃料,生物柴油在理化特性方面与柴油有一定差别,这对燃料的喷射和雾化会产生一定影响,进而影响到柴油机的燃油经济性和排放特性<sup>[2]</sup>。因此,进行生物柴油及其混

合燃料的喷雾特性研究,对改善柴油机的经济性和排放特性具有重要意义。

燃料喷雾特性评价可以分为宏观评价和微观评价:宏观喷雾特性评价指标主要有喷雾锥角、油束的液相长度和贯穿距离等;微观喷雾特性评价指标主要有喷雾油滴的平均直径、特征直径和液滴尺寸的发散度等。国外液滴尺寸分布的测量技术和雾化质量评价理论发展很快,目前最先进的测量方法有激光全息摄像法、高速摄影法、激光多普勒法和马尔文法。近年来,随着高分辨率数码照相机开发速度的加快,采用直接摄影法对喷雾特性进行对比研究变得更加简单有效,曹建明教授等人曾采用直接摄影法对 LPG/柴油双燃料喷雾液滴的尺寸分布进行了对比研究<sup>[3-4]</sup>。本文在此试验方法的基础上,在大气环境中对不同掺混比的生物柴油与柴油混合燃料的喷雾特性进行了对比研究。

## 1 喷雾特性试验

### 1.1 试验方法

为了对纯柴油 BD0、纯生物柴油 BD100 以及两者的混合燃料 BD25、BD50 (BD0、BD25、BD50、BD100 指生物柴油的体积掺混比分别为 0%、25%、50%、100%) 的喷雾特性进行对比研究,采用直接摄影法,拍摄不同掺混比油样的喷雾照片,测量燃油液滴的直径,以便比较雾化质量。

试验所用的喷油器为 DSLA145P300 型,5 孔喷嘴,孔径为 0.27 mm。由于试验目的是对纯生物柴油、纯柴油以及两者混合燃料的喷雾特性进行对比研究,并且喷嘴附近的油束紧密,粒子浓度太高,无法得到分散的燃料颗粒图像,因此,选用燃料喷射进入大气环境中的方案,对距离喷嘴  $L=30$  cm 处的喷雾场进行拍摄。

图 1 为喷雾特性试验台的布置,喷油器中燃料高压的建立是通过压动手压泵手柄来实现,启喷压力为 25 MPa,与原 SOFIM8140 型柴油机的相当。在进行喷雾试验时,燃料直接加注到手压油泵的储油筒中,储油筒通过高压油管与喷油器相连。

用直接摄影法拍摄 BD0、BD25、BD50 和 BD100 燃料喷射的喷雾场。成像采用 800 万像素佳能 EOS30D 型数码单反照相机,腾龙 SPAF90MMF/2.8Di 型微距镜头,银燕 BY-450AFD 型闪光灯,通过调整照相机设置获取所需要的图像。拍摄时照相机采用 B 门拍摄,光圈 2.8, M 档手动曝光,最大光圈微距,最近焦拍摄,照片格式为 RAW 高清格式;

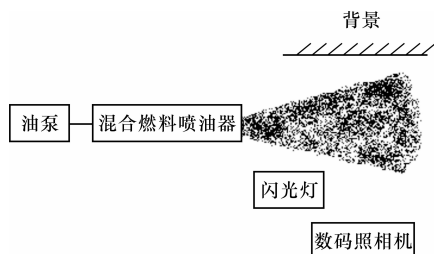


图 1 喷雾特性试验台的布置

使用外置闪光灯,频闪灯为手动,焦距 85 mm,闪光灯输出量 1/64 (闪光持续时间约为  $1/8\ 500$  s);照相机与喷雾油束中心线的距离为 14 cm,拍摄的喷雾场距喷嘴的轴向距离为 30 cm。拍摄背景采用黑色光滑平板,以增大图片的反差,便于读取微粒数据。

首先进行标准丝的拍摄,以便对油滴粒子的直径进行比较判读。以白色复印纸为背景,将标准丝粘在复印纸上,镜头距标准丝的拍摄距离为 14 cm,拍摄标准丝照片 1 张。用千分尺测得标准丝直径为  $35\ \mu\text{m}$ ,图 2 中标准丝的直径占 5 个像素,即一个像素的宽度为  $7\ \mu\text{m}$ ,因此把油滴粒子判读时的步长定为  $7\ \mu\text{m}$ 。

为了比较生物柴油掺混比例不同对混合燃料喷雾质量的影响,在距喷嘴 30 cm 处对 BD0、BD25、BD50 和 BD100 的喷雾场进行了拍摄,其中 BD100 的油滴粒子见图 2。虽然这些距离对于实际内燃机的燃烧室来说是比较大的,但由于喷嘴附近的油束集中,很难分辨出离散的燃料液滴,加之试验的目的是对不同掺混比混合燃料的喷雾质量进行比较研究,因此试验方案是可行的。喷雾锥角的测量,将一张白纸放置于距喷嘴 10 cm 的油束轴向位置,喷雾会将白纸浸湿,立即测量白纸上湿润印记的直径,经简单计算就可得到喷雾锥角。



图 2 BD100 的油滴粒子

获取的照片使用 USB 通用串行缆线从数码照相机传递到计算机中。在近百幅照片中为每种试验状况挑选 5 幅照片进行判读,取平均值进行分析。试验结果采用人工判读,选定判读照片后,先用图像处理软件 Photoshop 进行图片处理,通过灰度模式

选择、调整阈值和滤镜去斑等方法得到更加清晰、便于读取的微粒图像。由于照片中粒子数目众多,所以采用 Photoshop 把 1 张照片切分为 35 小张,再对每小张照片成倍放大,用标准丝定标,最后统计某一直径下粒子的数目和百分比分布。

### 1.2 燃料的物理性质

本文以大豆毛油为原料,制成生物柴油和 0# 柴油作为试验用油,不同掺混比混合燃料的理化特性见表 1。从表 1 的试验结果可知,随着生物柴油掺混比的增大,混合燃料的运动粘度和密度逐渐增大,闪点和馏程回收温度逐渐升高。从文献[5]中的数据可知,以大豆油为原料制成的生物柴油其表面张力大于柴油的表面张力。

表 1 不同掺混比混合燃料的物理性质

项 目		BD0	BD25	BD50	BD100
运动粘度(20 ℃)/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )		4.81	5.15	6.35	7.83
运动粘度(40 ℃)/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )		2.84	3.33	3.62	5.06
密度(20 ℃)/(kg·m <sup>-3</sup> )		836	847	856	874
表面张力(80 ℃)/(MN·m <sup>-1</sup> )		25.21 <sup>[2]</sup>			27.15 <sup>[2]</sup>
闪点(闭口)/℃		≥64	≥88	≥106	≥160
馏程	50%回收温度/℃	272	293	318	337
	90%回收温度/℃	338	339	343	354
	95%回收温度/℃	350	351	359	360

## 2 试验结果与分析

### 2.1 喷雾锥角

生物柴油/柴油不同掺混比混合燃料的喷雾锥角试验计算结果见表 2。由表 2 可知,随着生物柴油掺混比的增大,混合燃料的喷雾锥角逐渐减小,这主要是由于生物柴油的运动粘度较大引起的;另外,生物柴油的挥发性较差也会使喷雾锥角变小。液体的粘性通常会影响雾化质量,使之变差,当液体的粘度很高时,锥形液束可能会变成一条长长的直线;液体的粘度通常随着温度的升高而减小,加热燃油会使生物柴油的雾化质量得到改善<sup>[6]</sup>。

表 2 混合燃料的喷雾锥角 (°)

油样	BD0	BD25	BD50	BD100
喷雾锥角	21.52	18.74	18.19	17.07

### 2.2 雾化油滴的 Sauter 平均直径

喷雾液滴平均直径的定义是:设想一个液滴尺寸完全均匀一致的喷雾场,代替实际不均匀的喷雾场,这个假想的均匀喷雾场的液滴直径称为平均直径。喷雾液滴平均直径的表示方法很多,在动力装置的喷雾中最常用的是 Sauter 平均直径  $D_{32}$ ,也叫容面比平均直径,其计算式为

$$D_{32} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 dN}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^2 dN}$$

式中: $N$  为直径  $D$  的液滴数目,一般情况下,最小直径  $D_{\min} = 0$ 。

表 3 列出了距喷嘴  $L=30$  cm 处 Sauter 平均直径  $D_{32}$  的处理结果。由表 3 可以看出, $D_{32}$  随着混合燃料中生物柴油掺混比的增大而增大,说明柴油与生物柴油混合后,喷雾液滴中大颗粒油滴的数目增多,雾化质量变差。

表 3 雾化油滴的 Sauter 平均直径  $\mu\text{m}$

油样	BD0	BD25	BD50	BD100
$D_{32}$	59	63	69	103

生物柴油雾化油滴的 Sauter 平均直径较大,说明生物柴油的表面张力和粘度较大。喷雾使连续的液体碎裂成细小的液滴,液滴的稳定主要取决于液体的表面张力,它阻止液滴表面的变形,雾化所需要的最小能量等于表面张力乘以液体表面积的增加量;另外,液体的粘度对雾化液滴的尺寸也有一定影响,运动粘度的增加将使雷诺数  $Re$  减小,减缓湍流的发展,阻止喷雾圆射流或液膜射流的碎裂,使雾化液滴的尺寸增大。

### 2.3 雾化油滴的尺寸分布

本文给出了 BD0、BD25、BD50 和 BD100 喷雾的油滴尺寸数目分布和累计体积分布。在图 3(见下页)中,直径大于  $56\text{ }\mu\text{m}$  的油滴所占的数目百分数均低于 2%,可忽略不计。从图 3 可以看出,随着混合燃料中生物柴油掺混比的增大,喷雾油滴尺寸数目分布曲线向大颗粒方向偏移。从图 4(见下页)可以看出,随着生物柴油掺混比的增大,小颗粒油滴数目减少,所占的体积比例降低;大颗粒油滴的数目增多,所占的体积比例增大,因而累计体积的油滴直径增大,喷雾油滴的尺寸累计体积分布向大颗粒方向偏移。图 3、图 4 的结果表明,生物柴油及其混合燃料的雾化效果均比柴油差,这主要是由生物柴油的物理性质决定的。

### 2.4 雾化油滴的特征直径与发散度

分布曲线中的特征直径对于液滴尺寸发散度的分析很有价值,在液滴尺寸累计体积分布曲线中,特征直径为某一直径下所有液滴的体积占全部液滴总体积的百分比,并将此比值以下标的形式标出,其中最常用的特征直径是质量中值直径  $D_{0.5}$ 。

特征直径可根据油滴尺寸累计体积分布曲线图得到。表 4(见下页)列出了 4 种不同燃料在  $L=30$

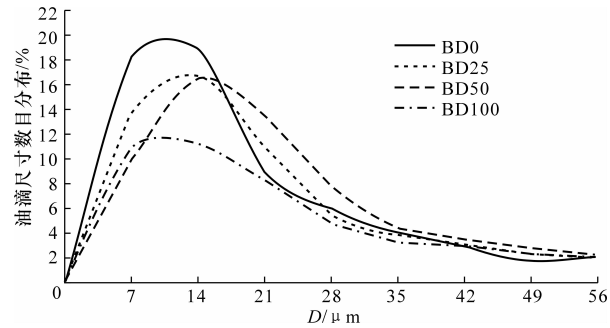


图3 油滴尺寸数目分布

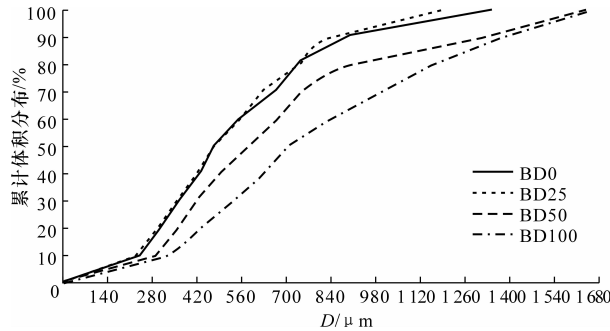


图4 油滴尺寸累计体积分布

表4 雾化油滴的特征直径

油样	$D_{0.1}$	$D_{0.5}$	$D_{0.9}$	$D_{0.999}$
BD0	231	476	896	1 351
BD25	217	476	826	1 197
BD50	273	581	1 309	1 645
BD100	322	707	1 372	1 659

注： $D_{0.1}$ 为液滴体积占全部液滴总体积10%时对应的特征直径；其余以此类推。

cm处油滴尺寸累计体积分布的特征直径。根据特征直径,可以求出喷雾油滴的发散边界。

为了评价最大液滴直径的发散程度,发散边界 $\Delta_b$ 的计算式为

$$\Delta_b = \frac{D_{0.999} - D_{0.5}}{D_{0.5}}$$

上式表示最大直径 $D_{0.999}$ 相对于质量中值直径 $D_{0.5}$ 的发散程度。

表5给出了4种燃料在 $L=30\text{ cm}$ 处油滴的发散边界。从表5可以看出,除BD50存在一定统计误差外,随着生物柴油掺混比的增大,发散边界都减小,说明油滴的发散程度在缩小。结合表4可以看出,这主要是因为4种燃料雾化的小颗粒油滴尺寸变化不大,而大颗粒油滴尺寸变大的缘故。

表5 雾化油滴的发散边界

油样	BD0	BD25	BD50	BD100
$\Delta_b$	1.84	1.52	1.83	1.35

3 结 语

(1)生物柴油的密度、粘度和表面张力均大于柴油,且挥发性较差,因此,随着混合燃料中生物柴油掺混比的增大,喷雾锥角变小,喷雾粒子的Sauter平均直径增大,雾化质量变差。

(2)生物柴油的掺混比越大,混合燃料油滴的粒度越大,使得喷雾油滴的尺寸数目分布曲线和累计体积分布曲线向大颗粒方向偏移,油滴的发散边界缩小。

(3)为了保证生物柴油与柴油的混合燃料具有良好的雾化和燃烧特性,混合燃料中生物柴油的掺混比不宜过大。

参考文献:

References:

[1] 司利增,边耀璋,蔡永江.柴油机燃用生物柴油的特性[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(5):83-85,121.  
SI Li-zeng, BIAN Yao-zhang, CAI Yong-jiang. Performances of diesel engine fueled with bio-diesel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 83-85, 121.

[2] 袁银南,夏云铎,钱裕尧.燃油品质对依维柯汽车喷油泵性能的影响[J].中国公路学报,2002,15(2):122-123,126.  
YUAN Yin-nan, XIA Yun-hua, QIAN Yu-yao. Affection of fuel quality to properties of fuel injection pump in IVECO automobile[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(2): 122-123, 126.

[3] 曹建明,武涛,程前,等.柴油与LPG/柴油双燃料喷雾特性的对比[J].交通运输工程学报,2003,3(2):40-44.  
CAO Jian-ming, WU Tao, CHENG Qian, et al. Atomization characteristics comparison between diesel and LPG/diesel dual fuel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(2): 40-44.

[4] 曹建明.喷雾学[M].北京:机械工业出版社,2005.

[5] 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): 1534-1544.

[6] Breda K. Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel[J]. Fuel, 2007, 85(17/18): 2377-2387.