

文章编号:1671-6833(2014)04-0014-05

# 燃料物理性质差异对柴油机喷雾特性的影响

耿莉敏, 汪月英, 王 城, 程清波, 邱 坤, 曹建明

(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**生物柴油与柴油物理性质上的差异会影响到发动机的喷雾特性,采用大豆毛油为原料制成的生物柴油与柴油配成不同掺混比的混合燃料,测定其密度、运动黏度、表面张力和馏程等理化特性指标;采用高速摄像机和马尔文粒度分析仪在大气环境中测定生物柴油和柴油的喷雾特性.结果表明:生物柴油的密度、运动黏度、表面张力和馏出温度高于柴油;生物柴油出喷嘴后不同时刻的喷雾锥角小于柴油,而贯穿距离大于柴油;与柴油相比,生物柴油的索特平均直径和特征直径增大,雾化油滴的尺寸体积分布曲线和累计体积分布曲线向大颗粒方向偏移,说明生物柴油的雾化质量比柴油差.

**关键词:**生物柴油;柴油;物理性质;喷雾特性

**中图分类号:**TK427

**文献标志码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.04.004

## 0 引言

生物柴油是一种绿色环保的可再生能源,大力发展生物柴油对节约能源和保护环境具有重要意义<sup>[1-5]</sup>.作为一种优良的石化柴油替代燃料,生物柴油的组成成分与柴油完全不同,因此两种燃料的理化性能指标有很大差异,这会影响到生物柴油喷雾的雾化质量.燃料雾化质量变差会对柴油机的燃烧特性和排放特性造成影响,导致着火落后期延长,缸内压力升高率过大,燃料燃烧不完全,排放特性变差<sup>[6-10]</sup>.笔者主要测定了影响生物柴油雾化蒸发性能的物理指标——密度、运动黏度、表面张力和馏程温度,测试结果显示生物柴油的上述雾化蒸发性能指标均比柴油差.为了研究燃料雾化蒸发性能变差对柴油机喷雾特性的影响,采用高速摄像机测定了生物柴油与柴油的喷雾锥角和贯穿距离,对比分析使用生物柴油时喷雾油束在燃烧室中的空间分布与柴油的差异;首次采用马尔文激光粒度分析仪测定了生物柴油与柴油的雾化液滴尺寸体积分布曲线、索特平均直径、特征直径和发散度等燃料雾化质量评价指标,试验结果显示在相同喷射条件下,与柴油相比生物柴油的喷雾液滴的尺寸体积分布曲线向大颗粒方向偏移,索特平均直径和特征直径增大,雾化油

滴在大颗粒范围内分布较广,说明生物柴油的喷雾质量比柴油差.对生物柴油及其与柴油混合燃料的雾化和蒸发性能进行研究,对改善发动机的燃烧特性和排放特性具有重要意义.笔者的研究结果对指导和优化生物柴油在发动机上的合理应用具有参考价值,使用生物柴油的过程中,在控制每循环喷油量的前提下,可以考虑综合调节喷油器的启喷压力和喷孔直径来改善生物柴油的雾化质量,避免柴油机燃用生物柴油时工作粗暴,同时降低不完全燃烧产物排放.

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试验材料

试验使用的生物柴油是以大豆毛油为原料制成的脂肪酸甲酯,柴油采用符合轻柴油国标要求的0#柴油.

### 1.2 试验方法

把0#柴油与生物柴油以BD0, BD10, BD20, BD30, BD50, BD80, BD100的比例进行掺混,其中“BDXX”中“XX”代表生物柴油在混合燃料中所占的体积百分比.采用国标方法分别测定不同掺混比混合燃料的密度、运动黏度、表面张力和馏程温度.

采用高速摄像机拍摄生物柴油和柴油的喷雾过程,测量和计算喷雾油束出喷嘴后不同时刻的

收稿日期:2014-03-30;修订日期:2014-05-19

基金项目:长安大学中央高校专项资金资助项目(CHD2012JC049);陕西省自然科学基金资助项目(2012JQ7031)

作者简介:耿莉敏(1978-),女,河南兰考人,长安大学副教授,博士,主要研究方向为燃料喷射和雾化,E-mail:genglimin@chd.edu.cn.

喷雾锥角和贯穿距离,高速摄像测试系统的组成部件及布置方式如图 1 所示. 马尔文测试系统布置如图 2 所示,马尔文粒度分析仪利用激光衍射技术测量并计算雾化液滴的尺寸体积分布、索特平均直径、特征直径和发散度.

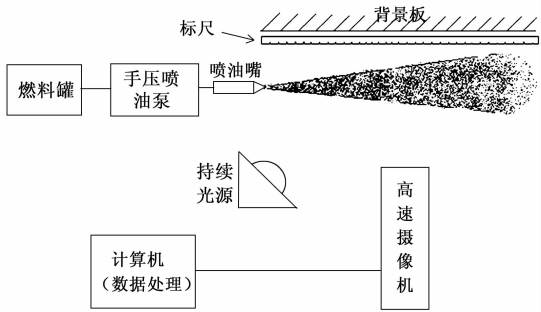


图 1 高速摄像测试系统  
Fig.1 Test system of high speed cameras

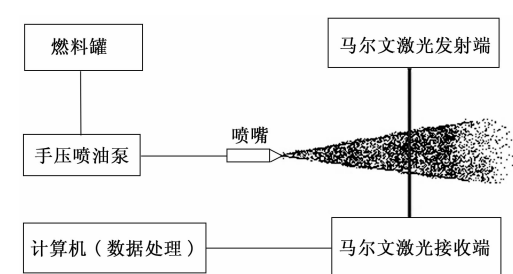


图 2 马尔文测试系统  
Fig.2 Test system of Malvern particle size analyzer

2 生物柴油混合燃料与柴油的物理性质对比

2.1 密度

燃料的密度对柴油机每循环的供油量和喷雾油束的射程都有影响. 采用密度计测定了柴油与不同掺混比混合燃料 20 ℃ 下的密度,试验结果如图 3 所示. 由试验结果可知,生物柴油的密度比柴油大,随着生物柴油掺混比的增大混合燃料的密度也逐渐增大. 生物柴油的密度大会使喷雾油束的贯穿距增大,还会导致柴油机每循环的供油量增加.

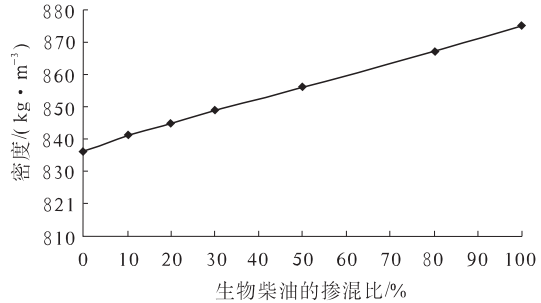


图 3 不同掺混比混合燃料的密度  
Fig.3 Mixed fuel density of different mixing ratio

2.2 运动黏度

燃料的运动黏度影响喷雾的碎裂、蒸发和雾化,同时还会影响柴油机燃料供给系中喷油泵、喷油器和出油阀偶件的润滑和密封. 采用国标《石油产品运动黏度测定法和动力黏度计算法》测定 20 ℃ 下不同掺混比混合燃料的运动黏度,试验结果见表 1. 由表中试验数据可知,生物柴油的黏度比柴油大,混合燃料的黏度随生物柴油掺混比的增大而增大,生物柴油的黏度高不利于燃料的雾化和蒸发.

表 1 不同掺混比混合燃料的运动黏度

Tab.1 Mixed fuel kinematic viscosity of different mixing ratio

油样	BD0	BD10	BD20	BD30	BD50	BD80	BD100
运动黏度/ (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	4.81	4.97	5.12	5.24	6.35	7.22	7.83

2.3 表面张力

燃料的表面张力对柴油机缸内的喷雾和燃烧有重要影响. 喷雾油束碎裂成细小的油滴,表面张力会阻止油滴表面变形,喷雾过程中油滴的稳定性主要取决于表面张力,雾化理论中最重要的量纲—参数韦伯数  $W_e$  也与表面张力有关. 燃料的表面张力与密度之间呈线性关系,密度越大则表面张力越大,利用经验公式计算得到 20 ℃ 下不同掺混比混合燃料的表面张力如图 4 所示. 由图可知,生物柴油的表面张力比柴油大,随着生物柴油掺混比的增大混合燃料的表面张力也随之增大.

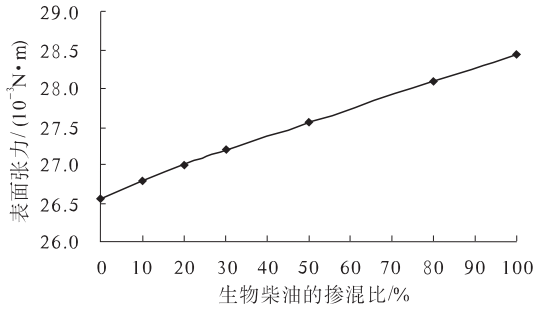


图 4 不同掺混比混合燃料的表面张力

Fig.4 Mixed fuel surface tension of different mixing ratio

2.4 馏程

燃料的馏程一般采用不同体积百分比的馏出温度表示,50% 的馏出温度反映了燃料中的轻质馏分的多少,90% 的馏出温度反映了燃料中难挥发的重质成分较多. 采用国标《石油产品蒸馏测定法》对不同掺混比混合燃料的馏程进行测定,

得到图 5 所示混合燃料的蒸馏曲线.

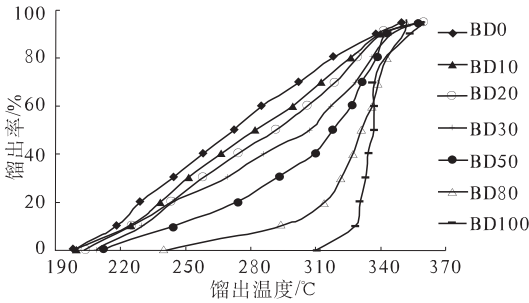


图 5 不同掺混比混合燃料的馏程曲线  
Fig. 5 Mixed fuel distillation curve of different mixing ratio

由试验结果可知:柴油的初馏点在 198 ℃,终馏点在 350 ℃,馏分宽度达到 152 ℃,其蒸馏曲线基本是一条直线;生物柴油的初馏点在 310 ℃,终馏点在 360 ℃,馏分宽度仅有 50 ℃,其馏程曲线比较陡峭;当蒸馏温度超过 330 ℃时,生物柴油的馏出率迅速增加;随着生物柴油掺混比的增大,混合燃料的初馏温度逐渐升高,蒸馏曲线逐渐向高温方向移动.这说明生物柴油中难蒸发的重质成分较多,燃料的雾化蒸发性能差会使燃料在缸内的蒸发度和扩散度下降,影响可燃混合气的形成速度和燃烧速度.

表 2 生物柴油与柴油在不同时刻的喷雾锥角和贯穿距离

Tab. 2 Spray cone angle and penetration distance of biodiesel and diesel at different time

喷射时间/ms	BD0 的喷雾锥角/(°)	BD100 的喷雾锥角/(°)	BD0 的贯穿距离/cm	BD100 的贯穿距离/cm
0	0	0	0	0
0. 83	25. 36	15. 53	4	8
1. 66	19. 36	10. 64	9	13
2. 49	13. 64	11. 57	14	17
3. 32	14. 58	12. 64	17	20
4. 15	15. 60	13. 05	20	22

3.2 雾化油滴的尺寸体积分布和累计体积分布

采用马尔文激光粒度分析仪测定了生物柴油和柴油的尺寸体积分布曲线、累积体积分布曲线,试验结果如图 6 和图 7 所示.由图 6 可知,使用 0.366 mm 的单孔喷嘴在 16 MPa 的喷射压力下,生物柴油雾化油滴的尺寸体积分布曲线明显向大颗粒方向偏移,柴油的体积峰值直径  $D_p$  为 61  $\mu\text{m}$ ,而生物柴油的体积峰值直径  $D_p$  为 72  $\mu\text{m}$ ,生物柴油喷雾的大颗粒油滴数目及所占体积超过柴油的;由图 7 可知,达到某一累计体积时对应的生物柴油雾化油滴直径明显大于柴油的,说明相同条件下柴油喷雾的油滴粒子直径偏小而生物柴油喷雾的油滴粒子直径偏大,生物柴油的雾化质量比柴油差.

3 生物柴油与柴油喷雾特性对比

3.1 喷雾锥角与贯穿距离

试验采用孔径为 0.366 mm 的单孔喷嘴,喷油器的启喷压力设定为 16 MPa,采用高速摄像机在大气环境中拍摄并测量生物柴油和柴油出喷嘴后不同时刻的喷雾锥角和贯穿距离,试验结果见表 2.由试验结果可知:不同时刻生物柴油的喷雾锥角均小于柴油,而贯穿距离均大于柴油.生物柴油的喷雾锥角小主要是由于生物柴油运动黏度高引起的;喷雾锥角小,油束中的油滴粒子密集,更容易发生碰撞粘合,形成大颗粒油滴,使油滴的蒸发面积变小,不利于燃油与空气的充分混合.生物柴油的贯穿距离大主要是因为生物柴油的密度大,燃料的密度越大,喷雾液滴运动的动能越大,从而贯穿距离也越长;喷雾油束的贯穿距离会影响燃料在燃烧室内的空间分布,贯穿距离的大小必须与燃烧室的尺寸相匹配,如果油束的贯穿距离过长,大部分燃料被喷射到气缸壁面,会导致壁面油膜过厚不易蒸发,燃料燃烧不完全,容易在燃烧室内形成积碳.

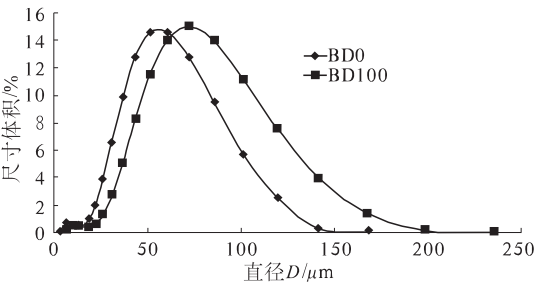


图 6 生物柴油与柴油雾化油滴的尺寸体积分布曲线  
Fig. 6 Spray droplet size distribution curve of biodiesel and diesel

生物柴油雾化质量较差的原因主要是因为生物柴油的运动黏度和密度较大,喷雾锥角小,油束不够疏松,油滴粒子质量大,运动速度快,容易发

生碰撞、黏合,形成大颗粒油滴;另外,生物柴油的表面张力比柴油大,使油滴粒子不容易碎裂,雾化的细微度差,大粒径的油滴数多,总油滴数变少,油滴蒸发的总表面积缩小,蒸发度变差;此外,生物柴油的馏程温度高,重质馏分多,不容易蒸发气化,也是导致其雾化质量较差的原因之一。

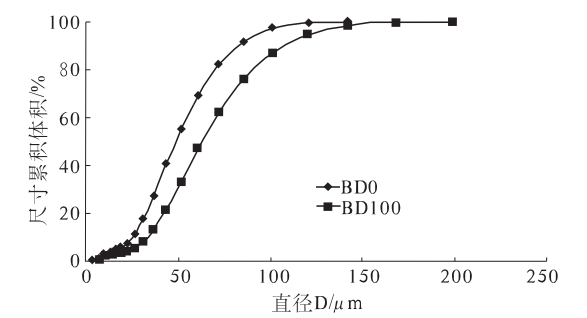


图 7 生物柴油与柴油的尺寸累积体积分布曲线

Fig. 7 Spray droplet accumulative volume distribution curve of biodiesel and diesel

3.3 雾化油滴的索特平均直径

雾化液滴的索特平均直径  $D_{32}$  是燃料雾化质量评价中最常用和最直观的指标之一. 利用马尔文激光粒子分析仪测量计算出柴油的索特平均直径为  $36.76\text{ }\mu\text{m}$ , 生物柴油的索特平均直径为  $49.13\text{ }\mu\text{m}$ . 生物柴油的索特平均直径大于柴油主要是因为生物柴油的运动黏度和表面张力较大, 馏程温度高, 燃料不容易碎裂、蒸发和雾化.

3.4 雾化油滴的特征直径和发散度

特征直径是指某一直径以下所有液滴的体积占全部液滴总体积的百分比, 特征直径的下标数值即表示体积百分比. 特征直径可以根据尺寸累计体积分布曲线求得, 其中  $D_{0.5}$  称为质量中值直径,  $D_{0.999}$  代表喷雾油滴粒子中最大油滴的直径. 在对燃烧系统的喷雾进行深入分析时, 常常要采用雾化油滴的特征直径, 它也是计算液滴尺寸发散程度的必要参数; 特征直径  $D_{0.9}$  和  $D_{0.999}$  对评价发动机的 HC 排放具有重要意义. 生物柴油与柴油雾化油滴的特征直径见表 3, 从表 3 的试验结果可知, 生物柴油的各特征直径均大于柴油的, 喷雾油滴的特征直径越大, 则雾化质量越差, 越不容易蒸发混合.

表 3 生物柴油与柴油的特征直径

Tab. 3 Representative diameter of biodiesel and diesel

特征直径	$D_{0.1}$	$D_{0.5}$	$D_{0.9}$	$D_{0.999}$
BD0/ $\mu\text{m}$	25.32	48.82	82.64	141.86
BD100/ $\mu\text{m}$	33.42	63.11	107.00	198.82

喷雾液滴尺寸的发散程度用来描述液滴尺寸的范围, 常用相对尺寸范围  $\Delta_s$  和发散边界  $\Delta_b$  来表示. 相对尺寸范围定义为

$$\Delta_s = \frac{D_{0.9} - D_{0.1}}{D_{0.5}}.$$

它表示液滴直径相对于质量中值直径的分布范围. 发散边界定义为

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

它表示最大液滴直径相对于质量中值直径的发散度. 从表 4 的试验结果可知, 生物柴油的相对尺寸范围与柴油基本相当, 而发散边界大于柴油, 说明生物柴油雾化液滴的尺寸分布宽度与柴油基本相当, 但生物柴油喷雾液滴在大颗粒范围内分布较广, 说明生物柴油的雾化质量比柴油差.

表 4 雾化油滴的相对尺寸范围  $\Delta_s$  和发散边界  $\Delta_b$

Tab. 4 Relative size range and divergent boundary atomized oil droplets

燃料	$\Delta_s$	$\Delta_b$
BD0	1.17	1.91
BD100	1.16	2.15

4 结论

(1) 生物柴油的密度、运动黏度和表面张力均比柴油大, 馏程温度比柴油高, 因此生物柴油的雾化蒸发性比柴油差.

(2) 由于燃料物理性质的差异, 导致在相同喷射条件下生物柴油的喷雾锥角小于柴油的, 而贯穿距离大于柴油的, 会使生物柴油在燃烧室内的空间分布发生变化.

(3) 与柴油相比, 生物柴油雾化油滴的尺寸体积分布曲线和累计体积分布曲线整体向大颗粒方向偏移; 生物柴油雾化油滴的索特平均直径和特征直径均比柴油大; 相对尺寸范围与柴油相当, 而发散边界大于柴油的. 说明生物柴油喷雾的大颗粒油滴数目较多, 其雾化质量比柴油差.

参考文献:

[1] YAMANE K, UETA A, SHIMAMOTO Y. Influence of physical and chemical properties of biodiesel fuels on injection, combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection compression ignition engine [J]. Engine Research, 2001, 2(4): 249 - 261.

[2] 耿莉敏, 边耀璋, 张春化, 等. 直喷式柴油机燃用生物柴油的试验研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版,

- 2007, 28(4): 105 – 108.
- [3] JOAQUIN A, VILLARREYES M, SOLDI C, et al. Diesel/biodiesel proportion for application by compression ignition engines [J]. Fuel, 2007, 8 ( 86 ): 1977 – 1982.
- [4] 马林才, 刘大学, 周志国, 等. 生物柴油 – 柴油混合燃料的理化及排放特性研究 [J]. 燃料化学学报, 2011, 39(8): 600 – 605.
- [5] KEGL B. Effects of biodiesel on emissions of a bus diesel engine [J]. Bio-resource Technology, 2008, 99 ( 11 ): 863 – 873.
- [6] 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(11): 1534 – 1544.
- [7] BREDA K. Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel [J]. Fuel, 2006, 95 ( 24 ): 2377 – 2387.
- [8] SEUNG H B, BONG W R, CHANG S L. An experimental investigation on the spray characteristics of dme blended biodiesel [C]//14th Asia Pacific Automotive Engineering Conference. USA: California, 2007: 3631 – 3639.
- [9] BENJUMEA P, AGUDELE J. Basic properties of palm oil biodiesel-diesel blends [J]. Fuel, 2008, 87 ( 38 ): 2069 – 2075.
- [10] CANDEIA R A, SILVA M C D, FILHO J R, et al. Influence of soybean biodiesel content on basic properties of biodiesel-diesel blends [J]. Fuel, 2009, 88 ( 39 ): 738 – 743.

## Effects of Physical Properties of Fuel on Spray Characteristics of Diesel Engine

GENG Li-min, WANG Yue-ying, WANG Cheng, CHENG Qing-bo, QIU Kun, CAO Jian-ming

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

**Abstract:** The difference of physical properties between biodiesel and diesel has impact on the spray characteristics of diesel engines. In this paper, diesel and biodiesel made from soybean crude oil were blended in different proportions. The physical property indexes of blended fuel such as density, kinematic viscosity, surface tension and distillation temperature were tested. Meanwhile, spray characteristics of biodiesel and diesel were measured in atmosphere environment by sports cameras and Malvern particle size analyzer. The results indicate that the density, kinematic viscosity, surface tension and distillation temperature of biodiesel are higher than those of diesel. The spray cone angle of biodiesel at different time is less than that of diesel. Conversely, penetration distance is longer than that of diesel. Compared with diesel, biodiesel's Sauter mean diameter and representative diameter increase. Simultaneously, the curve of drop size distribution and accumulative volume distribution shift to the direction of large particles, which indicates that atomization quality of biodiesel is poorer than that of diesel.

**Key words:** biodiesel; diesel; physical property; spray characteristics