

# 高喷射压力下生物柴油喷雾特性试验与仿真<sup>\*</sup>

赵陆明<sup>1</sup> 何旭<sup>1</sup> 郑亮<sup>2</sup> 王建昕<sup>2</sup> 刘福水<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

**【摘要】** 利用高速摄影技术,在定容燃烧弹中进行了高喷射压力条件下的生物柴油与柴油喷雾特性试验,对比了两种燃料的喷雾形态、贯穿距离、喷雾锥角,然后利用仿真计算研究了背景压力、喷射压力、背景温度对生物柴油贯穿距离的影响规律。研究表明:背景压力增加,生物柴油贯穿距离减小;喷射压力升高,生物柴油贯穿距离增大;背景温度增加,生物柴油贯穿距离先增大后减小,呈现不规则的波动,生物柴油的蒸发速率较大是造成这种现象的原因。

**关键词:** 生物柴油 喷雾 高喷射压力 高速摄影

中图分类号: TK421+.43 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)09-0006-05

## Spray Characteristics of Biodiesel under High Injection Pressure

Zhao Luming<sup>1</sup> He Xu<sup>1</sup> Zheng Liang<sup>2</sup> Wang Jianxin<sup>2</sup> Liu Fushui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

### Abstract

The spray characteristics of biodiesel and diesel were studied in a constant volume combustion bomb by using high speed photography under high injection pressure. The effects of background pressure, background temperature, and injection pressure on the spray characteristics were studied by means of CFD code. The results indicated that the penetration of biodiesel decreased with the increase of backpressure; penetration of biodiesel increased with the increase of injection pressure; with the increase of background temperature, penetration of biodiesel began to fluctuate due to the high evaporation rate.

**Key words** Biodiesel, Spray, High injection pressure, High speed photography

## 引言

生物柴油与普通柴油的理化特性有一定的差别,其喷雾与燃烧特性也与柴油存在差异。早期对生物柴油的研究主要集中在燃烧特性和排放特性上<sup>[1-6]</sup>,随后扩展到利用试验及仿真对生物柴油喷雾特性的研究<sup>[7-9]</sup>。然而以上研究主要是在中、低喷射压力条件下完成的,对生物柴油在高喷射压力条件下的研究还鲜有报道。本文利用高速摄影技术在定容燃烧弹中完成高喷射压力条件下生物柴油与柴油的喷射特性试验对比研究,同时利用 CFD 软件对

生物柴油在不同条件下的喷射特性进行扩展研究。

## 1 试验

### 1.1 试验系统

试验装置如图 1 所示,主要由燃油喷射和控制系统、定容燃烧弹、照明光源、高速摄像机等组成。

如图 1 所示,定容燃烧弹内部设计有封闭加热和加压装置,其有效视窗直径为 100 mm,可通过视窗观察燃料的喷雾、燃烧状况。燃油喷射系统为自行开发的高压共轨系统和同步控制系统,可以对油轨压力和喷射时刻以及喷射策略进行灵活控制。照

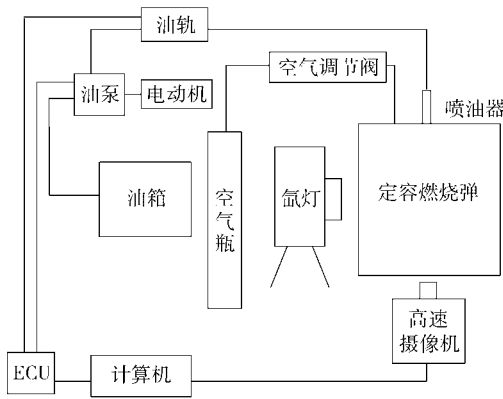


图 1 试验装置原理图

Fig.1 Experimental device system

明光源采用氙灯,从侧面照亮被测对象,其与高速摄像机光轴呈垂直放置。试验中高速摄像机采用 10 000 帧/s 的拍摄速度,单帧像素为 512 × 256,最大曝光时间 0.1 ms。

分别进行高喷射压力下生物柴油、柴油的冷态喷雾过程试验。其中,柴油标记为 B0,生物柴油选用的是棉籽油,标记为 B100。试验采用单孔喷油器,喷孔直径为 0.12 mm,最高喷射压力为 100 MPa,喷射脉宽 1 ms,单次喷油量 8 μL,背景压力为 1.4 MPa。为保证试验的精确性,试验过程中每换一种燃料就对油路和供油系统进行清洗。两种燃油的物理属性如表 1 所示。试验用油物性参数源于石油化工科学研究院样品分析报告。

### 1.2 试验结果

#### 1.2.1 特性评价指标

喷雾油束的形态、贯穿距离、喷雾锥角统称为喷雾特性,如图 2 所示。本次研究中,在试验装置里事先做好标尺,量取了标尺的实际长度,随后利用高速

表 1 试验用油的燃料特性

Tab.1 Fuel property used in experiment

参数	B0	B100
20℃ 密度/kg·m <sup>-3</sup>	838	873
氧质量分数/%	0	10.56
十六烷值	50.1	56.0
20℃ 粘度/mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	3.9	4.4

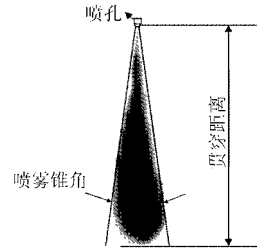


图 2 喷雾结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of spray structure

摄像机对试验过程进行拍摄。数据处理时,利用电子测量工具“E-ruler”量取图像中的标尺长度与喷雾的贯穿距离,随后根据标尺实际长度进行等比例换算,得到喷雾的实际贯穿距离。此外,利用 E-ruler 中提供的角度量取功能,量取喷雾锥角。Chang<sup>[10]</sup>对喷雾特性参数定义做了详细介绍,在此仅对喷雾近角和喷雾远角做简单描述:喷雾近角取喷雾贯穿距离 10 ~ 20 mm 的喷雾锥体截面最大夹角,而喷雾远角则是在 20 mm 和最大喷雾贯穿距离之间的喷雾锥体截面的最大夹角。在量取时分 3 次对喷雾近角和喷雾远角进行测量并取平均,以减小人为测量误差。

#### 1.2.2 生物柴油和柴油的喷雾形态

图 3 为利用高速摄影技术拍摄到的生物柴油

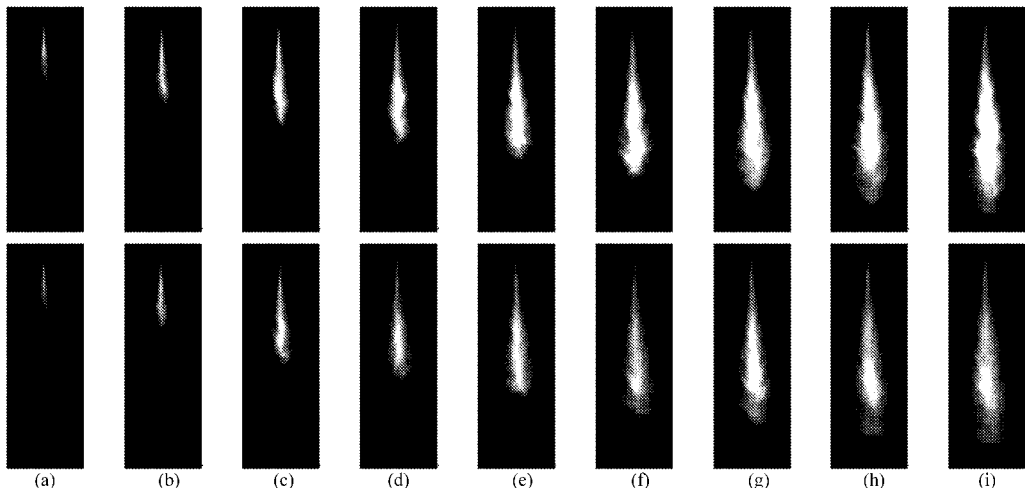


图 3 生物柴油与柴油喷雾过程高速摄影结果

Fig.3 High speed photograph results of spray process of biodiesel and diesel

(a)  $t=0.1$  ms (b)  $t=0.2$  ms (c)  $t=0.4$  ms (d)  $t=0.6$  ms (e)  $t=0.8$  ms (f)  $t=1.0$  ms  
(g)  $t=1.2$  ms (h)  $t=1.4$  ms (i)  $t=1.6$  ms

(上排)和柴油(下排)的喷射过程图像。从图上可以看出,在整个喷雾阶段,生物柴油与柴油的喷雾形态没有十分明显的差异,但从整体上来看,尤其是喷雾后期,由于生物柴油粘度较大,其雾注头部更加饱满,而柴油由于其挥发性较好,雾注前端与空气的卷吸作用较生物柴油更强烈。

### 1.2.3 两种燃油的贯穿距离和喷雾锥角

图4为两种燃料贯穿距离。可以看出,在高喷射压力下,由于生物柴油密度较大,因此生物柴油沿喷射方向的动量较大,在喷油初期,贯穿距离较柴油贯穿距离大,但随着喷雾的进行,在高介质密度的作用下,燃油与背景气体发生较强烈的质量和能量交换,燃料密度的差异对贯穿距离的影响被逐渐削弱,因此在喷雾的后期,两种燃油的贯穿距离趋于一致。

在喷雾初始阶段,由于喷射时间短、喷注能量大,雾注前端的燃油刚刚开始破碎且与空气混合效果不明显,雾注前端没有出现“蘑菇头”,锥角仅与喷孔结构、燃油物性有关;而量取喷雾远角时,燃油已与空气发生强烈的卷吸作用,在空气中的扩散混合越来越充分,因此,从图3可以看出,生物柴油喷雾锥角比柴油的喷雾锥角小,造成这种差异的原因,一方面是粘度的影响,另一方面是挥发性的影响。首先,燃油粘度越大,其在喷雾过程中的油-气混合状况就越差,其次,燃油挥发性越差,就越能阻碍喷雾的横向扩散。正是由于生物柴油粘度较高而挥发性较差,造成了生物柴油的喷雾锥角较柴油小。

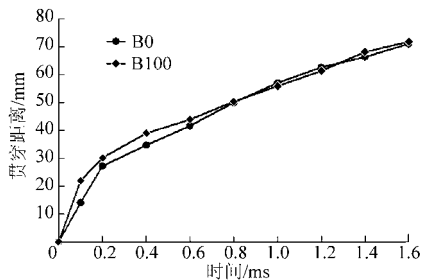


图4 生物柴油和柴油喷雾贯穿距离试验结果

Fig. 4 Test results of penetration of biodiesel and diesel

## 2 仿真计算及分析

### 2.1 仿真模型及验证

图5为在CFD软件中建立的网格模型,计算网格为六面体网格,计算区域为 $\phi 110\text{ mm} \times 110\text{ mm}$ 的圆柱体,在圆柱顶面中心区域选择正方形网格并对其进行加密,网格尺度约为 $0.7\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$

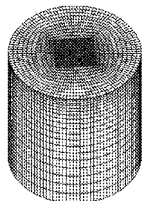


图5 CFD软件中

计算网格

Fig. 5 Grid in  
CFD software

(6倍喷孔直径),网格总数为42 000,喷嘴在顶面中心处,伸出高度为1 mm。仿真计算选取的模型如表2所示。

表2 计算模型

Tab. 2 Calculation model

模型类型	模型名称
湍流模型	$k-\epsilon$
喷雾模型	KH-RT
蒸发模型	Dukowicz
液滴湍流扩散模型	O-Rourke
聚合/碰撞模型	Schmidt

图6、图7分别为两种燃油贯穿距离的试验与仿真结果对比曲线以及在主喷射阶段(0.4 ms以后)内仿真结果与试验结果之间的相对误差。

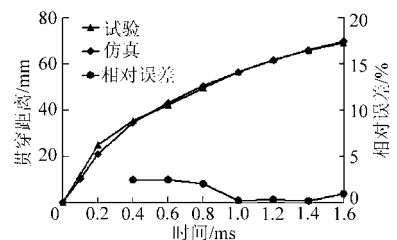


图6 柴油喷雾贯穿距离试验和仿真结果

Fig. 6 Comparison of penetration of diesel between experimental result and simulation result

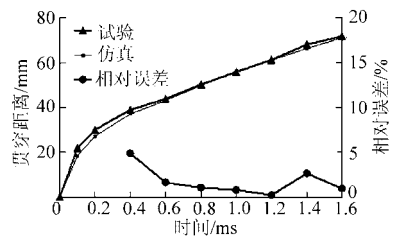


图7 生物柴油喷雾贯穿距离试验和仿真结果

Fig. 7 Comparison of penetration of biodiesel between experimental result and simulation result

从以往的计算来看,喷雾初期的数值模拟结果和试验结果往往误差相对较大,这是多种因素造成的,例如试验中燃油喷射与高速摄影的同步触发误差、试验结果的测量误差以及仿真软件中的计算误差等,因此本文主要关注主喷射段内的误差情况。从图上可以看出,数值模拟结果与试验结果基本吻合,主喷射段内误差最大不超过5%,从而保证了数值模拟结果的可信性。

### 2.2 生物柴油贯穿距离随背景压力、喷射压力、背景温度的变化

图8为其他参数不变,不同背景压力对生物柴油贯穿距离的影响。从图上可以看出,随着背景压力的增加,生物柴油的贯穿距离减小,原因在于随着

背景压力的增加,背景空气密度增加,燃油在前进方向上受到的空气阻力相应增加,造成贯穿距离下降。图9为不同喷射压力对生物柴油贯穿距离的影响。随着喷射压力的提高,生物柴油贯穿距离增加。原因是喷射压力越高,燃油喷射能量越大,因此在相同前进阻力下,燃油惯性力增加,因此贯穿能力增加。图10是不同背景温度时,生物柴油贯穿距离随背景温度的变化。由图可知,当 $t < 0.6$  ms,贯穿距离随

温度的增加而小幅增加,而从 $t = 0.6$  ms开始, $T = 713$  K和 $T = 913$  K对应的贯穿距离先后开始减小并出现波动。

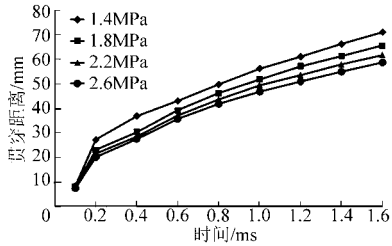


图8 贯穿距离随背景压力的变化曲线

Fig. 8 Penetration of biodiesel under different background pressures

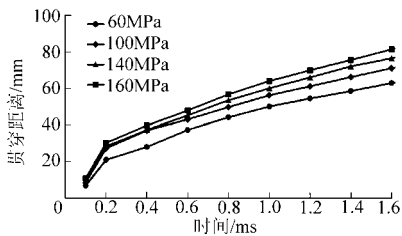


图9 贯穿距离随喷射压力的变化曲线

Fig. 9 Penetration of biodiesel under different injection pressures

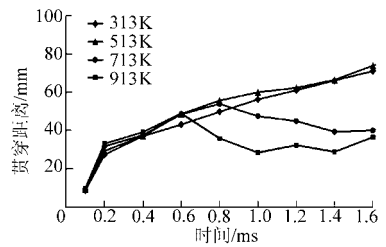


图10 贯穿距离随背景温度的变化曲线

Fig. 10 Penetration of biodiesel under different background temperatures

### 2.3 背景温度的影响规律分析

图11为不同背景温度下,生物柴油喷射质量与蒸发质量之差,即剩余液态燃油质量随时间的变化。图中不同时刻下对应的燃油喷射总量相同。观察各图可以看出, $t < 0.2$  ms时,不同背景温度下燃油蒸发速率相差不大,但从 $t = 0.2$  ms开始,背景温度越高,燃油蒸发速率越快,同一时刻下剩余液态燃油质量越少。从 $t \geq 0.6$  ms开始,高背景温度下( $T = 713$  K, $T = 913$  K)剩余液态燃油质量比常温下( $T = 313$  K)低了接近一个数量级,即燃油一旦喷入定容燃烧弹中,将立即汽化,由于燃油蒸发过快,致使沿喷射方向上的油滴总量大大减少,造成其贯穿能力大幅下降。

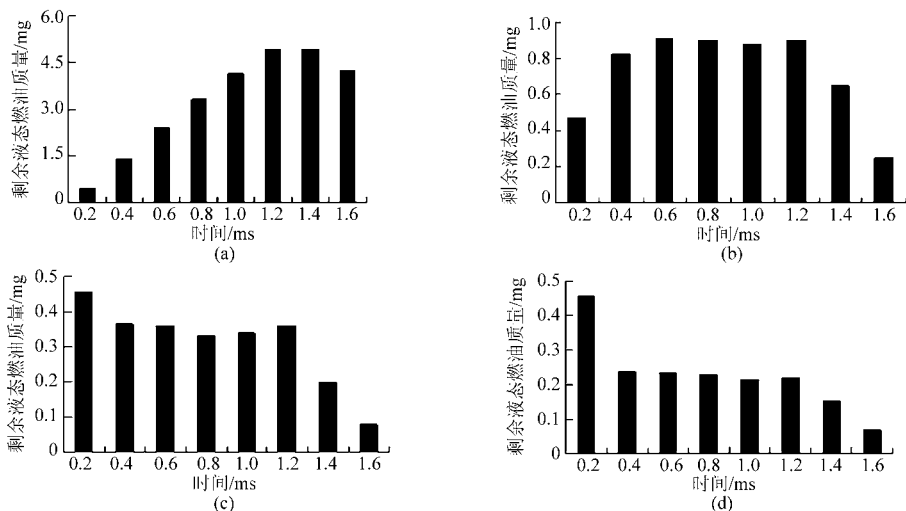


图11 不同背景温度下生物柴油剩余液态燃油质量随时间的变化

Fig. 11 Fuel mass of biodiesel remained at different time under different background temperatures

(a) 313 K (b) 513 K (c) 713 K (d) 913 K

### 3 结论

(1)在高背压条件下,生物柴油与柴油的雾注型态差别不大,但生物柴油的喷雾形态较为饱满,而柴油由于其挥发性较高,雾注前端的空气卷吸作用

较强。

(2)喷雾初期,生物柴油贯穿距离较柴油大,喷雾中后期两种燃油贯穿距离趋于一致;生物柴油喷雾锥角较柴油小。

(3)仿真结果表明,生物柴油贯穿距离随背景

压力的增加而降低;喷射压力越高,生物柴油贯穿距离越大;随着背景温度的提高,蒸发速率加快,导致其贯穿距离下降。

### 参 考 文 献

- 1 汤东,李昌远,葛建林,等. 柴油机掺烧生物柴油  $\text{NO}_x$  和碳烟排放数值模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(7):1~4.  
Tang Dong, Li Changyuan, Ge Jianlin, et al.  $\text{NO}_x$  and particulate emissions numerical simulation of diesel blended with biodiesel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 1~4. (in Chinese)
- 2 马志豪,张小玉,王鑫,等. 基于热重分析法的生物柴油—柴油发动机颗粒排放研究[J]. 农业机械学报,2011,42(9):26~29.  
Ma Zhihao, Zhang Xiaoyu, Wang Xin, et al. Particulate emissions of engine fuelled with biodiesel-diesel blends using thermogravimetric analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9):26~29. (in Chinese)
- 3 葛蕴珊,何超,韩秀坤,等. 柴油机燃用生物柴油的多环芳香烃排放试验研究[J]. 内燃机学报,2007,25(2):125~129.  
Ge Yunshan, He Chao, Han Xiukun, et al. Experimental study on PANs emission of diesel engine fuelled with biodiesel[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(2):125~129. (in Chinese)
- 4 Slatore Alfuso, Maddalena Auriemma, Giuseppe Police, et al. The effect of methy-ester of rapeseed oil on combustion and emissions of DI diesel engines [C]. SAE Paper 932801, 1993.
- 5 William Marshal, Leon G Schumacher, Steve Howel. Engine exhaust emissions evaluation of a cummins L10E when fueled with a biodiesel blend [C]. SAE Paper 952363, 1995.
- 6 Senatore A, Cardone M, Rocco V, et al. A comparative analysis of combustion process in DI diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel [C]. SAE Paper 2000-01-0691, 2000.
- 7 张旭升,李理光,邓俊,等. 生物柴油喷雾特性的试验研究[J]. 内燃机学报,2007,25(2):172~176.  
Zhang Xusheng, Li Liguang, Deng Jun, et al. An experimental study of biodiesel spray characteristics [J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(2): 172~176. (in Chinese)
- 8 施爱平,叶丽华,袁银南,等. 生物柴油喷射雾化特性试验与分析[J]. 农业机械学报,2008,39(10):44~47.  
Shi Aiping, Ye Lihua, Yuan Yinnan, et al. Experiment and analysis of the spray characteristics of biodiesel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 44~47. (in Chinese)
- 9 毛功平,王忠,杨殿勇,等. 生物柴油自由喷雾特性的数值模拟和试验研究[J]. 内燃机工程,2008,29(6):45~49.  
Mao Gongping, Wang Zhong, Yang Dianyong, et al. Numerical simulation and experimental study on free spray characteristics of bio-diesel fuel [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008,29(6):45~49. (in Chinese)
- 10 Chang Chanteng. Experimental study of diesel spray characteristics and atomization[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, USA, 1998.

(上接第5页)

- 10 Seungmok Choi, Minyoung Ki, Kyoungdoug Min, et al. An on-line model for predicting residual gas fraction by measuring intake exhaust and cylinder pressure in CAI engine [C]. SAE Paper 2008-01-0540, 2008.
- 11 Leroy T, Alix G, Chauvin J, et al. Modeling fresh air charge and residual gas fraction on a dual independent variable valve timing SI engine[C]. SAE Paper 2008-01-0983, 2008.
- 12 Peter M Olin. A mean-value model for estimating exhaust manifold pressure in production engine applications [C]. SAE Paper 2008-01-1004, 2008.