

丙醇-生物柴油斯特林发动机喷雾特性试验研究

王继刚¹, 李佳奇¹, 乔信起², 王林涛³

(1. 扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;
3. 中国船舶重工集团公司第七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 斯特林发动机的喷射压力和背压均低于柴油机, 一般采用压力涡流和引射耦合的喷雾方式。为研究丙醇-生物柴油混合燃料的在斯特林发动机上的喷雾特性, 本文建立了基于斯特林发动机的喷雾可视化试验系统, 研究了喷射压差、丙醇含量及喷孔直径对丙醇-生物柴油混合燃料斯特林发动机的喷雾特性的影响。结果表明: 与柴油相比, 丙醇-生物柴油混合燃料对喷射压差的敏感性较小; 在不同喷雾阶段, 丙醇含量对喷雾的影响呈现不同规律, 在喷雾趋于稳定后, P50BD50、P75BD25 和纯生物柴油的喷雾贯穿距明显大于 P25BD75 和柴油; 喷孔直径越大, 喷雾锥角越大、喷雾贯穿距越小; 引射作用对喷雾形态有质的影响, 在可观测范围内, 已无明显的雾束结构, 引射是低压差下斯特林发动机实现良好雾化的关键。

关键词: 丙醇; 生物柴油; 喷雾特性; 试验; 斯特林发动机

中图分类号: U674.7+01

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.09.008

[引用本文格式] 王继刚, 李佳奇, 乔信起, 等. 丙醇-生物柴油斯特林发动机喷雾特性试验研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(9): 63-71. WANG Ji-gang, LI Jia-qi, QIAO Xin-qi, et al. Experimental study on spray characteristics of n-propanol-biodiesel in a Stirling engine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9): 63-71.

Experimental Study on Spray Characteristics of n-Propanol-Biodiesel in a Stirling Engine

WANG Ji-gang¹, LI Jia-qi¹, QIAO Xin-qi², WANG Lin-tao³

(1. School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, China, Post Code: 225127;
2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240;
3. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 201108)

Abstract: The injection pressure and back pressure of Stirling engine are lower than those of diesel engine, generally, spray mode of pressure vortex and ejection coupling is adopted. In order to study the spray characteristics of n-propanol-biodiesel blended fuel in a Stirling engine, an experimental apparatus with spray visualization of Stirling engine was established in this paper, so as to study the effects of injection pressure difference, n-propanol content and nozzle diameter on the spray characteristics of the n-propanol-biodiesel blended fuel in a Stirling engine. The results show that the sensitivity of n-propanol-biodiesel blend fuel to injection pressure difference is less than that of diesel; in different spray stages, the influence of n-propanol content on spray shows different rules. After spray is stabilized, the spray penetration distance of P50BD50, P75BD25 and pure biodiesel is significantly greater than P25BD75 and diesel; the larger the nozzle diameter, the larger the spray cone angle and the smaller the spray penetration distance; ejection has a quali-

收稿日期: 2022-10-30; 修订日期: 2022-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52306167), 江苏省自然科学基金(BK20220588)资助项目

Fund-supported Project: Natural Science Foundation of China (52306167); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20220588)

作者简介: 王继刚(1991-), 男, 扬州大学讲师。

tative effect on the spray shape. In the observable range, there is no obvious spray beam structure. Ejection is the key to realizing the good spray in a Stirling engine at low pressure difference.

Key words: n-propanol, biodiesel, spray characteristics, experimental study, Stirling engine

引 言

斯特林发动机是一种外燃机,具有效率高、振动噪声低等特点。它采用燃料连续燃烧供热,易于实现高压纯氧燃烧,特别适合水下高能量密度动力系统工作要求,是水下动力系统的重要原动机之一。

近年来,国内外学者对喷雾特性进行了大量研究,包括直喷喷雾和旋流喷雾。钱丁超等人^[1]通过 STAR-CD 软件模拟计算的方法研究了燃油喷射压力对喷雾贯穿距、索特平均直径等喷雾特性参数和对混合气形成的影响,结果表明:燃油喷射压力对喷雾特性有显著影响,增加燃油喷射压力可以促进燃油的喷气雾化,提高混合气的生成速率和分布均匀性。高东志等人^[2]应用单孔喷油器结合高速摄影技术研究了 B5 生物柴油和竞标-10 号柴油在不同喷油压力、环境温度和燃油温度条件下的喷雾特性,结果表明:喷油压力和环境温度对喷雾贯穿速度有显著的影响;在相同的条件下,B5 生物柴油的蒸发性能较差。袁志远等人^[3]使用背光法利用一款单孔直喷喷油器完成了不同喷射压力和不同过热度下喷雾形态的高速成像试验,试验研究了喷射压力及过热度对喷雾形态及喷雾破碎的影响,结果表明:燃油过热度的提高可以使得喷雾宽度明显增大,喷雾贯穿距明显缩减;在冷态喷雾下,喷射压力的增加,增强了喷雾头部的破碎和雾化效果。石奇等人^[4]对两色法的测试不确定度及误差进行了分析和讨论,并对柴油-丁醇混合燃料在不同环境氧体积分数下的火焰温度和碳烟浓度(KL)的时空分布进行了研究,结果表明:与柴油相比,柴油-丁醇混合燃料一定程度上可以同时抑制炭烟颗粒和 NO_x 的排放。Feng 等人^[5]采用双脉冲激光照明的粒子液滴图像分析方法获得高压柴油喷雾稀释区域中的液滴数据,为喷雾建模和仿真提供了重要数据。Cheng 等人^[6]实验分析了加氢处理植物油(HVO)和欧洲标准柴油(EN590)在不同环境气体密度下(36 和 115 kg/m^3)的喷雾特性,预测了喷雾局部速度、燃料浓度、液体体积分数和密度分布,结果表明:对于不同的燃料类型和环境空气密度,可以获得精确的柴油

状喷雾演化类型。Han 等人^[7]实验研究了月桂酸甲酯、油酸甲酯和油酸乙酯 3 种生物柴油组分的宏观和微观喷雾参数,并与不同喷射压力和环境压力条件下的柴油进行了比较,研究表明:与柴油和月桂酸甲酯相比,油酸甲酯和油酸乙酯的粘度和表面张力较高,导致尖端穿透距离略高,但产生的投影喷雾面积、喷雾锥角和最大喷雾宽度较小;随着喷射压力的增加,可以减少由燃料特性引起的宏观喷雾参数的变化。Lan 等人^[8]研究了压力旋流喷嘴的喷雾特性,基于试验数据得到了流量和喷雾锥角随喷嘴压降的变化曲线,并推导出几种典型的喷雾流量分布,结果表明:即使压力变化很小,喷雾通量分布也有明显的变化。Liu 等人^[9]研究了航空煤油 RP-3 旋流喷雾的微观特性,利用平面激光诱导荧光技术测量了喷雾锥角、燃料空间分布;采用激光诱导荧光和 Mie 散射相结合的方法,测量了喷雾中心轴平面内液滴尺寸的空间分布;通过对液滴尺寸空间分布、SMD 和压差分布指数的分析指出,液滴碰撞的存在及其对液滴尺寸均匀性的不利影响。Durdina 等人^[10]研究了用于轻型涡轮喷气发动机的两种压力旋流雾化喷嘴的喷雾特性,试验结果表明:两种喷嘴相同喷射压力下的喷雾特性存在显著差异;单形喷嘴在各种喷油工况下,Sauter 平均直径低至 5 ~ 20 μm ,喷雾稳定性较好,但喷雾形状随喷射压力的变化较大,相似的研究还有文献[11]。上海交通大学张武高团队^[12-15]用定容弹模拟斯特林发动机燃烧室,采用高速摄影技术、激光测粒仪以及粒子图像测速技术对柴油、甲醇和二甲醚等燃料的压力涡流喷嘴宏观喷雾特性(贯穿距、喷雾锥角)和微观喷雾特性(液滴粒径和喷雾流场)做了深入研究,并考虑了斯特林发动机燃烧室的高背压以及再循环气体引射对喷雾特性的影响。

由于斯特林发动机喷雾过程是连续、定常喷雾,而且喷雾过程受到气体引射的影响,其喷雾特性与柴油机喷雾完全不同,因此有必要对其喷雾特性进行研究。本文采用 3 种斯特林发动机涡流喷嘴来开展生物柴油-丙醇混合燃料喷雾特性的试验研究,在改变压差、丙醇含量、喷孔直径等影响因素后,通过高速相机拍摄喷雾图像,然后利用图像处理方法获得不同工况下的喷雾特性。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置

试验采用3种斯特林发动机涡流喷嘴,如图1所示,喷孔直径分别为0.41,0.64和0.74 mm。斯特林发动机喷雾可视化试验装置框图见图2。整个装置主要包括供油子系统、充压子系统、定容弹主体和测试子系统。供油子系统主要包括氮气瓶、燃料池、压力容器、泄压阀、过滤器和压力泵;充压子系统主要包括氮气瓶和阀;定容弹主体主要包括定容弹、引射器和喷嘴,其中喷雾定容弹由304 不锈钢制成,壁厚60 mm,在侧面开有3个长方形石英玻璃窗口,窗口尺寸为100 mm×150 mm,如图3所示。试验时一个窗口为LED灯提供的背景光源窗口,另一个窗口为高速相机图像采集窗口,试验中相机和背光灯成90°夹角。定容弹设计压力3.8 MPa,最大安全压力为3.2 MPa。测试子系统包括高速相机、计算机和背光灯,本文中高速相机型号为PCO dimax S1,拍摄帧率5 000 fps,分辨率1002×1002 pixels。为了消除压力波动,试验中燃料通过高压氮气压入定容弹中。

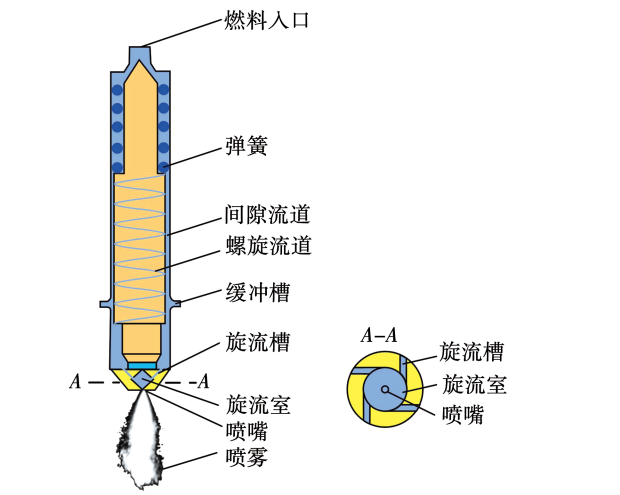


图1 压力涡流喷嘴结构

Fig. 1 Structure diagram of pressure vortex nozzle

试验中通过高速相机拍摄喷雾图像,然后利用图像处理方法获得数据。喷雾图像处理过程包括:(1)去背景,由于拍摄的喷雾图像背景光不均匀,会引起计算误差,因此需要通过去背景来消除;(2)灰度化,所用高速相机为彩色的,需转化为灰度图像;(3)二值化,通过二值化处理将喷雾与背景实现高度区分;(4)滤波,通过高斯滤波处理去除喷雾边缘的噪点。

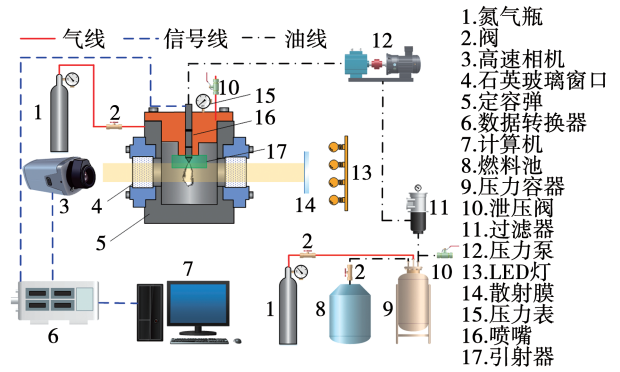


图2 喷雾试验装置框图

Fig. 2 Block diagram of experimental apparatus of spray



(a) 斯特林发动机喷雾试验台



(b) 引射器

图3 喷雾定容弹及引射器照片

Fig. 3 The photo of constant volume chamber and ejector

1.2 试验燃料及条件

试验燃料及条件如表1所示,其中环境温度为常温,由于斯特林发动机工作时的喷射压力为2~8 MPa,背压为0.1~2 MPa,结合试验设备的耐压可靠性,试验中选取喷射压力为3~7 MPa,背压为0.1~1.2 MPa。试验燃料为生物柴油(B)、丙醇(P)、柴油(D)及其混合燃料(PxBDy代表x%的丙醇与y%的生物柴油按照体积比混合)。丙醇为工业级,纯度为分析纯(98.5%),生物柴油和正丙醇的理化特性如表2所示。生物柴油的粘度和闪点较高,不利于燃料雾化和液滴快速蒸发,其成分是脂肪酸甲酯,因此具有良好的润滑性。丙醇的粘度和闪

点均较低,易于实现良好的雾化和蒸发,但其润滑性能不佳。丙醇和生物柴油混合可以优势互补,获得具有适当粘度和闪点的混合燃料。脂肪酸甲酯本身具有表面活性剂的作用,因此生物柴油与丙醇可以完全互溶,不需要额外加入表面活性剂。

表 1 试验燃料及条件
Tab. 1 Test fuel and conditions

工况	燃料	喷射压力/ MPa	环境压力/ MPa	喷嘴直径/ mm
1	P75BD25	3.2/4.2/5.2	1.2	0.41
2	丙 醇/生 物 柴 油/柴 油/P25BD75/ P50BD50/P75BD25/ P90BD10/P95BD5	6.2	1.2	0.41
3	P75BD25	6.2	1.2	0.41/0.64/0.74
4	P75BD25	5.8	0.8	0.41

表 2 生物柴油、丙醇及柴油的理化特性
Tab. 2 Physical and chemical properties of biodiesel,
n-propanol and diesel

特性	生物柴油	丙醇	柴油
粘度(20℃)/mm ² ·s ⁻¹	6.397	2.26	4.65
密度(20℃)/kg·m ⁻³	877.5	805	820
沸点/℃	57~354	97	—
低热值/MJ·kg ⁻¹	38.75	33.60	42.50
汽化潜热/kJ·kg ⁻¹	275	668	250~300
十六烷值	53	<15	51
闪点/℃	186	15	>50
馏程/℃	57~354	97	180~370
含水量/μg·mL ⁻¹	271.05	—	—
酸度 KOH/mL	52.59	—	—

1.3 喷雾参数定义

喷雾参数定义如图 4 所示。喷雾贯穿距定义为从喷孔到喷雾最长距离 L 。喷雾锥角定义为距喷孔 $1/4L$ 处与喷雾边缘形成的夹角 θ 。

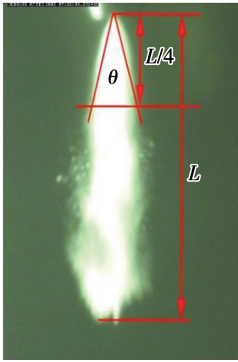


图 4 喷雾参数定义
Fig. 4 Definition of spray parameters

2 结果与分析

2.1 引射对喷雾的影响

引射过程是指利用高速气流作用于喷雾,通过边界的掺混作用将能量传递给被引射气流。引射器是斯特林发动机特有装置,是产生引射气流的装置,其作用是使燃料加速破碎。图 5 给出了喷嘴直径 0.41 mm,喷射压力 5.8 MPa,背压 0.8 MPa 下, P75BD25 在有气体引射(引射比 4)和无气体引射时的喷雾图像。可以看到,引射作用对喷雾形态有质变的影响,在引射器旋流器外,喷雾轮廓远超出视窗范围,雾滴分布范围明显变宽,这说明此时斯特林发动机的油气混合强烈。因引射器旋流器结构对喷孔出口的遮挡,近喷孔处油束发展图像无法捕捉。因此,试验中未安装引射器。

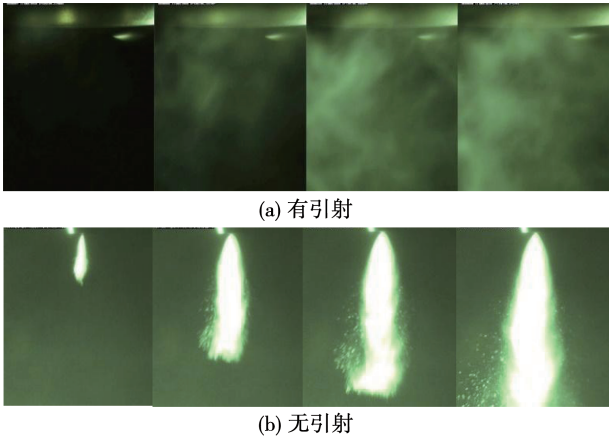


图 5 有引射和无引射条件下 P75BD25 燃料喷雾图像
Fig. 5 Spray images of P75BD25 with and without ejection

2.2 压差对喷雾的影响

压力涡流喷嘴中,燃油从螺旋流道进入,在缓冲腔内形成强烈的旋流后再经过螺旋狭缝进入涡流室,形成强烈的涡流。因此,当燃油从喷孔喷出时,同时具有轴向和切向速度。斯特林发动机根据工况不同需调节喷油压差从而改变喷油量,压差对喷雾的影响通常也是最为显著的。因大比例丙醇含量在氧耗性能、液滴蒸发、燃烧以及润滑性方面有较好的综合性能,因此以 P75BD25 为试验燃料,分析压差对丙醇-生物柴油混合燃料喷雾特性的影响。

图 6 分别给出了压差为 2, 3 和 4 MPa 时 P75BD25 的喷雾过程图片。其中,喷射压力分别为 3.2, 4.2 和 5.2 MPa,背压为 1.2 MPa。可以看到,在不同压差下,斯特林发动机喷射 P75BD25 燃料时

的喷雾形状都近似为锥形;喷雾边缘出现了薄雾,薄雾是由部分微小液滴较远距离的扩散形成。压差对喷雾发展有一定影响,但影响较小,随着压差的增大,喷雾雾束发展略有加快。

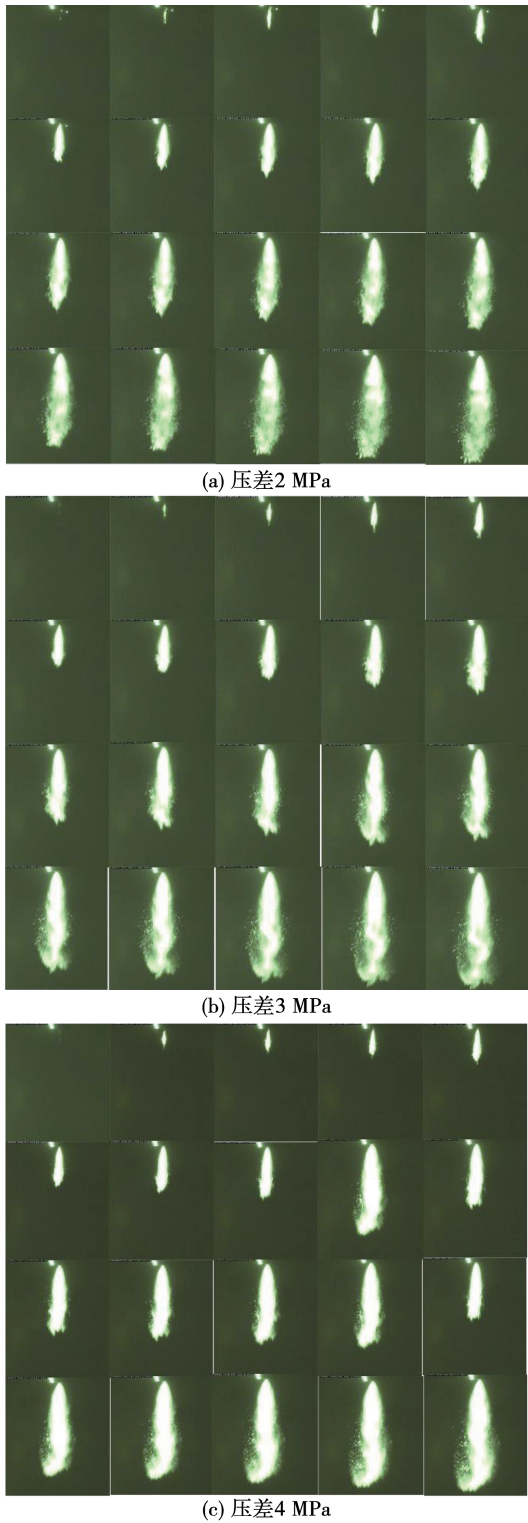


图 6 不同压差下 P75BD25 燃料喷雾图像(时间间隔 0.25 ms)

Fig. 6 Spray images of P75BD25 at different pressure differences (time interval of 0.25 ms)

图 7 给出了不同压差下 P75BD25 喷雾贯穿距的变化曲线。可以看到,喷雾贯穿距与喷射时间近似呈线性关系;相同时间压差越大喷雾贯穿距越大。这是因为提高压差,喷雾液滴的初始动能增大,喷雾发展越快。对比文献[13-15]给出的斯特林发动机喷射柴油时流量(压差)对喷雾贯穿距的影响,可以发现,柴油相比斯特林发动机燃用 P75BD25 时的喷雾参数对压差的敏感性明显小得多。这是因为丙醇粘性和表面张力系数都明显小于柴油,对于丙醇含量高的丙醇-生物柴油混合燃料,在较小压差下摆脱粘性力和表面张力束缚,实现良好雾化。

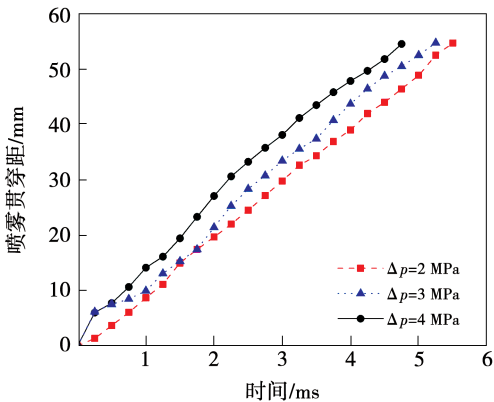


图 7 不同压差下 P75BD25 燃料喷雾贯穿距比较

Fig. 7 Comparison of spray penetration distances of P75BD25 at different pressure differences

为了近似估算喷雾的贯穿距,大量学者总结得出了喷雾贯穿距的式算公式,典型的是文献[16]提出的喷雾贯穿距的计算公式:

$$L = \left(\frac{t \cdot d}{\tan \theta} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{2\alpha \Delta p}{\rho_\alpha} \right)^{0.25} \tag{1}$$

$$L = 3.03 \left(\frac{\Delta p}{\rho_\alpha} \right)^{0.25} \cdot (t \cdot d)^{0.5} \cdot \left(\frac{293}{T_\alpha} \right)^{0.25} \tag{2}$$

式中: d —喷孔直径,mm; ρ_α —空气密度,kg/m³; α —喷孔流量系数, θ —喷雾锥角的一半, t —喷射时间,s, Δp —压差,Pa, T_α —燃烧室中的平均温度,K。

由式(1)和(2)可知,喷雾贯穿距与压差、环境气体密度、喷孔直径、喷射时间及环境温度有关。喷雾贯穿距随压差的增大而有所增大,这与试验结果相一致。由于斯特林发动机采用的是旋流喷嘴,喷雾锥角的理论计算公式与传统直喷喷嘴完全不同,目前尚未有文献报道过计算公式,但本文的试验结果与文献[13-16]的试验结果也是相符的。

图 8 给出了不同压差下 P75BD25 喷雾锥角的变化曲线。可以看到,压差为 2 MPa 时的喷雾锥角要明显大于 3 和 4 MPa,而压差为 3 和 4 MPa 时的喷雾锥角曲线差异较小。这是因为在大压差下喷雾会向前拉伸,同时涡流使喷雾径向扩散,轴向发展的速度大于径向扩散的速度,因此喷雾锥角减小。

2.3 丙醇含量对喷雾的影响

图 9 给出了喷射压力 6.2 MPa、背压 1.2 MPa、不同丙醇含量下,丙醇 - 生物柴油混合燃料的喷雾过程。可以看到,不同丙醇含量下的喷雾宏观形态较为相似。

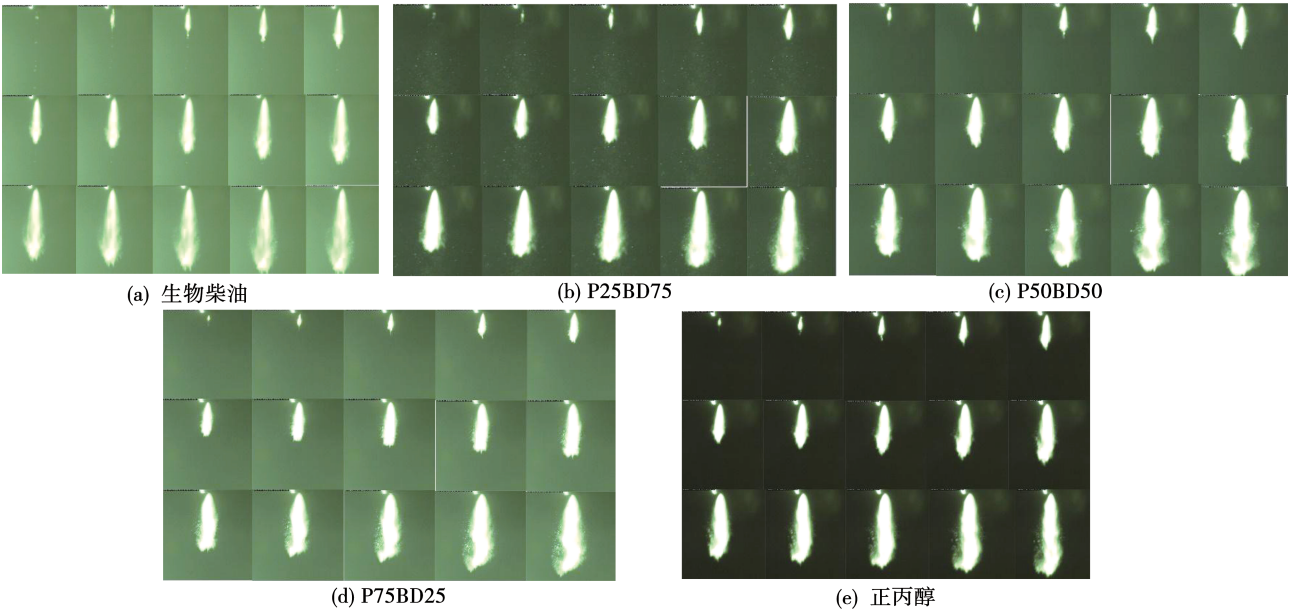


图 9 不同丙醇含量的丙醇 - 生物柴油混合燃料喷雾图像 (时间间隔 0.25 ms)

Fig.9 Spray images of n-propanol - biodiesel blended fuel indifferent n-propanol contents (time interval of 0.25 ms)

图 10 为喷射压力 6.2 MPa、背压 1.2 MPa 条件下不同丙醇含量时,丙醇 - 生物柴油混合燃料喷雾贯穿距的变化。丙醇 - 生物柴油混合燃料的贯穿距均大于生物柴油和柴油。这是因为丙醇 - 生物柴油混合燃料的密度较生物柴油和柴油小,启喷后,混合燃料雾滴的初始运动速度较大,雾束发展较生物柴油和柴油要快。

图 11 给出了喷射压力 6.2 MPa、背压 1.2 MPa 条件不同丙醇含量时,丙醇 - 生物柴油混合燃料的喷雾锥角变化。

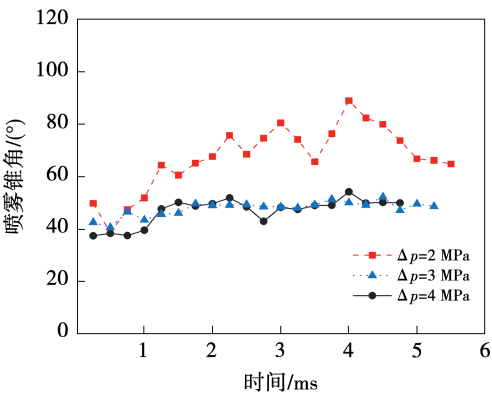


图 8 不同压差下 P75BD25 喷雾锥角比较

Fig.8 Comparison of spray cone angles of P75BD25 at different pressure differences

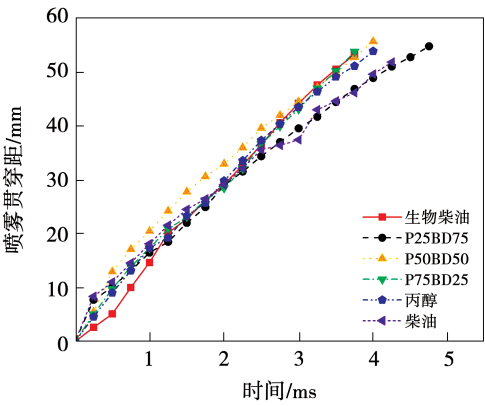


图 10 不同丙醇含量下丙醇 - 生物柴油混合燃料喷雾贯穿距比较

Fig.10 Comparison of spray penetration distances of n-propanol - biodiesel blended fuel in different n-propanol contents

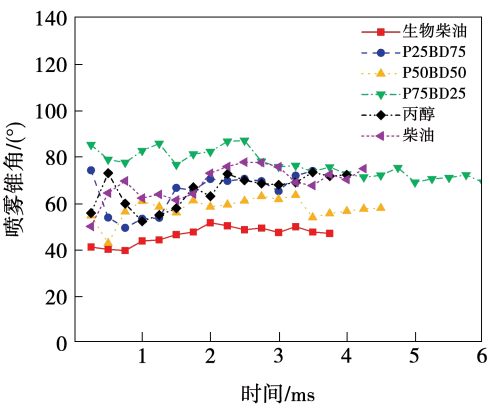


图 11 不同丙醇含量下丙醇-生物柴油混合燃料喷雾锥角比较

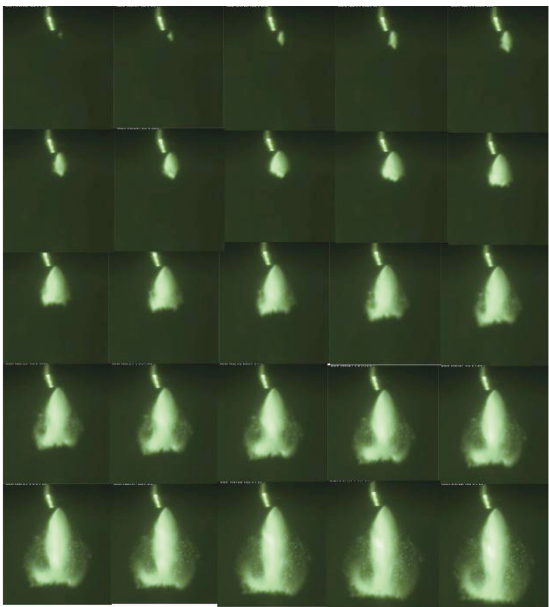
Fig. 11 Comparison of spray cone angles of n-propanol-biodiesel blended fuel in different n-propanol contents

可以看到,所有混合燃料的喷雾锥角都大于生物柴油。P75BD25 燃料的喷雾锥角最大,且大于柴油,表明 P75BD25 的雾化效果优于柴油。试验中测得丙醇的喷雾锥角与柴油相当,这是由于丙醇极易破碎成细小颗粒且沸点很低,从喷嘴喷出后喷雾边缘迅速蒸发,高速相机只能捕捉到液相大颗粒喷雾,因此测得的锥角偏小。

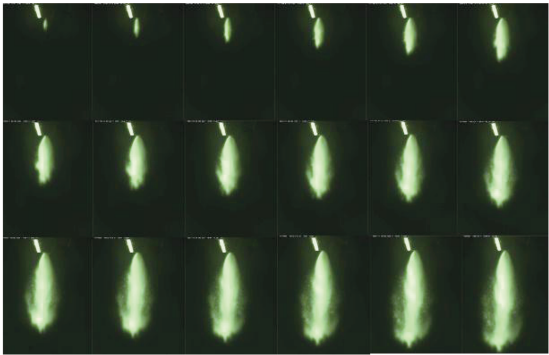
2.4 喷孔直径对喷雾的影响

对于大功率斯特林发动机,通常采用大喷孔直径以实现相同压差下燃油喷射量的提高。喷孔直径对喷雾的影响见于图 9(d)、图 12(a)和图 12(b),对应的喷孔直径分别为 0.41,0.64 和 0.74 mm,喷射压力均为 6.2 MPa,背压均为 1.2 MPa。比较图 9(d)和图 12(b)可以看到,喷孔直径从 0.41 mm 增大到 0.74 mm,喷雾形态发生了变化,较大喷孔直径对应的雾滴密集度明显增大,在喷雾雾束边缘出现大量离散雾滴颗粒。

图 13 和图 14 分别给出了 3 种喷孔直径下喷雾贯穿距和喷雾锥角的变化曲线。由图 14 可知,喷孔直径越大,喷雾锥角越大,喷孔直径 d_n 为 0.41 mm 时喷雾锥角约 50°,喷孔直径为 0.64 和 0.74 mm 时的喷雾锥角分别约为 70°和 75°。随着喷孔直径的增大,虽然燃料流量增大,但相对来说喷雾的径向发展要略大于其轴向发展,喷雾贯穿距减小,如图 13 所示。这是因为喷孔直径越大,径长比增大导致喷雾向前发展轴向导向作用减弱,向径向扩散的速度增大。



(a) 喷孔直径0.64 mm



(b) 喷孔直径0.74 mm

图 12 不同喷孔直径 P75BD25 燃料喷雾图像 (时间间隔 0.25 ms)

Fig. 12 Spray images of P75BD25 with different nozzle diameters (time interval of 0.25 ms)

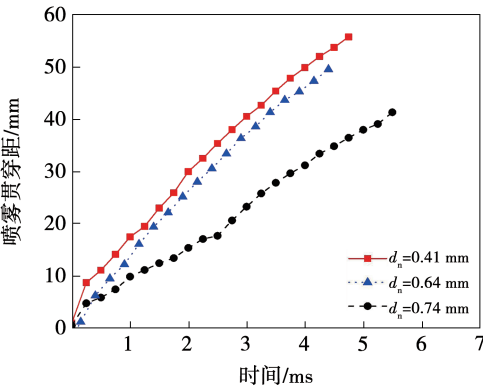


图 13 不同喷孔直径下 P75BD25 燃料喷雾贯穿距比较

Fig. 13 Comparison of spray penetration distances of P75BD25 with different nozzle diameters

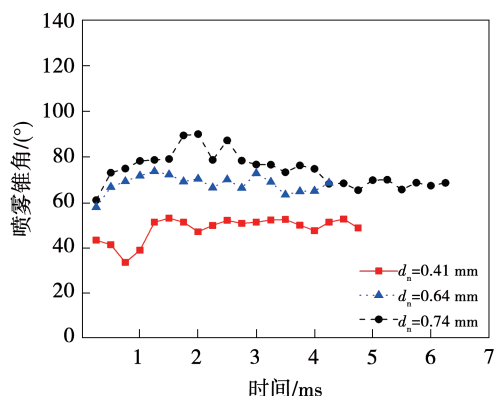


图 14 不同喷孔直径下 P75BD25 燃料
喷雾锥角比较

Fig. 14 Comparison of spray cone angles of P75BD25
with different nozzle diameters

文献[16]中喷雾锥角的计算公式为:

$$\theta = 0.05 \left(\frac{\rho_a \Delta p d^2}{\mu_a^2} \right)^{0.25} \quad (3)$$

式中: μ_a —空气的动力粘度, Ns/m^2 。

由式(3)可知, 喷雾锥角随喷孔直径的增大有所增加, 这与本文的结果一致。

3 结 论

研究了压差、丙醇含量、喷孔直径以及引射对丙醇-生物柴油混合燃料喷雾特性的影响, 结论为:

(1) 喷雾贯穿距与喷雾时间近似呈线性关系; 压差对喷雾发展有一定影响, 但影响较小, 随着压差的增大, 喷雾发展略有加快。

(2) 对比柴油, 研究了丙醇含量对丙醇-生物柴油混合燃料喷雾特性的影响。在喷雾初始阶段, P25BD75, P50BD50, P75BD25 和丙醇的贯穿距均大于生物柴油的; 在喷雾趋于稳定后, P50BD50、P75BD25 和纯生物柴油的喷雾贯穿距明显大于 P25BD75 和柴油。

(3) 喷孔直径越大, 喷雾锥角越大、喷雾贯穿距越小。引射作用对喷雾形态有质的影响, 在可观测范围内(引射器旋流器外), 已无明显的雾束结构, 是低压差下热气机实现良好雾化的关键。

参考文献:

[1] 钱丁超, 段加全, 刘耀东, 等. 燃油喷射压力对缸内直喷汽油机

喷雾特性的影响[J]. 车用发动机, 2018(4): 65-72.

QIAN Ding-chao, DUAN Jia-quan, LIU Yao-dong, et al. Effect of injection pressure on spray characteristics of gasoline direct injection engine [J]. Vehicle Engine, 2018(4): 65-72.

[2] 高东志, 秦建芸, 许丹丹, 等. 生物柴油和柴油直喷喷雾特性试验研究[J]. 车用发动机, 2021(4): 36-41.

GAO Dong-zhi, QIN Jian-yun, XU Dan-dan, et al. Spray characteristics of direct injection for biodiesel and diesel [J]. Vehicle Engine, 2021(4): 36-41.

[3] 袁志远, 崔明利, 李雪松, 等. 缸内直喷发动机燃油喷射压力对闪沸喷雾特性的影响研究[J]. 车用发动机, 2020(5): 11-14.

YUAN Zhi-yuan, CUI Ming-li, LI Xue-song, et al. Influence of fuel injection pressure on flash boiling spray characteristics for GDI engine [J]. Vehicle Engine, 2020(5): 11-14.

[4] 石 奇, 李 铁, 张小卿, 等. 柴油-丁醇混合燃料喷雾火焰的两色法测试研究[J]. 车用发动机, 2016(6): 83-89.

SHI Qi, LI Tie, ZHANG Xiao-qing, et al. Spray flame testing of diesel-butanol blended fuel with two-color method [J]. Vehicle Engine, 2016(6): 83-89.

[5] FENG Z, TANG C, YIN Y, et al. Time-resolved droplet size and velocity distributions in a dilute region of a high-pressure pulsed diesel spray [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 133: 745-755.

[6] CHENG Q, TUOMO H, KAARIO O T, et al. Spray dynamics of HVO and EN590 diesel fuels [J]. Fuel, 2019, 245: 198-211.

[7] HAN D, ZHAI J, DUAN Y, et al. Macroscopic and microscopic spray characteristics of fatty acid esters on a common rail injection system [J]. Fuel, 2017, 203: 370-379.

[8] LAN Z, ZHU D, TIAN W, et al. Experimental study on spray characteristics of pressure-swirl nozzles in pressurizer [J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 63: 215-227.

[9] LIU C, LIU F, YANG J, et al. Experimental investigations of spray generated by a pressure swirl atomizer [J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92: 210-221.

[10] DURDINA L, JEDELSKY J, JICHA M. Investigation and comparison of spray characteristics of pressure-swirl atomizers for a small-sized aircraft turbine engine [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78: 892-900.

[11] 杨国华, 王 凯, 雷凡培, 等. 螺旋形实心锥喷嘴雾化特性试验研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(3): 77-86.

YANG Guo-hua, WANG Kai, LEI Fan-pei, et al. Experimental study on spray characteristics of spiral solid cone nozzle [J].

Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(3):77-86.

[12] 刘涛涛,张武高,陈晓玲,等. 燃烧室背压对压力涡流喷嘴喷雾特性的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(3):21-25.

LIU Tao-tao,ZHANG Wu-gao,CHEN Xiao-ling,et al. Spray characteristics of pressure-swirl nozzle at different ambient pressure of combustion chamber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(3):21-25.

[13] 朱光沸,陈晓玲,张武高,等. 斯特林发动机低硫柴油和二甲醚冷态喷雾[J]. 上海交通大学学报,2013,47(3):341-345.

ZHU Guang-fei,CHEN Xiao-ling,ZHANG Wu-gao,et al. Simulation study about the spray characteristics of a Stirling engine by using diesel and dimethyl ether [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2013,47(3):341-345.

[14] 胡怀礼,张武高,金永星,等. 斯特林发动机喷雾特性试验研究[J]. 农业机械学报,2010,41(2):10-16.

HU Huai-li,ZHANG Wu-gao,JIN Yong-xing,et al. Experimental study on fuel spray characteristics of Stirling engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(2):10-16.

[15] 张武高,陈晓玲,刘涛涛,等. 引射空气对压力旋流喷嘴喷雾特性的影响[J]. 上海交通大学学报,2013,47(11):1723-1727.

ZHANG Wu-gao,CHNE Xiao-ling,LIU Tao-tao,et al. Experimental study of influence of air ejecting on spray characteristics of pressure swirl nozzle in a Stirling engine[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2013,47(11):1723-1727.

[16] 贾锡印,李晓波. 柴油机燃油喷射及调节[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2002.

JIA Xi-yin,LI Xiao-bo. Fuel injection and regulation of diesel engine [M]. Harbin:Harbin Engineering University Press,2002.

(姜雪梅 编辑)