

喷射压力及环境背压对松油-柴油混合燃料喷雾特性的影响

黄豪中¹, 史程¹, 张鹏¹, 王庆新¹, 刘庆生¹, 班智博²

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004; 2. 广西玉柴机器股份有限公司, 玉林 537005)

摘要:为探究柴油/松油混合燃料的喷雾特性, 基于高压可视化容弹试验台, 通过高速摄影技术对掺松油的柴油混合燃料的喷雾过程进行试验研究, 分析了喷射压力、背压和燃料物性的改变对喷雾宏观参数的影响。结果表明: 混合燃料的喷雾贯穿距离先呈现一定程度的线性增长, 然后增长幅度逐渐变小, 喷雾锥角呈先减小再保持在一个相对稳定的数值趋势, 但全程锥角变化不大; 喷射压力从 90 MPa 升高至 150 MPa, 混合燃料的喷雾锥角和贯穿距离的平均增幅分别为 9.2% 和 15%; 背压从 3 MPa 增加到 5 MPa, 混合燃料的平均喷雾锥角增幅约 2.6°, 而贯穿距离降低 11 mm 左右, 说明背压的改变对喷雾特性影响显著; 将广安公式适当地修正可与混合燃料的贯穿距离相互吻合; 向柴油中掺混一定比例的松油后, 燃料的黏度降低, 会引起喷雾锥角、贯穿距离和油束面积均小幅增大, 增强燃料的油气混合。试验研究有助于改善柴油的雾化质量, 可为柴油机代用燃料的筛选提供参考。

关键词: 柴油; 喷射; 压力; 松油; 混合燃料; 喷雾特性; 背压

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.008

中图分类号: TK421⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0055-07

黄豪中, 史程, 张鹏, 王庆新, 刘庆生, 班智博. 喷射压力及环境背压对松油-柴油混合燃料喷雾特性的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 55-61. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.008 http://www.tcsae.org

Huang Haozhong, Shi Cheng, Zhang Peng, Wang Qingxin, Liu Qingsheng, Ban Zhibo. Effect of injection pressure and ambient pressure on spray characteristics of pine oil-diesel blends[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 55-61. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.008 http://www.tcsae.org

0 引言

为了延缓不可再生能源开发和降低内燃机污染物排放, 人们将研究重点放在了寻找高效清洁的代用燃料^[1-3]。在燃料中添加一定比例的含氧生物燃料或含氧添加剂是改善柴油机排放的有效途径之一^[4-6]。随着生物燃料制备技术的发展, 松油(pine oil)作为一种新型燃料在国际上引起关注。松油主要来源于松树分泌的天然树脂(俗称松脂), 松脂经高温蒸馏分离出松节油和松香, 松节油再经过水合反应(磷酸催化)得到松油^[7]。松油是一种浅黄色的透明液体, 主要成分是萜烯醇($C_{10}H_{18}O$)和萜烯($C_{10}H_{16}$)。作为一种源于松树的生物质含氧燃料, 松油具有四大优点^[7-9]: 来源充分; 与柴油相比, 松油具有较低的十六烷值, 有利于延长柴油机的滞燃期, 促进缸内油气均匀混合; 由于松油的低热值与柴油接近, 应用到发动机上可提供与柴油相当的动力输出; 松油与柴油能任意比例互溶, 可直接与柴油掺混燃烧而发动机无需任何改动。

目前, 对掺混松油在发动机上使用的研究较少。

Vallinayagam^[9-10]等在单缸柴油机上研究了不同负荷下, 松油的掺混比例对燃烧与排放特性的影响规律。结果表明: 随着松油掺混比的增加着火延迟变长, 预混燃烧越明显, 热效率提高; NO_x 的排放升高, 而碳烟、CO、HC 的排放均不同程度降低。但是, 发动机掺混含氧生物燃料后, 试验结果不仅受燃料的密度、汽化潜热、十六烷值、含氧量等影响^[11], 而且对于多组分燃料而言, 不同馏分燃料的挥发性也是影响油气混合及蒸发过程的重要因素^[12]。此外, 发动机燃烧是复杂的湍流预混与扩散燃烧过程, 排放又受环境气体密度变化、混合气浓度分布、缸内工质成分等边界条件的影响, 这给探究含氧燃料的燃烧机理带来制约^[13]。

由于燃料的雾化质量直接影响发动机的燃烧过程和排放特性^[14-16], 所以有必要进一步研究掺混燃料对喷雾特性的影响。但目前还未有关于柴油掺混松油喷雾特性研究的报道。鉴于此, 本文通过高速摄影技术对柴油/松油混合燃料的喷雾过程进行可视化研究, 以期对松油作为柴油机代用燃料的可行性研究提供参考依据。

1 试验装置和方法

试验选取市售 0#普通柴油作为基础燃料, 掺松油体积比例为 20%、40%、50%, 分别记为 P0, P20, P40, P50。为了弄清试验所用松油理化特性, 委托广州能源检测研究院对其进行了检测, 柴油和松油的部分理化特性参数如表 1 所示。

收稿日期: 2016-04-12 修订日期: 2016-06-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51076033); 广西科学研究与技术开发计划(桂科攻 1598007-44, 桂科攻 1598007-45)

作者简介: 黄豪中, 男, 广西钟山人, 教授, 博士, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制。南宁 广西大学机械工程学院, 530004。

Email: hhz421@gxu.edu.cn.

表 1 柴油与松油的理化特性比较

| Table 1 Physical and chemical properties of diesel and pine oil | | |
|---|-----------|-------------|
| 特性指标 Properties | 柴油 Diesel | 松油 Pine oil |
| 密度 Density/(kg·m ⁻³) | 840 | 893.4 |
| 运动黏度 Kinematic viscosity(40 °C)/(mm ² ·s ⁻¹) | 3.2 | 1.763 |
| 表面张力 Surface tension/(10 ⁻³ N·m ⁻¹) | 27.5 | 30.2 |
| 低热值 Lower heating value/(MJ·kg ⁻¹) | 42.5 | 39.92 |
| 十六烷值 Cetane number | 52 | 38.9 |
| 氧含量 Oxygen content/% | - | 22.8 |

试验装置如图 1 所示。高压可视化容弹试验台由定容弹、燃油喷射系统、图像采集系统组成。定容弹为自行设计的高压可视化模拟试验装置，其一侧布置有进、排气道及安全阀，有效直径为 110 mm 的石英玻璃视窗固定在另外三个侧面，定容弹内的压力与温度通过布置在可拆卸顶盖上的 Kistler 缸压传感器和热电偶采集与显示。定容弹体最高耐温可达 1 000 K，设计承压极限为 15 MPa，可满足不同燃料喷雾和燃烧的试验要求。燃油喷射系统采用博世第 3 代高压共轨燃油喷射试验台，喷油压力可达 220 MPa，喷射脉宽 10~10 000 μs，喷油嘴采用单孔 P 型油嘴。图像采集系统为在容弹两侧视窗提供内部背景照明的光源，以及布置在另一侧视窗处捕捉油束发展过程的 Photron SA7 型 CCD 高速相机和 Tokina 微距镜头。通过注入高压氮气及管道加热器提供试验所需背压和环境温度。燃油喷射系统、高速相机和共轨喷油器的触发和同步通过电控单元（ECU）与驱动信号实现。试验主要参数设置见表 2。

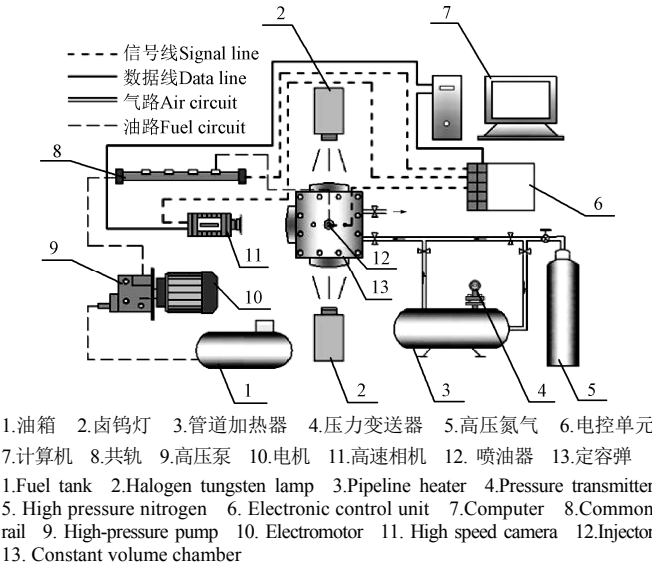


图 1 试验装置示意
Fig.1 Schematic of experimental apparatus

表 2 试验参数

| Table 2 Experimental parameter | | |
|--|-------------------|--|
| 参数 Parameter | 数值 Values | |
| 燃料类型 Type of fuel | P0, P20, P40, P50 | |
| 喷射压力 Injection pressure/MPa | 90, 120, 150 | |
| 环境背压 Ambient pressure/MPa | 3, 4, 5 | |
| 环境温度 Ambient temperature/K | 300 | |
| 环境密度 Ambient density/(kg·m ⁻³) | 34, 46, 57 | |
| 喷孔直径 Nozzle hole diameter/mm | 0.17 | |
| 喷射持续时间 Spray duration/ms | 2 | |
| 相机拍摄速率 Frame rate of camera/fps | 10 000 | |
| 像素分辨率 Resolution | 512×512 | |

试验拍摄的喷雾图片通过 MATLAB 软件自编程序进行处理。先将图像数组直接相减实现背景去除，利用功能函数将图像阈值分割获取最佳二值分割图（亮度小于给定阈值处为 0，其余为 1），再通过 sobel 算子（3×3 邻域的行和列之间的离散差计算梯度，对于灰度渐变和噪声多的图像所提取的轮廓较明显）和 canny 算子（使用两个阈值检测边缘像素，仅当弱像素与强像素相连时才将弱像素包含在输出图像中，不易被噪声“填充”，可获得较为连续的油束边缘）确定油束的边界曲线^[17]，从而在同条件下多次喷雾求平均值得到喷雾锥角，喷雾贯穿距离、油束面积。为了避免喷射湍流在油嘴附近引起的表面扰动以及喷雾前锋的不规则形状对喷雾锥角的影响^[18]，喷雾参数定义如图 2 所示。喷雾贯穿距离是指喷雾前锋与喷嘴出口处的轴向距离^[19]；喷雾锥角为从喷嘴到不同喷雾时刻贯穿距离的二分之一处，沿喷雾锥面所引出的两条切线之间的夹角^[20]。

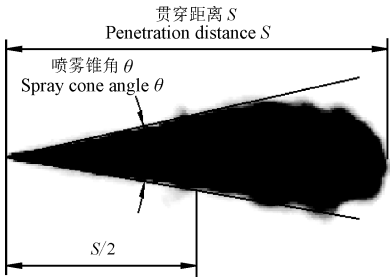


图 2 喷雾参数定义示意
Fig.2 Definitions of spray parameter

相比于传统雾场测试方法，本试验运用高速摄影直拍法可以更加直接地捕捉液相油束的图像，通过图像灰度化和差值去除背景可以得到较为清晰地结果。在黑暗的条件下，定容弹两侧卤钨灯完全对称固定布置，可提供充足的背景光源，与单光源照明相比，双侧照明捕捉的喷雾边缘更加完整，这为后期图像处理的准确性提供保证。对于图片处理过程，由于喷雾过程中不同阶段的图片的灰度值不尽相同，需要调整阈值进行分割，本文的阈值取值是以每张图片的喷油嘴处于边缘轮廓线为原则，使每张图片油束初始的轮廓线相同，再根据功能函数确定油束的边界曲线。针对每组试验均进行了 7 次喷雾过程和图像处理，再将其求平均值得到最后的数据结果。

2 试验结果与分析

2.1 掺混比对混合燃料喷雾特性的影响

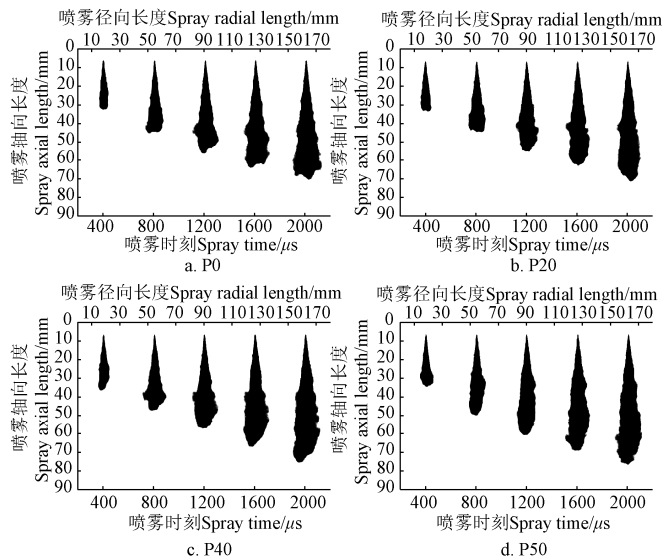
为直观分析掺混比对混合燃料喷雾特性影响的变化规律，图 3 给出了各混合燃料在环境背压为 5 MPa，喷射压力为 150 MPa 时高速相机拍摄的喷雾形态图像。图 4 为喷雾图像经处理后得到的喷雾特性曲线。观察发现，4 种燃料的喷雾锥角和喷雾贯穿距离均随松油掺混比例的增加而略有增大。对比不同掺混燃料的雾化情况，主要差异取决于运动黏度、表面张力和密度等燃料本身的物性参数^[21]，通常利用韦伯数 We 和雷诺数 Re 表征。韦伯数和雷诺数的定义式分别为

$$We = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot D}{\sigma} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (2)$$

式中 σ 为液体的表面张力, N/m; μ 为液体动力黏度, N·s/m²; ρ 为液体密度, kg/m³; v 为射流速度, m/s, 利用伯努利方程求得; D 为喷孔直径, m。韦伯数是惯性力和表面张力的比值, 比值越大, 液体越容易雾化; 雷诺数惯性力和黏性力的比值, 比值越大, 液体破碎雾化越好^[22]。为深入了解掺混比对混合燃料喷雾特性的影响, 本文对不同掺混燃料在不可压缩流场下的韦伯数与雷诺数进行了计算, 如图 5 所示。计算韦伯数和雷诺数的密度、黏度及表面张力由表 1 确定; 喷孔直径在表 2 体现; 射流速度是利用伯努利方程计算求得, 其中喷油量、喷射脉宽由试验喷油系统得到。由图 5 可知, 随着松油掺混比例的增大, 混合燃料的雷诺数变大, 而韦伯数减小。这表明雷诺数对喷雾锥角和贯穿距离的影响大于韦伯数, 说明在本文研究的试验工况下, 燃料的黏度起主导作用。运动黏度大的柴油使得惯性力更加难以将其破碎, 微观粒径也要大于松油, 油雾的射流破碎效果不理想; 同时初始动能相同, 黏度较低的油滴不易黏连在一起, 使得燃油在油嘴处的流动阻力降低, 喷射初速度增高, 这就提供了足够的惯性力, 从而导致喷雾锥角变大和喷雾贯穿距离增加。另外, 由图 4b 喷射前期 (0~600 μ s) 曲线看出, 混合燃料的喷雾贯穿距离曲线出现上下穿插

现象, 贯穿距离差别不大。这可能是由于油束不完全破碎雾化时表面张力很小, 韦伯数较大, 导致雾化情况差距不明显, 但随着喷雾的持续发展, 油束前端与环境气体卷吸运动的加强, 燃料的物化参数发生积极的表现, 雾化情况得以回归正常。所以喷雾贯穿距离和喷雾锥角的发展是密度、运动黏度、表面张力共同作用的综合影响^[23]。

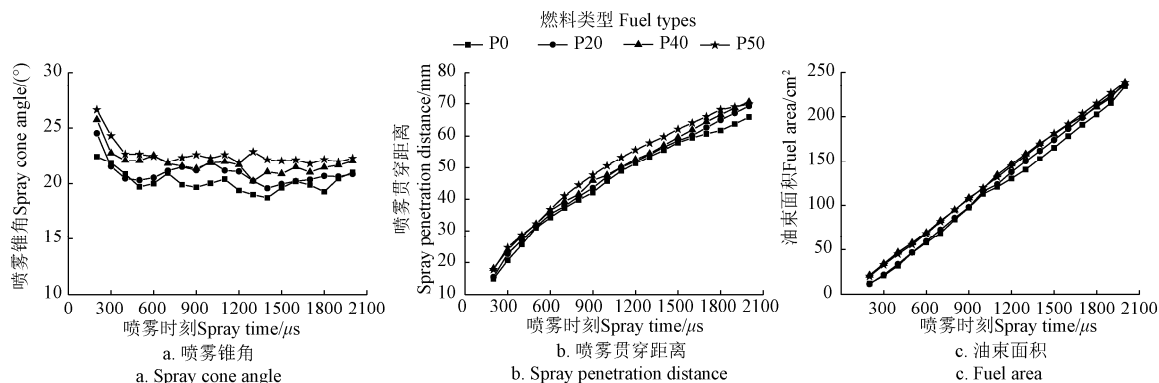


注: 喷射压力 150 MPa, 环境背压 5 MPa。

Note: Injection pressure 150 MPa, ambient pressure 5 MPa.

图 3 不同掺混燃料的喷雾形态

Fig.3 Spray form of different blend fuels

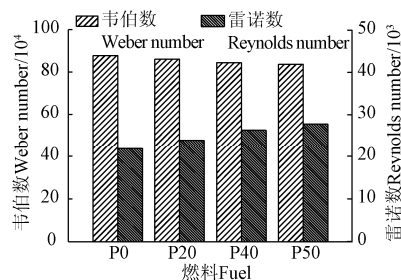


注: 喷射压力 150 MPa, 环境背压 5 MPa。

Note: Injection pressure 150 MPa, ambient pressure 5 MPa.

图 4 不同掺混燃料的喷雾特性

Fig.4 Spray characteristics of different blend fuels



注: 喷射压力 150 MPa, 环境背压 5 MPa。

Note: Injection pressure 150 MPa, ambient pressure 5 MPa.

图 5 不同掺混燃料的韦伯数与雷诺数

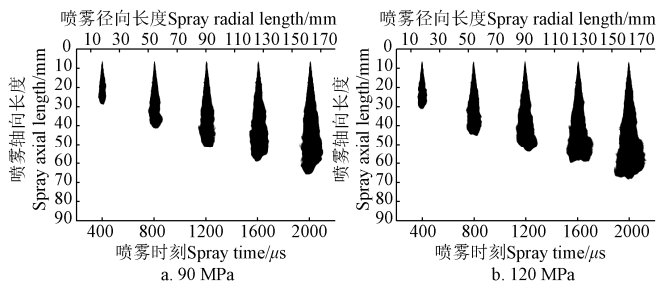
Fig.5 Weber number and Reynolds number of different blend fuels

此外, 综合表现喷雾锥角和喷雾贯穿距离的则是油束发展面积^[3]。通过对图 4c 直观分析可知, 在喷雾稳定后的不同时刻, 相比于纯柴油, 掺混燃料的油束面积均随松油比例的增加而略有增大, 喷雾与周围环境介质混合更充分, 说明在本试验掺混比例范围内, 相比于纯柴油, 添加了松油的混合燃料的雾化质量得到有效改善。

2.2 喷射压力对混合燃料喷雾特性的影响

图 6、图 3d 及图 7 分别给出 P50 在背压为 5 MPa, 喷射压力为 90、120、150 MPa 时的喷雾形态图像和喷雾特性曲线。从图 7a 看出, 提高喷射压力可以增大燃油的喷雾锥角, 但增大幅度有限, 每升高 30 MPa 的喷射压力,

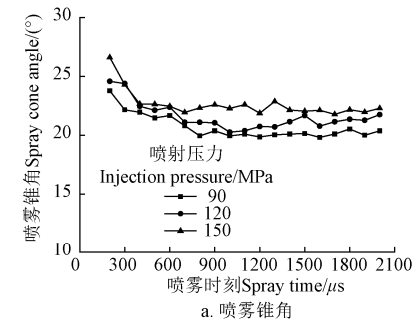
P50 在不同时刻的喷雾锥角平均增幅分别为 8.1% 和 10.3%。这是由于喷射压力对喷孔内燃油的射流速度有直接影响^[24], 提高喷射压力, 使射流内部推动增强, 促进了油滴的破碎和雾化, 催化了气态燃油向定容弹内四周扩散^[25], 所以喷雾锥角相应地增大。另外, 从整个喷雾发展过程看, 喷雾前期 ($0 \sim 600 \mu\text{s}$), 喷雾锥角变化较为明显, 这是由于燃油发生初次雾化, 轴向速度和径向动量较大, 喷雾呈急剧扩散的状态发展。喷雾中后期 ($700 \sim 1500 \mu\text{s}$), 喷雾锥角趋于平稳, 环境介质与油束锥面上的液滴发生强烈的卷吸现象, 二次雾化作用明显; 由于已喷射燃油和周围气体对后期续喷燃油的喷雾锥角继续发展形成阻滞, 因此喷雾锥角基本保持在一个稳定范围。喷雾末期 ($1500 \mu\text{s}$ 以后), 喷射的油量和动能接近耗尽, 喷雾形态逐渐破碎, 油束在空间上稀疏分布^[12]; 同时由于燃油受到环境温度影响, 最外围燃油液滴发生“蒸发冷却”作用^[26]和气化相变^[27](由液相转变为气相), 但高速相机无法捕捉气相油束, 因此喷雾锥角有逐渐变小的趋势。



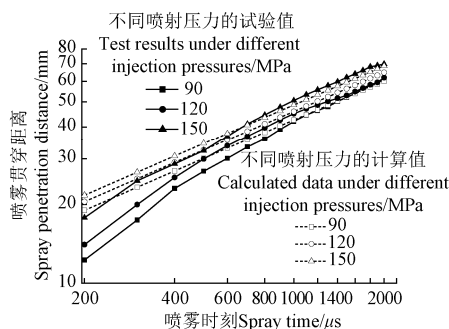
注: 环境背压 5 MPa。 Note: Ambient pressure 5 MPa.

图 6 不同喷射压力下 P50 的喷雾形态

Fig.6 Spray form of P50 under different injection pressures



a. 喷雾锥角
a. Spray cone angle



b. 喷雾贯穿距离
b. Spray penetration distance

注: 环境背压 5 MPa。 Note: Ambient pressure 5 MPa.

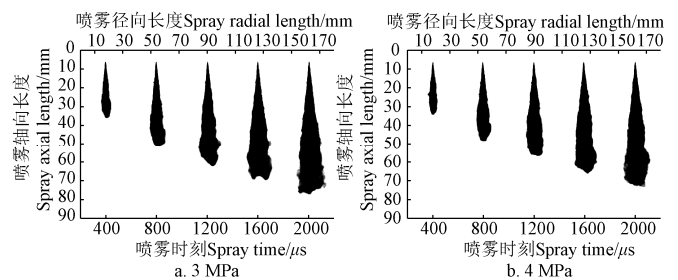
图 7 不同喷射压力下 P50 的喷雾特性

Fig.7 Spray characteristics of P50 under different injection pressures

由图 7b 明显看出, 在环境背压同为 5 MPa 时, 喷射压力从 90 MPa 升高到 150 MPa, P50 的喷雾贯穿距离随喷射压力的增加而显著变大, 平均增幅在 15% 左右。因为燃油喷射压力的提升使液滴具有更大的湍动能和更高的速率向前发展; 同时增大喷射压力也加速了喷雾油束的破碎、雾化和蒸发, 增加了喷雾发展过程中与环境气体的压力差, 这也促使燃油喷雾不断向前发展^[28]。此外, 从喷雾后期 ($1500 \mu\text{s}$ 以后) 曲线看出, 当喷射压力在 90 和 120 MPa 时, 燃料的喷雾贯穿距离增大速率减小, 且与 150 MPa 时的贯穿距有明显的差距。这可能归因于燃料在低喷射压力和高环境背压下, 喷射初速度与动能受到环境介质的影响增强, 先前喷出的油束对后面喷入燃油的继续发展有较大阻碍作用, 喷雾发展过程中的贯穿速率衰减加快, 而当喷射压力进一步增大时, 这种状况得到改善。

2.3 背压对混合燃料喷雾特性的影响

图 6b 和图 8 为 P50 在喷射压力为 120 MPa 时, 不同环境背压下的喷雾形态图像。图 9 给出了该工况下 P50 的喷雾锥角和贯穿距离随时间变化的曲线。由图可见, 在不同环境背压下, 喷雾锥角和喷雾贯穿距离的总体发展趋势并未发生变化。随着背压的增加, 喷雾锥角相应地增大, 喷雾贯穿距离出现了一定程度地减小。



注: 喷射压力为 120 MPa。

Note: Injection pressure 120 MPa.

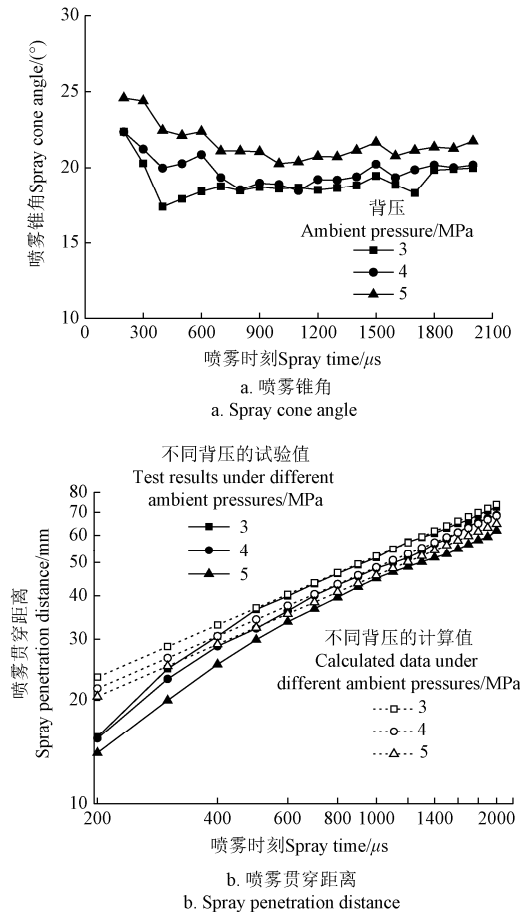
图 8 不同环境背压下 P50 的喷雾形态

Fig.8 Spray form of P50 under different ambient pressures

从图 9a 的喷雾锥角变化曲线可以发现, 背压从 3 MPa 升高到 5 MPa, P50 的平均喷雾锥角增大为 2.6°。在不同背压和相同喷射压力下, 混合燃料喷雾锥角的变化趋势大致相同, 都是在喷雾前期出现一个较高的峰值, 然后快速下降后略有上升, 最后保持在一个相对稳定的数值, 但全程喷雾锥角的变化不大。另外, 随着背压的增加, 弹内气体环境密度变大, 喷雾锥角增大。混合燃料喷射液滴与环境气体能量交换加强, 加速了液滴从大体积形态向小体积形态转化, 增加了射流破碎效果, 喷雾的外轮廓边缘发生更为强烈的卷吸作用, 高环境背压阻碍了喷雾油束的轴向发展速度, 有利于喷雾朝径向方向不断扩散^[29], 因而增加了喷雾的锥角。

同样, 混合燃料在不同背压下的喷雾贯穿距离均随时间变化先呈现一定程度地类似线性增长, 且近乎平行, 当喷雾发展至 $900 \mu\text{s}$ 以后, 曲线斜率减小, 贯穿距离增长幅度逐渐变小。另外, 图 9b 中背压为 5 MPa 时喷雾末期的贯穿距离较背压为 3 MPa 时的小 11 mm, 说明背压的改

变会直接影响燃料的喷雾贯穿距离。分析原因为：随着背压的增大，喷雾器油嘴孔的内外压力差变小，而压力差的变小使得燃油在喷嘴出口处获得的湍动能强度减弱，初始射流速度降低；同时背压增大导致定容弹内环境密度变大，油雾与容弹内环境气体的相互作用效果更强烈，液滴向前运动受到的阻力变大；液滴与周围气体的动量交换变快，造成燃油液滴动量损失较多，喷雾贯穿距离势必减小。



注：喷射压力为 120 MPa。
Note: Injection pressure 120 MPa.

图 9 不同背压下 P50 的喷雾特性

Fig.9 Spray characteristics of P50 under different ambient pressures

2.4 混合燃料喷雾贯穿距离公式的改进

为了更直观方便地描述喷雾贯穿距离随喷雾时刻的变化规律，人们提出了许多经验公式。Hiroyasu 和 Arai^[30]提出的广安公式（式（3））是目前最为普遍应用的经验公式。

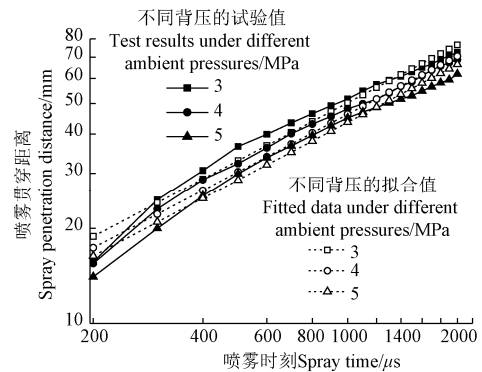
$$S = 2.95 \left(\frac{\Delta P}{\rho_a} \right)^{0.25} \cdot (D \cdot t)^{0.5} (t \geq t_b). \quad (3)$$

式中 S 为喷雾贯穿距离，m； ΔP 为喷射压力与背压之差，Pa； ρ_a 为环境密度，kg/m³； t 为喷射时间，s。通过计算破碎时间 t_b 均小于 200 μs，即本文主要讨论触发喷射信号 200 μs 后的情况。对比图 7b 和图 9b 中试验测得的 P50 喷雾贯穿距离的实际值与广安公式的计算值在不同喷射

压力及背压下，均有不同程度地偏差，无法准确反映柴油/松油混合燃料的喷雾贯穿距离变化过程。在本试验喷射压力和背压范围内，运用待定系数法将广安公式的变量系数和指数设为未知数，对图 7b 和图 9b 的 P50 喷雾贯穿距离 S 及相关变量参数代入并进行计算，得到修正拟合后的经验公式，其表达式为

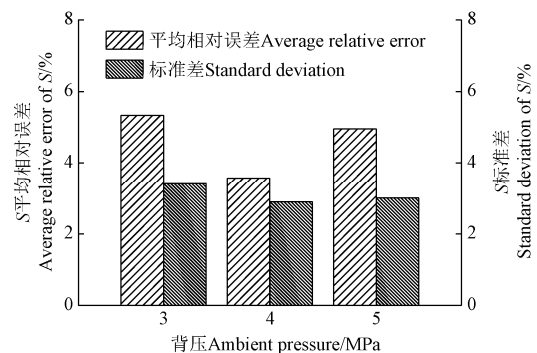
$$S = 1.978 \Delta P^{0.366} \cdot \rho_a^{-0.276} (D \cdot t)^{0.609} \cdot (t \geq t_b). \quad (4)$$

利用式（4）对图 9b 试验测得的数据进行拟合，在对数坐标下比较拟合值与试验值（图 10），并给出了拟合公式的平均相对误差及标准差（图 11）。由图可知，经拟合计算后 P50 在各工况下的喷雾贯穿距离 S 与试验实际测量值对比，计算结果有了显著的改观，平均相对误差低于 5%，标准差在 3% 左右。但在喷雾初期(200 μs)，公式计算结果存在较大误差，相对误差均在 10% 以上。这可能是由于喷射初始阶段油束急剧发展，贯穿距离随时间的增长率变化较大，导致试验结果的随机误差变大，从而影响拟合公式的计算精度。因此，在本试验的工况范围内，喷雾贯穿距离服从经修正后的广安经验公式，说明拟合得到的结果可以定量地反映松油/柴油混合燃料的喷雾情况。



注：喷射压力为 120 MPa。
Note: Injection pressure 120 MPa.

图 10 不同背压下 P50 贯穿距离的试验值与拟合值
Fig.10 Test results and fitted data for penetration distance of P50 under different ambient pressures



注：喷射压力为 120 MPa。
Note: Injection pressure 120 MPa.

图 11 不同背压下 P50 贯穿距离 S 的平均相对误差及标准差
Fig.11 Average relative error and standard deviation for penetration distance S of P50 under different ambient pressures

3 结 论

1) 在喷射压力为 90~150 MPa 及背压为 3~5 MPa 下, 雷诺数直接影响不同掺混燃料的雾化情况, 说明燃料的黏性力对喷雾特性起主导作用。

2) 同一背压 (5 MPa) 下, 柴油/松油混合燃料的喷雾锥角和贯穿距离随喷射压力升高而增大, P50 的贯穿距离和喷雾锥角在试验喷射压力范围内的平均增幅分别为 15% 和 9.2%。

3) 环境背压对燃料喷雾特性影响显著, 相同喷油压力 (120 MPa) 时, 背压从 3 MPa 增加至 5 MPa, P50 的喷雾贯穿距离缩短约 11 mm, 平均喷雾锥角增大 2.6°。

4) 对于松油/柴油混合燃料的喷雾贯穿距离, 将广安公式的变量系数和指数进行适当地修正可与试验结果更好吻合。

5) 混合燃料的喷雾特性与柴油相似, 随着松油掺混比的增加, 混合燃料的喷雾锥角、贯穿距离和油束面积均小幅增加, 说明掺混一定比例松油可有效提高燃油与环境介质的混合, 改善燃料的雾化过程。

[参 考 文 献]

- [1] Huang H Z, Liu Q S, Yang R Z, et al. Investigation on the effects of pilot injection on low temperature combustion in high-speed diesel engine fueled with *n*-butanol-diesel blends[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 106: 748—758.
- [2] Chen P C, Wang W C, Roberts W L, et al. Spray and atomization of diesel fuel and its alternatives from a single-hole injector using a common rail fuel injection system[J]. *Fuel*, 2013, 103: 850—861.
- [3] Kim W I, Lee K, Lee C S. Spray and atomization characteristics of isobutene blended DME fuels[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 22: 98—106.
- [4] Liu H F, Li S J, Zheng Z Q, et al. Effects of *n*-butanol, 2-butanol, and methyl octynoate addition to diesel fuel on combustion and emissions over a wide range of exhaust gas recirculation (EGR) rates[J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 246—256.
- [5] Agarwal A K, Dhar A, Gupta J G, et al. Effect of fuel injection pressure and injection timing of Karanja biodiesel blends on fuel spray, engine performance, emissions and combustion characteristics[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 91: 302—314.
- [6] Huang H Z, Zhou C Z, Liu Q S, et al. An experimental study on the combustion and emission characteristics of a diesel engine under low temperature combustion of diesel/gasoline/*n*-butanol blends[J]. *Applied Energy*, 2016, 170: 219—231.
- [7] Vallinayagam R, Vedharaj S, Yang W M, et al. Impact of ignition promoting additives on the characteristics of a diesel engine powered by pine oil-diesel blend[J]. *Fuel*, 2014, 117: 278—285.
- [8] Anand B P, Saravanan C G, Srinivasan C A. Performance and exhaust emission of turpentine oil powered direct injection diesel engine[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(6): 1179—1184.
- [9] Vallinayagam R, Vedharaj S, Yang W M, et al. Combustion performance and emission characteristics study of pine oil in a diesel engine[J]. *Energy*, 2013, 57: 344—351.
- [10] Vallinayagam R, Vedharaj S, Yang W M, et al. Pine oil-biodiesel blends: A double biofuel strategy to completely eliminate the use of diesel in a diesel engine[J]. *Applied Energy*, 2014, 130: 466—473.
- [11] Oo C W, Shioji M, Nakao S, et al. Ignition and combustion characteristics of various biodiesel fuels(BDFs)[J]. *Fuel*, 2015, 158: 217—287.
- [12] 黄豪中, 安彦召, 苏万华, 等. 喷射压力和喷射直径对柴油机混合燃料喷雾特性的影响[J]. *内燃机学报*, 2013, 31(3): 200—207.
Huang Haozhong, An Yanzhao, Su Wanhua, et al. Investigation on the influence of injection pressure and nozzle diameter on the spray of blended fuel in diesel engine[J]. *Transactions of CSICS*, 2013, 31(3): 200—207. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张鹏, 刘海峰, 陈贝凌, 等. 掺混含氧燃料的柴油替代物部分预混火焰中多环芳香烃的荧光光谱和碳烟浓度[J]. *物理化学学报*, 2015, 31(1): 32—40.
Zhang Peng, Liu Haifeng, Chen Beiling, et al. Fluorescence spectra of polycyclic aromatic hydrocarbons and soot concentration in partially premixed flames of diesel surrogate containing oxygenated additives[J]. *Acta Phys-Chim Sin*, 2015, 31(1): 32—40. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王谦, 赖晓易, 吴玉强, 等. 柴油机瞬态喷雾特性及喷油器后滴油现象试验研究及分析[J]. *内燃机工程*, 2015, 36(5): 18—24.
Wang Qian, Lai Xiaoyi, Wu Yuqiang, et al. An experimental study of spray characteristics of a diesel and analyzing of fuel dripping phenomenon[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2015, 36(5): 18—24. (in Chinese with English abstract)
- [15] Gao Y, Deng J, Li C W, et al. Experimental study of the spray characteristics of biodiesel based on inedible oil[J]. *Biotechnology Advances*, 2009, 27(5): 616—624.
- [16] 姚春德, 胡江涛, 银增辉, 等. 喷油压力对高压共轨柴油机燃烧影响的可视化研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 355—361.
Yao Chunde, Hu Jiangtao, Yin Zenghui, et al. Visualization on combustion characteristics of common rail diesel engine at different injection pressures[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 355—361. (in Chinese with English abstract)
- [17] 阮秋琪. 数字图像处理: MATLAB 版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 206—211.
- [18] Klein-Douwel R J H, Frijters P J M, Seykens X L J, et al. Gas density and rail pressure effects on diesel spray growth from a heavy-duty common rail injector[J]. *Energy & Fuels*, 2008, 23(4): 1832—1842.
- [19] 安彦召, 黄豪中, 苏万华, 等. 燃油属性和环境密度对柴油机混合燃料喷雾的影响[J]. *内燃机学报*, 2013, 31(2): 103—108.
An Yanzhao, Huang Haozhong, Su Wanhua, et al. Influence of fuel property and ambient density on spray of fuel blend[J]. *Transactions of CSICE*, 2013, 31(2): 103—108. (in Chinese with English abstract)
- [20] Naber J D, Siebers D L. Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 1996: 960034.
- [21] Deshmukh D, Mohan A M, Anand T N C, et al. Spray characterization of straight vegetable oils at high injection pressures[J]. *Fuel*, 2012, 97(7): 879—883.
- [22] 朱浩月, 王春海, 方俊华, 等. 生物柴油高压共轨喷油规律与喷雾特性的试验研究[J]. *内燃机工程*, 2013, 34(增刊 1): 1—4.
Zhu Haoyue, Wang Chunhai, Fang Junhua, et al. Injection rate and spray characteristics of biodiesel in HP common rail system[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2013, 34(Supp.1): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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.
- [24] 杜慧勇, 张紫薇, 刘建新, 等. 柴油机喷油脉宽和喷油压力变化对喷油器流量系数的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 71–76.
Du Huiyong, Zhang Ziwei, Liu Jianxin, et al. Influence of changed fuel injection pulse width and pressure on discharge coefficient in diesel injector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(12): 71–76. (in Chinese with English abstract)
- [25] Crua C, Shoba T A, Heikal M. High-speed microscopic imaging of the initial stage of diesel spray formation and primary breakup[R]. SAE paper No.2247, 2010.
- [26] Wang X G, Huang Z H. Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, 28(31): 659–666.
- [27] 马玉坡. 低温环境下柴油喷雾与燃烧特性试验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
Ma Yupo. Experimental Study on Diesel Spray and Combustion Characteristics under Low Temperature Condition[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王尚学, 任贵峰, 曹晶, 等. 煤制油宏观喷雾特性试验研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(1): 67–71.
Wang Shangxue, Ren Guifeng, Cao Jing, et al. Experimental study on macroscopic spray characteristics of coal to liquids[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(1): 67–71. (in Chinese with English abstract)
- [29] 何旭, 刘海, 曾威霖, 等. 燃油温度和喷射压力对葵花籽油与柴油喷雾特性的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 75–82.
He Xu, Liu Hai, Zeng Weilin, et al. Effect of fuel temperature and injection pressure on spray characteristics of sunflower oil and diesel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 37(15): 75–82. (in Chinese with English abstract)
- [30] Hiroyasu H, Arai M. Structures of fuel sprays in diesel engine[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 1990: 900475.

Effect of injection pressure and ambient pressure on spray characteristics of pine oil-diesel blends

Huang Haozhong¹, Shi Cheng¹, Zhang Peng¹, Wang Qingxin¹, Liu Qingsheng¹, Ban Zhibo²

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., Yulin 537005, China)

Abstract: The fuel spray performance and atomization quality played a fundamental role in promoting the level of combustion efficiency and exhaust emissions in internal combustion engines. In order to achieve better atomizing mode of diesel, we conducted experiments to study the spray characteristics of diesel blending pine oil. A diesel/pine oil spray trial platform was constructed to carry out a visual constant volume chamber and the high-pressure common rail test bench. The high-speed photograph technique was applied to systematically investigate the spray process of blended fuel. The study was conducted under the pine oil blending ratios of with 0, 20%, 40% and 50%, respectively. Then, the influences of injection pressure, ambient pressure and fuel property on macroscopic spray parameters (including spray cone angle, spray penetration distance and fuel flow area) were investigated. The results showed that at first, the spray penetration distance of blended fuel presented a certain degree of linear growth with the fuel injection, and then the increasing rate of the penetration distance decreased. On the other hand, it was observed that the spray cone angle was wider at the beginning of the spray development, and it gradually converged to a smaller and constant value. In general, the variation of the spray cone angle is stabilized during spray process. For the same ambient pressure (5 MPa), the blended fuel had a longer penetration distance with increasing the fuel injection pressure from 90 MPa to 150 MPa. And the effect of injection pressure on the spray cone angle according to the variation in injection pressure showed that the spray cone angle at a 150 MPa injection pressure was larger than that at 90 MPa of injection pressure. The percentage increased in the mean spray cone angle and penetration distance was 9.2% and 15%, respectively. When the ambient pressure increased from 3 MPa to 5 MPa at the same injection pressure (12 MPa), the increment of ambient pressure led to obvious increase of the spray cone angle as well as sharp decrease of the penetration distance. During the spray evolution process, the mean spray cone angle increased about 2.6°. The spray penetration distance decreased about 11 mm at the end of the injection. This indicated that the rise of ambient pressure had a significant effect on spray characteristics. In the range of experimental condition, good correlation was found between the spray penetration distance of blended fuel and the modified Hiroyasu's empirical equation. When injection pressure was 150 MPa and ambient pressure was 5 MPa, the effect of Reynolds number was greater than that of Weber number as blending ratios of pine oil increased by 50%. This suggested that the fuel viscosity played an important role in spray characteristics. The spray performance of blended fuel was basically similar to conventional diesel fuel with the variation of injection pressure and ambient pressure. In addition, analyses showed that the spray penetration distance, spray cone angle and fuel flow area increased slightly after blended a certain proportion of pine oil into diesel, which was very conducive to improve air and fuel mixture effect with pine oil. It can be concluded that investigating the spray characteristics of diesel and pine oil blends would be significantly beneficial for enhancing the atomization quality of pure diesel, and also provided a valuable reference on the spray characteristics to choose an acceptable and appropriate alternative fuel for common rail diesel engine.

Keywords: diesel fuels; spraying; pressure; pine oil; blended fuel; spray characteristics; ambient pressure