

# 燃油温度对柴油液相喷雾特性的影响

雷基林, 刘晓佩, 刘懿\*, 刘春丽, 赵立艳, 王东方

(昆明理工大学云南省内燃机重点实验室, 昆明 650500)

**摘要:** 在低温环境下柴油黏度增大流动性变差, 抑制了柴油机柴油喷雾的雾化和蒸发, 直接影响柴油机的冷启动可靠性。为此, 采用背光法试验对比研究高温、低温柴油在不同工况条件下喷雾宏观结构的变化规律, 并利用 MATLAB 对拍摄的喷雾图像进行数字图像处理获取喷雾宏观特性参数。试验结果表明, 喷孔直径 0.12 mm 时, 随着喷油压力的变化柴油温度对喷油量的影响比较明显, 黏性力的持续作用减慢了靠近壁面的流体层的流动速度, 抑制柴油喷出, 柴油温度低于 0℃ 随着柴油温度降低喷油量减少, 高压时柴油温度降低导致液滴间增强的黏性力在动能和惯性力的作用下反而促进柴油持续喷出, 喷油量随着柴油温度降低而增多。喷油压力为 75 MPa 时, 柴油温度降至 -20℃ 相较 38℃ 柴油喷油量增加了近 23.87%。并且小孔径下柴油温度降低液滴间黏性力增大, 导致喷雾液滴尺寸增大, 液滴所具有的动量越大, 削弱柴油喷雾径向发展趋势, 轴向运动能力增强, 随着柴油温度的降低喷雾贯穿距增大而喷雾锥角减小, 柴油温度从 38℃ 降至 -20℃ 柴油喷雾在 0.70 ms 时刻喷雾贯穿距增大了 39.89 mm。喷孔直径为 0.28 mm 时, 喷射压力小于 75 MPa, 喷油量随着柴油温度的降低而减少, 相同喷油压力下柴油更多的动量消耗于克服更大的内部摩擦力, 使其到达最远距离的能力减弱, 降低柴油温度会导致喷雾贯穿距和喷雾锥角均减小, 当喷油压力为 75 MPa 时 0.70 ms 时刻 -20℃ 柴油喷雾贯穿距相对 38℃ 柴油喷雾贯穿距缩短了 30.86 mm。相同喷射压力下增大喷孔直径, -20℃ 柴油喷雾贯穿距减小, 喷雾锥角增大。其次, 随着喷油压力的提升柴油温度对喷雾宏观特性的影响更加突出, 喷油压力越高降低柴油温度造成的喷雾贯穿距缩短趋势越明显。研究结果可为柴油机冷启动过程低温柴油喷雾特性提供支撑。

**关键词:** 柴油机; 低温冷启动; 喷雾特性; 喷油量; 喷孔直径

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406222

中图分类号: TK428.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-21-0056-08

雷基林, 刘晓佩, 刘懿, 等. 燃油温度对柴油液相喷雾特性的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 56-63. doi: 10.11975

/j.issn.1002-6819.202406222 <http://www.tcsae.org>

LEI Jilin, LIU Xiaopei, LIU Yi, et al. Effects of fuel temperature on the characteristics of diesel liquid-phase sprays[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 56-63. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406222 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

随着先进技术在柴油机上的不断应用升级, 凭借热效率高、可靠性好、安全性高等特性<sup>[1]</sup>, 柴油机在相当长的一段时间内依然是农业生产、工程机械、交通运输以及国防装备等领域的重要动力来源<sup>[2-3]</sup>。然而, 在高海拔低温环境下柴油机冷启动过程中, 机油黏度增加导致启动阻力急剧增加<sup>[4]</sup>, 在较低的压缩温度和压力下柴油具有较高的黏度、密度和较低的挥发性<sup>[5]</sup>, 导致柴油在低温环境下雾化和蒸发效果不佳, 造成发动机在启动过程中面临严重的热效率损失、增加有害物排放及动力不足的问题<sup>[6-8]</sup>。柴油的喷射和雾化性能受到低温环境的制约, 从根本上决定内燃机冷启动能否成功以及低温工作性能好坏<sup>[9]</sup>。针对上述低温特征, 研究低温柴油在自由

喷雾特性对改善柴油机冷启动性能具有重要的理论意义。

柴油机缸内燃烧过程优劣依赖于前期柴油的雾化、蒸发和油气混合过程, 而喷油压力和喷嘴孔径影响柴油雾化发展和混合气的形成<sup>[10-11]</sup>, 为探究柴油喷雾特性国内外学者进行了大量的研究。AGARWAL 等<sup>[12]</sup>发现喷雾的雾化速度、气相喷雾面积和贯穿距均随着喷油压力的增加有所增加。叶丽华等<sup>[13]</sup>研究不同喷油压力和环境背压的混合燃料喷雾特性, 喷雾贯穿距随着喷油压力的增大而增大, 增大喷油压力可以改善雾化。SHI 等<sup>[14]</sup>针对大功率柴油机低温着火过程, 在定容燃烧室内研究喷油压力对重型柴油机喷雾和着火特性的影响, 研究表明, 对于重型柴油机, 最好适当提高喷油压力, 有助于高温下的燃烧优化, 以确保快速启动, 同时发现低温下会导致着火不稳定<sup>[15]</sup>。其次, 石智成等<sup>[16]</sup>也针对喷孔直径和环境温度对低温环境下重型柴油机喷雾特性的影响进行了可视化测量, 结果表明, 大孔径下只有柴油的蒸发作用足够强烈, 才能使得液相撞壁喷雾量减少且达到稳定状态。YU 等<sup>[17]</sup>仿真研究了不同喷孔直径对混合物形成和燃烧特性的影响。研究结果表明, 随着喷嘴直径的减小, 喷雾渗透长度降低, 混合物更均匀, 碳烟排放显著减少。NISHIDA 等<sup>[18]</sup>发现喷孔直径的减小同时会导致

收稿日期: 2024-06-30 修订日期: 2024-08-30

基金项目: 云南省省市一体化专项项目 (202202AC080004); 云南省基础研究计划项目 (202301AT070384)

作者简介: 雷基林, 教授, 博士生导师, 研究方向为车辆动力设计与结构优化。Email: lejilin@kmust.edu.cn

※通信作者: 刘懿, 校聘副教授, 研究方向为氢燃料电池发动机水热管理与内燃机喷雾撞壁。Email: lqyi@kust.edu.cn

喷油速率和空气卷吸速率的减小，这对混合气的形成是不利的，在喷雾的宏观发展特性上，较小喷孔直径导致较小的喷油速率使得喷雾贯穿距和喷雾锥角均减小。徐阳杰等<sup>[19]</sup>中在常温常压下研究了喷孔直径（0.16~0.28 mm）对柴油射流雾化的影响，发现随着喷孔直径的增大，流动阻力减小，贯穿加速度增大。

从前人的研究来看，影响柴油喷雾的因素复杂而多变，不同温度柴油的喷射性能和喷雾特性主要取决于喷射系统参数、喷嘴结构以及柴油的物化特性。可见，在研究柴油雾化过程的基础上，对柴油喷雾特性的研究从未停止，但大多数研究集中在高温条件下的柴油机性能或喷雾燃烧特性，缺少低温冷启动工况下柴油喷雾特性的系统且定量的研究，针对这一现状开展低温柴油喷雾发展特性的研究具有重要意义。因此，本文基于高压共轨系统，在海拔高度为 2 000 m、环境温度平均在 293K 以及环境压力为 79.485 kPa 下，研究不同喷孔直径和喷油压力下柴油温度对喷雾特性的影响，测量不同工况下实际喷油量，记录喷雾图像进行图像处理，分析降低柴油温度对喷油量、喷雾贯穿距、贯穿速度以及喷雾锥角的影响规律，为改善柴油机低温启动性能提供了理论依据。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

本试验测量非蒸发态下柴油喷雾液相发展过程，采用背光法记录喷雾的液相发展过程，其喷雾可视化试验台布置分别如图 1 所示。试验装置由博世（BOSCH）EPS200、低温柴油制冷系统、光源与拍摄系统和同步控制系统组成。EPS200 主要由油箱、电动机、油泵、及高压共轨系统组成，EPS200 与同步控制系统协同控制共轨压力、喷油脉宽、喷油量等喷射参数的设置以及柴油的喷射。其次测量燃油质量的设备是 FA1204EN 电子分析天平秤，量程 120 g，精度 0.1 mg。

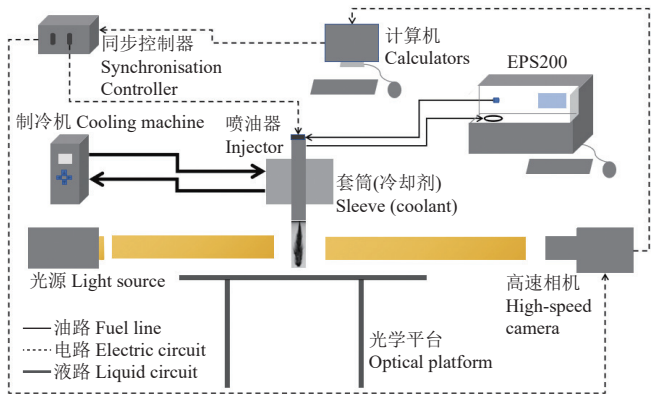


图 1 低温柴油喷雾测试系统  
Fig.1 Cryogenic fuel spray test system

为了直观地研究柴油机低温启动过程柴油喷雾特性的变化规律，试验用 BOSCH 单孔喷油器，柴油喷雾不受多孔喷雾的干涉。高压共轨管连接电控喷油器，柴油喷射压力由 EPS200 设定，控制器连接电控喷油器电磁阀接口，设定喷油持续时间以及喷油频率，协同控制实

现喷油器单次喷射。

其次，套筒内冷却剂包围喷油器，被包裹住的喷油器与低温冷却剂进行对流换热直接降低喷油器内部柴油温度，通过循环冷却剂降温控制柴油温度。低温制冷过程通过喷嘴前端切口内外温度，标定不同目标温度下喷油器内外温差，在正式试验前通过测量喷嘴外部温度，确定内部柴油温度。测定燃油温度，需进行预试验，将喷嘴前端 3~4 mm 处进行切割，在喷嘴内环形流道内壁面粘贴 Aidiwen 贴片式热电偶，喷嘴外同样粘贴贴片式热电偶，测量试验温度点内外温差，每个温度点测量均测量 10 次，取其温度差的平均值，确定为最终该温度点的温差值。

1.2 试验方法

本试验采用背光法记录不同工况条件下柴油喷雾液相的发展过程<sup>[20]</sup>，拍摄的喷雾图像中液相喷雾区域呈现黑暗色，背景呈现明亮色。根据喷雾图像的明暗程度可以确定其雾化情况：聚集大量液相柴油颗粒的位置（如喷雾中心处）对光的散射作用强，呈现黑暗色，颜色越深沉说明柴油浓度越浓稠；而亮度较大的位置表示此处的液相柴油颗粒大部分已经汽化，属于液相—气相的混合区域。光源与拍摄系统主要包括面光源、Photron FASTCAM Nova S12 高速摄影机等，面光源尺寸 200 mm×200 mm；高速摄影机相关参数如表 1 所示，快门速度为 1/200 000 秒，分辨率设置为 1 024 像素×688 像素，喷雾形态影像信息通过 Photron Fastcam Viewer 4.0（PFV4.0）软件实现保存，通过千兆以太网接口与高速摄像机进行通讯，将图像高速下载到本地<sup>[21]</sup>。进行试验时，在拍摄范围内得到清晰的喷雾区域图像后，通过拍摄的平面标尺与实际长度进行标定，以便图像处理过程中通过换算得到实际的喷雾宏观特性参数。

表 1 相机 (FASTCAM Nova S12) 参数		
Table 1 High-speed camera parameters		
项目 Index	数值 Value	
拍摄速度 Shooting speed/fps	20 000	
快门速度 Shutter speed/s <sup>-1</sup>	1/200 000	
分辨率 Resolution/PPI	1 024×688	

1.3 喷雾图像处理

本试验采用高速摄像机背光法成像技术获取液相喷雾发展试验前的空间尺度标定图像，标定图像如图 2 所示。该标尺上实际距离 60 mm 对应图像 179 像素，根据图像中像素之差获取实际的空间尺度。

利用 MATLAB 对拍摄的喷雾图像进行图像增强、图像滤波、形态学操作等预处理，提取喷雾图像的液相喷雾宏观轮廓，进而量化获取液相喷雾贯穿距和喷雾锥角。根据喷雾油束末端的非线性特征，本文利用已知坐标点求斜率的方法测量喷雾图像宏观特性参数。从经过预处理的喷雾油束二值化图像中，获取喷雾图像中像素值等于 1 的最上最下以及最左最右的四个像素点，如图 3

中所示 A、B、C、D 四点, 紧接着分别连接 AB 与 AC 以及 A 与 D 的垂直距离,  $\angle BAC$  即为喷雾锥角, AD 的长为贯穿距离, 最后根据已知两点坐标求斜率的原理<sup>[22]</sup>, 计算喷雾锥角与贯穿距离的大小。

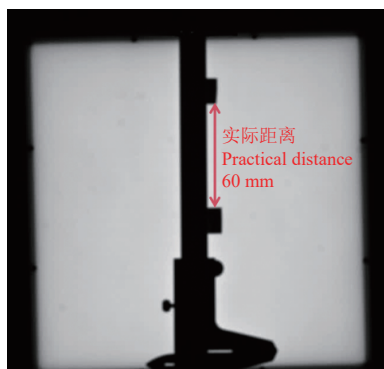


图 2 标定图像  
Fig.2 Calibration image

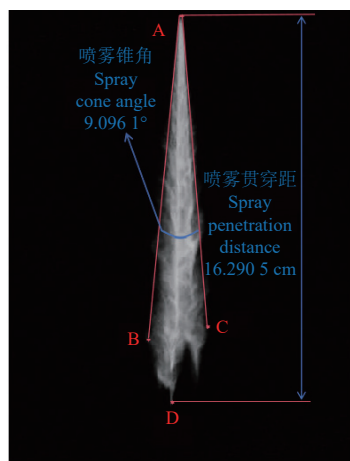


图 3 液相喷雾宏观参数定义  
Fig.3 Macroscopic parameter definition of liquid spray

#### 1.4 试验方案

在正式柴油喷雾试验前, 进行低温柴油温度标定试验, 经过多次重复试验, 标定喷雾器喷嘴前端内外柴油温差, 根据不同目标温度下温差, 取其平均温差用作正式试验时确定柴油温度 (条件见表 2)。

表 2 自由喷雾试验条件

Table 2 Free Spray Experimental Conditions

参数 Parameters	数值 Numerical value
柴油温度 Fuel temperature / °C	38、0、-10、-20
喷嘴直径 Nozzle diameter / mm	0.12、0.20、0.28 (单孔)
喷雾压力 Injection pressure / MPa	25、50、75、100
环境温度 Environmental temperature / K	293
海拔 Altitude / m	2 000
柴油 Diesel fuel	-50#柴油

本试验在不同孔径的单孔喷雾器上进行不同喷雾压力下非蒸发态的低温柴油自由喷雾可视化试验。试验分别选用 0.12、0.20、0.28 mm 喷嘴直径的单孔喷雾器, 柴油温度分别为 38、0、-10、-20 °C, 喷雾压力分别为 25、

50、75、100 MPa, 探究柴油温度在不同柴油喷射条件和喷雾器结构参数喷嘴直径下对喷雾量及喷雾特性的影响, 并利用背光法来记录喷雾液相的发展过程。

## 2 结果与分析

为了减小试验数据的随机误差, 以 38 °C 柴油在喷雾压力 50 MPa、喷雾脉宽 1.8 ms、常温常压工况下进行的 3 次喷雾试验, 其液相喷雾贯穿距发展情况如图 4 所示, 其中柴油喷射开始时刻定义为 0 ms, 由图可知试验重复性良好。

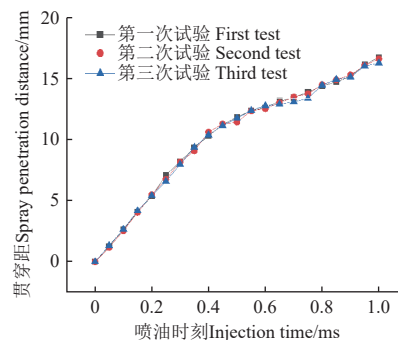


图 4 38 °C、50 MPa、1 ms 喷雾贯穿距重复试验  
Fig.4 38 °C, 50 MPa, 1 ms spray through pitch repeat experiment

### 2.1 柴油喷射量

通过高精度电子天平称测量不同温度柴油在喷雾压力分别为 25、50、75、100 MPa, 喷嘴直径分别为 0.12、0.20、0.28 mm 试验条件下的喷雾量。为了保证测量的准确度, 试验采用了多组多次喷雾取平均值的方法, 每组喷射 10 次取平均值, 最后对三组测量得到的 3 个单次喷雾量再取平均值, 得到最终的单次喷雾量。下列图中误差带表示试验数据的标准偏差, 表明试验具有良好的重复性。为了测定柴油喷雾量, 将喷射的柴油收集在试管中, 在试管口处加木塞, 防止喷射柴油蒸发外泄, 减小误差量。

#### 2.1.1 不同喷嘴直径下柴油温度对喷雾量的影响

图 5 展示了喷雾压力 75 MPa 不同喷嘴直径在柴油温度的变化下喷雾量的变化情况。小孔径下, 喷雾压力所具有的势能更好地促进各流层之间的相对运动, 随着柴油温度的降低, 导致液滴间增强的黏性在动能和惯性力的作用下反而促进柴油持续喷出, 使得降低柴油温度促进喷雾量增加。喷嘴直径为 0.12 mm 时, 柴油温度降至 -20 °C 相较 38 °C 柴油喷射量增加了近 23.87%。大孔径时, 降低柴油温度黏性力增大, 阻碍喷嘴处柴油的喷射, 柴油喷射初期速度减小, 相同喷雾脉宽下随着柴油温度的降低喷雾量逐渐减小。喷嘴直径为 0.28 mm 时 -20 °C 喷雾量比 38 °C 喷雾量减少了 8.99%。同一柴油温度下, 增大喷嘴直径喷嘴有效流通面积增加喷雾量明显增加, 而且随着柴油温度降低, 喷嘴直径增大造成的喷雾量增加比例逐渐减小。在喷射初期减小喷嘴直径喷雾速度变大, 喷射油滴直径变小, 更有利于柴油液滴破碎、雾化, 可以加速油气混合。



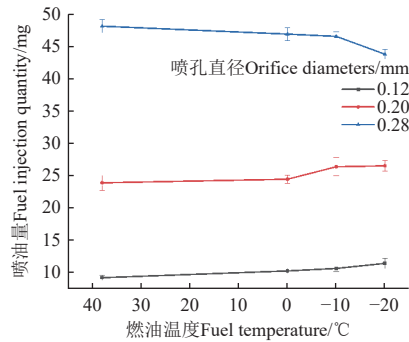


图 5 75MPa 不同温度柴油在不同喷孔直径下的喷油量  
Fig.5 75MPa injection quantity of different temperature diesel at different orifice diameters

### 2.1.2 不同喷油压力下柴油温度对喷油量的影响

图 6 展示了不同温度柴油在不同喷油压力下的喷油量的变化规律。从图 6a 中可以看出, 低喷油压力时降低柴油温度喷油量先增加后减少, 柴油温度从 38 °C 降至 0 °C 喷油量增加, 当柴油温度低于 0 °C 时, 随着柴油温度降低喷油量减少, 25MPa 时 -20 °C 柴油喷射量只有 3.85 mg, 且高温柴油喷射量最少。提升喷油压力至 100 MPa 时, -20 °C 喷油量比 38 °C 柴油喷射量增多了近 25%, 高压下柴油喷射量随着柴油温度的降低而增大, 这是因为在相同喷油压力下, -20 °C 柴油比 38 °C 柴油密度更大。低温下, 降低柴油温度柴油密度增大, 表面张力和黏性力增强。低喷射压力时, 柴油喷雾具有较小的动能<sup>[9]</sup>, 降低柴油温度黏性力增大, 黏性力的持续作用减慢了靠近壁面的流体层的流动速度, 抑制柴油喷出, 柴油温度低于 0 °C 喷油量随温度的降低而减少。高喷油压力时, 喷油压力所具有的势能更多地转换为柴油喷雾持续向前运动的动能, 促进各流层之间的相对运动, 柴油温度降低导致液滴间增强的黏性力在动能和惯性力的作用下反而促进柴油持续喷出, 使得降低柴油温度促进喷油量增加。其次, 38 °C 柴油喷射量随着喷油压力的变化接近于线性变化, 降低柴油温度, 喷油量随喷油压力的变化曲线斜率增大。

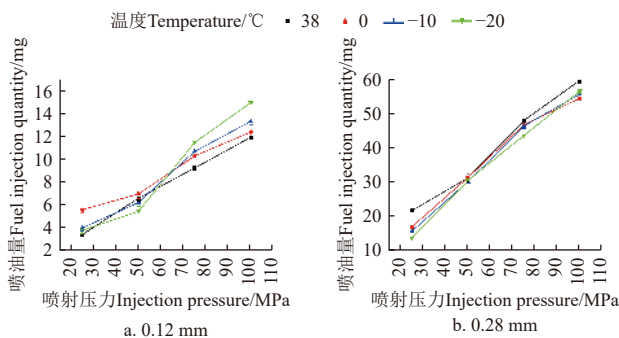


图 6 不同喷孔直径下不同温度柴油随喷油压力变化的喷油量  
Fig.6 Injection quantity of different temperature with varying injection pressures at different orifice diameters

降低柴油温度黏性力增大, 阻碍喷嘴处柴油的喷射, 柴油喷射初期速度减小。如图 6b 所示, 喷油压力低于 75 MPa 时, 随着柴油温度的降低喷油量逐渐减小。喷油

压力小于 75 MPa 时, 喷油量随着柴油温度的降低而减少, 25 MPa 时 -20 °C 柴油比 38 °C 柴油喷射量减少了 7.97 mg, 而当喷油压力为 100 MPa 时, 柴油温度低于 0 °C, 喷油量随着柴油温度的降低而增大, 但是始终 38 °C 柴油喷油量大于低温柴油喷油量。喷油量随喷油压力的曲线斜率随着柴油温度的降低而增大, 且 -20 °C 柴油喷油量随着喷油压力的变化更接近于线性变化。

小孔径下增大喷油压力低温柴油迅速增加, 发动机缸内燃料增多, 一方面增加了低温下发动机着火可靠性; 另一方面喷油量增多低温下缸内未燃柴油增多, 导致发动机排放性能恶化。大孔径下增大喷油压力有利于增加低温下缸内柴油喷射量, 使得形成的可燃混合气增大, 燃烧条件得到改善, 降低发动机失火的概率, 从而提高冷启动下发动机着火启动的几率。但是过大的喷油量会使柴油雾化蒸发过程吸收缸内更多的热量, 导致缸内温度更低, 并且过量的喷油量伴随混合气浓度过高使得发动机不完全燃烧的也有所增加<sup>[23]</sup>。所以喷油量适当提高有利于提高发动机冷启动几率。

### 2.2 喷油压力对低温柴油喷雾特性的影响

#### 2.2.1 喷雾宏观结构

由于在环境温度 293K、环境压力 0.7948 5 KPa 下, 自由射流液相喷雾贯穿距较长, 本文重点研究喷雾初期 0.70 ms 内喷雾发展情况。喷孔直径 0.28 mm、喷油压力 50 MPa、喷油时间分别在 0.10ms 和 0.70ms 时不同温度柴油自由射流液相喷雾形态变化如图 7 所示。

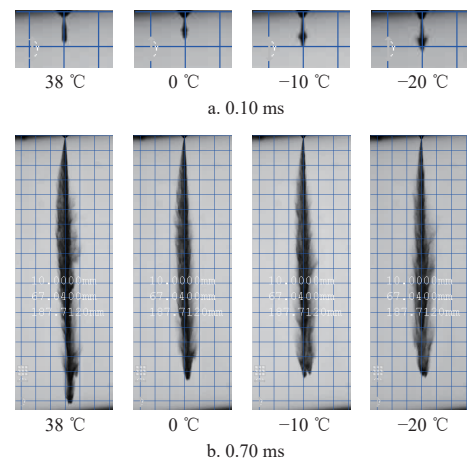


图 7 0.28 mm, 50MPa 不同喷油时刻喷雾宏观结构  
Fig.7 0.28 mm, 50MPa different oil spray time spray macro structure

不同温度下柴油的喷雾特性主要取决于柴油的物化特性, 包括黏度、密度、表面张力、挥发性等<sup>[24]</sup>。如图 7a 所示, 随着柴油温度降低, 喷射初期柴油聚集在前端形成明显的蘑菇云形状<sup>[25]</sup>, 随着柴油温度降低蘑菇云面积增加、边界越清晰。由于降低柴油温度, 柴油黏度、密度、表面张力升高, 抑制柴油液滴的破碎和蒸发, 柴油更多的动量消耗于柴油雾化蒸发, 使其到达最远距离的能力减弱, 从图 7b 中可以看出, 降低柴油温度喷雾贯穿距明显减小, -20 °C 时喷雾贯穿距相对 38 °C 时减小了 15.75 mm。

### 2.2.2 喷雾贯穿距

喷孔直径为 0.28 mm, 不同温度柴油在 0.70 ms 时刻喷雾贯穿距随喷油压力的变化趋势如图 8 所示。低温柴油降低柴油喷射、破碎、蒸发速度, 喷雾难以扩散抑制其持续向前运动。从喷射开始液相喷雾向前发展, 而柴油温度影响喷雾轴向运动, 随着柴油温度降低, 喷雾贯穿距减小。柴油在流动时更多的动量消耗于克服更大的内部摩擦力, 使其到达最远距离的能力减弱, 喷雾贯穿距减小。当喷油压力为 75 MPa 时 0.70 ms 时刻 -20 °C 柴油喷雾贯穿距相对 38 °C 喷雾贯穿距缩短了 30.86 mm。提高喷油压力喷射速度和动能增加<sup>[26]</sup>, 低温柴油喷雾贯穿距迅速增大。其次, 提高喷油压力柴油温度对液相喷雾贯穿距的影响更加明显, 喷雾贯穿距在喷油压力下的变化曲线斜率随着柴油温度的降低而减小。

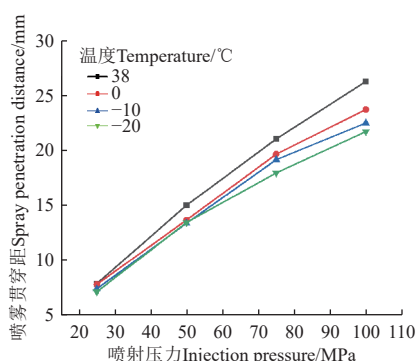


图 8 0.28 mm 不同喷油压力下喷雾贯穿距

Fig.8 0.28 mm spray penetration distance at different injection pressures

### 2.2.3 喷雾锥角

图 9 展示了喷孔直径为 0.28 mm 低温柴油在不同喷油压力下喷雾锥角的发展情况。柴油喷射之后从高压区域迅速进入低压区, 在极短时间内柴油无法扩散聚集在喷嘴处, 喷雾锥角在极短的时间内迅速增大并达到峰值, 其后在较短的时间内剧烈波动逐渐回落并趋于稳定状态。

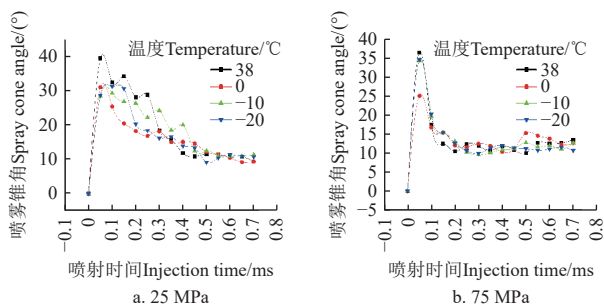


图 9 不同温度柴油喷雾锥角

Fig.9 Spray cone angle at different fuel temperatures

在低压 25 MPa 时低温柴油喷雾锥角波动幅度明显, 较长的时间趋于平稳的状态, 喷雾锥角稳定在 10° 上下波动。降低柴油温度后喷油量减少, 且低柴油温度引起的柴油黏度增大又抑制柴油雾化, 导致从喷雾宏观特性喷雾锥角上来看, 柴油温度对喷雾锥角的影响变化不大。升高喷油压力喷雾锥角很快就能达到稳定状态, 喷雾锥角稳定在 12° 上下波动, 且柴油温度对喷雾锥角

的影响比较明显, 可以看出喷雾锥角随着温度的降低而减小。柴油温度越低周向运动能力越弱, 使得喷雾锥角随着柴油温度的降低而减小。

从整体来看, 适当提高喷油压力有利于低温柴油增大喷雾锥角。原因是提高喷油压力对周向运动的初动能有一定影响, 促进柴油喷雾锥角的增大, 但是这种影响十分有限, 其次由于受到蒸发气化的作用, 液相喷雾的边界存在一定的变动。

### 2.3 喷孔直径对低温柴油喷雾特性的影响

#### 2.3.1 喷雾宏观结构

喷孔直径为 0.12 mm, 喷油压力 75 MPa 下不同柴油温度的柴油喷雾宏观结构如图 10 所示。随着喷油的持续进行, 液相喷雾的贯穿距急剧增加, 柴油与周围环境的接触面积越来越大, 柴油束卷吸空气与之混合, 并在气流的带动下往周向方向发展<sup>[27]</sup>。低温下, 柴油的黏度和活化能增大, 黏度系数增大, 流动特性指数减小, 相同喷油压力产生的喷雾束变得难以扩散, 0.70 ms 时刻可以清晰看出, -20 °C 柴油喷雾头部有细长的液柱, 喷雾贯穿距增大喷雾锥角减小, 柴油温度从 38 °C 降至 -20 °C 柴油喷雾在 0.70 ms 时刻喷雾贯穿距增大了 39.89 mm, 喷雾锥角减小了 1.73°。

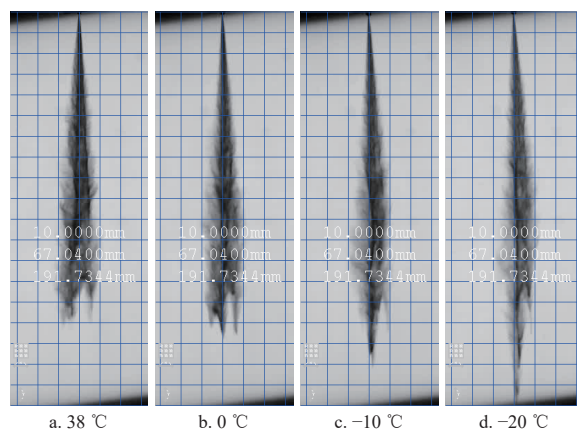


图 10 0.12 mm, 75 MPa, 0.70 ms 不同温度下喷雾宏观结构

Fig.10 0.12 mm, 75 MPa, 0.70 ms spray macro structure at different temperatures

高压小孔径下, 随着柴油温度降低喷油量增加。但是降低柴油温度, 油柱粘黏在喷孔壁面, 导致喷射初期喷射出的喷油量随温度的降低而减少, 后期喷射柴油量增多, 没有足够的时间雾化, 降低油气混合程度。其次, 低温柴油相对 38 °C 柴油喷雾形状变窄, 柴油温度越低喷雾越细长, 增加发动机缸内“湿壁”的可能性, 导致发动机燃烧和排放性能恶化。

#### 2.3.2 喷雾贯穿距

图 11 为喷油压力为 75 MPa 下不同温度柴油喷雾贯穿速度变化规律。低温下, 柴油喷雾宏观特性与喷孔直径密切相关, 喷孔直径越小柴油喷射速度越大、液滴破碎效果越好。当低温柴油喷雾轴向运动的过程中, 小孔径加速液滴的分裂、雾化持续向前运动<sup>[28]</sup>, 导致降低柴油温度反而促进喷雾轴向运动。如图 11a 所示, 小孔径下, 相同喷射持续时间内喷油量较小, 柴油温度降低液

滴间黏性力增大, 导致喷雾液滴尺寸增大, 液滴所具有的动量越大, 轴向运动能力增强, 柴油喷雾贯穿速度迅速增大后逐渐趋于稳定减小, 随着柴油温度的降低喷雾贯穿距增大。而在发动机运行期间喷雾的增长显著影响燃料的后续燃烧和排放性能<sup>[29-30]</sup>。

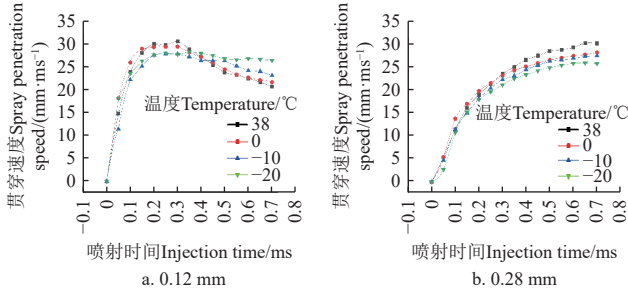


图 11 75 MPa 不同喷孔直径下不同温度柴油喷雾贯穿速度  
Fig.11 75 MPa spray penetration rate at different temperatures with different orifice diameters

柴油温度降低导致柴油黏度、密度、表面张力升高, 抑制柴油液滴的破碎和蒸发, 柴油的流动性会变差。图 11b 中可以看出, 大孔径下, 相同喷射持续时间内大孔径喷出的燃油远大于小孔径喷油量, 柴油在流动时更多的动量消耗于克服更大的内部摩擦力, 使其到达最远距离的能力减弱, 随着柴油温度的降低液相柴油喷雾贯穿距减小。相同喷油压力增大喷孔直径喷雾粒径增大, 液滴破碎效果变差, 低温柴油黏性力的抑制作用强于喷雾轴向运动的能力。

图 12 是 -20 °C 柴油在 75 MPa 下, 不同喷孔直径下喷雾贯穿距发展情况。由于喷孔直径增大导致相同时刻更多的柴油输出, 而高压共轨中的柴油不能及时补偿囊压减小<sup>[31]</sup>, 导致喷射速率降低, 喷雾初期低温柴油贯穿距随着喷孔直径增大而减小。

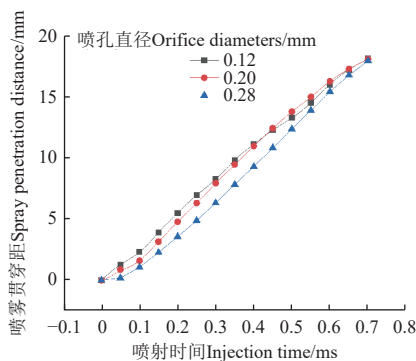


图 12 -20 °C, 75 MPa 不同喷孔直径喷雾贯穿距  
Fig.12 -20 °C, 75 MPa spray penetration distance for different orifice diameters

### 2.3.3 喷油锥角

图 13 展示了喷油压力 75 MPa 下, 喷孔直径 0.12 mm 和 0.28 mm 在不同温度柴油喷雾锥角的发展情况。

在喷油压力作用下, 燃料会破碎蒸发, 并向垂直喷射方向扩散, 喷雾锥角迅速增大后回落到平稳状态。小孔径 0.12 mm 柴油喷雾锥角稳定回落在 8°左右, 而大孔径 0.28 mm 柴油喷雾锥角稳定在 12°波动, 且降低柴油

温度喷雾锥角波动幅度较为平缓。柴油温度抑制喷雾轴向运动, 降低柴油温度喷雾锥角减小, 小孔径降低柴油温度喷雾锥角减小的趋势更加明显。

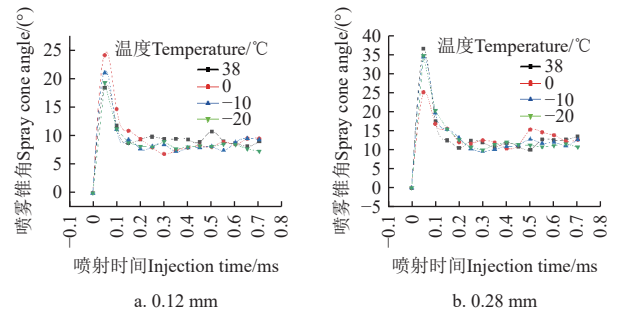


图 13 75 MPa 不同喷孔直径下不同温度柴油喷雾锥角  
Fig.13 75 MPa spray cone angle for different fuel temperatures with different orifice diameters

由图 14 可知, 在相同的喷油压力下, 喷孔直径增大, 在相同时间内喷出的低温柴油更多, 形成的柴油液滴尺寸较大, 破碎程度低, 动量越大<sup>[32]</sup>, 径向扩散增强喷雾锥角增大, 导致增大喷孔直径喷雾锥角也会随之增大。

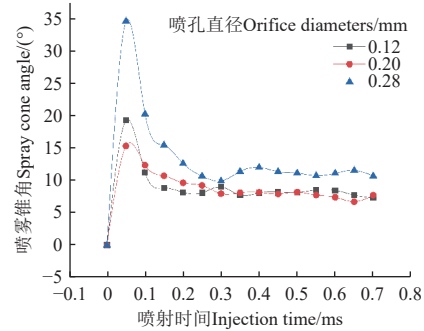


图 14 不同喷孔直径下喷雾锥角  
Fig.14 Spray cone angle for different orifice diameters

## 3 结论

低温环境下, 柴油机冷启动过程中柴油喷射性能与喷雾雾化情况, 直接影响柴油机冷启动的可靠性。针对提升喷油压力导致燃油贯穿距增加, 以及增大喷孔直径喷雾贯穿距、喷雾锥角增大的试验结果, 本文研究与前人的研究结果一致。但是, 低温环境下, 柴油黏度增加、密度增大、表面张力升高、流动性能变差, 导致柴油喷雾特性发生改变, 低温柴油雾化效果较差, 大粒径液滴数目增加不利于喷雾破碎, 同时对周围环境气体的卷吸作用较弱, 影响发动机冷启动过程油气混合程度、冷起动着火稳定性和燃烧排放性能。

1) 小孔径下, 喷油压力对柴油喷射量影响较大。喷孔直径为 0.12 mm 时, 低喷油压力下, 喷油量随着柴油温度的降低而减少, 25 MPa 时 -20 °C 柴油喷射量只有 3.85 mg。高喷油压力时, 柴油温度降低柴油喷射量增加, 75 MPa 柴油温度降至 -20 °C 较 38 °C 柴油喷射量增加了近 23.87%。随着降低柴油温度, 喷雾贯穿速度先减小后增大, 喷雾贯穿距先减小后增大, 喷雾锥角减小, 75 MPa 时柴油温度从 38 °C 降至 -20 °C 柴油喷雾在 0.70 ms 时刻喷雾贯穿距增大了 39.89 mm, 喷雾锥角减小了 1.73°。



2) 喷孔直径为 0.28 mm, 喷油压力小于 75MPa 时, 喷油量随着柴油温度的降低而减少, 25MPa 时-20℃柴油比 38℃柴油喷射量减少了 7.97 mg。喷油压力大于 75MPa, 柴油温度低于 0℃, 喷油量随着温度的减小而增大, 但始终小于 38℃柴油喷射量。随着柴油温度降低, 喷雾贯穿速度、喷雾贯穿距和喷雾锥角均减小。当喷油压力为 75MPa 时 0.70 ms 时刻-20℃柴油喷雾贯穿距相对 38℃喷雾贯穿距缩短了 30.86 mm。

3) 在低温环境下, 降低柴油温度黏度上升、流动性变差, 喷雾油束难以扩散。增大喷油压力, 低温柴油喷雾贯穿距增加, 喷雾锥角变化不明显, 且提升喷油压力柴油温度对喷雾特性的影响更加突出; 其次, 增大喷孔直径, 低温柴油喷雾贯穿距减小, 喷雾锥角增大。所以适当提高喷油压力和增大喷孔直径, 有利于液相喷雾的蒸发气化。

#### [参 考 文 献]

- [1] EMIROGLU A O. Effect of Fuel Injection Pressure on the Characteristics of Single Cylinder Diesel Engine Powered by Butanol-diesel Blend[J]. *Fuel*, 2019, 256: 115928.
- [2] KALGHATHI G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport?[J]. *Applied Energy*, 2018, 225: 965-974.
- [3] 韩志玉, 吴振阔, 高晓杰. 汽车动力变革中的内燃机发展趋势[J]. *汽车安全与节能学报*, 2019, 10 (2): 146-160.  
HAN Zhiyu, WU Zhenkuo, GAO Xiaojie. The development trend of internal combustion engine in automobile power change [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy Conservation*, 2019, 10 (2): 146-160. (in Chinese with English abstract)
- [4] ROBERTS A, BROOKS R, SHIPWAY P. Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 82: 327-350.
- [5] DENG Y, LIU H, ZHAO X, et al. Effects of cold start control strategy on cold start performance of the diesel engine based on a comprehensive preheat diesel engine model[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 279-287.
- [6] LI J, YANG W, ZHOU D. Review on the management of RCCI engines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69: 65-79.
- [7] KAN Z, HU Z, LOU D, et al. Effects of altitude on combustion and ignition characteristics of speed-up period during cold start in a diesel engine[J]. *Energy*, 2018, 150: 164-175.
- [8] GUMUS M. Reducing cold-start emission from internal combustion engines by means of thermal energy storage system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(4): 652-660.
- [9] 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, 2016.  
MA Yupo. Experimental Study on the Spray and Combustion Characteristics of Diesel Oil at Low Temperature [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [10] CHEN H, SHI Z, LIU F, et al. Non-monotonic change of ignition delay with injection pressure under low ambient temperature for the diesel spray combustion[J]. *Energy*, 2022, 243: 123017.
- [11] 王金乐, 常雪倩, 张露, 等. 两种不同大小喷孔直径喷油器对柴油机组经济性的影响[J]. *柴油机设计与制造*, 2024, 30(1): 1-4.
- [12] WANG Jinle, CHANG Xueqian, ZHANG Lu, et al. Effect of two different size nozzle diameter injectors on the economy of diesel units[J]. *Design and Manufacturing of Diesel Engine*, 2024, 30(1): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [13] AGARWAL A K, DHAR A, GUPTA J G, et al. Effect of fuel injection pressure and injection timing on spray characteristics and particulate size-number distribution in a biodiesel fuelled common rail direct injection diesel engine[J]. *Applied Energy*, 2014, 130: 212-221.
- [14] 叶丽华, 刘雯靖, 薛定邦. 压力对柴油/生物柴油混合燃料喷雾特性影响数值模拟[J]. *农业装备与车辆工程*, 2023, 61(7): 13-17.  
YE Lihua, LIU Wenjing, XUE Dingbang. Numerical simulation of spray effects of diesel / biodiesel mixture[J]. *Agricultural Equipment and Vehicle Engineering*, 2023, 61(7): 13-17. (in Chinese with English abstract)
- [15] SHI Z, LEE CF, WU H, et al. Effect of injection pressure on the impinging spray and ignition characteristics of the heavy-duty diesel engine under low-temperature conditions[J]. *Applied Energy*, 2020, 262: 114552.
- [16] SHI Z, WU H, LI H, et al. Effect of injection pressure and fuel mass on wall-impinging ignition and combustion characteristics of heavy-duty diesel engine at low temperatures[J]. *Fuel*, 2021, 299: 120904.
- [17] 石智成, 吴晗, 李海鹰, 等. 重型柴油机低温环境喷雾及蒸发特性研究[J]. *内燃机工程*, 2020, 41(5): 1-8.  
SHI Zhicheng, WU Han, LI Haiying, et al. Study on the low-temperature environmental spray and evaporation characteristics of heavy-duty diesel engine[J]. *Internal combustion Engine Engineering*, 2020, 41(5): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [18] YU H Z N, LIANG X Y, WANG Y S, et al. Effect of the nozzle diameter formation on the mixture characteristics in an early injection strategy: CFD modeling [C]. ASPACC 2015-10th Asia-Pacific Conference on Combustion. Beijing: Combustion Institute, 2015.
- [19] NISHIDA K, ZHU J, LENG X, et al. Effects of micro-hole nozzle and ultra-high injection pressure on air entrainment, liquid penetration, flame lift-off and soot formation of diesel spray flame[J]. *International Journal of Engine Research*, SAGE Publications, 2017, 18(1/2): 51-65.
- [20] 徐阳杰, 李国岫, 虞育松, 等. 喷孔直径对柴油射流雾化影响的试验研究[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(4): 907-911.  
XU Yangjie, LI Guoxiu, YU Yusong, et al. Experimental study on the effect of nozzle diameter on the atomization of diesel jet[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(4): 907-911. (in Chinese with English abstract)
- [21] LI Feng, LEE CF, WANG Z, et al. Optical investigation on impacts of ambient pressure on macroscopic spray characteristics of ducted fuel injection under non-vaporizing conditions[J]. *Fuel*, 2020, 268: 117192.
- [22] 赵鹏云, 陈占明, 王涛, 等. 二甲醚和柴油高压喷射喷雾与燃烧可视化对比研究[J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(6): 152-159.  
ZHANG Yongshuai. Macroscopic Parameters of Diesel Engine Spray Oil Beam Image Based on Matlab / GUI [D]. Xian: Chang'an University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [23] ZHZO Pengyun, CHEN Zhanming, WANG Tao, et al. Comparative study of high pressure jet spray with diME and diesel[J]. *Journal of Xi'an Jiao tong University*, 2023, 57(6): 152-159. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张永帅. 基于 Matlab/GUI 的柴油机喷雾油束图像宏观参数研究及程序设计[D]. 西安: 长安大学, 2019.

- [23] 雷基林, 李道硕, 王东方, 等. 临界温度下循环喷油量对柴油机冷启动和排放特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(10): 247-254.  
LEI Jilin, LIU Xiaopei, LIU Yi, et al. Effects of circulation injection quantity on cold start and emission performance of diesel engines at critical temperature[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(10): 247-254. (in Chinese with English abstract)
- [24] MA F, XU R, LIU X. Fuel injection performance and spray characteristic of high-pressure common rail systems at low temperatures[J]. *Energy Science & Engineering*, 2024, 12: 1233-1241.
- [25] 陈博. 高海拔条件下不同柴油喷雾特性影响规律研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.  
CHEN Bo. Study on the Influence Law of Different Fuel Spray Characteristics at High Altitude Conditions [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [26] DU W, ZHANG Q, et al. Effects of injection pressure on ignition and combustion characteristics of impinging diesel spray[J]. *Applied Energy*, 2018, 226: 1163-1168.
- [27] 谭贵荣, 赵增亮, 王毅, 等. 定容弹内煤制油喷雾及着火特性的可视化研究[J]. *车用发动机*, 2023(5): 25-30, 37.  
TAN Guirong, ZHAO Zengliang, WANG Yi, et al. Visualization study of coal-to-oil spray and ignition characteristics in the fixed-capacity bomb[J]. *Vehicle Engines*, 2023(5): 25-30, 37. (in Chinese with English abstract)
- [28] 向立明, 田江平, 隆武强, 等. 柴油机交叉孔喷嘴自由喷雾特性实验研究[J]. *汽车工程*, 2018, 40(11): 1275-1281, 1293.  
XIANG Liming, TIAN Jiangping, LONG Wuqiang, et al. Experimental study on the free spray characteristics of the cross-hole nozzle of diesel engine[J]. *Automotive Engineering*, 2018, 40(11): 1275-1281, 1293. (in Chinese with English abstract)
- [29] DURONIO F, DE Vita A, ALLOCCA L, et al. Gasoline direct injection engines—A review of latest technologies and trends. Part 1: spray breakup process[J]. *Fuel*, 2020, 265: 116948.
- [30] XUAN T, SUN Z, EL-Seesy AI, et al. An optical study on spray and combustion characteristics of ternary hydrogenated catalytic biodiesel/methanol/n-octanol blends; part I: liquid length and in-flame soot[J]. *Energy*, 2021, 227: 120543.
- [31] DONG P, YAMAUCHI J, NISHIDA K, et al. Hole geometrical effect on internal flow, fuel atomization and spray evaporation of multi-hole nozzle for diesel engine[EB/OL] // SAE Technical Paper, [2017-01].
- [32] 杜巍, 张乾坤, 安一峰. 喷孔直径对喷雾碰壁特性的影响研究[J]. *内燃机工程*, 2019, 40(2): 29-35, 44.  
DU Wei, ZHANG Qiankun, AN Yifeng. Study on the influence of vent diameter on the characteristics of spray wall touching[J]. *Internal Combustion Engine Engineering*, 2019, 40(2): 29-35, 44. (in Chinese with English abstract)

## Effects of fuel temperature on the characteristics of diesel liquid-phase sprays

LEI Jilin, LIU Xiaopei, LIU Yi<sup>\*</sup>, LIU Chunli, ZHAO Liyan, WANG Dongfang

(Yunnan Provincial Key Laboratory of Internal Combustion Engine, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** A diesel engine is the most energy-efficient powerplant in agricultural machinery. However, the performance of cold start has been limited to the diesel fuel viscosity in the low-temperature environment. Fluidity deterioration has also inhibited diesel spray atomization and evaporation, leading to the low reliability of diesel engines. In this study, the backlight test was conducted to compare the variation in the spray macrostructure of high and low-temperature diesel under different working conditions. The digital image processing of the spray images was then carried out using MATLAB to obtain the macroscopic characteristic parameters of the spray. The test results showed that the much more outstanding impact on the injection volume was obtained in the diameter of the spray hole 0.12 mm with the various injection pressures at diesel temperature. The continuous viscous force slowed down the flow velocity of the fluid layer near the wall and then suppressed the diesel emission. Once the diesel temperature was lower than 0 °C, the diesel temperature was reduced by the amount of injection. The diesel temperature decreased to enhance the viscous force among droplets at high injection pressure. The continuous ejection of diesel was then promoted under the action of kinetic energy and inertial force. The fuel injection amount increased with the decrease in diesel temperature. When the injection pressure was 75 MPa, the diesel temperature dropped to -20 °C, compared with 38 °C diesel injection quantity increased by nearly 23.87%. The diesel temperature decreased under small pore size, leading to the increase of viscous force among droplets. There was an increase in the droplet size and the greater momentum of droplets. Thus, the radial development trend of diesel spray was weakened to enhance the axial movement. Furthermore, the spray penetration increased with the decrease of diesel temperature, whereas, the spray cone angle decreased. The diesel spray penetration increased by 39.89 mm at 0.70 ms when the diesel temperature decreased from 38 °C to -20 °C. When the nozzle diameter was 0.28 mm, the injection pressure was less than 75 MPa, and the injection quantity decreased with the decrease of diesel temperature. More momentum of diesel was consumed to overcome the greater internal friction under the same injection pressure. The farthest distance to reach was weakened. Diesel temperature was reduced to decrease the spray penetration and spray cone angle. When the injection pressure was 75 MPa, the diesel spray penetration at -20 °C at 0.70 ms was 30.86 mm shorter than that at 38 °C. The spray penetration of -20 °C diesel decreased with the increasing nozzle diameter at the same injection pressure, whereas, the spray cone angle increased. Secondly, there was a more prominent influence of diesel temperature on the macroscopic characteristics of the spray with the increase in injection pressure. The higher the injection pressure was, the more outstanding the shortening trend of spray penetration caused by the decrease in diesel temperature was. Therefore, the injection pressure and nozzle diameter can be expected to improve for better evaporation and gasification of diesel liquid phase spray at low temperatures.

**Keywords:** diesel engine; low-temperature cold start; spray characteristics; injection quantity; orifice diameter