

基于气助雾化喷射的柴油喷雾特性数值模拟

季昊成¹, 吴昊², 杨海青², 刘海峰³, 刘锐¹

(1. 南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 211816;

2. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016;

3. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 为对气助雾化喷射柴油的过程进行数值分析, 借助计算流体力学仿真工具 Fluent, 在不改变喷嘴结构的情况下, 建立考虑油气预混腔中柴油喷射过程的三维流体计算模型, 研究定容弹内气助雾化喷嘴的柴油/空气两相流喷射过程, 并且重点考察喷气压力、环境背压以及燃油温度对气助雾化喷射柴油喷雾特性的影响规律。结果表明: 喷气压力对喷雾贯穿距离影响较大, 喷气压力由 0.65 MPa 增大至 0.75 MPa 后贯穿距离增加 12.2%, 但柴油索太尔平均直径(SMD)只减小了 5.2%, 说明在保证燃油 SMD 处于较好水平时, 喷气压力和环境背压绝对压力比值(气相压比)为 7.5 有利于减少气量消耗; 环境背压对喷雾贯穿距离与燃油 SMD 影响显著, 气相压比为 1.875 时, 喷嘴出口处流场基本不会产生超声速气流, 气动力降低显著影响了燃油液滴破碎过程, 使喷射时间在 4 ms 时的 SMD 达到 40.7 μm ; 燃油温度对喷雾贯穿距离影响不大, 但对燃油 SMD 影响较大, 燃油温度升高后燃油 SMD 显著减小, 323 K 对应的 SMD 比 293 K 时减小了 12.3%, 喷射时间在 4 ms 时的 SMD 达到 14.9 μm , 燃油蒸发质量分数达到 36.93%。

关 键 词: 气助雾化喷嘴; 柴油; 喷雾特性; 索太尔平均直径; 贯穿距离

中图分类号: V233.2; TK401

文献标志码: A

Numerical simulation of diesel spray characteristics based on air-assisted atomization injection

Ji Haocheng¹, Wu Hao², Yang Haiqing², Liu Haifeng³, Liu Rui¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering,

Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To numerically analyse the process of air-assisted atomization for diesel spray, the computational fluid dynamics simulation tool Fluent was applied. Three-dimensional fluid calculation model considering diesel injection process in fuel/air premixing chamber was established without changing the injector structure. The air-assisted injection process of diesel/air two-phase flow was investigated in constant volume chamber. The effects of air injection pressure, ambient

收稿日期: 2021-06-23

基金项目: 内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金(K2020-05); 国家自然科学基金(51865031);
江苏省高等学校自然科学基金项目(20KJB470014)

作者简介: 季昊成(1990—), 男, 讲师, 博士, 主要从事重油燃料喷射控制研究。E-mail: jhc@njtech.edu.cn

通信作者: 刘锐(1987—), 男, 讲师, 博士, 主要从事内燃机仿真与控制研究。E-mail: timliu@njtech.edu.cn

引用格式: 季昊成, 吴昊, 杨海青, 等. 基于气助雾化喷射的柴油喷雾特性数值模拟[J]. 航空动力学报, 2022, 37(6): 1284-1294. Ji Haocheng, Wu Hao, Yang Haiqing, et al. Numerical simulation of diesel spray characteristics based on air-assisted atomization injection[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(6): 1284-1294.

backpressure and fuel temperature on diesel spray characteristics were investigated. The results showed that the air injection pressure had a great influence on the spray penetration distance. As the air injection pressure increased from 0.65 MPa to 0.75 MPa, the penetration distance increased by 12.2%, while the Sauter mean diameter (SMD) of diesel only decreased by 5.2%. When maintaining the SMD of fuel spray at an optimal level, the pressure ratio of 7.5 was beneficial to reduce the air consumption. Ambient backpressure had significant influence on penetration distance and SMD of fuel spray, as the pressure ratio was 1.875, the flow field at injector outlet almost did not produce supersonic flow, and the decrease of aerodynamic force significantly affected the breaking process of fuel droplets, making the SMD increase to 40.7 μm at the injection time of 4 ms. Fuel temperature had little effect on spray penetration distance, while it had a great effect on SMD. The SMD of fuel decreased significantly with the increase of temperature, and the SMD corresponding to 323 K decreased by 12.3% compared with that of 293 K. At the injection time of 4 ms, the overall SMD of fuel was 14.9 μm and the evaporated mass fraction of fuel reached 36.93%.

Key words: air-assisted atomization; diesel; spray characteristics; Sauter mean diameter; penetration distance

二冲程发动机由于其具有结构简单、质量轻、功质比高等优点,被广泛用作军用无人战车和无人机的动力装置。二冲程发动机按照点火方式分为点燃式和压燃式,点燃式发动机一般更适用于需求功率在88 kW以下的平台上运用^[1]。通常二冲程点燃式发动机主要以蒸发性好、辛烷值高、易点燃的汽油作为燃料,由于其闪点低(228~298 K),使其在军用环境下储存和使用,容易引起火灾或爆炸等事故,在一定程度上限制了二冲程汽油机的使用^[2-4]。相比汽油,航空重油燃料(通常指轻柴油、航空煤油)的闪点较高,其中国产3号航空煤油(RP-3)的闪点不低于311 K,轻柴油的闪点大于333 K,这使得航空重油燃料在储存、运输和使用的过程中更加安全。航空重油较难挥发的特性,决定了其在相同条件下比普通汽油的雾化、蒸发质量要差,对二冲程点燃式航空重油发动机的整机性能有所限制。因此,要实现航空重油燃料在二冲程发动机上的应用,关键要解决航空重油燃料的喷射雾化问题^[5]。

目前,针对航空重油的喷射雾化有两种技术方案,分别为高压共轨喷射和低压气助雾化喷射,而通常情况下高压共轨喷射的贯穿距离较大,在中小排量二冲程点燃式发动机上易产生燃油碰壁的现象^[6-7]。同时随着共轨压力的不断提升,工艺与技术水平要求更高,雾化质量更好,更适用于高功率的压燃式航空重油发动机。对于低压气助雾化喷射,由于燃油先喷入预混腔内形成一次雾化,

通过压缩空气产生的高速气流来雾化燃油,极易使喷射出来的二次雾化燃油液滴尺寸小于一次雾化^[8],并且相对而言,气助雾化喷嘴对于燃油的种类不大敏感,可适用于汽油、航空重油等多种燃料^[9-11]。因此,气助雾化喷射技术更适用于较低功率级别的二冲程点燃式航空重油发动机。

为研究气助雾化喷射的喷雾特性,有学者利用背光成像技术,通过试验研究了气助雾化喷嘴在不同背压下的喷雾特性,结果表明随着定容弹内背压的增加,由于喷射压力和背压的压差减小以及定容弹内空气阻力的增大,喷雾体积和贯穿距离随之减小,并有可能降低碳氢化合物(hydrocodone, HC)的排放。此外,还有学者通过对喷油量以及混合气喷射时间进行了分析,结果表明喷雾贯穿距离和喷雾体积也受到燃油量的影响,并得到仿真出的喷雾索太尔平均直径(Sauter mean diameter, SMD, 量符号记为 d_{32}) 在4~14 μm 之间^[12-13]。国内学者鲍建军利用高速成像技术对空气辅助喷嘴的喷雾进行宏观特性的分析,结果表明增加喷油脉宽和增大油气压差均能增大喷雾锥角,降低喷雾贯穿距离^[14]。王思奇等基于计算流体力学(CFD)仿真计算对气助雾化喷嘴喷射航空煤油时的喷雾进行数值模拟,结果表明,当气助雾化喷嘴的气相压比达到6.500时,喷出燃油液滴的SMD较低,当气相压比达到7.500时,喷出燃油液滴的SMD变化不大,但过高的气相压比会消耗压缩机更大功率^[15]。

综合来说,以上国内外研究状况主要是对气助雾化喷嘴喷射航空煤油的喷雾特性进行研究,而对喷射柴油喷雾特性及其变化规律的理论解析研究鲜有报道。基于此,本文利用CFD软件Fluent计算气助雾化喷嘴在针阀不同升程下喷射柴油(0号柴油)的喷雾场变化过程。依据计算结果分析在不同喷射压力、环境背压与燃油温度条件下的喷雾形状、贯穿距离及SMD,为气助雾化喷嘴在直喷重油发动机上的设计与应用进一步充实理论基础。

1 气助雾化喷嘴基本原理

气助雾化喷嘴的剖面示意图如图1所示,喷嘴结构上包括喷油嘴和气嘴两个部分,一般通过电控方式来控制喷油和喷气的开启与关闭。通常利用气体压缩机或压缩气源向与预混腔连通的气轨供给0.55~0.65 MPa(表压)压缩空气,而燃油则被以0.75~0.85 MPa(表压)的压力从低压喷油嘴出口向预混腔内喷射,与预混腔内的压缩空气进行一次预混合,实现了燃油的一次雾化。当气嘴针阀开启后,预混后的油气混合物从针阀与阀座之间的空隙喷射而出,形成超声速气流来产生气动力克服燃油液滴表面张力,实现了燃油的二次雾化,使燃油雾化粒径整体上变得更小。

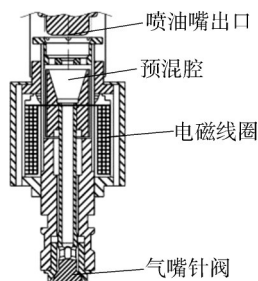


图1 气助雾化喷嘴三维结构图

Fig.1 Three-dimensional structure of air-assisted atomization injector

气助雾化喷嘴的喷油和喷气时刻是两个独立事件,互不干扰。通过控制喷油和喷气的时刻及其工作脉宽,调节喷油脉宽可以准确控制油量,调节喷气脉宽来控制油气混合物流量。实际发动机中,油气混合物喷入到缸内的时刻即为气嘴直喷的喷射时刻,图2为气助雾化喷嘴喷射控制示意图,实际应用中以发动机某缸上止点作为参考,根据工况来计算喷油结束角 θ_{fe} 、油气混合物喷射脉宽 t_{ai} (喷气脉宽)、喷油脉宽 t_{fi} 以及喷射延迟时

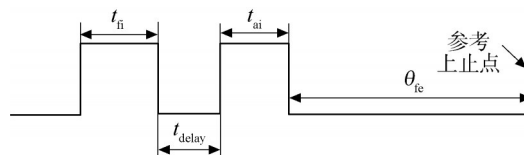


图2 喷射时序示意图

Fig.2 Injection sequence

间 t_{delay} 。

2 计算模型及条件设置

2.1 基本模型及计算域网格划分

为接近真实场景来模拟燃油从喷嘴出口到气嘴喷射至定容弹内的整个过程,首先对实际气助雾化喷嘴定容弹系统进行了适当的尺寸简化,并运用动网格技术来模拟真实情况下气嘴针阀的开启和关闭过程,因而网格划分的质量要求较高。本模型中气嘴针阀部分的结构较为复杂,需要利用网格处理软件对喷嘴模型进行细致的四面体网格划分,同时为保证网格质量,需要对模型的各个面进行精细的尺寸定义。由于在气嘴出口处的流场变化复杂,针对其出口处需进行网格加密处理,该处的网格最小尺寸为 $25\mu\text{m}$,而定容弹网格相对稀疏,使用结构化网格对其进行划分。最终生成的网格总数为32万左右,网格质量均在0.35以上,可满足喷雾仿真计算要求。图3为建立的气助雾化喷嘴定容弹系统的三维计算模型网格图,定容弹腔体的直径为70 mm,高度为100 mm。图4(a)、图4(b)分别为气助雾化喷嘴整体网格与喷嘴出口处局部网格。

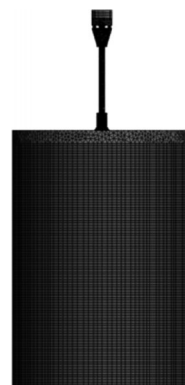
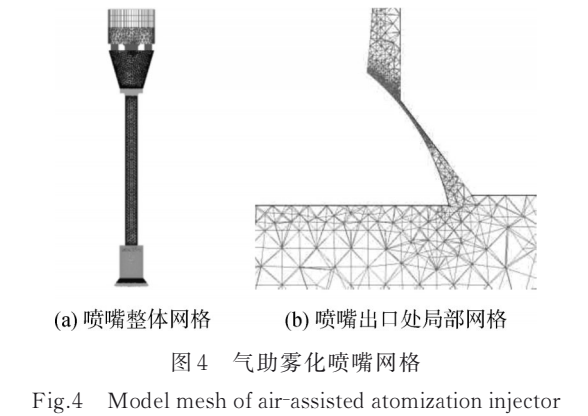


图3 定容弹模型网格

Fig.3 Model mesh of constant volume chamber

2.2 计算模型条件设置

气助雾化喷嘴实现燃油和压缩空气的预混合过程是一种典型的两相流动问题,处理两相流动



问题最精确的方法为拉格朗日法,其流体相被处理为连续相,颗粒被处理成离散相分布于连续相中。喷雾计算模型选用 $realizable\ k-\epsilon$ 湍流模型,并开启组分运输模型(柴油组分)。离散相模型(discrete phase model)中选择动态拖拽力模型,破碎模型选用 TAB(Taylor analogy breakup)模型,耦合方式选择多组分热量耦合。喷油模型选择面喷射,喷射位置即为实际喷油嘴出口位置,由于实际研究中很多微粒群的粒径分布服从 R-R(Rosin-Rammler)分布,因此喷出油雾粒径分布模型选用 R-R 分布,其关键参数如表 1 所示。

表 1 油雾模型部分参数设置	
Table 1 Parameters setting of spray model	
参数	数值
最小粒径/mm	0.05
最大粒径/mm	0.2
平均粒径/mm	0.1
燃油温度/K	293
质量流量/(kg/s)	0.003 5
液滴初始速度/(m/s)	30
喷油脉宽/ms	3

气助雾化喷嘴模型中选用压力入口作为边界条件,将压缩气体压力值设置为 0.65 MPa(表压),定容弹腔体内部所对应的压力为试验可用的背压,为 0 MPa(表压)。此外,仿真计算中需使用动网格技术,以便分析气助雾化喷雾的动态发展过程,实际针阀升程曲线可参考文献[16]中的针阀升程曲线得到,如图 5 所示,针阀在 0.5 ms 时针阀可达到最大升程,将针阀升程和时间的关系曲线编制成 profile 文件,导入到 Fluent 算例中。仿真前将计算域的初始温度设置为 293 K。仿真模

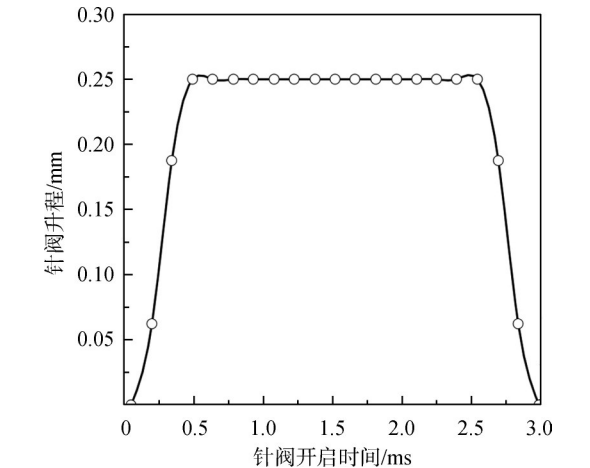


图 5 针阀升程随开启时间变化曲线^[16]
Fig.5 Needle valve lift curve with opening time^[16]

型中所选用的柴油标号为 0 号,表 2 给出了 0 号柴油在 293 K 温度下的理化性质参数^[17]。

表 2 0 号柴油特性参数表	
Table 2 Characteristic parameters of No.0 diesel	
燃油特性参数	数值
密度/(kg/m ³)	840
动力黏度/10 ⁻³ (Pa·s)	3.9
蒸发温度/K	341
液滴表面张力/(N/m)	0.026 3

3 模型校核与算例设置

3.1 试验与仿真对比

与计算模型一致,试验中对应使用的气助雾化喷嘴为外开式,针阀最大升程为 0.25 mm。试验测试方法为激光衍射法,测试所用设备为马尔文高速喷雾粒度分析仪,测量最小粒径为 0.1 μm。所用高速摄像机型号为 Photron 公司的 FAST-CAM SA1.1,分辨率为 512 像素×512 像素,拍摄帧数为 5 000 帧/s。定容弹视窗由石英玻璃制成,有效视野范围为 100 mm,试验台架如图 6 所示。供油系统的燃油压力为 0.75 MPa(表压),压缩气体压力为 0.65 MPa(表压),环境背压为 0 MPa(表压),喷油脉宽为 3 ms,喷气脉宽 4 ms。图 7 为气助雾化喷雾试验方案示意图,试验所用燃油均为 0 号柴油。

为验证计算模型,依据气助雾化喷嘴喷射过程来分析计算结果,以对比试验系统高速拍摄的喷雾特性与模拟计算得出的喷雾特性。表 3 给出

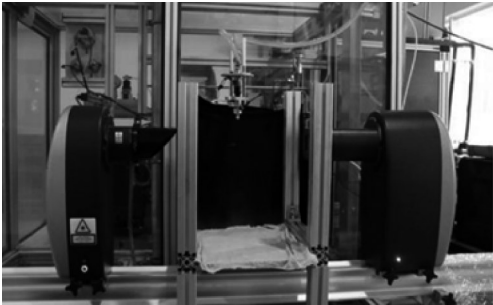


图 6 粒径测试试验台
Fig.6 Particle size test bench

了柴油燃料在喷气压力 $p_{ai}=0.65\text{ MPa}$ 与背压 $p_{cv}=0\text{ MPa}$ 条件下,针阀开启后不同时刻的高速喷雾试验图像和喷雾仿真图像。由试验与仿真喷雾图像可知,在喷嘴针阀开启初期,柴油液滴沿着喷嘴底部出口处的阀座锥角方向喷入定容弹中。随着喷嘴针阀的逐渐打开,预混腔中柴油与压缩空气混合物从针阀与阀座之间的空隙被高速喷出,高速气流使柴油液滴逐渐破碎,颗粒直径较大的柴油液滴由于其惯性较大,会沿着喷嘴的轴线靠拢,并一直沿着喷嘴轴线向下运动。部分粒径较小的柴油液滴随着高速气流与环境气体由于伯努利效应形成涡环结构,并逐渐向四周扩散,产生云团状的喷雾,使之更容易与空气形成燃油混合气。图 8 为试验和仿真的喷雾特性对比,由图可知,试验测得的贯穿距离稍大于仿真计算值,主要

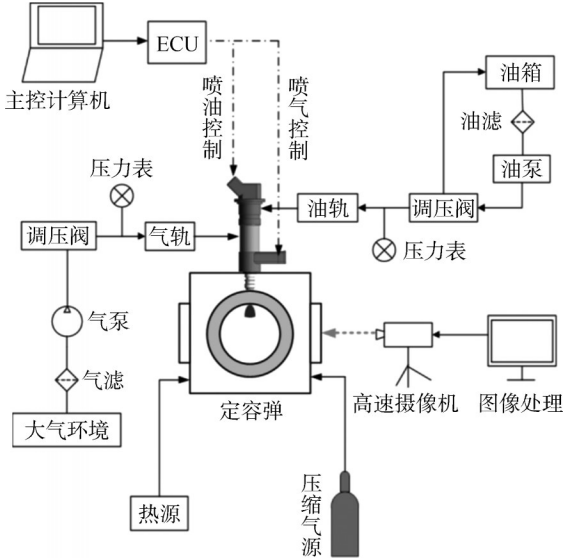


图 7 气助雾化喷雾试验系统示意图
Fig.7 Schematic diagram of spray test system for air-assisted atomization injector

在于仿真所用的喷油速率为平均速率,对喷雾变化有一定影响。总体上试验与仿真所得 SMD (d_{32})和贯穿距离的对比值基本吻合,定容弹高速拍摄的喷雾形状与计算得到的油束形状及变化过程趋于一致,说明模型计算结果和真实情况基本接近,具有良好的适用性,可为后续章节中计算对比分析不同喷气压力、环境背压与燃油温度下的喷雾特性奠定基础。

表 3 喷雾试验与仿真计算对比结果
Table 3 Comparison of fuel spray tests and simulation results

喷射时间/ms	1.0	2.0	3.0	4.0
试验结果				
仿真结果				

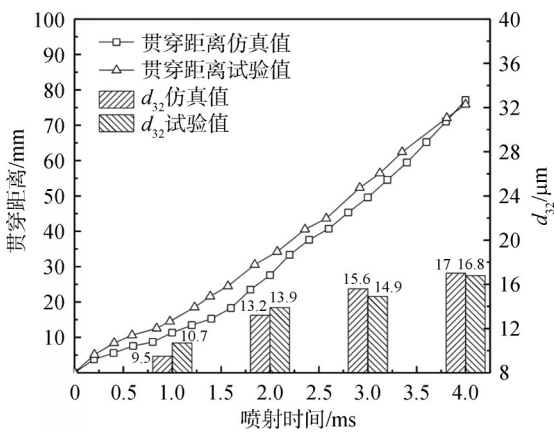


图 8 试验和仿真喷雾特性对比
($p_{ai}=0.65\text{ MPa}$, $p_{cv}=0\text{ MPa}$)

Fig.8 Comparison of spray characteristics between test and simulation ($p_{ai}=0.65\text{ MPa}$, $p_{cv}=0\text{ MPa}$)

3.2 算例设置

根据文中第 3.1 节所验证模型,在计算模型中对气嘴喷气压力、定容弹腔内环境背压、燃油温度等参数进行调整,各个算例参数设置如表 4 所示,其中,算例 1、算例 2、算例 3 为背压相同、喷气压力不同时仿真参数条件;算例 2、算例 4、算例 5 为喷气压力相同、背压不同时仿真参数条件;算例 2、算例 6、算例 7 则为燃油温度不同、喷气压力和背压均不变时仿真参数条件。该表中所给出的压力值均为表压,此外在 Fluent 计算环境中,操作压力给定为 0.1 MPa,气相压比定义为喷气压力与环境背压的绝对压力之比。

表 4 气助雾化喷射算例参数设置

Table 4 Parameters settings of calculation cases for air-assisted atomization injection

算例	环境背压 p_{cv}/MPa	喷气压力 p_{ai}/MPa	气相压比	喷油脉宽 t_{ti}/ms	喷气脉宽 t_{ti}/ms	燃油温度 T_i/K
1	0	0.55	6.500	3	4	293
2	0	0.65	7.500	3	4	293
3	0	0.75	8.500	3	4	293
4	0.1	0.65	3.750	3	4	293
5	0.3	0.65	1.875	3	4	293
6	0	0.65	7.500	3	4	278
7	0	0.65	7.500	3	4	323

4 仿真结果分析

4.1 不同喷气压力下喷雾特性分析

为研究喷气压力对柴油喷雾的影响,通过调整喷气压力参数,计算得到的喷雾变化过程如图 9(a)~图 9(c)所示,图中 t 为喷射时间。

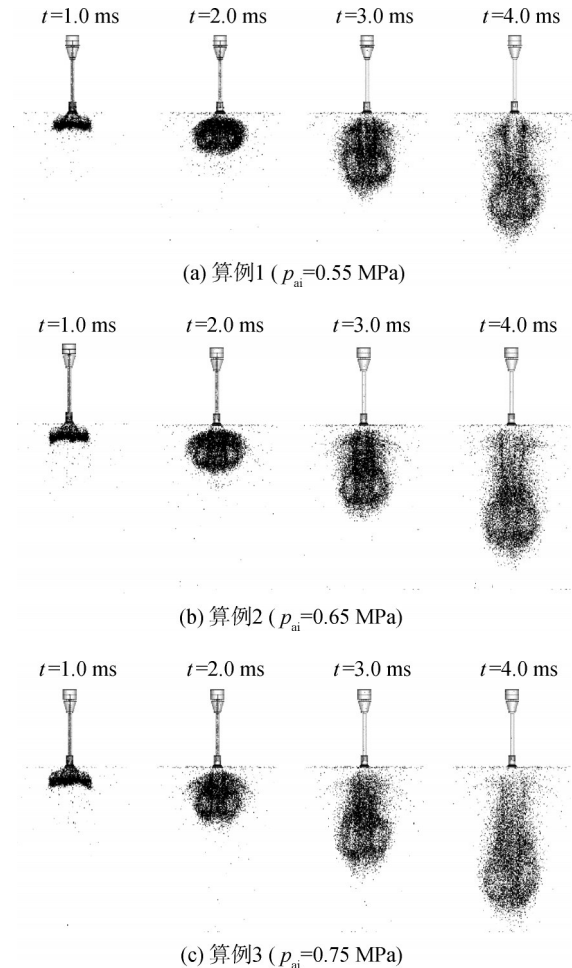


图 9 不同喷气压力下的柴油喷雾数值图像
($p_{cv}=0\text{ MPa}$, $T_i=293\text{ K}$)

Fig.9 Numerical images of diesel spray under different air injection pressures ($p_{cv}=0\text{ MPa}$, $T_i=293\text{ K}$)

通过提取喷嘴轴线方向上喷嘴出口处至喷雾前端的距离数据,得到所计算的贯穿距离如图 10 所示。当喷气压力增加后,由于气嘴内部压缩气体与环境之间的压差增加,气相速度随之增大,燃油液滴受到气动力也随之增大,因而喷雾贯穿距离逐渐增大。

图 11 为不同喷气压力下, SMD 随喷射时间的变化规律。可以看出,喷射初期的 SMD 较小,原因在于气助雾化喷嘴预混腔内的燃油混合气经过喷嘴出口处时产生超声速气流,强气动力作用

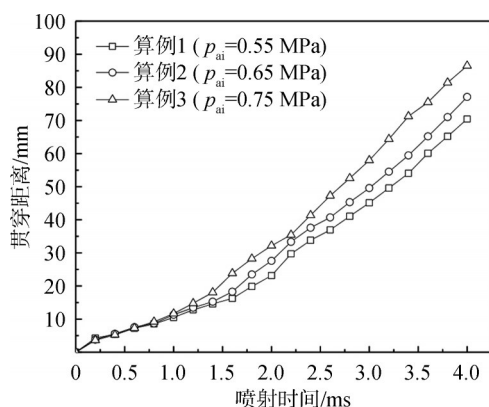


图 10 不同喷气压力下的贯穿距离
($p_{cv}=0$ MPa, $T_i=293$ K)

Fig.10 Penetration distance under different air injection pressures ($p_{cv}=0$ MPa, $T_i=293$ K)

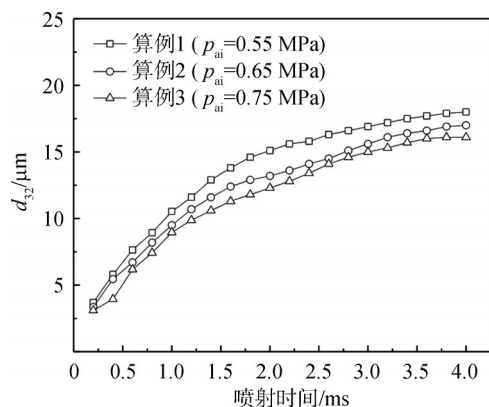


图 11 不同喷气压力下 SMD 变化
($p_{cv}=0$ MPa, $T_i=293$ K)

Fig.11 Variations of SMD under different air injection pressures ($p_{cv}=0$ MPa, $T_i=293$ K)

于燃油液滴上,使喷射前期的燃油液滴 SMD 处于较低水平。随着喷射时间的增加,燃油液滴的 SMD 逐渐增大,主要在于前期喷射的燃油液滴已远离喷嘴出口,所受气动力减小,燃油液滴之间发生碰撞、破碎和聚合使其逐渐增大。此外,喷气压力越大, SMD 整体会逐渐变小。从算例 2 和算例 3 的计算结果可以看出,气相压比为 7.500 和 8.500 时,两者对应的 SMD 差异较小,说明相比于 8.500,气相压比为 7.500 时可在保证良好的柴油雾化水平下能够降低压缩气体消耗量。

4.2 不同环境背压下喷雾特性分析

通过调整定容弹腔内的环境背压,计算得到的喷雾变化过程如图 12(a)~图 12(c)所示。

从图 13 显示数据曲线可以看出,环境背压对喷雾贯穿距离的影响非常显著,增大环境背压使定容弹内气体密度增大,燃油液滴受到的阻力随

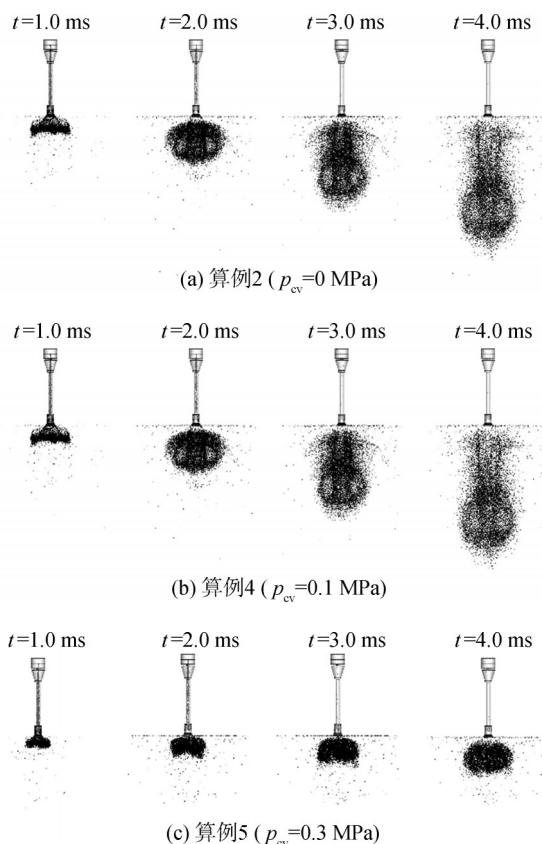


图 12 不同环境背压下的喷雾数值图像
($p_{ai}=0.65$ MPa, $T_i=293$ K)

Fig.12 Numerical images of diesel spray under different ambient backpressures ($p_{ai}=0.65$ MPa, $T_i=293$ K)

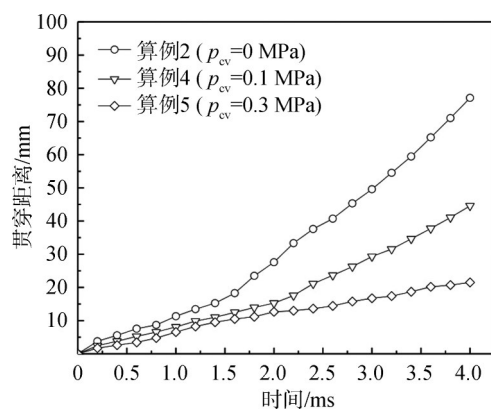


图 13 不同环境背压下的贯穿距离
($p_{ai}=0.65$ MPa, $T_i=293$ K)

Fig.13 Penetration distance under different ambient backpressures ($p_{ai}=0.65$ MPa, $T_i=293$ K)

之增加。当气相压比为 3.750 时,贯穿距离基本为一条定斜率的直线,这说明喷嘴出口处压力与环境背压相近,并且液滴受到的阻力和重力相抵消,使得液滴平均贯穿速率大致不变。

图 14 为不同环境背压下, SMD 随喷射时间

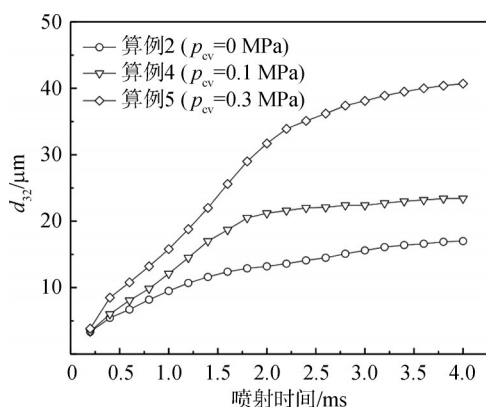


图14 不同环境背压下SMD变化

($p_{ai}=0.65$ MPa, $T_i=293$ K)

Fig.14 Variations of SMD under different ambient backpressures ($p_{ai}=0.65$ MPa, $T_i=293$ K)

的变化规律。随着环境背压的升高,从喷嘴出口处喷射出的燃油液滴SMD显著增大,即环境背压对SMD影响显著。环境背压增大,喷嘴出口处与定容弹的压差变小,在出口处较难产生高速气流,燃油液滴受到的气动力明显减小,破碎程度

有限。随着时间的推移,受腔内较高密度气体的阻力影响,破碎的燃油液滴发生碰撞后聚合,进一步导致燃油液滴的整体SMD增大。

为进一步分析不同气相压比对喷嘴出口处流场的影响,喷嘴处流体速度如图15所示。在图15(a)、图15(b)中,气相压比分别为1.875和3.750时,喷嘴出口处的气相速度明显降低,主要在于喷嘴预混腔内部本身存在着一定的压力损失,并且在喷嘴出口处与环境之间的压差减小,液滴受到的气动力变小。在图15(c)~图15(e)中,气相压比分别为6.500、7.500以及8.500时,喷嘴出口处的气相速度均容易达到超声速,并且在喷嘴下方的轴线附近形成了明显的涡环,高速气流从喷嘴出口处流出后,气体快速膨胀,使得喷嘴下方轴线处的空气产生负压区,周围空气快速流入到该负压区,从而形成对称的涡环。而随着气相压比的减小,可以明显看出喷嘴出口处的速度显著降低,气流速度相对较低,周围气体流入到负压区的速度变慢,从而形成不明显或不形成对称的反向涡环。

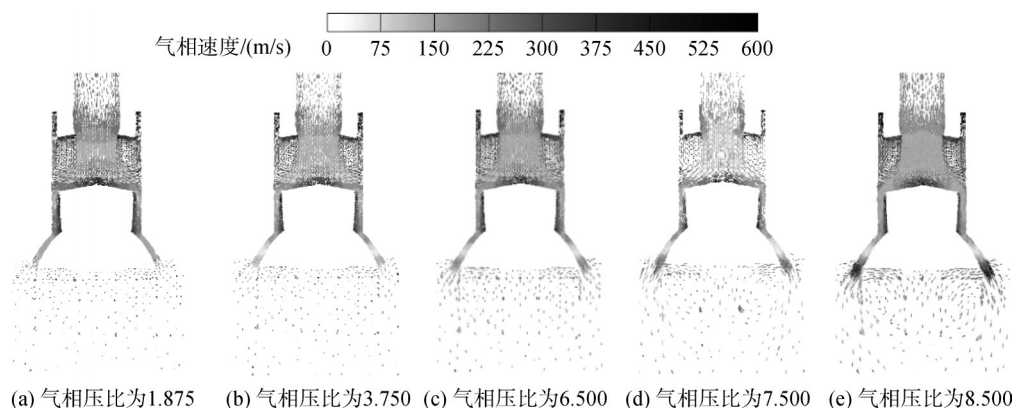


图15 喷射脉宽为2 ms时不同气相压比下气相速度

Fig.15 Air velocity under different pressure ratios at injection pulse width of 2 ms

4.3 燃油温度对喷雾特性的影响

为对比燃油温度对柴油喷雾特性的影响,通过改变燃油温度参数,计算得出的柴油喷雾变化过程如图16(a)~图16(c)所示。

温度直接影响燃油的理化特性,容易使其密度、运动黏度、表面张力等参数发生变化,可以通过式(1)~式(3)推算出不同温度条件下的燃油密度和燃油的运动黏度^[18]。表5为不同燃油温度下0号柴油的基本属性。

温度为 T_i (单位为K)时的燃油密度 ρ_{T_i} 为

$$\rho_{293} = \rho_{T_i} + 0.8894(T_i - 20) \quad (1)$$

式中 ρ_{293} 是293 K下柴油的密度,其值为840 kg/m³。

温度为 T_i 时的燃油运动黏度 ν_{T_i} 为

$$\lg(\nu_{T_i} + 0.65) = A - B \lg T_i \quad (2)$$

式中 A 、 B 为随油品性质而定的经验常数。

温度为 T_i 时的燃油动力黏度 μ_{T_i} 为

$$\mu_{T_i} = \rho_{T_i} \nu_{T_i} \quad (3)$$

图17给出了不同燃油温度下的喷雾贯穿距离。随着燃油温度的提高,喷雾贯穿距离小幅度增加,整体差异不大。图18为不同燃油温度下燃油SMD随喷射时间的变化曲线。随着燃油温度的升高,燃油液滴的SMD随之减小,323 K对应的SMD比293 K时减小了12.3%,说明提高燃油温度使其动力黏度降低,燃油与喷嘴内部壁面摩

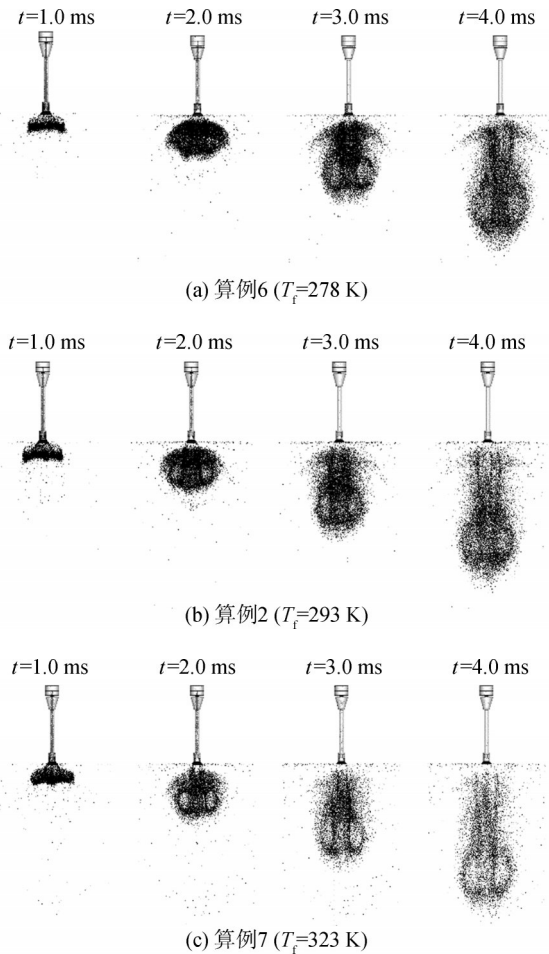


图 16 不同燃油温度下的喷雾数值图像
($p_{ai}=0.65\text{ MPa}, p_{cv}=0\text{ MPa}$)
Fig.16 Numerical images of diesel spray at different fuel temperatures ($p_{ai}=0.65\text{ MPa}, p_{cv}=0\text{ MPa}$)

表 5 不同燃油温度下 0 号柴油特性参数表
Table 5 Characteristics of No.0 diesel at different fuel temperatures

燃油温度/K	密度/(kg/m^3)	动力黏度/ $10^{-3}(\text{Pa}\cdot\text{s})$
278	853	8.7
293	840	3.9
323	813	2.25

擦减小,燃油液滴易破碎,喷雾粒径减小。从算例 2、算例 6 可以看出,当燃油温度降低后,燃油液滴的 SMD 变化并不明显,说明在燃油温度相对较低时,气助雾化喷嘴能够保证所喷射柴油 SMD 的稳定性,这为气助雾化喷嘴能够改善点燃式重油直喷发动机冷起动性能提供了理论分析依据。

图 19 为不同燃油温度下、喷射时间为 4 ms 时柴油喷雾对应燃油蒸发质量分数计算结果。可以

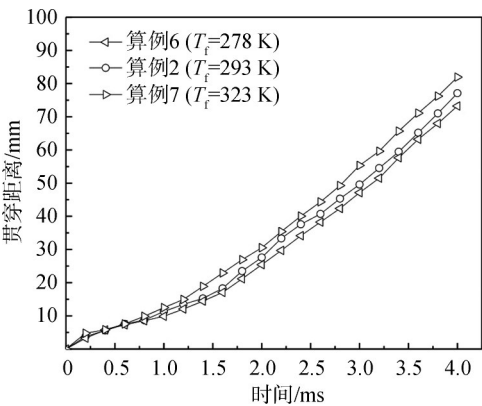


图 17 不同燃油温度下的贯穿距离
($p_{ai}=0.65\text{ MPa}, p_{cv}=0\text{ MPa}$)
Fig.17 Penetration distance at different fuel temperatures
($p_{ai}=0.65\text{ MPa}, p_{cv}=0\text{ MPa}$)

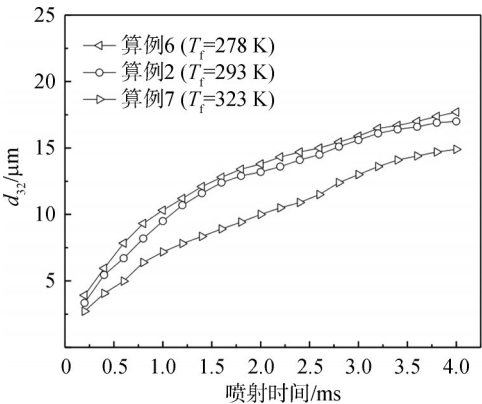


图 18 不同燃油温度下 SMD 变化
($p_{ai}=0.65\text{ MPa}, p_{cv}=0\text{ MPa}$)
Fig.18 Variations of SMD at different fuel temperatures
($p_{ai}=0.65\text{ MPa}, p_{cv}=0\text{ MPa}$)

看出,在图 19(a)和图 19(b)中,燃油温度在 278~293 K 时,喷雾贯穿距离较为接近,但燃油温度降低后对应的柴油蒸发效果下降明显。从图 19(c)中可以看出,燃油温度达到 323 K 时,柴油蒸发效果明显要好于前两种情形,主要在于该温度水平基本接近柴油的闪点,柴油喷射后容易形成良好的雾化效果。实际上,对于点燃式重油直喷发动机,如采用燃油预热技术后,冷机起动性能可以得到有效改善。此外,发动机负荷增加后,燃烧温度升高,喷嘴受热后在一定程度实现对油道内燃油的传导预热,气助雾化喷嘴自身对柴油等航空重油的雾化蒸发有着进一步的促进作用。

表 6 为针阀开启为 3 ms 后,柴油蒸发量占总喷油量的质量分数。可以看出,在燃油温度为 323 K 时,燃油蒸发质量分数在 4 ms 时达到 36.93%,而在燃油温度为 278 K 时,燃油蒸发质量分数仅达

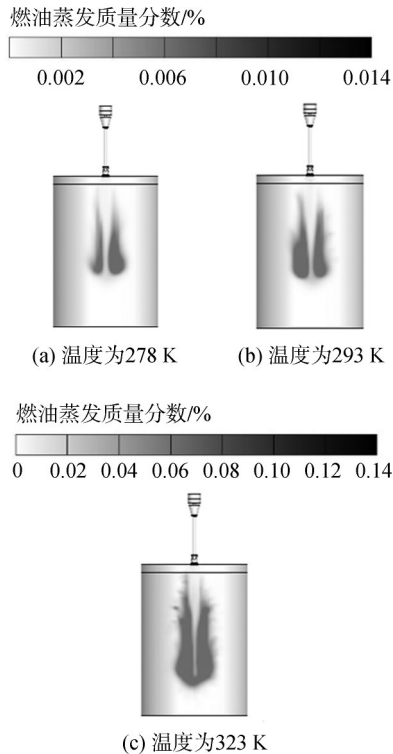


图 19 燃油蒸发质量分数分布

Fig.19 Mass fraction distribution of evaporated fuel

表 6 不同温度下燃油蒸发质量分数

Table 6 Mass fraction of evaporated fuel at different temperatures

喷射时间/ms	燃油蒸发质量分数/%		
	$T_f=278\text{ K}$	$T_f=293\text{ K}$	$T_f=323\text{ K}$
3.0	2.732	4.150	32.07
3.2	2.735	4.173	33.10
3.4	2.736	4.178	34.20
3.6	2.740	4.181	35.21
3.8	2.745	4.186	36.14
4.0	2.750	4.189	36.93

到 2.75%。因而,在低温条件下,除依靠气助雾化喷嘴得到较小的燃油雾化粒径,进行适当的燃油预热,使燃油蒸发性更好,在实际应用中,对于改善直喷发动机在部分工况下燃用柴油时的整机性能具有重要的实践意义。

5 结 论

通过对比气助雾化喷嘴的定容弹试验与仿真计算结果,开展了喷雾数值模拟分析。得到了喷气压力、环境背压以及燃油温度对气助雾化喷射柴油喷雾特性的影响规律,主要结论如下:

1) 喷气压力的升高对于燃油的贯穿距离影响较大,喷气压力为 0.75 MPa 比喷气压力为 0.65 MPa 贯穿距离增加了 12.2%,但对于燃油的 SMD 影响较小,喷气压力为 0.75 MPa 比喷气压力为 0.65 MPa 的 SMD 减小了 5.2%,即在保证燃油 SMD 处于较好水平下,气相压比为 7.500 有利于减少气量消耗。

2) 环境背压对燃油喷雾的贯穿距离与 SMD 影响较大,当喷嘴的气相压比为 1.875 时,喷嘴出口处流场基本不会产生超声速气流,降低了燃油液滴所受的气动力,从而显著影响燃油喷雾贯穿距离与 SMD,喷射时间在 4 ms 时 SMD 只能达到 40.7 μm 。

3) 燃油温度对喷雾贯穿距离影响不大,但对燃油的 SMD 影响较大,随着燃油温度的升高,燃油液滴的 SMD 急剧减小,323 K 对应的 SMD 比 293 K 时减小了 12.3%,喷射时间在 4 ms 时的 SMD 为 14.9 μm ,燃油蒸发质量分数达到 36.93%。

4) 实际应用中可通过借助燃油预热的方法,促进重油燃料的蒸发,以进一步改善二冲程缸内直喷重油发动机性能。

参考文献:

[1] CATHCART G, DICKSON G, AHERN S. The application of air-assist direct injection for spark-ignited heavy fuel 2-stroke and 4-stroke engines[R]. SAE Technical Paper 2005-32-0065, 2005.

[2] 胡强,余双,史开源,等. 浅谈航空重油活塞式发动机[J]. 航空动力, 2020, 3(5): 32-35.

HU Qiang, YU Shuang, SHI Kaiyuan, et al. Discussion on the aviation heavy fuel piston engines[J]. Aerospace Power, 2020, 3(5): 32-35. (in Chinese)

[3] 杜春媛,田梦园,胡春明. 二冲程重油航空发动机技术发展分析[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2020, 49(3): 92-96.

DU Chunyuan, TIAN Mengyuan, HU Chunming. Technical development analysis of two-stroke heavy fuel aero engine [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2020, 49(3): 92-96. (in Chinese)

[4] 冯光烁,周明. 重油航空活塞发动机技术路线分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(10): 1114-1121.

FENG Guangshuo, ZHOU Ming. Assessment of heavy fuel aircraft piston engine types[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016, 56(10): 1114-1121. (in Chinese)

[5] 郑艳. 气助雾化喷嘴结构对煤油雾化影响的 CFD 研究[D]. 南京航空航天大学, 2012.

ZHENG Yan. CFD research on the effects of air-assisted atomizer structure on kerosene atomization[D]. Nanjing: Nan-

- jing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [6] 李波, 李云清, 王德福. GDI 发动机喷雾特性的数值模拟和试验[J]. 内燃机学报, 2012, 30(1): 9-15.
- LI Bo, LI Yunqing, WANG Defu. Numerical simulation and experiment on spray characteristics of GDI engines[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(1): 9-15. (in Chinese)
- [7] 李雁飞, 郭恒杰, 王建昕, 等. 高背压下 GDI 油束喷雾特性的试验[J]. 内燃机学报, 2016, 34(4): 326-333.
- LI Yanfei, GUO Hengjie, WANG Jianxin, et al. Experiment on spray characteristics of GDI jet under elevated ambient pressure[J]. Transactions of CSICE, 2016, 34(4): 326-333. (in Chinese)
- [8] 华伦, 赵彦光, 胡静, 等. 空气辅助和无空气辅助 SCR 系统尿素喷雾特性的对比试验研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(3): 197-201.
- HUA Lun, ZHAO Yanguang, HU Jing, et al. A comparative experimental study on the urea spray characteristics in SCR systems w/wo air assistance[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(3): 197-201. (in Chinese)
- [9] 巴斯怀森 R. 汽油机直喷技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [10] YANG J, MUNOZ R, ANDERSON R, et al. Study of a stratified-charge DISI engine with an air-forced fuel injection system[R]. SAE Technical Paper 2000-01-2901, 2000.
- [11] 杨嘉林. 车用汽油发动机燃烧系统的开发[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [12] SURESHKUMAR J, ELAYARAJA R, MALLIKARJUNAJ, et al. Transient spray characteristics of air assisted fuel injection[R]. SAE Technical Paper 2015-01-0920, 2015.
- [13] HU Jinchao, LIU Bolan, ZHANG Chao, et al. Experimental study on the spray characteristics of an air-assisted fuel injection system using kerosene and gasoline[J]. Fuel, 2019, 235(1): 782-794.
- [14] 鲍建军. 点燃式空气辅助柴油喷射系统喷雾及燃烧特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- BAO Jianjun. Experimental study on spray and combustion characteristics of ignition air-assisted diesel injection system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [15] 王思奇, 杨海青. 航空重油发动机气助雾化喷嘴雾化机理仿真[J]. 内燃机学报, 2018, 36(2): 127-135.
- WANG Siqi, YANG Haiqing. Simulation on atomization mechanism of air-assisted injector for aircraft heavy fuel engine[J]. Transactions of CSICE, 2018, 36(2): 127-135. (in Chinese)
- [16] JIN S H, BREAR M J, WATSON H, et al. An experimental study of the spray from an air-assisted direct fuel injector[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(10): 1883-1894.
- [17] CHEN L, DING S, LIU H, et al. Comparative study of combustion and emissions of kerosene (RP-3), kerosene-pentanol blends and diesel in a compression ignition engine[J]. Applied Energy, 2017, 203(10): 91-100.
- [18] 中国石油化工总公司. 石油计量表: GB/T 1885-1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 1-16.

(编辑: 陈 越)