

航空活塞发动机用自增压喷嘴喷雾特性试验

楼煌强¹, 魏民祥¹, 刘锐², 季昊成¹, 杨海青¹, 常诚¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 211816)

摘 要: 为了自增压喷嘴更好地在航空活塞发动机上应用,在定容弹内对自增压喷嘴喷雾特性进行了试验研究。采用可视化技术结合 Matlab 图像处理程序,研究了 RP-3 航空煤油在不同背压、燃油温度和环境温度下的喷雾特性。结果表明:背压为 0.1 MPa 时的喷雾有明显的表面波和油线结构。背压从 0.1 MPa 增大至 0.8 MPa,典型的中空锥喷雾转变成有大尺度涡流的中空锥喷雾,喷雾贯穿距离和喷雾面积的最大值分别减小了 45% 和 55.3%。燃油温度的升高促进了喷雾蒸发有助于冷起动,喷雾贯穿距离、喷雾面积和喷雾锥角均在燃油温度为 50 ℃ 时最小。在背压为 0.1 MPa 时,喷雾贯穿距离和喷雾面积随着环境温度升高先增大后减小,在环境温度为 60 ℃ 和 50 ℃ 分别有最大值 67.3 mm 和 915.5 mm²,而喷雾锥角则随着环境温度升高而减小,在环境温度为 90 ℃ 时达到最小值 9.2°。

关 键 词: 喷雾特性; 自增压喷嘴; 航空活塞发动机; RP-3 航空煤油; 油线; 涡流

中图分类号: V312⁺.1

文献标志码: A

Experiment on spray characteristics of self-pressurized injector for aircraft piston engines

LOU Huangqiang¹, WEI Minxiang¹, LIU Rui², JI Haocheng¹,
YANG Haiqing¹, CHANG Cheng¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

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

2. School of Mechanical and Power Engineering,

Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: For the better application of the self-pressurized injector on aircraft piston engines, the spray characteristics of a self-pressurized injector was experimentally studied in a constant-volume vessel. Spray characteristics of RP-3 aviation kerosene under different ambient pressure, fuel temperature and ambient temperature were studied using visualization technology combining Matlab image processing program. Result showed that, the surface waves and fuel strings can be observed obviously under the ambient pressure of 0.1 MPa. With the ambient pressure increasing from 0.1 MPa to 0.8 MPa, the typical hollow cone spray was transformed into a hollow cone spray with large scale vortexes. The maximum spray penetration reduced by 45%, and the maximum spray area reduced by 55.3%, respec-

收稿日期: 2020-10-14

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

作者简介: 楼煌强(1996—),男,硕士生,研究方向为燃油喷射雾化。E-mail:17854290798@163.com

通信作者: 刘锐(1987—),男,讲师,博士,研究方向为内燃机仿真与控制。E-mail:timliu@njtech.edu.cn

引用格式: 楼煌强,魏民祥,刘锐,等. 航空活塞发动机用自增压喷嘴喷雾特性试验[J]. 航空动力学报,2020,35(12):2583-2592.
LOU Huangqiang, WEI Minxiang, LIU Rui, et al. Experiment on spray characteristics of self-pressurized injector for aircraft piston engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(12): 2583-2592.

tively. The increase of fuel temperature promotes spray evaporation to facilitate cold start. The spray penetration, area and cone angle were all minimum when the fuel temperature was 50 °C. At the ambient pressure of 0.1 MPa, the spray penetration and area increased at first and then decreased with the increase of ambient temperature. The maximum spray penetration reached 67.3 mm at ambient temperature of 60 °C, the maximum spray area reached 915.5 mm² at ambient temperature of 50 °C, respectively. The spray cone angle decreased with the increasing of ambient temperature, reaching the minimum value of 9.2° at ambient temperature of 90 °C.

Key words: spray characteristics; self-pressurized injector; aircraft piston engines; RP-3 aviation kerosene; fuel strings; vortexes

点燃式活塞发动机功质比大、结构简单、成本低廉,被广泛应用于民用和军事领域的小型无人机上^[1]。有研究报告指出,由于小型无人机的通用性和低成本,其应用数量在不久的将来将大大增加^[2]。

汽油是点燃式活塞发动机的主要燃料,但是汽油易挥发、安全性低,不适合用于舰载等安全性要求较高的场合,近年来单一燃料概念(single fuel concept, SFC)^[3]越来越受到各国研究者的关注。具有高热值与高稳定性的航空煤油被认为可以在传统点燃式活塞发动机上应用,但是航空煤油黏度与表面张力大,蒸发性差难以雾化^[4],易导致发动机冷起动困难、爆震和积碳。采用缸内直喷技术能提高航空煤油雾化质量,改善冷起动性能避免淹缸,降低缸内温度抑制爆震。同时,缸内直喷技术理论上能消除二冲程点燃式发动机短路损失,提高燃油经济性^[5]。

车用高压共轨的燃油雾化质量好,但其过高的喷油压力可能会导致喷雾直接撞击活塞顶,引起燃烧与排放恶化,另外其机械系统复杂,难以小型化。空气辅助喷射(air-assisted direct injection, AADI)可以提升航空煤油雾化效果^[6],已有许多研究就其在点燃式航空活塞发动机上应用而展开^[6-9],但其喷射压力低,高速大负荷工况下喷油时间长,需要在下止点前喷油,不可避免地造成短路损失而导致燃油经济性恶化;另外在高海拔时由于空气稀薄导致压缩空气压力下降,难以维持恒定的油气压力差;且油气供给系统增加了额外质量,消耗了发动机功率,导致发动机功质比下降^[10]。另一种缸内直喷技术是采用自增压喷嘴,E-TEC 缸内直喷系统是其中的代表(E-TEC direct injecton, E-DI)^[11-12]。E-DI 自增压喷嘴无需高压油泵和油轨就能提供高达 5 MPa 的喷油压力^[10],能在高速大负荷工况下短时间内完成喷油,且简单的供油系统也变相提高了发动机功质

比。E-DI 自增压喷嘴为外开旋流式,无预喷射喷雾^[13],且不易形成喷嘴沉积物^[14]。

目前,国内外大部分对 E-DI 自增压喷嘴喷雾特性的研究都基于汽油燃料^[15-16],应用航空煤油的研究较少。根据喷雾特性在缸内组织合理的可燃混合气,是发动机进行良好燃烧与排放的前提,因此有必要对 E-DI 自增压喷嘴航空煤油喷雾特性进行研究,为 E-DI 在点燃式航空活塞发动机上的应用提供参考依据。本文拟在定容弹内采用可视化技术获取喷雾图像,主要研究背压、燃油温度和环境温度对 E-DI 自增压喷嘴航空煤油喷雾特性的影响。

1 喷雾试验系统与图像处理

1.1 E-DI 自增压喷嘴工作原理

E-DI 自增压喷嘴内部结构如图 1 所示,线圈通电后受到永磁体磁场的作用,向下驱动弹簧预紧的顶针,顶针向下撞击燃油液柱,在压力室内产生高压,液压力使燃油从弹簧预紧的喷油嘴中喷出。喷嘴工作时需要保持燃油循环流动来冷却线圈。

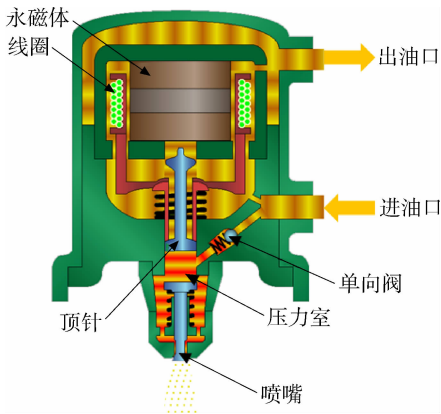


图 1 E-DI 自增压喷嘴结构示意图
Fig. 1 Structure schematic diagram of E-DI self-pressurized injector

1.2 喷雾试验系统

如图 2 所示,搭建了喷雾试验系统,包括燃油供给系统、进排气系统、定容弹、可视化系统和电子控制系统。定容弹有 3 个圆形石英玻璃视窗,

其中两个视窗相对布置,所有视窗可视部分直径为 120 mm。定容弹主体为正方体,底部有倒圆锥形设计,便于废油流出。可视化系统的参数如表 1 所示。

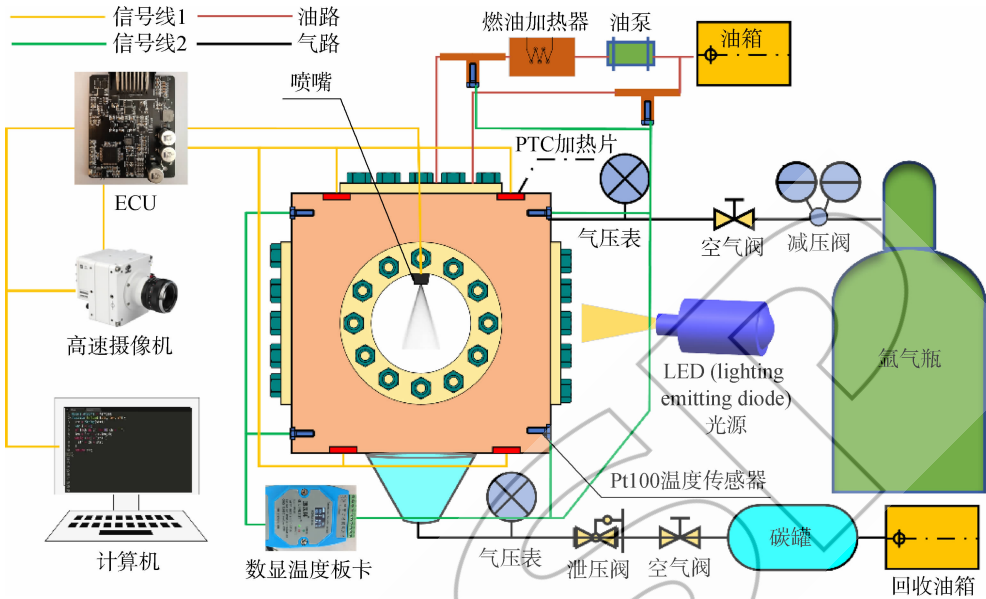


图 2 喷雾试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spray experiment system

表 1 可视化系统参数

Table 1 Visualization system parameters

参数	数值及详情
高速摄像机型号	Phantom VEO410L
分辨率/像素	832×600
帧率/(帧/s)	10 000
曝光时间/ μ s	50
光源功率/W	150

试验采用背光摄影法,喷嘴和高速摄像机的同步由电子控制系统完成,通过自编 Labview 上位机控制 ECU(electronic control unit)发送同步信号。试验中氩气瓶最高压力为 25 MPa,关闭进排气路中的空气阀可使定容弹背压维持稳定,两个气压表同时监测定容弹内背压,减小背压误差对试验结果的影响。泄压阀保证了试验安全性,背压超过设定安全值时将自动泄压。油泵压力为 0.3 MPa,体积流量为 80 L/h。试验中通过燃油加热器加热燃油,气体加热使用 PTC(positive temperature coefficient)加热片,燃油温度和环境温度由 Pt100 温度传感器监控,使用碳罐对废气中的废油进行回收。

1.3 试验条件

试验在不同背压、燃油温度和环境温度下进行,试验条件如表 2 所示,RP-3 航空煤油物化性质^[17]如表 3 所示,其中 t_f 表示燃油温度。

表 2 试验条件

Table 2 Expeirement condition

参数	数值
背压/MPa	0.1,0.2,0.4,0.6,0.8
燃油温度/ $^{\circ}$ C	30,40,50
环境温度/ $^{\circ}$ C	30,40,50,60,70,80,90
喷油压力/MPa	3.5
喷油脉宽/ms	3

表 3 RP-3 航空煤油性质

Table 3 RP-3 aviation kerosene properties

参数	数值
密度/(kg/m^3)($t_f=15\text{ }^{\circ}\text{C}$)	783.4
表面张力/ $10^{-3}(\text{N}/\text{m})(t_f=20\text{ }^{\circ}\text{C})$	24.1
运动黏度/($\text{mm}^2/\text{s})(t_f=20\text{ }^{\circ}\text{C})$	1.72
冰点/ $^{\circ}$ C	-45.2
闪点/ $^{\circ}$ C	43

1.4 喷雾图像处理

喷雾图像处理采用自编 Matlab 程序,首先通过减去背景图来消除环境干扰与照明不均匀性,将去背景图像转换成灰度图,用中位数滤波对灰度图去噪,去噪后进行对比度增强和伪彩图处理,采用 Otsu 阈值法^[18]进行二值化,用 Canny 算子^[19]进行边缘检测获取喷雾边缘。图 3 为上述喷雾图像处理过程示意图。

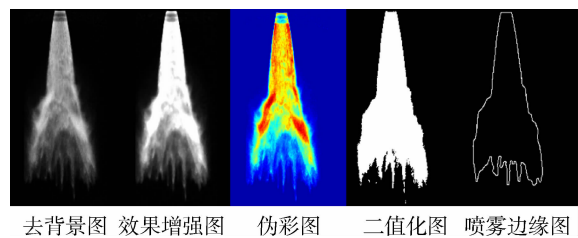


图 3 喷雾图像处理过程

Fig. 3 Spray images processing procedure

喷雾贯穿距离和喷雾锥角的定义采用 SAE (Society of Automotive Engineering) J2715^[20]方法,如图 4 所示。喷雾贯穿距离为喷雾在喷嘴轴向能达到的最远距离。喷嘴出口 5 mm 和 15 mm 的两条喷雾边缘切线,与喷嘴轴形成的左右锥角 θ_l 和 θ_r 之和为喷雾锥角。因为喷雾是一个随机过程,所以在每个试验点重复 10 次取平均值作为试验结果。试验结果需要对单个像素的实际大小进行标定,通过图像处理程序计算喷雾贯穿距离、喷雾锥角和喷雾面积大小。

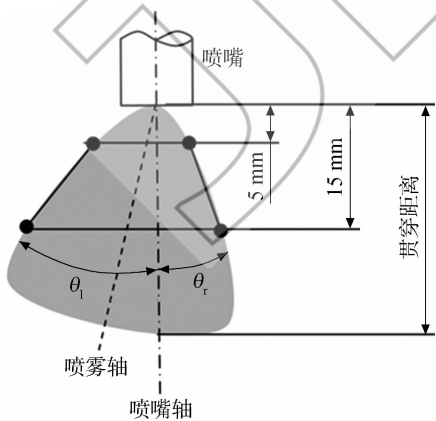


图 4 喷雾特性定义

Fig. 4 Deneftion of spray characteristics

2 喷雾试验结果与分析

2.1 E-DI 自增压喷嘴的喷雾形态发展

图 5 为燃油温度和环境温度在 30 ℃ 时,不同

背压下的喷雾宏观形态发展图,将首次出现喷雾的图像作为第一张图像,图中 T 表示时间。接近喷嘴出口部分的喷雾颜色较浅,是因为喷雾器安装底座的金属表面过于光滑而反射光线,对图像有一定干扰,但不影响试验结果。

图 5 中,不同背压下喷雾宏观形态差异很大,背压 $p_a=0.1\text{ MPa}$ 时,中空锥喷雾表面存在表面波和油线^[21],为了更清晰地观察油线,图 6 展示了喷雾图像和对应的油线结构图。 $T=0.3\text{ ms}$ 时,油线清晰且油线间隙基本一致; $T=0.5\text{ ms}$ 时表面波消失,油线在近场区域比较清晰,在远场区域油线开始破碎;在 $T=0.7\text{ ms}$ 和 $T=0.9\text{ ms}$ 时,近场区域存在油线但较为浑浊,油线间隙不清晰^[22],而远场区域油线消失。油线和油线间隙大大增加了喷雾与空气的接触面积,加强了喷雾与空气的相互作用,提高了航空煤油雾化质量。

空气与速度极高的燃油射流发生动量交换后,空气具备较大的运动速度^[23]。如图 7 所示,在高速空气作用下,液膜表面发生畸变并处于不稳定状态。当不稳定性达到临界点时,第一次破裂发生在液膜较薄处^[13]。同时,表面张力使液膜较厚处收缩。另外,空气夹带使得空气进入喷嘴内变成气泡附着在喷嘴体或轴针上^[24],如图 8 所示。轴针上的气泡使液膜外表面成凸型,喷嘴上的气泡使液膜外表面成凹型。随着液膜在周向不断扩大,液膜凸型与凹型处较薄,最先破裂。因此在空气作用力、表面张力和空气夹带共同作用下,油线生成。

图 5 中背压大于 0.1 MPa 时,喷雾两侧出现涡流且涡流尺度逐渐增大,形成再循环区^[15]。在再循环区,涡流挟带燃油液滴向喷嘴方向运动,部分燃油液滴逐渐靠近主喷雾体,最后与喷雾体发生作用。中空锥喷雾内部气流向喷嘴方向运动^[25],喷雾射流速度比喷雾内部气体速度大,因此中空锥内部为低压区,而涡流中心为高压区^[15],在内外压差作用下喷雾坍塌,背压越高坍塌越明显。另外,背压增大使涡流出现时刻提前,背压为 0.8 MPa, $T=0.3\text{ ms}$ 时就出现大尺度涡流,且背压越大,涡流作用范围越大,涡流最上方越接近喷嘴出口^[25]。在涡流作用下,油滴运动促进了油气混合,易形成可点燃的混合气。

2.2 背压对自增压喷嘴喷雾特性的影响

为了进一步探究 RP-3 航空煤油喷雾特性,在燃油温度和环境温度为 30 ℃ 时,研究了喷雾特

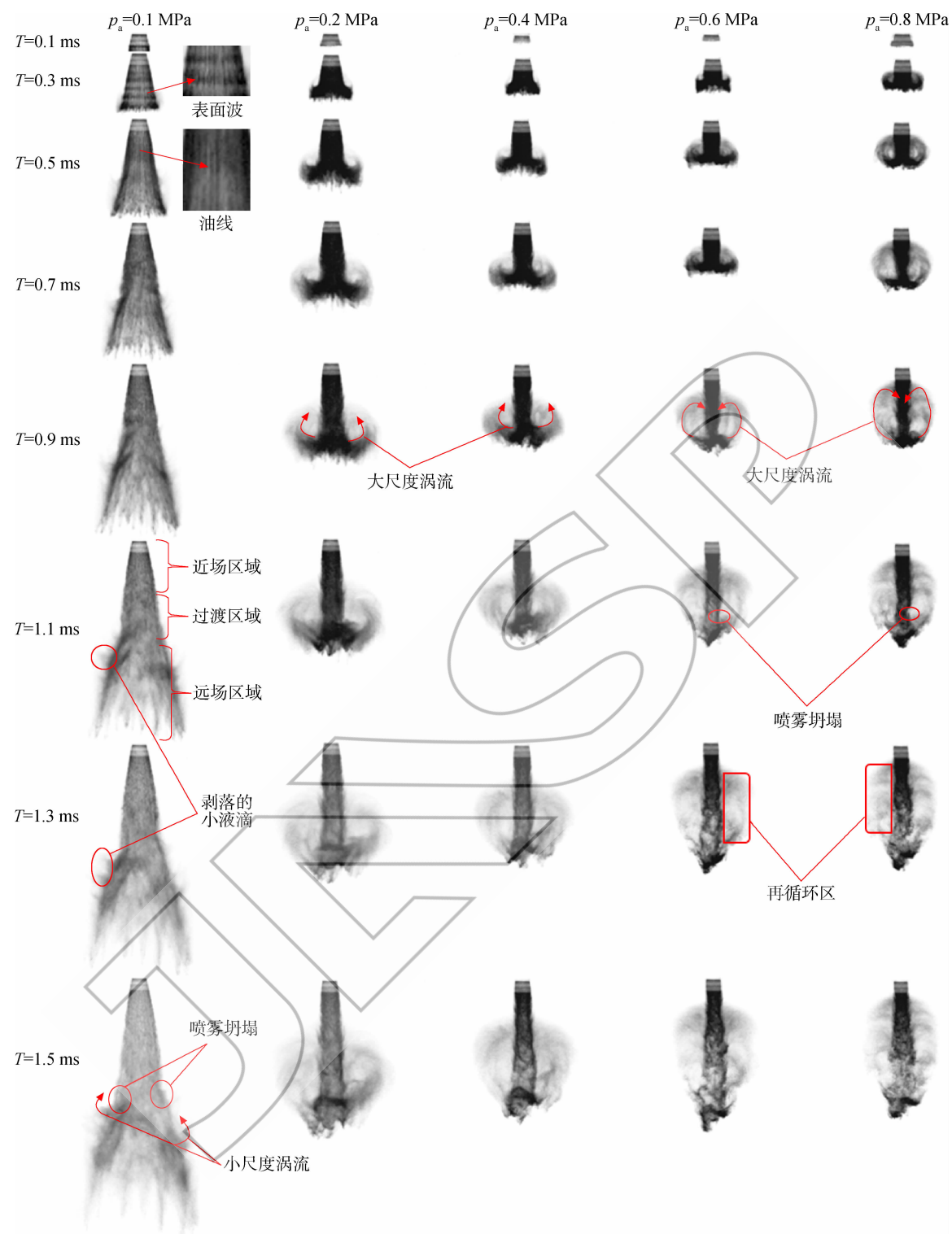


图 5 不同背压下喷雾宏观形态图

Fig. 5 Spray macroscopic images under different ambient pressures

性随背压变化的规律。图 9 为不同背压下喷雾贯穿距离的变化规律,从图中看出所有背压下的喷雾贯穿距离都近似于线性增加,背压增大时喷雾贯穿距离减小。在背压为 0.1MPa 时喷雾贯穿距离最大且明显大于其余背压,背压为 0.8 MPa 时喷雾贯穿距离最小,在 $T=1.5\text{ ms}$ 时喷雾贯穿距

离有最大值 90.5 mm,最小值 49.7 mm,在高背压作用下减小了 45%。

喷雾贯穿距离随着背压增大而减小的原因是,背压增大导致气体密度增大,单位体积内气体分子数增加,喷雾与气体分子发生碰撞的概率变大,喷雾与气体之间动量交换增加^[25]导致动能减

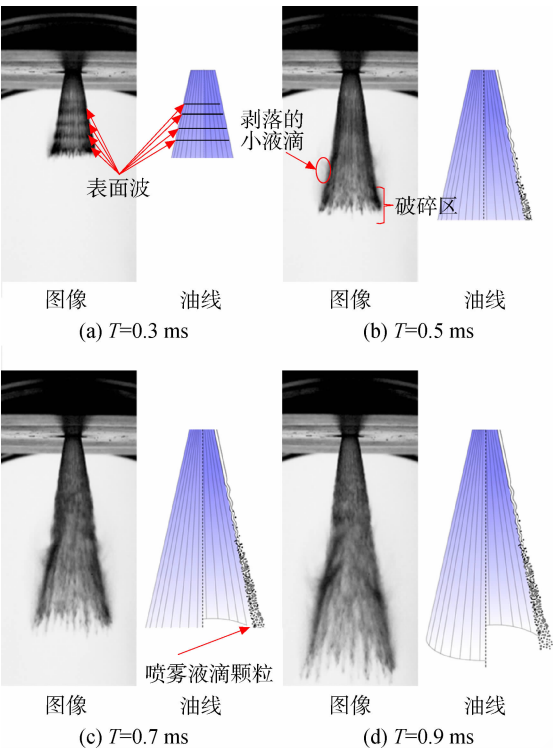


图 6 喷雾图像和油线结构示意图

Fig. 6 Spray images and schematic diagram of fuel strings structure

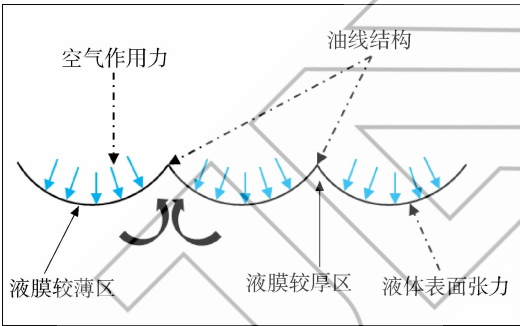


图 7 液膜变形形成油线

Fig. 7 Liquid sheet displacement to form fuel strings

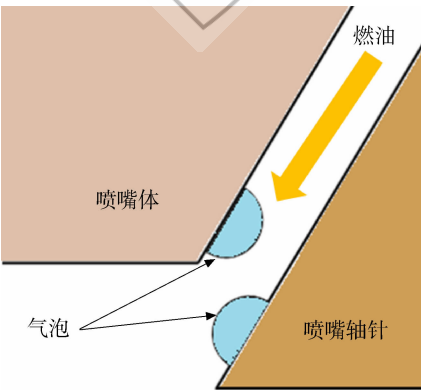


图 8 喷嘴内空气夹带

Fig. 8 Air entrainment in the injector

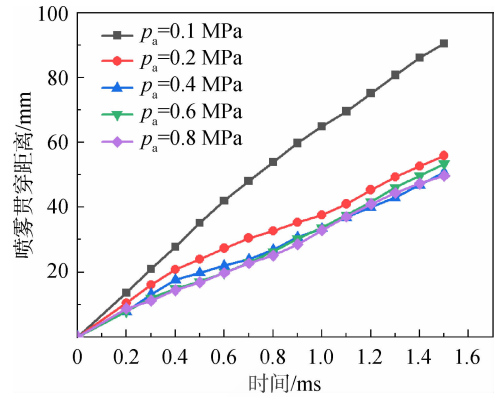


图 9 不同背压下喷雾贯穿距离随时间变化

Fig. 9 Variation of spray penetration with time under different ambient pressures

小,贯穿距离随之减小。另外,背压大于 0.1 MPa 时涡流向上卷吸小燃油液滴^[22],也使得喷雾贯穿距离减小。背压大于 0.1 MPa 时喷雾贯穿距离相差不大的原因可能是,小粒径液滴受到空气阻力作用后动能损失更大,而大粒径液滴有更大的动能继续向下运动^[26],此部分大粒径液滴受到空气阻力的影响有限。

喷雾面积一定程度上反映喷雾空间分布能力,喷雾空间分布能力与缸内混合气质量有关,后者影响发动机燃烧与排放。图 10 是燃油温度和环境温度为 30 ℃ 时,不同背压下的喷雾面积,可以看出喷雾面积随背压增大而减小。背压为 0.1 MPa 下在 $T=1.5$ ms 时喷雾面积有最大值为 1204.5 mm²,背压为 0.8 MPa 下在 $T=1.5$ ms 时有最大值为 538.2 mm²,减小了 55.3%。因为背压为 0.1 MPa 时喷雾贯穿距离最大,大大促进了喷雾在空间内扩散。虽然背压大于 0.1 MPa 时喷雾径向展开度变大,但是较小的喷雾贯穿距离导

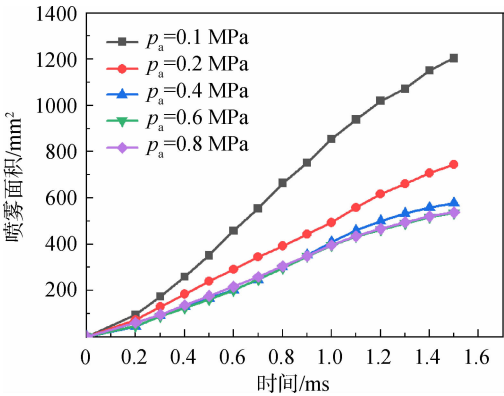


图 10 不同背压下喷雾面积随时间的变化

Fig. 10 Variation of spray area with time under different ambient pressures

致喷雾面积变小。

由于涡流对喷雾锥角干扰太大,背压试验不分析喷雾锥角变化规律。

2.3 燃油温度对自增压喷嘴喷雾特性的影响

低温冷起动困难是点燃式航空煤油活塞发动机面临的难题之一,通常需要外部加热装置加热缸头或者燃油进行辅助冷起动。图 11 是环境温度为 30℃ 时在不同燃油温度 t_f 和背压下的喷雾贯穿距离,可以发现相同背压下燃油温度越高喷雾贯穿距离越小,喷雾贯穿距离均在 $t_f=50\text{℃}$ 时达到最小。背压大于 0.1 MPa 时,燃油温度升高但是喷雾贯穿距离相差不大。

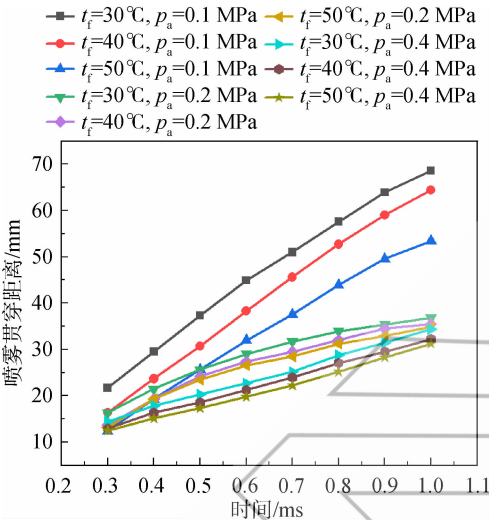


图 11 不同燃油温度和背压下喷雾贯穿距离随时间的变化
Fig. 11 Variation of spray penetration with time under different fuel temperatures and ambient pressures

燃油温度升高降低了燃油黏度,喷嘴内部流动摩擦损耗减小^[27],燃油射流初始动能变大,贯穿距离应该增大。试验结果与之相反的原因是,燃油温度升高后雷诺数变大,油束湍流增强,同时燃油表面张力减小,导致喷雾更易破碎。破碎后喷雾粒径减小,小粒径液滴受到空气阻力后减速更明显,所以喷雾贯穿距离减小;同时燃油温度升高和喷雾破碎后增加的空气接触面积加强了蒸发作用,也使得喷雾贯穿距离减小^[27]。图 12 是背压为 0.1 MPa、环境温度为 30℃ 时不同燃油温度下的部分喷雾伪彩图,红色越深表示喷雾越浓, $t_f=30\text{℃}$ 时喷雾尖端浅色部分面积最大, $t_f=40\text{℃}$ 次之, $t_f=50\text{℃}$ 最小,说明 $t_f=50\text{℃}$ 时喷雾蒸发作用最强。但是从图 13 环境温度为 30℃ 时不同燃油温度和背压下喷雾面积变化曲线图中发现,在

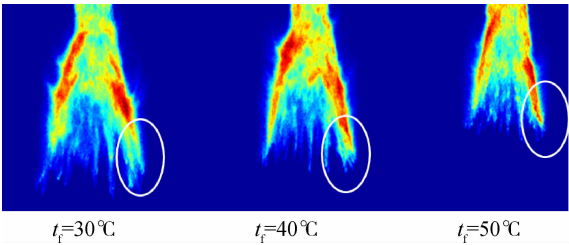


图 12 不同燃油温度下喷雾伪彩图
Fig. 12 Pseudo-color images under different fuel temperatures

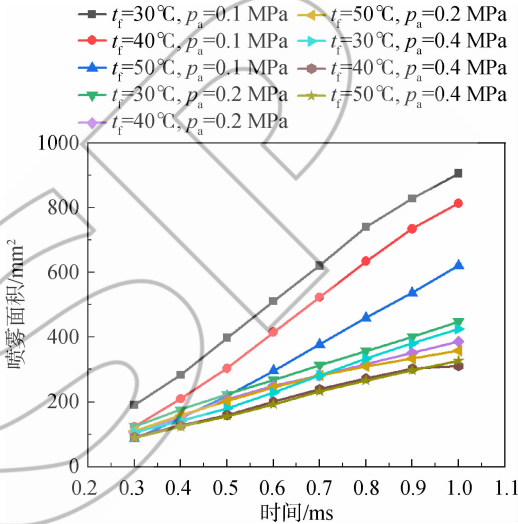


图 13 不同燃油温度和背压下喷雾面积随时间的变化
Fig. 13 Variation of spray area with time under different fuel temperatures and ambient pressures

背压大于 0.1 MPa 后,燃油温度升高能促进喷雾蒸发,但是对喷雾面积影响有限。

图 14 是背压为 0.1 MPa、环境温度为 30℃ 时不同燃油温度下的喷雾锥角变化情况,由图可知燃油温度升高而喷雾锥角减小,因为燃油温度越

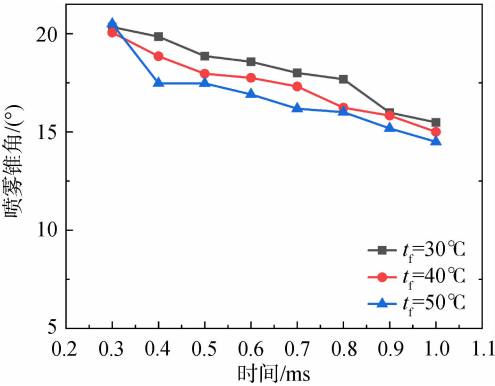


图 14 不同燃油温度的喷雾锥角
Fig. 14 Spray cone angle under different fuel temperatures

高,喷雾蒸发作用越强,喷雾锥角随之减小。在 $T=0.4\text{ ms}$ 时燃油温度为 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间有最大锥角差值 2.4° ,在 $T=1.0\text{ ms}$ 、 $t_f=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时有喷雾锥角最小值 14.5° 。另外喷雾锥角还随时间推移而减小,其原因是:喷雾外侧与空气接触摩擦,许多小粒径液滴从喷雾体上剥落,随着时间推移小液滴蒸发,喷雾锥角变小。

2.4 环境温度对自增压喷嘴喷雾特性的影响

图 15 是背压为 0.1 MPa 、燃油温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在不同环境温度 t_a 下喷雾贯穿距离的变化曲线。环境温度在 $30\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,喷雾贯穿距离随环境温度升高而增大,环境温度大于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后变化趋势相反,其中喷雾贯穿距离在 $t_a=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T=1.0\text{ ms}$ 时有最大值 67.3 mm 。从图 16 背压为 0.1 MPa 、燃油温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同环境温度下的喷雾图像中可以发现,喷雾浓度随温度升高而减小。气体密度随环境温度升高而减小,喷雾与空气之间动量交换减少,喷雾贯穿距离先变大。但同时环境温度升高也促进喷雾蒸发,喷雾贯穿距离开始减小。图 17 背压为 0.1 MPa 、燃油温度为

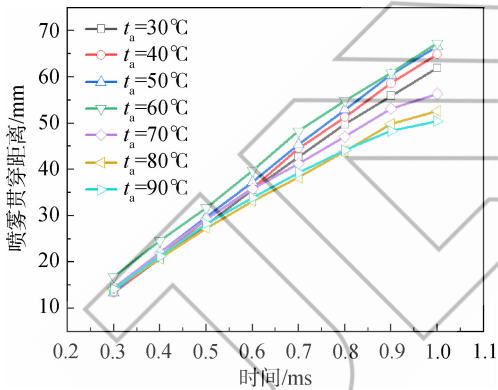


图 15 不同环境温度下喷雾贯穿距离随时间的变化
Fig. 15 Variation of spray penetration with time under different ambient temperatures

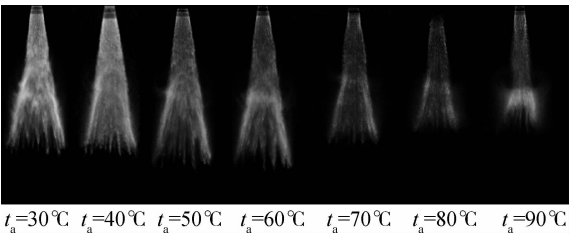


图 16 不同环境温度下喷雾发展图像
($p_a=0.1\text{ MPa}$, $T=1\text{ ms}$)
Fig. 16 Spray developing images under different ambient temperatures ($p_a=0.1\text{ MPa}$, $T=1\text{ ms}$)

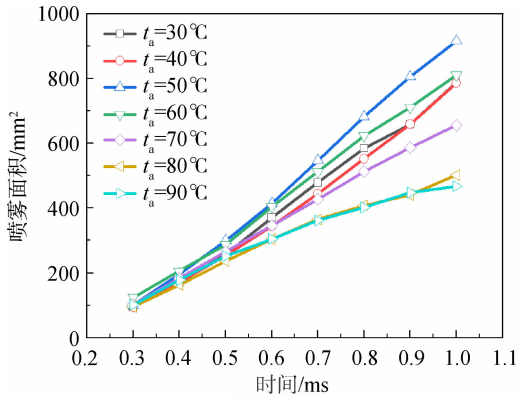


图 17 不同环境温度下喷雾距离随时间的变化
Fig. 17 Variation of spray area with time under different ambient temperatures

$30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同环境温度下喷雾面积的变化也说明了这点,图 17 中喷雾面积在 $t_a=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T=1.0\text{ ms}$ 时达到最大值 915.5 mm^2 。因此在图 15 中,环境温度小于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,空气阻力减少的作用大于蒸发作用,在环境温度大于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,蒸发作用占据主导地位^[28]。

图 18 是背压为 0.1 MPa 、燃油温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在不同环境温度下的喷雾锥角变化规律,可以发现环境温度小于等于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时喷雾锥角随时间推移逐渐减小;环境温度大于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时喷雾锥角先快速减小,然后在 $T=0.8\text{ ms}$ 开始变化速度逐渐变缓。环境温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时喷雾锥角有最小值 9.2° 。

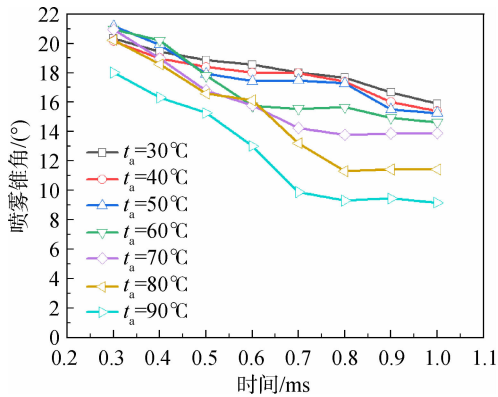


图 18 不同环境温度下的喷雾锥角
Fig. 18 Spray cone angle at different ambient temperatures

3 结 论

在定容弹内通过可视化技术捕获了 E-DI 自增压喷嘴喷雾图像,得到了背压、燃油温度和环境温度等参数对 E-DI 自增压喷嘴航空煤油喷雾特性的影响规律,主要结论如下:

1) 油线在空气夹带、空气作用力和液体表面

张力共同作用下形成,背压大于 0.1 MPa 时出现大尺度涡流,油线和涡流加强了喷雾蒸发与雾化作用,有利于形成可燃混合气。喷雾贯穿距离和喷雾面积随着背压增大而减小, $T=1.5\text{ ms}$ 时在背压为 0.8 MPa 下分别有最小值 49.7 mm 和 538.2 mm^2 。

2) 燃油温度的升高可以促进喷雾蒸发和增加喷雾初始动量,但是喷雾蒸发作用对喷雾特性的影响比喷雾初始动量增加的作用更强。喷雾贯穿距离、喷雾面积和喷雾锥角随燃油温度升高而减小,且均在燃油温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时出现最小值。

3) 随着环境温度的升高,喷雾贯穿距离和喷雾面积先增大,当环境温度继续升高时,喷雾蒸发作用逐渐占据主导地位,喷雾贯穿距离和喷雾面积开始减小。在环境温度为 $30\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,喷雾锥角随着环境温度的升高而一直减小,环境温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时有最小值 9.2° 。

参考文献:

- [1] BOUKOBERINE M N, ZHOU Z, BENBOUZID M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: solutions, strategies, and prospects [J]. *Applied Energy*, 2019, 255: 113823. 1-113823. 22.
- [2] GOH G D, AGARWALA S, GOH G L, et al. Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): challenges and potential [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 63: 140-151.
- [3] MCGANN B, KIM K, LEE T, et al. Effect of the cetane number on jet fuel spray ignition at high-temperature and-pressure conditions [J]. *Energy and Fuels*, 2020, 34 (2): 1337-1346.
- [4] 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)
- [5] WU M M, YANG Y X, XI D G, et al. Two-stroke engine with fuel semi-direct injection using FAI system [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 130/131/132/133/134: 796-799.
- [6] 杨海青, 陈茂杰, 黄丽萍, 等. 夹气喷嘴瞬态喷雾的 CFD 仿真及试验 [J]. *航空动力学报*, 2015, 30 (12): 2897-2903.
YANG Haiqing, CHEN Maojie, HUANG Liping, et al. CFD simulation and experiment of transient spray for an air-assisted injector [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30 (12): 2897-2903. (in Chinese)
- [7] 白洪林, 胡春明, 侯圣智, 等. 空气辅助喷射煤油和汽油的喷雾特性对比 [J]. *燃烧科学与技术*, 2015, 21 (5): 428-434.
BAI Honglin, HU Chunming, HOU Shengzhi, et al. Comparison of spray characteristics of air-assisted direct injector using kerosene and gasoline [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2015, 21 (5): 428-434. (in Chinese)
- [8] HU J, LIU B, ZHANG C, et al. Experimental study on the spray characteristics of an air-assisted fuel injection system using kerosene and gasoline [J]. *Fuel*, 2019, 235: 782-794.
- [9] 高宏力, 张付军, 刘波澜, 等. 空气辅助喷射闪急沸腾喷雾特性试验 [J]. *航空动力学报*, 2019, 34 (1): 63-72.
GAO Hongli, ZHANG Fujun, LIU Bolan, et al. Experiment on spray characteristics of air-assisted injection under flash boiling conditions [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34 (1): 63-72. (in Chinese)
- [10] JI H, WEI M, LIU R, et al. Drive control simulation and experimental studies on the flow characteristics of a pump injector [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 35672-35681.
- [11] WINKLER F, OSWALD R, SCHOEGL O, et al. Characterization of different injection technologies for high performance two-stroke engines [R]. *SAE Technical Paper* 2016-32-0001, 2016.
- [12] JOHNSON J, DEN BRAVEN K R. Comparison of homogeneous, stratified and high-squish stratified combustion in a direct-injected two-stroke engine [R]. *SAE Technical Paper* 2008-32-0030, 2008.
- [13] NOURI J M, ABO-SERIE E, MARCHI A, et al. Internal and near nozzle flow characteristics in an enlarged model of an outwards opening pintle-type gasoline injector [R]. London: the 3rd International Conference on Optical and Laser Diagnostics, 2007.
- [14] XU H, WANG C, MA X, et al. Fuel injector deposits in direct-injection spark-ignition engines [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 50: 63-80.
- [15] WU H, ZHANG F, ZHANG Z, et al. Experimental investigation on the spray characteristics of a self-pressurized hollow cone injector [J]. *Fuel*, 2020, 272: 117710. 1-117710. 13.
- [16] STRAUSS S, ZENG Y, MONTGOMERY D T. Optimization of the E-TEC™ combustion system for direct-injected two-stroke engines toward 3-star emissions [J]. *SAE Transactions*, 2003, 112 (3): 1962-1973.
- [17] ZHAO J, ZHAO B, WANG X, et al. Atomization performance and TG analysis of Fischer-Tropsch fuel compared with RP-3 aviation fuel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42 (29): 18626-18632.
- [18] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9 (1): 62-66.
- [19] 张登. 发动机喷雾油束图像特性参数软件开发的研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016.
ZHANG Deng. Study on software development of image characteristic parameters of engine spray [D]. Xi'an Chang'an University, 2016. (in Chinese)
- [20] HUNG D L S, HARRINGTON D L, GANDHI A H, et al.

Gasoline fuel injector spray measurement and characterization-a new SAE J2715 recommended practice[J]. International Journal of Fuels and Lubricants, 2009, 1 (1): 534-548.

[21] BEFRUI B,CORBINELLI G,ROBART D,et al. LES simulation of the internal flow and near-field spray structure of an outward-opening GDI injector and comparison with imaging data[R]. SAE Technical Paper 2008-01-0137,2008.

[22] RUBIO-GÓMEZ G, MARTÍNEZ-MARTÍNEZ S, RUAMOJICA L F. Spray characterization of a piezo pintle-type injector for gasoline direct injection engines[J]. London: the 3rd International Conference on Optical and Laser Diagnostics, 2007.

[23] TONINI S. Multi-phase flow modelling of fuel injection processes in direct injection diesel and gasoline engines [D]. London: The City University London, 2006.

[24] MARCHI A, NOURI J M, YAN Y, et al. Internal flow and spray characteristics of pintle-type outwards opening piezo injectors for gasoline direct-injection engines [J]. SAE Transactions, 2007, 116(3): 915-934.

[25] SAUTER W, PFEIL J, VELJI A, et al. Application of particle image velocimetry for investigation of spray characteristics of an outward opening nozzle for gasoline direct injection[R]. SAE Technical Paper 2006-01-3377, 2006.

[26] SKOGSBERG M, DAHLANDER P, DENBRATT I. Spray shape and atomization quality of an outward-opening piezo gasoline DI injector[R]. SAE Technical Paper 2007-01-1409, 2007.

[27] LIU Y, PEI Y, PENG Z, et al. Spray development and droplet characteristics of high temperature single-hole gasoline spray[J]. Fuel, 2017, 191: 97-105.

[28] TIAN J, ZHAO M, LONG W, et al. Experimental study on spray characteristics under ultra-high injection pressure for DISI engines[J]. Fuel, 2016, 186: 365-374.

(编辑:叶 青、王碧琚)