

空气辅助喷射闪急沸腾喷雾特性试验

高宏力¹, 张付军^{1,2}, 刘波澜¹, 曾强强¹, 胡敬超¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘 要: 在定容弹内利用高速相机和相位多普勒粒子分析仪(PDPA)研究了环境压力和燃油温度对空气辅助喷射系统喷雾特性的影响。试验环境压力的变化范围为 0.01 MPa 到 0.1 MPa, 燃油温度的变化范围为 25 ℃ 到 100 ℃。试验结果表明:随着环境压力的减小, 燃油喷雾逐渐从冷态过渡到闪急沸腾状态, 在喷嘴出口处喷雾气泡急剧增加。当环境压力小于 0.02 MPa 时, 喷雾处于闪急沸腾状态, 液滴速度增加, 粒径减小, 在喷雾近端出现喷雾膨胀现象;随着燃油温度的上升, 液滴表面张力减小, 液滴易于破碎。当燃油温度达到 100 ℃ 时, 喷雾处于闪急沸腾状态, 喷雾远端出现喷雾膨胀现象。

关 键 词: 空气辅助喷射; 闪急沸腾; 相位多普勒粒子分析仪; 索太尔平均直径; 液滴速度

中图分类号: V312⁺.1; TK418.9

文献标志码: A

Experiment on spray characteristics of air-assisted injection under flash boiling conditions

GAO Hongli¹, ZHANG Fujun^{1,2}, LIU Bolan¹,

ZENG Qiangqiang¹, HU Jingchao¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Shenzhen Research Institute,

Beijing Institute of Technology, Shenzhen Guangdong 518057, China)

Abstract: The effects of ambient pressure and fuel temperature on spray characteristics of air-assisted injection system were investigated by using high-speed photography and phase Doppler particle analyzer (PDPA) in a constant volume chamber. The ambient pressure ranged from 0.01 MPa to 0.1 MPa, and the fuel temperature ranged from 25 ℃ to 100 ℃ during the experiment. The experimental results showed that spray condition transferred from the non-flash boiling to flash boiling gradually with the decrease of the ambient pressure that induced the intensified bubble bursting at the nozzle exit. When the ambient pressure was less than 0.02 MPa, the spray was in flash boiling condition, bringing about the increase of the droplet velocity, the decrease of the droplet diameter and the spray expansion in the near field. Meanwhile, the rising fuel temperature led to the decrease of the fuel surface tension, which can accelerate the break of the droplet. As the fuel temperature reached 100 ℃, when

收稿日期: 2018-03-14

基金项目: 深圳科技创新基金(JCYJ20170817114345260)

作者简介: 高宏力(1987—), 男, 博士生, 主要从事燃油系统喷雾特性研究。

通讯作者: 张付军(1966—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事内燃机总体理论与技术、动力机械电子控制研究。

引用格式: 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.

the spray was in flash boiling condition, the spray expansion occurred in the far field.

Key words: air-assisted injection; flash boiling; phase Doppler particle analyzer; Sauter mean diameter; droplet velocity

缸内直喷技术已被证实具有提高发动机性能的潜力,可以精确地控制喷油时刻,提高发动机的压缩比,进而提高发动机的热效率^[1-3]。但是,采用高压缸内直喷技术缩短缸内工质的混合时间,同时带来燃油油滴撞击壁面形成湿壁和局部混合气混合不均匀等现象。这些问题主要与燃油的雾化特性、蒸发速率及缸内气流运动有关。通常采用进气道优化设计以提升缸内滚流以及提高喷油压力,降低液滴平均粒径,增加喷雾中总液滴表面积等方式解决^[4]。然而仅靠进气道优化并不能完全解决小负荷、低转速工况下发动机缸内滚流弱的现象,过高的喷射压力导致喷雾的贯穿距增加,会增加油束撞击气缸壁和活塞顶部的可能,导致燃烧恶化,产生大量的未燃碳氢化合物及颗粒物。

空气辅助喷射具有在较低的喷射压力(大约为传统 GDI(gasoline direct injection)的喷射压力 1/10)就能达到极高的雾化品质^[5]。空气辅助喷射系统可以形成稀薄混合气,有利于实现分层燃烧提高燃烧效率^[6],有效地避免上述传统 GDI 问题。不少学者对空气辅助喷射系统喷雾特性进行了研究,白洪林等^[7]研究了喷气脉宽对喷雾特性的影响规律,指出增加空气喷射量可以改善燃油的雾化效果,喷雾的 SMD(索太尔平均直径,记为 D_{sm})会有明显的降低,对贯穿距的影响很小。由于空气辅助喷射系统喷射压力低,喷射时刻对缸内环境要求较高。因此,空气辅助喷射系统大多数应用在小型二冲程发动机领域。对此,Li、王永伟等^[8-9],进行了空气辅助喷射正时和喷射持续期对发动机混合气的形成、性能和排放特性的系统性研究。

闪急沸腾喷雾是由于液体燃料所处的环境压力瞬间降至饱和气压以下而发生的燃油喷雾剧烈相变的过程^[10]。这种突然的相变迫使液态燃料进入过热状态,剧烈汽化和蒸发。闪急沸腾喷雾的产生本质上是由于大量液滴内部气泡核化、气泡生长和气泡破碎过程导致的微爆作用^[11]。研究表明^[12-15]:利用闪急沸腾喷雾可以有效提高喷雾雾化质量,促进喷雾蒸发,改善发动机燃烧。同时 Zeng 等^[12]还发现了环境压力和燃油饱和蒸汽压的比值同宏观喷雾的结构参数相关,并利用此比值将喷雾类型分为冷态和闪急沸腾状态。闪急

沸腾能够有效提高喷雾雾化质量,是应对未来更加严格的排放法规的潜在方式^[16]。张铭等^[17]使用 PIV(粒子图像测速法)研究了某 8 孔直喷喷油器在不同过热度下喷雾油束与环境气体相互作用和干涉的过程,研究表明随着过热度的提高,喷雾油束膨胀,粒径减小,燃油油束对环境气体的动量传递增大。相比于非闪急沸腾状态,闪急沸腾状态下的喷雾气泡爆炸强度显著增强^[14,18]。Schmitz 等^[19]采用激光诱导荧光技术,在定容容器上研究闪急沸腾效应对喷雾发展过程的影响,发现闪急沸腾能使燃油喷雾快速破碎成细小液滴和蒸气的混合物,喷雾场中较大的液滴数量急剧减少,并在喷雾的外围和中心处燃油蒸气量增多,燃油喷雾可快速地雾化蒸发并形成均匀混合气。此外还有很多学者使用不同的可视化诊断技术研究了闪急沸腾状态下的喷雾发展过程^[20-21]。余金平等^[22]研究了燃油温度对喷雾气液相贯穿距、气相总体积及气相混合气空燃比分布的影响,研究表明随着燃油温度的升高,喷雾的液相及气相贯穿距缩短,蒸发喷雾在径向上的扩展明显增强,喷雾蒸发的气相体积几乎呈线性增加。

喷雾坍塌现象是多孔喷油器闪急沸腾的显著表现之一^[18],影响因素和喷雾坍塌的原因已被广泛研究。Mojtabi 和 Aori 等^[23-24]研究了喷油器结构和燃油过热度对喷雾坍塌的影响。Guo 等^[25]使用多孔 GDI 喷油器对比研究了不同环境压力和燃油温度下闪急沸腾的特点。

此外,以前闪急沸腾喷雾的研究主要在旋流式喷嘴或多孔式喷嘴上进行。近年来采用外开式喷嘴的空气辅助喷射系统逐渐被人们重视,特别是应用于小型二冲程航空发动机领域。然而关于空气辅助喷射闪急沸腾喷雾特性却鲜有研究。因此对空气辅助喷射闪急沸腾喷雾特性的研究,不仅可以弥补缸内直喷领域的空白,还对航空缸内直喷汽油机的发展具有重要意义。

本文对空气辅助喷雾特性进行研究:利用高速相机和 PDPA(相位多普勒粒子分析仪),在不同环境压力、不同燃油温度下进行燃油喷雾试验,探究燃油过热前后喷雾宏观特性(喷雾宽度和喷雾贯穿距)和微观特性(平均粒径、平均粒子速度),揭示了空气辅助喷射系统闪急沸腾喷雾特

性,为空气辅助喷射系统的设计、应用推广以及燃烧系统设计提供理论依据。

1 试验设备与试验条件

试验系统如图 1 所示,主要有三维 PDPA、高速相机、空气辅助喷嘴系统、控制与同步系统以及数据采集系统组成。

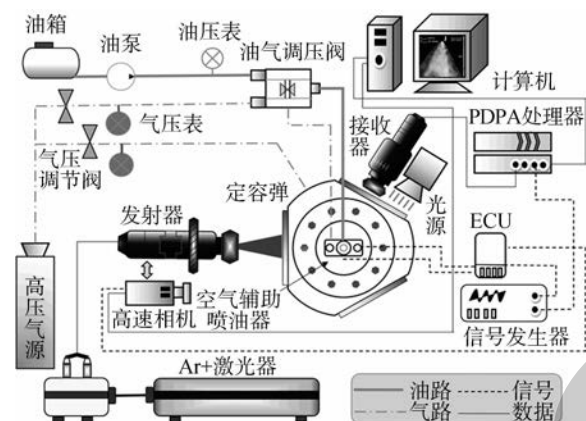


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experiment system

三维 PDPA 由 Dantec 公司引进,激光器采用 Coherent 公司的 Innova 70C 氙离子激光器,激光发出后经过布拉格单元分散为波长分别为 514.5、488、476.5 nm 的 6 束激光,分别用于测量 3 个方向的粒子速度,其中 514.5 nm 波长的激光还用于测量液滴粒子的直径。试验所用高速相机为 Photron 公司的 Fastcam SA4,试验拍摄频率为 10 000 帧/s。PDPA 的发射器和接收器分别置于定容弹两侧的可视窗处,另外 LED 强光源经一侧可视窗射入定容弹内为喷雾提供背景光源,喷雾发展过程由另一侧可视窗的高速相机捕获。高速相机、PDPA 以及喷雾器的同步由信号发生器提供。试验采用的喷雾器为空气辅助喷雾器,喷射系统安装在定容弹的上方,其原理图如图 2 所示。

空气辅助喷射系统主要由高压气源、气压调节阀、油箱、油泵、油压表、油气调节阀、油嘴、气嘴和 ECU (电子控制单元) 等组成。燃油以 0.8 MPa 的压力喷入 0.7 MPa 压力的预混腔, 完成燃油初次破碎, 当气嘴打开时, 高压气体的超声速气动力以及燃油表面的拉伸力克服液滴表面张力, 促使液滴发生二次破碎, 同时空气膨胀使液滴加速, 从而使燃油充分雾化。

本文中试验用油为汽油,属性如表1所示,饱和蒸气压曲线如图3所示^[26],25℃对应的饱和蒸

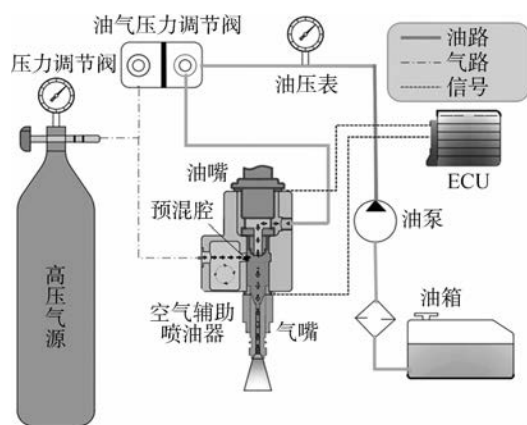


图 2 空气辅助喷射系统示意图

Fig. 2 Schematic of the air-assisted injection

表 1 汽油属性
Table 1 Gasline properties

参数	数值
密度/(kg/m^3)	752.1
黏度/(mm^2/s)	0.721
表面张力/ $10^{-3}(\text{N}/\text{m})$	21.58
蒸发压力(20°C)/ 10^5 Pa	0.36
潜热/(MJ/kg)	0.364

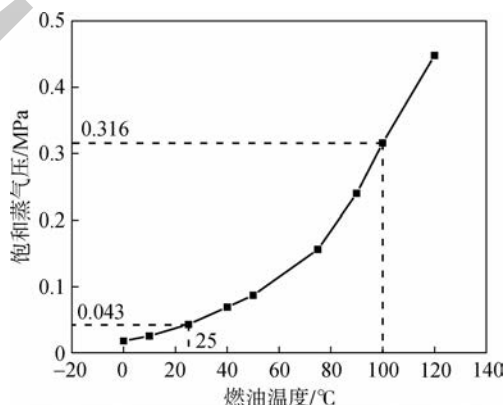


图 3 汽油饱和蒸气压曲线

Fig. 3 Saturation vapor pressure line of gasoline

气压为 0.043 MPa, 100 ℃ 对应的饱和蒸气压为 0.316 MPa。试验测试条件如表 2 所示, 喷油压力为 0.8 MPa, 脉宽为 5.5 ms, 油气间隔为 0.5 ms, 喷气脉宽为 2.5 ms。燃油温度通过水浴加热实现, 温度范围为 25~100 ℃。本文的定容弹容腔压力(环境压力)都是采用绝对压力。在定容弹两侧分别布置进气口和排气口, 定容弹容腔压力由安装在排气口上的真空泵和进气口上的流量调节阀共同作用实现, 同时使用压力表对定容弹内压

力实时监测,保持压力恒定。PDPA 的测试点位于喷嘴中轴线距离喷嘴 50 mm 处,为了保证测试结果的精确度,喷油频率保持为 1 Hz,每个测试工况捕获 100 000 个液滴,由此获得液滴粒径和粒子速度场分布,粒径采用索太尔平均直径(D_{Sm}),计算方法如式(1):

$$D_{Sm} = \frac{\sum D_i^3}{\sum D_i^2}$$

(1)

式中 D_i 为第 i 个的液滴的直径。

表 2 测试工况

Table 2 Experimental conditions

参数	数值
燃油类型	汽油
环境压力/MPa	0.01,0.02,0.05,0.07,0.1
燃油温度/℃	25,50,75,100
喷油脉宽/ms	5.5
喷气脉宽/ms	2.5
油气间隔/ms	0.5
喷油压力/MPa	0.8
喷气压力/MPa	0.7
油气压差/MPa	0.1

2 喷雾宏观特性分析

2.1 环境压力对喷雾形态的影响(燃油温度为 25℃)

图 4 为汽油温度在 25℃ 时,不同环境压力(p)下的喷雾形态,喷雾从上而下垂直分布,喷雾整体呈中心对称结构并沿喷孔方向贯穿。图 4(a)、图 4(b)靠近喷嘴处喷雾出现明显膨胀现象,喷雾外扩偏离喷孔方向(图中虚线方向)。此温度下,0.01 MPa 和 0.02 MPa 的环境压力明显低于该温度下的饱和蒸气压(0.043 MPa),说明此时喷雾处于闪急沸腾状态。这种由环境压力变化引起的闪急沸腾称之为环境压力引导闪急沸腾。喷雾在气嘴出口处径向急剧扩张,导致此处喷雾宽度明显增加。随着环境压力的进一步降低,相比较于 0.02 MPa 环境压力(图 4(b)),在 0.01 MPa(图 4(a))时汽油的闪急沸腾进一步加剧,同时在喷雾尾端出现收缩现象,由此可见,由环境压力引导的闪急沸腾喷雾膨胀现象发生在喷嘴近端。主要原因是环境压力明显低于此温度下的饱和蒸气压时导致喷雾形成的气泡在喷嘴处破

碎并部分汽化,在喷嘴近端出现膨胀。而当汽油处于冷态时(非闪急沸腾状态如图 4(c)、图 4(d)、图 4(e)),喷雾会沿着喷孔方向发展。为了定量分析空气辅助喷射喷雾形态,引入喷雾宽度和喷雾贯穿距。喷雾宽度是通过测量喷雾最左侧到最右侧的距离得到,喷雾贯穿距是从喷嘴到喷雾最远端的距离,如图 4(f)所示。为了保证结果的可重复性,在每个试验条件下进行 5 次重复测试并使用平均值来确定喷雾宽度和贯穿距。

在数据处理过程中使用 Matlab 程序对喷雾图像进行处理,取灰度阈值为 0.7,然后对图像进行二值化处理,计算喷雾宽度和喷雾贯穿距的像素点,利用高速相机预先标定好的实际距离与像素数的对应关系得到喷雾参数对应的实际距离。

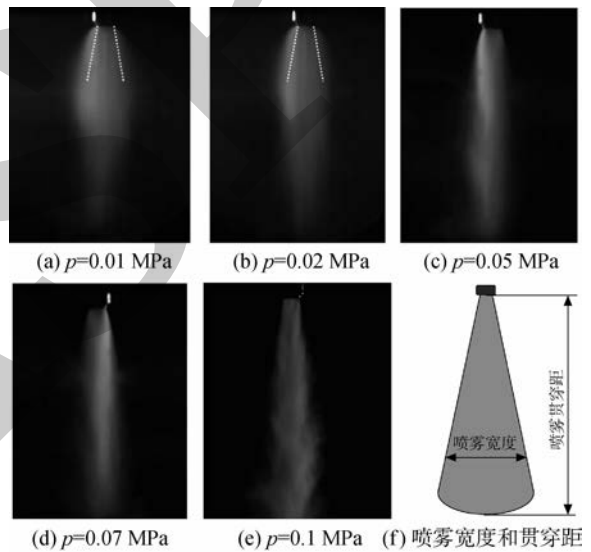


图 4 不同环境压力下喷雾形态以及喷雾宽度和贯穿距的定义

Fig. 4 Spray images under various ambient pressures and the definitions of spray width and penetration

图 5 为燃油温度为 25℃,不同环境压力下,喷嘴轴向不同距离处喷雾宽度的变化曲线。定义距喷嘴轴向距离(y)小于 5 mm 为喷雾近端,大于 15 mm 为喷雾远端。如图 5(a)所示,处于闪急沸腾($p=0.01,0.02$ MPa)的两条曲线,喷雾宽度在喷雾近端增加快速,而在远离喷嘴的喷雾远端增加缓慢。处于冷态时喷雾宽度随距喷嘴距离的增加始终保持缓慢增加。如图 5(b),当环境压力从 0.1 MPa 降到 0.05 MPa 时,相同轴向距离处喷雾宽度增加缓慢。随着环境压力的进一步降低,当环境压力小于 0.02 MPa 时,喷雾宽度突变增加,特别是在喷雾的近端,说明汽油已经由冷态转变

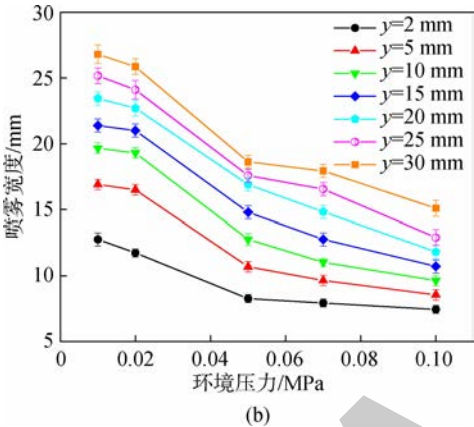
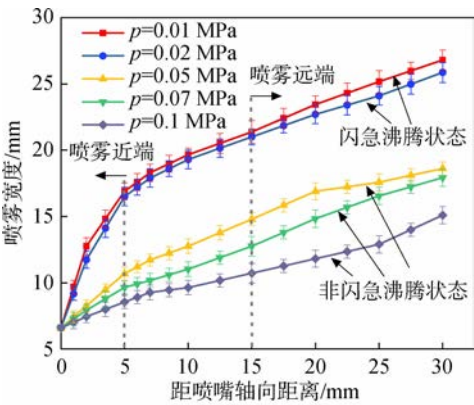


图 5 喷雾宽度随距喷嘴轴向距离和环境压力的变化
Fig. 5 Variation of spray width along axial under different ambient pressures

为闪急沸腾状态。喷雾在近端的突变膨胀是表征环境压力引导闪急沸腾的重要体现。

通过读取各个时刻的喷雾速率,得到贯穿距随时间的变化曲线,如图 6 所示。喷雾贯穿距随时间的变化近似线性变化,即喷雾传播速度基本不变,但是闪急沸腾状态下的喷雾传播速度度始

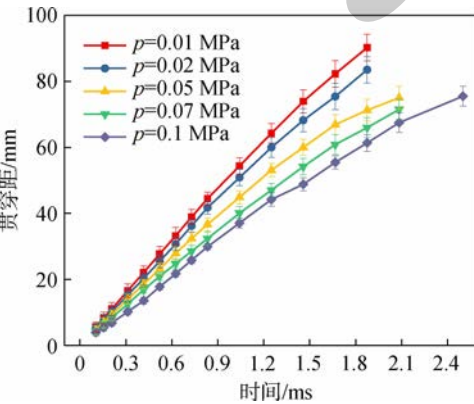


图 6 不同环境压力下喷雾贯穿距随时间发展的历程
Fig. 6 Time-resolved spray penetration under different ambient pressures

终保持稳定,而非闪急沸腾状态下的喷雾传播速度提前变缓;同时,喷雾传播速度随着环境压力的降低逐渐增大。这主要是由于环境压力的降低导致喷雾过程中空气阻力减小,从而加强液滴向前贯穿的动量造成的。

2.2 燃油温度对喷雾形态的影响(环境压力为 0.1 MPa)

图 7 为 0.1 MPa 环境压力,不同燃油温度(t)下的喷雾形态,从图中可以看出汽油在冷态(非闪急沸腾图 7(a)、图 7(b)、图 7(c))时各喷束在轴线方向沿喷孔贯穿。而汽油在 100 °C 时(图 7(d)),此时环境压力明显低于该温度下的饱和蒸气压(0.316 MPa),如图 3 所示,喷雾的远端出现喷雾膨胀现象,明显超出喷孔方向(图中虚线所示),这说明此时喷雾处于闪急沸腾状态,这种由燃油温度变化引起的闪急沸腾称之为燃油温度引导闪急沸腾。处于闪急沸腾的喷雾能够使燃油快速地雾化蒸发,加速液滴与周围空气的相互作用,导致液滴的横向动量增加,同时燃油温度的增加使液滴表面张力减小,促进液滴汽化膨胀。由于环境压力较大,使燃油在喷雾近端沿喷孔方向发展,而在液滴动量相对较小的远端发生喷雾膨胀。这与传统多孔缸内直喷喷油器由燃油温度引导的闪急沸腾不同,对于多孔喷油器,由燃油温度引导的闪急沸腾的微爆效应导致喷雾形态发生改变,喷雾远场端收缩明显^[27]。

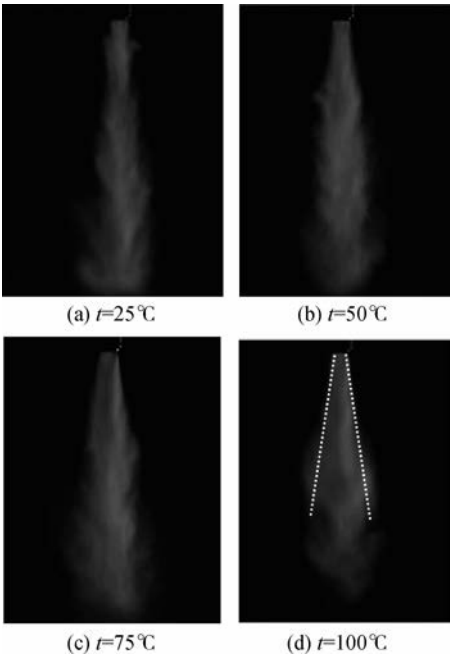


图 7 不同燃油温度下喷雾图像
Fig. 7 Spray images under different fuel temperatures

图 8 为 0.1 MPa 环境压力,不同燃油温度下喷嘴轴向不同距离处喷雾宽度的变化曲线。图 8(a)可得,在冷态时(25、50、75℃),相同轴向距离处喷雾宽度随燃油温度的增加而缓慢变宽。燃油温度越高分子运动越剧烈,与周围空气的相互作用增强使液滴横向动量增加导致喷雾变宽,雾化效果也就越好。而当燃油温度达到 100℃时,燃油处于闪急沸腾状态,不同温度的喷雾宽度在喷雾近端几乎没有变化。而当燃油的温度达到 100℃时,燃油处于闪急沸腾状态,在喷雾远端,特别是在距喷嘴轴向距离 40 mm 之后喷雾宽度突然变宽。

同理,图 8(b)给出了距喷嘴轴向距离 $y = 30 \sim 50$ mm 处,不同燃油温度下喷雾宽度的变化,随着燃油温度的增加(从 25~75℃)距喷嘴不同距离处的喷雾宽度稳定增加,当燃油温度进一步增加到 100℃时,处于闪急沸腾状态的喷雾宽度突增,尤其是发生在远离喷嘴的喷雾远端。如图 9 所示,在喷雾远端由于喷雾膨胀致使喷雾传播

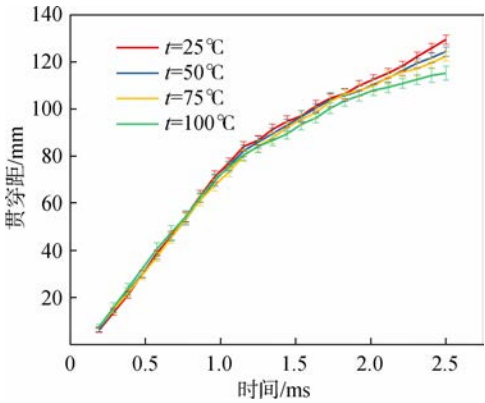


图 9 不同燃油温度下喷雾贯穿距随时间发展的历程
Fig. 9 Time-resolved spray penetration under different fuel temperatures

速度减小,从图中观察到在开始喷油的前 1.2 ms 不同燃油温度对应喷雾的贯穿速度基本保持不变,而在开始喷油后的 1.2 ms,随着燃油温度的增加喷雾贯穿距的增长率明显下降,喷雾传播速度变慢。在 2.5 ms 喷油结束时刻,不同燃油温度对应的喷雾贯穿距依次为 129.45、124.42、122.37、115.15 mm。另外,相对较低温度的燃油,在高压压缩空气的气动力下迅速沿喷孔方向延伸,喷雾的蒸发汽化速度相对较慢,贯穿距也相对较长。随着燃油温度的增加,液滴的黏度降低,表面张力减小,特别是在闪急沸腾状态,加速液滴破碎,促进燃油蒸发,导致喷雾贯穿距逐步减小。

3 喷雾微观特性

3.1 滴液速度和粒径分布

喷雾的微观特性可以更好地反映汽油从冷态转变为闪急沸腾状态的变化规律,同时能反映液滴群的蒸发速率。

PDPA 的激光由发射器发出后交于一点,形成测量体。液滴经过测量体时散射的光信号由接收器内的光电倍增管接收并转换为电信号,发送至 PDPA 信号处理器,并由此计算出液滴速度和粒径等信息。PDPA 的测量结果是基于几十到几百次喷射的统计数据,以喷射触发时刻为零点,从信号触发到液滴经过测量点这段时间称之为延时时间,实际测量有效数据为延时时间之后的 2.5 ms(喷气脉宽)。图 10、图 11 分别为两种不同引导方式的闪急沸腾液滴速度和液滴粒径的分布图,测试点为距离喷嘴 50 mm 处,其中黑色方框内数据点为有效测量数据点。SMD 和平均液滴速度是通过计算有效区域数据加权平均数得到。

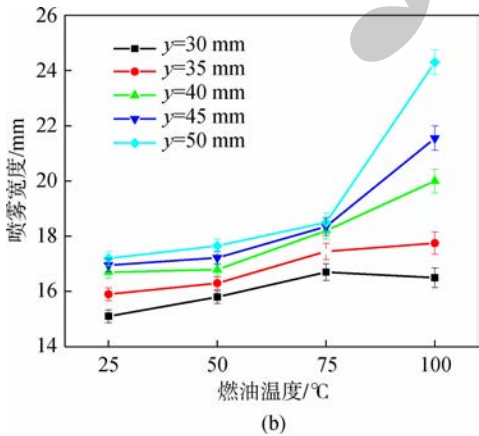
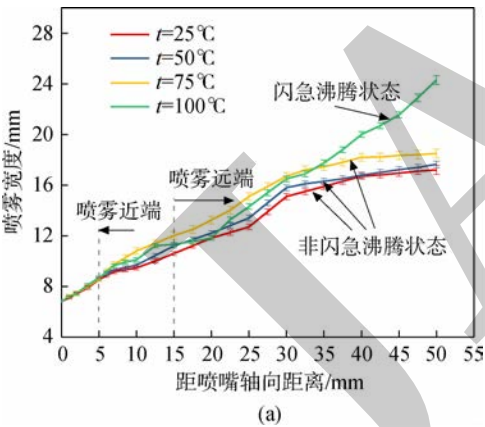


图 8 喷雾宽度随距喷嘴轴向距离和燃油温度的变化
Fig. 8 Variation of spray width under different axial positions and different fuel temperatures

图 10(a)和图 11(a)为环境压力引导闪急沸腾,图 10(b)和图 11(b)为燃油温度引导闪急沸腾,喷射压力恒定为 0.8MPa,可见,相比较于燃油温度引导的闪急沸腾,环境压力引导的闪急沸腾液滴的平均速度更快,分别为 98.7m/s 和 51.93m/s,而液滴粒子的 SMD 也更小,分别为 4.58 μm 和 5.91 μm 。另外,从图中可以观察到由环境压力引导的闪急沸腾有效液滴分布相对分散。这说明低压力环境下,空气阻力的减小促进了液滴的加速破碎蒸发,间接反应了燃油的雾化受环境压力影响更为明显。

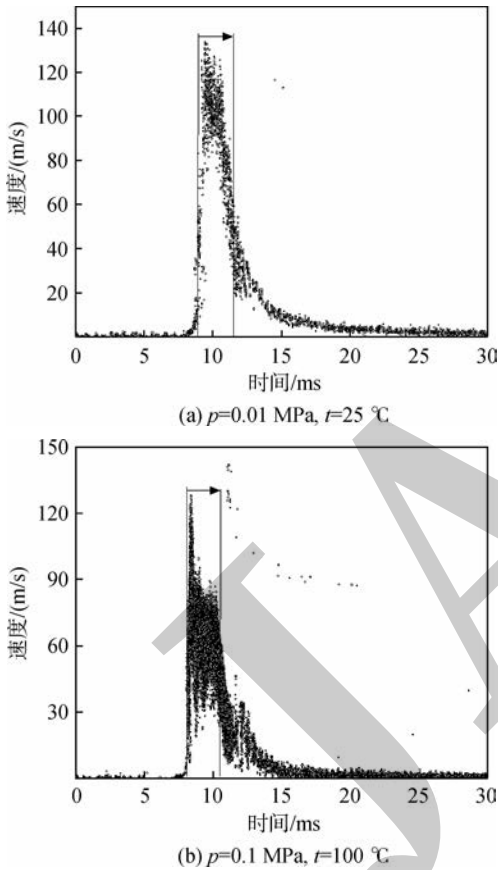


图 10 喷雾液滴速度分布图

Fig. 10 Velocity distribution of spray droplet

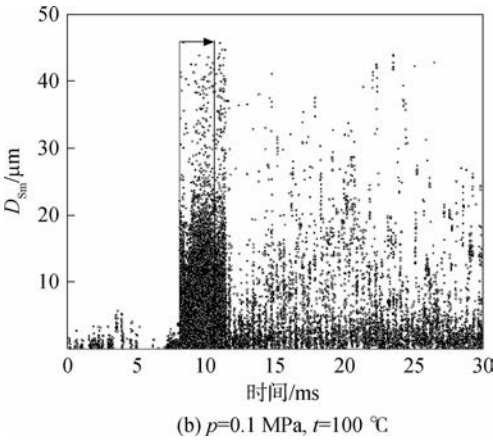
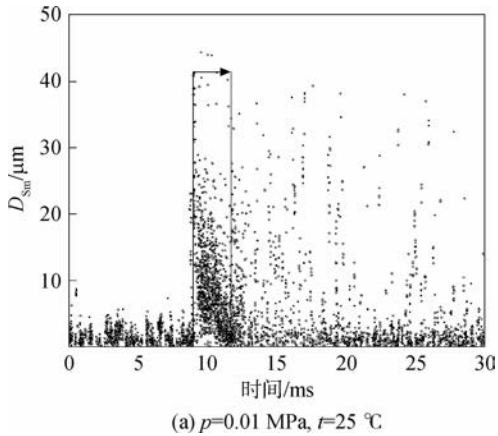


图 11 喷雾液滴粒径分布图

Fig. 11 Distribution of spray droplet diameter

图 12(a)为环境压力引导闪急沸腾液滴累积数量分布图,图 12(b)为燃油温度引导闪急沸腾液滴累积数量分布图。从图中可以看出两种不同引导方式液滴累积分布趋势。可见,在气嘴刚打开时,滴液数量较少,之后趋于稳定。另外,相比较于燃油温度引导的闪急沸腾,环境压力引导的闪急沸腾液滴累积量较少,主要原因是由于定容弹内压力相对较低,液滴分布较分散导致的。

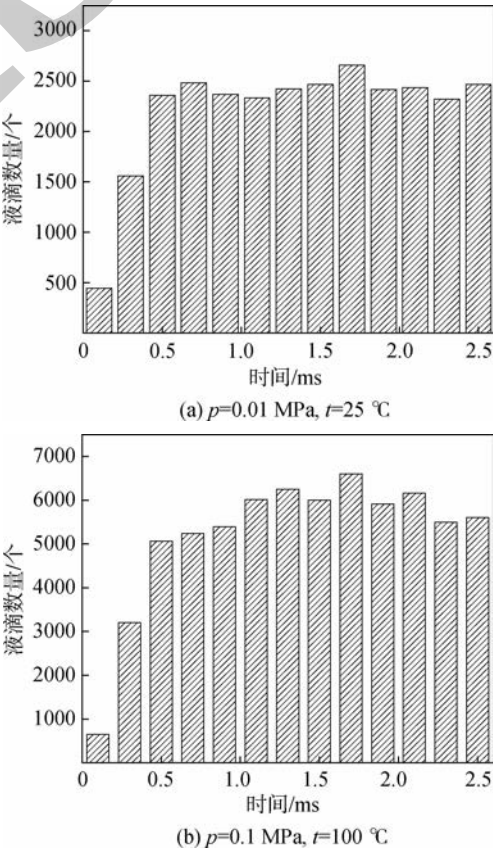


图 12 喷雾液滴数量累积分布图

Fig. 12 Cumulative distribution of spray droplet quantity

图 13(a)为环境压力引导闪急沸腾的 SMD 频率分布情况,图 13(b)为燃油温度引导闪急沸腾的 SMD 频率分布情况。从图中可以看出环境压力引导的闪急沸腾液滴 SMD 主要集中在 4~5 μm 之间,而燃油温度引导的闪急沸腾液滴 SMD 集中在 5~7 μm 之间。另外,从图中可以观察到滴液 SMD 的分布较为聚集,试验结果较为可靠。环境压力引导的闪急沸腾 SMD 更小,更有利于燃油的蒸发。

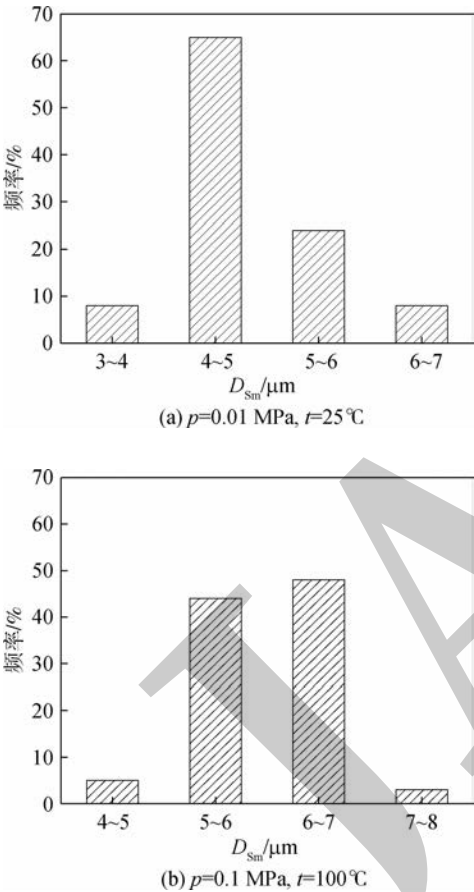


图 13 SMD 频率分布

Fig. 13 Frequency distribution of SMD

3.2 滴液平均速度和 SMD 影响规律

图 14 为环境压力对液滴平均速度和 SMD 的影响,测试位置为距离喷嘴轴向 50 mm 处,喷射压力为 0.8 MPa,燃油温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。可见,随着环境压力的增加,液滴的平均速度逐渐降低,从 0.01 MPa 的 98.7 m/s 降低到 0.1 MPa 的 58.75 m/s, SMD 反而增加,从 4.58 μm 增加到 6.8 μm 。由此可见,环境压力对喷雾的发展以及液滴的破碎起重要作用。在闪急沸腾状态($p=0.01, 0.02$ MPa)下,液滴的发展速度较快,蒸发特性也相对较好,与喷雾的宏观特性相吻合。

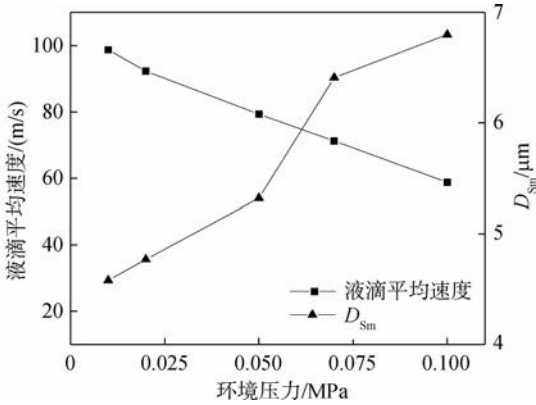


图 14 不同环境压力下的喷雾液滴平均速度和 SMD
Fig. 14 Spray droplet mean velocity and SMD under different ambient pressures

图 15 所示为不同燃油温度对液滴平均速度与 SMD 的影响规律,测试位置为距离喷嘴轴向 50 mm 处,喷射压力为 0.8 MPa,环境压力为 0.1 MPa。可见随着燃油温度的增加喷雾液滴的平均速度和 SMD 都减小, SMD 从 25 $^{\circ}\text{C}$ 的 6.8 μm 降到 100 $^{\circ}\text{C}$ 的 5.91 μm ,而液滴平均速度从 58.75 m/s 降低到 51.93 m/s,整体呈接近线性变化规律。

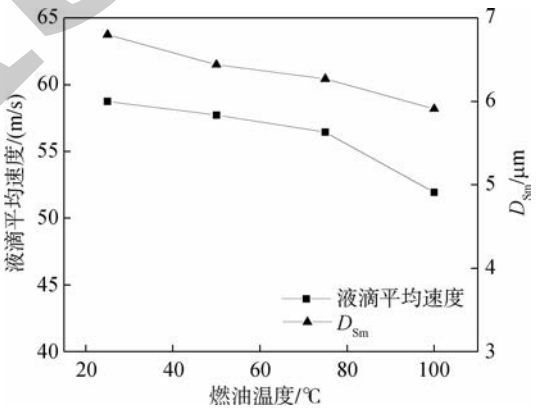


图 15 不同燃油温度下的喷雾液滴平均速度和 SMD
Fig. 15 Spray droplet mean velocity and SMD under different fuel temperatures

在闪急沸腾状态(100 $^{\circ}\text{C}$)液滴粒径最小,喷雾雾化效果最好。随着燃油温度的上升,液滴的黏度降低,表面张力减小,液滴破碎所需的内能减小。燃油温度的上升有利于提高喷雾中液滴群的蒸发速率及燃油在发动机内的化学反应速率。但燃油温度变化带来的油滴粒径和平均速度变化不明显,说明喷雾的微观特性对燃油温度敏感性较弱,这与前述燃油温度对喷雾的宏观特性影响相符。

4 结 论

本文以空气辅助喷射系统为对象,研究了环境压力和燃油温度对闪急沸腾喷雾特性的影响规律,具体结论如下:

1) 对于空气辅助喷射系统,升高燃油温度和降低环境压力,可以使喷雾达到闪急沸腾状态,由环境压力引导的闪急沸腾喷雾膨胀发生在靠近气嘴的近端,而由燃油温度引导的喷雾膨胀发生在喷雾的远端。

2) 由环境压力引导的闪急沸腾引起喷雾膨胀以及减小的环境压力阻力使喷雾粒子加速,可以使液滴粒子群平均速度从 0.1 MPa 的 58.75 m/s 上升到 0.01 MPa 的 98.7 m/s。同时由于喷雾膨胀产生大量细小油滴促进燃油蒸发,使液滴粒子群 SMD 从 0.1 MPa 的 $6.8\text{ }\mu\text{m}$ 降低到 0.01 MPa 的 $4.58\text{ }\mu\text{m}$ 。

3) 由温度引导的闪急沸腾可促进液滴蒸发,使液滴粒径减小,在 0.1 MPa 环境压力下,液滴 SMD 从 25℃ 的 $6.8\text{ }\mu\text{m}$ 降到 100℃ 的 $5.91\text{ }\mu\text{m}$ 。同时由于温度升高使液滴纵向动量减小导致喷雾的贯穿速度有缩小的趋势,而液滴平均速度也从 25℃ 的 58.75 m/s 降低到 100℃ 的 51.93 m/s,但整体变化不明显。

参考文献:

- [1] 魏民祥,刘锐,杨海青,等.二冲程点燃式直喷重油发动机小负荷试验[J].航空动力学报,2017,32(12):2919-2926.
WEI Minxiang, LIU Rui, YANG Haiqing, et al. Partial load tests on a two-stroke spark ignition direct injection heavy fuel engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 2919-2926. (in Chinese)
- [2] NAJJAR Y S H. Comparison of performance of a Greener direct-injection stratified-charge (DISC) engine with a spark-ignition engine using a simplified model[J]. Energy, 2011, 36(7): 4136-4143.
- [3] 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)
- [4] 李明,徐斌,许敏,等.外开环直喷喷油器在不同燃油过热度下的喷雾特性研究[J].内燃机工程,2014,35(5):88-94.
LI Ming, XU Bin, XU Min, et al. Spray characteristics of outward-opening nozzle for DISI engine in different fuel superheat degree conditions[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(5): 88-94. (in Chinese)

- [5] SURESHKUMAR J, ELAYARAJA R, MALLIKARJUNA J M, et al. Transient spray characteristics of air assisted fuel injection[R]. SAE Paper 2015-01-0920, 2015.
- [6] BORETTI A A, JIN S H, ZAKIS G, et al. Experimental and numerical study of an air assisted fuel injector for a D. I. S. I. engine[R]. SAE Paper 2007-01-1415, 2007.
- [7] 白洪林,胡春明,李志军,等.空气喷射量对空气辅助喷射喷雾特性的影响[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(2):206-212.
BAI Honglin, HU Chunming, LI Zhijun, et al. Effect of air injection quantity on spray characteristics of an air-assisted direct injector[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(2): 206-212. (in Chinese)
- [8] LI Y, ZHAO H, BROUZOS N, et al. Effect of injection timing on mixture and CAI combustion in a GDI engine with an air-assisted injector[R]. SAE Technical Paper 2006-01-0206, 2006.
- [9] 王永伟,魏民祥,杨海青,等.空气辅助缸内直喷发动机正时控制策略[J].航空动力学报,2014,29(12):2942-2947.
WANG Yongwei, WEI Minxiang, YANG Haiqing, et al. Timing control strategies of air-assisted direct injection engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2942-2947. (in Chinese)
- [10] LI Y, GUO H, MA X, et al. Morphology analysis on multi-jet flash-boiling sprays under wide ambient pressures[J]. Fuel, 2018, 211: 38-47.
- [11] KAWANO D, GOTO Y, ODAKA M, et al. Modeling atomization and vaporization processes of flash-boiling spray[R]. SAE Paper 2004-01-0534, 2004.
- [12] ZENG W, XU M, ZHANG G, et al. Atomization and vaporization for flash-boiling multi-hole sprays with alcohol fuels[J]. Fuel, 2012, 95: 287-297.
- [13] SHER E, BAR-KOHANY T, RASHKOVAN A. Flash-boiling atomization[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(4): 417-439.
- [14] ZENG W, XU M, ZHANG M, et al. Macroscopic characteristics for direct-injection multi-hole sprays using dimensionless analysis[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 40(7): 81-92.
- [15] XU M, ZHANG Y, ZENG W, et al. Flash boiling: easy and better way to generate ideal sprays than the high injection pressure[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2013, 6(1): 137-148.
- [16] SENDA J, WADA Y, KAWANO D, et al. Improvement of combustion and emissions in diesel engines by means of enhanced mixture formation based on flash boiling of mixed fuel[J]. International Journal of Engine Research, 2008, 9(1): 15-27.
- [17] 张铭,许敏.直喷喷雾-环境气体两相流场的实验研究[J].工程热物理学报,2015,36(1):205-209.
ZHANG Ming, XU Min. Experimental study on GDI fuel spray-ambient gas two-phase flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(1): 205-209. (in Chinese)

- [18] ZHANG G,XU M,ZHANG Y,et al. Macroscopic characterization of flash-boiling multihole sprays using planar laser-induced exciplex fluorescence; Part II cross-sectional spray structure[J]. Atomization and Sprays, 2012, 22(10):861-878.
- [19] SCHMITZ I,IPP W,LEIPERTZ A. Flash boiling effects on the development of gasoline direct-injection engine sprays[R]. SAE Paper 2002-01-2661,2002.
- [20] LI Y,GUO H,FEI S,et al. An exploration on collapse mechanism of multi-jet flash-boiling sprays[J]. Applied Thermal Engineering,2018,134:20-28.
- [21] ZHANG M, XU M, HUNG D L S. Simultaneous two-phase flow measurement of spray mixing process by means of high-speed two-color PIV[J]. Measurement Science and Technology,2014,25(9):095204. 1-095204. 9.
- [22] 余金平,张煜盛,张辉亚,等. 燃油温度对喷雾特性的影响研究[J]. 内燃机工程,2011,32(5):37-43.
SHE Jinping, ZHANG Yusheng, ZHANG Huiya, et al. Effects of fuel temperature on spray characteristics[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2011,32(5):37-43. (in Chinese)
- [23] MOJTABI M, WIGLEY G, HELIE J. The effect of flash boiling on the atomization performance of gasoline direct injection multistream injectors[J]. Atomization and Sprays, 2014,24(6):467-493.
- [24] AORI G,HUNG D L S,ZHANG M,et al. Effect of nozzle configuration on macroscopic spray characteristics of multi-hole fuel injectors under superheated conditions[J]. Atomization and Sprays,2016,26(5):439-462.
- [25] GUO H,DING H,LI Y,et al. Comparison of spray collapses at elevated ambient pressure and flash boiling conditions using multi-hole gasoline direct injector[J]. Fuel, 2017,199:125-134.
- [26] HUANG Y,HUANG S,HUANG R,et al. Spray and evaporation characteristics of ethanol and gasoline direct injection in non-evaporating, transition and flash-boiling conditions[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 108: 68-77.
- [27] 宋志平,王天友,杨晟华,等. 汽油直喷闪急沸腾喷雾特性的试验[J]. 内燃机学报,2013,31(5):420-424.
SONG Zhiping, WANG Tianyou, YANG Shenghua, et al. Experiment of flash boiling spray characteristics based on GDI multi-hole injector[J]. Transactions of CSICE,2013, 31(5):420-424. (in Chinese)

(编辑:陈 越)