

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2023.02.007

# 多孔 GDI 喷油器闪蒸喷雾溃灭形态分析

刘 成<sup>1</sup>, 王付远<sup>2</sup>, 潘金元<sup>2</sup>

(1. 安徽职业技术学院汽车工程学院, 安徽 合肥 230011; 2. 奇瑞汽车股份有限公司汽车工程技术  
研发总院, 安徽 芜湖 241006)

**摘要:**为深入研究多孔高压汽油直喷(gasoline direct injection, GDI)喷射器在冷喷射和闪蒸条件下的喷雾特性, 选用 GDI 喷油器, 自制高压喷油控制系统, 搭建了喷雾定容室试验平台, 对 3 种典型闪蒸条件下的喷雾特性进行了燃油喷射过程实时控制试验, 研究了不同喷射压力下乙醇汽油闪蒸喷雾的二维宏观形态和三维空间结构的演变特征。结果表明: 闪蒸喷雾的结构主要由环境压力和燃油温度决定; 较低的大气压力与较高的燃料温度都会加速闪蒸过程; 较高的喷射压力使喷射过程更快、喷雾穿透延长、坍塌程度降低, 较低的喷射压力使喷射过程的尖端穿透力较高。得出结论: 通过揭示多孔 GDI 喷射器的闪蒸喷雾的形成规律, 可为改善车用发动机性能提供技术参考。

**关键词:**缸内直喷; 冷喷射; 闪蒸条件; 喷雾特性; 闪蒸喷雾

**中图分类号:**TK413.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2023)02-0040-06

## Morphology Analysis of Flash Spray Collapse in Porous GDI Injector

LIU Cheng<sup>1</sup>, WANG Fuyuan<sup>2</sup>, PAN Jinyuan<sup>2</sup>

(1. School of Automotive Engineering, Anhui Vocational and Technical College, Hefei, Anhui 230011, China;  
2. Chery Automobile Co., Ltd., Wuhu, Anhui 241006, China)

**Abstract:** In order to deeply study the spray characteristics of porous gasoline direct injection (GDI) engine injector under the conditions of cold injection and flash evaporation, a constant volume spray chamber test platform was built with GDI injector and self-made high-pressure fuel injection control system. The real-time control experiments of fuel injection process were carried out for the spray characteristics under three typical flash evaporation conditions. The evolution characteristics of the two-dimensional macro morphology and three-dimensional spatial structure of ethanol gasoline flash spray under different injection pressures were studied. The results show that the structure of flash spray is mainly determined by ambient pressure and fuel temperature; lower atmospheric pressure and higher fuel temperature will accelerate the flash evaporation process; the higher the injection pressure, the faster the injection process, the longer the spray penetration and the lower the collapse degree, and the lower the injection pressure, the higher the penetration force at the tip of the injection process. It is concluded that the formation law of the flash spray of the porous GDI injector can provide a technical reference for improving the performance of the vehicle engine.

**Keywords:** direct injection; cold injection; flash evaporation; spray characteristics; flash spray

## 0 引言

相比进气道燃油喷射(port fuel injection, PFI)发动机, 缸内直喷发动机在燃油经济性、瞬态响应以及动力性能等方面更具优势。因此, 近年来缸内直喷发动机在研究机构和汽车制造商中得到了广

泛研究<sup>[1-2]</sup>。由于采用直接喷射系统, 与进气道燃油喷射发动机相比, 喷射压力大大提高, 燃油雾化和蒸发过程将有显著不同<sup>[3]</sup>, 高压喷射时喷油嘴孔外油滴压力骤降。一般情况下, 燃烧室内的环境压力在喷射过程中要比当前环境温度下的燃油饱和蒸汽压高。所以, 喷雾可以视为是冷喷射。在实际发

收稿日期: 2022-11-05

基金项目: 安徽省高校优秀青年骨干人才国内访学研修项目(gxgnfx2021176); 安徽省质量工程项目(2022cjr029); 安徽省高校自然科学研究项目(KJ2020A1034); 安徽职业技术学院质量工程项目(2022yjgkszzhyrgg01); 安徽职业技术学院科技工程自然科学项目(2022xjzr017)。

作者简介: 刘成(1985—), 男, 安徽合肥人, 讲师, 硕士, 主要研究方向: 高效燃烧发动机技术。

动机工作条件下,由于气缸盖和燃烧室到喷油器尖端的热传递,喷油器内部的温度相对较高。若燃烧室内的压力小于与喷射燃油温度相对应的饱和蒸汽压,将导致过热的燃油快速沸腾、雾化,即闪蒸喷雾<sup>[4]</sup>。

最初研究闪蒸喷雾主要是针对柴油发动机。近年来,汽油闪蒸喷雾的相关研究越来越受欢迎,许多研究机构都在关注缸内直喷发动机。以往的研究表明,随着蒸发速率的增加,闪蒸喷雾的液滴直径变小,空燃混合过程也会增强。所以在提高燃烧热效率上,闪蒸喷雾有一定的潜力<sup>[5]</sup>。此外,混合燃料与传统的化石燃料相比,特别是乙醇汽油燃料,由于添加剂的应用,其物理和化学特性也有所不同。吴坚等<sup>[6]</sup>通过高速成像配合激光光学诊断,对多孔GDI喷油嘴喷雾闪急沸腾特性进行了研究,结果显示,汽油闪急沸腾受燃料成分、环境压力以及燃油温度等因素影响;Li等<sup>[7]</sup>研究了多孔喷射器在较低背压下的闪蒸特性,认为闪蒸喷雾对环境压力高度敏感;Xin等<sup>[8]</sup>、Karavalakis等<sup>[9]</sup>对汽油闪蒸进行了大量的研究,认为闪蒸喷雾具有潜在的优势,可以提高直喷式汽油发动机的排放。在前人研究的基础上,Khan等<sup>[10]</sup>、Kobashi等<sup>[11]</sup>对闪蒸喷雾溃灭的影响机制进行了研究,结果显示,每个喷雾羽流的距离都会对喷雾的坍塌产生直接的影响。根据现有的研究结果,张传奇等<sup>[12]</sup>、李天云等<sup>[13]</sup>对汽油及其替代成分进行了研究。但针对混合燃料的多孔GDI喷射的深入研究鲜有报道。

为此,本文通过乙醇与汽油的混合制备乙醇汽油混合燃料,以研究其在冷喷射和闪蒸条件下的喷雾特性,采用多孔GDI喷射器研究了不同喷射压力下乙醇汽油闪蒸喷雾的二维宏观形态和三维空间结构的演变特征,为发展高效汽油发动机的节能减排技术提供参考。

## 1 喷雾理论概述

高压喷雾以低温进入燃烧室会立即发生相变过程,在液体燃料中产生气泡;这些气泡破裂,导致液体在喷嘴附近区域雾化和膨胀;雾化液滴经历了阻力、液滴之间的碰撞、分散、传热和蒸发<sup>[14-15]</sup>。

### 1.1 液滴尺寸分布理论

通常情况下,在闪蒸沸腾和非闪蒸沸腾条件下,喷射器喷嘴附近的液滴分布遵循 Rosin-Rammler 曲线。液体燃料以液滴形式注入计算域,液滴直径  $D$  遵循 Rosin-Rammler 分布,如式(1)所示。

$$f = d_{\min} + d_{\max} [-\ln(1 - N_{\text{rand}} K_R)]^q \quad (1)$$

式中: $f$ 为液滴尺寸分布的概率密度函数; $d_{\min}$ 为最小直径; $d_{\max}$ 为最大直径; $N_{\text{rand}}$ 为随机数; $K_R$ 值用  $K_R = 1 - \exp[(d_{\max} - d_{\min})^q / \bar{d}_p]$  计算; $\bar{d}_p$ 为液滴平均直径; $q$ 为扩展因子,控制液滴分布的扩展。

### 1.2 二次雾化理论

高 Weber 数时的液滴振荡并扭曲在液滴雾化之前。二次雾化由以下模型模拟:使用弹簧、质量的增强泰勒类比破裂模型和液滴破碎的阻尼器类比。弹簧力为液滴的类似表面张力和阻尼效应类似于流体的黏度。产生新液滴比率按照式(2)计算。

$$d\bar{m}(t)/dt = -3K_b \bar{m}(t) \quad (2)$$

上述关系产生了子液滴大小  $d_{\text{child}}$  与母液滴大小  $d_{\text{parent}}$  的速率,如式(3)所示。

$$d_{\text{child}}/d_{\text{parent}} = e^{-K_b t} \quad (3)$$

式(2)(3)中: $K_b$ 为常数,它的大小取决于液滴破碎的状态、振荡频率  $w$ ;  $t$ 为液滴破碎的时间。 $K_b$ 的计算如式(4)所示。

$$K_b = \begin{cases} k_1 w, & W_1 \leq W_2 \\ k_2 w \sqrt{W_1}, & W_1 > W_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $k_1, k_2$ 为常数。液滴破碎状态基于无量纲韦伯数(Weber number, 记为  $W_1$ ),即惯性力与表面张力的比率。临界韦伯数(记为  $W_2$ ),由实验观察确定,该观察确定了液滴破碎的状态。如果  $W_1$  小于  $W_2$  达到 80,则液滴破碎遵循袋破裂状态,否则发生剥离破碎状态。在袋破裂状态下,液滴此时会以袋的形式出现,最终形成直径相对小的液滴。在剥离-破碎状态下,液滴变平为片状结构,然后以较小液滴的形式剥离该薄片的边缘。

### 1.3 蒸发与传热理论

液滴的蒸发由  $d^2$  定律建模,该定律是蒸发弛豫时间  $\tau_e$  和蒸发系数  $C_e$  的乘积,如式(5)所示。

$$d_p^2 = \tau_e C_e \quad (5)$$

蒸发系数取决于无量纲舍伍德数(Sherwood number, 记为  $Sh$ ),  $Sh$  是对流换热与扩散换热的比值。 $Sh$  由 Frössling 相关性计算得出,如式(6)所示。

$$Sh = 2 + 0.6Re^{1/2} Se^{1/3} \quad (6)$$

Ranz-Marshall 的传热模型用于计算计算蒸发弛豫时间所需的努赛尔数(Nusselt number, 记为  $Nu$ )。

$$Nu = 2 + 0.6Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (7)$$

式中: $Pr$ 为普朗特数(Prandtl number)。标准蒸发和传热模型在闪蒸沸腾条件下运行良好,因为闪蒸效应被纳入喷射模型中,即减小液滴尺寸和增加喷雾角度。因此,喷雾被简单地视为高度蒸发喷雾。

## 2 试验设备和测试方法

燃油喷射过程实时控制试验,采用自行研制的高压燃油控制系统。此外,交流电机通过连接的凸轮轴,驱动执行元件高压汽油泵工作,输出高压燃油。通过主机可以精确地控制燃油压力。喷油器

驱动电流参数、喷油力矩、喷油脉冲宽度和喷油次数由喷油器驱动器 Scienlab D120 控制。同步地,为外部触发输入生成喷油器的驱动控制信号和外部同步触发信号。试验所用的喷雾定容室研究平台结构示意图如图 1 所示。

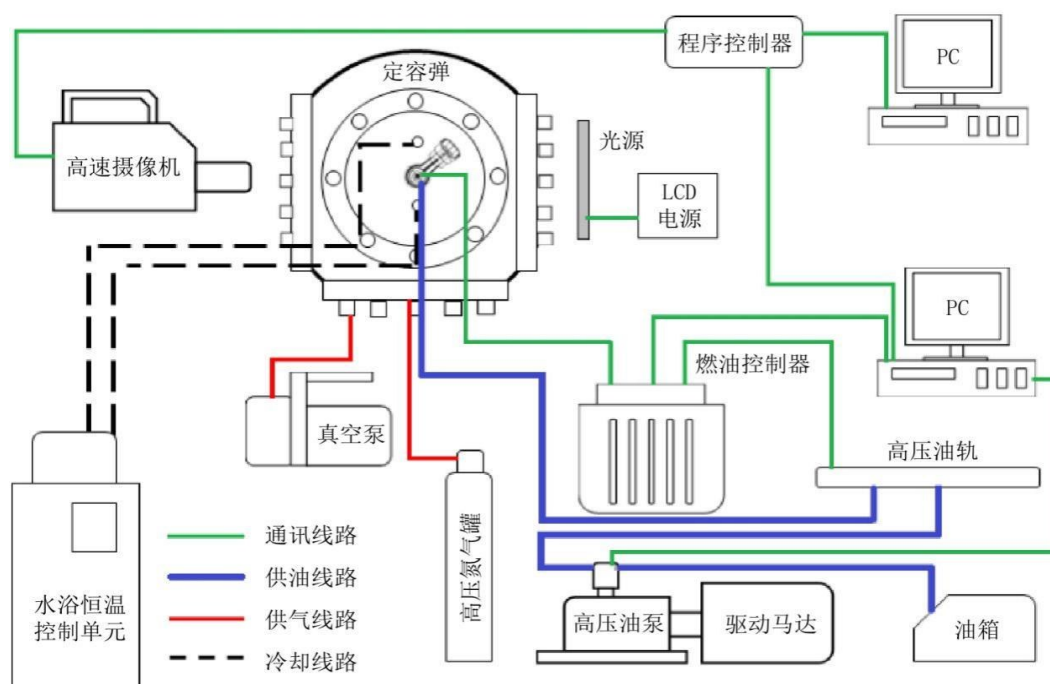


图 1 试验所用的喷雾定容室研究平台结构示意图

对于背光测试,2个石英窗相对安装。成像装置由 Photron 高速摄像机、LED 光源和可编程定时单元(programmable timing unit, PTU)组成。对于喷雾空间结构试验,采用光学图案化扫描法,在距喷嘴每 10 mm 的步长处,获得各试验平面上的喷雾图案化。然后叠加不同图案的图像,重新构建喷雾的空间结构。由于汽油是一种含有许多荧光材料成分的混合物,因此使用波长为 266 nm 的激光片从垂直方向照亮燃油喷雾。同时,利用 360 nm 中心波长、20 nm 带宽的光学滤波器滤除其他不需要的光。本研究激光光学诊断系统由 ICCD 摄像机、Nd:YAG 激光器、定时控制器和薄片光成型器组成。采用燃油喷射控制器控制每次试验 6 次连续喷射,以保证试验数据的准确性。此外,通过背景减法对从多次注射中收集的图像进行平均,以获得最终图像。

## 3 结果和讨论

### 3.1 环境压力和燃油温度对喷雾结构的影响

对 3 种典型闪蒸条件下的喷雾进行试验研究,

喷射压力设置为  $1 \times 10^4$  kPa,定容燃烧(constant volume combustion, CVC)中的压力根据燃油过热要求进行调整。燃油温度从 30 °C 调整到 65 °C。图 2 显示了在各种燃油温度  $T_{\text{fuel}}$ 、环境压力  $P_{\text{amb}}$  条件下的喷雾照片,以说明喷雾结构受到过热的程度影响。

图 2 中,比较了闪蒸沸腾的喷雾宏观特性。在 40 kPa 的环境压力下,伴随着燃油温度  $T_{\text{fuel}}$  不断上升,喷雾会变得过热。实验显示,燃油的温度  $T_{\text{fuel}}$  保持在 65 °C 时,随着环境压力的不断减小,类似的现象也会发生。一般情况下,喷雾羽流的穿透方向会随着燃油温度的升高而改变。同时,喷雾的穿透力也发生了明显的变化。在特定燃油温度下,当环境压力降低时,也可以观察到这种转变。在这张图中可以找到更多细节,不同喷射羽流之间的相互作用是不同的。另外,在恒定的环境压力下,喷雾宽度在燃油温度从 30 °C 上升至 40 °C 时,也比较平稳。相比之下,当  $T_{\text{fuel}}=65$  °C、 $P_{\text{amb}}=40$  kPa,即汽油中轻馏分的过热度越高时,喷雾羽流相互聚集并塌陷形成单一固体喷雾,然后喷雾宽度减小。在这种情况下

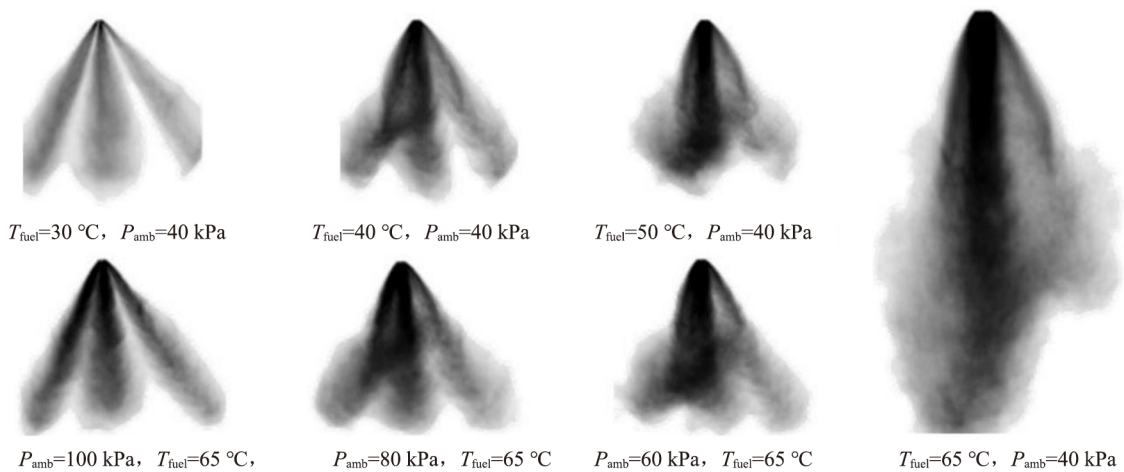


图 2 不同燃油温度、环境压力条件下的喷雾形态

下,由于所谓的“喷雾坍塌”,每个喷嘴都无法识别出单独的喷雾羽流。此时由于压力下降时液滴向蒸汽的转变,喷雾轮廓边界倾向于向轴弯曲,并导致喷雾宽度收缩。闪蒸喷雾液滴的焓超过饱和和液体焓,气泡便会快速增长。因此,气泡会历经迅速膨胀的过程,导致迅速爆裂成小液滴。喷雾羽流周围的气流更容易将较小的液滴推向喷雾轴。由于射流在轴向上的动量,由于快速移动产生的低压,相交区域内的液滴会相互吸引。从宏观角度看,喷雾收缩成纤细的图案。

一般来说,在闪蒸条件下,液滴尺寸变得非常小。在喷射过程中,由于动量交换,液滴速度可能会减慢并向径向扩散。因此,随着喷雾锥内空气的加速,喷雾穿透将缩短。这就解释了为什么轻度闪蒸喷雾穿透比无闪蒸条件下的要短。然而,在强闪蒸条件下并非如此。虽然在较低的环境压力和较高的燃油温度条件下,液滴尺寸小于其他两种情况,但由于喷雾的坍塌,与喷雾中心气体的动量交

换减少。为进一步揭示喷雾坍塌对喷雾结构的影响,通过对喷雾特性的空间分析,进一步揭示喷雾坍塌对喷油器喷雾结构的影响。在这些典型条件中可以发现一些明显的差异。分别以冷喷射喷雾、轻度闪蒸喷雾和强闪蒸喷雾三种典型条件进行形态评估,对应喷雾照片,如图 3 所示。在冷喷射条件下,在整个喷射过程中,羽流以直线穿透,没有任何相互作用。过热情况下的喷雾结构与冷喷相比有明显差异。在初始喷雾阶段,过热度越高,射流间相互的作用会变得越强。随着燃料喷雾的发展,在温和的闪蒸条件下,远场中的溃灭程度被唤醒,聚焦射流分离。这主要是因为初始喷雾期间,许多喷雾颗粒被推到羽流之间的空间,相邻羽流之间的相互作用保持很强。然而,由于相对较低的过热度,和进一步的射流间距,射流相互作用减弱。与其他条件相比,在强闪蒸喷雾的整个喷射过程中,坍塌程度保持很强。此外,喷雾的空间结构也由空心圆锥体转变为实心。

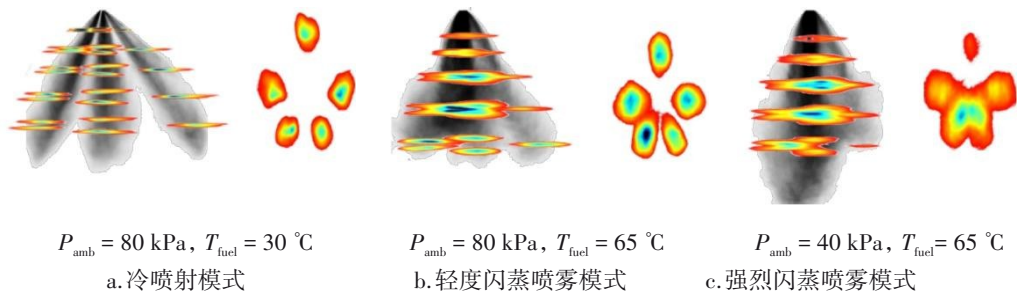


图 3 3 种闪蒸条件下的喷雾照片

如图 3 所示,在这些条件下,羽流形态存在显著差异。在冷喷射图像中,结果显示羽流间的相互作用有限。相比之下,在其他条件下,喷雾穿透可以

看到不同程度的坍塌。特别是在强闪蒸条件下,射流向喷射器中心坍塌,羽流无法分离。在闪蒸沸腾条件下,在初始喷射阶段,喷雾尖端一侧出现一些

小漩涡,这意味着强烈的空气夹带。随着时间推移,漩涡会逐渐增大,并被喷射的羽状物拖曳成羽毛的形状。在充分发展后,喷雾穿透预计会随着过热程度的加强而单调增加,这是因为塌陷的喷雾聚集在一起。然而,轻度闪蒸喷雾的穿透时间似乎最短,喷雾崩塌程度中等。

### 3.2 喷射压力对喷雾特性的影响

为了阐明喷射压力对闪蒸喷雾的影响,研究闪

蒸条件下不同燃料喷射压力下的喷雾特性。表1为几种喷射压力下汽油宏观喷射模式。从表1可以发现,随着喷射压力的逐渐升高,喷雾穿透将延长,坍塌程度降低。在较高的喷射压力下,喷雾羽流会出现明显分离的现象。这种差异应该与较高的喷射压力使液滴动量增加有关。由于较大的运动惯性,更多的油滴无法从根本上扩散,从而导致坍塌程度降低。

表1 几种压力和时间下汽油的宏观喷射模式

t/ms	几种压力下的喷射模式			t/ms	几种压力下的喷射模式		
	1×10 <sup>4</sup> kPa	2×10 <sup>4</sup> kPa	3.5×10 <sup>4</sup> kPa		1×10 <sup>4</sup> kPa	2×10 <sup>4</sup> kPa	3.5×10 <sup>4</sup> kPa
0.20				0.80			
0.35				0.98			
0.50				1.10			
0.65							

## 4 结论

本研究使用各种光学诊断技术系统地描述了多孔GDI喷射器的闪蒸喷雾,生成并分析了大量有关闪蒸形成过程的数据和信息。在此基础上,研究了闪蒸喷雾形成的物理过程,结论如下。

1)闪蒸喷雾的结构由过热程度决定,过热程度由环境压力和燃油温度表示。喷雾穿透和羽流宽度都和环境条件密切相关。

2)较低的大气压力和较高的燃料温度都会加

速闪蒸过程。在宏观层面上,冷喷射喷雾和闪蒸喷雾存在显著差异。当闪蒸发生时,喷雾结构总是从空心锥体变成固体;当喷油压力增加时,闪蒸喷雾对燃油温度的敏感性降低。

3)与较低的喷射压力相比,较高的喷射压力表现出更快的喷射过程,并且在喷射开始后,较低的喷射压力喷射条件下,喷射过程的尖端穿透力较高。对于闪蒸喷雾,随着喷射压力的增加,喷雾穿透明显延长,坍塌程度降低,因为较大的移动惯性使更多的油滴无法从根本上扩散,从而导致坍塌程度降低。

### 参考文献:

[1] 曹春晖,梁诚,牟一分.某GDI发动机二次喷油策略的试验研究[J].内燃机,2022,38(1):1-5.  
 [2] 李小平,解方喜,姜北平,等.可视化喷雾实验平台的研制[J].实验科学与技术,2021,19(5):129-133.  
 [3] 李东辉,赵铮,申景倩,等.大滚流气道对PFI发动机性能影响的试验研究[J].内燃机与配件,2021(19):6-10.

- [4] 韩荣,蒋炎坤,陈焯欣,等.MPI+GDI发动机稀薄燃烧性能研究[J].车用发动机,2021(4):1-7.
- [5] 杜家坤,陈泓,李钰怀,等.汽油机直喷喷油器闪沸喷雾形态研究[J].内燃机与动力装置,2019,36(2):7-13.
- [6] 吴坚,陈泓,杜家坤,等.直喷汽油机多孔喷油器喷雾闪急沸腾特性[J].内燃机学报,2019,37(6):529-535.
- [7] 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.
- [8] XIN H, RATCLIFF M A, ZIGLER B T. Effects of gasoline direct injection engine operating parameters on particle number emissions[J]. Energy & Fuels, 2012, 26:2014-2027.
- [9] KARAVALAKIS G, SHORT D, VU D, et al. The impact of ethanol and iso-butanol blends on gaseous and particulate emissions from two passenger cars equipped with spray-guided and wall-guided direct injection SI (spark ignition) engines[J]. Energy, 2015, 82:168-179.
- [10] KHAN M M, J HÉLIE, GOROKHOVSKI M, et al. Experimental and numerical study of flash boiling in gasoline direct injection sprays[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123:377-389.
- [11] KOBASHI Y, HIRAKO S, MATSUMOTO A, et al. Flash boiling spray of diesel fuel mixed with ethane and its effects on pre-mixed diesel combustion[J]. Fuel, 2019, 237:686-693.
- [12] 张传奇,文铭升,董芳,等.乙醇汽油燃料特性对直喷增压乘用车性能影响研究[J].内燃机工程,2020,41(5):54-61.
- [13] 李天云,许敏,张高明.乙醇与汽油的喷雾及蒸发特性研究[J].工程热物理学报,2014,35(7):1434-1438.
- [14] LEVY M, LEVY Y, SHER E. Spray structure as generated under homogeneous flash boiling nucleation regime [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1):416-423.
- [15] GODSAVE G. Studies of the combustion of drops in a fuel spray—the burning of single drops of fuel[J]. International Symposium on Combustion, 1953, 4(1):818-830.