

喷孔直径对高压喷射喷嘴内甲醇流动及 喷雾瞬态特性影响的可视化试验研究

张迎¹, 李红梅^{2,3,4}, 韩丹^{3,4}, 杨亦周¹, 郭根苗¹, 何志霞¹

(1. 江苏大学能源研究院, 212013, 江苏镇江; 2. 上海交通大学动力机械及工程教育部
重点实验室, 200240, 上海; 3. 中国船舶集团有限公司第七一一研究所, 201108, 上海;
4. 中国船舶集团有限公司先进船舶发动机技术全国重点实验室, 201108, 上海)

摘要: 为研究甲醇燃料在内燃机喷油器喷嘴内部的流动特性及近场喷雾演变规律,解决甲醇燃料与透明喷嘴材料间的光折射率匹配难题,自主搭建高压燃油喷射及雾化可视化试验系统,并开发了背光均光成像技术。基于该平台,探究了喷孔直径为 0.20、0.30、0.40 mm,喷射压力为 50 MPa 和背压为 0.1 MPa 时甲醇燃料的瞬态流动特征与喷雾宏观特性。研究结果表明:针阀开启过程中,喷孔内几何空化快速初生并演化为超空化流态,同时伴随喷嘴压力室内持续发展的线空化现象及空泡团簇汇聚运动。喷嘴锥角的变化滞后于针阀运动,且喷孔直径与线空化强度呈非线性关系,当孔径处于 0.30 mm 时,喷孔入口与针阀、压力室构成的流道可导致空化强度达到峰值,喷雾锥角峰值达 32.01°。同时,小孔径喷嘴(0.20 mm)在出口区域产生更强的剪切效应,这种流体扰动加速了甲醇尾喷阶段细长液丝的断裂过程,尾喷持续时间较 0.30 mm 孔径喷嘴短 60 μ s。该研究揭示了甲醇在喷嘴内的空化演化机制及近场喷雾特性,可为甲醇喷油器的结构优化与喷雾控制提供试验依据。

关键词: 甲醇;喷嘴;空化;喷雾;可视化试验

中图分类号: TK421 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202601016 **文章编号:** 0253-987X(2026)01-0162-09

Visualization Experimental Study on the Influence of Orifice Diameter on Methanol Flow and Transient Spray Characteristics in High-Pressure Injection Nozzles

ZHANG Ying¹, LI Hongmei^{2,3,4}, HAN Dan^{3,4}, YANG Yizhou¹, GUO Genmiao¹, HE Zhixia¹

(1. Institute of Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Shanghai 201108, China; 4. National Key Laboratory of Marine Engine Science and Technology, China State Shipbuilding Corporation Limited, Shanghai 201108, China)

Abstract: To investigate the flow characteristics of methanol fuel inside the nozzle of an internal combustion engine fuel injector and the evolution of near-field spray and address the challenge of refractive index matching between methanol fuel and transparent nozzle materials, this study independently builds a high-pressure fuel injection and atomization visualization experimental system and develops backlight uniform illumination imaging technology. Based on this platform,

the transient flow characteristics and macroscopic spray properties of methanol fuel are investigated under injection pressures of 50 MPa and back pressures of 0.1 MPa for orifice diameters of 0.20 mm, 0.30 mm, and 0.40 mm. The results indicate that during the needle valve opening process, geometric cavitation rapidly initiates within the orifice and evolves into a supercavitation flow regime, accompanied by continuously developing line cavitation in the nozzle pressure chamber and the coalescent motion of cavitation clusters. The change in nozzle cone angle lags behind the needle valve movement, and the relationship between orifice diameter and line cavitation intensity is nonlinear. When the orifice diameter is 0.30 mm, the flow passage formed by the orifice inlet, needle valve, and pressure chamber induces peak cavitation intensity, with the maximum spray cone angle reaching 32.01° . Simultaneously, the small orifice nozzle (0.20 mm) generates stronger shear effects in the exit region, and this fluid disturbance accelerates the breakup process of slender liquid ligaments during the tail injection phase of methanol, resulting in a tail injection duration $60\ \mu\text{s}$ shorter than that of the 0.30 mm orifice nozzle. This study reveals the cavitation evolution mechanism and near-field spray characteristics of methanol inside the nozzle, providing an experimental basis for the structural optimization and spray control of methanol fuel injectors.

Keywords: methanol; nozzle; cavitation; spray; optical experiment

内燃机作为热力发动机的重要形式,凭借其高功率密度和优异的热效率,广泛应用于交通运输、农业机械及发电等领域^[1]。然而,传统内燃机对化石燃料的依赖不仅加剧了全球气候变化问题,也带来了严重的环境污染^[2-3]。在“双碳”目标的推动下,交通运输行业亟需实现绿色低碳转型,发展替代燃料成为重要解决途径^[4-5]。甲醇因其丰富的资源基础、多样的制备途径及良好的燃烧特性,成为潜力巨大的清洁燃料之一,尤其在船舶和内燃机领域获得了广泛关注^[6-8]。

近年来,甲醇高压直喷技术作为提升发动机燃烧效率与排放性能的关键路径,引起了众多学者的研究兴趣^[9-13]。喷油器喷嘴作为喷射系统的核心部件,其内部存在复杂的微尺度多相流动现象——空化。空化主要分为几何空化和线空化两类形态,这些空化流动形态直接影响燃油的雾化和燃烧过程。已有研究表明,喷嘴内部几何结构的微小变化可引发完全不同的空化形态及其演变规律^[14-17]。现有研究多聚焦于柴油及传统燃料喷嘴内部空化流动及喷雾特征。Wei等^[18]通过原尺寸透明锥形喷孔的可视化试验研究结果发现,线空化仅在特定针阀升程下出现,受进口流通截面、针阀锥角及喷孔结构影响。高针阀升程时线空化显著增强喷雾锥角,同时引发压力室内燃油压力波动,导致喷油量不稳定。He等^[19]通过数值模拟方法模拟了不同喷嘴结构诱导形成4种典型空化流态,研究结果表明,空化形态对雾化效果具有显著影响。片状或柱状空化的发展能够促进液柱破碎,显著提升初级雾化性能;

而空化不足则抑制喷雾破裂过程,导致雾化质量下降。Zhu等^[20]通过数值模拟方法模拟了甲醇燃料在不同喷射压力下花瓣仿生喷嘴孔的内部流动和空化特性,结果表明,其空化主要发生在喷孔出口处,可以增强雾化效果。虽然这些研究为喷嘴空化机理提供了理论与试验依据,但主要针对柴油及传统燃料。相比之下,作为低黏度、低表面张力的替代燃料,甲醇喷嘴内部流动和空化特性尚缺乏系统研究。由于甲醇物理性质及试验条件的限制,关于其喷嘴内空化行为和喷雾演变的原尺寸可视化试验仍较少,进而影响了甲醇燃料喷嘴的优化和推广。

为深入揭示甲醇燃料在喷油器喷嘴内部的流动与喷雾特性,本文构建了适用于甲醇高压共轨系统的原尺寸透明喷嘴可视化试验平台。基于自主研发的背光均光法光学诊断技术,对甲醇在不同喷嘴结构中的单次喷射过程进行了高时空分辨率的可视化试验。试验系统分析了不同喷孔直径对甲醇喷嘴内空化行为及喷雾形貌的影响机制,进一步探讨了甲醇的瞬态空化强度、喷雾锥角及针阀升程响应等方面的异同,为甲醇直喷系统的结构优化与性能提升提供了重要的试验依据与理论支撑。

1 可视化试验装置及方法

1.1 甲醇喷嘴内部流动及近场喷雾光学测试试验平台

基于柴油机高压共轨燃油喷射系统,自行设计搭建高压喷射甲醇喷嘴内部流动及喷雾光学试验

台,如图 1 所示,结合高速显微成像技术,以足够高的时空分辨率获得喷嘴内空化瞬态流动和下游喷雾雾化特性。该平台主要由定容弹系统、高压共轨喷射系统、图像采集系统及控制系统等组成。其中,定容弹容积约为 1.25 L,弹体两侧设有两个直径为 100 mm 的观测窗口,以确保良好的光学观测条件。定容弹顶部安装甲醇喷射器、温度传感器和压力传感器,底部设有排废系统,保障甲醇安全排放。试验中,甲醇从储存箱经滤清器、增压泵加压后以高压进入共轨管,然后经油管输送到电磁阀共轨喷油器中,最终从喷孔喷射出。其中,通过电子控制单元(ECU)控制喷油器的电磁阀,实现甲醇过程的精确控制,利用同步器实现甲醇燃料喷射与相机拍摄信号的同步激励。试验所用喷油器由钧风电控科技有限公司提供,类型为柴油电控喷油器。图像采集系统中的高速相机最高拍摄速率可达 210 000 帧/s。综合拍摄视窗及图像分辨率,本研究选取 50 000 帧/s 拍摄速率,图像分辨率为 1 024 像素×512 像素。本研究中,甲醇温度稳定为 300 K、喷射压力和背压分别为 50 和 0.1 MPa,喷射脉宽为 4 200 μ s。

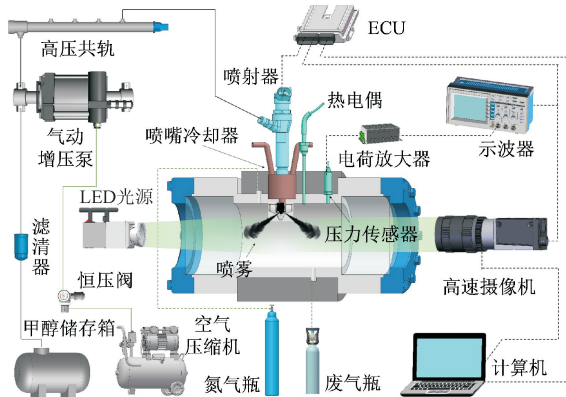


图 1 甲醇高压喷射喷嘴内部流动及喷雾光学试验台
Fig.1 Optical experimental platform for high-pressure methanol nozzle internal flow and spray

透明喷嘴是实现喷嘴内甲醇流动可视化的前提。本研究透明喷嘴加工过程如图 2 所示。首先从油嘴耦件的密封线以下将喷射器喷嘴头部区域进行切割,图 2(a)分别展示了喷嘴头部切除前后的结构对比。采用亚克力透明材料加工喷嘴头部,如图 2(b)所示,并利用显微镜对加工后的透明喷嘴进行微观形貌观察,对其几何结构进行精准标定。最后,将透明喷嘴头部与原金属喷射器组装,实现喷嘴内部流动可视化,如图 2(c)所示。表 1 给出了本研究所采用的不同喷孔直径透明喷嘴的具体几何参数。其中,喷嘴为双孔,喷孔长度为 1.92 mm。

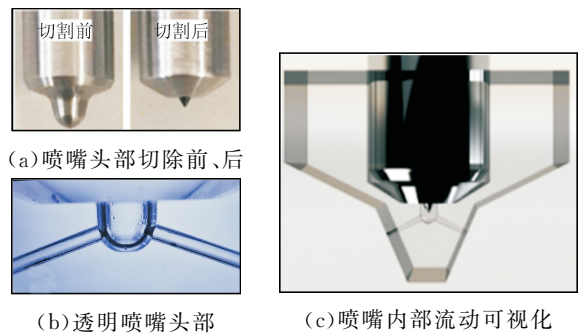


图 2 透明喷嘴头部加工原理及过程

Fig.2 Processing principle and process of the optical nozzle tip

表 1 喷嘴主要结构参数

Table 1 Main parameters of the nozzles

喷嘴	喷孔入口直径 D_{in} /mm	喷孔出口直径 D_{out} /mm
I	0.20	0.20
II	0.30	0.30
III	0.40	0.40

1.2 背光均光法原理

背光成像是目前研究透明喷嘴内部流动特性的常用可视化技术之一^[21],其光路布置如图 3 所示。试验中 LED 灯、透明喷嘴与高速相机沿同一直线布置。LED 光线穿过喷孔时,依次经过孔壁、燃油、空化区域、燃油、孔壁介质界面,并发生多次折射,尤其在空化与燃油交界处,因两者之间密度差异大,光线在进入空化区域以及再次进入液体时将发生两次明显的折射,无法被相机接收,故空化区域在图像中呈黑色。未发生空化的燃油区域光线透射顺畅,图像中对应区域则呈现为白色。喷孔外近场区域因液流连续、液滴密集,同样对光线产生遮挡,致使该区域在图像中同样表现为黑色。然而,与柴油的折射率 1.45 相比,甲醇的折射率仅为 1.31,这与亚克力透明材料折射率 1.49 差异显著,导致光线在喷孔内壁面与甲醇边界处产生了明显的全反射现象,从而喷孔壁面边界模糊。图 4(a)给出了采用背光成像法捕获的甲醇与柴油在亚克力透明喷嘴内的流动图像,由图 4 可以看出,传统的背光法难以实现喷嘴内甲醇流态的捕捉。为了解决这一问题,本研究在背光法基础上,巧妙提出背光均光法,即在透明喷嘴近光源一侧增设厚度为 0.1 mm、透光率为 97% 的高透光性的扩散片,以调节光束扩散角度,削弱全反射现象对图像质量的影响,同时配合高强度同步频闪光源以增强成像亮度与对比度,获得清晰、可靠的甲醇喷嘴内部流动图像。图 4(b)展示了相

同条件下,采用背光成像法与背光均光法的甲醇喷嘴内部流动图像对比。可以发现,经光路优化后,喷孔边缘的阴影区域显著减小,成像质量得到了明显提升,为后续的图像分析提供了有力保障。

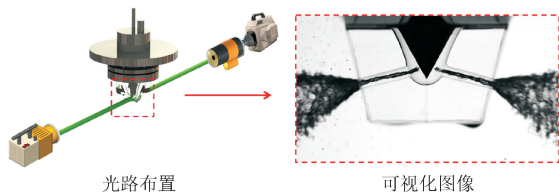
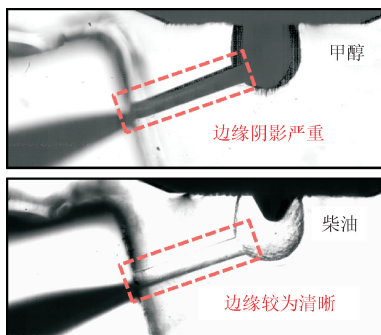
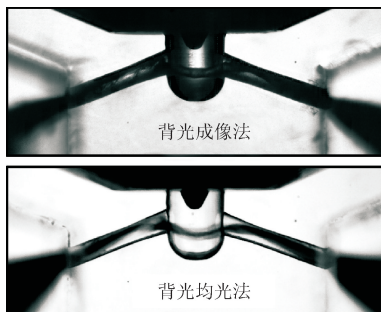


图3 背光成像法可视化光路布置图

Fig. 3 Optical setup of backlight imaging visualization



(a)背光成像法下甲醇与柴油瞬态图像对比



(b)背光法与背光均光法下甲醇喷嘴内瞬态流动图像对比

图4 背光法与背光均光法下喷嘴内部燃油瞬态流动典型图像

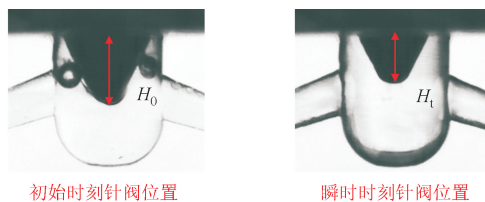
Fig. 4 Typical transient fuel flow images inside the nozzle under backlighting method and backlighting-based beam homogenization method

1.3 图像后处理及参数定义

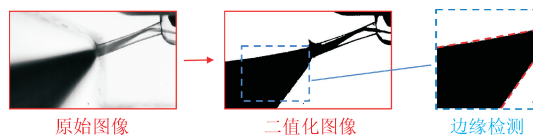
利用背光均光法捕获不同时刻喷嘴内甲醇流动与近喷孔区域喷雾图像,利用 Matlab 软件进行后处理得到针阀升程 L_{lift} 、近场喷雾锥角 θ 、喷嘴内空化强度 I 等定量数据^[22]。如图 5(a)所示,借助后处理技术准确提取针阀尖端的时序位置信息。针阀高度定义为燃油单次喷射周期内的某一瞬时针阀尖端位置 H_t 与针阀落座时位置 H_0 的相对高度。试验中

高速数码相机拍摄区域约为 $10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,本文喷雾锥角区域取喷孔出口 2 mm 内的范围。图 5(b)展示了喷雾锥角的确定过程。先将喷雾区域与未喷射时的图像进行差值运算,得到绝对差图,随后对其进行灰度增强与二值化处理,提取边界后通过曲线拟合获得喷雾边界斜率,最后计算出喷雾锥角 θ 。与处理喷雾锥角相似,空化强度的处理需要对原始图像进行二值化处理;截取喷孔区域位置并通过 Matlab 软件对于喷孔位置进行正确捕捉,将边缘阴影区域设置为 1,获得孔内空化的二值化图像,分别统计喷孔白色像素点以及捕获的空化形态黑色像素点。由于边界附近的灰度值相对较低,本文选取的灰度阈值为 0.4,以更有效地提取孔内空化的边缘轮廓,从而生成更贴合试验结果的二值化图像。计算二值化图像中空化区域面积 S_{cav} 与喷孔总面积 S_{hole} 之间的比值,得到喷嘴内空化强度^[23],其定义如下

$$I = \frac{S_{\text{cav}}}{S_{\text{hole}}} \quad (1)$$



(a)针阀升程



(b)近场喷雾锥角

图5 图像定量处理

Fig. 5 Image processing methodology

2 结果与讨论

2.1 喷嘴内部甲醇空化流动瞬态特性

针对 II 号喷嘴开展喷嘴内部甲醇空化流动特性研究,喷嘴的具体结构见表 1,喷孔直径为 0.3 mm 。图 6 给出了一次甲醇燃料喷射过程中喷嘴内部流态瞬态演变过程。这里将喷油器电磁阀接收喷油信号的瞬间定义为初始时刻($t=0\text{ }\mu\text{s}$),其中压力室内观测到的气泡为上一次喷射后残留液体中未完全释放的气体,属于液体内部残留气泡。值得注意的是,由于喷油器本身机械延迟以及甲醇物理性质和初始气泡的影响,甲醇燃料并未在起始时刻立刻从喷嘴

喷出。本文在 3 个喷嘴分别开展了 5 次重复性试验,都得到了相似的试验结果,绝对误差在 $\pm 1\%$ 以内。

从图 6 中可以看出,在喷射初期,上游高压甲醇通过压力室进入喷孔,由于流道截面的突然收缩和流的急剧转变,喷孔入口附近形成局部低压区,诱导出几何空化($480\ \mu\text{s}$),且壁面空化随针阀开启迅速发展至喷孔出口,演变为超空化流态($540\ \mu\text{s}$)。在这一阶段,喷射的燃油量较小,喷嘴内部甲醇的流速较小。尽管如此,初始气泡的破裂所引发的扰动加剧了压力室内的瞬时涡流强度,使得锥面线空化现象在压力室内短暂形成后迅速消失($540\ \mu\text{s}$)。随着针阀抬升,甲醇喷射量增加,并逐步达到稳定阶段,喷嘴内部旋流强度也随之增大,压力室内出现稳定的孔与孔线空化现象($760\ \mu\text{s}$)。同时,喷孔内部强

烈的旋流使得低密度的空化泡团汇聚在涡旋核心区域,导致几何空化呈现团聚特性。随后,在 $760\sim 1\,420\ \mu\text{s}$ 喷射时段,喷嘴内部持续维持强旋流,几何空化团聚现象频繁出现。然而,随着针阀继续抬升直至最大升程,燃油的流通面积进一步增大,流速减小,喷孔内旋流强度减弱,几何空化的团聚现象减弱,但喷嘴压力室内仍存在明显的线空化流态。针阀开始落座后,喷孔内几何空化团聚现象再次发生($4\,320\ \mu\text{s}$)。这主要是由于惯性效应的影响,甲醇的流量在短时间内仍维持在一个较高的水平,而流道截面的收缩进一步增大了甲醇的流速,喷嘴内部旋流强度增强,导致几何空化团聚现象再次发生。针阀在 $6\,040\ \mu\text{s}$ 时刻完全落座,压力室及喷孔内残余的甲醇在惯性作用下继续喷出,同时瞬间的逆梯度压力引起倒吸现象,喷孔及压力室内呈现大量气体。

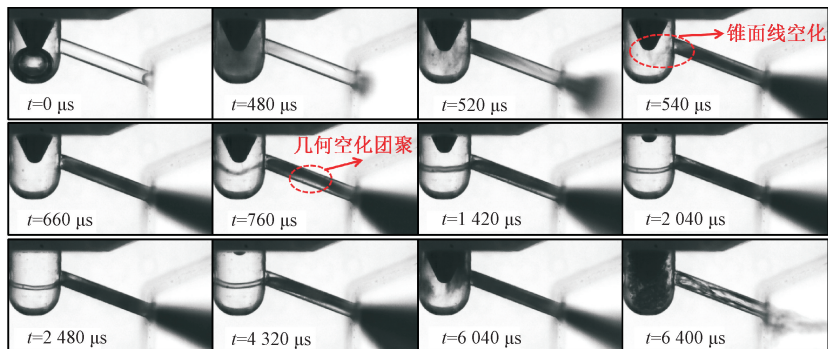


图 6 一次喷射过程中喷嘴内甲醇流态瞬态演变特性($P_{\text{in}}=50\ \text{MPa}$)

Fig. 6 Transient cavitation flow of methanol fuel in cylindrical nozzle ($P_{\text{in}}=50\ \text{MPa}$)

图 7 给出了上述喷射过程中喷嘴针阀运动规律,及相应的近场喷雾锥角与空化强度特性定量曲线。将甲醇燃料喷射过程划分为 4 个阶段,即喷射初期 A 阶段($0\sim 1\,420\ \mu\text{s}$)、喷射稳定阶段 B 阶段($1\,420\sim 4\,260\ \mu\text{s}$)、针阀落座阶段 C 阶段($4\,260\sim 6\,040\ \mu\text{s}$)及尾喷阶段 D 阶段($6\,040\sim 6\,400\ \mu\text{s}$)。通过对比各阶段空化强度可以发现,A、C 阶段空化强度波动明显强于 B、D 阶段。这种增强的波动性主要归因于上述两个阶段中较强的旋流所引发的间歇性几何空化团聚效应。进一步对喷油初始阶段 4 个区段的喷雾锥角进行时间平均处理,得到了每个阶段的平均喷雾角度 $\bar{\theta}$ 。结果表明,当喷嘴内部存在有利于几何空化团聚的旋流时,喷孔出口处的离心力更大,导致喷嘴近场喷雾锥角增大。此外,喷雾锥角发生明显变化时刻与喷嘴针阀开始落座时刻之间存在迟滞现象。这与流体的惯性有关,在针阀开始落座的瞬间,喷嘴内部的甲醇流动受惯性作用将保

持一定时间后才能充分响应针阀开度的变化,从而导致了喷雾锥角演变的滞后性^[24]。

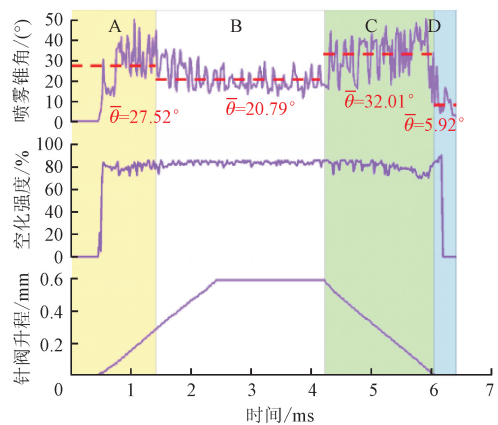


图 7 一次甲醇喷射过程中喷嘴针阀运动规律、喷雾锥角与空化强度特性($P_{\text{in}}=50\ \text{MPa}$)

Fig. 7 Variation of spray cone angle and string cavitation of methanol with the needle motion in nozzle ($P_{\text{in}}=50\ \text{MPa}$)

2.2 喷嘴直径对喷嘴内甲醇空化流动及近场喷雾特性的影响

本研究基于表 1 所述的 I、II 及 III 号喷嘴开展了喷嘴直径对喷嘴内甲醇空化流动及近场喷雾特性的影响。图 8 给出了不同喷嘴直径下,喷嘴针阀运动规律及喷嘴外近场喷雾特性。其中,喷射压力为 50 MPa,喷射脉宽为 4 200 μs 。对比针阀升程曲线可知,在相同的喷射压力下,喷嘴的喷嘴直径直接影响甲醇喷射器针阀运动规律。喷嘴直径增大,将导致喷射器针阀抬升速率降低,针阀处于最大升程的持续期减小,对于较大孔径喷嘴(0.40 mm)而言,针阀甚至难以完全抬起,针阀能达到的最大升程较小。喷油流量随喷嘴孔径的增大而增加是导致这一现象的主要原因。在喷射器进油管孔径保持不变的情况下,当喷嘴直径增大时,喷油流量显著上升,进而引发喷射器内部的压力动态变化。较大喷嘴在喷射过程中产生更高的瞬时流量,导致压力室内燃油压力迅速降低,最终导致针阀抬升过程中高压控制腔和弹簧力之和与针阀承压腔压力的差值减小,弹簧所受到的合力减小,针阀的升程速率下降^[25]。所以喷嘴直径越大,针阀完全开启的时间越小。由于针阀完全开启的时间不同,在相同的电磁阀激励时间下,针阀落座的时间不同,小孔径喷嘴针阀完全开启时间较长,其针阀落座需要更长的时间,因此其喷油持续期更长。此外,结合不同孔径压力室内线空化出现时间及近场喷雾锥角曲线可以发现,线空化出现频率和喷雾锥角随着喷嘴孔径的增加呈现出了非单调的变化。在 0.20 mm 孔径喷嘴中,稳定持续的线空化仅出现在针阀下落到一定位置后,在其他时段,0.2 mm 孔径喷嘴压力室内的线空化极不稳定,喷雾锥角较小;而在 0.3 和 0.4 mm 孔径的喷嘴中,线空化在针阀抬起与落座的一定时间段内稳定存在,喷嘴的近场喷雾锥角较大;同时,0.3 mm 孔径喷嘴

中的线空化持续时间最长且出现时间最早,整个喷射过程中的近场喷雾锥角也相对最大。

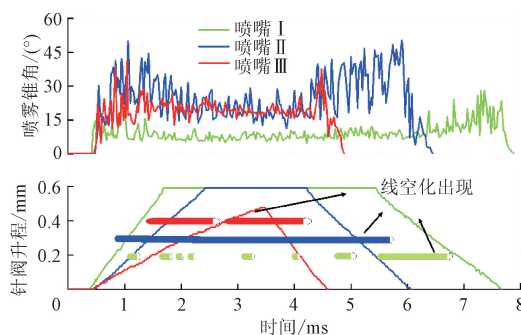
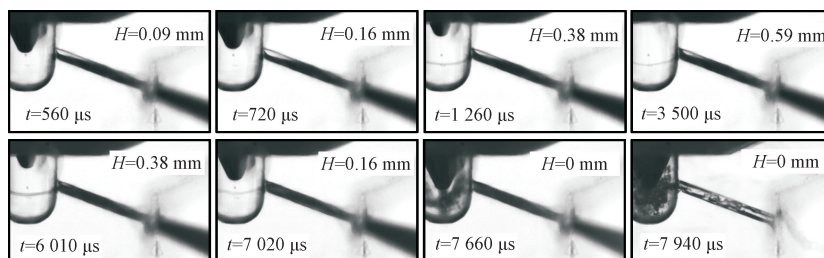


图 8 喷嘴直径对喷嘴的针阀升程、线空化及喷雾锥角特性的影响($P_{in}=50\text{ MPa}$)

Fig. 8 Effects of nozzle hole diameter on needle lift, string cavitation and spray ($P_{in}=50\text{ MPa}$)

图 9 展示了随针阀运动不同孔径喷嘴内部流动及近场射流破碎特性典型图像。结合图 8 与图 9 可以看出,在较小孔径喷嘴(0.20 mm)内,喷嘴压力室内的甲醇流动较为平稳,孔与孔间的涡流强度弱,因此喷嘴压力室内的线空化较弱。这种微弱的线空化难以延伸至喷嘴出口,因此对喷嘴内部甲醇流动及喷雾特性影响不显著,导致该喷嘴的射流喷雾锥角较小。对于 0.3 mm 孔径喷嘴,其内部甲醇燃料流动具有更大的雷诺数,导致喷嘴压力室内旋涡流动加强,喷嘴内易形成强烈且稳定的孔间线空化,喷嘴近场喷雾锥角显著增大。然而,随着喷嘴直径进一步增大到 0.4 mm,较大的喷嘴入口直径改变了甲醇流入喷嘴的流道,导致喷嘴针阀抬起速率减缓,甲醇更为平滑流入喷嘴,流动分离减弱,导致线空化初生临界针阀升程更高,且持续时间缩短。此外,从图 9 中喷嘴在针阀完全落座时刻的瞬时图像,以及图 8 所示喷雾锥角曲线可以看出,在针阀落座后,不同孔径的喷嘴均存在尾喷现象。这一现象与喷嘴内甲醇流动惯性及其剧烈汽化产生的高压有关。



(a) I 号喷嘴($D=0.20\text{ mm}$)

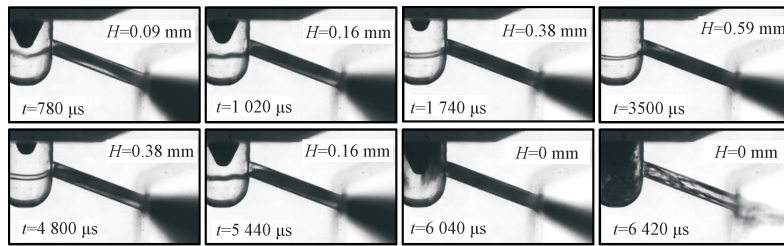
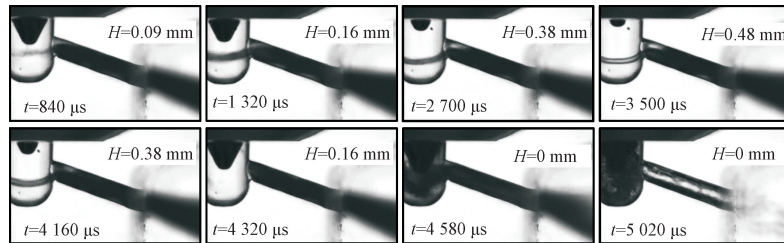
(b) II 号喷嘴 ($D=0.30$ mm)(c) III 号喷嘴 ($D=0.40$ mm)

图 9 不同孔径喷嘴内甲醇空化流动的瞬态特性

Fig. 9 Transient characteristics of methanol cavitation flow in nozzles with different orifice diameters

图 10 给出了孔径为 0.2 及 0.3 mm 两个喷嘴针阀落座后的近场喷雾宏观特性图像,图 10 中 $T=0 \mu\text{s}$ 时刻表示针阀完全闭合后尾喷的初始时刻。可以看出,0.20 mm 孔径的喷嘴尾喷持续时间比 0.30 mm 孔径喷嘴短 $60 \mu\text{s}$ 。这是多种原因共同作用的结果,在相同喷射压力下,小孔径喷嘴的单位时间喷油量较少,针阀闭合后残余动能较低,而大孔径喷嘴喷出燃料量大、动量强,易于维持更长的尾喷时间。随着喷孔变小,流通面积减小,针阀落座瞬间需要切断的液柱体积随之下降,有利于更快完成液柱剪切,从而快速终止燃油喷射。较小孔径增大了出口处的流动阻力,使得落座后内部高压难以继续驱动液体喷出,从而有效抑制尾喷过程。考虑到甲醇本身具有较低

的黏度与表面张力,在尾喷末期,喷出液体易拉伸成细长液丝,与较大孔径喷嘴(0.30 mm)相比,小孔径喷嘴结构增强了出口处的剪切力,对液体喷柱形成了更强的扰动作用,有助于抑制液丝的延展趋势,加快其断裂和消失过程。虽然较小的喷孔直径可以在几何尺度上增强毛细力的影响,但对于表面张力较低的甲醇而言,毛细效应不足以维持液柱在喷孔中的稳定延伸。当针阀落座后,小孔径喷孔内残余液体在毛细力和孔壁润湿作用的共同影响下,往往不会继续以液丝形式喷出,而是更倾向于附着在喷孔内壁或被孔口张力吸回腔体内部,这种“回缩”机制抑制了尾喷液丝的进一步延伸,促使尾喷迅速中断。因此,减小孔径可导致尾喷持续期的缩短。

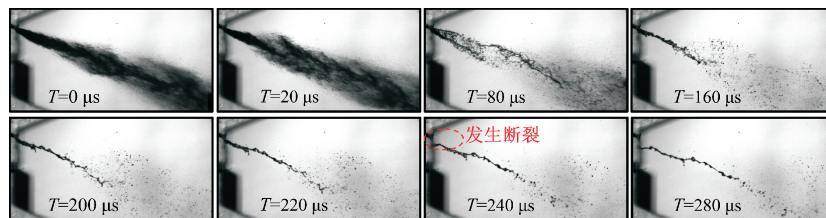
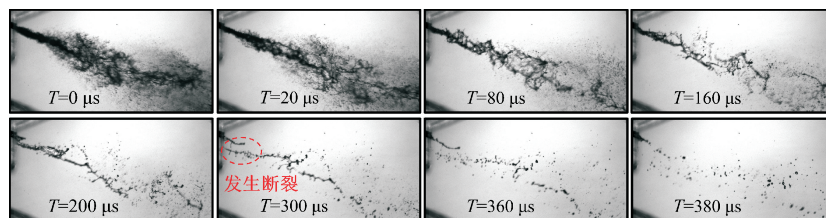
(a) I 号喷嘴 ($D=0.20$ mm)(b) II 号喷嘴 ($D=0.30$ mm)

图 10 尾喷阶段不同孔径喷嘴中甲醇近场喷雾瞬态图像

Fig. 10 Transient near-field spray images of methanol in nozzles with different orifice diameters during the end-of-injection stage

3 结 论

本文基于自行搭建的甲醇高压共轨透明喷嘴试验平台,采用自主开发的背光均光成像技术,结合高强度同步频闪光源,针对不同孔径喷嘴内部甲醇流动与近场喷雾特性开展可视化试验研究,观察到甲醇空化与喷雾锥角、尾喷特性之间的演化过程,系统分析了喷嘴孔径对喷嘴内甲醇空化流动及喷雾特性的影响规律,为揭示其雾化机制提供了关键理论依据。主要结论如下。

(1)随着针阀开启,由于喷孔入口处流道收缩及高流速诱发低压区,几何空化迅速形成,并在剪切扰动作用下发展为超空化,随后喷嘴压力室内逐渐形成持续的线空化,同时空泡在旋涡核心处聚集,表现出明显的几何空化团聚行为,揭示了空化演化过程中几何诱导与旋涡结构的协同机制。

(2)一次甲醇高压喷射过程可划分为喷射初期、喷射稳定阶段、针阀落座阶段及尾喷阶段4个阶段。其中喷射初期及针阀落座阶段,空化现象强烈且不稳定,导致喷雾锥角增大。此外,喷雾锥角的变化滞后于针阀运动,表明喷腔内部流动对外部喷雾行为具有非同步控制特征。

(3)喷孔直径增大导致喷嘴内线空化强度先增大后减小。小孔径喷嘴结构增强了出口的剪切力,对于甲醇燃料细长液丝型的尾喷有着更强的扰动作用,尾喷时间较短。相反,大孔径喷嘴喷流更稳定,难以维持高剪切扰动,导致尾喷时间延长。

参考文献:

- [1] REITZ R D, OGAWA H, PAYRI R, et al. IJER editorial: the future of the internal combustion engine [J]. International Journal of Engine Research, 2020, 21 (1): 3-10.
- [2] AAKKO-SAKSA P T, LEHTORANTA K, KUITTINEN N, et al. Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines: current trends and future options [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2023, 94: 101055.
- [3] KUBIK A, TURON K, FOLEGA P, et al. CO₂ emissions: evidence from internal combustion and electric engine vehicles from car-sharing systems [J]. Energies, 2023, 16(5): 2185.
- [4] SAINI H, RAMA RAO T, SAINI S, et al. Well-to-wheel performance of internal combustion engine vehicles and electric vehicles-study for future Indian market [J]. Energy Sources: Part A Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45(1): 2089-2111.
- [5] PAN Shiyu, ZABED H M, WEI Yutuo, et al. Technoeconomic and environmental perspectives of biofuel production from sugarcane bagasse: current status, challenges and future outlook [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 188(Part B): 115684.
- [6] CHENG Chong, FAURSKOV CORDTZ R, DYHR-PEDERSEN T, et al. Investigation of combustion characteristics, physical and chemical ignition delay of methanol fuel in a heavy-duty turbo-charged compression ignition engine [J]. Fuel, 2023, 348: 128536.
- [7] WEN Huabing, YU Yue, LI Jingrui, et al. Numerical investigation on the influence of injection location and injection strategy on a high-pressure direct injection diesel/methanol dual-fuel engine [J]. Energies, 2023, 16(11): 4518.
- [8] JAMROZIK A, TUTAK W, PYRC M, et al. Experimental investigations on combustion, performance, and emission characteristics of stationary CI engine fueled with diesel-methanol and biodiesel-methanol blends [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2017, 36 (4): 1151-1163.
- [9] LI Zhiyong, WANG Yang, YIN Zibin, et al. An exploratory numerical study of a diesel/methanol dual-fuel injector: effects of nozzle number, nozzle diameter and spray spacial angle on a diesel/methanol dual-fuel direct injection engine [J]. Fuel, 2022, 318: 123700.
- [10] 李智勇. 柴油引燃缸内直喷甲醇发动机燃烧过程及排放的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [11] VERHELST S, TURNER J W G, SILEGHEM L, et al. Methanol as a fuel for internal combustion engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 70: 43-88.
- [12] WANG Yang, XIAO Ge, LI Bo, et al. Study on the performance of diesel-methanol diffusion combustion with dual-direct injection system on a high-speed light-duty engine [J]. Fuel, 2022, 317: 123414.
- [13] YANG Yong, LONG Wuqiang, DONG Pengbo, et al. Performance of large-bore methanol/diesel dual direct injection engine applying asymmetrical diesel nozzle strategies [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 244: 122674.
- [14] HE Zhixia, GUO Genmiao, TAO Xicheng, et al. Study of the effect of nozzle hole shape on internal flow and spray characteristics [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 71: 1-8.

- [15] CHEN Zhou, HE Zhixia, SHANG Weiwei, et al. Experimental study on the effect of nozzle geometry on string cavitation in real-size optical diesel nozzles and spray characteristics [J]. *Fuel*, 2018, 232: 562-571.
- [16] GUO Genmiao, BAI Tianyang, HE Zhixia, et al. Assessment of influences of needle lift and hole height on string cavitation in liquid injection [J]. *Fuel*, 2023, 347: 128386.
- [17] 郭根苗, 白天阳, 邵壮, 等. 喷孔锥度和燃油温度对柴油喷嘴内空化流动特性的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(8): 131-140.
- GUO Genmiao, BAI Tianyang, SHAO Zhuang, et al. Effects of hole taper coefficients and diesel temperatures on in-nozzle cavitation [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(8): 131-140.
- [18] WEI Yunpeng, FAN Liyun, ZHANG Hanwen, et al. Experimental investigations into the effects of string cavitation on diesel nozzle internal flow and near field spray dynamics under different injection control strategies [J]. *Fuel*, 2022, 309: 122021.
- [19] HU Bihe, HE Zhixia, LI Chen, et al. Study of the effect of cavitation flow patterns in diesel injector nozzles on near-field spray atomization characteristics using a LES-VOF method [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2024, 174: 104791.
- [20] ZHU Yuejian, WANG Yanxia, WANG Yannian. Research on the internal flow and cavitation characteristics of petal bionic nozzles based on methanol low-pressure injection [J]. *Energies*, 2024, 17(22): 5612.
- [21] 何志霞, 张鑫, 陶希成, 等. 燃油温度对柴油喷射过程影响的试验 [J]. *内燃机学报*, 2017, 35(5): 399-405.
- HE Zhixia, ZHANG Xin, TAO Xicheng, et al. Experimental study into effects of fuel temperature on diesel injection process [J]. *Transactions of CSICE*, 2017, 35(5): 399-405.
- [22] 陈舟, 何志霞, 郭根苗, 等. 柴油机锥度孔喷嘴内线空化及初始气泡对喷雾形态影响的可视化研究 [J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(4): 953-959.
- CHEN Zhou, HE Zhixia, GUO Genmiao, et al. Visual experiment of the effects of string cavitation and stagnant bubbles on spray characteristics in tapered diesel nozzle [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(4): 953-959.
- [23] 徐硕涵, 赵凯, 白天阳, 等. 喷嘴内流影响下的喷油器性能参数敏感性分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2025, 59(5): 189-197.
- XU Shuohan, ZHAO Kai, BAI Tianyang, et al. Parameters sensitivity analysis of injector performance with the effect of nozzle internal flows [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025, 59(5): 189-197.
- [24] PAYRI R, SALVADOR F J, GIMENO J, et al. The effect of temperature and pressure on thermodynamic properties of diesel and biodiesel fuels [J]. *Fuel*, 2011, 90(3): 1172-1180.
- [25] CAO Tianyi, HE Zhixia, ZHOU Han, et al. Experimental study on the effect of vortex cavitation in scaled-up diesel injector nozzles and spray characteristics [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 113: 110016.

(编辑 武红江)