

喷孔空化特性和近孔初始射流结构研究

高永强^{1,2} 魏明锐^{1,2} LI Fan³ 颜伏伍^{1,2} 郭冠伦^{1,2}

(1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070;
2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070;
3. 伦敦玛丽女王大学材料与工程学院, 伦敦 E1 4NS)

摘要: 设计了透明的有机玻璃喷嘴头部代替原喷油器的压力室和喷孔,在高压共轨试验台架上搭建了喷油器孔内流动和近孔喷雾可视化试验装置,采用高速可控闪光摄影与长距离显微成像技术相结合方法,获得了喷孔内部空化流动和近孔区域初始射流结构形态的发展过程图像。结果表明,所有试验喷孔内均呈现空化流动,空化强度和空化类型与针阀升程和喷油压力有关,喷油压力越高,对应空化初生的喷油时刻越早,并且空化类型在喷孔内出现的频率和时间也不同;喷油前喷孔内存在初始气泡,初始气泡大小不同导致了近孔区域初始射流结构不同。基于大涡模拟 (Large eddy simulation, LES) 和界面追踪法 (Volume of fluid, VOF) 多相流模型,根据喷嘴内部几何形状和试验条件,模拟计算喷孔内初始气泡的演变过程以及初始射流结构形态的形成发展过程,试验结果与模拟结果相符。

关键词: 喷油器; 空化; 初始气泡; 初始射流; 大涡模拟

中图分类号: TK428.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)09-0369-08

Cavitation Characteristic Inside Nozzle and Near-nozzle Initial Spray Structure

GAO Yongqiang^{1,2} WEI Mingrui^{1,2} LI Fan³ YAN Fuwu^{1,2} GUO Guanlun^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan 430070, China
3. School of Materials and Engineering, Queen Mary University of London, London E1 4NS, UK)

Abstract: A transparent nozzle was designed to replace the sac and orifice of the original injector. Visualization experimental apparatus with a long distance microscope together with an ultrahigh speed CCD camera was employed to study the cavitation characteristic in the nozzle and the initial spray structure in the near nozzle region by photography technique with the help of backlighting. High spatial and temporal resolutions allowed a detailed observation of the very emergence of fuel from the nozzle orifice to the outside of nozzle. The experimental results showed that the residual fuel and initial bubbles were trapped in the injector hole after the end of injection, which had an important effect on the initial spray structure of the next injection. The cavitation was related to the needle lift and the injection pressure, and it was found that higher injection pressure led to earlier cavitation inception. Moreover, the types of free cavitation, cloud cavitation and string cavitation were also observed. In addition, based on the large eddy simulation (LES) and volume of fluid (VOF) multiphase flow model, the evolution of the initial bubble in the injection hole and the formation of the initial spray structure were simulated. The computational domain and settings mimicked the experimental injector internal geometry and experimental operating conditions. The initial bubbles inside the injector influenced the spray structure and could be a source of the observed deviation between experimental and numerical results. But the experimental results were basically consistent with the simulation results.

Key words: injector; cavitation; initial bubbles; initial spray; large eddy simulation

收稿日期: 2017-03-25 修回日期: 2017-04-20
基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130143110009)
作者简介: 高永强(1971—),男,博士生,主要从事动力机械与工程研究,E-mail: gaoyq518@163.com
通信作者: 魏明锐(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事内燃机排放与控制技术研究,E-mail: weimingrui@whut.edu.cn

引言

燃油射流是喷雾燃烧的重要子过程,其破碎机理的研究是一个难度较大的课题。对柴油机喷油器雾化的相关试验及模拟研究,长期以来受到国内外学者的高度重视,但由于计算机性能和试验条件的限制,人们至今尚未全面理解燃油雾化机理,特别是对近孔稠密段初始射流破碎机理的认识远不完善。

研究喷嘴内空化特性对揭示初次雾化机理,掌握雾化完整过程非常重要。文献[1-3]研究结果显示,喷孔内空化特性对燃油一次雾化具有重要影响,能够改变射流的雾化特性,增大喷雾锥角,减小燃油液滴粒径,粒径分布更加均匀及缩短射流的破碎长度。文献[4-7]采用高速数码摄影与长距离显微成像技术相结合等方法分别对喷孔流动特性或近孔区域射流结构进行可视化研究,分析燃油雾化机理的影响因素。早在 1999 年,BADOCK 等^[8]就发现在燃油喷射结束阶段,针阀开始关闭,有大气泡倒吸进入喷孔,甚至会进入压力室。随后,JIANG 等^[9]在可视化喷嘴喷射试验中也发现,在喷射结束阶段存在连续气泡柱或多气泡等现象。KOUKOUVINIS 等^[10]也发现在针阀刚抬起阶段,喷嘴出口发现了倒流现象。前一次喷射结束阶段的气泡倒吸会对下一次燃油喷射初次雾化产生重大影响。高压共轨燃油喷射、电控燃油喷射更多的采用多次喷射技术,初始气泡对下一次燃油喷射过程影响的研究显得非常重要。

本文搭建可视化试验平台,采用有机玻璃加工透明的压力室和喷孔代替原喷油器的压力室和喷孔,利用高速可控闪光摄影技术与长距离显微成像相结合,对柴油机喷孔内部空化特性和近孔区域初始射流结构形式进行可视化研究,获得高分辨率的喷孔内空穴流动和近孔区域初始射流结构流动图像。基于大涡模拟 (LES) 耦合 Schnerr-Saurer 空化模型和 VOF 多相流模型,开展喷孔内空穴流动、初始气泡演变和近孔区域初始射流形态形成过程的数值模拟。

1 试验装置与原理

1.1 试验装置理论基础

试验装置如图 1 所示,主要包括:燃油供给系统、成像同步装置和图像采集系统。燃油供给系统主要为试验提供多种喷射条件,为高压共轨管提供稳定的喷油压力,保证喷油器在给定的喷油脉宽和喷油频率下可靠工作。主要由输油泵、滤清器、冷却器、共轨管、控制单元 (Electronic control unit, ECU)

以及喷油器组成。喷油器为商用 BOSCH 电磁式喷油器,试验中将实际喷油器的球头部分 (压力室和喷孔) 磨去,用透明有机玻璃加工了含压力室和喷孔的结构部件,并用丙烯酸酯胶粘剂 (AB 胶) 将透明喷孔与喷油器本体粘合,组成透明喷嘴,如图 2 所示。有机玻璃具有极佳的透光率,透光率可达 92% 以上,同时还具有较高机械强度和韧性,更为重要的是其折射率与柴油的折射率接近。相同的折射率可消除透明材料对成像的影响,使拍摄到的图像能真实反映孔内流体形态。透明喷嘴结构参数如表 1 所示。

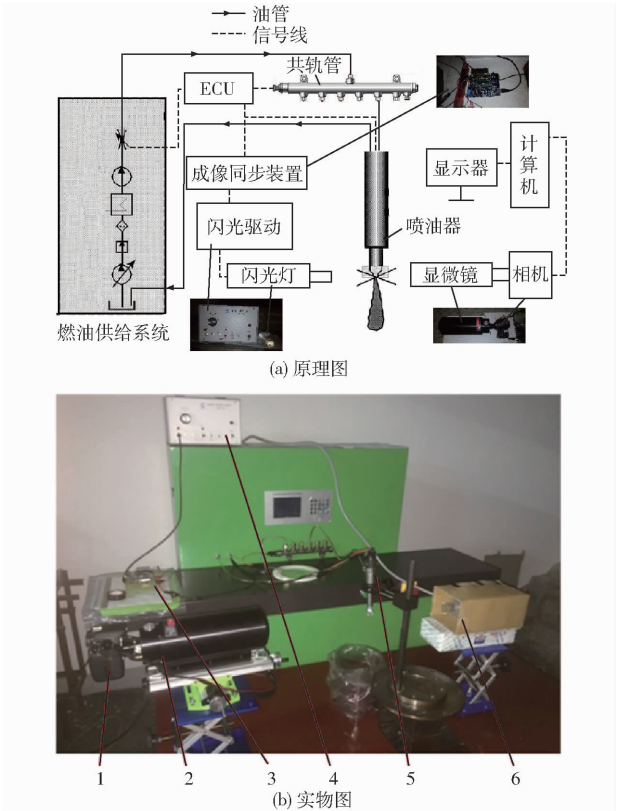


图 1 可视化试验台

Fig. 1 Visualization system platform

1. 相机 2. 显微镜 3. 成像同步装置 4. 闪光灯驱动 5. 喷油器 6. 闪光灯

成像同步装置主要由 32 MHz 的主控芯片 Freescale MC9S12XDP512 型和 2 个固态继电器组成。固态继电器 1 接收到喷油 (输入) 信号后传给单片机控制板进行处理,输出信号经固态继电器 2 输出给闪光灯驱动器,启动闪光灯。成像同步装置的主要作用是让喷油信号和图像采集信号进行同步,因为喷油器接收到喷油信号时不能立刻喷油,它们之间有个时间延迟,让成像同步装置控制这个延时时间,来获得不同时刻的喷孔内部流动和近孔区域喷雾图像。

图像采集系统主要由相机、镜头转接环 (自制)、长距离显微镜和闪光灯组成。相机采用佳能

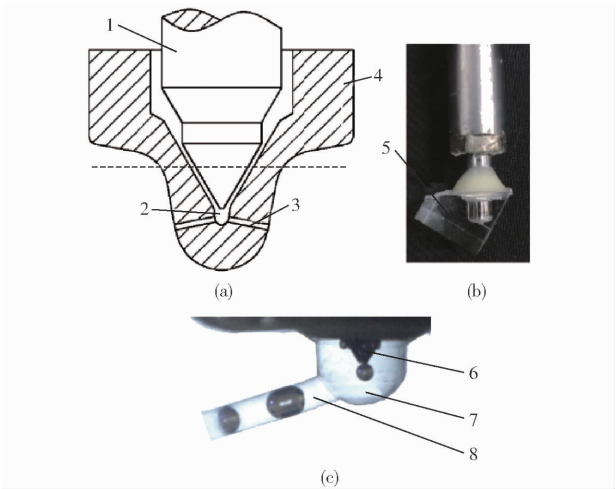


图 2 透明喷嘴头部结构示意图

Fig. 2 Transparent nozzle structure diagram

1、6. 针阀 2、7. 压力室 3、8. 喷孔 4. 本体 5. 有机玻璃

表 1 透明喷嘴参数

Tab. 1 Experiment parameters of transparent nozzle

参数	数值
喷孔直径/mm	0.4
喷孔长度/mm	2
工作介质	柴油
启喷压力/MPa	40、50、60
背压/MPa	0.1
喷油脉宽/ μs	1 000
喷油频率/Hz	1

(EOS 700D 型) 数码单反相机, 镜头转接环将相机和长距离显微镜连接起来, 用长距离显微镜代替原相机镜头。长距离显微镜 (QM - 100 型, QUESTAR) 主要对微小喷孔进行放大, 最高放大率可达 381 倍, 而且具有极高的分辨率, 分辨率为 $1.1\text{ }\mu\text{m}$, 工作距离在 15 ~ 35 cm 之间, 视场直径在 0.375 ~ 8.0 mm 之间。闪光灯可为试验提供闪光脉冲, 主要用于相机曝光, 闪光灯由高速闪光驱动器 (NP - 1A 型) 和灯体 (NPL - 5 型) 组成, 单次闪光持续时间可达 ns 级。曝光时间越短, 拍摄图片就越清晰, 若能达到脉冲激光器的 ns 级, 图片基本不模糊, 形如流场“冻结”。本次试验闪光灯单次闪光持续时间为 180 ns。

1.2 试验原理

如图 1 所示, 开启燃油供给系统, 将闪光灯与相机分别置于喷油器透明喷孔的两侧, 在黑暗环境下, 调节好显微镜焦距后打开相机 B 快门, 立刻开启成像同步装置的喷油信号, 进行延迟后输出信号给闪光灯驱动器, 触发闪光灯闪光, 完成一次拍摄, 关闭相机 B 快门。然后再调节延迟时间进行下一次拍摄, 通过对同一基准信号进行不同时间延时, 可以拍

摄到不同喷油循环的整个喷油过程。虽然拍摄的图像不是同一个喷油循环, 但可以对每一时刻进行多次拍摄, 以消除喷油循环变动对喷油过程的影响。试验用燃油采用市场销售的 0 号柴油, 柴油的理化特性如表 2 所示。

表 2 柴油物性参数

Tab. 2 Parameters of diesel

参数	数值
温度 T/K	293
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	840
运动黏度 $\mu/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	6.0×10^{-6}
饱和蒸气压 p_V/Pa	892
表面张力系数 $\sigma/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	0.261

2 数值模拟

基于 OpenFOAM 软件, 采用 LES 和 VOF 多相流模型, 并且添加 Schnerr - Saurer 空化模型展开对喷孔内空穴流动、初始气泡的演变和近孔初始射流结构的形成发展过程的模拟研究。大涡模拟 LES 耦合 Schnerr - Saurer 空化模型对孔内空穴流动以及近孔区域喷雾过程的研究可参见文献[11 - 12]。

计算域采用喷嘴透明部分的压力室和喷孔, 模拟试验条件下燃油流经压力室和喷孔喷入静止定容室的过程。喷嘴结构尺寸、边界条件和燃油物性参数与试验完全一致。为了减小计算量, 数值模拟计算区域上游边界取压力室上端, 模拟过程中喷嘴针阀固定于最高位置。考虑到喷雾三维结构的非对称性, 因此在汽车建模软件 (Integrated computer engineering and manufacturing, ICEM) 中划分了单孔喷嘴模型整个 360° 的喷嘴内部和定容室作为模拟计算的计算域, 如图 3 所示。为了更接近真实的燃油喷射过程, 设置初始燃油充满喷孔 4/5 的长度。虽然这样的设置有很大的主观因素, 但是从文献[13]中可知, 这样的设置在一定程度上是有意义的。

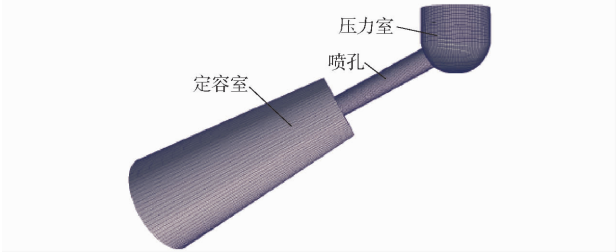


图 3 计算域和网格

Fig. 3 Calculation domain and mesh

3 结果与分析

3.1 试验结果与分析

3.1.1 喷孔内空化特性

图 4 所示为喷油压力为 40 MPa 时不同喷油时

刻喷孔内空穴流动图像。喷孔内颜色较黑区域为空穴区域,因为当喷孔内部产生相变时,光穿过有机玻璃再照射到空穴气泡表面后会发生散射,空穴区域最终在图片上显示为较深颜色。喷油初期,喷油器针阀升起后首先观测到压力室内针阀附近出现絮状的空穴气泡(图 4b),随后空穴气泡到达喷孔入口处(图 4c),再后空穴向喷孔出口处延伸、发展。产生这种现象主要原因是当喷油器针阀开启后,针阀的运动对压力室内的燃油产生一定扰动,当燃油以较高速度进入压力较低的压力室内时便产生空穴气泡。另外,在 15 μs 时,可观测到很少出现的线空化。随着喷油进行,空穴区域不断扩大,燃油流动向喷孔出口处扩散。原因是随着针阀开启增大,燃油流动速度增大,且在喷孔入口处由于流动截面收缩,使流速进一步增加,根据伯努利方程流速增大同时压力减小,因此空穴气泡随着燃油喷射进行逐渐加强,喷孔内出现片空化,片空化脱落形成云空化。此外,云空化的脱落同时伴随着涡脱落。同时,还观测到压力室内空穴气泡由于针阀升程增加,流动趋于稳定而空穴逐渐减少和消失。但在 800 μs 以后针阀开始关闭过程,随着针阀的下降,喷孔内流速也开始降低,这时压力室内又出现空穴气泡,喷孔内空化强度开始慢慢减弱,最后空穴从孔壁脱落,形成云空化状。

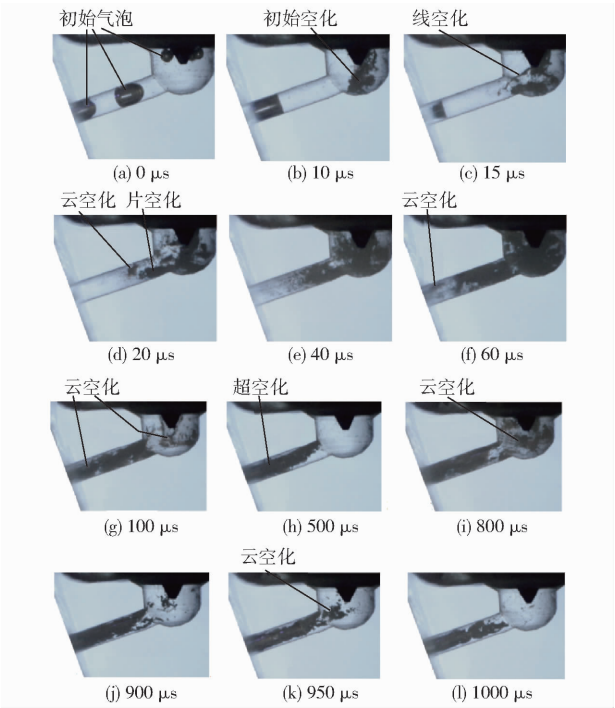


图 4 喷油压力 40 MPa 时喷孔内空化图像
Fig. 4 Cavitation images in-nozzle at 40 MPa

图 5 为不同喷射压力下喷孔内空化流动图像,在喷油初期喷油压力越高,喷孔口入口处空穴出现越早,空穴强度越强。而在空穴发展阶段,能够观测

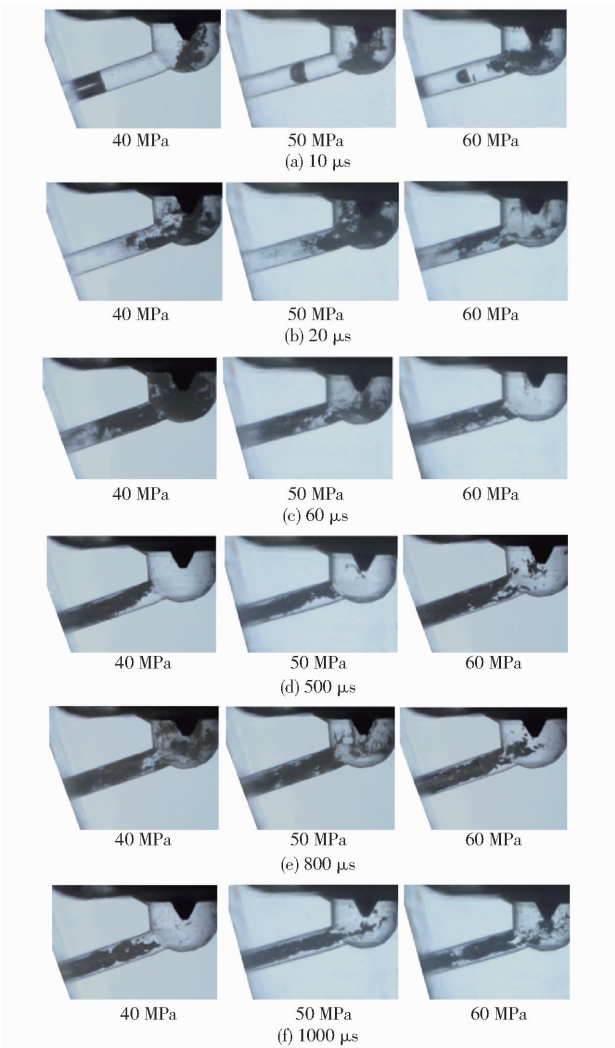


图 5 不同喷油压力下喷孔内空化图像
Fig. 5 Cavitation flow images in-nozzle at different pressures

到片空化、云空化和线空化各类特征的空化现象,但他们出现的时刻和位置稍有不同。因此,可以认为喷油压力影响喷孔内空化特性。

图 6 为不同压力下针阀升程曲线,从图中可以看出,较高喷油压力针阀升程速度也较快,针阀开启速度不同导致对压力室的扰动不同,因此压力室内产生的空化结构也不同。相同针阀升程下,喷油压力越高,燃油进入压力室内产生的漩涡流动越强烈,从而空化效应越强。为了对比喷油压力对空化结构的影响,选择每个喷射压力下连续拍摄的图片各 600 幅进行统计,结果如图 7 所示。由图 7 可知,在相同喷油压力下,虽然不同的空化结构在喷孔内出现概率不同,但概率都随着喷油压力的增大而增大。研究表明^[14-15],喷孔入口处的锐边拐角产生流动分离,该处首先形成空化区域,随后流体的再附着和空穴气泡的溃灭相结合产生回流,使片空化脱落形成云空化,云空化继续脱落同时伴随着涡脱落,空化脱落并在喷孔出口附近溃灭释放能量,将会对喷雾特性产生重大影响。线空化的出现与漩涡流动结构关

系十分密切,由图 7 还可看出,随着喷射压力的增大,线空化出现的频率增大,较高的喷射压力促进了线空化的发生和发展。在大的喷射压力下,喷孔内的流动更加紊乱,更易形成漩涡流动结构,有利于提高燃油的雾化质量。

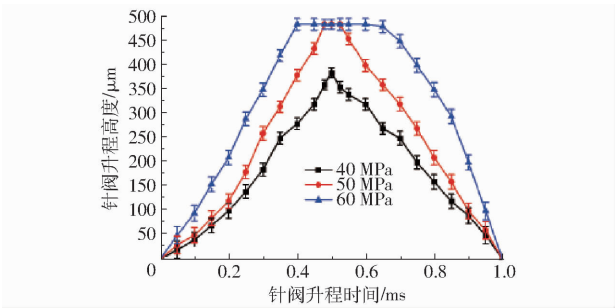


图 6 不同喷油压力下针阀升程曲线

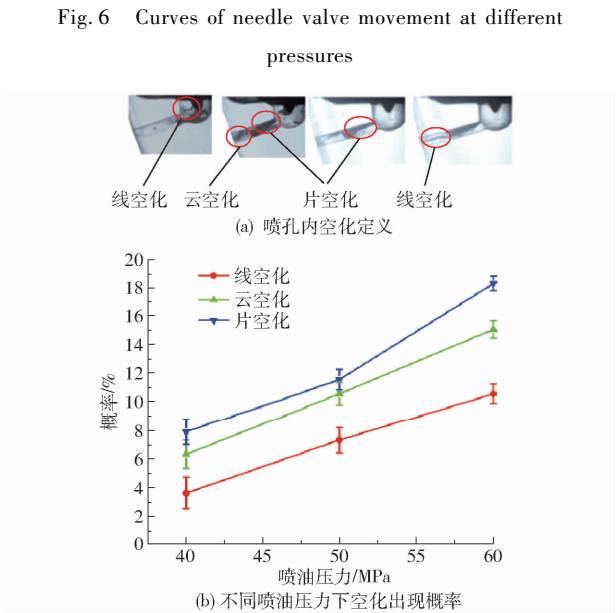


图 7 喷孔内空化类型定义与出现概率

Fig. 7 Definition of different cavitations inside nozzle and probability

3.1.2 近孔区域初始射流结构形态

研究孔内空化流动图像发现,在每次喷油开始时,可观测到喷孔内仍然有少量空穴气泡,它们主要有 2 种形态:喷孔出口处非封闭气泡(气膜)和喷孔内完整的空穴气泡,如图 8 所示。孔内这些初始气泡主要来源有以下 2 种情况,首先在喷油末期针阀突然关闭时,射流由于惯性继续从喷孔喷出,致使喷孔内出现局部低压区域而形成燃油蒸气(空化);其次是环境气体倒吸孔内形成初始气泡。图 9 为几种典型的近孔区域初始射流结构图像,仔细分析这些图像发现,近孔区域初始射流基本上可以分为 5 类,第 1 类是射流头部有一个“气泡”(图 9a),而且有一个“针形”液丝伸入空穴气泡内,这个气泡主要来源就是前述的由环境气体倒吸喷孔形成;第 2 类有一个“针形”液丝从主喷射流穿过(图 9b),形成“针

形”头部射流结构;第 3 类是射流头部形成“蘑菇形”结构形态(图 9c);第 4 类是在主喷射流前面形成一个“伞形”状头部射流结构,这个“伞形”结构的形状和大小各不相同(图 9d~9g);第 5 类就是射流头部周围被大量液丝和液滴包围(图 9h),这些液丝和液滴可能是孔内初始气泡溃灭所致。由于喷孔内初始气泡的存在,影响喷孔内流动初始扰动导致近孔初始射流结构变化,致使射流形成不稳定的表面波,表面波的发展和空穴气泡在射流表面的破碎,进一步加强了射流与空气的交互作用,促进了表面波的分裂和液丝的形成。

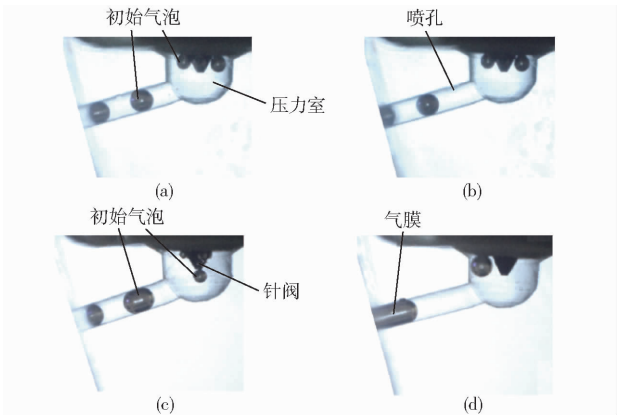


图 8 喷孔内初始气泡特征与位置

Fig. 8 Characteristics and positions of original bubbles inside nozzle

3.2 模拟结果分析

文献[4,8,16-20]研究表明,在燃油喷射结束阶段,针阀关闭后喷孔内有滞留气泡,均认为前一次喷射结束后孔内初始气泡必会对下一次燃油喷射初次射流结构产生重大影响。为了进一步验证试验结论的可靠性,本文对孔内初始气泡演变过程以及孔外初始射流的形成过程进行数值模拟。喷射初期在喷孔内设置直径小于喷孔直径的不同初始球形气泡,初始气泡的物性参数与背压腔内设置相同。初始气泡(直径为 0.1 mm)在喷孔位置如图 10a 所示(d 为喷孔直径, $4d$ 表示从喷孔进口到标注处距离), $0\ \mu\text{s}$ 对应燃油喷射且气泡刚要开始移动的时刻, $5\ \mu\text{s}$ 时喷孔内气泡受到上游燃油挤压变形,同时推动最下游燃油向喷孔出口流动, $10\ \mu\text{s}$ 时气泡呈现比较明显变形, $15\ \mu\text{s}$ 时可见初始气泡被上游高速燃油液丝穿过,将气泡分成 2 部分, $20\ \mu\text{s}$ 时穿过的燃油液丝在喷孔出口处基本形成射流头部结构形态, $25\ \mu\text{s}$ 以后液丝逐渐发展形成头部“伞形”结构。改变初始气泡直径(0.04 mm),喷孔内气泡演变过程以及近孔射流形态的形成过程如图 10b 所示。对比图 10a 发现当气泡直径变小时,近孔区域形成的射

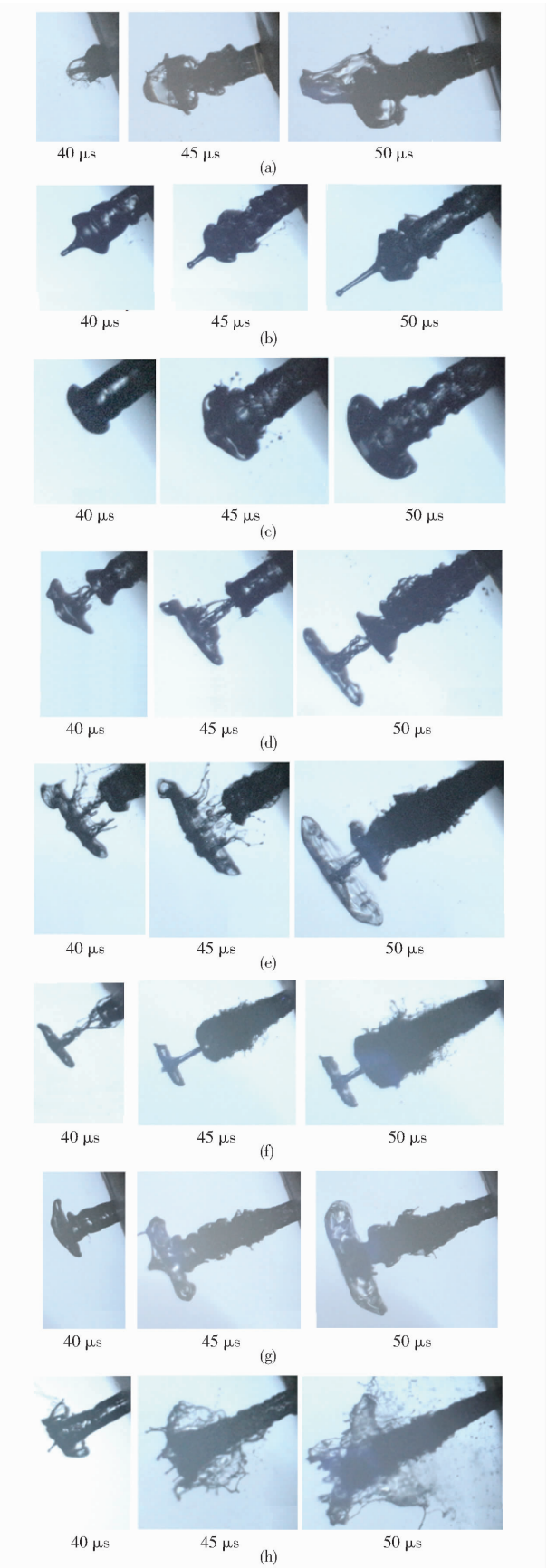


图9 喷油压力 40 MPa 时近孔典型初始射流结构形态
Fig.9 Near-nozzle typical spray structures under 40 MPa

流头部结构形态也随之变化,可以看出,由于初始气泡直径变小,近孔射流形态从“伞形”变成“针形”结

构。因此可以进一步验证图 9 所示各种初始射流结构形态是由喷孔内初始气泡引起。图 10c 所示为喷孔内没有气泡时近场区域射流结构形态演变过程,当喷孔内没有气泡时,近场区域喷雾结构头部没有出现图 10a 和 10b 所示的那种结构形态,只是射流结构在周围空气作用下,沿径向膨胀形成类似“蘑菇形”结构。

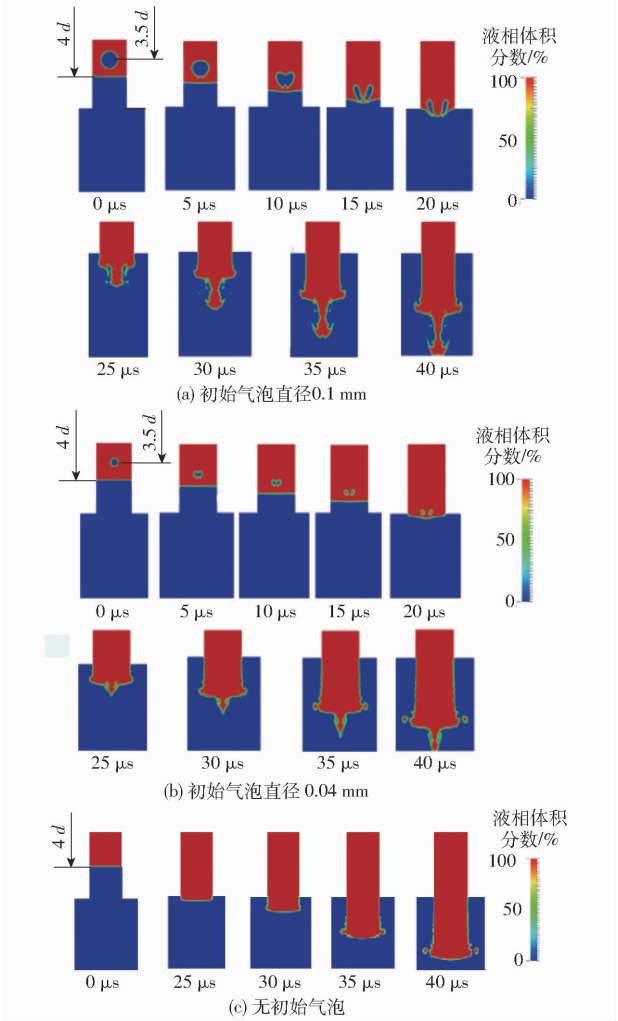


图 10 喷油压力 40 MPa 时初始气泡沿喷嘴轴线截面演变与初始射流结构形态形成
Fig.10 Distributions of initial bubble along axis cross section and formation initial spray structure at 40 MPa

综上所述,喷孔内初始气泡与近场区域喷雾结构有很大关系,喷孔内初始气泡影响初始射流结构,进而影响燃油的初次分裂以及随后的二次分裂雾化,促进燃油和空气的混合质量,这对于改善柴油机性能都是有利的。

3.3 试验结果与模拟结果比较

图 11 所示为近孔区域典型初始射流结构形态试验结果与数值模拟对比。从图 11 中可以看出试验值和模拟结果并不完全吻合,主要原因是模拟计算时设置的初始气泡并不完全与试验相同,而且在

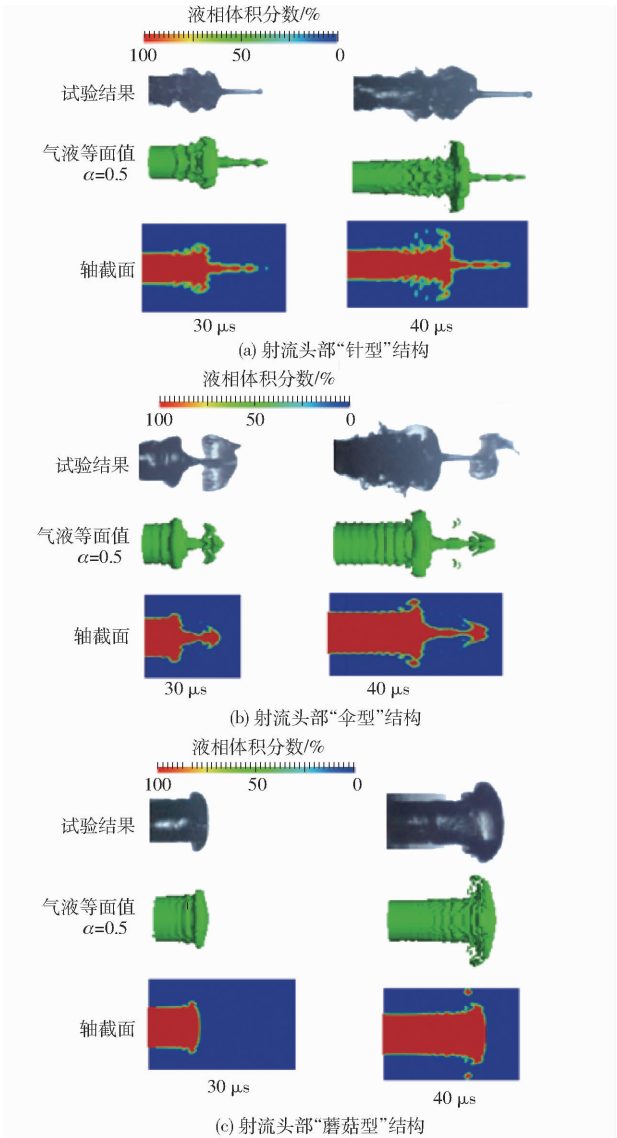


图 11 近孔区域典型射流结构试验与模拟结果对比

Fig. 11 Comparison of near nozzle spray structure of experimental and numerical results

试验时,喷孔内初始气泡不仅由空气气泡组成,还包括上次喷射结束时残余燃油和燃油蒸气(相变产生)。这些初始气泡的大小和初始位置也不确定,因此,数值模拟时很难做到与试验完全相同,这是试验观察到的现象和数值模拟结果之间偏差的主要原

因。但是,由图 11 可以看出,利用所建模型计算得到的孔内气泡演变和近孔初始射流形态形成过程与试验结果呈现出相同的变化趋势。

结合喷嘴内燃油流动分析可知,燃油喷嘴内初始气泡和空穴,对随后的喷雾过程产生不同的影响,喷嘴内初始气泡使得在喷射初期形成“伞形”或“针形”的初始射流结构;而喷孔内空化使燃油流动更加复杂,在喷孔出口处溃灭时产生的微射流、压力波等使燃油破碎,形成初始射流的扰动源,成为空化对初始喷雾过程影响的关键。燃油雾化是内燃机喷雾燃烧的重要子过程,其破碎机理的研究涉及流动过程中湍流问题、边界层问题,特别是对近嘴稠密段初始破碎机理的认识远不完善。通过对喷嘴内流动特性以及近孔区域初始射流的研究,获得喷嘴流动特性(初始气泡、空穴以及残余燃油)对近嘴区域初始射流的影响因素,可提升和完善长期以来人们对燃油液体射流稠密段的破碎机理现象学或半现象学模型的认识。

4 结论

(1)喷孔内均呈现空化流动,且空化强度和空化类型与针阀升程和喷油压力有关,喷油压力越高,对应空化初生的喷油时刻越早,并且空化类型在喷孔内出现频率和时间也不同。

(2)喷射结束后观测到喷孔内存在初始气泡,且每次观测到初始气泡大小和初始位置并不相同。初始气泡的存在会对下一次燃油喷射初次射流结构产生重大影响。

(3)数值模拟结果表明,若喷孔内存在不同的初始气泡时,近孔区域形成“针形”或“伞形”等不同的初始射流结构;若喷孔内没有初始气泡时,近孔区域形成“蘑菇形”结构的初始射流结构。

(4)数值模拟了试验条件下喷孔内初始气泡的演变过程以及近孔区域初始射流结构的形成过程,试验结果与模拟结果相符。

参 考 文 献

1 EMBERSON D, IHRACSKA B, IMRAN S, et al. Optical characterization of diesel and water emulsion fuel injection sprays using shadowgraphy [J]. Fuel, 2016, 172: 253 – 262.

2 SUH H, LEE C. Effect of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4): 1001 – 1009.

3 WANG F, HE Z, LIU J, et al. Diesel nozzle geometries on spray characteristics a spray model coupled with nozzle cavitating flow [J]. International Journal of Automotive Technology, 2015, 16(4): 539 – 549.

4 CYRIL C, MORGANN R. Microscopic imaging of the initial stage of diesel spray formation [J]. Fuel, 2015, 157: 140 – 150.

5 王铮昊,王谦,何志霞,等. 柴油喷雾近场初次破碎微观特性可视化试验研究[J]. 车用发动机,2014, 213(5):43 – 48.

WANG Zhenghao, WANG Qian, HE Zhixia, et al. Visual study on microscopic characteristics of diesel spray near-field primary breakup [J]. Vehicle Engine, 2014, 213(5): 43 – 48. (in Chinese)

- 6 徐阳杰,李国岫,虞育松,等. 喷孔直径对柴油射流雾化影响的实验研究[J]. 工程热物理学报,2015, 36(4):908-911.
XU Yangjie, LI Guoxiu, YU Yusong, et al. The experimental investigation on the diesel spray characteristics with various injector nozzle parameters [J]. Journal Engineering Thermophysics,2015, 36(4): 908-911. (in Chinese)
- 7 仇滔,宋鑫,雷艳,等. 柴油机喷孔内空化过程与流动特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2016, 47(9):359-365. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160948. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298. 2016. 09.048.
QIU Tao, SONG Xin, LEI Yan, et al. Cavitation process and flow characteristics inside diesel injector nozzle [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):359-365. (in Chinese)
- 8 BADOCK C, WIRTH R, FATH A, et al. Investigation of cavitation in real size diesel injection nozzles [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999,20(5): 538-544.
- 9 JIANG G, ZHANG Y, WEN H, et al. Study of the generated density of cavitation inside diesel nozzle using different fuels and nozzles [J]. Energy Conversion and Management,2015,103: 208-217.
- 10 KOUKOUVINIS P, GAVAISES M, LI J, et al. Large eddy simulation of diesel injector including cavitation effects and correlation to erosion damage[J]. Fuel, 2016, 175: 26-39.
- 11 YUAN W, SAUER J, SCHNERR G. Modeling and computation of unsteady cavitating flows in injection nozzles[J]. Mécanique & Industries ,2001,2(5):383-394.
- 12 高永强,魏明锐,颜伏伍,等. 喷孔几何特征对孔内流动及近孔区域燃油雾化的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016, 47(12):347-353. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161243. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298. 2016. 12.043.
GAO Yongqiang, WEI Mingrui, YAN Fuwu, et al. Influence of nozzle geometry on internal flow characteristics of injection nozzle and near nozzle region injection and atomization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):347-353. (in Chinese)
- 13 GHIJI M, GOLDSWORTHY L, BRANDNER P, et al. Analysis of diesel spray dynamics using a compressible Eulerian/VOF/LES model and microscopic shadowgraphy [J]. Fuel, 2017, 188: 352-366.
- 14 HE Z, CHEN Y, LENG X, et al. Experimental visualization and LES investigations on cloud cavitation shedding in a rectangular nozzle orifice [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016,76:108-116.
- 15 HE Z, GUO G, TAO X, et al. Study of the effect of nozzle hole shape on internal flow and spray characteristics[J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2016,71: 1-8.
- 16 WANG Z, WANG B, JIANG C, et al. Microscopic characterization of isooctane spray in the near field under flash boiling condition[J]. Applied Energy , 2016,180: 598-606.
- 17 MOON S, GAO Y, PARK S, et al. Effect of the number and position of nozzle holes on in- and near-nozzle dynamic characteristics of diesel injection [J]. Fuel, 2015, 150: 112-122.
- 18 HE Z, ZHANG Z, GUO G, et al. Visual experiment of transient cavitating flow characteristics in the real-size diesel injector nozzle[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 78: 13-20.
- 19 DING H, WANG Z, LI Y, et al. Initial dynamic development of fuel spray analyzed by ultra high speed imaging[J]. Fuel, 2016, 169: 99-110.
- 20 姜光军,张煜盛,MEDHAT E,等. 不同燃料的喷嘴内流动与喷雾形态可视化试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(5): 22-29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140504. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298. 2014. 05.004.
JIANG Guangjun, ZHANG Yusheng, MEDHAT E, et al. Visualization experiment of internal flow of nozzle and spray construction for various fuels[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):22-29. (in Chinese)