

背压对喷油嘴断油过程中气体倒流现象的影响

文 华¹ 王晨亮¹ MEDHAT Elkelawy² 姜光军¹

(1. 南昌大学机电工程学院, 南昌 330031; 2. 坦塔大学工学院, 坦塔 31111)

摘要: 基于流体体积 (VOF) 模型和动态重叠网格技术对针阀关闭过程的喷油嘴内流场进行了瞬态模拟, 分析发现在断油过程中, 喷油嘴压力室和喷孔入口两个位置都会发生空化现象, 与试验现象一致。计算得到的最大空化体积与倒流气体体积基本相等, 说明空化溃灭是造成外部气体倒流的主要原因。压力室内的空化溃灭是引起倒流气体进一步流入压力室的必要条件。进一步从理论推导出新的变量——空化数, 用以评估针阀关闭过程喷嘴内空化的程度, 得出背压增大, 断油过程的空化程度减弱, 使倒流的气体体积减少, 较好地解释了背压对气体倒流的影响规律。

关键词: 气体倒流; 喷油嘴; 数值模拟; 可视化试验; 背压; 空化

中图分类号: TK421.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0364-06

Influence of Ambient Pressure on Gas Ingestion in Diesel Nozzle after End of Injection

WEN Hua¹ WANG Chenliang¹ MEDHAT Elkelawy² JIANG Guangjun¹
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China
2. Faculty of Engineering, Tanta University, Tanta 31111, Egypt)

Abstract: For researching phenomena of the cavitation and the air ingestion in the nozzle under different ambient pressures, a visualization experiment with a transparent injector nozzle was carried out, which used the stroboscope, long-distance microscope, CCD camera, high-pressure spray chamber etc. The VOF method and the overset grid technology were used to simulate transient state flow in the spray orifice and the sac. The simulation results showed that the strong cavitation phenomenon would happen in the orifice and the sac of nozzle after the end of injection. The void volume of the cavitation bubble collapsing was filled with ingested air. And the cavitation volume was roughly equal to the ingested air volume based on the calculated data which can prove the conclusion. This showed that the cavitation collapse was the main cause of air ingestion. The cavitation collapse in the sac was a necessary condition for the ingestion air further flowing into the sac. And the smaller the cavitation area in the sac was, the less hot combustion gas was ingested into the sac. The cavitation number was proposed which represented the degree of cavitation in the nozzle after the end of injection. Further studies found that an increase in ambient pressure can cause the cavitation number to increase which led to the cavitation volume and the ingested air volume tend to decrease. And the cavitation number explained the influence of ambient pressure on air ingestion, and this was consistent with the experiment and simulation results.

Key words: air ingestion; nozzle; numerical simulation; visualization experiment; ambient pressure; cavitation

引言

柴油机的燃油喷雾特性对发动机的经济性、动力性、排放性能有重要影响, 而喷雾特性受到喷嘴内

部流场的影响^[1]。在不同比例尺寸的透明喷嘴喷射试验研究^[2-7]中发现, 稳定喷射阶段在喷孔入口处发生空化现象, 空化使喷孔流量系数降低, 并对射流雾化起到促进作用, 同时也指出放大喷嘴和实际

喷嘴内部的空化现象存在差异^[8]。随着多次喷射技术的广泛应用,针阀开启与关闭过程对应的非稳定喷射阶段所占的时间比重增大,国内外学者^[9-12]开始利用透明喷嘴研究针阀运动带来的影响。DUKE 等^[13-17]采用 X 射线相衬成像技术拍摄到实际喷嘴中喷孔内存在空化与气体倒流现象,并且发现针阀运动会射流雾化产生影响。本课题组^[18]利用高速频闪技术拍摄到实际尺寸透明喷嘴内的倒流气体现象,分析指出倒流气体量随燃料表面张力减小而增大。目前国内外的研究主要集中于稳态喷射时喷孔内部空化现象,对于喷嘴断油瞬态过程中的空化和气体倒流现象的机理分析以及背压对倒流现象的影响研究比较欠缺。本文对实际喷孔尺寸透明喷嘴进行可视化试验,基于流体体积 (Volume of fluid, VOF) 方法的多相流模型模拟喷嘴内部流场,采用重叠网格技术实现针阀运动,研究断油过程中背压对喷嘴内空化及气体倒流现象的影响。

1 不同背压下断油时喷嘴内流场试验

在喷嘴可视化试验装置基础上加装定容弹,通过改变定容弹压力实现喷嘴的背压调节。加工的透明喷嘴为轴对称直孔结构,孔径 0.2 mm,孔长约 1.3 mm。考虑到透明喷嘴材料强度较低,燃油喷射系统使用 0 号柴油,油轨压力设定为 30 MPa,分别对背压 p_b 为 0.1 MPa 和 1 MPa 条件下的喷嘴内部流动进行高速频闪拍摄,频闪仪闪光持续时间为 180 ns,有效地冻结了流场。试验结果如图 1 所示,拍摄时刻以针阀关闭时刻 (End of injection, EOI) 为时间参考点,图中黑色部分是由于气液界面对光散射造成的,可反映空化和倒流气泡界面。

0.1 MPa 背压条件下,在 EOI - 0.1 ms (处于针阀完全开启,稳定喷射时),孔内有部分空化;在 EOI 时由于针阀关闭产生的扰动和断油使得喷嘴内部产生的压力迅速降低而产生空化,导致喷孔和压力室内均产生较多的空化气泡;在 EOI + 0.2 ms 时,喷孔内的空化溃灭,使孔外环境气体倒流进入喷孔内;在 EOI + 0.4 ms 时,压力室内的空化进一步溃灭使已经进入喷孔内的环境气体倒流进入压力室;由于压力室内空化比较剧烈,在下次喷射开始时刻 (Start of injection, SOI),倒流气体还没有完全聚合成大气泡,但喷孔内已经形成较大的气泡。

1 MPa 背压条件下,在 EOI - 0.1 ms 时并没有明显空化现象;在 EOI 时,喷孔内发生一部分空化,压力室内几乎没有空化产生;这也使得在 EOI + 0.4 ms 只有少量气体倒流进入喷孔内,压力室内没有倒流

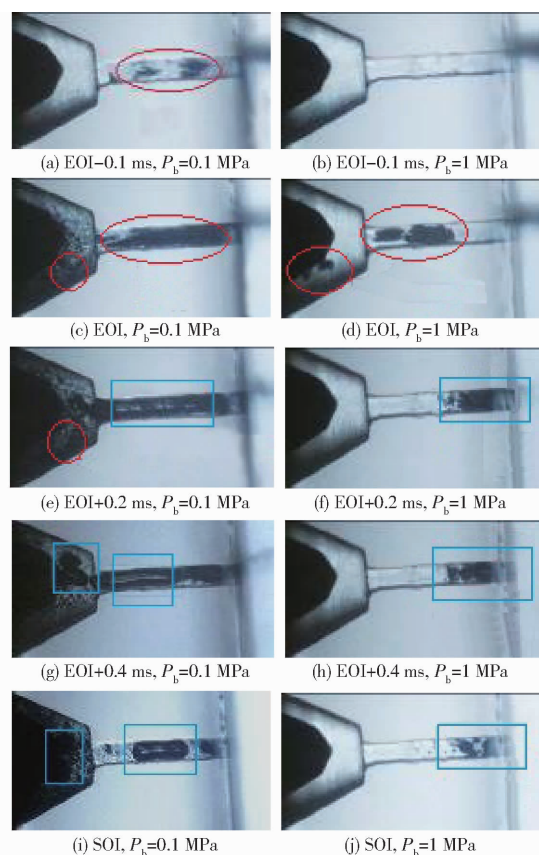


图 1 不同背压下断油时喷嘴内部流场 (圆圈为空化、方框为倒流气泡)

Fig. 1 Flow fields with different ambient pressures after end of injection (circles showed cavitation, boxes showed ingestion air)

气泡;最终形成的初始气泡只停留在喷孔入口附近。

试验结果显示,在针阀关闭时喷孔及压力室内部都迅速产生空化现象,空化溃灭后外部气体倒流进入喷嘴。对比 2 种背压条件下的试验现象,高背压条件下断油过程喷嘴内的空化区域较小,倒流气体体积也随之减小。

2 喷嘴内流场数值模拟

2.1 计算模型与边界设置

基于 VOF 模型和重叠网格技术,对断油过程喷嘴内的气-液-汽两相三组分瞬态湍流流动进行模拟。数学物理模型采用均相流模型框架下的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型、Sauer 空化相变模型和 Kistler 相界面接触角模型。

受透明喷嘴加工手段限制,制作的透明喷嘴和实际喷嘴压力室结构有些差异,故流场计算的几何模型采用文献[15]的单孔轴对称喷嘴。孔径 0.206 mm,孔长 1.16 mm,喷孔与针阀轴线夹角为 0°,压力室体积为 1.122 mm³。喷射流体为柴油,环境气体为空气,计算中流体为柴油,在常温下其密度为 840 kg/m³,运动粘度为 4.24 mm²/s,饱和蒸汽压

力为 0.27 kPa,表面张力为 0.027 8 N/m。

模拟中网格划分和边界设置如图 2 所示,为减少计算工作量,网格采用二维轴对称多面体网格。针阀运动使用重叠网格技术实现,针阀周围生成一套重叠网格,按图 3 所示的规律运动。每个时刻的流动区域由重叠网格、背景网格和壁面确定。当针阀间隙内的网格小于 2 层时,间隙中的网格不激活,即针阀关闭。流场入口和出口设为压力边界,入口压力 p_{inj} 为 50 MPa,出口背压 p_b 分别取 0.1、1.0、2.0 MPa。

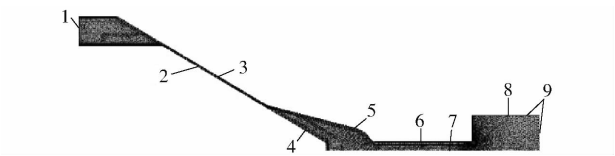


图 2 边界条件设定

Fig. 2 Boundary condition design

1. 燃油入口 2. 针阀 3. 阀座 4. 重叠区域 5. 压力室 6. 喷孔 7. 轴对称边界 8. 环境区域 9. 压力出口边界

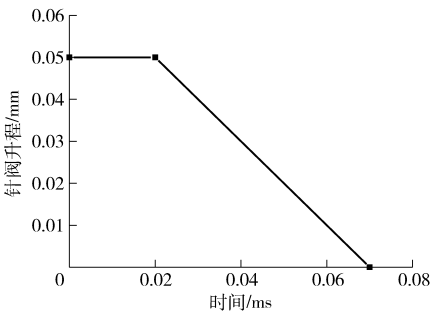


图 3 针阀运动规律

Fig. 3 Law of needle movement

2.2 模型验证

计算网格在喷孔及压力室区域做局部加密,进行网格独立性分析,以喷嘴内空化体积作为网格独立性的评判依据。不同网格基本尺寸的空化体积如图 4 所示。当网格基本尺寸减小到 0.012 mm 后,空化体积基本保持不变,取该网格基本尺寸可以满足网格独立性要求。

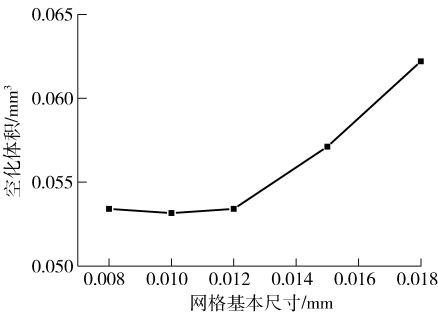


图 4 网格独立性验证

Fig. 4 Verification of mesh-dependence

模拟计算边界条件取 SWANTEK 等^[19]试验对应的 p_{inj} = 50 MPa 和 p_b = 0.1 MPa,模拟结果和试验

结果的对比如图 5 所示,对比发现模拟和试验的喷油嘴压力室和喷孔内的倒流气体分布形态基本吻合,从而验证了计算模型的可靠性。

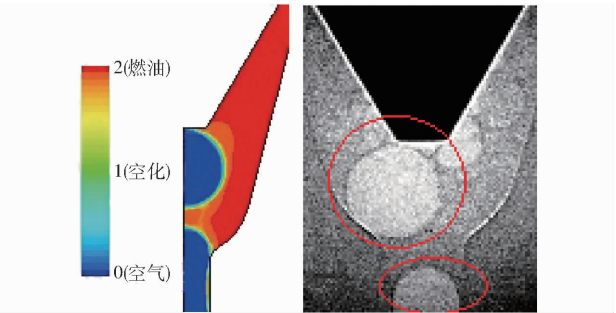


图 5 倒流气体分布的仿真与试验结果对比

(右图红圈中为倒流气泡)

Fig. 5 Contrast between simulation and experiment results of ingestion air (red circles on right showed ingestion air)

2.3 断油过程中喷油嘴内部流场分析

图 6 为 p_{inj} = 50 MPa 和 p_b = 0.1 MPa 时喷油嘴内空气、空化、燃油分布的变化过程,图 7 是空化与倒流气体体积变化曲线,结合两图进行分析。在 0.020 ms 时刻针阀开始关闭前,由于喷孔入口圆角较大,在稳定喷射阶段喷孔入口下游没有发生空化。在 0.020 ~ 0.070 ms 针阀关闭过程中,由于针阀运

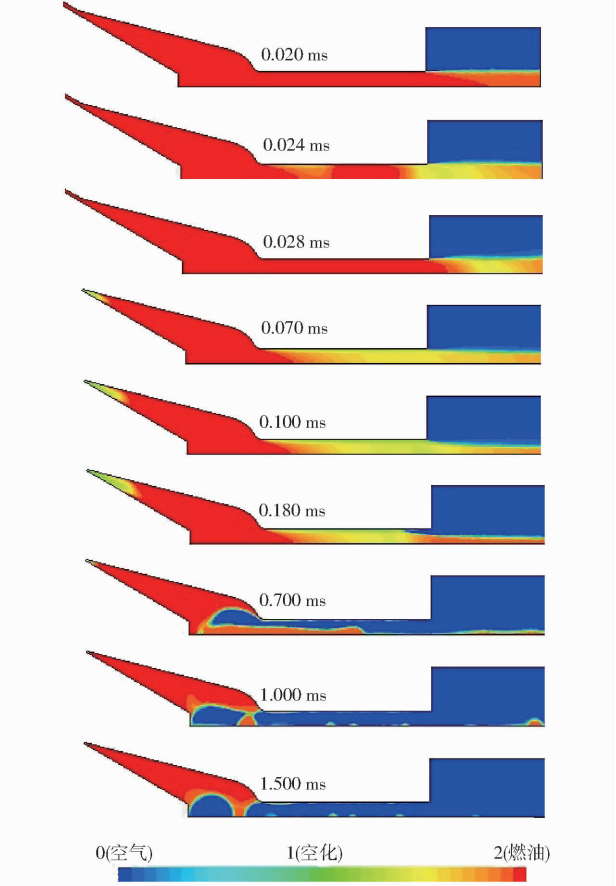


图 6 喷油嘴内空气、空化、燃油分布的变化过程

Fig. 6 Changing process of distribution of air, cavitation and fuel in nozzle

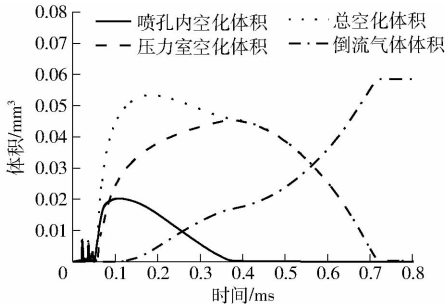


图 7 空化体积与倒流气体体积关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between cavitation volume and ingested air volume

动产生的扰动使喷孔入口下游有少量空化产生和溃散的交替现象。在 0.070 ms 时,由于针阀完全关闭使针阀密封面附近燃油流速迅速降低为零,喷孔入口附近流速也随之下落,导致压力室内阀座密封面附近和喷孔内的压力降低,从而迅速出现空化现象。0.100 ms 时喷孔内空化体积达到最大值 0.02 mm³,空化开始溃灭并伴随着外部气体倒流进入喷孔。在 0.180 ms 喷油嘴内的总空化体积达到最大值 0.053 mm³,随后总空化体积开始减小。从图 7 可以看出,喷孔内空化程度小于压力室,喷孔内的空化首先发生溃灭,在其完全溃灭后压力室内部空化才开始溃灭。这是由于喷孔位置更靠近孔外区域,孔外压力向喷嘴内部传递,先经过喷孔使喷孔内空化溃灭先于压力室发生。在 0.700 ms 压力室内空化已经基本溃灭消失,溃灭过程导致的气液界面移动使外部气体倒流进入到压力室内。在 1.000 ms 时刻倒流气体在气液表面张力的作用下,界面收缩形成气泡,喷嘴内倒流气体体积为 0.058 mm³,略大于最大总空化体积。1.500 ms 时流体基本静止,该气泡残留在压力室内,将随下一次喷射排出喷孔。

气体倒流的形成机理可从两方面做出解释。首先从图 7 中可以看出,空化体积的减小过程和倒流气体体积增加过程基本是同步进行的,空化的生成导致喷孔内近似相等体积量的燃油流出,降低了孔内残余燃油量,喷油嘴内空出的体积由临近流体填充,从而导致外部气体跟随倒流进入喷嘴。其次少量孔内燃油受到流出喷孔的燃油粘性力作用被拖曳出喷孔,而流入部分外部气体,导致倒流气体体积比最大总空化体积略大。综上所述,空化现象造成的孔内燃油挤出效应是影响倒流气体体积的主要因素,最大总空化体积基本等于倒流气体体积。

2.4 背压对气体倒流的影响

图 8 是在 $p_{inj}=50\text{ MPa}$ 条件下,针阀关闭后喷嘴内最大总空化体积和倒流气体体积随背压变化的曲线。可以看出随着背压的升高,最大总空化体积和

倒流气体体积逐渐减小,说明背压对空化有抑制作用。背压增大使断油过程喷嘴内燃油流出的阻力增大,喷嘴内部压力降低幅度减小,空化程度减弱,从而导致空化体积减小,倒流气体体积也相应减小。

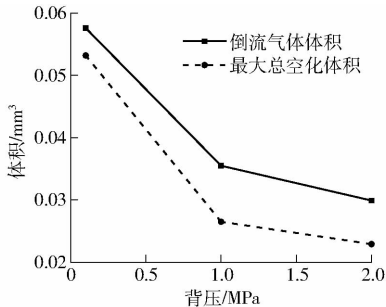


图 8 不同背压对空化量和气体倒流的影响

Fig. 8 Effects of ambient pressure on cavitation volume and ingested air volume

图 9 是 p_{inj} 为 50 MPa 喷射压力下,环境背压分别为 0.1、1.0、2.0 MPa 条件下的压力室内空化最大时刻以及最后稳定时刻的燃油体积分数分布云图。可以看出,随着背压升高,压力室内最大空化体积减小,进入压力室内的气泡随之减小。根据图 7 的分析结果,空化溃灭是导致气体倒流的主要因素,空化体积和倒流气体体积基本相等,所以最大空化体积大于喷孔体积时倒流气体会进入压力室。压力室内

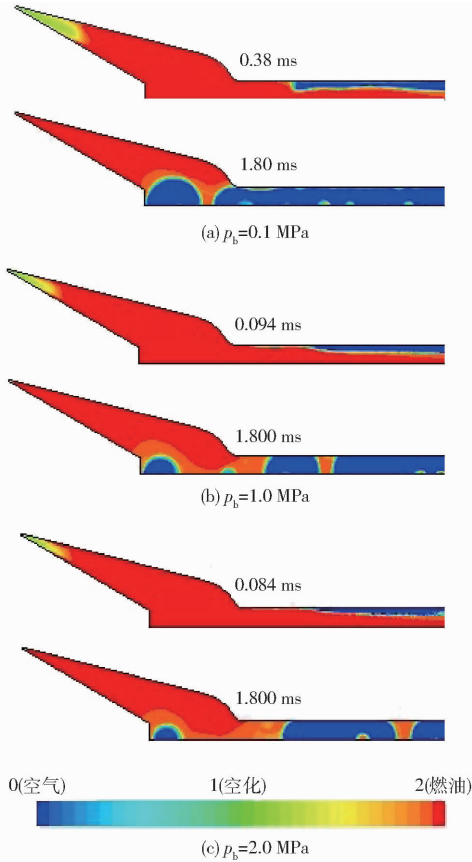


图 9 不同背压下空化和倒流气体云图

Fig. 9 Contours of cavitation and air ingestion with different ambient pressures

空化溃灭使喷孔内部液体回流从而使倒流进入喷孔的气体能进一步卷入压力室。故压力室内的空化溃灭是气体倒流进入压力室的必要条件。有研究表明^[20-21],发动机内工作的喷油嘴内部结焦由于高温引起,针阀关闭后回流的高温燃气可能引起喷油嘴内部结焦。

3 空化机理分析

忽略压力室的几何结构影响,将喷嘴内流动近似看作直孔内的 Poiseuille 流动,如图 10 所示。图

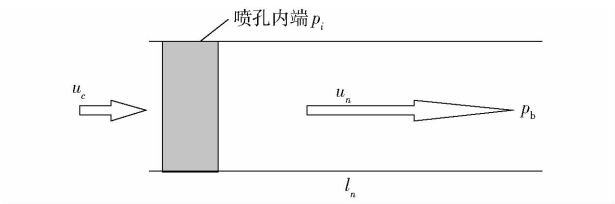


图 10 简化的喷孔流动模型
Fig. 10 Simplified flow model of nozzle

中阴影部分为喷孔内端,这部分流体在断流时受到的拉伸作用力最大,压力变化较大,则孔内流体动量方程可表示为

$$\frac{du_n}{dt} = \frac{p_i - p_b}{\rho l_n} - \frac{8\pi\nu}{A_n}u_n \tag{1}$$

式中 u_n ——喷孔内流体平均流速
 p_i ——喷孔内端压力
 ρ ——燃油密度 ν ——运动粘度
 l_n ——喷孔等效长度
 A_n ——喷孔等效截面积

式(1)中喷孔内端压力 p_i 可近似表示为

$$\frac{dp_i}{dt} = K \frac{u_c - u_n}{\beta l_n} \tag{2}$$

式中 K ——燃油体积模量
 u_c ——喷孔入口流速
 β ——喷孔内端长度所占比例

把方程(2)代入微分后的方程(1)可得 u_n 的二阶常微分方程,并求出该二阶系统的固有频率 ω_0 、阻尼比 ξ 和相位 ϕ

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho\beta l_n^2}} \quad \xi = \frac{4\pi\nu l_n}{A_n} \sqrt{\frac{\beta\rho}{K}} \quad \phi = \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$$

此二阶系统表征了断油过程中孔内燃油动能向势能的转换过程。 u_c 在 EOI 后变为 0,类似于为此二阶系统输入一个阶跃信号。当 $u_{n,t=t_0} = 0$ 时动能

全部转化为势能, p_i 到达最小值 p_{imin} ,此时 $\dot{u}_{n,t=t_0} = -u_c\omega_0 e^{-\xi\omega_0 t_0}$,代入方程(1)可得

$$u_c\omega_0 e^{-\xi\omega_0 t_0} = \frac{p_b - p_{imin}}{\rho l_n} + \frac{8\pi\nu}{A_n}u_n \tag{3}$$

其中 $t_0 = \frac{\pi - \phi}{\omega_0 \sqrt{1-\xi^2}}$

当不考虑粘性时,式(3)可简化为

$$\frac{p_b - p_{imin}}{u_c \sqrt{\frac{\rho K}{\beta}}} = 1 \tag{4}$$

由于 p_{imin} 在喷孔内不低于燃油饱和蒸汽压 p_{sat} ,压力差存在极限值。可定义针阀关闭过程的空化数为

$$C_N = \frac{p_b - p_{sat}}{u_c \sqrt{\rho K}} \tag{5}$$

C_N 代表喷孔内燃油压力极限势能与初始动能的比值。当初始动能等于压力极限势能时,喷孔内端压力会降到燃油饱和蒸汽压,发生临界空化;若进一步增大初始动能,即减小 C_N ,孔内端压力不能下降,但空化程度增大。因此 C_N 可以表征针阀关闭过程中喷嘴内部发生空化的程度。从式(5)可得,随着 p_b 减小, u_c 、 ρ 、 K 增大, C_N 越小,空化越剧烈。

上述分析可以对本文的试验现象和模拟结果作出理论解释:随着背压增加,空化数变大,在断油过程压力室和喷孔内的空化程度减小,造成倒流气体体积的减小。

4 结论

(1) 试验和模拟结果表明,针阀关闭时在压力室针阀密封面附近及喷孔入口附近都会迅速产生空化现象,空化溃灭伴随着孔外气体倒流进入喷油嘴;对于实际工作的喷油器,倒流的高温燃气可能造成喷嘴内部结焦。

(2) 定量分析发现,断流过程中的最大空化体积基本等于倒流气体体积,说明空化溃灭是导致气体倒流的主要因素,压力室内的空化溃灭易引起倒流气体进一步流入压力室。

(3) 提出了表征断油过程喷嘴内空化程度的空化数 C_N ,从理论分析得出,随着背压增大, C_N 增大,断油过程的空化程度减弱,从而使倒流的气体体积减少,这与试验及模拟结果相符。

参 考 文 献

1 PAYRI R, SALVADOR F, GIMENO J, et al. Understanding diesel injection characteristics in winter conditions[C]. SAE Paper 2009-01-0836, 2009.
2 何志霞, 柏金, 王谦, 等. 柴油机喷嘴内空穴流动可视化试验与数值模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 6-9.
HE Zhixia, BAI Jin, WANG Qian, et al. Visualization experiment and numerical simulation for cavitating flow in a diesel injector

- nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 6-9. (in Chinese)
- 3 冷先银, 金煜, 何志霞, 等. 交叉孔喷油嘴内部流动特性的模拟[J]. 内燃机学报, 2015, 33(6): 522-529.
LENG Xianyin, JIN Yu, HE Zhixia, et al. Numerical simulation on internal flow characteristics of intersecting hole nozzles[J]. Transactions of CSICE, 2015, 33(6): 522-529. (in Chinese)
- 4 何志霞, 赵朋, 王谦, 等. 基于背压的柴油机喷嘴内部空穴流动试验研究[J]. 内燃机工程, 2014, 35(6): 20-24.
HE Zhixia, ZHAO Peng, WANG Qian, et al. Experimental research of cavitating flow in diesel fuel injector nozzle under different back pressure[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(6): 20-24. (in Chinese)
- 5 BADOCK C, WIRTH R, FATH A, et al. Investigation of cavitation in real size diesel injection nozzles[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 1999, 20(5): 538-544.
- 6 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?file_no=20160948&flag=1. 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)
- 7 SOU A, PRATAMA R H, TOMISAKA T. Cavitation in a nozzle of fuel injector[C]//International Symposium on Cavitation (CAV 2012), 2012.
- 8 GAVAISES M, FLORA H, BADAMI M, et al. Cavitation in real-size multi-hole diesel injector nozzles[C]. SAE Paper 2000-01-1249, 2000.
- 9 HAYASHI T, SUZUKI M, IKEMOTO M. Effects of internal flow in a diesel nozzle on spray combustion[J]. International Journal of Engine Research, 2013, 14(6): 646-654.
- 10 马志炎. 柴油机喷油器喷孔内空穴流动的可视化试验研究与数值模拟分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
MA Zhiyan. The visualization experiment and numerical simulation for cavitation flow in a injector nozzle of diesel engine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- 11 JOLLET S, HEILIG A, BITNER K, et al. Comparison of experiments and numerical simulations of high pressure transparent injection nozzles[C]//25th ILASS-Europe, 2013.
- 12 GHIJI M, GOLDSWORTHY L, BRANDNER P A, et al. Numerical and experimental investigation of early stage diesel sprays[J]. Fuel, 2016, 175(1): 274-286.
- 13 DUKE D, KASTENGREN A, TILOCCO Z, et al. Synchrotron x-ray measurements of cavitation[C]//25th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2013: 5-8.
- 14 DUKE D, SWANTEK A, TILOCCO Z, et al. X-ray imaging of cavitation in diesel injectors[J]. SAE International Journal of Engines, 2014, 7(2): 1003-1016.
- 15 DUKE D, SWANTEK A, TILOCCO Z, et al. End of injection, mass expulsion behaviors in single hole diesel fuel injectors [C]//26th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS-Americas, 2014.
- 16 BATTISTONI M, POGGIANI C, SOM S. Prediction of the nozzle flow and jet characteristics at start and end of injection; transient behaviors[C]//JSAE/SAE Powertrains, Fuels & Lubricants International Meeting, 2015: 84-97.
- 17 HUANG W, MOON S, OHSAWA K. Near-nozzle dynamics of diesel spray under varied needle lifts and its prediction using analytical model[J]. Fuel, 2016, 180: 292-300.
- 18 JIANG Guangjun, ZHANG Yusheng, Wen Hua, 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.
- 19 SWANTEK A, KASTENGREN A L, DUKE D, et al. A further examination of fuel dribble from single hole diesel nozzles[C]//ILASS-Europe 2014, 26th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2014.
- 20 TANG J, PISCHINGER S, LAMPING M, et al. Coking phenomena in nozzle orifices of dl-diesel engines[J]. SAE International Journal of Fuels & Lubricants, 2009, 2(1): 259-272.
- 21 IKEMOTO M, OMAE K, NAKAI K, et al. Injection nozzle coking mechanism in common-rail diesel engine [J]. SAE International Journal of Fuels & Lubricants, 2011, 5(1): 78-87.