

柴油机喷嘴内空穴流动可视化试验与数值模拟*

何志霞 柏金 王谦 黄云龙

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 柴油机喷雾特性除了与气缸内气流运动有关外,也与喷嘴内空穴流动有密切的关系。设计了比例放大多孔喷嘴内空穴流动和喷雾的可视化试验装置,进行了不同燃油喷射压力下喷嘴内空穴现象和喷雾的可视化试验,对所建喷嘴内空穴流动的三维数值计算模型进行了试验验证。采用试验和数值模拟相结合的方法分析了喷嘴内部流动从单相湍流流动发展为空穴流动、超空穴流动的流动特性,得出了喷嘴流量系数与喷射压力及空穴参数之间的关系以及喷嘴内出现空穴现象的临界条件。

关键词: 柴油机 喷嘴 空穴 可视化试验 数值模拟

中图分类号: TK421 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0006-04

Visualization Experiment and Numerical Simulation for
Cavitating Flow in a Diesel Injector Nozzle

He Zhixia Bai Jin Wang Qian Huang Yunlong

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

A visualization unit with a proportion of the multi-hole injector nozzle for cavitating flow was developed, and by means of high-speed video camera, the pictures of the cavitating flow in a large-scale transparent nozzle were taken under various injection pressures. A three-dimensional grid model of the injector nozzles was established, and the three-dimensional numerical simulation of cavitating flow in nozzle holes of a multi-hole injector combined with these pictures from experiment was utilized to analyze flow characteristics of single-phase flow to supercavitation flow. The relationship between injection pressure, non-dimensional cavitation parameters and the discharge coefficient, as well as the critical conditions when the cavitation appeared was pointed out clearly.

Key words Diesel engine, Injector nozzle, Cavitating flow, Visualization experiment, Numerical simulation

引言

研究表明燃油喷雾的形成、雾化过程及雾化质量除了受公认的喷雾与其周围空气摩擦的影响外,更受到喷嘴内流动情况,即湍流和空穴的影响^[1~2]。喷孔内因空穴引起液流紊乱对液体喷束雾化造成的影响远大于喷束与周围空气摩擦所造成的影响,所以不考虑喷嘴所带来的影响而建立的喷雾预测理论是不完善的。但通常喷孔直径不到 1 mm,喷油持续

期只有几毫秒,使得直接观察喷孔内部流动非常困难,所以国内外对喷嘴内可视化试验研究相对较少^[3~5],国内则尚未见到有关多孔喷嘴内空穴流动可视化试验研究的报道。本文将真实多孔喷油器比例放大十倍后加工成透明喷油嘴头部,搭建可视化试验装置,观察不同喷射压力下的喷嘴喷孔内的空穴流动现象,通过喷射压力的稳定调节来寻求空穴初生的临界压力,并分析喷嘴流量系数与由喷射压力及背压所决定的无量纲空穴参数间的关系。

收稿日期: 2010-12-28 修回日期: 2011-04-01

* 国家自然科学基金资助项目(50806030)

作者简介: 何志霞,副教授,博士,主要从事内燃机燃烧理论研究, E-mail: zxhe@ujs.edu.cn

1 喷嘴内流动形态分析

图 1 所示为喷孔空穴流动简化模型。根据不可压缩流体伯努利方程,沿流线速度越高,压力越低。在高速流动的喷孔入口处,由于拐角的存在,产生局部流动分离以及孔口收缩,引起横截面面积的减小,此截面上的流速会大大增加,从而引起压力的降低。当局部压力降至低于该液体饱和蒸汽压时,该区域就会出现空泡,形成空穴区。其中空泡的存在使液相流体的连续性遭到破坏,在喷孔内形成蒸汽泡、液体中的未溶气体和液体的两相流动。空穴仅发生在喷孔入口处,但通常都会向下游延伸而形成薄而长的空穴层。

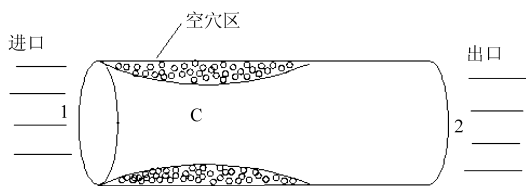


图 1 喷孔空穴流动模型

Fig. 1 Cavitation model of flow in nozzle hole

通常用动力相似无量纲参数即空穴参数 K ^[6~7] 来描述其流动

$$K = (p_1 - p_c) / (p_1 - p_2) \quad (1)$$

式中 p_1 ——喷射压力

p_2 ——背压(喷孔出口处压力)

p_c ——液体饱和蒸汽压

分子项反映流体表面上压力变化,分母表示促使空泡产生的净压力,因此 K 可认为是导致空穴形成发展的可用压力与使空穴溃灭的可用压力之比。 K 越小,空穴越严重。存在出现空穴现象时的临界空穴参数 K_{crit} ,且不同结构喷嘴其喷孔内空穴流动的临界空穴参数值是不同的。当 K 高于 K_{crit} 时,不管雷诺数多大,也不会产生空穴,而是单相流;一旦 K 低于 K_{crit} ,在喷孔入口缩脉处将产生空穴,形成部分空穴流动;随喷射压力的进一步提高, K 进一步减小,流动发展为完全空穴流。喷油嘴偶件的流量系数就是在一定条件下喷油嘴偶件的实际喷油量(有效流通截面积)与理论喷油量(最小几何流通截面积)之比。可将空穴区域看成一固定、滑移边界,占据喷孔横截面上一部分固定区域,流体则从喷孔横截面的其余部分通过。流体流经喷孔,由于湍流摩擦涡旋和喷孔几何形状的影响,产生流动损失,使流体实际流量不同于理想流动下的流量,故对流经整个喷孔的流动引入流量系数,即

$$C_d = C_c \sqrt{\frac{p_1 - p_c}{p_1 - p_2}} \quad (2)$$

式中 C_c ——收缩系数,与喷嘴几何特征参数有关
由式(1)和式(2)得出

$$C_d = C_c \sqrt{K} \quad (3)$$

可以看出,流量系数与空穴分布有着密切的联系,空穴情况越严重, $\sqrt{K}$ 越小,则流量系数越小。

2 试验装置及原理

2.1 试验装置

搭建的喷油嘴内空穴流动的可视化试验装置如图 2 所示。包括透明喷嘴头部按比例放大的喷油器、稳压供油系统、光学系统以及数据采集系统等。

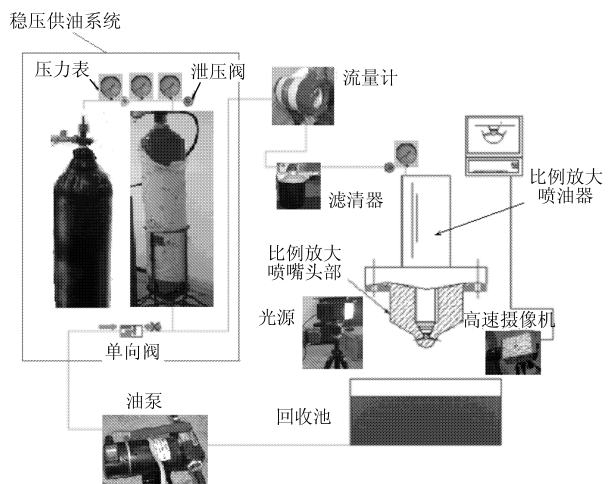


图 2 可视化试验装置

Fig. 2 Visualization experimental setup with transparent nozzle

为了观察喷嘴内的流动,整个装置中最关键的部件是透明喷嘴,其几何特征参数为:喷孔数 $n = 4$; 喷孔直径 $D = 3.2 \text{ mm}$; 喷孔长度 $L = 10 \text{ mm}$; 喷孔与针阀轴线间夹角 $\gamma = 75^\circ$; 喷孔入口为锐边过渡,即入口圆角半径 $R = 0 \text{ mm}$; 针阀升程 $h = 5 \text{ mm}$ 。透明喷嘴所采用的材料是聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),俗称有机玻璃,这种材料在 213°C 的高温下也能长时间保持力学强度,变形很小。此外,它还具有强耐磨损性和抗划痕硬度。而且由于完全不含聚合引发剂、稳定剂或其他低分子化合物,具有优良的透明性和长期稳定性,透光率达到 92% ,比玻璃的透光度高,如图 3 所示。

试验要求提供稳定的喷油压力,本试验装置以氮气瓶为压力输出,同时根据定压容器设计原理自行设计加工了一个稳压油桶。稳压油桶上下两端都接有三通阀。稳压油桶下端用于连接油泵和喷油管,上端用于连接氮气瓶和泄压阀。

2.2 试验原理

如图 2 所示,首先将稳压油桶的泄压阀打开,通



图3 透明喷嘴

Fig. 3 Transparent nozzle

过油泵将回收池内的燃油泵入稳压油桶中。泵入一定量燃油后,关上稳压油桶的泄压阀,同时打开氮气瓶开关,向稳压油桶中输入一定的压力。在滤清器和透明喷嘴之间有一个开关,当稳压油桶的压力表达到试验所需的喷射压力时,打开开关,喷油嘴开始喷油,同时通过高速数码相机记录针阀升起过程及喷油压力完全稳定时喷嘴内的液流情况。管道中所安装的涡轮流量计可进行系统流量的实时测定。

2.3 试验装置特点

(1)光路设计中采用了冷光源,因而光路光源能量损失少、亮度增加,使得试验拍摄图片更加清晰。

(2)试验装置不仅可以用来拍摄喷嘴喷孔内空穴流动发展过程,也可以用来拍摄燃油雾化过程。

(3)在拍摄喷嘴内空穴流动及喷雾过程的同时,可以同步采集并记录喷射压力、流量等多种数据。

(4)由于喷嘴的透明化,本试验装置可以观测到各种不同介质时的流动与雾化情况,更能详尽地研究不同喷射介质喷嘴内部空穴流动机理及其对雾化的影响机理,整个装置具有较强的通用性。

3 可视化试验

本试验首先选择水作为喷射介质进行可视化试验研究,对不同进口压力下的喷嘴内空穴流动情况进行了观测与数据采集。由于在启喷过程中,随着针阀的不断升起,喷孔内部流动状态变化比较复杂,所以选用针阀完全升起后稳定状态下的图片进行分析。图4是在不同进口压力条件下拍摄到的流动形态图片,光源的照射使气泡表面产生反射与折射,喷孔内空穴区域在拍摄图片上为白色亮点区域。当进口压力为0.21 MPa时,喷孔里没有亮点区域,即没有发生空穴现象;而当进口压力增加至0.22 MPa时,喷嘴入口拐角处出现亮点,所以初步判断该结构喷嘴以水为喷射介质时,空穴初生的临界压力为0.22 MPa,之后随着压力的不断增加,亮点区域贴壁

面延伸长度越来越长,特别是在进口压力为0.5 MPa时最为明显,空穴层在延伸的同时,入口厚度明显增加,即其他条件不变时,随着进口压力的增加,进出口压差增大,导致空穴现象越来越剧烈。

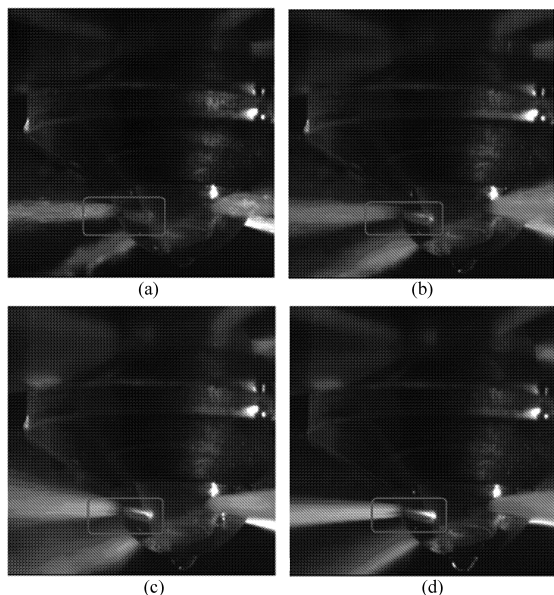


图4 不同进口压力下喷嘴内空穴流动图片

Fig. 4 Pictures of cavitating flow in a diesel injector

nozzle with different injection pressures

(a) $p_{in} = 0.21 \text{ MPa}$ (b) $p_{in} = 0.22 \text{ MPa}$

(c) $p_{in} = 0.3 \text{ MPa}$ (d) $p_{in} = 0.5 \text{ MPa}$

由通过试验测得的流量数值可计算得到流量系数,图5和图6分别为流量系数与进口压力和空穴参数之间的关系。从图5可以看出,随着进口压力不断增加,流量系数相应减小,说明空穴现象越来越严重。从图6可以看出随着空穴参数的减小,流量系数也相应减小,当 $\sqrt{K} = 1.072$ 时,流量系数达到最小值;随后,当 K 进一步减小,流量系数又有所增加。由拍摄所得图片与之前理论分析对比可作如下解释,即当喷油压力等于0.75 MPa,空穴参数 $K = 1.15 (\sqrt{K} = 1.072)$ 时,喷嘴喷孔里出现超空穴现象,但当液流空穴层完全脱离喷孔壁面喷射出去后,又导致流量系数从最小值开始增大。

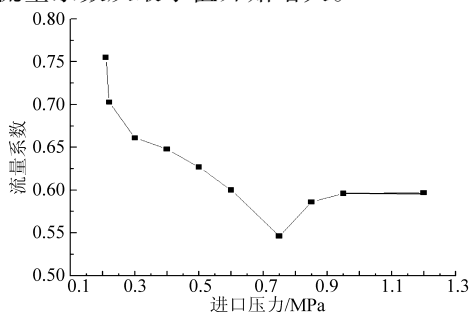


图5 流量系数随进口压力的变化曲线

Fig. 5 Variation of discharge coefficient with injection pressure

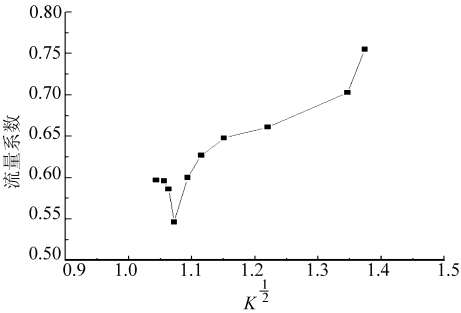


图 6 流量系数随空穴参数的变化曲线
Fig. 6 Variation of discharge coefficient with non-dimensional cavitation parameters

4 喷嘴流动数值模拟与试验验证

4.1 模型建立

在试验研究基础上,利用 Fluent 软件对比例放大喷嘴内部空穴流动进行了数值模拟。喷嘴进出口设为压力边界,但由于喷孔内部空穴的出现,喷孔出口压力往往不同于气缸压力,设定喷孔出口压力为气缸压力时会影响喷孔内部流动数值计算的准确性,所以考虑将出口边界延伸至气缸内部,从而减小出口对喷孔内部求解区域的影响。由于比例放大透明喷嘴共有 4 个喷孔且对称,故取其中的一个喷孔加以研究,即取整个流动区域的 1/4 作为计算区域,此时的网格单元总数为 135 545,如图 7 所示。

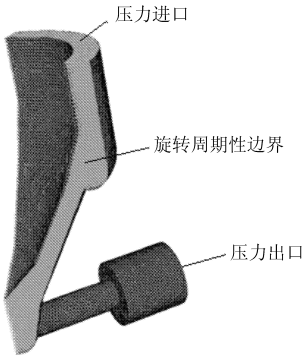


图 7 比例放大透明喷嘴模型网格图
Fig. 7 Cavitation model of flow in nozzle hole

4.2 边界条件及模型参数

喷嘴计算的初始条件、边界条件及相关参数设定如下:入口为压力边界,喷射压力取 0.2、0.4 和 0.8 MPa;出口也为压力边界,压力 $p_{out} = 0.1$ MPa;进行依赖时间的瞬态求解,时间步长 $\Delta t = 1 \times 10^{-6}$ s;由于计算区域内湍流运动很强烈,所以进出口界面上 k 、 ϵ 取值对计算结果影响不大,如无实测值可用时,可给定湍流强度 I 和湍流尺度 l 以取代湍动能 k 和耗散率 ϵ ,湍流强度为

$$I = 0.16Re^{-1/8} \tag{4}$$

Re 为雷诺数,湍流长度尺度为

$$l = 0.07D \tag{5}$$

式中 D ——喷孔直径

对空穴模型中气泡初始直径 R_0 和单位体积纯液体中所含气泡数 n_0 取值时,参考相关资料并通过数值模拟与试验的反复对比,取 $n_0 = 1.5 \times 10^{11}$, $R_0 = 0.3 \mu\text{m}$,其密度为 998 kg/m^3 ,分子粘度为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$,蒸汽密度为 0.5542 kg/m^3 ,蒸汽粘度为 $1.34 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ 。数值模型的可靠性和准确性已在文献[8]中得到验证。

4.3 试验验证

数值模拟所得的空穴分布图与试验拍摄所得图片对比如图 8 所示。从图 8a 可以看出,数值模拟喷射压力 $p_{in} = 0.2 \text{ MPa}$ 时,喷孔入口开始出现空穴现象,并以薄层状态向喷孔出口延伸,而试验所得图片中喷孔里还未出现空穴现象,主要是由于试验过程中,由于沿程压力损失,使得喷油器前管道中所装压力表测得的压力要比喷嘴数值模拟中所取的入口位置处压力高而导致的。而当喷射压力增加至 0.4 MPa 时,空穴层延伸长度增加,厚度也明显增加,数值模拟和试验结果所显示的空穴层均快要接近喷孔出口,见图 8b。当压力进一步增至 0.8 MPa,图 8c 图片中喷孔空穴区亮度明显增强,数值模拟和试验结果非常接近,空穴层也均延伸出了喷孔出口,

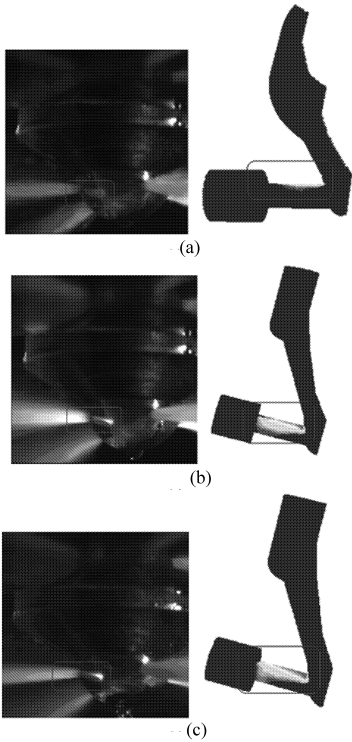


图 8 数值模拟与试验结果对比
Fig. 8 Comparison of cavitation from numerical simulations and experiments

(a) $p_{in} = 0.2 \text{ MPa}$ (b) $p_{in} = 0.4 \text{ MPa}$ (c) $p_{in} = 0.8 \text{ MPa}$

- 4 Pefley R K, Saad M A, Sweeney M A. Performance and emissions characteristics using blends of methanol and dissociated methanol as an automotive fuel[C]. SAE Paper 719008, 1971.
- 5 徐元利, 姚春德, 李旭聪. 废气余热制富氢气体对发动机性能的影响[J]. 汽车安全与节能学报, 2011, 2(2): 175 ~ 180.
Xu Yuanli, Yao Chunde, Li Xucong. Effects of hydrogen mixture generated from methanol dissociated by exhaust heat to engine performance[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2011, 2(2): 175 ~ 180. (in Chinese)
- 6 姚春德, 徐元利, 杨建军, 等. 甲醇裂解气对点燃式发动机性能影响研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(2): 353 ~ 356.
Yao Chunde, Xu Yuanli, Yang Jianjun, et al. Effects of dissociated methanol on performance of SI engine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(2): 353 ~ 356. (in Chinese)
- 7 Adams T G. Fuel economy improvements through the use of dissociated methanol[C] // Methanol: An Alternate Fuel. Columbus, OH, USA, 1986: 75 ~ 79.
- 8 Takishita Tashio. Development research on dissociated methanol fueled spark engine[C] // Motor Vehicle Technology: Mobility for Prosperity, Third International Pacific Conference on Automotive Engineering. Jakarta, Indones, 1985: 193 ~ 205.
- 9 Finegold J G. Dissociated methanol vehicle test results[C] // Nonpetroleum Vehicular Fuels IV. Arlington, VA, USA, 1984: 213 ~ 228.
- 10 Adams T G. Comparison of engine performance using methanol or dissociated methanol as the fuel[C] // Proceedings—Society of Automotive Engineers. Vienna, Austria, 1984: 151 ~ 157.
- 11 Norman D B, Russell F S. A comparison of methanol and dissociated methanol illustrating effects of fuel properties on engine efficiency experiments and thermodynamic analyses[C]. SAE Paper 850217, 1985.
- 12 黄钰. 柴油-甲醇组合燃烧发动机的控制策略及试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.

(上接第 9 页)

发展为超空穴流动。总体来说在相同的边界条件下, 由于沿程压力损失, 数值模拟所得喷嘴内的空化程度均比试验稍显严重。

5 结束语

分析了喷嘴喷孔内流体的流动形态, 对空穴参数进行了阐述; 在搭建的比例放大多孔喷嘴内空穴

流动和喷雾的可视化试验台上, 开展了不同喷射压力下喷嘴内空穴流动的可视化试验。通过改变进口压力, 再现了喷孔内由单相湍流、部分空穴流到超空穴流时不同流动形态, 并得出了该放大模型喷嘴内空穴临界压力值。该试验研究为研究喷嘴内空穴两相流动提供了直接的手段。试验结果也很好地验证了所建喷嘴内空穴流动数值计算模型的准确性。

参 考 文 献

- 1 Roth H, Giannadakis E, Gavaises M, et al. Effect of multi-injection strategy on cavitation development in diesel injector nozzle holes [C]. SAE Paper 2005-01-1237, 2005.
- 2 文华, 姜水生, 魏明锐. 基于喷孔两相流场的柴油一次雾化模型[J]. 工程热物理学报, 2008(6): 1 069 ~ 1 073.
Wen Hua, Jiang Shuisheng, Wei Mingrui. A primary breakup model for diesel spray based on two-phase flow in injector nozzle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008(6): 1 069 ~ 1 073. (in Chinese)
- 3 Stanley Cameron, Rosengarten Gary, Milton Brian, et al. Investigation of cavitation in a large-scale transparent nozzle [EB/OL]. F2008-SC-001, <http://www.fisita.com/students/congress/sco8papers/f2008sc001.pdf>
- 4 Hyun Kyu Suh, Chang Sik Lee. Effect of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4): 1 001 ~ 1 009.
- 5 Masaaki Kubo, Takashi Araki, Shuji Kimura. Internal flow analysis of nozzles for DI diesel engines using a cavitation model [J]. JSAE Review, 2003, 24(3): 255 ~ 261.
- 6 Wang Xiang, Su Wanhua. A numerical study of cavitating flows in high-pressure diesel injection nozzle holes using a two-fluid model[J]. Chinese Science Bulletin, 2009(10): 1 655 ~ 1 662.
- 7 Palau-Salvador G, González-Altozano P, Ariza-Valve-rde J. Numerical modeling of cavitating flows for simple geometries using FLUENT V6.1[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2007, 5(4): 460 ~ 469.
- 8 何志霞. 高压载轨可喷射系统内部流动的数值模拟[D]. 镇江: 江苏大学, 2004.