

# 柴油机喷孔内空化过程与流动特性研究

仇滔<sup>1,2</sup> 宋鑫<sup>1</sup> 雷艳<sup>1</sup> 徐慧<sup>1</sup>

(1.北京工业大学环境与能源工程学院,北京 100124; 2.北京电动车辆协同创新中心,北京 100081)

**摘要:**为研究柴油机喷孔内燃油空化过程及其对流动能力的影响,基于试验和CFD三维仿真,保持入口压力不变,通过改变出口压力改变空化数,研究了随空化数变化,喷孔内空化过程及空化流动特性。研究表明:随空化数降低,喷孔内流动经历3个阶段:无空化阶段、空化发展阶段和空化饱和阶段。在不同的空化阶段,随空化数降低,空化过程和燃油的流通能力不同:无空化阶段,喷孔轴向各截面气液混合相体积分数不变,燃油流量增加,流量系数不变;空化发展阶段,空化从喷孔入口端向出口端发展,沿流向各截面气液混合相体积分数均增加,燃油流量增加,但流量系数下降;空化饱和阶段,喷孔入口端面的气液混合相体积分数首先达到稳定,沿流动方向,其他截面依次达到稳定,燃油流量达到最大并保持稳定,流量系数不断减小。

**关键词:**柴油机;喷嘴;空化;数值模拟;流动特性

**中图分类号:**TK421+.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2016)09-0359-07

## Cavitation Process and Flow Characteristics inside Diesel Injector Nozzle

Qiu Tao<sup>1,2</sup> Song Xin<sup>1</sup> Lei Yan<sup>1</sup> Xu Hui<sup>1</sup>

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China  
2. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To study the cavitation occurring in diesel nozzle and its effects on the flow capacity, the process of cavitation and the flow characteristics in diesel injector orifice were analyzed based on optical testing and three-dimensional CFD simulation. In the experiment, the visualization of cavitation was recorded by a high-speed camera, the frame rate was set to 6 688 frames per second. The high-frequency Kistler pressure transducers were assembled before and after the nozzle to acquire pressure. Ultimately, the data of pictures and pressure were stored by a computer. The 3D CFD diesel cavitation simulations were carried out under conditions of different inlet pressures and back pressures based on the commercial code Fluent. The CFD simulations were validated by the experimental data. The results showed that: when  $K > 2.49$ , there were no bubbles in the nozzle, which was named no-cavitation period; during no-cavitation period, both the gas-liquid mixed phase volume fraction and the fuel mass flow in each section did not increase and the flow coefficient was constant. When  $K \leq 2.49$ , it is the cavitation developing period when the gas-liquid mixed phase volume fraction of the entrance of the nozzle (plane A) started to increase which represented cavitation inception. At the same time, the growth rate of fuel mass flow reduced, and the flow coefficient began to decrease. When  $K \leq 1.91$ , the gas-liquid mixed phase volume at plane A became stable, which meant the cavitation saturation period. During the saturation period, the fuel mass flow rose to its maximum and maintained stable while the flow coefficient decreased. It can be seen that the cavitation occurred in diesel injector nozzle had large impact on the flow characteristics. Meanwhile, the cavitation had impact on the fuel mass flow, the flow coefficient and the gas-liquid mixing phase volume fraction at different nozzle cross sections.

**Key words:** diesel; nozzle; cavitation; numerical simulation; flow characteristics

收稿日期:2016-03-02 修回日期:2016-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51006012)和北京市教育委员会科学与技术发展项目(KM201610005018、KM201310005033)

作者简介:仇滔(1976—),男,副教授,主要从事内燃机电子控制、燃油系统匹配、尾气治理研究,E-mail: qiutao@bjut.edu.cn

## 引言

柴油机喷油器是现代柴油发动机喷射系统必不可少的组成元件。喷油器喷油雾化效果的好坏对发动机燃烧过程有着至关重要的影响<sup>[1-3]</sup>。机动车尾气排放法规政策对机动车尾气的排放限值及燃油经济性要求越来越高,有效地提高燃油的雾化效果已成为一种节能减排的技术手段。柴油机喷油器的喷油雾化特性受多种因素的影响,其中喷孔内的燃油流动特性,尤其是喷孔内空化过程更是影响燃油喷射和雾化效果的关键因素<sup>[4-7]</sup>,因此研究喷孔内空化流动特性一直是学术界的热点。

贾明等<sup>[8]</sup>通过固定入口喷射压力、改变出口背压发现:出口燃油质量流量在无空化发展阶段不断增加,在空化发展及饱和阶段燃油质量流量不变;尹必峰等<sup>[9]</sup>固定喷射压力,采用 LES 模拟柴油机喷油器内的空化发展趋势,发现出口空泡的溃灭导致了湍动能的增加,进而提高了燃油的雾化效果;SALVADOR 等<sup>[10]</sup>通过改变入口喷射压力及出口背压发现:在无空化阶段,燃油流量系数趋于一致,而在空化饱和阶段不断降低;LÓPEZ 等<sup>[11]</sup>对燃油空化流动特性的仿真验证研究表明:由于阻塞流的出现,空化作用降低了燃油的流量及动量流量;丁红元等<sup>[12]</sup>对多喷孔流量的研究表明:固定入口压力,随着背压降低,燃油流量先增加后稳定;崔慧峰等<sup>[13]</sup>对柴油机喷孔的仿真研究表明:提高入口喷油压力,喷孔出口燃油流速增加,流量系数减小。仇滔等<sup>[14]</sup>基于试验,研究了喷油器出口压力对喷油率的影响,发现空化阶段,随喷油器背压的增加燃油流量系数增加。上述文献证明了喷孔内易于空化,且空化对喷孔流量和流量系数产生显著影响,但是,没有对喷孔内的空化发展过程及不同过程对流通能力影响开展深入研究。本文以等比例放大喷油器喷孔模型为

基础,结合三维仿真(Computational fluid dynamics, CFD)计算,分析喷孔内空化的发展过程、不同空化阶段的特点和对流通能力的影响。

## 1 比例放大喷孔和等效压力边界条件

由于喷油器喷孔直径很小,直接观察喷孔内部的空化流动非常困难。本文基于相似原理,保证结构相似和空化数相似,采用等比例放大喷油器喷孔模型开展试验<sup>[15]</sup>。

实际喷孔尺寸(长×直径)为 2 mm×0.2 mm,试验中,将喷油器喷孔比例放大 5 倍,放大后尺寸(长×直径)为 10 mm×1 mm。试验用透明的聚甲基丙烯酸甲酯材料加工喷油器喷孔,如图 1 所示。

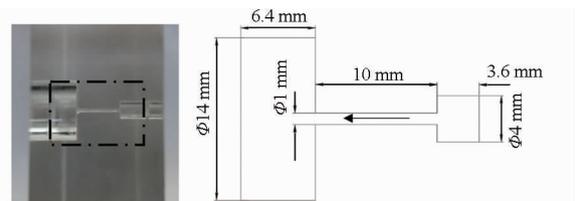


图 1 比例放大喷孔

Fig. 1 Scale-up nozzle

试验装置如图 2 所示,燃油经过滤清器由油泵泵入油轨中,在燃油进入比例放大喷孔之前,为保证所测压力的稳定性,在入口 Kistler 压力传感器前端约 50 cm 处安装一个油量稳压器。其中,光源采用强光灯。主要设备参数如表 1 所示。

光源和高速摄像机在同一轴线,置于比例放大喷嘴的两侧。背压调节阀调节出口背压,以便获得不同出口背压。由于喷孔的尺寸小,燃油在喷孔内温度变化较小,可近似将喷孔内的燃油流动简化为恒温过程<sup>[16]</sup>,本文在试验中燃油温度保持为 25℃。试验过程中,分别固定入口压力为 3 MPa 和 4 MPa,改变出口背压,测量燃油质量流量。为保证所测燃

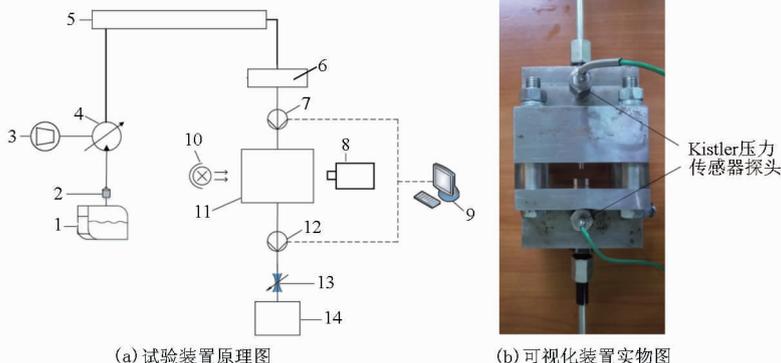


图 2 试验装置

Fig. 2 Schematic of testing equipment

1. 油箱 2. 滤清器 3. 电动机 4. 油泵 5. 油轨 6. 油量稳压器 7、12. Kistler 压力传感器 8. 高速摄像机 9. 计算机 10. 光源 11. 可视化装置 13. 背压调节阀 14. 电子计量秤

表1 设备参数

Tab.1 Equipment parameters

设备名称	型号	参数
高速摄像机	Phantom v7.3	灵敏度: 4800 ISO/ASA monochrome, 1200ISO/ASA color, 拍摄频率: 6 688 帧/s (全分辨率); 500 000 帧/s (加速模式)
压力传感器	Kistler 4067C3000	量程: 0 ~ 300 MPa, 灵敏度: 0.333 mV/MPa, 端点线性度: $< \pm 0.5\%$ F. S. O., 固有频率: $> 200$ kHz, 工作温度: 0 ~ 120°C
油量稳压器	NXQ-A(AB)-/20	共称压力: 20 MPa, 连接方式: 螺纹连接, 最大排流量: 10 ~ 40 L
光源	TY LED	电压: 220 V, 功率: 400 W
电子计量秤	CHS-D	量程: 0 ~ 30 kg, 灵敏度温漂: $\leq 1.2 \times 10^{-5}$ °C, 非线性: $\leq 0.01\%$ F. S

油质量流量的准确性,本试验在每一工况下连续测量 3 min,每次测量 3 次,取平均值。根据空化数相似原理<sup>[15]</sup>,当实际柴油机出口压力在 8 MPa 时,得到的等效压力边界条件如表 2 所示。

表2 等效压力边界

Tab.2 Boundary of equivalent pressures

实际出口压力/MPa	等效出口压力/MPa	空化数	等效入口压力/MPa	实际入口压力/MPa
8	1.0	1.33	4.0	32
		1.50	3.0	24
8	0.2	1.05	4.0	160
		1.07	3.0	120

## 2 三维仿真计算

### 2.1 几何模型及网格划分

基于比例放大喷孔,建立了三维几何模型。为提高计算精度,采用全六面体结构网格。在喷油器喷孔部分采用局部加密的方式进行网格划分。图 3 所示为喷油器喷孔处网格,网格数为 525 393 个。

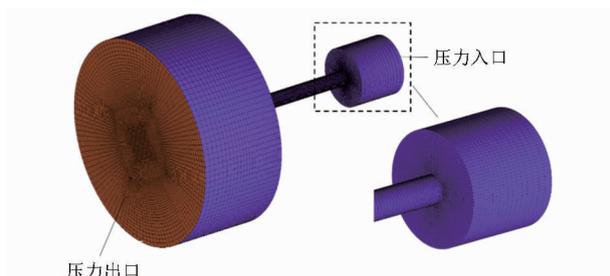


图3 三维模型网格

Fig.3 3D model grid

### 2.2 模型设置

使用 Fluent 进行仿真计算。考虑到喷油器喷孔

流通截面处的急剧收缩,采用考虑了转换过程的四方程湍流模型(Transition SST),空化模型选用 Zwart-Gerber-Belamri 模型。入口及出口采用压力边界,采用基于压力-速度耦合的 SIMPLEC 算法进行计算,梯度项采用基于单元的最小二乘法进行离散,压力项采用 PRESTO 进行离散,其余各相均采用一阶迎风格式进行离散。两相流模型选用 mixture 模型。其中,试验及仿真所用 0 号柴油参数如表 3 所示。

表3 0号柴油参数

Tab.3 0# diesel parameters

参数	数值
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	850
粘度/( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	3.5
饱和蒸汽压/Pa	3 540
表面张力/( $\text{mN} \cdot \text{m}$ )	27.4

### 2.3 模型验证

CFD 计算中,网格数量的多少对计算结果精度有很大的影响<sup>[17]</sup>。本文对三维喷孔模型进行了 8 组网格数量的划分,采用常规柴油和相同的边界条件进行数值计算,验证不同网格数对喷孔内质量流量影响的敏感度。由图 4 可以看出,固定入口压力 4 MPa,出口背压 0 MPa。当网格数量低于 500 000 时,燃油质量流量随网格数量的增加而降低;当网格数量超过 500 000 时,继续增加网格数量,燃油质量流量不再降低,由此可以看出,选择大于 500 000 的网格数量的计算结果可靠性较高。从节约计算机资源及时间考虑,本文使用的网格数量为 525 393。

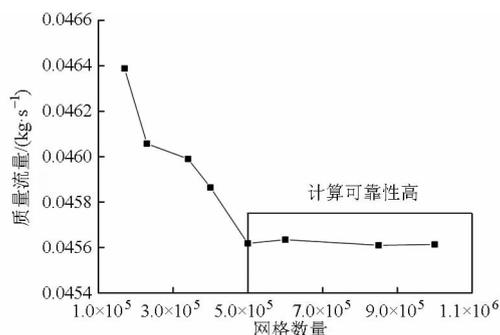


图4 网格无关性

Fig.4 Grid independency

试验过程中,固定入口压力 4 MPa,改变出口背压,测量燃油质量流量。图 5 所示是仿真和试验获得的流量对比,试验和仿真质量流量相对误差均未超过 5%。

## 3 结果分析

对于空化现象,引用无量纲数:空化数  $K$  和流量系数  $C_d$  表征流动特性。

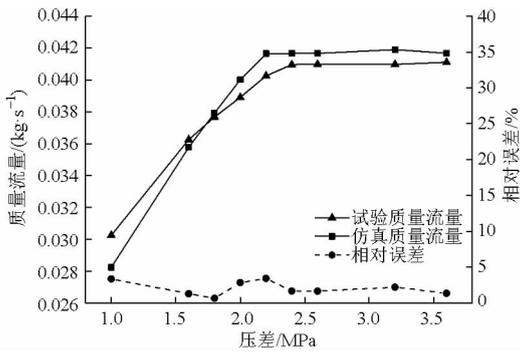


图5 模型验证结果

Fig. 5 Model validation

$$K = \frac{p_{in} - p_v}{p_{in} - p_b} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{m}{A \sqrt{2(p_{in} - p_b) \rho}} \quad (2)$$

式中  $p_{in}$ ——入口压力  $p_v$ ——饱和蒸汽压  
 $p_b$ ——出口压力  
 $m$ ——实际质量流量  
 $A$ ——燃油有效流通截面积  
 $\rho$ ——燃油密度

### 3.1 喷孔内空化过程

图6为入口压力等于4 MPa时空化随 $K$ 变化的光学试验和仿真结果。本文采用的空化观测方式为阴影法,即当空化发生时,喷孔内观测到的图像为黑色阴影。可以看出,随着 $K$ 降低,空化强度不断增加。当 $K < 1.91$ 时,空化不仅充满整个喷孔腔,空化已发展到出口端下游;当 $K = 1.91$ 时,空化延伸到喷孔出口端,整个喷孔内均出现空化,此阶段为空化饱和阶段;当 $1.91 < K < 2.49$ 时,沿燃油流动方向,喷孔内的空化不断从入口向出口端延伸发展,此阶段为空化发展期;当 $K = 2.49$ 时,在喷孔的入口端,试验图像开始出现黑色阴影,仿真图像出现浅色空化区,表示空化初生;当 $K > 2.49$ 时,喷孔内无空化,即无空化阶段。

为了解喷孔内空泡发展变化趋势,沿喷孔流动方向,将喷孔截面均分为A、B、C、D、E 5个截面,图7a表示截面切分位置示意图,图7b表示不同空化阶段空泡发展示意图。如图可见,气泡是沿圆周均布在喷孔壁面上,喷孔中心部位仍然是液态。空泡先由A截面形成,之后延伸到其余各截面。

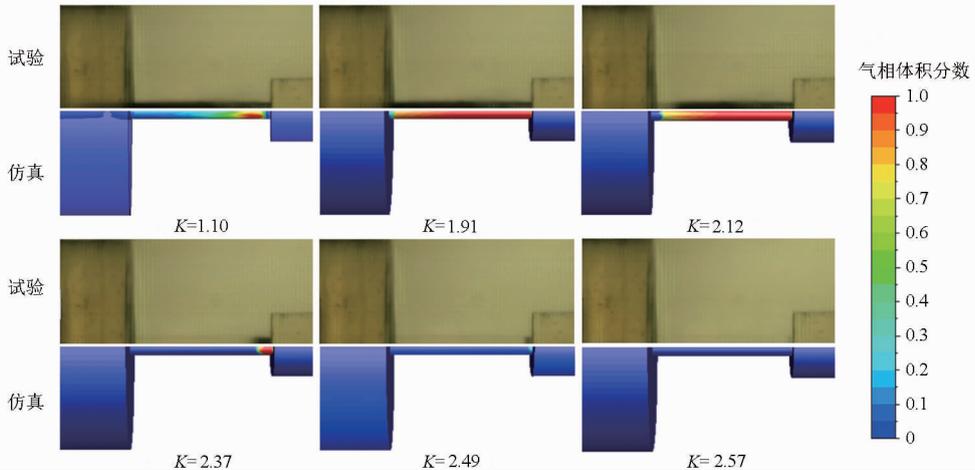


图6 喷孔内气相体积分数

Fig. 6 Vapor volume fraction

图8为各个截面气液混合相体积分数变化趋势。以A截面气液混合相体积分数变化为例,可以看出:在无空化阶段,当 $K$ 下降时,各截面气液混合相体积分数基本不变;在空化发展阶段,随着 $K$ 继续下降,A截面气液混合相体积分数开始增加,这意味着空化初生;当A截面的气液混合相体积分数不再变化,则进入了空化饱和阶段;在空化饱和阶段,随着 $K$ 进一步降低,A截面的气液混合相体积分数不再发生变化。之后沿喷孔内流向其他各截面(B、C、D截面)气液混合相体积分数依次达到稳定,E截面气液混合相体积分数增加幅度减小。

图9表示入口端(A截面)平均气相体积分数

及平均液相速度随 $K$ 变化趋势。固定入口压力4 MPa,在无空化阶段,随 $K$ 降低,A截面平均气相体积分数及平均液相速度均增加,此时,A截面为纯液相;在空化发展阶段,当 $K$ 降低到2.49时,空化初生,A截面开始出现空化,随 $K$ 进一步降低,平均气相体积分数及平均液相速度开始增加;当 $K \leq 1.91$ 时,即空化饱和阶段,入口截面平均气相体积分数及平均液相速度保持不变。

### 3.2 空化对流量的影响

图10是质量流量、流量系数在不同工况阶段的变化。可以看出,无空化阶段( $K > 2.49$ ):随 $K$ 下降,流量单调上升,流量系数不变,此阶段光学测试

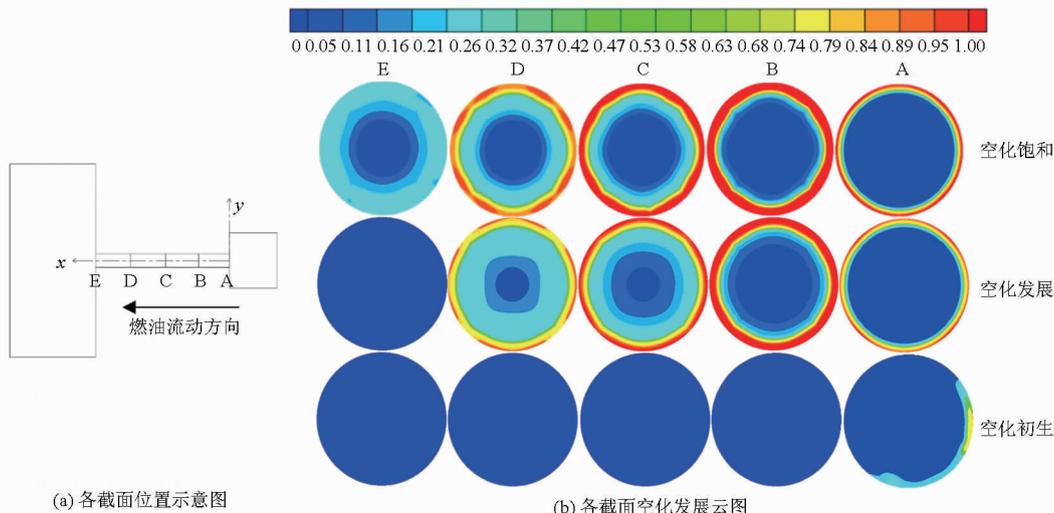


图7 不同截面气相体积分数分布云图

Fig. 7 Distribution of vapor volume fraction in different cross sections

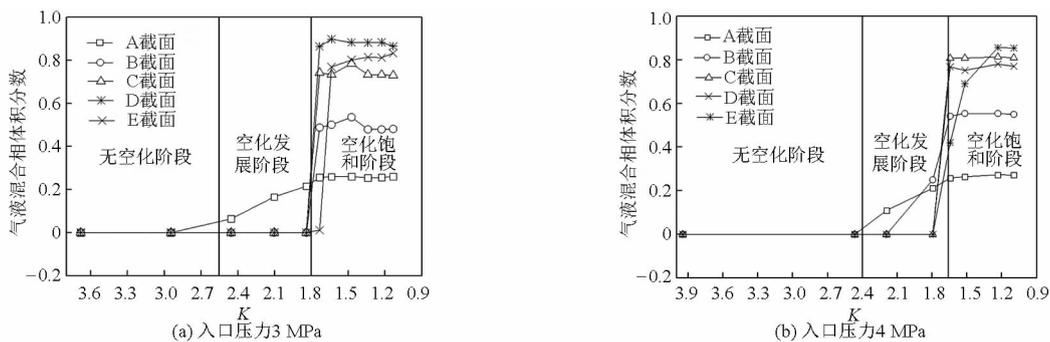


图8 气液混合相体积分数随K变化曲线

Fig. 8 Gas-liquid mixing percentage changing with K

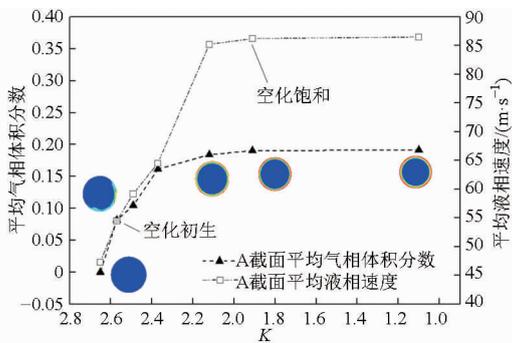


图9 平均气相体积分数及平均液相速度随K变化曲线

Fig. 9 Average vapor volume fraction and average liquid flow rate changing with K

及仿真结果均表明没有空化发生。

空化发展阶段 ( $1.91 \leq K \leq 2.49$ ): 空化初生发生在  $K = 2.49$  时, 随着  $K$  继续下降, 空化不断发展并向出口端延伸, 此时流量继续增加, 但增加幅度小于无空化阶段, 流量系数略有下降。

空化饱和阶段: 当  $K$  下降到 1.91 时, 空化发展到出口, 整个喷孔内均出现空化现象, 此时流量趋于稳定, 但流量系数持续降低, 且下降幅度大于空化发展阶段。

结合图9得到, 在无空化阶段, 燃油流量的增加

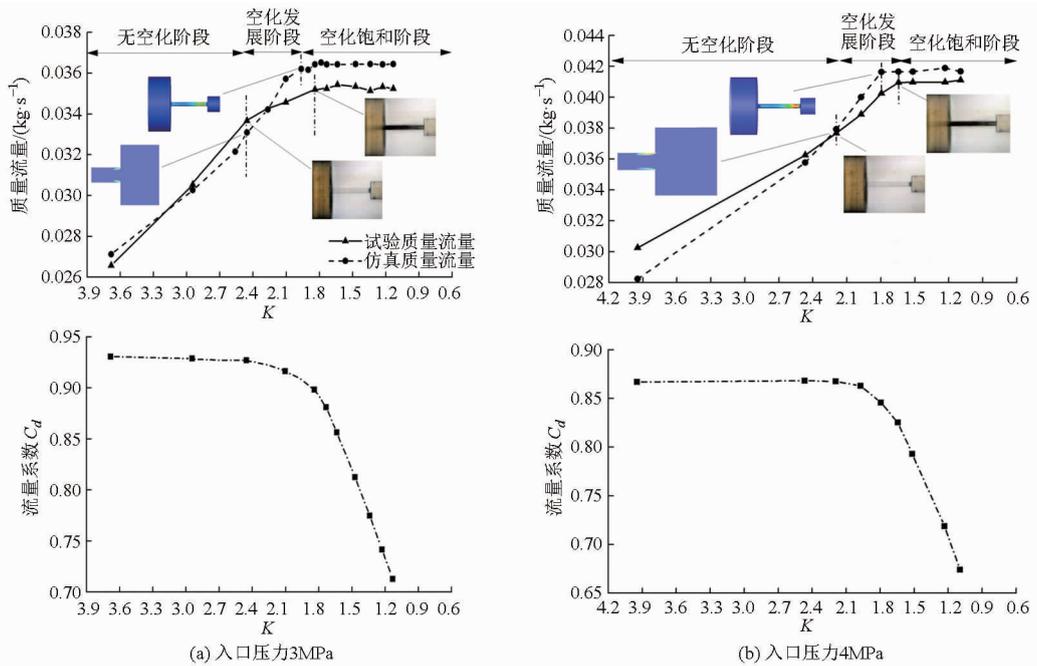
是由于压差的增大, 而此阶段喷孔内流动为纯液相流动, 所以燃油流量系数保持不变; 在空化发展阶段,  $K$  的进一步降低, 即压差的进一步增大, 使得燃油流量继续增大, 空化的发展使得纯液相流通面积减小, 燃油流量系数开始降低; 空化饱和阶段, 随  $K$  降低, 入口端燃油空化面积不变, 平均燃油流速不变使得流量不变, 而压差的进一步增大使得理论流量继续增大, 流量系数降低。

#### 4 结论

(1) 固定入口压力, 提高出口背压, 空化数不断降低。

(2) 随着空化数变化, 喷孔内燃油经历3个阶段: 无空化阶段、空化发展阶段以及空化饱和阶段。随空化数降低, 喷孔流向各截面气液混合相体积分数先不变; 当空化发生时, 喷孔入口端面空化体积分数先增加, 之后各截面依次开始增加; 当空化饱和时, 入口端面的空化体积分数达到稳定, 并沿喷孔内流向各截面空化体积分数依次达到稳定状态。

(3) 随空化数降低, 在无空化阶段, 燃油流量不断增加, 流量系数不变; 在空化发展阶段, 燃油流量

图10 质量流量和流量系数随 $K$ 变化曲线Fig. 10 Mass flow rate and flow coefficient against  $K$ 

增加幅度减小,流量系数开始降低;在空化饱和阶段,随空化数降低,燃油流量不变,流量系数降低幅度大于空化发展阶段。

(4)综合试验与仿真分析,在柴油机喷油量匹配时,需要考虑喷孔内空化特性对其造成的影响。

#### 参 考 文 献

- 胡鹏. 基于乙醇柴油单液滴蒸发和湍流扩散模型的喷雾和燃烧过程研究[D]. 镇江:江苏大学,2014.  
HU Peng. Research on spray and combustion process based on single droplet evaporation model and turbulent diffusion combustion model of ethanol-diesel [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)
- 吕继祖,白敏丽. 燃油的喷射雾化燃烧对柴油机缸内空气流动影响的研究[J]. 内燃机工程,2007,28(3):25-29.  
LÜ Jizu, BAI Minli. Research on influence of fuel spray atomization and combustion on air flow in cylinder [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(3): 25-29. (in Chinese)
- 沃恒洲. 柴油机喷嘴燃油的空化流动、气蚀与积炭特性研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.  
WO Hengzhou. Cavitation flow and erosion and carbon deposition of diesel fuel in the injection nozzle [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 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.
- 魏起森,杨铁皂,杜青. 柴油机喷油器内部空化效应的模拟研究[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2011,32(5):24-27.  
WEI Qisen, YANG Tiezao, DU Qing. Numerical simulation of cavitating flow in diesel nozzle [J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2011, 32(5): 24-27. (in Chinese)
- MOHAN B, YANG W, YU W, et al. Numerical simulation on spray characteristics of ether fuels [J]. Energy Procedia, 2015, 75: 919-924.
- MOHAN B, YANG W, CHOU S K. Cavitation in injector nozzle holes—a parametric study [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2014, 8(1): 70-81.
- 贾明,解茂昭,刘红,等. 伞喷嘴内空化现象的数值模拟[J]. 内燃机学报,2011,29(3):213-220.  
JIA Ming, XIE Maozhao, LIU Hong, et al. Numerical simulation of cavitation in the conical-spray nozzle [J]. Transactions of CSICE, 2011, 29(3): 213-220. (in Chinese)
- 尹必峰,俞升浩,杨宽宽. 基于大涡模拟的柴油机喷嘴内空化效应研究[J]. 工程热物理学报,2015,36(11):2517-2521.  
YIN Bifeng, YU Shenghao, YANG Kuankuan. The research of the cavitation phenomenon in diesel injector nozzles by large eddy simulation (LES) [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(11): 2517-2521. (in Chinese)
- SALVADOR F J, CARRERES M, JARAMILLO D, et al. Comparison of microsac and VCO diesel injector nozzles in terms of internal nozzle flow characteristics [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 203: 284-299.
- LÓPEZ J J, SALVADOR F J, OSCAR A, et al. A comprehensive study on the effect of cavitation on injection velocity in diesel nozzles [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 64: 415-423.

- 12 丁红元,刘芬,黄荣华,等.直喷汽油机多孔喷油器喷嘴内部流动数值模拟[J].农业机械学报,2013,44(3):6-11.  
DING Hongyuan, LIU Fen, HUANG Ronghua, et al. Numerical simulation of nozzle flow in GDI multi-hole injector [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(3):6-11. (in Chinese)
- 13 崔慧峰,罗福强,董少锋,等.柴油机渐缩形喷孔喷嘴流动特性研究[J].农业机械学报,2013,44(11):19-25.  
CUI Hui Feng, LUO Fuqiang, DONG Shaofeng, et al. Flow characteristics in diesel nozzle with convergent conical orifice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):19-25. (in Chinese)
- 14 仇滔,冯祥,雷艳,等.出口压力对柴油喷油器流量特性影响的试验研究[J].兵工学报,2015,36(5):777-780.  
QIU Tao, FENG Xiang, LEI Yan, et al. Experimental study of influence of outlet pressure on discharge characteristics of diesel injector [J]. Acta Armamentarii, 2015,36(5):777-780. (in Chinese)
- 15 钟汶君,何志霞,王谦,等.不同比例放大倍数喷嘴内空穴流动的试验研究[J].内燃机工程,2014,35(6):65-69.  
ZHONG Wenjun, HE Zhixia, WANG Qian, et al. Visualization experiment of cavitating flow in nozzle with different amplification [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014,35(6):65-69. (in Chinese)
- 16 MOLINA S, SALVADOR F J, CARRERES M, et al. A computational investigation on the influence of the use of elliptical orifices on the inner nozzle flow and cavitation development in diesel injector nozzles [J]. Energy Conversion and Management, 2014,79:114-127.
- 17 陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2008.