

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.004

柴油机渐缩形喷孔喷嘴流动特性研究^{*}

崔慧峰¹ 罗福强¹ 董少锋¹ 梁昱² 周立迎^{1,2}

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 贵阳学院机械工程学院, 贵阳 550005)

摘要: 利用混合多相流空穴模型, 对柴油机渐缩形喷孔喷嘴进行了三维气液两相流数值模拟, 分析了喷油压力、喷油背压及针阀运动对其内部空穴分布、湍动能分布、喷孔出口平均流速及流量系数的影响规律, 并与圆柱形喷孔喷嘴进行了对比分析。结果表明: 对于渐缩形喷孔喷嘴, 喷油压力的提高或针阀开启速度的加快, 均可增强喷孔内的空化效应, 强化喷孔内的液流紊乱, 提高喷孔出口平均流速及循环喷油量, 这对于燃油喷射及雾化的改善、柴油机性能的提高都是有利的; 随着喷油背压的增加, 喷嘴的流量系数虽略有提高, 但喷孔内的空化效应、液流紊乱及喷孔出口平均流速均逐渐降低; 相同喷射条件或针阀升程下, 喷嘴内的空化效应弱于圆柱形喷孔喷嘴, 喷孔出口平均流速及流量系数高于圆柱形喷孔喷嘴。

关键词: 柴油机 渐缩形喷孔 喷嘴 流动特性 数值模拟

中图分类号: TK423.8⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)11-0019-07

Flow Characteristics in Diesel Nozzle with Convergent Conical Orifice

Cui Huifeng¹ Luo Fuqiang¹ Dong Shaofeng¹ Liang Yu² Zhou Liying^{1,2}

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Mechanical Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China)

Abstract: The three-dimensional numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in diesel nozzle with convergent conical orifice (CDN) was carried out by using the mixed multiphase cavitation flow model, and the effects of injection pressure, injection back pressure and needle valve movement on the cavitating distribution, the turbulent kinetic energy distribution, the mean flow velocity at outlet (MFVO) and the discharge coefficient were analysed. The results show that the increasing in the injection pressure or the needle valve's open velocity will enhance the cavitation effect, strengthen the flow disturbance, improve MFVO and the cycle fuel injection quantity, which are beneficial to the performance of diesel engine, the fuel injection and atomization; with the increase of the injection back pressure, the discharge coefficient of CDN is increased slightly, but the cavitation effect, the flow disturbance and MFVO are decreased gradually; under the same injection condition or needle valve lift, the cavitation effect of CDN is weaker than that of diesel nozzle with cylindrical orifice, MFVO and the discharge coefficient of CDN are higher than those of diesel nozzle with cylindrical orifice.

Key words: Diesel engine Convergent conical orifice Nozzle Flow characteristics Numerical simulation

引言

随着柴油机排放法规的日益严格及人们对其燃

油经济性要求的逐步提高, 喷油器已成为柴油机最为关键的部件之一^[1]。对柴油机喷嘴的相关实验及模拟研究, 已受到国内外学者的高度重视^[2~5]。

收稿日期: 2012-12-18 修回日期: 2013-01-06

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51176068)、江苏高校优势学科建设工程资助项目和江苏省博士创新基金资助项目(CXZZ12_0674)

作者简介: 崔慧峰, 博士生, 主要从事动力机械测试及仿真研究, E-mail: chfwpp0517@163.com

通讯作者: 罗福强, 教授, 博士生导师, 主要从事发动机工作过程与排放控制研究, E-mail: luofq@ujs.edu.cn

当今制造技术的飞速发展,使得加工不同形状的喷孔成为可能。为此,锥形喷孔喷嘴应运而生。表征喷孔锥度的系数 K 可表示为

$$K = \frac{D_i - D_o}{L} \times 100$$

式中 D_i ——喷孔入口直径

D_o ——喷孔出口直径

L ——喷孔长度

对于系数 K 大于 0 的渐缩形喷孔喷嘴,虽已有较多学者进行过相关研究^[16~8],但对燃油喷射及雾化具有重要影响的喷嘴内空穴流动^[9]及喷孔出流的系统研究,还鲜有报道。为此,建立柴油机喷嘴内三维气液两相流空穴模型,验证后,进行渐缩形喷孔喷嘴内的气液两相流数值模拟,分析喷油压力、喷油背压及针阀运动对其内部空穴分布、湍动能分布、喷孔出口平均流速及流量系数的影响规律,并与圆柱形喷孔喷嘴进行对比分析。

1 计算模型

采用混合多相流模型附加空穴模型^[10],对柴油机渐缩形喷孔喷嘴的流动特性进行分析。混合相的连续性方程和动量方程分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + S_i \end{aligned} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

其中

$$\rho = (1 - \alpha) \rho_l + \alpha \rho_v \quad (3)$$

$$\mu = (1 - \alpha) \mu_l + \alpha \mu_v \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\frac{4}{3} n_0 \pi r^3}{1 + \frac{4}{3} n_0 \pi r^3} \quad (5)$$

式中 ρ_l ——液相密度 ρ_v ——气相密度
 μ_l ——液相粘度 μ_v ——气相粘度
 α ——气相体积分数 u ——混合相流速
 r ——空穴区气泡半径
 S_i ——广义源项 n_0 ——气泡数密度
 气泡数密度 n_0 随喷射条件而变化^[5],即

$$n_0 = \frac{(p_i - p_o)^3}{10^6} \quad (6)$$

式中 p_i ——喷油压力 p_o ——喷油背压
 气相输运方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha V) = \frac{(1 - \alpha) \rho_l}{(1 - \alpha) \rho_l + \alpha \rho_v} \frac{4 n_0 \pi r^2}{1 + \frac{4}{3} n_0 \pi r^3} \frac{dr}{dt} \quad (7)$$

单个气泡的成长破裂过程计算公式为

$$r \frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = \frac{p_B - p_N}{\rho_l} - \frac{2\sigma}{\rho_l r} - 4 \frac{\mu_l}{\rho_l r} \frac{dr}{dt} \quad (8)$$

式中 p_B ——气泡内压力,可用蒸汽部分压力 p_v 和非凝结气体部分压力 p_N 之和来表示

σ ——表面张力系数

柴油机喷嘴内部,特别是喷孔内部,燃油流速非常高,流动存在明显的法向应变。虽然标准 $k-\epsilon$ 模型是分析湍流的首选模型,但其通常对湍流流动估计过高,由于 RNG $k-\epsilon$ 模型能弥补上述不足^[11],因此,采用 RNG $k-\epsilon$ 模型来模拟气液混合相的湍流流动。近壁区内的流动,采用标准壁面方程进行处理。

2 模型的求解及验证

Winklhofer E 等^[12]通过高速摄影的方法,研究了柴油在准二维透明喷嘴内的空穴流动特性。该喷嘴喷孔为一个矩形截面、厚 0.3 mm、入口宽 0.301 mm、出口宽 0.284 mm、长 1 mm、入口导圆半径 0.02 mm 的通道。试验过程中,保持燃油温度 27℃ 及入口压力 10 MPa 不变,通过调节背压得到所期望的喷油压差。基于此喷嘴及试验工况,对所建数学模型的准确性进行验证。

贾明等^[13]指出上述喷嘴的数值计算结果对网格密度具有强烈依赖性。为此,在喷嘴模型三维结构化网格生成过程中,根据文献[13]中的网格密度要求,对三维网格的面网格进行了精确控制及适当调整。数学模型的控制方程组采用 CFD 软件 Fluent 进行求解;控制方程的离散采用基于内节点的有限容积法;采用一阶中心差分格式离散扩散项,二阶迎风差分格式离散对流项;进出口均采用压力边界,其他均采用壁面边界;流场的计算采用 SIMPLEC 算法。

图 1 所示为不同喷油压差时喷孔内空穴分布的计算值(右侧图)与试验值(左侧图)的比较。计算结果与试验结果均显示:喷油压差 6 MPa 时,喷孔内的空穴仅发生于喷孔入口处,且气相体积分数较小,此时喷孔内的空穴处于初生阶段;随着喷油压差的增大,喷孔内的空穴层沿着喷孔壁面逐渐向喷孔出口处延伸,且当喷油压差达到 8 MPa 时,喷孔内的空穴已沿着喷孔壁面延伸至喷孔出口,出现了所谓“超空化现象”。图 2 显示了不同喷油压差下喷嘴质量流量计算值与试验值的对比。从图 2 可以看出,利用所建模型计算得到的喷嘴质量流量与试验值随喷油压差的变化呈现出相同的变化趋势,且两者误差较小,均处于 5% 以内。据贾明^[13]和王子

玉^[14]等针对计算模型的验证标准知,所建模型能够较准确预测喷嘴内的空穴流动现象。

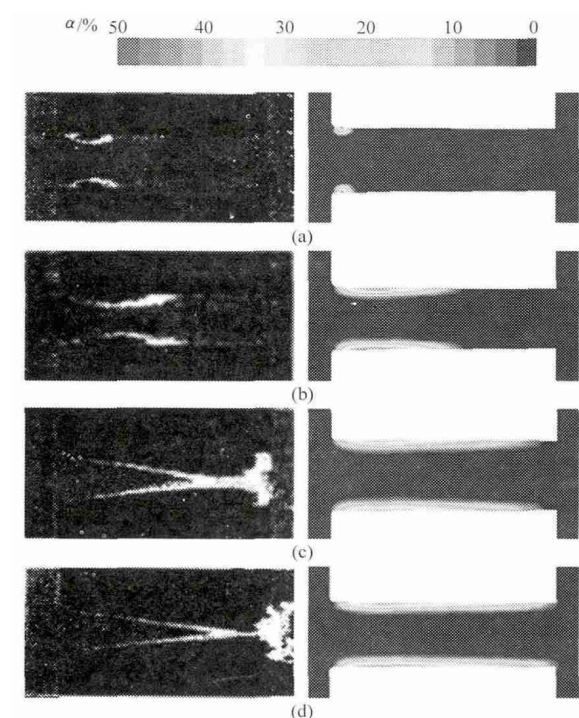


图 1 不同喷油压差下空穴分布计算值与试验值的比较

Fig. 1 Comparisons between the predicted cavitating distribution with experimental data under different pressure drop

(a) 6 MPa (b) 7 MPa (c) 7.5 MPa (d) 8 MPa

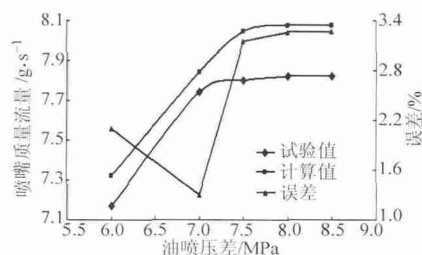


图 2 不同喷油压差下质量流量计算值与试验值的比较

Fig. 2 Comparisons between the predicted mass flow rate with experimental data under different pressure drop

3 计算结果对比分析

以表 1 所示有压力室四孔均布渐缩形喷孔喷嘴 ($K=0.7$, 简记 KN 型喷嘴) 为对象, 利用所建模型, 对其内部的气液两相流流动特性进行研究, 并与表 1 所示有压力室四孔均布圆柱形喷孔喷嘴 (简记

表 1 喷嘴几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of the nozzles

参数	KN 型喷嘴	SAC 型喷嘴
喷孔入口直径/mm	0.25	0.25
喷孔出口直径/mm	0.243	0.25
喷孔长度/mm	1	1
喷孔轴线与针阀轴线夹角/(°)	75	75
针阀行程/mm	0.3	0.3

SAC 型喷嘴) 进行对比分析。

基于喷油器的结构特点, 选取包含整个喷孔的 1/4 喷嘴为对象, 采用分块耦合及“面”控制“体”的方法生成三维结构化六面体网格, 并对重点计算区域喷孔处进行加密处理。最大针阀升程时 KN 型喷嘴的计算求解区域如图 3 所示, 网格总数为 92 344 个, 所有网格均为六面体网格。进出口均采用压力边界, 截取 1/4 喷嘴时所产生的两个剖面均采用旋转周期性边界, 其他均采用壁面边界。

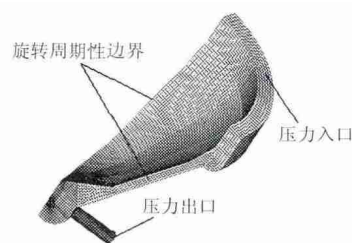


图 3 喷嘴计算网格

Fig. 3 Computational grid of the nozzle

3.1 喷油压力的影响

图 4~6 分别为喷油背压 3 MPa, 不同喷油压力时喷孔内空穴分布、湍动能分布以及喷孔质量流量、出口平均流速、流量系数对比图(图 4、5 左侧图为 KN 型喷嘴, 右侧图为 SAC 型喷嘴)。由图 4 知, 随着喷油压力的增加, 两种喷嘴喷孔内空穴层的长度逐渐增加, 厚度逐渐变大, 即空化效应逐渐增强。但相同喷油压力下, KN 型喷嘴喷孔内空穴层的长度及厚度均明显小于 SAC 型喷嘴, 这是因为渐缩形喷孔可有效抑制其内部空穴的发生^[6]。同时, 不论 KN 型喷嘴还是 SAC 型喷嘴, 当喷油压力达到一定值时(KN 型喷嘴 110 MPa, SAC 型喷嘴 80 MPa), 喷油压力再次增加对喷嘴内空化效应的影响将变得不再明显。基于射流空穴雾化理论, 上述现象可以合理解释玉木伸茂的研究结果^[15]: 当喷油压力达到一定程度后, 其对射流雾化的作用将变得不再明显。由图 5 知, 随着喷油压力的增加, 两种喷嘴喷孔内的湍动能均逐渐增加, 且喷孔内的最大湍动能及湍动能梯度也逐渐增加, 即喷孔内的液流紊乱逐渐增强。从图 6 可以看出, 随着喷油压力的增加, 两种喷嘴的喷孔出口平均流速逐渐提高, 流量系数逐渐降低。但相同喷油压力下, KN 型喷嘴的流量系数要高于 SAC 型喷嘴, 这是因为: KN 型喷嘴的喷孔出口几何截面虽比 SAC 型喷嘴小, 但由于相同喷油压力下 KN 型喷嘴内的空化效应较 SAC 型喷嘴弱(由图 4 知), 使得相同喷油压力下 KN 型喷嘴的实际流量较 SAC 型喷嘴虽有所降低, 但降低幅度较小且随着喷油压力的升高, 两者的差值逐渐变小(由图 6 知, 30 MPa、50 MPa、80 MPa、110 MPa、140 MPa 时 KN 型

喷嘴的实际流量分别为 SAC 型喷嘴实际流量的 96.39%、98.52%、99.07%、99.14%、99.12%); 而喷嘴的理论流量只与喷油条件及喷孔几何参数相关^[7], 致使相同喷油条件下 KN 型喷嘴的理论流量较小, 只为 SAC 型喷嘴理论流量的 94.5%。由流量系数定义知, 相同喷油压力下 KN 型喷嘴的流量系数要大于 SAC 型喷嘴。同时, 相同喷油压力下, KN 型喷嘴的喷孔出口平均速度高于 SAC 型喷嘴, 这是因为相同喷油条件下, 喷孔出口平均流速与流量系数成正比^[16], 由上述分析知, 相同喷油压力下, KN 型喷嘴的喷孔出口平均速度要大于 SAC 型喷嘴。

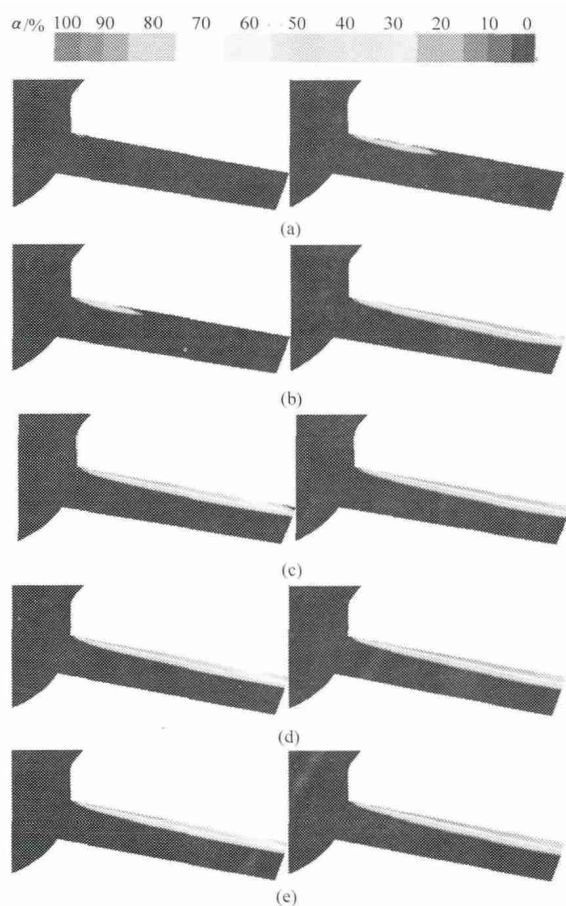


图4 不同喷油压力下的空穴分布

Fig. 4 Contour of volume fraction of vapor under different injection pressure

(a) 30 MPa (b) 50 MPa (c) 80 MPa (d) 110 MPa (e) 140 MPa

对于 KN 型喷嘴, 喷油压力提高所导致的喷孔内空化效应及液流紊乱的增强, 喷孔出口平均流速的提高, 将改善油束的初次雾化质量^[9], 减小液滴的索特平均直径, 增大喷雾的贯穿距离, 这对于柴油机燃烧过程的改善是非常有利的。

3.2 喷油背压的影响

图7~9分别为喷油压力 80 MPa, 不同喷油背压时喷孔内空穴分布、湍动能分布以及喷孔出口平均流速、流量系数对比图(图7、8左侧图为 KN 型喷

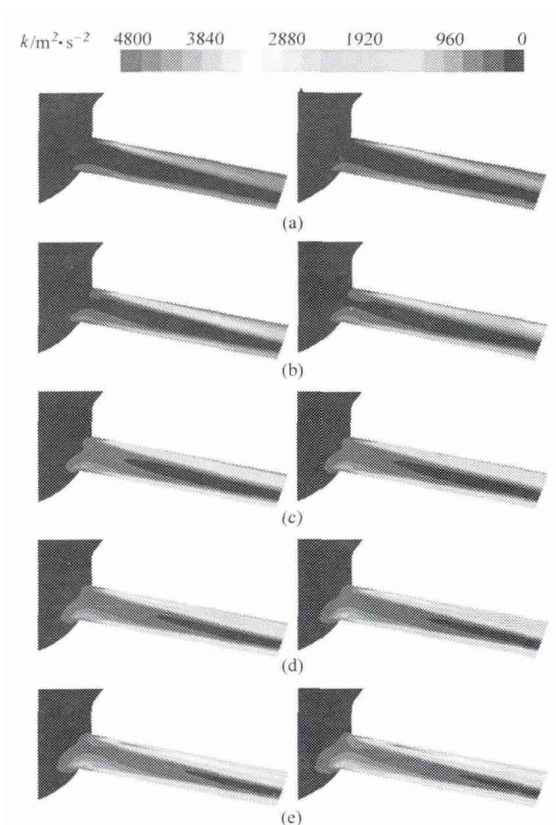


图5 不同喷油压力下的湍动能分布

Fig. 5 Contour of turbulent kinetic energy under different injection pressure

(a) 30 MPa (b) 50 MPa (c) 80 MPa (d) 110 MPa (e) 140 MPa

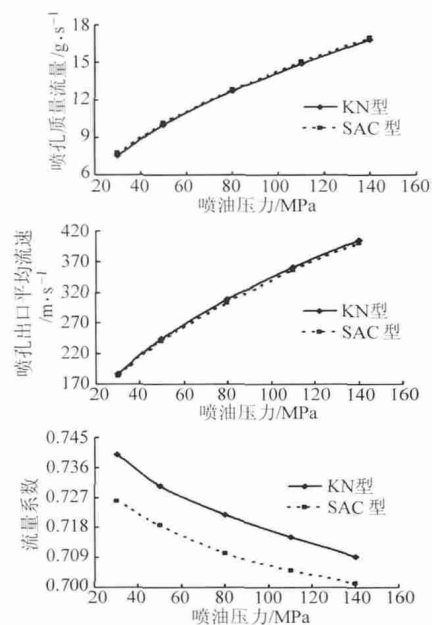


图6 不同喷油压力下的喷孔质量流量、出口平均流速及流量系数

Fig. 6 Mass flow rate, mean flow velocity at outlet and discharge coefficient under different injection pressure

嘴, 右侧图为 SAC 型喷嘴)。由图7可知, 喷油压力一定时, 随着喷油背压的增加, 两种喷嘴喷孔内空穴层的长度、厚度及体积分数均逐渐减小, 即喷油背压

对喷孔内的空化效应具有一定的抑制作用,且 KN 型喷嘴尤为明显。对于 KN 型喷嘴,喷油背压 7 MPa 时,其内部空穴仅发生于喷孔入口的上边缘附近,且空穴层的长度、厚度及体积分数均非常小;而对于 SAC 型喷嘴,喷油背压 7 MPa 时,虽空穴层的厚度略有变小且其在距喷孔出口一定位置处与喷孔壁面相脱离,但其依然延伸到了喷孔出口处,喷孔内依然处于较强空穴流动状态。由图 8 可以看出,随着喷油背压的增加,两种喷嘴内的湍动能及湍动能梯度均逐渐变小,低湍动能区域逐渐增加,即喷孔内的液流紊流逐渐降低。从图 9 可以看出,随着喷油背压的增加,两种喷嘴的喷孔出口平均流速逐渐降低,流量系数逐渐提高,但相同喷油背压下,KN 型喷嘴的喷孔出口平均流速及流量系数高于 SAC 型喷嘴。导致上述现象差异的原因与 3.1 节相同,此处不再详述。

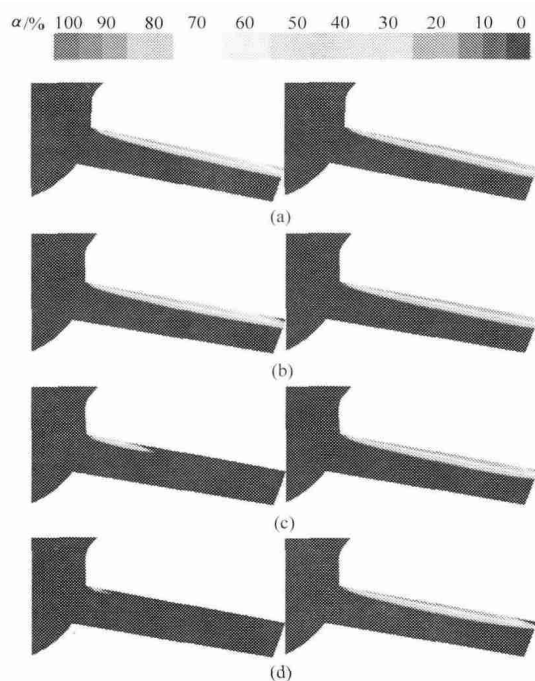


图 7 不同喷油背压下的空穴分布

Fig. 7 Contour of volume fraction of vapor under different injection back pressure

(a) 2 MPa (b) 3 MPa (c) 5 MPa (d) 7 MPa

相关文献指出^[9],燃油的喷射及发展主要包括喷孔内的空穴和湍流所影响的初次雾化及传统气动雾化理论所解释的二次雾化过程。对于渐缩形喷孔喷嘴,喷油背压的增加将抑制喷孔内的空化效应,降低喷孔内的液流紊流及喷孔出口平均流速,这对于燃油的喷射及雾化是不利的。

3.3 针阀运动的影响

图 10~12 所示为喷油压力 50 MPa,喷油背压 3 MPa,不同针阀升程时喷孔内空穴分布、湍动能分

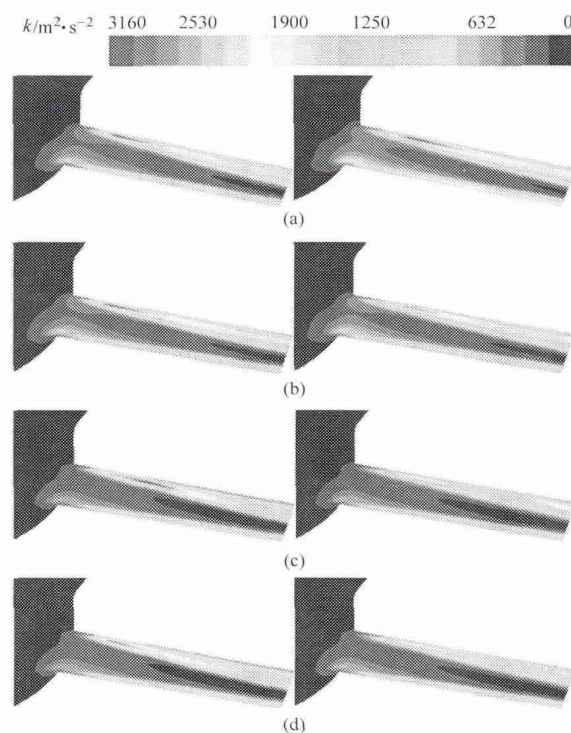


图 8 不同喷油背压下的湍动能分布

Fig. 8 Contour of turbulent kinetic energy under different injection back pressure

(a) 2 MPa (b) 3 MPa (c) 5 MPa (d) 7 MPa

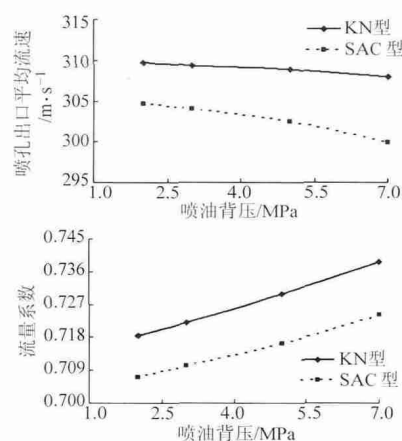


图 9 不同喷油背压下喷孔出口平均流速及流量系数

Fig. 9 Mean flow velocity at outlet and the discharge coefficient under different injection back pressure

布以及喷孔出口平均流速、流量系数对比图(图 10 和 11 左侧图为 KN 型喷嘴,右侧图为 SAC 型喷嘴)。由图 10 可知,随着针阀升程的增加,两种喷嘴内的空化效应逐渐增强,这是因为随着针阀升程的增加,针阀头部与针阀座面间的流通面积逐渐增大,使得燃油流经此通道时的局部损失逐渐减小,致使压力室内的燃油压力逐渐提高,由 3.1 节的分析知,燃油压力的提高,将增强喷孔内的空化效应。由图 10 还可看出,相同针阀升程下,KN 型喷嘴内的空化效应也是弱于 SAC 型喷嘴的。从图 11 可以看出,小针

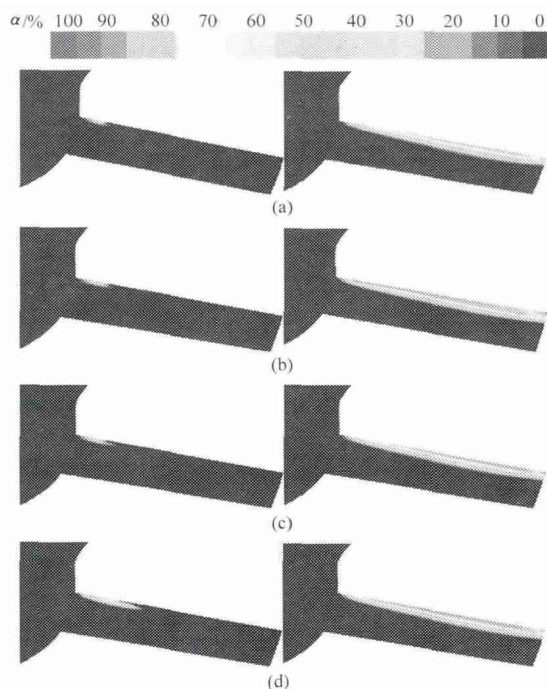


图10 不同针阀升程下的空穴分布

Fig. 10 Contour of volume fraction of vapor under different needle valve lifts

(a) 0.1 mm (b) 0.15 mm (c) 0.2 mm (d) 0.3 mm

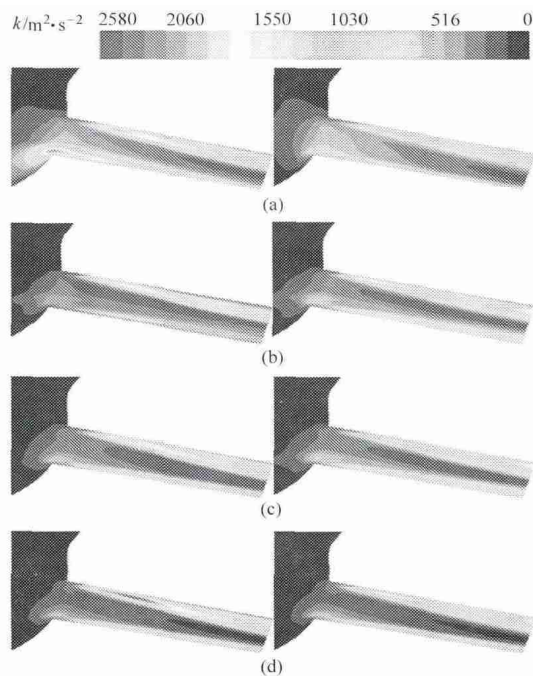


图11 不同针阀升程下的湍动能分布

Fig. 11 Contour of turbulent kinetic energy under different needle valve lifts

(a) 0.1 mm (b) 0.15 mm (c) 0.2 mm (d) 0.3 mm

阀升程(0.1 mm)时,喷孔内的湍动能分布较混乱,这是由小针阀升程时喷嘴内燃油流动欠稳定所致。从图10、11可以看出,随着针阀升程的增加,空穴所在位置及其附近区域的湍动能逐渐增加,纯液相区域的湍动能渐趋均匀。这是因为:随着针阀升程的

增加,喷孔内的空化效应逐渐增强,由于气泡的快速生成及溃灭,增强了空穴所在位置及其附近区域的燃油扰动,致使上述区域的液流紊乱逐渐增强;同时,由于喷孔内的燃油流动随针阀升程的增加渐趋稳定(由图12知),使得纯液相区域的湍动能随针阀升程的增加而渐趋均匀。由图12知,针阀升程小于0.2 mm时,两种喷嘴的流量系数随针阀升程的增加逐渐增加,而当针阀升程大于0.2 mm时,两种喷嘴的流量系数渐趋稳定,虽随针阀升程的增加略有增加,但增加幅度较小。这是因为:当针阀升程小于针阀总升程的50%时,喷孔流量随针阀升程的增加而按比例增加,此后,流量随针阀升程的增加将变得不再明显^[2]。从图12还可看出,相同针阀升程下,KN型喷嘴的喷孔出口平均流速及流量系数也大于SAC型喷嘴。

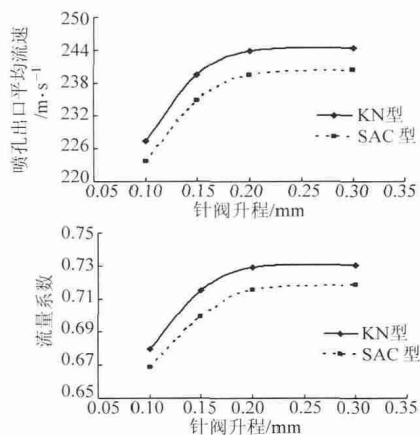


图12 不同针阀升程下喷孔出口平均流速及流量系数

Fig. 12 Mean flow velocity at outlet and the discharge coefficient under different needle valve lifts

由上述分析知,对于KN型喷嘴,加快针阀的开启速度可增加喷油持续期内的喷油量,强化喷孔内的液流紊乱,提高喷孔出流速度,这对于燃油喷射及雾化的改善、柴油机性能的提高都是有利的。

4 结论

(1) 对于渐缩形喷孔喷嘴,随着喷油压力的增加,喷孔内的空化效应逐渐增强,液流紊乱、出口平均流速及质量流量逐渐提高,但流量系数逐渐降低;喷油背压的增加,虽可小幅提高喷嘴流量系数,但对喷孔内的空化效应、液流紊乱及出口平均流速均具有抑制作用;针阀开启速度的加快,对喷孔内的空化效应、出口平均流速及流量系数的提高都是有利的。同时,相同喷射条件或针阀升程下,喷嘴内的空化效应均弱于圆柱形喷孔喷嘴,而出口平均流速及流量系数均高于圆柱形喷孔喷嘴。

(2) 喷油压力的提高或针阀开启速度的加快,

均可增强渐缩形喷孔喷嘴内的空化效应,强化喷嘴于燃油喷射及雾化的改善、柴油机性能的提高都是有利的。内的液流紊乱,增大出口平均流速及质量流量,这对

参 考 文 献

- 1 Som S, Ramirez A I, Longman D E, et al. Effect of nozzle orifice geometry on spray, combustion, and emission characteristics under diesel engine conditions [J]. Fuel, 2011, 90(3): 1 267 ~ 1 276.
- 2 大石行纪, 渡边庆人. 计算流体力学(CFD)在产品研究和开发中的应用[J]. 油泵喷嘴技术, 1995(4): 20 ~ 24.
- 3 Shervani-Tabar M T, Parsa S, Ghorbani M. Numerical study on the effect of the cavitation phenomenon on the characteristics of fuel spray [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2012, 56(5 ~ 6): 105 ~ 117.
- 4 Fang T, Coverdill R E, Lee C F, et al. Effects of injection angles on combustion processes using multiple injection strategies in an HSDI diesel engine [J]. Fuel, 2008, 87(15 ~ 16): 3 232 ~ 3 239.
- 5 Wang X, Su W. Numerical investigation on relationship between injection pressure fluctuations and unsteady cavitation processes inside high-pressure diesel nozzle holes [J]. Fuel, 2010, 89(9): 2 252 ~ 2 259.
- 6 Benajes J, Pastor J V, Payri R, et al. Analysis of the influence of diesel nozzle geometry in the injection rate characteristic [J]. Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(1): 63 ~ 71.
- 7 Payri R, García J M, Salvador F J, et al. Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics [J]. Fuel, 2005, 84(5): 551 ~ 561.
- 8 Dernotte J, Hespel C, Foucher F, et al. Influence of physical fuel properties on the injection rate in a diesel injector [J]. Fuel, 2012, 96: 153 ~ 160.
- 9 Tatsch I R, Sarre C K, Berg E. IC engine spray modeling status and outlook [C]//International Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting at the SAE Congress, 2002: 234 ~ 246.
- 10 何志霞, 袁建平, 李德桃. 垂直多孔喷嘴内部流动空穴现象数值模拟分析 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 4 ~ 8.
He Zhixia, Yuan Jianping, Li Detao. Numerical simulation and analysis of cavitating phenomena in a vertical multi-hole nozzle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2): 4 ~ 8. (in Chinese)
- 11 Reitz R D, Rutland C J. Development and testing of diesel engine CFD models [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1995, 21(2): 173 ~ 196.
- 12 Winklhofer E, Kull E, Kelz E, et al. Comprehensive hydraulic and flow field documentation in model throttle experiments under cavitation conditions [C]//Proceedings of the ILASS-Europe Conference, Zurich, 2001: 574 ~ 579.
- 13 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)
- 14 王子玉, 程秀围, 梁昱, 等. 柴油机燃用小桐子油的燃烧过程三维模拟 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 16 ~ 21.
Wang Ziyu, Cheng Xiuwei, Liang Yu, et al. 3-D simulation of combustion process in a diesel engine fueled with jatropha curcas oil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 16 ~ 21. (in Chinese)
- 15 玉木伸茂. 喷嘴喷孔空穴现象对液体喷束雾化的影响 [J]. 国外内燃机, 1998(8): 23 ~ 29.
- 16 Gong Chen. Study of fuel temperature effects on fuel injection, combustion and emission of direct-injection diesel engines [C]//2003 Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division, Erie, Pennsylvania USA, 2003.