doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.043

喷孔几何特征对孔内流动及近孔区域燃油雾化的影响

高永强[1,2]　魏明锐[1,2]　颜伏伍[1,2]　文　华[3]

(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. 武汉理工大学汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070; 3. 南昌大学机电工程学院, 南昌 330031)

摘要: 采用混合多相流模型与空穴模型相结合的方法,对喷孔内部流动特性及近孔区域燃油喷射及雾化进行数值模拟。计算结果表明,喷孔几何特征对其内部流动特性及近孔区域燃油喷射及雾化具有重要影响,对于截面渐扩的喷孔,孔内空化效应、湍流度均增强,喷孔出口流速提高,喷油压力增大时效果更显著,空穴强度增大能够促进近孔区域燃油快速分裂,使燃油液滴雾化更细小,有利于柴油机油气混合以及性能的提高。对于截面渐缩的喷孔,孔内空化效应受到抑制、湍流度和喷孔出口流速均降低,喷孔出口液柱较长、液块较大,近孔区域燃油雾化程度降低。

关键词: 空穴模型; 变截面喷孔; 燃油雾化

中图分类号: TK470　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)12-0347-07

Influence of Nozzle Geometry on Internal Flow Characteristics of Injection Nozzle and Near Nozzle Region Injection and Atomization

Gao Yongqiang[1,2]　Wei Mingrui[1,2]　Yan Fuwu[1,2]　Wen Hua[3]

(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 University of Technology*, *Wuhan* 430070, *China*
3. *School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Nanchang University*, *Nanchang* 330031, *China*)

Abstract: The presence of cavitation and turbulence in a diesel injector nozzle has significant effects on the subsequent spray characteristics. The influence of nozzle hole shape on internal flow and near-nozzle region fuel injection and atomization under stationary conditions was studied. Five standard-sac nozzles with the same hole inlet diameter but different hole shapes (cylindrical, divergent, convergent, divergent - convergent and convergent - divergent) were used for the investigation of influence of nozzle hole shape on internal flow and spray. Large eddy simulation (LES) along with a two phase homogenous mixture model were employed. From research results, three important conclusions can be drawn. Firstly, the geometry characteristics of the orifice had a great impact on internal flow of injection nozzle. The cavitation can raise the effective velocity at the nozzle exit and strengthen flow disturbance of the nozzles, and such effect became even more obvious with higher injection pressure, e.g., 100MPa. Secondly, the diverging-shaped nozzle was more prone to cavitate, that's the very opposite of the converging nozzles. Stronger outlet cavitation intensity was found in hyperbolic-shaped nozzles, and stronger inlet cavitation intensity was found in elliptic-shaped nozzles. Thirdly, the cavitation intensity had a great impact on the near-nozzle region fuel break-up and atomization, especially the outlet cavitation such as the diverging-shaped nozzle and hyperbolic-shaped nozzle under the condition of high injection pressure, which were beneficial to the performance of diesel engine, the fuel injection and atomization.

Key words: cavitation model; varying hole cross-section; fuel atomization

收稿日期: 2016-04-28　修回日期: 2016-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51466009)和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

燃油的喷射、雾化和蒸发及其与空气的混合是影响柴油机燃烧和排放的关键因素,良好的雾化对实现柴油机的高效低污染燃烧具有重要的意义。长期以来,人们对柴油机中的喷雾特性进行了大量研究,众多研究表明,喷雾特性与喷油器喷孔的几何形状有很大的关系[1-6]。因此,研究喷孔的几何特征形状与喷雾特性的关系,可为改善喷雾形态、促进油气混合,提高燃烧性能,以及优化柴油机喷油器设计提供理论基础。

近年来,很多学者展开了喷孔几何特征对孔内流动特性的研究,邹振宇等[7]主要研究了渐扩和渐缩喷孔的扩张程度对孔内空穴流动特性的影响。卢国权等[8]主要分析了喷油压力以及背压对椭圆和双曲线喷孔的空穴流动状态的影响,何志霞等[9]、魏明锐等[10]、张乐超等[11]则从喷孔类型及喷孔锥度、入口圆弧、喷孔直径、孔壁粗糙度等特征尺寸对柴油喷雾锥角、空穴的产生、出口流速进行了分析。由此可见,喷孔几何特征是影响喷孔内空穴流动形态重要的影响因素之一,但喷孔内部流动特性对喷孔近孔区域燃油喷射及雾化研究,还鲜有报道。本文建立柴油机喷孔内气液两相流空穴模型,验证后,对喷孔内流动特性及近孔区域燃油喷射雾化的影响进行大涡模拟,分析喷孔几何特征内部空化效应、湍流度、压力、流速对近孔区域燃油喷射雾化的影响规律。

1 数值计算模型

1.1 基本控制方程

采用混合多相流模型附加空穴模型,对不同几何特征的喷孔内部流动特性及近场区域燃油喷射及雾化过程进行大涡模拟,混合相的连续性方程和动量方程分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{u}_i\bar{u}_j)}{\partial x_i}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}+\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2}-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\tau_{ij}=\overline{u_iu_j}-\bar{u}_i\bar{u}_j \tag{3}$$

式中 ρ——混合相密度

μ——混合相动力粘度

$\bar{u}_i$——速度,上标“-”表示过滤或平均,下标 i 表示坐标方向

τ_{ij}——亚网格应力,下标 ij 表示不同的坐标方向

亚网格应力是一个未知量,基于流场各向同性涡粘假设,亚网格应力可根据大尺度流场的应变率确定,即

$$\tau_{ij}=\frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij}-2\upsilon_t\bar{S}_{ij} \tag{4}$$

$$\bar{S}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \tag{5}$$

式中 $\bar{S}_{ij}$——大尺度变形率张量

δ_{ij}——Kronecker 参数

υ_t——亚网格涡粘系数,通过不同模型计算

SONE 等[12]提出通过求解亚网格湍动能的输运方程来获得亚网格涡粘系数

$$\upsilon_t=C_k(k_{sgs})^{1/2}\Delta$$

从而提升大涡模拟的计算精度。亚网格湍动能输运方程为

$$\frac{\partial k_{sgs}}{\partial t}+\frac{\partial \bar{u}_j k_{sgs}}{\partial x_j}=-\tau_{ij}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}-C_\varepsilon\frac{k_{sgs}^{3/2}}{\Delta}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_j}\right) \tag{6}$$

式中 k_{sgs}——亚网格湍动能 Δ——网格尺寸

C_ε、C_k、σ_k 均为常数,取值分别为 $\sigma_k=1$,$C_\varepsilon=1.048$,$C_k=0.094$。混合相密度和粘度为

$$\rho=\alpha_l\rho_l+\alpha_v\rho_v \tag{7}$$

$$\mu=\alpha_l\mu_l+\alpha_v\mu_v \tag{8}$$

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_l——液相体积分数

α_v——气相体积分数

1.2 空化模型

目前常用的空化模型,大多基于 Rayleigh-Plesset 提出的气泡生长方程[13-14]。Rayleigh-Plesset 模型提供了控制蒸气产生和凝结的基本方程,描述液体中的气泡生长,方程的具体形式为

$$\frac{p_v(T)-p}{\rho_l}=R\frac{\mathrm{d}^2R}{\mathrm{d}t}+\frac{3}{2}\left(\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}\right)^2+\frac{2\sigma}{\rho_lR} \tag{9}$$

式中 p_v——气泡内压强 p——远场压强

R——气泡半径 σ——液体表面张力

气泡内没有未溶解的气体,只有液体和蒸气。忽略二次项和表面张力项,则简化为

$$\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}=\sqrt{\frac{2(p_v-p)}{3\rho_l}} \tag{10}$$

Schnerr-Sauer[15]推导了液相到气相的净质量输运解析式

$$\frac{\partial(\rho_v\alpha_v)}{\partial t}+\nabla(\rho_v\alpha_vu_i)=\frac{\rho_v\rho_l}{\rho}\frac{\mathrm{d}\alpha_v}{\mathrm{d}t} \tag{11}$$

Schnerr 和 Sauer 利用质量源项建立单位液体体积内气泡数 n 和气相体积分数 α_v 之间的关系式

$$\alpha_v = n\frac{4}{3}\pi R^3 \Big/ \left(1 + n\frac{4}{3}\pi R^3\right) \tag{12}$$

$$\frac{\mathrm{d}\alpha_v}{\mathrm{d}t} = \alpha_v(1-\alpha_v)\frac{3}{R}\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t} \tag{13}$$

这里，$n = 1.6 \times 10^{13}$，$R = 2.0$ μm。

因此，液相到气相的质量输运率 $\dot{m}$ 的表达式为

$$\dot{m} = \frac{\rho_v\rho_l}{\rho}\alpha_v(1-\alpha_v)\frac{3}{R}\sqrt{\frac{2(p_v-p)}{3\rho_l}} \tag{14}$$

Schnerr－Sauer 空化模型中，蒸发率和凝结率采用相同的形式，蒸发和凝结系数均取 1，质量输运率 $\dot{m}$ 可用蒸发率和凝结率表示

$$\dot{m}^+ = \frac{\rho_v\rho_l}{\rho}\alpha_v(1-\alpha_v)\frac{3}{R}\sqrt{\frac{2(p_v-p)}{3\rho_l}} \quad (p \leqslant p_v) \tag{15}$$

$$\dot{m}^- = \frac{\rho_v\rho_l}{\rho}\alpha_v(1-\alpha_v)\frac{3}{R}\sqrt{\frac{2(p-p_v)}{3\rho_l}} \quad (p > p_v) \tag{16}$$

式中　$\dot{m}^+$——液相蒸发率　　$\dot{m}^-$——气相凝结率

1.3　数值方法

数学模型的控制方程组采用 CFD 软件 OpenFOAM 进行求解，控制方程的时间离散采用隐式欧拉格式离散，动量方程和连续性方程中的对流项采用二阶中心差分格式进行离散，其他方程中的对流项采用一阶迎风差分格式进行离散；扩散项采用高斯线性格式离散。由于液体体积分数的相界面两侧存在一个阶跃，为了避免发散，式(11)的对流相需要采取 Gauss van Leer 差分格式。压力、速度场耦合采用 PISO 算法。

2　计算几何模型

2.1　模型的求解及验证

WINKLHOFER 等[16]通过高速摄影方法，研究了柴油在准二维透明喷嘴内空穴流动特性。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。

图 1 为不同喷油压差时喷孔内空穴分布的计算值与试验值的比较。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”。从图中可以看出，所建模型计算得到的孔内空穴分布与试验值随喷油压差的变化呈现出相同的变化趋势，所建模型能够较准确地预测喷嘴内的空穴流动现象。贾明等[17]、崔慧峰等[18]、卢国权等[8]和 SUN 等[19]都使用 WINKLHOFER 的试验结果对其所建模型进行验证，虽然应用不同仿真软件，但均得出所建模型能够较准确地预测喷孔内的空穴流动现象。

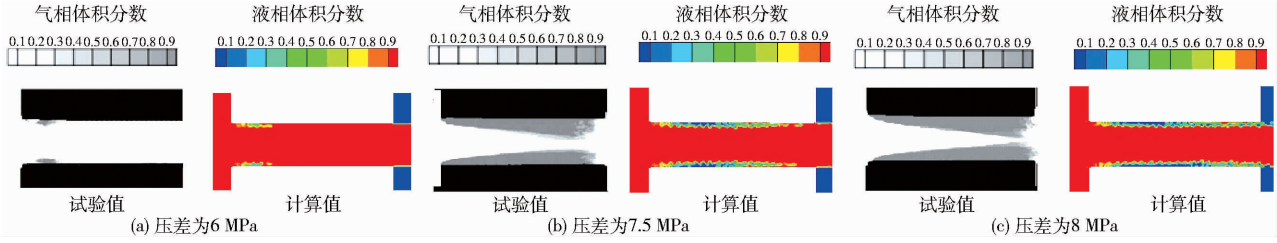

图 1　不同喷油压差下空穴分布计算值与试验值的比较

Fig. 1　Comparisons between predicted cavitation distribution and experimental data under different pressure drops

2.2　喷孔几何特征参数定义

喷孔截面主要特征主要有：圆柱型喷孔、渐扩型喷孔、渐缩型喷孔、具有局部截面扩张的椭圆型喷孔、具有局部截面收缩的双曲线型喷孔，如图 2 所示。对于圆柱型、渐扩型和渐缩型喷孔，用 K 系数表示其截面特征(图 2a)，对于椭圆型或双曲线型变截面喷孔，定义特征参量 K_m 和 X_m 表征内部截面收缩或者扩张的程度及位置(图 2b)，即

$$K = \frac{d_i - d_o}{L} \tag{17}$$

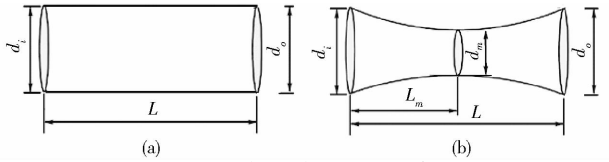

图 2　变截面喷孔形状示意图

Fig. 2　Schematics of nozzles with varying longitudinal cross sections

$$K_m = \frac{2d_m}{d_i + d_o} \tag{18}$$

$$X_m = \frac{L_m}{L} \tag{19}$$

式中 d_i——喷孔入口直径

d_o——喷孔出口直径

d_m——收缩或扩张截面直径

L——喷孔长度

L_m——收缩或扩张截面与喷孔入口的距离

为了研究喷孔几何特征对喷孔内部流动特性及近孔区域燃油喷射及雾化的影响，计算域为采用单孔喷嘴，基本的参数为：压力室直径为 $D=0.6$ mm，喷孔孔径为 $d=0.2$ mm，喷孔长度为 $L=0.8$ mm，喷孔入口圆角半径为 $r=0.02$ mm。喷孔长度和喷孔直径比值 $L/d=4$，喷孔入口边缘的倒圆半径与喷孔直径的比值 $r/d=0.1$，定容室的直径分别为 0.6 mm 和 0.8 mm，长 2 mm 的圆台型区域，如图 3 所示。燃油在初始时刻充满 2/3 的长度，入口压力分别采用 50、100、150 MPa，背压均为 0.1 MPa，喷孔的进口直径都采用 $d=0.2$ mm，通过改变不同的出口直径或中径尺寸，从而形成不同扩张系数的喷孔几何特征（图 2）。

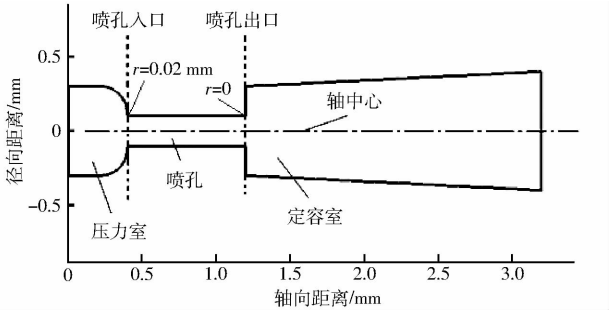

图 3 计算域及边界条件示意

Fig. 3 Calculation domain and initial conditions

3 计算结果及分析

本文计算所用燃油物性参数为：液体密度为 840 kg/m^3，运动粘度为 0.002 5 kg/ms，表面张力为 0.02 N/m，饱和蒸汽压力为 1 200 Pa，燃油蒸气密度为 2.9×10^{-2} kg/m^3，燃油蒸气运动粘度为 3.1×10^{-6} kg/ms。

图 4 为不同喷油压力下的喷孔内部流动以及近孔区域喷雾的液相体积分数，可以看出，随着喷油压力的提高，所有喷孔近孔区域燃油雾化程度均有较大提高。喷油压力不变时喷孔几何形状对孔内流动特性以及近孔区域燃油雾化有显著影响，对于圆柱型和渐扩喷孔，空穴强度均逐渐增强，椭圆喷孔入口以及双曲线喷孔出口，空穴强度相对低压时有所提高。喷油压力相同时，例如 100 MPa，喷孔几何形状对孔内流动特性以及近孔区域燃油雾化有较大影响，$K=-0.075$ 的渐扩喷孔与 $K=0$ 圆柱喷孔相比，喷孔内空穴层的长度增加，厚度变大，空穴层不仅出现在壁面处，轴中心出口处也生成大量空穴，即空化效应增强、空穴区域分布范围更大。主要原因是孔内局部压力低于燃油饱和蒸气压时，就会形成空穴，空穴首先出现在孔内压力低于其饱和蒸气压的区域，而渐扩喷孔出口压力（定容室压力）不变，上游压力必然随着喷孔扩张减小[7]，这意味着相对于圆柱喷孔而言，渐扩喷孔中压力会更低，因此，渐扩喷孔空穴强度和空穴范围更大，这些空穴随着向下游延伸、发展和溃灭，溃灭时产生的较高湍流强度。因此，渐扩喷孔近孔区域燃油雾化程度相对较高。$K=0.05$ 的渐缩喷孔，孔内流动特性与渐扩型喷孔相反，喷孔出口压力不变时，渐缩喷孔随着截面减小，孔内上游压力升高，孔内产生空化的条件受到抑制。因此渐缩喷孔出口液柱更长，液块更大，燃油雾化程度降低，这种喷孔不利于燃油的快速分裂雾化。

$K_m=1.3$、$X_m=0.5$ 的椭圆型喷孔，空穴仅出现在喷孔截面扩张的前半段，由于椭圆型喷孔截面的先期扩张，使入口处壁面附近产生空穴，空穴范围不大，但随着喷孔后半段截面收缩空穴很快消失，椭圆型喷孔在出口处也出现较长液柱和较大液块，但由于前期空穴的溃灭产生液流紊乱，椭圆型喷孔在近孔区域燃油雾化与渐缩喷孔相比要好。而 $K_m=0.7$、$X_m=0.5$ 的双曲线型喷孔，情况与椭圆喷孔相反，喷孔前半段截面收缩空穴产生受到抑制，但喷孔后半段截面扩张空化效应得到提高，喷孔出口生成大量空穴，因此，双曲线喷孔能够促进燃油快速分裂及雾化。

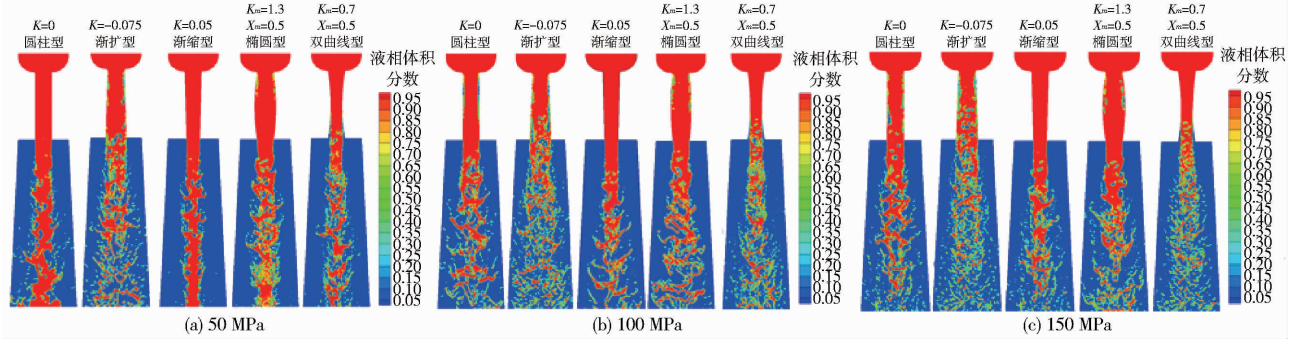

图 4 不同喷油压力下的液相体积分数

Fig. 4 Contours of liquid fraction distribution at different injection pressures

根据以上对喷孔内部流动以及对近孔区域燃油喷射雾化分析，可以看出，喷孔几何特征对喷孔内部流动特性具有重要影响，截面扩张的喷孔，孔内空化效应增强，孔内的液流紊乱增大，空穴溃灭产生液流紊乱使湍动能增加，促进燃油的快速分裂和雾化，对于燃油的喷射及雾化是非常有利，而对于截面收缩的喷孔，抑制喷孔内的空化效应，降低喷孔内的液流紊乱，燃油雾化程度降低。

图 5 为不同喷油压力下的速度分布云图，可以看出，对于几何特征相同喷孔，随着喷油压力的提高流场速度均增大。喷油压力不变时，喷孔几何特征影响孔内部速度及近孔区域速度分布，因为孔内速度变化首先要满足质量守恒定律，速度与截面积成反比这一条件，同时还受孔内空化强度的影响，孔内生成大量的空穴使有效流通面积减小，引起孔内速度的变化。例如截面渐扩喷孔，一方面由于截面扩张，速度有减小的趋势，另一方面由于喷孔内空化效应增强，空穴造成有效流通面积减小，孔内速度增大的趋势，喷孔扩张引起的流速变化小，而空化效应引起的流速变化占主导地位，总的结果速度增大（图 6）。另外，从速度云图上还可以看出，喷孔出口近孔区域射流表面速度出现凸起。而对于截面渐缩喷孔，喷孔内的空化效应受到抑制，虽然喷孔截面减小，但孔内速度仍然较低，喷孔出口近孔区域射流表面速度较光滑（从云图上看）。双曲线喷孔孔内速度变化前半段与渐缩喷孔类似，后半段与渐扩喷孔类似。椭圆型喷孔，孔内空化效应也较弱，由于截面扩张，孔内速度相对于其他喷孔要低。喷孔内部速度变化及近孔区域速度分布与喷孔几何特征有很大关系，孔内速度增大、空化效应和液流紊乱增强，促进了燃油的初次分裂及雾化。

图 7 为不同喷油压力下喷孔内及近孔区域射流压力分布云图，可以看出，在各种喷油压力下，喷孔内压力分布与速度分布密切相关，这是因为喷孔内流动特性不仅要满足质量守恒定律，面积与速度呈反比关系，而且要满足能量守恒定律伯努利方程，忽略势能影响，在总能量不变的情况下，压力与速度可以相互转换。在喷孔入口拐角处由于流动分离形成局部低压区，孔内压力的变化与速度一样，喷孔几何特征影响孔内压力分布、空化效应强弱和液流紊乱大小，这对于近孔区域燃油喷射雾化产生重要影响。从图 8 可知，对渐扩喷孔，无论是进出口压力，还是轴中心上的压力，孔内压力都较低，而渐缩喷孔正好相反，孔内压力相对较高，对于椭圆喷孔，可以明显看出孔内压力分为两区，前半段有一个低压区，后半段压力又开始呈现升高，形成一个较高压力，双曲线喷孔，孔内压力变化也比较明显，前半段孔内压力较高，后半段压力较低。综上孔内压力的变化，主要是由于喷孔几何特征不同引起的，孔内局部低压区域增大，不仅利于空穴现象的产生，也利于空穴流动向喷孔出口延伸，使得喷孔出口积聚大量的空穴气泡，这利于出口燃油的快速分裂雾化。

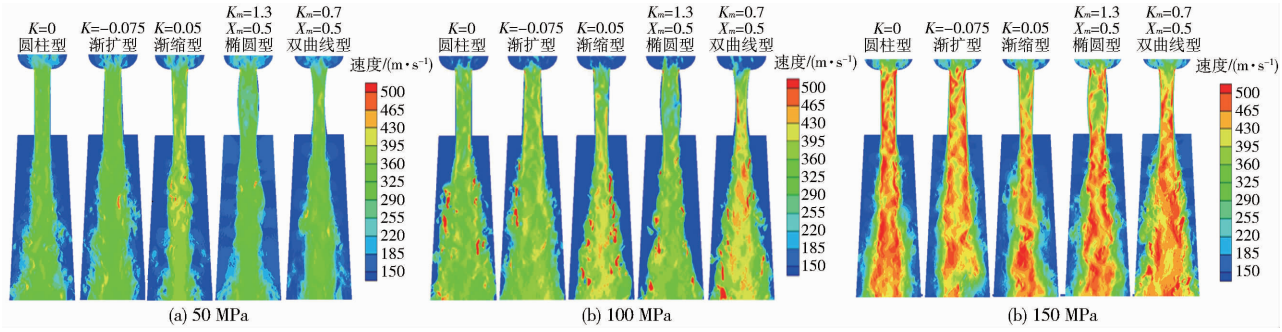

图 5　不同喷油压力下的速度云图

Fig. 5　Contours of velocity at different injection pressures

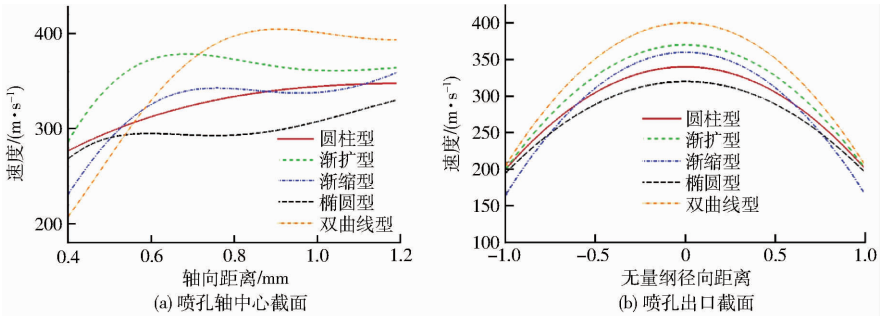

图 6　喷油压力为 100 MPa 时孔内速度分布

Fig. 6　Distributions of internal nozzle flow velocity at injection pressure of 100 MPa

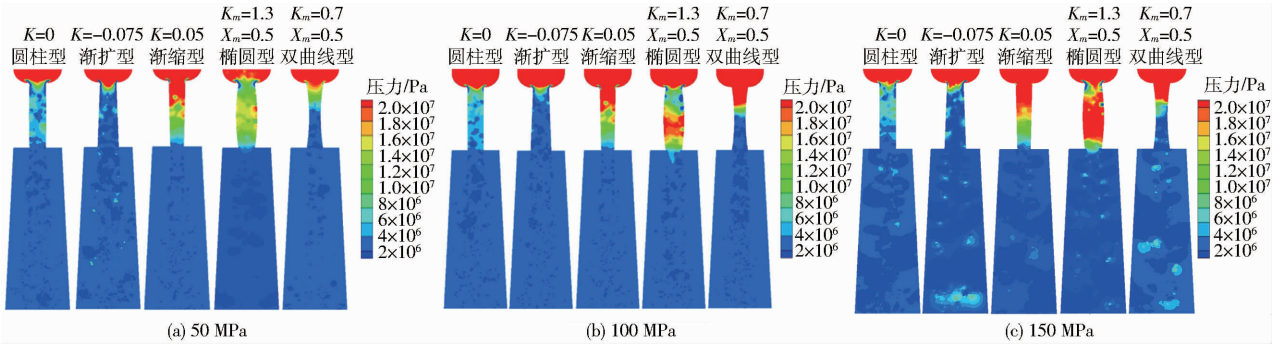

图 7 不同喷油压力下的压力云图

Fig. 7 Contours of pressure at different injection pressures

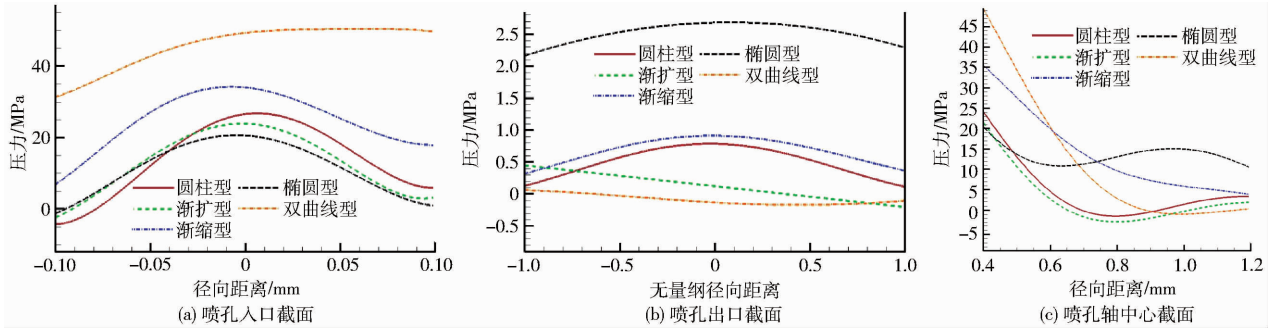

图 8 喷油压力为 100 MPa 时孔内压力分布

Fig. 8 Distributions of internal nozzle pressure at injection pressure of 100 MPa

图 9 为不同压力喷孔内部及近孔区域湍动能分布云图，可以看出，在各种喷油压力下，所有喷孔内的湍动能分布都有一个共同点，壁面附近湍动能明显偏大，而中心区域的湍动能较小，湍动能的这种分布特点主要是因为在喷孔入口附近接近壁面的流动分离区中存在着大尺度的漩涡，在其尾流中会有更多小尺度的漩涡从大尺度的漩涡上脱落下来，提高了壁面附近的湍动能。还可以看出，喷孔内湍动能分布同样也影响近孔区域湍动能变化，对于截面渐扩喷孔，由于孔内空化效应增强，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增加；近喷孔处湍动能形态形成不规则的凸起，这表明喷雾头部的速度梯度较小，促成大尺度的涡团结构形成，形成了喷雾头部不规则的凸起。而对于截面收缩的喷孔，孔内空化效应受到抑制，湍动能及湍动能梯度均变小，低湍动能区域增加；近孔区域湍动能形态较为规整，这表明此处的速度梯度大，湍流应力大，湍流特征尺度小。综上所述，喷孔几何特征影响着喷孔内湍流分布以及近孔区域的湍动能的分布，强化了喷孔内的液流紊乱以及近孔区域大尺度涡团结构。

根据文献[20]，影响燃油喷射及雾化的主要因素包括喷孔内的空穴和湍动所引起的初次雾化及气动雾化理论所解释的二次雾化过程。增强喷孔内的空化效应，强化喷孔内的液流紊乱，提高喷孔出口流速的喷孔，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；而抑制喷孔内的空化效应，降低喷孔内的液流紊乱及喷孔出口流速的喷孔，则不利于燃油的喷射及雾化。

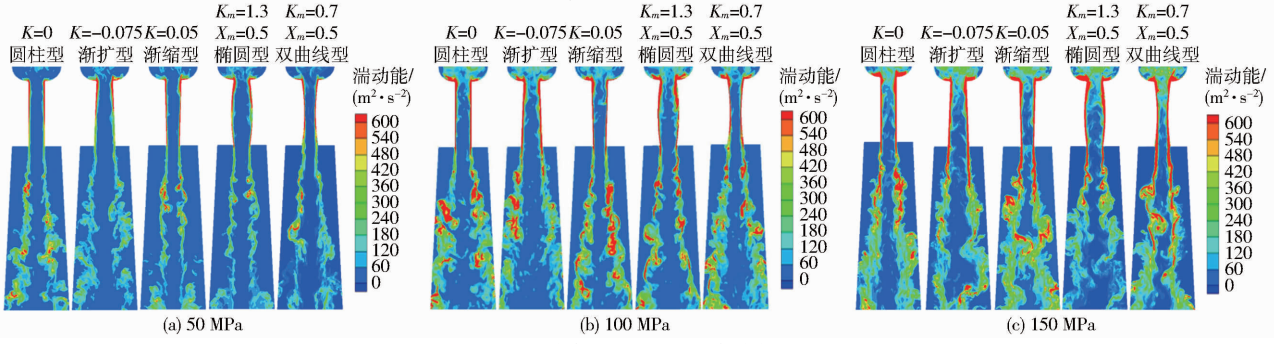

图 9 不同喷油压力下的湍动能云图

Fig. 9 Contours of turbulent kinetic energy at different injection pressures

4　结论

（1）几何特征相同的喷孔，提高喷油压力可增强喷孔喷嘴内的空化效应，强化喷嘴内的液流紊乱，增大出口平均流速，可改善燃油喷射及雾化质量。

（2）相同的喷射压力，对于渐扩喷孔，孔内的空化效应增强、空穴区域分布范围更大，孔内湍流度和出口速度均提高，而双曲线喷孔，空穴首先出现在喷孔截面收缩的位置，并快速发展到喷孔下游的出口处。这 2 种喷孔相对于传统圆柱型孔，出口处大量空穴气泡溃灭产生液流紊乱促进了近孔区域燃油快速分裂雾化，即燃油雾化较细、雾化程度提高。

（3）相同喷油压力的渐缩和椭圆喷孔，孔内的空化效应、液流紊乱及出口流速均具有抑制作用。这 2 种喷孔相对于传统圆柱型孔，喷孔出口处液柱较长、液块较大，不利于促进燃油的快速分裂及雾化，雾化程度降低。

参　考　文　献

1　PARRI R, SALVADOR F J, GIMENO J, et al. Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions[J]. Fuel, 2008, 87(7): 1165 – 1176.

2　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): 1267 – 1276.

3　PAYRI R, SALVADOR F J, GIMENO J, et al. Effects of nozzle geometry on direct injection diesel engine combustion process [J]. Applied Thermal Engineering, 2009,29(10): 2051 – 2060.

4　LAI M C, ZHENG Y, XIE X B, et al. Characterization of the near-field spray and internal flow of single-hole and multi-hole sac nozzles using phase contrast X-ray imaging and CFD[J]. SAE International Journal of Engines, 2011,4(1): 703 – 719.

5　SEOKSU M, YUAN G, SUHAN P, 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.

6　SALVDOR 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, 2015,103: 284 – 299.

7　邹振宇,刘晶. 扩张喷管与收缩喷管中空化现象的数值模拟[J]. 车用发动机,2008(6): 26 – 31.

8　卢国权,虞钢,何秀丽,等. 喷孔几何特征对变截面喷油孔空穴流动状态的影响[J]. 内燃机学报, 2012, 30(3):254 – 259.
LU Guoquan, YU Gang, HE Xiuli, et al. Effect of geometry characteristics on internal cavitation flow of injection nozzle with varying hole cross-section[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(3): 254 – 259. (in Chinese)

9　何志霞,李德桃,胡林峰,等. 喷油嘴喷孔内部空穴两相流动数值模拟分析[J]. 内燃机学报,2004,22(5):433 – 438.
HE Zhixia, LI Detao, HU Linfeng, et al. Numerical simulation and analysis of two-phase flow of inner cavitation in injection nozzle [J]. Transactions of CSICE, 2004, 22(5): 433 – 438. (in Chinese)

10　魏明锐,文华,刘会猛,等. 柴油机孔式喷油嘴内空穴流动的模拟分析[J]. 内燃机学报,2006,24(6): 526 – 530.
WEI Mingrui, WEN Hua, LIU Huimeng, et al. Simulation analysis on cavitation flow in a diesel engine nozzle[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(3): 526 – 530. (in Chinese)

11　张乐超,齐放. 喷孔几何特征尺寸对柴油喷雾及柴油机性能影响的研究进展[J]. 车用发动机,2010(3): 1 – 7.

12　SONE K, PATEL N, MENON S. Large-eddy simulation of fuel-air mixing in an internal combustion engine[C]. AIAA Paper 2001 – 0635,2001.

13　RAYLEIGH L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. Philosophical Magazine, 1917, 34(1): 94 – 98.

14　PLESSET M S. The dynamics of cavitation bubbles[J]. Jarnal of Applied Mechanics, 1949, 16(3): 277 – 282.

15　SCHNERR G H, SAUER J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics [C] // Proceedings of 4th International Conference on Multiphase Flow,2001.

16　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,2001: 574 – 579.

17　贾明,解茂昭,刘红,等. 伞喷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)

18　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 Huifeng, 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)

19　SUN Zuoyu, LI Guoxiu, CHEN Chuan, et al. Numerical investigation on effects of nozzle's geometric parameters on the flow and the cavitation characteristics within injector's nozzle for a high-pressure common-rail DI diesel engine[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 843 – 861.

20　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.