

喷嘴空化模型建立与有效性试验验证

麻斌 高莹 刘宇 刘洪岐 邓海鹏 王亚娣

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025)

摘要: 提出了一种针对喷嘴孔内空化现象的数值计算模型——喷嘴空化模型, 并进行了可视化试验以验证其模型有效性, 其中喷嘴空化模型考虑了液相与气相之间相变、气泡动力学、湍流扰动及不凝性气体影响等诸多因素, 并采用喷嘴孔内空化数对相变速率方程进行了修正。将基于喷嘴空化模型的数值计算结果与试验结果及基于 Schnerr - Sauer 模型的计算结果进行对比分析, 结果显示: 在 2 种空化模型均采用默认参数的前提下, 喷嘴空化模型与 Schnerr - Sauer 模型计算所得喷嘴孔内空化现象变化趋势均与试验结果吻合良好, 即喷嘴孔内空化现象随喷射压力提高而加强, 且在发展空化至超空化流态过渡过程中空化特征长度涨幅远高于其他流态过渡情况; 喷嘴空化模型计算所得空化特征长度在各流态下均与试验结果吻合良好, Schnerr - Sauer 模型计算空化特征长度则低于试验结果, 两者与试验值的最大误差均发生在超空化阶段, 其中喷嘴空化模型计算值为试验值的 92%, Schnerr - Sauer 模型计算值为试验值的 65%。该结果表明, 所建立喷嘴空化模型可用于较为准确地模拟喷嘴孔内空化现象的变化趋势及空化特征长度。

关键词: 喷嘴; 空化; 数值模拟; 模型验证

中图分类号: TK417 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0377-08

Establishment and Experimental Validation of Nozzle Cavitation Model

MA Bin GAO Ying LIU Yu LIU Hongqi DENG Haipeng WANG Yadi

(State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Fuel spray atomization strongly affects engine economic performance and emissions, which in turn is significantly influenced by nozzle cavitation phenomenon with high injection pressure in diesel and GDI engine. A new cavitation model named “nozzle cavitation model” was presented to specifically simulate nozzle cavitation while the corresponding visual experiment was made to validate this model. The presented model considered phase change, bubble dynamics, turbulent pressure fluctuations and noncondensable gases while the equation of phase-change rate was amended by cavitation number. The comparison of simulation results with “nozzle cavitation model”, simulation results with Schnerr - Sauer cavitation model and visual experimental results showed that the development trend of nozzle cavitation from “nozzle cavitation model” and Schnerr - Sauer cavitation model both agreed well with experimental results, that was, the normalized cavitation length was increased with the enhancement of injection pressure and the maximal increase appeared on the transition from development cavitation to super cavitation. The normalized cavitation length from “nozzle cavitation model” agreed well with experimental results while that from Schnerr - Sauer cavitation model was obviously less than that of experimental results. The maximum errors of normalized cavitation length simulated with the two cavitation models both appeared at super cavitation stage, which were 8% with “nozzle cavitation model” and 35% with Schnerr - Sauer cavitation model. The conclusion that the predictive capability of “nozzle cavitation model” was superior to that of Schnerr - Sauer cavitation model for simulation of nozzle cavitation was mainly because of the turbulent viscosity in near-wall region calculated from the former was lower than that from the latter, the threshold pressure value to produce phase change from the former was higher than that from the latter, the bubble number density from the former was amended by volume fraction of noncondensable gases and the equation of phase-change rate from the former was amended by cavitation number.

Key words: injector; cavitation; numerical simulation; model validation

收稿日期: 2017-02-09 修回日期: 2017-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51306069)

作者简介: 麻斌(1989—), 男, 博士生, 主要从事直喷汽油机喷嘴内空化效应机理及射流破碎特征研究, E-mail: mb_freedom@sina.cn

通信作者: 高莹(1972—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事内燃机流动和燃烧研究, E-mail: ying-gao@vip.sina.com

引言

现代共轨式柴油机及缸内直喷式汽油机均采用高压喷射策略以优化燃油喷雾质量,在这种高压喷射条件下喷嘴喷孔内极易产生空化现象,而喷嘴孔内空化现象对燃油喷雾特性具有显著的影响^[1-5],进而影响缸内燃油喷射发动机的排放性能和燃油经济性,且这种影响在喷射压力较高、喷孔内燃油流速较高时尤其明显^[6-7]。因此国内外学者对喷嘴喷孔内空化现象进行了大量的试验研究及数值模拟,以进一步掌握喷孔内空化现象的发生、发展、溃灭等机制,分析其影响因素,实现对燃油喷射过程更全面的控制,改善发动机性能。

目前针对喷嘴喷孔内空化现象的试验大致可分为基于实际尺寸喷嘴和基于放大尺寸喷嘴的可视化试验。基于实际尺寸喷嘴进行可视化试验所采用的喷孔尺寸(0.2 mm左右)及喷射压力(10~100 MPa左右)均与工业用缸内燃油喷射发动机十分相近,因此其试验结果更能反映实际发动机用喷嘴孔内发生的空化现象,然而过小的喷孔直径及过高的喷射压力,会显著提高可视化试验困难,包括难以加工、喷孔易被高压入流冲毁、试验图像模糊等问题^[8-11]。基于放大尺寸喷嘴进行可视试验的理论基础为在雷诺数和空化数保持一致的条件下,不同尺寸喷孔内气相区域分布情况具有很高程度的相似性^[6,8,12],因此可以有效规避基于实际尺寸喷嘴(喷孔直径0.1 mm左右)进行可视化试验时所面临的困难,从而可以对喷嘴孔内空化现象进行较为详尽细致的试验研究^[12-16],然而这种研究方式所得试验结果与实际尺寸喷嘴孔内空化现象存在一定程度的差异^[6,8,12]。

另一方面,数值模拟分析也被广泛应用于喷嘴孔内空化现象的研究,其具有不受喷嘴形状、喷孔尺寸、喷射压力等条件限制的优点,且可以针对流域内各种动态特征进行详细的数值分析,但计算模型的有效性 & 计算结果的准确性必须经过严格的模型校核过程^[17-19]。

喷嘴孔内空化现象数值模型主要由多相流、湍流、空化3种子模型组成,其中空化模型用以描述液相与气相之间的质量转换速率,对最终的计算结果有十分重要的影响。本课题组基于不同的子模型研究了相间滑移、不凝性气体及湍流扰动等建模因素对喷嘴孔内空化现象数值模拟准确性的影响^[20-21],发现目前常采用的空化模型多为通用性空化模型(ZGB^[22]、Schnerr-Sauer^[23]、KUNZ^[24]、SINGHAL^[25]),这些模型在设计之初并非针对喷嘴孔内空化现象,

而是主要针对水轮机械中发生的空化现象,因此在将其应用至喷嘴孔内空化现象数值模拟时需要进行多次调试,且准确性有限。针对这种问题,本文提出一种专用于喷嘴孔内空化现象数值模拟的空化模型——喷嘴空化模型,对其数学过程进行详细的描述和推导,并进行相关可视化试验对模型有效性进行验证。

1 可视化试验

1.1 试验设置

图1为模型验证试验所采用的可视化台架示意,分为低压水路、高压气路、气液分离、高压水路、观测装置等部分,试验工质为过滤水,其水温为13.5℃,氧含量为9 mg/L,喷射压力由高压氮气提供,可支持0.1~10 MPa的喷射压力,背压为环境大气压。试验时首先在气液分离罐中无高压氮气的情况下,以低压泵为动力源将过滤水经低压水路(水箱、滤清器、低压泵、阀)泵进气液分离罐中,然后关闭低压水路阀门,并开启高压氮气瓶阀门,使高压氮气经高压气路(高压氮气瓶、调压阀、三通)进入气液分离罐中对过滤水进行加压,之后开启高压水路阀门,使过滤水经高压水路(阀、流量计、压力计、透明喷嘴)完成喷射,最后利用LED灯及高速摄影机完成试验图片采集。其中,高压气路中调压阀用以对喷射压力进行控制,高压水路中压力计用以精确测量喷射压力,高压水路中流量计用以精确测量管道内过滤水的瞬时体积流量,从而可以通过透明喷嘴及高压管路的尺寸计算喷嘴孔内平均流速。

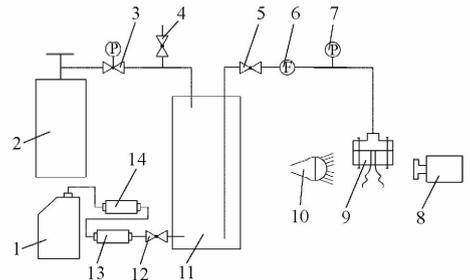


图1 可视化试验台架布置示意图

Fig.1 Sketch of visual experimental setup

1. 水箱 2. 高压氮气 3. 调压阀 4. 泄气阀 5、12. 阀 6. 流量计 7. 压力表 8. 高速摄影机 9. 透明喷嘴 10. LED灯 11. 气液分离罐 13. 低压泵 14. 滤清器

图2为试验所采用的透明喷嘴结构及尺寸示意,该喷嘴为单孔喷油器,由上部压力室(不锈钢材料)及下部透明喷孔(亚克力材料)组合而成,且喷孔尺寸经过放大处理,以便观察喷嘴孔内发生的空化现象,其喷孔长度为16 mm,喷孔直径为3.6 mm。

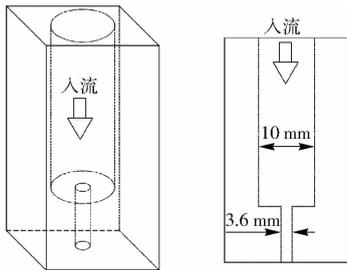


图 2 试验用喷嘴示意图

Fig. 2 Structure diagram of test nozzle

1.2 试验结果

试验以喷射压力为变量,基于放大尺寸喷孔(直径 3.6 mm)进行,试验工况参数及其对应的实际尺寸喷孔(直径 0.3 mm)工况参数如表 1 所示,可以看到,在满足雷诺数及空化数一致的前提下,本文选择工况对应的实际尺寸喷孔工况与发动机真实工作状态相近。其中实际尺寸喷孔喷射压力由雷诺数、空化数及实际尺寸喷孔直径计算获得,雷诺数及空化数^[26-27]的计算公式为

$$Re = \frac{V_{out} \rho_l D}{\mu_l} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{p_{out} - p_{sat}}{0.5 \rho_l V_{out}^2} \quad (2)$$

式中 Re ——雷诺数 D ——喷孔直径, m

V_{out} ——喷孔出口平均流速, m/s

ρ_l ——液态工质密度, kg/m³

μ_l ——液态工质粘度, kg/(m·s)

σ ——空化数 p_{out} ——背压, Pa

p_{sat} ——饱和蒸汽压, Pa

表 1 试验工况

Tab. 1 Test conditions

雷诺数 Re	空化数 σ	放大尺寸喷射 压力/MPa	实际尺寸喷射 压力/MPa
36 500	1.37	0.22	31.6
39 300	1.18	0.25	36.0
40 600	1.11	0.26	37.5
41 300	1.07	0.27	38.9
41 900	1.04	0.28	40.3
42 900	0.99	0.30	43.1
44 400	0.98	0.32	46.9
46 200	0.86	0.35	49.7
48 100	0.79	0.37	63.3
49 800	0.74	0.40	68.7

空化数分子项为背压与饱和蒸汽压的差值,该值越小,系统中流体静压距离液态工质饱和蒸汽压越近,进而越容易发生空化;分母项为液态工质的动压,由伯努利方程可知,在总压一定时,动压越大则静压越小,进而越容易发生空化。

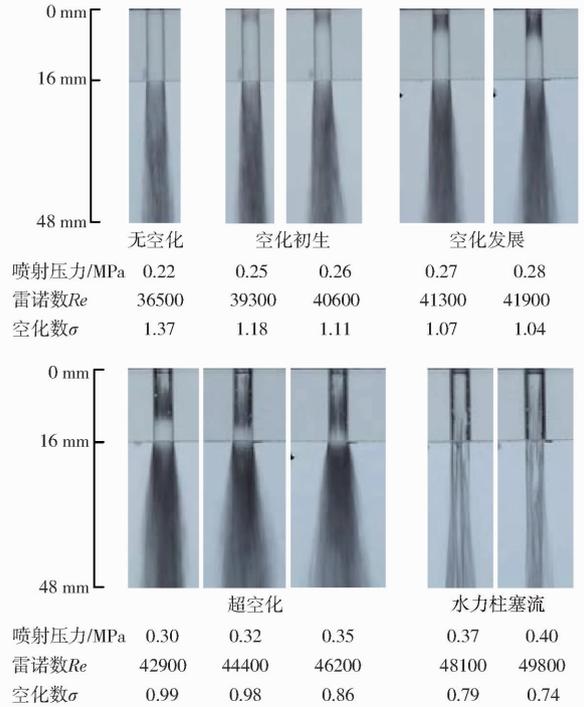
图 3a 为喷孔内空化及近场喷雾可视化试验结果,图 3b 为喷孔内空化特征长度随喷射压力的变化曲线,其中空化特征长度为

$$L_{CAV^*} = \frac{L_{CAV}}{L_{hole}} \quad (3)$$

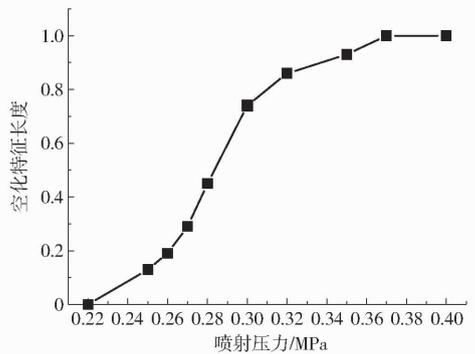
式中 L_{CAV^*} ——空化特征长度

L_{CAV} ——空化区域长度, m

L_{hole} ——喷孔长度, m



(a) 可视化试验图像



(b) 空化特征长度随喷射压力变化曲线

图 3 喷嘴孔内空化试验结果

Fig. 3 Experimental results of nozzle cavitation

可以看到,随着喷射压力的提高、空化数的减小及雷诺数的增大,喷嘴孔内空化现象随之加强,其中喷射压力小于 0.22 MPa 时无空化现象出现,属于无空化阶段;喷射压力为 0.25、0.26 MPa 时在靠近喷孔入口区域出现少量空化,属于空化初生阶段;喷射压力为 0.27、0.28 MPa 时空化现象由喷孔入口向出口方向蔓延,但空化特征长度未超过 0.5,属于空化发展阶段;喷射压力为 0.30~0.35 MPa 时,喷孔内已经形成强度较高的空化现象,但空化特征长度未

达到1,属于超空化阶段;喷射压力大于0.37 MPa时,喷孔内空化现象由喷孔入口蔓延至出口,此时空化特征长度为1,属于水力柱塞流阶段^[4-5,16,19,26]。值得注意的是,无空化阶段至空化初生阶段的过度比较平缓,而空化初生阶段至超空化阶段的过度则近乎阶跃变化,超空化阶段至水力柱塞流阶段的过度又重新归于平缓;喷雾锥角并非随喷孔内空化现象强度增强而持续增大,而是在喷孔内空化现象处于超空化阶段时达到一个峰值,在进入水力柱塞流后喷雾锥角出现骤降现象。

2 喷嘴空化模型的建立

提出的喷嘴空化模型考虑了液相与气相之间相变、气泡动力学、湍流扰动及不凝性气体影响等诸多因素,并采用喷孔内空化数对得到的相变速率方程进行修正,从而使其更加适用于喷孔内空化现象的数值模拟分析。提出的喷嘴空化模型可与均相流(Homogeneous equilibrium model, HEM)、混合多相流(Mixture)、欧拉-欧拉两相流(Euler-Euler)等多相流模型及雷诺平均(Reynolds averaging Navier Stokes, RANS)、雷诺应力(Reynolds stress model, RSM)、大涡(Large eddy simulation, LES)等湍流模型耦合使用。

2.1 气泡动力学

在进行喷嘴空化模型计算方程推导时,采用与ZGB^[22]、Schnerr-Sauer^[23]、KUNZ^[24]、SINGHAL^[25]等空化模型相同的假设,即认为蒸汽相气泡是由液相中存在的初始气核成长而来,于是空化现象的增强与减弱过程可以转换为初始气核的增大与减小过程,并采用R-P方程^[27]来描述气泡动力学,其结构为

$$r \frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = \frac{p_{sat} - p}{\rho_l} - \frac{4\nu_l}{r} - \frac{2\Sigma}{\rho_l r} \quad (4)$$

式中 r ——气泡半径 p ——当地静压
 ν_l ——液相运动粘度
 Σ ——液相表面张力

由于液相在整个喷射过程中并无自由液面,因此表面张力的影响可以忽略,另出于简化方程求解过程的考虑,忽略二阶项,于是简化后的R-P方程为

$$\frac{3}{2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = \frac{p_{sat} - p}{\rho_l} \Rightarrow \frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_{sat} - p}{\rho_l}} \quad (5)$$

2.2 初始相变速率

初始相变速率的推导过程基于气泡动力学方程、连续方程、混合相密度计算方程进行。混合相、液相、蒸汽相的连续方程为:

$$\text{混合相} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (6)$$

$$\text{液相} \quad \frac{\partial (\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{V}) = -R \quad (7)$$

$$\text{蒸汽相} \quad \frac{\partial (\alpha_v \rho_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{V}) = R \quad (8)$$

$$\text{其中} \quad \rho = \alpha_v \rho_v + \alpha_l \rho_l \quad (9)$$

$$\alpha_v + \alpha_l = 1$$

式中 α_l ——液相体积分数

α_v ——蒸汽相体积分数

ρ ——混合相密度

ρ_v ——蒸汽相密度

R ——初始相变速率

对方程(9)进行求导,得到混合相密度 ρ 与蒸汽相体积分数 α_v 的关系为

$$\frac{d\rho}{dt} = -(\rho_l - \rho_v) \frac{d\alpha_v}{dt} \quad (10)$$

蒸汽相体积分数 α_v 与气泡半径 r 有关系

$$\alpha_v = \frac{\frac{4}{3} n \pi r^3}{1 + \frac{4}{3} n \pi r^3} \quad (11)$$

式中 n ——气核数密度

联立方程(10)与方程(11)可得

$$\frac{d\rho}{dt} = -(\rho_l - \rho_v) (4n\pi)^{1/3} (3\alpha_v)^{2/3} \alpha_l^{4/3} \frac{dr}{dt} \quad (12)$$

联立方程(5)、(7)、(8)、(12),可得相变速率计算方程为

$$R = (4n\pi)^{1/3} (3\alpha_v)^{2/3} \alpha_l^{4/3} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_{sat} - p|}{\rho_l}} \quad (13)$$

2.3 不凝性气体及气核数密度修正

在发动机燃油供给和喷射过程中,通常会在燃油中混入不凝性气体,其一方面来源于燃油中溶解的气体,另一方面来源于由环境泄漏进油箱、低压泵等部件的气体。随着不凝性气体体积分数的增大,喷孔内空化现象会随之加剧,其影响通过2种途径实现,一方面不凝性气体会在喷孔内低压区域发生膨胀,从而与通过相变产生的蒸汽相一起构成喷孔内气液两相流中的气相;另一方面不凝性气体会对液相中存在的气核数密度产生影响,不凝性气体体积分数越大,则气核数密度越高^[21,25]。本文提出的喷孔内空化模型考虑了不凝性气体对液相中气核数密度的影响,并通过不凝性气体质量分数对气核数密度进行了第1次修正,考虑到很微量的不凝性气体(10 mg/L)也会对喷孔内空化现象产生显著影响^[25]及理论上存在的极端情况(不凝性气体体积

分数为 0), 最终采用的计算方程为

$$n_1 = n_0 (1 + 10^6 f_{NCG}) \quad (14)$$

式中 n_0 ——初始气核数密度^[23], 取为 10^{13}

n_1 ——第 1 次修正后的气核数密度

f_{NCG} ——不凝性气体体积分数

液相中包含的气核数密度除了受到不凝性气体的影响之外, 同时受到流域内蒸汽相体积分数的影响, 蒸汽相体积分数越大, 则气核数密度越小。因此本文参照文献[28]中的方法, 基于蒸汽相体积分数对气核数密度进行了第 2 次修正, 计算方程为

$$n_2 = \begin{cases} n_1 & (\alpha_v \leq 0.5) \\ 2n_1(1 - \alpha_v) & (\alpha_v > 0.5) \end{cases} \quad (15)$$

式中 n_2 ——第 2 次修正后的气核数密度

2.4 湍流扰动修正

喷嘴孔内液态流体雷诺数常常达到数万甚至更高的量级, 因此其流动状态属于强湍流流动, 而这种强湍流会对空化现象产生明显的影响, 其具体表现为降低空化现象发生的阈值压力^[25]。因此, 本文参照文献[25]中的方法, 基于湍流扰动对饱和蒸汽压进行了修正, 计算方程为

$$p'_{sat} = p_{sat} + 0.195 \rho k \quad (16)$$

式中 p'_{sat} ——修正后饱和蒸汽压

k ——混合相湍动能

2.5 空化数修正及喷嘴空化模型

结合方程(7)、(8)、(13)~(16), 得到初始相变速率计算方程为

$$R = (4n_2\pi)^{1/3} (3\alpha_v)^{2/3} \alpha_l^{4/3} \frac{\rho_l \rho_v}{\rho} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p'_{sat} - p}{\rho_l}} \quad (17)$$

为使建立的空化模型更加适用于喷嘴孔内空化现象的数值模拟, 采用空化数对初始液相至气相的质量转换速率进行修正。考虑到喷嘴孔内空化现象强度随空化数的减小呈近似指数增长^[15-16, 19], 因此在利用空化数对初始相变速率进行修正时采用指数修正式, 其具体的计算方程在经过多次数值计算后获得

$$R' = 30e^{-5\sigma} R \quad (18)$$

结合方程(7)、(8)、(17)、(18), 并在气相至液相质量转化方程中加入修正系数, 得到喷嘴空化模型最终的计算方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\alpha_v \rho_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{V}) = R_e \\ \frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{V}) = R_e \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_e = 30e^{-5\sigma} (4\pi n_2)^{1/3} (3\alpha_v)^{2/3} \frac{\rho_l \rho_v}{\rho} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p'_{sat} - p}{\rho_l}} \\ R_e = -F_{con} (4\pi n_2)^{1/3} (3\alpha_v)^{2/3} \frac{\rho_l \rho_v}{\rho} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p'_{sat}}{\rho_l}} \end{cases} \quad (19)$$

式中 F_{con} ——蒸汽相破碎修正系数

3 数值模拟及结果分析

3.1 数值模拟设置

数值模拟计算基于 ANSYS_FLUENT 15.0 进行, 其中多相流计算采用 Mixture 模型, 针对混合相的连续方程及动量方程进行求解, 并考虑相间滑移对计算结果的影响, 采用 Schiller and Naumann 拖拽力计算模型及 Manninen 滑移速度计算模型^[29]求得液相与气相之间的滑移速度及动量交换, 另外出于求解气相体积分数的需要, 还求解了气相的连续方程; 湍流计算采用 realizable $k - \varepsilon$ 模型; 空化模型除采用前述提出的喷嘴空化模型外, 还选择 Schnerr - Sauer^[23]空化模型作为对比, 其中喷嘴空化模型基于 Fluent 15.0 提供的 UDF (User defined functions) 功能进行编译, Schnerr - Sauer 空化模型由 Fluent 15.0 提供。

网格密度及质量对数值模拟计算的影响十分显著, 因此本文选择了一系列不同密度的网格进行计算以验证网格无关性, 同时所有网格均采用纯六面体进行划分, 最终确定适用于本文研究内容的三维计算网格如图 4 所示, 其中喷孔处六面体数目约为 322 000, 喷孔上游处六面体数目约为 318 000, 喷孔及喷孔入口处网格最小尺寸为 20 μm (分布于近壁面附近), 最大尺寸为 54 μm (分布于喷孔轴线附近)。

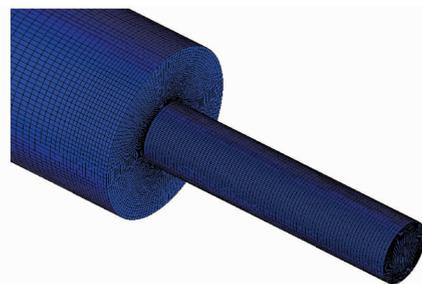


图 4 三维计算网格

Fig. 4 3-D computational grid

在数值模拟中入口边界条件采用压力入口, 具体压力数值由试验提供, 出口边界条件采用压力出口, 并将其设置为 103 125 Pa; 计算用工质采用同试验一致的水及水蒸气, 并认为其均为不可压流, 其物性参数如表 2 所示; 计算服务器主要配置为: 2 个英特尔 E5-2650 V3 @ 2.30 GHz x 10 处理器, 25 M 缓

存。计算步长选择为 0.01 ms, 总计算时常为 15 ms, 一次计算约耗时 1.5 d。

表 2 工质物性参数
Tab.2 Fluid properties

工质	密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘度 $\mu/$ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	饱和蒸汽压 p_{sat}/Pa
液态水 $\text{H}_2\text{O}(l)$	999.307 0	1.19×10^{-3}	
水蒸气 $\text{H}_2\text{O}(g)$	0.011 7	1.00×10^{-6}	1 548

在数值模拟中针对无空化、空化初生、发展空化、超空化、水力柱塞流等 5 个喷孔内流动状态各取一个工况进行计算, 所拟定的模拟工况及其对应入口边界条件见表 3。

表 3 选定模拟工况及其入口边界条件
Tab.3 Simulation operating points and inlet boundary conditions

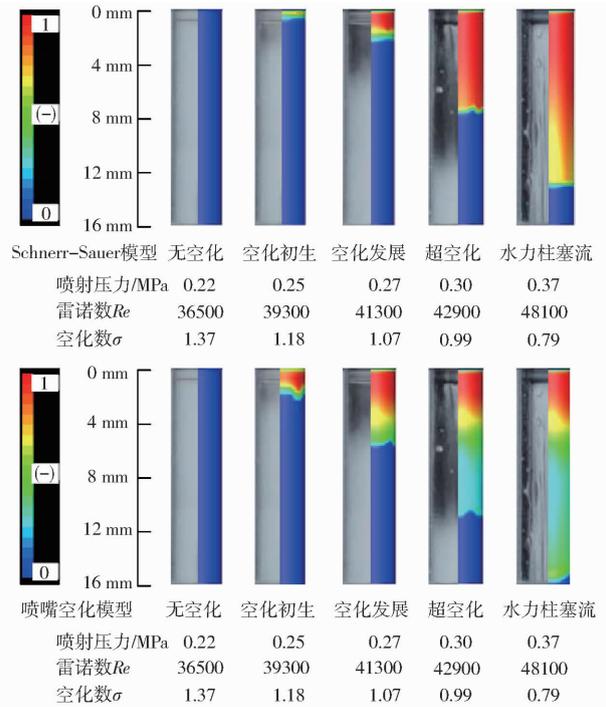
入口压力 p_{in}/MPa	雷诺数 Re	入口湍流 强度 $I/\%$	入口水力 直径 L/m	流动状态
0.22	36 500	4.30		无空化
0.25	39 300	4.26		空化初生
0.27	41 300	4.24	0.01	空化发展
0.30	42 900	4.22		超空化
0.37	48 100	4.16		水力柱塞流

3.2 计算结果及分析

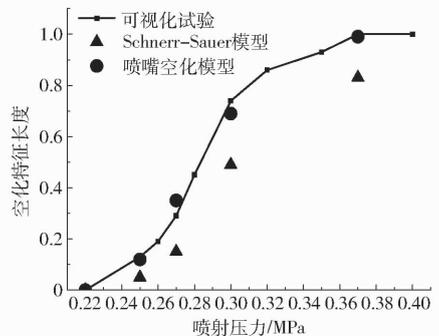
图 5a 所示为基于 Schnerr-Sauer 空化模型及基于喷嘴空化模型的计算结果与试验结果对比, 图 5b 所示为计算所得喷嘴孔内空化特征长度及试验所得喷嘴孔内空化特征长度随喷射压力(喷嘴入口压力)的变化曲线。2 种模型在应用中均采用模型推导过程中确定的默认参数, 未进行任何调试。

可以看到, 基于 2 种空化模型计算所得空化特征长度的变化趋势均与试验结果一致, 即随着喷射压力提高、空化数减小及雷诺数增大, 空化特征长度随之增大, 且空化特征长度在无空化流态至空化初生流态、超空化流态至水力柱塞流流态的增大比较缓慢, 在空化初生流态至超空化流态的增大则比较迅速; 基于 Schnerr-Sauer 空化模型的计算结果在空化特征长度具体数值上与试验结果存在一定误差, 在喷孔内各流态下不同程度低估空化特征长度, 其中在超空化流态(喷射压力 0.30 MPa)误差达到最大值, 其计算所得空化特征长度为试验值的 65%; 基于喷嘴空化模型的计算结果则在各流态下与试验结果吻合良好, 最大误差同样出现在超空化流态(喷射压力 0.30 MPa), 其计算所得空化特征长度为试验值的 92%。

以超空化流态为例进一步对 2 种空化模型的计算结果进行分析, 图 6 所示为不同观察视角下 2 种



(a) 喷孔内空化现象计算云图与试验图像



(b) 空化特征长度随喷射压力变化曲线

图 5 喷嘴孔内空化现象计算结果与试验结果对比

Fig.5 Comparison of simulated and experimental results of nozzle cavitation

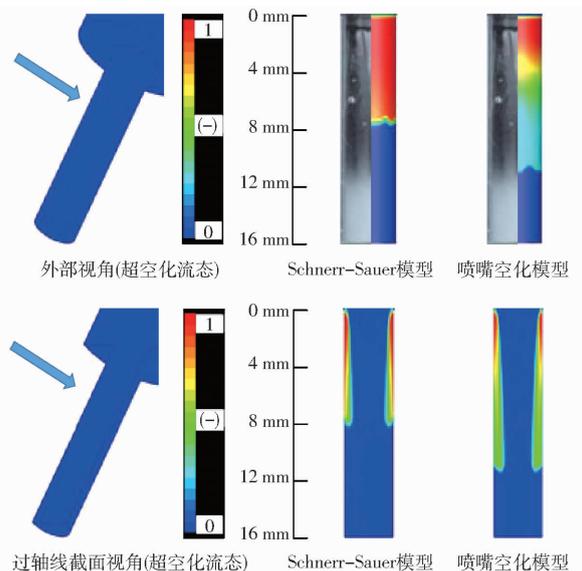


图 6 不同观察视角下气相区域分布对比(超空化流态)

Fig.6 Comparison of gas phase distribution at different viewing angles

空化模型的气相云图计算结果,可以看到 2 种空化模型在超空化流态下计算所得气相区域均为贴壁分布,另外在其他流态下数值模拟所得喷孔内气相区域分布同样具有这种贴壁分布的特征,由此可得,试验所得喷孔内气相区域呈贴壁分布特征,而图 3 所示试验结果未能观察到这种分布特征的原因在于在试验中观察视角只能选择外部观察视角。

图 7a 所示为超空化流态下 2 种空化模型在距轴线 1.6 mm 且与轴线平行线域上湍流粘度计算结果对比,选择该线域上的计算结果进行对比是考虑到 2 种模型计算所得气相区域均分布于该线域上。可以看到,基于喷嘴空化模型计算所得湍流粘度在喷孔长度 8 ~ 16 mm 范围内明显小于基于 Schnerr-Sauer 模型计算所得,而更小的湍流粘度代表更小的流动阻力、更大的流动速度,进一步引发更低的流体静压并最终诱发喷嘴空化模型计算

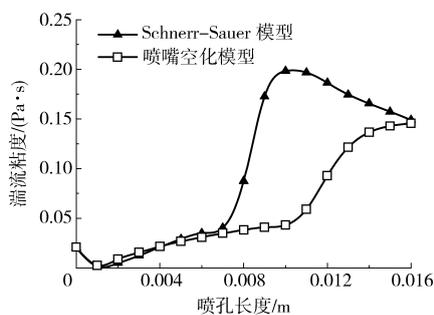


图 7 不同空化模型计算结果对比(超空化流态)

所得空化特征长度大于 Schnerr-Sauer 模型计算所得。图 7b 所示为与图 7a 同一线域上饱和蒸汽压及经过式(16)修正后的饱和蒸汽压对比,其中用以计算的混合相湍动能取自喷嘴空化模型超空化流态计算结果,为 Schnerr-Sauer 模型空化发生阈值,为喷嘴空化模型空化发生阈值。可以看到,经过修正后的饱和蒸汽压明显大于修正前,即喷嘴空化模型所采用的相变发生阈值高于 Schnerr-Sauer 模型所采用的相变发生阈值,从而使喷嘴空化模型计算所得空化特征长度大于 Schnerr-Sauer 模型计算所得。另外需要指出的是,喷嘴空化模型基于不凝性气体体积分对气核数进行修正(式(14))、基于空化数对液相至气相的质量转换速率进行修正(式(18))也是喷嘴空化模型计算所得空化特征长度大于 Schnerr-Sauer 模型计算所得的重要原因。

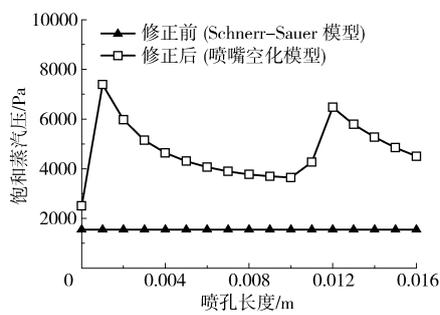


Fig. 7 Comparison of simulation results with different cavitation models

4 结论

(1) 在喷嘴几何尺寸及工质特性不变的前提下,随着喷射压力增大、空化数减小及雷诺数增大,喷嘴孔内空化现象随之加强,依次经历无空化、空化初生、空化发展、超空化、水力柱塞流等 5 个流动状态变化,其中无空化至空化发展、超空化至水力柱塞流的过渡比较平缓,而空化发展至超空化的过渡近乎阶跃,即在空化发展至超空化过渡过程中,很小的喷射压力提高即可引发较大幅度的空化特征长度增大;在喷嘴几何尺寸及工质特性不变的前提下,随着孔内空化特征长度的持续增大,喷孔出口附近喷雾锥角在孔内无空化至超空化流态过渡过程持续增大,而当喷孔内流态进入水力柱塞流流态后,喷雾锥

角随之急剧降低。

(2) 在喷嘴空化模型与 Schnerr-Sauer 模型均采用默认模型参数的前提下,2 种模型计算所得孔内空化特征长度的变化趋势均与试验吻合良好,即随喷射压力增大、空化数减小及雷诺数增大,喷嘴孔内空化现象持续加剧,且在发展空化至超空化过渡过程中空化特征长度存在一个近乎阶跃的增大过程;喷嘴空化模型计算所得孔内空化特征长度与试验结果吻合良好,最大误差发生在超空化流态下,其计算所得空化特征长度为试验值的 92%;Schnerr-Sauer 模型计算所得孔内空化特征长度低于试验结果,最大误差同样发生在超空化流态,其计算所得空化特征长度为试验值的 65%。

参 考 文 献

- 1 SUN Z, LI G X, YU Y S. Numerical investigation on transient flow and cavitation characteristic within nozzle during the oil drainage process for a high-pressure common-rail DI diesel engine[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 98(1): 507-517.
- 2 SOM S, AGGARWAL S K, HANNOUNY E M. Investigation of nozzle flow and cavitation characteristics in a diesel injector[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(4): 514-522.
- 3 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)
- 4 颜学升. 柴油机喷嘴结构对喷雾特性的影响研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
YAN Xuesheng. Researches on the influences of nozzle structure on spray characteristics for diesel engines[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- 5 张军. 柴油机喷嘴内空化效应的机理及射流破碎特征的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
ZHANG Jun. Investigations of cavitation in nozzle and characteristic of breakup for diesel spray[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- 6 COLLICOTT S, LI H. True-scale true-pressure internal flow visualization for diesel injectors[C]. SAE Paper 2006-01-0890, 2006.
- 7 RADITYA H P, AKIRA S. String cavitation in fuel injector[C]//微粒化シンポジウム講演論文集, 2013: 45-51.
- 8 ARCOUMANIS C, BADAMI M, GAVAISES M. Cavitation in real-size multi-hole diesel injector nozzles[C]. SAE Paper 2000-01-1249, 2000.
- 9 REID B A, HARGRAVE G K, GAMER C P, et al. An investigation of string cavitation in a true-scale fuel injector flow geometry at high pressure[J]. Physics of Fluids, 2010, 22(3): 104-109.
- 10 GAVAISES M. Flow in valve covered orifice nozzles with cylindrical and tapered holes and link to cavitation erosion and engine exhaust emissions[J]. International Journal of Engine Research, 2008, 9(6): 435-447.
- 11 MITROGLOU N, MCLOM M, GAVAISES M, et al. Instantaneous and ensemble average cavitation structures in diesel micro-channel flow orifices[J]. Fuel, 2014, 116(1): 736-742.
- 12 ZHONG W, HE Z, WANG Q, et al. Experimental study of flow regime characteristics in diesel multi-hole nozzles with different structures and enlarged scales [J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2014, 59: 1-10.
- 13 STANLEY C, BARBER T, MILTON B, et al. Periodic cavitation shedding in a cylindrical orifice[J]. Experiments in Fluids, 2011, 51(5): 1189-1200.
- 14 GAVAISES M, ANDRIOTIS A, PAPOULIAS D, et al. Characterization of string cavitation in large-scale diesel nozzles with tapered holes[J]. Physics of Fluids, 2009, 21(5): 107-115.
- 15 AKIRA S, RADITYA H P, TSUYOSHI T. Cavitation flow in nozzle of liquid injector[R]. ICLASS 2012.
- 16 AKIRA S. Liquid jet deformation induced by cavitation in nozzles of various shapes[C]. SAE Paper 2009-24-0157, 2009.
- 17 BASTAWISSI E D, ELKELAWY M. Computational evaluation of nozzle flow and cavitation characteristics in a diesel injector[J]. Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities Jarid, 2012, 5(4): 1605-1616.
- 18 GIANNADAKIS E, PAPOULIAS D, GAVAISES M, et al. Evaluation of the predictive capability of diesel nozzle cavitation models[C]. SAE Paper 2007-01-0245, 2007.
- 19 AKIRA S, BARIS B, AKIO T. Numerical simulation of incipient cavitation flow in a nozzle of fuel injector[J]. Computers & Fluids, 2014, 103(8): 42-48.
- 20 麻斌, 高莹, 刘宇, 等. 相间滑移对喷雾器喷孔内空化现象数值模拟研究的影响[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(1): 59-64.
MA B, GAO Y, LIU Y, et al. Effects of slip velocity on the modeling of cavitation phenomenon in injector nozzle[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(1): 59-64. (in Chinese)
- 21 麻斌, 高莹, 刘宇, 等. 不凝性气体及湍流扰动对喷嘴孔内空化现象数值模拟的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 342-348. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170445&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.045.
MA Bin, GAO Ying, LIU Yu, et al. Effects of noncondensable gases and turbulent fluctuations on modeling of cavitation phenomenon in injector nozzle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 342-348. (in Chinese)
- 22 ZWART P, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase model for predicting cavitation dynamics[C]//Proceedings of ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow, 2004: 1-11.
- 23 SCHNERR G H, SAUER J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics[C]//Proceedings of ICMF 2001 International Conference on Multiphase Flow, 2001: 1-8.
- 24 KUNZ R F, BOGER D A, STINEBRING D R, et al. A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction[J]. Computers and Fluids, 2000, 29(8): 849-875.
- 25 SINGHAL A K, MAHESH M. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 617-624.
- 26 SOU A. Liquid jet deformation induced by cavitation in nozzles of various shapes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, 2(2): 694-702.
- 27 CHRISTOPHER E B. 空化与空泡动力学[M]. 王勇, 潘中永, 译. 镇江: 江苏大学出版社, 2013.
- 28 FRANKLIN R E, MCMILLAN J. Noise generation in cavitating flows, the submerged jet[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1984, 106(3): 336-341.
- 29 MANNINEN M, TAIVASSALO V, KALLIO S. On the mixture model for multiphase flow[J]. VTT Publications, 1996, 288: 532-595.