

DOI: 10.7652/xjtuxb201701010

相间滑移对喷油器喷孔内空化现象 数值模拟研究的影响

麻斌, 高莹, 刘宇, 刘洪岐, 陈伟, 徐英健

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 130025, 长春)

摘要: 针对喷孔内空化现象影响喷雾特性进而影响发动机经济及排放性能的问题, 利用 ANSYS_Fluent 15.0 软件, 在湍流计算采用 realizable $k-\epsilon$ 模型、空化计算采用 S-S 模型(Schnerr and Sauer Model)的基础上, 基于均相流及双欧拉两相流模型建立了 2 种喷油器喷孔内空化现象数值模拟模型。基于均相流的模型认为液相与蒸汽相流速相同, 即不考虑相间滑移的影响; 基于双欧拉两相流的模型认为液相与蒸汽相拥有不同的流速, 即考虑相间滑移的影响。2 种模型的计算与试验结果对比分析显示: 在相同边界条件下, 2 种模型的计算结果存在显著差异, 考虑相间滑移的计算结果与试验结果吻合良好, 既能反映喷孔内空化现象的变化趋势, 也可获得准确的空化特征长度, 未考虑相间滑移的计算结果仅可反映喷孔内空化现象的变化趋势, 但 2 种模型均不能捕捉到喷孔内空化区域末端的小型空化团分离现象。该结果表明, 在空化现象数值模拟研究中, 强湍流作用下蒸汽相的运动状态完全受液相支配, 而液相运动状态不受蒸汽相影响的这一结论, 并非在所有流动状态下均成立。

关键词: 喷油器; 空化; 数值模拟; 相间滑移

中图分类号: TK417 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)01-0059-06

Effects of Slip Velocity on the Modeling of Cavitation Phenomenon in Injector Nozzle

MA Bin, GAO Ying, LIU Yu, LIU Hongqi, CHEN Wei, XU Yingjian

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

Abstract: Fuel spray atomization is significantly influenced by nozzle cavitation. Two simulation models are established to analyze nozzle cavitation by ANSYS_Fluent 15.0. The two models based on the homogeneous equilibrium scheme and Eulerian-Eulerian scheme employ the realizable $k-\epsilon$ model for turbulence computation and Schnerr and Sauer model for cavitation computation. The slip velocity between different phases is ignored in the model from the homogeneous equilibrium scheme and taken into account in the Eulerian-Eulerian scheme. Simulation results are compared with the experimental ones, and it is found that there are obvious differences between the simulations of the two models with the same boundary conditions, and the model considering slip velocity gives more accurate results, where both the specific cavitation length and the changing trend of the cavitation length are obtained. The model ignoring slip velocity only gives accurate changing trend of the cavitation length. The small scale cavitation

收稿日期: 2016-06-01。 作者简介: 麻斌(1989—), 男, 博士生; 高莹(通信作者), 女, 教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51306069)。

网络出版时间: 2016-10-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161018.1519.008.html>

cloud separated from the whole cavitation sheet cannot be simulated by the two models. The simulations indicate that the assumption that under very strong turbulence the fluid carrier influences the vapor phase via drag but the vapor phase has no influence on the fluid carrier does not hold true in all flow states.

Keywords: injector; cavitation; numerical simulation; slip velocity

喷油器喷孔内空化现象是指高压燃油在喷孔内流速急剧升高,造成部分燃油静压下降至饱和蒸汽压以下并发生汽化,从而在喷孔内出现由燃油、燃油蒸气及部分未融气体构成的气液两相流现象。适当强度的空化现象可以增大喷雾锥角,而过度的空化现象又会使喷雾锥角急剧减小^[1-2]。为了降低发动机排放、提高燃油经济性,现代柴油机及汽油直接喷射式发动机(GDI)均采用高压喷射策略以优化喷雾质量,在这种情况下喷油器喷孔内空化现象不可避免,因此国内外学者对喷油器喷孔内空化现象进行了大量的试验研究及数值模拟分析。

大量有关喷油器喷孔内空化现象的试验研究是在比例放大及简化几何形状的喷油器中进行的,在这种喷油器中进行的试验需要保证雷诺数及空化数的相似准则,一般试验结果与实际喷油器中产生的空化现象会有一定差距^[3]。文献[4]在实际尺寸但形状简化的喷油器中进行了空化现象可视化试验研究,获得了一些十分有用的可视化试验图像,并以此分析在放大尺寸喷油器中进行空化现象试验可能存在的误差。

文献[5]基于均相流模型(HEM)对喷油器喷孔内空化现象进行了建模分析,对比了 SST $k-\omega$ 湍流模型与标准 $k-\epsilon$ 湍流模型在空化现象仿真计算中的应用效果,结果发现 SST $k-\omega$ 湍流模型比标准 $k-\epsilon$ 湍流模型更适用于喷油器喷孔内空化现象的仿真计算。文献[6]基于均相流模型进行了研究,发现随着喷射压力提高、针阀升程减小及工质黏度降低,喷孔内空化现象持续加剧。文献[7]在均相流建模的基础上对比了两种空化模型的优劣,发现 ZGB(Zwart-Gerber-Belamri)空化模型会在一定程度上低估空化现象,而全空化模型所得空化区域的分布相较试验结果略微发散。

本文应用 ANSYS_Fluent 15.0 软件,在湍流计算均使用 realizable $k-\epsilon$ 雷诺平均模型、空化计算均使用 S-S 模型(Schnerr and Sauer Model)的基础上,分别建立了基于均相流的空化现象仿真模型及基于双欧拉(Eulerian-Eulerian model, EEM)两相流的空化现象仿真模型。在这两种模型中,蒸汽相

体积分数均通过对蒸汽相连续方程的求解并配以空化发展补充方程得到,两模型各自应用于放大尺寸喷油器喷孔内空化现象的数值模拟计算,并与文献[8]的试验结果进行对比分析。

1 模型及试验描述

1.1 基于均相流的空化现象仿真模型

基于均相流的空化现象仿真模型(模型1)假设液相与气相在流场内各点充分混合,忽略了液相与蒸汽相之间相间滑移的影响,可直接对混合相进行输运方程求解。空化现象主要受流场内压力变化的影响,在仿真计算时不考虑流体可压缩性,故只需对液相与蒸汽相构成的混合相进行连续方程及动量方程的求解。混合相连续方程及动量方程如下

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho_m \mathbf{v}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \cdot \mathbf{v}_m) = \\ - \nabla P + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{v}_m$ 为混合相流速; ρ_m 及 μ_m 分别为混合相密度及黏度。由于不考虑液相中未融气体的影响, ρ_m 及 μ_m 计算如下

$$\begin{aligned} \rho_m &= \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l \\ \mu_m &= \alpha \mu_v + (1 - \alpha) \mu_l \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ρ_v 、 ρ_l 分别为蒸汽相及液相密度; μ_v 、 μ_l 分别为蒸汽相及液相黏度; α 为蒸汽相体积分,可通过对蒸汽相连续方程进行求解,并配以空化发展补充方程得到。

蒸汽相连续方程如下

$$\frac{\partial (\alpha \rho_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \mathbf{v}_m) = R \quad (4)$$

式中: R 为液相至蒸汽相的质量转换率,可通过 S-S 空化发展模型提供的空化发展补充方程来计算

$$R = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{r} \frac{dr}{dt} \quad (5)$$

进行空化模拟时均假设蒸汽相气泡是由液相中存在的初始气核成长而来,于是空化现象增强与减弱的过程可以转换为初始气核增大与减小的过程。目前应用最广泛的描述气核成长的气泡动力学方程

为 Rayleigh-Plesset 方程^[9],在 S-S 空化发展模型中对该方程进行了简化,忽略其中的高阶项、表面张力项、黏性力项等,只保留低阶项及瞬时张力项,则有

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \left(\frac{2(P_v - P)}{3\rho_l} \right)^{1/2}, \quad P_v > P \\ \frac{dr}{dt} &= - \left(\frac{2(P - P_v)}{3\rho_l} \right)^{1/2}, \quad P_v \leq P \end{aligned} \quad (6)$$

式中: P 为流场当地压力; P_v 为饱和蒸汽压; r 为蒸汽相气泡半径。

r 与 α 有如下关系

$$\begin{aligned} \alpha &= n \frac{4}{3} \pi r^3 / \left(1 + n \frac{4}{3} \pi r^3 \right) \Rightarrow \\ r &= \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n} \right)^{1/3} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: n 为空化初始气核数密度。理论上该值可以通过求解 n 的输运方程来确定,但这会带来过高的计算成本,此处 n 为定值 10^{13} 。

通过联立方程(4)~(7),即可完成对蒸汽相体积分数的求解,从而使整个计算方程组封闭。

1.2 基于双欧拉两相流的空化现象仿真模型

基于双欧拉两相流的空化现象仿真模型(模型2)对液相及蒸汽相分别进行输运方程求解,于是液相与蒸汽相可以拥有不同的流速,相间滑移直接被引入。需要说明的是,建立模型2的初衷是引入相间滑移的影响,模型1也可以通过经验方程引入相间滑移,但计算精度不如模型2。同模型1,不考虑能量方程的求解,液相及蒸汽相的连续方程和动量方程如下

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(1 - \alpha)\rho_l] + \nabla [(1 - \alpha)\rho_l \mathbf{v}_l] &= -R \\ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha\rho_v) + \nabla (\alpha\rho_v \mathbf{v}_v) &= R \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial [(1 - \alpha)\rho_l \mathbf{v}_l]}{\partial t} + \nabla [(1 - \alpha)\rho_l \mathbf{v}_l \cdot \mathbf{v}_l] &= \\ - (1 - \alpha) \nabla P + \nabla \bar{T}_l + \mathbf{M} - R\mathbf{v} \frac{\partial (\alpha\rho_v \mathbf{v}_v)}{\partial t} + \\ \nabla [\alpha\rho_v \mathbf{v}_v \cdot \mathbf{v}_v] &= -\alpha \nabla P + \nabla \bar{T}_v - \mathbf{M} + R\mathbf{v}_l \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{v}_l$ 、 $\mathbf{v}_v$ 分别为液相及蒸汽相流速; $\mathbf{M}$ 为蒸汽相至液相的相间作用力; $\mathbf{v}$ 为相间界面移动速度; $\bar{T}_l$ 、 $\bar{T}_v$ 分别为液相及蒸汽相应力张量

$$\begin{aligned} \bar{T}_l &= (1 - \alpha)\mu_l (\nabla \mathbf{v}_l + \nabla \mathbf{v}_l^T) + \\ (1 - \alpha) \left(\lambda_l - \frac{2}{3} \mu_l \right) (\nabla \cdot \mathbf{v}_l) \bar{\mathbf{I}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_v &= \alpha\mu_v (\nabla \mathbf{v}_v + \nabla \mathbf{v}_v^T) + \alpha \left(\lambda_v - \frac{2}{3} \mu_v \right) (\nabla \cdot \mathbf{v}_v) \bar{\mathbf{I}} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 λ_l 、 λ_v 分别为液相及蒸汽相体积黏度, $\bar{\mathbf{I}}$ 为单位张量。

相界面移动速度 $\mathbf{v}$ 可近似等同于液相或蒸汽相速度,且有

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_l, R > 0; \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}_v, R < 0 \quad (11)$$

$\mathbf{M}$ 由拖拽力方程及相界面浓度方程共同决定

$$\mathbf{M} = K(\mathbf{v}_v - \mathbf{v}_l) = \frac{3\mu_v f A_i}{d_v} \quad (12)$$

式中: d_v 为蒸汽相气泡直径,设为定值 10^{-6} m; A_i 为相界面浓度; f 为拖拽力方程,采用 S-N 拖拽力模型计算。有关计算式如下

$$A_i = \frac{6\alpha(1 - \alpha)}{d_v} \quad (13)$$

$$f = \frac{C_D \bar{R}_e}{24}$$

$$\bar{R}_e = \frac{\rho_l |\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_v| d_v}{\mu_l}$$

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15\bar{R}_e^{0.687})/\bar{R}_e, & \bar{R}_e \leq 1\,000 \\ 0.44, & \bar{R}_e > 1\,000 \end{cases} \quad (14)$$

α 及 R 的计算同模型1,于是可以通过方程(11)~(14)及方程(5)~(7)使得整个计算方程组封闭。

1.3 试验设置^[8]

本文喷雾器喷孔内空化仿真的计算模型有效性通过与文献[8]中的试验进行对比来验证。图1为文献[8]喷雾器喷孔内空化试验台架示意图,图2为试验喷嘴结构图。为简化试验过程,试验工质为过滤水,温度为 300 K,背压为当地大气压,试验入口条件由安装于喷嘴上游的流量计及压力计测得,喷嘴内空化区域分布由高速摄影机配合卤素闪光灯获得。试验用喷嘴由两块聚丙烯酸酯胶片与一块不锈钢平板组合而成,尺寸见图2,喷孔长度 $L_n = 16$ mm,宽度 $W_n = 4$ mm,厚度 $T_n = 1$ mm。

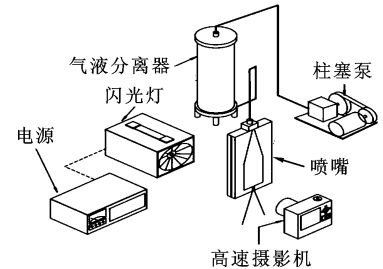
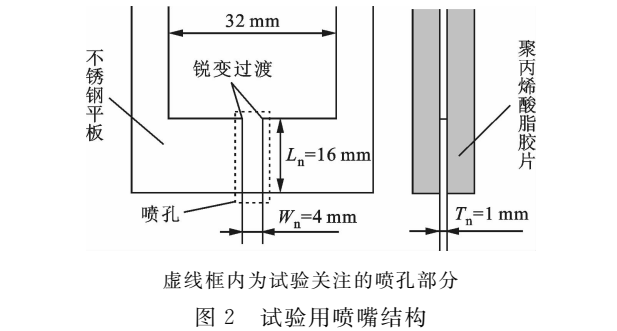


图1 试验台架布置示意

文献[8]在进行试验结果分析时对空化数和空化特征长度进行了定义。空化数是从边界条件的角



度描述空化的强度, $\sigma = 2(P_a - P_v) / \rho_l V_{out}^2$, 其中 P_a 、 P_v 分别为环境气压及饱和蒸汽压, ρ_l 为过滤水密度, V_{out} 为喷孔处平均流速。空化特征长度是从可视化试验结果的角度描述空化的强度, $L = L_{cav} / L_n$, 其中 L_{cav} 、 L_n 分别为空化区域长度及喷孔长度。

1.4 网格及仿真设置

通过采用不同密度的网格进行网格无关性验证, 从而得到了适用于本文的三维计算网格, 如图 3 所示。该网格为三维纯六面体网格, 喷孔处六面体数约为 322 000, 喷孔上游处六面体数约为 201 000, 喷孔及喷孔入口处网格最小尺寸为 17 μm , 最大尺寸为 80 μm 。

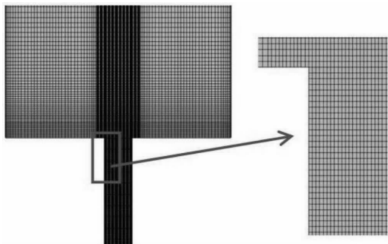


图 3 三维计算网格

仿真中入口边界条件采用速度入口, 具体流速由文献[8]中的试验条件确定; 出口边界条件采用压力出口, 为 0.1 MPa。仿真中工质为水及水蒸气, 物性参数如表 1 所示。计算服务器主要配置为: 两个英特尔 E5-2650 V3 @ 2.30 GHz x10 处理器, 25 MB 缓存。仿真步长为 0.1 ms, 模型 1 大约 2 d 可完成一次计算, 模型 2 大约 3 d 可完成一次计算。

表 1 工质物性参数

工质	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\mu/\text{Pa} \cdot \text{s}$	P_v/Pa
液态水	998.443	1.03	
水蒸气	0.016 3	1.26	2 200

2 计算结果及分析

模拟计算中, 先对喷孔内超空化现象^[10]进行仿

真分析, 通过对文献[8]中提供数据进行整理和计算, 由此获得的超空化现象对应的边界条件如表 2 所示。

表 2 超空化现象边界条件

Re	σ	$v_{in}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$k/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
70 000	0.65	2.256	0.012
$\epsilon/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$	$v_{out}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	P_{out}/MPa	
0.096	18.05	0.1	

注: v_{in} 为入口速度; k 为入口湍动能; ϵ 为入口湍流耗散率; v_{out} 为出口流速; P_{out} 为出口压力。

仿真中进出口质量流量在约 10 ms 后趋于稳定, 总计算时间为 15 ms, 如图 4 所示, 故在与试验结果进行对比分析时采用 15 ms 的计算结果。

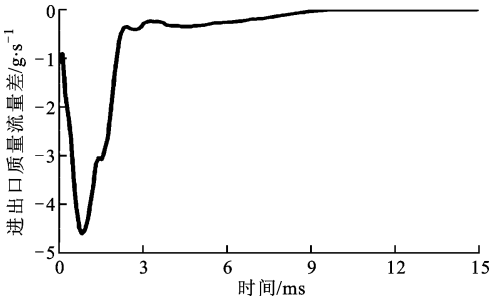


图 4 仿真中进出口质量流量变化

图 5 为采用模型 1 及模型 2 计算所得喷油器喷孔内空化区域分布与试验结果^[8]的对比。可以看到: 模型 1 计算所得空化区域紧贴壁面的分布状态与试验结果吻合, 空化区域长度明显小于试验观测结果; 模型 2 在空化区域分布状态及空化区域长度两方面均与试验结果吻合良好, 即考虑相间滑移及液相与蒸汽相之间动量交换的模型计算结果与试验结果更加吻合。值得注意: 文献[8]试验所得喷孔内空化区域的分布并不是严格对称的, 产生这种现象的原因是试验中采用的喷嘴无法做到严格对称; 模型 1 及模型 2 均未能捕捉到试验中观察到的空化区域末端分离出小型空化团的现象。

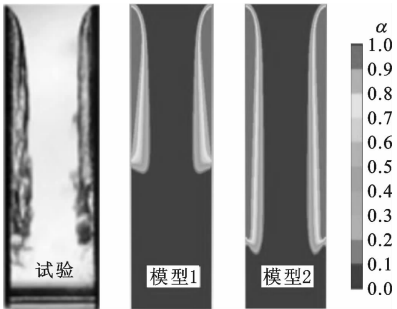


图 5 喷孔内空化现象计算云图

图 6 为采用模型 1 及模型 2 计算所得喷油器孔内湍流黏度、流场静压及流速云图。由图 6a 可以看到,模型 1 在喷孔下半部分近壁处计算所得湍流黏度明显高于模型 2,这就是模型 1 与模型 2 计算所得空化区域不同的根本原因。由图 6b 可以看到,模型 1 在近壁处流速低于模型 2,且液流重新附着点^[11]靠上,这种现象源于之前提到的模型 1 在近壁处计算所得湍流黏度明显高于模型 2,并且进一步引发了图 6c 所示的压力场差异,即模型 1 计算所得静压在靠近喷孔出口处高于模型 2,最终导致模型 1 计算所得空化区域长度小于模型 2。

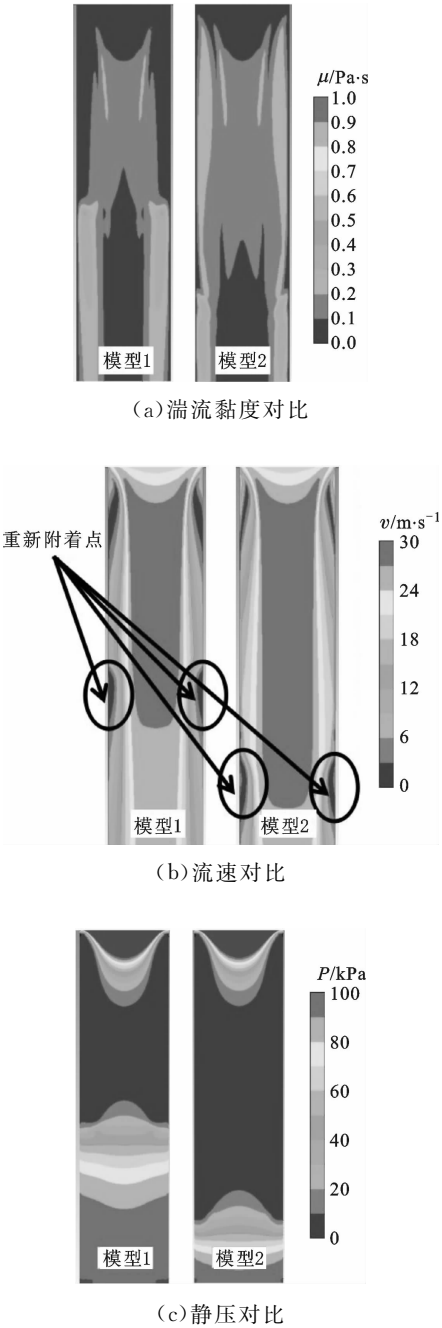


图 6 喷孔内湍流黏度、流速及静压计算云图

通过调整入口边界条件,分别基于模型 1 及模型 2 完成了喷油器孔内流动状态由无空化状态至发展空化状态^[10]的数值模拟,并与试验结果进行了对比分析。

图 7 为模型 1 及模型 2 喷孔内不同流速下计算所得空化现象与试验结果^[8]对比。可以看到,在喷油器喷孔内空化现象处于空化初生及发展阶段时,两模型计算结果与在超空化阶段的计算结果类似,

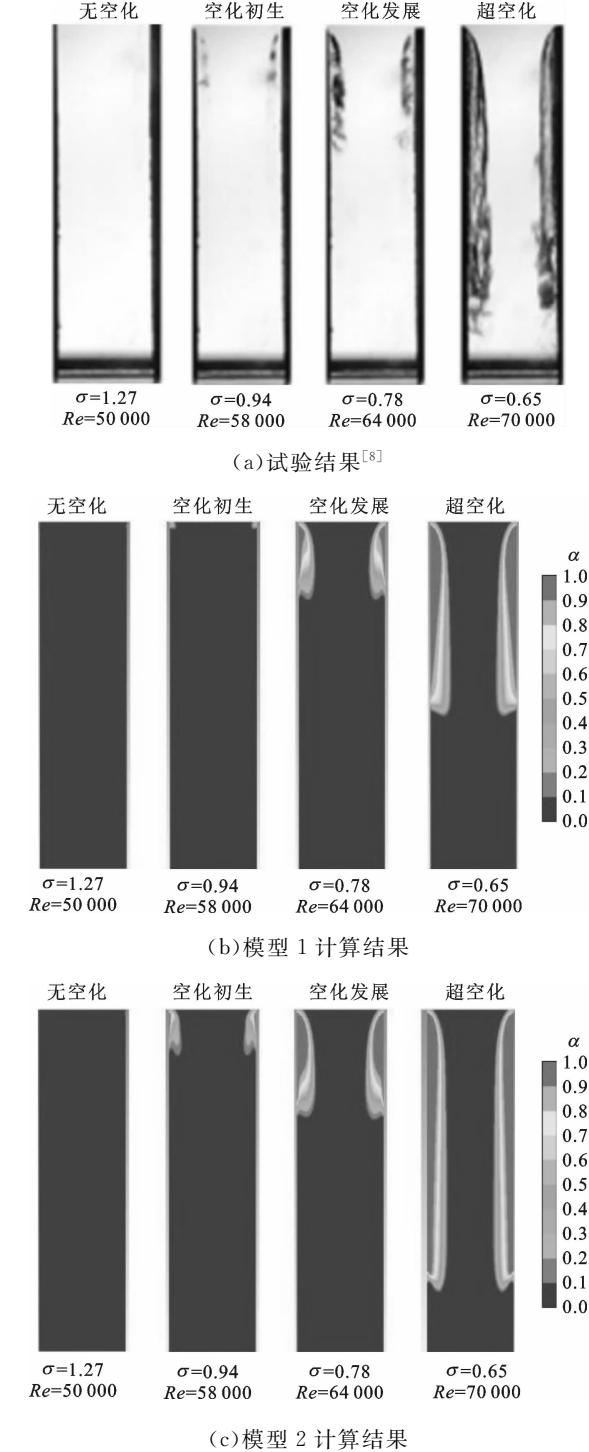
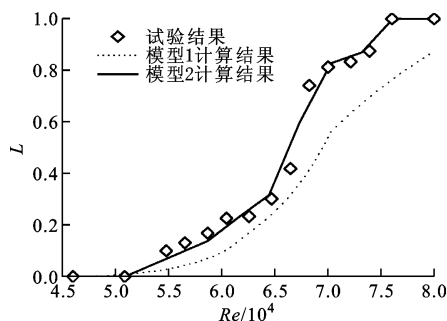


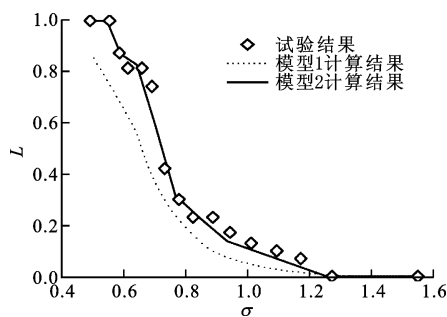
图 7 喷孔内不同流动状态下空化现象试验与计算结果对比

即考虑了相间滑移及相间动量交换的模型 2 计算结果与试验结果吻合,其对喷油器喷孔内空化强度的预测要明显优于模型 1,但两模型的计算结果均未捕捉到空化区域末端的分离空化团。

图 8 为喷孔内雷诺数 Re 及空化数 σ 对空化强度(空化特征长度 L)的影响。可以看到,模型 1 及模型 2 的计算结果均表现出与试验结果相同的变化趋势,即空化特征长度随 Re 的增大先小幅增大后急剧增大,随空化数 σ 的减小先急剧减小后小幅减小,然而如前所述,在同等 Re 或 σ 下,考虑相间滑移的模型 2 计算结果与试验结果更加吻合,其计算所得 L 较模型 1 的计算结果略长。



(a) Re 对空化现象的影响



(b) σ 对空化现象的影响

图 8 喷孔内 Re 及 σ 对空化现象的影响

3 结 论

本文分别基于均相流方法和双欧拉两相流方法建立了用于喷油器喷孔内空化现象数值模拟研究的模型 1 及模型 2,前者认为液相与蒸汽相流速相同,即不考虑相间滑移,后者则考虑了相间滑移及液相与蒸汽相之间的动量交换,此外两者所采用的湍流模型均为 $realizable\ k-\epsilon$ 雷诺平均模型,空化模型均为 S-S 模型,且在模拟计算过程中采用相同密度的网格,从而排除了除相间滑移以外的其他建模及计算差异。将两种模型的计算结果与试验结果进行对比分析,结论如下。

(1)在相同边界条件下,两模型对喷油器喷孔内空化强度的计算结果存在显著差异,模型 1 计算所得 L 明显小于试验值,模型 2 计算结果与试验值吻合良好。分析这种差异,发现模型 1 对喷孔近壁面处湍流黏度估计得过高,从而使喷孔近壁面处液相流速降低、静压上升,最终导致空化强度降低。由此得出,在采用 $realizable\ k-\epsilon$ 湍流模型、S-S 空化模型的前提下,相间滑移对喷油器喷孔内空化现象的准确模拟研究具有重要作用,不可忽略。

(2)在喷油器喷孔内空化现象处于无空化、空化初生、超空化等各状态时,模型 2 计算结果均能够与试验结果吻合良好,在不同雷诺数及不同空化数下模型 2 计算所得空化特征长度变化趋势与试验结果一致,且空化特征长度误差较小。由此可以认为,模型 2 可以应用于喷油器喷孔内空化现象的准确模拟和预测。

(3)模型 1 及模型 2 均未捕捉到喷孔内空化区域末端的小型空化团分离现象,考虑该问题来源于两种模型对蒸汽相的计算过程均基于欧拉方法,即没有直接对蒸汽相气泡的运动轨迹进行追踪。下一步研究将考虑采用拉格朗日方法对蒸汽相的运动过程进行计算,以期能够捕捉到空化区域末端的小型空化团分离现象。

参考文献:

- [1] SOU A, HOSOKAWA S, TOMIYAMA A. Ligament formation induced by cavitation in a cylindrical Nozzle [J]. Journal of Fluid Science and Technology, 2008, 3 (5): 633-643.
- [2] SOU A, PRATAMA R H, KIBAYASHI Y. String cavitation in fuel injector Nozzle [C/OL]. // European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. [2016-03-15]. http://www.researchgate.net/publication/267569306_String_Cavitation_in_Fuel_Injector.
- [3] ARCOUMANIS C, BADAMI M, GAVAISES M. Cavitation in real-size multi-hole diesel injector Nozzles: SAE 2010-01-1249 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2010.
- [4] COLLICOTT S, LI H. True-scale true-pressure internal flow visualization for diesel injectors: SAE 2006-01-0890 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2006.
- [5] BICER B, TOMIYAMA A. Numerical simulation of cavitation phenomenon in diesel injector Nozzles [DB/OL]. [2016-01-20]. <https://www.researchgate.net/publication/259844302>.

(下转第 78 页)