

基于 Fluent 角型喷嘴内部空化行为的数值模拟

赵丁选,王倩,杜苗苗

(吉林大学机械科学与工程学院,吉林 长春 130022)

摘 要: 利用 Fluent 流体计算软件对角型喷嘴内部空化流场进行了数值模拟,得到了喷嘴内部的压力、气相生成速率和汽含率分布场,并对三种扩张角喷嘴内的流场进行了比较分析。结果表明:在角型喷嘴内部,空化气泡主要在喷嘴圆柱段壁面起始点和扩张段壁面起始点两处产生;在扩张段壁面起始点处,由于回流和压力两种因素的共同作用导致扩张角对空化气泡生成速率的影响存在最优值;随着扩张角的减小,角型喷嘴在扩张段壁面的空化区域不断扩大,其汽含率也不断攀升;扩张角的变化对角型喷嘴圆柱段区域的空化行为没有明显影响。

关 键 词: 空化;角型喷嘴;扩张角;数值模拟;汽含率

中图分类号: TP 61 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)09-1283-05

Fluent-Based Numerical Simulation of the Cavitation Behavior in the Angle Nozzle

ZHAO Ding-xuan, WANG Qian, DU Miao-miao

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China. Corresponding author: WANG Qian, E-mail: 499143449@qq.com)

Abstract: Using the Fluent software to simulate the field of cavitation flow in the angle nozzles, the distribution of pressure, mass transferring rate from liquid to vapor and vapor fraction were obtained. The flow fields in the three nozzles with different divergence angles were analyzed by comparison. The results showed that in the angle nozzles, the cavitation bubbles were mainly generated at the starting point of the cylindrical region's wall and divergence region's wall. Under the working of reflux and pressure, an optimal divergence angle which impacts the generating rate of cavitation bubbles at the starting point of divergence region's wall exists. With the divergence angle decreasing, the area of cavitation on the wall of divergence regions expands continuously, and the vapor fraction also increases gradually. Changing divergence angles has no obvious effect on the cavitation behavior of cylindrical regions.

Key words: cavitation; angle nozzle; divergence angle; numerical simulation; vapor fraction

空化是指液体内部局部压力降低时,液体内部或液固交界面上蒸汽或气体空穴(空泡)的形成、发展和溃灭过程。在一些水利设备中,空化气泡在材料表面溃灭时可导致材料表面出现空蚀破坏。因此,工程人员将空化气泡引入到射流中形成空化射流,从而提高射流的冲蚀能力。空化射流在石油钻井、水下设备清洗、金属材料表面强化等领域都具有一定的应用。尤其是在金属材料表面强化领域,空化射流强化金属材料的能力以其高效、环

保、节能等优点吸引了越来越多学者的研究和关注^[1-6]。

空化喷嘴是形成空化射流的关键部件。但是由于空化现象涉及相变、高速、湍流等复杂物理因素,所以对空化喷嘴的研究主要以数值模拟为主。管金发等^[7]采用混合模型、Singhal 完全空化模型和 RNG $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型对空化射流喷嘴进行了数值模拟,结果表明:圆柱段直径的最佳初始值为 1 mm。陈林等^[8]利用 Fluent 软件对不同结构的风

琴管形空化喷嘴进行了仿真研究,结果表明,射流在进入圆柱段后产生了明显的负压区,该负压区可促进空化的发生。刘海峰等^[9]运用连续方程、动量方程和 Rayleigh – Plesset 方程对收缩 – 扩散型空化喷嘴的泡液流进行稳态求解,结果表明,适当增加收缩 – 扩散型喷嘴出口的扩展角,更有利于空化。薛梅新等^[10]采用动态亚格子应力模型对高压柴油喷嘴内部瞬时流动进行大涡模拟,结果表明,相比 $\kappa - \omega$ SST 湍流模型,DSM 模型可以准确预测喷孔入口分离转捩过程,相似尺寸下,光滑圆倒角对分离转捩的抑制作用强于斜倒角,对空化初生抑制效果更好。

1 物理模型建立

1.1 几何模型

图 1 为角型喷嘴的中心截面图。液体由入口进入喷嘴,当经过圆柱段时,流场中会产生一定的压降从而促进空化汽泡的产生。在本研究中喷嘴收缩角为 40° ,收缩段和圆柱段长度分别为 16, 4 mm,圆柱段直径为 1 mm,扩张段长度为 12 mm,扩张角 α 为可变参数。

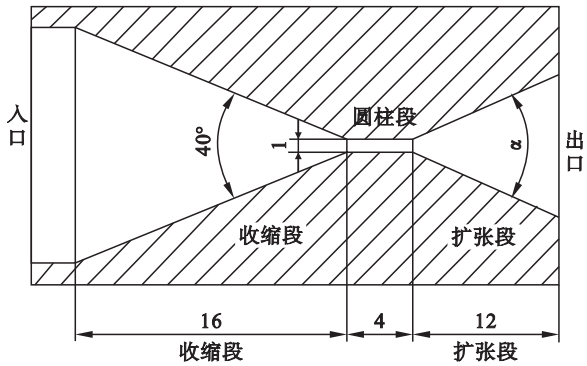


图 1 角型喷嘴中心截面图(单位 mm)
Fig. 1 Center section of the angle nozzle

1.2 网格划分及边界条件设定

由于喷嘴具有轴对称几何特性所以在模拟时取整个流场二维模型的一半区域进行模拟计算,网格划分如图 2 所示,在收缩段、圆柱段和扩张段流场会有较大的速度变化,所以在这些区域进行了网格细化。

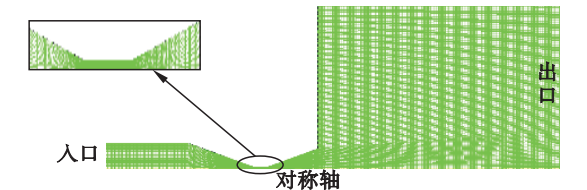


图 2 喷嘴网格划分图
Fig. 2 Mesh map of the nozzle

图 2 中的边界条件如下:

- 1) 入口为压力入口条件,入口压力为 1 MPa;
- 2) 出口为压力出口条件,出口压力为 101.325 kPa;
- 3) 图 2 中除入口、出口和对称轴以外的边界均为壁面边界条件,壁面上满足无滑移条件,并采用壁面函数法对近壁区域处理。

模拟时采用 Zwart – Gerber – Belamri 空化模型,并结合混合多相流模型、RNG 湍流模型,对室温下的水进行模拟分析。

2 基本方程

根据质量守恒原则可推出多项流中气态相运输方程:

$$\frac{\partial(\varphi \rho_v)}{\partial t} + \nabla(\varphi \rho_v v_v) = T_c - T_c. \quad (1)$$

式中: φ 为气态相体积分数, ρ_v 为气态相密度, v_v 为气态相速度, T_c 为气态相生成速率, T_c 为气相凝结速率。

单个空泡在液体中的动力学行为可用 Rayleigh – Plesset 方程描述:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2S}{R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_l}. \quad (2)$$

式中: R_B 为空泡半径, p_v 为液体饱和蒸汽压, p 为液体围压, ρ_l 为液体密度, S 为液体表面张力系数。

忽略上述公式中二次项和表面张力的影响,可推出空泡半径与液体围压之间的动力学关系式:

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_l}}. \quad (3)$$

由式(3)可推出单个空泡的质量变化速率与液体围压的关系式:

$$\frac{dm_B}{dt} = 4\pi R_B^2 \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_l}}. \quad (4)$$

假设单位体积内有 N_B 个空泡,气态相的体积分数 φ_v 可表达为

$$\varphi_v = V_B N_B = \frac{4}{3} \pi R_B^3 N_B. \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)中即得单位体积内的质量转换速率:

$$\dot{T} = \frac{dm_B}{dt} = \frac{3\varphi_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_l}}. \quad (6)$$

当 $p_v > p$ 时,代表液体处于空化状态,在空化的初始阶段,随着空化核不断生长成空化汽泡,空化核的密度会相应的减少,所以上述公式中气态

相的体积分数 φ_v 可用式 (7) 表达：

$$\varphi_v = \varphi_{nuc} (1 - \varphi_v). \tag{7}$$

式中 φ_{nuc} 为液体中空化核体积分数。

将式 (7) 代入式 (6) 可得出空化初始时的气相生成速率与液体压力之间的关系式。

$$T_e = F_{vap} \frac{3\varphi_{nuc}(1 - \varphi_v)p_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}}. \tag{8}$$

当 $p_v < p$ 时空化停止 空化汽泡内的水蒸气会由气态相转变成液态相 即冷凝过程 表达式如下：

$$T_c = F_{cond} \frac{3\varphi_v p_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}}. \tag{9}$$

F_{vap} 与 F_{cond} 为经验系数 分别取 50 0.01。

将式 (9) 与式 (8) 代入式 (1) 中即可计算出液体中压力与气态相体积的关系。

式 (8)、式 (9) 即为 Zwart – Gerber – Belamri 空化模型^[11]。可以看出在该模型中气态相和液态相之间质量转化速率的推导是直接以单位体积内空化核的数量和单个空泡质量变化为基础推算而得 所以与由混合密度推导出相间质量转化速率的 Singhal 空化模型^[12]相比较 Zwart – Gerber – Belamri 空化模型更能体现出空化核数量对空化行为的影响。

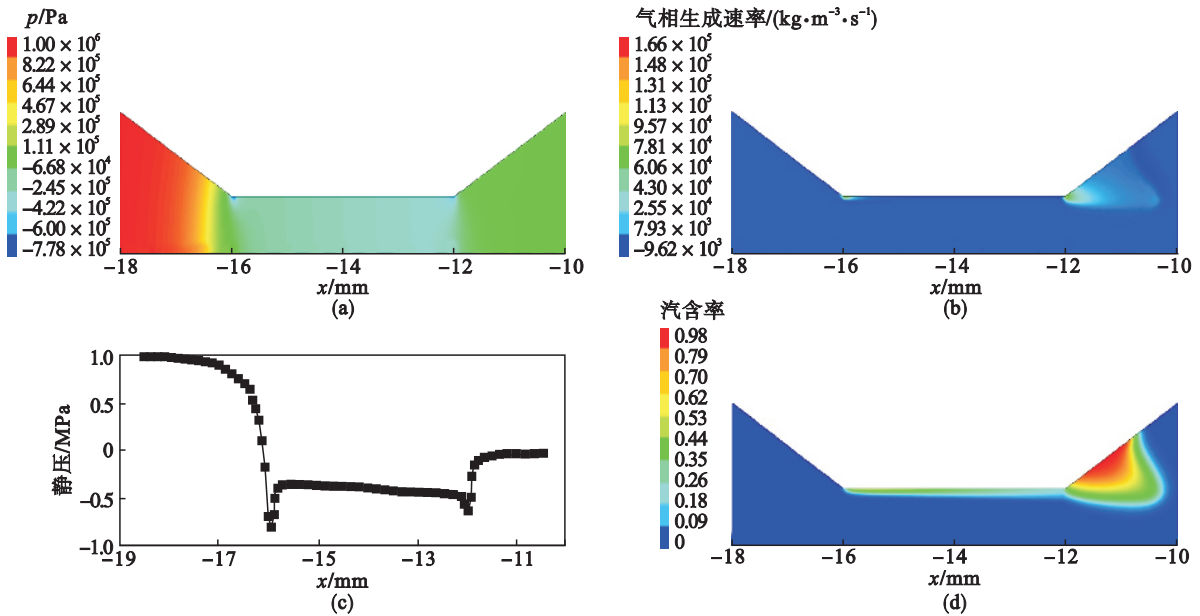


图 3 喷嘴内部流场分布图

Fig. 3 Flow field distribution of the nozzle inside

(a)—压力场分布 ;(b)—气相生成速率场分布 ;(c)—沿 x 方向壁面压力分布曲线 ;(d)—汽含率分布场。

随着壁面的流动逐渐的扩散开来进而形成了图 3d 中的分布状态。

当液体高速离开喷嘴时 ,为了弥补喷嘴扩张段内流失的液体必然会有同等质量的液体填充到喷嘴内部从而形成局部的回流区如图 4 所示。这

3 模拟结果分析

3.1 喷嘴内部流场分析

图 3 为 40°扩张角角型喷嘴内部的空化流场分布图。在图 3a 中可以看出角形喷嘴在圆柱段区域形成了一段低压区 ,这为喷嘴内液体的空化提供了先决条件。图 3b 为喷嘴壁面的静压分布曲线图 ,可以看出在圆柱段起始点(-16 mm)和扩张段起始点处(-12 mm)的壁面上出现了明显的压力突降。图 3c 为液体中气相生成速率场分布图 ,可以看出同样在圆柱段起始点和扩张段起始点两处出现了明显的气相生成速率分布 ,说明这两点是喷嘴产生空化汽泡的主要区域 ,这是因为这两点的压力较其他区域更低(见图 3b) 加之这两点处于壁面附近 ,流速较低便于聚集一定量的空化核 这样一来 ,空化核在低压的作用下很容易形成空化汽泡 ,所以造成了上述现象。图 3d 为喷嘴内部汽含率分布场 ,在图中可以看出汽含率都是从圆柱段起始点和扩张段起始点两处开始沿着壁面扩散分布 ,这是因为在这两点处产生的空化汽泡

种回流导致了扩张段内汽含率分布场的末端出现了向内凹陷的趋势如图 3d 所示。

3.2 扩张角对模拟结果影响分析

图 5 为三种扩张角度喷嘴壁面气相生成速率曲线对比图 ,由图中可以看出在圆柱段(-16 ~

- 12 mm 区间) 气相生成速率曲线分布基本一致 , 但是在扩张段区域 (- 12 mm 以后) 却出现较大差别 , 这说明扩张角的改变对圆柱段的空化速率没有明显影响 , 影响区域仅限于扩张段区域。

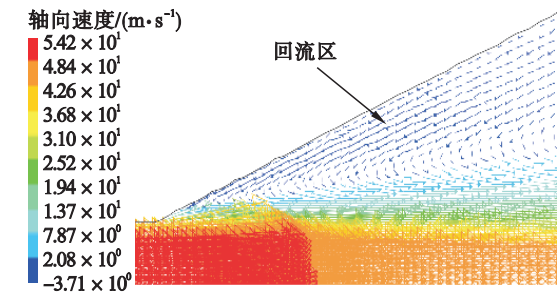


图 4 喷嘴内回流示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the flow in the nozzle

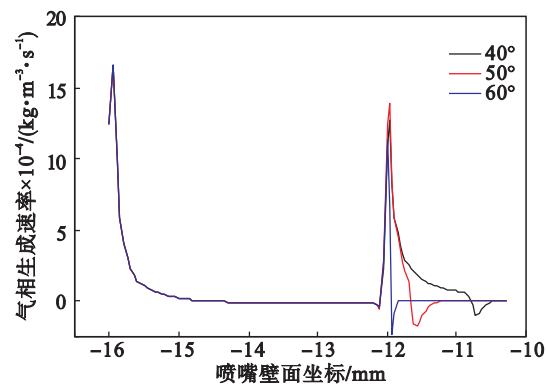


图 5 喷嘴壁面气相生成速率曲线分布
Fig. 5 Gas generation rate distribution curves of the nozzle wall

图 6 为三种喷嘴扩张段回流区域占扩张段总面积的比例 , 可以看出扩张角度越大这种回流面积比就越大 , 表明回流程程度就越剧烈。

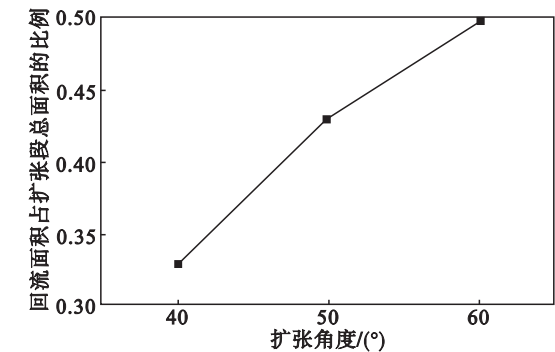


图 6 喷嘴扩张段内回流面积比
Fig. 6 Reflux area ratio in the expansion section of the nozzle

图 7 为图 5 中扩张段处的局部放大图 , 可以看出三种喷嘴气相生成速率大于零的坐标区间是随着喷嘴扩张角的减小而增大 , 这种现象与扩张

段内的回流有一定关系。回流会将空化核向扩张段起始点处推移导致生成空化气泡的区域不断减小。随着扩张角的增大 , 喷嘴内的回流程程度不断加强 (见图 6) , 这种推移效果也越明显。

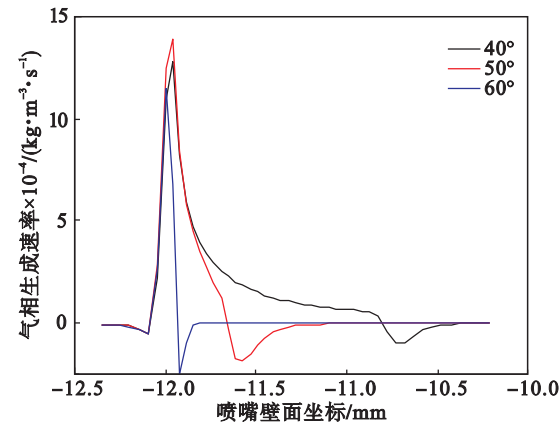


图 7 喷嘴扩张段壁面气相生成速率曲线分布
Fig. 7 Gas generation rate distribution curves about the outspread wall of the nozzle

在图 7 中三种扩张角喷嘴在扩张段起始点附近 (- 12 mm 处) 的气相生成速率峰值点有明显差异 , 50° 扩张角喷嘴在该处产生的气相生成速率明显高于 40° 和 60° 扩张角喷嘴 , 这说明扩张角度对扩张段处空化气泡生成速率的影响存在最优值。造成这种现象的因素有两个 , 分别为空化核的数量和空化区域压力大小。液体中空化核的数量越多和空化区域压力越低就越容易产生空化气泡。由于喷嘴扩张段内存在回流 , 回流会将其他区域的空化核集中到扩张段壁面起始点处 , 扩张角越大回流就越剧烈 , 在扩张段壁面起始点处聚集的空化核数量也就越多 ; 在压力方面 根据模拟结果显示 , 扩张段壁面起始点的压力是随着扩张角的减小而降低 , 如图 8 所示。所以 , 综合两方面考虑 , 50° 扩张角虽然在空化核聚集数量和压力方面上都不是最有利的 , 但在两种因素上都维持在相对较高的水平上 , 从而造成 50° 喷嘴在扩张段壁面起始点处生成空化气泡的速率 (气相生成速率) 要高于 40° 和 60° 喷嘴。

图 9 为三种扩张角喷嘴在喷嘴壁面上的汽含率分布曲线对比图 , 与图 5 中气相生成速率曲线分布一样 , 三种喷嘴在圆柱段的汽含率分布基本没有差别 , 所以扩张角的改变对这段区域的汽含率没有明显影响。不过在扩张段区域 , 汽含率出现了明显差异 , 3 条曲线都在扩张段区间内出现了峰值 , 但是该区间的汽含率峰值最高的却并不是图 7 中气相生成速率最高的 50° 扩张角喷嘴 , 而是扩张角最小的 40° 喷嘴 , 这是因为尽管 50° 扩张

角喷嘴的气相生成速率最高但其分布范围(空化区域)要小于 40°扩张角喷嘴,所以在汽含率的分布上,40°扩张角喷嘴要略高于 50°扩张角喷嘴,而 60°扩张角喷嘴由于其气相生成速率的峰值和分布范围均最小,所以汽含率的峰值也最小.综合上述分析可知,当角型喷嘴的扩张角在 40°到 60°之间时,其角度越小,最终形成的空化汽泡含量(汽含率)就越多即空化效果好.

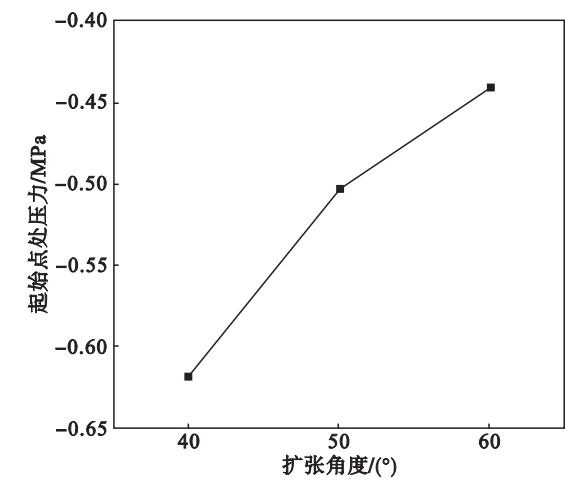


图 8 扩张段壁面起始点处压力

Fig. 8 Pressure at the starting point on the wall of the expansion section

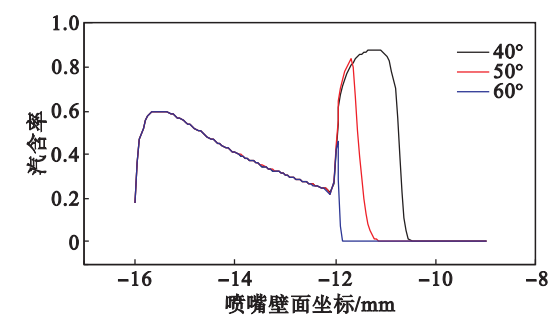


图 9 喷嘴壁面汽含率分布曲线

Fig. 9 Vapor fraction distribution curve of the nozzle wall

4 结 论

- 1) 角型喷嘴扩张角的改变仅会对扩张段区间内的空化行为产生影响,对圆柱段区间没有明显影响.
- 2) 在角型喷嘴扩张段内,回流与压力的共同作用导致了扩张角对扩张段壁面起始点处空化汽泡生成速率(气相生成速率)的影响存在最优值.
- 3) 当角型喷嘴扩张角在 40°到 60°之间时,随着扩张角的减小,扩张段区间内的空化汽泡含量(汽含率)会增多.所以,在 40°到 60°区间内,喷嘴的扩张角度越小其空化效果就越好.

参考文献：

[1] Ju D Y ,Qin M ,Koubayashi R ,et al. Effect of aeration on superficial residual stress level of carburized and quenched gears treated by water cavitation peening [J]. *Surface Engineering* 2006 22 219 – 223.

[2] Han B ,Ju D Y. Compressive residual stress induced by water cavitation peening :a finite element analysis[J]. *Materials and Design* 2009 30(8) 3325 – 3332.

[3] Odhiamabo D ,Soyama H. Cavitation shotless peening for improvement of fatigue strength fatigue strength of carbonized steel[J]. *International Journal of Fatigue* 2003 , 25(9) :1217 – 1222.

[4] Soyama H ,Shimizu M ,Hattori Y ,et al. Improving the fatigue strength of the elements of a steel belt for CVT by cavitation shotless peening[J]. *Journal of Materials Science* ,2008 43 (14) 5028 – 5030.

[5] Soyama H. Introduction of compressive residual stress using a cavitating jet in air[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology* 2004 ,126(1) :123 – 128.

[6] Soyama H ,Macodiyo D O. Fatigue strength improvement of gears using cavitation shotless peening[J]. *Tribology Letters* , 2005 ,18(2) :181 – 184.

[7] 管金发 邓松圣 郭广东 ,等. 空化射流角型喷嘴内流场的数值模拟[J]. *机床与液压* 2012 40(23) :46 – 50.

(Guan Jin-fa ,Deng Song-sheng ,Guo Guang-dong ,et al. Numerical simulation of internal flow field in angle nozzle for cavitation water jet[J]. *Machine Tool & Hydraulics* 2012 40 (23) :46 – 50.)

[8] 陈林 雷玉勇 郭宗环 ,等. 基于 Fluent 自振空化喷嘴内流场的数值模拟[J]. *机床与液压* 2013 41(11) :154 – 157.

(Chen Lin ,Lei Yu-yong ,Guo Zong-huan ,et al. Numerical simulation of self-resonating cavitation jet nozzle based on Fluent[J]. *Machine Tool & Hydraulics* ,2013 ,41(11) : 154 – 157.)

[9] 刘海锋 张凤华 唐川林 ,等. 扩展角对收缩 – 扩散型喷嘴空化效果的影响[J]. *湖南工业大学学报* ,2011 ,25(2) : 22 – 25.

(Liu Hai-feng ,Zhang Feng-hua ,Tang Chuan-lin ,et al. The extend angle 's effects on the cavitation of convergence-divergence nozzle[J]. *Journal of Hunan University of Technology* 2011 25(2) 22 – 25.)

[10] 薛梅新 朴英. 高压喷嘴空化初生的大涡模拟[J]. *工程力学* 2013 30(4) :417 – 422.

(Xue Mei-xin ,Piao Ying. Large eddy simulation on cavitation inception of a diesel nozzle[J]. *Engineering Mechanics* 2013 30(4) :417 – 422.)

[11] Zwart P J ,Gerber A G ,Belamri T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics[C]//Fifth International Conference on Multiphase Flow. Yokohama , 2004 : 152 – 162.

[12] Singhal A ,Athavale M M. Mathematical basis and validation of full cavitation model[J]. *Journal of Fluids Engineering* , 2002 ,124(3) :617 – 624.