

文章编号:1673-5005(2009)06-0057-04

缩放型喷嘴产生的空化射流流场数值模拟

卢义玉, 王晓川, 康 勇, 陈宇龙

(重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400030)

摘要:应用 Standard $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 和 Standard $k-\omega$ 湍流模型对缩放型喷嘴内部湍流流场进行数值模拟, 结合理论及质量流量测试试验对数值模拟结果进行对比验证。结果表明: RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型最适合用于数值模拟缩放型喷嘴内部的湍流流场; RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型数值模拟结果显示缩放型喷嘴收缩角使喷嘴喉管部产生了低压场, 压差的产生使水射流的空化效果得到了提高。

关键词:空化水射流; 缩放型喷嘴; 流场; 数值模拟; 流动特性

中图分类号: TH 137 **文献标识码:** A

Numerical simulation for cavitation water jet flow field through convergent-divergent nozzle

LU Yi-yu, WANG Xiao-chuan, KANG Yong, CHEN YU-long

(College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The turbulent field in a nozzle was numerically simulated by Standard $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$ and Standard $k-\omega$ turbulent models. The contrast check for simulated results was done by combining the theory analysis and experiments of mass flow rates. The results show that the RNG $k-\varepsilon$ is the most suitable model. The numerical simulation results of RNG $k-\varepsilon$ turbulent model show that the reduction angle of convergent-divergent nozzle has significantly influence on the parameters of jet flow field. It can form low pressure field in nozzle throat, and the pressure difference can improve the cavitation effect of high pressure water jet.

Key words: cavitation water jet; convergent-divergent nozzle; flow field; numerical simulation; flow property

相同的水力参数条件下,水射流的空化效果取决于喷嘴结构。大量的试验研究已经证实缩放型喷嘴产生的空化射流冲刷效果明显比收缩型喷嘴的好。但是,目前人们对喷嘴的几何形状与水射流的空化效果之间的关系还缺乏认识,需要对喷嘴内部流场进行全面和准确的试验研究。直接通过试验测试喷嘴内射流的压力分布状态非常困难,传统的分析方法也不能计算内部截面积有变化的喷嘴中的射流压力分布,因此探索合适的数值模拟方法进行喷嘴内部射流流场的数值模拟,对研究喷嘴结构与空化效果间的关系具有重要意义^[1-5]。笔者选用适应

性强的 Standard $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Standard $k-\omega$ 模型,对缩放型喷嘴内部湍流流场进行数值模拟,结合质量流量测试试验,选出最适合数值分析缩放型喷嘴内部湍流流场的模型,通过数值模拟研究喷嘴结构与空化效果之间的关系。

1 控制方程

FLUENT 软件采用 SIMPLE 算法(求解压力耦合方程的半隐方法)对控制方程进行数值求解,通过“预测—校正”程序来计算交错网格上的压力。非定常的连续方程和 Navier-Stokes 方程^[6-8]为

收稿日期:2009-03-02

基金项目:国家创新研究群体基金项目(50621403);重庆市杰出青年基金项目(CSTC2009BA6047);新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0767)

作者简介:卢义玉(1972-),男(汉族),湖北京山人,教授,博士,博士生导师,主要从事高压水射流理论及应用方面的研究。

$$\begin{aligned} \text{div } U &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(uU) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \text{div}(\text{grad } u), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(vU) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \text{div}(\text{grad } v), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(wU) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \text{div}(\text{grad } w). \end{aligned}$$

式中, ρ 为水的密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; U 为速度矢量, m/s ; u, v, w 分别为速度矢量 U 在 x, y, z 方向上的分量, m/s ; p 为流体微元体上的压力, Pa ; μ 为水的动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$ 。

由于湍流运动是不规则、随机的, 不可能计算出所有质点运动情况, 因此可将非定常的控制方程作雷诺分解时均处理, 即

$$\begin{aligned} \text{div } U &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(uU) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \text{div}(\text{grad } u) + \\ &\left[-\frac{\partial \overline{u'u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right], \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(vU) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \text{div}(\text{grad } v) + \\ &\left[-\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right], \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(wU) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \text{div}(\text{grad } w) + \\ &\left[-\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right]. \end{aligned}$$

2 FLUENT 湍流模型的选择

2.1 物理模型和网格划分

模拟试验流域包括了空化器、喷嘴及进口端连接喷嘴的管道(图1)。为缩短计算时间缩小了模拟空化器的体积, 其尺寸为 $\Phi 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 设有环形出口。水射流通过喷嘴注入空化器内部所产生的压力(围压)可调节, 缩放型喷嘴的喉部直径 d 为 1.27 mm 。

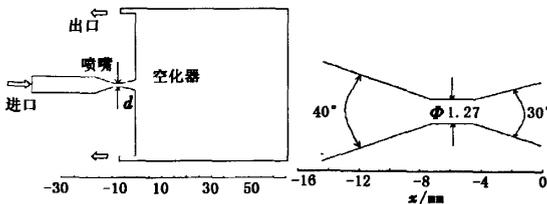


图1 物理模型和缩放型喷嘴示意图
Fig.1 CFD modelled cavitation cell and convergent-divergent nozzle

该流域将在 GAMBIT 被离散化。设定空化器和喷嘴的形状成轴对称, 只需取 1/2 的物理模型体积进行离散化(图2)。在喷嘴的收缩段、扩展段以及喷嘴出口段进行网格局部细化。经初步计算分析, 物理模型划分成 8 521 个四边形结构网格就可以满足计算的要求, 超过 8 521 个网格对计算结果影响不大。采用二阶迎风格式对控制方程进行离散。

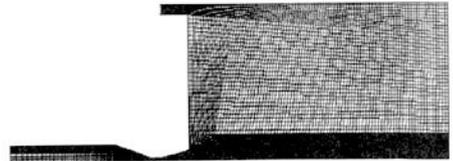


图2 流场半剖面网格划分
Fig.2 Meshed domain for flow field semi-profile

2.2 边界条件

为了与试验条件相一致, 模拟装置的进、出口压力按照各单个实测试验数据来设置。模拟进、出口的边界条件需输入湍流强度和流体的直径。湍流强度 I 可以通过管流的经验关系公式来估算^[7], 即

$$I = 0.16Re^{-1/8}.$$

式中, Re 为按水力直径计算得到的雷诺数。

边界条件: 进、出口压力分别为 10.2 和 6 MPa, 进、出口水流温度均为 300 K, 进、出口湍流强度均为 4.5%, 进、出口水流直径分别为 6.5 和 21 mm。

2.3 不同湍流模型预测的流体参数比较

图3, 4 分别为 3 种模型计算出的速度矢量和流线。从图3(箭头表示方向, 长度表示速度大小) 可以看到, 利用 RNG $k-\epsilon$ 和 Standard $k-\omega$ 模型能很清楚地计算出水射流中的分离流, Standard $k-\epsilon$ 模型却不能。从图4 可以看出: Standard $k-\epsilon$ 模型中分离流在扩展端尾部出现, 剪切层非常薄; 其他模型的分离流都是出现在临近扩展端的开始部分(靠近喉部), 而剪切层非常厚。所以 Standard $k-\epsilon$ 模型不能精确预测反向压力梯度下的流体参数。

图5 为射流中心线处速度分布。由图看出, RNG $k-\epsilon$ 模型计算出的速度值在沿射流中心线处从 $x = -3 \text{ mm}$ 到 $x = 3 \text{ mm}$ 处几乎是恒定不变的, 其他模型并没有计算出该特征。依照射流理论, 淹没射流有一个等速核^[9], RNG $k-\epsilon$ 模型成功计算出该核心, 所以 RNG $k-\epsilon$ 模型适合数值计算缩放型喷嘴产生的湍流场。

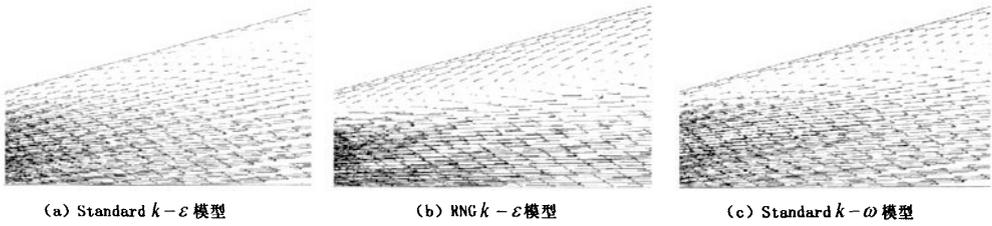


图 3 不同模型对应的喷嘴扩展端速度矢量

Fig. 3 Velocity vectors in nozzle divergent section modelled by different models

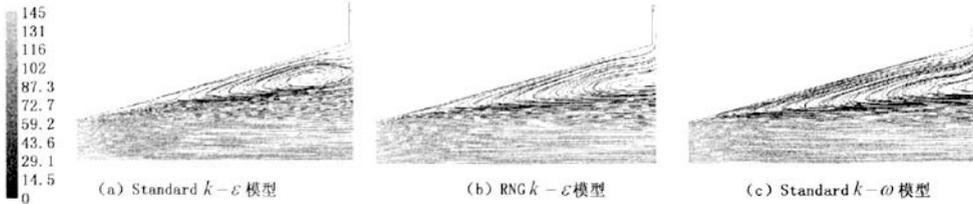


图 4 不同模型计算出的流线(m/s)

Fig. 4 Flow lines modelled by different models(m/s)

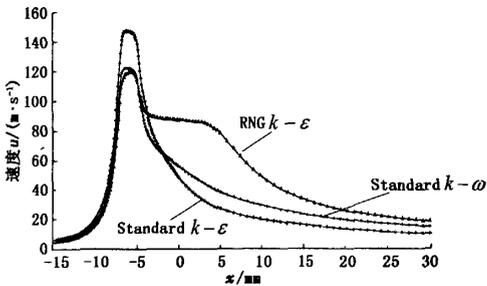


图 5 射流中心线处的速度分布

Fig. 5 Velocity distribution on jet central line

3 流量测试试验

由于喷嘴的尺寸很小,射流的速度很快,要测量出喷嘴内的压力和速度非常困难,故而通过测试射流的质量流量来验证数值计算结果。

3.1 试验条件

试验用的缩放型喷嘴尺寸、形状与模拟喷嘴一致。水经高压泵流入喷嘴形成射流,泵压和围压可以通过压力调节阀来调整。整个试验过程保持泵压恒定为 10 MPa,只改变围压(0.2 ~ 8 MPa)。

3.2 质量流量的测量方法

用秒表计时,将从空化器出口流出的水用容器收集,并用电子天平称重,平均质量流量为

$$Q = m/t.$$

式中, Q 为平均质量流量,kg/s; m 为收集的水的质量,kg; t 为试验时间,s。

3.3 质量流量的实测值与计算值的比较

由于湍流模型适用于单相流体,即使模型选择

正确,其所预测的流量也只有在没有空化现象产生时才与实测结果相一致。当出口压力低于水蒸气饱和压力时,水中的微小气泡就会膨胀^[10],占去流体中一部分体积而导致质量流量降低,测得的流量值应低于预测值。

图 6 是在不同泵压和围压条件下不同模型计算出的质量流量值与实测值的对比。从图 6 中可以看出,Standard $k-\varepsilon$ 模型所计算出的质量流量值都比实测值大。

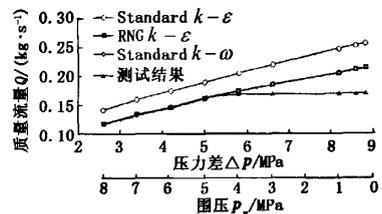


图 6 数值计算出的质量流量值与实测值的比较

Fig. 6 Comparison of mass flow rates between calculations and measurements

通过试验可以观察到,当围压减小到 4.6 MPa 左右时,就能听到空化声,即有空化现象产生。图 7 为不同模型在不同围压下计算的射流中心线上的最小喉部压力。可以看到,当围压减小到 4.6 MPa 左右时只有 RNG $k-\varepsilon$ 模型预测的喉部压力接近 0,符合空化产生的压力条件,说明 RNG $k-\varepsilon$ 模型的预测值比其他几个模型更接近实际值。因此 RNG $k-\varepsilon$ 模型更适合用来模拟缩放型喷嘴内部流场。

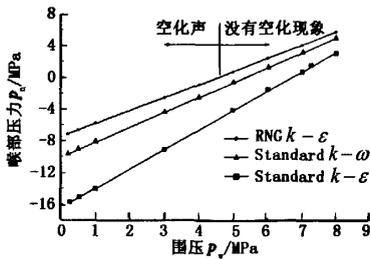


图7 不同模型下沿射流中心线的最小喉部压力
Fig.7 Minimum pressure in throat on jet central line by different models

4 缩放型喷嘴内部空化现象数值模拟

选用 RNG $k-\epsilon$ 模型对缩放型喷嘴内部射流场进行数值模拟。不同压力下的数值模拟结果表明,缩放型喷嘴喉部是一个低压区,随喉部压力的降低压差逐渐增大(图8)。由于压差的增加可以加快空泡的成长,增加空泡数^[10],所以缩放型喷嘴的几何结构提高了射流的空化效果。

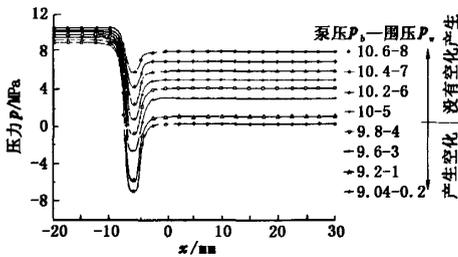


图8 不同压力差下沿射流中心线的压力分布
Fig.8 Pressure profiles on jet central line for different pressure difference

5 结论

- (1) RNG $k-\epsilon$ 模型适合用于数值计算缩放型喷嘴产生的空化射流流场。
- (2) 缩放型喷嘴的扩展段能使喷嘴喉部产生一个低压区,加快空泡的成长,增加了空泡数,使其空化效果得到了较好的提高。

(上接第56页)

[8] 于永南, 韩志勇. 斜直井眼中钻柱屈曲的研究[J]. 力学与实践, 1997, 19(2): 17-19.
YU Yong-nan, HAN Zhi-yong. A study on the drillstring buckling in inclined wellbores [J]. Mechanics and Practice, 1997, 19(2): 17-19.

[9] 高宝奎, 高德利. 斜直井眼中钻柱屈曲的可能性[J]. 石油钻采工艺, 1995, 17(5): 6-11.
GAO Bao-kui, GAO De-li. Probability of the drillstring-

参考文献:

[1] 卢义玉, 李晓红, 向文英. 空化水射流破碎岩石的机理研究[J]. 岩土力学, 2005, 8(26): 1233-1237.
LU Yi-yu, LI Xiao-hong, XIANG Wen-ying. Rock erosion mechanism of cavitating water jets [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 8(26): 1233-1237.

[2] 蒋明虎, 刘晓敏, 王尊策, 等. 静态水力旋流器压力场分布测试研究[J]. 石油学报, 2003, 24(5): 104-107.
JIANG Ming-hu, LIU Xiao-min, WANG Zun-ce, et al. Test of pressure field distribution in static hydro-cyclones [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(5): 104-107.

[3] 李福田, 倪浩清. 工程湍流模式的研究开发及其在应用[J]. 水利学报, 2001, 5(5): 22-23.
LI Fu-tian, NI Hao-qing. Application and development of turbulence model for engineering practice [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 5(5): 22-23.

[4] MANLAPAZ R L, CHURCHILL S W. Fully developed laminar flow in a helically coiled tube of finite pitch [J]. Chem Eng Commun, 1980, 177(7): 57-58.

[5] 崔海清, 刘希圣. 非牛顿流体偏心环形空间螺旋流的速度分布[J]. 石油学报, 1996, 17(2): 76-83.
CUI Hai-qing, LIU Xi-sheng. Velocity distribution of helical flow of non-Newtonian fluid in eccentric annuli [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(2): 76-83.

[6] 郑丽丽, 范维澄. 撞击射流流场计算 $k-\epsilon$ 和 ASM 湍流模型及 PLDS 和 QUICK 差分格式的比较[J]. 水动力学研究与进展, 1988, 13(14): 1-7.
ZHENG Li-li, FAN Wei-cheng. Calculation of a plane turbulence impinging jet [J]. Journal of Hydrodynamics, 1988, 13(14): 1-7.

[7] 王福军. 计算流体动力学——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 63-108.

[8] 朱自强. 应用计算流体力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998: 19-32.

[9] 崔漠慎, 孙家骏. 高压水射流技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 7-19.

[10] HICKLING R, PLESSET M S. Collapse and rebound of a spherical bubble in water [J]. Physics Fluids, 1964, 12(7): 7-14. (编辑 李志芬)

buckling in inclined wellbores [J]. Oil Drilling Technology, 1995, 17(5): 6-11.

[10] 范慕辉, 焦永树, 蔡宗熙. 斜井中钻柱的稳定性研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 167-172.
FAN Mu-hui, JIAO Yong-shu, CAI Zong-xi. A study on the stability of tubular in inclined wellbores [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 167-172.

(编辑 李志芬)