

风琴管空化喷嘴流场数值模拟

胡坤¹, 艾志久¹, 付必伟¹, 贾林¹, 彭旭²

1. 西南石油大学机电工程学院, 成都 610500

2. 河南石油勘探局, 河南南阳 473000

摘要 风琴管空化喷嘴是一种常见的空化射流喷嘴, 利用喷嘴内部特殊结构形成产生空化效应, 从而提高射流的打击效果, 因此, 研究空化喷嘴内部结构对形成的空化效应影响, 有利于提高喷嘴的工作性能。本文利用多相流模型研究风琴管空化喷嘴, 在出口压力为 2MPa 工况下, 对不同入口压力下喷嘴的内流场进行了数值计算。结果表明, 在正常工作压力 8MPa 情况下, 喷嘴喉道位置出现局部低速区和低压区域, 且空化位置出现在喉道截面突变位置。同时, 研究了喷嘴喉道长径比和存在圆角情况下内部空化情况, 发现增大喷嘴喉道长径比实际相当于增加了低压区域, 有利于空化的产生; 喷嘴喉道变径区域存在圆角会严重影响空化喷嘴的空化性能, 且圆角半径越大, 临界空化压力越大。

关键词 空化; 风琴管; 流场仿真; 计算流体动力学; 水射流

中图分类号 TE243

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.21.007

Numerical Simulation of Flow Field for Organ-pipe Cavitation Jet Nozzle

HU Kun¹, AI Zhijiu¹, FU Biwei¹, JIA Lin¹, PENG Xu²

1. School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Henan Petroleum Exploration Bureau, Nanyang 473000, Henan Province, China

Abstract Organ-pipe cavitation jet nozzle is a common nozzle for cavitation jet, by using its internal special structure; the nozzle generates the cavitation effect in order to improve the percussion effect of jet. Therefore, the research on the structure inside of cavitation nozzle is able improve the nozzle performance. By using multi-phase flow model to study organ-pipe cavitation nozzle, on the conditions of the outlet pressure of 2MPa, for the different inlet pressure, nozzle inner flow field is numerically calculated. The results indicate that with the normal working pressure of 8MPa, nozzle throat position locates at local low speed zone and low pressure area, and cavitation position appears at the position of throat section mutation. At the same time, in the case of the nozzle throat long diameter ratio and existing corner, the internal cavitation is studied; the following conclusions are drawn: The increase of nozzle throat long diameter larger than it is actually is equivalent to increase the low pressure area, and is helpful for the generation of cavitation; that nozzle throat reducer area exists corner would seriously affect the cavitation performance of cavitation nozzle, and the larger radius is, the bigger the critical cavitation pressure is.

Keywords cavitation; organ-pipe; flow field simulation; computational fluid dynamics; water jet

0 引言

空化现象是流体流动过程中局部压力低于饱和蒸气压力时出现的空泡生成、长大及溃灭的现象, 其实质是流体在动力及热力联合作用下, 液体介质局部液-气相变过程。将空化作用引入高压水射流技术领域即为空化水射流技术, 利用空泡溃灭引起的极大冲击力可以加强高压水射流的清洗、破碎和切割能力^[1,2]。

空化喷嘴是形成空化射流的核心元件, 其结构特征直接影响射流的形成质量。风琴管空化喷嘴是一种典型的空化喷嘴。对风琴管空化现象的研究多以试验研究为主, 但随着计算机技术及计算流体动力学方法的发展, 利用计算流体动力学方法研究风琴管空化喷嘴内外流场逐渐被研究者重视。范晓红等^[3]利用计算流体动力学软件 Fluent 对风琴管喷嘴淹没射流流场进行仿真分析, 研究了空化喷嘴内部压力及轴线速

收稿日期: 2013-01-28; 修回日期: 2013-04-25

基金项目: 中国石油天然气集团公司重大科技专项项目(2008C-2800)

作者简介: 胡坤, 博士研究生, 研究方向为石油天然气装备行为力学仿真, 电子邮箱: faee0@sina.com

度分布。杨树人等^[4]利用 Fluent 软件计算比较了角型空化喷嘴及风琴管空化喷嘴内部流场分布,得出在一定情况下,角型喷嘴空化性能优于风琴管空化喷嘴。卢义玉等^[5]比较了 standard $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 及 standard $k-\omega$ 等 3 种湍流模型在缩放型喷嘴空化射流流场模拟中的应用,得出 RNG $k-\varepsilon$ 最适合于模拟缩放型喷嘴内部湍流流场。然而,上述研究只是进行单相计算,并未考虑气相的耦合效应。本文利用多相流模型,对风琴管空化喷嘴结构关键参数进行研究,分析各参数对其空化性能的影响。

1 数值计算模型和边界条件

1.1 喷嘴结构及计算模型

选取如图 1 所示的风琴管空化喷嘴作为研究对象,图中 a, b, L 分别为喷嘴轴向特征尺寸, D 为喷嘴喉道直径。

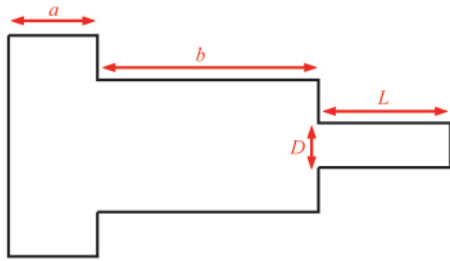


图 1 风琴管喷嘴结构

Fig. 1 Structure of organ-pipe nozzle

为研究喷嘴结构尺寸对空化效果的影响,选取基准喷嘴尺寸 a, b, L, D 分别为 2, 5, 3, 1mm。

考虑喷嘴结构及内部流场的对称性,选取 2D 轴对称模型进行计算,构建数值计算网格模型如图 2 所示。计算区域采用全结构网格划分,共生成 32874 个网格。

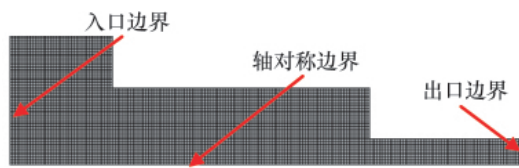


图 2 网格模型和边界

Fig. 2 Grid model and boundary conditions

1.2 边界条件

计算边界如图 2 所示。图中未标志的边界均为壁面边界。共涉及以下 4 种边界类型。

喷嘴入口:采用压力入口边界,指定总压 8MPa。

喷嘴出口:采用压力出口边界,指定静压 2MPa。

喷嘴壁面:采用光滑无滑移壁面边界。

喷嘴轴线:采用轴对称边界。

2 控制方程和离散方法

2.1 控制方程

喷嘴内部和外部流动状态为复杂的湍流流动,采用三维 $N-S$ 方程作为流动控制方程,利用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型计算流场湍流信息^[6,7]。

连续方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$k-\varepsilon$ 方程

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \quad (4)$$

式中, u_i 为 x, y, z 方向流场速度, m/s; x_i 为流场中第 i 个空间变量; ρ 为流场中流体介质的密度, kg/m³; k 为湍动能, m²/s²; μ 为流体介质黏度, Pa·s; ε 为湍流耗散率, m²/s³; μ_{eff} 为有效黏度, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, Pa·s; μ_t 为湍流黏度, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, Pa·s; f_i 为单位质量力, m/s²; P_k 为湍流产生源项; 方程中涉及的经验常数取值为: $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_\varepsilon = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

2.2 空化模型

空泡体积分数方程^[8,9]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha_v) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_v v_{vi} \alpha_v) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\eta \frac{\partial \alpha_v}{\partial x_i} \right) + S_v \quad (5)$$

式中, ρ_v 为气相密度; v_{vi} 为相间速度; α_v 为空泡体积分数; η 为质量转换系数, 即

$$\eta = \rho_v \frac{dR}{dt} \frac{3\delta_v \alpha_v}{4\pi} \quad (6)$$

式中, R 为空泡半径, m; δ_v 为计算体的体积, m³; S_v 为源项, 用于模拟空泡产生和溃灭的过程, 即

$$S_v = 4\pi R \rho_v N R^2 \frac{dR}{dt} \quad (7)$$

$$R = \left(\frac{3\alpha_v}{4\pi N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式中, N 为单位控制体内的空泡数, 设置为 1.5×10^{10} 。

相变公式^[10]如下。

当 $p_v > p$ 时, 空泡的生长速度为

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3\rho_v}} \quad (9)$$

当 $p_v < p$ 时, 空泡的溃灭速度为

$$\frac{dR}{dt} = -\sqrt{\frac{2(p - p_v)}{3\rho_v}} \quad (10)$$

式中, p 为环境压力; p_v 为水的气化压力, 设为 2367Pa。

2.3 离散方法

数值方法采用 Simple 算法实现压力场与速度场的耦合, 压力方程采用 PRESTO! 离散格式, 其他方程采用 2 阶迎风格式进行离散。

3 仿真结果与分析

3.1 喷嘴内流场分析

考查喷嘴内部速度、压力、气相体积分数分布规律,分析喷嘴产生空化的原因。

图3为喷嘴内部速度场分布。由图可看出,喷嘴喉道位置出现等速核,且等速核区域延伸至喷嘴出口位置。

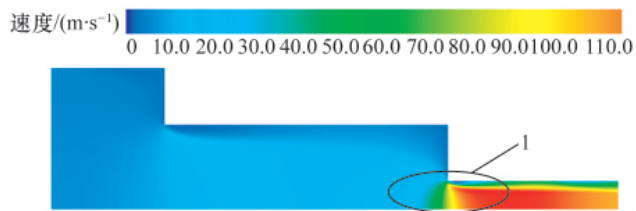


图3 喷嘴速度场分布

Fig. 3 Distribution of nozzle velocity field

图4为图3中的标志1位置的局部放大图。如图4所示,在喷嘴出口位置存在局部低速区。该区域的形成是由于喷口界面突变导致出现涡旋。该区域涡旋的存在有利于形成局部低压,从而导致空化的产生。

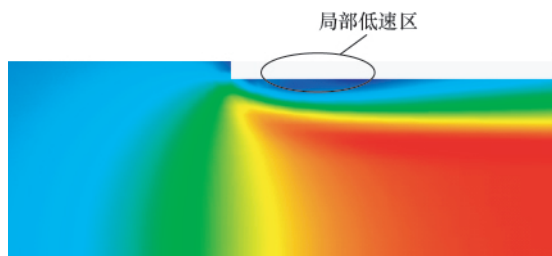


图4 局部速度分布

Fig. 4 Distribution of local velocity

图5为喷嘴压力分布。可以看出,在喷嘴喉道位置出现低压,最低压力低于1MPa。当压力低于水的饱和蒸气压2368Pa时将会产生空化。

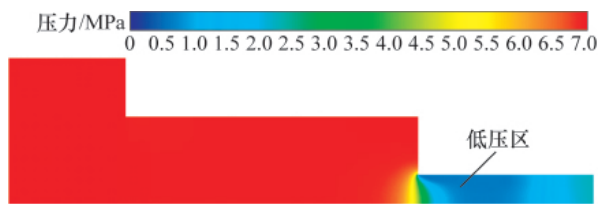


图5 压力分布

Fig. 5 Distribution of pressure

图6为产生空化后气相分布情况。如图6所示,空化发生在喷嘴出口喉道处,且气相含量从壁面沿径向逐渐降低。在壁面附近,气相体积分数达到0.9以上。



图6 空化气相体积分布

Fig. 6 Distribution of cavitation vapor phase volumes

3.2 空化临界压力分析

为研究该型喷嘴的空化临界压力,在喷嘴出口静压恒定为2MPa情况下,分别设定入口压力为5、6、7、8MPa,计算喷嘴内部空化情况。

图7为不同入口压力下考虑空化时计算得到的水蒸气相体积分数分布。可以看出,在入口压力为5MPa情况下,几乎不存在气相分布,当压力提高至6MPa时开始出现气相,但此时气相含量较少,局部最高体积分数为0.7。当入口压力继续增大时,气相分布区域不断扩展,且最高气相含量也随之增大。压力提高至8MPa时,最高气相含量增至0.97。

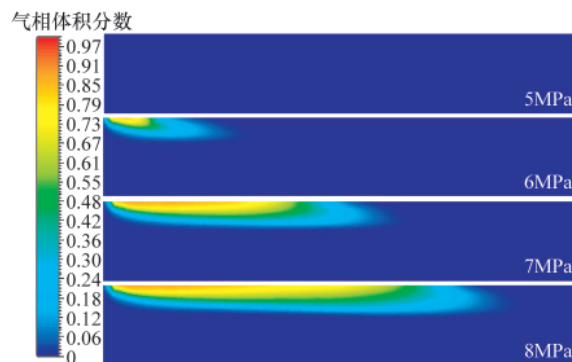


图7 不同入口压力下空化情况

Fig. 7 Cavitation with different inlet pressures

此型号喷嘴在出口背压2MPa情况下,空化临界压力在5MPa与6MPa之间,这与现实情况较为相符。实验测定该型号喷嘴临界空化压力为5.32MPa。

3.3 长径比对空化的影响

保持喷嘴入口压力为8MPa,出口压力为2MPa, $D=1\text{mm}$,改变 L 为2,3,4,5mm,即长径比 L/D 为2,3,4,5。计算不同长径比下喷嘴空化情况。

图8(a)、(b)、(c)、(d)分别为长径比为2,3,4,5情况下喷嘴出口喉道位置发生空化后气相体积分数分布。由图可看出,随着长径比的增加,空化产生的气相体积随之增加。其原因在于,加长喷嘴喉道长度,有助于增加低压区域(图5中所示区域),增强空化效果。由于背压的存在,在临近出口位置,喷嘴内部压力会升高至背压,压力升高后空化作用消失。因此对于风琴管空化喷嘴,在设计时可尽量延长其出口喉道,有助于增强空化效果。

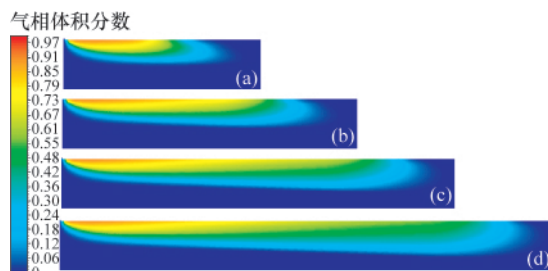


图 8 不同长径比喷嘴气相分布

Fig. 8 Distribution of nozzle vapor phase with different aspect ratios

3.4 圆角对空化的影响

喷嘴喉道位置在制造过程中以及使用时间过长而出现加工圆角^[1]。为研究圆角对喷嘴空化性能的影响,设置喉道位置圆角半径分别为 0.1,0.2,0.3mm,并与之前的模型进行比较。边界条件采用入口压力 8MPa,出口压力 2MPa。

图 9 为不同圆角半径情况下气相体积分布。从图中可以看出,在没有圆角情况下($R=0$),气相体积比超过 0.2 的区域(图中红色区域)较为明显;当喷嘴结构存在 $R=0.1\text{mm}$ 的圆角时,喉道内气相体积下降很快,体积分数超过 0.2 的区域面积很小。而当继续增大圆角半径时($R=0.2\text{mm}$ 及 $R=0.3\text{mm}$),计算区域气相体积分数超过 0.2 的区域已完全消失,可以认为此时不会发生空化。

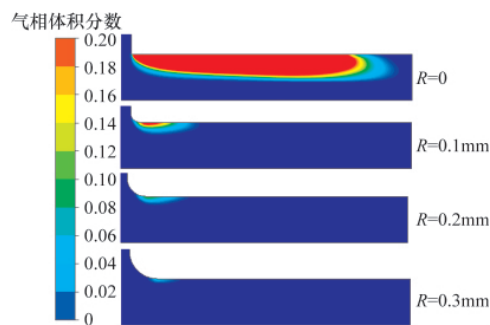


图 9 不同圆角半径情况下气相分布

Fig. 9 Distribution of vapor phase volumes with different fillet radii

喉道位置产生的圆角对风琴管空化喷嘴空化性能影响很大,在实际生产应用中,喷嘴喉道位置常由于工作磨损导致空化性能严重下降。故空化喷嘴在加工制造过程中要提高制造精度,喉道收缩口位置不允许出现加工圆角。在使用过程中要检查喉道形状的完整性。

4 结论

本文利用计算流体力学方法对风琴管流场进行数值模拟,得出以下结论:

(1) 对于风琴管类空化喷嘴,由于其结构存在阶梯型内径,导致在截面突变位置出现局部低压区域,空化产生于该

低压区域;

(2) 空化喷嘴在一定背压的工作环境下,存在空化临界压力,当入口压力低于临界空化压力时不会产生空化现象,当入口压力提高至临界空化压力后,会产生明显的空化现象,气相体积分数会快速增加;

(3) 喷嘴喉道长径比对产生空化很敏感,增大长径比能有效地提高空化效应;

(4) 喉道位置出现磨损而产生的圆角会严重降低空化效果,这也是导致喷嘴失效的主要因素。

参考文献 (References)

- [1] 向文英, 李晓红, 卢义玉, 等. 空化射流效应的实验研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(13): 1388-1391.
Xiang Wenyong, Li Xiaohong, Lu Yiyu, et al. China Mechanical Engineering, 2006, 17(13): 1388-1391.
- [2] 李根生, 沈忠厚. 风琴管自振空化喷嘴的设计原理 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 1992, 16(5): 38-42.
Li Gensheng, Shen Zhonghou. Journal of China University of Petroleum: Natural Sciences Edition, 1992, 16(5): 38-42.
- [3] 范晓红, 刘庭成, 窦忠强. 风琴管喷嘴淹没射流流场仿真研究[J]. 清洗世界, 2007, 23(8): 13-16.
Fan Xiaohong, Liu Tingcheng, Dou Zhongqiang. Cleaning World, 2007, 23(8): 13-16.
- [4] 杨树人, 谭放, 张莹, 等. 空化喷嘴内部流场的数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10(33): 8329-8332.
Yang Shuren, Tan Fang, Zhang Ying, et al. Science Technology and Engineering, 2010, 10(33): 8329-8332.
- [5] 卢义玉, 王晓川, 康勇, 等. 缩放型喷嘴产生的空化射流流场数值模拟 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009(6): 63-66.
Lu Yiyu, Wang Xiaochuan, Kang Yong, et al. Journal of China University of Petroleum: Natural Sciences Edition, 2009(6): 63-66.
- [6] 王国玉, 吴炯杨, 李向宾, 等. 空化紊流流动的数值计算模型及其验证 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(6): 49-52.
Wang Guoyu, Wu Jiongyang, Li Xiangbin, et al. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(6): 49-52.
- [7] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉. Fluent 流体分析及仿真使用教程 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
Zhu Hongjun, Lin Yuanhua, Xie Longhan. Fluent fluid analysis and simulation and practical course [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010.
- [8] Moholkar V S, Pandit A B. Modeling of hydrodynamic cavitation reactors: A unified approach[J]. Chemical Engineering Sciences, 2001, 56(6): 6295-6302.
- [9] Volmajer M, Kegl B. Cavitation phenomena in the injection nozzle: Theoretical and numerical analysis [J]. Journal of KONES Internal Combustion Engines, 2004, 11(3/4): 295-303.
- [10] 沃恒洲, 姚智华, 张亚芳, 等. 发动机喷嘴内部空化初生的数值模拟研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(17): 59-63.
Wo Hengzhou, Yao Zhihua, Zhang Yafang, et al. China Mechanical Engineering, 2011, 22(17): 59-63.
- [11] 张风华, 唐川林, 杨林, 等. 空化喷嘴出口形状的研究 [J]. 流体机械, 2004(1): 25-28.
Zhang Fenghua, Tang Chuanlin, Yang Lin, et al. Fluid Machinery, 2004(1): 25-28.

(责任编辑 王媛媛)