

环形射流泵性能参数的数值模拟

王振恒, 唐川林, 胡 东

(湖南工业大学 水射流研究所, 湖南 株洲 412008)

摘要: 基于 Fluent 软件, 采用标准湍流模型在其它泵体参数选用经验值的情况下, 对不同面积比的环形射流泵内部流场进行了数值模拟, 计算得出 2 种入射角度下射流泵的性能参数, 分析了不同面积比对射流泵最大效率的影响。结果表明: 当面积比为 1/3 时, 射流泵效率最高。以最高效率下降 3% 为原则, 得出最优面积比的范围为 0.3~0.35 之间。

关键词: 环形射流泵; 数值模拟; 面积比; 效率

中图分类号: O358

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)03-0086-04

The Numerical Simulation of Property Parameters of Annular Jet-Pump

Wang Zhenheng, Tang Chuanlin, Hu Dong

(Research Institute of Water Jet, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: Based on Fluent software, using standard model and with other parameters selecting empirical values, makes numerical simulations of the flow field of different area ratios in annular jet-pumps. Calculates the performance parameters of the jet-pump of two type injecting angles and analyses the effect of different area ratios on the efficiency. The results indicate that the highest efficiency is at the area ratio of 1/3. According to the principle of the highest efficiency reducing 3%, the optimal area ratio is between 0.3 to 0.35.

Keywords: annular jet-pump; numerical simulation; area ratio; efficiency

0 引言

环形射流泵主要用于输送液体、气体和固体物。由于其吸入口和喉管处于同轴线上, 被吸入流体不需改变流向, 所以特别适合吸取含有较高固体浓度和较大固体粒度的流体。实验研究表明: 环状喷嘴射流泵和多喷嘴聚焦射流泵相比较具有工作压力高、波动小、当量喷嘴大小可以调节、对偏心不敏感、喷嘴不会堵塞、磨损小、结构简单、安装方便、重量轻等优点, 具有相当广阔的应用前景和较高的研究价值^[1]。

本文研究了面积比对环形射流泵的影响, 在射流泵其它参数不变的情况下, 采用 Fluent 软件和标准模型, 对不同面积比射流泵内流场进行了数值模拟, 获

得不同面积比下射流泵的特性曲线。以最高效率为参考标准, 以面积比为优化目标, 针对面积比对效率的影响进行讨论, 得出在给定其它参数下最佳面积比取值范围。

1 组成原理与计算区域

本文所模拟的环形喷嘴射流泵结构如图 1 所示。其工作原理为: 高速工作流体从环形缝隙喷嘴射入喉管, 卷吸喉管内的流体进入扩散管, 同时在喉管内形成负压, 将被输送流体吸入喉管与工作流体发生混合。混合流体经扩散管将动能转换成压能, 经输送管到达被指定输送地点。

收稿日期: 2009-04-20

作者简介: 王振恒(1984-), 男, 山东临沂人, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为高效射流理论及应用,

E-mail: Wangzhg84@gmail.com

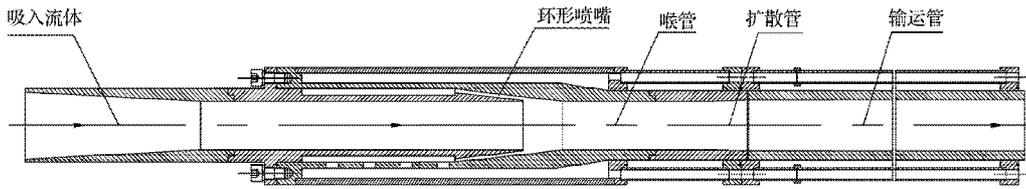


图1 环形射流泵结构图

Fig. 1 The sketch of annular jet-pump structure

经研究分析, 吸入管道和输运管道内流体呈均匀管流分布, 所以在建立计算区域时采取适当简化处理, 取靠近喷嘴部分为计算区域。对于环形喷嘴, 设截面流速为均匀分布。因为所关注的为混合过程和混合以后的流场, 所以对于喷嘴可以采用简化处理, 取喷嘴长度的一半为计算区域。总计算区域如图2所示。

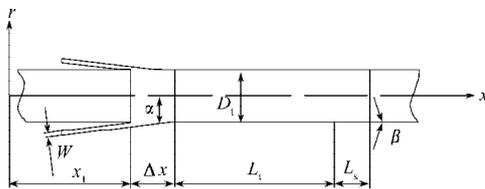


图2 计算区域

Fig. 2 The computational region

2 数学模型

2.1 控制方程

流体的基本控制方程包括连续性方程和动量方程。根据计算域的几何特点, 采用轴对称计算方法, 其柱坐标下的控制方程为^[2]:

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v) = 0, \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, 单位 kg/m^3 ; u, v 分别为速度的轴向和径向速度, 单位 m/s 。

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho uv) &= 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v^2) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial r}. \end{aligned} \quad (3)$$

式中: Γ 为广义扩散系数, 其表达式为

$$\Gamma = \mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon + \mu}, \quad (4)$$

式中: $\mu_{\text{eff}}, \mu_t, \mu$ 分别为有效粘性系数, 湍流粘性系数, 动力粘性系数。湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 使控制方程封闭。

2.2 边界条件

入口条件: 设喷嘴出口截面速度分布均匀, 则入口边界条件为

$$\begin{cases} u_1 = u_a & (r = r_1, x_1 \leq x \leq x_1 + \Delta x), \\ v = u_b & (r = r_1, x_1 \leq x \leq x_1 + \Delta x), \\ u_3 = u_c & (x = 0, 0 \leq r \leq r_1), \end{cases}$$

式中: u_1 为工作流体轴向速度; v 为工作流体径向速度, 单位 m/s ; u_3 为被吸流体轴向速度, 单位 m/s 。

出口条件: 自然出流; 固壁边界条件: 标准壁面函数; 中心边界条件: 轴对称, 表达式为

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial r} = 0, \\ v = 0, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = 0. \end{cases}$$

由于模型几何结构规则, 所以采用计算效率和精度都较好的结构网格, 如图3所示。由于喷嘴出口处流动较为复杂, 对其进行加密处理。综合考虑计算量和计算精度, 采用2阶迎风格式离散控制方程, 并采用标准 SIMPLE 算法对离散方程进行求解。

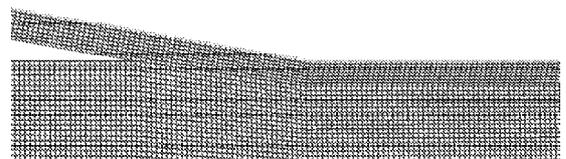


图3 喷嘴入口处网格图

Fig. 3 The grid around nozzle inlet

3 模拟与结果分析

3.1 模拟实验对比验证

为了验证选用的模型和算法的准确性, 以便使用数值模拟手段对环形射流泵进行深入研究, 本文根据文献[3]给出的几何结构和条件进行了模拟计算, 并将所得结果与试验值进行对比, 结果如图4所示。从图4中可看出, 本文的数值计算结果与文献[3]中的试验数据吻合得很好。可以得出, 本文所选用的模型对环形射流泵内流场的计算结果具有精确性和可靠性。

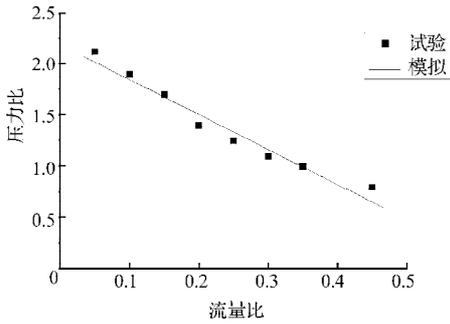


图4 模拟与实验对比

Fig. 4 The comparison between simulation and experiment

3.2 结果与分析

射流泵基本方程形式为 $P=f(M, R)$ ，它是研究射流泵压力、流量与几何尺寸之间的关系式，反映了泵内能量变化和各主要部件（喷嘴、喉管、扩散管和喉管进口段）对射流泵性能的影响，是设计、制造和运用射流泵的理论基础^[4]。

各参数定义如下：

1) 面积比

$$R = \frac{A_j}{A_1} = \frac{\pi \left(\left(\frac{D_t}{2} + b \right)^2 - \left(\frac{D_t}{2} \right)^2 \right)}{\pi D_t^2} \quad (5)$$

式中： D_t 为喉管直径， b 为环形喷嘴宽度，单位m。

2) 流量比

$$M = \frac{q_3}{q_1} = \frac{v_3 A_1}{v_1 A_j} = \frac{v_3 \frac{\pi D_t^2}{4}}{v_1 \left(\left(\frac{D_t}{2} + b \right)^2 - \left(\frac{D_t}{2} \right)^2 \right)} \quad (6)$$

式中： q_1 为工作流体流量， q_3 为吸入流体流量，单位 m^3/s 。

3) 压力比

$$P = \frac{\Delta p_3}{\Delta p_1} = \frac{\left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) - \left(\frac{p_3}{\rho g} + \frac{v_3^2}{2g} + z_3 \right)}{\left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right)} \quad (7)$$

式中： p 为压力，单位Pa； g 为重力加速度，单位 m/s^2 ；下标1为工作流体入口，下标2为泵出口，下标3为被吸流体入口。 z 表示水头位置，单位m； v 为流体速度，单位 m/s 。则

$$v_3 = R(1 + M)v_1 \quad (8)$$

$$\text{射流泵的效率定义为 } \eta = M \cdot P \quad (9)$$

工作介质为常温下的水，密度 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。为了研究面积比对射流泵性能的影响，以常用的 10° 和 7° 喷嘴入射角的数据为代表。分别对面积比为1/8、1/5、1/3、1/2.5、1/2的射流泵进行模拟，每种射流泵的流量

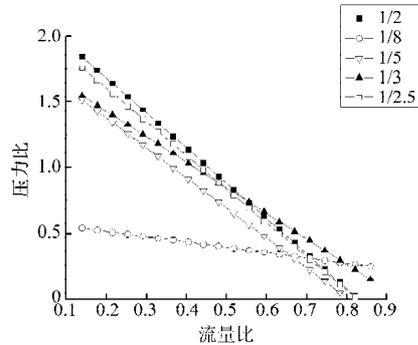
比取值为0.2、0.4、0.6、0.8。泵体固定参数见表1。

表1 泵体固定参数一览

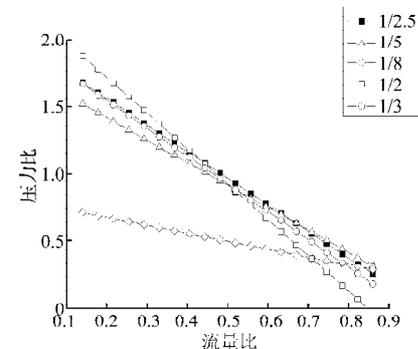
Tab. 1 The checklist of pump fixed parameters

$\alpha / ^\circ$	$\beta / ^\circ$	L_t / mm	L_s / mm	D_t / mm
10, 7	3	246	53	80

将计算得出的结果进行曲线拟合得到5种面积比的射流泵性能曲线和效率曲线，如图5和图6所示，从图中可以看出，面积比对射流泵性能影响明显。当面积比为1/8时，射流泵的性能曲线和其它情况相对变化较大，曲线斜率非常小，射流泵的效率也非常小，这是因为在较小的面积比情况下，在相同的流量比时，工作流体的流速相对较大，在与吸入流体混合时产生了较大区域的回流，由此产生了较大的能量损失。随着面积比的增大，性能曲线之间的斜率和截距随之变化。变化趋势不够明显，但是从效率曲线可以看出，随着面积比的增大，射流泵的最高效率也随之增大，这是因为随着面积比的增大，工作流体和被吸入流体在混合时产生的回流区减小，混合能量损失减小。当面积比大于1/3时，随着工作流体相对速度的降低，混合时间加长，混合能量损失回升，使得最高效率呈下降趋势。由此可见，存在一个最佳的面积比和最优工作参数使得射流泵的效率最高。



a) 入射角度为 10°



b) 入射角度为 7°

图5 不同面积比的射流泵在2种喷嘴入射角度下性能曲线对比

Fig. 5 The comparison of performance curves between different Area ratios under two injecting angles

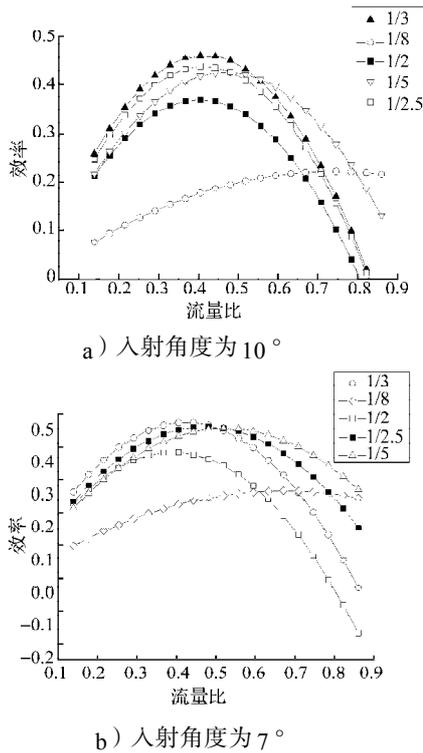


图6 不同面积比的射流泵在2种喷嘴入射角度下效率曲线对比

Fig. 6 The comparison of efficiency curves between different area ratios under two injecting angles

将5种面积比的射流泵的最高效率连线,如图7所示。取最高效率下降3%为标准来界定高效率区,即 $\eta = 97\% \cdot \eta_{\max}^{[5]}$,从而确定最优面积比,则最佳面积比在0.3~0.35之间。

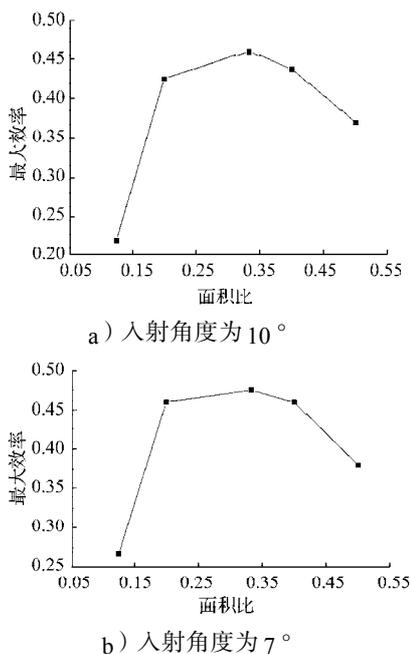


图7 不同面积比的射流泵在2种喷嘴入射角度下最大效率对比

Fig. 7 The comparison of highest efficiency between different area ratios under two injecting angles

4 结语

本文利用数值模拟的方法,在其它参数选用经验值的情况下对2种喷嘴入射角度的环形射流泵内部流场进行了模拟,利用已有的实验结果验证了采用数值模拟方法模拟环形射流泵的流场是可靠的。针对不同面积比的射流泵在相同流量比和其它结构参数下进行了模拟对比分析。结果表明,面积比对射流泵的性能影响显著。随着面积比的增加,射流泵的效率也随之增加,但是这种趋势不是单调的,当到达一个临界值后,效率开始下降。这说明,存在一个最优的面积比使得射流泵的效率最高。由最高效率下降3%为标准,得到最佳面积比的取值范围为0.3~0.35。

参考文献:

- [1] 唐川林,张凤华,杨 林,等.外滤式真空过滤机用射流真空泵工作性能的改进[J].重庆大学学报,2004,27(5): 12-15. Tang Chuanlin, Zhang Fenghua, Yang Lin, et al. Changing Jet Structure to Improve Performance of Jetting Vacuum Pump for Vacuum Filter System[J]. Journal of Chongqing University. 2004, 27(5): 12-15.
- [2] 向清江,袁寿其,何培杰,等.液气射流泵内部流场的数值计算[J].江苏大学学报:自然科学版,2008,29(3): 231-235. Xiang Qingjiang, Yuan Shouqi, He Peijie, et al. Numerical Simulation of Liquid Jet Gas Pump[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(3): 231-235.
- [3] 刘晖霞,廖振方,刘 宁.环形射流泵空化特性的试验研究[J].石油机械,2007,35(7): 1-3. Liu Huixia, Liao Zhenfang, Liu Ning. Experimental Study of Cavitation Performance of Annular Jet Pump[J]. China Petroleum Machinery, 2007, 35(7): 1-3.
- [4] 陆宏圻.喷射技术理论及应用[M].武汉:武汉大学出版社,2004. Lu Hongqi. The Theory and Application of Injecting Technology [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004.
- [5] 龙新平,程 茜,韩 宁,等.射流泵最佳喉嘴距的数值模拟[J].核动力工程,2008,29(1): 35-38. Long Xinping, Cheng Qian, Han Ning, et al. Numerical Simulation of Optimal Nozzle-to-Throat Clearance of Jet Pump [J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(1): 35-38.

(责任编辑:罗立宇)