

迷宫螺旋泵气液两相流场的数值模拟及试验

张有忱, 杨春玲, 黎镜中

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 基于混合物多相流模型、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和SIMPLEC算法,应用CFD软件Fluent对迷宫螺旋泵内气液两相流场进行数值模拟并通过试验进行验证。通过分析流道内不同截面上的压力、速度以及含气率分布,研究泵内气液两相流场的流动情况。模拟结果表明,压力分布从进口到出口沿螺旋槽逐渐升高,增压效果明显,速度分布在环形腔的外侧比在内侧稍大,螺旋部分含气率分布比较均匀,进出口处出现含气率分布不均匀现象,局部含气率较高,在此要防止气堵现象的发生。试验结果表明所采用的计算模型基本符合泵内部流动的实际情况,这说明模拟结果一定程度上揭示了迷宫螺旋泵内部气液两相流场的流动规律,可为迷宫螺旋泵气液两相流研究提供理论依据,试验结果同时表明迷宫螺旋泵进行气液混输时具有良好的曝气效果,可作为传统曝气设备的替代产品。

关键词: 迷宫螺旋泵; 气液两相流; 数值模拟; 含气率; 曝气

中图分类号: S277.9; TH315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2010)06-0492-05

Numerical simulation and experiment of gas-liquid two-phase flow field in labyrinth screw pump

Zhang Youchen, Yang Chunling, Li Jingzhong

(College of Mechanical Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The flow field of gas-liquid two-phase in a labyrinth screw pump was simulated by CFD software Fluent based on the mixture model of multi-phase, RNG $k-\varepsilon$ turbulent model and SIMPLEC algorithm. The experiment was carried out to examine the simulation results. The two-phase flow field in the pump was studied by analyzing pressure, velocity and gas void distributions. The simulation results showed that the pressure in screw groove grew continuously, velocity of outside regions was bigger than that of inside, the gas void distribution in screw groove was uniformly. But higher gas void regions appeared at inlet and outlet area and blocking phenomenon easily occurred. The experimental results prove the validity of the numerical calculation model. To some extent, the simulation results can reveal the evolution of the two-phase flow, and provide references for researching the principle of the two-phase flow field in pumps. The experimental results also prove that the pump has a good aeration effect. So the labyrinth screw pump can be used to replace traditional aerators.

Key words: labyrinth screw pump; gas-liquid two-phase flow; numerical simulation; gas void; aeration

收稿日期: 2010-05-13

基金项目: 中国石油化工集团公司技术开发项目(309040)

作者简介: 张有忱(1957—),男,山东平度人,教授(zhangyc@mail.buct.edu.cn),主要从事流体机械设计理论和流场分析研究。
杨春玲(1986—),女,山东聊城人,硕士研究生(yangchunlingbuct@163.com),主要从事流场分析及数值模拟研究。

迷宫螺旋泵的研发始于20世纪60年代的前苏联,80年代引入我国,是一种高扬程、小流量、低比转速的新型泵,广泛应用于石油化工、机械、农业、食品、卫生等领域。目前,许多学者对迷宫螺旋泵的研究主要集中在单相液体,其应用也仅限于单相液体输运^[1-2]。由于迷宫螺旋泵又具有磨损小、寿命长的特点,因此也适用于含有气体、固体颗粒等介质的输运,即迷宫螺旋泵可进行气液混输或固液混输。

以前学者对迷宫螺旋泵气液混输性能的研究较少,笔者采用CFD软件Fluent对迷宫螺旋泵内部气液两相流场进行数值模拟,分析流道内不同截面上的压力分布、速度分布以及含气率分布,并进行试验验证,为迷宫螺旋泵气液混输性能的改进和应用提供一定的理论参考。

1 迷宫螺旋泵的结构

常见迷宫螺旋泵的结构形式包括单吸立式迷宫泵和双吸卧式迷宫泵,两者基本结构类似,泵体主要由转子、定子(套筒)、进口、出口、连接法兰、密封组件、轴承等组成,区别是双吸卧式泵流量大,周向力平衡好。迷宫螺旋体(转子和定子)是迷宫螺旋泵的主要过流部件^[3],表面上有形状相同但旋向相反的螺旋槽。迷宫螺旋体作为输送介质的做功部件,起着有效增能升压作用,其主要参数包括螺旋升角、螺旋槽深、转子和定子之间的间隙、螺旋槽宽与螺旋棱宽等。螺旋形状有矩形、梯形、三角形和半圆形等基本型线,其中三角形迷宫螺旋槽所获得的扬程最高,半圆形螺旋的效率最高。

文中所研究的迷宫螺旋泵属于双吸卧式泵,其结构如图1所示。迷宫螺旋体采用三角形迷宫螺旋槽,其几何参数值分别为螺旋槽深3.00 mm,转子和定子之间的间隙0.125 mm,螺旋槽宽3.20 mm,螺旋棱宽0.60 mm。迷宫螺旋泵的螺旋段长度200 mm,导程140 mm,转子内径170 mm,定子和转子螺旋头数36。

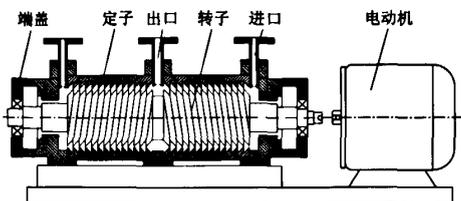


图1 迷宫螺旋泵结构示意图

Fig.1 Structure diagram of labyrinth screw pump

2 数值模拟

2.1 模型的建立

目前Fluent软件有两种多相流数值计算方法,分别为欧拉-拉格朗日方法和欧拉-欧拉方法,其中欧拉-欧拉多相流模型有3种,即VOF模型、混合物模型和欧拉模型。混合物模型的应用范围包括低负载的粒子负载流、气泡流、沉降以及旋风分离器,迷宫螺旋泵进行气液混输属于气泡流,在进行数值计算时可采用混合物模型^[4-5]。由于流体处于强烈的湍流状态,而RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型通过修正湍动粘度,考虑了平均流动中的旋转及旋流情况,故可采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对迷宫螺旋泵内气液两相流场进行数值模拟。

2.1.1 混合物模型基本方程

连续方程

$$\nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}) = \dot{m}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{v} = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m}$, 为质量平均速度, α_k 为第 k 相的体积分数; $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$, 为混合密度; \dot{m} 描述了由于气穴或用户定义的质量源的质量传递。

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v} \mathbf{v}) = \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] - \nabla p + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n a_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k} \right), \quad (2)$$

式中 $n=2$, 为相数; \mathbf{F} 为体积力; $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$, 为混合粘性系数; ρ_k 为第 k 相的密度; $\mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}$, 为第 k 相的漂移速度。

第2相(p)的体积分数方程

$$\nabla \cdot (a_p \rho_p \mathbf{v}) = -\nabla \cdot (a_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}), \quad (3)$$

式中 a_p 为第2相(p)的体积分数; ρ_p 为第2相(p)的密度; $\mathbf{v}_{dr,p}$ 为第2相(p)的漂移速度, $\mathbf{v}_{dr,p} = \mathbf{v}_{qp} - \sum_{k=1}^n \frac{a_k \rho_k}{\rho_m} \mathbf{v}_{qk}$, 其中 $\mathbf{v}_{qp} = \tau_{qp} \mathbf{a}$ 是第2相(p)的速度相对于主相(q)的速度, $\tau_{qp} = \frac{(\rho_m - \rho_p) d_p^2}{18 \mu_q f}$ 是粒子的弛豫时间, f 是拖曳系数。

2.1.2 湍流模型基本方程

文中采用 RNG $k - \epsilon$ 湍流模型^[6-7], 其中湍动能 k 方程为

$$\nabla \cdot (\rho_m \nu k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_{k,m} + \rho_m \epsilon, \quad (4)$$

湍动耗散率 ϵ 方程为

$$\nabla \cdot (\rho_m \nu \epsilon) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon}^* G_{k,m} - C_{2\epsilon} \rho_m \epsilon), \quad (5)$$

式中 $\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, 为湍动粘度系数; $G_{k,m}$ 为湍动能

的产生项; $C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} - \left(\frac{1 - \eta}{\eta_0} \right)$; $C_{1\epsilon} = 1.42$; $C_{2\epsilon} =$

1.68; $C_\mu = 0.0845$; $\eta_0 = 4.38$; $\beta = 0.012$.

2.2 数值计算方法

利用模型的对称性, 可只对流道的一半区域进行建模, 几何建模在 Fluent 的前处理软件 Gambit 中进行, 采用 TGrid 方法对流道进行三维网格划分, 各截面位置及计算网格如图 2 所示, 其中网格总数为 2 409 522.

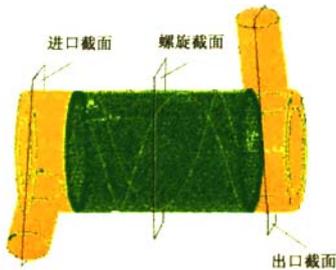


图2 各截面位置及计算网格

Fig.2 Placement of each section and computational grid

CFD 软件中控制方程的离散方式有 3 种, 分别为有限差分法、有限单元法和有限体积法, 文中采用有限体积法, 离散方程的数值求解采用 SIMPLEC 算法^[8-9], 动静边界的耦合采用多参考坐标系模型^[10-11]. 不考虑温度变化和重力影响, 介质主相为水 ($\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$), 第 2 相为空气 ($\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$). 计算域的进口采用质量入流边界条件, 流动方向垂直于进口边界; 出口采用出流边界条件, 流动完全发展; 动静区域连接面采用内边界条件; 壁面处采用

无滑移边界条件, 在近壁区采用标准壁面函数.

2.3 计算结果及分析

迷宫螺旋泵进行气液混输, 气体和液体的体积流量可通过进口处阀门进行控制. 进口气体流量为 $2.8 \text{ m}^3/\text{h}$, 含气率为 0.157 时各截面的压力分布、速度分布、含气率分布如图 3-5 所示.

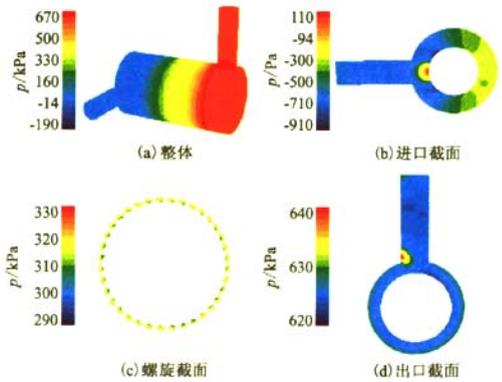


图3 泵内静压分布

Fig.3 Static pressure distribution in pump

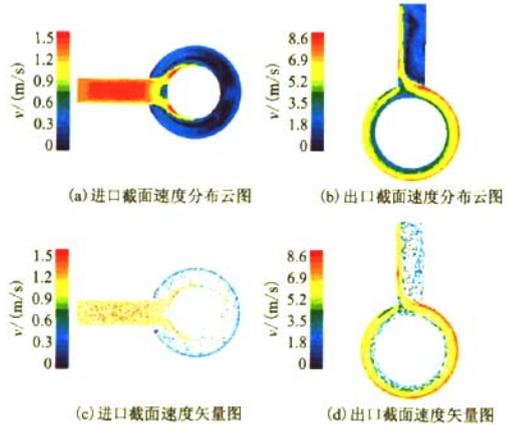


图4 泵内速度分布

Fig.4 Velocity distribution in pump

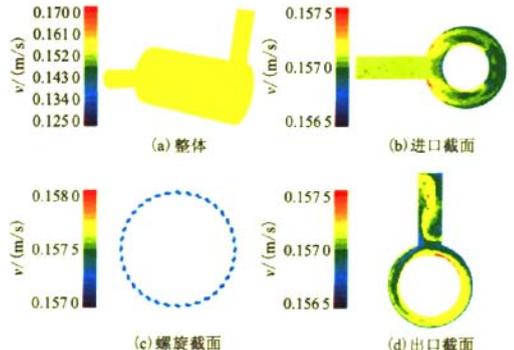


图5 泵内含气率分布图

Fig.5 Gas volume fraction distribution in pump

2.3.1 压力分布

图3为泵内整体及各截面静压分布.由图3a可以看出进口到出口沿螺旋槽逐渐升高,说明螺旋槽是迷宫螺旋泵的主要升压部件,具有获能增压的作用;迷宫螺旋泵从进口到出口,压力逐渐平缓增加,无明显突变,这样的压力分布不易造成两相分离,对两相输送是十分有利的.由图3b可以看出在迷宫螺旋泵的进口处出现负压,这是由于迷宫螺旋泵吸入液体过程属于自吸过程;同时局部出现压力增大现象,这是由于液体撞击旋转轴导致速度降低,压力升高.由图3c可以看出在迷宫螺旋泵的螺旋槽部分,压力分布整体相差不大,但定子压力稍高于转子压力.由图3d可以看出流道外侧比内侧压力稍高,在出口管内压力也有所降低,该现象也出现在图3b进口管两侧.

2.3.2 速度分布

图4为泵内进口截面和出口截面速度分布情况.由图4a,c可知,在进口管速度稍高,进入环形腔以后速度有所降低,这是由于环形腔体积增大,根据伯努利方程,速度降低压力应有所升高,从图3b进口截面压力云图也可看出环形腔整体压力比进口管压力稍高.在图4b,d出口管一侧速度有所降低,出现回流现象,气体易聚集滞留形成气团,易发生气堵现象.从总体上看,环形腔的外侧比内侧速度稍大.

2.3.3 含气率分布

图5为泵内含气率分布.由图5a可以看出整体含气率分布相差不大.由图5b可以看出在进口管两侧局部出现含气率较高的现象,这是由于该处易形成漩涡,有气团产生,导致局部含气率较高,同时引起该区域压力稍微降低(见图3b).由图5d可以看出在出口管处也出现局部含气率较高的区域,这是由于出口管处出现回流现象(见图4d),气体易聚集滞留而形成气团,同时引起出口管处压力稍降(见图3d).在分析压力分布时压力在外侧稍高于内侧,这是由于离心力的作用使得密度较大的液相被甩向外侧,在外侧液体含量高,含气率小,压力较大;在内侧液体含量低,含气率高,压力小.在图5c,d中也可明显看出含气率在流道内侧稍高于外侧.从总体上看,流道外侧与内侧相比含气率稍低,压力稍高;流体进出口处气体易聚集滞留形成气团,易发生气堵现象.

3 试验

3.1 试验系统

在北京高碑店污水处理厂曝气实验室,对迷宫

螺旋泵进行曝气性能试验,并对该泵的曝气性能进行测试.为了测试曝气设备的充氧性能,采用溶氧仪测量该曝气设备排出水池内的含氧量,试验原理如图6所示.

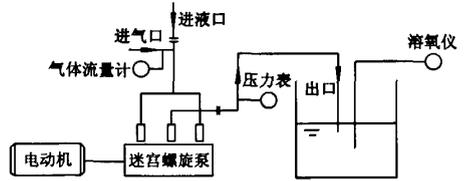


图6 迷宫螺旋泵曝气试验原理
Fig. 6 Experimental principle of labyrinth screw pump aeration

输送介质为水和空气,电机转速为2 950 r/min.试验主要设备包括三相异步电动机、电容式压力变送传感器,气体转子流量计LZB-25、德国WTW Oxi 330i溶氧仪等.

3.2 试验结果

在进口气体流量为 $2.8 \text{ m}^3/\text{h}$,含气率为0.157时,测得迷宫螺旋泵的扬程为60.0 m,由溶氧仪检测水池内水中含氧量,绘制水中含氧量随时间的变化曲线如图7所示.可以看出,应用该迷宫螺旋泵进行气液混输可以明显增加水中的含氧量,从而达到曝气增氧的目的.

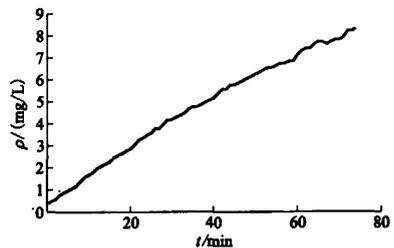


图7 水中含氧量随时间的变化曲线
Fig. 7 Change curve of oxygen content in water with time

试验结果还表明,虽然数值计算扬程为62.5 m,与试验测得扬程相比较,但相差不大,本模拟结果对迷宫螺旋泵的研究具有一定的参考价值;迷宫螺旋泵用于气液混输,可显著增加水中含氧量,可作为曝气设备应用于水污染、水处理等领域的曝气增氧环节.所谓曝气增氧,就是向水中通入气体增大水中含氧量,有效地去除水中致黑致臭物质,改善水质.同时,迷宫螺旋泵与传统曝气设备相比,无需空压机和气体溶气罐,因此可作为传统曝气设备的替代产品.

4 结 论

(1) 迷宫螺旋泵从进口到出口沿螺旋槽压力逐渐升高,说明该泵具有增压获能的作用.同时迷宫螺旋泵环形腔的外侧比内侧速度稍大,含气率稍低,压力稍高.

(2) 迷宫螺旋泵整体含气率分布较均匀,但在进出口处出现含气率稍高的区域,此处易发生气堵现象,因此改进迷宫螺旋泵进出口处的水力设计是提高迷宫螺旋泵气液混输性能的重要途径之一.

(3) 迷宫螺旋泵用于气液混输,其进气量大,溶气率高,出口气泡均匀、气泡小,可增大气体和液体的接触面积,增大水中含氧量,可作为曝气设备应用于水污染、水处理的曝气增氧环节.

参考文献 (References)

- [1] 田国文,张有忱,黎镜中. 迷宫螺旋泵内部流动的CFD模拟[J]. 北京化工大学学报, 2007, 34(2): 218-220.
Tian Guowen, Zhang Youchen, Li Jingzhong. Computational fluid dynamics (CFD) simulation of the internal flow in a labyrinth screw pump [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2007, 34(2): 218-220. (in Chinese)
- [2] 王春林,张浩,彭娜,等. 三角形迷宫螺旋泵内部流场数值计算及试验[J]. 排灌机械, 2009, 27(2): 73-77.
Wang Chunlin, Zhang Hao, Peng Na, et al. Numerical calculation and experimental study for interior flow field in triangular labyrinth screw pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(2): 73-77. (in Chinese)
- [3] 韩国军,赵振文. 迷宫螺旋泵和密封工作特性研究[J]. 石油化工设备, 2006, 35(3): 4-6.
Han Guojun, Zhao Zhenwen. Study and testing of the working characteristics of labyrinth pump and seal [J]. *Petro-chemical Equipment*, 2006, 35(3): 4-6. (in Chinese)
- [4] Khopkar A R, Tanguy P A. CFD simulation of gas-liquid flows in stirred vessel equipped with dual rushton turbines: influence of parallel, merging and diverging flow configurations [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(14): 3810-3820.
- [5] 刘建瑞,苏起钦. 自吸泵气液两相流数值模拟分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 73-76.
Liu Jianrui, Su Qiqin. Numerical simulation on gas-liquid two-phase flow in self-priming pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(9): 73-76. (in Chinese)
- [6] 王春林,吴志旺,司艳雷,等. 旋流自吸泵气液两相流数值模拟[J]. 排灌机械, 2009, 27(3): 163-167.
Wang Chunlin, Wu Zhiwang, Si Yanlei, et al. Gas-liquid two-phase flow numerical simulation of a vortex flow self-priming pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(3): 163-167. (in Chinese)
- [7] Zhang Mingliang, Shen Yongming. Three-dimensional of meandering river based on 3D RNG $k-\epsilon$ turbulence model [J]. *Journal of Hydrodynamic*, 2008, 20(4): 448-455.
- [8] 何有世,袁寿其,郭晓梅,等. 分流叶片离心泵叶轮内变工况三维数值分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2005, 26(3): 193-197.
He Youshi, Yuan Shouqi, Guo Xiaomei, et al. Numerical simulation for inner flow of impeller with splitting vanes of centrifugal pump under different operating condition [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2005, 26(3): 193-197. (in Chinese)
- [9] 余志毅,曹树良,王国玉. 叶片式混输泵内气液两相流的数值计算[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 46-48.
Yu Zhiyi, Cao Shuliang, Wang Guoyu. CFD analysis of the air-water bubbly flow in a multiphase rotodynamic pump impeller [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(1): 46-48. (in Chinese)
- [10] Ranganathan P, Sivaraman S, Gerald D S. CFD modeling of gas-liquid-solid mechanically agitated contactor [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, 86(12): 1331-1344.
- [11] Jahoda M, Tomášková L, Moštěk M. CFD prediction of liquid homogenisation in a gas-liquid stirred tank [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2009, 87(4): 460-467.

(责任编辑 陈建华)