

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.005

固液两相离心泵内部非定常流动特性研究*

项佳梁, 李 昶*, 唐 华

(浙江理工大学 浙江省流体传输技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为研究固液两相流离心泵内部的非定常流动特性, 基于滑移网格方法, 采用 RNG κ - ε 湍流模型以及 ASMM 代数滑移混合物模型, 对一台高比转速固液两相离心泵内部流场进行非定常流动的数值模拟, 通过分析清水工况数值计算结果、外特性性能实验结果以及固液两相流非定常数值计算结果, 获得了非定常条件下固液两相输送离心泵的瞬时外特性曲线和内部流动及磨损规律。研究表明: 在一个转动周期内, 离心泵的扬程、效率和轴功率均呈现正弦波动特征; 动静干涉效应使得叶轮出口处的速度和静压分布均呈现周期性波动; 模型泵叶轮前后盖板的磨损情况比蜗壳壁面的磨损严重。上述计算结果可为实现高比转速固液两相流离心泵的优化水力设计和减轻磨损提供一定的理论参考。

关键词: 固液两相流; 非定常; 流动特性; 数值计算; 磨损性能

中图分类号: TH311 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)06-0702-05

Study on unsteady flow characteristics of solid-liquid two-phase centrifugal pump

XIANG Jia-liang, LI Yi, TANG Hua

(The Province Key Laboratory of Fluid Transmission Technology, Zhejiang Sci-Tech University,
Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to study the unsteady flow characteristics of solid-liquid two-phase pump, sliding grid technique, the RNG κ - ε turbulence model and Algebraic slip mixture model were used to simulate the unsteady turbulent flow field in a high specific speed solid-liquid two-phase centrifugal pump. The numerical calculation results and external characteristics results of single-phase water were compared. And the unsteady flow analysis was carried on for the solid-liquid two-phase mixture transportation. The results indicate that pump head, efficiency and shaft power show a sine wave features in a run cycle. The velocity and static pressure distributions at the outlet of impeller show cyclical fluctuations because of stator interaction effects. The wear of impeller is serious than that of the volute wall. In conclusion, these rules provide high specific speed solid-liquid two-phase centrifugal pump reference to achieve hydraulic design optimization and wear reduce.

Key words: solid-liquid two-phase flow; unsteady; flow characteristics; numerical simulation; wear property

0 引言

固液两相流离心泵广泛地应用于我国工农业各个部门。相对于单相流而言, 两相流动要复杂得多, 其难点基本上集中在粒子对两相湍流结构的影响、粒

子的跟随性问题以及复杂边界条件下的相干结构问题。两相流动的复杂性使得固液两相流泵的设计理论与方法还不成熟, 运行效率低和使用寿命短的缺陷始终存在。提升效率和改善磨损的关键就在于通过开展泵内两相流动机理的研究, 真正掌握泵内固液两相流动规律, 才能为高性能固液泵的优化设计提供指导。

收稿日期: 2014-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076144); 国家科技支撑计划课题资助项目(2013BAF05B01)

作者简介: 项佳梁(1994-), 男, 浙江浦江人, 主要从事流体机械及工程方面的研究。E-mail: 2292029034@qq.com

通信联系人: 李 昶, 女, 副教授, 硕士生导师。E-mail: liyi@zstu.edu.cn

目前国内外已有众多学者采用数值模拟方法对固液两相流离心泵内部的流动特性开展了研究。如文献[1-7]针对固液两相流泵内流特征、外特性进行了定常数值计算与实验研究,文献[8-11]通过定常数值计算研究了固液两相流泵内部磨损的情况,文献[12-14]进行稀疏两相流定常计算,文献[15]通过定常计算探究出口角对固液两相流泵内部流动的影响,文献[16]对固液两相流泵进行耦合计算。由于固液两相流动的复杂性,对其的研究多在定常流动条件下开展,在非定常条件下的研究尚不够充分,本研究拟对一台高比转速离心泵在非定常流动条件下开展内部特性研究,从而更为全面地揭示内部流动特性和过流部件的磨损特性,为后续改型设计提供参考依据。

1 计算模型与方法

1.1 计算模型泵

本研究计算模型是一台高比转速离心泵,其主要参数如表1所示。

表1 离心泵主要参数

流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	转速 $n/(r \cdot min^{-1})$	比转速 n_s	进口直径 D/mm	叶轮外径 D/mm	叶片数 Z
100	2900	196	89	140	6

1.2 控制方程

两相流计算采用代数滑移混合物模型(Algebraic slip mixture model, ASMM)来描述,其一般形式如下述公式所示。

连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_{m,i}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_m —混合物密度, u_m —质量平均速度。

动量方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m u_{m,j}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_{m,i} u_{m,j}) = \\ & -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \times \mu_m \left(\frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{m,j}}{\partial x_i} \right) + \\ & \rho_m g_j + F_j + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k u_{D,k,i} u_{D,k,j} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: p —压力, u_m —混合物有效粘性, g —重力加速度, F —体积力, ϕ —体积分数, $u_{D,k}$ —颗粒相漂移速度。

体积分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_s \rho_s) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\phi_s \rho_s u_{m,i}) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\phi_s \rho_s u_{D,s,i}) \quad (3)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \quad \mu_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \mu_k \quad u_m = \frac{\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k u_k}{\rho_m} \quad (4)$$

颗粒相的漂移速度为:

$$u_{D,k} = u_k - u_m = v_{k,c} - \frac{1}{\rho_m} \sum_{i=1}^{n-1} \phi_i \rho_i v_{i,c} \quad (5)$$

颗粒相的滑移速度为:

$$v_{k,c} = \frac{(\rho_m - \rho_k) d_k^2}{18 \mu_c \mu} \left(g - \frac{D u_m}{D_t} \right) \quad (6)$$

$$\mu = \begin{cases} 1 + 0.05 \text{Re}^{0.687} & \text{Re} < 1\,000 \\ 0.018 \text{Re} & \text{Re} \geq 1\,000 \end{cases} \quad (7)$$

式中: μ —摩擦因数, d_k —颗粒直径, μ_c —连续相粘性, Re —当地雷诺数。本研究计算介质为固液两相流,故 $n=2$ 。

本研究采用考虑旋转和曲率影响的 RNG $k-\epsilon$ 两方程模型封闭时均雷诺方程。速度与压力间的耦合计算采用 SIMPLEC 算法实现。对流项空间离散采用一阶迎风格式,扩散项空间离散采用二阶精度的中心差分格式,源项空间离散采用线性化标准格式。假定固体颗粒为物性不变的均匀球形颗粒。在进行固液两相流的非定常计算时,本研究采用滑移网格方法完成不同计算时刻的流动计算。

1.3 计算域及网格划分

整个流体计算区域由以下4部分组成:转动部分的叶轮区域,静止部分的吸水室、压水室(蜗壳)和蜗壳出口延伸段。

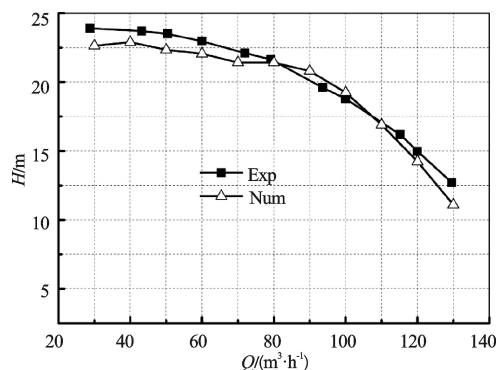
本研究采用 Gambit 软件[17]进行网格划分,其中叶轮和蜗壳区域采用四面体的非结构化网格,吸水室和蜗壳延伸段为结构化的六面体网格。经过网格无关性验证,最后计算域的网格总数为 1.21×10^6 。

1.4 边界条件

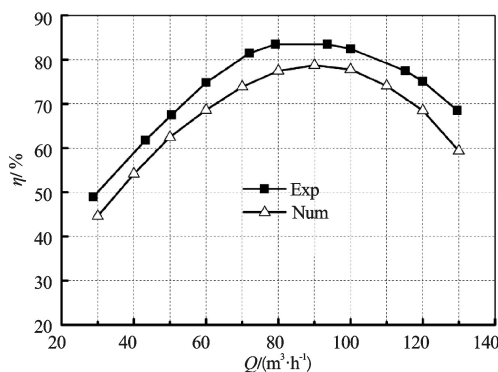
计算域进口处的流体为不可压缩流动,边界条件设为速度入口,可根据流量计算出进口速度。在计算域出口处,假定流体到达出口边界时流动已充分发展,设置为自由出流边界条件。本研究在壁面处采用无滑移边界条件,并在近壁低雷诺数区域应用标准壁面函数来处理高雷诺数湍流模型带来的问题。

2 清水工况下的实验与数值模拟对比

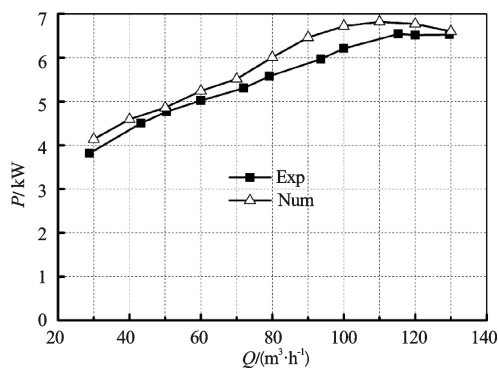
在清水工况下,本研究对模型泵的外特性进行性能实验。将实验结果与计算所得结果进行对比,结果如图1所示。发现水力实验和数值计算预测的结果变化趋势基本一致,对比扬程、效率及轴功率三者最大相对误差率分别是 5.1% ($Q=50 \text{ m}^3/\text{h}$)、7.2% ($Q=80 \text{ m}^3/\text{h}$) 和 8.2% ($Q=100 \text{ m}^3/\text{h}$)。在设计工况点 $Q=100 \text{ m}^3/\text{h}$ 处,水力实验和数值计算的扬程、效率及轴功率三者相对误差率分别是 2.1%、5.7% 和 8.2%。两者相对误差率均在允许误差范围内。



(a) 扬程—流量



(b) 效率—流量



(c) 功率—流量

图1 清水工况下外特性对比

3 非定常计算结果及分析

本研究所计算固液两相流中的固相颗粒属性如下:颗粒直径为0.10 mm;密度为1 500 kg·m⁻³;固相体积分数为10%。

3.1 瞬时外特性曲线

叶轮转过720°,即两个周期内泵的扬程、效率和功率变化曲线如图2所示。

由图2可知,离心泵转动一个周期,其扬程、效率和轴功率均呈现周期性波动变化。叶轮分别转过270°和90°时,扬程达到最大值16.6 m和最小值15.9 m;效率的最大值和最小值分别为59.09%和56.04%,扬程和效率的变化一致。而在叶轮转过90°和

180°的时刻,功率的最大值和最小值分别为7.713 kW和7.621 kW。转速 $n=2\ 900\text{ r/min}$,叶片数 $Z=6$, $T=0.020\ 7\text{ s}\cdot\text{r}^{-1}$,本研究设置叶轮每转过15°为一个时间步长,即 $\Delta t=8.621\times 10^{-4}\text{ s}$,则一个周期共分成4个时刻,分别记为0 T 、1/4 T 、1/2 T 和3/4 T 时刻。

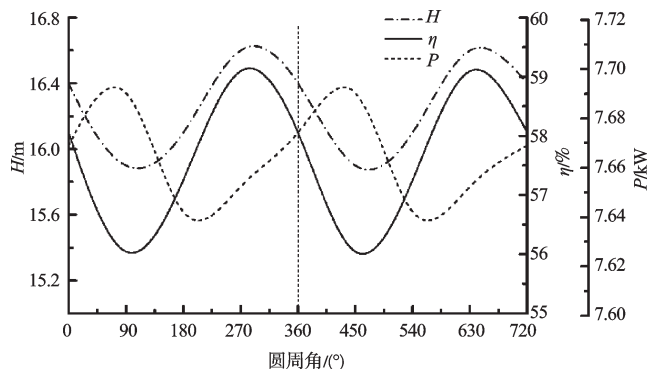


图2 瞬时外特性曲线

3.2 静压分布

蜗壳8个断面分布二维图如图3所示。转动周期内的4个不同时刻,叶轮与蜗壳交界面沿圆周方向叶轮出口处的静压分布情况如图4所示,圆周角 $\theta=0^\circ$ 表示蜗壳第VII断面所在位置,并且沿逆时针方向变化。

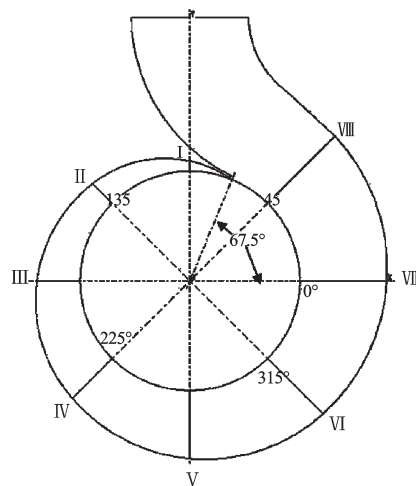


图3 蜗壳断面分布

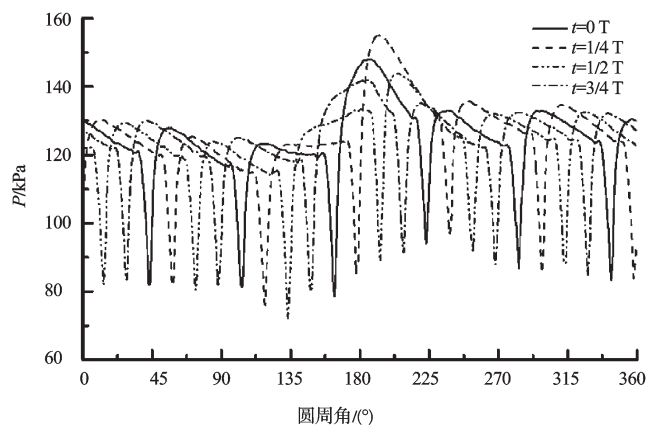


图4 不同时刻叶轮出口处静压分布

由图4看出,不同时刻,叶轮出口处静压分布均呈现周期性变化规律,并且在圆周角 $\theta=180^\circ$ 附近叶轮出口静压出现最大值。其中 $t=1/4 T$ 时刻, $\theta=193^\circ$ 时, $P_{\max}=155.062 \text{ kPa}$, $\theta=118^\circ$ 时, $P_{\min}=75.874 \text{ kPa}$ 。

不同时刻中截面的静压分布如图5所示。在设计工况点,同一周期内的4个不同时刻,叶轮6个叶槽内的静压分布变化趋势基本一致,从叶轮进口到出口(径向)静压值逐渐增大,叶片压力面静压值大于吸力面静压值。叶轮进口处压力最低,最低值为 $-2.0 \times 10^4 \text{ Pa}$,在叶片吸力面离进口边不远处出现负压区,此处易发生汽蚀。在靠近蜗壳隔舌附近的叶槽流道内,由于隔舌的阻碍作用,静压值分布与其他流道内的分布情况有所不同,出现局部压力最高点,蜗壳隔舌处的压力梯度较大。从叶轮进口到蜗壳出口静压值逐渐增大,最大静压值为 $1.6 \times 10^5 \text{ Pa}$,出现在隔舌位置处。在蜗壳出口处,出现静压变小的现象,通过速度矢量图发现此处有回流产生。

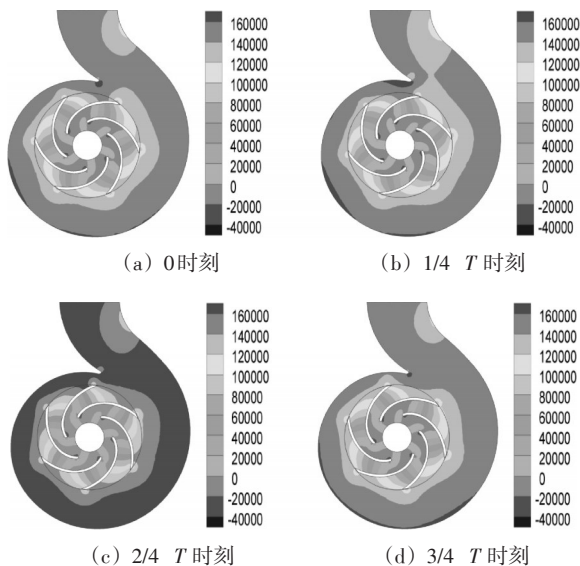


图5 不同时刻中截面静压云图(单位:Pa)

3.3 速度分布

不同时刻离心泵中截面的速度分布如图6所示。可以看出,速度从叶轮进口到出口(径向)呈增大趋势,进口速度相对较小,最小值为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;出口速度增大,叶片出口处速度最小值为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大速度值为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。叶片工作面速度比背面速度大,不同时刻,叶轮出口附近速度基本保持一致。流体在蜗壳中流速变化不大,在蜗壳出口处,速度逐渐降低,速度值由 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 变成 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

水平截面上的固相颗粒流动迹线如图7所示。由图7可知,在不同时刻,叶轮和蜗壳内部的固相流动规律相似,设计工况下蜗壳内部均有明显涡流现象。蜗

壳内部相对速度出现负值,其中 $t=0$ 时刻,最小相对速度为 $-5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,出口处最大速度达到 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据速度云图可知,蜗壳内的速度梯度大,蜗壳内靠近前壁面一侧的固相颗粒体积分数较大,故蜗壳前壁面比后壁面磨损更严重。

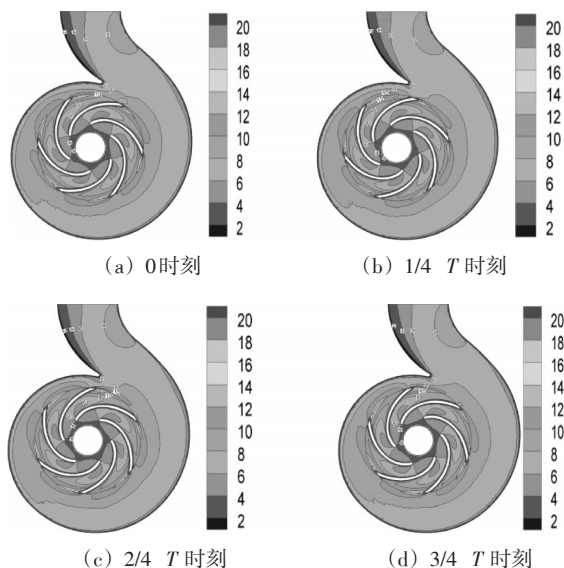


图6 不同时刻中截面速度云图(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

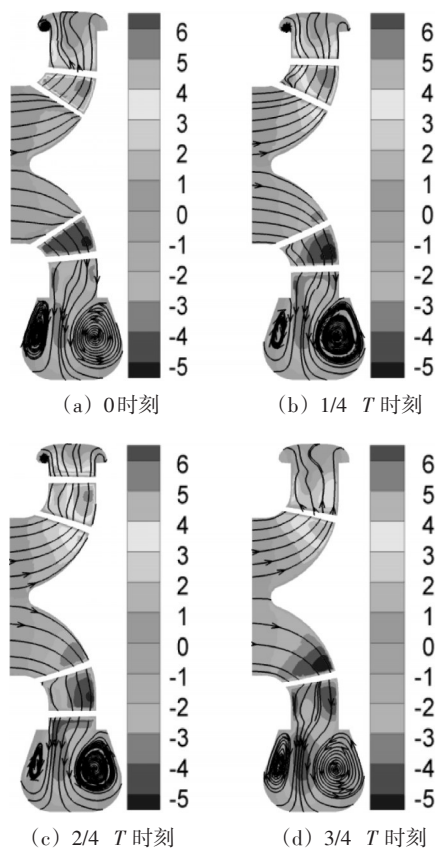


图7 水平截面流体流动迹线

3.4 固相体积浓度分布

3/4 T时刻叶轮和蜗壳壁面的固相体积浓度分布情况如图8所示。

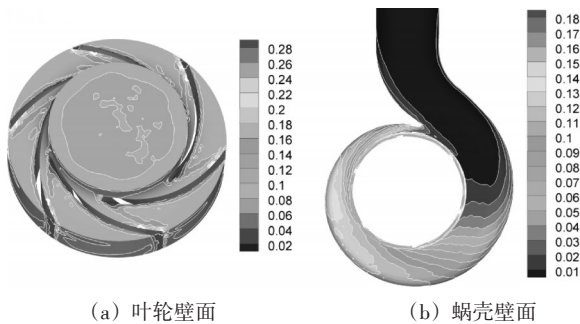


图8 固相体积浓度分布

由图8(a)可知,叶轮进口处固相体积浓度最大,进口中心处的浓度最大值为10%。随流体逐渐进入叶轮流道,固相体积浓度逐渐变小。颗粒主要集中在叶轮前盖板和后盖板处,在其他区域,固体体积浓度很小,这使得前盖板和后盖板侧的磨损破坏严重。由图8(b)可知,蜗壳进口前壁面处固相体积浓度较大,前壁面浓度最大值14%。而其他区域固体颗粒则很少,因此得出前壁面处磨损相比于其他区域更严重的结论。蜗壳出口固相浓度值变小,最小值为1%,结合固相速度信息,可知此处磨损较为轻微,这也与实际工程中的结果相吻合。而比较图8(a)、8(b)可知,叶轮壁面的固相体积浓度明显大于蜗壳壁面,叶轮前、后盖板的磨损情况比蜗壳壁面严重。

4 结束语

本研究对一台高比转速固液两相流离心泵内的非定常流动进行了数值计算分析,主要结论如下:

(1) 模型泵叶轮前后盖板的磨损情况比蜗壳壁面磨损严重,与工程中的磨损严重部位相同。

(2) 在一个转动周期内,泵的扬程、效率和轴功率均呈现正弦波动变化趋势。

(3) 叶轮出口处的速度和静压分布均呈现周期性变化规律,在圆周角 $\theta=180^\circ$ 附近叶轮出口压力达到最大值;速度和静压从叶轮进口到出口(径向)呈增大趋势,叶轮进口靠近吸力面附近和蜗壳隔舌位置梯度较大,能量损失较大。

参考文献(References):

[1] ZHANG Yu-liang, LI Yi, CUI Bao-ling. Numerical Simulation and Analysis of Solid-liquid Two-phase Flow in Centrifugal Pump[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 26(1): 53-60.

[2] 张 静, 吴 波, 覃正超. 离心泵内固液两相流动的三维数值模拟[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2009, 35(2): 189-192.

[3] 杨敏官, 顾海飞, 刘 栋, 等. 离心泵叶轮内部湍流流动的数值计算及试验[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(12): 180-185.

[4] SHI De-pan, LUO Zheng-hong, ZHENG Zu-we. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow in a tubular polymerization reactor[J]. *Power Technology*, 2010, 198(n1): 135-143.

[5] 陈次昌, 杨昌明, 熊茂涛. 低比转速离心泵叶轮内固液两相流的数值分析[J]. *排灌机械*, 2006, 24(6): 1-3.

[6] 郑 军, 杨昌明, 朱 利, 等. 离心泵叶轮流固耦合分析[J]. *流体机械*, 2013, 41(2): 25-29.

[7] 沈宗沼, 杨定军, 刘爱圆. 液固两相流泵叶轮内流场数值分析与试验研究[J]. *煤矿机械*, 2010, 31(1): 56-58.

[8] Mehta M, Kadambi J R, Sastry S. Particle velocities in the rotating impeller of a slurry pump[C]//Proceedings of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference. Cleveland: SYMPOSIA, 2007: 369-378.

[9] XING Dong. Finite element analysis of wear for centrifugal slurry pump[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009(1): 1532-1538.

[10] LIU Jian-hua. Numeration simulation of solid-liquid two-phase flow in centrifugal sewerage pump[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010(44): 345-348.

[11] TAHSIN E, MESUT G. Performance characteristics of a centrifugal pump impeller with running tip clearance pumping solid-liquid mixtures[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001(123): 533-538.

[12] HAZRA S B, STEINER K. Computation of dilute two-phase flow in a pump[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2007, 203(2): 444-460.

[13] GRUSELLE F, STEIMES J, HENDRICK P. Study of a two-phase flow pump and separator system[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air GT2010 June 14-18, Glasgow, UK: 1-10.

[14] CARIDAD J, ASUAJE M, KENYERY F. Characterization of a centrifugal pump impeller under two-phase flow conditions[J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2008, 63(4): 18-22.

[15] 刘 栋, 杨敏官, 董 祥. 出口角对离心泵内固液两相流动的影响[J]. *排灌机械*, 2009, 27(1): 1-7.

[16] 袁寿其, 李 晔, 何朝辉. 无堵塞离心泵内部三维固液两相湍流场数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(7): 18-22.

[17] 林 玲, 牟介刚, 郑水华, 等. 平衡鼓间隙对离心泵轴向力平衡的影响[J]. *轻工机械*, 2013, 31(6): 13-15.

[编辑: 罗向阳]

本文引用格式:

项佳梁, 李 晔, 唐 华. 固液两相离心泵内部非定常流动特性研究[J]. *机电工程*, 2014, 31(6): 702-706.

XIANG Jia-liang, LI Yi, TANG Hua. Study on unsteady flow characteristics of solid-liquid two-phase centrifugal pump[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(6): 702-706.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>