

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.01.009

# 基于 CFD 的固液两相离心泵内部流动及磨蚀特性研究

李文锋, 冯建军, 朱国俊, 王秀玲, 罗兴铨

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 基于 Euler-Lagrange 方法, 采用 CFX 软件对抽送黄河水的离心泵内的流动进行了数值计算, 根据计算结果可知在固体颗粒直径相同的情况下, 随着固相体积分数的增加, 离心泵的扬程和水力效率都随着固相体积分数的增加而下降, 叶道间出现明显的涡流, 从而使得泵性能变差。其次采用 Particle 模型和颗粒单向耦合模型, 对离心泵抽送不同直径的泥沙颗粒的混合液进行了数值模拟, 分析探讨了泥沙颗粒的运动规律和泵内部的磨损情况。结果表明: 颗粒的分布与流道的布置方式、颗粒的大小均有重要关系, 泵内部磨损与固体颗粒的相对速度、浓度、颗粒大小也有直接关系, 叶片出水边吸力面靠近后盖板处是磨损最为严重的区域。

**关键词:** 离心泵; 两相流; 单向耦合; 磨损

**中图分类号:** TH311

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2017)01-0046-07

## Investigation in internal flow and abrasion characteristics of solid-liquid two-phase centrifugal pump base on CFD

LI Wenfeng, FENG Jianjun, ZHU Guojun, WANG Xiuling, LUO Xingqi

(School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Firstly, the numerical simulation of internal flow of the centrifugal pump pumping Yellow River water is conducted by CFX on account of the Euler-Lagrange method in this paper, and it is found that the head and efficiency values of the pump present a continuous downward trend with increase of the solid-phase volume fraction with the same particle diameter, there appearing the obvious vortex in the blade channels which worsens the pump performance. Secondly, the particle model and one-way coupling model are adopted to conduct calculation of centrifugal pump as it pumps slurry containing solid particles with the same and different diameters respectively, with the motion law of solid particles and abrasion pattern inside the pump researched. The results show that distribution of particles are related closely to layout of the flow channel and size of particles, and that pump abrasion is affected by the relative velocity, concentration as well as size of the solid particles, with location near the rear cover in suction surface of the outlet edge of the blade being the most seriously abraded area.

**Key words:** centrifugal pump; two-phase flow; one way coupling; abrasion

泵是一种输送各种介质的动力机械, 应用非常广泛, 近 1/4 的电力消耗用于泵的运行。随着工业经济的快速发展, 固液两相离心泵由于其特点多应用于航天航空、农田水利、石油化工等领域, 但这些泵存在两个技术难题, 一方面由于固体颗粒的存在, 离心泵水力效率较低, 另一方面固体颗粒加剧了水轮机内部的磨损。因此, 对于固液两相离心泵的研究和改进迫在眉睫。

经过几十年发展, 固液两相离心泵的理论分析已经趋于成熟, 目前国内外主要采用 CFD 数值分析和实验对其特性进行研究, 取得了一定的成效。汪家琼<sup>[1-3]</sup>对一定浓度、一定直径的泥沙颗粒在离心泵的内部流动进行了分析, 同时还对直径分别为 0.1 mm、0.25 mm、0.5 mm、0.75 mm 的泥沙颗粒在泵内的运动规律及磨损情况进行了研究, 进一步对固体颗粒直径对渣浆泵冲蚀磨损性能的影响做了分析,

收稿日期: 2016-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379174, 51339005, 51679195)

作者简介: 李文锋, 男, 博士生, 主要研究方向为水力机械流动理论与过渡过程。E-mail: lwf19890428@163.com

通讯作者: 冯建军, 男, 教授, 主要研究方向为水力机械流动理论。E-mail: jianjun\_feng@163.com

取得了一定的成果;文献[4]提出了一种KET模型,对泵内两相流动方程进行了封闭并对边界条件做了一定处理,进而进行数值模拟,得到了泵内的一些流动规律;文献[5]采用数值模拟的方法对排沙射流泵内部流场进行了研究,分析了其内部两相的压力场和速度场;谭东华<sup>[6-7]</sup>对双流道泵在清水下和含杂质的污水下进行了实验研究,分析其水力特性,研究表明,双流道泵在输送固体颗粒有较高的效率以及良好的耐磨能力;文献[8-10]通过对固液两相流泵的数值模拟揭示了泵内部流动特性对其磨损性能的影响。

目前采用CFD模拟固液两相流泵的内部流动常用的方法有二种:一是将固体和液体看作是共同存在相互渗透的连续介质的欧拉-欧拉法<sup>[11-12]</sup>;二是将液体相看做是连续介质而将固体相看成是离散相的欧拉-拉格朗日法<sup>[13-14]</sup>。本文以某型号离心泵为研究对象,首先使用CFX对清水泵进行计算并绘制离心泵的性能曲线,然后对含有不同固相体积分数的固液两相流离心泵进行了数值模拟,分析其外特性以及内部流动,最后采用两相流模型对固液两相流离心泵进行了流场计算,并使用Finnie模型统计磨损量。重点研究了不同直径颗粒在泵轮内部的运动规律以及对泵内部流动的影响和磨损情况,为进一步研究磨损性能提供一定的依据。

## 1 计算模型与方法

### 1.1 计算模型与网格划分

本文以某离心泵为研究对象,叶轮进口直径 $D_1=155$  mm,共6个叶片,叶轮出口直径 $D_2=320$  mm,叶轮出口宽度 $b_2=70$  mm。离心泵设计转速 $n=1480$  r/min,设计流量 $Q=200$  m<sup>3</sup>/h,设计扬程 $H=34$  m。

泵的整个计算域包括吸入室、叶轮和蜗壳,计算模型见图1。对各过流部件采用分块网格划分六面体网格,最终经网格无关性验证后计算域总网格数确定为335万,其中吸入室网格数为8万,叶轮网格数为260万、蜗壳网格数为67万,叶轮和蜗壳网格见图2。



图1 计算模型(前盖板已移除)

Fig.1 Calculation model (with shroud removed)

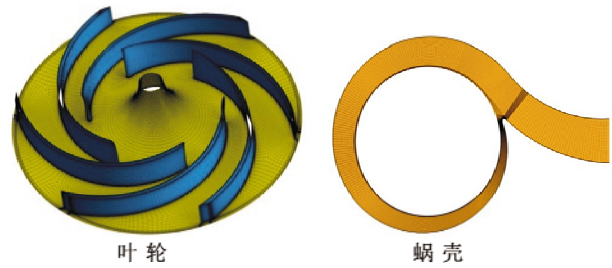


图2 网格划分

Fig.2 Mesh of impeller and volute

### 1.2 边界条件

湍流模型选用 $k-\epsilon$ 模型,进口采用总压进口边界条件,出口采用质量流量边界条件,其中假定进口处颗粒体积分数分布均匀,所有壁面均设置为无滑移壁面边界条件,动域和静域采用“冻结转子”交界面方式。

### 1.3 介质参数定义

本文以黄河水为研究对象,黄河水中的沙粒可分为粗沙( $d>0.05$  mm)、中沙( $0.05>d>0.025$  mm)和细沙( $d<0.025$  mm)。本文以粗沙为研究对象,沙粒密度 $\rho_s$ 为 $2650$  kg/m<sup>3</sup>。液相为常温下的清水,密度 $\rho_w$ 为 $997$  kg/m<sup>3</sup>;则混合后的密度为:

$$\rho = \left(1 - \frac{V_s}{V}\right) \cdot \rho_w + \frac{V_s}{V} \cdot \rho_s \quad (1)$$

其中, $V_s$ 、 $V_w$ 和 $V$ 分别为沙粒体积、水体和混合液体积,单位为m<sup>3</sup>。

## 2 固液两相流泵性能分析

本文首先进行清水泵数值计算,对设计工况( $Q=200$  m<sup>3</sup>/h, $H=34$  m)及其左右两侧各3个工况总计7个工况进行了CFD计算,得到7个工况的泵扬程和效率,性能曲线如图3实线所示。

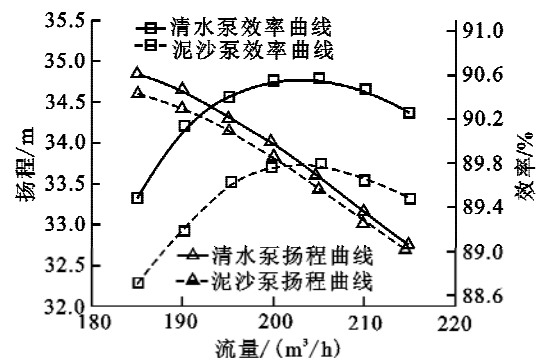


图3 泵性能曲线

Fig.3 Curves of pump performance

文献[15]以黄河含沙水为介质,对黄河水中粒径颗粒为 $0.076$  mm的粗沙在离心泵内的流动进行了数值模拟。因此为了计算方便及可靠,本文针对直径为 $0.076$  mm的颗粒,首先对上述7个工况在

固相体积分数 0.1%进行了 CFD 计算,同样得到两相流泵扬程和效率曲线(如图 3 虚线所示),图 3 显示在相同工况下,固液两相流泵扬程和效率均低于清水泵。

其次对固相体积分数分别为 0、0.1%、1%、5%、10%、20%的固液两相流动进行数值模拟,分析其外特性和内部流动特性。计算得到的两相泵的效率 and 扬程随固相体积分数的变化,数值可见表 1。

表 1 计算结果  
Tab.1 Calculation result

颗粒直径 $d/\text{mm}$	体积分数 $C_v/\%$	扬程 $H/\text{m}$	扬程下降量 $\Delta H/\text{m}$	效率 $\eta/\%$	效率下降量 $\Delta \eta/\%$
0.076	0	34.01	0	90.55	0
0.076	0.1	33.92	0.09	89.78	0.81
0.076	1	33.88	0.13	87.46	3.13
0.076	5	33.80	0.21	85.12	5.47
0.076	10	33.73	0.28	81.01	9.58
0.076	20	31.61	2.40	73.79	16.8

由表 1 可知,在颗粒直径为 0.076 mm 时,随着固体颗粒体积分数的增加,泵扬程和效率逐渐下降。固体颗粒的体积分数从 0 增加到 20%的过程中,扬程下降的差值逐渐从 0.09 m、0.13 m、0.21 m、0.28 m 增加到 2.4 m,计算效率下降值从 0.81%、3.13%、5.47%、9.58%增加到 16.8%,在体积分数为 20%时,效率和扬程显著下降。分析原因:随着浓度的增加,内部流体间的摩擦增加,由此造成的水力损失增加,从而引起扬程和效率的下降。

图 4 为设计工况下,颗粒直径  $d=0.076\text{ mm}$ ,叶轮不同截面颗粒浓度分布图。图 4 显示:叶轮内进口边固相浓度分布从后盖板到前盖板依次减小,说明固体颗粒在进入叶轮时主要聚集在后盖板并向前盖板流动。分析各截面的固相体积分布还可以发现,固体颗粒从压力面向吸力面偏移。

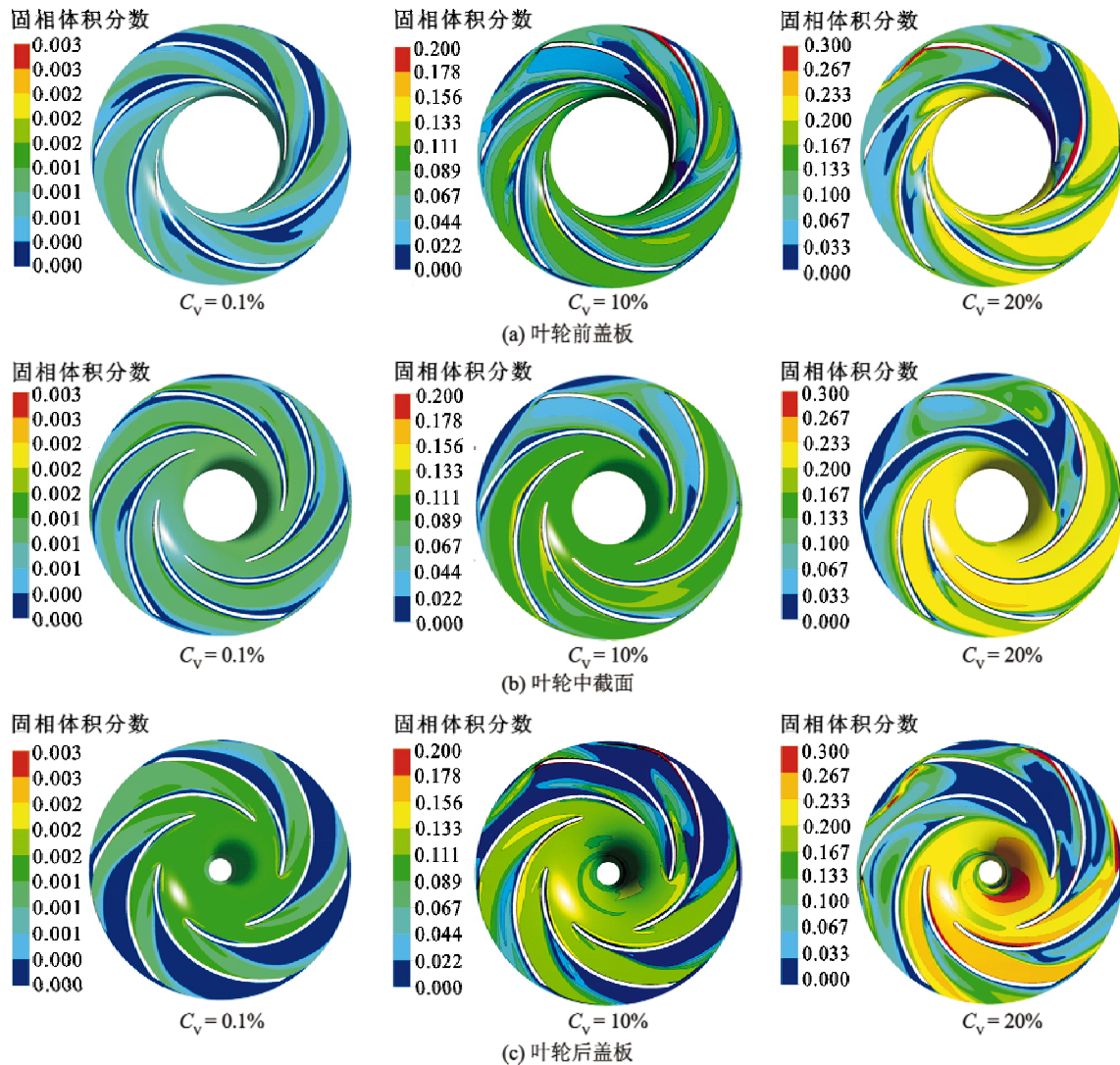


图 4 转轮内固相体积分数分布

Fig.4 Distribution of solid volume fraction in impeller

图 5 为固体体积分数分别为 0.1%、10%、20% 的工况下泵内部流场分布。从图 5 可看出,当初始

固相体积分数为 0.1% 时,内部流线顺畅,没有发生明显的突变;而当初始固相体积分数增加到 10% 时,隔舌对颗粒影响明显。

于此同时,由于惯性力的作用,流态发生了变

化,造成隔舌附近的两个叶片吸力面出现了叶道涡,并且该叶道涡的尺度随着颗粒体积分数的增加而增大,对叶片流道的堵塞作用也更加明显,也进一步加剧了离心泵性能的恶化。

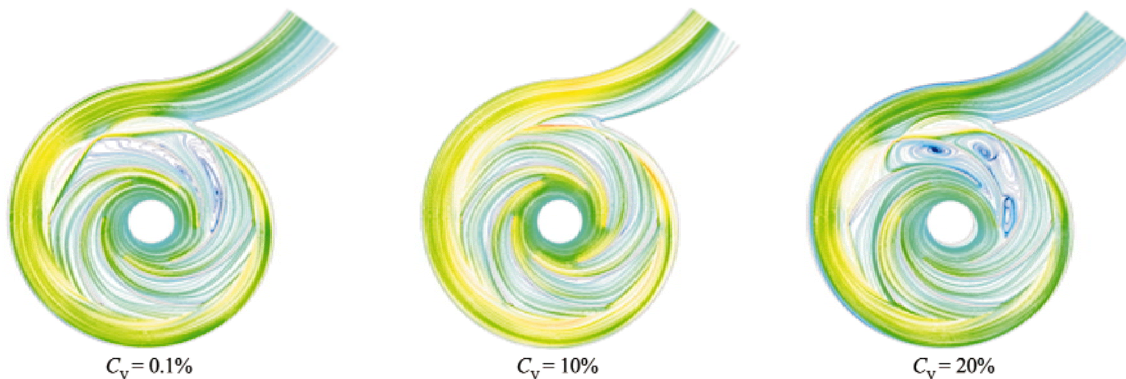


图 5 液相流线图

Fig. 5 Streamlines of liquid phase

### 3 固体颗粒运动与磨损分析

在颗粒的运动过程中,受到多种力的共同作用,如重力、浮力、相间拽力、离心力等,研究固体颗粒在泵内的运动规律对设计两相流泵具有重要的指导意义。本文首先采用单向耦合方法对固定直径的固体颗粒进行单向耦合计算,该方法适用于低浓度的物料颗粒轨道,故在计算中固体颗粒体积分数的控制为 0.001。固体颗粒直径选定为 0.076 mm,密度  $\rho$  为 2 650 kg/m<sup>3</sup>。湍流模型选用  $k-\epsilon$  模型;对于固体颗粒,拽力模型选用 Schiller Naumann,入射方式选择均匀分布,固体颗粒进口采用零滑移速度,指定粒子数量为 20 000 个。

固体颗粒运动轨迹如图 6 所示。

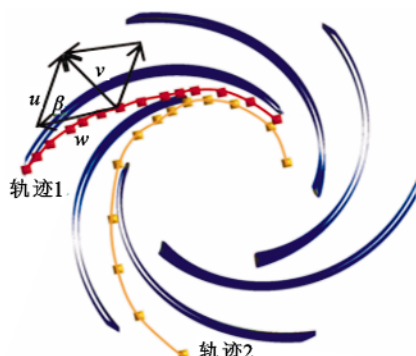


图 6 颗粒粒子轨道

Fig. 6 Particle track

粒子的运动轨迹与粒子进入叶轮的相对位置有很大关联。轨迹 1 显示,靠近叶片头部的固体颗粒进入流道后,在连续液相中受到各种力的共同作用,颗粒发生一定角度的偏转并与下一个叶片的压力面发生碰撞,碰撞后颗粒又沿着一定的运动轨迹与叶

片出口吸力面发生碰撞,故叶片出口吸力面易发生磨蚀;从叶道中部和靠近吸力面侧进入的固体颗粒不容易发生碰撞,或以较小的碰撞角度靠近叶片压力面(如轨迹 2)。

由流体力学相关理论可知,叶轮内任意一点均满足速度三角形,轨迹 1 某一点速度三角形标示于图 6。图 7 为轨迹 1 流线颗粒  $\beta$  角与叶片安放角对比图,图中显示,固体颗粒从叶片头部进入流道后的前一段,其运动的  $\beta$  角小于叶片的安放角,而在后一段要大于叶片的安放角。分析原因:固体颗粒在刚开始的运动过程中偏向于叶片压力面与下一个叶片发生碰撞后其获得了较大的反向圆周分速度,故反弹后其  $\beta$  角度大于叶片的安放角,运动偏向于吸力面。

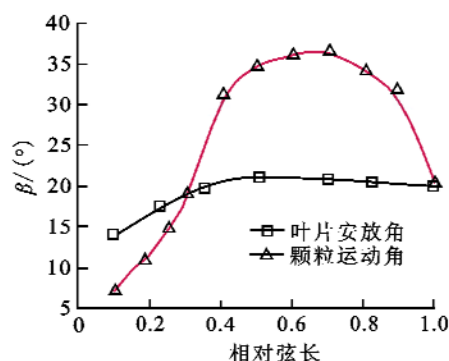


图 7 颗粒运动的  $\beta$  角与叶片安放角对比

Fig. 7 Comparison of particle motion  $\beta$  angle and blade setting angle

上述是针对直径为 0.076 mm 固体颗粒进行了单向耦合计算,分析了其运动规律,在黄河流域中,固体颗粒是随机分布的,颗粒直径大小不一,为了更好地模拟黄河中的沙粒粒径分布,本文采用正态分



布作为计算中的颗粒粒径分布规律。文献[16]提出当固体颗粒直径小于1 mm,颗粒体积效应影响小,计算较为可靠,所以本文颗粒粒径最大设定为1 mm。即在计算中给定最大颗粒直径为1 mm,最小粒径为0.076 mm,平均粒径为0.5 mm,标准差为5 mm,从而进行两相流泵的模拟。

图 8 为采用正态分布粒径开展数值计算后获得的不同粒径颗粒在流道内的运动轨迹。从图 8 可看出,在转轮内粒径较大的固体颗粒更不容易随着水流流场偏转,受惯性的影响较大,更多的分布在叶片吸力面出水边处;粒径较小的固体颗粒受惯性力的影响较小,能够随着水流流场偏转,主要分散在流道中间;在蜗壳内部,大粒径的固体颗粒较多地分布在蜗壳的外围,较小粒径的固体颗粒更多分布在蜗壳沿着 Z 轴的两侧。

图 9 为流道中不同直径固体颗粒分布图。图中显示在进口从吸水室到叶轮叶片入口处有近乎 90° 的转弯固体颗粒更容易往后盖板处聚集;在进入叶

片流道之前固体颗粒分布较为均匀,在进入流道之后,刚进入流道的固体颗粒更容易与叶片的头部相撞,粒径较小的颗粒则可以相对均匀地随着水流进入流道内。在流道中,粒径较大的固体颗粒由于惯性的原因更容易产生离心现象,较大的固体颗粒在绕过叶片头部后难以随着水流流场进行旋转,有靠近叶片吸力面的倾向。

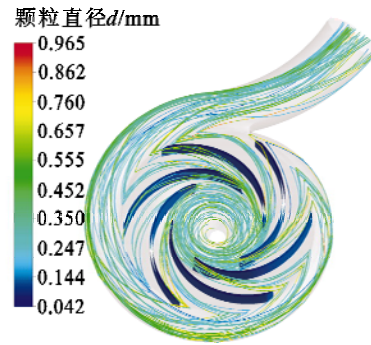


图 8 不同粒子轨道分布  
Fig. 8 Particle track distribution

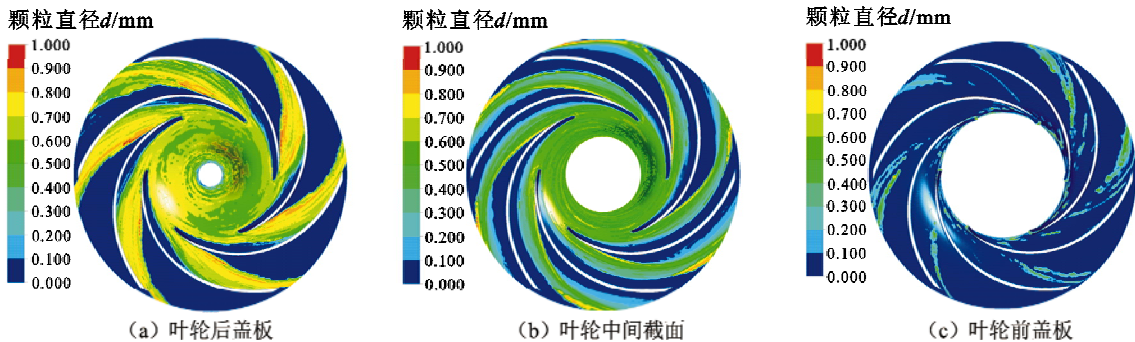


图 9 不同直径固体颗粒分布  
Fig. 9 Distribution of different diameters of solid particles

图 10 为前、后盖板磨损率密度分布图。图中显示前后盖板磨损主要集中在叶轮进口处,这与上述固体颗粒的分布规律是一致的,后盖板的磨损相对

前盖板要严重,前后盖板的总体磨损相对叶片要小很多,因此叶片是发生磨损的主要对象。

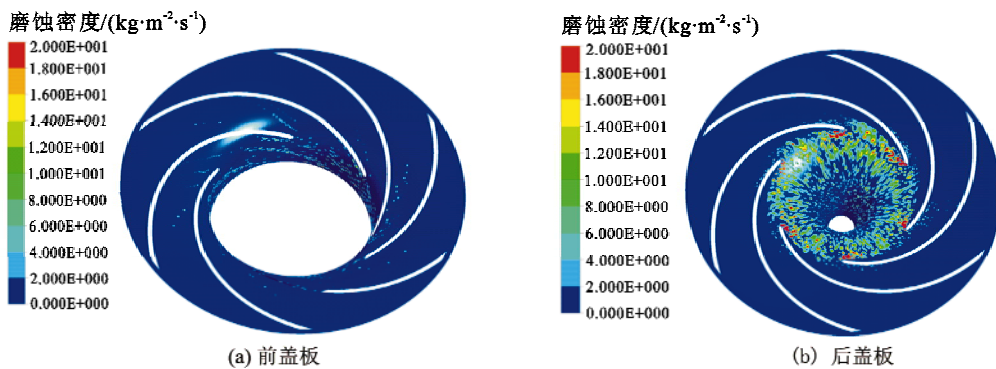


图 10 前、后盖板磨损率密度分布图  
Fig. 10 Density distribution of erosion rates at hub and shroud of the impeller

从图 11 可以看出,靠近下盖板处分布着较多的固体颗粒,在叶片靠近上盖板处粒径较小的颗粒分

布较多,根据叶片头部粒径分布可以看出,粒径较大的固体颗粒对叶片头部压力面形成了较多的有效撞

击。从图12叶片磨损分布图中可以看出,磨损最严重的区域是大粒径的颗粒分布较多的位置,且叶片出水边吸力面靠近后盖板处是磨损最为严重的区域,叶片头部有较多的粒子进行撞击,磨损量较大。图13为蜗壳表面的磨损量分布图,图中显示磨损最严重的区域在蜗壳壁面外围偏中上位置靠近后盖板,此位置与叶片磨损位置相对应。

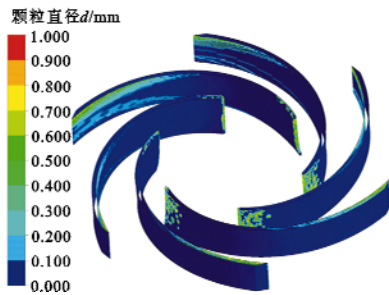


图11 叶片附近固体颗粒粒径分布图  
Fig. 11 Particle size distribution of solid

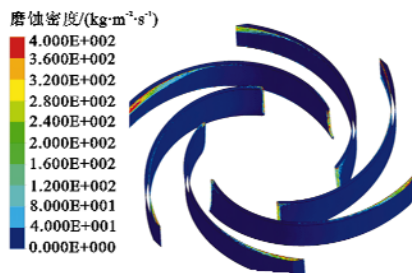


图12 叶片表面磨损分布  
Fig. 12 Erosion distribution on impeller surface

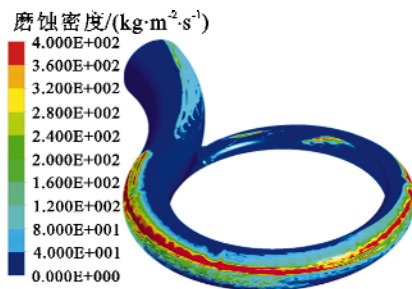


图13 蜗壳表面磨损分布  
Fig. 13 Abrasion distribution on volute surface

## 4 结论

1) 通过对比计算发现,在相同工况下,固液两相离心泵扬程和效率均低于单相清水工况,且固相体积分数越高,扬程和效率下降越明显。当固相体积分数增加到10%以上时,叶道间有漩涡出现,严重影响泵的性能。

2) 对含直径为0.076 mm固体颗粒的两相流泵进行了单向耦合计算,分析固体颗粒在泵内的运动规律,计算表明,固体颗粒的运动轨道受到多种因

素的共同影响,在叶道进口靠近叶片压力面的颗粒更容易与叶片进口压力面发生碰撞,碰撞后的粒子获得较大周向速度,极易与叶片的吸力面发生碰撞并产生磨蚀。

3) 对含有不同直径的固体颗粒(粒径按正态分布)的两相流泵进行了单向耦合计算,结果表明:直径是影响固体颗粒在离心泵内运动的一个重要因素,直径大的粒子更容易和叶片发生碰撞,且在叶片出水边吸力面靠近后盖板处粒子聚集较多,最易发生磨蚀。

## 参考文献:

- [1] 汪家琼,蒋万明,孔繁余,等.基于Particle模型固液两相流离心泵流场数值模拟[J].排灌机械工程学报,2013,31(10):846-850.  
WANG Jiaqiong,JIANG Wanming,KONG Fanyu,et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in centrifugal pump based on Particle model[J]. Journal of Drainage & Irrigation Machinery Engineering,2013,31(10):846-850.
- [2] 汪家琼,蒋万明,孔繁余,等.固液两相流离心泵内部流场数值模拟与磨损特性[J].农业机械学报,2013,44(11):53-60.  
WANG Jiaqiong,JIANG Wanming,KONG Fanyu,et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow and wear characteristics of centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(11):53-60.
- [3] 汪家琼,叶群,闫科委,等.颗粒直径对渣浆泵冲蚀磨损性能的影响[J].排灌机械工程学报,2014,32(10):840-844.  
WANG Jiaqiong, YE Qun, YAN Keiwei, et al. Effects of particle diameter on erosion abrasion performance of slurry pump[J]. Journal of Drainage & Irrigation Machinery Engineering,2014,32(10):840-844.
- [4] 魏进家,姜培正.离心泵叶轮内密相液固两相湍流的数值模拟[J].应用力学学报,2000,17(1):1-6.  
WEI Jinjia,JIANG Peizheng. Numerical simulation of dense liquid-solid two-phase turbulent flow in a centrifugal pump impeller[J]. Journal of Applied Mechanics,2000,17(1):1-6.
- [5] LIU Xu,DENG Hongchao,MA Wenxing. Numerical analysis for solid-liquid two-phase flow field of draining-sand jet pump[C]//International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE,2009:4116-4121.
- [6] 谭东华,朱祖超,崔宝玲.固液两相双流道泵的设计与试验研究[J].流体机械,2006,34(5):1-4.  
TANG Donghua,ZHU Zuchao,CUI Baoling. Design and experimental research on double-channel pump of solid-liq-

- uid two-phase[J]. *Fluid Machinery*, 2006, 34(5): 1-4.
- [7] 谭东华. 水下运行环境的固液两相双流道泵的设计与试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
TANG Donghua. Design and experimental study of two phase liquid solid flow pump in underwater operation environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [8] LI Yi, ZHU Zuchao, HE Zhaohui, et al. Abrasion characteristic analyses of solid-liquid two-phase centrifugal pump[J]. *Journal of Thermal Science*, 2011, 20(3): 283-287.
- [9] 刘建瑞, 徐永刚, 王董梅, 等. 离心泵叶轮固液两相流动及泵外特性数值分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3): 86-90.  
LIU Jianrui, XU Yonggang, WANG Dongmei, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in impeller channel and pump characteristics analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2010, 41(3): 86-90.
- [10] ENGIN T, GUR M. Performance characteristics of a centrifugal pump impeller with running tip clearance pumping solid-liquid mixtures [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123(3): 532-538.
- [11] 赵斌娟, 袁寿其, 刘厚林, 等. 基于 Mixture 多相流模型计算双流道泵全流道内固液两相湍流[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 7-12.  
ZHAO Binjuan, YUAN Shouqi, LIU Houlin, et al. Simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in double-channel pump based on Mixture model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(1): 7-12.
- [12] FENG Xin, LI Xiangyang, CHENG Jingcai, et al. Numerical simulation of liquid-liquid turbulent flow in a stirred tank with an explicit algebraic stress model[J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 82(11): 272-284.
- [13] COLAGROSSI A, LANDRIINI M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics[J]. *Journal of Computational Physics*, 2003, 191(2): 448-475.
- [14] SHI Depan, LUO Zhenghong, ZHENG Zuwei. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow in a tubular loop polymerization reactor[J]. *Powder Technology*, 2010, 198(1): 135-143.
- [15] 杨从新, 董富弟, 程效锐, 等. 含沙水流中粒径对离心泵叶轮磨损特性影响的数值分析[J]. *兰州理工大学学报*, 2014, 40(4): 45-50.  
YANG Congxin, DONG Fudi, CHENG Xiaorui, et al. Numerical analysis of effect of sand particle size of silt-laden water flow on abrasion characteristics of centrifugal pump impeller[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2014, 40(4): 45-50.
- [16] 李映. 离心泵内部固液两相流动数值模拟与磨损特性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.  
LI Yi. Numerical simulation and wear characteristics of solid-liquid two-phase flow in centrifugal pump[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.

(责任编辑 王卫勋)