



大型疏浚泥泵固液两相流场特性的 数值模拟分析

刘明明，庄海飞，胡京招

(中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司，上海 200082)

摘要：基于欧拉双流体模型对绞吸挖泥船大型泥泵进行固液两相流的非定常数值模拟计算，通过对颗粒粒径、颗粒浓度、颗粒密度对两相流线、固相颗粒浓度分布等流场特性的影响，为提高疏浚泥泵的优化设计提供指导。模拟结果表明，颗粒物理特性对液相流线分布的影响较小，随着颗粒粒径增大，液相对固相的带动作用减弱；随着颗粒密度的增大，液相对固相的带动作用未减弱；随着颗粒浓度增大，液相对固相的带动作用增强；随着粒径和密度增大，颗粒分布不均性加强；随着颗粒浓度的增大，颗粒浓度分布均匀性加强，靠近叶片壁面浓度明显增大。对比了两种泥泵流道的颗粒浓度分布，通过叶轮流道的优化设计，可以减少颗粒在流道表面的集聚，降低泥泵磨损。

关键词：疏浚泵；磨损；固液两相流；流场特性

中图分类号：U616；TH311

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)07-0230-07

Numerical simulation analysis of solid-liquid two-phase flow field characteristics of large dredging pump

LIU Mingming, ZHUANG Haifei, HU Jingzhao

(CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment, Shanghai 200082, China)

Abstract: Based on the Euler two-fluid model, the unsteady numerical simulation of solid-liquid two-phase flow of large dredging pump of cutter suction dredger is carried out. Through the analysis of the effects of particle size, particle concentration and particle density on the flow field characteristics of dredging pump including the two-phase streamline and solid particle concentration distribution, it provides guidance for improving the optimal design of dredging pump. The simulation results show that the physical properties of particles have little effect on the streamline distribution of liquid phase, and the driving effect of liquid relative to solid phase decreases with the increase of particle size. With the increase of particle density, the driving effect of liquid relative to solid does not weaken. With the increase of particle concentration, the driving effect of liquid relative to solid phase increases. With the increase of particle size and density, the uneven distribution of particles increases. With the increase of particle concentration, the uniformity of particle concentration distribution strengthened, and the concentration near the blade wall increased significantly. By comparing the particle concentration distribution of the two dredging pumps, the reasonable design of the impeller channel can reduce the agglomeration of particles on the surface of the channel and the abrasion of the dredging pump.

Keywords: dredging pump; abrasion; solid-liquid two-phase flow; flow field characteristics

泥泵广泛应用于耙吸挖泥船、绞吸挖泥船等疏浚船舶，用来输送含有各种土质的泥浆或砂浆，

是挖泥船输送系统的核心关键装备。挖泥船施工中的疏浚土质复杂，由于颗粒冲蚀磨损和汽蚀等

收稿日期：2022-09-27

作者简介：刘明明（1987—），硕士，高级工程师，研究方向为疏浚泥泵研发及输送系统匹配设计。

造成泥泵过流部件严重损坏。针对浆体颗粒特性对离心泵性能的影响, 国内外学者开展了试验和数值模拟相关研究, Ukhin^[1]通过实验研究了叶轮叶片数量和形状对泥泵性能参数的影响。李龙华等^[2]通过试验研究得出, 渣浆泵的汽蚀和磨损往往同时发生, 含固相量对汽蚀性能的影响甚微, 但是随着粒径增大, 泵扬程、效率快速下降, 抗汽蚀性能迅速下降; 李晶等^[3]采用数值模拟方法研究叶片型线对渣浆泵水力性能及叶轮磨损特性的影响, 得出不同的叶片型线条件下渣浆泵的水力性能与其叶轮磨损特性相互制约; 赵万勇等^[4]通过数值模拟分析了离心泵进口处的固体颗粒对叶片进口磨损的影响, 在一定范围内, 减小进口安放角可以改善叶轮的抗磨损性能; 赵伟国等^[5]采用数值分析方法研究沙粒体积分数对离心泵磨损特性的影响, 随着体积分数增加, 离心泵过流部件的磨损强度逐渐增大, 磨损部位主要集中在叶片进口边、叶片背面、叶片工作面靠近叶片出口的位置, 且沙粒运动轨迹逐渐趋于紊乱, 扬程和效率也逐渐降低; 刘少军等^[6]采用数值模拟预测深海扬矿泵磨损特性, 当颗粒体积分数提高时, 叶轮和导叶过流部件的磨损速率迅速增大, 与导叶相比, 叶轮过流部件的磨损速率明显更大, 其中叶轮压力面磨损最为严重; 刘娟等^[7]模拟分析了离心泵内固体颗粒运动与磨损规律, 结果显示, 大质量颗粒的运动轨迹向叶片工作面偏转较大, 易与叶片头部发生撞击, 并且存在多次撞击过程,

对叶片的磨损程度大; 黄先北等^[8]采用数值分析研究了离心泵叶轮泥沙磨损规律, 粒径增大, 颗粒向叶片工作面进口边的运动速度增加, 形成点状的冲击式磨损; 粒径减小时, 在叶片工作面靠近出口边处逐渐形成条状的擦伤式磨损。此外, 国内外学者还开展了泥泵优化设计研究, 其中 Bugdayci 等^[9]研发了针对岩石输送的大通道专用泵, 提高了泥泵的通过能力; 张晓娜等^[10]采用数值模拟方法对泥泵叶轮进行了优化设计, 提高了泥泵的扬程和效率, 庄海飞等^[11]保持叶轮外形尺寸不变, 基于数值模拟方法研制了吸口直径 900 mm 的绞吸船舱内泵 3 叶片扭曲型叶轮, 提升了泥泵效率。

针对绞吸船大型疏浚泥泵, 通过数值模拟方法分析颗粒特性对泥泵内部流场的影响, 为优化泥泵叶片提供机理支持, 可减少泥泵磨损, 同时提高泥泵效率, 提升绞吸船对不同土质的疏浚性能。

1 计算模型设置

1.1 模型和网格划分

泥泵参数: 进口直径 850 mm, 叶轮直径 2 160 mm, 叶轮出口宽度 360 mm, 泵出口 560 mm, 额定流量为 12 000 m³/h, 泥泵转速 325 r/min。计算模型包括叶轮、泵壳及进口延长段, 采用三棱柱体-四面体混合网格形式进行网格划分, 如图 1 所示, 网格单元数总数约 200 万个。

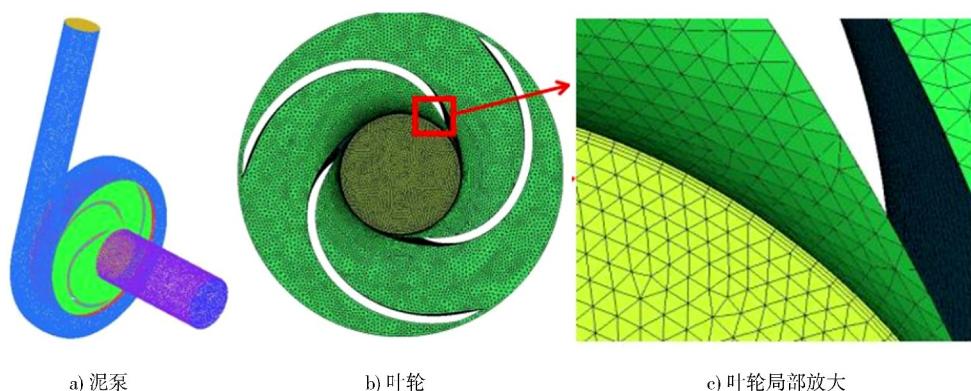


图 1 网格模型

1.2 数值方案

采用商业软件 Ansys Fluent 19.2 对模型进行数值求解, 采用欧拉-欧拉双流体模型进行两相流的非定常数值计算, 以叶轮旋转 1.5° 为一个时间步, 共计算 5 个周期, 分析最后一个计算周期的结果。泥泵边界条件采用速度进口、自由出流, 假定进口速度无切向、径向分量以及出口流动充分发展; 采用无滑移壁面并采用标准壁面函数进行处理; 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型; 空间离散设置二阶迎风格式对湍流方程进行求解^[12]。

为分析颗粒粒径(平均粒径)、颗粒浓度、颗粒密度对泥泵流场特性的影响, 仅改变颗粒其中一种特性, 而其他特性保持不变, 模拟计算方案见表 1。

表 1 模拟计算方案

组次	粒径 ^① /mm	颗粒浓度 ^② /%	颗粒密度 ^③ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	0.1	5	2 000
2	0.3	15	2 500
3	0.5	20	3 000

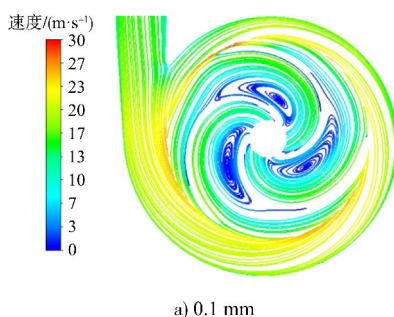
注: ①浓度 15%, 颗粒密度 $2 700 \text{ kg/m}^3$; ②粒径 0.3 mm, 颗粒密度 $2 700 \text{ kg/m}^3$; ③粒径 0.3 mm, 浓度 15%。

2 数值结果及流场分析

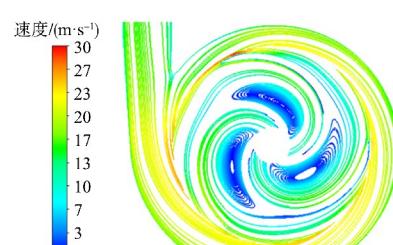
2.1 颗粒粒径对流场的影响

2.1.1 流线分布

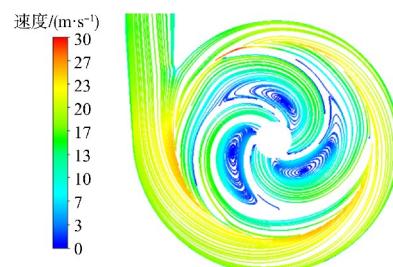
图 2、3 分别为不同颗粒粒径时泵内液相和固相的流线分布情况, 从液相流线分布情况可以看出, 粒径尺寸对液相流线分布的影响较小; 从固相流线分布情况可以看出, 随着粒径增大, 液相对固相的影响减弱, 粒径较小时固相与液相的流线基本重合, 表明此时粒子在液相的带动下随液相一起运动, 但随着粒径的增大, 这种带动作用逐渐减弱。



a) 0.1 mm

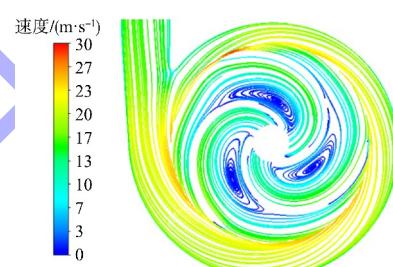


b) 0.3 mm

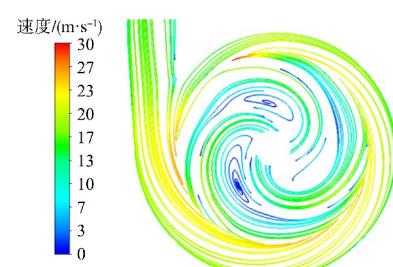


c) 0.5 mm

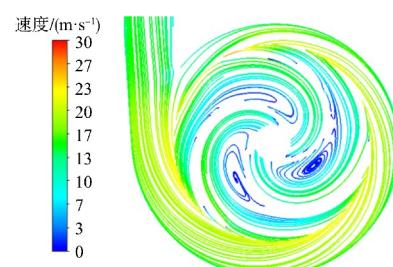
图 2 不同颗粒粒径时液相流线分布



a) 0.1 mm



b) 0.3 mm



c) 0.5 mm

图 3 不同颗粒粒径时固相流线分布

2.1.2 浓度分布

图 4 为不同颗粒粒径时泵内颗粒浓度的分布情况, 从图中可以看出, 粒径较小时, 泵内颗粒浓度分布相对较为均匀, 随着粒径增大, 泵内颗粒分布不均性加强, 其中靠近叶轮工作面的浓度逐渐减小, 造成此现象的原因可能是受到壁面附近旋涡的影响, 使得粒子偏离壁面; 随着粒径增大, 泵出口和泵壳圆周断面位置偏离壁面位置的浓度逐渐较小, 此时粒子受到惯性力的作用紧贴壁面运动使得蜗壳壁面浓度逐渐增加。

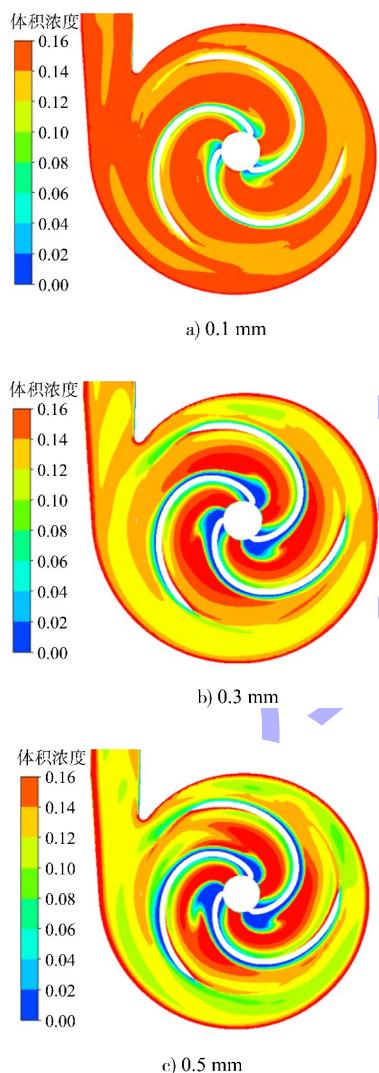


图 4 不同颗粒粒径时固相浓度分布

2.2 颗粒密度对流场的影响

2.2.1 流线分布

图 5、6 分别为不同颗粒密度时泵内液相和固

相的流线分布情况, 可以看出, 颗粒密度大小对液相流线的分布的影响较小, 且液相对固相的带动作用不随着颗粒密度的增大而减弱。

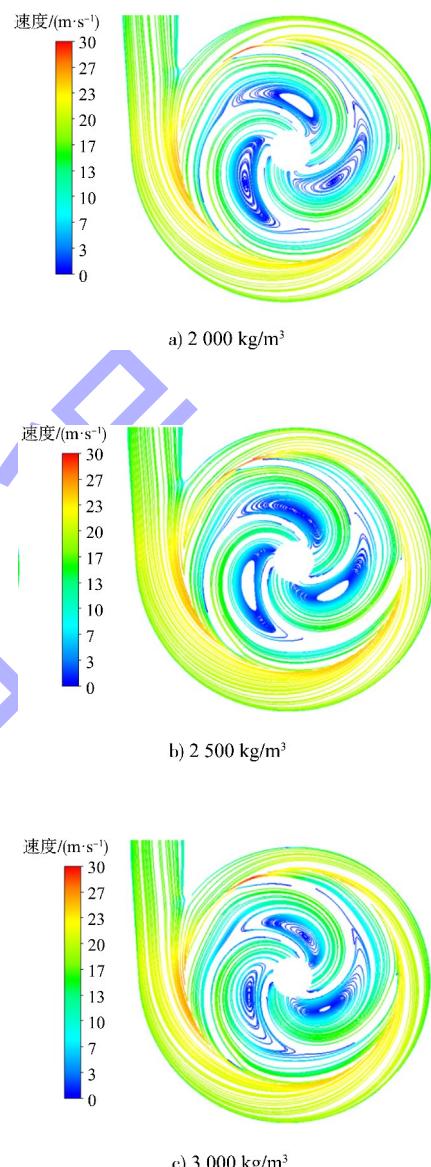
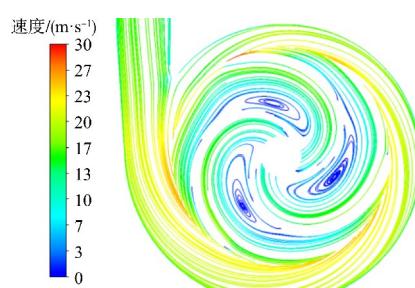


图 5 不同颗粒密度时液相流线分布



a) 2 000 kg/m³

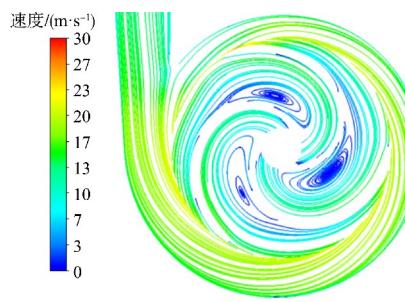
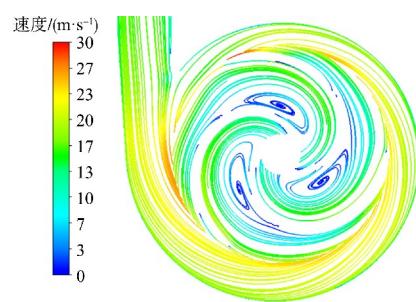
b) $2\ 500 \text{ kg/m}^3$ c) $3\ 000 \text{ kg/m}^3$

图 6 不同颗粒密度时固相流线分布

2.2.2 浓度分布

图 7 为不同颗粒密度时颗粒浓度的分布情况,可以看出,颗粒密度较小时,泵内颗粒浓度分布相对较为均匀,随着颗粒密度的增大,泵内颗粒分布不均性加强,主要体现在泵出口和圆周断面位置偏离壁面位置的浓度逐渐较小,此时粒子受到惯性力的作用使得蜗壳壁面的浓度增加;在惯性力作用下,随着颗粒密度增大,靠近叶片工作面的颗粒浓度有所增加,叶片背面的颗粒浓度有所减弱,但是由于旋涡的存在,叶片工作面位置的浓度较低。

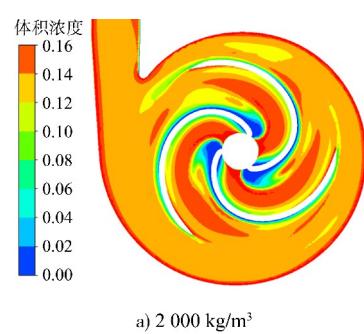
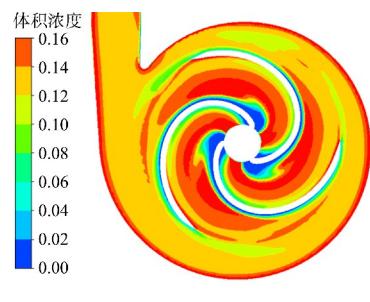
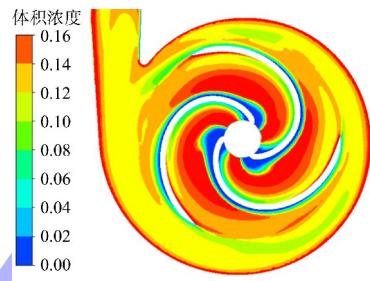
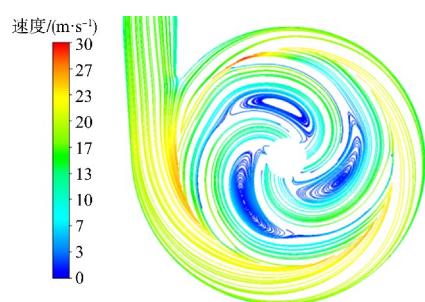
a) $2\ 000 \text{ kg/m}^3$ b) $2\ 500 \text{ kg/m}^3$ c) $3\ 000 \text{ kg/m}^3$

图 7 不同颗粒密度时固相浓度分布

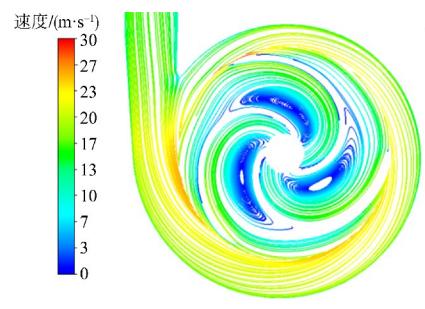
2.3 颗粒浓度对流场的影响

2.3.1 流线分布

图 8、9 分别为不同颗粒浓度时泵内液相和固相的流线分布情况,可以看出,颗粒浓度对液相流线分布的影响非常小,而对固相流线分布影响较大,且液相对固相的带动作用随着颗粒浓度的增大而增强,泥泵叶轮的水力损失随之增加,从而导致泥泵效率的降低。



a) 5%



b) 15%

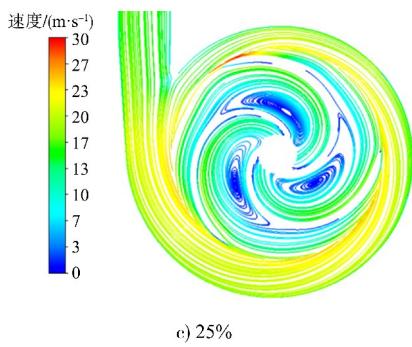


图 8 不同颗粒浓度时液相流线分布

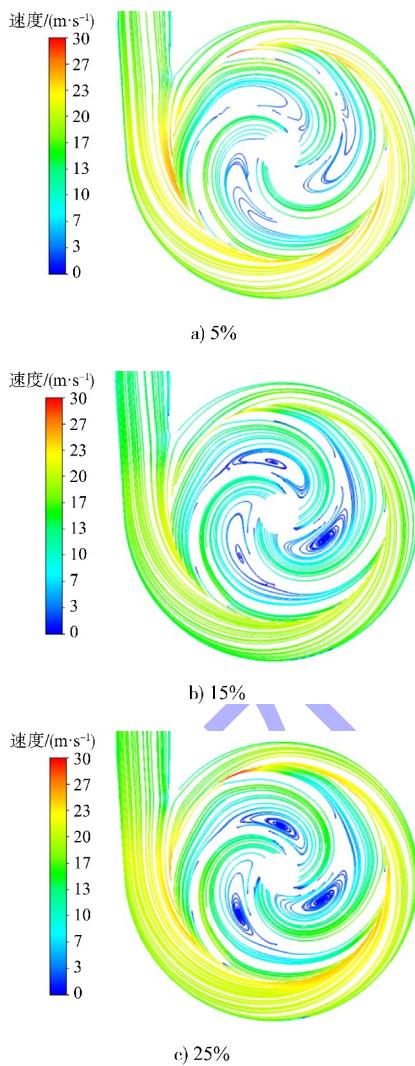


图 9 不同颗粒浓度时固相流线分布

2.3.2 浓度分布

图 10 为不同颗粒浓度下固相浓度的分布情况, 图中的浓度云图均以入口最大浓度为最大限值显示并作归一化处理, 即图中 1 的值分别代表 5%、15%、25%, 从图中可以看出, 随着颗粒浓度的增大, 泵内颗粒分布越来越均匀, 主要表现在叶

轮流道内靠近叶片壁面的低浓度区域减小, 即叶片壁面浓度增大, 这可能会加剧叶片之间的磨损。

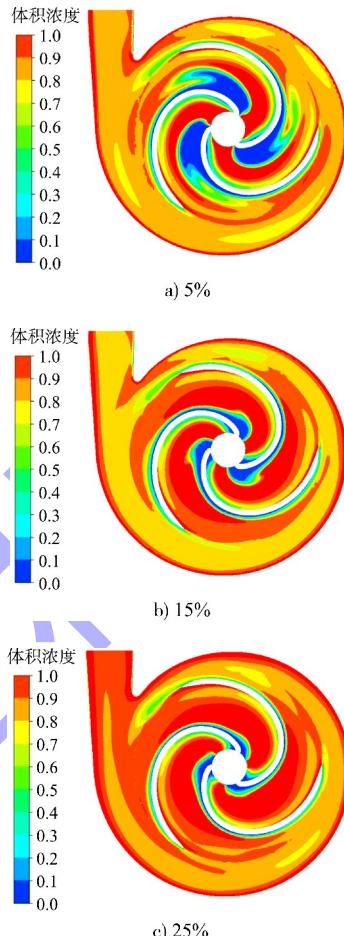


图 10 不同颗粒浓度时固相浓度分布

3 不同泥泵的固相浓度分布

庄海飞等^[13-14]结合数值模拟和模型试验的方法对 3 500 m³/h 绞吸挖泥船泥泵进行优化设计, 泥泵效率达到 86% 以上, 已应用于多艘挖泥船的实船改造, 本节采用前述方法对比改造前后泥泵的固相颗粒浓度分布, 原泵叶轮为圆柱 5 叶片, 新泵叶轮为扭曲 3 叶片。计算条件均为: 流量 12 000 m³/h, 粒径 0.3 mm, 颗粒浓度 20%, 颗粒密度 2 700 kg/m³。

图 11 为原泵与新泵固相分布情况, 从图中可以看出, 新泵的叶轮和泵壳内的固相分布更为均匀。原泵的泥浆浓度靠近叶片壁面; 而新泵的泥浆浓度居于流道之间, 叶片壁面的浓度较低, 有效降低了叶片表面的磨损。相较于原泵, 通过叶轮流道的合理设计, 新泵泵壳内的浓度分布更为

合理, 可有效减少颗粒在泵壳内部的集聚, 减少泥泵磨损, 延长泥泵寿命。

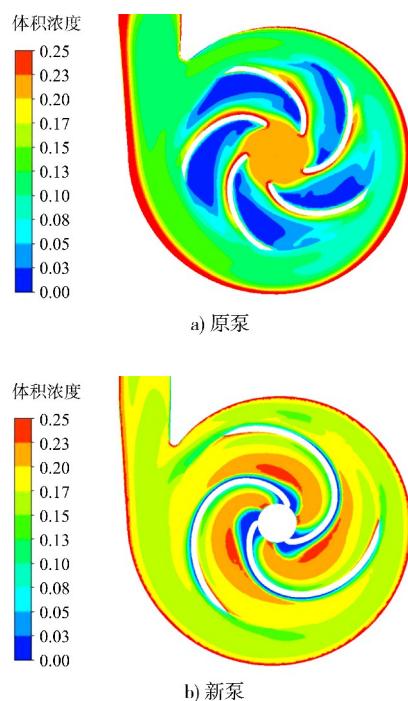


图 11 泥泵改造前后固相浓度分布

4 结论

1) 粒径尺寸对液相流线分布的影响较小, 随着粒径增大, 液相对固相的影响减弱; 粒径的变化引起不均匀分布, 粒径较小时, 泵内颗粒浓度分布相对较为均匀, 随着粒径的增大, 泵内颗粒分布不均性加强, 其中叶轮工作面、蜗壳出口和蜗壳圆周位置偏离壁面位置的浓度逐渐减小, 蜗壳壁面的浓度逐渐增加。

2) 颗粒密度大小对液相流线分布的影响较小, 且液相对固相的带动作用不随着颗粒密度的增大而减弱; 颗粒密度变化引起不均匀分布, 颗粒密度较小时, 泵内颗粒浓度分布相对较为均匀, 随着颗粒密度增大, 泵内颗粒分布不均性加强, 叶片背面、泵出口和圆周断面位置偏离壁面位置的浓度逐渐较小, 蜗壳壁面的浓度逐渐增加。

3) 颗粒浓度变化引起不均匀分布, 浓度较小时, 粒子分布不均匀性较为明显, 此时粒子偏离叶片工作面, 随着颗粒浓度的增大, 使得液相对固相的带动作用增强, 同时泵内颗粒分布均匀性加强, 且近叶片壁面的浓度增大。

4) 采用扭曲叶片的流道内固相浓度分布更为合理, 可有效减少颗粒在流道表面的集聚, 降低泥泵磨损, 提高船舶的疏浚效率。

参考文献:

- [1] UKHIN B V. Effect of the quantity and shape of impeller blades on dredge pump parameters [J]. Hydrotechnical construction, 2002, 36(3): 168-172.
- [2] 李龙华, 缪英, 弓勇峰. 离心杂质泵中汽蚀现象初探 [J]. 水泵技术, 2006(6): 8-11.
- [3] 李晶, 张人会, 郭荣, 等. 叶片型线对渣浆泵水力性能及叶轮磨损特性的影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(1): 21-27.
- [4] 赵万勇, 郭强, 宋乾斌, 等. 叶片进口几何参数对离心泵磨损规律的影响 [J]. 甘肃科学学报, 2018, 30(4): 126-131.
- [5] 赵伟国, 郑英杰, 刘宜, 等. 沙粒体积分数对离心泵磨损特性影响的数值分析 [J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(2): 98-103.
- [6] 刘少军, 文豪, 邹伟生, 等. 深海扬矿泵磨损特性的两相流数值模拟预测 [J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(6): 541-546.
- [7] 刘娟, 许洪元, 唐澍, 等. 离心泵内固体颗粒运动规律与磨损的数值模拟 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 54-59.
- [8] 黄先北, 杨硕, 刘竹青, 等. 基于颗粒轨道模型的离心泵叶轮泥沙磨损数值预测 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 35-41.
- [9] BUGDAYCI H H, MUNTS E, GRINWIS H. Latest developments in dredge pump technology: how recent pump designs can improve the productivity of a dredge [C]//20th World dredging congress and exhibition. Brussels: [s. n.], 2013.
- [10] 张晓娜, 周凌九, 彭光杰. 数值模拟的离心挖泥泵叶轮优化设计 [J]. 水泵技术, 2005 (6): 35-37.
- [11] 庄海飞, 刘明, 金邦雄. 疏浚船用离心式泥泵叶轮改型研究及应用 [J]. 流体机械, 2020, 48(4): 42-45.
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [13] 庄海飞, 王文魁, 郑琳珠, 等. 基于 CFD 和模型试验的水下泥泵优化设计研究 [J]. 中国农村水利水电, 2015(10): 130-132, 140.
- [14] 庄海飞, 杨晨, 胡京招. 4 500 m³ 耙吸挖泥船用高效泥泵的研究与应用 [J]. 中国港湾建设, 2017, 37(1): 63-67.

(本文编辑 王传瑜)