

引用格式:

王田田, 支嘉才, 杨具瑞, 谢訥之, 喻黎明, 崔宁博. 基于计算流体动力学与离散元法的离心泵内流场及磨损的数值模拟[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(2): 235–241.

WANG T T, ZHI J C, YANG J R, XIE R Z, YU L M, CUI N B. Numerical simulation of flow field and wear in centrifugal pump based on CFD-DEM[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(2): 235–241.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



基于计算流体动力学与离散元法的离心泵内流场及磨损的数值模拟

王田田¹, 支嘉才², 杨具瑞¹, 谢訥之¹, 喻黎明^{1*}, 崔宁博³

(1.昆明理工大学农业与食品学院, 云南 昆明 650500; 2.西北工业大学柔性电子研究院, 陕西 西安 710129; 3.水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 利用离散单元法与流体动力学耦合的方法研究了不同入口流速(0.6、1.2、1.7 m/s)和额定转速(2650、2800、3000 r/min)下单级离心泵内部流场变化、磨损部位、磨损量、输送能力。结果表明: 离心泵叶轮叶片尾部易发生空化现象, 入口流速对叶片空化现象、出水管滞留区域产生的影响大于转速的; 9种工况下离心泵最大磨损量出现在叶片尾部, 转速从2650 r/min变化为3000 r/min时, 磨损最严重的部位由叶片1、4尾部变为叶片1、2尾部, 叶轮叶片为离心泵磨损最严重的部件, 占离心泵总磨损量的38.10%~49.41%; 离心泵内沙粒平均停留时间表明, 流速对离心泵输送性能的影响大于转速的, 入口流速0.6 m/s、1.2 m/s、1.7 m/s下沙粒平均停留时间分别为0.144、0.068、0.052 s, 说明随着流速的增加, 离心泵输送性能增强。

关键词: 单级离心泵; 内流场; 磨损; 计算流体动力学; 离散元法; 数值模拟

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)02-0235-07

Numerical simulation of flow field and wear in centrifugal pump based on CFD-DEM

WANG Tiantian¹, ZHI Jiakai², YANG Jurui¹, XIE Ruizhi¹, YU Liming^{1*}, CUI Ningbo³

(1.Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 2.Institute of Flexible Electronics, Northwest Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710129, China; 3.State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: The change of internal flow field, wear position, wear quantity and conveying capacity of centrifugal pumps were explored at different inlet speeds(0.6, 1.2, 1.7 m/s) and rotational speeds(2650, 2800, 3000 r/min) by using the method of discrete element method and fluid dynamics coupling. The results show that the tail of impeller blade of centrifugal pump is prone to cavitation, and the influence of velocity on cavitation and retention area of outlet pipe is greater than that of speed. Under nine working conditions, the maximum abrasion loss of the centrifugal pump appears at the tail of the blade. When the speed changes from 2650 r/min to 3000 r/min, the most serious wear part changes from the tail of blade 1 and 4 to the tail of blade 1 and 2. The impeller blade is the most serious wear part of the centrifugal pump, accounting for 39.36%-49.41% of the total abrasion loss of the centrifugal pump. According to the average residence time of particles in the centrifugal pump under nine working conditions, the flow rate has a greater impact on the performance

收稿日期: 2020-11-11

修回日期: 2021-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769009); 中央高校基本科研业务费项目(2019CDPZH-10)

作者简介: 王田田(1996—), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事水动力学及水力机械仿真研究, Tiantian7921@163.com; *通信作者, 喻黎明, 博士, 教授, 主要从事节水灌溉理论和设备研究, liming16900@sina.com

of the centrifugal pump than the speed, and the average residence time of particles under 0.6, 1.2 and 1.7 m/s are 0.144, 0.068 and 0.052 s respectively, which indicated that the centrifugal pump delivery performance improved with an increase in the velocity.

Keywords: centrifugal pump; flow field; wear; computational fluid dynamics; discrete element method; numerical simulation

单级离心泵结构简单, 输送效率高, 是农业水利机械中最常见的机械部件。大多数离心泵是按照清水泵设计的, 在输送含沙水时存在输送效率低、磨损大、耗能高等问题。对离心泵的研究主要有试验与数值模拟 2 种方法, 数值模拟现已成为主流研究方法。汪家琼等^[1]利用 Particle 模型和非均相模型研究了不同粒径下离心泵磨损与颗粒滑移速度的变化, 得出颗粒滑移速度与磨损随着粒径的增大而增大的结论。刘娟等^[2]应用雷诺应力模型(液体)、离散相流动模型(固相)和 Finnie 模型研究了固体颗粒对离心泵磨损的影响, 认为大质量颗粒易于在叶片头部发生多次撞击, 小质量颗粒易于在叶片压力面发生 1 次撞击。赵晓辉等^[3]利用 CFX 研究了固相粒径对离心泵内流场的影响, 结果表明, 随着颗粒粒径的增大, 离心泵叶轮流道内的固相体积分数减小。这些研究所运用的欧拉两相流模型把颗粒当作拟流体处理, 离散相模型忽略了颗粒的形状影响。

随着离散元技术(DEM)的发展, 杨庆璐等^[4]基于计算流体力学-离散元(CFD-DEM)方法研究了集排式分肥装置中颗粒的运动, 利用 EDEM 模拟了肥料颗粒, 确定了分肥装置的最佳参数。赵思琪等^[5]利用 CFD-DEM 方法对气动式鱼塘投饲机进行了优化, 并得出 CFD-DEM 耦合法具有可靠性。目前 CFD-DEM 耦合法在气固两相流中研究较多, 在液固两相流的研究^[6-8]中, 特别是离心泵的应用上较少。黄思等^[9]利用 CFD-DEM 分析了颗粒在离心泵内的运动, 结果表明, 浑水状态下的扬程脉动大于清水状态下的扬程脉动, 离心泵内的颗粒体积分数随着时间的推移会达到一种饱和状态。刘少军等^[10]利用 CFD-DEM 研究了不同颗粒体积分数下深海扬矿电泵叶片的压力分布, 认为颗粒体积分数对叶片压力面的影响大于叶片吸力面的。施卫东等^[11]运用 CFD-DEM 方法研究了旋流泵中大颗粒内流特性, 认为影响离心泵内颗粒运输的原因分别

是贯通流、循环流、贯通流与循环流的相互作用。目前, 对离心泵的研究都是通过 CFD-DEM 法探究颗粒体积分数、粒径对离心泵内流场与颗粒分布的影响, 但转速、流量对离心泵的磨损的影响研究罕见。有鉴于此, 笔者拟运用 CFD-DEM 方法, 对 40 μm 沙粒在不同流速、转速下通过单级离心泵时的流场变化及对离心泵的磨损进行数值模拟, 分析不同流速和转速对离心泵压力场、流速场、磨损、输送性能的影响, 以期单级微型离心泵的结构优化提供依据。

1 建模及网格划分

单级离心泵由进水管、出水管、蜗壳, 叶轮等组成, 进、出水管管径均为 10 mm, 蜗壳直径为 45 mm, 叶片数为 4。首先采用 CAD 软件 UG 对离心泵流场进行建模, 如图 1 所示, 重力方向与出流方向相反。之后利用 ICEM CED 对计算域进行网格划分, 如图 2 所示, 并进行无关性验证, 即把模型

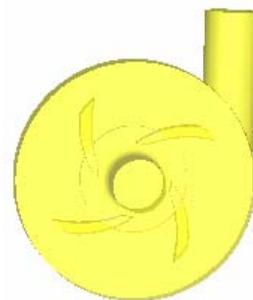


图 1 单级离心泵的三维模型

Fig. 1 3 D model diagram of centrifugal pump

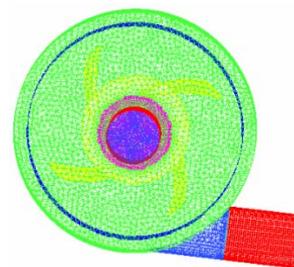


图 2 离心泵全流域网格

Fig. 2 Full basin grid of centrifugal pumps

节点数提高 1.5、2、3 倍^[12]，选取第二套网格作为最终计算网格。进、出水管采用结构网格划分，网格数为 72 118 个，其他部分采用空间适应性良好的非结构网格，网格数为 198 101 个。

2 单级离心泵 CFD-DEM 数学模型的建立

对单级离心泵中的固液两相流采用 CFD-DEM 法计算，CFD-DEM 中的流体相与离散相在离心泵中分别为水与沙粒。

2.1 离心泵水相的数学模型

将离心泵内的水视作不可压缩的黏性流体，在 FLUENT 中作连续相，进行非定常流计算，参照文献[13]，考虑水的重力、黏滞力，水相连续方程和动量方程为：

$$\frac{\partial \varepsilon \rho}{\partial t} + \nabla \rho \varepsilon v = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon \rho v}{\partial t} + \nabla \rho \varepsilon \mu v = -\nabla \rho + \nabla \mu \varepsilon \nabla v + \rho \varepsilon g - F_1 \quad (2)$$

式中： ρ 为水相密度； ε 为体积分项； t 为时间； v 为水相速度； g 为重力加速度； F_1 为动量汇。

2.2 离心泵沙粒的数学模型

在水沙两相流中，沙粒的计算用离散元方法 (DEM)，运用牛顿第二定律和接触模型确定沙粒的位置和受力；沙粒之间、沙粒与泵体之间的碰撞采用 Hertz-Mindle 模型计算。计算中主要考虑重力和曳力。曳力采用 Sphere 曳力模型，其他附加力为升力等，依据文献[14-15]，沙粒的平衡方程为：

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = F_1 + G_1 + \sum F_2 \quad (3)$$

$$I_1 \frac{d\omega_1}{dt} = \sum T_1 \quad (4)$$

式中： m_1 为沙粒质量； v_1 为沙粒速度； I_1 为转动惯量； ω_1 为沙粒角速度； G_1 为沙粒重力； F_1 、 F_2 为沙粒分别受到的来自其他沙粒与流体的作用力； T_1 为单个沙粒受到其他沙粒的力矩。

2.3 离心泵水沙 CFD-DEM 的双向耦合

水沙两相流计算忽略了沙粒体积分数的影响，因而采用欧拉-拉格朗日方法^[11]，CFD-DEM 耦合采用 2.2 版本的基于 DPM 模型的耦合接口，以 FLUENT 中 DPM 模型作为模板，相比欧拉版本少

了 13 个 UDM，可以节约计算时间。FLUNET 先计算流场，然后根据沙粒所在的流场中的参数，通过 DEM 计算沙粒所受的力来确定沙粒位置，再传回 FLUENT 中的 DPM 模型，使得 FLUENT 中的每个沙粒位置和 EDEM 中的沙粒位置一致，通过这样的方式反复迭代传递动量和质量。

2.4 边界条件设置

单级离心泵的额定转速为 2650、2800、3000 r/min，水流与沙粒具有相同的入口流速，分别为 0.6、1.2、1.7 m/s，颗粒粒径为 0.4 mm，投入 10 000 个。

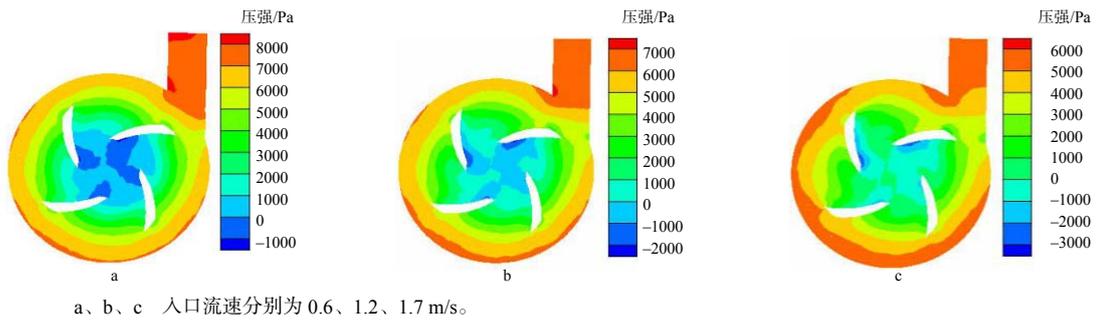
CFD 的设置：进口为速度入口，湍流强度为 5%，水力直径为 10 mm；出口采用自由出流边界条件，湍流模型运用 SST k- ω 湍流模型^[16]，壁面采用标准壁面函数。为了模拟泵内的真实运动情况，采用滑移网格，压力-速度的耦合采用 PISO 算法，使用预测-修正-再修正步骤，加快收敛速度，且鲁棒性更好，采用默认的迎风格式，时间步长为 1×10^{-4} s，每个时间步长最大迭代数为 40。

EDEM 的设置：沙粒设置为球形，粒径采用随机分布，为粒径的 0.5~1.5 倍，沙粒与离心泵的材料与参数取自文献[9]。沙粒与沙粒之间采用 Hertz-Mindle 模型，沙粒与泵体之间采用 EDEM 内置的 Hertz-Mindle with Archard 模型^[17]及 Relative wear 模型预测磨损的位置及大小，磨损常数为 1×10^{-12} ^[18-19]，采用 EDEM 的 API(二次开发程序)对沙粒特性进行编程，计算颗粒停留时间，为结构优化提供依据，时间步长为 1×10^{-6} s，每 0.000 1 s 保存 1 次。

3 结果与分析

3.1 不同入口流速下离心泵内流场的分布

图 3 为转速 2650 r/min、入口流速分别为 0.6、1.2、1.7 m/s 时的离心泵截面的压强云图。对比 3 个工况的压强，当入口流速 0.6 m/s 提高到 1.7 m/s 时，最大压强从 8000 Pa 减小到 6000 Pa，最小压强从 -1000 Pa 减小到 -3000 Pa，说明随着入口流速的增大，离心泵内的水沙混合物快速通过，减少了泵内的挤压，但入口流速的增大，使得水沙混合物对叶轮的冲蚀加大，因此负压更大，更易产生空蚀现象。



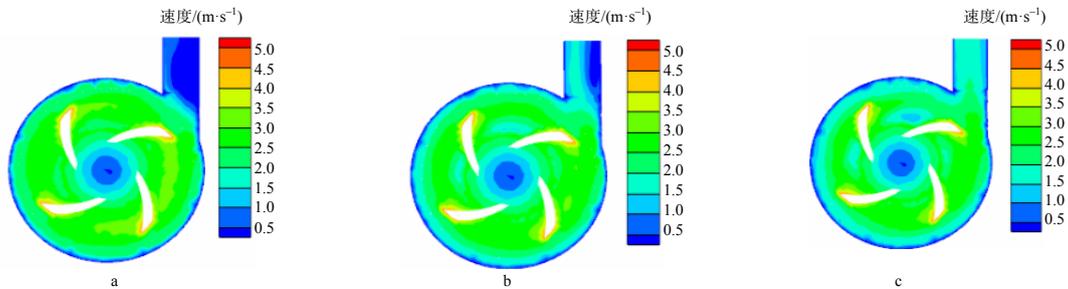
a、b、c 入口流速分别为 0.6、1.2、1.7 m/s。

图 3 不同入口流速的离心泵压强分布

Fig.3 Pressure distribution of centrifugal pump at different inlet flow rates

图 4 为不同入口流速时离心泵截面的速度云图,当入口流速为 0.6 m/s 时,出水管道的最大流速为 1 m/s;入口流速增加到 1.7 m/s 时,出水管道最大流速增加到 2 m/s,但叶片末端的流速没有发

生变化,说明随着流速的增大,离心泵出水管道的大流速区逐渐增大,整个管道流速区域趋于对称,减少了回流,叶轮转速没有发生改变,因而叶片处的流速也未发生改变。



a、b、c 入口流速分别为 0.6、1.2、1.7 m/s。

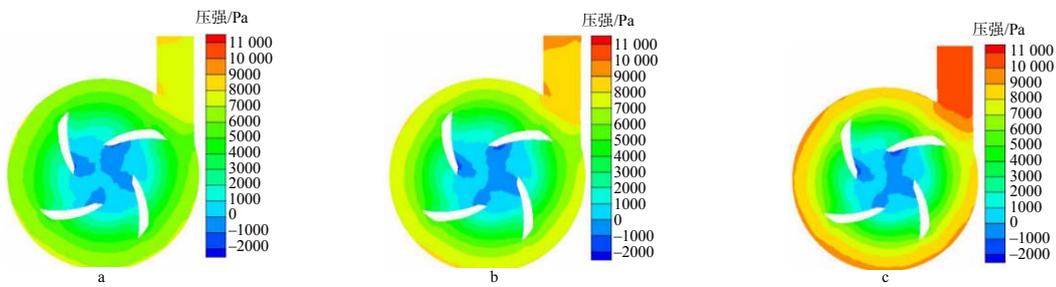
图 4 不同入口流速下的离心泵流速分布

Fig.4 Distribution of centrifugal pump velocity at different inlet velocity

3.2 不同转速下离心泵内流场的分布

从图 5 中可以看出,叶轮转速为 2650 r/min 时,最大压强为 8928 Pa,负压为-1640 Pa;随着转速的不断增大,最大压强与负压的压强差不断增大,当转速为 2800 r/min 时,最大压强为 10 008 Pa,负压为-2200 Pa,说明转速从 2650 r/min 增加到 2800

r/min 时,离心泵内部湍流变化增大。在转速为 3000 r/min 时,最大压强为 11 429 Pa,负压为-2372 Pa。对比压强的变化,说明转速对负压的影响比最大压强的影响小。由于叶轮转速的增大,离心力的增大使得内流道中的流态变化更加紊乱,在蜗壳壁面处流体受到急剧挤压,压力骤升,出水管道的压强也随即增大。



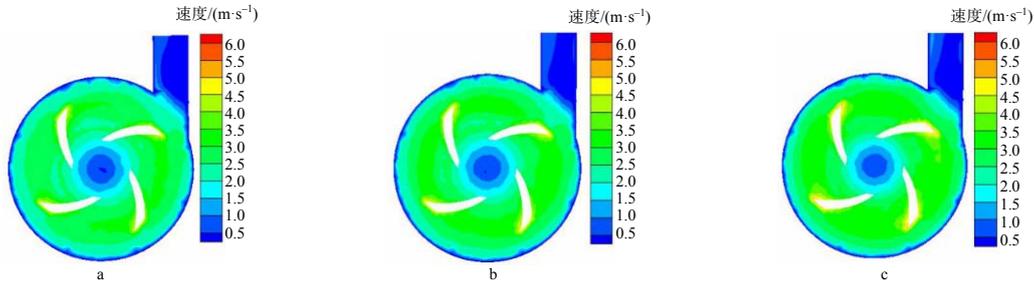
a、b、c 转速分别为 2650、2800、3000 r/min。

图 5 不同转速下的离心泵压强分布

Fig.5 Pressure distribution of centrifugal pump at different speeds

从图 6 中可以看出,叶轮转速为 2650 r/min 时,水相最大流速为 5 m/s; 转速增加到 2800 r/min 时,水相最大速度为 5.5 m/s,说明离心泵转速的增加使得泵内接近叶轮叶片处流体的速度增加; 在转速达

到 3000 r/min 时,最大流速达到了 6 m/s。对比 3 个转速下离心泵的流速,可以看出,转速对蜗壳区域和出口通道区域的流速分布影响很小。



a、b、c 转速分别为 2650、2800、3000 r/min。

图 6 不同转速下的离心泵流速分布

Fig. 6 Velocity diagram of centrifugal pump at different speeds

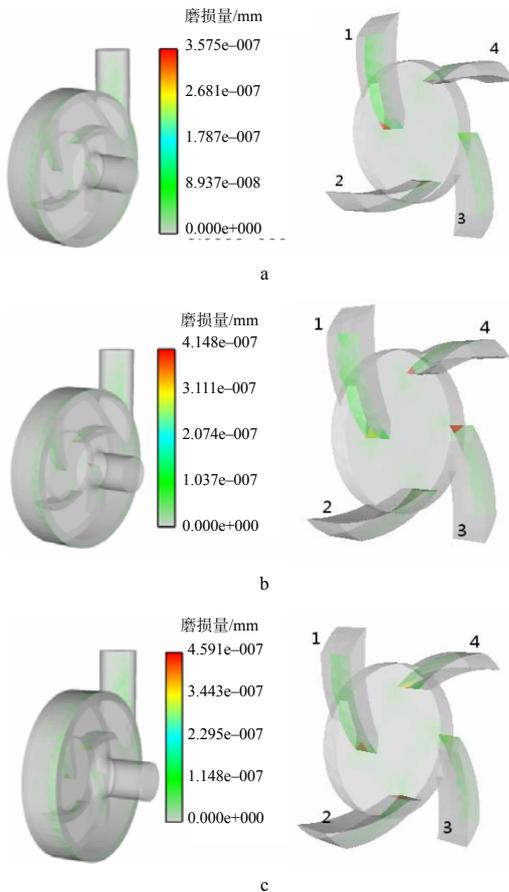
3.3 不同转速与流速下离心泵的磨损部位

通过单位面积磨损量来衡量离心泵磨损的程度,利用 Ensiht 对 EDEM 的计算结果进行后处理,从图 7 中可以看出,离心泵的磨损主要集中在叶轮叶片、蜗壳、出水管一侧。离心泵在高速旋转时,

水沙混合物在初始时进入离心泵,直接撞击叶轮和叶片尾部,造成叶轮叶片的磨损。由于颗粒分层效应,叶轮转动下沙粒刚开始在叶片压力面运动,在离心力和哥式力的作用下沙粒向着叶片吸力面和蜗壳方向运动,由于叶片压力面的边界层不稳定,叶片吸力面的边界层稳定,所以叶片压力面的磨损大于吸力面的磨损。

图 7 为 1.5 s 时不同转速下的离心泵磨损分布,在转速为 2650 r/min 时,磨损最严重部位为叶片 1 和叶片 4 的尾部; 转速为 2800 r/min 时,磨损最严重部位是叶片 3 和叶片 4 的尾部; 在转速为 3000 r/min 时,叶片 1 和叶片 2 的尾部磨损最严重。当叶轮转速从 2650 r/min 增加到 3000 r/min 时,最大磨损量从 3.575×10^{-7} mm 增加到 4.519×10^{-7} mm,说明在沙粒初始速度不变的情况下,叶片转速的增加,在同等时间段内沙粒与叶片的有效接触位置发生改变,且沙粒之间、沙粒与泵体之间的碰撞加剧,沙粒对离心泵蜗壳等部件接触次数增大,离心泵受到了更多的冲击和累计应力。

从图 8 中可以看出,入口流速为 1.2 m/s 时,最大磨损量为 4.583×10^{-7} mm,入口流速为 0.6 m/s 时,最大磨损量为 4.148×10^{-7} mm。转速一定时,离心泵叶轮叶片的磨损分布一致,叶片 3 和叶片 4 的尾部为磨损最严重的位置,叶片压力面上的磨损分布具有均匀分布的特性,每个叶片上的磨损形状一致。



a、b、c 转速分别为 2650、2800、3000 r/min。

图 7 不同转速下的离心泵磨损分布

Fig. 7 Wear distribution of centrifugal pump at different speeds

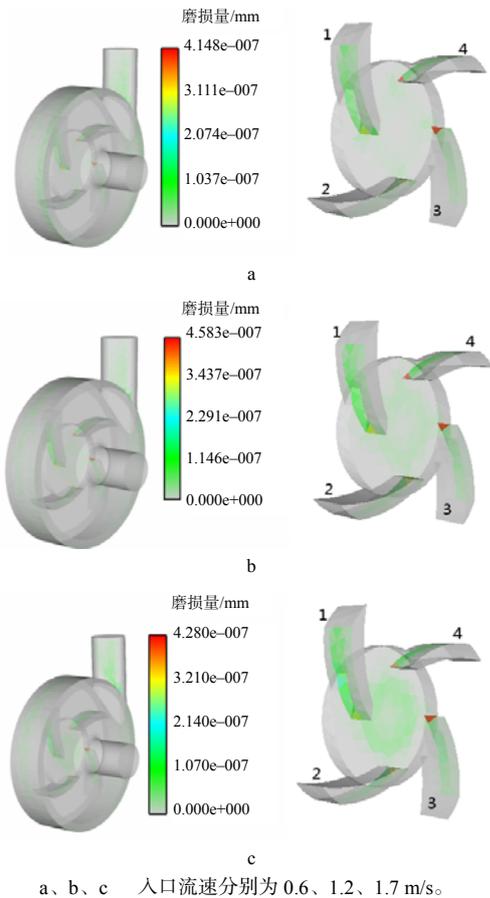


图 8 不同入口流速下的离心泵磨损分布

Fig.8 Wear distribution of centrifugal pump at different inlet flow rates

3.4 不同转速与入口流速下离心泵的磨损量

从图 9 可以看出,随着时间的增加,离心泵的磨损量增大,在 0.2 s 后,磨损量和时间呈线性增加的趋势。为了表示 1.5 s 内离心泵磨损的大小,取 1.5 s 内总磨损量的平均值表示磨损的大小,在转速为 2650 r/min 时,入口流速为 0.6 m/s 的平均总磨损量为 1.03×10^{-5} mm;入口流速增加为 1.2 m/s 时,平均总磨损量为 1.10×10^{-5} mm,说明入口流速增加时,沙粒获得了更大的动能,对离心泵的冲击磨损更大;在 1.7 m/s 时的平均总磨损量为 1.30×10^{-5} mm,随着入口流速的继续增大,沙粒对离心泵的磨损有明显的增大。在转速分别为 2800 r/min 和 3000 r/min 时也符合这一规律。入口流速为 1.2 m/s、转速为 3000 r/min 时的磨损量超过了入口流速为 1.7 m/s、转速为 2650 r/min 时的磨损量,说明叶轮转速的影响超过了入口流速的。

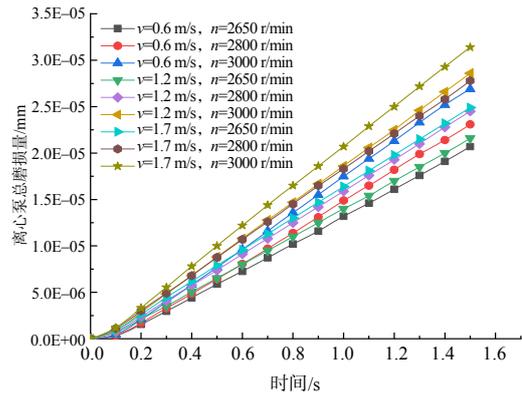


图 9 9 种工况下的离心泵磨损量

Fig.9 Abrasion loss of centrifugal pump under 9 kinds of working conditions

由图 10 可以看出,随着时间的推移,叶轮叶片的磨损量占比逐渐减小,蜗壳、出水管道等其他部件的磨损量增加,对叶轮叶片磨损量影响更大的是入口流速。当离心泵内沙粒在 0.6 s 达到进出平衡时,磨损量减小的趋势变缓。从沙粒进出平衡后叶轮叶片磨损量占比的平均百分数,可以得出叶轮叶片磨损量最大占比为 49.41%,最小占比为 38.10%。入口流速从 0.6 m/s 增加到 1.2 m/s 时,叶轮叶片磨损量增加了 8.475%~9.46%,但随着入口流速的继续加大,磨损量增加不明显。在入口流速为 0.6 m/s、叶轮转速从 2650 r/min 增加到 3000 r/min 时,叶轮磨损量占比下降了 1.8%,在入口流速为 1.2 m/s 和 1.7 m/s 时、叶轮叶片磨损量分别降低了 2.785%和 1.03%。

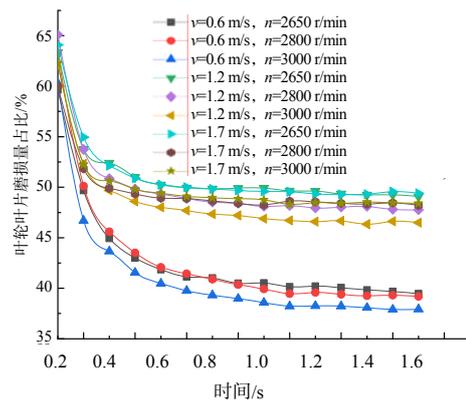


图 10 9 种工况下的叶轮叶片磨损量占比

Fig.10 Abrasion loss proportion of impeller blade under 9 kinds of working conditions

3.5 不同工况下离心泵的输送性能

利用 EDEM 的 API 功能,通过 Visio Studio 编程,对沙粒在离心泵内的停留时间进行统计,如图 11 所示,入口流速对沙粒停留时间的影响大于叶轮

转速的,当离心泵内进出口沙粒达到平衡时,入口流速为 0.6 m/s 时的沙粒平均停留时间最长,为 0.144 s;入口流速为 1.2 m/s 时,沙粒平均停留时间为 0.068 s;入口流速为 1.7 m/s 时,沙粒停留时间为 0.052 s。入口流速为 1.7 m/s、叶轮转速为 3000 r/min 时,离心泵的输送性能最好;入口流速为 0.6 m/s、叶轮转速为 2650 r/min 时,离心泵的输送性能最差。

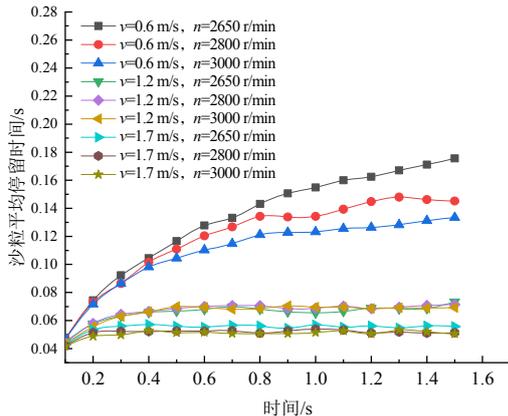


图 11 不同转速与流速下离心泵内沙粒的停留时间

Fig.11 Particle residence time in centrifugal pump at different speed and flow rate

4 结论

流场分析表明,离心泵叶轮叶片尾部易发生空化现象,流速的变化对叶片空化现象的影响大于转速的;随着入口流速的增加,离心泵内的最大压强减小,叶片尾部的负压增大,出水管道区域的滞留区域减小;离心泵转速的变化对最大压强的影响大于负压的,转速的增加对滞留区域并没有改善。

离心泵磨损最严重的部位在叶片尾部。转速的变化会改变叶片磨损最严重的位置,流速的变化不会对叶片磨损最严重的位置产生影响,只会增加磨损量。叶轮叶片为离心泵中磨损最严重的位置,占离心泵总磨损量的 38.10%~49.41%。

从 9 种工况下离心泵内沙粒的平均停留时间看,入口流速对离心泵输送性能的影响大于转速的,同一流速下,转速越大,离心泵的输送性能越好。

参考文献:

[1] 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.
[2] 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.
[3] 赵晓辉,赖喜德,廖功磊,等. 固相颗粒对离心泵内部流场影响的数值分析[J]. 热能动力工程, 2019, 34(4): 67-72.
[4] 杨庆璐,李子涵,李洪文,等. 基于 CFD-DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 81-89.
[5] 赵思琪,丁为民,赵三琴,等. 基于 EDEM-Fluent 的气动式鱼塘投饲机性能优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 130-139.
[6] 喻黎明,谭弘,邹小艳,等. 基于 CFD-DEM 耦合的迷宫水道水沙运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 65-71.
[7] 喻黎明,邹小艳,谭弘,等. 基于 CFD-DEM 耦合的水力旋流器水沙运动三维数值模拟[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 126-132.
[8] 喻黎明,徐洲,杨具瑞,等. 基于 CFD-DEM 耦合的网式过滤器水沙运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 303-308.
[9] 黄思,杨富翔,宿向辉,等. 运用 CFD-DEM 耦合模拟计算离心泵内非稳态固液两相流动[J]. 科技导报, 2014, 32(27): 28-31.
[10] 刘少军,李渊文,胡小舟. 基于 DEM-CFD 颗粒体积分数对深海扬矿电泵工作性能的影响[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 257-264.
[11] 施卫东,施亚,高雄发,等. 基于 DEM-CFD 的旋流泵大颗粒内流特性模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 176-185.
[12] 周理强,韩栋,喻黎明,等. 导流片对 Y 型网式过滤器性能的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 40-46.
[13] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
[14] QIU L C, WU C Y. A hybrid DEM/CFD approach for solid-liquid flows[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1): 19-25.
[15] CHU K W, WANG B, YU A B, et al. CFD-DEM modelling of multiphase flow in dense medium cyclones[J]. Powder Technology, 2009, 193(3): 235-247.
[16] 吴贤芳,冯进升,刘厚林,等. 单流道离心泵定常非定常性能预测及湍流模型工况适用性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(S1): 85-91.
[17] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.
[18] CHEN G M, SCHOTT D L, LODEWIJKS G. Sensitivity analysis of DEM prediction for sliding wear by single iron ore particle[J]. Engineering Computations, 2017, 34(6): 2031-2053.
[19] 张延强,李秀红,任家骏,等. WK-75 型矿用挖掘机斗齿的磨损分析[J]. 工程设计学报, 2015, 22(5): 493-498.

责任编辑: 罗慧敏
英文编辑: 吴志立