

基于 CFD - DEM 耦合算法的开式设计旋流泵磨损研究

高雄发¹ 乔传龙¹ 张德胜¹ 施卫东^{1,2} 陈斌³ 许荣军³

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 南通大学机械工程学院, 南通 226000;
3. 蓝深集团股份有限公司, 南京 211500)

摘要: 为了探究开式设计旋流泵的磨损规律, 基于 CFD - DEM (Computational fluid dynamics - discrete element method) 耦合方法, 并结合 Archard 磨损模型, 在 1%、3%、5% 共 3 种不同体积分数下, 开展数值模拟与实验研究。重点分析旋流泵内部流动规律、颗粒分布特征以及关键部件(叶轮、蜗壳及进口内壁)的磨损规律。研究结果表明, 随着颗粒浓度的增加, 旋流泵的扬程和效率均出现下降趋势, 当颗粒体积分数从 1% 提升到 3% 时, 其下降幅度大于体积分数从 3% 增至 5% 的情况。旋流泵关键部件的磨损程度随颗粒浓度的增加而加剧。颗粒对叶片的切向累计剪切强度显著高于法向累计冲击强度, 这说明叶片的磨损主要是由摩擦作用引起的。进一步分析发现, 压力面的磨损程度明显高于吸力面, 尤其是压力面的进口边受切向摩擦与法向冲击作用相对其他区域均较高, 所以其磨损最为严重。此外, 叶片的整体磨损主要集中于靠近后盖板的区域, 并且从压力面到吸力面, 后盖板的磨损程度逐渐减轻。蜗壳的磨损程度次于叶轮, 其中隔舌处由于过流面积较小, 导致颗粒流速加快, 撞击频率增高, 成为蜗壳中磨损最为严重的部位。具体来看, 从第 I 到第 V 断面, 蜗壳壁面的磨损主要集中在后侧, 且磨损较为严重; 而在第 V 到第 X 断面, 由于受到无叶腔内循环流的影响, 磨损逐渐向前侧扩展, 因颗粒分布变得更加扩散, 磨损程度相对较轻。有一股螺旋流从无叶腔沿着进口内壁逆向流动, 颗粒浓度越大, 螺旋回流长度越短, 且进口管壁面的磨损呈现螺旋状特征, 距无叶腔越远, 磨损程度越轻。

关键词: 开式旋流泵; CFD - DEM 耦合; 冲击和摩擦磨损; 颗粒分布; 螺旋流动

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)15-0248-10

OSID:



Wear Analysis of Open-design Vortex Pump Based on CFD - DEM Coupling

Gao Xiongfai¹ Qiao Chuanlong¹ Zhang Desheng¹ Shi Weidong^{1,2} Chen Bin³ Xu Rongjun³

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226000, China

3. Lanshen Group Co., Ltd., Nanjing 211500, China)

Abstract: In order to investigate the wear patterns of the open-design vortex pump, it was based on the computational fluid dynamics - discrete element method (CFD - DEM) coupling method and combined with the Archard wear model to conduct numerical simulations and experimental research, considering three different volume fractions: 1%, 3%, and 5%. Focusing on analyzing the internal flow pattern of the vortex pump, the particle distribution characteristics, and the wear patterns of key components, including the impeller, volute casing, and inlet wall, the results showed that as particle concentration was increased, the head and efficiency of the vortex pump exhibited a decreasing trend, with a more pronounced decline when the concentration was increased from 1% to 3% compared with the increase from 3% to 5%. The wear of key components was increased with the increase of particle concentration. The cumulative tangential shear force exerted by the particles on the vanes was significantly higher than the normal cumulative impact force, indicating that vane wear was primarily attributed to friction. Further analysis revealed that the wear on the pressure side was significantly more severe than on the suction

收稿日期: 2025-03-02 修回日期: 2025-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909108)和国家杰出青年科学基金项目(52425903)

作者简介: 高雄发(1984—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事流体机械设计理论与内流研究, E-mail: gxfyq@ujs.edu.cn

通信作者: 张德胜(1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事流体机械设计理论与流动特性研究, E-mail: zds@ujs.edu.cn

side. Especially at the leading edge of the pressure side, both tangential friction and normal impact were relatively more intense than in other regions, resulting in the most severe wear. In addition, overall blade wear was primarily concentrated near the rear cover plate, with the wear on the rear cover plate gradually decreasing from the pressure surface to the suction surface. The wear on the volute casing was the second only to that on the impeller, with the tongue of the volute casing experiencing the most severe wear due to the reduced flow area, which accelerated particle velocity and increased impact frequency. Specifically, from section I to section V, wear on the volute casing wall was primarily concentrated on the back side, where it was more severe; while from section V to section X, due to the influence of circulating flow in the bladeless cavity, wear gradually expanded to the front side, although the degree of abrasion was relatively light as the particle distribution became more diffuse. Additionally, a spiral flow was observed as moving in the reverse direction from the bladeless cavity along the inlet wall. As particle concentration was increased, the spiral reflux length was decreased, and the inlet pipe wall exhibited a spiral wear pattern, with wear intensity diminishing as the distance from the bladeless cavity increased. The results can provide a theoretical reference for the optimization and structural improvement of the vortex pump.

Key words: open-design vortex pump; CFD-DEM coupling; impact and abrasive wear; particle distribution; helical flow

0 引言

旋流泵广泛应用于农业生产养殖、食品加工、城市环保排污等复杂的固液混输中^[1-2]。其结构与离心泵不同,叶轮为半开式且叶轮前端存在较宽的轴向空腔体(简称无叶腔)。这种独特的结构,使得泵腔内存在循环流与贯通流两种主要流动状态,固体物质可不经叶轮流道直接在无叶腔中循环后流出泵腔^[3-5]。农业生产和加工中常需要处理含有来自农作物、食品等固液混合介质的流体,输运过程中,大多数固体颗粒不经叶轮,直接进入蜗壳,不仅可以降低固体物损伤,也提高了泵的抗堵塞性能。然而该类型泵虽有较好的通过性能,但遇到大尺度、不规则坚硬颗粒时,其在输运作业或突发工况时,也会遇到堵塞流道、磨损叶轮和蜗壳等主要过流壁面的情况,对旋流泵的性能和使用寿命造成严重威胁。

近年来,大量学者通过实验和数值模拟的方法进行固液两相流的研究。文献[6-9]研究了不同种类、不同浓度、不同粒径的颗粒对旋流泵性能的作用机制^[6-9]。文献[10]采用 CFD-DEM 耦合的方法发现旋流泵内部存在 3 种不同的颗粒运输方式,并且采用高速摄影对泵腔和进口内壁螺旋回流进行研究,结果表明二者具有较好的一致性。文献[11]将油菜籽和黄豆两种颗粒等比例混合,研究了不同工况、不同浓度下旋流泵内部流动规律及颗粒分布特征。文献[12]通过实验研究了沉积物侵蚀对水轮机导流叶片周围流动的影响。文献[13]通过实验发现离心渣浆泵的叶轮主要磨损类型为侵蚀磨损,且叶轮边缘区域的磨损程度显著高于中心区域。文献[14-16]均采用 DPM 离散相模型进行计算,分析了泵内关键部件的磨损特征。文献[17]基于

CFD-DEM 耦合算法,研究了不同包角叶轮的磨损情况。文献[18-20]采用 Finnie 侵蚀模型对离心泵磨损进行预测。文献[21]基于 Thakoff 侵蚀模型预测双吸泵部件的侵蚀。文献[22]采用 Melaury 模型预测了双吸离心泵的侵蚀,发现颗粒形状对性能的影响小于颗粒直径和颗粒浓度的影响。文献[23]采用 Oka 侵蚀模型研究不同工况下自吸泵叶片前缘易受侵蚀。文献[24]采用 Archard 磨损模型,发现离心泵叶片的磨损率明显大于蜗壳表面的磨损率。文献[25]采用 CFD-DEM 耦合算法结合 Archard 磨损模型发现固体的质量分数是影响泵部件磨损的重要因素。文献[26]采用 CFD-DEM 耦合方法,结合可变形 Archard 磨料磨损模型与 Oka 冲蚀磨损模型,数值研究了不同颗粒体积分数下微型离心泵内固液两相流的复合磨损特性、分布规律及演化过程。

磨损问题在旋流泵的应用中是一个不可忽视的关键技术问题,现有研究多集中在旋流泵内固相颗粒的分布及其对内流场的影响,而针对旋流泵固液两相流作用下的磨损特性分析相对较少。为此,本文基于 CFD-DEM 耦合的方法,采用磨损模型,在不同体积分数下研究泵内固液两相流特征、颗粒运动轨迹特性以及颗粒对过流部件内壁的磨损特性,探讨颗粒体积分数与旋流泵内壁面磨损率的关联性,以期对旋流泵优化设计及结构改进提供理论支持。

1 数值模拟

1.1 几何模型

本文研究的是开式设计的旋流泵,叶轮未完全退缩在后腔中,其设计流量为 $32 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程为

4.5 m,转速为 1 450 r/min。旋流泵几何模型如图 1 所示,主要结构参数如表 1 所示。

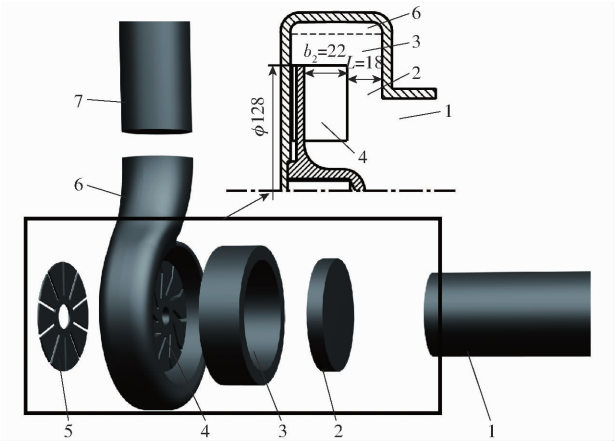


图 1 旋流泵模型
Fig.1 Vortex pump model
1. 进口段 2. 无叶腔 3. 间隙 4. 叶轮 5. 背叶片 6. 蜗壳 7. 出口管

表 1 旋流泵主要结构参数

Tab.1 Main structural parameters of vortex pump			
参数	数值	参数	数值
蜗壳基圆直径 D_3 /mm	160	叶轮出口直径 D_2 /mm	128
蜗壳进口宽度 b_3 /mm	47	叶轮出口宽度 b_2 /mm	22
蜗壳出口直径 D_d /mm	80	叶片第 1 段倾角 $\alpha/(^\circ)$	45
泵的进口直径 D_s /mm	94	叶片第 2 段倾角 $\beta/(^\circ)$	30
无叶腔宽度 L /mm	18	叶片数 z	10
叶轮外径与蜗壳的间隙 e /mm	16	叶片厚度 h /mm	4

1.2 网格划分

采用 ANSYS 中 ICEM CFD 对旋流泵水体计算域进行网格划分(图 2),所有水体计算域均由六面体结构化网格组成,质量在 0.35 以上,且 y^+ 小于 100。采用表 2 中所述的 6 种网格划分方案,通过模拟发现,随着网格数量的增多,扬程变化减小。这表明进一步增多网格数量对计算结果影响较小,因此选用方案 D 作为本研究的数值计算网格。

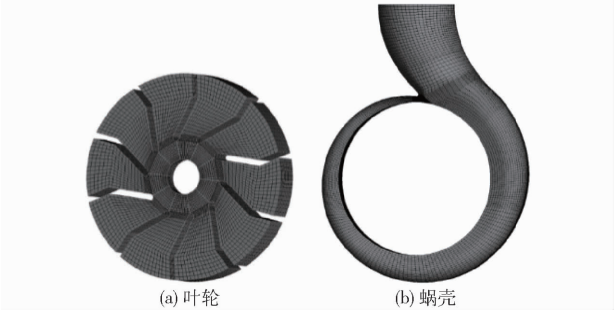


图 2 计算域网格划分
Fig.2 Computational domain meshing

1.3 实验方案

本研究采用的开式试验台如图 3 所示,试验台主要由开式水箱、电机、扭矩仪、进出口压力变送器、

表 2 网格划分方案

Tab.2 Mesh generation scheme						
参数	方案					
	A	B	C	D	E	F
网格总数	7.30×10^5	9.50×10^5	1.20×10^6	1.35×10^6	1.46×10^6	1.68×10^6
扬程预测值/m	4.39	4.43	4.47	4.52	4.54	4.53

模型泵等装置组成。

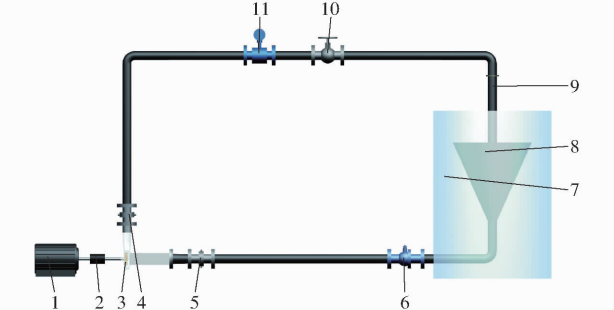


图 3 试验台
Fig.3 Test bench
1. 电机 2. 转速转矩传感器 3. 出口压力变送器 4. 模型泵 5. 进口压力变送器 6. 进口阀 7. 开式水箱 8. 带筛孔的锥形漏斗 9. 管道 10. 出口阀 11. 电磁流量计

试验台中,进口管与蜗壳均由透明有机玻璃制成,以便于观测泵腔及进口段颗粒的运动行为。开式水箱中由 1 mm 筛孔的圆锥形漏斗以及管道连接,管路和漏斗均可与水箱内的水相互流通,管道采用快速接头连接,便于实验过程中固体颗粒的投放与回收,保证实验的可重复性和可操作性。实验所用测量仪器及具体参数如表 3 所示。实验采用了 3 种不同体积分数(1%、3%、5%)的球形颗粒,并在不同流量工况下进行测试,每组实验重复 3 次。

表 3 测量仪器及具体参数

Tab.3 Measuring instruments and specific parameters			
测量仪器	仪器型号	测量范围	相对不确定度/%
电磁流量计	LDBE-80S-M2X100-80	0 ~ 160 m ³ /h	0.5
进口压力变送器	WT2000	-0.1 ~ 0.1 MPa	0.1
出口压力变送器	WT2000	-0.1 ~ 0.1 MPa	0.1
转速转矩传感器	JN338-A	-20 ~ 20 N·m 0 ~ 6 000 r/min	0.2
转矩转速测量仪	JN338		0.1

图 4 为折叶片旋流泵在体积分数 1% 下实验与仿真的外特性对比(图中 Q/Q_{des} 表示不同流量工况, Q 表示实际流量, Q_{des} 表示设计流量),结果表明数值模拟与实验数据吻合较好。随着流量的增大,扬程略有下降,效率先上升后下降,从外特性结果可知,该旋流泵可以在较宽的工况范围内保持高效运

行。在额定工况下,数值模拟和实验测得的扬程分别为 4.51 m 和 4.43 m,效率分别为 47.01% 和 46.3%。扬程和效率的计算误差分别为 1.81% 和 1.53%,表明数值模拟结果与实验值相近,验证了数值模拟的可靠性。

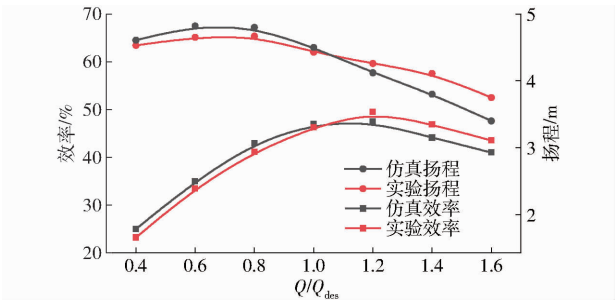


图 4 实验与数值模拟外特性对比

Fig. 4 Comparison of experimental and numerical simulation external characteristics

图 5 为折叶片旋流泵在不同颗粒体积分数下的实验外特性曲线图。由图可知,在 $1.4Q_{des}$ 下,颗粒体积分数的变化对扬程的影响最为显著,当体积分数从 1% 增长到 3% 时,扬程下降 2.7%;进一步增加至 5% 时,扬程下降 1.3%。在 $1.6Q_{des}$ 下,效率下降最为明显,体积分数从 1% 增长到 3%,效率下降 2.8%;体积分数从 3% 增加至 5% 时,效率下降 1.9%。随体积分数的增加,旋流泵的扬程和效率均呈现下降趋势,颗粒体积分数从 1% 增加至 3% 影响更加显著。这是由于低颗粒体积分数(1%)时,固体颗粒分布稀疏,相互作用较少,对泵的性能影响较小;当体积分数增加至 3% 时,颗粒数量增加,相互作用增多,流动阻力与能量损失加剧,扬程和效率下降更为明显;当体积分数进一步增加至 5% 时,尽管颗粒数量继续增加,但颗粒间相互作用趋于饱和,对泵内旋流影响变化较小,因此颗粒体积分数从 3% 到 5% 的影响小于从 1% 到 3% 的影响。

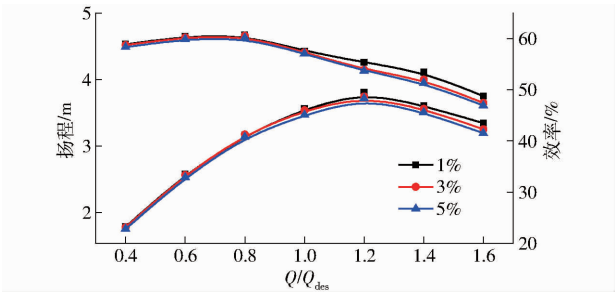


图 5 外特性曲线

Fig. 5 External characteristic curves

1.4 求解设置

旋流泵内部存在复杂的旋转流和强涡量分布,为了追求计算效率和计算精度的平衡,对于流体相的求解采用 Fluent 软件,基于 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流

模型。在计算边界方面,入口设置为速度入口,出口设为压力出口,壁面采用无滑移壁面条件。流场求解采用 SIMPLE 算法进行速度与压力耦合计算,并使用二阶上迎风格式对对流项进行离散。对于颗粒相的求解,采用 ROCKY DEM 进行模拟。在本研究中,采用 Archard 磨损模型对旋流泵中固液两相流引起的磨损进行定量分析,其表达式为

$$W = k \frac{PL}{H}$$

(1)

式中 W ——磨损体积

k ——磨损系数

P ——接触压力

L ——颗粒滑动距离

H ——材料硬度

本文采用磨损速率表示壁面的磨损程度,其公式为

$$n = \frac{W}{At}$$

(2)

式中 n ——磨损速率

A ——颗粒与壁面的接触面积

t ——时间

实验和仿真所采用颗粒的物性参数及其他信息如表 4 所示。

表 4 颗粒的物性参数及其他信息

Tab. 4 Physical properties and other information of particles

参数	数值
直径/mm	4
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 350
泊松比	0.3
体积分数/%	1、3、5
颗粒-有机玻璃碰撞恢复系数	0.58
颗粒-颗粒碰撞恢复系数	0.69
静摩擦因数	0.52
动摩擦因数	0.02

为了确保数值计算结果的可靠性,在距离蜗壳出口截面 50 mm 处设置监测截面,统计旋流泵每旋转一圈通过该截面的颗粒数量,如图 6 所示。随时间推移,颗粒数量在 12 ~ 19 圈趋于准稳态,而在 19 ~ 25 圈期间,泵内颗粒数量逐渐增加。这一现象主要归因于颗粒的碰撞、聚集等行为,以及进口段回流颗粒的再次进入泵腔,导致通过截面的颗粒数短暂增加,至第 25 圈后,颗粒数量重新趋于稳定。因此,本文取泵运行 25 圈(即 1.048 s)后的数据进行分析。数值模拟部分,主要针对额定工况下不同体积分数的颗粒进行研究。

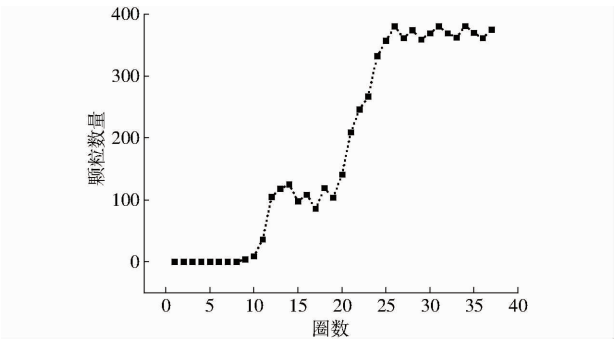


图 6 时间无关性验证

Fig. 6 Time independence test and verification

2 流场分析

在旋流泵的运行过程中,流场的特性对泵的性能及其关键部件的磨损具有重要影响。流体速度的分布、湍流强度以及压力分布等因素,均可能导致泵关键部件如进口、叶轮和蜗壳的局部磨损。

2.1 进口段流动分析

进口段是流体进入旋流泵的初始区域,其流动特性对泵的整体性能具有直接影响。如图 7 所示,流体在进口管中主要为轴向运动,由于速度梯度的存在,在进口管壁面附近区域出现明显的螺旋回流现象,且回流的速度高于流体进入泵腔的平均速度。随着颗粒体积分数的增加,螺旋回流长度逐渐缩短。

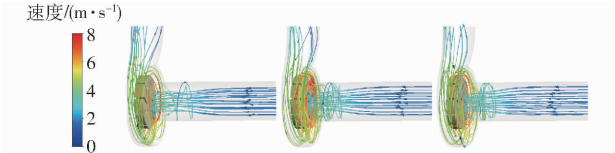


图 7 进口段流线分布

Fig. 7 Streamline distribution in inlet section

为了进一步分析进口螺旋回流现象,如图 8 所示,以无叶腔与进口管交界处为初始截面,每隔 50 mm 取 1 个进口截面,共取 4 个截面,对进口管内流态进行研究。图 9 显示了不同进口截面上的涡量分布情况,结果表明涡量随与泵腔距离的增加而逐渐衰减,同时颗粒体积分数的增加也对涡量产生一定的抑制作用。这是由于旋流泵叶轮的高速旋转,在泵腔内部产生强烈的剪切流动,涡量在离开叶轮

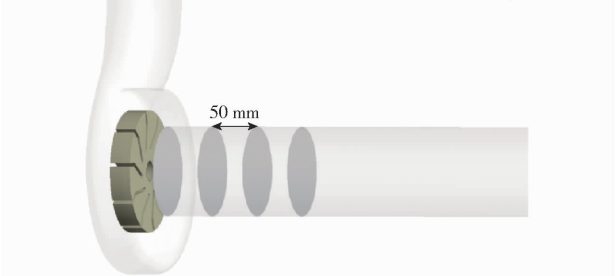


图 8 进口管截面示意图

Fig. 8 Schematic of inlet pipe cross-section

区域后因流体的粘性耗散而逐渐降低。此外,如图 10 所示,湍动能也随流动的发展而逐渐衰减,旋流扩散效应使转动动量向周围流体扩散,粘性剪切作用进一步导致小尺度的涡旋逐渐被耗散成热能,最终导致涡量减少。

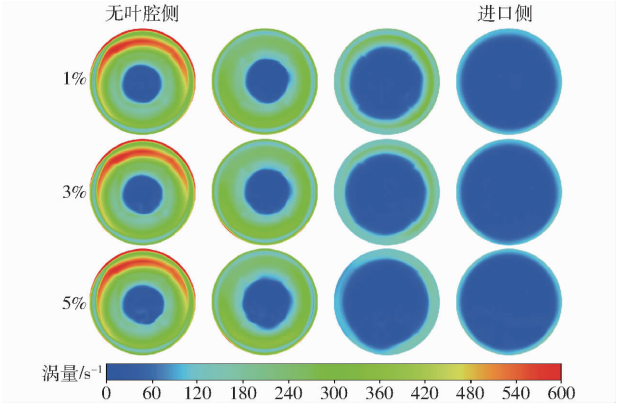


图 9 进口管截面的涡量分布

Fig. 9 Vorticity distribution in inlet pipe cross-section

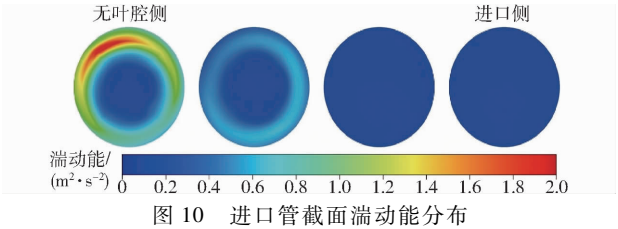


图 10 进口管截面湍动能分布

Fig. 10 Turbulent kinetic energy distribution in inlet pipe cross-section

为探索涡核的旋转方向,引入正则化螺旋度 H_n 进行分析。其定义为速度与涡量的点积和速度与涡量的模的比值,表达式为

$$H_n = \frac{\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega}}{|\mathbf{v}| |\boldsymbol{\omega}|} \tag{3}$$

式中 $\mathbf{v}$ ——速度矢量 $\boldsymbol{\omega}$ ——涡量矢量

正则化螺旋度可以清晰地反映速度与涡量方向的一致性,当 H_n 接近于 1 时,速度和涡量几乎同向;接近 -1 时,则表示二者反向;接近 0 时,说明两者方向垂直,或者其中一个向量的模接近 0。如图 11 所示,随与泵腔距离的增加,涡核逐渐向进口管的壁面扩散,并且强度逐渐减小,同时切向流动基本消失,流动以轴向流动为主。

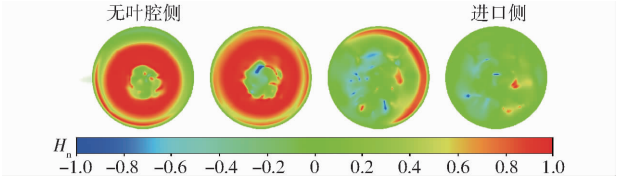


图 11 进口管截面 H_n 分布

Fig. 11 Distribution of H_n in inlet pipe cross-section

2.2 叶轮与无叶腔内流动分析

旋流泵的叶轮与无叶腔构成了泵内的核心流动

区域,对泵能量转换、效率及磨损特性有重要影响。图 12 展示了在颗粒体积分数 5% 下叶轮不同截面的速度分布。可以看出,在叶轮前端面生成了旋涡,且其主要位于叶片的折点之前,靠近压力面一侧,并沿压力面向吸力面发展。而叶轮的中间及后截面,并未观察到明显的漩涡结构。由于流体在进入叶轮时存在流动分离、导致流速分布不均,因此在叶轮的前端面形成旋涡。随着流体进一步进入叶轮内部,流速逐渐增大,主流能量占据主导地位,流动趋于稳定,旋涡结构被破坏,因此在叶轮的中后截面未出现明显的旋涡结构。

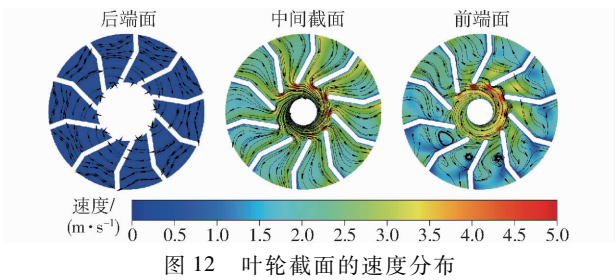


Fig. 12 Velocity distribution in impeller cross-section

无叶腔位于叶轮前端,该区域受循环流的作用影响,如图 13 所示,无叶腔内流速分布不均匀,该区域形成与叶轮旋转方向一致的环向流动,在无叶腔的外围,形成高流速区。在无叶腔中部,由于进口管来流的惯性,导致流动分离及局部回流,该区域流速较低。

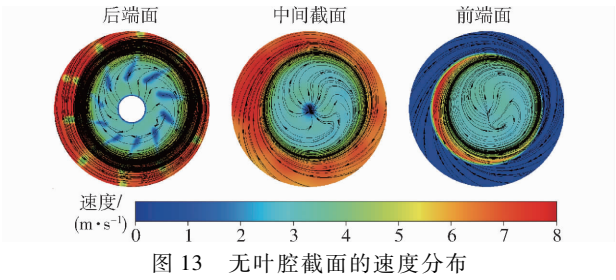


Fig. 13 Velocity distribution in bladeless cavity cross-section

2.3 蜗壳流动分析

在旋流泵中,泵腔内部的能量转换和压力提升主要依靠叶轮产生的离心力和蜗壳的扩压作用。此旋流泵采用半开式叶轮,前端设有无叶腔,且与蜗壳之间存在较大的间隙,容易产生复杂的流动结构,如回流、局部涡流以及流动分离等。

图 14 为在颗粒体积分数 5% 下蜗壳不同横截面的速度分布云图,图中显示靠近叶轮中截面,近叶轮出口区域速度最高,流体在蜗壳内呈现螺旋状流动,在蜗壳的扩散段速度逐渐降低,至蜗壳出口管部分速度最低。

图 15 为颗粒在不同体积分数下蜗壳出口截面的正则螺旋化云图以及基于 Q 准则同一阈值下的

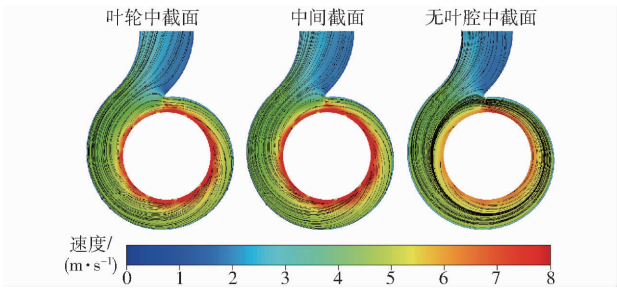


图 14 蜗壳横截面的速度分布

Fig. 14 Velocity distribution in volute cross-section

涡核分布图。图中显示蜗壳扩散管段出现了一束长度较大的漩涡,随颗粒体积分数的增加,涡核区域减小,且涡核靠近蜗壳前侧,这是由于这部分流体缺少叶轮约束,仅依靠循环流带动,受隔舌的阻碍发生流动分离,产生涡核。颗粒体积分数增加,颗粒之间的碰撞与流体的相互作用增强,湍流动能的耗散加剧,进而抑制了大区域涡核的形成,导致涡核的核心区域减小。

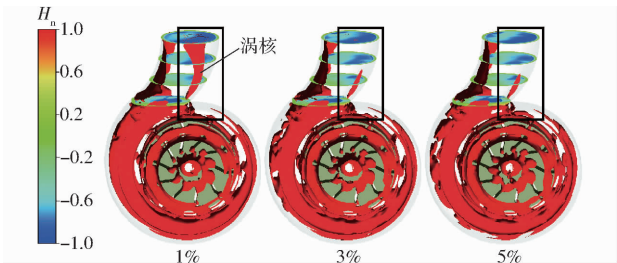


图 15 蜗壳出口截面正则螺旋化云图及涡核分布

Fig. 15 Contour plot of regularized spiral flow and vortex core distribution at volute outlet section

3 磨损分析

3.1 进口管内壁磨损分析

在旋流泵的整体运行中,进口管作为流体进入泵腔的第 1 道通道,其受到颗粒的冲击、摩擦以及湍流的作用,在长期运行中遭受不同程度的磨损。如图 16 所示,进口管靠近无叶腔侧壁面磨损较为严重,且呈螺旋状特征,随颗粒体积分数的增加磨损程度加剧,螺旋回流长度略微缩短,与图 7 结果对应。

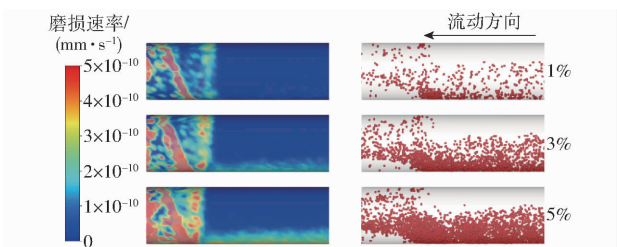


图 16 进口段磨损及颗粒分布图

Fig. 16 Wear and particle distribution in inlet section

为进一步了解颗粒对进口管壁面的磨损情况,以无叶腔与进口管交界处为初始位置,做 15 个厚度为 10 mm 的圆环,统计圆环内颗粒的平均速度,圆

环的外径与进口管直径一致为 94 mm,内径为 74 mm,如图 17 所示。

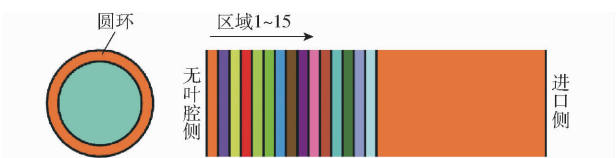


图 17 统计圆环位置示意图

Fig. 17 Schematic of statistical annular position

图 18 为进口管 15 个圆环区域内颗粒的平均速度,可以看出,在体积分数 1%、3%、5% 下,颗粒速度变化趋势一致,随着与无叶腔距离的增加,靠近进口管壁的颗粒因与管内主流相反,受流体阻力的影响,速度逐渐降低。在进口管中区域 1~12 内颗粒的平均速度随颗粒体积分数的增加逐渐减小,在区域 12~15 则相反,这是由于颗粒体积分数增加,螺旋回流长度变短,远端的颗粒方向改变再次流向无叶腔,所以颗粒体积分数较低的螺旋回流末尾区域内的平均速度较低。距无叶腔越远,进口管内壁的磨损程度越轻。进口管处由于回流现象,导致少量高速流颗粒摩擦进口管内壁,在结构改进设计中,进口内壁可增加短导流叶片,在保证过流面积的同时,减少进口回流,降低进口磨损。

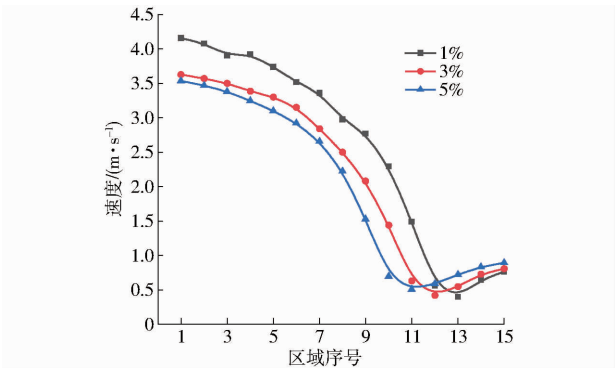


图 18 进口管不同区域内颗粒的平均速度

Fig. 18 Average velocity of particles in different regions of inlet pipe

3.2 叶轮磨损分析

如图 19 所示,不同体积分数下颗粒对叶轮磨损分布表明,叶片压力面的磨损明显高于吸力面,且进口边的磨损速率高于出口边。叶片压力面的磨损主要靠近后盖板附近,而后盖板的磨损主要发生在靠近压力面一侧,并且呈现出由压力面向吸力面逐渐减轻的趋势。

为了进一步研究叶轮叶片压力面及吸力面的磨损分布,将压力面和吸力面均分成 48 个等面积的小平面,自前端面至后盖板均分为 4 份,自进口边至出口边均分成 12 份,如图 20 所示。

如图 21 所示,随颗粒体积分数的增加,叶片的

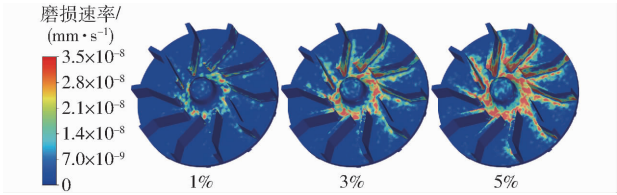


图 19 叶轮磨损分布图

Fig. 19 Impeller wear distribution

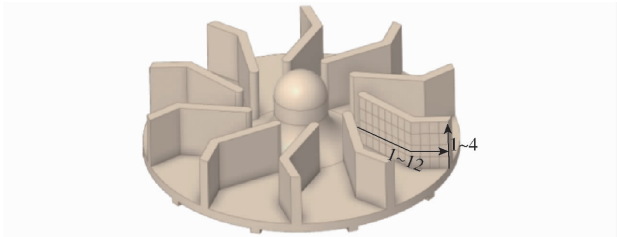


图 20 叶轮叶片均分平面示意图

Fig. 20 Schematic of impeller blade mid-plane

压力面与吸力面的磨损速率均增加,且压力面的磨损速率远高于吸力面。压力面的高磨损位置分别位于叶片进口边区域以及出口边和折角之前靠近后盖板的区域。吸力面的高磨损位置位于叶片进口边靠近前端面以及后盖板的区域。对于叶片进出口及折边之前区域的磨损均可通过局部强化处理(热处理、硬化技术等)来提高局部耐磨性。在结构设计和工程应用中,对于折角前区域磨损较大,可通过将第 1 与第 2 段折边采用圆角过渡来降低磨损程度。

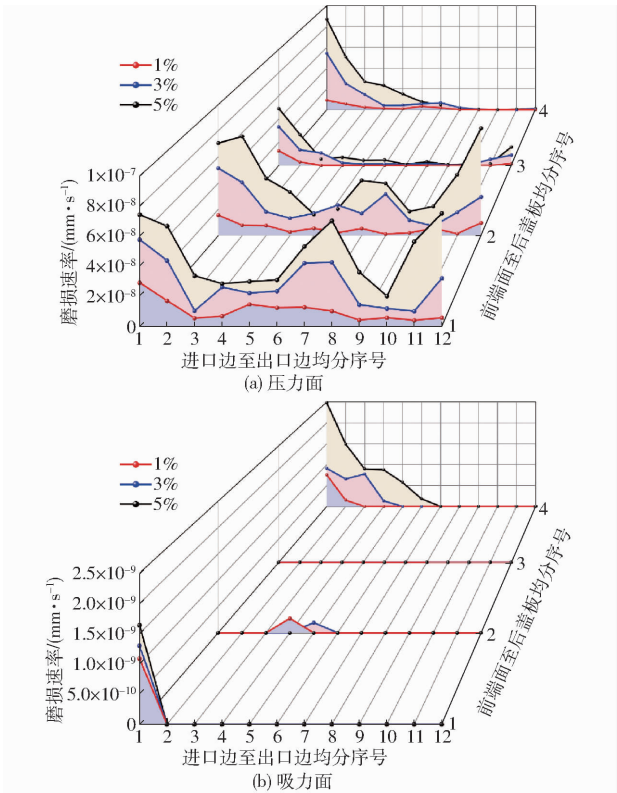


图 21 叶片均分平面的磨损速率

Fig. 21 Wear rate on impeller blade mid-plane

如图 22、23 所示,分别为颗粒在体积分数 5%

下叶片的切向累计剪切强度以及法向累计冲击强度。叶片压力面与吸力面的磨损主要是由颗粒横向切割摩擦作用导致的,叶片入口边缘还遭受颗粒的法向冲击作用,所以叶片入口边缘磨损最为严重。

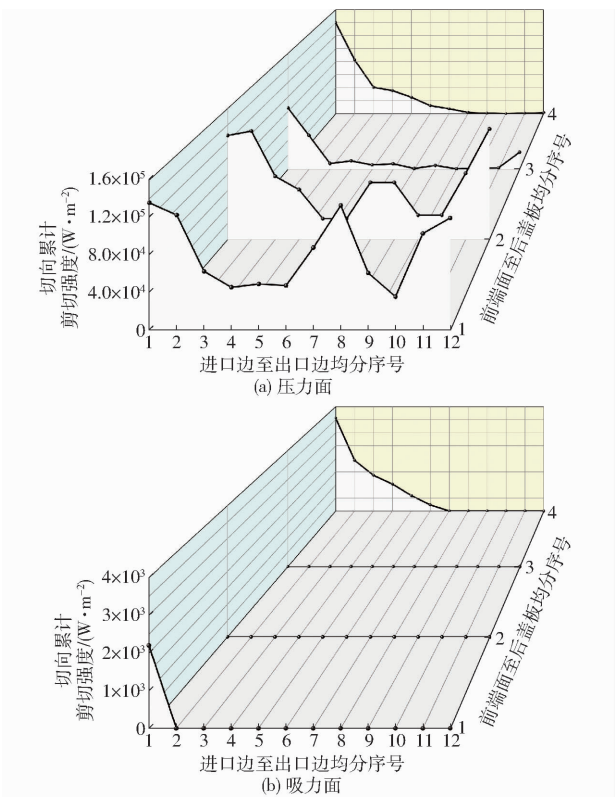


图 22 颗粒体积分数 5% 下叶片切向剪切强度
Fig. 22 Tangential shear strength on blade at 5% concentration of particles

图 24 为体积分数 5% 的颗粒在叶轮内部的分布情况,并以速度对颗粒着色。叶片压力面的磨损主要集中在叶片靠近后盖板区域,故将叶轮沿轴向分为前后两部分,厚度均为 11 mm。在重力作用下,颗粒通过叶轮进口时,由于流道较窄,颗粒在此区域聚集,且轴向运动转变为切向运动,在叶片表面产生较强的剪切应力。同时,颗粒与压力面入口边频繁发生摩擦和冲击,导致该区域磨损加剧。在压力面出口边,由于颗粒流速较高,受到离心力作用,颗粒与叶片表面发生频繁的冲击和摩擦,且颗粒主要分布在叶轮后部,所以磨损主要集中在靠近后盖板区域。此外,压力面折角前的位置磨损速率也较高。由于折角的存在,颗粒沿第 1 段折边运动,而在第 2 段折边处,由于距折角较近,颗粒与其接触碰撞较少,使该区域的磨损相对减轻。

3.3 蜗壳磨损分析

旋流泵泵腔内存在循环流与贯通流两种主要流动,对颗粒的分布及蜗壳壁面的磨损均产生重要影响。图 25 为颗粒不同体积分数下蜗壳的磨损分布图,随着颗粒体积分数的增加,蜗壳磨损速率相应增

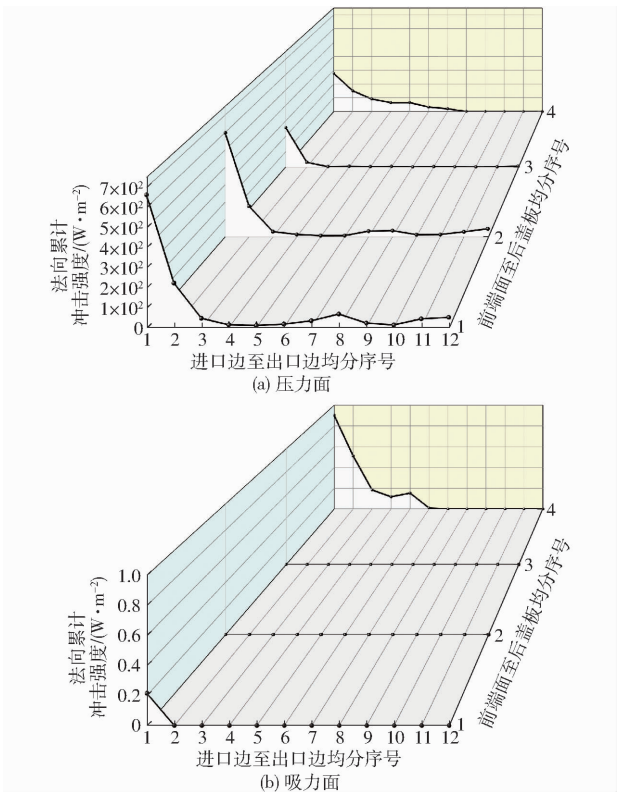


图 23 颗粒体积分数 5% 下叶片法向累计冲击强度
Fig. 23 Normal cumulative impact strength on blade at 5% concentration of particles

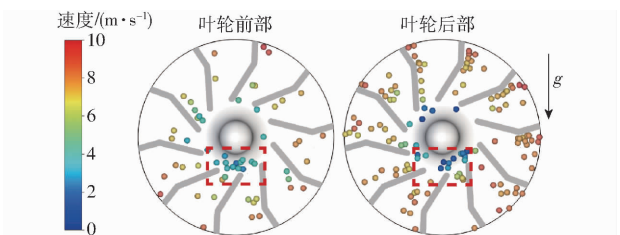


图 24 颗粒体积分数 5% 下叶片前后部分布
Fig. 24 Distribution of front and rear parts of blade at 5% concentration of particles

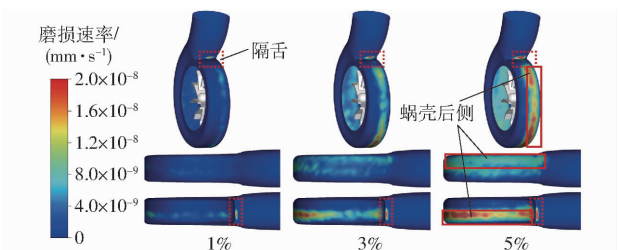


图 25 颗粒不同体积分数下蜗壳磨损分布图
Fig. 25 Wear distribution in volute at different concentrations of particles

大。其中隔舌处由于过流面积较小,颗粒速度快,撞击频率高,成为蜗壳磨损最严重的部位。蜗壳壁面磨损自第 I 至第 V 断面主要集中于后侧,且磨损区域集中,呈现为带状分布,磨损程度较大;第 V 到第 X 断面受无叶腔内循环流的影响,颗粒分布趋于扩散,磨损向蜗壳前侧发展,且磨损程度相对较轻。

图 26 为颗粒不同体积分数下,与叶轮出口同宽截面的颗粒分布及速度图。由图 26 可知,蜗壳隔舌位置磨损最为严重,其主要原因在于,颗粒经过叶轮及蜗壳入口区域后,由于惯性作用,与隔舌发生碰撞并在该区域聚集,导致局部颗粒体积分数相对较高。同时,这些颗粒保持较高的相对速度,持续对隔舌区域进行冲击和摩擦,进而引发严重的磨损。

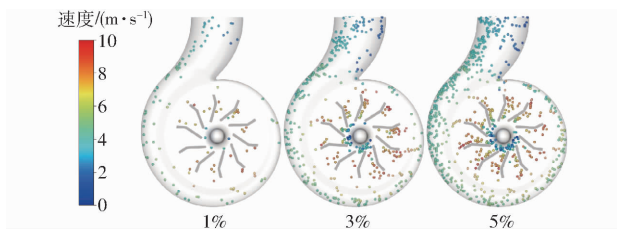


图 26 不同体积分数下蜗壳内颗粒分布及速度图

Fig. 26 Particle distribution and velocity in volute at different concentrations

4 结论

(1)随着颗粒体积分数的增加,旋流泵的扬程和效率均出现下降趋势,当颗粒体积分数从 1% 提升到 3% 时,其下降幅度大于体积分数从 3% 增至 5% 的情况。

(2)随着颗粒体积分数的增加,旋流泵的叶轮、蜗壳和进口管的磨损速率均呈现上升趋势,且过流部件内壁磨损面积和磨损程度也相应增大。

(3)叶轮叶片的磨损主要是由摩擦磨损导致,集中在压力面,进口边的磨损速率高于出口边,且磨损主要集中在靠近后盖板区域,后盖板的磨损速率自叶片压力面至叶片吸力面递减。

(4)蜗壳隔舌区,由于断面面积小,流速大,受到颗粒碰撞较为严重,因此磨损较为严重;蜗壳壁面磨损自第 I 至第 V 断面主要集中于后侧,磨损区域集中且严重,呈现为带状分布;第 V 到第 X 断面受无叶腔内循环流的影响,磨损向蜗壳前侧发展,颗粒分布趋于扩散,磨损较轻。

(5)旋流泵进口管内壁区发生螺旋回流,该螺旋回流从无叶腔产生并演化进入到进口内壁,螺旋回流方向与叶轮的旋转方向相同;对进口过流面积产生一定影响,但是对整泵性能影响不大。随颗粒体积分数的增加,螺旋回流长度逐渐减小。进口管内壁出现螺旋形磨损特征,且距离泵腔越远,进口管内壁的磨损程度越小。

(6)叶轮、蜗壳、进口的磨损分布不均,最大磨损位置集中,主要过流部件可采用高耐磨材料以及对高磨损位置进行局部强化处理,来提高耐磨性能。在结构设计和改进方面,可通过进口管内壁增加短导流叶片,减少螺旋回流损失和降低磨损;叶轮折角位置可改为圆角过渡,减少颗粒对折角前附近区域的摩擦和冲击,提高旋流泵运行可靠性、稳定性以及延长使用寿命。

参 考 文 献

- [1] Quan H, Guo Y, Li R, et al. Optimization design and experimental study of vortex pump based on orthogonal test[J]. Science Progress, 2020, 103(1): 0036850419881883.
- [2] 沙毅. 旋流泵性能及内部流场试验分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 141 - 146.
Sha Yi. Experiments on performance and internal flow of a vortex pump[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 141 - 146. (in Chinese)
- [3] 权辉, 康蕾, 郭英, 等. 固相浓度对旋流泵内循环流动结构的影响[J]. 排灌机械工程学, 2021, 39(6): 551 - 561.
Quan Hui, Kang Lei, Guo Ying, et al. Effect of solid concentration on circulation flow and hydraulic characteristics in vortex pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(6): 555 - 561. (in Chinese)
- [4] 杨敏官, 高波, 刘栋, 等. 旋流泵内部盐析两相流速度场的 PDPA 实验[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2): 237 - 240.
Yang Minguan, Gao Bo, Liu Dong, et al. Experimental investigation of salt-out two-phase flow in a vortex pump by PDPA measurements[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(2): 237 - 240. (in Chinese)
- [5] Gao X, Zhao T, Shi W, et al. Numerical investigation of an open-design vortex pump with different blade wrap angles of impeller[J]. Processes, 2020, 8(12): 1601.
- [6] 沙毅, 刘祥松. 旋流泵固液两相流输送特性试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 76 - 82.
Sha Yi, Liu Xiangsong. Performance test on solid-liquid two-phase flow hydrotransport of vortex pump[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 76 - 82. (in Chinese)
- [7] Mao W Y, Song P Y, Deng Q G, et al. Numerical simulation on the performance of the vortex pump for transporting solid-liquid two-phase with light particles[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2016: 012018.
- [8] 张东伟, 杨敏官, 高波, 等. 旋流泵内颗粒分布特性及对泵性能的影响[J]. 流体机械, 2013, 41(5): 15 - 18.
Zhang Dongwei, Yang Minguan, Gao Bo, et al. Particle concentration distribution and its effect on performance in a vortex pump[J]. Fluid Machinery, 2013, 41(5): 15 - 18. (in Chinese)
- [9] 沙毅, 朱颖, 武鹏, 等. 旋流泵菜籽-水两相流浓度特性实验与流场数值模拟[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 173 -

180.

Sha Yi, Zhu Ying, Wu Peng, et al. Hydrotransport test with variable rapeseed concentration and flow field numerical simulation of vortex pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 173-180. (in Chinese)

- [10] 施卫东, 施亚, 高雄发. 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.

Shi Weidong, Shi Ya, Gao Xiongfa. Simulation and experiment on flow characteristics of large particles in vortex pump based on DEM-CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 176-185. (in Chinese)

- [11] 高雄发, 郜聪, 张德胜, 等. 基于 CFD-DEM 的旋流泵混合颗粒固液两相流研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 163-170, 248.

Gao Xiongfa, Gao Cong, Zhang Desheng, et al. Solid-liquid two-phase flow of mixed particles in vortex pump based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 163-170, 248. (in Chinese)

- [12] Koirala R, Neopane H P, Zhu B, et al. Effect of sediment erosion on flow around guide vanes of Francis turbine[J]. Renewable Energy, 2019, 136: 1022-1027.

- [13] Khalid Y A, Sapuan S M. Wear analysis of centrifugal slurry pump impellers[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2007, 59(1): 18-28.

- [14] 孙雪雷, 刘厚林, 谈明高, 等. 矿粒粒径对深海采矿扬矿泵磨损特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(11): 1097-1103.

Sun Xuelei, Liu Houlin, Tan Minggao, et al. Influence of mineral particle size on wear characteristics of deep-sea mining lifting pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(11): 1097-1103. (in Chinese)

- [15] 曹卫东, 张洋杰, 茅佳雨, 等. 高速多级深井泵固液两相流及磨损特性[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(5): 433-439.

Cao Weidong, Zhang Yangjie, Mao Jiayu, et al. Solid-liquid two-phase flow and wear characteristics of high-speed multi-stage deep-well pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(5): 433-439. (in Chinese)

- [16] Liu Z, Li G. Numerical simulation of centrifugal pump impeller erosion caused by particles in lead-bismuth alloy[J]. International Journal of Modern Physics B, 2023, 37(23): 2350225.

- [17] 刘栋, 黄凯, 倪子建, 等. 叶片包角对离心泵水力性能及磨损特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(10): 973-980.

Liu Dong, Huang Kai, Ni Zijian, et al. Effects of blade wrap angle on hydraulic performance and erosion characteristics of centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(10): 973-980. (in Chinese)

- [18] Wang K, Liu H, Wang L, et al. Effect of particle size on vortex structure and erosion behavior of semi-open centrifugal pump[J]. Energy, 2024, 293: 130576.

- [19] Peng G J, Luo Y Y, Wang Z W. Research on wear properties of centrifugal dredge pump based on liquid-solid two-phase fluid simulations[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2015: 042048.

- [20] Pu W, Ji L, Li W, et al. Study on the erosion characteristics of mixed-flow pumps under forced action of solid particles[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46(10): 619.

- [21] Song X, Yao R, Shen Y, et al. Numerical prediction of erosion based on the solid-liquid two-phase flow in a double-suction centrifugal pump[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(8): 836.

- [22] Shen Z, Chu W, Li X, et al. Sediment erosion in the impeller of a double-suction centrifugal pump: a case study of the Jingtai Yellow River Irrigation Project, China[J]. Wear, 2019, 422: 269-279.

- [23] Zhang W, Yang S, Wu D, et al. Effect of particle mass concentration on erosion characteristics of self-priming pump[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(23): 6782-6797.

- [24] Li Y, Zhang H, Lin Z, et al. Analysis of particle motion and wear characteristics for mixed particle sizes in centrifugal pumps[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(9): 4705-4716.

- [25] Kang C, Cao Q, Teng S, et al. Wear characteristics of a centrifugal pump transporting solid-liquid mixture: an experimental and numerical study[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2024, 15(1): 102277.

- [26] 王田田, 李俊宏, 南玲博, 等. 可变形磨损模型下微型离心泵复合磨损研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 136-145.

Wang Tiantian, Li Junhong, Nan Lingbo, et al. Research on composite wear of micro centrifugal pump based on deformable wear model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 136-145. (in Chinese)