doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.04.013

可变形磨损模型下微型离心泵复合磨损研究

王田田[1]　李俊宏[2]　南玲博[1]　陈帝伊[1]　曹东亮[3]　韩　伟[4]

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100;2.中山大学航空航天学院,广州 510275;
3.海尔集团,青岛 266101;4.兰州理工大学能源与动力工程学院,兰州 730050)

摘要:为了探究微型离心泵在不同颗粒体积分数下的复合磨损类型与磨损变化,基于计算流体动力学与离散元耦合的方法,通过可变形磨料磨损 Archard 模型与可变形冲蚀磨损 Oka 模型对离心泵在不同颗粒体积分数(2%、4%、6%、8%、10%、12%)下的颗粒-部件碰撞占比率、磨损分布与演化进行了研究。通过对比实验发现颗粒体积分数在 4% 附近时颗粒与叶轮叶片、蜗壳碰撞占比率呈现不同的变化趋势。离心泵磨损以磨料磨损为主,磨料磨损中蜗壳为磨损最严重的部件,占总磨料磨损量的 68.5%,随着颗粒体积分数的增加,蜗壳处磨料磨损由断面Ⅷ向断面Ⅰ演化,蜗壳前后端先后磨损。冲蚀磨损高磨损区域主要集中于叶轮叶片,占冲蚀磨损总量的 95.83%,蜗壳处冲蚀磨损断面演化规律与磨料磨损变化规律近似,但蜗壳后端最先被磨损。颗粒体积分数对蜗壳磨料磨损变形量影响较大,蜗壳、叶轮磨料磨损变形量与冲蚀磨损变形量具有相似的变化趋势。

关键词:微型离心泵;磨料磨损;冲蚀磨损;可变形磨损;颗粒体积分数;CFD-DEM

中图分类号:S276.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)04-0136-10　　**OSID**:

Complex Wear of Micro Centrifugal Pump under Deformable Wear Model

WANG Tiantian[1]　LI Junhong[2]　NAN Lingbo[1]　CHEN Diyi[1]　CAO Dongliang[3]　HAN Wei[4]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *School of Aeronautics and Astronautics*, *Sun Yat-sen University*, *Guangzhou* 510275, *China*
3. *Haier Group*, *Qingdao* 266101, *China*
4. *School of Energy and Power Engineering*, *Lanzhou University of Technology*, *Lanzhou* 730050, *China*)

Abstract: Micro centrifugal pump has a wide range of applications in the field of medical and chemical sewage treatment, but it often faces the problem of wear in use. In order to explore the compound wear type and wear change of micro centrifugal pump under different particle volume fractions, based on the method of computational fluid dynamics and discrete element coupling, and the deformable abrasive wear Archard model and the deformable erosion wear Oka model, the particle-component collision ratio, wear distribution and evolution of centrifugal pumps under different particle volume fractions (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%) were studied. The results showed that when the particle volume fraction was near 4%, the impact ratio between impeller blade and volute showed different trends. The wear in centrifugal pump was mainly abrasive wear, and the parts with the most serious wear in the abrasive wear accounted for 68.5% of the total abrasive wear. With the increase of particle volume fraction, the abrasive wear at the volute changed from section Ⅷ to section Ⅰ, and the front and back ends of the volute wear successively. The high wear area of erosion wear was mainly concentrated in the impeller blade, accounting for 95.83% of the total erosion wear. The evolution law of erosion wear section at the volute was similar to the change law of abrasive wear, but the back end of the volute was worn first. The particle volume fraction had more influence on the abrasive wear deformation of volute, and the abrasive wear deformation of volute and impeller had a similar change trend to the erosion wear deformation.

Key words: micro centrifugal pump; abrasive wear; erosion wear; deformable wear; particle volume fraction; CFD-DEM

收稿日期:2023-08-23　修回日期:2023-12-06

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52339006)

作者简介:王田田(1996—),男,博士生,主要从事水动力学及水力机械研究,E-mail:Tiantian7921@163.com

通信作者:陈帝伊(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事水电站及泵站工程研究,E-mail:diyichen@nwafu.edu.cn

0　引言

微型离心泵广泛应用于航天、医疗、矿业、生物技术、化学污水处理等领域，并发挥着不可替代的作用[1]。泵件的使用寿命和性能直接制约了这些领域的发展与经济效益，其中，泵件的磨损问题尤为突出，泵件磨损程度加剧会导致泵件效率下降、能耗激增、噪声加剧甚至部件失效等问题。因此进一步揭示微型离心泵磨损机理及其对性能的影响，对于提高泵的可靠性、降低运维成本至关重要。

目前，对于离心泵磨损问题的研究，外界因素影响的不确定性以及旋转机械的复杂性导致实验开展难度大、分析困难等问题，数值模拟方法研究成为一种主流研究手段，常用的理论模型有欧拉-欧拉法与欧拉-拉格朗日法[2]。然而，已有研究发现当颗粒粒径与形状对离心泵的磨损产生较大的影响时欧拉-欧拉法不适用于固液两相流的研究，而欧拉-拉格朗日法可以在拉格朗日坐标系下综合考虑离散项的特点[3]，CFD－DEM 法作为欧拉-拉格朗日体系下主流的研究方法被领域内学者所重视。文献[4]利用 CFD－DEM 法探究了离心泵中的颗粒运动，发现固体颗粒在泵中的运动及其对离心泵性能的影响随时间的变化而变化。文献[5]将 CFD－DEM 耦合法引入旋流泵中模拟了不同粒径、体积分数大颗粒的物理运动特性，结果表明旋流泵内部存在 3 种不同的颗粒运输方式，颗粒主要分布在蜗壳后侧。文献[6]基于 CFD－DEM 与实验探究了多级离心泵中的颗粒分布与运动，实验结果证明了 CFD－DEM 耦合法的有效性，并发现扩散段出口处存在颗粒局部团聚是由回流引起的。

颗粒对离心泵的磨损极其复杂，受到颗粒尺寸、形状、浓度、硬度、冲击角、冲击流速、离心泵流量、叶片进出口角、包角、安放角的影响，此外，不同工况下磨损程度不同，同一工况下离心泵各部件的磨损程度也不同[7-8]。目前，对离心泵的磨损研究主要从单磨损模型出发利用欧拉-拉格朗日法探究颗粒特性、离心泵特性对离心泵的磨损影响。文献[9]利用图尔萨大学的磨损模型对双吸离心泵的磨损特性进行了分析，发现叶轮表面的磨损率、冲击角、固相体积分数和速度存在周期性。文献[10]利用 Archard 磨损模型与 CFD－DEM 耦合法对泥浆泵衬套磨损进行了数值模拟，并将数值模拟结果与现场实验进行了对比，得出了固体颗粒流特性是衬套磨损的主要因素。文献[11]采用油漆法与 CFD－DEM 法对照的方式分析了不同流速和颗粒体积分数下固液变化与磨损特性，认为叶轮、蜗壳的瞬时磨损率呈周期性变化。

上述研究虽然对离心泵的磨损进行了系统分析与研究，但在实际应用中，离心泵的磨损是一个多类型磨损，包括磨料磨损、冲蚀磨损、黏着磨损、表面疲劳磨损、腐蚀磨损[12]，且磨损过程中伴随着结构体的变形，而结构体变形对颗粒运动会产生较大的影响。鉴于此，本文基于颗粒体积分数的 CFD－DEM 耦合法结合可变形磨损 Archard、Oka 模型对单级微型离心泵进行数值模拟，分析不同颗粒体积分数下离心泵各部件不同磨损类型的分布与变化，以期为单级离心泵的结构优化与安全运行提供理论支持。

1　模型建立及边界条件

以某微型单级离心泵为研究对象，利用 Siemens NX 对离心泵进水段、叶轮、蜗壳、出水段进行全流域建模，如图 1 所示。基本设计参数为：进出口段直径 D 为 10 mm、叶片数 Z 为 4、流量 Q 为2.8 L/min、最大扬程 H 为 1 m、转速 n 为 2 650 r/min，离心泵磨损模拟使用的泥沙颗粒为 EDEM 自带球形颗粒，粒径为 40 μm，颗粒体积分数分别为 2%、4%、6%、8%、10%、12%。

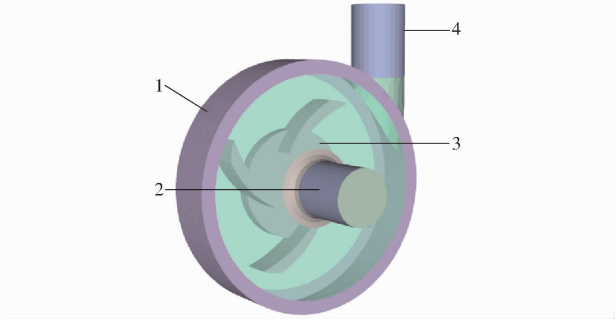

图 1　离心泵三维模型图

Fig. 1　Three-dimensional model of centrifugal pump

1. 蜗壳　2. 进水管　3. 叶轮　4. 出水管

采用有限体积法对离心泵内部流场进行分析时需要进行网格化，由于离心泵内部结构复杂且多变，因此进出水段等规则形状结构采用 Oblock 进行六面体结构网格划分，叶轮、蜗壳等复杂结构采用四面体非结构网格划分。虽然大量的网格增加了计算精度，但也增加了计算量和计算开销，因此从收敛角度对网格数量进行优化。将网格节点数提高到 1.5、2、3 倍[13]，以扬程为评判标准，对 1.2 m/s 工况下的离心泵外特性进行模拟，综合考虑准确性与计算资源后确定总网格数为 270 226 个（图 2），其中结构网格数为 72 118 个，非结构网格数为 198 108 个[14]。

采用基于颗粒体积分数的欧拉-拉格朗日法对离心泵中的固液两相流进行了模拟，采用的耦合接

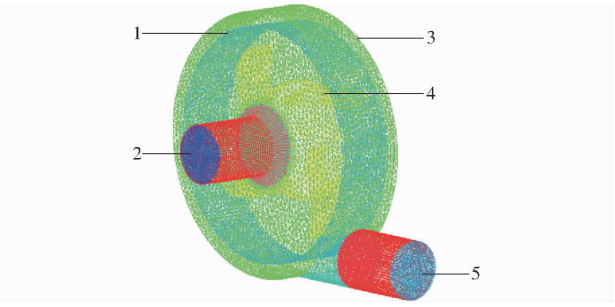

图 2 离心泵全流域网格图

Fig. 2 Grid diagram of whole basin of centrifugal pump

1. 交界面 2. 进口 3. 蜗壳 4. 叶片 5. 出口

口是以 Fluent 中 DPM 模型为模板的耦合接口。其中流体相在欧拉坐标系下计算,选用的湍流模型为结合标准 $k-\varepsilon$ 模型与标准 $k-\omega$ 模型优点的 SST $k-\omega$模型,为了准确求解边界层流体物理变化,对边界层进行了加密,y^+符合计算要求,在文献[8]中已有说明。进口采用速度入口边界条件,出口采用自由出流边界条件,求解方法采用 SIMPLE 算法。在拉格朗日坐标系下计算颗粒的受力与运动,颗粒与几何体的接触模型采用 Hertz - Mindlin 模型,材料参数与接触参数如表 1、2 所示[4],瑞利时间步长为欧拉时间步长的 1/10。

表 1 材料属性

Tab. 1 Material properties

类型	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	剪切模量/Pa
颗粒	0.25	1 500	4×10^7
几何体	0.30	7 800	7×10^7

表 2 接触参数

Tab. 2 Contact parameters

类型	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
颗粒-颗粒	0.64	0.27	0.01
颗粒-几何体	0.50	0.15	0.01

2 研究方法

2.1 液相模型

流体进入离心泵随着叶轮转动时蕴含着高雷诺数的湍流紊动并伴随着能量与动量的交换。在求解中流体被视为连续相的不可压缩流处理,考虑流体的重力、粘滞力等,连续方程与动量方程为[15-16]

$$\frac{\partial\varepsilon\rho}{\partial t}+\nabla\rho\varepsilon v=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial\varepsilon\rho v}{\partial t}+\nabla\rho\varepsilon\mu v=-\nabla\rho+\nabla\mu\varepsilon\nabla v+\rho\varepsilon g-F_e \tag{2}$$

式中 ρ——水相密度,kg/m^3

ε——体积分数项

t——时间,s

μ——动力粘度系数,Pa·s

v——水相速度,m/s

g——重力加速度,m/s^2

F_e——动量汇

2.2 固相模型

在固液两相流中,颗粒的计算主要用离散元方法(DEM),运用牛顿第二定律和接触模型确定颗粒的位置、受力,其基本原理是力-位移的关系,颗粒与颗粒、颗粒与几何体之间的碰撞采用 Hertz - Mindle 模型计算,本文计算中主要考虑重力和曳力,其他附加力为升力等,颗粒平衡方程为[17-18]

$$m_p=\frac{\mathrm{d}v_p}{\mathrm{d}t}=F_{d,i}+F_{\nabla p,i}+F_{\nabla\tau,i}+F_{Ar,i}+F_{vm,i}+F_{Saff,i}+F_{Mag,i}+G_p+\sum F_{p-p} \tag{3}$$

$$I_p\frac{\mathrm{d}\omega_p}{\mathrm{d}t}=\sum T_{p-p} \tag{4}$$

式中 m_p——颗粒质量,kg

v_p——颗粒速度,m/s

I_p——惯性矩,kg·m^2

ω_p——颗粒角速度,rad/s

G_p——颗粒重力,N

$F_{d,i}$——曳力,N

$F_{\nabla p,i}$——压力梯度力,N

$F_{\nabla\tau,i}$——粘性阻力,N

$F_{Ar,i}$——浮力,N

$F_{vm,i}$——虚拟质量力,N

$F_{Saff,i}$——萨尔曼升力,N

$F_{Mag,i}$——马格努斯升力,N

F_{p-p}——单个颗粒受到其他颗粒的作用力,N

T_{p-p}——颗粒受到其他颗粒的力矩,N·m

2.3 磨损模型

颗粒接触材料的磨损是由一系列微观力学现象造成的,包括切削、断裂、塑性变形、冲击、疲劳等。虽然这些微观力学现象具有一定的复杂性和多样性,但与颗粒相接触产生的磨损可有效地分为两大类:磨料磨损和冲蚀磨损。当颗粒在设备表面滑动时会产生磨料磨损。目前,离心泵的磨损计算没有一个普适性公式,但可通过冲击角度、冲击速度、材料、颗粒形状等代入经验模型计算,较常见的经验模型有 Finnie 模型、Tabakoff 模型,这两种模型较适用于碳钢材料的磨损预测。基于 Archard 理论的传统 Archard wear 模型利用法向接触力与滑动距离计算磨料磨损量,被广泛应用于磨料磨损的工程计算,Oka wear 模型利用颗粒冲击而导致结构体体积变化的冲蚀磨损,被广泛应用于冲蚀磨损工程计算[19]。但磨损过程中伴随着结构体变形,为了准确计算磨

料磨损与冲蚀磨损的变化，通过基于可变形的 Archard wear 模型[20-21]与可变形的 Oka wear 模型[22-23]分别预测离心泵的磨料磨损、冲蚀磨损位置，计算磨损量、结构体变形量。

Archard wear 模型为

$$h=\frac{KF_n d_t}{AH_c} \tag{5}$$

式中　h——磨料磨损量，mm

K——磨损系数　　F_n——法向载荷，N

d_t——摩擦行程，mm

H_c——材料硬度，HB

A——摩擦掉材料面积，mm^2

Oka wear 模型为

$$D_w=\frac{g'(\alpha)E(\alpha)m_p}{A} \tag{6}$$

其中

$$E(\alpha)=65W^{-k_1}\left(\frac{v_c}{104}\right)^{2.3H_v^{0.038}}\left(\frac{d}{0.326}\right)^{0.19} \tag{7}$$

$$g'(\alpha)=\sin\alpha^{0.71H_v^{0.14}}(1+H_v(1-\sin\alpha))^{2.4H_v^{-0.04}} \tag{8}$$

式中　D_w——冲蚀磨损量，mm

α——颗粒冲击角，(°)

$E(\alpha)$——单位质量磨损体积，mm^3

$g'(\alpha)$——归一化侵蚀冲击角函数

W——磨损常数

v_c——颗粒冲击速度，m/s

H_v——维氏硬度，GPa

d——颗粒直径，mm

k_1——实验推导常数

2.4　数模可行性校验

2.4.1　内流场校验

为了验证数值模拟流场的准确性，本次研究在西北农林科技大学水利与建筑工程学院实验室进行了水泵外特性实验验证，实验装置图见图 3。选取同一颗粒浓度下 7 种不同流速进行了验证，结果如图 4 所示，对比发现实验值与模拟结果误差在 5% 以内，认为流场模拟可靠。

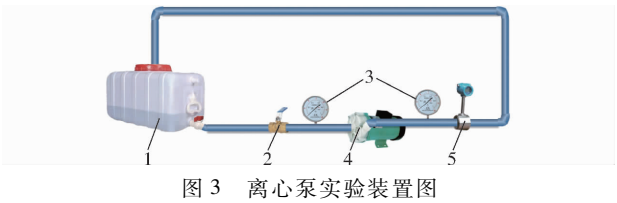

图 3　离心泵实验装置图

Fig. 3　Centrifugal pump experimental device diagram

1. 水箱　2. 阀门　3. 压力表　4. 离心泵　5. 流量计

2.4.2　磨损校验

由于微型离心泵磨损复杂且难以测量，为了验证该方法的准确性，采用文献[24-27]中的弯管磨损实验进行了定性定量对照。通过 CFD-DEM 耦合结合可变形 Archard 磨损模型、可变形 Oka 磨损模型对同工况下弯管进行 1∶1 的建模仿真，对比图 5a、5b 发现数值模拟的磨料磨损、冲蚀磨损位置分布与文献[24]一致。然后与文献[25-26]的实验进行了模拟对照，结果如表 3 所示，磨损量比文献[27]的结果更接近，证明了磨损模型的准确性。

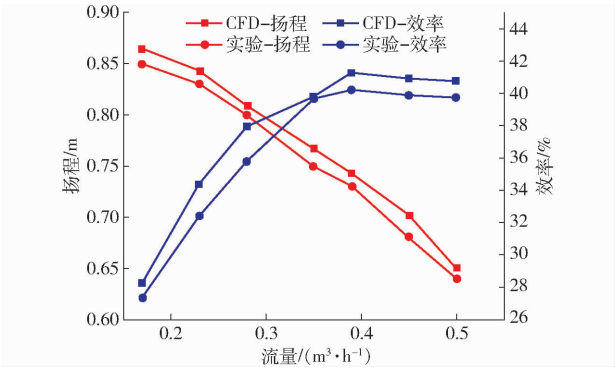

图 4　数值模拟与实验对比

Fig. 4　Comparison of numerical simulation and experimental results

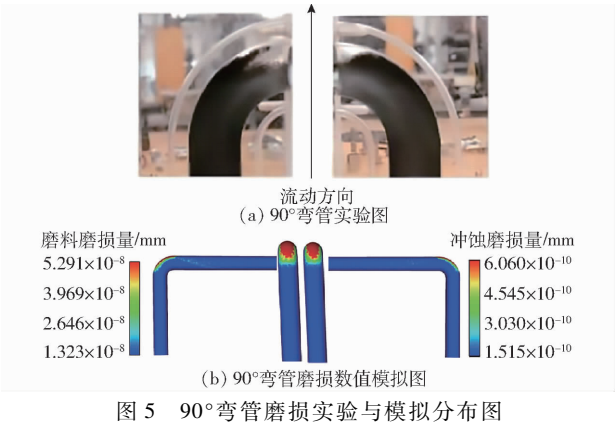

图 5　90°弯管磨损实验与模拟分布图

Fig. 5　Experimental and simulated distribution of 90° bending pipe wear

表 3　磨损模型预测与实验结果

Tab. 3　Results of wear model prediction and experiment

进口速度/(m·s^{-1})	粒径/μm	ER 探针实验质量磨损量/(m·kg^{-1})	仿真质量磨损量/(m·kg^{-1})	
			磨料磨损	冲蚀磨损
5	150	1.8×10^{-8}	9.41×10^{-9}	5.60×10^{-9}
10	150	9.3×10^{-8}	5.31×10^{-8}	8.44×10^{-9}

3　结果分析

3.1　颗粒分布

图 6 为颗粒进出平衡时不同颗粒体积分数下离心泵颗粒分布图。根据颗粒速度可将离心泵中的颗粒分布区分为颗粒滞留区、高速区、缓速区。

对比图 6a ~ 6f 可以发现颗粒滞留区主要集中在叶轮中心区域与出口管道,高速区主要集中在叶片头部区域,缓速区主要集中在蜗壳区域。当颗粒体积分数 φ 从 2% 升到 12% 时,颗粒在水流的挟持作用下进入离心泵冲击到叶轮,过多的颗粒数量增加了颗粒与叶轮的接触面积,叶轮处的颗粒滞留区在有限空间中从中心区域向圆周扩散。出口管道颗粒滞留区域在不同体积分数颗粒的作用下从靠近隔舌的出水管道边逐渐向管道中心区域靠近,说明随着颗粒数量的增加,出水管道处的滞留涡分布被打破,另一方面颗粒数量的增加致使通道区域颗粒碰撞加剧,颗粒速度降低产生滞留区。此外,由于离心泵的特殊性,颗粒高速区域并没有随着颗粒数量的增加而发生改变,最高速度也没有随着颗粒体积分数的增加而产生线性变化,但随着颗粒体积分数的增加,当颗粒体积分数超过 4% 时颗粒最大速度从 3.685 m/s 减小为 3.310 m/s,说明超过一定的颗粒体积分数时,颗粒会阻碍泵内流动,降低离心泵效率,同样颗粒数量的增加使得叶片通道处高速颗粒增加。

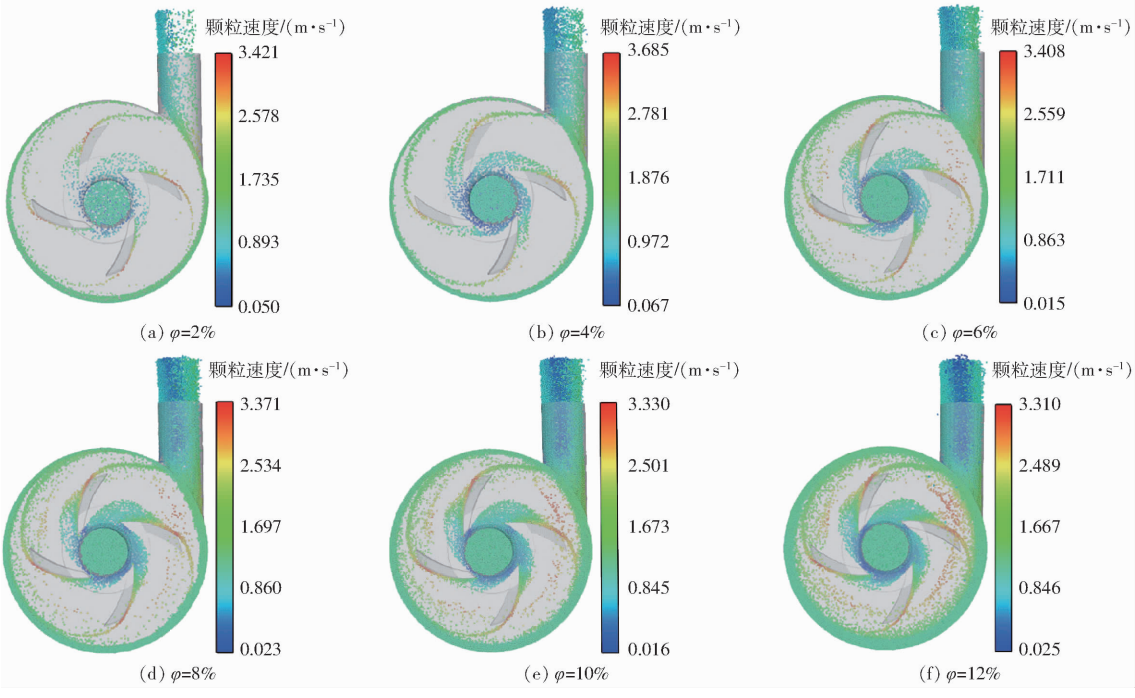

图 6 不同体积分数下离心泵颗粒分布图

Fig. 6 Granule distributions of centrifugal pump under different volume fractions

3.2 离心泵主要部件碰撞率

颗粒在离心泵中运行时会对各部件产生碰撞,包括一次碰撞、复合碰撞、虚假碰撞。由于叶轮、蜗壳等部件的碰撞率难以统计求解,因此本文用碰撞占比率表征颗粒-叶轮、颗粒-蜗壳碰撞次数与全部颗粒对离心泵碰撞次数的比值。图 7、8、9 分别为不同颗粒体积分数下离心泵叶轮叶片、蜗壳碰撞次数与碰撞占比率变化曲线。从图 8、9 中可以发现,颗粒体积分数小于 4% 时叶轮叶片碰撞占比率逐渐减小,颗粒体积分数大于 4% 时逐渐增加,蜗壳碰撞占比率呈相反的变化趋势,结合图 7 说明随着离心泵中颗粒数量的增加,叶轮叶片、蜗壳受到更多的颗粒碰撞,整体颗粒碰撞次数呈增加趋势,但不同工况下叶轮叶片、蜗壳受到的碰撞次数相较不同工况下的总碰撞占比并没有维持在一个平衡的状态,主要是因为随着颗粒体积分数的增加,由于颗粒之间的相互作用力,部分颗粒并没有撞击叶轮而是直接撞击蜗壳,而撞击叶轮后的颗粒继续撞击蜗壳,因此撞击蜗壳次数大于撞击叶轮次数,随着颗粒体积分数的继续增加,离心泵效率逐渐降低,导致颗粒逐渐堵塞在蜗壳内,减小了蜗壳与颗粒的撞击面积。

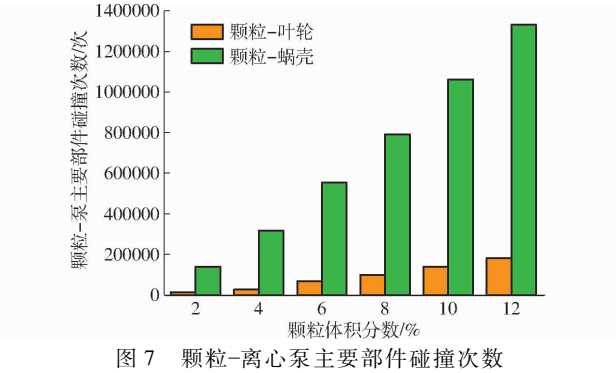

图 7 颗粒-离心泵主要部件碰撞次数

Fig. 7 Collision frequency diagram of main components of particle - centrifugal pump

3.3 磨损分布及变化

图 10 为颗粒体积分数 12% 时离心泵磨料磨

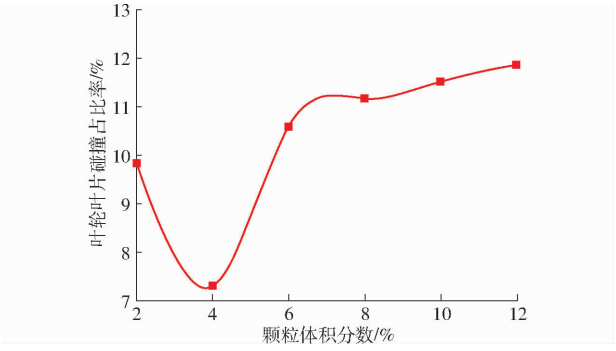

图 8　不同颗粒体积分数下叶轮叶片碰撞占比率变化曲线

Fig. 8　Variation of impact ratio of impeller blade under different particle volume fractions

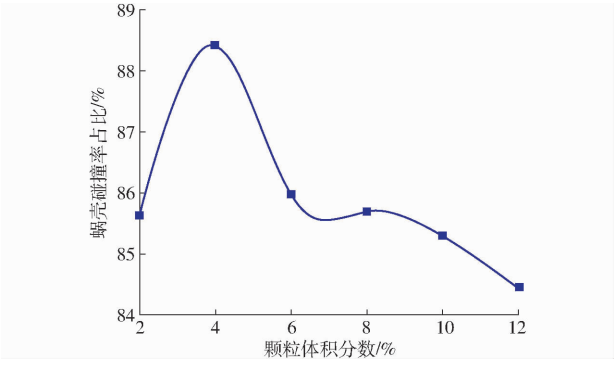

图 9　不同颗粒体积分数下蜗壳碰撞占比率变化曲线

Fig. 9　Variation of volute impact rate under different particle volume fractions

损、冲蚀磨损云图与磨损量对比图。由图 10a、10b 中可以看到，离心泵中的磨料磨损主要分布在蜗壳与叶轮叶片，叶轮叶片部位主要集中于叶轮与叶片压力面，冲蚀磨损主要集中在叶轮叶片。对比两种磨损类型在叶片压力面的分布可以发现磨料磨损最严重的部位主要集中在叶片压力面尾部，而冲蚀磨损主要集中在叶片压力面头部。对比图 10c 两种磨损量的变化可以发现离心泵中的磨损主要以磨料磨损为主。这是因为在水沙多相流运行中由于颗粒的跟随性，在水相复杂湍流作用下，颗粒对离心泵叶轮造成冲蚀磨损与磨料磨损，然后颗粒在惯性力、曳力等作用下沿着蜗壳壁面滑动，形成磨料磨损，磨料磨损过程大于冲蚀磨损过程。

3.4　不同体积分数下离心泵磨损分布

颗粒体积分数是流体机械磨损的重要影响因素，因此分析不同颗粒体积分数下不同磨损形式的变化尤为重要。图 11 为不同颗粒体积分数下离心泵磨料磨损量分布图。图中 A、B 分别表示蜗壳外表面靠近叶轮进口和远离叶轮进口的蜗壳前后端，从图中可以发现颗粒体积分数为 2% 时，磨损最严重的部位大多数集中在隔舌与蜗壳断面Ⅷ到Ⅶ处，少量分布在叶片压力面。随着颗粒体积分数增加，叶片压力面的高磨损区域逐渐增加并向叶片尾部与叶片头部靠近，其中叶片尾部比叶片头部磨损严重。当颗粒体积分数增加至 4% 时，蜗壳处的磨损部位逐渐扩展到断面Ⅴ，带块状分布逐渐变为片状分布，最大磨损量已超过 3.018×10^{-7} mm。当颗粒体积分数继续增加到 6% 时，蜗壳处最大磨损位置扩大到断面Ⅲ，主要集中在靠近前泵盖的蜗壳前端处，出水管道处磨损增加明显，叶片压力面处高磨损区域继续扩大。颗粒体积分数为 8% 时可以发现，蜗壳高磨损区域的增加主要在后泵盖相交处的蜗壳后端断面延伸，叶轮叶片处磨损分布变化不大。颗粒体积分数增加到 10% 时蜗壳表面 A、B 中间区域高磨损区域增加并向前端 A 靠近，颗粒体积分数为 12% 时蜗壳处高磨损区域逐渐向后端 B 靠近，逐步实现全蜗壳区域的磨损，叶轮叶片处高磨损区域也逐渐由叶片尾部过渡到叶轮处，这是因为随着颗粒数量的增加，在有限的泵体空间内由于颗粒与颗粒之间的碰撞使得颗粒在蜗壳中向另一侧运动。

冲蚀磨损是旋转机械中最常见的磨损形式，含介质的流体与固体表面接触使得表面材料发生损耗，根据流体介质的不同可将冲蚀磨损分为喷砂冲蚀与泥浆冲蚀。图 12 为同工况下离心泵冲蚀磨损量分布图。从图中可以发现，颗粒体积分数为 2% 时，离心泵中最严重的冲蚀磨损区域主要分布在叶片压力面，隔舌与蜗壳处含有少部分。颗粒体积分数增加到 4% 时，叶片尾部处的高磨损区域已扩大到叶轮，蜗壳处高磨损区域从断面Ⅷ扩展到断面Ⅶ

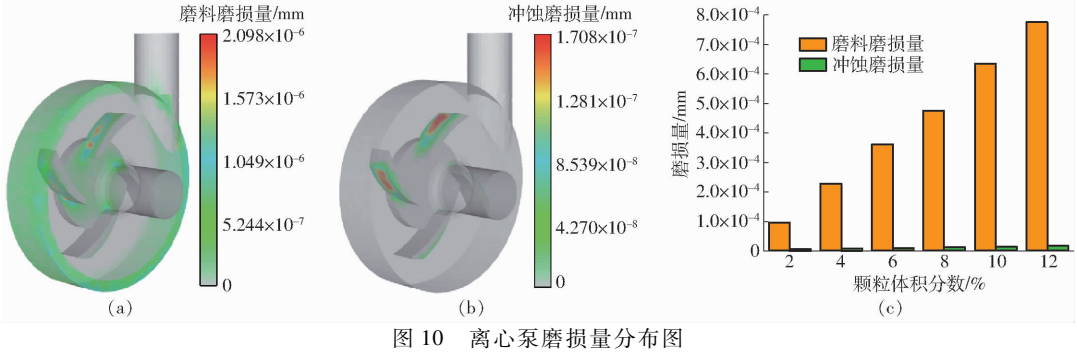

图 10　离心泵磨损量分布图

Fig. 10　Wear distributions of centrifugal pump

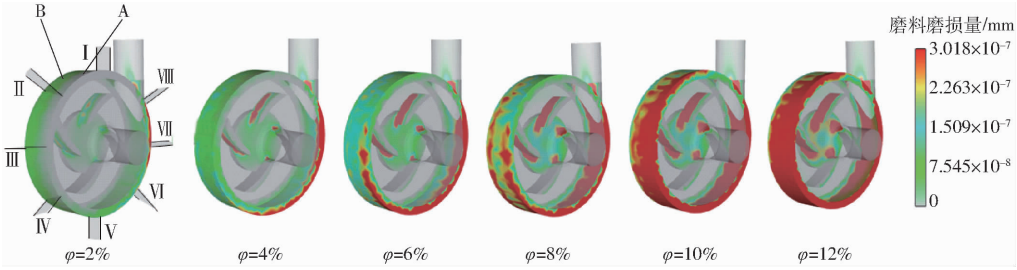

图 11 不同颗粒体积分数下离心泵磨料磨损分布图

Fig. 11 Abrasive wear distribution of centrifugal pump under different particle volume fractions

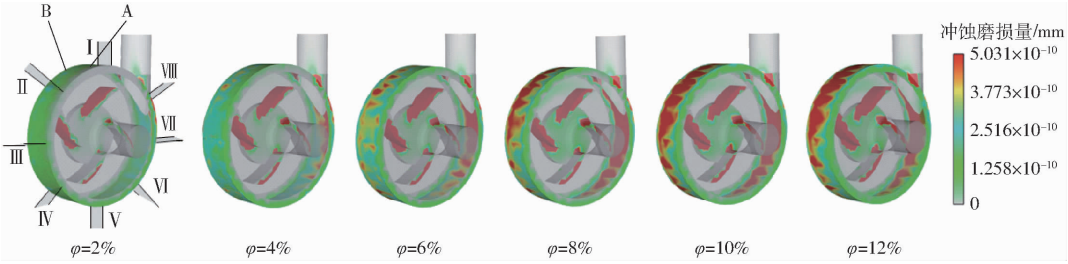

图 12 不同颗粒体积分数下离心泵冲蚀磨损量分布图

Fig. 12 Erosion wear distribution of centrifugal pump under different particle volume fractions

且呈点块状分布,出水管道出现小块高磨损区域。颗粒体积分数增加到 6% 时,蜗壳各个截面出现点块状高磨损区域,最大磨损量已超过 5.031×10^{-10} mm。颗粒体积分数从 8% 增加到 12% 时,可以发现蜗壳区域的高磨损区域逐渐从与后泵盖连接的蜗壳后端逐渐向前端扩展,但颗粒体积分数由 10% 变化为 12% 时磨损区域变化较小,说明蜗壳区域几乎全部磨损。

3.5 离心泵各部件磨损变化

图 13 为不同颗粒体积分数下离心泵各部件的磨损量。从图 13a 可以发现,蜗壳磨料磨损最严重,磨料磨损量占总磨料磨损量的 68.5%,叶轮叶片的磨料磨损量次之,占总磨料磨损量的 28.67%,进出水管道与泵盖的磨料磨损量最小,占总磨料磨损量

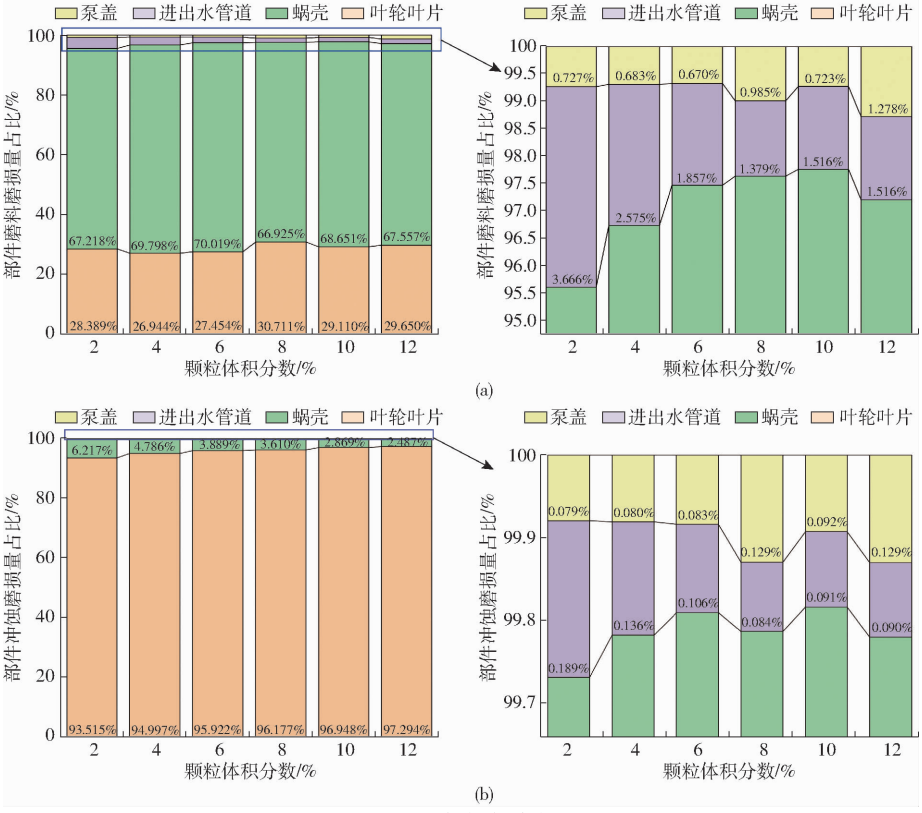

图 13 离心泵各部件磨损量对比

Fig. 13 Comparisons of wear amount of centrifugal pump components

的 2.83%，这是因为磨料磨损是法向应力下颗粒与结构体的滑动摩擦形成的。图 13a 中也可以发现颗粒体积分数增加时，总磨料磨损量增加，同一颗粒体积分数下离心泵各部件的磨料磨损量维持在一个平衡状态，不随颗粒体积分数的增加而打破。图 13b 为不同颗粒体积分数下离心泵各部件的冲蚀磨损量变化图，颗粒在二次流、分离流的作用下以不同的冲蚀角度对叶轮造成冲蚀，叶轮转动时首先对叶片的压力面造成磨损，然后在离心力的作用下对蜗壳产生冲击。从图 13b 可以发现，叶轮叶片为离心泵受到冲蚀磨损最严重的部件，冲蚀磨损量占总冲蚀磨损量的 95.83%，蜗壳冲蚀磨损量占总冲蚀磨损量的 4%，进出水管道与泵盖的冲蚀磨损量占总冲蚀磨损量的 0.17%。进出水管道与泵盖的冲蚀磨损量相较于叶轮叶片与蜗壳的磨损量可忽略。

3.6　不同颗粒体积分数下离心泵叶轮、蜗壳磨损变形量分析

3.6.1　离心泵叶轮磨损变形量

颗粒在离心泵运行中会造成离心泵各部件的磨损，随着磨损的加深会造成泵体的变形，泵体的变形则会影响离心泵中介质的运行从而导致离心泵运行效率的降低和安全隐患的形成。图 14a 为不同颗粒体积分数下叶轮叶片磨料磨损变形量随时间的变化曲线。从图 14a 可以看出，当颗粒体积分数增大时，叶轮叶片磨料磨损变形量增大。每个颗粒体积分数下叶轮叶片磨料磨损变形量呈峰状变化，但不同颗粒体积分数的峰数与峰形状的变化不同。颗粒体积分数 2%、4%、6%、10%、12% 产生的叶轮磨损变形曲线具有相似趋势，颗粒体积分数 8% 的磨损变形量在 4.8～5 s 的变化呈先增加后减小趋势，而其他 5 组则呈现先减小后增加的趋势。从图 14a 中也可以发现，相邻颗粒体积分数之间的磨损变形量的变化较为清晰，说明颗粒体积分数对磨料磨损变形的影响较大。颗粒体积分数为 10%、2.9 s 时的磨料磨损变形量在 6 组颗粒体积分数实验中最大，变形量为 8.23×10^{-11} mm。图 14b 为不同颗粒体积分数下叶轮叶片冲蚀磨损变形量变化曲线，从图 14b 可以发现，每个颗粒体积分数下的变形量最大值与最小值的梯度差较大，5 s 内的平均磨损变形量随着颗粒体积分数的增加而增加，每个时刻的磨损变形量并没有随着颗粒体积分数的增加而产生较大差异。从图 14b 也可以看出，当颗粒体积分数逐渐增加时，每个时刻的 0 mm 变形量逐渐减少，颗粒体积分数为 2% 时的 0 mm 变形量最多，颗粒体积分数为 12% 时的 0 mm 变形量最少，为 0。从图 14b 也可以，发现颗粒体积分数 2%～10% 中的 0 mm 变形量并不在同一个时间点出现，叶轮冲蚀磨损变形量也呈峰状变化。

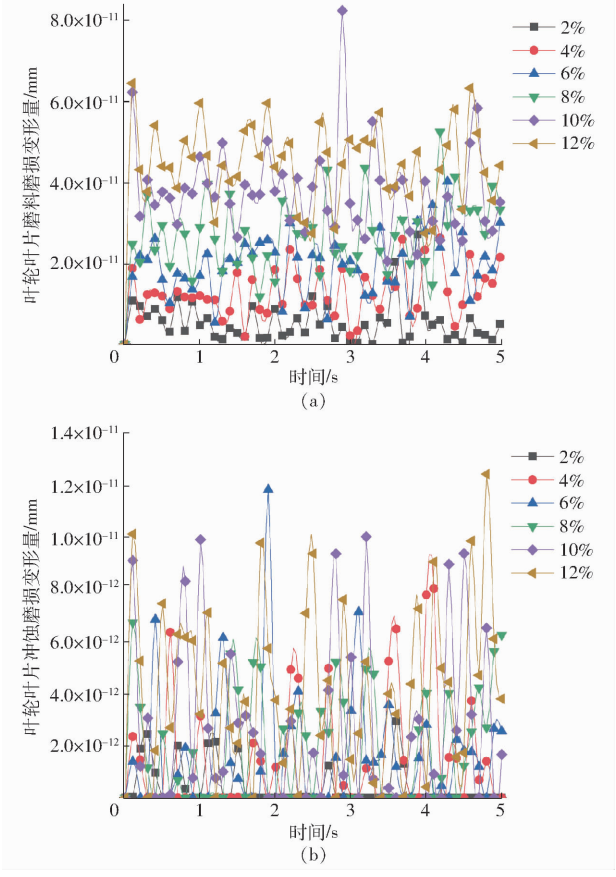

图 14　不同颗粒体积分数下叶轮叶片磨损变形量变化曲线

Fig. 14　Variations of wear deformation of impeller blade under different particle volume fractions

3.6.2　离心泵蜗壳磨损变形量

图 15a 为不同颗粒体积分数下离心泵蜗壳磨料磨损变形量变化图，从图中可以发现不同颗粒体积分数下离心泵的磨料磨损变形呈梯级变化，相邻颗粒体积分数的磨料磨损变形量变化值在时间尺度上具有一定的差值。蜗壳的磨损变形量变化值也呈峰状变化，但每个时间点的磨损变形量不为 0 mm。图 15b 为不同颗粒体积分数下蜗壳冲蚀磨损变形量变化图，可以发现蜗壳的冲蚀磨损变形量变化规律与叶轮叶片的磨损变形量类似，但从图中可以发现 0 mm 变形量只存在于颗粒体积分数为 2% 的工况，每个颗粒体积分数下的最大冲蚀磨损变形量与最小冲蚀磨损变形量相差较小。对比 6 组工况中的磨损变形量可以发现磨损变形量曲线分布较为集中，说明颗粒体积分数对蜗壳冲蚀磨损变形的影响相比磨料磨损变形较小。图 15b 存在两个高峰值：一个工况是颗粒体积分数 12% 的水沙介质在 0.4 s 形成的全局最大磨损变形量，冲蚀磨损变形量为 7.18×10^{-13} mm；另一个是颗粒体积分数 8% 的水沙介质在 2.5 s 形成的局部磨损变形量，冲蚀磨损变形量为 4.45×10^{-13} mm。

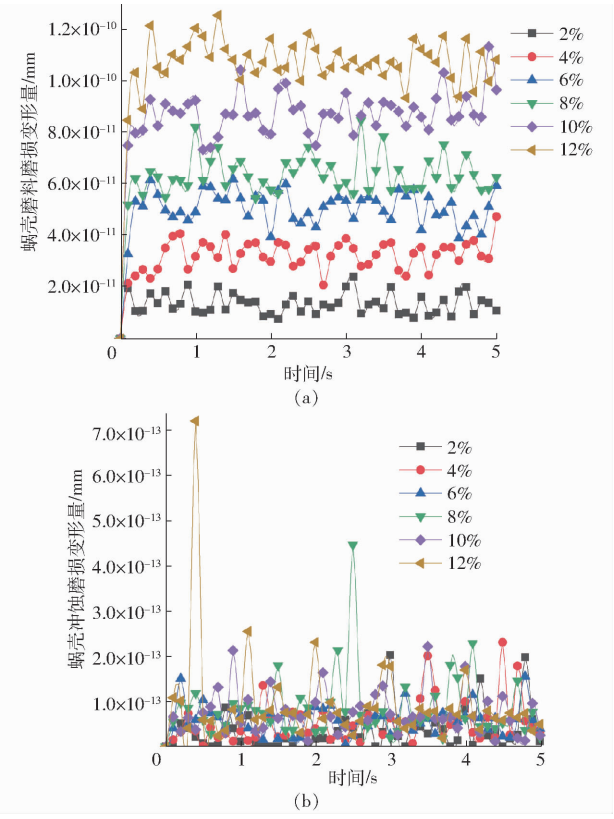

图 15 不同颗粒体积分数下蜗壳磨损变形量变化曲线

Fig. 15 Variation of volute wear deformation under different particle volume fractions

4 结论

(1)随着颗粒体积分数的增加,出口管道处的颗粒滞留区从靠近隔舌边的出水管道边过渡到管道中心区域。当颗粒体积分数超过 4% 时,离心泵的效率下降,蜗壳碰撞占比率减小,颗粒体积分数 4% 附近时叶轮碰撞占比率最小。

(2)对比磨料磨损与冲蚀磨损的数量级可以发现离心泵磨损以磨料磨损为主,磨损磨料的主要磨损部件为蜗壳与叶轮,冲蚀磨损的主要磨损部件为叶轮叶片。

(3)通过对不同体积分数下磨损部位的变化进行对比可以发现,随着颗粒体积分数的增加,蜗壳磨料磨损由断面Ⅷ向断面Ⅰ演变,蜗壳前后端先后被磨损,蜗壳占总磨料磨损量的 68.5%。冲蚀磨损中以叶轮磨损为主,占总磨损量的 95.83%,高磨损区域由叶片尾部向叶轮扩展,蜗壳处的冲蚀磨损由断面Ⅷ向断面Ⅰ演化,蜗壳后端向前端演化。

(4)利用可变形磨损模型对离心泵复合磨损变形求解发现,颗粒体积分数对蜗壳的磨料磨损变形影响更大,蜗壳、叶轮的磨料磨损变形量与冲蚀磨损变形量具有相似的变化趋势。

参 考 文 献

[1] 冷洪飞,姚志峰,汤远,等. 微型离心泵诱导轮与叶轮轴向距离匹配特性[J]. 农业工程学报,2020,36(12):47 – 53.
LENG Hongfei, YAO Zhifeng, TANG Yuan, et al. Matching characteristics of axial distance between inducer and impeller of micro-centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(12):47 – 53. (in Chinese)

[2] 康灿,曹骞,胡江,等. 基于壁面磨损的渣浆泵内固液两相流动分析[J]. 工程热物理学报,2021,42(9):2292 – 2297.
KANG Can, CAO Qian, HU Jiang, et al. Analysis of solid-liquid two-phase flow in a slurry pump based on wear of hydraulic components[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021,42(9):2292 – 2297. (in Chinese)

[3] 夏铖,赵睿杰,施卫东,等. 基于 DEM – CFD 耦合的泵内颗粒流动特性研究[J]. 工程热物理学报,2021,42(2):357 – 369.
XIA Cheng,ZHAO Ruijie, SHI Weidong, et al. Numerical investigation of particle induced erosion in a mixed pump by CFD – DEM coupled method[J]. Journal of Engineering Thermophsics,2021,42(2):357 – 369. (in Chinese)

[4] HUANG S, SU X, QIU G. Transient numerical simulation for solid-liquid flow in a centrifugal pump by DEM – CFD coupling [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics,2015, 9(1):411 – 418.

[5] 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.
SHI Weidong, SHI Ya, GAO Xiongfa, et al. 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)

[6] DENG L, HU Q, CHEN J, et al. Particle distribution and motion in six-stage centrifugal pump by means of slurry experiment and CFD – DEM simulation[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021,9(7):716.

[7] LIU H X, YANG W X, KANG R. A correlation for sand erosion prediction in annular flow considering the effect of liquid dynamic viscosity[J]. Wear, 2018, 404 – 405:1 – 11.

[8] 王田田,池晓清,杨具瑞,等. 颗粒特性对离心泵叶轮叶片的磨损分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2022,37(2):181 – 189.
WANG Tiantian, CHI Xiaoqing, YANG Jurui, et al. Wear analysis of impeller blade of centrifugal pump by particle characteristics[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics A, 2022, 37(2):181 – 189. (in Chinese)

[9] 张自超,李延频,陈德新. 双吸离心泵叶轮内泥沙磨损非定常特性研究[J]. 农业机械学报,2022,53(4):140 – 148,191.
ZHANG Zichao, LI Yanpin, CHEN Dexin. Investigation on unsteady erosion characteristics in impeller of double suction centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4):140 – 148,191. (in

Chinese)

[10] QIN J Y, WEI C. Coupling of an IOT wear sensor and numerical modelling in predicting wear evolution of a slurry pump[J]. Powder Technology, 2022,404: 117453.

[11] LI Y, ZENG X, LV W, et al. Centrifugal pump wear for solid-liquid two-phase flows based on computational fluid dynamics-discrete element method coupling[J]. Advances in Mechanical Engineering,2020,12(7):378 - 396.

[12] 骆家银. 钻井泵泵阀系统磨损与失效分析研究[D]. 成都:西南石油大学,2015.
LUO Jiayin. Wear and failure analysis of drilling pump valve system[D]. Chengdu:Southwest Petroleum University,2015. (in Chinese)

[13] 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.
ZHOU Liqiang, HAN Dong, YU Liming, et al. Effects of guide vanes on performance of Y-screen filter[J]. Transactions of the CASE, 2020, 36(12):40 - 46. (in Chinese)

[14] 王田田,支嘉才,杨具瑞,等. 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 Tiantian, ZHI Jiacai, YANG Jurui, et al. 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. (in Chinese)

[15] 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.

[16] 喻黎明,徐洲,杨具瑞,等. CFD - DEM 耦合模拟网式过滤器局部堵塞[J]. 农业工程学报,2018,34(18):130 - 137.
YU Liming, XU Zhou, YANG Jurui, et al. CFD - DEM coupling simulation of local clogging of mesh filter[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(18):130 - 137. (in Chinese)

[17] QIU L C, WU C Y. A hybrid DEM/CFD approach for solid-liquid flows[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1):19 - 25.

[18] 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.

[19] TANG C, YANG Y C, LIU P Z, et al. Prediction of abrasive and impact wear due to multi-shaped particles in a centrifugal pump via CFD - DEM coupling method[J]. Energies, 2021,14(9): 2391.

[20] ARCHARD J F, HIRST W. The wear of metals under unlubricated conditions[J]. Proceedings of the Royals Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1956, 236(1206):397 - 410.

[21] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981 - 988.

[22] OKA Y I, OKAMURA K, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: effect of impact parameters on a predictive equation[J]. Wear, 2005, 259(1 - 6): 95 - 101.

[23] OKA Y I, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: mechanical properties of materials directly associated with erosion damage[J]. Wear, 2005, 259(1 - 6):102 - 109.

[24] BILAL F S, SEDREZ T A, SHIRAZI S A. Experimental and CFD investigations of 45 and 90 degrees bends and various elbow curvature radii effects on solid particle erosion[J]. Wear, 2021, 476: 203646.

[25] BLANCHARD D, GRIFFITH P, RABINOWICZ E. Erosion of a pipe bend by solid particles entrained in water[J]. Journal of Engineering for Industry,1984,106(3):213 - 217.

[26] ZHANG Y, REUTERFORS E P, MCLAURY B S, et al. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows[J]. Wear, 2007, 263(1 - 6):330 - 338.

[27] 夏铖. 基于 CFD - DEM 方法的两级混流泵内部粗颗粒固液两相流特性研究[D]. 镇江:江苏大学,2020.
XIA Cheng. Study on coarse solid-liquid two-phase flow characteristics in a two-stage mixed-flow pump based on CFD - DEM method[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)