

基于动态边界的双吸离心泵叶片渐进磨损及泵性能预测

沈小波¹ 李仁年^{1,2} 韩伟^{1,2} 陈帝伊³ 孙江河⁴ 田亚平⁴

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学特种泵阀及流控系统教育部重点实验室, 兰州 730050; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 4. 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 兰州 730099)

摘要: 过流边界形态随磨损时间的变化对客观真实地反映双吸离心泵磨损特性及磨损形貌至关重要。采用欧拉-拉格朗日方法, 配合磨损壁面几何重构的动态边界法, 对黄河平均含沙量及粒径下甘肃省景泰川泵站双吸离心泵进行固液两相流计算, 结合实验数据, 预测了该泵叶片渐进磨损特性, 分析了叶片磨损机理及壁面几何形貌变化对泵性能影响。结果表明: 以冲击角函数最大值对应冲击角 α_0 为阈值, 小于 α_0 磨损形貌呈类圆形凹坑, 大于 α_0 磨损形貌呈沟槽状, 冲击角在 $50^\circ \sim 75^\circ$ 范围且冲击速度高的叶片区域磨损率大, 叶片磨损程度严重; 根据该泵水力性能损失率变化特性, 将预测期划分为 3 个阶段, 磨损率在初期增长率最大, 但在数量级上远小于中、后期, 使前 1 000 h 磨损阶段扬程损失率、效率损失率、叶片质量损失率均小于其他阶段; 上述 3 个参数的增长均呈初期慢、中期快、后期减缓的趋势, 最大增长率均在磨损中期, 参数变化曲线斜率分别为 1.51×10^{-3} 、 1.97×10^{-3} 、 4.12×10^{-3} , 在 1 000 ~ 6 000 h 磨损时长范围内, 磨损导致双吸离心泵性能下降最快。

关键词: 双吸离心泵; 叶片; 渐进磨损; 磨损预测; 动态边界法

中图分类号: TH311; O359

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)07-0212-09

OSID:



Progressive Erosion and Pump Performance Prediction of Double Suction Centrifugal Pump Vane Based on Dynamic Boundary

SHEN Xiaobo¹ LI Rennian^{1,2} HAN Wei^{1,2} CHEN Diyi³ SUN Jianghe⁴ TIAN Yaping⁴

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Key Laboratory of Advanced Pumps, Valves and Fluid Control System of the Ministry of Education,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730099, China)

Abstract: The change of overflow boundary morphology with erosion time is important to objectively and realistically reflect the erosion characteristics of double suction centrifugal pumps and erosion morphology. The Euler-Lagrange method and the dynamic boundary method of geometric reconstruction of the erosion wall were used to calculate the solid-liquid two-phase flow of the double suction centrifugal pump of Jingtaichuan Pumping Station in Gansu Province under the average sand content and the value of grain size of the Yellow River. The progressive erosion characteristics of the pump vanes were predicted, and the effects of the vane erosion mechanism and the change of wall geometry on the pump performance were analyzed combining the experimental data. The results showed that taking the maximum value of the impact angle function corresponded to the impact angle α_0 as a threshold to distinguish erosion patterns. If impact angle was less than the threshold, the erosion pattern was liking a rounded crater, if it was bigger than the threshold, the erosion pattern was liking a groove. The erosion rate was high in areas where the impact angle was in the range $50^\circ \sim 75^\circ$ and the impact velocity was high, which both led to high level of blade erosion. The prediction period was divided into three phases based on the characteristics of the rate of change of the hydraulic performance loss. The erosion rate had the largest growth rate in the early stages, but the values were orders of magnitude smaller than those in the middle and late stages, so that

收稿日期: 2023-11-14 修回日期: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179086, 52269022)和中央引导地方科技发展资金项目(23ZYQA0320)

作者简介: 沈小波(1991—), 男, 博士生, 主要从事水力机械多项流动理论研究, E-mail: shenxbz@163.com

通信作者: 李仁年(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水力机械流动理论及优化设计方法研究, E-mail: lim@lut.cn

the head loss rate, efficiency loss rate and mass loss rate of blade in the first 1 000 hours of erosion was less than in other stages. All these parameters showed a trend of slow growth in the early stage, fast growth in the middle stage and slow growth in later stage, and maximum growth rate in the middle stage, values of 1.51×10^{-3} , 1.97×10^{-3} , and 4.12×10^{-3} respectively. Erosion caused the fastest performance degradation of double suction centrifugal pump in the 1 000 hours to 6 000 hours erosion length range.

Key words: double suction centrifugal pump; vane; progressive erosion; erosion prediction; dynamic boundary

0 引言

双吸离心泵广泛应用于工业给排水、建筑消防、农田水利排灌等领域。在长期泵送含沙水时,固体颗粒对过流部件造成磨损,使性能、可靠性下降及部件损坏^[1]。因此,符合实际磨损特性的预测方法对泵水力设计优化有重要意义。

目前,水力机械磨损预测的主要手段是数值模拟。众多学者在固定边界下从颗粒特性、壁面材料、湍流模型及磨损模型选择等方面,研究泵磨损特性^[2-8]。然而,磨损会改变壁面几何形貌,影响流动状态,改变磨损特性,因此固定边界法不能反映真实磨损状态。

文献[9]通过在同一泵上,分别以未磨损和磨损后两套叶轮模型预测磨损特性,证明几何形状变化对磨损率分布、磨损面积和磨损速率均产生了影响。动网格方法首先在弯管内壁和直管外壁磨损特性预测中得到了应用^[10-12],推广到泵磨损预测中时,由于结构和流动的复杂性,仅对静止的泵盖内壁短时间内的磨损进行了预测^[13]。文献[14]提出冻结流场法,旨在解决采用动网格方法消耗大量计算机资源的问题,其在较短的磨损周期下可大幅度节省计算时间,但随着磨蚀时间的增加,网格变形严重导致求解的非物理化,需要改进动网格移动策略。

本文针对固定边界磨损预测方法存在流场不能跟随过流边界形态的变化而变化,导致磨损预测误差大,无法有效反映与客观真实相接近的磨损形貌的问题,以双吸离心泵为对象,提出磨损壁面几何重构策略,对叶片渐进磨损及泵性能预测。通过对比实验数据,验证该方法的合理性,并进一步分析叶片不同区域几何形貌成形机理,以及叶片几何形貌变化对泵性能的影响,分析扬程损失率、效率损失率、叶轮质量损失率随时间的变化规律,以期对双吸离心泵磨损特性预测和抗磨损设计提供依据。

1 计算方法

1.1 颗粒运动基本方程

在拉格朗日体系下求解颗粒运动微分方程,通

过离散相与液相相互作用,计算颗粒轨迹。忽略颗粒之间相互作用,颗粒作用力平衡方程为^[15]

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_D + F_p + F_{VM} + F_B \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad F_D = C_D \rho \frac{\pi d_p^2}{8} |v - v_p|^2 \quad (2)$$

$$F_p = \frac{1}{4} \pi d_p^3 \Delta P \quad (3)$$

$$F_{VM} = -\frac{1}{12} \pi d_p^3 \rho_p \frac{dv_p}{dt} \quad (4)$$

$$F_B = \frac{1}{6} \pi d_p^3 (\rho_p - \rho) g \quad (5)$$

式中 m_p ——颗粒质量,kg
 v_p ——颗粒速度,m/s
 v ——液体流速,m/s
 F_D ——颗粒单位质量曳力,N
 F_p ——压力梯度产生的力,N
 F_{VM} ——作用在颗粒上的附加质量力,N
 F_B ——浮力,N
 C_D ——曳力系数
 d_p ——颗粒直径,m
 ρ_p ——颗粒密度,kg/m³
 ρ ——液体相密度,kg/m³
 ΔP ——颗粒表面的压力差,Pa

1.2 相间耦合模型

忽略固液两相间热量交换,只考虑动量和湍流动能交换,通过交替求解液相与离散相控制方程,实现双相耦合。其中,动量交换发生在颗粒沿轨迹通过流体相的每一个控制体,动量交换量 S_M 表达式为^[16]

$$S_M = \sum (F_D + F_p + F_{VM} + F_B) M_p \Delta t \quad (6)$$

式中 M_p ——颗粒质量流量,kg/s

Δt ——时间步长,s

湍流动能耦合采用随机游走模型,在颗粒轨迹微分方程中引入流体瞬时速度,通过计算足够多颗粒来反映湍流对颗粒运动的影响。求解时认为在涡寿命内,流体脉动速度为常量,满足高斯概率密度分布函数的随机脉动速度 u' 、 v' 、 w' 为^[17]

$$u' = \lambda \sqrt{(u')^2} \quad (7)$$

$$v' = \lambda \sqrt{(v')^2} \quad (8)$$

$$w' = \lambda \sqrt{(w')^2} \quad (9)$$

其中 $\sqrt{(u')^2} = \sqrt{(v')^2} = \sqrt{(w')^2} = \sqrt{2k/3}$ (10)

式中 λ ——服从正态分布的随机数

k ——湍动能, m^2/s^2

1.3 碰撞反弹模型

采用 G&T 颗粒碰撞反弹模型,其垂直于壁面切线方向动量变化率为法向恢复系数 ε_N ,切线方向动量变化率为切向恢复系数 ε_T ,分别定义为^[18]

$$\varepsilon_N = 0.993 - 1.76\alpha + 1.56\alpha^2 - 0.49\alpha^3 \quad (11)$$

$$\varepsilon_T = 0.988 - 1.66\alpha + 2.11\alpha^2 - 0.67\alpha^3 \quad (12)$$

式中 α ——冲击角, rad

1.4 磨损模型

采用 E/CEC 磨损模型^[19],因其全面考虑壁面材料、冲击角度、冲击速度、颗粒形状、颗粒硬度等因素,得到结果与实验更接近^[20],磨损失重率和冲击角函数表示为

$$W_R = KB_H^{-0.59} F_s f(\alpha) v_p^m \quad (13)$$

$$f(\alpha) = \sum_{i=1}^5 R_i \alpha^i \quad (14)$$

式中 m 、 K ——经验常数,取 2.14 、 2.17×10^{-7}

F_s ——颗粒形状系数,棱角颗粒为 1 ,半球形颗粒为 0.53 ,球形颗粒为 0.2

B_H ——壁面材料布氏硬度

R_i ——经验常数,当 i 为 $1 \sim 5$ 时其取值分别为 $5.398\ 3$ 、 $-10.106\ 8$ 、 $10.932\ 7$ 、 $-6.328\ 3$ 、 $1.423\ 4$

磨损率是关于磨损失重率的函数,其表达式为

$$E_R = W_R M_p / A \quad (15)$$

式中 A ——计算部分壁面面积, m^2

1.5 磨损壁面几何重构策略

磨损使壁面几何形貌变化,引起泵内流状态改变,导致颗粒运动状态变化,反映到磨损率的动态变化。通过 UDF 代码,提取 E/CRC 磨损模型计算得到的每个网格单元磨损率 E_R ,计算单元壁面穿透速率,即垂直壁面方向网格单元移动速率,其是关于壁面材料密度的函数,即

$$P_R = E_R / \rho_s \quad (16)$$

式中 ρ_s ——壁面材料密度, kg/m^3

瞬态计算流场的时间步长一般为微秒级,而过流壁面出现磨损变形的时间在数千小时,为对应实

际磨损过程,减少计算时间,引入单位计算时间 t' ,该值的选取应小于实际磨损时长的 1% ^[21]。在指定单位计算时间 t' 下,单元沿壁面法线方向移动距离计算式为

$$\Delta s = P_R t' \quad (17)$$

网格节点坐标更新时,新坐标 X_{n+1} 、 Y_{n+1} 、 Z_{n+1} 值是上次坐标 X_n 、 Y_n 、 Z_n 加 Δs 在各坐标轴的投影值,完成壁面几何重构,即

$$\begin{cases} X_{n+1} = X_n + \Delta s_x \\ Y_{n+1} = Y_n + \Delta s_y \\ Z_{n+1} = Z_n + \Delta s_z \end{cases} \quad (18)$$

式中 Δs_x 、 Δs_y 、 Δs_z —— Δs 在各坐标轴的投影值, m

长时间磨损预测时,为保证网格质量,避免出现负体积,采用扩散光顺方法^[22],配合间隔为 5 的频率对局部单元和局部面进行网格重构^[23],其中尺寸尺度根据网格划分情况确定,最大单元偏斜度和面网格最大偏斜度均为 0.7 。

2 计算模型建立与设置

2.1 计算对象

本文的研究对象是甘肃省景泰川泵站双吸离心泵,主要参数为:额定流量 Q_n 为 $0.35\ \text{m}^3/\text{s}$,设计扬程 H 为 $43.5\ \text{m}$,效率 η 为 88.84% ,转速 n 为 $1450\ \text{r}/\text{min}$,比转数 n_s 为 130.6 ,叶轮直径 D 为 $406\ \text{mm}$,叶轮出口宽度 b 为 $40.5\ \text{mm}$,叶片数量 z 为 6 个,泵进口直径 D_1 为 $350\ \text{mm}$,泵出口直径 D_2 为 $300\ \text{mm}$ 。叶轮材料为 QT600-3 型球墨铸铁,密度 ρ_s 为 $7300\ \text{kg}/\text{m}^3$,硬度 B_H 为 290 。

计算颗粒条件:粒径 d_p 为 $25\ \mu\text{m}$,密度 ρ_p 为 $2650\ \text{kg}/\text{m}^3$,质量浓度取黄河多年平均含沙量 $5.074\ \text{g}/\text{L}$ ^[24],换算到设计流量下颗粒质量流量 M_p 为 $1.7759\ \text{kg}/\text{s}$ 。

2.2 网格划分及边界条件

采用 ICFEM 软件对计算域进行网格划分,如图 1a 所示,对叶片处网格进行细化,该处最大网格尺寸 L 为 $3\ \text{mm}$,并对叶片近壁面划分边界层^[25],指定首层网格高度 h 为 $0.12\ \text{mm}$,高度比 r 为 1.1 ,边界层数 n_b 为 10 ,如图 1b 所示,叶片壁面的 y^+ 值控制在 100 以内,如图 1c 所示。在额定流量下,对 6 组网格进行无关性验证,如图 2 所示,当网格数量超过 3×10^6 后,扬程的浮动小于 1% ,确定网格数量为 $3\ 160\ 986$ 。

应用 Fluent 进行数值计算,为了捕捉叶片壁面处及流体边界层内的流动状态,采用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[26]。压力速度耦合采用 Coupled 方法,压力、动量、湍流动能、比耗散率均采用二阶迎风格式。颗

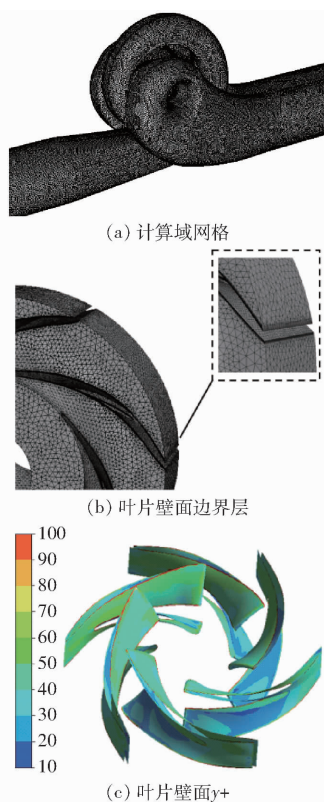


图 1 计算域网格划分

Fig. 1 Mesh generation of computational domain

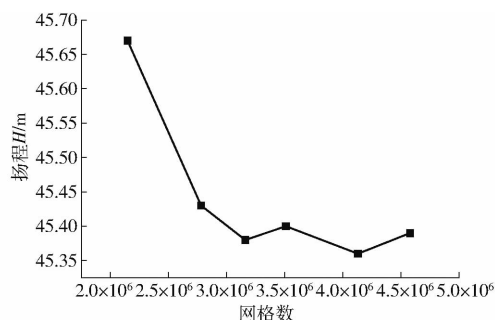


图 2 网格无关性检验

Fig. 2 Grid-independent verification

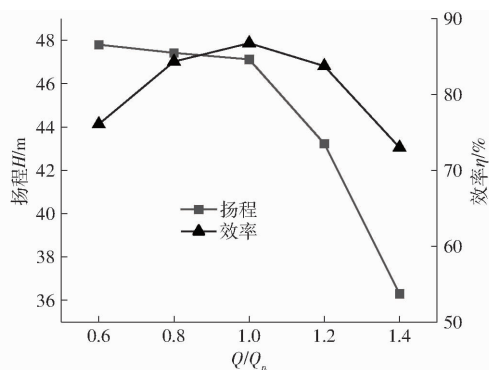
粒相采用双向耦合方法,颗粒轨迹追踪考虑萨夫曼升力^[27]、虚拟质量力、压力梯度力。

入口边界为速度进口,出口为自由出流。入口处颗粒速度与液体速度一致,壁面采用无滑移边界,壁面粗糙度 h_w 为 $10 \mu\text{m}$,粗糙度常数 r_w 为 0.5,颗粒从双吸离心泵出口逃逸,其余壁面为“reflect”边界条件,离散相迭代间隔数为每 10 计算步迭代 1 次,单位计算时间 t' 为 10 h。

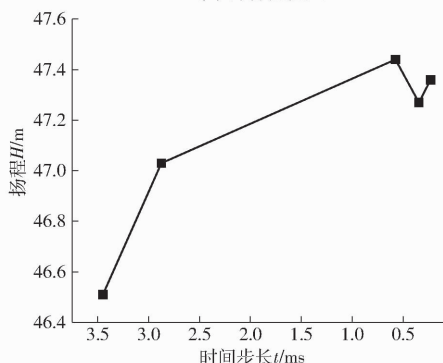
2.3 计算模型验证

采用稳态计算,在上述含沙水条件下对计算模型进行验证,取 5 种不同流量,获得扬程、效率曲线如图 3a 所示,其中 Q 为计算工况对应流量。该外特性曲线符合双吸离心泵性能变化规律,额定工况下,计算获得效率为 86.76%,与设计效率之间的误差为 2.34%;计算获得扬程为 47.12 m,与设计扬程

之间的误差为 8.32%,误差在合理范围内,可用于后续计算。



(a) 外特性验证



(b) 计算时间步长无关性验证

图 3 计算模型验证

Fig. 3 Computational model validation

在相同条件下,进行非定常计算步长验证,以扬程在叶轮转动 5 圈内的平均值作为验证对象,分别取不同的时间步长进行计算,结果如图 3b 所示,最终确定计算时间步长 t 为 0.574 7 ms。

3 计算结果与分析

3.1 叶片形貌变化

通过模拟双吸离心泵在设计工况下含沙水条件运行 8 000 h,研究叶片形貌变化,每间隔 1 000 h 实际磨损时长,对比叶片压力面及吸力面的磨损情况,如图 4 所示。

为验证渐进磨损形貌预测的准确性,对照文献^[28]通过对叶片进行分层颜色喷涂的方法,实验获得同类型双吸泵的实际磨损情况,其中深蓝色漆为表层,由表及里依次为浅蓝色、绿色、黄色、红色,如图 5 所示。该磨损情况表明叶片吸力面平均磨损程度大于压力面。随着时间推移,会加剧两者几何形貌变化程度的差异,因此能够定性验证预测得到的形貌变化趋势。

文献^[29]通过实验,分时段描述了该泵叶片实际磨损情况,其中磨损 1 000 h 后,实物叶片未能观察到明显变化,但在图 4b 中能看到吸力面出现轻微的形貌变化,这种差别是由于实物叶轮在铸造中,存

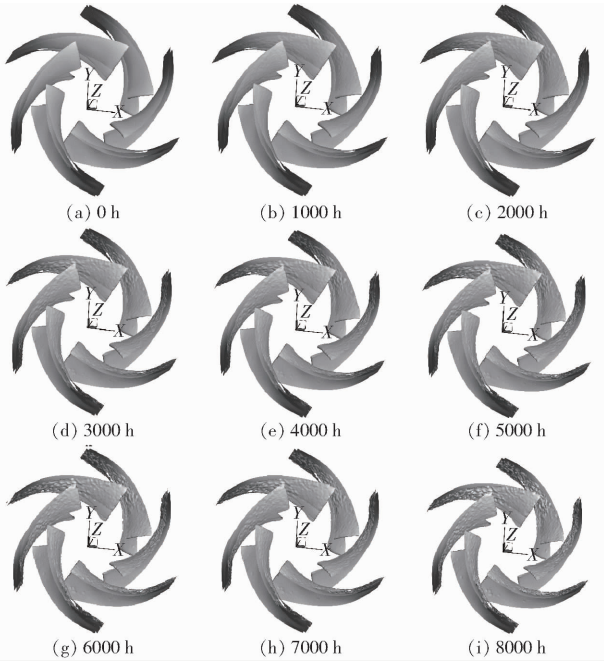


图4 双吸离心泵叶轮叶片渐进磨损形貌

Fig. 4 Progressive erosion morphologies of impeller vanes of double suction centrifugal pump

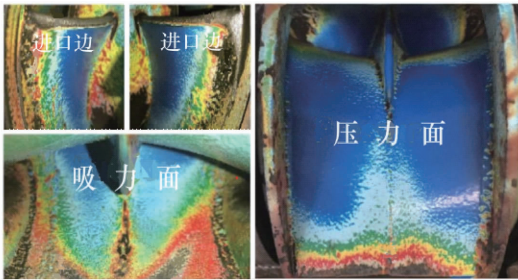


图5 双吸离心泵实际磨损情况

Fig. 5 Actual erosion of double-suction centrifugal pumps

在渣孔、气孔等铸造缺陷,干扰形貌的观察,而在数值预测中忽略上述缺陷。

根据文献[29]所述,在磨损3000 h后,实物叶片表面出现较为严重的损伤,由图4d能看出吸力面和压力面均出现较明显的磨损形貌;磨损5000 h后,实物叶片表面出现凹坑,由图4f看出,吸力面和压力面也均出现凹坑,压力面进口和出口位置磨损较为明显,如图6所示,与图5所示实际磨损情况能够较好吻合;磨损8000 h后叶片出

现严重损坏,反映实物泵性能下降,图4i叶片凹陷程度加剧,对泵性能的影响将在下文中详细叙述。综上所述,图4中各时间段,渐进磨损导致叶片形貌变化的预测结果与实际磨损程度相似,证明了该预测方法的可行性。

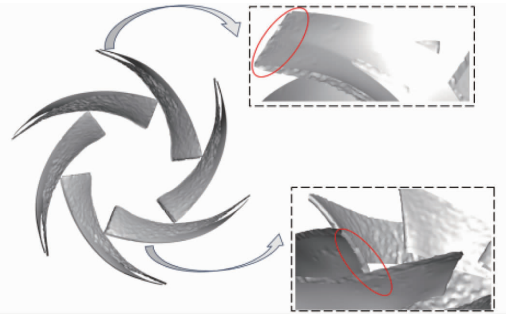


图6 磨损5000 h叶片压力面进口和出口磨损形貌

Fig. 6 Inlet and outlet erosion morphology after 5000 hours of erosion at blade pressure surface

3.2 叶片渐进磨损特性

在磨损预测中,很难从结果中区分空化引起的损伤,因此只考虑颗粒磨损的单一作用。叶片渐进磨损特性研究以对应实际磨损时间为5000 h、磨损程度明显的吸力面作为对象展开。

由式(13)可知,磨损率是关于颗粒冲击角度和冲击速度的函数,与二者均成正比,根据式(11)、(12),编写壁面UDF程序。提取磨损5000 h后泵内的流动状态,如图7a所示,可以看出叶片形貌发生变化明显的吸力面,在叶轮出口位置,出现了较为明显的低速区,造成叶轮出口动压下降,引起泵水力性能下降;泵内颗粒的分布如图7b所示,颗粒从进口进入流道后,经叶轮加速后从泵出口流出,叶轮内流线从压力面指向吸力面,由于颗粒斯托克斯数 St 小于1,颗粒轨迹对流线的跟随性较好,跟随流线撞击吸力面,颗粒速度呈现出叶轮进口附近慢,向叶片中心及叶轮出口逐渐增大的趋势;叶轮流道颗粒质量浓度分布如图7c所示,颗粒浓度在吸力面分布高且均匀,而在压力面分布低,导致叶轮压力面整体磨损率远低于吸力面。提取叶片表面颗粒冲击状态云图,如图8所示。在叶片冲击角度大、冲击速度高的

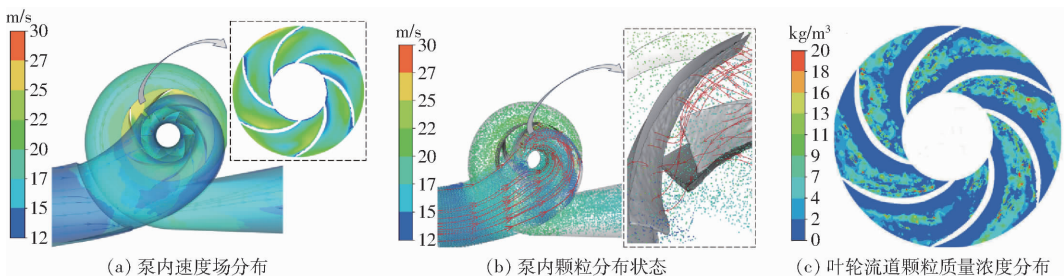


图7 磨损5000 h后泵内流动状态

Fig. 7 Pump flow condition after 5000 hours of erosion

区域,对应的磨损率高,由图 9 可以看出,叶片吸力面中间部分磨损率明显高于其他区域。

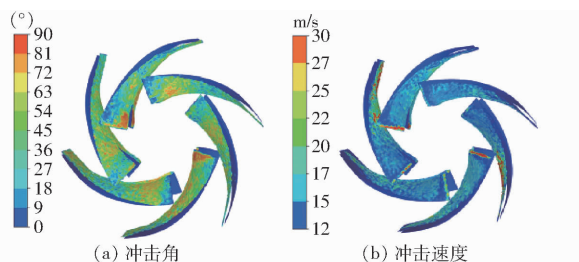


图 8 颗粒冲击状态云图

Fig. 8 Cloud maps of particle impact state

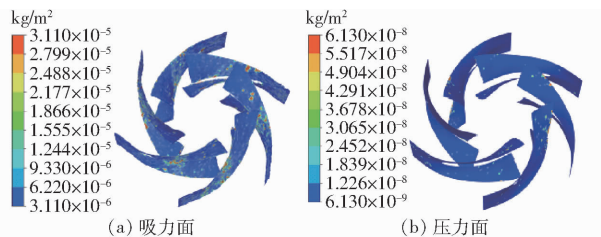


图 9 磨损 5 000 h 叶片磨损率分布

Fig. 9 Distribution of blade erosion rate after 5 000 hours of erosion

文献[29]通过切割磨损 5 000 h 后的该双吸离心泵叶片,展示了叶片吸力面不同区域的磨损形貌。为便于分析,将叶片吸力面划分为 4 个区域,如图 10 所示。

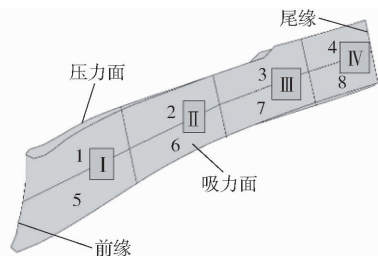


图 10 叶片吸力面区域划分示意图

Fig. 10 Schema of blade suction side partitioning

叶片吸力面几何形貌预测结果与实物对比如图 11 所示(图中 1~8 对应图 10),各区域磨损几何形貌与颗粒冲击参数对照见表 1。结合冲击角函数曲线(图 12),综合分析叶片渐进磨损特性。

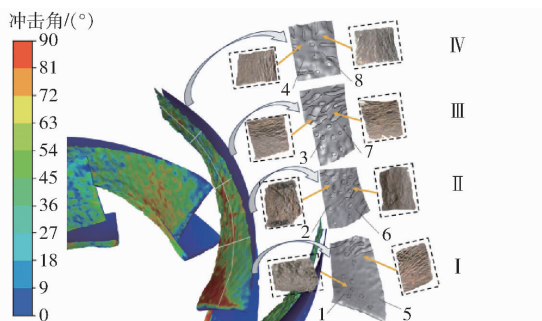


图 11 吸力面几何形貌渐进磨损预测结果与实物对比

Fig. 11 Progressive erosion topography comparison with actual shape in blade suction side

表 1 颗粒冲击参数与磨损状态

Tab. 1 Particle impact parameters and erosion states

参数	区域			
	I	II	III	IV
冲击角/(°)	30 ~ 90	50 ~ 90 (较大)	30 ~ 40 (较小)	30 ~ 80
冲击速度/ (m·s ⁻¹)	3 ~ 10 (小)	6 ~ 15 (较大)	15 ~ 25 (大)	20 ~ 30 (大)
磨损形貌	类圆形为主, 小冲击角处 为沟槽状	类圆形 为主	沟槽状 为主	沟槽状为主, 大冲击角处 为类圆形
磨损程度	轻微	严重	严重	严重

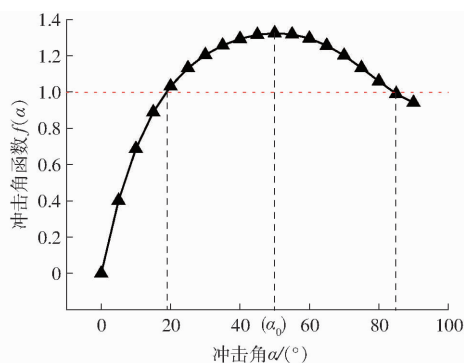


图 12 E/CEC 冲击角函数曲线

Fig. 12 Curve of impact angle function for E/CEC erosion model

由图 12 可知,冲击角 α 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内,当冲击角小于 19° 或大于 85° 时,函数值小于 1,表明会减弱磨损损失;在 $\alpha_0 = 50^\circ$ 时,冲击角函数存在最大值,冲击角对磨损的影响最大。

结合图 11 和表 1 可以看出,叶片前缘处受到严重磨损,出现不规则凹陷;区域 I 处,磨损形貌在冲击角大于 α_0 的部位呈现类圆形凹坑状,其余部位为沟槽状,且该区域颗粒冲击速度小,磨损程度较轻;区域 II 整体冲击角大于 α_0 ,磨损形貌以类圆形凹坑为主,冲击角函数大于 1,且颗粒冲击速度较大,两者叠加导致该处磨损率大,磨损程度严重;区域 III 整体冲击角小于 α_0 ,磨损形貌以沟槽状为主,颗粒冲击速度大,磨损程度严重;区域 IV 除中心区域冲击角大于 α_0 的区域为类圆形凹坑状以外,其余大部分为凹槽状,颗粒冲击速度大,磨损程度严重。

以上叶轮吸力面渐进磨损预测的几何形貌变化与叶片实际磨损情况能够很好对应,可以认为叶片壁面冲击角决定磨损形貌,当大于 α_0 磨损形貌为沟槽状,小于 α_0 磨损形貌为类圆形凹坑。冲击角在 $50^\circ \sim 75^\circ$ 范围且冲击速度高的区域磨损率大,叶片磨损程度严重。

3.3 叶片渐进磨损对双吸离心泵性能的影响

引入损失率,分析渐进磨损下,叶片表面形状改

变导致泵扬程、效率、叶片质量的变化情况,表达式为

$$\zeta_H = \frac{H_s - H_t}{H_s} \times 100\% \quad (19)$$

$$\zeta_\eta = \frac{\eta_s - \eta_t}{\eta_s} \times 100\% \quad (20)$$

$$\zeta_m = \frac{m_s - m_t}{m_s} \times 100\% \quad (21)$$

式中 ζ_H ——扬程损失率, %

ζ_η ——效率损失率, %

ζ_m ——叶片质量损失率, %

H_s ——初始扬程, m

H_t ——对应磨损时刻扬程, m

η_s ——初始效率, %

η_t ——对应磨损时刻效率, %

m_s ——叶片初始质量, kg

m_t ——对应磨损时刻叶片质量, kg

将双吸离心泵在对应 8 000 h 实际磨损期内的预测结果,按泵水力性能损失率变化特性,分为 3 个阶段,其中初期为 0 ~ 1 000 h,中期为 1 000 ~ 6 000 h,

后期为 6 000 ~ 8 000 h。不同阶段叶片平均磨损率曲线如图 13 所示。扬程损失率、效率损失率、叶片质量损失率曲线如图 14 所示。对上述曲线拟合,获得二者与磨损时间的表达式为

$$y = a + k_s t_e \quad (22)$$

式中 t_e ——对应磨损时间, h

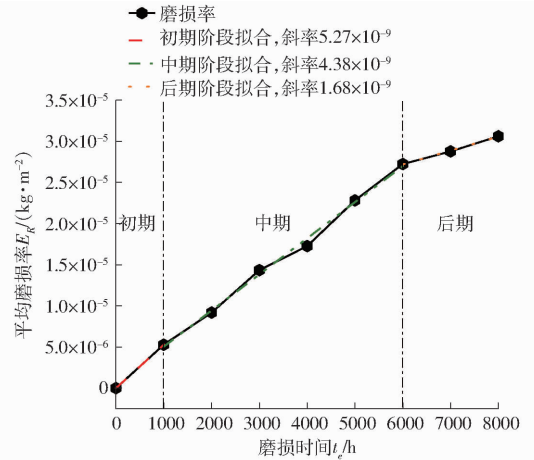


图 13 平均磨损率变化曲线

Fig. 13 Change curve of average erosion rate

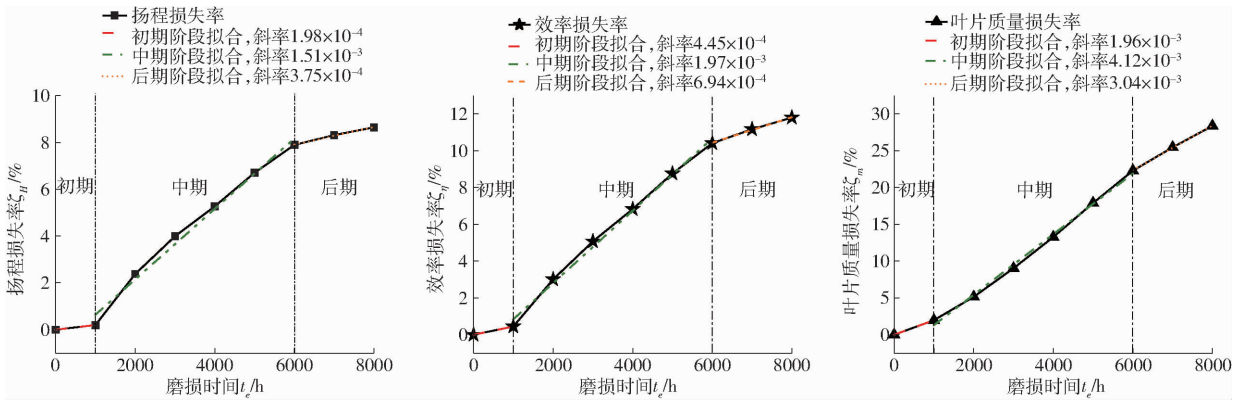


图 14 双吸离心泵性能参数变化曲线

Fig. 14 Performance changes curves of double suction centrifugal pump

拟合函数参数见表 2。

表 2 拟合参数

Tab. 2 Fitting parameters

参数	初期	中期	后期	
平均磨损率	a	7.85×10^{-9}	6.60×10^{-7}	1.71×10^{-5}
	k_s	5.27×10^{-9}	4.38×10^{-9}	1.68×10^{-9}
质量损失率	a	-3.14×10^{-16}	-2.81	4.08
	k_s	1.96×10^{-3}	4.12×10^{-3}	3.04×10^{-3}
扬程损失率	a	-1.96×10^{-17}	-0.87	5.66
	k_s	1.98×10^{-4}	1.51×10^{-3}	3.75×10^{-4}
效率损失率	a	-3.93×10^{-17}	-1.13	6.27
	k_s	4.45×10^{-4}	1.97×10^{-3}	6.94×10^{-4}

由图 13 可以看出,叶片平均磨损率的增长率在整个磨损周期呈减缓的趋势,虽然初期阶段该值的增长率最大,但磨损率在数量级上远小于中期和后

期。这与文献 [29] 中描述该泵实物叶片在前 1 000 h 内未观测到叶片表面有明显磨损破坏的情况相吻合。

由图 14 可知,扬程损失率、效率损失率、叶片质量损失率的增长均呈初期慢、中期快、后期减缓的趋势,且磨损中期增速最快,参数变化曲线斜率分别为 1.51×10^{-3} 、 1.97×10^{-3} 、 4.12×10^{-3} ,表明该阶段双吸离心泵性能下降最快。根据式 (22) 可计算获得,在磨损 5 000 h 后,由叶片几何参数变化导致双吸离心泵扬程损失率为 6.70%,效率损失率为 8.76%;磨损到 8 000 h,扬程损失率为 8.64%,效率损失率为 11.80%,叶片质量损失率为 28.38%,表明叶片已经遭到严重磨损,结果与文献 [29] 描述该时刻水泵性能严重下降的情况相符。表明基于动态

边界的渐进磨损预测方法,通过跟踪过流壁面改变造成的流场变化,从而较为真实地反映磨损造成双吸离心泵性能的变化。

4 结论

(1)采用基于动态边界的渐进磨损预测方法,考虑磨损导致过流边界变化对流场的影响,在时间维度上控制壁面网格重构,相较于固定边界法能够获得更加符合实际的磨损特性。

(2)颗粒冲击角度决定叶片壁面的磨损形貌,以冲击角函数最大值对应的冲击角 α_0 为界,冲击角小于 α_0 磨损形貌为类圆形凹坑,大于 α_0 磨损形貌

为沟槽状;冲击角函数与颗粒冲击速度共同决定磨损率,冲击角在 $50^\circ \sim 75^\circ$ 范围且冲击速度高的区域磨损率大,叶片磨损程度严重。

(3)磨损率在初期增长率最大,中、后期增长率放缓,但初期在数量级上远小于中期和后期,使前1 000 h磨损阶段扬程损失率、效率损失率、叶片质量损失率均小于其他阶段。

(4)扬程损失率、效率损失率、叶片质量损失率的增长均呈初期慢、中期快、后期减缓的趋势,最大增长均在磨损中期,表明在1 000~6 000 h磨损时长范围内,磨损导致的双吸离心泵性能下降最快。

参 考 文 献

- [1] 李伟,潘云欣,李昊明,等.固液两相流离心泵流动特性及磨损问题研究进展[J].排灌机械工程学报,2023,41(2):109-117.
LI Wei, PAN Yunxin, LI Haoming, et al. Research progress on solid-liquid two-phase flow characteristics and erosion of centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(2):109-117. (in Chinese)
- [2] 黄凯,刘栋,尤保健,等.颗粒浓度对离心泵性能及磨损影响的研究[J].流体机械,2022,50(2):35-42.
HUANG Kai, LIU Dong, YOU Baojian, et al. Research on effects of particle concentrations on the performance and erosion of centrifugal pump[J]. Fluid Machinery, 2022, 50(2):35-42. (in Chinese)
- [3] 张自超,李延频,陈德新.双吸离心泵叶轮内泥沙磨损非正常特性研究[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)
- [4] KUMAR J, TIWARI G, RAWAT A, et al. Computational investigation of erosion wear on industrial centrifugal pump handling solid-water flows[J]. Tribology in Industry, 2020, 42(3):382-399.
- [5] 张自超,王福军,陈鑫,等.基于改进欧拉算法的双吸离心泵泥沙磨损特性研究[J].农业机械学报,2017,48(3):124-133,147.
ZHANG Zichao, WANG Fujun, CHEN Xin, et al. Erosion characteristics of double suction centrifugal pump based on modified Eulerian algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):124-133, 147. (in Chinese)
- [6] LAI Fen, WANG Yu, SAEED A, et al. Numerical study of solid particle erosion in a centrifugal pump for liquid-solid flow[J]. Journal of Fluids Engineering, 2019, 141(12):121302.
- [7] SONG Xijie, YAO Rao, SHEN Yubin, 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.
- [8] ZHU Haiwen, ZHU Jianjun, ZHOU Zulin, et al. Experimental study of sand erosion in multistage electrical submersible pump ESP: performance degradation, wear and vibration[C]//International Petroleum Technology Conference, Beijing, 2019.
- [9] XIAO Yexing, GUO Bao, AHN S H, et al. Slurry flow and erosion prediction in a centrifugal pump after long-term operation[J]. Energies, 2019, 12(8):1523.
- [10] OLUWASEUN E A, CARLOS A R D. Prediction of thickness loss in a standard 90° elbow using erosion-coupled dynamic mesh[J]. Wear, 2020, 460:203400.
- [11] ZHU D S, LI Q Q, OU G F, et al. Gas-solid erosion study of elbow pipe based on erosion dynamic grid technology[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2022, 15(6):1837-1850.
- [12] DONG Yunshan, QIAO Zongliang, SI Fengqi, et al. A novel method for the prediction of erosion evolution process based on dynamic mesh and its applications[J]. Catalysts, 2018, 8(10):432.
- [13] FABIAN H, OLIVER K, STEFAN R. Numerical prediction of slurry erosion and its influence on prevailing flow conditions using a dynamic mesh method[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 774(1):012056.
- [14] DUARTE C A R, FRANCISCO J. Dynamic mesh approaches for eroded shape predictions[J]. Wear, 2020, 484:203438.
- [15] MORSI S A, ALEXANDER A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55(2):193-208.
- [16] PENG W, CAO X. Numerical simulation of solid particle erosion in pipe bends for liquid-solid flow[J]. Powder Technology, 2016, 294:266-279.
- [17] FAETH G. Spray atomization and combustion[C]//24th Aerospace Sciences Meeting, Reno, 1986.
- [18] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles[J]. Journal of Aircraft, 1975, 12(5):471-478.
- [19] 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.
- [20] ARABEJAD H, MANSOURI A, SHIRAZI S A, et al. Development of mechanistic erosion equation for solid particles[J]. *Wear*, 2015, 332: 1044-1050.
- [21] 陈雨, 李仁年, 韩伟, 等. 基于动态边界的 90°弯管壁面渐进磨损特性[J]. *排灌机械工程学报*, 2024, 42(4): 380-387.
CHEN Yu, LI Rennian, HAN Wei, et al. Progressive erosion of 90° elbow wall based on dynamic boundary[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2024, 42(4): 380-387. (in Chinese)
- [22] XIA Y, XU W, YE W, et al. Design and unsteady numerical simulation of variable geometry inlet using dynamic meshes[J]. *Electrical Engineering*, 2019, 459: 816-827.
- [23] 隋洪涛, 李鹏飞, 马世虎, 等. 精通 CFD 动网络工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [24] 潘启民, 杨会颖, 马志瑾, 等. 黄河泥沙公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [25] ANSYS, Inc. *Fluent, ANSYS 18.0: user's guide*[Z]. ANSYS, Inc.
- [26] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [27] SAFFMAN P G. The lift on a small sphere in a slow shear[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, 22(2): 385-400.
- [28] QIAN Z, SU J, GUO Z, et al. Erosion wear in a double-suction centrifugal pump using an improved erosion model[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 1037(1): 012031.
- [29] SHEN Z, LI R, HAN W, et al. Erosion wear on impeller of double-suction centrifugal pump due to sediment flow[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2020, 13(4): 1131-1142.

(上接第 131 页)

- [14] TAVARES L M, CHAGAS A S. A stochastic particle replacement strategy for simulating breakage in DEM[J]. *Powder Technology*, 2021, 377: 222-232.
- [15] BARRIOS G K, JIMÉNEZ-HERRERA N, FUENTES-TORRES S N, et al. DEM simulation of laboratory-scale jaw crushing of a gold-bearing ore using a particle replacement model[J]. *Minerals*, 2020, 10(8): 1-16.
- [16] 田辛亮, 丛旭, 齐江涛, 等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(10): 100-108, 242.
TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw-soil mixture in black soil areas[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(10): 100-108, 242. (in Chinese)
- [17] 陈永, 高晓勋, 金鑫, 等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(12): 58-69.
CHEN Yong, GAO Xiaoxun, JIN Xin, et al. Calibration and analysis of seeding parameters of *Cyperus esculentus* seeds based on discrete element simulation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(12): 58-69. (in Chinese)
- [18] 胡梦杰, 周勇, 汤智超, 等. 脱绒包衣棉花种子的力学特性[J]. *安徽农业大学学报*, 2018, 45(1): 175-180.
HU Mengjie, ZHOU Yong, TANG Zhichao, et al. Mechanical properties of the delinted and coated cottonseed[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2018, 45(1): 175-180. (in Chinese)
- [19] TAVARES L M. Review and further validation of a practical single-particle breakage model: review papers[J]. *KONA Powder and Particle Journal*, 2022, 39: 62-83.
- [20] TAVARES L M, KING R P. Single-particle fracture under impact loading[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1998, 54(1): 1-28.
- [21] TAVARES L M, ANDRÉ F P, POTAPOV A, et al. Adapting a breakage model to discrete elements using polyhedral particles[J]. *Powder Technology*, 2020, 362: 208-220.
- [22] 郝建军, 魏文波, 黄鹏程, 等. 油葵籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 36-44.
HAO Jianjun, WEI Wenbo, HUANG Pengcheng, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(12): 36-44. (in Chinese)
- [23] 王龙, 贺小伟, 胡灿, 等. 包衣棉种物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(6): 71-82.
WANG Long, HE Xiaowei, HU Can, et al. Measurement of the physical parameters and calibration of discrete element simulation parameter of coated cottonseed[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(6): 71-82. (in Chinese)
- [24] YAN Dongxu, YU Jianqun, LIANG Liusuo, et al. A comparative study on the modelling of soybean particles based on the discrete element method[J]. *Processes*, 2021, 9(2): 286.
- [25] JYOTIRMAY M, SHANKER T P, PRATAP S K, et al. Analysis of cotton (*Gossypium hirsutum*) seed properties for engineering applications[J]. *Current Advances in Agricultural Sciences (An International Journal)*, 2022, 14(1): 27-33.
- [26] CHEN Zhengpu, CARL W, KINGSLEY A, et al. Development and validation of a DEM model for predicting compression damage of maize kernels[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 230: 480-496.
- [27] 谢浩松. 北衙金矿半自磨钢球运动能量与矿石断裂能的匹配机制[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- [28] GABRIEL C A, MARÍA C I, JULIANA P, et al. DEM breakage calibration for single particle fracture of maize kernels under a particle replacement approach[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, 195: 151-165.