doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.018

基于边界重构方法的双吸离心泵空化-颗粒协同侵蚀与性能衰减特性研究

南昊志[1]　李仁年[1]　韩　伟[1,2]

(1.兰州理工大学能源与动力工程学院,兰州 730050;2.兰州理工大学绿色能源与储能学院,兰州 730050)

摘要:针对黄河高含沙水流工况下双吸离心泵叶轮渐进磨损与性能衰减问题,本文以黄河上游某提灌泵站工程泵为对象,构建基于欧拉-拉格朗日两相流、SST $k-\omega$ 湍流模型、Zwart-Gerber-Belamri 空化模型和 E/CRC 磨损模型的空化-颗粒协同侵蚀数值方法,并结合边界重构实现等效 4 000 h 运行过程叶片形貌动态更新及流场再分析。结果表明,高侵蚀区主要集中在压力面尾缘和叶片进口边,与高速度、高颗粒浓度及大冲击角区域相对应;随运行时间增加,进口边产生侵蚀坑,出口边钝化并形成锯齿状缺口,局部流道收缩和泄漏流增强,导致叶轮内部涡量和湍动能耗散显著提高。等效 4 000 h 内,泵扬程和效率分别降低约 5.17% 和 12.17%,叶轮质量损失率约 14.67%,性能演化呈"缓慢增长期-加速期-稳定期"阶段性特征,可为高含沙流域双吸离心泵抗磨设计和寿命评估提供依据。

关键词:双吸离心泵;空化-颗粒协同侵蚀;边界重构;侵蚀形貌演变;性能衰减

中图分类号:TH311　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)12-0195-10　　**OSID**:

Numerical Investigation of Cavitation – Particle Synergistic Erosion and Performance Degradation in Double-suction Centrifugal Pump Using Boundary Reconstruction Approach

NAN Haozhi[1]　LI Rennian[1]　HAN Wei[1,2]

(1. *College of Energy and Power Engineering*, *Lanzhou University of Technology*, *Lanzhou* 730050, *China*
2. *College of Green Energy and Energy Storage*, *Lanzhou University of Technology*, *Lanzhou* 730050, *China*)

Abstract: Aiming to address the progressive impeller wear and performance degradation of double-suction centrifugal pumps operating under high-sediment Yellow River conditions, a prototype pump from an irrigation station in the upper Yellow River was selected as the research object. A cavitation-particle synergistic erosion numerical framework was established based on an Euler – Lagrange two-phase flow approach, the SST $k-\omega$ turbulence model, Zwart – Gerber – Belamri cavitation model, and E/CRC erosion model, which was further coupled with a boundary reconstruction strategy to realize dynamic updating of blade geometry and flow-field reanalysis over an equivalent operating time of 4 000 h. The results showed that high-erosion regions were mainly concentrated at the pressure-side trailing edge and blade leading edge, corresponding to zones of high velocity, high particle concentration and large impact angle. With increasing operating time, pits form at the leading edge, while the trailing edge became blunted and developed serrated notches, causing local passage contraction and intensified leakage flow, which in turn significantly enhanced vorticity and turbulent kinetic energy dissipation inside the impeller. Within 4 000 h of equivalent operation, the pump head and efficiency were decreased by about 5.17% and 12.17%, respectively, and the impeller mass loss ratio reached approximately 14.67%. The performance evolution exhibited a distinct "latent – accelerated – stable" three-stage pattern, providing a basis for wear-resistant design and service life assessment of double-suction centrifugal pumps in high-sediment river regions.

Key words: double-suction centrifugal pump; cavitation – particle synergistic erosion; boundary reconstruction; erosion morphology evolution; performance degradation

收稿日期:2025-12-11　修回日期:2026-01-23

基金项目:国家自然科学基金项目(52179086)和兰州理工大学优秀博士论文培育计划项目

作者简介:南昊志(1994—),男,博士生,主要从事水力机械多相流研究,E-mail:nhzlut@163.cn

通信作者:李仁年(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事水力机械多相流研究,E-mail:lirn@lut.edu.cn

0 引言

离心泵是水利、石化、电力、冶金和采矿等领域最常用的流体输送设备之一,在固液两相流工况运行时,流体中携带的固体颗粒会持续冲击和摩擦叶轮、蜗壳等过流部件,导致几何形状改变和性能劣化,高含沙河流区域的双吸离心泵磨损问题尤为突出[1-5]。围绕固液两相流冲蚀磨损机理,现有研究在可视化试验、旋转盘装置、原型泵试验以及基于欧拉-拉格朗日方法数值模拟等方面取得了大量成果,分析了颗粒粒径、浓度、流速和冲击角等因素对磨损行为的影响,并提出了 Finnie、Grant-Tabakoff、Oka 及 E/CRC 等一系列经验和半经验磨损模型[6-20]。

然而,相关研究多数工作侧重单一工况或短周期条件的磨损规律,数值计算中多假定叶轮边界刚性不变,尚难反映叶轮几何形貌随运行时间渐进演变对内部流场和颗粒运动的反馈作用,对“侵蚀形貌演变-流场重构-性能退化”的耦合机理认识仍不充分[21-27]。

基于此,本文以黄河上游某提灌泵站双吸离心泵为对象,引入 E/CRC 磨损模型和网格边界重构方法,在欧拉-拉格朗日两相流和空化-颗粒协同侵蚀数值框架下,对不同等效运行时长叶轮叶片侵蚀形貌演变及其对内部流场和泵性能的影响进行研究,以期为黄河高含沙地区农业灌溉泵站双吸离心泵设计和运行维护提供理论依据。

1 数值模型与计算方法

1.1 研究对象与基本参数

研究对象为黄河上游某提灌泵站双吸离心泵,相关参数如表 1 所示。

表 1 双吸离心泵主要参数

Tab.1 Main parameters of double-suction centrifugal pump

参数	数值	参数	数值
额定流量 Q_n/($m^3\cdot s^{-1}$)	0.35	设计扬程 H/m	43.5
设计效率 η/%	88.84	转速 n/($r\cdot min^{-1}$)	1 450
比转数 n_s	130.6	叶轮直径 D/mm	406
叶轮数量 z	6	叶轮出口宽度 b/mm	40.5
材料密度 ρ_1/($kg\cdot m^{-3}$)	7 300	布氏硬度 B_H	290

1.2 流动与空化模型

双吸离心泵内部多相流采用欧拉-拉格朗日方法描述,连续方程和动量方程为[28]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]-\frac{\partial(\rho u_i' u_j')}{\partial x_j} \tag{2}$$

式中 ρ——流体密度,kg/m^3

u_j——速度分量,m/s

μ——动力黏度,Pa·s

u——速度,m/s u_i——速度分量,m/s

$\rho u_i' u_j'$——雷诺应力项

为封闭方程体系,引入湍动黏度假设

$$-\rho u_i' u_j'=\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{3}$$

式中 μ_t——湍黏系数,kg/(m·s)

k——湍动能,m^2/s^3

δ_{ij}——克罗内克符号

采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,该模型综合标准 $k-\omega$ 与 $k-\varepsilon$ 模型优点,在近壁区具有较高分辨能力,在自由流区域计算效率较高,适用于同时存在强剪切、逆压梯度和旋转效应的叶轮流场。SST $k-\omega$ 模型控制方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j}=P_k-\beta^*\rho k\omega+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\sigma_k\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\omega u_j)}{\partial x_j}=\alpha\frac{\omega}{k}P_k-\beta\rho\omega^2+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\sigma_\omega\mu_t)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right]+2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j} \tag{5}$$

式中 β^*——湍动能耗散系数

σ_k——湍动能湍流普朗特数

F_1——SST 模型混合函数

σ_ω——比耗散率湍流普朗特数

$\sigma_{\omega2}$——交叉扩散项系数

ω——比耗散率,1/s

P_k——湍动能生成项,kg/(m·s^3)

空化过程采用 Zwart-Gerber-Belamri 模型,通过气相体积分数演化方程描述汽泡成核与溃灭行为,考虑局部压力与饱和蒸汽压之间的差异对相变速率的影响,可较准确预测叶轮进口低压区及空化发展特征,核心方程为[29]

$$\frac{\partial(\rho_l a_v)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_l u_i a_v)}{\partial x_i}=R_v-R_c \tag{6}$$

其中 $$R_v=F_{vap}\frac{3\alpha_{nuc}(1-\alpha_v)\rho_v}{r_b}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_v-p}{\rho_1}}\quad(p\leqslant p_v) \tag{7}$$

$$R_c = F_{comd}\frac{3\alpha_v\rho_v}{r_b}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p-p_v}{\rho_1}} \quad (p>p_v) \tag{8}$$

式中　α_{nuc}——空化核子体积分数，取 5×10^{-4}

F_{vap}——蒸发系数，用于校正蒸发计算结果，取 50

F_{comd}——凝结系数，取 0.01

1.3　颗粒运动模型

固体颗粒采用离散相模型（Discrete phase model，DPM）求解，颗粒受力包括阻力、重力、萨夫曼升力、虚拟质量力和压力梯度力等，在拉格朗日坐标下运动方程为

$$m_p\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}_p}{\mathrm{d}t} = \sum \boldsymbol{F} \tag{9}$$

式中　m_p——颗粒质量，kg

$\boldsymbol{u}_p$——颗粒运动速度，m/s

$\sum \boldsymbol{F}$——颗粒所受外力合力，N

1.4　边界重构方法

为刻画双吸离心泵在高含沙工况下叶片形貌渐进演化，在三维固液两相流数值模拟基础上引入边界重构方法，将颗粒动力学、E/CRC 磨损模型与动态网格技术耦合，形成“颗粒冲击-局部侵蚀-节点位移-网格更新”的闭环计算框架。

动态网格移动通过“面-体-节点”多层一致性更新，将瞬时侵蚀信息转换为平滑、可控的几何退缩量：在每一时间步，首先通过自定义函数 UDF（User-defined function）接口从面级自定义存储单元 UDM（User-defined memory）中读取瞬时侵蚀速率；随后结合时间步长换算为单步侵蚀深度增量，并累积到面侵蚀深度场中持续存储，形成时间连续的深度演化；同时将更新后的面侵蚀深度写入相邻体单元存储区以保证流场计算与后处理的一致性；最后不是在面层直接进行平滑，而是采用节点层面积加权平均将面侵蚀深度投影到节点层，得到连续、平滑节点侵蚀深度及其对应的节点法向位移信息，从而稳定驱动动态网格逐步变形与边界更新。

对于低侵蚀区域，节点位移较小且变化平缓，面积加权映射后节点位移场可保持几何连续性，动态网格可稳定跟随更新；对于局部高侵蚀带，采用“逐步累积-节点平滑映射-法向退缩”更新方式，使几何变化以渐进形式释放到多个时间步内，从而避免单步位移过大引发网格畸变；同时，通过面-体-节点多层同步与节点层平滑，可有效降低局部梯度过大导致的网格质量劣化风险。

1.5　计算域、网格及边界条件

双吸离心泵计算域包括吸水室、叶轮、蜗壳及进出口直管段。采用四面体网格进行网格划分，对叶轮区域进行局部加密，并沿壁面布置多层边界层网格，首层网格高度取 0.1 mm，将叶轮壁面无量纲网格高度（y^+）控制在 100 左右，以兼顾近壁流动分辨率与计算效率，如图 1、2 所示。

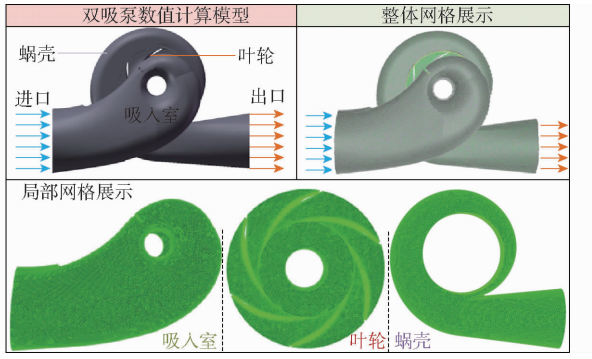


图 1　计算域网格划划分

Fig. 1　Computational domain and mesh

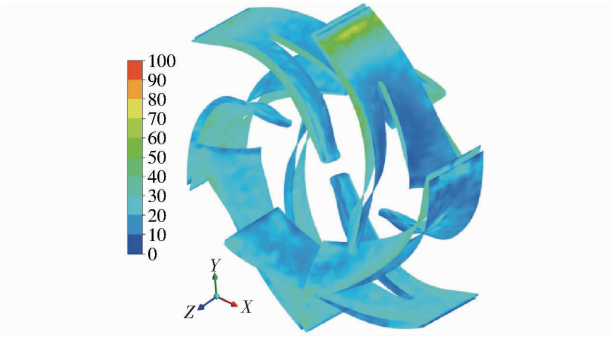


图 2　叶轮壁面的 y^+ 值云图

Fig. 2　Contours of y^+ on impeller wall

入口边界设为速度入口，按给定流量换算轴向入口速度，同时作为颗粒注入面，额定工况下颗粒质量流率为 1.775 9 kg/s。为明确固相入口条件来源，基于研究河段多年平均含沙量约 5.074 kg/m^3 设定本文颗粒质量流率。该含沙量按质量浓度等价处理，并结合本文额定工况流量折算得到入口颗粒质量流率 1.775 9 kg/s。上述设置用于构建代表性长期运行的基准工况，未考虑含沙量季节性波动分布。出口边界设为压力出口；所有固壁采用无滑移条件，颗粒-壁面交互采用反弹模型。本文颗粒对流场的反馈并非通过改写连续性方程实现，而是通过“动量交换源项”形式回馈到连续相动量方程中；该源项由 DPM 轨迹计算得到并在求解时迭代更新（即软件层面的动量耦合实现）。

连续相与离散相采用 DPM 动量交换耦合（两向动量反馈）。但受 DPM 颗粒假设限制，难以准确表征高浓度下颗粒碰撞团聚、体积占据及湍流调制等效应。

1.6　网格与时间步长无关性检验

为保证数值结果可靠性，对网格数量和时间步

长进行无关性检验。在叶轮叶片区域设置不同最小网格尺寸(2 ~6 mm),得到 7 组网格方案,总网格数量为 1.40×10^6 ~6.67×10^6,如表 2 所示。

表 2 计算域网格方案

Tab. 2 Mesh schemes for computational domain

网格方案	最小网格尺寸/mm	叶轮网格数	总网格数量
1	6.0	6.70×10^5	1.40×10^6
2	5.5	8.40×10^5	1.76×10^6
3	5.0	1.01×10^6	2.32×10^6
4	4.5	1.44×10^6	2.89×10^6
5	3.0	2.08×10^6	4.43×10^6
6	2.5	2.45×10^6	5.32×10^6
7	2.0	3.04×10^6	6.67×10^6

以额定工况下稳态扬程为评价指标,结果表明,当叶轮最小网格尺寸减小至 3.0 mm 后,模拟值与表 1 设计扬程相对误差小于 3%,选用方案 5(最小网格尺寸 3.0 mm)作为最终网格方案,如图 3a 所示。

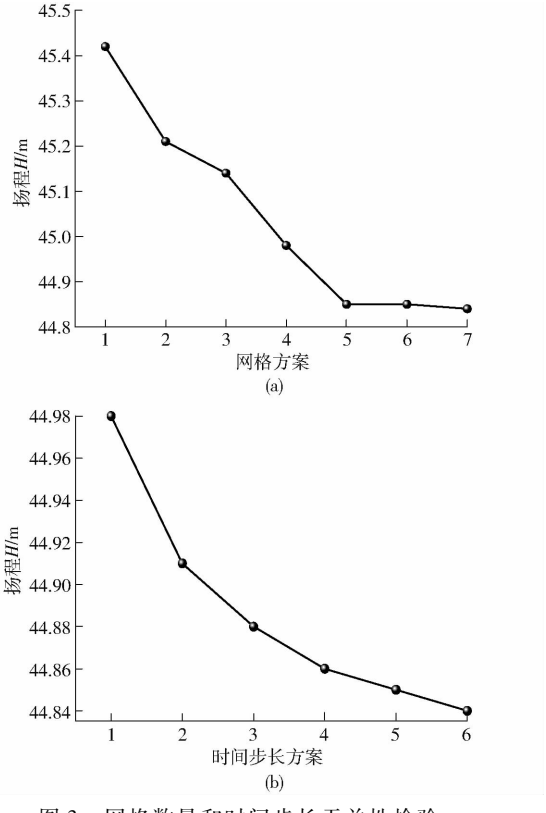


图 3 网格数量和时间步长无关性检验

Fig. 3 Independence tests for mesh density and time step

瞬态计算中,以叶轮每步转过 3° ~18°对应 6 组时间步长方案进行对比,如表 3 所示。以叶轮连续旋转 3 个完整周期后扬程均值与波动幅值为判断依据,结果显示,当时间步长减小至 0.000 69 s 时,扬程基本不再随步长变化,因此瞬态计算采用时间步长 0.000 69 s,如图 3b 所示。

表 3 计算时间步长方案

Tab. 3 Time-step schemes for numerical simulation

时间步长方案	旋转角/(°)	计算时间步长/s
6	3	0.000 45
5	6	0.000 69
4	9	0.001 03
3	12	0.001 33
2	15	0.001 72
1	18	0.002 07

1.7 协同侵蚀模型与有效性验证

为了在数值模型中以紧凑形式表征上述局部动力学,通过对大量单气泡-单颗粒-壁面耦合工况的试验与数值模拟,构建空泡溃灭时对颗粒微射流加速模型[20]

$$V_p = k_1 e^{k_2\left(\sqrt{\frac{p}{P_c}}\right)} \frac{k_3 \sin\left(k_4 \frac{m_p}{R_b^3 \rho}\right)}{\left(\frac{S}{R_b}\right)^{k_5} + e^{k_6\left(\frac{S}{R_b}\right)}} \tag{10}$$

式中 V_p——颗粒在气泡溃灭瞬间的特征冲击速度,m/s

P_c——给定温度下饱和蒸汽压,Pa

R_b——最大气泡半径,m

S——颗粒到壁面距离,m

磨损预测采用 E/CRC 模型,将单位时间内单位面积材料损失质量与颗粒速度、入射角及材料硬度关联,可同时反映切削磨损和塑性变形两类机理。叶轮叶片局部侵蚀率可表示为颗粒冲击能量和入射角函数,基本形式为[20,29]

$$E = C(B_H)^{-0.59} F_s U_p^n F(\beta) \tag{11}$$

其中

$$F(\beta) = \sum_{i=1}^{5} A_i \beta^i \tag{12}$$

式中 E——磨损率,kg·m²/s

F_s——颗粒形状系数,取 0.6

β——颗粒撞击角,rad

U_p——颗粒撞击速度,m/s

C 和 n 分别取 2.17×10^{-7}、2.41,A_1 =5.398 3,A_2 = -10.068,A_3 = 10.932 7,A_4 = -6.328 3,A_5 = 1.423 4。

其中式(11)中颗粒撞击速度 U_p 并不是一个独立的新速度,而是取自颗粒撞壁瞬间式(9)中颗粒运动速度 $\boldsymbol{u}_p$ 的模拟值。V_p 作为空化诱导速度增量项用于修正颗粒撞击速度 U_p。

Grant-Tabakoff 提出的颗粒反弹模型是冲蚀磨损预测中经典模型,主要用于描述固体颗粒碰撞壁面后的运动行为,核心是通过法向和切向恢复系数量化颗粒碰撞过程动量和能量损失。Tabakoff 法向恢复系数 $e_n(\theta)$ 和切向恢复系数

$e_t(\theta)$经验计算式为

$$e_n(\theta) = 0.993 - 1.76\theta + 1.56\theta^2 - 0.49\theta^3 \quad (13)$$

$$e_t(\theta) = 0.988 - 1.66\theta + 2.11\theta^2 - 0.67\theta^3 \quad (14)$$

现有工程尺度数值框架主要刻画空化对颗粒冲击增强的协同作用，尚未对单泡溃灭全过程及空蚀贡献进行显式分离定量；原因在于单泡界面演化与微射流冲击需要更高保真界面追踪与结构响应耦合，超出本文计算可实现范围。

需要指出的是，在具体 UDF 实施中，协同体积力方向一般选取与粒子当前速度方向一致，对于远离壁面、空化区域分布相对均匀流场是一种合理的工程近似。但对于靠近固体边界、气泡溃灭过程明显呈指向壁面射流情形，仅以速度方向作为受力方向会低估微射流对粒子“推向壁面”的偏向作用。为提高模型物理完备性，在协同模型 UDF 中引入压力梯度信息辅助判定协同力方向：通过计算粒子速度矢量与局部压力梯度负方向的夹角及其点积符号，判断粒子相对于低压区域的运动趋势。当粒子速度方向与压力梯度负方向基本一致，即粒子正朝向低压区域或壁面附近的低压区运动时，气泡溃灭产生的微射流更容易捕获粒子并将其加速推向壁面，此时协同体积力方向和幅值可以适当加强；反之，当颗粒远离低压区或空化作用较弱时，协同效应显著减弱，可在模型中相应衰减。

综上，基于 DEFINE_DPM_BODY_FORCE 宏的协同体积力实现方案，将空化-颗粒协同加速机理以附加体积力的形式嵌入到离散相轨迹求解框架中，无需显式解析气泡界面和微观溃灭过程。该实现流程目的是在物理机理、数值稳定性和工程适用性之间取得平衡。

为验证空化-颗粒协同侵蚀模型时双吸离心泵的适用性，分析协同侵蚀模型下叶轮叶片的侵蚀率云图，并与现场服役叶轮的实物侵蚀形貌进行对比，如图 4 所示。结果表明，协同侵蚀模型得到的高侵蚀区集中在叶片压力面尾缘区域，与实物叶轮严重磨损区域在位置和形貌特征上高度一致，而单一颗粒磨损模型预测的侵蚀范围明显偏窄，难以再现实际损伤分布。验证结果表明，空化-颗粒协同侵蚀模型可较真实地反映双吸离心泵在高含沙工况下侵蚀行为，为形貌重构与性能分析奠定了基础。

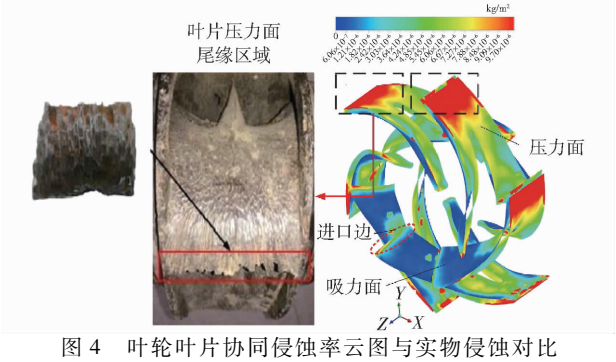


图 4　叶轮叶片协同侵蚀率云图与实物侵蚀对比

Fig. 4　Synergistic erosion-rate contours on impeller blades and comparison with worn impeller

2　双吸离心泵协同侵蚀特性与机理分析

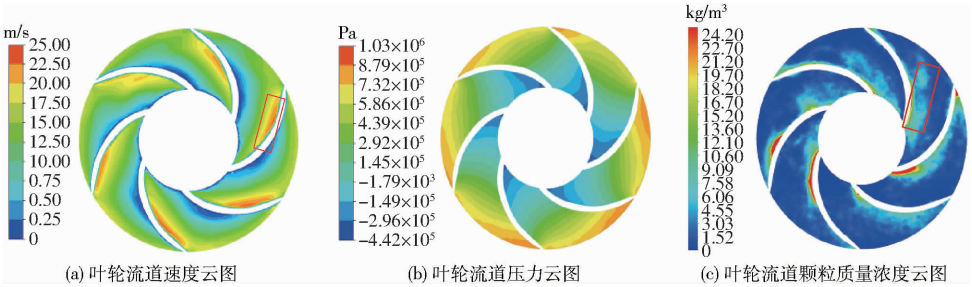
2.1　叶轮侵蚀分布特性

协同侵蚀计算结果表明，叶轮叶片侵蚀整体呈压力面高于吸力面特征，高侵蚀区域主要分布在叶片压力面尾缘及叶片进口边，吸力面侵蚀集中于中部区域。沿压力面从进口至出口，侵蚀率逐渐增大，在尾缘区域达到峰值；吸力面侵蚀程度整体较低，仅在中部高流速区出现局部侵蚀集中区。

结合图 5 中叶轮通道速度、压力及颗粒浓度分布可知，叶片进口处为全通道低压区，易发生空化；介质在叶轮做功作用下逐渐加速，吸力面中部及压力面尾缘形成高速度带。受离心力和黏性阻力共同作用，颗粒在流道内向压力面侧偏聚，使压力面局部颗粒浓度显著高于吸力面，从而形成“速度-浓度-侵蚀”三者空间分布上高度一致性。

2.2　颗粒冲击参数与侵蚀机理

为进一步揭示侵蚀分布规律，从颗粒冲击速度和冲击角度两方面分析叶轮表面冲击参数。如图 6 所示，压力面上颗粒冲击速度整体高于吸力面，高速冲击区域主要集中在压力面尾缘附近，最大冲击速度约 23.43 m/s；吸力面虽局部区域瞬时冲击速度可接近该值，但高速度区范围较小。



(a) 叶轮流道速度云图　　(b) 叶轮流道压力云图　　(c) 叶轮流道颗粒质量浓度云图

图 5　叶轮内部流场图

Fig. 5　Flow field inside impeller

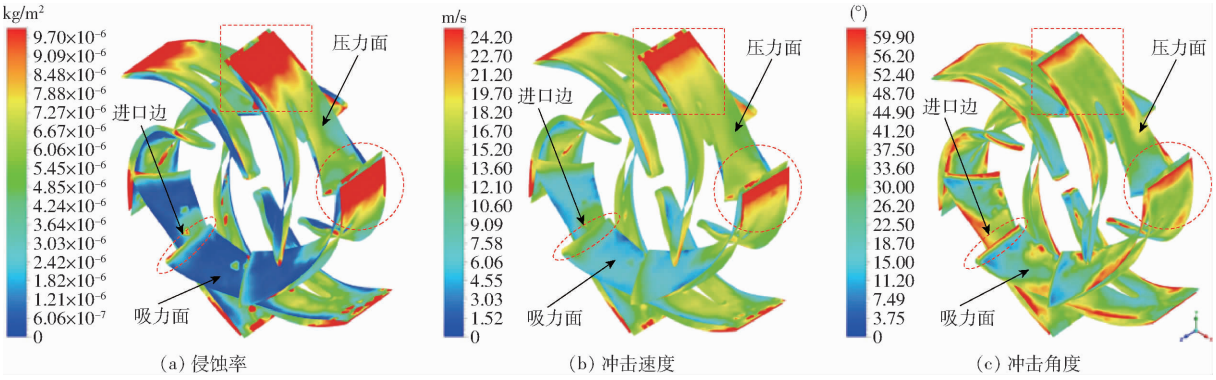


图 6 叶轮表面颗粒冲击参数

Fig. 6 Particle impact parameters on impeller surface

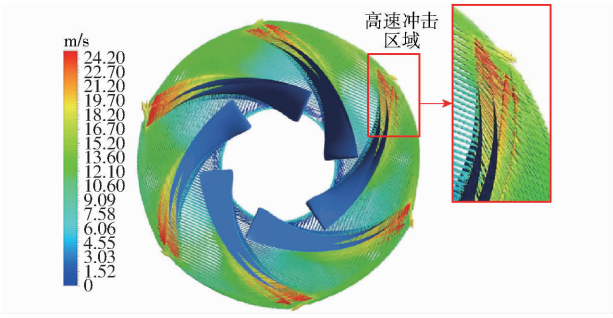


图 7 叶轮内部速度矢量图

Fig. 7 Velocity vectors inside impeller

颗粒冲击角度分布与侵蚀率云图具有良好对应性:叶片压力面尾缘存在大角度冲击集中区,最大冲击角度约 57.8°,与高侵蚀率及颗粒高速冲击区高度重合,如图 7 所示;吸力面冲击角度整体较小,从叶片前缘至尾缘呈逐渐增大的趋势。叶片进口边和叶片侧边缘同样存在一定的大角度冲击区。

其形成机理主要与离心泵叶轮出口流场特性及颗粒惯性效应有关。介质和颗粒在叶轮中由进口向出口逐渐加速,出口处绝对速度最大,流向偏移和二次流结构明显。在叶片尾缘,液体流向随叶道扩散发生改变,而密度较大的颗粒因响应时间长,难以及时跟随流线转向,沿原方向继续运动,与叶片表面形成较大的相对夹角;同时尾缘附近易产生小尺度分离涡,颗粒在涡旋中被卷吸和再加速,进一步放大冲击角和冲击能量,从而导致该区域侵蚀最为严重。

叶片进口边作为颗粒首次接触叶轮区域,由于双吸结构两侧同步吸入含沙水流,颗粒在离心力作用下向外缘运动,在惯性作用下轨迹滞后于流体介质,易在叶片前缘附近形成局部浓度堆积。进口边压力最低,空化现象易发,空泡溃灭产生的微射流对颗粒具有协同加速作用,颗粒以较大入射角和中等速度冲击叶片前缘,使进口边呈侵蚀坑为主的损伤形貌。

2.3 叶片侵蚀形貌演变及对内部流场的影响

为研究离心泵叶轮在空化-颗粒协同作用侵蚀形貌演变规律及其对泵性能的影响,在流场-颗粒-结构信息耦合基础上,采用边界重构方法对叶片进行多阶段形貌更新。双吸离心泵等效计算时长设为 4 000 h,大致对应泵站 1 年灌溉期内累计工作时间。为保证侵蚀演化时间分辨率,初始网格移动步长取 40 h,即总运行时长 1%,网格光顺采用线弹性光顺方法与部网格重构相结合。数值结果表明,叶轮叶片形貌变化主要集中在叶片进口边和出口边,位置与侵蚀率高值区基本一致。图 8 为叶片工作 1 000、2 000、3 000、4 000 h 时三维形貌及颗粒冲击参数。与初始叶片相比,随着运行时间增加,进口边与出口边的侵蚀逐渐加重:进口边以颗粒冲击形成的侵蚀坑为主,出口边则出现明显钝化并形成锯齿状缺口(实测形貌见图 4)。图 9 为叶片表面颗粒冲击速度和冲击角度变化规律,双吸结构使含沙水流自两侧吸入叶轮,叶片进口处为全通道低压区,易发生空化;颗粒流经空化区域时受到空泡射流协同加速,但此时介质尚未完全被叶片加速,整体冲击速度中等,而冲击角度较大,因此进口边主要呈大角度冲击导致的坑蚀特征。在形貌演化初始阶段,进口边颗粒最大冲击速度约 18.12 m/s。

随着运行时间延长,叶片形貌退化对内部流场产生显著反馈。图 9a 为不同运行时刻叶片进口边颗粒冲击参数变化规律,随着侵蚀加剧,进口边颗粒最大冲击速度和冲击角度均呈缓慢上升趋势,4 000 h 时分别增至约 18.89 m/s 和 60.34°,相较初始状态提高 4.24% 和 4.36%。

整体来看,侵蚀使叶轮通道平均流通面积增大,出口截面平均流速有所降低,但局部几何突变导致特定区域流速反而升高。一方面,尾缘钝化及缺口使通道末端局部收缩,形成小流道加速效应,流体及颗粒被迫加速通过;另一方面,侵蚀扩大了叶顶间隙,叶片两侧压差驱动更强的泄漏形成高速间隙射流,叶顶涡强度显著增加。同时,叶片型线破坏使局部边界层更易分离,出口边分离剪切层中存在较大

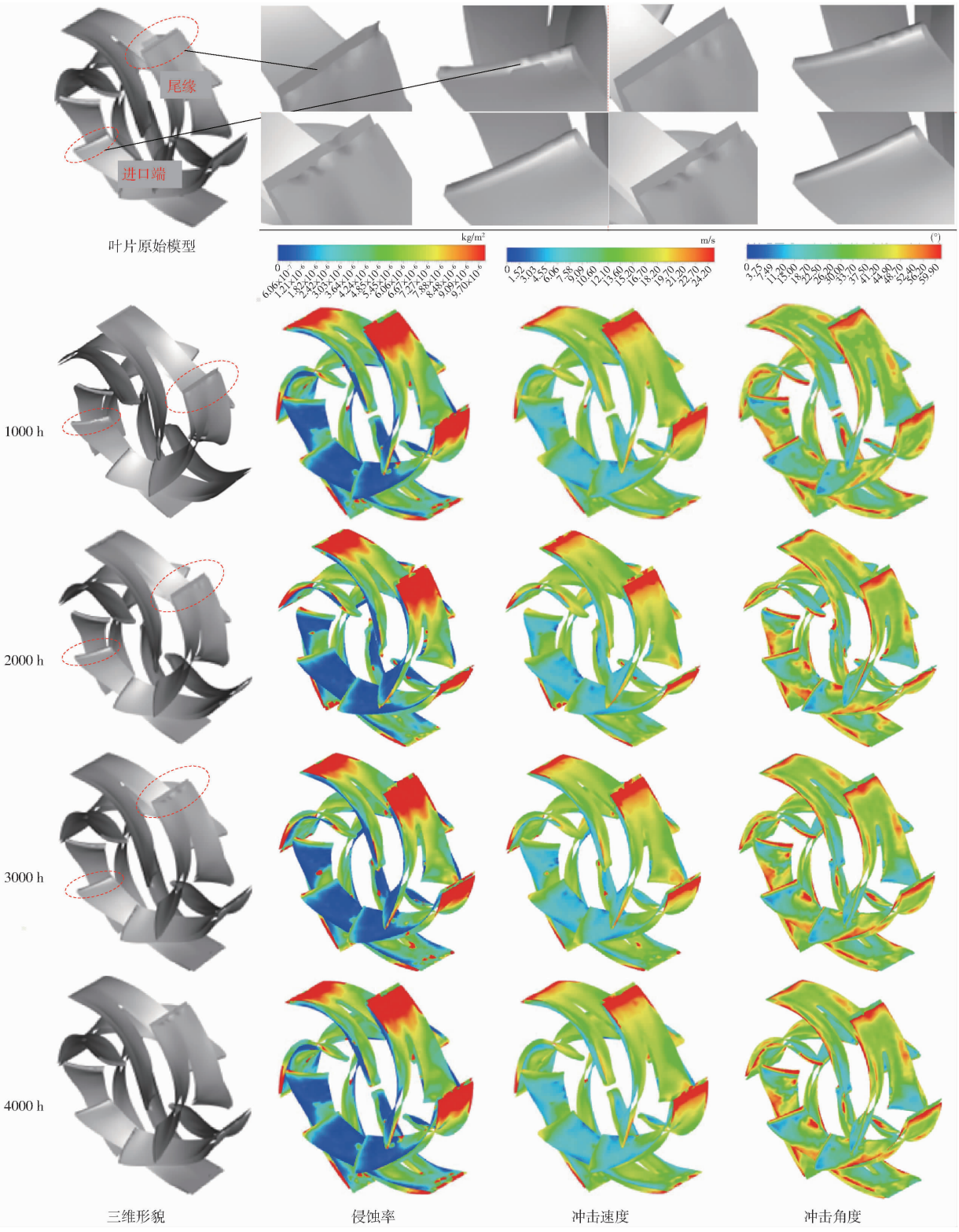


图 8　叶片三维形貌以及叶片表面冲击参数

Fig. 8　Three-dimensional blade morphology and particle impact parameters on blade surface

速度梯度，颗粒被卷入涡旋后在离心作用下再次加速，最终以更高速度和更大冲击角度撞击叶片表面。如图 9b 所示，4 000 h 时，出口边颗粒最大冲击速度和冲击角度分别约为 23.86 m/s 和 60.84°，较初始状态增加 1.41% 和 4.38%。叶片进口边和出口边几何突变不仅改变了局部冲击角度和压力分布，而且显著增强了剪切层和二次流结构，从而诱发更强的涡旋和湍流。湍动能在多尺度涡旋中逐级衰减，速度梯度越大（涡强度越大），局部能量耗散越强，如图 10 所示。

为进一步定量表征叶片几何形状随运行时间的变化，图 11 为不同运行时长叶片侵蚀深度云图。由

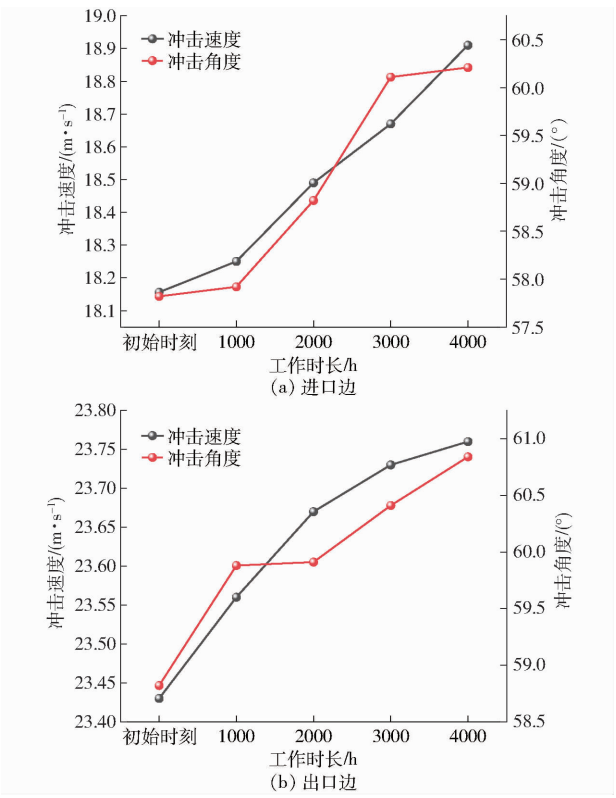


图 9 进出口边颗粒冲击参数变化规律

Fig. 9 Variations of particle impact parameters at inlet and outlet edges of blade

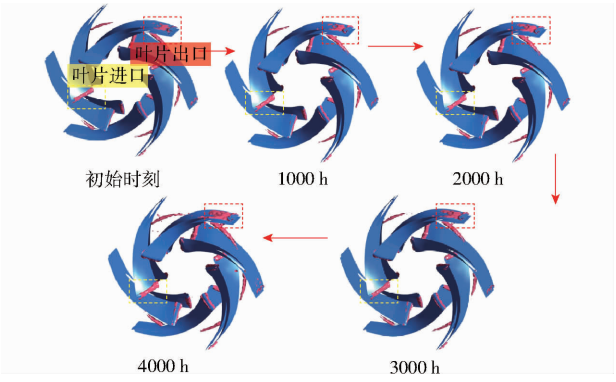


图 10 叶轮不同时刻涡演变特性

Fig. 10 Evolution of vortical structures in impeller at different operating times

图 11 可见,叶片整体侵蚀以局部高值区为主,且随运行时间呈局部深化向带状连续扩展的演化特征:当工作时长为 1 000、2 000 h 时,叶片表面侵蚀以轻微磨蚀为主,大部分区域侵蚀深度处于低值水平,局部最大侵蚀深度不超过约 1.8 mm;到 3 000 h 后,在叶片局部边缘区域出现明显的带状高侵蚀区,侵蚀深度显著增加,局部峰值约 3.5 mm;当达 4 000 h 时,高侵蚀带进一步扩展,高值区范围增大,局部最大侵蚀深度仍维持在约 3.5 mm。

2.4 双吸离心泵叶片侵蚀形貌演变对泵性能的影响

叶片是双吸离心泵最关键的做功部件,其几何

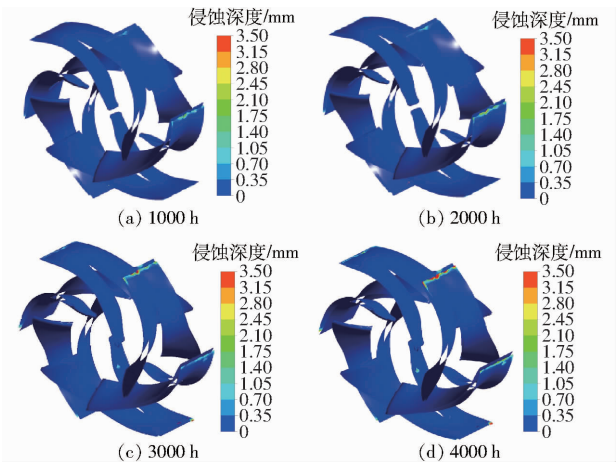


图 11 不同运行时长叶片侵蚀深度云图

Fig. 11 Contours of blade erosion depth at different operating times

形貌将直接影响泵扬程和效率,并通过材料损失反映整体性能衰减程度。为定量评价空化-颗粒协同侵蚀下叶片形貌演变对泵性能的影响,从损失率角度出发,对不同侵蚀时长的扬程、效率及叶轮质量变化规律进行分析。

不同侵蚀时长双吸离心泵扬程、效率及叶轮质量变化曲线如图 12、13 所示。整体来看,在 4 000 h 等效运行周期内,性能衰减呈现明显的阶段性特征,可分为缓慢增长期、快速增长期和稳定期 3 阶段。

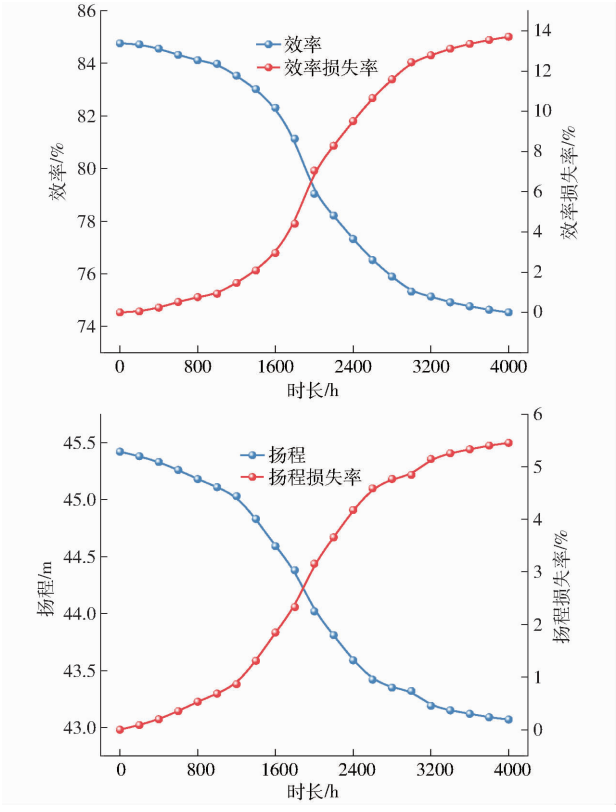


图 12 不同侵蚀时长下泵性能变化规律

Fig. 12 Variations of pump performance under different erosion durations

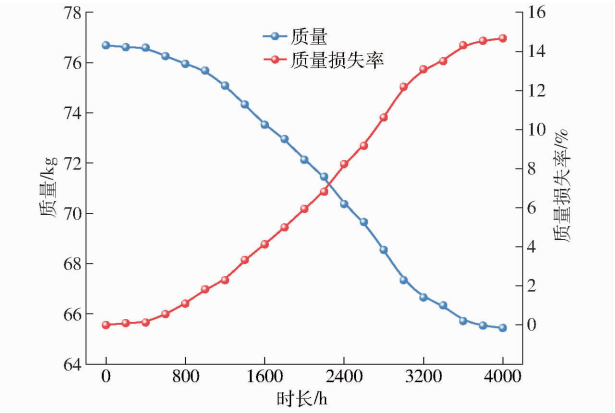


图 13　不同侵蚀时长下泵叶片质量变化规律

Fig. 13　Variation of pump blade mass with erosion duration

阶段划分旨在表征协同侵蚀的工程演化过程，鉴于现场工况下早期轻微几何劣化仍可能引起外特性的小幅波动，将 0 ~ 1 200 h 阶段表述为“初期缓慢发展阶段”，并依据扬程损失率、效率损失率与叶轮质量损失率随运行时长变化的斜率特征（先缓慢、后加速、再趋缓）对演化过程进行分段描述。

在 0 ~ 1 200 h（缓慢增长期）内，叶轮叶片前缘进口边与尾缘出口边开始受蚀，但侵蚀时间较短，表面形貌变化不明显。阶段末端，扬程仅较初始值下降 0.39 m（损失率 0.86%），效率下降约 1.23%（损失率 1.46%），叶轮质量减少约 1.6 kg（质量损失率 2.29%）。

侵蚀时长在 1 200 ~ 3 200 h（快速增长期）内，叶片进口边与出口边侵蚀显著加剧，局部几何形貌明显改变，流道扩散与泄漏特性受扰动，能量损失快速增加。至 3 200 h，扬程由 45.64 m 降至约 43.19 m（损失率约 5.15%），效率由 84.76% 降至约 75.13%（损失率约 12.79%），叶轮质量损失率增至约 13.08%。

当侵蚀超过 3 200 h（稳定期）后，局部侵蚀逐渐趋于饱和，进一步几何变化对整体流道增量的影响减弱；性能仍下降但幅度明显减小。至 4 000 h，扬程、效率与叶轮质量分别约为 43.07 m、74.53% 和 65.44 kg，对应损失率约 5.17%、12.17% 和 14.67%。在 3 200 ~ 4 000 h 内，三者损失率仅增加约 0.31%、0.92% 和 1.58%，趋势较前阶段明显趋缓。

综上，双吸离心泵在 4 000 h 等效运行周期内性能衰减过程表现出“先缓慢、后加速、再趋稳”典型阶段性演化特征：0 ~ 1 200 h 为缓慢增长期，性能变化不显著；1 200 ~ 3 200 h 为快速增长期，扬程、效率及质量损失显著增加；3 200 ~ 4 000 h 进入稳定期，性能继续衰减但趋于平缓，直观反映了空化-颗粒协同侵蚀对泵性能的长期累积效应。

3　结论

（1）基于欧拉-拉格朗日两相流框架，耦合 SST $k-\omega$ 湍流模型、Zwart - Gerber - Belamri 空化模型、DPM 颗粒轨迹、Tabakoff 反弹模型和 E/CRC 磨损模型，并引入边界重构方法，构建了适用于黄河高含沙工况的双吸离心泵空化-颗粒协同侵蚀数值预测体系。计算得到的高侵蚀区位置与实测叶轮磨损区域吻合良好，证明了该方法的工程适用性。

（2）在空化与颗粒磨损协同作用下，叶片压力面为主要受损区域，高侵蚀区集中在压力面尾缘和叶片进口边，对应高速度、高颗粒浓度和大冲击角耦合区。空化气泡溃灭产生的微射流对颗粒具有二次加速作用，形成“空化诱导-颗粒加速-高速大角度冲击”的协同侵蚀机理。

（3）通过等效 4 000 h 叶片边界重构，揭示了叶片进口边坑蚀、削薄和出口边钝化、锯齿化等渐进形貌演变特征，叶顶间隙扩大导致泄漏流和分离涡加强。随侵蚀加剧，进口边和出口边颗粒冲击速度与冲击角度均有所升高，局部湍动能耗散明显增强，叶轮内部二次流与剪切层结构更加复杂。

（4）在等效 4 000 h 运行周期内，双吸离心泵扬程和效率分别降低约 5.17% 和 12.17%，叶轮质量损失率约 14.67%。性能衰减过程呈“缓慢增长期-加速期-稳定期”的阶段性特征，定量反映了空化-颗粒协同侵蚀的长期累积效应。

参　考　文　献

[1] ZHANG H, CHEN M, XIA G, et al. Erosion characteristics of a centrifugal pump based on rosin-rammler distribution of particles[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2752(1): 012119.

[2] ZHANG J, ONG C M, WEN X. Dynamic analysis of the de-ballasting operations of a floating dock with a malfunctioning pump [J]. Journal of Marine Science and Application, 2024, 24(4): 1 - 15.

[3] 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. Effect of blade wrap angle on hydraulic performance and wear characteristics of centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(10): 973 - 980. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 彭俊威,周青,耿鹏,等. 大排量离心泵固液两相流磨损特性仿真分析[J]. 石油矿场机械,2025,54(1):44 - 52.
PENG Junwei, ZHOU Qing, GENG Peng, et al. Simulation analysis of wear characteristics of solid - liquid two-phase flow in a large-discharge centrifugal pump[J]. Oil Field Equipment, 2025, 54(1): 44 - 52. (in Chinese)
[6] 黄建德,张奎亭,陈涟. 含砂水对离心泵叶轮磨损的实验研究[J]. 工程热物理学报,1999,20(4):448 - 452.
HUANG Jiande, ZHANG Kuiting, CHEN Lian. Experimental study on impeller wear of centrifugal pump in sand-laden water [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1999,20(4): 448 - 452. (in Chinese)
[7] TERAN L A, LAÍN S, RODRÍGUEZ S A. Synergy effect modelling of cavitation and hard particle erosion: implementation and validation[J]. Wear, 2021, 478: 203901.
[8] 赵会宾,韩伟,宾立,等. 高体积分数及大直径颗粒工况下低比转数泵叶轮的磨损特性[J]. 排灌机械工程学报,2025,43(9):873 - 880.
ZHAO Huibin, HAN Wei, BIN Li, et al. Wear characteristics of a low specific speed pump impeller under high volume fraction and large-diameter particle conditions[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2025, 43(9): 873 - 880. (in Chinese)
[9] 孙帅辉,任最有,段宏江,等. 含沙水流冲击参数对水力机械基材磨损及磨蚀特性的影响[J]. 水力发电学报,2025,44(5):1 - 9.
SUN Shuaihui, REN Zuiyou, DUAN Hongjiang, et al. Influence of impact parameters of sediment-laden flow on wear and erosion characteristics of hydraulic machinery base material[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2025, 44(5): 1 - 9. (in Chinese)
[10] 王勇,李明,陈杰,等. 离心泵固液两相流动与磨损特性的 CFD - DEM 研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2026,47(2):446 - 454.
WANG Yong, LI Ming, CHEN Jie, et al. CFD - DEM study on solid - liquid two-phase flow and wear characteristics in a centrifugal pump[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2026,47(2):446 - 454. (in Chinese)
[11] 吴国颖,翁映标,周福宁,等. 超大流量大功率离心泵泥沙磨损特性[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2024,22(6):1214 - 1223,1238.
WU Guoying, WENG Yingbiao, ZHOU Funing, et al. Sand abrasion characteristics of ultra-large flow and high-power centrifugal pump[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1214 - 1223,1238. (in Chinese)
[12] 沈小波,李仁年,韩伟,等. 基于动态边界的双吸离心泵叶片渐进磨损及泵性能预测[J]. 农业机械学报,2024,55(7):212 - 220.
SHEN Xiaobo, LI Rennian, HAN Wei, et al. Progressive erosion and pump performance prediction of double suction centrifugal pump vaue based on dynamic boundary[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 212 - 220. (in Chinese)
[13] 张映波,赵子龙,钱忠东. 双吸式离心泵叶片吸力面泥沙磨损破坏规律与形成机制研究[J]. 农业机械学报,2024,55(2):202 - 207.
ZHANG Yingbo, ZHAO Zilong, QIAN Zhongdong. Analysis of sediment erosion at suction side of double-suction centrifugal pump blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 202 - 207. (in Chinese)
[14] 史小东,张浩,王晓岗,等. 基于 Finnie 冲蚀模型的井口八通冲蚀预测及施工参数优选[J]. 石油钻采工艺,2025,47(4):500 - 510,532.
SHI Xiaodong, ZHANG Hao, WANG Xiaogang, et al. Erosion prediction of wellhead cross based on Finnie erosion model and optimization of construction parameters[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2025, 47(4): 500 - 510, 532. (in Chinese)
[15] 张自超,常凤祥,李嘉兴,等. 磨损模型对固液两相流泥沙磨损计算影响[J]. 水力发电学报,2024,43(11):103 - 113.
ZHANG Zichao, CHANG Fengxiang, LI Jiaxing, et al. Influence of wear models on sediment erosion calculation in solid - liquid two-phase flow[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(11): 103 - 113. (in Chinese)
[16] OKA Y, OKAMURA K, YOSHIDA T. Particle estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: effects of impacts parameters on a predictive erosion[J]. Wear, 2005, 259: 95 - 101.
[17] OKA Y, YOSHIDA T. Particle estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: mechanical properties of material directly associates with erosion damage[J]. Wear, 2005, 259: 102 - 109.
[18] 赖芬,王凤鸣,朱相源,等. 基于 E/CRC 磨损模型的离心泵壁面磨损特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2021,42(5):719 - 728.
LAI Fen, WANG Fengming, ZHU Xiangyuan, et al. Study on wall wear characteristics of centrifugal pump based on E/CRC wear model[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(5): 719 - 728. (in Chinese)
[19] NAN H, HAN W, LI R, et al. Erosion characteristics and mechanisms of different particle sizes under the synergy effect of cavitation and particle erosion[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(12): 123365.
[20] NAN H, HAN W, LI R, et al. Synergy effects of cavitation and particle erosion based on the erosion/corrosion research center erosion model[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(7): 073311.
[21] 王勇,李刚祥,袁霄,等. 混合沙粒对半开式叶轮离心泵磨损的影响[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(8):764 - 769.
WANG Yong, LI Gangxiang, YUAN Xiao, et al. Influence of mixed sand particles on wear of semi-open impeller centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(8): 764 - 769. (in Chinese)

(下转第 232 页)

YOLO[J]. Food Science, 2024, 45(23): 268 - 277. (in Chinese)
[19] LI H, LI J, WEI H, et al. Slim-neck by GSConv: a lightweight-design for real-time detector architectures[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2024, 21(3): 62.
[20] CAO J, BAO W, SHANG H, et al. GCL - YOLO: a GhostConv-based lightweight YOLO network for UAV small object detection[J]. Remote Sensing, 2023, 15(20): 4932.
[21] 卢英, 王慧琴, 佟威,等. 基于 Harris-张正友平面标定法的摄像机标定算法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(6):860 - 864.
LU Ying, WANG Huiqin, TONG Wei, et al. Based on Harris - Zhang Zhengyou plane calibration method of camera calibration algorithm[J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition),2014,46(6):860 - 864. (in Chinese)
[22] 李琼,姚遥,杨青春,等. 基于 MATLAB 图像处理的大豆颗粒检测方法研究[J]. 中国农学通报,2018,34(30):20 - 25.
LI Qiong, YAO Yao, YANG Qingchun, et al. Soybean grain detection method based on MATLAB image processing[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2018,34(30):20 - 25. (in Chinese)
[23] 丁琦,徐伟,李蒙,等. 基于分水岭和统计矩的大豆籽粒形态参数测量方法[J]. 大豆科学,2019,38(6):960 - 967.
DING Qi, XU Wei, LI Meng, et al. Measurement method of soybean seed morphological parameters based on watershed and statistical moment[J]. Soybean Science, 2019,38(6):960 - 967. (in Chinese)
[24] 熊政炳. 密集荞麦籽粒图像表型参数提取和粘连分割算法研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2024.
XIONG Zhengbing. Research on phenotypic parameters extraction and adhesion segmentation algorithm for dense buckwheat seed images[D]. Hohhot:Inner Mongolia University of Technology,2024. (in Chinese)
[25] 黄超,茅健,徐斌,等. 基于最小外接矩形和 Hough 变换的定位算法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2021(8):66 - 71.
HUANG Chao, MAO Jian, XU Bin, et al. Location algorithm based on minimum enclosing rectangle and Hough transform [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(8):66 - 71. (in Chinese)
[26] 宋晨旭,于翀宇,邢永超,等. 基于 OpenCV 的大豆籽粒多表型参数获取算法[J]. 农业工程学报,2022,38(20):156 - 163.
SONG Chenxu, YU Chongyu, XING Yongchao, et al. Algorithm for acquiring multi-phenotype parameters of soybean seed based on OpenCV[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(20):156 - 163. (in Chinese)
[27] LIANG J, CHEN J, ZHOU M, et al. An intelligent detection system for wheat appearance quality[J]. Agronomy, 2024, 14(5): 1057.

(上接第 204 页)

[22] 廖伟波, 赵博, 邹镇,等. 基于 CFD - DEM 的 T 形管内非球形颗粒磨损研究[J]. 能源化工, 2025, 46(14): 29 - 37.
LIAO Weibo, ZHAO Bo, ZOU Zhen, et al. Study on wear of non-spherical particles in T-junction pipe based on CFD - DEM [J]. Energy Chemical Industry, 2025, 46(14): 29 - 37. (in Chinese)
[23] 问亚鹏, 张佳奇, 郭锐,等. 基于沙丘猫优化变分模态分解和蜣螂优化算法同步优化特征选择的齿轮泵磨损故障诊断[J]. 液压与气动, 2025, 49(8): 65 - 78.
WEN Yapeng, ZHANG Jiaqi, GUO Rui, et al. Wear fault diagnosis of gear pump based on sand cat optimization variational mode decomposition and dung beetle optimization algorithm with synchronous feature selection[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2025, 49(8): 65 - 78. (in Chinese)
[24] 陈智浩,李阁强,王帅,等. 粒径对全断面竖井掘进机出渣泵磨损特性影响研究[J]. 液压气动与密封,2023,43(10): 20 - 26.
CHEN Zhihao, LI Geqiang, WANG Shuai, et al. Influence of particle size on wear characteristics of discharge pump for full-section vertical shaft boring machine[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023, 43(10): 20 - 26. (in Chinese)
[25] 陈梦,淡娟君,郭鹏程,等. 基于冲蚀流动与动网格耦合的弯管磨损量化研究[J]. 水电能源科学,2025,43(4):203 - 207.
CHEN Meng, DAN Juanjun, GUO Pengcheng, et al. Quantitative study on elbow wear based on coupling of erosion flow and dynamic mesh[J]. Water Power and Energy Science, 2025, 43(4): 203 - 207. (in Chinese)
[26] 黄剑峰,姚激,张蕾蕾. 基于冲蚀-动网格耦合的混流式水轮机泥沙磨损演化特性研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2024,39(2):234 - 243.
HUANG Jianfeng, YAO Ji, ZHANG Leilei. Study on sediment wear evolution of francis turbine based on coupling of erosion and dynamic mesh[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 2024, 39(2): 234 - 243. (in Chinese)
[27] KHALAJI M N, KOCA A, KOTCIOĞLU İ. Investigation of numerical analysis velocity contours $k-\varepsilon$ model of RNG, standard and realizable turbulence for different geometries[J]. International Journal of Innovative Research and Reviews, 2019, 3(2): 29 - 34.
[28] WANG J, SUN L, ZHOU Y, et al. Numerical simulation of cavitation characteristics of a centrifugal pump based on an improved ZGB model[J]. Processes, 2023, 11(2): 438.
[29] 陈雨. 水力机械泥沙磨损特性及渐进磨损预测方法研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2022.
CHEN Yu. Study on sand erosion characteristics and progressive wear prediction methods of hydraulic machinery[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology, 2022. (in Chinese)