

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

张映波 赵子龙 钱忠东

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 离心泵叶片泥沙磨损是引黄泵站面临的工程难题,采用模型试验及数值模拟相结合的方法,分析了双吸式离心泵叶片出口的磨损破坏规律及其形成机制。采用多层涂层法、丝线法和内窥式成像技术对叶片的磨损特征和近壁面流态进行了分析,并结合数值模拟分析了叶轮流道内的旋涡结构及颗粒轨迹。研究发现:叶片吸力面出口存在左右近似对称的“三角形”磨损破坏区域,该区域存在明显的流动分离;叶轮内的叶道涡和出口回流涡是导致叶片吸力面出口磨损的主要原因。源于叶片压力面进口的叶道涡诱导泥沙颗粒向叶片吸力面出口聚集,造成吸力面出口的集中磨损;叶片吸力面出口附近存在的回流涡诱导颗粒进行轴向旋转运动,加剧叶片吸力面出口的磨损破坏。本研究为双吸式离心泵的抗磨损设计提供了理论支撑。

关键词: 双吸式离心泵; 叶片吸力面; 泥沙磨损; 流场观测; 数值模拟

中图分类号: TH311; TV136⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)02-0202-06

OSID:



Analysis of Sediment Erosion at Suction Side of Double Suction Centrifugal Pump Blade

ZHANG Yingbo ZHAO Zilong QIAN Zhongdong

(State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Sediment erosion of centrifugal pump impeller is a major issue of pumping stations on the Yellow River. The sediment erosion at the outlet of the impeller blade suction side of a double-suction centrifugal pump was mainly analyzed by experiments and numerical simulation. In the experiment, the blade sediment erosion was visualized by using the multi-layer coating method and the near-wall flow pattern were observed by the tuft visualization method coupled with the endoscopic imaging technique respectively. The experimental results showed that there were two triangular severe erosion regions symmetrically distributed at the outlet of the suction side of the blade. In the same regions, the flow separation can also be observed clearly. Furthermore, the Euler-Lagrangian method was used to analyze the mechanism for the sediment erosion on the two triangular severe erosion regions. The inter-blade vortex in the pump impeller and the recirculation vortex at the blade outlet were considered responsible for the formation of severe erosion. The inlet-blade vortex can guide sediment particles to aggregate and hit the outlet of the blade suction side. In addition, the recirculation vortex near the outlet of the suction side of the blade made the particles hit the blade repeatedly. Their combined effects lead to severe sediment erosion on the outlet of the blade suction side. The research results can supply theoretical reference for anti-erosion design of centrifugal pump.

Key words: double suction centrifugal pump; suction side of the blade; sediment erosion; flow field observation; numerical simulation

0 引言

双吸式离心泵因流量大、扬程高等特点^[1],被

广泛应用于引黄泵站工程中^[2-3]。由于黄河水泥沙含量高,且泥沙主要成分为石英、长石^[4],离心泵过流部件遭到严重的磨损破坏,导致水泵效率降低、能

收稿日期: 2023-09-28 修回日期: 2023-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279090)

作者简介: 张映波(1998—),男,硕士生,主要从事离心泵泥沙磨损研究, E-mail: ybzhang@whu.edu.cn

通信作者: 钱忠东(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事水力机械及计算流体力学研究, E-mail: zdqian@whu.edu.cn

耗增加、振动加剧,严重影响泵站的安全、高效、稳定运行^[5]。

国内外学者对离心泵内固液两相流动特性和磨损规律进行了大量研究。文献[6-10]采用高速摄影技术和数值模拟的方法研究了不同颗粒粒径、密度、叶片角度、叶轮转速下离心泵内固体颗粒的运动轨迹。文献[11]通过粒子图像测速(Particle image velocimetry, PIV)技术得到了固体颗粒在离心泵叶片不同位置的速度分布图,并对固体颗粒对叶片表面的磨损形式进行了分析。文献[12-13]通过高速摄像技术和数值模拟分析了固体颗粒与过流部件的撞击过程。文献[14-17]研究了颗粒粒径、浓度、叶轮转速对双吸式离心泵叶片磨损强度的影响,并通过改进叶片头部形状、采用仿生凸包体结构等措施提高了叶轮的抗磨损能力。文献[18]采用离散相冲击模型(Discrete phase model, DPM)模拟了离心泵内部的固液两相流动特性及磨损规律,分析了在不同工况和固相参数条件下蜗壳不同位置的磨损量和颗粒浓度。文献[19]采用欧拉-欧拉模型研究了叶片表面磨损率的非定常特性。

目前针对离心泵叶片磨损形成机制的研究尚不够深入。本文采用多层涂层法、丝线法和内窥式成像技术对双吸式离心泵叶片的磨损特征和近壁面流态进行分析,并通过数值模拟对叶轮流道内的旋涡结构和颗粒轨迹进行分析,重点研究叶片吸力面出口泥沙磨损破坏的形成机制。

1 模型试验

1.1 试验台

本文的试验研究在武汉大学水泵磨损试验台上进行。试验台结构如图 1 所示,主要包括模型离心泵、电动机、储水箱、立式搅拌器、进出口闸阀、进出口管道、电磁流量计。模型泵为 HSN250-200-250A 型单级双吸式离心泵,其性能参数:额定流量 Q_d 为 $485\text{ m}^3/\text{h}$ 、额定扬程 H_d 为 14.00 m 、转速 n 为 $1\,450\text{ r/min}$ 、比转数 n_s 为 190 。水泵进口直径 D_i 为 250 mm 、出口直径 D_d 为 200 mm 。叶轮叶片数 Z 为 6 、叶轮外径 D_2 为 236 mm 、叶轮进口直径 D_f 为 156 mm 。试验过程中通过立式搅拌器对储水箱中的含沙水进行搅拌,避免泥沙颗粒沉积在水箱底部。

1.2 内窥式成像系统

在流场可视化试验中采用内窥式成像系统对离心泵内部流场进行观测和图像采集。内窥式成像系统如图 2a 所示,由内窥镜、数码相机、同步触发控制器、频闪仪、图像采集软件 5 部分组成。数码相机分

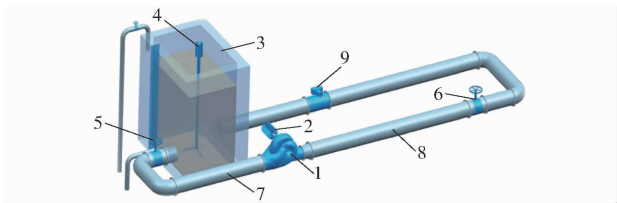
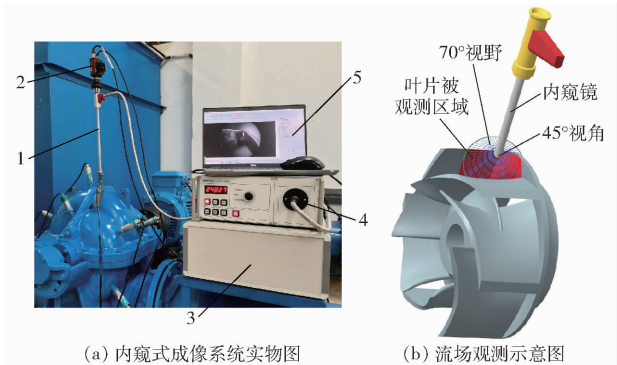


图 1 试验台示意图

Fig. 1 Sketch of experimental test rig

1. 双吸式离心泵 2. 电动机 3. 储水箱 4. 立式搅拌器 5. 进口闸阀 6. 出口闸阀 7. 进水管 8. 出水管 9. 电磁流量计



(a) 内窥式成像系统实物图

(b) 流场观测示意图

图 2 内窥式成像系统实物图及流场观测示意图

Fig. 2 Pictures of endoscopic imaging system and sketch of flow field observation

1. 内窥镜 2. 数码相机 3. 同步触发控制器 4. 频闪仪 5. 图像采集软件

辨率为 $1\,388\text{ 像素} \times 1\,038\text{ 像素}$,最大帧率 30.1 f/s 。内窥镜探头直径 10 mm ,视角 45° ,视野 70° ,可通过旋转探头实现对叶轮特定区域的观测。本试验观测区域为图 2b 所示的红色区域。

1.3 试验方案

1.3.1 泥沙磨损试验

采用多层涂层法来量化叶片的泥沙磨损位置和强度。在叶片表面按顺序依次喷涂红色、黄色、绿色、浅蓝色、深蓝色油漆,每层油漆厚度约为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。在含沙水流中磨损一段时间后,叶片表面不同位置的油漆颜色可以直观反映出磨损破坏的位置和强度。

1.3.2 流场可视化试验

采用丝线法显示离心泵叶片近壁面流场。丝线法是一种传统的流场显示技术^[20],其工作原理是将轻质柔软、跟随性较好的纤维悬挂或粘贴在叶片表面,纤维的另一端可自由活动,根据纤维在叶片表面的运动状态(有无摆动、摆动剧烈程度)判断叶片表面的流动状态^[21]。

本试验选用轻质、柔软、无静电的绿色荧光丝线。丝线直径为 0.1 mm ,长度为 10 mm ,沿叶片展向平行布置,间隔为 5 mm 。叶片吸力面出口丝线布置如图 3 所示。

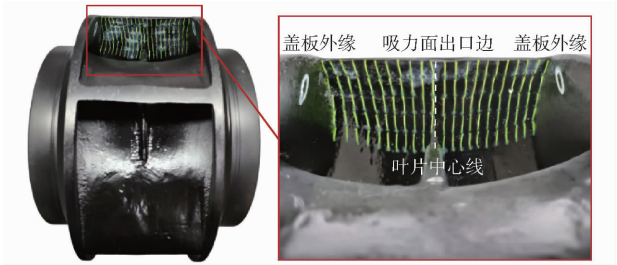


图3 叶片吸力面丝线布置图

Fig. 3 Arrangement of filaments on suction side of blade

2 数值计算

为深入分析叶片吸力面出口磨损破坏的形成机制,本文对双吸式离心泵内的固液两相流动进行了全流道数值模拟计算。

2.1 几何模型

离心泵全流道模型如图4所示,计算区域包括进水管、吸水室、叶轮、蜗壳和出水管5部分。采用ICEM对计算域进行网格划分,经过网格无关性验证后,最终确定吸水室网格数量为 7.9×10^5 ,叶轮网格数量为 1.71×10^6 ,蜗壳网格数量为 8.9×10^5 。各部分网格划分情况如图5所示。

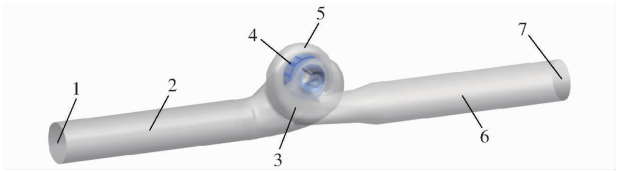


图4 双吸式离心泵全流道模型

Fig. 4 Physical model of double-suction centrifugal pump

1. 进口断面 2. 进水管 3. 吸水室 4. 叶轮 5. 蜗壳 6. 出水管 7. 出口断面

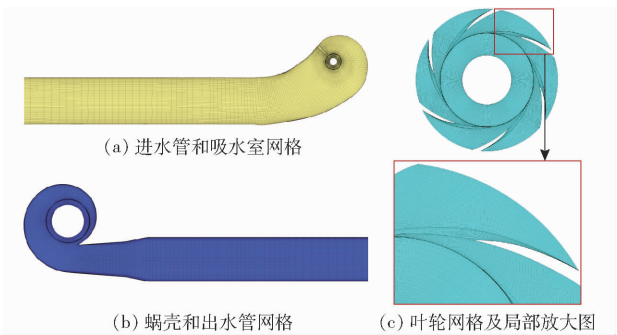


图5 双吸式离心泵计算域网格

Fig. 5 Meshes of computational domain for double-suction centrifugal pump

2.2 控制方程

采用欧拉-拉格朗日方法对双吸式离心泵中的挟沙水流进行模拟,连续相控制方程采用不可压缩稳态雷诺时均 Navier-Stokes 方程:

连续方程为

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程为

$$\frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] + S_p \tag{2}$$

式中 U ——连续相时均速度
 P ——时均压力
 ρ ——连续相密度
 x ——笛卡尔坐标系下位置矢量
 μ ——连续相粘性系数
 μ_t ——湍流粘性系数
 S_p ——动量交换源项

下标 i, j 表示 3 个坐标方向的分量。

采用 SST $k-\omega$ 湍流模型求解计算^[22]。在源项 S_p 中考虑颗粒运动对连续相动量的影响。此外,由于挟沙水流中颗粒体积分数 $C_v < 1\%$,连续方程中颗粒体积分数的影响可忽略。

颗粒运动在拉格朗日体系下进行求解,并采用 Generic 磨损模型^[23]对叶轮的磨损情况进行计算。其中磨损速率 $R_{erosion}$ 计算公式为

$$R_{erosion} = \sum_{p=1}^{N_{particle}} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}} \tag{3}$$

其中

$$f(\alpha) = \begin{cases} 0.04\alpha & (\alpha < 20^\circ) \\ 0.8 + 0.02(\alpha - 20^\circ) & (20^\circ \leq \alpha < 30^\circ) \\ 1 - (\alpha - 30^\circ)/30^\circ & (30^\circ \leq \alpha < 45^\circ) \\ 0.5 - 0.1(\alpha - 45^\circ)/45^\circ & (45^\circ \leq \alpha < 90^\circ) \end{cases} \tag{4}$$

式中 m_p ——颗粒质量
 d_p ——颗粒粒径
 $C(d_p)$ ——颗粒粒径函数,取 1.8×10^{-9}
 α ——颗粒对壁面的冲击角
 $f(\alpha)$ ——颗粒冲击角函数
 v ——颗粒撞击速度
 $b(v)$ ——颗粒撞击速度函数,取 2.6
 A_{face} ——颗粒撞击壁面网格单元面积
 $N_{particle}$ ——撞击壁面颗粒数量

2.3 计算方法与边界条件

进口断面给定流量,出口断面给定总压。首先采用单相流计算离心泵内清水流场,待清水流场计算稳定后,进一步采用离散相冲击模型(DPM)计算泥沙颗粒在离心泵内的运动情况。

3 试验结果与分析

3.1 离心泵性能试验结果

本文在离心泵磨损试验台上进行了双吸式离心泵的性能试验。试验过程中通过电磁流量计、三相

高精度功率仪以及安装在离心泵进出口的压力传感器和配套的数据采集仪来获得离心泵不同工况下的流量、功率和压力数据。离心泵性能曲线如图 6 所示,实测最优工况点的流量为 $490.50\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 13.69 m ,机组效率为 80.50% 。

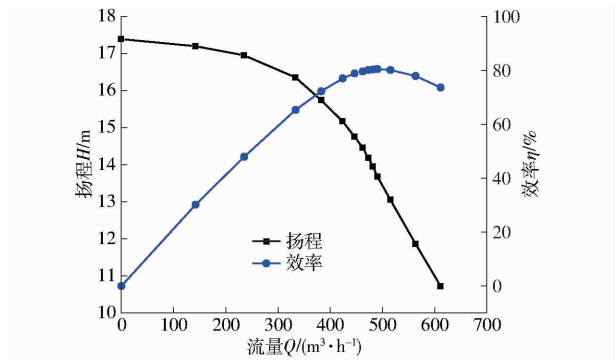


图 6 离心泵性能曲线

Fig. 6 Performance curves of centrifugal pump

3.2 泥沙磨损试验结果

试验工况为离心泵额定流量 Q_d 工况,流量为 $485\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 13.95 m ,机组效率为 80.32% 。根据黄河中上游引黄泵站的运行记录,选取泥沙颗粒粒径 d_p 为 $0.160\text{ 0} \sim 0.315\text{ 0}\text{ mm}$,泥沙质量浓度为 $10.00\text{ kg}/\text{m}^3$ 。图 7 为离心泵在运行 $0、24、48\text{ h}$ 后叶片吸力面出口的泥沙磨损情况。可以看出,离心泵运行 24 h 后,叶片吸力面出口出现两个左右近似对称的“三角形”磨损区域,其表层深蓝色和浅蓝色油漆已被磨蚀,露出了绿色油漆和黄色油漆。离心泵运行至 48 h 时,吸力面出口磨损区域的整体形状和面积相较于 24 h 时变化不明显,但严重磨损区域面积进一步增大。左右两侧“三角形”磨损区域磨损程度不完全相同,但靠近两侧盖板的位置磨损均最为严重,其不对称是由泥沙颗粒的随机性引起的。图 8 为某引黄泵站双吸式离心泵叶片吸力面出口的磨损破坏图像。本试验得到的叶片吸力面出口磨损破坏位置与该叶片典型磨损破坏位置基本一致。

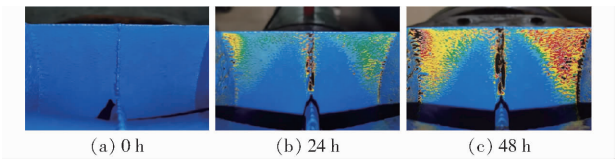


图 7 离心泵运行不同时长后叶片吸力面出口磨损破坏情况

Fig. 7 Erosion at outlet of blade suction side for different hours

3.3 流场可视化试验结果

可视化试验工况为清水条件额定流量 Q_d 工况。图 9 为离心泵在不同流量 Q 下运行时叶片吸力面近壁面的流动情况,受内窥镜视野限制,本文仅给出了单侧出口的流态。图 9a 为离心泵启动前叶片吸

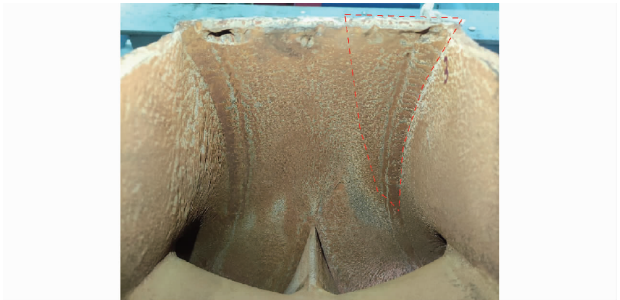


图 8 某引黄泵站叶片吸力面出口磨损破坏情况

Fig. 8 Erosion at outlet of blade suction side at actual site

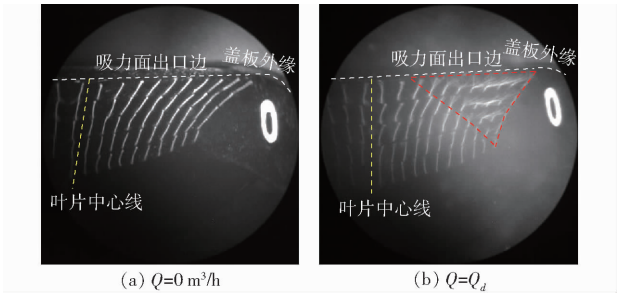


图 9 不同流量工况下叶片吸力面出口的丝线形态

Fig. 9 Filament position of outlet of blade suction side for different flow conditions

力面出口的初始丝线形态。图 9b 为离心泵在额定流量工况下运行时的丝线形态。通过对比水泵启动前和额定流量工况下的丝线形态可知,叶片吸力面出口中间位置大部分的丝线顺水流方向紧贴叶片表面。叶片出口靠近侧盖板位置存在明显的“三角形”区域,位于该区域的丝线不断摆动并呈现向两侧 90° 弯折的形状,表明该位置存在流动分离。该“三角形”区域与图 7 中的叶片吸力面出口磨损区域的形状基本吻合。

4 数值计算结果与分析

根据泥沙磨损试验中泥沙颗粒的粒径范围和浓度,选取其中值粒径 d_{50} 为 $0.237\text{ 5}\text{ mm}$,质量流量 q_m 为 $1.35\text{ kg}/\text{s}$ 进行计算。图 10 为叶轮流道内旋涡的三维结构及典型颗粒轨迹,其中旋涡等势面采用 Q 准则进行显示^[24],颗粒轨迹颜色表示颗粒相对速度的大小。旋涡从叶片压力面进口外缘形成,沿盖板向相邻叶片的吸力面的出口方向延伸形成叶道涡。双吸式离心泵内的水流进入半螺旋形吸水室后产生预旋,但由于吸水室隔舌的存在,预旋流动被阻挡,叶轮进口流速分布并不均匀。本研究采用的高比转数离心泵叶片进口存在扭曲,导致叶片进口外缘形成冲角,进而产生明显的流动分离。对于中低比转数的离心泵,叶片进口的流动分离会有所减轻。

叶道涡的存在改变了叶轮流道内泥沙颗粒的运动轨迹,图 10 中给出的典型颗粒从叶片压力面靠近

盖板的位置进入叶轮,在叶道涡的影响下围绕旋涡做螺旋运动,在相邻叶片吸力面出口靠近盖板的位置打击叶片,使叶片出现磨损破坏。

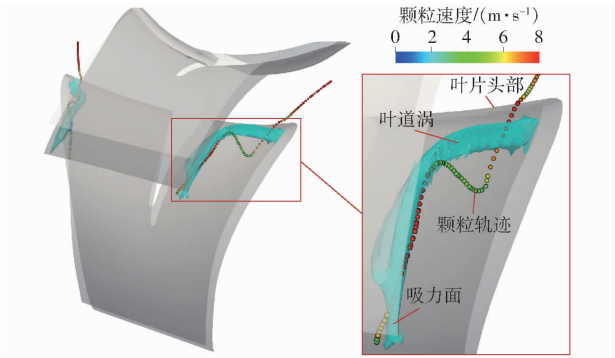


图 10 叶道涡及典型颗粒轨迹

Fig. 10 Interblade vortices and trajectories of typical particles

图 11 为叶片吸力面附近的流线图。可以发现,在叶片表面中后部靠近两侧盖板处均出现脱流,进而在叶片出口处形成回流涡^[25],回流涡的方向与叶轮旋转方向相同。图 12 为叶片吸力面出口回流涡的三维结构和典型颗粒的运动轨迹。回流涡的存在对颗粒运动轨迹有较大影响,颗粒在运动至吸力面出口附近区域时,被回流涡“捕捉”,在回流涡的影响下围绕旋涡在叶片表面进行轴向旋转,导致颗粒与叶片表面的碰撞次数大大增加,从而加剧叶片吸力面出口的磨损破坏。

5 结论

(1)双吸式离心泵叶片吸力面出口存在左右近似对称的“三角形”磨损区域,靠近两侧盖板的位置磨损更加严重。

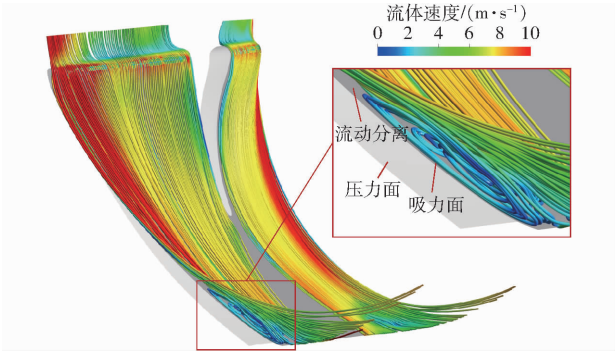


图 11 叶片吸力面流线图

Fig. 11 Streamlines at blade suction side

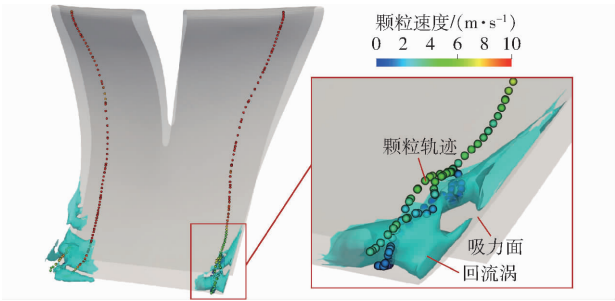


图 12 回流涡及典型颗粒轨迹

Fig. 12 Recirculation vortices and trajectories of typical particles

(2)叶片吸力面出口存在“三角形”的流动分离区,该区域与“三角形”磨损区域基本一致。

(3)叶片压力面进口流动分离诱导形成叶道涡,叶道涡的存在引导部分泥沙颗粒向相邻叶片吸力面出口方向聚集,形成叶片吸力面出口的集中磨损;叶片吸力面出口的回流涡导致泥沙颗粒进行轴向旋转运动,加剧叶片吸力面出口的磨损破坏。

参 考 文 献

[1] 朱迪,肖若富,田芳. 双吸离心泵蜗壳面积比对水力性能的影响研究[J]. 农业机械学报, 2018,49(1):123-129.
ZHU Di, XIAO Ruofu, TIAN Fang. Influence of double suction centrifugal pump volute area ratio on hydraulic performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(1):123-129. (in Chinese)

[2] 刘君,贾宝,唐波. 西北地区高扬程多起伏输水工程选型设计[J]. 中国农村水利水电, 2021(2):157-160.
LIU Jun, JIA Bao, TANG Bo. Selection design of high-lift and multi-fluctuation water transfer project in northwest China[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(2):157-160. (in Chinese)

[3] 钱忠东,王焱,谢华. 副叶片对双吸离心泵口环泥沙磨损的影响分析[J]. 水力发电学报, 2012,31(4):232-237.
QIAN Zhongdong, WANG Yan, XIE Hua. Influence of back blade on sediment erosion of impeller ring in double suction pump [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012,31(4):232-237. (in Chinese)

[4] 庞红丽,高红山,李富强,等. 黄河宁蒙段沉积物地球化学元素组成及分布特征[J]. 中国沙漠, 2022,42(5):44-53.

[5] 张自超. 双吸离心泵泥沙磨损特性研究[D]. 北京:中国农业大学, 2016.
ZHANG Zichao. Investigation on sediment erosion characteristics of double suction centrifugal pump [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[6] 吴玉林,许洪元,高志强. 杂质泵叶轮中固体颗粒运动规律的实验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1992,32(5):52-59.
WU Yulin, XU Hongyuan, GAO Zhiqiang. Experimental study on motion of solid particles in slurry pump impellers[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1992,32(5):52-59. (in Chinese)

[7] 许洪元. 关于泵轮中颗粒运动的研究[J]. 水泵技术, 1994(5):16-19.

- [8] 许洪元, 吴玉林, 戴江, 等. 离心式叶轮中低浓度固体颗粒分布的研究[J]. 工程热物理学报, 1994,15(3):288-291.
XU Hongyuan, WU Yulin, DAI Jiang, et al. Study on distribution of dilute solid particles in centrifugal impeller[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1994,15(3):288-291. (in Chinese)
- [9] 许洪元, 吴玉林, 高志强, 等. 稀相固粒在离心泵轮中的运动实验研究和数值分析[J]. 水利学报, 1997,28(9):13-19.
XU Hongyuan, WU Yulin, GAO Zhiqiang, et al. Experimental study and numerical analysis of the motion of dilute solid particles in centrifugal pump impellers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997,28(9):13-19. (in Chinese)
- [10] 田爱民, 田爱杰, 许洪元, 等. 离心泵叶轮中颗粒轨迹与磨损的关系[J]. 水利电力机械, 2000(2):48-50.
- [11] MEHTA M, KADAMBI J R, SASTRY S, et al. Particle velocities in the rotating impeller of a slurry pump[C]//ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2007: 369-378.
- [12] 刘娟, 许洪元, 唐澍, 等. 离心泵内固体颗粒运动规律的实验研究[J]. 水力发电学报, 2008,27(6):168-172, 167.
LIU Juan, XU Hongyuan, TANG Shu, et al. Experimental research on the movement rule of solid particles in centrifugal pump [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008,27(6):168-172, 167. (in Chinese)
- [13] 刘娟, 许洪元, 唐澍, 等. 离心泵内固体颗粒运动规律与磨损的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2008,39(6):54-59.
LIU Juan, XU Hongyuan, TANG Shu, et al. Numerical simulation of erosion and particle motion trajectory in centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6):54-59. (in Chinese)
- [14] DONG J, QIAN Z, THAPA B S, et al. Alternative design of double-suction centrifugal pump to reduce the effects of silt erosion[J]. Energies, 2019,12(1):158.
- [15] 董静, 钱忠东, 郭志伟, 等. 变速调节对离心泵泥沙磨损特性的影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(8):201-204, 208.
DONG Jing, QIAN Zhongdong, GUO Zhiwei, et al. Influence of variable speed regulation operation on sediment erosion in a centrifugal pump[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(8):201-204, 208. (in Chinese)
- [16] 钱忠东, 王焱, 郜元勇. 双吸式离心泵叶轮泥沙磨损数值模拟[J]. 水力发电学报, 2012,31(3):223-229.
QIAN Zhongdong, WANG Yan, GAO Yuanyong. Numerical simulation of sediment erosion in double-suctions centrifugal pump [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012,31(3):223-229. (in Chinese)
- [17] 钱忠东, 张凯, 王志远, 等. 双吸式离心泵叶片头部形状对泥沙磨损的影响[J]. 排灌机械工程学, 2014,32(2):103-107.
QIAN Zhongdong, ZHANG Kai, WANG Zhiyuan, et al. Effect of blade leading edge shape on sediment erosion of blade in double-suction centrifugal pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014,32(2):103-107. (in Chinese)
- [18] TARODIYA R, GANDHI B K. Numerical simulation of a centrifugal slurry pump handling solid-liquid mixture: effect of solids on flow field and performance[J]. Advanced Powder Technology, 2019,30(10):2225-2239.
- [19] 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)
- [20] 袁建平, 袁寿其, 何志霞. 流场测试技术及其在离心泵中的应用进展[J]. 水泵技术, 2003(2):3-7.
YUAN Jianping, YUAN Shouqi, HE Zhixia. Internal flow measurements techniques and progress in its application in centrifugal pumps[J]. Pump Technology, 2003(2):3-7. (in Chinese)
- [21] 惠增宏, 侯金玉, 邓磊. 荧光微丝在低速风洞试验中应用的关键技术研究[J]. 实验流体力学, 2015,29(1):92-96.
HUI Zenghong, HOU Jinyu, DENG Lei. Key technologies study of fluorescent mini-tuft application in the low speed wind tunnel tests[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015,29(1):92-96. (in Chinese)
- [22] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [23] EDWARDS J K, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. Evaluation of alternative pipe bend fittings in erosive service[J]. Wear, 2000,33(1): 151-173.
- [24] HUNT J C R, WRAY A A, MOIN P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows[R]. Technical Report CTR-S88, Center for Turbulence Research, 1988.
- [25] 李德友. 水泵水轮机驼峰区流动机理及瞬态特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
LI Deyou. Investigation on flow mechanism and transient characteristics in hump region of a pump-turbine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)