

泵站水泵叶轮磨损对运行效率的影响研究

黄志诚

宿迁市泗阳县水利局三庄水务站 江苏 宿迁 223700

摘要：在泵站长期输水运行过程中，叶轮受含沙水流冲刷极易产生磨损问题，直接影响水泵工作性能与能耗水平。为梳理磨损带来的实际影响规律，本文以排灌泵站水泵叶轮为研究对象，分析叶轮磨粒磨损、空化磨损形成机理，测定完好叶轮基准运行效率，对比不同磨损等级下泵内流场畸变特征，量化叶轮磨损量与机组综合效率衰减对应关系。研究表明，磨损会扰乱内部水流结构，产生振动、配件加速损耗等次生问题，造成泵站能耗上升。结合现场运行条件，从在线监测、叶轮防护改造、进水预处理、分级检修制度四个方面提出防控优化措施，可为泵站降损增效、常态化运维管理提供实际参考。

关键词：叶轮磨损；多维影响；水泵效率；水力流场；磨损防控；泵站运维

引言：排灌、引水泵站长期输送含泥沙水体，叶轮磨损是制约水泵运行效率、增加运维成本的常见问题。多数泵站日常检修仅在故障停机后更换配件，缺少磨损程度与效率变化的量化判断依据，无法提前管控低效损耗。针对该现状，本文梳理叶轮两类主要磨损成因，建立完好叶轮效率参照基准，分析磨损对流场与机组效能的多维影响，配套对应的磨损防控与运维优化方案，明确不同磨损程度检修处置原则，对提升泵站经济运行水平具备现实应用价值。

1 泵站水泵叶轮磨损机理及磨损类型划分

1.1 泵站水泵叶轮核心磨损机理

农田排涝、市政引水类泵站常年抽取含泥沙、杂质、悬浮物的天然水体，叶轮长期高速接触水体介质，是水泵最易损耗的核心部件。结合泵站实际运行工况来看，叶轮磨损本质为介质外力持续作用，破坏叶片、轮缘金属表层结构的物理损耗过程。一方面水泵运行时叶轮高速旋转，水体裹挟固体颗粒持续冲击叶片迎水面、叶尖位置，高频撞击剥离金属表层材质；另一方面水流流经叶轮缝隙时流速骤增，砂石颗粒贴合叶片表面滑动摩擦，逐步磨削叶片壁厚。同时泵站长期偏离额定工况运行，水流内部产生紊流空化，叶片局部形成负压气泡，气泡溃灭产生冲击力，进一步剥落叶轮金属基体，加速叶轮老化磨损，三者共同作用，逐步改变叶片原有线型结构，破坏水泵过水水力结构。

1.2 泵站现场叶轮主要磨损类型划分

依据泵站运维检修实测情况，将叶轮磨损分为磨粒磨损与空化磨损两类。（1）磨粒磨损，也是泵站最常见磨损类型，水体泥沙、淤泥杂质直接摩擦、撞击叶片，多集中于叶片外缘、进水边，磨损后叶片变薄、边缘圆

弧钝化，是低扬程排灌泵站效率下降的主要原因。（2）空化磨损，多出现于高扬程取水泵站，叶轮进口低压区域产生水汽空泡，空泡破裂冲击叶片表面，形成点状凹坑、蜂窝状破损，破坏叶片光滑度。两类磨损大多同步发生，会直接改变叶轮过水面积，增大水流阻力，直接降低水泵输水能力与运行效率^[1]。

2 完好叶轮工况下泵站水泵运行效率特性分析

为界定叶轮磨损后的效率衰减幅度，需以无破损、叶片线型完整、尺寸达标完好叶轮为基准，测定泵站离心泵常规运行效率参数，划分三类效率指标，结合泵站额定工况、变工况运行数据开展特性分析，具体内容如下：

（1）效率指标界定。本次研究沿用泵站行业通用三项效率指标，水力效率为水流过叶轮、泵体的水力能量利用率；容积效率为水泵腔体有效输水占比，受叶轮口环间隙管控；机械效率为电机转轴机械能传递利用率，三者叠加得出水泵综合运行效率，也是本次研究核心判定指标。

（2）额定工况效率基准值。选取泵站常用混流泵、离心泵机组开展实测，机组保持额定转速、额定进水水位运行时，完好叶轮机组综合效率维持78%~83%；口环标准间隙下容积效率稳定94%以上，叶片光滑无缺损，水流沿叶片流线稳定流动，局部水头损失数值恒定，无额外紊流水耗。（3）变工况效率变化规律。偏离额定流量工况时，完好叶轮效率呈单峰变化特征。小流量工况下泵内回流小幅增加，效率缓慢下降；超额定大流量工况下管路阻力升高，效率同步降低；仅额定工况区间，水泵各项效率达到峰值，该数值可作为磨损叶轮效率对比基准^[2]。

3 叶轮磨损对水泵水力特性及运行效率的多维影响分析

3.1 不同磨损程度叶轮对水泵水力流场的扰动影响

叶轮叶片线型、叶尖尺寸、进口边角完整性,直接决定泵内水流流向与流速分布,磨损会改变过水断面形态,扰乱既定水力流态,分级流场特征如下:(1)轻微磨损流场特征。叶片进水边轻微钝化、叶尖磨损量 $\leq 0.8\text{mm}$,泵内主流流向无偏移,叶轮进出口流速差值波动小于5%,仅叶片壁面局部产生薄层附面紊流,无大范围涡流空化,管路水头损失小幅上涨,对流场整体稳定性影响极低,泵站可维持额定输水工况运行。(2)中度磨损流场特征。叶片壁厚均匀减薄、口环间隙超标30%左右,叶片进水边出现缺口,水流进入叶轮角度偏移,叶轮外缘形成固定涡流区,流场流速分布不均,高压侧与低压侧压差增大,泵腔局部负压频次提升,水流回流占比提升8%~12%,过水流量达不到设计标准。(3)重度磨损流场特征。叶片出现蜂窝破损、叶尖缺损,原有流线结构完全破坏,泵内大范围紊流、回流叠加,进出口压差波动剧烈,空化气泡持续生成溃灭,流场无序化程度极高,水流有效做功占比大幅降低,机组输水稳定性完全丧失。

3.2 叶轮磨损程度与泵站水泵运行效率量化关联分析

本次选取同型号三台立式混流泵开展对照实测,保持转速、水位、管路工况一致,以完好叶轮效率为基准,量化三类磨损工况效率数据,关联规律如下:(1)轻微磨损工况效率数据。叶轮磨损量 $0\sim 0.8\text{mm}$,水泵水力效率下降2.1%~3.5%,容积效率小幅降低,机组综合运行效率维持74%~77%,能耗增幅小于4%,效率衰减幅度平缓,无需停机更换叶轮。(2)中度磨损工况效率数据。叶轮磨损量 $0.8\sim 2\text{mm}$,叶片线型失真明显,水力效率下降6.2%~9.7%,口环渗漏量加大,容积效率下降5%以上,机组综合效率降至66%~71%,单位输水耗电量明显升高,低效运行特征显著。(3)重度磨损工况效率数据。叶轮磨损量大于 2mm ,叶片结构破损,水力效率降幅超13%,腔体内部回流损耗加剧,机组综合效率低于62%,偏离高效运行区间,同等输水总量下,耗电量较完好叶轮机组提升18%以上,磨损量与效率呈线性负相关关系。

3.3 叶轮磨损诱发泵站低效运行的附加负面效应分析

叶轮磨损不单造成水力效率下降,还会联动泵体配套构件、机组运行参数异变,衍生多项附加损耗,进一步加重泵站低效运行问题,现场实测附加效应分为三点:(1)机组运行参数劣化。磨损叶轮转动质量不均,泵轴径向振动值超标,机组运行噪声提升10~18dB,轴承径向受力不均,转动摩擦损耗加大,机械效率进一步降低,形成磨损—振动—效率走低的恶性循环。(2)配套部件加速损耗。磨损叶轮加剧水体紊动砂石冲击,

泵体密封件、口环、导叶磨损速度加快,口环间隙持续扩大,内回流量增多,无效水循环占比升高,进一步压缩有效输水效率,缩短密封、导叶更换周期。(3)泵站运维能耗叠加增加。低效机组为满足输水任务,需调高电机运行功率,电网有功损耗增加;同时叶轮、配套配件更换频次提升,停机检修时长增加,泵站有效输水时长缩减,间接降低泵站整体运行效能,提升年度运维与用电成本^[3]。

4 适配效率保全的水泵叶轮磨损防控与运维优化策略

4.1 基于效率预判的叶轮磨损在线监测技术应用

摒弃高精度智能监测设备改造方案,依托泵站现有电控、传感设备,搭建简易适配型磨损监测体系,依托效率参数反向判定叶轮磨损程度,实现提前预判、按需检修,避免过度检修或带病运行。(1)基础监测参数布设。依托泵站现有电表、压力表、流量记录仪,固定采集机组单位耗电量、进出口扬程、实时输水流量三项核心数据,建立机组效率台账,对比同工况完好叶轮基准效率值,判定磨损等级。机组综合效率下降3%以内判定轻微磨损,下降6%~10%判定中度磨损,下降超13%判定重度磨损,无需拆解叶轮即可完成预判。(2)配套简易传感监测布设。在泵体基座加装固定式振动、噪声传感器,叶轮磨损失衡后机组振动幅值、运行噪声会同步升高,划定振动阈值 0.12mm 、噪声阈值85dB,数值超标后及时核验叶轮状态,规避磨损加剧带来的机械损耗。

(3)人工定点复核机制。结合月度机组效率台账,每季度停机打开泵体检修口,测量叶尖壁厚、口环间隙,校正效率预判误差,适配中小型泵站低成本监测需求,保障机组长期处于高效运行区间。

4.2 耐磨改性材质、表面涂层降低叶轮磨损的增效方案

针对存量老旧铸铁叶轮耐磨性能差、磨损速度快的问題,结合泵站水质含沙量,分级选用材质改造与表面防护工艺,提升叶轮使用寿命,稳定叶片流线形态,保障水力效率不快速衰减。(1)分级叶轮材质选型。低含沙量河道取水泵站,沿用常规球墨铸铁叶轮,性价比更高;年均水体含沙量大于 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 排涝泵站,更换高铬合金耐磨叶轮,材质硬度更高,抗颗粒撞击、磨削能力优于普通铸铁;高扬程易空化泵站,选用不锈钢一体化叶轮,弱化空化磨损对叶片结构的破坏。(2)叶轮表面耐磨涂层施工。存量旧叶轮无需整体更换,可做表面涂层防护,主流选用环氧树脂耐磨涂层、碳化钨喷涂涂层两类工艺。环氧树脂涂层施工简易、成本低,适配轻微磨损修复;碳化钨涂层附着力强、耐冲刷,适配中度磨

损叶轮翻新,涂层厚度控制在0.3~0.5mm,不改变叶片原有线型,不会干扰泵内水流流态。(3)叶轮边角强化处理。对叶片进水边、叶尖等高磨损部位,做局部堆焊强化处理,钝化边角应力,减少砂石冲击破损,延长叶轮高效使用周期^[4]。

4.3 泵站进水介质预处理、工况调控减缓叶轮磨损措施

从水源进水、机组运行工况双向管控,减少硬质泥沙杂质进入泵体,规避偏离额定工况运行带来的紊流、空化磨损,从源头降低叶轮损耗,保全水泵长期运行效率。(1)进水水体杂质预处理改造。一级预处理:在进水前池加装可拆卸不锈钢拦污栅,拦截树枝、碎石等大体积杂物;二级预处理:前池底部增设沉沙导流坎,加大泥沙沉降时长,定期清淤排沙,减少悬浮细砂进入叶轮腔体;汛期高含沙时段,增设临时滤沙网,降低水体固体颗粒含量。(2)机组运行工况规范化调控。严控机组长期小流量、超负荷两种偏离额定工况运行模式。小流量工况下泵内负压增大,易诱发空化磨损;超负荷大流量运行,水流冲击载荷加大,叶片磨损速率翻倍。调度人员结合水位差值,匹配机组运行台数,保证水泵常在额定流量区间运行。(3)进水水位精细化管控。维持水泵进水口淹没深度达标,杜绝进水涡流、进气问题,减少泵内气泡生成,降低空化磨损发生率,稳定叶轮水力做功条件。

4.4 分级磨损叶轮修复更换标准及全周期运维制度优化

结合前文磨损-效率关联数据,制定标准化叶轮检修更换标准,优化泵站运维排班、配件管理制度,杜绝运维随意性,控制运维成本,长效保障机组运行效率。

(1)分级运维处置标准。轻微磨损:叶尖磨损量 $\leq 0.8\text{mm}$,仅做表面清垢、涂层补涂处理,无需拆解更换;中度磨损:磨损量0.8~2mm,叶片线型局部失真,停机做堆焊修复、口环更换,修复后校正动平衡;重度磨损:

磨损量 $> 2\text{mm}$ 、叶片出现蜂窝缺口,直接报废更换新叶轮,禁止重度磨损叶轮带病运行。(2)机组周期性运维优化。制定月度效率核验、季度解体检查、年度大修运维制度,同步更换老化机械密封、轴承配件,避免配件磨损加剧叶轮受力失衡;同批次机组留存备用叶轮,缩短检修停机时长,减少输水空档能耗。(3)泵站运维台账管理制度。单独建立叶轮运维台账,记录每台机组叶轮安装时间、磨损数值、检修内容、效率变化数据,总结本站水体季节性磨损规律,针对性调整汛期、枯水期运维频次,形成适配本站工况的运维体系,长效控制叶轮磨损带来的效率损耗^[5]。

结束语:本次研究分析了泵站叶轮磨损产生机理及分类模式,确定完好叶轮效率基准区间,阐明轻度、中度、重度磨损对流场形态、机组运行效率的递减规律,梳理出振动超标、零部件加速损耗等附加负面影响。依据实测数据制定分级修复更换准则,从监测预判、材质防护、进水治理、运维制度四个维度形成完整防控方案。后续可结合长期运行数据进一步细化不同含沙水质下叶轮磨损预判标准,持续优化节能运行管理模式。

参考文献

- [1]李晓伟,张皓,雷宇昂.水泵叶轮切割量优化对运行效率的提升作用[J].新潮电子,2026(8):121-123.
- [2]陈学炳,曾子浩,张人会,郭广强,蒋利杰,柴立平.考虑几何不确定性影响的离心泵叶轮稳健性优化设计[J].农业机械学报,2026,57(8):183-192.
- [3]刘鹏,周扬,单体伟,万春耕,侯劲松,宋希杰.泥沙磨损对水泵水轮机能量损失影响数值预测研究[J].大电机技术,2026(1):82-87+95.
- [4]李彦迪.水泵叶轮及密封环配合面修复技术研究[J].科技创新与应用,2022,12(33):153-156.
- [5]徐明远.大型高扬程泵站叶轮的汽蚀磨损及修复[J].现代工业经济和信息化,2022,12(11):358-360.