

立式离心泵在高含沙水流工况下的汽蚀与磨损问题分析

龙攀亮

宁夏固海扬水管理处 宁夏 中卫 755100

摘要: 立式离心泵广泛应用于农田灌溉、矿山排水、河道清淤等工程,高含沙水流工况易引发汽蚀与磨损故障,严重影响泵组运行稳定性与使用寿命。本文阐述立式离心泵与高含沙水流的基础特性,分析高含沙水流对汽蚀、磨损的影响规律及二者协同作用机制,介绍故障识别、检测方法,提出结构优化、材料改进等防控措施,通过试验与工程验证其有效性,为高含沙工况下立式离心泵的安全稳定运行、故障防控及运维优化提供理论与实践支撑。

关键词: 立式离心泵;高含沙水流工况下;汽蚀;磨损问题

引言: 在矿山、农田灌溉、河道治理等工程中,立式离心泵因结构紧凑、适配垂直安装的优势,成为高含沙水流输送的核心设备。我国大型灌排引黄泵站多面临高含沙问题,易出现汽蚀与磨损,导致泵组效率下降、故障频发、运维成本增加。当前相关防控技术仍需完善,基于此,本文聚焦高含沙水流工况下立式离心泵的汽蚀与磨损问题,深入分析其产生机制、影响因素及协同效应,提出针对性防控方案,助力提升泵组运行可靠性与使用寿命。

1 立式离心泵与高含沙水流工况基础理论

1.1 立式离心泵结构与工作原理

立式离心泵核心结构:叶轮是能量转换核心,将机械能传递给流体;泵壳收集流体并转换动能为压力能;吸水管、出水管分别负责流体吸入与排出;密封装置防止流体泄漏,保障运行密封性。立式离心泵工作原理:通过叶轮高速旋转产生离心力,完成流体动能与压力能的转换;立式安装使轴向受力更合理,流动更平稳,适配垂直空间安装需求。(3)立式离心泵运行关键参数:流量决定输送效率,扬程影响输送高度,转速直接关联能量转换效率,汽蚀余量不足会引发汽蚀故障,均直接影响泵的运行稳定性^[1]。

1.2 高含沙水流的基本特性

高含沙水流的定义与分类:以含沙浓度为核心划分,结合颗粒粒径(0.06~0.40mm为常见区间),分为轻度、中度、高度含沙水流三类,粒径越大,沉降速度越快。高含沙水流的物理性质:含沙量越高,密度、粘度越大;泥沙沉降特性受粒径和流速影响,会改变流体流动状态,增加流动阻力。工程中高含沙水流的典型场景:矿山排水含沙粒径偏粗,农田灌溉含沙量波动大,河道清淤含沙浓度高,均对泵组输送能力提出特殊要求。

1.3 高含沙水流与立式离心泵的相互作用

高含沙水流对泵内流场的影响:会改变泵内流速分布,导致压力不均,易形成漩涡,破坏流场稳定性,降低能量转换效率。立式离心泵运行参数对含沙水流输送的影响:转速过高易加剧泥沙磨损,过低则会导致泥沙沉降;流量合理可减少沉降,提升输送效率。高含沙水流工况下泵组运行的核心问题:泥沙磨损叶轮、泵壳等部件,汽蚀会破坏流道,二者叠加会引发泄漏、振动等连锁故障,影响泵组寿命。

2 高含沙水流工况下立式离心泵汽蚀问题分析

2.1 汽蚀的基本理论与产生机制

汽蚀的定义与形成过程:汽蚀是立式离心泵运行中,泵内局部区域压力降至液体饱和蒸气压时,液体发生汽化形成气泡,气泡随流体流动至高压区后迅速溃灭,形成瞬时高压冲击的现象,完整过程分为液体汽化、气泡产生、气泡溃灭三个阶段,且各阶段连续循环。(2)汽蚀的危害:汽蚀会导致泵体剧烈振动、运行噪音显著增大,破坏水力性能,使流量、扬程大幅下降,同时气泡溃灭产生的瞬时高压会冲击过流部件表面,造成部件磨损、腐蚀,长期运行会缩短泵组使用寿命,甚至引发停机故障^[2]。(3)汽蚀产生的核心条件:核心是泵内局部压力低于液体对应温度下的饱和蒸气压,此外,液体中存在气核、气核的生长与溃灭速度,以及流体流动状态,均会影响汽蚀的产生与发展,气核越多、溃灭速度越快,汽蚀现象越严重。

2.2 高含沙水流对汽蚀的影响规律

含沙浓度的影响:含沙浓度对汽蚀临界条件影响显著,如含沙浓度15%时,汽蚀临界余量略有上升,而浓度升至16.5%时,临界余量大幅增加,含沙浓度越高,流体粘度增大,汽蚀发生的临界压力越高,越易引发汽蚀。泥沙颗粒特性的影响:泥沙颗粒粒径越大、硬度越高,对汽蚀气泡演化及溃灭强度影响越明显,大粒径硬颗粒

会撞击气泡加速其溃灭,同时加剧气泡溃灭时的冲击力,进一步破坏过流部件,加速汽蚀进程。运行参数的影响:转速升高会增大泵内流体离心力,降低局部压力,提升汽蚀敏感性;流量偏离设计值过大时,流场紊乱,易形成低压区引发汽蚀;安装高度过高会增加吸水管阻力,降低泵入口压力,诱发汽蚀。

2.3 高含沙水流工况下汽蚀的试验分析

试验装置与方案设计:搭建立式离心泵试验台,配备泥沙混合装置配制不同含沙浓度、不同粒径的高含沙水流,设定转速、流量等变量参数,安装压力、振动、噪音测试设备,明确试验分组与测试流程,确保试验数据的准确性。试验数据采集与分析:重点采集汽蚀临界余量、泵体振动加速度、运行噪音分贝等关键参数,对比不同含沙浓度、颗粒粒径及运行参数下的数据差异,分析各因素对汽蚀的影响程度,梳理数据变化规律。试验结论:明确高含沙水流工况下,含沙浓度、泥沙粒径与汽蚀强度呈正相关,转速过高、流量偏离设计值、安装高度过高会显著提升汽蚀风险,同时确定不同工况下汽蚀的发生规律及核心影响因素,为汽蚀防控提供试验依据。

2.4 汽蚀故障的识别与判断方法

外观识别:通过观察过流部件表面,若出现蜂窝状凹坑、表面剥落、腐蚀斑点等特征,可判断发生汽蚀,且损伤程度与汽蚀强度正相关。运行参数识别:运行中若出现压力表读数剧烈波动、流量和扬程持续下降,同时泵体振动、噪音异常增大,排除其他故障后,可判定为汽蚀故障。监测技术应用:采用压力传感器及机组振摆检测仪实时监测泵内局部压力,通过振动传感器捕捉泵体振动信号,结合数据异常变化,实现汽蚀故障的在线监测,及时预警汽蚀风险。

3 高含沙水流工况下立式离心泵磨损问题分析

3.1 磨损的基本理论与类型划分

磨损的定义与本质:磨损是高含沙水流工况下,泵内流动的泥沙颗粒与过流部件表面发生撞击、摩擦等机械作用,导致部件表面材料逐渐流失、表面形貌劣化的现象,其本质是机械能作用下的材料损耗过程。高含沙工况下磨损的主要类型:核心为磨粒磨损,即泥沙颗粒作为磨料刮擦部件表面;其次是冲蚀磨损,高速含沙水流冲击部件形成局部损伤;汽蚀磨损由气泡溃灭冲击与泥沙磨损协同作用产生;此外,三种磨损常相互叠加形成协同磨损,加剧部件损伤。磨损的危害:磨损会使过流部件厚度逐渐减薄,叶轮叶片出现缺口、变形甚至失效,导致泵组水力性能下降、效率降低,能耗增加,严

重时会造成部件泄漏、泵组停机,大幅缩短泵组整体使用寿命,增加运维成本。

3.2 高含沙水流对磨损的影响因素

泥沙特性的影响:颗粒粒径越大、硬度越高,磨损能力越强;不规则形状颗粒比圆形颗粒磨损更剧烈;含沙浓度越高,单位时间内撞击部件的颗粒数量越多,磨损程度呈显著上升趋势。泵体结构的影响:叶轮叶片形状不合理、流道尺寸设计不当,会导致含沙水流流速分布不均,局部流速过高加剧磨损;过流部件材料硬度越低,抗磨损能力越弱,磨损速率越快。运行工况的影响:转速越高,泥沙颗粒撞击速度越快,冲击力越大,磨损速率显著提升;流量偏离设计值时,流场紊乱,局部冲刷强度增大;进出口压力不稳定会加剧水流扰动,间接增加磨损程度^[3]。

3.3 磨损的分布规律与损伤特征

磨损的空间分布:磨损存在明显热点区域,叶轮出口、叶片前缘及蜗壳扩散段磨损最严重,因这些区域水流流速高、泥沙颗粒撞击集中,而泵壳进口、叶轮轮毂等区域磨损相对较轻。磨损的微观特征:部件表面可见明显划痕、深浅不一的凹坑及麻点,划痕由泥沙颗粒刮擦形成,凹坑和麻点则源于颗粒撞击与汽蚀协同作用,微观形貌呈现不规则凹凸状,表面粗糙度显著增加。磨损的发展规律:磨损量随运行时间呈非线性增长,初期磨损速率较快,随部件表面逐渐粗糙,磨损速率趋于平缓,长期运行后因材料累积损耗,磨损速率再次加快,最终导致部件失效。

3.4 磨损程度的检测与评估方法

离线检测方法:称重法通过测量部件磨损前后质量差计算磨损量;尺寸测量法检测部件关键尺寸变化评估磨损程度;微观形貌观测法借助内窥镜显微镜观察表面微观损伤,分析磨损机制。在线监测方法:安装磨损传感器实时捕捉部件磨损信号,结合振动分析技术,通过监测振动频率变化,实时判断磨损程度,实现磨损故障的早期预警,减少停机损失。(3)磨损评估指标:以磨损速率、材料损失量作为基础评估指标,结合部件剩余寿命、表面粗糙度等参数,建立综合评估标准,精准判断部件磨损状态,为运维更换提供依据。

4 高含沙水流工况下汽蚀与磨损的协同作用及防控措施

4.1 汽蚀与磨损的协同作用机制

汽蚀对磨损的促进作用:汽蚀发生时,气泡在高压区迅速溃灭会产生瞬时高压微射流,该微射流不仅直接冲击泵内过流部件表面,还会加速泥沙颗粒的运动速

度、增强颗粒撞击力度,使泥沙颗粒对部件的冲刷、刮擦作用显著加剧,大幅提升磨损速率,形成“汽蚀助推磨损”的叠加效应。磨损对汽蚀的加剧作用:磨损会导致过流部件表面出现划痕、凹坑等缺陷,破坏部件表面的光滑性,使局部流场产生紊乱,形成低压漩涡区,降低部件的抗汽蚀性能;同时,表面缺陷会成为汽蚀气泡产生的核心点位,加速气核的生长与溃灭,进一步诱发和加剧汽蚀现象,形成恶性循环^[4]。协同作用的危害:汽蚀与磨损相互促进、相互叠加,相较于单一故障,协同作用会导致泵组过流部件损伤速度呈几何倍数加快,水力性能急剧恶化,泵组振动、噪音异常加剧,故障频率大幅提升,不仅会显著缩短泵组使用寿命,还可能引发叶轮断裂、泵壳泄漏等严重停机事故,增加工程运维成本与安全隐患。

4.2 汽蚀与磨损的防控措施

结构优化设计:优化叶轮叶片形状与流道曲线,减少流场紊乱和局部低压区,降低汽蚀风险;合理匹配吸水管、出水管尺寸,减少管路阻力,提升泵入口压力;对叶轮、蜗壳等关键部件进行圆角处理,减轻泥沙撞击与气泡溃灭的冲击,从结构上减少汽蚀与磨损隐患。材料改进措施:选用高硬度、高耐磨性、高抗汽蚀性能的合金材料制作过流部件,提升部件自身抗损伤能力;对部件表面进行涂层改性处理,通过喷涂耐磨、抗汽蚀涂层,形成防护屏障,减少泥沙冲刷与气泡冲击对部件的直接损伤,延长部件使用寿命。运行工况优化:根据高含沙水流的含沙浓度、颗粒粒径,合理调整泵组转速与流量,使其运行在设计工况范围内,避免转速过高、流量偏离设计值导致的汽蚀与磨损加剧;禁止高扬程泵低扬程使用,防止泵内流速异常升高;必要时对进水进行预处理,控制含沙浓度与颗粒粒径,降低介质对泵组的损伤^[5]。辅助防护措施:在泵组入口安装合适规格的滤网,拦截大粒径泥沙颗粒,减少泥沙进入泵内;安装止回阀防止水流倒流,加装水锤消除器减轻水锤冲击对部件的损伤;建立定期清理维护制度,及时清除泵内积沙、检查部件磨损与汽蚀情况,提前排查故障隐患。

4.3 防控措施的有效性验证

数值模拟验证:基于流体力学理论建立立式离心泵三维模型,模拟高含沙水流工况下,优化后泵内流场分布、汽蚀气泡演化规律及泥沙颗粒运动轨迹,对比优化前后汽蚀临界余量、磨损速率的变化,验证结构优化、工况调整等措施的有效性。试验验证:搭建试验台,分别测试优化前后泵组的汽蚀性能、磨损速率、振动加速度、噪音分贝及水力效率等参数,通过数据对比,明确防控措施对抑制汽蚀、减轻磨损、提升泵组运行稳定性的实际效果,优化完善防控方案。工程应用验证:将优化后的防控措施应用于农田灌溉、矿山排水、河道清淤等实际高含沙工况中,长期监测泵组运行状态、部件损伤情况及运维成本,分析防控措施在实际应用中的适应性与有效性,为后续工程应用提供实践依据。

结束语

本文系统分析了高含沙水流工况下立式离心泵汽蚀与磨损的产生机制、影响因素及协同作用,明确了故障识别检测方法与防控路径,通过数值模拟、试验及工程应用验证了防控措施的有效性。研究表明,结构优化、材料改进与工况调控结合可有效抑制故障发生。后续可进一步优化防控技术,结合智能化监测手段,提升适配性与经济性,为不同高含沙场景下立式离心泵的高效、安全运行提供更全面的技术保障。

参考文献

- [1]李大勇,郭维民,唐洪岩.离心泵的汽蚀问题与防止措施[J].南方农机,2021,51(14):43-44.
- [2]王辉,金雪红.浅析离心泵抗汽蚀性能的影响因素及提高措施[J].城镇供水,2022,7(02):17-26.
- [3]岳彬,李涛,张一鸣.不同工况下诱导轮对自吸离心泵汽蚀影响的研究[J].环境技术,2021,39(01):106-111.
- [4]郝咏冰,张胜,乔金宇.泵汽蚀试验方法研究[J].机电工程技术,2024,49(09):76-77.
- [5]刘航泊,王辉,程蕾,杨军虎.高抗汽蚀离心泵的仿真优化设计[J].流程工业,2022,27(07):46-48.