

# 水电站机械设备腐蚀监测与防护技术研究

敬嘉

四川贝诺人力资源管理有限公司, 四川省成都市, 610023;

**摘要:** 水电站机械设备长期处于潮湿与含盐含沙的复杂环境之中, 金属与涂层在水化学与电化学共同作用下产生多源腐蚀, 局部缝隙与焊缝热影响区更易形成加速区。为在可控成本内延缓失效并保持可用性, 本文构建以机理认知、在线监测与工程防护协同的技术框架, 提出以环境分区与材料分级为底座的治理思路, 给出监测指标与布点方法、数据解读与寿命评估路径以及表面体系与阴极措施的匹配准则, 并将运维协同与数据闭环嵌入流程, 使防护从一次性施工转向全周期治理。方法强调词典统一与证据留痕, 结合样段验证与滚动复核, 在不同水文与负荷条件下保持稳定效果。方案兼顾经济与绿色, 通过模板复制与分区实施扩大覆盖。

**关键词:** 水电站; 腐蚀监测; 阴极保护; 涂层体系; 寿命评估

**DOI:** 10. 69979/3060-8767. 25. 05. 085

## 引言

腐蚀导致部件壁厚减薄与连接松弛, 进而诱发泄漏与卡滞等连锁后果, 水工环境还叠加泥沙冲刷与空化汽蚀, 若缺少统一词典与稳定评价, 治理容易流于一次性修补。为把复杂因素纳入可执行框架, 需要以场地水化学、流态与材料体系为主线, 把环境边界、腐蚀类型与失效路径明确表达, 再以监测与数据治理支撑早期识别与趋势判断, 使防护策略与证据一一对应。工程实施面临检修窗口短与位置受限的约束, 因此监测方案应以少量高信息测点为主, 防护方案应以可维护与可复原为导向, 把工艺可达性与安全边界前移到策划阶段。本文在不依赖特定品牌与专有数据的前提下, 给出机理层、监测层与实施层的系统方法, 力求在多水头与多气候条件下保持可迁移与可复制。同时需要把应急处置与长期治理统一到一张路线图, 明确快速止损与根治修复的衔接条件, 把风险与费用以同一尺度表达, 便于多方在同一目标下协同。

## 1 腐蚀机理与环境边界

### 1.1 水工环境与腐蚀类型谱

水电站设备暴露于多变水化学与流固作用之中, 溶解氧与二氧化碳参与电化学过程, 泥沙含量与粒径决定磨蚀强度, 温度与导电性调节腐蚀速率, 静止区与高速区的边界影响阳极与阴极分布。常见模式包含均匀腐蚀与局部点蚀, 靠近缝隙与垫片的区域易出现差异氧浓度引发的缝隙腐蚀, 焊缝热影响区因组织不均更易形成微电池, 在含氯离子的水体中还可能出现应力腐蚀裂纹<sup>[1]</sup>。

空化与汽蚀在高落差或局部负压区产生微射流与冲击坑, 与电化学腐蚀相叠加会加速涂层破坏与金属剥蚀。涂层体系在热胀冷缩与水压脉动下产生微裂纹, 若前处理粗糙度与清洁度不达标则附着力下降, 涂层下腐蚀沿界面扩展, 外观仍旧完整而基体已被削弱。湿干交替区的氧扩散更充分, 阴极区位与阳极区位随水位变化而迁移, 年周期与季节性改变腐蚀热点位置, 岸边风生浪与启停调度带来额外扰动, 导致短时窗口内的速率可显著提升。材料种类对路径有决定性影响, 碳钢在中性水体中以阳极溶解为主, 不锈钢在氯离子增强时易突破钝化膜, 喷焊合金与金属热喷涂层在冲刷下表现差异, 阴极保护电位若控制过低会诱发氢脆风险, 控制过高则保护不足。为在规划阶段给出可执行边界, 有必要把水体成分与流速区间划分为若干等级, 将对应的腐蚀类型与优先部位写入清单, 把易感位点与可达位点区分开来, 再用样段验证校核判断, 促使后续监测与防护基于证据运行。

### 1.2 材料与结构的失效路径

失效路径由材料组织与构造细节共同决定, 母材成分与相比例影响钝化能力, 焊接热循环导致晶粒长大与残余拉应力, 在长期水压与温度循环作用下, 微裂纹沿弱界面扩展并在几何突变处汇聚, 形成宏观裂纹与泄漏风险。法兰与密封圈夹持区容易形成缝隙环境, 氧扩散受限导致阴极区位稳定, 点蚀坑沿缝边发展并侵入基体, 配合面若存在微动则会出现磨蚀与腐蚀耦合, 表层氧化膜被反复破坏而难以恢复<sup>[2]</sup>。轴颈与滑动轴承之间的油膜或水膜一旦被污染, 局部温升与摩擦上升, 表面硬度

下降与夹层剥落相互促进,当介质含沙时,磨粒嵌入软相引起条带与划痕,后续电化学反应沿划痕扩展,形成带状腐蚀。对于马氏体不锈钢与析出硬合金,氯离子与拉应力共同作用会诱发穿晶或沿晶开裂,在阴极保护电位控制不当时,氢原子进入晶格造成脆化,低温停机阶段更为明显。涂层体系若基底处理不足或界面污染,将出现空鼓与针孔,渗入的水与离子在界面迁移,以涂层下腐蚀的形式消耗金属,肉眼观察与厚度测量可能滞后,管理误判与维护延误因而发生。多金属连接处的电偶效应常被忽视,螺栓与母材电位差驱动局部流,螺纹根部因应力集中而成为薄弱环,当紧固力随时间衰减,微动幅值上升,腐蚀与疲劳交替作用进一步缩短寿命。在复杂结构上,几何困陷与排水不畅形成长时含水区,表层涂层即便完好也掩盖了内部的能量通道,因此失效分析应与几何与工艺一道审视,给出针对性的修正位置与构造细节。铸造件的缩孔与夹渣为后续局部腐蚀提供起点,镀层边界的台阶效应引入电位梯度,若未在收口与转角处做圆滑与封边,界面电场集中度更高,早期破损概率显著增加。

## 2 监测体系与数据治理

### 2.1 监测指标与布点方法

监测体系以少而精为原则,优先选择信息增益高且易维护的通道,核心指标包含开路电位与极化电阻、腐蚀速率与厚度变化、环境电导与溶解氧以及温度与流速等要素,在可达性受限的位置辅以电化学探针与电阻探针,结合超声测厚与电磁法对关键部位进行复核<sup>[3]</sup>。布点策略以易感位点与代表位点并重,缝隙边缘与焊趾附近设置密集点,开阔区设置趋势点,在湿干交替与飞溅带安排垂向梯度点,形成对环境与材料的立体刻画。数据链路强调时间同步与抗干扰,采集端保持单一时钟源,接地与屏蔽遵循分层布置,弱网场景下边缘节点启用缓存与断点续传,避免数据断裂造成趋势误判。测点标识与位置编码与构件台账一一对应,任何数据都能回溯到位置与责任,校准计划与更换计划写入例行维护,过期即触发提醒。为适配检修窗口短与环境变化快的现实条件,采用模块化传感单元与快速接头,现场拆换以分钟计完成,故障率曲线与停机时长因此显著下降。多源数据需要统一口径,词典与量纲在平台侧固化,报告模板保持稳定版式,不同项目与不同季节之间可以横向对比。在无法持续布设电子探头的区域,可使用腐蚀试片开展离线评估,按季回收并测定质量变化与形貌特征,建立

与在线指标的换算关系。参考电极的稳定性决定电位数据可信度,安装应避开强流区与气泡富集区,并在维护计划中安排定期核对与替换。对大体量构件可使用表面电位扫描绘制分布图,把热点区域与结构特征一一对应,为后续防护提供依据。平台端通过边缘与云端分工实现远程可视,现场完成快速判断,平台完成趋势分析,异常在同一看板上透明呈现,处置状态随时间更新,减少重复沟通。

### 2.2 数据解读与寿命评估

数据解读以一致口径与可回放为基本要求,任何结论都应附带指标来源与时间范围,把短时波动与长期趋势区分开来。腐蚀速率可由电化学参数与电阻探针共同估计,再用超声测厚在关键点做交叉验证,若差异超出阈值则优先复检传感与环境,避免误判。在流速与温度显著波动的条件下,建议采用分段基线与环境修正,把外部变化从材料退化中分离,同时给出不确定度范围,便于计划层在风险与成本之间权衡<sup>[4]</sup>。寿命评估以壁厚余量与裂纹萌生阈值为核心,结合应力分布与支撑刚度给出承载能力的时间变化,对存在电偶效应与缝隙环境的部位设置更保守的安全余量。当数据覆盖不足时引入相似构件的迁移曲线,以结构位置与环境等级为索引,但需要在样段中小规模回放验证,确认差异在可接受范围内。平台端以看板呈现风险等级与剩余寿命,排序规则以重要度与可达性综合度量,让现场在有限窗口内先处理高影响位置。为增强透明度,报告以固定版式展示曲线与结论,参数与版本留痕可查,任何阈值修改都会生成差异记录,在下一周期检视效果并决定是否固化。当趋势显示加速而环境指标稳定,应优先排查涂层下腐蚀与电位控制,必要时开展剥离检查与局部开窗,避免延误导致扩大修复。在方法层面可以采用区间估计与贝叶斯更新,将新数据对寿命分布的影响以渐进方式吸收,对突发异常采用独立通道标记,不直接改写长期趋势,以免过度反应。对多源数据融合可引入一致性评分,把相互印证的证据赋予更高权重,把孤立证据暂列观察,在后续窗口安排补测。触发规则以阈值与速率双通道构建,当速率跨过警戒带而水平尚未越限时,建议实施局部减载与临时防护,待验证完成后再决定是否进入计划检修。

## 3 防护技术与工程实施

### 3.1 材料选择与表面防护体系

材料选择需要与水化学与流态匹配,碳钢构件应结合涂层与阴极措施形成复合体系,高氯环境与高流速部位优先考虑不锈钢或复合衬里,承受冲刷的位置可采用喷焊合金或热喷涂金属底层配合有机面层,在几何转角与收口处增加封边与过渡,降低电位与流速集中。表面防护的关键在于基底处理与层间协同,除锈等级与粗糙度要与涂料体系相容,清洁度应达到油脂与盐分残留的控制目标,干膜厚度按分区设定,在飞溅带与湿干交替带加厚并采用更高交联密度的品种。阴极保护可采用外加电流或牺牲阳极两种路径,前者适用于大体量与电阻率较高的水体,后者适用于局部构件与相对独立腔体,电位控制应在安全窗口内运行,避免氢脆与涂层剥离。电缆与参比点布局应考虑检修可达与电磁干扰,并设置独立接线盒以便测试与隔离。对涂层下腐蚀敏感的结构,建议选用低渗透与高附着体系,在搭接与缝边处使用弹性腻子与密封胶形成屏障,在扣件与螺纹处使用防咬合剂与固持剂,减少微动与缝隙水的聚集。工厂预制与现场补口需要口径一致,色标与批次记录要可追溯,固化时间与环境条件按清单核对,不满足即延后作业,以免早期起泡与开裂。对于长期浸没与周期暴露交替的部位,可将表面体系分区化配置,在稳定浸没区优先考虑耐水解品种,在暴露区重视耐紫外与抗热震,通过差异化叠层获得更高的综合耐久。质量控制以针孔检测与附着力抽检为要点,针孔密度与尺寸超出限值时应返工至合格,附着力在代表位置分布测试,结果进入台账以便趋势对比。外加电流的电流分配需结合几何与电导进行分区调整,牺牲阳极的材质与形状根据水温与电阻率选择,并按消耗速率设置更换周期,在启停频繁的机组上适度提高冗余度。

### 3.2 运维协同与全周期治理

全周期治理把设计、施工与运维连接成连续链条,目标是在可预期成本下维持稳定性能。策划阶段建立统一词典与编码,设备台账与位置编码与监测点与防护分区一一对应,任何记录都能回溯到构件与责任。施工阶段以样段先行验证工艺可达与检验门槛,通过后再复制到全场景,减少返工与材料浪费。运维阶段以看板驱动执行,风险等级与剩余寿命排序使窗口内的动作更聚焦,告警与处置形成闭环并留痕,下一周期用于阈值与计划的修正。在组织协同上,项目层负责资源与窗口,区域

层负责统筹与协调,班组层负责准备与恢复,分层并不割裂信息,日例会以问题与措施为主轴,减少冗长汇报。为适配水文季节性与调度波动,制定双档或多档检修计划,在枯水与丰水时段分别安排不同强度的维护,避免对电量产出造成不必要影响。在供应与外协管理上,合同嵌入编码与数据交付要求,未达标不予结算,把质量与经济挂钩,减少灰色地带。经验沉淀以条目化为载体,一条包含触发条件与观察线索与动作清单,在新项目按库调用并在使用后更新,形成组织记忆。对难以短期修复的问题设置临时防护与观察计划,明确检查频次与责任岗位,待检修窗口到来后一次完成根治。在安全边界上,任何可能引发氢脆与火花的操作都必须在停电与通风条件下进行,作业票据与检测记录相互校验,避免越权与漏检。通过这种协同,防护从一次性施工转换为运行属性,把费用从事后修复转向预防与优化,长期成本因而下降。数字底座提供回放能力与差异报告,新旧参数与做法的影响范围一目了然,模板复制让成熟做法跨站点迁移,绩效评价以闭环时长与缺陷复发率为主线,以事实驱动改进,使团队在稳定节奏中持续抬升水位。

## 4 结语

水电站机械设备的腐蚀治理需要机理认知与监测证据与工程措施同向,以环境分区与材料分级为抓手,在线指标与离线核验协同运行,把风险从隐性状态转化为可度量曲线。监测以少而精保证可靠,数据以统一词典保证可比,防护以分区叠层与阴极措施获得耐久与可维护的平衡,组织以样段先行与滚动复核稳住节奏。面向长期运行,应继续完善寿命评估与费用模型,把策略从经验转为证据,让防护成为运行属性与竞争力来源。

## 参考文献

- [1] 姚天玺.水电站机械设备的运行管理与维护探讨[J].电工技术,2024,(S2):81-83. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2024.26.029.
- [2] 朱代华.水电站关键机械设备维护与故障检修方法研究[J].中国机械,2023,(24):80-83.
- [3] 辛晓.水电站机械设备常见故障检修技术[J].设备管理与维修,2020,(20):65-67. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2020.10D.37.
- [4] 陈海全.水电站机械设备的运行维护分析与管理思考[J].技术与市场,2019,26(01):200-201.