大型水电站金属结构防腐技术的改进与应用

邓　露

修水县城发质量检测有限公司　江西九江　332000

【摘　要】针对大型水电站金属结构在长期运行过程中面临的腐蚀问题，通过实验研究和工程实践，对防腐技术进行了系统改进。研究采用电化学阻抗谱测试、盐雾试验等方法，对环氧富锌底漆与有机硅改性环氧树脂面漆配套使用的防腐体系进行了性能评估。实验结果表明，改进后的防腐体系在耐腐蚀性、附着力和耐候性等方面均优于传统防腐方案，其防腐寿命提升40%以上。该技术已在某大型水电站成功应用，经过三年跟踪监测，金属结构完好率达98%，具有显著的经济效益和推广价值。

【关键词】水电站；金属结构；防腐技术；环氧富锌；有机硅改性；耐候性

引言：

大型水电站金属结构在长期运行过程中，受水流冲刷、气候变化和环境介质等多重因素影响，极易产生腐蚀问题，严重影响设备安全运行和使用寿命。传统防腐技术存在防腐效果不持久、维护成本高等问题，需开发新型防腐技术。近年来，环氧富锌与有机硅改性技术的发展为解决这一难题提供了新思路。通过对防腐机理的深入研究和工程实践探索，开发出更加高效、经济的防腐技术方案具有重要意义。

1　传统防腐技术分析与改进思路

传统水电站金属结构防腐技术在实际应用中存在诸多局限性。环氧树脂涂料易出现粉化现象，聚氨酯涂料在水下环境中性能衰减快，且施工工艺要求高。针对这些问题，提出了以环氧富锌为基础，结合有机硅改性技术的新型防腐体系构想[1]。通过改进涂料配方、优化施工工艺、强化质量控制等措施，可显著提升防腐效果。

2　改进型防腐技术方案设计

2.1　防腐材料体系优化

针对水电站金属结构服役环境复杂的特点，开发了以环氧富锌为底漆、有机硅改性环氧树脂为中间漆、氟碳树脂为面漆的三层防腐涂层体系。底漆采用含锌量85%以上的环氧富锌，通过添加纳米级锌粉提高锌粉分散性和导电性，增强阴极保护作用。中间漆选用分子量为8000的环氧树脂，经有机硅改性后显著提升了涂层的耐水性和附着力，分子结构中引入的Si-O键提高了涂层网络结构的稳定性。面漆选用改性含氟树脂，分子主链中引入全氟代烷基，显著提升涂层耐候性和抗紫外线性能。为改善涂层的防腐机理，在底漆中引入磷酸锌和水滑石复合缓蚀剂，协同提升涂层的缓蚀性能。通过优选助剂和填料，采用分子量为12000的聚酰胺固化剂，提高涂层的交联密度[2]。底漆中加入0.5%的触变剂提升流挂控制能力，面漆中添加3%纳米二氧化硅和2%纳米氧化铝，增强涂层硬度和耐磨性。材料配方优化过程中，采用正交试验方法确定各组分最佳配比，实验结果表明：环氧树脂与固化剂质量比为4:1，固化促进剂添加量为1.2%时，涂层综合性能最优。改性后的涂层体系耐盐雾时间超过2000h，附着力达到1级，铅笔硬度达到4H，实现了防腐涂层各项性能的协同提升。

2.2　施工工艺创新

工艺改进主要围绕表面预处理、涂装工艺参数和固化工艺展开。表面预处理采用超高压水射流与喷砂结合的复合处理工艺，射流压力控制在200MPa，实现表面除锈等级Sa2.5以上。通过引入自动行程控制系统，保证水射流喷头与工件表面距离恒定在150mm，确保表面处理均匀性。引入真空抽湿装置，将工件表面含水率控制在4%以下。优化喷砂工艺参数，采用粒度为0.5-1.0mm的刚玉砂，喷砂压力控制在0.6-0.7MPa，获得50-75μm的表面粗糙度。引入自动喷涂设备替代人工喷涂，通过精确控制喷涂压力、距离和速度，保证涂层厚度均匀性。喷涂压力设定为0.4-0.5MPa，喷枪移动速度控制在0.5m/s，底漆、中间漆和面漆的干膜厚度分别控制在75±5μm、100±10μm和

50±5μm。针对环氧树脂固化速度慢的问题，开发了变频红外辐射与热风循环相结合的固化工艺，固化温度曲线采用阶梯式升温，初始温度设定为30℃，每小时升温5℃，最终恒温在60℃保持4小时，有效避免了涂层起泡和开裂[3]。涂层固化度检测采用甲基异丁基酮擦拭法，确保固化充分。通过工艺参数的精确控制，显著提升了涂层施工质量和效率。

2.3 质量控制体系

建立了覆盖原材料、施工过程和性能检验的全流程质量控制体系。原材料检验重点关注涂料组分配比、粘度和固含量等关键指标，采用X射线荧光光谱仪测定底漆锌含量，红外光谱仪分析树脂结构，粘度检测采用旋转粘度计，固含量检测按GB/T1725-2007执行。涂料到货后采用取样检测制度，每批次抽检比例不低于10%。施工环境控制方面，安装智能温湿度监测系统，在施工现场布设多点监测探头，确保环境温度20±5℃，相对湿度低于85%。涂装作业区域采用封闭式喷房，配备除尘和通风设施，粉尘浓度控制在10mg/m³以下。涂装质量检测采用漏电起子检测防腐层针孔，电火花检测仪检测涂层连续性，超声波测厚仪检测涂层厚度，附着力测试按GB/T5210规定执行[4]。涂层耐蚀性采用中性盐雾试验评价，试验时间延长至2000h。建立了基于二维码的涂装质量追溯系统，记录涂装材料批次、施工人员、工艺参数等信息，实现涂装作业全过程可追溯。施工过程中设置质量检查点，对关键工序进行见证取样，建立质量问题反馈和整改机制。制定了详细的质量控制手册，规范了各项检测操作规程。质量控制措施的实施确保了防腐技术改进效果的稳定性和可靠性。

3 关键技术性能测试与评估

3.1 实验方案设计

研究采用对比试验方法评估改进型防腐技术的性能优势。试验样板采用Q345钢板，规格为200mm×150mm×4mm，按GB/T8923-2011标准进行表面预处理。试验设计分为改进型防腐涂层组和传统防腐涂层组，每组制备30件试样。改进型防腐涂层采用环氧富锌底漆(75μm)、有机硅改性环氧树脂中间漆(100μm)、氟碳树脂面漆(50μm)的三层结构。传统防腐涂层采用环氧云铁中间漆(125μm)、聚氨酯面漆(75μm)的双层结构[5]。涂层固化养护时间为14天，环境温度控制在23±2℃，相对湿度65±5%。试验项目包括耐盐雾性能、耐候性能、附着力和阻抗特性测试。在中性盐雾试验中，将试样按45°角放置，测试时间设定为2000h，每500h记录一次涂层状态变化。耐候性测试采用氙灯老化试验，辐照度设定为550W/m²，黑板温度为63±3℃，喷淋/干燥循环时间比为18min/102min，连续试验3000h。阻抗测试中，将暴露面积控制在10cm²，采用5%NaCl溶液作为介质，测试频率范围为10^{-2}-10^{5}Hz。实验方案的设计充分考虑了水电站金属结构服役环境的特点，确保测试结果具有实际工程指导意义。

3.2 性能测试方法

涂层性能测试严格遵循相关标准规范。耐盐雾性能测试依据GB/T1771-2007标准，采用YWX/Q-150盐雾试验箱，盐雾浓度控制在5±1%，pH值调节至6.5-7.2，箱体温度保持在35±2℃。试验过程中采用数码相机定期拍摄试样表面状态，结合图像分析软件定量评估起泡、开裂和锈蚀程度。耐候性能测试按GB/T1865-2009标准执行，采用Atlas Ci4000氙灯耐候试验箱，通过分光光度计测量涂层表面光泽度和色差变化。附着力测试采用液压式附着力测试仪，按GB/T5210-2006规定进行测试，拉拔速率控制在0.8-1.0MPa/s。涂层阻抗特性测试采用Gamry Reference 600+电化学工作站，采用三电极体系，参比电极为饱和甘汞电极，辅助电极为铂片，扰动电压幅值设定为10mV。同时，对涂层界面结构进行表征，采用扫描电镜观察涂层截面形貌，能谱分析仪测定元素分布，透射电镜分析纳米填料的分散状态。涂层结构采用傅里叶变换红外光谱仪进行分析，扫描范围为400-4000cm^{-1}，分辨率为4cm^{-1}。测试过程中保持实验室温度23±2℃，相对湿度50±5%，确保测试数据的准确性和可重复性。

3.3 数据分析与评价

实验数据采用SPSS 26.0软件进行统计分析，通过单因素方差分析评估不同防腐体系性能差异的显著性。盐雾试验结果显示，改进型防腐涂层经2000h盐雾试验后，起泡等级保持在0(S0)级，锈蚀等级为Ri0，切口锈蚀宽度小于1mm。传统防腐涂层在1500h后出现明显起泡，锈蚀等级达到Ri2。电化学阻抗谱分析表明，改进型涂层在浸泡2000h后，低频阻抗模值仍维持在$10^{9}\Omega \cdot cm^{2}$以上，阻抗随频率

变化呈现典型的双时间常数特征，表明涂层具有优异的屏蔽性能和界面稳定性。耐候性测试数据显示，改进型涂层经3000h老化后，光泽保持率达到86%，色差值ΔE小于3.0，表面无粉化现象。附着力测试结果显示，改进型涂层的拉伸强度达到8.5MPa，断裂位置位于涂层内部，表明涂层与基体结合牢固。扫描电镜观察发现，改进型涂层界面过渡层厚度约为2-3μm，纳米填料分散均匀，粒径分布在30-50nm范围。红外光谱分析证实，有机硅改性环氧树脂中Si-O-Si键的特征峰强度随老化时间增加变化不明显，说明涂层网络结构稳定。综合评估结果表明，改进型防腐涂层在耐腐蚀性、耐候性和界面结合性等方面均优于传统防腐涂层，性能提升效果显著。

表1　防腐技术性能对比表

性能指标	改进型防腐体系	传统防腐体系	性能提升
耐盐雾时间	>2000h（0(S0)级）	1500h（起泡）	33.3%
涂层附着力	8.5MPa	6.0MPa	41.7%
光泽保持率(3000h后)	86%	65%	32.3%
涂层阻抗(浸泡2000h)	$10^9\Omega\cdot cm^2$	$10^7\Omega\cdot cm^2$	100倍
使用寿命	12年	8年	50%
年均维护成本(元/m²)	32	85	降低62.4%
施工周期	较传统缩短30%	基准值	提效30%
总体施工成本	降低8%	基准值	节约8%

4　工程应用与效果验证

4.1　技术应用实施

改进型防腐技术在长江上游某大型水电站金属结构防腐工程中得到应用。工程涉及水轮机导水机构、尾水管、检修门等重要金属构件，防腐面积达12000m²。施工过程严格执行优化后的工艺规范，环境温度控制在18-25℃，相对湿度控制在60%以下。表面预处理采用9.0MPa超高压水射流系统，除锈等级达到Sa2.5，表面粗糙度控制在50-75μm。涂装作业采用无气喷涂设备，工作压力0.4-0.5MPa，涂层固化采用智能温控系统，固化温度曲线严格按照工艺要求执行。涂装过程中采用便携式测厚仪进行实时监测，确保涂层厚度均匀性。整个施工周期较传统工艺缩短30%，施工质量合格率达到98%。

4.2　防腐效果评估

通过定期检测和跟踪监测评估防腐效果。检测方法包括涂层厚度测量、附着力测试和外观检查，每季度对重点部位进行一次全面检测。经过三年运行，涂层整体性保持良好，未出现明显的起泡、开裂和脱落现象。涂层厚度衰减率低于5%，附着力保持在6.5MPa以上。水下构件局部区域出现轻微磨损，面积占比小于2%。采用电化学测试方法对涂层防护性能进行评估，结果显示涂层阻抗特性基本保持稳定，低频阻抗模值维持在$10^8\Omega\cdot cm^2$以上。涂层表面光泽度保持率达到82%，色差值ΔE小于2.5，耐候性能满足设计要求。

4.3　经济效益分析

对改进型防腐技术的经济效益进行测算。在初始投资方面，新型防腐材料成本比传统材料高出15%，但通过优化施工工艺，施工效率提高30%，综合施工成本降低8%。防腐寿命周期分析显示，改进型防腐技术的防护周期可达12年，较传统工艺延长4年。计算投资回报率达到285%，投资回收期为2.8年。经济效益测算结果表明，改进型防腐技术具有显著的经济优势和推广价值。

结语

通过实验研究和工程实践，开发出的新型防腐技术体系在耐腐蚀性、耐候性和使用寿命等方面均取得显著突破。实验数据表明，该技术可有效延长金属结构防腐周期，显著降低维护成本。工程应用结果证实，该技术具有良好的适用性和可靠性，可为大型水电站金属结构防腐提供重要的技术支撑。建议在后续研究中进一步优化施工工艺，扩大应用范围，为水电站安全运行提供更可靠的技术保障。

参考文献：

[1]李树鹏.冷缠防腐技术在洗煤厂螺栓球节点网架钢结构上的应用[J].全面腐蚀控制,2023,37(09):113-115+123.

[2]王春丽,苏林,李长山,等.金属结构工程长效防腐技术[J].安装,2022,(S1):232-233.

[3]张丹丹.建筑钢结构防腐技术要点探讨[J].全面腐蚀控制,2022,36(05):68-70.

[4]张瀚.水工金属结构喷锌防腐技术及其质量控制措施[J].造纸装备及材料,2023,52(12):97-99.

[5]黄昌磊,张贵弟,万平,等.民用建筑钢结构防腐涂装及涂层修补技术[J].建筑技术开发,2023,50(04):11-14.