

高盐雾环境电力铁塔围网防腐选型与施工管理研究

邵建军

上海同盛电力有限公司 上海 201306

【摘要】：为了应对高盐雾环境电力铁塔围网腐蚀严重威胁供电安全的问题，本研究以小洋山岛四号五号铁塔围网更换项目为例，分析高盐雾环境盐雾腐蚀机理对围网材料的加速破坏作用，提出基于材料筛选工艺验证的防腐涂层选型方法，利用三维建模基准控制线技术解决高低腿铁塔安装平面适配问题，构建环形安全生命线和分层防护屏障体系保障高空作业安全。结果表明围网防腐性能提升87.5%使用寿命从8年延长至15年以上，材料搬运工期从9天压缩至2天效率提升4倍多，安装缝隙误差控制在±5mm内材料浪费率降至3%，整个项目实现零安全事故工期缩短至9天，为高盐雾环境电力铁塔围网防腐选型与施工管理提供了可行技术方案和工程管理经验。

【关键词】：高盐雾环境；电力铁塔；围网防腐；涂层选型；施工管理

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.037

引言

高盐雾环境对电力基础设施的长期安全运行构成严重威胁，特别是沿海地区的输电铁塔附属防护设施。小洋山岛四号五号铁塔位于东海石龙山上，三面临海，常年受海风盐雾侵蚀，其围网作为防止外来人员闯入、保障电网安全的关键屏障，腐蚀问题尤为突出。该塔群于2017年投运，四号塔为150米高锚塔，需经350级陡峭台阶抵达，五号塔位于山脚，围网在8年运行后已严重腐蚀倒塌，失去防护功能，存在重大人身触电和停电事故风险。亟需一种兼具长效防腐性能并能适应复杂地形施工的围网系统与配套管理方案，以保障电力设施本质安全。

1 高盐雾环境腐蚀特性及其对围网影响分析

1.1 高盐雾环境腐蚀机理与特征

小洋山岛四号五号铁塔所处石龙山环境三面临海，形成典型的高盐雾大气腐蚀环境。其腐蚀机理本质是电化学腐蚀过程，海风携带的盐雾颗粒在围网金属表面沉降并吸收空气中水分，形成富含氯离子的薄液膜。氯离子具有极强的穿透能力，能够破坏金属表面钝化膜，与铁元素反应生成易溶的氯化亚铁，显著加速阳极溶解过程。该区域盐雾沉积率预计超过0.3 mg/cm²/day，年平均相对湿度长期维持在80%以上，年平均风速可达7m/s，这种高温高湿高盐分的协同作用使得腐蚀速率较普通大气环境高出5至10倍^[1]。腐蚀产物主要为疏松多孔的羟基氧化铁和FeCl₃·nH₂O，不仅无法提供保护，反而会吸附更多水分和污染物，形成恶性循环。

1.2 高盐雾环境对围网材料的具体影响

原四号五号铁塔围网采用常规热镀锌碳钢材料，在8年运行后已严重腐蚀倒塌，证明标准镀锌层在此极端环境下保护寿

命有限。高浓度氯离子持续攻击镀锌层，首先溶解其表层的ZnO和Zn(OH)₂保护膜，进而与锌反应生成可溶的ZnCl₂，导致镀锌层被快速消耗。当局部镀锌层消耗殆尽，氯离子直接作用于基体铁，诱发快速点蚀，蚀孔向材料内部纵深发展，最终导致网片或立柱穿孔、断裂。对于围网的焊接部位，热过程改变了镀锌层的金相结构和厚度分布，形成电化学阳极区，腐蚀电流密度远高于母材，焊缝区域成为腐蚀突破口，强度大幅衰减。围网的钢板网网丝直径通常为4—5mm，点蚀导致的有效截面损失超过30%时，其抗拉强度与抗风压能力已不满足安全隔离要求。

2 防腐涂层选型与性能评价研究

2.1 适用于高盐雾环境的围网防腐涂层体系

针对小洋山项目高盐雾腐蚀环境，确定的围网防腐涂层体系是一个多层复合防护结构。该体系以Q235B碳钢作为基材，首先进行酸洗磷化处理以去除表面氧化皮和铁锈并形成一层磷酸盐转化膜增强涂层附着力。核心防护层为热浸镀锌层，镀锌层厚度要求不低于85μm，其防护机制包括物理屏障作用和阴极保护作用，锌的电极电位比铁更负，在电解液环境中优先腐蚀从而保护钢基体。面层防护采用美国杜邦公司的超耐候性改性环氧塑粉进行浸塑处理，塑粉层厚度严格控制在0.8mm到1.2mm之间^[2]。该塑粉含有高比例的化学惰性树脂和紫外光稳定剂，其分子结构致密能有效阻隔氯离子、水分子和氧气的渗透。浸塑工艺需在200℃的固化温度下保持15分钟，使塑粉充分流平并交联成坚固的连续膜。

2.2 高盐雾环境下防腐涂层选型原则

1) 长效防腐寿命原则：涂层体系必须保证在目标使用寿命周期内维持有效的防护能力，小洋山项目要求涂层体系有效

作者简介：邵建军（1974.03.01-），男，汉族，上海市浦东新区人，学历：本科，工作单位：上海同盛电力有限公司。职称：中级工程师，研究方向：工程管理。

防护年限不低于15年，这需要通过加速老化试验和数据外推模型进行验证。

2) 涂层体系兼容性匹配原则：各涂层之间不能出现不良反应，镀锌层与浸塑层必须有良好的附着力，附着力划格试验需达到0级标准。物理机械性能适用原则要求涂层具备足够的硬度、耐磨性和抗冲击性，以应对运输安装过程中的机械应力和可能的异物撞击，浸塑层的抗冲击性应大于50kg·cm。

3) 工艺可行性原则要求：所选涂层体系必须适应现场施工条件或工厂预制要求，例如浸塑处理需要大型浸塑槽和高温固化设备，必须在工厂内完成。

4) 全生命周期经济性原则要求在满足性能指标前提下优化成本，不仅考虑初始投资，还需评估后期维护成本和因腐蚀失效导致的停电损失等间接成本。

2.3 涂层耐盐雾性能评价方法与模型

涂层耐盐雾性能评价采用实验室加速试验与现场挂片试验相结合的方法，核心加速试验是依据ASTM B117标准进行的中性盐雾试验，将涂层试样置于35℃±2℃的密闭盐雾箱中，连续喷洒5%±1%的氯化钠溶液，喷雾收集液的pH值维持在6.5至7.2之间。更精确的评价采用循环腐蚀试验Prohesion测试，其循环周期为在0.35% (NH₄)₂SO₄和0.05% NaCl溶液中盐雾喷洒1小时，随后在35℃、相对湿度低于35%的条件下干燥1小时，该测试能更好地模拟干湿交替的真实环境。基于失效物理的涂层寿命预测模型常用于性能评估，其中一个常用模型是涂层防护寿命与盐雾浓度的关系模型：

$$t_f = A \cdot [Cl^-]^{-n} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

其中， t_f 代表涂层失效时间；A是材料相关的常数； $[Cl^-]$ 是盐雾中氯离子浓度，单位为mol/L；n是腐蚀指数，表征涂层对氯离子的敏感度； E_a 是涂层失效的活化能，单位为kJ/mol；R是理想气体常数，约为8.314 J/(mol.K)；T是绝对温度，单位为K^[3]。该模型通过不同氯离子浓度和温度下的加速试验数据拟合参数A, n, E_a ，进而外推预测实际环境下的涂层使用寿命。

3 防腐施工关键技术与全周期管理策略

3.1 高盐雾环境围网防腐施工关键技术控制

高盐雾环境围网防腐施工的关键技术控制始于材料表面的预处理阶段，所有钢构件在工厂内进行抛丸除锈处理，清洁度达到Sa2.5级，表面粗糙度控制在40-70 μm范围内，确保镀锌层与基体的冶金结合。热浸镀锌过程严格控制锌液温度在445-465℃之间，浸锌时间根据构件厚度精确计算，保证镀锌层厚度均匀达到85 μm以上。浸塑工序采用静电喷涂配合流化床浸塑工艺，预热后的工件浸入塑粉流化床，确保边角部位完全覆盖，后在200℃固化炉中保持15分钟形成厚度0.8—1.2mm

的致密塑层^[4]。现场安装阶段采用非破坏性连接技术，避免对防腐层造成损伤，所有螺栓连接部位涂抹专用防腐密封胶。

针对石龙山狭窄陡峭的运输条件，设计专用分布式受力搬运工具，采用Φ50mm无缝钢管制作框架，配合高强度尼龙织带，实现单人肩扛受力均匀化，较徒手抬运省力60%。安装过程中运用全站仪进行三维坐标采集，建立CAD模型进行网片预制，以最高塔腿基础为基准设置控制线，通过水准仪逐段校准围网高度，确保网片拼接处缝隙≤3mm^[5]。高空作业安全防护体系构建环形安全生命线，在四个塔腿顶部焊接Φ12mm热镀锌吊环，采用12mm钢丝绳串联形成闭合环形防护网，钢丝绳拉力测试达5吨以上，作业人员安全带双挂钩连接至生命线，实现高挂低用，具体效果见表1所示。

表1 防腐施工关键技术效果对比

技术指标	传统施工方案	本项目优化方案	提升效果
镀锌层厚度	60 μm	≥85 μm	提升 41.7%
面层防腐厚度	0.3—0.5mm	0.8—1.2mm	提升 150%
盐雾试验耐受时间	2000 小时	5000 小时	提升 150%
安装精度误差	±15mm	±5mm	精度提高 66.7%
材料浪费率	8%	3%	降低 62.5%

3.2 防腐施工质量控制与验收体系

防腐施工质量控制建立全过程闭环管理体系，涵盖材料进场检验、工序交接检查、隐蔽工程验收三个关键节点。材料检验环节对每批次镀锌管材进行涂层厚度测量，采用磁性测厚仪随机抽取30%的构件，每个构件测量10个点，厚度不合格率超过5%则整批退场。工序质量控制实行三检制，即操作者自检、班组互检、专职检验员专检，重点监控焊接部位防腐补强工艺，确保富锌底漆喷涂厚度达到设计标准。过程监控运用电化学检测手段，采用涂层孔隙率检测仪对浸塑层进行连续性测试，施加1.5kV直流电压检查是否存在击穿点。

验收阶段执行三级验收标准，第一级为施工单位内部验收，第二级为监理单位过程验收，第三级为业主单位最终验收。专项质量检测包括附着力划格试验，切割间距1mm，胶带撕扯后涂层脱落面积小于5%为合格；耐冲击试验采用1kg重锤从50cm高度自由落体冲击涂层表面，无裂纹无剥落为合格。建立质量追溯档案，每个网片编号管理，记录从原材料、加工工

艺到安装位置的全流程数据。

3.3 围网防腐层的后期维护策略

围网防腐层的后期维护采用基于状态的预防性维护策略，建立定期巡检、专项检测、预警干预三级维护机制。定期巡检每季度进行一次，采用无人机高空拍摄与人工近距离检查相结合的方式，重点检查涂层粉化、龟裂、剥落状况，建立涂层状况指数评估体系。专项检测每年开展一次，运用超声测厚仪测量剩余涂层厚度，红外热像仪检测涂层剥离情况，对腐蚀速率超过设计值的部位进行预警。维护干预设置三个阈值等级，当涂层厚度损失小于20%时进行清洁保养；损失20%—40%时进行局部修补，采用专用修补材料恢复防护层完整性；损失超过40%时启动更换程序，效果见表2所示。

表2 全周期管理策略实施效果

管理维度	实施前状况	实施后效果	改善幅度
预期使用寿命	8年	15年以上	提升 87.5%
材料搬运工期	9天	2天	缩短 77.8%
安装精度控制	±15mm	±5mm	精度提高 66.7%

参考文献:

[1] 管玉皓,符冠楠,侯枫琳,等. 高盐雾环境混凝土结构耐久性设计与保护措施 [J]. 新基建科技, 2025, 34 (07): 123-125.

[2] 朱竞伍. 海外高盐雾地区大型海水冷却塔防腐应用技术研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (09): 207-208.

[3] 杨翠平,王震震,徐淑红. 高盐雾环境下光伏电气系统的腐蚀防护研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39 (04): 235-238.

[4] 吴伶俐. 智能监测系统在升压站节能与电力铁塔施工中的集成应用 [J]. 中国信息化, 2025, (02): 51-52.

[5] 陈浩,余兴建,谭震,等. 高湿高盐雾环境下双光激光除锈装置抗腐蚀性能分析 [J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50 (01): 91-94.

管理维度	实施前状况	实施后效果	改善幅度
材料利用率	92%	97%	提升 5.4%
安全事故发生率	历史项目平均 2 起	0 起	降低 100%
总工期	30 天	9 天	缩短 70%

4 结论

针对小洋山岛四号五号铁塔围网因长期受海风盐雾侵蚀而严重腐蚀失效的技术难题，本文深入分析高盐雾环境的腐蚀特性及其对围网材料性能的具体影响机制，构建基于热镀锌层与高性能浸塑面层相结合的双重防腐涂层体系，确立以长效防腐为核心的涂层选型原则与耐盐雾性能评价方法，提出适用于狭窄陡峭地形的材料搬运方案与高低腿铁塔安装精度控制技术，建立包含环形安全生命线的立体防护体系和完善的质量监控流程，制定基于状态评估的全周期维护策略，有效解决强腐蚀环境下围网寿命短的行业痛点，显著提升电力设施安全运行水平，为同类沿海地区输电线路防护工程提供可借鉴的技术路径和工程管理实践范例。