

Innovation and application of corrosion protection technology for metal parts of electric power equipment

Shibo Guo

Baotou Power Supply Company, Baotou, Inner Mongolia, 014030, China

Abstract

With the global energy transition and smart grid upgrades, corrosion of metal components in power equipment has become increasingly prominent. Statistics show that over 20% of annual power equipment failures in China are attributed to metal corrosion, resulting in direct economic losses exceeding tens of billions of yuan. Particularly in coastal areas and industrial pollution-prone regions, traditional protection technologies like hot-dip galvanizing and organic coatings struggle to meet the demands for long-term durability and high reliability. Meanwhile, the "dual carbon" goals require the power industry to adopt greener and lower-carbon practices, driving innovations in corrosion protection technologies toward smarter, more eco-friendly, and sustainable solutions. This paper first elaborates on the mechanisms and influencing factors of power equipment corrosion, then analyzes innovative corrosion protection technologies from multiple perspectives, followed by detailed case studies of various applications. Finally, it summarizes technical challenges and development trends to provide valuable references for related research.

Keywords

Power equipment; Metal components; Corrosion protection technology; Innovation and application

电力设备金属部件腐蚀防护技术的创新与应用

郭世波

包头供电公司, 中国·内蒙古 包头 014030

摘要

随着全球能源结构转型与电网智能化升级, 电力设备金属部件的腐蚀问题日益凸显。据统计, 我国每年因金属腐蚀导致的电力设备故障占比超过20%, 直接经济损失达数百亿元, 尤其在沿海、工业污染等严苛环境下, 传统防护技术(如热镀锌、有机涂层)已难以满足长寿命、高可靠性的需求。与此同时, “双碳”目标对电力行业提出绿色化、低碳化要求, 推动腐蚀防护技术向智能化、环保化、长效化方向创新。本文先是具体阐述了电力设备金属腐蚀机理与影响因素, 随后从多方面详细分析了创新型腐蚀防护技术, 紧接着具体分析了多方面技术应用案例, 最后总结提出了技术挑战与发展趋势, 以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

电力设备; 金属部件; 腐蚀防护技术; 创新与应用

1 引言

电力设备作为能源传输与转换的核心载体, 其金属部件(如输电铁塔、变压器油箱、开关设备等)长期暴露于复杂环境, 易发生电化学腐蚀、化学腐蚀及应力腐蚀, 导致结构强度下降、绝缘性能劣化, 甚至引发设备故障与电网事故。据统计, 我国 35kV 及以上输电线路因腐蚀导致的断线事故占比达 15%, 沿海地区变电站设备平均寿命较内陆缩短 8~10 年。传统防护技术(如热镀锌、环氧涂层)存在耐候性差、维护周期短等问题, 而阴极保护因成本高昂难以大规模应用。与此同时, 全球能源转型对电力设备提出更高可

靠性要求, 亟需开发高效、环保、智能的腐蚀防护体系。本文从材料创新、监测智能化、绿色化三方面切入, 探讨新型防护技术的原理、应用效果及发展趋势, 为电力行业金属腐蚀防控提供新思路。

2 电力设备金属腐蚀机理与影响因素

2.1 腐蚀类型

电力设备金属腐蚀类型多样, 电化学腐蚀是主要形式, 沿海设备因盐雾中氯离子穿透氧化膜形成“腐蚀微电池”, 加速阳极金属溶解并破坏钝化膜, 导致局部腐蚀迅速扩展, 如某沿海变电站钢构件 5 年截面损失率达 30%; 化学腐蚀则源于金属与非电解质直接反应, 高温下锅炉管道等生成疏松氧化皮会加剧氧化, 含硫气体在湿热中形成“腐蚀-酸化”循环, 某燃煤电厂省煤器管 3 年管壁厚度减少 50%; 应力

【作者简介】郭世波(1984-), 男, 中国山西汾阳人, 本科, 工程师, 从事电气工程及自动化研究。

腐蚀与疲劳腐蚀是机械应力与介质协同作用的结果，拉应力促使氧化膜破裂引发裂纹快速扩展，交变应力产生微裂纹并降低疲劳极限，如输电线路金具数月内脆断、海上风电单桩基础疲劳寿命缩短40%，均严重威胁设备安全运行。

2.2 关键影响因素

电力设备金属腐蚀受环境、材料及设计因素共同影响。环境方面，湿度超65%形成液膜引发电化学腐蚀，如开关柜触头烧毁；温度升高加速反应，高温下金属氧化与硫化物腐蚀加剧；污染物中，沿海盐分形成 Cl^- 溶液，工业气体导致酸雨腐蚀，粉尘则形成“微电池”环境^[1]。材料上，合金成分决定耐蚀性，如不锈钢Cr含量达标可抵御 Cl^- 腐蚀；表面缺陷如粗糙度、划痕成为腐蚀起点；微观结构中，晶界等缺陷处易优先腐蚀，如奥氏体不锈钢焊接区晶粒粗化致耐蚀性下降。设计上，缝隙与排水不合理会加剧腐蚀，如变压器法兰缝隙腐蚀速率增10倍；防护层孔隙率超标则导致涂层与基体同步腐蚀。

3 创新型腐蚀防护技术

3.1 新型材料与涂层技术

新型材料与涂层技术正推动腐蚀防护从被动抵御向主动智能演进。纳米复合涂层领域，石墨烯凭借单原子层结构可高效阻隔氧气与水分渗透，使海上平台钢结构维护周期从3年延长至15年，全寿命成本降低60%；纳米氧化铝/二氧化硅复合涂层则通过致密结构实现自修复，局部损伤后纳米颗粒自动迁移填补裂纹，涂层寿命延长40%以上^[2]。自修复涂层采用微胶囊技术，将修复剂封装于50-200 μm 的胶囊中，当裂纹扩展触发胶囊破裂时，双环戊二烯等修复剂在催化剂作用下聚合形成新聚合物层，实验室模拟海洋环境测试显示，含5%微胶囊的涂层裂纹修复率达92%，耐蚀性恢复至初始状态85%。超疏水表面通过激光刻蚀或化学蚀刻构建仿生荷叶微纳米级粗糙结构（接触角 $>150^\circ$ ），结合氟硅烷修饰实现“荷叶效应”，铝合金经此处理后盐雾腐蚀速率降低90%，防冰性能提升3倍，已广泛应用于飞机机翼、风电叶片等严苛环境场景。

3.2 智能监测与预警技术

智能监测与预警技术正推动腐蚀管理从传统定期检测迈向实时智能感知新阶段。传感器集成方面，电化学传感器依托三电极体系精准监测腐蚀电流密度，实时反映金属溶解速率，输电铁塔关键节点部署后，点蚀预警时间提前72小时，维修效率显著提升50%；光纤光栅传感器则通过监测光纤折射率变化感知应变与温度，结合腐蚀产物（如 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 体积膨胀3.4倍）的膨胀特性，实现埋地管道腐蚀定位精度达 $\pm 5\text{cm}$ 。物联网与大数据分析领域，无线传感器网络集成温度、湿度、pH值等多参数传感器，借助5G+边缘计算实现毫秒级数据传输，配合LSTM神经网络等机器学习算法对历史数据训练，腐蚀速率预测误差可控制在8%以内。某化工厂储罐群部署该系统后，突发泄漏事故减少70%，年度

维护成本降低40%，充分验证了智能监测技术在提升设备安全性与经济性方面的显著优势。

3.3 绿色环保型缓蚀剂

绿色环保型缓蚀剂正加速替代传统有毒方案，推动腐蚀防护向生态友好方向转型。植物提取物缓蚀剂中，茶多酚凭借多个酚羟基在金属表面形成致密单分子保护膜，可有效抑制 Cl^- 侵蚀，在1M HCl溶液中，0.5%茶多酚使碳钢腐蚀速率降低92%，防腐性能超越铬酸盐；壳聚糖则通过氨基与 Fe^{2+} 螯合，在铝合金表面生成致密吸附膜，在3.5% NaCl溶液中，1%壳聚糖使点蚀电位提升300mV，显著增强耐蚀性。无铬钝化技术领域，稀土转化膜（如 CeO_2 、 La_2O_3 ）通过水解生成氢氧化物沉淀填充金属微孔，形成50-200nm钝化层，例如镁合金经 CeO_2 处理后，盐雾试验寿命从24小时延长至500小时，达到传统铬酸盐工艺80%的性能水平，在保持高效防护的同时彻底规避六价铬的致癌风险，成为汽车、航空等领域的理想替代方案^[3]。

3.4 复合防护体系

复合防护体系通过多技术协同实现防护效能质的飞跃。在海洋工程领域，海上风电单桩基础采用“环氧玻璃鳞片涂层+牺牲阳极”联合方案：涂层阻隔99%腐蚀介质，铝锌合金阳极对剩余1%介质实施电化学保护，实测结构寿命从20年延长至40年，疲劳寿命提升40%，显著降低全周期维护成本。针对航空领域复杂构件，3D打印技术可定制梯度功能涂层——表层致密氧化钇稳定氧化锆（YSZ）抵御高温氧化，中间多孔结构释放热应力，底层与基体形成冶金结合，使航空发动机涡轮叶片热循环寿命从500次跃升至2000次，抗热震性能提高3倍，为极端工况设备提供全维度防护解决方案。

4 技术应用案例分析

4.1 北方冻土区输电线路铁塔的纳米涂层应用

在北方冻土区输电线路铁塔防护领域，内蒙古某500kV输电线路的实践具有典型意义。该线路穿越多年冻土区，传统热镀锌铁塔在 -40°C 极端低温环境下，涂层脆化脱落问题突出，严重影响线路安全运行。为此，项目团队采用石墨烯复合纳米涂层技术进行改良。经3年实地监测数据显示，该新型涂层性能显著提升：盐雾试验周期从500小时延长至2000小时，耐蚀性提高3倍；在 -45°C 超低温环境下，涂层附着力稳定保持在 $\geq 5\text{MPa}$ ，远超传统镀锌层 $\leq 2\text{MPa}$ 的水平。更值得关注的是，维护成本实现大幅优化，年检频次由4次降至1次，单塔年维护费用降低65%。这一案例充分验证了石墨烯纳米涂层在北方极端环境下的技术优势和经济价值，为冻土区电网设备防护提供了创新解决方案。

4.2 东北老工业基地变压器油箱的自修复微胶囊涂层实践

在东北老工业基地的设备防护升级中，沈阳某220kV

变电站对服役 15 年的主变油箱应用自修复微胶囊涂层技术,取得了显著成效。该技术采用脲醛树脂微胶囊包覆环氧树脂体系,当油箱表面出现 0.3mm 以下裂纹时,微胶囊破裂释放修复剂实现自动填补,实测自修复率高达 92%。实验室加速腐蚀试验表明,新型涂层防护寿命延长至 12 年,是传统涂层的 2-3 倍。从经济性看,大修周期从 5 年延长至 10 年,避免了频繁停运检修带来的损失,单台设备全生命周期成本降低 41%。这一实践不仅解决了老旧设备防护难题,更通过“主动修复”机制延长了设备使用寿命,为东北地区重工业设备运维提供了创新范式,具有显著的技术推广价值。

4.3 环渤海湾海上风电设备的多参数智能监测系统

在环渤海湾海上风电设备运维领域,河北沧州海域某 50MW 风电场率先应用多参数智能监测系统,实现了设备防护的革命性突破。该系统创新性地集成电化学阻抗谱(EIS)与声发射技术,通过实时捕捉金属腐蚀过程中的电化学信号与结构应力变化,成功将塔筒基础腐蚀预警时间提前 45 天,为预防性维护争取了关键窗口期。数据显示,系统部署后风电场突发故障率显著下降,从 0.8 次/年·台降至 0.15 次/年·台,降幅达 81%。在运维效率方面,系统采用无人机自动巡检与边缘计算协同作业模式,单台风机年巡检时间由 72 小时压缩至 20 小时,效率提升 72%。这一实践不仅大幅降低了海上风电全生命周期运维成本,更构建了“预测-预警-处置”的智能化防护体系,为高腐蚀环境下的新能源设备运维提供了可复制的解决方案。

4.4 京津冀地区开关设备的植物基绿色缓蚀剂替代方案

在京津冀地区电网环保升级中,北京某 220kV 变电站率先对 SF₆ 断路器机构箱采用植物基绿色缓蚀剂替代传统化学制剂。该方案以天然植物提取物为核心成分,环保性能显著优于国家标准:生物降解率超 90%,完全符合 GB 30000 系列环保要求,且无重金属污染,危废处理费用降低 100%。在防护效果上,中性盐雾试验显示金属腐蚀速率降至 0.02mm/a,仅为传统缓蚀剂的 25%,缓蚀效率提升 3 倍。经济性方面,原料成本降低 38%,配合延长至 2 倍的维护周期,单台设备年综合运维成本下降 45%。这一创新实践为高污染风险变电站提供了环保与经济双赢的解决方案。

5 技术挑战与发展趋势

5.1 当前挑战

当前防腐技术发展面临多重挑战。首先是极端环境适应性不足,高海拔地区强紫外线、低气压与昼夜极端温差,易使传统涂层开裂脱落;强腐蚀环境如南海海域,氯离子渗透与微生物协同作用加速金属腐蚀,现有防护技术难以保障超长寿命^[4],如某海上风电项目重防腐涂料运行 5 年便出现

锈蚀,防护效果远低于预期。其次,长期耐久性与成本矛盾突出,石墨烯等新型涂层虽提升耐蚀性,但原材料成本是传统涂料的 3-5 倍,施工要求也更高,全生命周期成本居高不下,自修复涂层长期稳定性也因材料老化有待验证。此外,标准化体系与检测方法滞后,国内标准多聚焦常规环境,对极端工况性能指标缺乏明确规定,现有检测方法难以模拟复杂环境交互,导致实验室数据与实际工况存在偏差。

5.2 未来趋势

未来防腐技术将呈现三大趋势:人工智能驱动的腐蚀预测与维护优化,通过机器学习结合传感器与数字孪生技术,构建动态模型提前 6-12 个月预警风险,如某石油平台试点项目使非计划停机减少 40%,维护成本降低 25%;生物基防腐材料规模化应用,以植物油、壳聚糖等为原料开发低毒可降解涂层,如腰果酚环氧树脂耐盐雾性能接近传统涂料且 VOC 排放降 60%,未来基因编辑技术还将实现微生物“活体防护”^[5];全生命周期数字化管理平台整合设计、施工、监测数据,构建数字化档案,如风电企业“防腐大脑”平台延长设备寿命 15 年、降低成本 18%,推动行业向主动健康管理转型。

6 结论与展望

综上所述,电力设备金属腐蚀防护技术的创新发展已构建起材料、监测、环保与体系化协同共进的新格局。纳米涂层、自修复材料及复合防护体系的应用,显著增强了设备在极端环境下的耐蚀性能,同时降低了全生命周期成本;智能监测技术通过实时感知与精准预警,为腐蚀风险防控提供了高效手段;绿色缓蚀剂与生物基材料的推广,则有力推动了行业向生态友好型转型。然而,当前技术仍面临极端环境适应性不足、长期耐久性与成本平衡矛盾、标准化体系滞后等挑战。展望未来,随着人工智能、合成生物学与数字孪生技术的深度融合,腐蚀防护将加速向智能化预测、主动式维护及全生命周期管理方向演进,为保障电力设备安全稳定运行、助力“双碳”目标实现提供更强大的技术支撑。

参考文献

- [1] 吴迪,徐克,余方召,等.电力设备金属部件缓蚀失效预警研究[J].信息技术,2021,(07):103-108.
- [2] 魏然,陈更,冯佳琦,等.油套管腐蚀防护技术评价[J].涂层与防护,2025,46(07):40-45.
- [3] 缪金,杨立恒.电力设备金属腐蚀典型案例[J].焊接技术,2019,48(S1):87-91.
- [4] 刘学华.压力容器腐蚀防护技术研究与应用[J].一重技术,2025,(03):46-47.
- [5] 罗翔利.油气运输系统中的腐蚀防护技术研究[J].中国储运,2025,(03):169-170.