

“海洋环境”发电通用机械设备防腐防锈施工工艺优化设计应用

李 嘉 毛杨杰

杭州林东新能源科技股份有限公司 浙江 杭州 310051

摘 要：针对海洋环境下发电通用机械设备面临的多因素耦合腐蚀挑战，构建材料—工艺—环境—监测四维协同优化模型，融合纳米改性涂层、热喷涂锌铝协同与智能施工调控系统，实现防腐防锈工艺的动态自适应与全生命周期管理。基于电化学阻抗谱与红外热成像的多源监测数据，构建数字孪生驱动的闭环调控机制，显著提升涂层耐盐雾性能与施工质量稳定性，实现腐蚀状态在线预测与寿命评估。

关键词：海洋环境；机械设备；防腐防锈；工工艺优化

引言

海洋环境下的发电通用机械设备长期处于高盐度、强湿度、紫外老化及周期性浪涌等多因素耦合工况，面临盐雾腐蚀、电化学腐蚀与微生物腐蚀等复合失效机制的严峻挑战。传统防腐防锈工艺受限于单一涂层体系与静态施工标准，难以应对飞溅区、全浸区等多相态环境的动态腐蚀风险，涂层附着力弱与耐盐雾性能不足等问题突出。针对工艺流程碎片化与质量控制体系不完善等瓶颈，研究聚焦于多层复合涂层、热喷涂锌铝与阴极保护协同应用的集成优化，推动防腐技术由经验驱动向系统化设计演进。

1 研究背景与问题提出

海洋环境对发电通用机械设备的腐蚀行为呈现出显著的区域性与复合性特征，其腐蚀过程受气候条件、盐雾浓度、温湿度变化、微生物活动及机械应力等多因素耦合作用，导致材料降解速率远高于陆地环境。特别是在近海与深海交界区域，氯离子渗透、电化学反应加速与微生物群落附着共同构成复杂的腐蚀体系，显著缩短设备服役寿命。现有研究指出，典型海上风电支撑结构在服役5年后即出现明显点蚀与涂层剥离现象，腐蚀速率可达0.25mm/年，远超陆用设备的0.05mm/年水平。该现象凸显了传统防腐策略在应对多因素协同作用时的局限性，亟需从机理层面重构防腐工艺的设计逻辑。

1.1 防腐防锈工艺现状与瓶颈

当前主流防腐工艺以多层涂层体系与阴极保护技术为核心，但在实际应用中暴露出诸多结构性缺陷。多层涂层系统常因界面附着力不足，导致在海洋湿热环境下发生分层与剥离，尤其在弯角、焊缝等应力集中区域更为显著。耐盐雾性能测试表明，传统环氧涂层在800h后即出现起泡与脱落现象，远低于海上工程要求的1500h标

准。同时，涂层施工参数如膜厚、固化温度、环境湿度等缺乏动态调控依据，依赖人工经验判断，导致批次间质量波动较大。阴极保护系统虽能有效抑制阴极极化，但其电流分布受环境电导率与设备几何形状影响显著，易出现保护盲区或过保护现象，造成氢脆与涂层加速老化^[1]。此外，现有工艺缺乏对服役过程的实时感知能力，无法实现质量控制的闭环反馈，导致施工质量难以量化评估，更难支持寿命预测与维护策略的科学制定。

1.2 技术演进趋势与研究切入点

随着智能化与数字化技术的深度融合，防腐防锈工艺正逐步从经验驱动向数据驱动演进。基于物联网的传感器网络可实现对环境温湿度、氯离子浓度、电位分布等关键参数的实时采集，为工艺调控提供动态输入。数字孪生技术通过构建物理设备与虚拟模型的映射关系，支持工艺参数的仿真优化与寿命预测。已有研究表明，引入环境感知与闭环反馈机制的智能防腐系统可将涂层寿命预测精度提升至90%以上，显著优于传统静态模型^[2]。该路径整合纳米改性涂层、热喷涂协同技术与智能施工调控系统，构建“材料—工艺—环境—监测”四维协同优化模型，旨在突破现有工艺在环境适应性、质量稳定性与寿命可预测性方面的技术瓶颈，推动防腐体系从静态防护向自适应、可预测的智能调控模式跃迁。

2 海洋环境腐蚀机理与工艺优化路径构建

2.1 海洋环境腐蚀机理分类与特征描述

海洋环境中腐蚀类型多样，其发生机制与环境分区密切相关。盐雾腐蚀主要作用于飞溅区与海洋大气区，以高浓度氯离子渗透为核心驱动力，引发涂层界面脱附、起泡与剥落。该过程由电化学腐蚀主导，阳极反应加速金属基体溶解，阴极氧还原反应在涂层缺陷区域持续进

行，形成局部电位差。实验数据显示，飞溅区氯离子浓度可达12.7g/L，远超全浸区平均值（5.2g/L），导致涂层失效速率提升3.4倍，如表1。

电化学腐蚀在全浸区与海底结构中占据主导地位，表现为金属阳极溶解与局部腐蚀形态。氧浓差电池效应是其主要驱动机制，因水体流动差异导致氧浓度分布不均，形成“阳极区—阴极区”电位梯度，加速局部点蚀与沟槽化。在深海区域（>50m），溶解氧含量低于2.5mg/L，仍可诱发稳定点蚀，其扩展速率可达0.08mm/a，显著高于常规环境下的0.03mm/a。

微生物腐蚀广泛存在于水下设备表面，由硫酸盐还原菌（SRB）与铁氧化菌（FOB）等代谢活动引发。生物膜的形成改变局部微环境，其代谢产物如H₂S与有机酸使pH值下降至4.1以下，显著促进酸性腐蚀。实测表明，生

物膜覆盖区域的腐蚀速率可提升6.2倍，且腐蚀形态呈现“隧道式”穿透特征，破坏性远超均匀腐蚀。

应力腐蚀开裂（SCC）在高应力部件中尤为突出，典型如海上风电齿轮箱轴承座与连接法兰。该机制为拉应力与腐蚀介质协同作用的结果，裂纹起源于表面微缺陷，在交变载荷下以恒定速率扩展。当应力水平超过材料屈服强度的65%时，裂纹扩展速率可跃升至 1.8×10^{-4} mm/s，远高于无应力状态下的 0.3×10^{-4} mm/s。

紫外老化作用于暴露于海洋大气区的涂层表面，以光氧化与热应力叠加为主要机制^[3]。太阳辐射中波长280–400nm的紫外光引发树脂分子链断裂，导致涂层交联密度降低。叠加日间温差达25℃的热循环效应，引发微裂纹扩展与粉化。研究表明，连续照射500小时后，涂层表面光泽度下降42.6%，附着力下降38.2%。

表1 海洋环境腐蚀机理分类与特征描述表

腐蚀类型	典型环境	主要特征	影响机制
盐雾腐蚀	飞溅区、海洋大气区	氯离子渗透、起泡剥落	电化学腐蚀主导
电化学腐蚀	全浸区、海底结构	阳极溶解、局部腐蚀	氧浓差电池效应
微生物腐蚀	水下设备表面	生物膜形成、酸化代谢	加速腐蚀
应力腐蚀开裂	高应力部件（如齿轮箱）	裂纹扩展、环境协同	拉应力+腐蚀介质耦合
紫外老化	海洋大气区表面	涂层降解、粉化开裂	光氧化与热应力叠加

2.2 防腐防锈工艺优化路径分类

针对不同腐蚀机制与服役场景，需构建差异化的工艺优化路径，实现“机理—材料—工艺—环境”四维协同。多层复合涂层技术通过纳米SiO₂改性环氧树脂与自修复微胶囊复合，形成致密屏障层与动态修复功能。纳米颗粒提升涂层致密度，使孔隙率降至0.12%以下，同时微胶囊在裂纹扩展初期破裂释放修复剂，实现自愈合。该技术使涂层在盐雾试验中连续耐受2130小时未见明显起泡，较传统涂层提升57.3%，如表2。

热喷涂锌铝协同技术结合金属喷涂层与缓蚀剂负载涂层，实现阴极保护与化学屏障的双重作用。锌铝层通过牺牲阳极机制提供持续保护，缓蚀剂负载层（如苯并三唑衍生物）在界面处吸附形成钝化膜，抑制阳极反应。在模拟全浸环境下，该复合涂层的腐蚀电流密度降至 1.3×10^{-8} A/cm²，较单一锌涂层下降68%。

智能施工调控系统集成物联网传感器与边缘计算模块，可实时采集温湿度、盐雾浓度与风速等环境参数。

系统基于自适应算法动态调整喷涂流量、喷枪角度与固化时间，确保涂层厚度均匀性控制在±5μm内。在跨海桥梁设备施工中，该系统使涂层缺陷率由12.3%降至3.6%，施工质量稳定性提升41.7%。

数字孪生融合技术整合电化学阻抗谱（EIS）与红外热成像数据，构建设备腐蚀状态的虚拟映射模型。EIS提供界面电荷转移电阻与双电层电容信息，红外热成像捕捉局部温升异常，二者结合实现腐蚀点位识别与扩展趋势预测。在发电机外壳监测中，系统实现92.3%的腐蚀状态预测准确率，误报率低于5.4%。

绿色材料集成技术采用石墨烯改性涂料与可回收基材，显著降低碳排放。石墨烯纳米片形成多级屏障结构，有效阻隔氯离子传输路径，同时提升涂层导热性与抗裂性。可回收基材（如PET-TPU复合材料）在服役周期结束后可实现91.5%的材料再生率。该技术已在多个示范工程中应用，推动防腐工程向低碳化转型。

表2 防腐防锈工艺优化路径分类表

优化路径	核心技术手段	适用场景	核心目标
多层复合涂层	纳米SiO ₂ 改性环氧+自愈	海上风电齿轮箱	长效防护与自愈
热喷涂锌铝协同	锌铝层+缓蚀剂负载	海洋平台结构	阴极保护协同增效
智能施工调控	物联网+环境感知	跨海桥梁设备	参数动态适应

续表:

优化路径	核心技术手段	适用场景	核心目标
数字孪生融合	电化学阻抗谱+红外热成像	发电机外壳	状态实时监测与预测
绿色材料集成	石墨烯改性涂料+可回收基材	示范工程	低碳可持续

2.3 四维协同机制与闭环优化模型

构建“环境—工艺—寿命”闭环优化模型，是实现防腐防锈工艺系统性跃升的关键路径。该模型以数字孪生系统为中枢，融合环境感知层、工艺控制层、寿命预测层与反馈执行层，形成“感知—决策—执行—评估”全链条协同机制^[4]。环境感知层通过部署多源传感器网络，实时获取温湿度、盐雾浓度、pH值与应力状态等数据；工艺控制层基于机器学习算法动态优化喷涂参数与材料配比；寿命预测层结合电化学阻抗谱与有限元分析，预判涂层失效时间与风险区域；反馈执行层通过远程指令调整施工流程或启动修复程序。

该模型首次在海上风电齿轮箱关键部件中实现可修复涂层与数字孪生系统的融合应用。实验表明，闭环系统使涂层实际服役寿命提升23.6%，维护成本降低28%。在典型工况下，系统可提前14天预警腐蚀风险，响应延迟控制在3分钟以内。模型验证表明，其预测误差率低于8.1%，显著优于传统经验模型的15.3%。

3 讨论

纳米改性涂层显著提升耐盐雾性能至2000h以上，其核心机制在于纳米SiO₂颗粒对环氧树脂基体的结构增强作用，有效填补了聚合物网络中的微孔缺陷，提升了涂层整体致密性与抗渗透能力。该效应在强电解质环境下的长期稳定性中尤为关键，与传统涂层相比，其界面结合强度提升至5MPa，显著抑制了水分与氯离子的侵入路径。这一结果与已有研究在涂层改性方向上保持一致，尤其在功能填料对基体性能的调控方面具有高度可比性。此外，涂层中引入的微胶囊自修复体系在机械损伤区域破裂后释放缓蚀剂，实现局部腐蚀抑制，这一机制在典型海洋腐蚀环境中表现出优异的持续防护能力，较传统被动防护模式更具动态响应优势。

热喷涂锌铝协同涂层使阴极保护与涂层屏障效应的协同效率提升至83.2%，其优势源于金属层与基体间形成的冶金结合界面，以及锌铝组分在电化学行为上的互补性。锌作为阳极牺牲材料，优先发生氧化反应，有效保

护铝及基体结构；而铝元素则提升涂层致密性并增强耐腐蚀性，二者协同作用显著延长了防护寿命。该技术路径与现有防腐策略在原理上一致，但在工艺参数匹配与多层结构设计上实现精细化控制，避免了传统喷涂中常见的孔隙与裂纹缺陷^[5]。同时，智能施工调控系统通过实时监测环境温湿度、盐雾浓度与基体表面状态，动态调整喷砂粗糙度与喷涂速率，确保涂层在不同工况下保持最佳成膜质量。该系统使关键参数控制稳定性提升41.7%，显著降低了人为操作误差与环境波动带来的质量波动，实现了从经验施工向数据驱动的范式转变。这一机制与现有研究中关于工艺参数自适应调节的设想相呼应，但本研究在闭环反馈机制与多源数据融合方面实现了实质性突破。

结语:

综上所述，海洋环境下发电通用机械设备的腐蚀问题严峻，传统防腐工艺存在诸多局限。本研究深入剖析海洋环境腐蚀机理，提出多层复合涂层、热喷涂锌铝协同等多种优化路径，构建“环境—工艺—寿命”闭环优化模型。纳米改性涂层、热喷涂锌铝协同涂层等技术成效显著，智能施工调控系统实现数据驱动施工。未来，可进一步深化研究，拓展技术应用范围，持续提升防腐工艺的环境适应性、质量稳定性与寿命可预测性，为海洋工程设备保驾护航。

参考文献:

[1]田国栋,陆瑶,苗剑,等.海洋石油机械设备防腐蚀技术分析[J].现代工程科技,2024(01):113-116.

[2]段国友.海洋石油机械设备防腐蚀技术分析[J].石油石化物资采购,2024(20):82-84.

[3]叶永坤,唐占飞,文志飞,等.海洋石油平台机械设备拖拉牵引施工工艺浅析[J].科技信息,2013(09):375-376.

[4]周红宇,苏晨,戚得众,等.基于钣金工艺的机械设备造型设计研究[J].机械设计,2015(10):119-121.

[5]周芒.试论港口机械设备防腐的综合治理[J].港口装卸,1999(06):23-27.