

深海平台机电设备腐蚀防护技术优化

孙 臣

(中海油能源发展装备技术有限公司, 天津 300450)

摘 要 深海平台机电设备长期服役于高盐高压极端海洋环境, 腐蚀失效是诱发设备故障、缩短服役寿命的核心诱因。为提升设备腐蚀防护效能与运营经济性, 本文研究优化设计复合涂层防护、智能阴极保护、微生物腐蚀抑制三大技术体系, 经实验室加速试验与现场挂片验证, 优化后防护体系腐蚀速率降幅超 95%, 全生命周期成本显著下降, 具备良好的工程应用前景。

关键词 深海平台; 机电设备; 腐蚀防护技术; 复合涂层防护技术; 阴极保护系统

中图分类号: TE988

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.002

0 引言

深海油气与矿产资源开发是我国能源安全战略核心组成, 深海平台是深海资源开发关键枢纽装备, 机电系统运行稳定性直接决定平台安全生产能力。深海极端服役环境下, 机电设备腐蚀失效风险持续升高, 现有防护技术多基于浅海工况研发, 难以适配深海高压低氧复杂环境, 制约平台运营安全性与经济性。因此, 开展腐蚀防护技术优化研究, 对保障深海装备长效服役具有关键工程价值。

1 深海平台机电设备腐蚀现状与防护痛点分析

1.1 深海平台机电设备腐蚀环境特征与失效案例

深海平台机电设备长期服役于高盐高湿高压交变载荷极端环境, 腐蚀失效是设备故障与寿命缩短的首要诱因。深海环境腐蚀驱动力随水深增加呈现非线性强化特征, 不同水深区间环境参数直接决定腐蚀类型与失效速率, 具体参数见表 1。

机电设备腐蚀失效集中在动力传动系统、液压控制系统、电气仪表系统三大核心模块。动力传动系统齿轮箱、传动轴等部件, 因海水渗透与润滑介质劣化, 易诱发缝隙腐蚀与疲劳腐蚀, 失效占比 38%。液压控制

系统阀体、管路接头等精密部件, 以点蚀与电偶腐蚀为主要失效形式, 失效占比 32%。电气仪表系统接线端子、传感器壳体等部件, 在潮湿盐雾环境中易发生电化学腐蚀, 导致信号中断与设备失控, 失效占比 30%。国内近 5a 深海平台运维统计数据表明, 机电设备因腐蚀导致非计划停机时长占总停机时长 42%, 单次腐蚀故障维修成本较常规故障高 2.7 倍, 直接影响平台运营安全性与经济性^[1]。

1.2 现有腐蚀防护技术的局限性分析

目前, 深海平台机电设备应用腐蚀防护技术以有机涂层防护、牺牲阳极阴极保护、缓蚀剂添加为主, 各类技术在深海极端环境下均存在明显性能短板, 具体性能与局限性统计见表 2。

现有防护技术突出短板集中于三大关键层面。环境适配性不足, 常规防护技术多基于浅海环境研发, 在深海高压低温低流速环境下, 防护性能出现大幅衰减, 涂层阻抗模值较浅海环境降幅超 65%, 阴极保护效率降幅超 40%。协同防护能力缺失, 现有技术多为单一体系独立应用, 涂层与阴极保护之间存在电偶效应匹配失衡问题, 易加速涂层剥离与阳极消耗, 无法形成全周期协同防护效果。智能化管控能力不足, 现有防

表 1 深海不同水深环境腐蚀关键参数

水深区间 /m	环境温度 /℃	海水盐度 /‰	溶解氧含量 /mg · L ⁻¹	海水流速 /m · s ⁻¹	静水压力 /MPa
0 ~ 200	18 ~ 25	32 ~ 34	6 ~ 8	0.5 ~ 1.5	0 ~ 2
200 ~ 1 000	4 ~ 18	34 ~ 35	2 ~ 6	0.2 ~ 0.8	2 ~ 10
1 000 ~ 3 000	2 ~ 4	34.5 ~ 35	1 ~ 2	0.1 ~ 0.3	10 ~ 30
3 000 ~ 6 000	1 ~ 2	34.6 ~ 35	0.5 ~ 1	0.05 ~ 0.15	30 ~ 60

作者简介: 孙臣 (1978-), 男, 本科, 技术员, 研究方向: 海油发展。

表 2 现有主流腐蚀防护技术性能与局限性统计

技术类型	常规防护年限 /a	深海环境适用等级	年平均失效概率/%	主要局限性
溶剂型有机涂层	3 ~ 5	B 级	32	耐高压性能不足，易发生针孔与剥离，破损后无自修复能力
牺牲阳极阴极保护	8 ~ 12	A 级	18	输出电流不可调，深海低氧环境下效率衰减快，无法适配局部腐蚀防护需求
液相缓蚀剂	1 ~ 2	C 级	47	易被海水冲刷流失，环境友好性差，无法实现长效防护
热喷涂金属镀层	5 ~ 8	B 级	26	孔隙率高，与基体结合力不足，交变载荷下易开裂失效

护系统无法实时监测腐蚀状态与防护效果，无法针对局部腐蚀风险进行动态调整，只能通过定期停机检修进行维护，存在严重滞后性与被动性。

2 深海平台机电设备腐蚀防护技术优化方案设计

2.1 复合涂层防护技术的改进与应用

为突破常规有机涂层性能瓶颈，搭建改性环氧树脂为基体、功能化纳米填料与自修复微胶囊为关键组分的复合涂层体系。基体改性环节，选用有机硅改性环氧树脂，提升涂层耐高低温性能与耐水解稳定性，降低涂层高压环境渗透率。功能填料环节，引入表面改性石墨烯纳米片与玻璃鳞片，构建多层级物理阻隔结构，延长腐蚀介质渗透路径，石墨烯片径控制在 $5\ \mu\text{m} \sim 10\ \mu\text{m}$ ，添加量控制在 $0.5\% \sim 1.0\%$ ，玻璃鳞片厚度控制在 $5\ \mu\text{m} \sim 8\ \mu\text{m}$ ，添加量控制在 $15\% \sim 20\%$ ，在保证涂层阻隔性能同时，避免因填料过量导致涂层脆性增加。自修复功能设计环节，引入双壁型聚脲醛微胶囊，囊芯包含修复剂与固化剂，微胶囊粒径控制在 $20\ \mu\text{m} \sim 50\ \mu\text{m}$ ，添加量控制在 $3\% \sim 5\%$ ，当涂层出现机械破损或微裂纹时，微胶囊发生破裂释放修复剂，在破损区域快速固化形成致密防护层，完成涂层损伤原位自修复^[2]。此外，在涂层体系中引入电位缓冲剂，优化涂层与阴极保护系统电位匹配性，避免阴极剥离现象发生，形成涂层防护与阴极保护协同效应。针对机电设备不同部件服役环境，设计差异化涂层配套体系，动力传动系统转动部件采用耐磨型复合涂层，液压控制系统精密部件采用低孔隙率超薄复合涂层，电气仪表系统部件采用绝缘型耐盐雾复合涂层，完成全设备精准化防护。

2.2 阴极保护系统的智能化升级

为解决常规牺牲阳极阴极保护体系局限性，搭建辅助阳极驱动的外加电流智能阴极保护系统，完成防护参数实时监测与动态调控。系统硬件设计环节，采

用高稳定性氧化物辅助阳极，阳极材料以钨钛钛氧化物为核心，优化阳极催化活性与使用寿命，在深海环境下阳极消耗率低于 $10\ \text{mg} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ，使用寿命可达 20a 以上。参比电极采用全固态银氯化银参比电极，提升电位监测精度与稳定性，电位测量误差控制在 $\pm 5\ \text{mV}$ 以内，可在深海高压环境下长期稳定运行。系统控制环节，搭载边缘计算单元的智能控制模块，结合安装在设备关键部位的腐蚀传感器、电位传感器、温度传感器，实时采集设备腐蚀状态与环境参数，通过预设控制算法，动态调整外加电流输出大小与分布范围，将设备保护电位稳定在 $-0.85\ \text{V} \sim -1.05\ \text{V}$ 最优区间，避免过保护导致氢脆风险与欠保护导致腐蚀失效。针对机电设备复杂结构，采用分布式阳极布置方案，在管路接头、阀体、齿轮箱等易发生局部腐蚀部位，设置微型辅助阳极，完成局部区域精准防护，解决常规阴极保护系统存在的电位分布不均问题。

2.3 微生物腐蚀抑制技术的创新

为破解深海微生物腐蚀防控难题，开发依托群体感应抑制原理的绿色微生物腐蚀防控技术，替代传统广谱杀菌剂。深海环境内，硫酸盐还原菌是诱发机电设备微生物腐蚀的优势致腐菌种，该菌种通过生物膜形成与代谢活动，加速基体金属电化学腐蚀进程。群体感应为微生物调控生物膜形成与代谢活性的关键机制，通过抑制微生物群体感应系统，可在不杀灭微生物前提下，抑制生物膜形成与腐蚀代谢活性，避免微生物产生耐药性，同时降低对海洋生态环境影响。以海洋天然卤代呋喃酮作为先导骨架，引入氟、氯等卤素及磺酸基、羧基等极性锚定基团修饰分子，维持其构象在深海高压、低温、高盐环境中稳定，同时强化对硫酸盐还原菌群体感应受体识别选择性。修饰后抑制剂能够竞争性结合细菌信号受体蛋白，阻断酰基高丝氨酸内酯类信号传导，由此抑制胞外多糖分泌与生物膜形成，生物膜抑制率达到百分之九十以上，对烧

足类、浮游藻类等非靶标生物无急性或慢性毒性反应，环境相容性优良。

在应用层面，选用介孔二氧化硅或金属有机框架等多孔纳米载体包埋抑制剂，载药量高且孔径可调，促使抑制剂由涂层内部朝界面缓慢扩散。将载药纳米粒子嵌入环氧树脂—聚氨酯复合涂层，并复配咪唑啉类缓蚀剂，组成梯度释放结构。外涂层先行释放缓蚀剂以抑制初期腐蚀，纳米载体随涂层微孔逐步溶出抑制剂，维持界面群体感应抑制浓度。调节载体壳层交联密度与涂层交联网络，释放周期可延长至五年以上。此防护

层在深海装备表面形成稳定抑菌屏障，持续减少硫酸盐还原菌附着与生物膜累积，降低微生物腐蚀风险^[3]。

3 深海平台机电设备腐蚀防护技术优化效果评估与应用前景

3.1 实验室加速腐蚀试验结果分析

为验证优化后防护技术防护性能，在实验室环境下开展加速腐蚀试验，试验环境模拟 3 000 m 水深深海工况，试验周期 3 000 h，对比不同防护体系腐蚀防护性能，具体试验结果见表 3。

表 3 不同防护体系加速腐蚀试验性能参数

防护体系类型	腐蚀速率 /mm·a ⁻¹	涂层附着力 /MPa	10 Hz 下阻抗模值 /Ω·cm ²	破损自修复 时间/h
传统环氧涂层	0.082	3.2	1.2×10 ⁶	无自修复能力
优化复合涂层	0.006	8.7	1.8×10 ¹⁰	12
优化复合涂层+智能阴极保护	0.002	9.1	2.3×10 ¹⁰	8
优化复合涂层+智能阴极保护 +微生物抑制剂	0.0008	9.3	2.7×10 ¹⁰	8

加速腐蚀试验结果表明，优化后复合涂层体系较传统环氧涂层，腐蚀速率降幅 92.7%，涂层附着力提升 171.9%，阻抗模值提升 4 个数量级，具备优异物理阻隔性能与自修复能力。复合涂层与智能阴极保护系统结合后，腐蚀速率同步下降 66.7%，涂层与阴极保护之间形成良好协同防护效应，可抑制涂层破损区域腐蚀扩展。引入微生物腐蚀抑制技术后，防护体系综合性能持续提升，在模拟硫酸盐还原菌污染环境中，腐蚀速率较未添加抑制剂体系下降 60%，可抑制微生物腐蚀发生。此外，优化后防护体系在高压交变载荷循环试验中，未出现涂层开裂与剥离现象，具备优异耐机械损伤性能与环境适应性^[4]。

3.2 现场挂片试验数据验证

于南海某 3 000 m 水深作业深海平台开展现场挂片试验，试验周期 12 个月，挂片材质选用平台机电设备常用 316L 不锈钢与 42CrMo 合金钢，分别设置传统防护体系、优化综合防护体系两组平行试验样本。试验结果表明，316L 不锈钢样本中，传统防护体系平均腐蚀速率 0.024 mm·a⁻¹，优化综合防护体系平均腐蚀速率 0.0012 mm·a⁻¹，腐蚀速率降幅 95%。42CrMo 合金钢样本中，传统防护体系平均腐蚀速率 0.058 mm·a⁻¹，优化综合防护体系平均腐蚀速率 0.0021 mm·a⁻¹，腐蚀速率降幅 96.4%。挂片表面形貌分析表明，传统防护体系样本表面出现明显点蚀与缝隙腐蚀，最大点蚀深度达 0.12 mm，而优化综合防护体系样本表面平整光滑，无明显腐蚀痕迹，涂层完整性保持率达 99% 以上。现场

试验结果与实验室加速腐蚀试验结果保持一致，验证优化防护技术在实际深海环境中的有效性与稳定性^[5]。

4 结束语

本文针对深海平台机电设备腐蚀防护关键瓶颈，完成复合涂层防护技术改进、阴极保护系统智能化升级与微生物腐蚀抑制技术创新，构建多维度协同防护体系。经实验室加速腐蚀试验与现场挂片验证，优化后防护体系防护性能与全生命周期经济性均明显优于传统方案。未来将进一步优化多技术协同适配机制，开展全尺度工程应用验证，推动该技术体系在深海装备领域落地应用。

参考文献：

- [1] 孟凡帝,高浩东,刘莉,等.适用于深海压力-流体耦合环境的玄武岩有机防腐涂层的制备及性能研究[J].中国腐蚀与防护学报,2023,43(04):704-712.
- [2] 胡清泉.深海环境下海洋石油化工水下生产设备的腐蚀防护技术研究[J].福建化工,2025(07):105-107.
- [3] 吴俊升,胡科峰,董超芳,等.深海极端环境下钛合金腐蚀科学问题评述[J].科技导报,2025(17):77-84.
- [4] 龙秋雨,杨名亮,王茜茜,等.深海静水压力下有机涂层失效机制与防腐策略研究进展[J].材料开发与应用,2025(04):55-67.
- [5] 项琦峰,赵阳,张涛,等.模拟浅海及深海环境中阴极极化对 10CrNi5MoV 钢氢脆敏感性的影响[J].中国腐蚀与防护学报,2025,45(06):1599-1609.