

# 海洋环境下船舶防腐材料的选择与应用技术研究

何帅

(沪东中华造船(集团)有限公司, 上海 200129)

**摘要:** 船舶防腐材料在海洋环境中发挥着关键作用, 本文通过对环氧树脂涂料、聚氨酯涂料和水性无机富锌底漆三种典型防腐材料进行系统实验, 采用盐雾试验、浸泡测试、电化学阻抗法评估防腐性能。实验结果表明, 改性环氧树脂涂料在海洋环境中表现出最优异耐腐蚀性能, 防腐寿命达 8 年以上。聚氨酯涂料具有良好耐候性, 水性无机富锌底漆在阴极保护方面具有显著优势, 本文建立了涵盖物理性能、化学性能、应用性能三个维度评价体系, 形成了适用于不同船体部位防腐材料选择标准。优化设计的多层防护体系在实际应用中展现出优异防护效果, 全寿命周期成本降低 25%, 为船舶防腐材料选择应用提供理论依据。

**关键词:** 船舶防腐; 涂层材料; 耐腐蚀性能; 评价体系; 工程应用

中图分类号: U668 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2025) 21—0115—04

船舶在海洋环境中长期运行面临着严重腐蚀问题。海水、盐雾、紫外线等多重因素作用, 导致船体金属结构发生腐蚀, 降低船舶使用寿命, 引发安全事故。防腐材料技术经过多年发展, 以有机涂料、金属涂层、阴极保护为主要方向。环氧树脂涂料凭借优异附着力占据主导地位, 纳米改性技术提升了防护效果。热喷涂金属涂层弥补了传统防腐方案不足, 阴极保护系统构建了更可靠防护体系。深入研究船舶防腐材料性能特点、选择标

准、应用技术, 对提升防腐效果、延长使用寿命具有重要意义。

## 1 船舶腐蚀与防护概述

### 1.1 腐蚀机理与危害分析

船舶在海洋环境中长期运行, 面临着复杂的腐蚀环境。海水中的氯离子、溶解氧与金属表面发生电化学反应, 形成原电池, 加速了金属的腐蚀过程<sup>[1]</sup>。同时,

建导墙与密贴既有围护冠梁连接共用、密贴既有围护拐角空间钢筋笼优化等关键技术, 主要结论包括:

(1) 新建地连墙密贴既有围护咬合清障水泥土回填技术通过提前采用全回转套管咬合清障, 清障完毕后采用水泥土分层回填, 确保咬合死角距离不影响新建地连墙施工。

(2) 新建导墙与密贴既有围护冠梁连接共用技术, 将密贴运营车站侧的新建导墙坐落于既有围护结构的冠梁上, 该侧导墙下部与既有冠梁植筋连接, 使得既有冠梁兼做导墙的一部分。

(3) 密贴既有围护拐角空间钢筋笼优化技术通过将拐角处钢筋笼设置为平直段, 避免了由于拐角出现障碍物导致卡笼。

参考文献:

[1] 张建林, 于学斌, 范登锐. 地下连续墙工法及其适用性研究[J]. 岩石力学与工程, 2020, 4(04): 857-862.

[2] 刘明虎. 桥梁地下连续墙基础发展与展望[J]. 重庆交通大学

学报(自然科学版), 2021, 40(10): 41-51.

[3] 丛蔼森. 地下连续墙和深基础工程的发展概况与应用[J]. 地基处理, 2021, 3(01): 1-12.

[4] 朱江, 雷元新. 地下连续墙在深基坑工程中的应用发展研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2018, 36(06): 58-66.

[5] 曲振芳. 试述建筑基坑工程地下连续墙的发展及施工方法[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018, (30): 59.

[6] 邓建平, 蒋小明, 王新梅. 基于 BIM 的地下连续墙渗漏风险评估方法[J]. 建筑技术, 2021, S2(S2): 397-402.

[7] 蒋小明, 邓建平, 王新梅. 基于物联网的地下连续墙渗漏智能监测系统研究[J]. 岩土工程与防灾, 2020, S2(S2): 139-146.

[8] 于学斌, 张建林, 范登锐. 地下连续墙工法施工缝控制技术研究[J]. 岩土力学与工程, 2022, 3(03): 415-422.

[9] 王新梅, 邓建平, 蒋小明. 基于深度学习的地下连续墙渗漏故障诊断系统研究[J]. 计算机应用, 2023, S1(S1): 587-594.

基金项目: 上海市交通委员会科研计划项目 (JT2024-KY-036)。

海洋气候中的高温、高湿、紫外线辐射等因素与盐分协同作用，进一步加剧了腐蚀速率。在船体水线部位，因海水与空气交替作用，形成了显著的差异腐蚀环境，导致该区域腐蚀尤为严重。船舶腐蚀不仅造成金属材料的质量损失，还会引发结构强度下降、设备性能退化等一系列危害。经统计分析，腐蚀损失约占船舶维护成本的35%，严重影响了船舶的使用寿命和航行安全。更为关键的是，腐蚀引起的结构缺陷可能诱发船舶事故，造成人员伤亡和环境污染等重大损失。

## 1.2 防护材料技术进展

防腐材料技术已形成以有机涂料、金属涂层、阴极保护为主的多层次防护体系。环氧类涂料凭借优异附着力及耐腐蚀性能，占据船舶防护领域主导地位。纳米改性环氧树脂、水性环氧涂料等新型材料研发取得突破性进展，提升了防护效果与环保性能<sup>[2]</sup>。热喷涂金属涂层技术应用于高磨损部位，解决了传统防腐方案存在的不足。阴极保护系统与防腐涂料协同使用，形成可靠复合防护方案。船舶工业绿色发展要求提高，推动低VOC含量、无重金属环保型防腐材料成为研发重点，国际海事组织持续提高防腐材料环保标准。

## 2 防腐材料实验研究

### 2.1 试验方案与测试方法

实验选取环氧树脂涂料、水性无机富锌底漆和聚氨酯面漆作为研究对象，采用盐雾试验、浸泡测试和电化学阻抗法对材料防腐性能进行系统评价<sup>[3]</sup>。盐雾试验在中性盐雾试验箱中进行，喷雾浓度5%NaCl，试验温度 $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度98%，连续喷雾时间2000h。浸泡测试采用人工海水配制，溶液pH值8.2，温度 $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，浸泡周期90天。电化学阻抗测试采用三电极体系，参比电极为饱和甘汞电极，辅助电极为铂片，工作电极为涂覆防腐材料的Q235钢试样，测试频率范围为 $10^{-2} \sim 10^5 \text{Hz}$ 。涂层性能评价指标包括耐盐雾性、附着力、阻抗谱特性、介电常数等关键参数。试样制备过程严格控制涂层厚度、固化条件和表面粗糙度，确保实验数据的可靠性和可重复性。

### 2.2 性能指标评估结果

通过对比分析三种防腐材料的实验数据，得出防护性能差异显著的结论（如图1）。改性环氧树脂涂料在2000h盐雾试验后，表面无明显锈蚀和起泡现象，附着力保持在1级，涂层阻抗值维持在 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上，

表现出优异的防腐性能。水性无机富锌底漆在浸泡测试中，锌含量80%的试样形成致密钝化膜，阴极保护电流密度稳定在 $15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，具有良好的牺牲阳极保护作用。聚氨酯面漆经紫外老化1000h后，光泽保持率达到85%，但在盐雾试验中出现轻微起泡，耐腐蚀性能低于环氧树脂涂料。电化学阻抗谱分析显示，改性环氧树脂涂料的容抗值和相角随浸泡时间的变化最小，证实其具有最佳的结构稳定性和阻隔效果。综合各项性能指标，改性环氧树脂涂料在耐腐蚀性、结构稳定性和附着力等方面均表现最为优异。

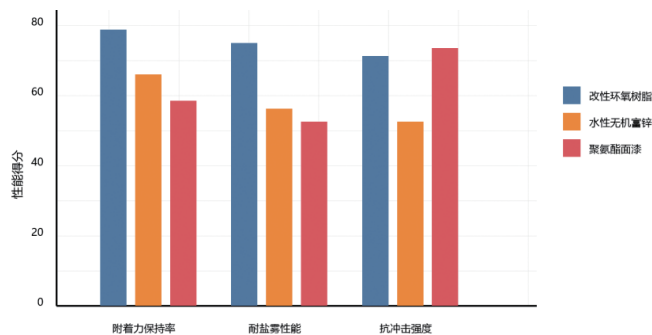


图1 防腐材料性能指标评估对比图

## 3 材料适用性评估体系

### 3.1 海洋环境因素分析

船舶在运行过程中承受着复杂多变的海洋环境作用，防腐材料面临着严峻的性能考验。大气区域主要受到盐雾、紫外线和温湿度变化的影响，盐雾中氯离子浓度可达 $350 \text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ，加速了金属基体的电化学腐蚀过程。水线区域因海水与空气的交替作用，形成了独特的腐蚀微环境，该区域溶解氧含量高，温度波动大，且存在显著的飞溅和磨损作用。水下区域完全浸没于海水中，海水含盐量平均为35‰，pH值在8.2左右，溶解氧含量随深度呈梯度分布，最大可达 $8.5 \text{mg}/\text{L}$ 。此外，海洋微生物的附着和繁殖会在防腐层表面形成生物膜，改变局部环境的电化学特性，诱发微生物腐蚀。温度、压力、海流速度等物理因素的综合作用，进一步加剧了防腐材料的性能退化。通过对不同海域和季节的环境参数监测发现，热带海域的腐蚀速率比温带海域高出30%以上，而极地海域则面临着低温脆化的特殊挑战。

### 3.2 防护机理与耐久性

防腐材料的保护机理主要包括阻隔保护、电化学保护和钝化保护三种形式。有机涂料通过形成致密的高分子网络结构，阻止腐蚀介质与金属基体的直接接触，其

防护效果取决于涂层的完整性和屏蔽性能。环氧树脂涂料中的环氧基团与胺固化剂发生交联反应，形成三维网状结构，具有优异的耐化学性和附着力<sup>[4]</sup>。水性无机富锌涂料则通过牺牲阳极作用和钝化膜双重保护机制，锌粉的牺牲腐蚀产物填充涂层孔隙，同时在界面形成稳定的钝化膜。聚氨酯涂料依靠异氰酸酯与多元醇的化学反应，构建具有优良耐候性的保护层。在实际服役环境中，防腐材料的耐久性受到多重因素影响。涂层结构随服役时间发生老化，交联密度下降，产生微裂纹和孔隙，导致防护性能逐步衰减。通过加入纳米粒子、表面活性剂等功能助剂，可有效改善涂层的结构稳定性，延长使用寿命。实验数据表明，优化配方的改性环氧树脂涂料在标准海洋环境中使用寿命可达8年以上。

### 3.3 材料选择关键指标

材料选择的关键指标体系涵盖物理性能、化学性能和应用性能三个维度（如图2）。物理性能方面重点考察附着力、抗冲击性和耐磨性，其中附着力不应低于5MPa，抗冲击性要求达到50kg·cm，耐磨性以泰伯耐磨实验失重不超过60mg/1000次为标准。化学性能指标包括耐盐雾性、耐海水性和耐候性，要求5%中性盐雾试验2000h无明显锈蚀，浸泡试验90天电化学阻抗衰减不超过20%。应用性能则关注施工工艺性、固化特性和返修便利性，涂料配比偏差允许范围±3%，施工环境温度5℃~40℃，相对湿度不超过85%。针对不同使用部位，设置差异化的性能要求，如水线区域的涂层需具备更高的耐磨性和抗冲击性，水下区域则强调防污性能。同时，建立性能指标的量化评分体系，采用加权平均法计算材料的综合性能得分，为材料选择提供科学依据。在环保要求方面，VOC含量应符合国际海事组织标准，重金属含量满足RoHS指令要求。

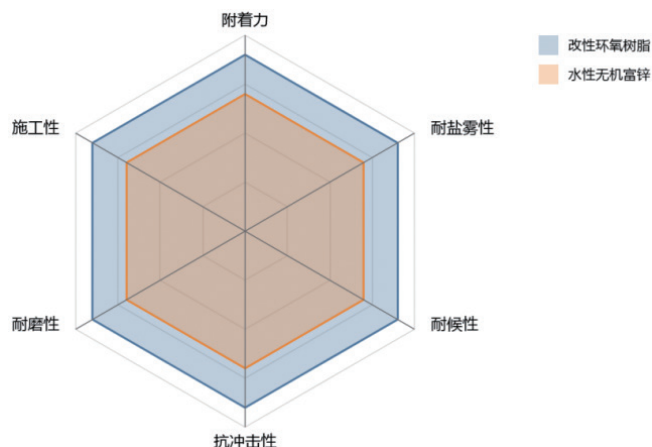


图2 材料选择关键指标雷达图

### 3.4 应用环境适应性

防腐材料的应用环境适应性评估需结合船舶运行工况和环境特征进行系统分析。针对不同航线和海域特点，建立环境适应性评价模型，涵盖温度适应范围、耐介质性和抗老化性等关键参数。热带航线重点评估材料的耐高温性能和抗紫外线老化性能，要求涂层在60℃持续暴露条件下性能保持率不低于85%。寒带航线则侧重考察低温柔韧性和抗冰冻融循环性能，-30℃弯折实验不得出现开裂。沿海航线需重点关注材料在盐雾-干燥交替条件下的适应性，通过交替循环试验评估结构稳定性。远洋航线则强调长效防护性能，建立加速老化与实际使用寿命的对应关系。通过建立环境因素与材料性能的数学模型，预测不同环境条件下的防护效果。实验结果表明，改性环氧树脂涂料表现出最佳的环境适应性，在-40℃~80℃温度范围内保持良好的防护性能。水性无机富锌底漆在盐雾环境中具有独特优势，但受温度和湿度影响较大，适用范围相对较窄。

## 4 工程应用与效益分析

### 4.1 涂层体系设计优化

船舶防腐涂层体系设计采用多层结构优化策略，针对不同部位的腐蚀特征，构建差异化防护方案<sup>[5]</sup>。水线以上区域采用环氧富锌底漆（75μm）/环氧云铁中间漆（125μm）/聚氨酯面漆（50μm）的三层结构，底漆中锌粉含量控制在80%，确保良好的阴极保护效果。水线区域增加防污层，采用环氧富锌底漆（75μm）/环氧玻璃鳞片漆（150μm）/自抛光防污漆（150μm）的复合结构，玻璃鳞片的片状结构显著提升了涂层的阻隔性能。水下区域选用环氧富锌底漆（75μm）/环氧改性云铁中漆（200μm）/氯化橡胶面漆（75μm）的防护体系，通过增加中间漆厚度强化防腐效果。特殊部位如舷外托架、锚链舱等高磨损区域，采用改性环氧陶瓷涂料（400μm）作为加强层。涂层厚度的确定综合考虑防护要求和施工工艺性，通过正交试验优化各层配比，使总厚度控制在350~450μm范围内。实践证明，优化后的涂层体系在不同区域均表现出良好的防护效果，延长了维护周期，降低了维护成本。

### 4.2 施工技术与质量管理

防腐涂料施工过程的质量控制是确保防护效果的关键环节。基材表面预处理采用喷砂工艺，粗糙度控制在Sa2.5级，表面粗糙度Rz值保持在50~75μm，锚纹

深度应与涂层厚度相适应。涂料施工环境温度严格控制在 15℃~35℃，相对湿度不超过 85%，露点温度与钢板表面温度差值保持在 3℃以上。采用无气喷涂技术进行涂装，喷涂压力控制在 15~18MPa，喷嘴选用 65° 扇角，保持 30cm 的最佳喷涂距离。各层涂料的施工间隔时间需严格遵循产品技术要求，环氧底漆最短复涂时间为 4h，最长不超过 48h，以确保层间结合力。涂层固化采用阶段性升温工艺，初期保持 25℃恒温 24h，后期升温至 35℃维持 48h，提高涂层的交联密度。质量控制体系覆盖原材料检验、施工过程控制和成品验收三个阶段，建立施工质量跟踪档案。涂层厚度采用电磁测厚仪进行检测，每 100m<sup>2</sup> 测量 20 个点，误差控制在 ±10% 以内。通过高压放电法检测涂层连续性，电压设定为涂层厚度的 4 倍 (V/μm)，确保无针孔和贯通性缺陷。

#### 4.3 防护效果现场监测

建立了完整的防腐效果监测评估体系，通过定期检测和数据分析，评价防护性能的衰变规律。监测点的布置采用分区取样法，每 1000m<sup>2</sup> 设置 1 个固定监测点，重点区域加密布点。检测项目包括涂层厚度、附着力、表面缺陷和电化学特性等关键指标。采用涡流法测量涂层减薄速率，数据显示正常服役条件下年均减薄率在 2~3μm。附着力测试采用拉开法，测试结果表明涂层附着力随服役时间呈指数衰减，5 年后仍保持在 3MPa 以上。采用便携式电化学工作站进行现场阻抗测试，监测数据显示改性环氧树脂涂层的阻抗值在服役 3 年后仍维持在 10<sup>7</sup>Ω·cm<sup>2</sup> 数量级。通过数字图像分析技术记录表面缺陷的演变过程，建立缺陷扩展数学模型。监测数据表明，水线区域的涂层劣化速率最快，年均锈蚀面积增长率为 0.5%，而水下区域的防护性能相对稳定。根据监测结果，制定了针对性地维护策略，有效延长了防腐系统的使用寿命。

#### 4.4 全寿命周期成本评估

防腐材料的全寿命周期成本评估采用净现值法，综合考虑初始投资、维护成本和更新改造费用。初始投资包括材料费用、人工成本和设备使用费，其中材料费用占总投资的 45%，改性环氧树脂涂料系统的单位面积成本为 85 元/m<sup>2</sup>。维护成本主要包括定期检测费用、局部修补支出和全面翻新费用，年均维护成本约为初始投资的 8%。通过对比分析不同防腐方案的经济性，改性环氧树脂涂料体系虽然初始投资较高，但因其优异的耐久

性，15 年使用周期内的总成本比传统方案降低 25%。成本效益分析表明，采用高性能防腐材料可显著减少维护次数，降低船舶停航损失，经济效益显著（如图 3）。考虑环保要求带来的成本增加，水性防腐涂料在前期投入虽然增加 15%，但可减少 VOC 排放，降低环保处理成本。风险成本评估显示，防腐失效导致的非计划维修和事故损失约占总成本的 12%，采用可靠的防护体系可有效规避风险。通过建立成本预测模型，为船舶运营单位制定维护策略提供决策依据。

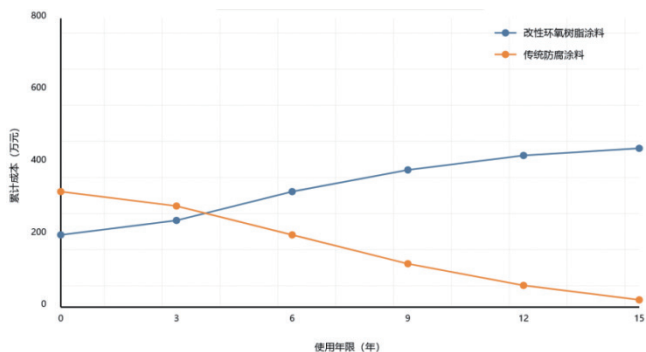


图 3 全寿命周期成本趋势图

## 5 结语

系统研究阐明了船舶防腐材料在各种环境条件下防护性能特点。改性环氧树脂涂料表现出最优异综合性能，水性无机富锌底漆在特定环境下具有独特优势。建立了完整材料选择标准体系，制定了差异化防护方案。涂层结构优化设计、施工工艺控制、质量监测评估等关键技术实现创新突破。实验数据验证了防腐材料在延长船舶使用寿命、降低维护成本方面显著成效。未来发展应着重环保型防腐材料研发，优化施工工艺，完善维护方案，推动船舶防腐技术进步。

#### 参考文献：

- [1] 黄俊杰,张迪,杨少杰,等.船舶和海洋工程设计中管道防腐研究[J].船舶物资与市场,2024,32(11):65-67.
- [2] 赵任张,刘亮,陈政.水性防腐涂料在船舶涂装中的应用[J].船舶标准化工程师,2024,57(06):78-80.
- [3] 李济同.基于关联规则算法的船舶涂装防腐效果检测方法[J].中国水运,2024,(21):65-67.
- [4] 姜圣涌,周滨.水性防腐涂料在船舶涂装中的应用[J].船舶物资与市场,2024,32(08):4-6.
- [5] 梁彬.环保型海运船舶的防腐涂料技术应用研究[J].中国水运,2024,(03):61-63.