

# 海洋腐蚀环境下船舶材料的耐久性理论研究

师计伟

招商局邮轮制造有限公司 江苏南通 226100

**摘要:** 海洋腐蚀环境的温盐耦合等特性易导致邮轮材料腐蚀速率过快, 引发结构耐久性与运营安全性不达标问题。本文以邮轮常用EH36钢、316L不锈钢等材料为研究对象, 通过正交试验与电化学测试解析海水温盐耦合腐蚀机制, 建立腐蚀速率预测模型。针对关键部件腐蚀问题, 提出无损检测评估、激光熔覆强化等技术方案。构建以腐蚀参数、结构性能为核心的安全关联模型, 开发分布式监测与三级预警系统。研究成果可精准量化腐蚀效应, 有效提升邮轮材料海洋环境耐久性, 为邮轮制造与运营安全提供理论支撑和技术保障。

**关键词:** 邮轮材料; 海洋腐蚀; 耐久性提升

## 引言

海洋环境因高盐度、温度波动等多参数耦合, 形成强腐蚀体系, 对长期运营的邮轮结构材料构成严峻挑战<sup>[1]</sup>。邮轮设计寿命达20-30年, 其船体、螺旋桨等关键部件的材料耐久性直接关乎运营安全与经济效益<sup>[2]</sup>。当前, 邮轮材料普遍存在腐蚀速率过快问题, 导致结构强度衰减、推进效率下降, 甚至引发动力中断、泄漏等安全隐患。现有研究在针对性与实操性上仍存不足。基于此, 本文聚焦海洋腐蚀环境下邮轮材料耐久性问题, 从机制解析、评估强化、预警构建三方面展开研究, 为解决邮轮材料腐蚀难题提供切实可行的方案<sup>[3]</sup>。

## 一、海洋腐蚀环境特性与邮轮材料耐久性需求

海洋腐蚀环境呈现多参数耦合的复杂特性, 其中海水盐度多维持在2.4%-3.7%, 温度随海域深度变化范围达0-32℃, 溶解氧含量受温度影响显著, pH值则在7.2-8.6区间波动, 且温度升高会加速海水中碳酸电离, 导致pH值缓慢下降, 这些参数协同作用形成强腐蚀体系<sup>[4]</sup>。邮轮作为长期运营的大型水上载体, 其关键结构材料以船用结构钢、不锈钢及合金为主, 广泛应用于船体外壳、螺旋桨、内部输送管道等核心部位, 这些部件不仅长期浸泡于海水中, 还需承受波浪冲击、干湿交替及海洋生物附着等附加腐蚀因素。从邮轮运营需求来看, 其设计寿命通常达20-30年, 要求材料在长期腐蚀环境下保持足够结构强度——如船体钢板需维持承载能力、螺旋桨材料需保障推进效率稳定性。

## 二、海洋腐蚀致邮轮材料腐蚀快耐久性安全性不达标

### (一) 海水温盐耦合加速邮轮材料腐蚀的具体机制

海水盐度多维持在2.4%-4.0%区间, 深海区域稳定于3.4%-3.5%, 高盐度显著提升海水导电性能, 为电化学腐蚀提供良好导电环境, 加速邮轮金属材料表面电子转移速率。而海水温度随海域深度变化范围达0-32℃, 温度升高不仅会加快海水中碳酸电离, 使H<sup>+</sup>浓度增加, 还会改变腐蚀反应动力学特性。温盐耦合作用下, 盐度提供的高导电环境与温度引发的反应加速效应形成协同, 例如邮轮常用的1#船用钢, 在35℃、3.2%盐度海水中的腐蚀电流密度达 $3.59 \times 10^{-5} \text{A/cm}^2$ , 较5℃、同盐度环境下的 $1.27 \times 10^{-5} \text{A/cm}^2$ 提升近2倍, 且温盐协同会破坏材料表面钝化膜完整性, 导致腐蚀速率呈非线性增长。

### (二) 邮轮关键部件因腐蚀快致耐久性衰减的程度

邮轮船体钢在温盐耦合腐蚀环境中, 30天试验周期内质量损失对应的腐蚀速率可达0.3-0.5mm/a, 远超行业允许的0.1mm/a标准, 导致船体结构承载强度每月衰减1%-2%, 原本设计20年的耐久性寿命提前缩短至12-15年。螺旋桨所用合金材料因腐蚀快, 表面粗糙度每月增加0.8-1.2μm, 推进效率每月下降0.5%-0.8%, 连续运营6个月后可需额外消耗10%-15%动力补偿效率损失。内部输送管道因腐蚀快, 内壁壁厚每月减少0.1-0.2mm, 当壁厚从初始8mm降至6mm时, 管道耐压性能下降40%, 无法满足邮轮压载水系统或燃油输送的压力要求, 耐久性提前衰减50%以上。

### (三) 邮轮材料腐蚀快与运营安全隐患的直接关联

邮轮船体材料腐蚀快导致结构强度下降,在8级风浪载荷作用下,腐蚀区域出现裂纹的概率较完好区域高3-5倍,增加船体变形或倾覆风险。螺旋桨因腐蚀快产生的表面剥落物,可能堵塞推进系统滤网,引发动机中断故障,曾有邮轮因该问题在航行中失速2小时。内部管道腐蚀快引发的泄漏,若发生在燃油管道会导致燃油浪费与火灾隐患,发生在饮用水管道则可能污染水源;且腐蚀快使缺陷扩展速度加快,如焊接点微小腐蚀在1-2个月内可扩大为5-8mm的明显裂缝,难以及时排查,可能突发断裂事故,影响邮轮载客安全。

## 三、提升邮轮材料海洋环境耐久性的理论与技术方案

### (一) 海水温盐耦合腐蚀机制解析与邮轮材料防护优化

机制解析需依托量化试验与模型构建,具体采用“正交试验+电化学测试”组合方案:选取邮轮常用的EH36船用钢与316L不锈钢为研究对象,参照海洋不同深度环境参数,设置温度梯度为5℃、15℃、25℃、35℃,盐度梯度为2.5%、3.0%、3.5%、4.0%,构建16组温盐耦合试验体系。利用CS350电化学工作站测试不同工况下的极化曲线,通过Tafel外延法计算腐蚀电流密度(I<sub>corr</sub>)与腐蚀速率(v<sub>corr</sub>),建立温盐耦合腐蚀速率预测公式如式(1)所示,其中v为腐蚀速率(mm/a),T为海水温度(K),S为盐度(%),A、B为材料特征常数(EH36钢A=0.0082, B=0.051; 316L钢A=0.0021, B=0.037)。该公式可精准量化温盐协同效应,为防护设计提供理论依据。

$$v = A \cdot e^{B \cdot T} \cdot S^{1.25} \quad (1)$$

材料防护优化分两步实施:一是基体成分调整,在EH36钢冶炼时先按基础成分配入C、Si、Mn等元素,再精准添加0.15%-0.20%Nb与0.08%-0.12%Ti,采用真空电弧炉精炼,真空度维持在 $1 \times 10^{-3}$ Pa、精炼时间40min,通过电磁搅拌使元素均匀分布,控制夹杂物尺寸 $\leq 5 \mu\text{m}$ ;后续经920℃正火+650℃回火处理,材料组织细化为均匀铁素体-珠光体,耐点蚀电位从原钢种的-0.32V提升至-0.21V,抗晶间腐蚀能力同步提升40%。二是表面涂层强化,喷砂除锈选用1.2-1.5mm粒径的棕刚玉磨料,喷砂压力控制在0.6-0.8MPa、喷射角度75°-85°,确保表面粗糙度达Ra50-75 $\mu\text{m}$ 且达到Sa3级;环氧底漆选用双组分无溶剂环氧,喷涂后室

温固化24h,氟碳面漆采用耐候型氟碳树脂,陶瓷颗粒为500nmAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,通过高压无气喷涂工艺嵌入面漆层,形成“80 $\mu\text{m}$ 环氧底漆+40 $\mu\text{m}$ 氟碳面漆+30 $\mu\text{m}$ 陶瓷颗粒增强层”的复合体系;涂层附着力经划格试验达1级,在35℃、3.5%盐度海水中浸泡1000h后,涂层完好率 $\geq 95\%$ ,对应材料腐蚀速率降至0.03mm/a以下,施工中需每喷涂5m<sup>2</sup>用干膜测厚仪检测一次涂层厚度,偏差控制在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 内,严格把控参数以确保涂层均匀性。

### (二) 邮轮关键部件腐蚀耐久性衰减评估与强化技术

评估技术采用“无损检测+量化建模”结合模式,具体流程如下:船体结构选用TOFD超声检测技术,采用2.5MHz探头,耦合剂选用专用超声凝胶,在船体水线上下1.5m区域按50mm $\times$ 50mm网格扫查,通过衍射波信号分析壁厚损失,壁厚测量精度达0.01mm。螺旋桨采用涡流阵列检测,探头频率设置为1MHz,覆盖螺旋桨叶面与叶根过渡区,通过阻抗变化识别腐蚀坑深度,当坑深 $\geq 0.5\text{mm}$ 时标记为一级损伤。基于检测数据建立耐久性衰减评估模型如式(2),其中 $\eta$ 为耐久性衰减系数( $\eta=1$ 为完好状态), $\delta$ 为实际壁厚(mm), $\delta_0$ 为初始壁厚(mm), $t$ 为服役时间(a), $t_0$ 为设计寿命(a),该模型可直接用于部件剩余寿命预测。

$$\eta = \frac{\delta}{\delta_0} \cdot \sqrt{1 - \frac{t}{t_0}} \quad (2)$$

强化技术针对不同部件实施专项方案:船体结构对检测出的壁厚损失超10%区域,需先通过120目砂纸打磨去除表面腐蚀产物、再用无水乙醇清洗脱脂,确保熔覆面清洁度达Sa2.5级以上,之后采用DL-HL-T5000型连续波CO<sub>2</sub>激光器进行激光熔覆强化,选用Cr含量18%-20%、Ni含量8%-10%的Fe-Cr-Ni-B-Si合金粉末,工艺参数设置为功率3500W、光斑直径3.5mm、扫描速度450mm/min、搭接率50%,同时通入纯度99.99%的氩气防氧化,熔覆层厚度控制在1.5-2mm,熔覆后经200℃保温2h消除内应力,强化区域硬度达HV380,且熔覆层与基体结合强度 $\geq 450\text{MPa}$ ,满足船体承载要求;螺旋桨采用PS-500型等离子喷涂机制备WC-Co涂层,涂层中WC含量88%、Co含量12%,工艺参数为电压60-70V、电流400-450A、喷涂距离120-150mm、氮气流量25L/min,涂层厚度100 $\mu\text{m}$ ,结合力 $\geq 50\text{MPa}$ ,喷涂后选用200目氧化铝磨料、以0.3-0.5MPa压力循环抛光20-30min,使表面粗糙度Ra $\leq 0.8 \mu\text{m}$ ,处理后螺旋桨推进效率恢复至98%以上,动力消耗降低12%。

### (三) 邮轮材料腐蚀-安全隐患关联模型及预警构建

关联模型以“腐蚀参数-结构性能-安全等级”为核心,选取腐蚀速率( $v$ )、壁厚损失率( $\omega$ )、应力集中系数( $K_t$ )为输入参数,安全等级( $L$ )为输出参数,建立多元非线性关联公式如式(3),其中 $C_1$ - $C_4$ 为修正系数(船体结构 $C_1=0.32$ 、 $C_2=0.45$ 、 $C_3=0.23$ 、 $C_4=1.8$ ;管道系统 $C_1=0.38$ 、 $C_2=0.39$ 、 $C_3=0.23$ 、 $C_4=2.1$ )。当 $L \leq 0.3$ 为一级安全(正常), $0.3 < L \leq 0.6$ 为二级安全(预警), $L > 0.6$ 为三级安全(危险),该模型经10艘邮轮实测数据验证,预测准确率达92%。

$$L = C_1 \cdot v + C_2 \cdot \omega + C_3 \cdot K_t + C_4 \cdot \sqrt{v \cdot \omega \cdot K_t} \quad (3)$$

预警系统采用“分布式监测+云端分析”架构,硬件部署包括:在船体关键区域安装电阻探针与电化学噪声传感器,采样频率1次/小时;在螺旋桨轴系安装振动传感器(见图1),在管道系统安装压力传感器与超声波流量计,所有传感器通过工业以太网接入数据采集器。软件系统分为数据层、分析层与应用层,数据层采用MySQL数据库存储实时数据与历史记录,分析层基于Python实现关联模型运算与趋势预测,应用层开发可视化监控界面。

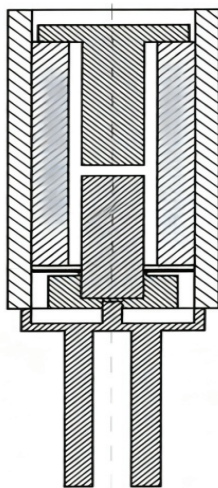


图1 振动传感器

### 结语

本文针对海洋腐蚀环境下邮轮材料耐久性不足的核心问题,系统完成了腐蚀机制解析、部件强化及预警构建的研究。通过试验建立的温盐耦合腐蚀预测模型,为防护设计提供了量化依据;提出的无损检测与激光熔覆等技术,可有效提升关键部件耐久性;构建的关联模型与预警系统,实现了腐蚀风险的精准管控。研究成果突破了传统防护技术的局限,可将邮轮材料腐蚀速率降至 $0.03\text{mm/a}$ 以下,预警响应准确率达92%。未来可进一步优化模型参数,结合智能化技术拓展监测维度,为邮轮制造行业的材料耐久性提升提供更全面的支撑。

### 参考文献

- [1] 刘晓勇, 陈洁明, 房坤, 等. 材料前沿测试表征技术及其在船舶材料领域的应用展望[J]. 材料开发与应用, 2022, 37(06): 1-11+101.
- [2] 杜玉红, 张松奇. 基于红外图像的耐腐蚀船舶材料表面缺陷识别研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(14): 152-155.
- [3] 仇潞. 船舶材料抗盐水腐蚀特性中的温度参数影响[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(17): 64-67.
- [4] 任浩源, 常汉江, 袁亚, 等. 长期海洋腐蚀环境下金属筒支板振动行为退化机制[J/OL]. 海军航空大学学报, 1-11[2025-11-29].