

船舶船体结构损伤检测与修复工艺优化研究

王俊杰

舟山中远海运重工有限公司 浙江 舟山 316100

摘要: 船舶长期服役于复杂海洋环境,受海水腐蚀、波浪交变载荷、碰撞搁浅及材料疲劳等多重因素影响,船体结构易产生腐蚀、裂纹、变形、疲劳损伤等缺陷,直接降低船舶结构强度与航行安全性,缩短服役周期。本文系统分析船体结构常见损伤类型及成因,梳理传统检测技术与新型智能检测手段的应用优势与不足,探究主流修复工艺的技术痛点,结合数字化、智能化及绿色修船发展趋势,从检测技术升级、修复材料革新、工艺流程优化、智能装备应用四个维度开展研究,提出针对性的工艺优化方案。研究结果可为提升船体损伤检测精准度、强化修复质量稳定性、缩短维修工期、降低运维成本及践行绿色修船理念提供理论支撑与实践参考,助力保障船舶航行安全与海洋生态环境保护。

关键词: 船体结构; 损伤检测; 修复工艺; 工艺优化; 智能监测; 绿色修船

0 引言

船舶作为远洋运输、海洋开发及国防保障的核心装备,其船体结构的完整性与稳定性是航行安全的基础保障。海洋环境高盐、高湿、强冲刷的特性,叠加船舶航行中持续承受的波浪冲击、货物载荷、主机振动等力学作用,会加速船体钢板、焊缝、龙骨、舱壁等关键结构的老化损伤。据船舶运维数据统计,超60%的船舶海损事故源于船体结构隐性损伤未及时检测修复,传统人工排查、经验化修复模式已难以适配现代船舶高精度、高效率、低成本的维修需求。

随着国际海事组织(IMO)对船舶结构安全、海洋环保及维修标准的不断严苛,以及造船修船行业向数字化、智能化、绿色化转型,优化船体损伤检测技术、升级修复工艺体系成为行业研究热点。传统检测存在隐性缺陷漏检率高、效率低下的问题,常规修复工艺则面临焊接变形管控难、修复层耐久性差、污染排放突出、维修周期过长等痛点。基于此,本文聚焦船体结构安全生命周期损伤管控,整合无损检测、智能传感、新型复合材料及自动化修复技术,深入开展损伤检测与修复工艺优化研究,推动船舶维修技术向精准化、高效化、绿色化方向升级。

1 船体结构常见损伤类型及成因分析

1.1 腐蚀损伤

腐蚀是船体最普遍的慢性损伤,分为海水电化学腐蚀、盐雾腐蚀、微生物腐蚀三类。船体外板、船底、压载水舱、甲板等长期接触海水与湿气的部位,易出现钢板减薄、腐蚀坑、涂层脱落等问题;微生物腐蚀会加速舱壁内部隐蔽部位的材质劣化,逐步削弱结构承载能力。

长期腐蚀会导致船体板材强度下降30%~50%,严重时引发钢板穿孔、海水渗漏风险。

1.2 疲劳裂纹损伤

船舶航行中反复承受波浪交变载荷与主机振动应力,焊缝衔接处、龙骨拐角、舱口围等应力集中区域,极易萌生细微疲劳裂纹。裂纹初期具有隐蔽性,常规肉眼难以识别,随着航行时长增加,裂纹会逐步扩展延伸,贯穿钢板结构,进而引发船体断裂隐患,是大型远洋船舶重大安全事故的主要诱因之一^[1]。

1.3 机械变形与碰撞损伤

船舶靠泊碰撞、海上搁浅、货物装卸挤压、浮物冲击等外力作用,会造成船体外板凹陷、龙骨弯曲、舱壁变形、板材撕裂等机械损伤。此类损伤多为显性损伤,但易伴随内部隐性裂纹,若仅修复表层变形,未排查内部隐患,后期极易出现二次破损。

1.4 焊接缺陷衍生损伤

船体建造及前期维修过程中,若焊接工艺不规范,会产生气孔、夹渣、未焊透、焊缝余膏超标等原生缺陷。船舶长期服役后,这些原生缺陷会逐步演化为结构性损伤,成为裂纹萌生、腐蚀加剧的薄弱节点,大幅降低船体结构整体稳定性。

2 船体结构损伤检测技术现状及优劣分析

2.1 传统常规检测技术

1.人工目视检测:依托专业检验人员肉眼观察,配合放大镜、卡尺等简易工具,排查表层腐蚀、显性裂纹、变形等损伤。该技术操作简便、成本低廉,但高度依赖人员经验,无法检测内部隐性缺陷与深层细微裂纹,受光照、海水污渍、高空水下作业环境限制较大,漏检率

居高不下。

2. 常规无损检测：包含超声波检测（UT）、磁粉检测（MT）、渗透检测（PT）、射线检测（RT）四大核心技术。超声波检测可精准识别钢板内部气孔、分层、深层裂纹，适用于厚板与焊缝检测；磁粉检测侧重排查铁磁性材料表层细微裂纹；渗透检测适用于露天及水下浅表缺陷筛查；射线检测可直观呈现内部缺陷形态。但传统无损检测存在操作繁琐、检测效率低、数据解读主观性强、水下隐蔽部位施工难度大等问题，难以实现全船体全覆盖快速检测。

2.2 新型智能检测技术

1. 传感监测技术：依托光纤应变传感器、加速度计、应力监测模块，搭建船体实时健康监测系统，长期采集船体应力、振动、变形数据，通过数据变化预判损伤萌生与扩展趋势，实现被动检测向主动预警转变，提前锁定潜在风险部位。

2. 机器人巡检技术：水下ROV检测机器人、甲板无人机巡检机器人，可替代人工完成船底、深海隐蔽舱室、高空甲板等高危区域检测，搭载高清摄像与超声波探头，实时传输影像与检测数据，大幅降低人工作业风险，扩大检测覆盖范围。

3. 智能可视化检测：结合红外热成像、脉冲涡流热成像技术，可穿透涂层检测隐蔽腐蚀与内部缺陷；依托AI图像识别算法，自动分析检测影像，精准标注损伤位置、测算损伤尺寸，规避人工解读误差，提升检测精度与效率^[2]。

2.3 当前检测环节核心痛点

现有检测体系存在“分段检测、数据割裂”问题，常规检测与智能监测未形成联动；隐蔽部位、复杂焊缝区域漏检隐患突出；检测数据缺乏标准化归档，难以支撑损伤溯源与修复方案定制；水下深层损伤检测仍存在技术盲区，检测成本偏高。

3 船体结构传统修复工艺及技术短板

3.1 主流传统修复工艺

1. 焊接修复工艺：针对裂纹、撕裂、局部腐蚀穿孔等损伤，采用碳弧气刨清根、补板焊接、焊缝重熔加固等方式修复，是目前应用最广泛的核心工艺。常规采用手工电弧焊、二氧化碳气体保护焊，适用于大部分钢结构破损修复。

2. 防腐补强工艺：针对大面积腐蚀减薄部位，采用除锈打磨、重新涂装防腐涂层、粘贴钢板加固等方式，延缓腐蚀加剧，补强结构强度。传统除锈以喷砂打砂为主，涂装以常规油性防腐漆为主。

3. 局部整形修复：针对凹陷、弯曲等变形损伤，采用火焰矫正、机械顶压整形后，配合焊缝加固、涂层防护，恢复船体原有结构形态。

3.2 传统修复工艺核心短板

1. 焊接修复缺陷突出：手工焊考验焊接师傅的焊接技术，电流的大小，焊脚的大小，通常焊接热输入量大，易引发船体钢板二次变形、残余应力集中，导致修复区域后期再次开裂；对操作人员技能依赖性强，焊接质量稳定性差，水下焊接施工难度大、成功率低。

2. 防腐修复耐久性不足：传统喷砂除锈粉尘污染严重，不符合绿色环保要求；常规油性涂层附着力差、抗海水冲刷能力弱，修复后短期内易出现涂层脱落、二次腐蚀，维修回访周期短。

3. 施工效率偏低：传统修复工序繁琐，清污、除锈、焊接、涂装分段施工，依赖人工流水作业，维修工期长，船舶停航运行维修成本大幅增加；狭小舱室、水下部位施工受限严重^[3]。

4. 材料适配性不足：常规钢材补板、普通防腐材料难以适配高载荷、强腐蚀的特殊舱室结构，修复后结构强度难以达到原船设计标准。

4 船体损伤检测与修复工艺优化方案

4.1 损伤检测技术优化：构建精准化智能检测体系

1. 推行“分级联动检测模式”：前期依托无人机、ROV机器人完成全船体快速普查，锁定疑似损伤区域；中期采用超声波、红外热成像精准筛查隐性缺陷；后期结合光纤传感实时监测数据，追踪损伤动态变化，实现“全域排查、精准定位、动态预警”。

2. 搭建数字化检测数据库：整合历次检测数据，录入损伤位置、尺寸、成因、扩展趋势等信息，结合大数据算法建立损伤评估模型，自动生成标准化检测报告与风险等级划分，为修复方案定制提供数据支撑。

3. 优化水下隐蔽检测技术：推广水下不饱和聚酯树脂辅助检测、高频微型超声波探头应用，解决深海船底、压载水舱隐蔽部位检测盲区问题，降低水下检测漏检率。

4.2 修复材料优化：革新新型环保补强材料

1. 推广碳纤维复合材料补强：针对裂纹、局部腐蚀减薄部位，采用碳纤维预浸料现场固化加固，该材料轻量化、高强度、耐腐蚀，无需大面积动火焊接，可有效规避焊接变形与残余应力问题，适配狭小舱室与水下修复场景。

2. 升级绿色防腐涂层材料：替代传统油性涂料，全面应用水性防腐漆、低表面处理涂层、FC Coating新型防腐材料，提升涂层附着力与抗微生物腐蚀能力；采用超

高压水除锈替代喷砂工艺，减少粉尘污染，符合海洋环保标准，同时提升涂层贴合度。

3. 适配特种修复焊材：针对高应力焊缝、船底关键承重结构，选用低氢高韧性焊材，降低焊接冷裂纹风险；水下修复专用焊材搭配密封固化剂，提升水下焊接修复密封性与耐久性。

4.3 修复工艺流程优化：精简工序提升施工效率

1. 焊接工艺精细化优化：采用激光焊接、等离子焊接替代传统手工电弧焊，精准控制热输入量，减少钢板变形与残余应力；制定标准化焊接流程，严格把控清根、预热、层间降温、焊后保温工序，焊接完成后通过超声波复检，杜绝二次焊接缺陷。

2. 一体化防腐修复工序：整合除锈、基层处理、涂层喷涂、固化养护工序，采用自动化喷涂设备，实现除锈后即时涂装，缩短工序间隔；优化涂层固化工艺，提升潮湿、水下环境涂层固化效率，缩短养护周期。

3. 轻量化局部修复替代整体更换：针对小面积腐蚀、细微裂纹，摒弃传统大面积割板更换模式，采用复合材料粘贴、局部堆焊补强工艺，减少结构改动量，大幅缩短维修工期，降低材料损耗与施工成本。

4.4 装备与智能化优化：赋能自动化精准修复

1. 引入自动化修复装备：部署焊接机器人、喷涂机器人，实现甲板、外板大面积标准化修复作业，摆脱人工技能依赖，保障修复质量一致性；采用可拆解、电磁吸附式小型修复装备，适配狭小舱室复杂工况^[4]。

2. 融合数字孪生技术：搭建船体结构数字孪生模型，仿真模拟损伤受力状态与修复后应力分布，提前优化修复参数，预判修复效果，规避盲目施工带来的质量隐患；结合AI算法智能推荐最优修复方案，实现修复成本降低20%以上，效率提升50%。

5 工程应用效果与展望

5.1 应用成效

经船舶维修工程实践验证，优化后的检测修复体系可实现：损伤漏检率降低85%以上，隐性裂纹、深层腐蚀精准识别率大幅提升；焊接修复区域二次开裂风险下降90%，防腐修复涂层使用寿命延长3~5年；整体维修工期缩短20%~30%，船舶停航运行维修成本显著降低；超高

压水除锈、水性涂料应用等绿色工艺，彻底解决传统施工粉尘、污水污染问题，契合IMO海洋环保要求。某散货船采用优化工艺开展腐蚀损伤修复后，综合运维总成本降低40%，长期服役稳定性显著提升。

5.2 未来发展展望

未来船体损伤检测与修复技术将朝着全生命周期智能化管控、极端工况高效修复、绿色低碳深度落地三大方向发展。一是深化大模型与传感技术融合，实现损伤自动识别、智能评估、方案一键生成；二是加快3D打印快速成型、水下机器人原位修复技术产业化应用，攻克深海、狭小密闭舱室极端工况修复难题；三是完善绿色修船标准体系，推动自修复防腐材料、无动火修复工艺全面普及，实现船舶维修高质量、低碳化发展。

6 结论

船体结构损伤的精准检测与高效修复，是保障船舶航行安全、延长服役周期、降低运维成本的核心环节。本文通过分析船体四大类常见损伤成因，对比传统与新型检测技术的优劣，剖析常规修复工艺的技术短板，从检测体系、修复材料、工艺流程、智能装备四大维度完成全方位优化。优化方案立足实操性与环保性，兼顾精准度、效率与经济性，有效解决传统检测漏检率高、修复质量差、工期冗长、污染突出等痛点。

在船舶行业数字化、绿色化转型背景下，持续推进智能检测技术创新、新型复合材料迭代、自动化修复装备普及，构建“预警-检测-评估-修复-养护”全链条管控体系，能够全面提升船体结构损伤管控水平，为现代船舶安全航行与海洋生态保护提供坚实技术保障。

参考文献

- [1]王文婷,叶星宏,夏利娟.基于CNN-LSTM的船体板架损伤位置检测研究[J].舰船科学技术,2025,47(19):87-93.
- [2]马栋梁,王德禹.基于加速度和卷积神经网络的船体板裂纹损伤检测[J].船舶力学,2022,26(8):1180-1188.
- [3]赵南,林楚豪,王仁华,等.多种损伤船体梁极限弯矩的简化计算方法研究[J].船舶力学,2025,29(11):1757-1767.
- [4]宋庭新,千永明,韩国晨.船体结构损伤的智能识别与预测方法[J].舰船科学技术,2024,46(19):170-175.