

船舶焊接修复工艺及质量控制研究

王俊杰

宁兴船舶修造有限公司 浙江 舟山 316212

摘要：船舶钢结构长期在高盐、高湿、交变载荷的海洋复杂工况下服役，船体焊缝、板材结构易产生裂纹、腐蚀减薄、焊接老化、外力撕裂等缺陷，需通过焊接修复恢复结构强度与整体密封性。船舶焊接修复区别于普通钢结构焊接，具有工况复杂、拘束度大、防变形要求高、耐海水腐蚀严苛、部分区域需水下/狭小空间作业等特点，若工艺选型不当、质量管控缺失，极易出现二次裂纹、夹渣、未焊透、焊接变形及防腐失效等问题，直接威胁航行安全。本文系统梳理船舶常用焊接修复方法，分析不同部位、不同缺陷的工艺适配原则，围绕焊前准备、焊接过程、焊后处理全流程剖析关键技术要点，构建系统化质量控制体系，同时结合现场常见缺陷提出防控与返修措施，并融入智能化、绿色化焊接质控新思路。研究可为船舶修造企业优化焊接修复工艺、稳定焊接质量、降低返修率、延长修复结构使用寿命提供理论依据与工程实践参考。

关键词：船舶钢结构；焊接修复；焊接工艺；质量控制；缺陷防控；焊缝检测

0 引言

船舶船体、甲板、舱壁、龙骨、舷侧外板及管道支撑等核心结构，以低碳船板钢、高强船用钢、耐腐蚀合金钢为主要用材，焊接是建造与维修加固的核心工序。船舶在营运过程中，受波浪冲击、货物载荷、主机振动、海水电化学腐蚀、靠泊碰撞及搁浅摩擦等多重作用，原有焊缝易萌生疲劳裂纹，母材会出现腐蚀坑、板材减薄、局部撕裂等损伤。开展高质量焊接修复，是消除结构隐患、恢复力学性能、保障船舶适航、延长服役年限的关键手段^[1]。

国际海事组织（IMO）及船级社规范对船舶焊接修复的焊缝力学性能、耐腐蚀性能、外观成型及无损检测标准逐年提高。传统船舶焊接修复多依赖焊工经验，存在工艺随意性大、热输入管控不严、变形矫正困难、隐蔽焊缝质量难追溯、返修成本高等痛点。尤其压载水舱、双层底、机舱狭小舱室、水下结构等特殊区域，焊接作业空间受限、环境湿度大、预热保温难度高，更易引发焊接质量隐患。

在此背景下，开展船舶焊接修复工艺优化与全流程质量控制研究，明确不同缺陷对应的焊接方法、材料选型、工艺参数及检测标准，建立焊前、焊中、焊后一体化质控体系，对提升船舶维修可靠性、降低安全事故概率、减少停航维修损失、践行绿色修船理念具有重要工程价值。

1 船舶常见焊接修复缺陷类型及成因分析

1.1 常见需焊接修复的结构损伤

1.1.1 疲劳裂纹：集中在舱口围、角接焊缝、龙骨

过渡段、主机底座等应力集中区域，由长期交变载荷引发，裂纹细微隐蔽，扩展速度快。

1.1.2 腐蚀破损：船体外板、船底、压载水舱内壁钢板腐蚀减薄、穿孔，需补板焊接或堆焊补强。

1.1.3 碰撞变形撕裂：靠泊、浮物撞击导致外板凹陷、板材撕裂，整形后需焊接加固。

1.1.4 原有焊接原生缺陷扩展：建造阶段存在的气孔、夹渣、未熔合、余高超标，服役后逐步发展为结构性损伤。

1.2 焊接修复易产生的典型质量缺陷及成因

1.2.1 裂纹（热裂纹、冷裂纹）：冷裂纹多因钢材淬硬倾向大、焊前未预热、焊材含氢量高、焊后未及时保温消应力；热裂纹源于焊缝杂质偏析、焊接电流过大、焊缝成型差^[2]。

1.2.2 未焊透与未熔合：坡口设计不合理、焊接电流偏小、运条速度过快、层间清渣不彻底，多见于厚板对接与角接修复焊缝。

1.2.3 气孔与夹渣：坡口除锈除油不干净、环境潮湿有水汽、焊材受潮、保护气体纯度不足、层间熔渣残留。

1.2.4 焊接变形与残余应力：热输入过大、焊接顺序不合理、拘束应力集中，导致板材翘曲、局部凹陷，后期诱发二次开裂。

1.2.5 耐腐蚀性能下降：修复焊缝区域晶粒粗大、合金元素烧损，未做封焊与防腐配套处理，海水环境下优先腐蚀失效。

2 船舶主流焊接修复工艺及适配应用

2.1 手工电弧焊（SMAW）

该工艺设备简单、机动性强,适配野外、高空、狭小舱室及局部零散缺陷补焊,是船舶应急修复与现场小范围补板的常用工艺。适配碳钢、普通高强船钢裂纹堆焊、局部补强。缺点是焊接效率低、焊缝成型依赖焊工水平,热输入偏大,容易产生变形与气孔,大面积修复不推荐。

2.2 二氧化碳气体保护焊(CO₂/MAG)

焊接热输入可控、熔深稳定、成型美观、效率高,适合甲板、外板大面积补板、长焊缝修复。飞溅控制良好时,焊缝致密性强,抗疲劳性能优于手工焊。广泛应用于船体平直部位结构加固与腐蚀补板焊接;潮湿舱室需做好防风防潮,防止保护气失效产生气孔。

2.3 氩弧焊(TIG/GTAW)

焊缝纯净度高、无夹渣气孔、成型优异,适合薄壁板材、管道焊缝、精密构件及耐腐蚀要求高的关键部位修复;也可用于裂纹根部打底焊。缺点是焊接速度慢、成本高,厚板主体填充一般搭配其他工艺复合使用。

2.4 埋弧焊(SAW)

自动化程度高、焊缝质量稳定、熔深大,适用于船坞内大块补板、平直长焊缝机械化修复;现场零散缺陷及空间受限区域无法使用,多用于进厂大修规模化焊接修复。

2.5 水下湿式/干法焊接

针对船底、水下外板无法进坞的紧急修复,采用专用水下焊条与密封干法焊接舱,保障焊缝密封与强度;工艺难度大、合格率要求高,修复后必须严格开展无损检测复核。

2.6 不同缺陷工艺选型原则

细微裂纹打底优先氩弧焊;中厚板裂纹补强、补板优先气体保护焊;狭小隐蔽区域应急补焊选用手工电弧焊;大面积规整焊缝采用埋弧焊自动化修复;水下紧急缺陷采用专用水下焊接工艺。同时严格匹配母材强度等级选用配套焊材,杜绝低强焊材替代。

3 船舶焊接修复全流程工艺优化要点

3.1 焊前准备工艺优化

3.1.1 缺陷清理与坡口制备:采用碳弧气刨+砂轮打磨彻底清除裂纹,两端打止裂孔;腐蚀破损区域切除疏松锈蚀母材,保证露出完好金属基体;厚板对接开设标准V型、U型坡口,保证根部可焊透,杜绝窄坡口强行焊接。

3.1.2 表面预处理:严格清除坡口及两侧20mm范围内的油漆、铁锈、油污、水分;潮湿舱室提前除湿烘干,海水浸泡部位必须彻底干燥,防止氢致裂纹与气孔。

3.1.3 焊材管理:船用低氢焊材按规范烘干、保温、随用随取;受潮焊材严禁使用;高强钢修复匹配高韧性低氢焊材,保证焊缝抗裂与耐疲劳性能。

3.1.4 预热管控:高强钢、厚板、低温环境修复必须进行整体预热,降低淬硬倾向,减少残余应力;预热温度根据钢材等级、板厚严格标定,全域均匀加热,避免局部温差过大。

3.2 焊接过程工艺管控

3.2.1 合理控制热输入:严禁大电流、慢运条盲目堆焊,采用多层多道焊,薄层施焊,控制层间温度,防止晶粒粗大与变形;对称分段退焊、跳焊法,分散焊接应力,抑制板材翘曲变形。

3.2.2 严格执行打底—填充—盖面工序:根部打底保证熔透,中层逐层清渣防止夹渣,盖面控制余高均匀、成型平顺,避免应力集中凸起。

3.2.3 环境工况管控:露天焊接搭设防风防雨棚,CO₂焊严防气流扰动;密闭舱室加强通风换气,做好防火防爆;低温、高湿天气严禁无防护高强度焊接修复。

3.2.4 关键部位加固拘束:大面积补板焊接增设临时支撑、拉筋与定位板,减少自由变形量,焊后再有序拆除,保证结构尺寸精度。

3.3 焊后处理工艺强化

3.3.1 消应力处理:重要承重焊缝、高强钢修复焊缝,采用后热保温+局部退火消应力,释放残余焊接应力,防止后期裂纹扩展。

3.3.2 外观修整:打磨焊缝余高、圆弧过渡,消除尖角应力集中;清理飞溅、焊瘤,保证表面平顺。

3.3.3 防腐配套处理:修复焊缝区域优先做除锈钝化,配套船用专用防腐涂层、耐海水封孔涂料,补齐防腐体系,避免焊缝优先腐蚀失效。

4 船舶焊接修复质量控制体系构建

4.1 人员资质管控

所有参与船舶主结构焊接修复的焊工,必须持有对应船级社资质证书,匹配焊接材质、厚度、焊接位置实操合格;定期复训考核,严禁无证上岗、超资质施焊;关键焊缝安排资深焊工全程旁站作业。

4.2 工艺文件标准化管控

针对不同缺陷、不同钢级、不同作业区域,编制专项焊接修复工艺卡(WPS),明确坡口形式、预热温度、焊材型号、电流电压、层间温度、焊接顺序、后热参数;现场严格按工艺卡执行,严禁随意更改参数,变更需工艺评审确认。

4.3 全过程无损检测质控

4.3.1 外观检测 (VT): 焊后首先检查成型、气孔、裂纹、飞溅、咬边等表面缺陷。

4.3.2 渗透/磁粉检测 (PT/MT): 筛查焊缝表面及近表面细微裂纹, 重点核查裂纹修复打底区域。

4.3.3 超声波检测 (UT): 检测厚板焊缝内部未焊透、夹渣、埋藏裂纹, 是船体主结构核心检测手段。

4.3.4 射线检测 (RT): 对关键密闭焊缝、重要受力焊缝开展精准内部成像复检。

所有检测数据存档备案, 实现修复质量可追溯, 满足船级社报验要求^[3]。

4.4 常见缺陷返修质控措施

发现未焊透、夹渣缺陷, 必须彻底挖除缺陷区域, 重新坡口清理后分层补焊; 裂纹缺陷需扩大清除范围, 增设止裂结构, 优化预热与焊材; 变形超标部位采用火焰矫正+机械矫正复合方式, 严禁强行冷敲矫正; 返修焊缝二次复检, 合格后方可验收交付。

5 智能化与绿色化质控发展趋势

随着造船修造行业数字化升级, 船舶焊接修复逐步向自动化、智能化转型: 焊接机器人、磁吸式自动焊设备应用于外板、甲板规整焊缝修复, 实现参数恒定、质量稳定; 依托数字孪生模拟焊接应力与变形, 提前优化焊接顺序与热输入; AI视觉识别实时监测焊缝成型, 在线预警缺陷。同时推广低飞溅焊接、无粉尘打磨、环保焊材与水性配套防腐涂层, 减少有害气体与粉尘排放,

契合绿色修船与海洋环保要求。

6 结论

船舶焊接修复是保障船体结构完整性、提升航行安全性的核心维修技术, 其质量受母材材质、工艺选型、焊材匹配、环境工况、人员操作及全流程管控多重影响。本文梳理了船舶常用焊接修复工艺的适配场景, 剖析了裂纹、未焊透、气孔、变形等典型缺陷成因, 明确了焊前清理、坡口制备、预热保温、过程控热、焊后消应力及防腐配套的关键工艺要点, 建立了人员资质、工艺标准、无损检测、缺陷返修一体化质量控制体系。

严格落实全流程焊接工艺规范与质控标准, 可有效降低焊接返修率, 抑制二次裂纹与腐蚀失效, 保证修复焊缝力学性能、抗疲劳性能与耐海水腐蚀性能满足船级社适航要求。未来结合自动化焊接、智能检测与绿色工艺的深度应用, 将进一步提升船舶焊接修复的稳定性、高效性与环保性, 为船舶全生命周期安全运维提供坚实技术保障。

参考文献

- [1]毛雄飞. 船舶焊接与结构设计优化分析 [J]. 船舶物资与市场, 2022, 30 (8):14-16.
- [2]丁鹏龙, 成应晋, 何亮. 甲板分段焊接变形仿真与控制 [J]. 材料开发与应用, 2023, 38 (1):9-16.
- [3]张新宇, 罗银波, 唐首祺. 船舶焊接缺陷与检测方法综述 [J]. 中国水运 (下半月), 2023, 23 (7):63-65.