

高强度钢在大型船体结构中的焊接工艺优化

路 东

中国船级社实业有限公司深圳分公司 广东 深圳 518067

摘 要：现代大型船舶主船体、承重构件普遍采用高强度钢材，该类钢材的焊接施工质量，直接关系到船舶结构安全与使用年限。船体野外施工条件特殊，高强度钢焊接易产生焊接缺陷与结构应力问题，常规焊接工艺难以匹配船体建造的高精度施工要求。本文结合船体施工实际条件，总结高强度钢焊接的现存工艺问题，从焊材选用、工艺参数、施工流程、热处理及质量管控方面完善优化方案，统一现场焊接作业标准，减少焊接缺陷，稳定船体焊接结构性能，为大型船舶高强度钢焊接施工提供工艺依据。

关键词：高强度钢；大型；船体结构；焊接工艺

引言

现代船舶大型化、重载化发展趋势下，大型船体结构对钢材强度、结构稳定性的要求持续提升，高强度钢逐步替代普通钢材成为船体核心结构用材。高强度钢物理力学性能特殊，焊接过程易出现应力集中、焊缝成型不良、内部缺陷等问题，直接影响船体结构安全性与使用寿命。当前传统焊接工艺适配性不足，无法满足大型船体高精度、高可靠性焊接施工标准。基于船体施工实际工况，对高强度钢焊接工艺进行系统性优化，成为船舶建造领域的核心研究内容。

1 大型船体结构高强度钢焊接基础概述

大型船体核心结构多采用高强度低合金钢材，该类钢材碳含量控制在固定区间，同时添加锰、硅、镍等合金元素，实现钢材强度、韧性、硬度的综合提升，适配船体承受海水压力、交变载荷、温差变化的复杂工况。船体高强度钢主要应用于船体外板、甲板、舱壁、龙骨等关键承重结构，此类结构焊接接头数量多、焊缝长度大、施工空间受限，对焊接工艺稳定性要求较高。高强度钢与普通船用钢材焊接特性存在明显差异，钢材淬硬倾向相对较高，焊接热影响区范围易出现组织变化，焊接接头力学性能易产生波动^[1]。大型船体焊接施工为现场露天作业，环境温湿度、海风、水汽等外界条件会直接干预焊接过程，增加焊接缺陷产生概率。现阶段船舶建造行业针对高强度钢焊接多沿用传统工艺模式，工艺参数固化、工序流程粗放，未结合大型船体结构特点进行针对性调整。实际施工过程中，高强度钢焊接普遍存在焊缝气孔、夹渣、未焊透、焊接残余应力等问题，各类缺陷会降低焊接接头承载能力，长期服役状态下易出

现结构变形、焊缝开裂等故障，影响船舶航行安全性。船舶大型化发展使船体结构焊接体量持续增加，传统工艺施工效率、成型质量已无法匹配现代化船舶建造产能与质量标准。开展高强度钢焊接工艺优化，贴合大型船体施工工况，规范焊接全流程操作，是提升船舶建造质量、保障船体结构稳定性的关键途径。

2 大型船体高强度钢焊接现存问题分析

2.1 焊接材料选用不合理问题

大型船体高强度钢焊接施工中，焊接材料选用未形成精准匹配标准，是影响焊接质量的主要因素之一。部分施工环节沿用普通船用焊接耗材，未结合高强度钢合金成分、力学性能指标匹配对应的焊条、焊丝和焊剂，导致焊接熔敷金属与母材融合性不足。焊接材料合金配比与高强度钢母材不匹配，会造成焊缝区域强度、韧性与母材存在差值，焊接接头整体力学性能无法达到船体设计标准。焊接材料存储、管控流程不规范的问题普遍存在，焊材受潮、氧化、污染情况频发。受潮焊材焊接过程中会产生大量气体，留存于焊缝内部形成气孔缺陷，氧化焊材会降低焊缝熔合质量，产生夹渣、裂纹等问题。施工过程中存在焊材规格混用、批次混用的情况，不同材质、规格焊材的焊接熔池特性存在差异，导致同一段船体焊缝成型不均匀，焊接接头性能一致性无法保障，给大型船体整体结构稳定性带来隐患。

2.2 焊接施工工序不规范问题

大型船体现场焊接施工工序执行缺乏标准化管控，各操作环节随意性较强，直接影响高强度钢焊接成型效果。焊前预处理环节落实不到位，高强度钢母材焊缝区域的氧化层、铁锈、油污、水汽未彻底清理，残留杂质

会阻碍熔池融合,诱发各类焊接缺陷。部分施工人员简化焊前预热流程,预热温度不足、预热范围不达标,无法抵消高强度钢淬硬倾向带来的焊接负面影响^[2]。焊接过程工序衔接混乱,多层多道焊的层间清理、层间温度管控不到位,层间残留焊渣、氧化物未彻底清除,会造成层间未熔合、夹渣等缺陷。焊后冷却、整形、检测工序存在滞后问题,焊缝完成焊接后未按标准进行缓冷处理,快速冷却会加剧焊接残余应力集中。施工过程中焊接顺序规划不合理,船体大面积焊缝同步施工、无序施工,会造成整体结构应力叠加,引发船体局部变形,降低焊接施工整体质量。

3 大型船体结构高强度钢焊接工艺优化策略

3.1 焊接材料匹配与管控优化

针对大型船体高强度钢焊接材料选用与管控问题,建立母材与焊材精准匹配机制,依据高强度钢牌号、合金成分、力学性能参数,选定对应等级的焊接耗材。严格遵循等强匹配原则,保障熔敷金属的强度、韧性、耐腐蚀性与母材保持一致,规避因焊材性能不匹配导致的焊缝性能不达标问题。不同船体结构部位采用差异化焊材,核心承重结构选用高韧性、低氢型焊材,降低焊接冷裂纹产生概率,非核心结构选用适配经济型焊材,兼顾施工质量与施工成本。建立焊接材料全流程管控体系,规范焊材采购、存储、烘干、领用、回收全环节操作。焊材采购阶段核验产品参数、质量检测报告,杜绝不合格焊材投入施工。存储环节采用专用恒温恒湿仓库,分类存放不同规格、类型焊材,做好防潮、防氧化、防污染防护^[3]。焊材使用前严格执行烘干工艺,根据焊材类型设定固定烘干温度与烘干时长,烘干后恒温保温存放,随用随取。规范施工现场焊材领用与使用管理,实行批次领用制度,杜绝不同批次、不同规格焊材混用。施工过程中及时回收剩余焊材,避免焊材长期暴露在露天环境中受潮氧化。建立焊材使用台账,记录焊材型号、批次、使用部位、使用时间,实现焊材使用全程可追溯。通过标准化焊材管控,从源头消除因焊材问题引发的焊接缺陷,稳定高强度钢焊缝成型质量,保障大型船体焊接接头性能一致性。

3.2 焊接工艺参数精准优化

结合大型船体高强度钢材质特性与现场施工工况,对焊接核心工艺参数进行精准调整与标准化固化,解决参数不合理引发的焊接质量问题。焊接电流、焊接电压、焊接速度是影响熔池成型、焊缝性能的核心参数,需根据高强度钢板厚度、焊缝形式、焊接位置设定对应参数区间。薄板高强度钢焊接采用小电流、低电压、

快焊速参数,避免热输入量过大造成板材烧穿、变形;厚板焊接采用分层焊接模式,匹配适中电流电压,保障熔池充分熔合。严格管控焊接热输入量,将热输入量控制在高强度钢适配区间内,规避热输入过高导致的热影响区晶粒粗大、接头韧性下降问题,同时避免热输入过低引发的未焊透、未熔合缺陷。针对船体平焊、立焊、横焊、仰焊等不同焊接位置,差异化调整工艺参数,适配不同位置熔池流淌特性,保障各类位置焊缝成型均匀。优化焊前预热与层间温度参数,根据钢材厚度、环境温度确定预热温度与预热范围,低温环境下适当提升预热温度,抵消环境温度对焊接熔池的影响。多层多道焊施工中,实时监测层间温度,待温度降至标准区间后再开展下一层焊接,避免层间温度过高造成的焊接应力累积。固化所有焊接参数并形成施工标准,要求现场施工人员严格执行,杜绝随意调整参数的行为,通过参数标准化实现高强度钢焊接质量的稳定可控,适配大型船体规模化焊接施工需求。

3.3 焊接施工工序标准化优化

针对大型船体高强度钢焊接工序不规范问题,重构标准化施工流程,细化焊前、焊中、焊后全环节操作标准。焊前预处理阶段,对焊缝两侧固定范围的母材区域进行彻底清理,去除铁锈、氧化皮、油污、水汽等杂质,保持焊接区域母材表面洁净。清理完成后核验焊缝坡口尺寸、角度、间隙,修正坡口偏差、间隙超标等问题,保障焊接熔合条件达标。严格执行焊前预热操作,采用均匀预热方式,保障预热区域温度均匀分布。焊中施工阶段规范焊接顺序,根据大型船体结构受力特点与焊缝分布情况,制定对称焊接、分段退焊、分层焊接的施工顺序,规避无序焊接造成的应力集中与结构变形^[4]。多层多道焊施工时,每完成一层焊接后,及时清理层间焊渣与氧化物,检测层间焊缝成型情况,确认无缺陷后开展后续焊接。全程管控焊接施工节奏,保持焊接过程连续稳定,杜绝中途随意停焊、断焊,避免熔池冷却不均产生内部缺陷。焊后处理阶段优化操作流程,焊缝完成焊接后实施缓冷防护,采用保温棉覆盖焊缝区域,降低冷却速度,减少焊接残余应力。待焊缝温度降至室温后,开展外观清理,打磨焊缝余高、飞溅,保持焊缝成型平整。同步落实工序自检工作,排查表面气孔、裂纹、咬边等缺陷,及时处理施工问题。通过全工序标准化管控,规范施工人员操作行为,消除工序漏洞引发的焊接质量问题,提升大型船体高强度钢焊接施工规范性。

3.4 焊接热处理工艺优化

高强度钢焊接后易产生残余应力,热影响区组织性能易出现劣化,优化热处理工艺是改善焊接接头性能、消除结构应力的核心手段。结合大型船体结构体积大、焊缝分布广的特点,采用分段式焊后热处理模式,替代传统整体热处理方式,适配船体现场施工条件。根据高强度钢材质与焊缝厚度,设定精准的热处理升温速率、恒温温度、恒温时长、降温速率。严格管控升温过程,采用匀速升温模式,避免升温过快导致焊缝与母材温差过大,产生二次应力。恒温阶段保持温度稳定,保障热量均匀渗透至焊接接头整体结构,充分释放焊接残余应力,改善热影响区金相组织,恢复接头韧性与强度。降温过程采用缓慢降温方式,禁止快速降温、风冷等操作,防止温度骤变引发结构变形、裂纹等问题。针对大型船体不同结构部位差异化制定热处理方案,核心承重厚板焊缝延长恒温时长,保障应力释放彻底;薄壁结构焊缝降低恒温温度,避免高温影响母材基础性能。热处理施工过程中布设多点温度监测点,实时采集焊缝及周边母材温度数据,保障全域温度达标。热处理完成后对焊接接头性能进行核验,确认应力消除效果与组织性能达标。通过热处理工艺优化,有效解决高强度钢焊接应力集中、接头性能劣化问题,提升大型船体焊接结构的稳定性与服役耐久性。

3.5 焊接质量全过程管控优化

构建大型船体高强度钢焊接全过程质量管控体系,覆盖施工准备、焊接施工、焊后处理、成品检测全流程,实现焊接质量闭环管控。施工准备阶段开展技术交底与工艺核验,确认焊材、设备、参数、工序全部符合施工标准,排查施工环境隐患,规避环境因素对焊接质量的影响。对施工设备进行定期校验,保障焊接设备输出稳定,杜绝设备故障引发的焊接质量偏差。焊接施工阶段实施动态质量监管,安排专人全程监督施工操作,核查焊接参数执行、工序落实、操作规范度等情况,及时纠正违规操作行为。对重点焊缝、核心承重结构焊

缝实施全程旁站管控,记录施工过程数据,实现施工过程可追溯^[5]。针对露天施工环境,实时监测温湿度、风力等环境指标,环境条件不达标时暂停焊接施工,规避外界环境对焊接成型的干扰。焊后阶段完善质量检测机制,采用外观检测与无损检测相结合的方式,全面排查焊缝表面与内部缺陷。对检测发现的气孔、夹渣、裂纹、未焊透等缺陷,制定标准化返修方案,规范返修流程,返修完成后再次复检,直至质量达标。建立焊接质量台账,记录每一处焊缝的施工参数、施工人员、检测结果、返修情况,形成完整质量档案。

结语

结合大型船体高强度钢焊接施工存在的实际工艺问题,可从焊材管控、工艺参数调整、施工工序规范、热处理处理、全程质量管控五个方面落实工艺改进。适配船体野外施工的特殊工况与高强度钢的焊接特性,能够有效改善传统焊接工艺缺陷多、结构性能不稳定、施工流程杂乱的现状。标准化的焊接施工模式,能够切实提升船体焊接接头性能与整体结构稳定性,适配大型船舶工业化建造需求,可为船舶高强度钢焊接现场施工提供成熟的工艺参考。

参考文献

- [1] 刘菲. 高强度钢在大型船体结构中的焊接工艺优化与变形控制 [J]. 船舶物资与市场, 2026, 34(4): 33-35.
- [2] 赵鑫. 激光焊接技术在高强度钢材料中的应用与工艺优化研究 [J]. 中国金属通报, 2025(3): 127-129.
- [3] 吴海明. 高强度钢在船体焊接中的工艺性能与质量控制研究 [J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(11): 7-9.
- [4] 杜键. 高强度钢在桥梁爬模系统中的应用与结构性能优化 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(21): 138-140.
- [5] 陆静静. 钢结构在工业厂房中的应用及施工工艺优化 [J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2025(1): 097-100.