

高强钢在大型集装箱船船体结构中的应用与焊接性能评估

任精玲

福建华东船厂 福建 福州 350650

摘要: 大型集装箱船船体结构对钢材性能要求严苛, 高强钢凭借高强度、高韧性及耐蚀性成为关键选材。本文围绕高强钢在船体结构中的应用选型、焊接工艺要点、焊接性能评估指标体系展开研究, 分析材料特性、焊接工艺参数及环境对焊接性能的影响, 提出优化思路与方向, 为高强钢在大型集装箱船船体结构中的合理应用与焊接质量控制提供理论支撑与实践指导。

关键词: 高强钢; 大型集装箱船; 船体结构; 焊接工艺; 焊接性能评估

引言: 随着全球贸易发展, 大型集装箱船需求增加, 其船体结构需承受复杂海洋环境下的动态载荷, 对钢材性能要求极高。高强钢具有高强度、高韧性及耐蚀性等优势, 能满足船体结构减重、抗脆断及耐蚀需求, 成为大型集装箱船船体结构的关键选材。深入研究高强钢在船体结构中的应用与焊接性能, 对提升船舶安全性、可靠性及建造质量具有重要意义。

1 高强钢在大型集装箱船船体结构中的应用选型

1.1 大型集装箱船船体结构对钢材的核心性能要求

大型集装箱船的船体结构需承受复杂海洋环境下的动态载荷, 包括货物重量、波浪冲击、风载荷及船体运动产生的惯性力。这种工况要求钢材具备高强度以支撑结构减重需求, 同时需保持足够的韧性以避免脆性断裂风险^[1]。船体底部、舷侧及甲板等关键部位长期暴露于海水腐蚀环境, 耐蚀性成为影响服役寿命的核心指标。此外, 焊接接头作为结构薄弱环节, 其低温韧性、抗疲劳性能及热影响区组织稳定性直接影响船体整体安全性。在极端工况下, 钢材需满足动态载荷下的抗层状撕裂能力, 确保结构在循环应力作用下的可靠性。

1.2 适配大型集装箱船的高强钢类型及核心特性

针对船体结构需求, 低合金高强度钢(HSLA)与高强度调质钢成为主流选型。HSLA钢通过添加铌、钒、钛等微合金元素实现晶粒细化, 在保持较高强度的同时提升焊接性, 其屈服强度范围覆盖460~690MPa, 适用于非关键承载结构。高强度调质钢经淬火+回火处理后, 组织为回火马氏体或贝氏体, 屈服强度可达890MPa以上, 常用于龙骨、舱口围等高应力区域。两类钢材均需满足国际船级社协会(IACS)标准中关于碳当量(CEV)与焊接裂纹敏感指数(Pcm)的限值要求, 以确保焊接工艺可行性。

1.3 高强钢在船体关键结构部位的应用分配

船体底部纵桁与舷侧外板因长期承受波浪冲击与货物压力, 优先选用屈服强度690MPa级HSLA钢, 通过优化板厚与加筋布置实现结构轻量化。甲板纵骨与舱口围板作为高应力集中区域, 采用890MPa级调质钢以提升局部承载能力, 通过控制轧制工艺改善Z向性能, 防止层状撕裂。上层建筑与次要结构则使用460MPa级普通强度钢, 在满足强度需求的前提下降低制造成本。不同强度钢材的过渡区域需设置缓冲段, 通过坡口设计与焊接顺序优化减少残余应力集中。

1.4 高强钢应用过程中的核心适配要点

高强钢应用过程中的核心适配要点围绕选材、工艺与性能匹配展开。选材需结合船体不同结构部位的受力特点与服役需求, 参照船级社规范与相关技术标准, 确保钢材性能与结构要求精准匹配, 避免性能冗余或不足。工艺适配需关注钢材加工与焊接环节, 根据钢材类型调整轧制、弯曲等加工参数, 控制加工变形, 焊接过程中选用适配焊材与工艺参数, 控制热输入量, 减少焊接热影响区性能衰减, 抑制焊接缺陷产生。性能适配需兼顾钢材力学性能、耐蚀性能与工艺性能的协同, 确保应用过程中钢材性能稳定发挥, 关注钢材与船体其他结构材料的兼容性, 保障结构整体衔接的可靠性。

2 高强钢焊接工艺要点

2.1 高强钢焊接的核心工艺要求

高强钢焊接工艺需以保障接头性能与结构完整性为核心, 遵循船用钢材焊接相关技术规范与标准。焊接过程需严格控制热输入, 避免热影响区出现晶粒粗大、硬化脆化等现象, 维持焊接接头与母材力学性能的一致性^[2]。焊接接头需达到与母材相当的强度、韧性及耐蚀性能, 满足船体结构长期承受复合载荷与海洋环境侵蚀的需求。焊接操作需保证接头成型良好, 避免未焊透、未熔合、气孔、裂纹等缺陷, 确保接头连接的致密性与可

靠性。焊接过程需注重温度控制,合理设计预热、层间温度与后热工艺,缓解焊接应力,减少应力集中引发的接头损伤,为后续工艺实施奠定基础。

2.2 高强度焊接材料的选型要点

高强度焊接材料选型需基于钢材成分、力学性能及焊接工艺需求,结合船级社规范要求精准选用。焊材强度等级需与母材强度相匹配,避免强度不匹配导致接头受力不均,引发应力集中或接头失效。焊材需具备良好的焊接工艺性,易于引弧、稳弧,焊缝成型均匀,减少焊接缺陷产生。针对海洋服役环境,焊材需具备优异的耐蚀性能,抵御海水、盐雾等介质侵蚀,降低接头腐蚀失效风险。焊材成分需与母材成分协同匹配,控制硫、磷等有害元素含量,避免焊接过程中产生热裂纹、冷裂纹等缺陷,同时提升接头韧性与抗裂性能,适配高强度焊接的核心需求。

2.3 高强度焊接的关键工艺参数控制

高强度焊接关键工艺参数控制直接影响焊接接头质量与性能,需结合钢材类型、板厚及焊接方法精准调控。热输入量需根据高强度等级与板厚合理设定,过高热输入会导致热影响区晶粒粗大,降低接头韧性;过低热输入则易产生未焊透、未熔合等缺陷。焊接电流与电压需协同调整,确保电弧稳定,焊缝成型均匀,同时控制焊接速度,避免速度过快导致焊缝未填满,速度过慢增加热输入量。层间温度需严格控制在规范范围内,避免层间温度过高引发晶粒长大,或温度过低导致焊接应力累积。预热温度需根据钢材碳当量与板厚确定,有效缓解焊接应力,抑制冷裂纹产生。

2.4 高强度焊接过程中的工艺难点及应对思路

高强度焊接过程中核心工艺难点集中在冷裂纹产生、热影响区性能衰减及焊缝成型不均等方面。冷裂纹多由焊接应力、氢含量过高及母材淬硬倾向导致,应对思路为严格控制焊材氢含量,选用低氢型焊材,焊接前对焊材进行烘干处理,同时优化预热与后热工艺,缓解焊接应力,降低淬硬倾向。热影响区性能衰减源于热输入控制不当,可通过精准调控热输入参数、优化焊接层道设计,减少热影响区范围,同时选用适配焊材,弥补热影响区性能损失。焊缝成型不均可通过调整焊接电流、电压与速度的匹配关系,规范焊接操作手法,确保焊缝宽度、余高符合标准,避免出现咬边、未填满等缺陷,保障焊接接头质量。

3 高强度焊接性能评估指标体系

3.1 高强度焊接接头力学性能评估指标

高强度焊接接头力学性能评估是保障焊接质量的核

心环节,评估指标需贴合船体结构服役受力需求,参照船用高强度焊接性能评估相关标准设定^[3]。屈服强度与抗拉强度是基础评估指标,需通过拉伸试验测定,确保接头强度不低于母材标准值的一定比例,满足船体结构承载要求。冲击韧性通过低温冲击试验评定,重点考核接头在海洋低温环境下的抗冲击能力,避免低温条件下发生脆性断裂。硬度指标需通过维氏硬度试验检测,控制焊接接头及热影响区硬度分布均匀性,防止硬度过高导致接头脆化,同时避免硬度过低影响接头承载能力。接头塑性通过伸长率与断面收缩率评定,保障接头具备足够的变形能力,应对航行过程中的交变载荷作用。

3.2 高强度焊接接头金相组织评估指标

高强度焊接接头金相组织评估聚焦组织形态、晶粒尺寸及相组成,依据金属材料金相检验规范开展,直接关联接头力学性能与服役可靠性。晶粒尺寸是核心评估指标,需控制热影响区晶粒大小,避免晶粒粗大导致接头韧性下降,通过金相显微镜观察并结合晶粒评级标准判定。相组成评估重点关注有害相的产生,禁止出现网状渗碳体、魏氏组织等脆性相,优先保障接头组织以细小铁素体、珠光体或贝氏体为主,确保组织稳定性。组织均匀性评估需检查接头各区域组织差异,避免出现组织偏析,减少性能波动,同时关注焊缝与母材过渡区的组织连续性,保障接头整体性能协同。

3.3 高强度焊接的抗裂性评估指标

高强度焊接抗裂性评估针对焊接过程中易产生的冷裂纹、热裂纹及再热裂纹,结合船用高强度抗裂性试验标准设定评估指标。冷裂纹评估通过斜Y形坡口焊接裂纹试验、插销试验等方法,重点考核接头在焊接应力与氢作用下的抗裂能力,评估指标包括裂纹率、裂纹扩展长度,确保裂纹数量与扩展范围控制在规范允许范围内。热裂纹评估聚焦焊缝及热影响区,通过刚性固定对接裂纹试验评定,控制裂纹产生的概率与尺寸,核心评估指标为热裂纹敏感性系数。再热裂纹评估针对调质型高强度钢,通过再热裂纹试验测定,评估接头在焊后热处理或服役过程中再次加热时的抗裂性能,保障接头长期服役稳定性。

3.4 高强度焊接性能的综合评估标准

高强度焊接性能综合评估需整合力学性能、金相组织、抗裂性等单项指标,遵循船级社相关规范与船舶行业标准,形成系统完善的评估体系。综合评估需明确各单项指标的合格阈值,确保各项指标均满足规范要求,同时考虑各指标间的协同关系,避免单项指标合格但整体性能不达标。评估过程需结合焊接工艺参数与服役环

境需求,对焊接接头质量进行全面判定,明确评估等级划分标准,区分合格、待改进及不合格接头。综合评估需兼顾科学性与实用性,既符合学术评估规范,又能指导实际焊接生产,保障高强度焊接接头满足大型集装箱船船体结构的长期服役需求,为焊接质量控制提供可靠依据。

4 高强度焊接性能影响因素及优化方向

4.1 材料特性对高强度焊接性能的影响

材料特性是决定高强度焊接性能的基础,影响规律遵循金属焊接冶金原理与船用高强度材料标准。钢材成分直接主导焊接过程中的冶金反应,碳含量过高会增加母材淬硬倾向,加剧焊接裂纹产生风险;合金元素配比不合理会破坏焊缝与热影响区组织稳定性,导致接头力学性能下降。钢材纯净度对焊接性能影响显著,硫、磷等有害杂质会降低焊缝韧性,诱发热裂纹,而钛、铌等细化晶粒元素可改善焊接组织,提升接头抗裂能力^[4]。钢材交货状态也会影响焊接性能,不同热处理状态下的钢材组织存在差异,进而导致焊接过程中热影响区性能变化不同,需结合交货状态调整焊接工艺。

4.2 焊接工艺参数对焊接性能的影响

焊接工艺参数是调控高强度焊接性能的关键,参数设置合理性直接关联接头质量,符合船用高强度焊接工艺规范要求。热输入量不合理会引发接头性能劣化,过高热输入导致热影响区晶粒粗大、韧性下降,过低热输入则易产生未焊透等缺陷。焊接电流与电压的匹配度影响电弧稳定性与焊缝成型,进而改变接头组织致密性,不当匹配会增加气孔、咬边等缺陷概率。层间温度与预热温度控制不当会导致焊接应力累积,加剧裂纹产生风险,而焊接速度波动会造成焊缝成形不均,影响接头受力均匀性,需精准调控各项工艺参数协同适配。

4.3 焊接环境对高强度焊接性能的影响

焊接环境需符合船用焊接环境控制标准,其温湿度、洁净度等因素直接影响高强度焊接性能。环境温度过低会降低焊接接头冷却速度,增加淬硬倾向,易产生冷裂纹,同时影响焊材熔化与焊缝成型。环境湿度较高时,空气中水分易进入焊接熔池,增加焊缝氢含量,诱发氢致裂纹,降低接头韧性。焊接区域洁净度不足,表面铁锈、油

污等杂质会影响焊缝熔合质量,产生未熔合、气孔等缺陷,同时降低接头耐蚀性能,海洋环境中的盐雾还会加剧焊接过程中的腐蚀,进一步劣化接头性能。

4.4 高强度焊接性能的优化思路与方向

高强度焊接性能优化需基于影响因素针对性开展,遵循“源头控制、过程调控、性能提升”的思路,贴合船用高强度焊接生产实际需求。材料层面,优化钢材成分设计,严格控制有害元素含量,添加晶粒细化元素,提升钢材纯净度与焊接适配性;焊材选用需与母材精准匹配,优先选用低氢型焊材,降低氢致裂纹风险^[5]。工艺层面,优化焊接参数组合,精准控制热输入、层间温度等关键参数,采用多道焊、窄间隙焊等先进工艺,减少热影响区范围,缓解焊接应力。环境层面,搭建可控焊接环境,控制温湿度与区域洁净度,针对海洋环境采取防护措施,避免环境因素劣化焊接性能,实现焊接性能与船体结构服役需求的精准匹配。

结束语

高强度在大型集装箱船船体结构中的应用,有效提升了船舶的承载能力与安全性,推动了船舶建造技术发展。通过合理选材、优化焊接工艺参数、严格评估焊接性能,可有效控制焊接质量,保障船体结构长期服役稳定性。针对材料特性、工艺参数及环境等因素对焊接性能的影响,采取针对性优化措施,能进一步提升高强度焊接质量,为大型集装箱船的高质量建造提供坚实保障。

参考文献

- [1]肖声浩,张会霞,赵照.超大型集装箱船体结构极限强度研究方法[J].船舶标准化工程师,2024,57(1):65-67.
- [2]丁仕风,周利,周亚军.大型集装箱船在斜浪工况下的扭矩特征研究及结构强度分析[J].船舶力学,2021,25(6):798-807.
- [3]李海洲,刘平,李小灵,等.超大型集装箱船中横隔板拓扑优化方法研究[J].舰船科学技术,2023,45(16):27-31.
- [4]贺鑫,周学谦.结构安全监测系统在超大型集装箱船上的应用[J].上海船舶运输科学研究所学报,2023,46(1):19-23.
- [5]李毅,陈继康.大型箱船正胎状态双面安装导轨架的方法[J].江苏船舶,2023(5):58-60.