

# 高强度钢舱口盖焊接裂纹返修工艺研究

王俊杰

江苏韩通赢吉重工有限公司 江苏 南通 226000

**摘要:** 本文聚焦高强度钢舱口盖焊接裂纹返修工艺。分析裂纹常见部位与形态,指出其产生是冶金、工艺等多因素共同作用的结果。介绍常用无损检测方法针对舱口盖的检测方法选择。阐述返修材料要求、常用材料及性能测试。制定并优化返修工艺流程与参数,开展模拟验证。明确返修质量检测方法与评估指标,为提升高强度钢舱口盖返修质量、保障结构安全提供理论与技术支持。

**关键词:** 高强度钢; 舱口盖; 焊接裂纹; 返修工艺

引言: 高强度钢因具备高强度、良好韧性等特性,广泛应用于船舶舱口盖制造。然而,在焊接过程中,舱口盖易出现焊接裂纹,这不仅影响结构强度与密封性,还威胁船舶航行安全。焊接裂纹的产生受多种因素影响,返修难度大,若处理不当,裂纹可能再次扩展,导致更严重后果。因此,深入研究高强度钢舱口盖焊接裂纹返修工艺,对提高船舶制造质量、保障航行安全具有重要意义。

## 1 高强度钢舱口盖焊接裂纹分析

### 1.1 舱口盖焊接裂纹的常见部位与形态

高强度钢舱口盖焊接裂纹的产生具有明显的部位集中性和形态差异性,主要集中在三大核心区域。一是舱口盖面板与加强筋的T型接头处,该部位为应力集中区,焊接时拘束度大,易产生横向或纵向裂纹;二是舱口盖边缘折角焊接处和焊缝交叉部位,此处焊接变形受阻,残余应力叠加,裂纹多沿熔合线扩展;三是焊缝根部和焊趾处,根部易因未焊透、夹渣形成裂纹源头,焊趾处则因应力集中易产生微裂纹<sup>[1]</sup>。从形态来看,热裂纹多呈现为沿晶分布的纵向裂纹,多发生在焊缝中心,宽度较大且延伸较短,多由硫磷等杂质引发;冷裂纹多为穿晶或沿晶的横向裂纹,多出现于热影响区和熔合线,裂纹细小、延伸较长,具有延迟性;氢致裂纹多为细微的网状或线性裂纹,主要分布在热影响区,需通过专业检测手段才能发现,若不及时处理易快速扩展。

### 1.2 裂纹产生的原因分析

高强度钢舱口盖焊接裂纹的产生是冶金、工艺、结构和环境多因素共同作用的结果,核心是焊接内应力超过材料自身承载强度。冶金方面,母材或焊材中碳、硫、磷含量过高,会增加焊缝淬硬性和热裂纹敏感性,焊后组织脆化进一步降低接头抗裂能力,同时焊接过程中产生的氢原子聚集的应力集中区,易形成氢致裂纹。

工艺方面,预热温度不足、焊后未及时消氢处理,会加速马氏体形成和氢残留;焊接参数不合理,如热输入过大或过小、焊接速度过快,会导致焊缝成形不良、熔合不足,形成裂纹源头;层间清理不彻底、焊接顺序错误,会加剧应力集中和缺陷积累。结构方面,舱口盖设计存在尖锐拐角、厚度突变等问题,焊接时拘束度大,残余应力无法释放。环境方面,高湿、低温环境会增加氢来源和冷却速度,进一步提升裂纹产生风险。

## 2 焊接裂纹检测方法

### 2.1 无损检测方法概述

无损检测是高强度钢舱口盖焊接裂纹检测的核心手段,其核心优势是在不破坏构件结构完整性的前提下,精准识别裂纹的位置、尺寸和形态,为后续返修提供可靠依据,广泛应用于焊接质量控制的全过程。目前常用的无损检测方法主要分为五大类,各有其适用范围和技术特点。超声检测(UT)利用超声波在异质界面的反射特性,检测速度快、成本低,适用于内部裂纹检测;射线检测(RT)通过X射线或 $\gamma$ 射线穿透焊缝形成缺陷影像,检测结果直观且可永久保存,适用于高精度定量检测;磁粉检测(MT)和渗透检测(PT)主要针对表面和近表面裂纹,操作简便、成本低廉,适用于现场快速检测;涡流检测(ET)适用于导电材料表面及近表面裂纹检测,检测效率高,可实现自动化扫查。另外,相控阵超声检测(PAUT)等先进方法,可实现多角度扫查和三维成像,进一步提升复杂部位裂纹的检测精度。

### 2.2 适用于高强度钢舱口盖裂纹检测的方法选择

针对高强度钢舱口盖的结构特点、服役环境及裂纹类型,需结合各类无损检测方法的优点,进行针对性选择和组合应用,确保裂纹检出率 $\geq 98\%$ 。对于舱口盖面板与加强筋接头、焊缝根部等内部裂纹,优先选用超声检测(UT),其对平面裂纹检出率高,可适配8mm以上

厚度焊缝,且检测成本较低,适合批量检测;关键部位可采用相控阵超声检测(PAUT),减少检测盲区,提升复杂节点裂纹的检测精度<sup>[2]</sup>。对于焊缝表面及近表面的微裂纹,选用磁粉检测(MT)或渗透检测(PT),操作简便且能快速定位表面缺陷,其中高湿环境下需先对构件表面进行干燥处理,确保检测准确性。对于重要承重部位的焊缝,采用“超声初检+射线复验”的组合方案,既保证检测效率,又确保检测精度,可永久保存检测记录。同时,结合自动化扫查装置和AI缺陷识别算法,可区分气孔与裂纹,缩短检测报告生成时间,提升检测效率。

### 3 返修材料选择与性能分析

#### 3.1 返修材料的要求

高强度钢舱口盖焊接裂纹返修材料的选择,直接决定返修质量和结构服役寿命,需严格遵循“匹配性、低氢性、高韧性”三大核心要求。首先,返修材料的力学性能需与母材匹配,屈服强度、抗拉强度、冲击韧性等指标需不低于母材标准,确保返修接头与母材形成整体受力,避免因性能差异导致二次裂纹。其次,必须选用低氢型返修材料,严格控制氢含量,减少氢致裂纹隐患,焊材需经过严格烘干处理,去除水分和杂质。再次,返修材料需具备良好的焊接工艺性,易引弧、电弧稳定,焊缝成形良好,不易产生气孔、夹渣等缺陷,且焊接时淬硬性适中,可减少热影响区脆化。考虑到舱口盖可能面临的海洋腐蚀环境,返修材料还需具备良好的抗腐蚀性能,与母材的热膨胀系数匹配,避免焊接和服役过程中因热应力产生裂纹,同时需符合相关行业标准 and 工程规范。

#### 3.2 常用返修材料的介绍

结合高强度钢舱口盖的返修需求,目前常用的返修材料主要为低氢型焊条和实心焊丝,根据母材材质和服役要求合理选用。低氢型焊条中,E11018-G焊条应用广泛,适用于S690QL1等调质高强钢返修,属于低氢铁粉焊条,氢含量 $\leq 8\text{mL}/100\text{g}$ ,抗拉强度 $\geq 1100\text{MPa}$ ,冲击韧性良好,焊接工艺性优异,可有效抑制氢致裂纹,适合手工电弧焊返修。实心焊丝方面,ER110S-G焊丝应用较多,属于低合金高强焊丝,氢含量低、杂质少,焊接时电弧稳定,焊缝成形美观,力学性能与母材匹配度高,适合气体保护焊返修,可用于中厚板舱口盖的返修作业。此外,针对海洋环境服役的舱口盖,可选用含Cr、Ni等合金元素的耐蚀返修材料,提升接头抗腐蚀性能。同时返修材料需按规范存储,焊条需在 $350^\circ\text{C}\times 2\text{h}$ 条件下烘干,焊丝需做好防潮处理,避免因材料变质影响返修质量。

#### 3.3 返修材料的性能测试与分析

为确保返修材料符合使用要求,需对其进行系统的性能测试与分析,核心测试项目涵盖力学性能、焊接工艺性和抗腐蚀性能,严格遵循相关国家标准和行业规范。力学性能测试包括拉伸试验、冲击试验和硬度测试,拉伸试验需确保返修材料的屈服强度、抗拉强度不低于母材,断后伸长率满足设计要求;夏比V型缺口冲击试验需在常温及低温环境下进行,确保冲击功达标,避免低温脆断;硬度测试需控制热影响区硬度 $\text{HV}\leq 400$ ,与母材差值 $< 25\text{HV}$ ,防止组织脆化<sup>[3]</sup>。焊接工艺性测试通过试焊评估引弧性能、电弧稳定性、焊缝成形及缺陷敏感性,确保无气孔、夹渣等缺陷。抗腐蚀性能测试采用盐雾试验,确保材料在海洋环境中耐蚀时间 $\geq 500\text{h}$ ,均匀腐蚀率 $\leq 0.1\text{mm}/\text{year}$ 。通过性能测试可筛选出最优返修材料,同时分析材料性能与焊接工艺的匹配性,为后续返修工艺制定提供依据。

### 4 返修工艺制定与优化

#### 4.1 返修工艺流程设计

高强度钢舱口盖焊接裂纹返修需遵循“检测定位—缺陷清除—焊前准备—焊接返修—焊后处理—质量复检”的闭环工艺流程,每一步骤严格控制,避免二次缺陷产生。首先,通过无损检测精准定位裂纹的位置、长度和深度,做好标记,确保缺陷清除彻底。其次,采用碳弧气刨或砂轮打磨清除缺陷,裂纹类缺陷需从两端各延长50mm清除,并钻止裂孔( $\phi 10\text{mm}$ ),清除后修整为V形 $60^\circ\pm 5^\circ$ 坡口,钝边 $1.5\pm 0.3\text{mm}$ ,再通过PT或MT检测确认无残留缺陷。然后进行焊前准备,包括焊材烘干、坡口清理、工件预热,预热温度 $\geq 180^\circ\text{C}$ ,高湿环境提升至 $200^\circ\text{C}$ ,保温时间 $\geq 30$ 分钟。随后进行焊接返修,采用多层多道焊,控制层间温度和热输入。焊后立即进行 $200^\circ\text{C}\times 2\text{h}$ 恒温消氢处理,缓冷至 $100^\circ\text{C}$ 以下。最后通过无损检测进行质量复检,不合格则重新返修,同一部位返修不得超过两次。

#### 4.2 返修工艺参数优化

返修工艺参数的优化是提升高强度钢舱口盖返修质量、抑制二次裂纹的关键,核心围绕热输入、预热温度、层间温度和焊接速度四大参数进行调控。热输入需控制在 $1.2\text{--}1.5\text{kJ}/\text{mm}$ ,不得高于原始焊接值,避免热输入过大导致晶粒粗化、热影响区扩大,或热输入过小导致熔合不良。预热温度需根据母材厚度和环境湿度调整,常规情况下 $\geq 180^\circ\text{C}$ ,高湿环境提升至 $200^\circ\text{C}$ ,测温范围为焊缝两侧各75mm,采用红外测温仪实时监控,防止局部降温。层间温度需控制在合理范围,避免过高导致组

织过热, 过低导致冷却过快产生脆硬组织, 通常控制在180–250℃。焊接速度需均匀, 避免过快导致焊缝成形不良、未焊透, 过慢导致热输入过大, 手工电弧焊速度控制在8–12cm/min, 气体保护焊速度控制在10–15cm/min, 同时优化焊接电流和电压, 确保电弧稳定, 提升焊缝成形质量。

#### 4.3 返修工艺的模拟与验证

为确保返修工艺的可行性和可靠性, 需在实际返修前进行工艺模拟与验证, 避免因工艺不合理导致返修失败。采用ABAQUS等有限元分析软件, 建立三维热-力耦合模型, 模拟返修焊接过程中的温度场和应力场分布, 揭示熔池演化规律和热循环特性, 预测裂纹产生风险, 优化工艺参数。模拟过程中重点分析预热温度、热输入、冷却速度对焊接接头组织和应力的影响, 调整参数以降低残余应力, 减少脆硬组织生成。模拟完成后, 选取与舱口盖母材相同的试板, 按照优化后的工艺参数进行试焊, 试焊完成后对试板进行无损检测和力学性能测试, 检查焊缝无裂纹、气孔等缺陷, 力学性能达到设计要求。同时, 结合工程实践案例, 验证工艺参数的合理性, 针对试焊中出现的问题进一步调整优化, 确保返修工艺能够满足实际生产需求, 实现裂纹的有效修复。

### 5 返修质量检测与评估

#### 5.1 返修质量检测方法

高强度钢舱口盖返修质量检测需贯穿返修全过程, 分为焊前检测、焊中检测和焊后检测, 确保每一步骤符合质量要求。焊前检测主要针对缺陷清除情况和焊前准备, 通过PT或MT检测确认缺陷已彻底清除, 无残留裂纹和杂质; 检查坡口尺寸、钝边符合设计要求, 焊材烘干到位, 预热温度达到规定标准。焊中检测重点监控焊接参数, 包括焊接电流、电压、速度、层间温度, 采用红外测温仪实时监测温度变化, 确保参数符合优化要求; 同时观察焊缝成形, 及时清理焊渣, 避免夹渣、未熔合等缺陷产生<sup>[4]</sup>。焊后检测分为无损检测和理化检测, 无损检测采用UT、MT/PT组合方式, UT检测内部缺陷, MT/PT检测表面及近表面缺陷, 关键部位可采用RT复验; 理化

检测包括硬度测试、金相分析, 检查接头组织均匀性, 避免晶粒粗化和脆硬组织, 确保返修接头性能达标。

#### 5.2 返修质量评估指标

高强度钢舱口盖返修质量评估需建立科学完善的指标体系, 围绕缺陷控制、力学性能、组织性能和外观质量四大核心维度展开, 确保返修后构件满足服役要求。缺陷控制指标: 返修区域无裂纹、气孔、夹渣、未熔合等缺陷, 内部缺陷需符合GB/T 11345-2023标准, 表面缺陷需符合相关行业规范, 缺陷检出率100%, 返修合格率100%。力学性能指标: 返修接头的屈服强度、抗拉强度不低于母材标准, 断后伸长率  $\geq 20\%$ , 夏比V型缺口冲击功  $\geq 27\text{J}$ , 硬度梯度HV0.1变化率  $\leq 10\%$ , 热影响区硬度不超过母材硬度的120%。组织性能指标: 返修接头组织均匀, 无明显晶粒粗化、马氏体脆化等现象, 铁素体含量  $\geq 70\%$ , 夹杂物A类  $\leq 1.5$ 级, 孔隙率  $\leq 0.5\%$ 。外观质量指标: 焊缝成形均匀、光滑, 无咬边、未焊满、飞溅等缺陷, 焊缝尺寸符合设计要求, 返修区域与母材过渡平滑, 无明显凸起或凹陷。

#### 结束语

高强度钢舱口盖焊接裂纹返修工艺研究意义重大。通过对裂纹的全面分析、精准检测, 合理选择返修材料, 科学制定并优化返修工艺, 严格把控返修质量检测与评估, 有效解决了焊接裂纹问题, 提升了舱口盖的制造质量与可靠性。未来, 随着船舶行业不断发展, 需持续优化返修工艺, 以适应更高性能材料和更复杂结构的需求, 为船舶安全航行提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1]陆炜,周清华,王冰.VLECSNi钢液货舱表面的电弧螺柱焊接头性能分析[J].造船技术,2025,53(2):73-77.
- [2]戚建伟,姜昊,张连超.舰船舱壁钢结构关键节点焊接变形控制研究[J].舰船科学技术,2023,45(11):186-189.
- [3]杨国威,田俊,姚佳人.奥氏体钢舱段焊接残余应力测试及分析[J].计量与测试技术,2022,49(7):31-34.
- [4]钮东辉.散货船舱口盖舾装工事焊接工艺改进方法[J].船舶标准化工程师,2022,55(4):65-68.