



深水铺管船主吊机扒杆变幅滑轮支撑板焊接修复方案研究

栾陈杰 吴红霞 许可望 任胜汉

【摘要】介绍了一种位置独特、焊接难度非常大的深水铺管船的主吊机扒杆变幅滑轮支撑板焊脚裂纹的修复方案，经实践证明该方法适用可行。

关键词：S690；焊接裂纹；修复

1. 概述

S690MPa高强度钢是低碳调质钢的一种，这类钢一般是在调质状态下直接焊接，焊后不再作调质处理。尽管S690MPa高强度钢的综合力学性能比较优越，但其焊接性却比碳钢差的多。对于S690MPa高强度钢的焊接，主要存在焊接裂纹、热影响区脆化、焊接接头软化等问题。

S690MPa高强度钢在国外的应用已经比较成熟，但在国内还处于起步阶段。目前这种强度等级的钢材在我公司首条深水铺管船的扒杆中首次应用。船舶在服役后由于疲劳载荷和设计相对不合理，造成主吊机扒杆变幅滑轮支撑板焊脚裂纹，服役期间的S690高强度钢修复位置独特，焊接难度非常大，因此开发此类钢材的焊接工艺具有重要的工程价值，有助于我公司承揽相关的工程项目，拓展业务范围，为海油总公司今后成功进军深水领域奠定了坚实的基础。

2. S690高强度钢焊接性分析

(1) 焊接裂纹敏感性 热裂纹：由于低碳和严格控制S、P等杂质含量，所以低碳调质钢产生焊接热裂纹和近缝液化裂纹的几率很小。

冷裂纹：低碳调质钢的碳含量一般控制在0.20%以下，为了确保钢的强度和韧性，通过添加适量的Mn、Mo等合金元素以及V、Nb、Ti、Al等微合金化元素，配合适当的热处理工艺来保证钢材具有优良的综合力学性能。由于焊接热循环不稳定的原因，在钢淬透性提高的同时也加大了脆硬组织出现的几率，并且冷却速度过快又会较多地出现晶格缺陷，这都为冷裂纹的出现埋下了隐患。

由于结构的角度、焊缝的位置、焊接顺序、构件的自重等因素使焊接接头承受了不同的内应力，从而降低了构件的承载力，使构件在未达到使用期限或使用能力时就产生了冷裂纹或疲劳裂

纹而发生损坏。

(2) 冷裂纹的控制 冷裂纹一般在氢、拉伸应力和脆硬结构三者同时存在时形成，补救措施就是消除其中的一个或几个因素。

避免氢的存在可采取以下措施：①充分预热，使氢的逸出速度大大提高（如温度由20℃升高到120℃，氢的逸出速度可提高100倍）。②选用低氢焊材。③焊接坡口准备时不准有水分、铁锈或油污。④保护气体中不能有水蒸汽。⑤使用推荐的热输入。⑥焊后进行消氢处理。

焊件中的应力是因冷却过程中的收缩而引起的，避免高的拉伸应力主要通过以下几个途径：

①尽可能让焊缝自由收缩。②选择正确的焊接顺序。③选用合适的焊材。对于脆硬结构，可以通过控制较低碳当量和冷却速度来避免其出现。

(3) 热影响区的性能变化 低碳调质钢中加入的提高淬透性

元素，同时也是碳化物和氮化物形成元素，它们的固氮作用避免了热应变脆化的发生。但过热区脆化和热影响区的软化问题，应引起足够的重视。

低碳调质钢热影响区的理想组织为质量参数90%~70%的低碳马氏体加质量参数10%~30%的下贝氏体，控制 $t_{8/5}$ 是取得上述组织的关键，而 $t_{8/5}$ 表征的是冷却速度。一般情况下，冷却速度过快会引起脆化；过慢则强度和韧性不能保证。这些特性，在制定焊接工艺时必须引起足够重视。

热影响区的软化是低碳调质钢焊接的一个普遍问题，强度越高，问题越突出。软化发生区域为热影响区内加热温度高于母材回火温度至 A_{c1} 的范围，越是靠近 A_{c1} 的区域，软化越严重。软化是因碳化物的积聚长大而引起的。

3. 焊接修复

(1) 裂纹概况 支撑板厚度为30mm，箱体盖板厚度为20mm，材质均为S690高强钢。产生焊缝裂纹位置如图1所示。

有6处焊缝产生裂纹，右舷侧3处，左舷侧3处，具体位置如图2所示。现场裂纹如图3所示。

(2) 修复依据 ①裂纹检测相关报告。②201船现场调研报告。③本修复方案公司级专家审查会专家意见。④吊机建造图样



图1 裂纹产生的部位

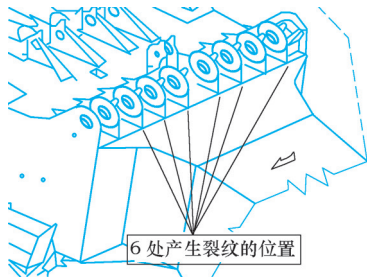
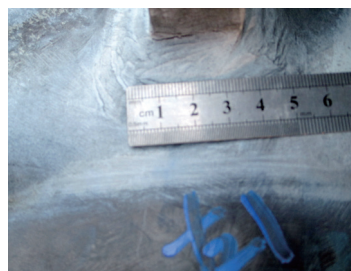


图2 裂纹产生部位示意

和技术要求。⑤吊机建造过程中的业主批准的技术文件。⑥焊工技能及资质：返修焊接的施工，选用具有合格资质、经验丰富并且工作责任心强的焊接技师和高级技师负责现场操作，以保证该焊缝的焊接质量。⑦焊接过程监控：返修全过程需有质控人员现场监控记录和焊接工程师技术指导。

(3) 焊接修复的实施 第一，修复作业环境。①焊接修复区域周围采取防风、防雨措施，使用帆布搭设防护棚，棚内要有足够的照明设施，脚手架安装禁止与吊机S690钢发生焊接连接，并选择天气状况良好的时间进行修复作业。②清理现场影响修复作业的非重要结构及附件。③对吊机缆绳等重要设备设施进行防火隔热等有效防护，保证焊接作业对吊机其他部件无影响。④焊接作业地线连接位置尽量靠近焊接作业点，连接点需打磨至光泽金属，尽量使用铜质地线连接夹具，保证焊接作业时其他结构不产生打火现象。

第二，焊接设备及焊接材料准备。①焊接设备及辅助设备需提前进行调试，并做有效防护，保证修复过程连续，不会因设备问题而产生中断。②返修焊接



(a) 左1 (裂纹长度24 mm)



(b) 左2 (裂纹长度9 mm)



(c) 左4 (裂纹长度3 mm)



(d) 右3 (裂纹长度19 mm)



(e) 右4 (裂纹长度30 mm)



(f) 右5 (裂纹长度22 mm)

图3 现场裂纹

选用Ph.SHNi2K100、 $\phi 3.2\text{mm}$ 焊条，焊条的真空包装必须检查完好无损，从包装袋中拿出后，在 $300\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干2h，烘干后存放时应在 $120\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的保温箱内存放，焊条在从烘干箱或保温箱内取出后4h内使用，超过4h未使用的焊条直接丢弃。

第三，缺陷的清除。按照检测标识的缺陷部位进行缺陷清除工作，首选砂轮机打磨的方式，使返修部位在长度、深度、角度上去掉足够的焊缝金属，以保证缺陷被完全清除。

裂纹的清除应由距裂纹末端最少 50 mm 处开始，向内清除到裂纹中心，然后同样的过程从裂纹另一端开始直至裂纹完全被清除，打磨深度为检测的缺陷深度加上 3mm 余量。裂纹清除后末端应为锥形，最小锥度为 $3:1$ 。打磨区域应有 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的坡口角度，打磨形成的坡口底部圆弧最小半径为 5mm ，深度/宽度应 <1 。

第四，磁粉检测。清除缺陷后，应采用磁粉检测，以保证缺陷完全去除。磁粉检测合格后，应使用砂轮打磨坡口直至呈现金属光泽。

第五，焊前预热。为了使焊缝返修区域均匀升温受热达到要求预热温度，采用电加热片和火焰加热相结合的方式，预热温度最低 150°C ，在整个焊接过程层间温度不得低于预热温度，以保

证焊接时扩散氢充分逸出，以降低产生裂纹的倾向。

第六，焊接修复。①每处返修焊接必须连续一次性焊完，不得中断。如因特殊情况中断焊接，焊道及周围母材必须用保温棉保温，重新焊接前必须重新预热，并经现场质控人员和焊接工程师测温到达预热温度时才能继续焊接。②返修焊接选用正确的WPS进行焊缝处的焊接修复；对于表面裂纹，清除裂纹并制作好坡口后使用相应WPS进行焊接修复。③严格按照焊接参数要求执行，焊条选用Ph.SHNi2K100， $\phi 3.2\text{mm}$ ，焊接电源为林肯DC—400，焊接参数如附表所示。④引弧必须在坡口内进行，不得在坡口外引弧。⑤焊接时，每层焊道药皮和焊渣要清理干净，以免产生夹渣、未熔合等焊接缺陷。⑥层间温度要求严格控制在 200°C 内，一旦层间温度超过 200°C 需暂停焊接，待温度降到层间温度要求以内后再继续焊接。⑦焊接时采用多层多道焊，短弧摆动，窄焊道操作，最大摆动幅度为焊芯直径的2.5倍($\phi 3.2\text{mm}\times 2.5=8\text{ mm}$)。

第七，焊后消氢处理。返修焊接完毕后，对整道焊缝进行焊后消氢处理。立即使用电加热器对返修焊缝及两端原焊缝各 200 mm 的区域加热至 $225\sim 250^{\circ}\text{C}$ ，并在此温度保温2h，随后采用石棉布或保温岩棉

包裹受热焊缝区域，确保焊缝缓慢冷却。

第八，焊缝外观控制。焊缝盖面成形后表面应打磨光滑，尤其要对焊缝焊脚处及表面两焊道间进行打磨，使其圆滑过渡。打磨时选用蘑菇头砂轮机，打磨纹路应垂直于返修焊缝长度方向（即砂轮旋转面所在平面应垂直于焊缝长度方向）。

第九，焊缝检测。返修区域应采用和原始焊缝相同的无损检测方法（VT、MT、UT）进行检测，应包括全部返修焊缝及其两侧各 50mm 的范围。无损检测应在返修完成冷却到室温后进行第一次，过72h后进行第二次，过一周后进行第三次。质控、质检人员和焊接工程师按照质量管理体系中焊接记录表对所有的返修操作做明确记录。

4. 结语

船舶主吊机扒杆变幅滑轮支撑板S690高强钢焊接修复的难度极大，但是在掌握S690高强钢的特性后，并运用高超的操作手法，使得主吊机扒杆变幅滑轮支撑板的裂纹修复工作一次成功。这种高强钢结构在国内运用很少，文中所述修复方法可为类似工程提供借鉴。

作者简介：栾陈杰等，海洋石油工程股份有限公司；吴红霞，中石化第四建设有限公司。

MW 20160822

焊接参数

焊接方法	焊接电流		电弧电压/V	焊接速度/ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	热输入/ $\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$	层间温度/ $^{\circ}\text{C}$
	极性	电流/A				
SMAW	DC(+)	105~115	21~23	105~130	1.0~1.5	150~200