

海洋钢结构低合金钢焊接接头横向裂纹返修工艺和措施

徐光耀 陈海涛 袁建松 李海良 李兆杰

海洋石油工程(青岛)有限公司 青岛 266500

摘要: 某一带一路大型 FPSO 项目, 在冬季施工过程中, 上部模块立管平台结构存在数量较多的长直焊缝焊接接头横向裂纹, 本文对项目中焊接裂纹发生原因进行排查, 并制定针对性的返修焊接工艺和过程控制措施; 返修焊接工艺控制合理的焊接参数和焊接热输入, 焊接过程中做好层间温度控制并进行必要的焊缝清理; 返修施工中规划合理的缺陷清除顺序和焊接顺序, 控制变形和二次焊接的应力水平, 焊后经过无损检验, 满足项目质量合格标准。

关键词: 横向裂纹; 返修; 焊接工艺

Repair technology and measure of transverse crack in welded joint of low alloy steel in ocean steel structure

Guangyao Xu, Haitao Chen, Jiansong Yuan, Hailiang Li, Zhaojie Li
Offshore Petroleum Engineering (Qingdao) Co., LTD., Qingdao 266500

Abstract: During the winter construction of a large-scale FPSO project in one Belt and One Road, there were a large number of transverse cracks of long straight weld welded joints in the upper module riser platform structure. This paper investigated the causes of welding cracks in the project, and developed targeted repair welding technology and process control measures. Repair welding process control reasonable welding parameters and welding heat input, do a good job in the welding process of interlayer temperature control and necessary weld cleaning; Plan reasonable defect removal sequence and welding sequence in the repair construction, control the stress level of deformation and secondary welding, and meet the quality standards of the project after nondestructive inspection.

Keywords: Transverse crack; Repair; Welding process

一、前言

某大型 FPSO 项目, 其立管平台结构设计上大量采用厚度 30-50mm, 屈服强度为 355MPa 级中厚板低合金结构钢, 其形式尺寸庞大且较为复杂, 单道焊缝长度可达 8 米以上。由于焊接作业面较大, 恰逢冬季焊接施工环境温度较低, 降温速度较快, 加之前期焊接施工过程中的焊接区域温度控制措施欠佳, 导致焊接应力和拘束度水平较高。在焊接完成后的超声波检验中, 发现焊接接头中存在较大量横向裂纹缺陷, 横向裂纹基本都分布在焊缝和熔合线位置, 且经过反复超声波检验发现该横向裂纹有延迟发生的现象。

经过裂纹形貌和位置的观察, 判定所发现的裂纹为冷裂纹。结合冷裂纹的形成因素, 制定有针对性的焊接返修工艺和过程控制措施, 并且合理规划返修施工顺序, 尽量控制焊接返修造成的变形。返修方案经过实施, 在后续的无损检验中取得了良好的效果, 满足项目质量合格标准, 圆满完成了棘手的焊接返修工作。

二、原因排查和分析

1. 现场调查研究

缺陷产生于中厚板焊接接头的焊缝和熔合线位置, 通过对裂纹形貌和位置观察, 裂纹的方向垂直于焊道的轴向, 宽度大约 1mm 以内, 长度 8-30mm, 结合超声波检验发现该横向裂纹有延迟发生的现象, 综合判定该项目横向裂纹缺陷属于冷裂纹缺陷, 或者称延迟裂纹^[1]。

结合现场施工焊接情况, 确定从母材性能、焊材性能及保管、焊接工艺、焊接过程控制等多方面进行分析和排查。

2. 母材分析和检测

为确保返修工艺制定的针对性和合理性, 对项目使用的钢板进行抽样分析和检测, 检测项目和验收标准依据母材标准要求, 并进一步分析材料的可焊性。立管平台结构钢板性能测试结果见表 1, 化学成分测试结果见表 2, 金相组织测试结果见图 1。具体结果如下所示:

表 1 立管平台结构钢板性能测试结果

试验项目	试验标准	验收标准	试验结果	接受值	结果
------	------	------	------	-----	----

拉伸试验	ASTMA370	ASTMA131	Re _H 387/398MPa Re _H 421/424MPa Rm525/525MPa Rm544/542MPa	Re _H ≥ 355MPa Rm490- 620MPa	合格
冲击试验	ASTMA370	ASTMA131	(- 40℃) >100J	(- 20℃) >300J	合格
金相试验	ASTME 112	ASTMA131	9 级	≥ 5 级 (晶粒度)	合格

表 2 立管平台结构钢板化学成分测试结果 (质量分数 %)

化学成分	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	V	Nb	Al	Ceq
标准值	≤ 0.18	0.9-1.6	≤ 0.035	≤ 0.035	0.1-0.5	≤ 0.2	≤ 0.4	0.08	≤ 0.35	≤ 0.02	0.05-0.1	0.02-0.05	0.015	≤ 0.38
测试值	0.086	1.487	0.011	0.005	0.207	0.021	0.00	0.00	0.009	0.013	0.00	0.014	0.027	0.339

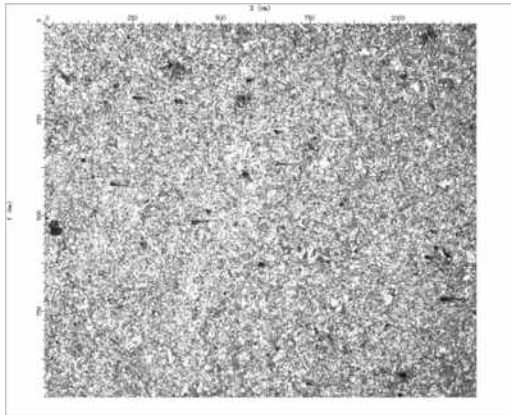


图 1 立管平台结构钢板金相组织照片 (100 倍)
钢板测试结果表明:

立管平台结构钢板试验结果符合母材标准要求。

立管平台结构钢板碳当量较低, 焊接性较好。各类有益合金元素成分含量较低 (Ni、Ti、Nb、V 等)。

母材晶粒度较细, 金相组织中有少量杂质出现。

3. 其他因素排查分析

通常情况下, 导致产生焊接冷裂纹主要是由于三方面的因素: 扩散氢、淬硬组织和拘束应力^[2]。

扩散氢, 主要来自于环境和材料中的水分: FPSO 船停靠在码头进行焊接施工作业, 空气中的湿度较大, 这在一定程度上增加可能导致裂纹的氢的来源; 焊接材料受潮, 是一项潜在的影响因素; 钢板表面吸附的水分和潮气也有可能增加焊接接头的扩散氢。

淬硬组织, 理论上讲, 在屈服强度为 355MPa 等级钢材的焊接接头中出现的概率不高。因为, 钢材和焊材中的碳和其他合金元素的含量不高, 由于钢材化学成分导致出现较多淬硬组织的倾向性不高。但是, 由于出现冷裂纹期间恰逢冬季, 环境温度较低, 并且码头区域风力较大, 风向多变。焊接接头可能在焊接过程中以及焊接完成后温度较高的阶段, 冷却速度过快, 加剧了出现淬硬组织的倾向。

拘束应力, 在本次焊接冷裂纹问题中处于较低的水平。因为出现裂纹的立管平台焊缝大多处于半自由的状态, 只是在长直焊缝的局部区域附加了临时定位工装来

保证坡口装配尺寸, 并做了少许焊接加强来防止出现过量的焊接变形。并且, 临时工装在一定程度上缓解了由于钢板自身重量导致的拘束应力。尽管立管平台的整体结构型式比较复杂, 但出绝大多数现焊接裂纹的焊道所在的结构相对简单, 不存在过高的拘束应力。

三、制定和实施焊接返修措施

由于延迟裂纹暴露出来的时间比较集中, 考虑到施工周期的限制, 需要制定切实可行的返修措施确保一次返修成功。

1. 缺陷定位

由于焊接冷裂纹有一定的延迟性, 因此裂纹定位和扩展尺寸预判的准确性十分关键。在本次返修工作中, 采用 X 射线检验和超声波检验并用的方式进行缺陷定位, 首先采用 X 射线检验, 这样能够准确地判定焊接裂纹在平面方向上的位置, 可以用 1: 1 的比例结合 X 射线胶片来进行缺陷定位。

然后, 通过超声波检验来确定裂纹的深度, 并适当做出裂纹扩展尺寸的预判, 保证后续清楚缺陷时能够完全清除, 没有残留。在钢板表面用白色油漆笔做裂纹尺寸和位置的标记。

2. 缺陷清除

考虑到本次裂纹返修是在冬季施工状态下实施, 环境温度为 -10℃ 左右。缺陷清除之前要进行预热, 并在焊道反面以及焊道周围区域采用保温棉隔离冷空气, 防止因为清除局部缺陷造成过度的残余应力。

采用碳弧气刨清除焊接裂纹缺陷, 根据先前缺陷定位时标记的裂纹位置以及深度进行刨削。为了避免对返修区域造成“渗碳”作用, 引弧之前, 先向返修区域吹入压缩空气, 一段气刨结束时先断开电弧, 保持压缩空气几秒钟再关气。气刨区域要控制合理的深宽比, 避免出现很尖锐的缺口, 深度 / 宽度应小于 1。裂纹清除后, 末端应为锥形, 最小锥度为 3:1。

在碳弧气刨发现裂纹时, 要暂停气刨, 通过砂轮机打磨观察裂纹, 测量并拍摄裂纹的外观形貌, 并通过磁粉检验来确定裂纹完全清除。

碳弧气刨完成之后, 要对缺陷清除区域进行打磨,

把气创造成的氧化区域打磨至光亮的金属钢材。

3. 返修焊接前的预热及层间温度控制

考虑到立管平台处于 FPSO 船的相对独立区域, 码头周围冷空气对其影响较大。因此, 返修之前, 采用脚手架和帆布将返修区域封闭起来, 避免不定风向的冷风侵袭。

焊前预热采用电加热和火焰加热并用的方式进行, 电加热片放置在返修焊道的反面; 在返修焊道的正面采用火焰进行预热, 预热温度为 80℃ -100℃。

层间温度的保持和控制同样十分重要, 主要的措施是通过电加热进行伴热焊接, 确保层间温度不低于预热温度, 也不超过 250℃。

4. 焊材保管和使用

本次返修焊接选择的焊接材料是 ASTM A5.29 E81T1-Ni1M, 焊接材料的强度略高于钢板的强度。由于药芯焊丝容易受潮, 返修焊接的焊材是真空包装的焊材, 并保证在拆开包装内的 8 小时内用完, 使用过程中在焊机转轴上使用原始包装进行包裹, 最大程度地防止焊丝受潮。如果出现了上一个班次未使用的情况, 要保证不让焊丝在现场过夜, 如果需要放置几个小时而不使用, 则将焊丝拆下存放到有温度和湿度控制的焊材库房中, 避免焊丝受潮。

5. 返修顺序和刚性固定

由于出现裂纹的区域属于整条焊缝的局部区域, 因此我们在焊接返修之前要对可能出现的潜在变形做出预判。制定合理的气刨顺序和焊接顺序才能更有效的预防焊接变形, 同时, 对可能超出尺寸公差局部区域, 施加适当的刚性固定筋板来防止出现过量的变形。

6. 严格执行焊接参数和热输入控制

返修焊接过程中, 严格执行焊接工程师制定的焊接参数, 并做好过程监控和记录, 焊接电流、电压、焊接速度, 并要求所有参与返修工作的人员能够独立计算焊接热输入。严格控制热输入在一个相对适中的水平。

7. 焊后保温缓冷

焊接完成之后, 对焊接接头进行缓冷保温, 采用电加热片保温 1 小时, 保温温度为 250℃。加热片布置在返修焊道的反面, 焊道的正面和反面用保温棉进行覆盖, 并在保温 1 小时完成后持续覆盖, 直至焊道完全冷却。

8. 尺寸测量

在返修焊接过程中, 动态测量返修构件的尺寸和变形情况。适时调整焊接的顺序来调整变形, 保证最终获得的返修构件尺寸公差在可接受的范围。

9. 焊后无损检验

返修焊接完成后, 需要间隔 48 小时进行无损检验。无损检验的内容包括外观检验、磁粉检验和超声波检验。其中, 超声波检验需要在完成后 48 小时进行, 并且在间隔一周和两周后分别再次检验, 以确保焊接返修彻底, 获得的最终焊道没有缺陷。

四、其他必要的管理措施

1. 返修焊接施工安排

返修焊接施工, 要尽量保证连续作业, 不要出现焊接中断。因此, 返修焊接工作组织三个焊接班组人员倒班作业, 需要返修的焊道一次完成, 避免出现焊接施工不连续的情况。

在这种安排下, 能有效防止焊道层间温度降低过快, 避免出现焊接中断; 同时能够尽量使焊材连续使用, 免于受潮。上一个班次未使用完的焊材要仔细检查, 没有问题的情况下可以继续使用。

2. 组织班前会, 宣讲焊接裂纹返修的注意事项和控制要点

组织焊接返修施工之前的班前会, 至少要求焊接班组、质量控制人员、安全人员、电加热人员和尺寸测量人员一同参与。将每项工作中的注意事项和控制要点宣讲清楚, 确保整个返修团队明确自己的职责, 并能做到有效的团队协作。

3. 焊接工艺参数随身携带

焊接程序文件中的焊接参数是焊接返修的关键, 因此, 我们将焊接参数表制成了手掌大小的卡片, 分发给每名焊工, 要求其随身携带, 并且在焊接返修施工之前仔细核实所选取的焊接参数符合焊接参数卡上的内容。

4. 首先试点返修, 然后推广

由于本次焊接返修工作比较严肃, 必须保证一次性焊接返修合格, 如果出现第二次返修是项目的成本和工期等方面所不能承受的。

所以, 我们首先选取了两处典型的返修焊缝作为试点, 通过严格执行返修方案中的每项技术措施, 焊接返修一次性合格, 然后再推广至其他待返修区域, 取得了良好的效果。

在返修焊接完成后间隔半个月和两个月, 分别再次进行超声波检验焊道仍旧没有缺陷, 彻底消除了大家对延迟裂纹的疑虑。

五、总结

1) 导致产生焊接冷裂纹主要是由于三方面的因素: 扩散氢、淬硬组织和拘束应力。然而, 在本次返修当中, 制定焊接冷裂纹返修方案需要综合考虑可能导致这三方面因素的多种条件, 多措并举, 消除缺陷。

2) 严格落实和执行焊接返修方案, 需要全体参与人员对返修方案有切实的理解, 对返修方案的宣讲并实施过程控制是保证工作效果的关键。

参考文献:

- [1] 陈祝年. 焊接工程师手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 张连生. 金属材料焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.