

Analysis on quality control of welding of inner tank wall plate in LNG cryogenic storage tank

Ge Bai Baoxu Chen Zhaxidawa Laxiangduojie

Offshore Petroleum Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300450, China

Abstract

This paper systematically explores the quality control of inner wall plate welding in LNG cryogenic storage tanks, addressing the technical challenges of welding under extreme conditions at -168°C . A comprehensive quality management system is established, encompassing precise pre-welding control, dynamic in-situ adjustment, and rigorous post-welding inspection. Before welding, the foundation of quality is strengthened through measures such as verifying the low-temperature performance of materials (nickel content $\pm 0.5\%$ at -168°C , impact energy $\geq 70\text{J}$) and controlling the bevel accuracy (angle $\pm 5^{\circ}$, undercut 1.5-2mm). During welding, dynamic optimization of process parameters (such as GMAW flat welding current 180-220A) and real-time defect monitoring are implemented. Post-welding, multiple non-destructive testing techniques (radiographic testing with a sensitivity of $\geq 2.0\%$, ultrasonic testing with a sensitivity 6dB higher than the benchmark) and strict acceptance standards (tensile strength of mechanical properties $\geq 530\text{MPa}$) are used. The research findings provide quantifiable technical standards and practical approaches for improving the welding quality of LNG storage tanks, effectively reducing welding risks in low-temperature environments and ensuring the safe operation of the storage tanks.

Keywords

LNG cryogenic storage tank; inner tank wall plate; welding quality control

LNG 低温储罐内罐壁板焊接质量控制分析

白舸 陈宝旭 扎西达娃 拉巷多杰

海洋石油工程股份有限公司, 中国·天津 300450

摘要

本文围绕LNG低温储罐内罐壁板焊接质量控制展开系统性研究, 针对 -168°C 极端工况下的焊接技术难题, 构建“焊接前精准预控-焊接中动态调控-焊接后严格验收”的全流程质量管控体系。在焊接前, 通过材料低温性能验证(镍含量 $9\% \pm 0.5\%$, -168°C 冲击功 $\geq 70\text{J}$)、坡口精度控制(角度 $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$, 钝边1.5-2mm)等措施筑牢质量基础; 焊接过程中, 实现工艺参数动态优化(如GMAW平焊电流180-220A)与实时缺陷监测; 焊接后采用多元无损检测技术(射线检测像质计灵敏度 $\geq 2.0\%$, 超声波检测灵敏度比基准高6dB)和严格验收标准(力学性能抗拉强度 $\geq 530\text{MPa}$)。研究成果为LNG储罐焊接质量提升提供了量化技术标准与实践路径, 有效降低低温环境下的焊接风险, 保障储罐安全运行。

关键词

LNG低温储罐; 内罐壁板; 焊接质量控制

1 引言

我国能源结构优化过程中, 液化天然气作为清洁能源, 其使用愈加普遍, 接收站与运输设施中的LNG储罐处于核心设备, 内罐长期在 -162°C 极端低温环境, 对结构安全性以及密封、耐低温等提出极高要求。内罐壁板是承压主体, 焊接质量直接影响储罐运行安全, 施工过程中必须对全过程质量进行控制, 确保焊缝低温韧性、抗裂性与致密性达到要求, 系统梳理焊接前中后各阶段质量控制要点, 提出可行的技术路径与管理方法, 为同类工程提供参考。

【作者简介】白舸, 男, 中国黑龙江大庆人, 本科, 工程师, 从事项目管理研究。

2 焊接前的质量控制

2.1 焊接材料低温性能验证

LNG低温储罐内罐壁板常用9%镍钢, 其工作温度低至 -168°C , 对焊接材料低温性能要求极高。焊接材料的化学成分需与母材高度匹配, 镍含量应控制在 $9\% \pm 0.5\%$, 且焊缝金属在 -168°C 时的冲击吸收功不得低于70J。每批次焊接材料进场后, 按GB/T2650-2020标准进行低温冲击试验, 随机抽取5%样品制作夏比V型缺口试样, 试验温度偏差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。同时, 严格核查质量证明文件, 对焊条药皮脱落、焊丝表面锈蚀等问题材料直接退货。建立专用焊材库, 温度维持在 $15-20^{\circ}\text{C}$, 湿度 $\leq 50\%$, 焊条使用前需在 $350-400^{\circ}\text{C}$ 烘干2小时, 随取随用, 避免二次受潮影响焊接质量。

2.2 坡口加工精度控制

内罐壁板焊接坡口精度对焊缝成形和熔合质量有直接影响, 8-12mm 厚壁板一般使用 V 型或 X 型坡口, 坡口角度为 $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$, 钝边在 1.5-2mm 范围内, 根部间隙控制在 3-4mm。坡口加工采用数控火焰切割机或等离子切割机完成, 表面粗糙度需达到 $Ra \leq 25 \mu m$, 且不得存在裂纹、夹层等缺陷, 坡口加工后, 需使用坡口角度尺和游标卡尺进行 100% 检测, 角度误差超过 $\pm 2^{\circ}$ 或钝边偏差大于 $\pm 0.5mm$ 时, 要求返修处理, 砂轮机打磨坡口两侧 20mm 区域, 去除氧化皮与油污, 露出金属光泽, 避免焊接时产生气孔和夹渣等缺陷。

2.3 焊接工艺评定与参数优化

焊接工艺评定在确定焊接参数中是相当关键的环节, NB/T47014-2011 标准下, 不同板厚、焊接位置(平、立、横、仰焊)及方法(手工电弧、熔化极气体保护焊)都要求开展评定试验。以 9% 镍钢板且厚度为 8mm 手工电弧焊为例, 焊接电流调整为 120-140A, 电弧电压为 22-24V, 速度在 18-22cm/min 间, 采用多层多道施焊, 每层厚度控制 3-4mm, 层间温度保持在 100-150 $^{\circ}C$, 完成焊接后, 外观检查焊缝, 同时 100% 进行射线检测(RT)与超声波检测(UT), 并取样做拉伸、弯曲和冲击试验, 试验结果可优化相关参数, 生成指导书, 使实际焊接质量达到稳定可靠。

2.4 焊工技能认证与实操考核

从事 LNG 低温储罐焊接的焊工必须持有特种设备焊接资格证, 且具备 3 年以上低温容器焊接经验。施工单位需组织专项培训, 针对低温焊接热输入控制、窄间隙焊接、多层多道焊等技术进行实操教学。培训后开展模拟考核, 要求焊工在规定时间内完成不同位置(平、立、横、仰)、不同板厚(8-12mm)的焊接任务。焊缝外观需满足余高 0-3mm、宽度误差 $\pm 2mm$ 、咬边深度 $\leq 0.5mm$ 且长度不超过焊缝全长 10% 的标准, 经 100% 射线检测和超声波检测合格后, 方可上岗作业。同时建立焊工档案, 定期进行技能复评, 确保操作水平持续达标^[1]。

3 焊接过程中的质量控制

3.1 工艺参数精准调控

LNG 低温储罐内罐壁板焊接时, 工艺参数的精准控制对焊接质量影响重, 以 9% 镍钢板熔化极气体保护焊(GMAW)为例, 8-12mm 厚钢板焊接电流需精细调整, 平焊位置要求为 180-220A, 立焊和横焊 160-180A, 仰焊位置降至 140-160A 以降低熔池下坠风险。电压与电流匹配保持在 26-30V, 过低使焊缝成形不良, 过高则增加金属飞溅、导致焊缝熔宽过大, 焊接速度则控制在 25-35cm/min, 过快易导致焊缝熔深不足并产生气孔, 过慢则热影响区过大、焊缝余高过高, 这些参数偏移影响焊缝质量, 且需在焊接中依据具体工况调控, 控制不精准易对焊接安全和结构质量产生影响^[2]。

选用 80%Ar+20%CO₂ 的混合气体为保护气体, 流量范围稳定在 18-22L/min, 确保熔池保护有效, 避免空气侵入后气孔生成, 多层多道焊工艺中, 每层焊缝厚度保持在 3-4mm, 红外测温仪实时监测层间温度, 控制在 100-150 $^{\circ}C$ 。层间温度低于 100 $^{\circ}C$ 时, 使用电加热片进行预热; 高于 150 $^{\circ}C$ 时, 暂停施焊, 等温度降至合适范围, 防止温度过高对焊缝金属低温韧性产生不良, 精准控制这些参数, 焊缝熔深与熔宽达到设计要求, 未焊透、烧穿等缺陷概率降低。

3.2 规范操作保障质量

实现高质量焊缝离不开规范的焊接操作, 焊接前检查焊枪, 喷嘴孔径需与焊丝直径匹配, 使用 1.2mm 焊丝时, 喷嘴孔径以 18-20mm 为宜, 导电嘴内径比焊丝直径大 0.1-0.2mm, 送丝顺畅和气体保护效果与这些相关, 焊接过程中, 焊枪与焊缝夹角在 75-85 $^{\circ}$, 直线往复运条法或小幅度锯齿形运条法是可采用的运条法, 焊缝熔合良好且成形均匀与运条法存在相关性。

每道焊缝焊接后, 钢丝刷需立即清理焊渣与飞溅物, 并用焊缝检验尺对焊缝外观进行检查, 焊缝宽度的误差要求在 $\pm 2mm$ 以内, 余高 0-3mm, 咬边深度需 $\leq 0.5mm$ 且长度不超过焊缝总长度的 10%。相邻焊道搭接的宽度不小于 5mm 以确保焊缝平滑过渡, 焊接顺序为先纵缝后环缝、分段退焊, 环缝焊接, 将焊缝均分 4-6 段, 每段长度约 500-800mm, 多名焊工对称施焊减少焊接变形和残余应力。立焊与仰焊位置采用小电流、短弧操作, 熔池体积和温度需控制, 防止熔池流淌使焊缝成形不良, 焊工焊接节奏与操作手法需保持稳定的, 避免操作波动影响焊缝质量^[3]。

3.3 实时检验及时纠偏

焊接实时检验对确保质量相当重要, 焊工需目视每道焊道, 重点检查焊缝表面气孔、裂纹、咬边、未熔合等缺陷是否存在。焊缝尺寸测量使用焊缝检验尺, 每 100mm 长度内至少 3 个点, 记录宽度与余高数据, 超差时及时调整焊接参数。

每焊接 3-5 层焊道, 就使用超声波探伤仪(UT)检测内部质量, 以 8mm 厚壁板为实例, 检测灵敏度设定为 $\Phi 2-12dB$, 探头频率选择 2.5MHz, 使用横波斜探头检测, 依据焊缝结构选择 45 $^{\circ}$ 或 60 $^{\circ}$ 的探头角度, 以确保探到未焊透、夹渣等内部缺陷, 检测到超标缺陷时, 焊接立即中止, 焊接工程师与无损检测人员组织分析原因。未焊透缺陷的成因为焊接电流偏小或焊接速度过快, 需增大电流 10-20A 或降低焊接速度 5-10cm/min 后返修, 气孔缺陷的生成与保护气体流量不足或焊枪角度不当相关, 调整气体流量至标准范围并修正焊枪角度可处理, 返修后的焊缝重新进行无损检测直至合格, 焊接质量需保持处于可控状态。

3.4 层间处理强化性能

多层焊接过程中, 焊缝综合性能的提升在相当程度决定着层间处理的完成质量, 每层焊接一完成, 就使用角磨机

对焊缝表面打磨,打磨深度需达到0.5-1mm,焊缝表面的氧化物、熔渣和飞溅物清除后,露出金属光泽,潜在微小缺陷可消除,后续焊层与本层熔合面积也增加,完成打磨后,采用丙酮或无水乙醇把焊缝及两侧20mm区域擦拭,油污杂质彻底去除,防止后续焊接时污染物形成气孔、夹渣等缺陷。

层间温度的控制也相当关键,需维持在100-150℃,焊缝金属冷却速度过快,易产生淬硬组织,这与温度过低相关,冷裂纹倾向也因冷却速度过快增加;晶粒粗大则与温度过高相关,焊缝强度和韧性在晶粒粗大下降低。层间间隔时间需控制在1-2分钟,避免因间隔过长使层间温度过低,各焊层之间充分熔合、晶粒组织细化通过严格规范的层间处理保证,焊缝强度、韧性、抗低温性能显著提升,焊缝在-168℃极端工况下服役可靠性增强^[4]。

4 焊接后的质量控制

4.1 无损检测技术多元应用

焊接完成后需采用多技术联合检测手段,全面评估焊缝质量,确保无缺陷残留。射线探伤(RT)需采用AB级检测技术,像质计灵敏度 $\geq 2.0\%$ (线径 $\leq 0.125\text{mm}$),底片黑度2.0-2.8,焦距 $\geq 600\text{mm}$,确保焊缝根部未熔合、裂纹等缺陷清晰可见。超声波探伤(UT)采用K2斜探头(频率2.5MHz),扫描灵敏度比基准灵敏度高6dB,缺陷波高 \geq 基准波高55%时判定为不合格,重点检测层间未熔合与夹渣。磁粉探伤(MT)选用湿法连续法,灵敏度试片A1-30/100,磁悬液浓度10-20g/L,缺陷显示长度 $\geq 0.8\text{mm}$ 时需记录位置。渗透检测(PT)采用溶剂去除型着色法,显像时间 ≥ 10 分钟,缺陷显示长度 $\geq 1\text{mm}$ 时需标记。对厚度 $\geq 30\text{mm}$ 的焊缝,需增加相控阵超声检测(PAUT),角度覆盖范围 $45^\circ - 70^\circ$,聚焦深度误差 $\leq \pm 1\text{mm}$,提高缺陷定位精度。检测数据需通过三维成像系统生成缺陷分布图,误差 $\leq \pm 1.5\text{mm}$,并标注缺陷类型、尺寸及位置。对关键焊缝(如环缝与纵缝交叉部位),需进行双技术复检(如RT+UT),确保缺陷检出率 $\geq 99.5\%$ 。

4.2 焊接缺陷精细评估与修复

量化评估与分类处理检测出的缺陷,这是确保修复方案科学且有效,裂纹缺陷通过金相分析明确扩展方向,长度、深度达到0.8mm、0.4mm,就存在返修的。气孔缺陷统计直径和数量后,直径达到0.6mm、累计面积与焊缝截面积的0.8%相等,也需返修,未熔合缺陷测量长度、深度,长度、深度为1.5mm、0.25mm时,同样存在返修的,返修时专项方案需制定,返修工艺参数在方案中明确,热输入量降低15%-20%,层间温度 $\leq 75^\circ\text{C}$,返修次数限制在 ≤ 2 次,返修后的检测要求也包含在方案内容中。返修阶段借助碳弧气刨方式移除缺陷,刨槽深度保持在缺陷深度增加3mm的级别,宽度需在缺陷宽度5mm的增加量之后,表面打磨处理后要求粗糙度Ra达到 $6.3\mu\text{m}$ 的控制要求。完成返修之后,需重新进行RT、UT、MT检测且要求合格率保持在完全达

100%的层次,焊缝返修超过2次时,对力学性能进行复验包含抗拉强度 $\geq 530\text{MPa}$ 、屈服强度 $\geq 330\text{MPa}$ 、-168℃冲击功 $\geq 36\text{J}$ 等参数。第三方检测机构出具评估报告作为说明依据,返修记录保留缺陷类型、尺寸、清除具体方式与返修相关参数包括检测结果,为质量追溯记录作为说明^[5]。

4.3 质量验收标准严格执行

焊接质量的验收判定需综合多维度标准,确保焊缝性能与设计要求的高匹配性,外观质量部分要求:焊缝余高控制在1.8mm,宽度差需达到1.5mm,咬边深度不许过0.2mm且累计长度控制在焊缝总长度3%。同时错边量不许多过0.8mm,焊缝表面禁止存在裂纹和焊瘤等缺陷,无损检测标准为RT合格率100%,按JB/T4730.2-2005 II级要求;UT合格率应达到99%且满足JB/T4730.3-2005 I级标准,MT/PT合格率要求100%,按JB/T4730.4-2005和JB/T4730.5-2005 I级,力学性能的判定依据GB/T229-2020:焊缝抗拉强度达到530MPa,屈服强度应为330MPa,延伸率不许降低22%,冲击功需 $\geq 36\text{J}$,满足-168℃要求。尺寸偏差验收标准:焊缝直线度控制在2mm/m及以下,对口错边量保持在0.8mm及以下,角变形需达到 $1^\circ/\text{m}$ 及以下,验收流程包含施工单位的自检、监理单位的抽检(抽检比例不小于20%)和第三方机构的复检(关键焊缝需100%复检)这三级管控。

验收完成之后,要求出具质量报告并加盖检测单位公章,报告内容需写明检测方法、技术参数、缺陷记录与处理结果,焊缝不合格时,需分析原因,例如热输入量过高、层间温度失控等,制定整改措施后重新验收,直至焊缝完全合格。

5 结语

LNG低温储罐内罐壁板的焊接质量控制包含材料、工艺、人员、设备与环境等环节,技术要求极强且具备系统性,焊前准备充分、焊接中严格执行工艺要求、焊接后完成全面检测评估,这些环节确保焊缝的低温韧性和结构稳定性达到优良水平,自动化焊接和智能检测等新技术的发展,使焊接质量控制的层次在提升,为LNG储罐安全高效运行提供保障。

参考文献

- [1] 王全扣,刘柏伟,蔡德成,等.LNG低温储罐内罐壁板焊接质量控制分析[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(20):37-39.
- [2] 张月.探析全容式LNG低温储罐建造技术[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(09):193-195.
- [3] 秦玉良.大型LNG低温储罐内罐安装控制技术[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(07):190-192.
- [4] 栾涛,蔡文刚,尹永强.大型低温LNG储罐内罐安装的风险管理与控制措施[J].化工管理,2022,(10):136-141.
- [5] 李雪梅.浅谈LNG低温储罐内罐焊接技术[J].石油化工建设,2021,43(03):63-65+70.