

油田地面工程焊接工艺标准化与质量追溯体系构建

李会君

中国石油天然气集团有限公司长庆油田分公司第九采油厂 陕西 延安 717600

摘要: 随着我国油气资源开发向深层、高含硫、高腐蚀性等复杂地质条件延伸,对油田地面工程建设质量提出了更高要求。焊接作为油田地面工程(如集输管道、储罐、换热器、阀组等)的核心连接工艺,其质量直接关系到系统的安全性、可靠性和服役寿命。然而,当前油田地面工程焊接作业仍存在工艺执行不统一、过程控制粗放、质量责任不清等问题,亟需通过标准化与信息化手段加以解决。本文从焊接工艺标准化出发,系统梳理了焊接工艺评定(WPS/PQR)、焊工资格管理、材料控制、环境适应性等关键环节的技术要求;在此基础上,提出构建基于数字化平台的质量追溯体系,融合物联网(IoT)、射频识别(RFID)、区块链及大数据分析等技术,实现“人-机-料-法-环”全要素全过程可追溯。焊接工艺标准化与质量追溯体系的协同建设,是推动油田地面工程高质量发展的关键技术支撑。

关键词: 油田地面工程; 焊接工艺; 标准化; 质量追溯; 数字化平台; 区块链

引言

油田地面工程连接井口与终端处理设施,涵盖原油集输等多个子系统,核心设备与管线多以焊接方式永久连接,焊接接头数量庞大。焊接质量缺陷是引发泄漏、爆管等安全事故的主要诱因之一。尽管国家及行业出台多项焊接标准,但实际施工仍存诸多问题:工艺执行随意,不同单位对焊接工艺规程理解不一;焊工资质管理松散,部分焊工持证与实际不符;过程记录缺失或造假,参数依赖人工记录易出问题;质量问题溯源难,失效后难定位责任环节;数据孤岛现象严重,各环节信息割裂。在此情形下,推进焊接工艺标准化,构建全链条质量追溯体系,对保障油田地面工程本质安全、提升建设与运维水平十分迫切。

1 油田地面工程焊接工艺标准化体系构建

焊接工艺标准化是质量追溯的前提和基础。只有在统一、科学、可执行的工艺框架下,后续的数据采集与责任界定才具有意义。标准化体系应覆盖“事前—事中—事后”全过程。

1.1 焊接工艺评定(PQR/WPS)标准化

焊接工艺评定(PQR)是验证焊接工艺可行性的试验过程,其结果用于编制焊接工艺规程(WPS)。在油田地面工程中,焊接接头种类繁多、服役环境严苛,若缺乏系统化的工艺评定支撑,极易因工艺适配不当而埋下质量隐患。因此,必须建立覆盖全面、参数精细、动态更新的PQR/WPS管理体系。具体而言,应针对不同母材(如L245、L415、304L等)、壁厚区间、焊接方法(SMAW、GTAW、FCAW等)以及空间位置(1G至

6G)开展完整的工艺评定试验,形成企业级PQR数据库。在此基础上编制的WPS,不仅应明确基本焊接参数,还需细化预热温度范围、层间温度控制上限、热输入限值、焊道层数与填充顺序、后热处理要求等关键控制点,避免使用“适当”“视情况而定”等模糊表述。此外,当工程中出现母材供应商变更、焊材牌号调整或施工环境发生重大变化(如由平原转至高寒地区)时,原有WPS可能不再适用,此时应启动补充评定或重新评定程序,确保工艺始终与现场条件匹配^[1]。为提升执行效率与准确性,建议将WPS纳入数字化管理平台,支持按项目编号、管线标识、材质规格等条件自动匹配推荐工艺文件,减少人为误选风险。

1.2 焊工资格与技能管理标准化

焊工作为焊接操作的直接执行者,其技能水平与责任心对焊缝质量具有决定性影响。当前部分项目中,焊工资质管理流于形式,存在证书过期、项目覆盖不全、实际操作能力与证书不符等问题,严重削弱了工艺标准的落地效果。为此,必须建立以资质合规为基础、以技能实绩为导向的焊工管理体系。首先,应严格审查焊工所持特种设备作业人员证或石油行业焊工资格证书的有效性与适用性,确保其考试项目完全覆盖拟施焊的材质、厚度、位置及焊接方法。其次,对于高压、高含硫、高温等关键管线,仅凭证书不足以保证质量,还应组织岗前模拟试焊考核,由第三方或业主代表对试件进行无损检测与力学性能验证,合格后方可授权上岗。更重要的是,应打破“一考定终身”的传统模式,建立焊工个人电子技能档案,动态记录其历史焊接业绩、参与

项目类型、无损检测一次合格率、返修次数等数据，作为后续派工与绩效评价的重要依据。通过将焊工能力量化、可视化，可有效引导施工单位优化人力资源配置，优先安排高绩效焊工承担关键焊口任务，从而从源头提升焊接质量稳定性。

1.3 焊接材料与设备管理标准化

焊接材料与设备是实现稳定工艺输出的物质基础。在油田地面工程中，焊材混用、受潮、错发等问题屡见不鲜，而焊接设备性能漂移亦常被忽视，这些都可能导致即使工艺参数正确，实际焊缝质量仍不达标。因此，必须对焊材与设备实施全生命周期标准化管理。对于焊条、焊丝、焊剂等焊接材料，应从采购源头抓起，要求供应商提供完整材质证明与批次信息，并在入库时进行复验。在存储环节，严格执行烘干制度，不同牌号、批号的焊材分区存放，避免交叉污染。发放时采用“以旧换新”或扫码领用机制，确保每根焊条、每盘焊丝均可追溯至具体焊口^[2]。对于焊接设备，应建立定期校准制度，重点核查输出电流/电压的精度、送丝机构的稳定性、高频引弧性能等关键指标，确保设备状态满足WPS要求。同时，辅助工具如红外测温仪、风速计、湿度计等也应纳入计量管理，定期检定，其测量数据作为焊接环境合规性判断的依据，一并纳入过程记录。唯有将“料”与“机”置于受控状态，才能为标准化工艺的精准执行提供可靠保障。

1.4 环境与过程控制标准化

油田地面工程多在野外露天环境下施工，风、雨、低温、高湿等自然因素对焊接冶金过程和焊缝成形具有显著影响。若缺乏对环境条件的量化控制与过程干预，即便工艺参数完美，也可能因冷却速率过快、氢致裂纹敏感性增加等原因导致缺陷产生。因此，必须制定科学的环境准入与过程控制标准。例如，当风速超过8m/s时，电弧稳定性急剧下降，保护气体易被吹散，应强制设置防风棚；当相对湿度高于90%或母材表面有结露时，氢扩散风险增大，应禁止施焊。此外，焊接过程中的多个中间环节同样需要标准化管控：坡口加工后应彻底清除油污、氧化皮；组对时需严格控制间隙与错边量；预热应均匀覆盖规定区域并达到设定温度；每层焊道完成后须彻底清渣，避免夹渣缺陷累积。这些控制点虽看似琐碎，但任一环节失控都可能成为质量事故的导火索。因此，应在作业指导书中明确各工序检查要求，并通过数字化手段（如移动端拍照上传、传感器自动记录）确保执行到位，形成闭环管理。

2 质量追溯体系架构设计

在标准化基础上，构建“端-边-云”协同的质量追溯体系，实现从原材料到服役全生命周期的数据贯通。

2.1 总体架构

为实现焊接质量全过程可追溯，需构建一个层次清晰、功能完备的信息技术架构。该体系总体上可分为感知层、边缘层、平台层与应用层四个层级：

感知层：部署智能焊机、RFID标签、温湿度传感器、高清摄像头等，实时采集焊接参数、环境数据、操作视频；

边缘层：在施工现场部署边缘计算网关，对原始数据进行清洗、压缩、初步分析，并本地存储；

平台层：基于云平台构建焊接质量管理信息系统（WQMS），集成WPS库、焊工档案、材料台账、NDT报告等模块；

应用层：提供移动端APP、Web端看板，支持质量预警、追溯查询、统计分析、电子签章等功能。

2.2 关键技术集成

2.2.1 物联网（IoT）与智能焊接设备

现代智能焊接设备已具备强大的数据采集与通信能力，能够以毫秒级频率输出焊接过程中的关键参数，并通过4G/5G或低功耗广域网（如LoRa）实时上传至管理平台。这一技术突破使得焊接过程从“黑箱”变为“透明箱”。结合GPS或管线桩号定位，每一道焊缝均可被赋予唯一的空空间坐标标识，实现物理焊口与数字记录的一一对应^[3]。这种高精度的过程数据不仅可用于事后追溯，更可作为实时质量控制的依据，例如当检测到热输入持续超出WPS允许范围时，系统可立即向焊工与监理发出告警，避免整道焊缝报废。

2.2.2 射频识别（RFID）与二维码技术

为打通“人-机-料-法-环”各要素之间的信息壁垒，需为每个实体对象赋予唯一数字身份。在管材出厂时即粘贴包含材质、规格、炉批号、复验结果等信息的RFID标签或二维码；焊材包装上同样标注唯一编码；焊工佩戴内置身份芯片的工牌。施工过程中，通过扫码或刷卡操作，系统可自动关联当前焊口所使用的材料批次、操作人员资质、适用的WPS文件及环境监测数据，生成结构化的电子焊接记录。焊接完成后，系统自动生成该焊缝的唯一追溯码，作为后续无损检测、压力试验、运行维护的索引标识。这种“一码贯穿”机制极大提升了信息采集效率与准确性，杜绝了手工台账易错、易漏、易篡改的弊端。

2.2.3 区块链技术保障数据可信

在质量追溯中，数据的真实性与不可抵赖性至关重要

要。传统中心化数据库存在被内部人员篡改的风险，难以满足高合规性要求。引入区块链技术后，可将焊接过程中的关键数据摘要（如WPS编号、焊工ID、焊接时间、热输入均值、NDT结论等）以哈希值形式写入分布式账本。由于区块链具有去中心化、时间戳、链式结构与共识机制等特性，任何试图修改历史记录的行为都将被网络节点拒绝，从而确保追溯数据的原始性与公信力。在发生质量纠纷或事故调查时，相关方可通过授权访问区块链上的存证信息，快速厘清责任归属，提升仲裁效率。

2.2.4 大数据分析 with AI 辅助决策

海量焊接数据的积累为质量优化提供了新的可能。通过对历史项目中数万道焊口的数据进行挖掘，可构建焊接质量预测模型，揭示工艺参数（如预热温度、层间温度、热输入）与缺陷类型（如气孔、裂纹）之间的非线性关系，进而指导WPS的精细化优化。在施工过程中，系统可基于实时数据流进行在线分析，一旦发现参数偏离正常区间或环境条件恶化，立即触发分级预警机制，提醒相关人员干预^[4]。对于已发生的返修事件，可通过聚类分析识别出高频缺陷模式及其关联因素（如某类焊材在低温环境下易产生冷裂纹），为根因分析与预防措施制定提供数据支撑。未来，随着人工智能技术的发展，系统甚至可实现自适应参数调整，根据实时熔池图像自动微调电流电压，进一步提升焊接智能化水平。

3 实施路径

焊接工艺标准化与质量追溯体系的建设是一项系统工程，需遵循“顶层设计—试点验证—全面推广—持续优化”的实施路径。首先，企业应从战略高度出发，制定《焊接标准化与追溯体系建设指南》，明确组织架构、职责分工、技术标准、考核指标与保障机制，为后

续工作提供制度依据。其次，选择1至2个具有代表性的重点项目（如新建联合站、长输管线）作为试点，集中资源部署智能设备、开发管理平台、培训操作人员，验证技术方案的可行性与经济性。在试点成功基础上，逐步将体系推广至所有在建项目，并将追溯要求嵌入现有施工管理流程，如开工报审需提交WPS匹配清单、工序交接需扫码确认材料与人员、隐蔽工程验收需附带完整电子记录等。最后，建立数据驱动的持续改进机制，定期分析平台运行数据，识别薄弱环节，迭代更新标准文件与算法模型，确保体系始终与工程实践同步演进。

4 结语

油田地面工程焊接质量是保障油气安全生产的生命线。本文提出的“标准化+追溯”双轮驱动模式，通过构建覆盖全要素、全过程的焊接工艺标准体系，并深度融合物联网、区块链等新一代信息技术，实现了焊接质量从“经验控制”向“数据驱动”的根本转变。该体系不仅能显著提升焊接一次合格率、降低质量风险，更为工程数字化交付、智能运维奠定数据基础。未来，随着人工智能与数字孪生技术的发展，焊接质量追溯体系将进一步向预测性维护、自适应工艺优化方向演进，为油田地面工程高质量发展注入持续动能。

参考文献

- [1]徐恩亮.论油田管道焊接工艺与质量控制措施[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(04):40-42.
- [2]张明安.油田管道焊接工艺与质量控制措施探讨[J].中国设备工程,2023,(06):124-126.
- [3]唐燕林.油田地表工程焊接无损检测问题及改善方法[J].科技创新与应用,2020,(30):111-112.
- [4]戴士植.浅析油田管道焊接工艺与质量控制措施[J].全面腐蚀控制,2020,34(04):65-66.