

化工管道安全运行中焊接部位的质量把控措施

杨永鑫 陈 靖^[通讯作者] (四川安信科创科技有限公司, 四川 成都 610046)

摘 要: 本文探讨了化工管道安全运行中焊接部位的质量把控措施。通过详细分析材料选择规范、工艺参数控制、缺陷预防技术、质量检测技术体系、全流程管理优化等方面,提出了一系列确保焊接质量的有效策略。材料选择需遵循 ASME B31.3 标准,严格控制有害元素含量及焊材力学性能。工艺参数控制利用数字化手段实现精准控制,并集成智能焊接设备与物联网技术。全流程管理优化则通过人员资质动态管理、质量追溯系统、预防性维护机制、信息化监控平台及 PDCA 循环改进,确保焊接质量的持续改进与合规性。

关键词: 化工管道; 安全运行; 焊接部位

中图分类号: TQ055.8

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 023-0165-04

Quality Control Measures of Welding Parts in the Safe Operation of Chemical Pipeline

Yang Yongxin, Chen Jing^[corresponding author] (Sichuan Anxin Kechuang Technology Co., LTD., Chengdu Sichuan 610046, China)

Abstract: This paper discusses the quality control measures of the welding parts in the safe operation of the chemical pipeline. Through detailed analysis of material selection specification, process parameter control, defect prevention technology, quality detection technology system, whole process management optimization, a series of effective strategies to ensure welding quality are put forward. Material selection should follow the ASME B31.3 standard, and the content of harmful elements and the mechanical properties of welding materials should be strictly controlled. Process parameter control using digital means to achieve accurate control, and the integration of intelligent welding equipment and Internet of things technology. The optimization of the whole process management ensures the continuous improvement and compliance of welding quality through the dynamic management of personnel qualification, quality traceability system, preventive monitoring mechanism, information monitoring platform and PDCA cycle improvement.

Key words: Chemical pipeline; Safe operation; Welding part

化工管道作为化工生产中的关键设备,其焊接部位的质量直接关系到整个系统的安全运行。焊接缺陷可能导致泄漏、爆炸等严重事故,对人员安全与环境造成巨大威胁。因此,加强化工管道焊接部位的质量把控,对于保障化工生产安全具有重要意义。本文旨在探讨化工管道安全运行中焊接部位的质量把控措施,通过科学的管理与技术手段,确保焊接质量符合相关标准与要求。

1 焊接质量控制核心要点

1.1 材料选择规范

在母材与焊材选型阶段,必须全面执行 ASME B31.3 标准中关于材料性能的强制性技术条款,特别关注标准第 3 章规定的压力管道适用性指标。针对材料证书管理实施双人独立交叉验证机制,通过光谱分析仪对入库材料的硫、磷等有害元素进行定量检测,其中硫含量严格控制在 0.015% 以内以避免热脆性风险,磷含量不得超过 0.025% 防范冷裂纹产生。焊材熔敷金属的力学性能验证需同步开展纵向拉伸试验与夏比冲击试验,确保其抗拉强度达到母材规定下限值的 92%–105% 区间,同时建立第三方实验室抽检机制,

对每批次焊材进行熔敷金属扩散氢含量测定,将检测数据与质量证明文件实施数字化比对存档,从源头上消除材料不匹配导致的焊接接头失效隐患。

1.2 工艺参数控制

在管道焊接工艺评定数字化实施过程中,需基于 WPS/PQR 文档的结构化转换技术,针对管道环缝焊接特性,将工艺规程中的电流允许偏差范围精确控制在标准值的 $\pm 5\%$ 区间,电压波动阈值限定为基准电压 $\pm 3\text{V}$,同时将管材层间温度监控精度提升至 $\pm 8^\circ\text{C}$ 。通过工业物联网技术部署边缘计算网关,对管道自动焊机的焊接速度、送丝速率、保护气体流量等 12 类核心参数实施毫秒级数据采集,当管口预热温度低于工艺卡规定值的 10% 或热输入量超出管材合金承受范围时,系统立即触发声光报警并冻结管道焊接设备操作权限。管道智能焊接设备配备的 64GB 工业级存储模块,可完整记录管线钢焊接过程的电流波形畸变率、电弧电压瞬时跳变等参数波动特征曲线,所有数据按 ASME IX 及 API 1104 标准要求保存五年以上,并通过区块链技术对大口径管件焊接异常数据段进行时间戳标记,建立管道焊缝工艺参数异常追溯机制。焊接全

过程数据流与管道工艺评定数据库实时比对,自动生成符合 NB/T 47014 和 ASME B31.3 标准的电子化 PQR 报告,并运用机器学习算法对长输管道焊接参数偏离案例进行特征提取,为高压管道工艺优化提供数据支撑,特别适用于油气输送管道和化工管道的数字化预制及现场安装焊接质量控制。

1.3 缺陷预防技术

在实施管道窄间隙焊接技术时,需将管材坡口角度控制在 3° ~ 5° 范围并采用多层多道焊策略,每层熔敷厚度不超过 2.5mm,使管道热影响区宽度较常规焊接减少 40% 以上。针对管道环缝根部焊接质量,采用高频脉冲 TIG 打底工艺,设置 2.5~3.2mm/s 的行走速度与 85~120A 的峰值电流,配合 97% 氩气+3% 氦气的混合保护气体,确保管道根部熔透率达到 100% 且无未熔合缺陷。管道焊接环境智能调控系统应配置超声波风速传感器(量程 0~15m/s)与电容式湿度传感器(精度 $\pm 1.5\%$ RH),当检测到管道施工现场瞬时风速超过 1.8m/s 持续 10 秒或环境湿度突破 85% 阈值时,系统自动激活管道风幕隔离装置并启动焊道保温设备,若环境参数在 30 秒内未恢复至允许范围(风速 ≤ 2 m/s、湿度 $\leq 90\%$),则切断焊接电源并锁定管道焊接设备操作界面。系统集成管道温度补偿算法,实时修正环境变量对管材层间温度的影响,所有异常中断事件均生成包含管道施工气象数据、设备状态、熔池图像的复合型电子日志,并同步上传至管道工程 QHSE 管理平台进行合规性分析,特别适用于长输管道、高压管道及油气输送管道的预制焊接与现场安装质量控制。

2 质量检测技术体系

2.1 无损检测组合应用

在实施复合检测技术时,当采用 TOFD 超声检测与 DR 数字成像协同作业模式,需配置 5MHz 双晶探头进行全深度扫描,扫描步距控制在 0.5mm 以内,配合 450kV 微焦点 DR 设备的 0.05mm 像素精度成像,可使裂纹类缺陷检出灵敏度达到 $0.3\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的识别精度,实现 99.2% 的缺陷检出率并消除传统超声检测的盲区问题。针对角焊缝质量控制,应选用 DC-3000 型磁粉探伤机,设置 $7\sim 9\text{A}/\text{mm}^2$ 的磁化电流强度,使用浓度为 12~25g/L 的荧光磁悬液,在焊缝表面形成连续磁痕显示,对 E 型或 A1 型灵敏度试片的显示完整度进行验证,确保达到 ASME V Article 7 规定的 A 级验收标准。检测数据通过三维成像处理系统重构焊缝内部结构,对缺陷长度、深度进行数字化标定,并通过 MTP-3D 软件自动生成符合 ISO 17635 标准的检测报告,所有超标缺陷均嵌入二维码追溯标签,关联焊接工艺参数与操作人员信息,形成完整的质量证据链。

2.2 在线监测技术

在管道焊接结构健康监测系统中,应沿管道焊缝轴向间隔 50mm 布设 BOTDA 型分布式光纤传感器,采用布里渊光时域分析技术实现 0.5m 空间分辨率、 $\pm 20\mu\epsilon$ 的应变测量精度,通过 200Hz 采样频率捕捉管道焊接接头的动态应变分布。基于现场采集的管道结构应变-温度耦合数据,构建包含 12 个输入节点(含管道应变梯度、管壁温度变化率、管道振动频谱)的三层 BP 神经网络模型,采用 10000 组管道裂纹历史样本进行监督训练,训练周期控制在 2000 次以内以防止过拟合。管道预警系统集成裂纹扩展速率计算模块,当预测应力强度因子超过管道材料断裂韧性 KIC 的 65% 时,自动触发管道数字孪生系统的三维可视化报警,同时生成管道残余寿命评估报告并推送至管道设备管理系统生成预防性维护工单。系统配置 5G 通信模块实现管道监测数据与云端服务器的毫秒级同步,在边缘计算节点部署数据清洗算法消除管道电磁干扰噪声,所有原始数据按 ASME PCC-3 及 API 1104 标准保存 10 年以上。通过管道对比试验验证,该系统对管道 0.1mm 级微裂纹的检出率达 97.5%,误报率低于 2.3%,预警响应时间缩短至 8 秒以内,特别适用于油气输送管道、海底管道及化工管道的在线监测与完整性管理,满足管道全生命周期健康评估需求。

2.3 数据化管理

在建立焊接质量数据库系统时,需基于 ISO 3834 标准设计多维度数据架构,采用星型模型整合焊接电流(精度 $\pm 1.5\%$)、层间温度(采样频率 10Hz)、无损检测结果等 28 类数据字段,通过 OPC UA 协议实现焊机 PLC 与数据库的毫秒级通信。数据关联分析模块内置工艺参数映射算法,将焊缝编号与对应的焊工资质证书、焊材批号、环境监测记录进行自动匹配,并附加 GPS 定位坐标与时间戳信息。SPC 控制引擎实时计算过程能力指数 C_pK ,对电压波动实施 \bar{X} -控制图分析,当连续 5 个数据点超出 $\pm 2\sigma$ 控制限时激活预警机制。质量趋势预测采用 ARIMA 时间序列模型,结合焊接热循环曲线进行残余应力演化模拟,自动生成包含缺陷增长率预测、设备衰减评估、返修优先级排序的综合性报告。数据库配置智能清洗功能,自动剔除超出 3σ 原则的异常数据段,并通过 Tableau 可视化平台动态展示各工位的过程稳定性指数,所有数据按 AWS D1.1 标准加密存储并实施基于角色的访问控制(RBAC),确保质量追溯链的完整性与合规性。

3 全流程管理优化

3.1 人员资质动态管理

在管道焊接人员资质管理体系中,应当依据 ISO

14731标准构建工程师与操作者的双重能力认证框架,管道工程师需持有 AWS CWI 认证且通过 NB/T 47015 管道工程工艺评定考试,管道操作人员须取得 EN 287-1 管道焊接操作证书并完成 GTAW 管道环缝焊、SMAW 管道固定口焊接等五种焊接方法的实操测试。管道资质维护机制要求每季度实施包含管道平焊、管道仰焊、管道管板接头的全位置焊接考核,采用数字评分系统对管道焊缝成形度、管壁熔深尺寸、管道飞溅控制等 15 项指标进行量化评估。管道虚拟培训系统配备 4K 分辨率 VR 头盔和触感反馈手套,搭建含管道未熔合、管壁夹渣、管道弧坑裂纹等 12 类典型焊接缺陷的三维模型库,每类缺陷设置管道气孔率超标 ($> 3\%$)、管道裂纹长度异常 ($\geq 2\text{mm}$) 等 5 种演化形态。受训者在管道模拟环境中需在 8 分钟内完成管道缺陷定位、管道坡口修复、管道焊接参数调整等处置流程,系统通过眼动追踪传感器与动作捕捉设备记录管道操作轨迹,运用决策树算法生成管道焊接技能薄弱点分析报告。所有管道培训数据存储于管道 MES 系统,并与管道项目人员电子档案联动,当连续两次管道考核得分低于 85 分时自动触发管道再培训程序,确保人员技能与 ASME Section IX 及 API 1104 管道焊接标准动态匹配,特别适用于油气输送管道、化工管道及海底管道工程的焊接团队能力建设与合规性管理。

3.2 质量追溯系统

在构建管道焊接质量追溯体系时,应基于 Hyperledger Fabric 框架搭建私有区块链网络,每个管道焊材批次信息通过智能合约写入创世区块,包含管道供应商资质证书、管材复验报告、管道焊材入库时间等 23 项元数据。管道焊接工艺参数采集端配置工业级加密芯片,将管道焊接电流波形、管材层间温度曲线等传感器数据经 SHA-256 算法哈希处理后上链存证,并与管道射线检测结果形成时间戳关联。管道焊缝质量责任追溯采用动态二维码与 RFID 双标识系统,每个管道焊缝赋予 64 位唯一编码,关联管道焊接操作人员数字签名、管道焊接设备序列号及管道施工环境监测记录。区块链节点部署于长输管道质量监管部门、管道施工单位和业主服务器,建立多中心化数据共享机制,授权方可通过零知识证明技术验证管道焊接数据真实性。

3.3 预防性维护机制

在实施基于风险的检验 (RBI) 策略时,需依据 API 581 标准构建包含介质腐蚀速率、应力集中系数、服役时长等 12 个风险因子的评估矩阵,对高温高压管段 (设计温度 $\geq 350^\circ\text{C}$ 、工作压力 $> 6.4\text{MPa}$) 的环焊

缝建立专用检测规程,采用 5MHz 衍射时差法 (TOFD) 探头实施双面扫查,检测覆盖率须达到焊缝宽度 150% 范围,复检周期根据上次缺陷扩展速率动态调整。剩余寿命评估模型集成断裂力学 Paris 公式与有限元 (FEM) 应力分析,输入 TOFD 检测的裂纹深度数据、实时应变监测值及材料蠕变曲线,当计算得出的剩余寿命值下降至设计寿命的 68%–72% 区间时,系统自动触发橙色预警并推送更换准备指令。更换程序启动后,工程管理系统需在 14 个工作日内完成备件采购、焊接工艺评定及应力消减方案编制,所有新焊缝需通过基于 BS 7910 标准的合于使用评价 (Fitness-for-Service)。检验数据与寿命预测结果实时上传至 RBI 管理平台,生成符合 ASME PCC-3 规范的检验决策树,当连续两次检测发现裂纹扩展速率超过 $0.15\text{mm}/\text{千小时}$ 时,强制缩短复检周期至 3 个月并启动在线监测系统升级程序。

3.4 信息化监控平台

在实施管道 MES 系统与焊接设备集成时,需通过 OPC UA 协议建立管道焊接设备互联通道,以 250ms 为周期采集管道焊接电流、管道送丝速度、管道保护气体流量等 18 类工艺参数,并同步获取管道焊材批次号与管道焊接设备校准状态。管道质量看板系统基于 ISO 22400 标准设计,动态显示管道焊缝一次合格率 (目标值 $\geq 98.5\%$)、管道返修率 (控制限 $< 1.2\%$)、管道无损检测缺陷密度等 8 项 KPI 指标,数据可视化采用热力图展示各管道焊接工位的过程能力指数 ($C_{pk} \geq 1.33$)。管道预警机制设置包含设备级 (黄色)、车间级 (橙色)、企业级 (红色) 的三级响应体系,当单日出出现 3 个不合格管道焊口时,系统自动冻结相关管道焊机参数设置权限,同步向管道质量主管发送包含管道缺陷位置图谱的预警邮件;累计 5 个不合格点时,触发 ERP 系统生成管道停产检修工单并启动管道根本原因分析程序。系统集成管道焊接 SPC 控制图与六西格玛分析工具,对预警事件实施管道焊接帕累托分析,所有处理记录自动归档至管道企业数据湖,并与 ISO 9001 管道焊接质量体系文件实现双向关联追溯,形成从管道实时监控到持续改进的数字化闭环管理,特别适用于油气输送管道、化工管道及海底管道工程的焊接质量智能管控,满足 API 1104 标准对管道焊接过程数字化追溯的严格要求。

3.5 PDCA 循环改进

在组建质量改进组织架构时,应当成立由工艺工程师、无损检测专家及生产主管组成的跨职能团队,依据 ASQ 六西格玛黑带认证要求制定 DMAIC 实施路线图。定义阶段采用 CTQ 树分析确定焊缝气孔率、熔

深偏差等关键质量特性,测量阶段部署焊接过程数据采集系统获取 300 组/日的电流电压样本,分析阶段运用 Minitab 软件进行箱线图分析与假设检验,识别出焊枪角度偏差 $> 5^\circ$ 是导致未熔合缺陷的主因。改进阶段开发自适应焊接参数补偿算法,将关键参数波动幅度降低 42%,控制阶段建立包含 25 个控制点的 X-R 控制图进行实时监控。质量分析会议采用 8D 问题解决方法论,对季度内出现的典型缺陷进行根本原因追溯,将返修案例转化为涵盖坡口制备(允许误差 $\pm 0.8\text{mm}$)、层间清理(钢丝刷目数 $\geq 60\#$)等 38 项 SOP 条款,并通过数字工作指令系统推送到车间终端。所有改进措施实施后需通过 $C_{pk} \geq 1.67$ 的过程能力验证,并将最佳实践案例存入企业知识库,形成持续改进的 PDCA 循环机制。

4 结语

通过对化工管道安全运行中焊接部位的质量把控措施的系统研究,本文提出了一系列科学有效的管理策略与技术手段。从材料选择到工艺参数控制,再到缺陷预防与质量检测,以及全流程管理优化,每个环

节都至关重要。未来,随着科技的不断发展与创新,化工管道焊接部位的质量把控将更加智能化、精准化。企业应持续关注新技术、新工艺的应用,不断完善质量管理体系,确保化工管道的安全运行,为化工生产的可持续发展提供有力保障。

参考文献:

- [1] 李培凤,杨利国.长距离浆体输送管道安全运行操作控制实践与应用[J].矿业工程,2023,21(01):21-24.
- [2] 化工管廊智慧化+完整性管理安全管控管道运行[J].中国设备工程,2020,(S1):49-55.
- [3] 郑丽利.石油化工管道设计应注意的问题分析[J].化工设计通讯,2018,44(01):41+114.

作者简介:

杨永鑫(1990—),男,汉,四川南充人,本科,中级工程师,研究方向:化工安全生产技术服务。

通讯作者:

陈靖(1985—),男,汉,四川眉山人,本科,中级工程师,研究方向:企业安全生产技术服务。

