

长输管道焊接质量过程控制关键措施分析

藏国虎 (陕西延长石油 (集团) 有限责任公司管道运输第一分公司, 陕西 榆林 718500)

摘要: 为提升长线对接头的质量稳定性, 对长线对接头的关键控制点从准备、施工及验收三个关键工序着手进行分析研究, 而实践中则采用在线的焊接工艺评定控制及反馈调控, 以及精确的热量输入计算进行过程中的动态管控, 并最终通过全自动超声检测技术进行缺陷尺寸判定及量化评价, 建立全过程的质量追溯体系。形成以数据为依托的过程管理模式, 这也是保证长途管线焊接质量的关键措施。

关键词: 长输管道; 焊接质量; 过程控制; 全自动焊; 数据追溯

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0107-03

Analysis of Key Measures for Process Control of Welding Quality in Long-Distance Pipeline Construction

Zang Guohu (Pipeline Transportation First Branch of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Yulin Shaanxi 718500, China)

Abstract: To enhance the quality stability of long-distance joint connections, this study analyzed and researched the key control points of long-distance joint connections from three critical processes: preparation, construction, and acceptance. In practice, online welding process assessment control and feedback regulation, as well as precise heat input calculation, were adopted for dynamic control during the process, and finally, through fully automatic ultrasonic detection technology, defect size determination and quantitative evaluation were carried out to establish a complete quality traceability system. A process management model based on data was formed, which is also a key measure to ensure the welding quality of long-distance pipelines.

Keywords: Long-distance pipeline; Welding quality; Process control; Fully automatic welding; Data traceability

随着 X80 等高级别管线钢在长输管道工程中的广泛应用, 以及全自动焊接技术的普及, 对焊接质量的过程控制提出了更高的技术要求^[1]。传统的质量控制方法往往侧重于焊后检验, 难以满足现代化管道建设的需求。因此, 有必要对焊接全流程进行深入分析, 识别并优化从准备阶段到最终检验的各个关键控制点。研究旨在系统性地探讨在采用全自动焊接技术条件下, 如何通过对焊接工艺、设备性能、过程参数及检测数据的精细化管理, 实现对焊接质量的主动预防与动态控制, 保障管道本体的结构完整性与服役安全性。

1 焊接准备阶段关键质量控制点

1.1 焊接工艺评定与程序的验证

以某输气管道工程采用的美国石油学会标准 1104 (American Petroleum Institute Standard 1104, API 1104) 为例, 针对直径为 1219 mm、壁厚为 18.4 mm 的 X80 钢管线, 评定试验要求覆盖所有预期的施工条件^[2]。需要进行一系列严格的检验措施, 在其中包含有焊缝及热影响区部位的拉伸试验、弯曲试验以及夏比 V 形缺口冲击试验等。并且在相关的标准中要求试件的拉伸强度不得低于基材最低值 620 MPa 的数值; 同时无论从正视图、俯视图或是侧视图上来看, 都不得有大于 3.2 mm 的单个缺陷存在于试件当中; 冲击

试验为 -10℃ 下焊缝中心及附近热影响区中三个试件的冲击功总和达到 80 J 即可。取得上述合格标准后方可确定实际应用过程中的焊接工艺规程。除了正式施工前进行预生产试验外, 在现场还要采用工程中实际使用的设备、材料及人员对焊装工艺规范在现场工况条件下进行验证, 确保其适用性和可靠性, 实现各参数的再现性。

1.2 焊接材料与母材的匹配性控制

焊材选用对焊件母材的适应性以及最终的焊接结果都有着非常关键的作用, 由于 X80 高等级管道钢对于其自身的化学成分及其物理性能有着非常严格的要求, 因此必须采用与其相匹配的低氢型焊材来进行焊接作业^[3]。例如在自动焊施工中一般会采用 ER70S-6 的 $\phi 1.0$ 焊丝配合以 Ar+CO₂ 混合气体 (80+20) 来进行保护, 这样可保证较好的根部穿透性并形成良好; 而作衬垫和盖面用的则选用综合性能更好的药芯焊丝如 E81T1-N11-H4 这类产品, 其熔敷金属的强度及韧性均可较好地满足 X80 基材要求, 并将扩散氢控制在 4ml/100g 以下。为防止误用, 建立严格的库房检验及领料跟踪制度。对每批到货的焊材在核对其质保书的同时, 采用便携式 X 射线荧光分析仪进行关键性合金元素含量测定, 保证其满足技术要求的化学成分; 同时, 在现场采用唯一的焊缝号, 将使用过的焊丝批次

表 1 全自动焊设备关键参数标定要求

标定参数	标准单位	设定范围	允许偏差	标定周期
送丝速度	m/min	5.0-15.0	±2%	每日 / 更换后
行走速度	mm/min	200-800	±3%	每日 / 更换后
焊接电压	V	24-32	±1.5%	每周
焊接电流	A	200-350	±1.5%	每周
摆动频率	Hz	1.0-4.0	±0.1 Hz	每周

号、焊粉批次号及保护气瓶号逐一登记，实现从库房到焊接实物上的追溯功能。

1.3 全自动焊设备性能的标定与维护

全自动焊接过程的顺利进行是建立在相对固定的焊接工艺参数基础上的，如 CRC-Evans M-400 型全自动焊接机具的主要控制变量有焊速、行走速度、电弧电压、焊接电流及焊枪摆幅。所以每天开工前及更换关键部件后，都需进行系统的标定^[4]。对于送丝速度而言，使用数显转速表检测送丝轮转动速度，并与控制柜设置值对比，以 ±2% 范围内为宜；而行走速度则采用在管子打标记的方法配合秒表测定实际行走时间，以此为依据，希望将误差控制在 ±3% 范围之内；其次对焊接电源的电压以及电流输出情况进行检测，将其钳形表和电压表相连接，在实际焊接负载中对其测量值予以检测，希望其指示数值的实际差值不超过 ±1.5% 的范围；最后关于全自动焊机相关维护及调试指标如表 1 所示。

在表 1 中各指标严格设置后可避免因性能变化造成设备作用失效而引起的焊接技术参数不准确的问题，这也是进行焊接过程标准化的必要前提；对设备开展周期性的维修保养作业，包括清洁传送线缆、检查导体咀磨损状态、紧固电路连接端子等措施是维持设备长期稳定运行及减少焊接失误的重要举措。

2 焊接实施过程动态质量监控

2.1 焊接参数的实时监测与闭环调控

因为焊接过程中的不稳定性造成了焊接缺陷的产生，因此对关键参数进行在线监测以及动态控制十分有必要。现有的管自动焊机已集成了完善的焊接数据采集系统，可实现对各焊缝的焊接电流、电弧电压、行走速度、送丝速度的毫秒级在线跟踪记录。以上所有的数字都由传感器收集传送到控制器中。这个控制器内有比例 - 积分 - 微分这样的一个控制系统，它可以将实时的数据与焊接工艺标准上所指定的目标进行比对，并在有任何参数超出容许偏差范围内时发出指令（例如由于电弧长度变化引起电压的变化达到 ±0.5 V），如此，该控制装置会及时启动送丝速度或行走速度以快速回升至预设值内，从而达到对焊接过程进行周期性控制的目的，并能够有效提升焊接质量的稳定

性及减少由人为滞后原因或工作环境变化（例如切割面距差异、电网不稳定等）导致的未熔合、夹渣等情况的发生。

2.2 焊接热输入的精确计算与控制

焊接过程中的热量大小主要是通过焊接热输入来综合表示，它对 HAZ 的组织 and 性能具有显著影响，特别在 X80 这类高热敏度的钢铁材料中更加明显。按下式计算焊接热输入： $Q(\text{kJ/mm})=(V \cdot I \cdot 60)/(v \times 1000)$ ，其中 V 为电弧电压 (V)，I 为焊接电流 (A)，v 为焊接线速 (mm/min)。采用 $\phi 1219\text{mm} \times 18.4\text{mm}$ X80 钢管进行焊接，典型填充层焊接工艺评定参数：焊枪电压 28V，焊接电流 320A，行走速度 600mm/min，则估算热输入约为 0.90kJ/mm。对 X80 钢严格控制其热输入不大于 0.8 ~ 1.4kJ/mm 的限制值。若热输入过低，容易导致冷却速度太快，产生热影响区硬化的倾向，增加了冷裂纹的可能性；热输入过大，则使得热影响区晶粒粗大，降低焊点韧度。因此，焊工和焊接监测仪不仅要单个参数进行关注，还应对热输入值进行实时计算并记录，协调电压、电流以及行走速度三者之间的关系，并将之控制在合理的范围之内，确保焊缝良好的强度及韧性的配合性。

2.3 根焊与热焊道次间处理的管控

在多层焊的第一道焊缝（根焊）质量将影响整个焊接端结果^[5]。采用气体保护金属极电弧焊完成第一道焊缝时特别要注意控制坡口底间隙值，通常应为 $1.8 \pm 0.5 \text{ mm}$ 左右；内置式气动对口装置可有效保证这一尺寸值的均匀性和稳定性。焊接过程中要控制住保护气体流量为 15 ~ 20L/min 以防止底部被氧化，在接下来的热焊环节主要的任务是防止一级焊缝产生的裂纹。因此一级焊缝完成后就必须立即进行热焊作业，并且是在一级焊缝温度还没有降至 100℃ 以下的时候。每一个焊道后的工作也很重要，每一焊道结束以后都需要用电动钢丝刷或者是角度研磨机彻底地将焊道上的熔渣以及飞溅物清理干净，尤其需要注意的是焊道与坡口边界的熔合线位置。清理完之后还要进行目视检查确认是否含有夹渣、气孔等缺陷。然后再进行下一道焊接，在此过程中还要使用红外测温仪对各层之间的温度进行检测，并控制其在预热最大值范围内而

表 2 全自动超声检测缺陷接受标准 (部分示例)

缺陷类型	评价参数	验收限值 (壁厚 T=18.4 mm)
线性夹渣	单个长度	$\leq T/3(6.1 \text{ mm})$
	累计长度	$\leq T(18.4 \text{ mm}) \text{ in } 12T$
未熔合	高度	$\leq 0.8 \text{ mm}$
	长度	$\leq 25 \text{ mm}$
根部凹陷	深度	$\leq 1.6 \text{ mm}$
	长度	不限
裂纹	任何尺寸	不允许

不超过 250℃ 最大限制内, 以此来对冷却速度加以控制, 进而降低应力, 避免出现延迟性裂纹。

3 焊后检验与全过程数据管理

3.1 全自动超声检测的缺陷定量评价

焊后无损探伤是评定焊接质量的重要工序, 已经成为长输管道的主要检验方法之一。因其效率高、准确性好, 采用全自动超声波检测技术 (如 Olympus PipeWIZARD) 进行整条环焊缝 100% 体积扫查的应用也越来越多。该方法不仅可判断是否存在缺陷, 还可采用如全聚焦法等图像处理新技术对缺陷位置做出准确评价; 本套装置的软件还可自动识别缺陷类型并精确测量出缺陷长宽高、直径、深度 (壁厚) 大小。这些数据可以作为后续评定的基础依据。例如 API 1104 规范, 可建立缺陷宽容度数据库如表 2 所示。

在完成检测后, 软件会自动生成检验报告单并对照表 2 中的数值进行比较判断合格与否, 即直接给出缺陷尺寸, 用精确的测量代替射线检验, 主要是基于经验的定性分析。这也使其主观成分较多而不稳定。

3.2 焊接接头的力学性能试验评估

为保证现有生产过程持续满足设计标准, 我们需要定期从已建造好的管线上切取焊接接头样品进行破坏性力学试验。通常按照每 100 个焊缝或每公里抽一个作为试验样品; 采样后, 我们按照焊接过程评定标准制作出拉伸、弯曲以及冲击试样。其中拉伸试验主要是为了验证所生产的焊接头的强度是否能够满足母材规定的要求; 弯曲试验是为了检验焊缝金属的韧性以及其与母材之间的结合状况, 在 90° 后不得有破裂的情况出现。夏比 V 形凹槽冲击试验是检验连接韧性的重要手段之一, 并考虑到低温下防止脆化的性能, 在进行该工作时应当将凹槽位置固定于焊接中心线、热影响区粗晶区并规定试验环境温度通常小于管道设计最低温度 (如 -10℃)。最终结果一定要达到设计文件中规定的要求冲击吸收功数值, 比如在 80J 以上, 并不少于 65J。这样可以实时监控工厂焊接工艺的有效一致性及快速发现可能存在的全厂性的质量问题。

3.3 焊接质量全过程数据的追溯

建立完整的焊接质量追溯体系是保证管线全生命

周期完整性的重要环节之一, 该体系是以每一环焊缝唯一的编号为基础进行全流程信息采集。每条焊缝应有包含管件信息里的管号、炉批、壁厚、材质级别, 焊接工艺评定编号, 所用的焊机牌号, 焊工资格证编号, 焊丝、焊粉及保护气体批号, 焊接场地温度、相对湿度及风速, 焊接过程中弧长、焊接电流、焊接速度等主要工艺参数曲线图, 层间温度记录, 以及自动超声检测的原始数据及结论等。上述信息被汇总存储到中央数据库中, 作为每条焊缝的“电子档案”。不仅用于工程实施过程中的质量检测, 在管道长期运营过程中同样发挥重要作用: 例如当发现某批次的管材或焊丝可能存在质量问题, 借助于数据库可快速准确定位使用该批产品的所有位置。然后再进行针对性风险分析以及二次测试, 以期实现精细化养护, 避免盲目排查。

4 结论

长输管线焊缝质量的保证是一个系统工程, 其效果取决于各环节的管理办法是否相辅相成, 形成合力。完善的检验管理制度从原来的侧重竣工后验收模式转变为围绕焊接工艺实施“前控中检后验”的一体化管理模式。其核心是预控到位, 严格把控各项焊前基础条件, 从而避免潜在质量缺陷; 而焊中动态监测以及参数滚动优化是最有效的控制产品质量一致性思想; 最后精准无损检验结果及全过程可追溯性数据的后台核证则为我们提供了第三方评判依据, 也为整条管线全面养护提供可靠的数据库支撑。

参考文献:

- [1] 刘季. 油气长输管道安全管理挑战及优化路径研究 [J]. 化工设计通讯, 2025, 51(10): 31-34.
- [2] 黄旭东. 油气长输管道运行中的安全管理措施探析 [J]. 石化技术, 2024, 31(10): 269-271.
- [3] 安志强. 天然气长输管道材料及施工质量对运行安全的影响分析 [J]. 石化技术, 2024, 31(04): 134-136.
- [4] 宋卫臣. 半自动焊智能管理系统在长输管道中的研究及应用 [J]. 焊接技术, 2023, 52(09): 83-87.
- [5] 叶勇. 油气长输管道焊接工艺质量控制 [J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(06): 28-30.