

Discussion on Pipeline Welding Process Technology and Quality Control Measures

Xiangchao Kong Xingxing Wen

- China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Handan, Hebei, 056001, China
- China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Pingliang, Gansu, 743418, China

Abstract

Pipeline welding constitutes a critical component in the construction of long-distance pipelines, urban pipeline networks, and industrial facilities, with its quality directly impacting energy transmission safety, facility operational reliability, and environmental protection. This paper provides a systematic discussion on two key themes: pipeline welding process technology and quality control. It elaborates on essential process control parameters during welding, required skill levels for operators, applications of weld quality inspection and non-destructive testing techniques, mechanisms behind common welding defects and preventive strategies, as well as the establishment of a comprehensive quality management framework throughout the entire process. By integrating theoretical analysis with practical considerations, this study aims to provide a systematic reference for enhancing both the inherent safety standards and long-term performance of pipeline welding projects.

Keywords

pipeline welding; welding process; quality control; non destructive testing; defect prevention

管道焊接工艺技术及质量控制措施探讨

孔祥超 文星星

- 中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·河北 邯郸 056001
- 中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·甘肃 平凉 743418

摘要

管道焊接是长输管道、城市管网及工业装置建设中的核心环节,其质量直接关系到能源输送安全、设施运行可靠性与环境保护。本文围绕管道焊接工艺技术与质量控制两大主题展开系统论述。详细阐述了焊接过程中的工艺控制要点、操作人员的技能素质要求、焊缝质量检验与无损检测技术的应用范围、典型焊接缺陷的生成机理与预防策略,以及贯穿始终的系统性质量管理框架构建。本文旨在通过理论梳理与实践指向相结合的方式,为提升管道焊接工程的本质安全水平与长期服役性能提供系统的参考依据。

关键词

管道焊接; 焊接工艺; 质量控制; 无损检测; 缺陷预防

1 引言

现代工业体系中,管道承担着输送油气资源、化工原料、城市用水等重要介质的职能,被称为工业的血管。焊接作为管道连接最主要且不可替代的永久性方法,其接头质量是整条管线结构完整性与密封性的决定性因素。焊接接头存在的任何微小瑕疵,在介质压力、温度交变、土壤应力及腐蚀环境长期作用下,都可能演变为导致泄漏甚至灾难性事故的初始裂纹源。因此,深入探究管道焊接所涉及的复杂工艺技术,并建立一套严密、科学、可追溯的质量控制体系,具有极其重大的工程意义与经济价值。本文的论述目的即在于对管道

焊接从技术原理到质量保障的全流程进行整合性探讨,梳理技术关键点与管理核心要素,为相关工程实践与标准制定提供理论支撑。

2 管道焊接技术的理论内涵

2.1 焊接工艺的技术原理基础

焊接工艺的本质是通过物理或化学方式,在待连接工件接头处建立原子或分子间的结合,从而形成不可拆卸的永久性连接。对于管道焊接而言,这一过程通常涉及局部热源的施加,使母材金属与填充金属熔化形成共同的熔池,随后熔池冷却凝固结晶,形成将两段管道熔合为一体的焊缝金属。依据热源性质与保护方式的不同,形成了多种焊接方法。其技术原理的共通性在于实现金属的冶金结合,同时必须克服因快速加热与冷却带来的焊接应力、变形、组织性能不均

【作者简介】孔祥超(1998-),男,中国河北邯郸人,助理工程师,从事焊接技术研究。

匀等一系列冶金学与力学问题。

2.2 质量控制的定义与要素

在管道焊接工程语境下,质量控制是指为确保焊接接头满足设计标准、技术规范及安全服役要求,所采取的一系列有计划、系统化的技术活动与管理措施。它并非单一环节的检验,而是贯穿于焊接作业全生命周期的连续性过程。质量控制的核心要素涵盖人的因素、机的状态、料的品质、法的合规以及环的适宜性五大方面。具体而言,包括焊接操作人员与检验人员的资格认证与技能水平;焊接设备、预热及热处理装置的性能稳定性与计量准确性;管道母材、焊丝、焊条、保护气体等材料的化学成分与力学性能符合性;经过评定合格的焊接工艺规程的严格执行;以及施焊环境如温度、湿度、风速等条件对焊接过程影响的控制。这些要素相互关联,共同构成了质量控制的基本框架。

3 焊接工艺体系的结构分析

3.1 主要焊接方法的分类与特性

管道焊接领域应用广泛的方法主要包括焊条电弧焊、钨极惰性气体保护焊、熔化极气体保护焊以及药芯焊丝电弧焊。焊条电弧焊设备简单灵活,适用于全位置焊接及野外作业,但对操作者技能依赖度高。钨极惰性气体保护焊电弧稳定,焊缝纯净度高,常用于打底焊道及薄壁管、特殊材料管的焊接。熔化极气体保护焊效率高,易于自动化,在中厚壁管道填充盖面中应用普遍。药芯焊丝电弧焊综合了熔敷效率高与工艺适应性好的优点,在长输管道建设中占据主导地位。此外,自保护药芯焊丝焊因其无需外部保护气体,在户外有风环境下展现出独特优势。

3.2 工艺参数设定的科学依据

焊接工艺参数的设定是工艺规程的核心,直接决定了焊接热输入、熔深、焊缝成形及最终接头性能。关键参数包括焊接电流、电弧电压、焊接速度、送丝速度、保护气体流量与成分、焊丝伸出长度、坡口形式尺寸以及层道间温度控制区间。这些参数并非孤立存在,而是相互影响、相互制约。例如,增大电流可增加熔深与熔敷率,但可能导致焊道过宽、咬边或热影响区晶粒粗大。科学的参数设定建立在焊接冶金理论、大量工艺试验及焊接工艺评定的基础上,旨在获得最佳的焊缝金属化学成分、金相组织、力学性能指标,并确保焊接过程稳定,缺陷发生率最低。

3.3 母材与焊接材料的选择要求

管道焊接接头的性能是母材、焊缝金属及热影响区三部分共同作用的结果。因此,材料的选择与匹配至关重要。母材通常根据输送介质、设计压力、环境温度及腐蚀条件选用碳钢、低合金高强度钢、不锈钢、耐热钢或双金属复合管。焊接材料的选择必须遵循等强匹配或高强匹配原则,同时兼顾韧性与耐蚀性要求。焊丝或焊条的化学成分需能与母材形成良好的冶金相容性,控制有害元素如硫、磷的含量,并通

过添加合金元素调整焊缝金属性能。保护气体的选择影响电弧特性、熔滴过渡形式与焊缝表面质量。例如,富氩混合气能改善电弧稳定性,减少飞溅,而纯二氧化碳成本较低但飞溅较大。焊剂或药芯的成分则承担着脱氧、脱硫、造渣保护、合金化及稳弧等多重功能。材料的正确选择与严格验收是保证焊接质量的前提^[1]。

4 技术实施与质量控制融合

4.1 焊接过程的工艺控制要点

将书面的工艺规程转化为实体高质量焊缝,依赖于焊接过程中每一环节的精准控制。焊前准备是控制的第一步,坡口角度、钝边尺寸、组对间隙的精度直接影响焊接可达性与熔透均匀性;组对时的错边量必须严格限制在标准允许范围内;坡口表面及两侧至少20毫米范围内的油污、铁锈、水分等必须彻底清除,以防止氢、氧、氮等气体侵入焊缝。预热是控制焊接冷却速度、防止氢致冷裂纹的核心工艺措施,预热温度需根据钢材的碳当量、壁厚拘束度及环境温度通过计算或查表确定,并采用接触式或红外测温仪进行实时监控与记录。施焊过程中,焊工或设备操作员需保持工艺参数的稳定,通过观察熔池的宽度、亮度、流动性及电弧的声音,可直观判断焊接过程是否正常。对于多层多道焊缝,每一焊道完成后都必须使用专用工具仔细清除焊渣与飞溅,并使用测温仪检查层间温度,确保其始终处于工艺规定的上下限之间,避免因层间温度过高导致焊缝区晶粒粗化韧性下降,或因温度过低而增加淬硬倾向。后热及焊后热处理是重要的补充控制手段,后热可使氢加速逸出,焊后热处理则用于消除残余应力、改善接头韧性或恢复耐蚀性^[2]。

4.2 操作人员的技术能力规范

焊接质量的高度人性化特征决定了操作人员是质量控制链条中最活跃、最具决定性的因素。建立一套严谨、规范的焊工技能管理体系至关重要。一名合格的管道焊工,不仅需要掌握手眼协调的稳定操作技能,还需具备基本的金属学、焊接原理、识图及安全知识。其技能获取必须通过系统化的培训,包括理论学习与大量的实际操作训练。更为关键的是,焊工必须通过针对具体工程项目的焊接工艺评定试验,即使用项目将采用的管材、焊材、焊接位置及工艺,在监督下焊接试件,该试件经无损检测和破坏性检验合格后,焊工方能取得针对该项目的上岗资格。这种资格通常是针对特定材质、壁厚范围和焊接位置的,并且设定了有效期,到期需重新考核。除了技能,焊工的职业道德与质量意识培养同样不可忽视,应使其深刻理解手中焊枪所承载的安全责任,养成严格遵守工艺纪律、一丝不苟对待每一道焊缝的职业习惯^[3]。

4.3 检验与检测技术应用范围

质量检验体系是验证焊接成果是否符合设计预期的“裁判所”,它由破坏性检验和无损检测两大支柱构成。破坏性

检验通常在焊接工艺开发评定阶段或对批量产品进行质量仲裁时采用,通过从焊接试板上截取样块,进行拉伸、弯曲、冲击、硬度、金相宏观与微观分析等试验,以获得接头全面的力学性能数据和内部组织信息,其结果具有结论性。而在工程现场,无损检测由于其不破坏被检对象的特性,成为对每一个焊缝接头进行百分之百或抽样检验的主要手段。射线检测利用X或 γ 射线穿透焊缝,在胶片或数字探测器上形成影像,对气孔、夹渣、缩孔等体积型缺陷显示直观,且能永久保存记录,但其对裂纹等面状缺陷的检出灵敏度受方向影响较大,且有辐射安全限制。超声波检测利用高频声波在材料中传播遇到缺陷时产生反射的原理,对裂纹、未熔合等面积型缺陷非常敏感,且能估算缺陷深度,适用于厚壁管检测,但对操作者经验依赖度高,且结果不直观。磁粉检测适用于铁磁性材料,能灵敏地检测表面及近表面的缺陷,渗透检测则适用于所有非多孔性材料表面的开口缺陷检测。

4.4 焊接缺陷的预防机制

卓越的质量控制理念强调“预防优于纠正”。建立系统的焊接缺陷预防机制,需要深入理解每一种常见缺陷的生成机理。裂纹是最危险的缺陷,冷裂纹与焊接接头的淬硬组织、扩散氢含量及拘束应力三要素直接相关,其预防策略是一整套组合拳:选用低氢或超低氢焊接材料并严格烘干;根据碳当量与壁厚实施足够的预热与后热;优化接头设计以降低拘束度;控制焊接热输入以获得有利的组织。热裂纹则与焊缝凝固末期的低熔点共晶物有关,预防需从控制焊缝化学成分、调整凝固模式入手。气孔主要由熔池中溶解的气体在凝固前来不及逸出造成,预防关键在于杜绝气体来源:确保焊区及焊材干燥清洁;检查保护气路密封性;在野外有风处设置防风棚。夹渣与未熔合多因焊接参数不当、操作手法不良或层间清理不净导致,预防需优化电流电压匹配、保证合适的焊枪角度与摆动方式、以及彻底的清渣。通过系统的焊接工艺评定,可以在实验室条件下探索并确定能够规避主要缺陷的“工艺窗口”。在工程实践中,推行基于统计过程控制的质量数据管理,持续收集焊接参数、检验结果及缺陷类型数据,运用统计分析工具识别异常趋势,追溯至人、机、料、法、环等根本原因,从而及时采取纠正与预防措施,将质量控制从被动响应推向主动预测与干预。

4.5 质量管理的系统构建

将前述所有分散的技术控制点、检验活动与管理要求整合为一个协调、高效、自洽运行的有机整体,必须依赖一个成文的、系统化的焊接质量管理体系。该体系的构建应以

国际国内通用的质量管理标准为骨架,融合管道焊接领域的特殊专业技术规范与具体项目合同要求。体系文件通常呈金字塔结构:顶端是阐述管理意图的质量方针与目标;下层是描述跨职能活动流程的管理性程序文件;再下层是针对具体作业的技术性规程、作业指导书与工艺卡片;底层则是用于记录各类活动的表格、报告等。体系运行的核心活动构成一个“计划-执行-检查-处理”的闭环。这包括:项目初始阶段的设计焊接性审查与制造焊接工艺设计;采购过程中对焊接材料供应商的严格评价与入场后的抽样复验;制造与施工阶段对“人、机、料、法、环”所有要素的持续符合性验证,以及焊接过程的实时监控与参数记录;通过专职检验员巡检、质量工程师抽检、第三方监理或业主代表监督等多层次、多角度的独立验证活动;对发现的任何不合格品进行标识、隔离、记录、原因分析、处置方案评审及实施纠正;定期进行内部质量审核与管理评审,以评估体系运行的有效性,识别改进机会,推动质量管理水平的螺旋式上升。

5 结语

管道焊接,是一门融合了材料科学、热力学、流体力学、电学及自动控制等多学科知识的精深技艺,更是一项涉及设计、工艺、操作、检验与管理等多环节协同的复杂系统工程。其最终质量的铸就,是理论基础、技术细节、人员素养与系统管理共同交织作用的成果。本文通过层层递进的论述,试图阐明这样一个核心观点:保障管道焊接的高质量,既需要深入掌握焊接冶金与工艺的内在科学规律,对每一个技术参数的精雕细琢,对每一位操作人员的匠心培养,也需要构建一个贯穿全局、闭环反馈、持续改进的系统化管理框架。当前,焊接技术正朝着自动化、数字化、智能化的方向迅猛发展,智能焊接机器人、在线视觉传感、焊接大数据分析云计算等新技术,为实现焊接过程的精确感知、智能决策与自适应控制开辟了崭新前景。然而,无论技术工具如何演进,对焊接本质规律的敬畏之心、对工艺纪律的恪守之责、对人员价值的重视之道以及系统化质量管理的思维之纲,始终是不可或缺的基石。

参考文献

- [1] 张新龙,云保洋,步爱军.化工设备安装中焊接技术的质量控制措施分析[J].你好成都(中英文), 2023(27):0229-0231.
- [2] 毛晨,李占宇.石油化管道的焊接工艺与质量控制[J].中国图片(中英文), 2024(22):219-220.
- [3] 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(6):28-30.