

化工不锈钢管道氩弧焊焊接工艺优化研究

桂顺江

内蒙古承泰建设工程科技有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017100

摘要: 化工不锈钢管道的焊接质量直接关系到生产安全与稳定性。针对当前氩弧焊工艺存在的参数控制不精准、背面保护不足等问题,本文从焊接材料、工艺参数及设备改进三方面提出优化方案。通过选用匹配焊丝、高纯氩气,优化脉冲参数与背面保护工艺,并升级数字化焊机与充氩工装,有效降低了热输入与缺陷率。经试验验证,优化后焊缝力学性能提升,晶间腐蚀与点蚀深度显著减小,耐腐蚀性满足化工苛刻工况要求,为不锈钢管道高质量焊接提供了可靠技术路径。

关键词: 不锈钢管道; 氩弧焊; 工艺优化; 背面保护; 耐腐蚀性能

引言: 化工不锈钢管道是输送腐蚀性介质、保障生产安全的核心系统,其焊接质量至关重要。氩弧焊因成形好、质量稳定成为主流工艺,但传统工艺在参数控制、背面保护等方面存在不足,易导致焊缝缺陷与耐蚀性下降,威胁管道长期安全运行。随着化工行业对管道可靠性要求的提升,亟需对现有氩弧焊工艺进行系统性优化。本文分析当前工艺问题,提出材料、参数与设备协同优化策略,并通过试验验证其有效性,旨在提升化工不锈钢管道的焊接质量与服役寿命。

1 化工不锈钢管道的重要性

化工不锈钢管道是化工生产系统的核心组成部分,承担着腐蚀性介质、高温高压流体的输送任务,直接决定化工生产的安全性、稳定性和连续性。化工生产工况极端,常涉及硫酸、盐酸等强腐蚀性介质,以及数百摄氏度的高温、数十兆帕的高压环境,普通管材易发生腐蚀、泄漏,而不锈钢凭借优异的耐腐蚀性、高强度和良好的韧性,能有效抵御介质侵蚀和工况冲击,降低泄漏风险。据统计,全球超过12000家化工厂依靠不锈钢管道处理腐蚀性物质,67%的化学加工线需要高级不锈钢管,某化工企业用其替代传统碳钢管后,年维护成本降低60%。同时,不锈钢管道清洁度高、不易滋生杂质,能保障化工产品纯度,避免因管道污染导致产品报废^[1]。另外,不锈钢管道使用寿命长、维护便捷,可减少停机检修次数,降低生产成本,是化工行业实现绿色、高效、安全生产的重要基础,其质量直接关系到生产人员人身安全、企业经济效益及生态环境安全。

2 化工不锈钢管道氩弧焊焊接工艺现状

当前,氩弧焊因焊缝成形美观、热影响区小、无飞溅、焊接质量稳定等优势,已成为化工不锈钢管道焊接的主流工艺,广泛应用于304L、316L等常用不锈钢管

道的连接作业。随着化工行业向大型化、精细化方向发展,对管道焊接质量的要求不断提升,氩弧焊焊接工艺也在逐步完善,形成了一套相对成熟的操作流程。

2.1 常见焊接工艺参数

化工不锈钢管道氩弧焊焊接工艺参数的选择,需结合管材厚度、直径、材质及焊接位置综合确定,核心参数包括焊接电流、电弧电压、焊接速度、氩气流量及钨极参数等,目前行业内已形成相对统一的参考标准。对于壁厚1.0~3.0mm的薄壁不锈钢管,焊接电流通常控制在60~120A,电弧电压10~14V,焊接速度80~150mm/min,氩气流量8~12L/min,选用Φ1.6mm或Φ2.0mm的钨钨极;对于壁厚3.0~6.0mm的中厚壁管,焊接电流调整为100~180A,电弧电压11~15V,焊接速度60~120mm/min,氩气流量10~15L/min,钨极直径选用Φ2.4mm或Φ3.2mm。此外,背面充氩流量通常控制在5~8L/min,置换时间需满足 $t \geq 0.5\sqrt{V}$ (V为腔体体积),确保排气口 $O_2 < 0.02\%$ 。焊接位置为立焊、横焊时,需将电流降低至平焊的80%-90%,严格控制熔池形态,避免出现缺陷。这些参数需根据实际工况微调,确保焊缝成形良好、熔透均匀。

2.2 存在问题

化工不锈钢管道氩弧焊焊接工艺目前仍存在诸多突出问题,影响焊接质量稳定性。一是焊接参数控制不精准,部分操作人员凭借经验设定参数,未结合管材材质、壁厚及工况进行针对性调整,易出现电流过大导致热影响区扩大、晶粒粗大,或电流过小导致未焊透、未熔合等缺陷。二是背面保护不到位,氩气纯度不足、流量匹配不合理或置换不彻底,导致焊缝背面氧化发黑,形成富Cr贫化区,丧失钝化能力,为晶间腐蚀埋下隐患^[2]。三是焊前清洁不规范,坡口两侧未彻底清除油污、

氧化膜，或焊丝烘干不彻底，易产生气孔、夹渣等缺陷。四是操作人员技能水平参差不齐，部分人员缺乏专业培训，运枪手法不规范、送丝节奏不均匀，导致焊缝成形不良、咬边、内凹等问题。此外，部分企业焊接设备老化，缺乏精准参数调控功能，也难以保障焊接质量的一致性。

2.3 对化工生产的影响

氩弧焊焊接工艺存在的问题，会对化工生产产生多方面的不利影响，严重时甚至引发安全事故。焊接缺陷会降低管道的力学性能和耐腐蚀性能，在高温高压、强腐蚀工况下，未焊透、裂纹、气孔等缺陷易导致管道泄漏，不仅造成化工原料浪费，还可能引发火灾、爆炸等安全事故，威胁生产人员人身安全。焊缝背面氧化、晶间腐蚀等问题会缩短管道使用寿命，增加管道更换和维护成本，导致生产停机，影响生产连续性，降低企业经济效益。同时焊接缺陷可能导致管道内壁粗糙度增加，不符合医药、精细化工等行业的洁净要求，污染输送介质，影响产品纯度和质量，导致产品报废，损害企业市场信誉。泄漏的腐蚀性介质还会污染土壤、水源，破坏生态环境，面临环保处罚，进一步增加企业运营压力。

3 化工不锈钢管道氩弧焊焊接工艺优化方法

针对当前化工不锈钢管道氩弧焊焊接工艺存在的问题，结合化工生产工况需求，需从焊接材料、工艺参数、焊接设备三个核心维度进行系统优化，全面提升焊接质量，保障管道安全稳定运行。优化过程中需遵循“适配性、精准性、高效性”原则，结合管材材质、输送介质、工况条件等实际情况，制定个性化优化方案，既要解决现有缺陷问题，也要兼顾生产效率和成本控制。

3.1 焊接材料选择优化

焊接材料的选择直接决定焊缝质量，需根据母材材质、输送介质及工况条件进行优化匹配，杜绝因材料不兼容导致的焊接缺陷。对于奥氏体304/316L不锈钢管道，当服役介质含氯离子 $\geq 50\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，焊丝须升级至含Mo的ER316L-Si，且碳含量 $\leq 0.025\%$ ，防止刀状腐蚀；双相钢2205管道应选用ER2209焊丝，Ni含量比母材高2%，补偿焊接过程中奥氏体化造成的相平衡偏移^[3]。氩气优先选用纯度 $\geq 99.99\%$ 的高纯度氩气，背面保护可采用5% H_2 +95%Ar混合气，利用 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ 反应将 O_2 降至 $< 0.005\%$ ，避免背面氧化。焊丝选用真空包装产品，拆封后24h内用完，逾时须 $250^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ 烘干，随取随用；坡口清理禁用含氯清洁剂，避免 Cl^- 残留引发应力腐蚀开裂。

3.2 焊接参数调整优化

结合管材规格和工况，对焊接参数进行精准优化，实现参数与焊接需求的精准匹配，减少人为操作误差。采用小电流、快焊速、薄焊层的工艺原则，根部焊接选用 $\Phi 2.0\text{mm}$ 焊丝，电流控制在60~80A，焊接速度80~120mm/min，热输入 $\leq 0.8\text{kJ}/\text{mm}$ ；盖面焊接摆宽 $\leq 8\text{mm}$ ，层厚 $\leq 2.5\text{mm}$ 。优化氩气流量匹配，正面氩气流量12~14L/min，背面5~8L/min，根部间隙 $> 2\text{mm}$ 时，背面流量下调30%，避免氩涡卷吸。控制层间温度，化工洁净级管道层间温度 $\leq 60^\circ\text{C}$ ，采用湿棉布或铜管水冷循环，缩短高温停留时间，避免在450~850 $^\circ\text{C}$ 敏化区滞留。收弧时采用电流衰减+滞后停气5~7s，确保高温收弧区仍在保护下，杜绝弧坑裂纹；起弧前预送气2s，避免钨极污染。

3.3 焊接设备改进优化

焊接设备的性能对焊接参数稳定性及焊接质量起着决定性作用。当前，为进一步提升焊接水平，需对现有设备开展全面升级改造，着重提升其自动化与精准化程度。首先，淘汰那些老化严重、参数调控精度低的焊接设备，引入具有脉冲焊接功能的氩弧焊机。这种焊机脉冲频率可在0.5 - 2Hz范围内灵活调节，基值电流设定为峰值的30%，能有效降低20%的热输入，显著减少面内变形，提高焊接质量。其次，为焊机配备精准的氩气流量控制系统和温度监测装置。通过实时监控氩气流量和层间温度，确保焊接参数始终处于稳定状态，为高质量焊接提供保障。再者，改进焊枪结构，选用可调节钨极伸出长度的焊枪。将钨极修磨成20 - 25 $^\circ$ 锥角、平端0.5mm，并保持3 - 4mm的伸出长度，以此提升电弧集中度。另外，配备背面充氩专用工装，根据管道直径差异采用不同充氩方式，DN $\leq 50\text{mm}$ 管道采用整管充氩，DN $> 50\text{mm}$ 采用局部气囊随焊前移，既节省氩气又提升保护效果。最后，新增USB内窥镜，方便实时观察根部熔透情况，以便及时调整焊接参数，确保焊接效果达到最佳。

4 优化后焊接工艺效果验证

为验证化工不锈钢管道氩弧焊焊接工艺优化方案的有效性，需通过科学的试验设计、系统的性能测试，全面评估优化后焊缝的质量、力学性能和耐腐蚀性能，确保优化后的工艺满足化工生产工况要求。试验需遵循“公平、公正、科学”的原则，选取与实际生产一致的管材、焊接材料和工况条件，设置优化前工艺为对照组，优化后工艺为试验组，通过对比测试，明确优化方案的优势，为工艺的推广应用提供数据支撑。

4.1 试验设计

试验选用化工行业常用的316L不锈钢管道,规格为 $\Phi 50\text{mm}\times 3\text{mm}$,选取优化前后两种氩弧焊工艺进行对比试验,每组设置3个试验样本,确保试验结果的可靠性。试验组采用优化后的焊接工艺,包括ER316L-Si焊丝、纯度99.99%氩气(背面用5% H_2 +95%Ar混合气)、精准调控的焊接参数及改进后的焊接设备;对照组采用传统焊接工艺,保持其他条件与试验组一致。试验前对管材进行严格清洁,坡口两侧50mm范围内打磨至露出金属光泽,用丙酮去除油污;焊接过程中实时记录焊接参数、氩气流量和层间温度;焊后对焊缝进行外观检查,剔除明显缺陷样本。采用田口试验设计方法,以焊接电流、焊接速度、氩气流量为输入参数,以焊缝合格率、根部高度为评价指标,优化试验方案,确保测试结果具有代表性。

4.2 力学性能测试

力学性能测试是评估焊接质量的关键环节,主要聚焦于焊缝的抗拉强度、屈服强度、冲击韧性以及硬度这几项重要指标,并严格依照国家标准 GB/T 2651 - 2008、GB/T 2650 - 2008 的相关要求开展测试工作。在测试过程中,从试验组和对照组的焊接样本里,分别精准截取标准拉伸试样、冲击试样和硬度试样,且每组都准备3个试样,以保证测试结果的准确性与可靠性^[4]。拉伸测试借助万能试验机进行,以此来测定焊缝的抗拉强度和屈服强度,明确要求抗拉强度不得低于母材的90%。冲击测试使用冲击试验机,在-20℃的特定低温环境下开展,规定冲击韧性不能低于40J/cm²。硬度测试则采用布氏硬度计,对焊缝以及热影响区的硬度进行检测,要求硬度值处于180 - 220HB的区间内,并且与母材的硬度差值不得超过30HB。测试结果令人满意,试验组焊缝的抗拉强度、屈服强度相较于对照组提升了8% - 12%,冲击韧性提升15%以上,硬度分布均匀,没有出现明显的硬脆现象,各项力学性能完全满足化工管道的使用要求。

4.3 耐腐蚀性能测试

结合化工生产强腐蚀工况,采用晶间腐蚀测试和点蚀测试两种方式,验证优化后焊缝的耐腐蚀性能,参考GB/T 4334-2020E法开展测试。晶间腐蚀测试采用5周期沸腾Cu-CuSO₄-16% H_2SO_4 试验,将试样浸泡后进行弯曲试验,观察是否出现裂纹;点蚀测试采用3.5%NaCl溶液浸泡试验,浸泡时间72h,观察试样表面是否出现点蚀坑,并测量点蚀深度。测试结果表明,对照组试样经晶间腐蚀测试后出现轻微裂纹,点蚀深度达0.08mm;试验组试样无裂纹产生,点蚀深度 $\leq 0.02\text{mm}$,且表面无明显氧化痕迹。另外,试验组焊缝经酸洗钝化处理,形成致密的Cr₂O₃钝化膜,膜厚达2~3nm,点蚀电位提升120mV,耐腐蚀性较对照组显著提升,可有效抵御化工生产中强腐蚀介质的侵蚀,延长管道使用寿命。

结束语

本文针对化工不锈钢管道氩弧焊工艺存在的关键问题,提出了系统性优化方案,并通过试验验证了其有效性。优化后的工艺显著提升了焊缝的力学性能与耐腐蚀性,满足化工苛刻工况要求。该研究成果为提高化工管道焊接质量提供了可靠技术支撑,对保障化工生产安全、延长设备寿命具有重要意义,具备良好的工程应用价值与推广前景。

参考文献

- [1]韩峰,张建军,郭朝辉,等.厚壁不锈钢管道机器人全位置激光焊接工艺研究[J].电焊机,2023,53(9):37-46.
- [2]应道宴,汤晓英,尤子涵,等.压力管道工程中有关焊接诸多认知误区和盲区浅析(一)——焊接接头[J].化工设备与管道,2024,61(4):85-91.
- [3]周金辉,田锁杰,周艺霖,等.大口径不锈钢管道陶瓷衬垫焊接技术[J].安装,2024(5):68-69.
- [4]姜万军,王金富,牛存厚,等.奥氏体不锈钢管道在石油化工装置的应用[J].炼油技术与工程,2023,53(9):35-37.