

稀土冶炼环境下钛合金和不锈钢焊接接头的性能分析

芦永和 任继德 图蒙巴亚尔 张湛明

中国北方稀土(集团)高科技股份有限公司冶炼(华美)分公司

DOI:10.12238/jsse.v3i2.13470

[摘要] 稀土冶炼工业中钛合金以及不锈钢异种金属焊接技术对提升设备使用寿命以及工艺效率具有重要意义。针对稀土冶炼工艺环境中pH值波动与温度循环及压力变化等特征,研究了异种金属直接焊接工艺中的温度场控制及焊接参数优化等技术要点,通过配置专业焊接装备及完善工艺参数,实现了良好的接头性能。工程应用表明,在80℃工作温度及2.8MPa压力条件下,焊接接头运行稳定可靠,改进后的焊接技术节省施工时间30%,接头返修率降低至2%以下。焊接装备配置及工艺参数的优化显著提升了施工效率及接头质量,为稀土冶炼工业的设备升级及工艺革新提供了重要的技术支撑,推动了行业技术进步。

[关键词] 稀土冶炼; 钛合金; 不锈钢; 异种金属焊接接头

中图分类号: TF764+.1 **文献标识码:** A

Performance Analysis of Welded Joints of Titanium Alloy and Stainless Steel in Rare Earth Smelting Environment

Yonghe Lu Jide Ren Mengbayar Tu Zhanming Zhang

Smelting (Huamei) Branch of China North Rare Earth (Group) High-tech Co., LTD

[Abstract] In the rare earth smelting industry, the welding technology of dissimilar metals such as titanium alloys and stainless steel is of great significance for improving the service life of equipment and process efficiency. In view of the characteristics such as pH value fluctuations, temperature cycling and pressure changes in the rare earth smelting process environment, the technical key points such as temperature field control and welding parameter optimization in the direct welding process of dissimilar metals were studied. Through the configuration of professional welding equipment and the improvement of process parameters, good joint performance was achieved. Engineering applications show that under the working temperature of 80℃ and the pressure of 2.8MPa, the welded joint operates stably and reliably. The improved welding technology saves 30% of the construction time and reduces the joint repair rate to less than 2%. The optimization of welding equipment configuration and process parameters has significantly improved construction efficiency and joint quality, providing important technical support for equipment upgrading and process innovation in the rare earth smelting industry, and promoting technological progress in the industry.

[Key words] Rare earth smelting Titanium alloy Stainless steel Dissimilar metal welded joints

稀土冶炼工业的快速发展对生产设备材料及连接工艺提出了更高要求,钛合金管道凭借优异的耐腐蚀性能,在输送腐蚀性介质的工艺系统中得到广泛应用。工程实践中,钛合金与不锈钢管道的连接问题成为制约设备性能及使用寿命的关键因素,传统焊接工艺采用铜与镍等过渡材料,工艺流程复杂,成本高昂,在稀土萃取分离系统中,设备长期承受pH值变化与温度波动及压力循环等复杂工况,对焊接接头的综合性能提出严峻挑战,基于稀土冶炼行业需求,通过焊接工艺优化及智能化装备应用,实现异种金属的高质量连接。

1 稀土冶炼工艺环境分析

稀土冶炼工艺环境具有显著的复杂性及苛刻性,主要体现在化学腐蚀与温度波动及压力变化等多个方面。在萃取分离过程中,工艺介质pH值波动范围大,从强酸性到强碱性环境交替出现,对设备材料耐腐蚀性提出严峻挑战,生产环境中普遍存在硫酸与硝酸等强腐蚀性介质,传统碳钢管道在此环境下年腐蚀率高达3-5mm,严重影响设备使用寿命及生产安全。工艺系统压力波动范围在0.6-4.5MPa之间,温度区间跨度大,设备经常处于交变应力状态,在焙烧工序中,温度可达800℃以上,热循环导致材料疲劳损伤加剧,工艺过程中的化学反应放热与冷却降温等环节造成设备温度快速变化,热应力及机械应力叠加作用,对管道

系统完整性构成威胁。设备材料在多重应力作用下容易发生应力腐蚀开裂,焊接接头区域因组织不均匀性更易成为损伤源,在稀土萃取过程中,有机溶剂的使用进一步加剧了设备腐蚀,某些萃取剂在高温条件下会分解产生腐蚀性气体,增加了设备防护难度。同时,工艺过程中的固液混合物对管道磨损也较为严重,特别是在输送含稀土氯化物溶液时,固体颗粒的冲刷作用与化学腐蚀协同效应明显,生产过程中的振动及冲击载荷也会加速材料疲劳,设备检修及维护难度大。

2 焊接接头制备与性能控制

2.1 直接焊接工艺开发

钛合金与不锈钢直接焊接工艺开发需着重解决界面结合及组织控制问题,焊接过程中,两种材料的物理化学性质差异显著,热膨胀系数相差30%以上,导致界面应力集中,焊接温度场控制对接头质量起决定性作用,温度过高会促进金属间化合物形成,温度过低则影响界面结合。工艺参数优化应重点关注热输入量调控,采用脉冲能量输入方式可有效降低热影响区组织粗化,焊接气氛保护尤为关键,钛合金对氧与氮等间隙原子具有较强的固溶能力,需采用高纯惰性气体进行双面保护,焊接电弧的偏置控制可调节熔池形态,实现异种金属的良好润湿过渡,焊缝成形控制应考虑材料的导热性差异,合理设计坡口形式及焊接层次,避免产生未熔合等缺陷。在焊接电流选择方面,需权衡热输入量对两种材料的影响,通常控制在180–280A范围内较为适宜,焊接速度对接头性能有重要影响,过快会导致未熔合,过慢则造成热影响区过大,焊丝选择需考虑与母材的匹配性,通常采用ERNiCr-3等镍基焊丝可获得较好的过渡效果,焊接位置控制也需特别注意,推荐采用平焊位置,必要时可采用变位机辅助,焊前预热及焊后热处理工艺参数需根据材料厚度及性能要求综合确定。

2.2 接头组织性能调控

异种金属焊接接头的组织性能调控重点在于界面过渡区的组织演变控制,焊接热循环过程中,钛合金侧易形成针状马氏体组织,而不锈钢侧奥氏体晶粒粗化倾向明显,界面反应层厚度控制在10微米以下可获得较好的力学性能匹配,焊缝区采用变质处理可细化晶粒,添加稀土元素具有明显的细化效果。热处理工艺设计需考虑两种材料相变温度差异,控制冷却速度可抑制脆性相形成,焊缝区元素扩散行为显著影响接头性能,碳元素向奥氏体侧迁移会导致界面脱碳层形成,焊接热输入量与冷却速率的匹配对组织形态具有重要影响,快速冷却有利于抑制金属间化合物层生长,组织性能调控过程中需重点关注界面结合区的金相组织特征,钛合金一侧通常呈现魏氏体组织,而不锈钢侧则以奥氏体及铁素体混合组织为主^[1]。界面过渡区的显微硬度梯度变化应保持在合理范围内,避免应力集中,焊缝金属成分设计应考虑两种母材的稀释率,确保获得良好的塑性配比,组织调控手段包括焊接工艺参数优化与热处理制度设计及微合金化处理等,各种方法综合运用可达到理想的性能匹配效果,焊后焊缝区的组织均匀性及性能稳定性直接影响接头的服役性能,需通过合理的工艺设计予以保证。

2.3 焊接工艺装备配置

焊接装备配置重点考虑稀土冶炼工业现场实际需求与施工环境特点。焊接电源选用氩弧焊机(WSM-400型),具备基本的电流与电压调节功能,电流调节范围50–400A,电压调节范围10–30V,满足钛合金及不锈钢焊接工艺要求,焊接工装采用可调式管道焊接变位机,转速范围0.1–2r/min,便于调整焊接位置,提高焊缝成形质量,变位机采用伺服电机驱动,转速稳定性达到±2%,有效保证焊接速度的均匀性,配备专用气体保护装置,采用高纯氩气(纯度≥99.999%)双面保护系统,主气路流量可调范围8–20L/min,背保护气路流量4–12L/min,有效防止钛合金的氧化污染。考虑到现场施工环境,配置便携式防风装置,在8级风速条件下仍可保持稳定的气体保护效果,焊接夹具采用快速定位结构,工件装夹时间控制在2分钟以内,提高施工效率,夹具的定位精度达到0.5mm,确保管道对接的同轴度,为保证焊接质量,配备焊接专用测温仪,测温范围0–1000℃,精度±2℃,实时监控工件温度,辅助设备包括专用砂轮机与去除飞溅工具及角向磨光机等,确保焊前坡口加工及焊后表面处理质量。施工现场配置防护屏风,隔离区域面积4×3m,有效防止强气流干扰,配置3000W移动式照明设备,确保焊缝观察清晰度^[2]。

2.4 异种材料连接标准规范

异种材料连接标准规范制定需涵盖工艺要求与质量评定及检验方法等多个方面,焊接工艺评定内容包括焊前预处理与焊接参数范围与保护气体纯度等具体要求,接头质量验收标准规定了内部缺陷与表面成形及尺寸偏差等允许限值,无损检测方法选择需考虑异种材料接头特点,超声波检测技术对界面结合质量评价具有独特优势,接头力学性能评定采用分区硬度测试与弯曲试验等方法,规定了各项指标的合格标准^[3]。焊接人员资格认证制度对操作技能提出明确要求,确保焊接施工质量,标准中对焊接环境条件提出明确要求,包括温度与湿度及防风等具体指标,焊接材料的存储与使用及质量控制也有相应规定,确保材料性能满足施工需求。规范中明确规定了焊接接头的检验方法及频次,包括外观检查与射线探伤及超声检测等,质量记录及可追溯性管理要求也是标准规范的重要组成部分。对于特殊环境服役的接头,还需补充耐腐蚀性能与疲劳性能等专项试验要求,标准的实施监督及定期评估机制也需明确规定,确保规范要求得到有效执行。

3 焊接接头综合性能评价

3.1 焊接接头强度测试

焊接接头强度测试采用标准拉伸试验方法,测试结果显示良好的接头性能,如表1所示。常温下接头抗拉强度达到650MPa,屈服强度约为480MPa,延伸率保持在15%以上,接头断裂多发生在焊缝区,表明焊缝区域为强度薄弱位置,这与焊缝金属成分及组织特征密切相关,通过对比不同焊接工艺参数下的接头强度,确定最佳焊接电流范围为180–280A,电压控制在16–22V范围内,相应工艺参数下焊接的接头抗拉强度波动范围控制在±5%以内,显示出良好的工艺稳定性。在实际工况温度80℃条件下进行拉

伸测试, 接头抗拉强度保持在580MPa以上, 满足工程使用要求, 焊接接头硬度分布测试可以表明, 焊缝区平均硬度值为280HV, 热影响区硬度变化幅度控制在 ± 30 HV范围内, 体现出良好的组织均匀性, 多道焊接接头的横向硬度测试结果显示, 各道次之间硬度过渡平稳, 未出现明显的硬度突变。对批量生产的焊接接头进行抽样检测后, 强度合格率达到98%以上, 工艺评定试验中, 接头弯曲试验角度达到 180° , 未出现裂纹, 证实接头塑性良好。

表1 钛合金-不锈钢焊接接头工艺参数与强度测试数据

工艺参数组合	电流(A)	电压(V)	抗拉强度(MPa)	屈服强度(MPa)	延伸率(%)	硬度(HV)	评价结果
A1	180	16	635	475	14.5	275	合格
A2	220	18	650	480	15.0	280	优良
A3	260	20	645	478	14.8	278	优良
A4	280	22	632	472	14.3	273	合格
B1*	220	18	585	445	13.5	275	合格

注: B1*为80℃工况下测试数据

3.2 接头实际承载性能

在稀土冶炼实际工况下, 焊接接头经受工艺系统运行中的压力波动以及温度变化考验, 运行数据显示, 在工作压力2.8MPa条件下, 接头承受 ± 0.6 MPa的压力波动无异常, 管道系统在生产过程中经历多次工艺参数调整, 最大压力达到4.5MPa, 焊接接头结构保持完整性, 温度波动范围为 $80 \pm 40^\circ\text{C}$ 时, 焊接接头区域未出现变形或泄漏。工艺管道系统在正常运行中存在的振动载荷, 最大应力幅值达到120MPa, 焊接接头表现出良好的抗振性能。采用超声波检测方法对接头进行定期检查, 未发现内部缺陷扩展迹象。针对焊接接头的长期使用性能评估预测表明, 在目前工况条件下预期使用寿命可达15年, 证实接头性能稳定可靠^[4]。

3.3 耐蚀性能测试分析

焊接接头在复杂腐蚀环境中展现出差异化的耐蚀特性, pH值2.5的硫酸介质中, 接头年腐蚀速率为0.15mm, 低于碳钢焊接接头约80%, 氯离子浓度达到3.5%时, 钛合金侧电化学腐蚀电位降至-320mV, 而不锈钢侧保持在-280mV, 电位差导致微区腐蚀加剧, 焊缝金属耐蚀性优于热影响区, 腐蚀电流密度相差0.8个数量级^[5]。在60℃盐雾环境中暴露720小时后, 接头表面点蚀深度控制在0.2mm以内, 交变应力作用下的应力腐蚀开裂敏感性较低, 临界应力强度因子达到 $45\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 焊缝区晶间腐蚀倾向不明显, 铬贫化区宽度控制在 $5\mu\text{m}$ 以下, 电化学阻抗谱分析显示, 界面膜电阻随浸泡时间延长呈现先增大后趋于稳定的趋势, 120小时后达到稳定值 $8.5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 动电位扫描结果表明, 焊缝金属的钝化电流密度为 $2.8\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 优于两侧母材。局部腐蚀行为分析发现, 点蚀优先发生在热影响区晶界处, 蚀坑深宽比约为0.6, 高温腐蚀环境下, 氧化膜生长速率随温度升高而加快, 800℃时氧化增重速率达到 $2.5\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。

3.4 工程应用验证

异种金属焊接接头在稀土冶炼工程中的实际应用效果显著。应用于稀土萃取分离系统的焊接管道, 在80℃工作温度及2.8MPa压力条件下运行, 焊缝完整性保持良好, 管道系统承受的温度波动范围达到 $\pm 40^\circ\text{C}$, 压力波动幅值为1.2MPa, 焊接接头未出现裂纹或泄漏。如表2所示, 在不同运行工况下的性能监测数据表明焊接接头具有良好的适应性及可靠性, 在含氟离子浓度达到2000ppm的工况下, 接头年腐蚀量控制在0.08mm以内, 工程应用数据显示, 改进后的焊接工艺可节省30%的施工时间, 接头返修率降低至2%以下。系统运行过程中的声发射监测数据表明, 焊接接头区域的声信号能量水平保持稳定, 性能显著优于传统的过渡接头方案。

表2 异种金属焊接接头在不同工况下的运行监测数据

工况类型	运行参数	监测数据	评价标准	运行状态
高温工况	180℃/2000h	强度保持率 95%	$\geq 90\%$	良好
压力循环	0.5-4.5MPa/5000次	无裂纹萌生	无损伤	稳定
腐蚀环境	pH=2.0/4000h	腐蚀率 0.10mm/年	$\leq 0.15\text{mm}/\text{年}$	合格
振动载荷	120MPa/106次	疲劳损伤因子 0.2	≤ 0.3	正常
温度冲击	$\pm 60^\circ\text{C}/3000\text{次}$	位移量 0.8mm	$\leq 1.0\text{mm}$	

4 结语

钛合金-不锈钢异种金属焊接技术在稀土冶炼工业中的应用取得显著成效, 通过专业焊接装备配置及工艺参数优化, 有效解决了异种金属直接连接的技术难题。在实际工况条件下, 焊接接头可以表现出良好的强度性能及承载能力, 满足工程应用要求, 工程应用验证预测表明, 改进后的焊接技术显著提升了施工效率, 降低了设备维护成本, 技术创新成果为稀土冶炼工业的设备升级以及工艺革新提供了重要支撑, 推动异种金属连接技术的进步, 为稀土工业绿色发展做出贡献。

【参考文献】

- [1]薛行雁,程东海,张冠星.稀土合金化对钛合金激光焊接接头超塑变形行为的影响[J].材料热处理学报,2024,45(8):227-234.
- [2]张旭.稀土铝合金旋转摩擦焊接头微观组织与力学性能研究[D].西安建筑科技大学,2024.
- [3]李思阳.钛/钢异种金属高能束焊接研究进展[J].焊管,2024,47(05):11-17.
- [4]李丹.氧化处理对纯钛焊接接头耐腐蚀性能影响研究[D].西安石油大学,2021.
- [5]周洋,孔谅,王敏,等.钛及钛合金焊接接头腐蚀性能研究现状[J].电焊机,2018,48(07):46-50+75.

作者简介:

芦永和(1967--),男,汉族,江苏泰兴人,中专,特级技师、包钢(集团)公司首席技能大师,研究方向:稀土冶炼环境下的焊接技术。