

结构型节能阳极导杆组机器人焊接工艺

尚和鹏¹, 王文杰¹, 赵婷², 曹国武³, 王元庚¹, 胡欣宇¹, 伍永福⁴, 赵玉春⁵

(1. 内蒙古科技大学机械学院, 内蒙古包头 014010;

2. 内蒙古北方重工业集团科研试制中心, 内蒙古包头 014010;

3. 内蒙古电力有限责任公司鄂尔多斯供电分公司, 内蒙古鄂尔多斯 017004;

4. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古包头 014010;

5. 内蒙古安达恒远科技有限公司, 内蒙古包头 014010)

[摘要] 阳极导杆组是电解铝生产的重要导电部件,其导电性能和使用寿命是衡量经济效益的重要指标。为解决常规焊接存在的质量不稳定问题,本文分析目前自动化焊接存在的弊病,提出一种结构型节能阳极导杆组机器人焊接方案,对阳极导杆组坡口切割、定位装夹、视觉检测、焊接工艺进行全方位的改革,利用并改良阳极钢爪双向双焊道堆焊、阳极导杆钢-铝直焊等焊接工艺,解决焊接开裂、破损、压降过高等问题。生产实践表明,结构型阳极钢爪压降明显低于铸造型钢爪,与传统铸钢爆炸焊块相比,钢-铝直焊导杆组焊缝的压降可降低 13.84 mV,且压降波动较小,稳定在 20 mV 以下,导电性能提升显著。采用钢-铝直焊,以 92.5% 的电流效率计算,吨铝可实现节约约 44.6 kW·h,节能效果明显。

[关键词] 阳极钢爪; 焊接机器人; 钢-铝直焊; 焊接工艺

[中图分类号] TF821

[文献标志码] B

[文章编号] 2097-2423(2025)03-0090-07

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/lf.2025.03.016

0 引言

在国家“碳达峰”“碳中和”的政策引导下,电解

[收稿日期] 2024-10-24

[基金项目] 内蒙古自治区直属高校基本科研项目(2024RCTD008)“阳极钢爪焊接机器人智能路径规划及控制系统智能组态设计”;内蒙古自治区直属高校基本科研项目(2023YXXS014)“基于机器人手势交互的自抗扰随动控制 Simulink 建模及实验验证”;内蒙古自治区直属高校基本科研项目(2023YXXS011)“基于人机动作同步映射建模的动作重定向研究”。

[作者简介] 尚和鹏(2000—),男,硕士研究生,研究方向为柔性机械臂振动抑制、机器人焊接工艺。

[引用格式] 尚和鹏,王文杰,赵婷,等. 结构型节能阳极导杆组机器人焊接工艺[J]. 绿色矿冶,2025,41(3):90-96.

SHANG Hepeng, WANG Wenjie, ZHAO Ting, et al. Robotic welding process for structural energy-saving anode guide rod pack[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(3): 90-96.

铝行业向着智能化、低能耗方面迈进。传统阳极炭块组包括阳极导杆、爆炸焊块、阳极钢爪及阳极炭块等(图1),其中阳极导杆及阳极钢爪起到导电及承载阳极炭块的重要作用。由于阳极钢爪长期处于高温、烟气侵蚀、强腐蚀性电解质以及强磁的工况下,会产生“细腰”现象进而产生内弯,腐蚀后的钢爪电阻增加,电解压降升高,使能耗骤增,同时脱落的腐蚀层影响铝液纯度,易出现因铁含量过高而误判停槽的经济损失^[1-2]。此外,爆炸焊块与阳极导杆连接处电解负荷大,常出现开裂状况,需下线维修。鉴于焊接强度大、环境差的现状,企业招工难,虽然自动化设备正逐步替代人工,但阳极导杆组制造与修复焊接工艺复杂,主流自动化设备很难兼顾,故阳极导杆组自动化制造和修复成为热点问题。

针对阳极导杆组制造与修复中存在的自动化焊接难题,本文基于对现有技术的系统梳理,优化了自动化焊接设备及工艺,重点研究了阳极钢爪横梁与爪头双向双焊道堆焊、阳极导杆与阳极钢爪钢-铝直焊的机器人焊接工艺,提出了一种旨在降低能耗、

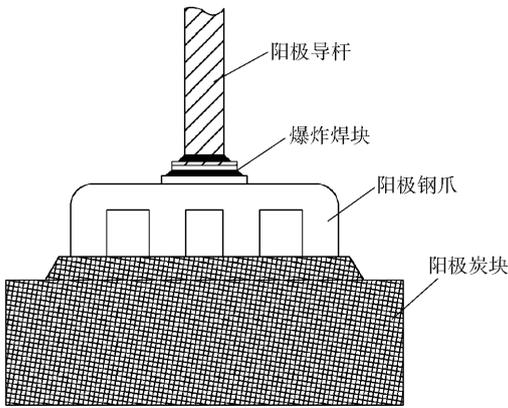


图1 传统阳极炭块组的构成

提升焊接可靠性的结构型节能阳极导杆组机器人焊接整体方案。

1 国内外阳极导杆组制造和修复焊接技术

传统的消失模铸造阳极钢爪因铸造工艺存在缺陷,结合强度不高,电阻率较高,且铸造过程中产生含S、P的有害气体,现已逐步被结构型钢爪所替代。与铸造钢爪相比,结构型钢爪材质均一、稳定,并具有良好的耐腐蚀性及优良的材料力学性能^[3]。阳极钢爪焊接修复层面,王日昕等^[4]利用电渣熔铸代替人工进行阳极钢爪的全截面熔焊修复,减少了焊接时产生的残余应力,但模具和结晶器安装制造工序复杂,不利于钢爪的大批量修复。张天华等^[5]

提出用Q235钢棒替换废弃的爪头以满足阳极钢爪的重复利用,该方法兼具性能与经济,成为热门;王平军等^[6]采用惯性摩擦焊实现了阳极钢爪的高强度焊接;Zayed等^[7]利用搅拌摩擦焊显著提高了阳极钢爪的力学性能和电学性能,但摩擦焊对焊表面有严格要求,对于阳极钢爪修复适用性较差;吴道林等^[8]通过设计窄间隙焊接专机实现钢爪全截面焊接,焊接过程易控制,但仍存在焊接形变等问题;赵玉春^[9]通过钢爪横梁两侧同时堆焊,实现全截面焊接,堆焊区域受热均匀,但对自动焊接设备及工艺提出了更高的要求。

阳极导杆组在电解过程中因自重和使用原因,常出现爆炸焊块焊接处开裂的现象。王涛^[10]通过改变坡口形状及异型爆炸焊块的方式提高了阳极导杆组的使用寿命;黄群贤^[11]总结爆炸焊块焊接特点,规范焊接工艺,降低了阳极导杆组的生产、维修成本;刘云云^[12]提出利用钢板连接和异型爆炸焊块补强均可提高爆炸焊块强度,但一次性费用较高,需衡量经济效益。为彻底取消爆炸焊块,李经纬^[13]利用相位摩擦焊技术,实现自动化生产;王旭东等^[14]采用钢-铝直焊新技术,将爆炸焊块产生接触压降的3处变为2处,使焊缝界面材料达到原子结合,并解决了钢-铝直焊生成过量金属间化合物引起焊接缺陷的问题。综上所述,国内外阳极导杆组先进制造及修复技术优点及局限性见表1。

表1 国内外阳极导杆组的先进制造及修复焊接技术优点及局限性

焊接对象	焊接技术	优点	局限性
阳极钢爪	消失模铸造	异型结构容易成型	存在夹渣、气孔等铸造缺陷、电阻率较高、铸造产生有害气体
	电渣熔焊	全截面焊接修复、焊接残余应力小	模具和结晶器安装制造工序复杂,不利于大批量修复
	摩擦焊	焊接强度高、焊缝及热影响区组织好、节能、制造成本低	设备成本高、待焊表面要求严格,不利于钢爪修复
	窄间隙焊	全截面焊接,无裂纹、夹杂等缺陷,综合效益好	焊接中产生变形,需调整工艺
	双向双焊道堆焊	堆焊工艺便捷、电流分布均匀、合格率高	焊前预留坡口
阳极导杆	爆炸焊块焊	实现钢-铝异种金属焊接	焊接成本高、开裂率高、压降高
	摩擦焊	焊接强度高、节约能耗、环保无污染	专用设备成本高
	钢-铝直焊	强度高、节能降耗	技术要求高

2 阳极导杆组机器人焊接工艺

2.1 阳极导杆组焊接流程

鉴于电渣熔焊、摩擦焊等全截面焊接专用设备昂贵,且这类设备往往是通过移植传统技术改进而

来,难以应对阳极导杆组焊接的复杂性。坡口堆焊是较为认可的人工制造及修复方式,但将其适用于机器人自动化焊接存在以下问题:

1)旧阳极钢爪的横梁长度因电解腐蚀发生变化,切割坡口时采用单边定位,使得远端坡口不断积

累定位误差,同时火焰切割进一步使得坡口产生烧伤缺陷,大幅增加自动焊接的定位难度。

2) 腐蚀钢爪非标准、多变量的特点使得已腐蚀横梁难以对正待焊钢爪的轴线;在焊接坡口时金属会出现热胀冷缩的变形,对机器人焊接补偿技术及自动定位装夹提出了更高要求。

3) 传统爆炸焊块开裂率高、导电性差;新一代的导杆-钢爪成型方案已经转为钢-铝直焊技术,但尚缺乏配套的自动化焊接设备及焊接工艺。

4) 因钢爪坡口存在复杂多变的特点,常规的机器示教焊接方式要求操作人员根据待焊坡口现状反复调整,修正焊接工艺参数,严重影响焊接效率。

为了解决上述问题,对阳极导杆组坡口切割、定

位装夹、视觉检测、焊接工艺进行全方位的改革。采用等离子切割的方式对阳极钢爪进行切割,形成统一规整的坡口;设计自动化的定位装夹设备,辅以视觉焊接效果检测系统,动态实时调整焊接参数。

阳极导杆组焊接流程如图 2(a) 所示,分为阳极钢爪横梁与爪头处焊接、阳极导杆与阳极钢爪横梁的焊接。阳极导杆钢-铝直焊流程如图 2(b) 所示,先对阳极导杆待焊处进行坡口切割,完成涂覆助焊剂、预热等焊前预处理后,开始铝-钢过渡钎焊及横梁与阳极导杆的钢-铝直焊。阳极钢爪横梁与爪头处焊接流程如图 2(c) 所示,横梁坡口切割后,完成焊前定位装夹,规划焊接流程并进行多层多道堆焊。焊接过程中均有自动化的焊接工艺参数规划(图 2(d)),以提高焊接质量。

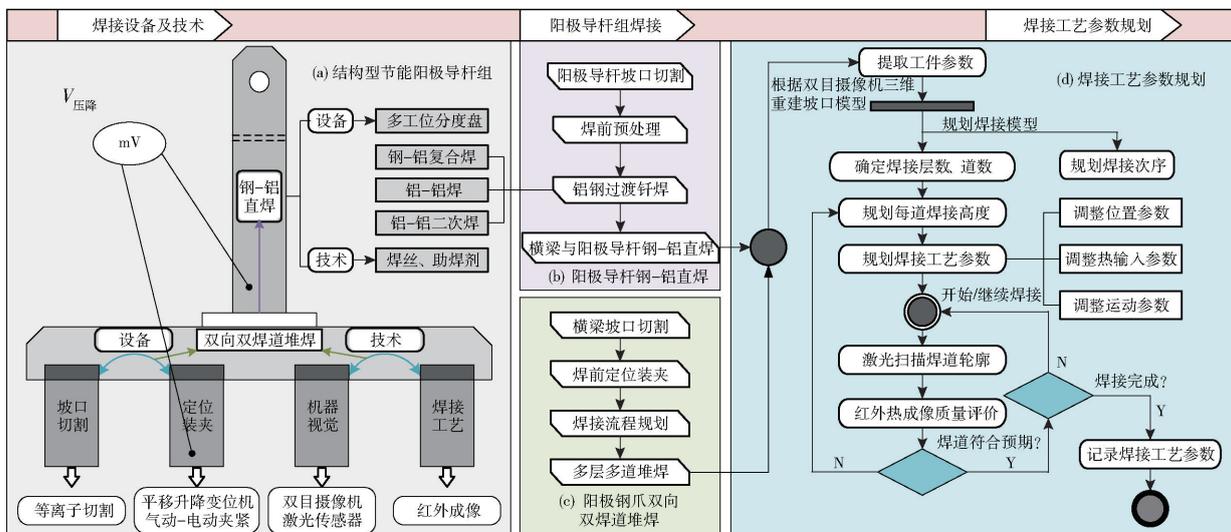


图 2 阳极导杆组焊接流程图

2.2 阳极钢爪横梁与爪头的多层多道焊接工艺设计

阳极钢爪横梁与爪头的焊接常出现在旧钢爪的修复与新钢爪的制造环节当中,其焊接工艺的优劣直接影响阳极钢爪入槽的压降与常规使用寿命。阳极钢爪待焊处为双侧开坡口的角焊缝,属于中厚板 K 型坡口焊接,需进行多层多道摆动焊接规划。因待焊横梁厚度、坡口位置、坡口角度、位间隙等焊接工件参数(图 3)存在多变复杂性,人工示教需多次调整焊接轨迹及焊接工艺,无法实现自动化生产,因此需机器人能够在线自动调整焊接轨迹,并能够对焊接质量作出评价,以优化焊接工艺。本文针对机器人自动焊接设备优化多层多道焊接工艺,以解决焊接难题。

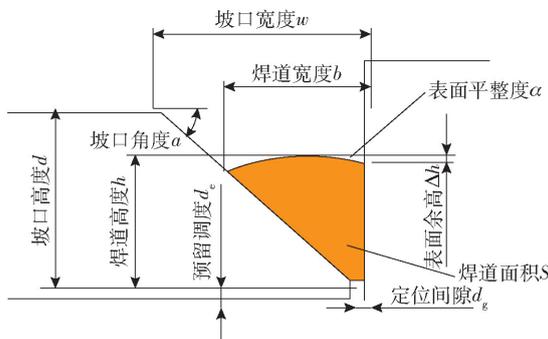


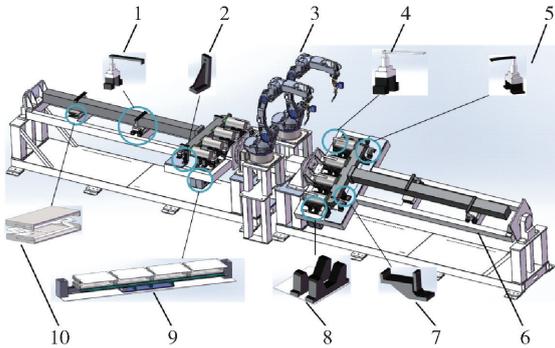
图 3 坡口焊接工件参数

2.2.1 横梁坡口切割

在焊接前对阳极钢爪横梁采用等离子切割机切割坡口,并对坡口打磨、抛光去除表面氧化层。

2.2.2 焊前定位装夹

利用桁架机械手将阳极钢爪及待焊爪头放置在定位夹具处,搭载可供升降用的爪头V型槽,放置装置的平移升降平台根据横梁厚度及坡口位置,结合距离传感器使待焊爪头自动找正坡口,气动夹具在收到PLC发出的定位完毕信号后进行快速装夹;同时为提高焊接效率,在机械臂两侧分别放置可配合焊接调整角度的翻转平台,实现一侧装夹一侧焊接的高效加工。变位工装设备如图4所示。



1 - 横梁气动夹具;2 - 横梁侧挡块;3 - 焊接机器人;4 - 爪头气动夹具;5 - 横梁气压夹具;6 - 翻转平台;7 - 横梁定位块;8 - 爪头V型槽;9 - 平移升降平台;10 - 阳极导杆升降装置

图4 变位工装设备

2.2.3 焊接流程规划

为摆脱人工示教弊端的影响,采用结合被动视觉的离线编程法和主动视觉的在线纠偏法的混合离线编程方式,实现实时引导的自主焊接混合离线编程方法(图5)。待定位装夹工作完毕,双目摄像机移动到待焊坡口位置进行三维重建,得到模型后将其传输给工业计算机,并通过离线模型算法初步规划焊接轨迹和焊接流程;焊接过程中采用激光视觉检测因焊接产生热胀冷缩导致的变形误差,对焊接轨迹进行纠偏,重新定位起弧点位,并实时反馈焊接后多层多道焊道的实际位置;实现焊接过程的正反焊接变形补偿工艺,逐步消除焊道厚度和宽度误差,完成对焊接过程的视觉定位和实时纠偏功能。

2.2.4 多层多道堆焊

焊缝填充策略是多层多道焊接中的重要一环。传统焊道截面打底焊采用三角形,上层截面用菱形及梯形拟合,结合等高法、等面积法规划路径^[15],但其模型较理想化,难以从中确定自动焊接过程的轨迹。本文采用被动视觉双目摄像机重建得到坡口模

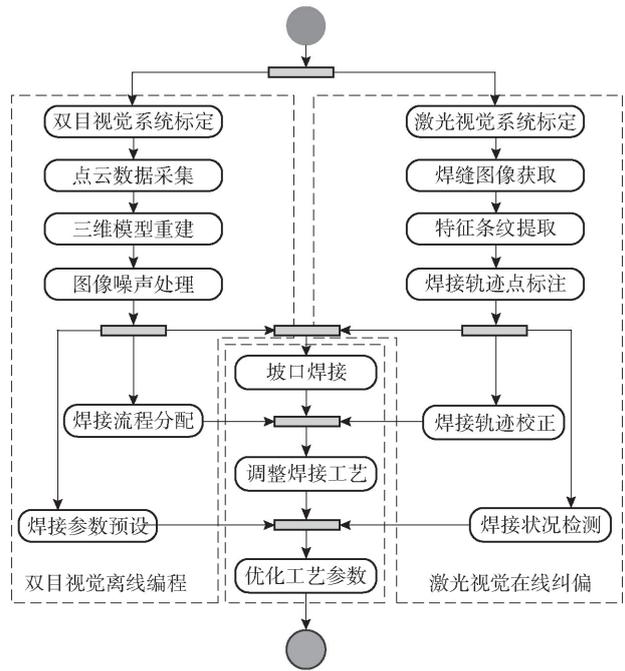


图5 混合离线编程方法流程

型,依据坡口宽度及高度规划出层数、道数及焊缝层高,并利用主动激光视觉获取的点云数据拟合出实际焊接轮廓,且与预规划轮廓对比,重新校正规划后续焊缝层高,确保熔深、熔宽、余高在理想范围内。阳极钢爪坡口较窄,采取摆动的方式,焊一道基本满足前几层的需求,但后两层坡口因宽度增加,增大摆幅减缓焊接速度的方式会出现焊瘤及未焊透的焊缝缺陷,因此需进行两道焊接。为尽可能避免热聚集引起的开焊,减少焊接残余应力导致的爪头翘曲变形,提高焊接强度,经过焊道参数调整及试验测算,一侧坡口焊5层,后两层焊两道,先对一侧打底焊,另一侧满焊的工艺符合阳极钢爪坡口自动焊接要求。多层多道堆焊效果如图6所示。

2.3 阳极导杆与阳极钢爪横梁的钢-铝直焊工艺设计

传统的阳极钢爪与阳极导杆之间采用铝-钢爆炸焊块作为过渡连接,钢爪与爆炸焊块、铝导杆与爆炸焊块以及铝-钢爆炸焊块自身共存在3处产生压降的焊缝,因此,焊接脱落风险很高。钢-铝直焊技术打破异种金属焊接壁垒,使得焊缝截面材料实现原子结合,将原有的3处接触压降变为2处,钢铝直焊流程如图7所示。整体生产线呈直线排布,运输采用AGV设备,自动化生产线如图8所示,包含钢爪铣面倒角工位、涂覆助焊剂预热工位、钢-铝直焊四工位分度盘、铝导杆切割倒角工位以及钢爪-导杆焊接工位。

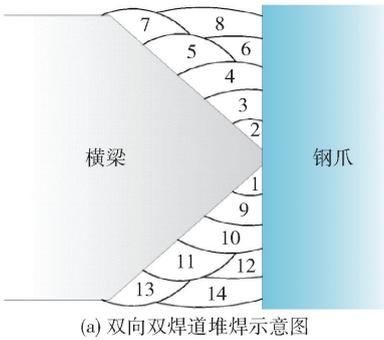


图6 阳极钢爪坡口焊缝双向双焊道堆焊效果

2.3.1 阳极导杆坡口切割及预处理

采用等离子切割阳极导杆坡口,焊接前将阳极钢爪吊装在定位夹具中,由AGV输送进行铣面倒

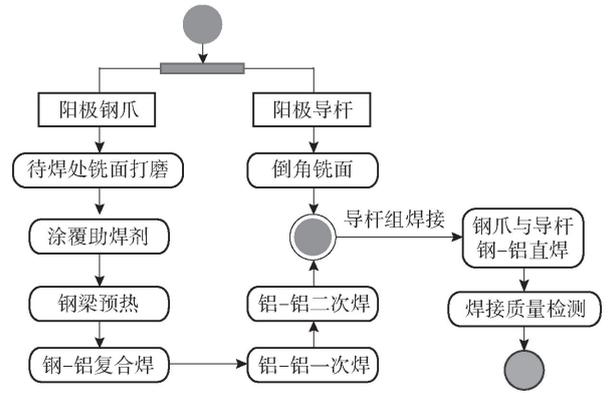


图7 钢铝直焊流程图

角,去除待焊工件表面氧化层,并在表面涂覆厚140 μm的助焊剂,将钢梁预热至200℃,有效隔绝空气,提高焊接融合度,减少金属间化合物的生成。

2.3.2 铝-钢过渡钎焊

AGV将预处理后的阳极钢爪送至四工位分度盘待焊区,先对横梁进行钢-铝复合钎焊,后分别采用不同组分焊丝对钎焊后的横梁表面进行铝-铝熔化焊接两次。

2.3.3 阳极钢爪横梁与阳极导杆钢-铝直焊

过渡钎焊完成后,横梁的待焊表面已经成为铝

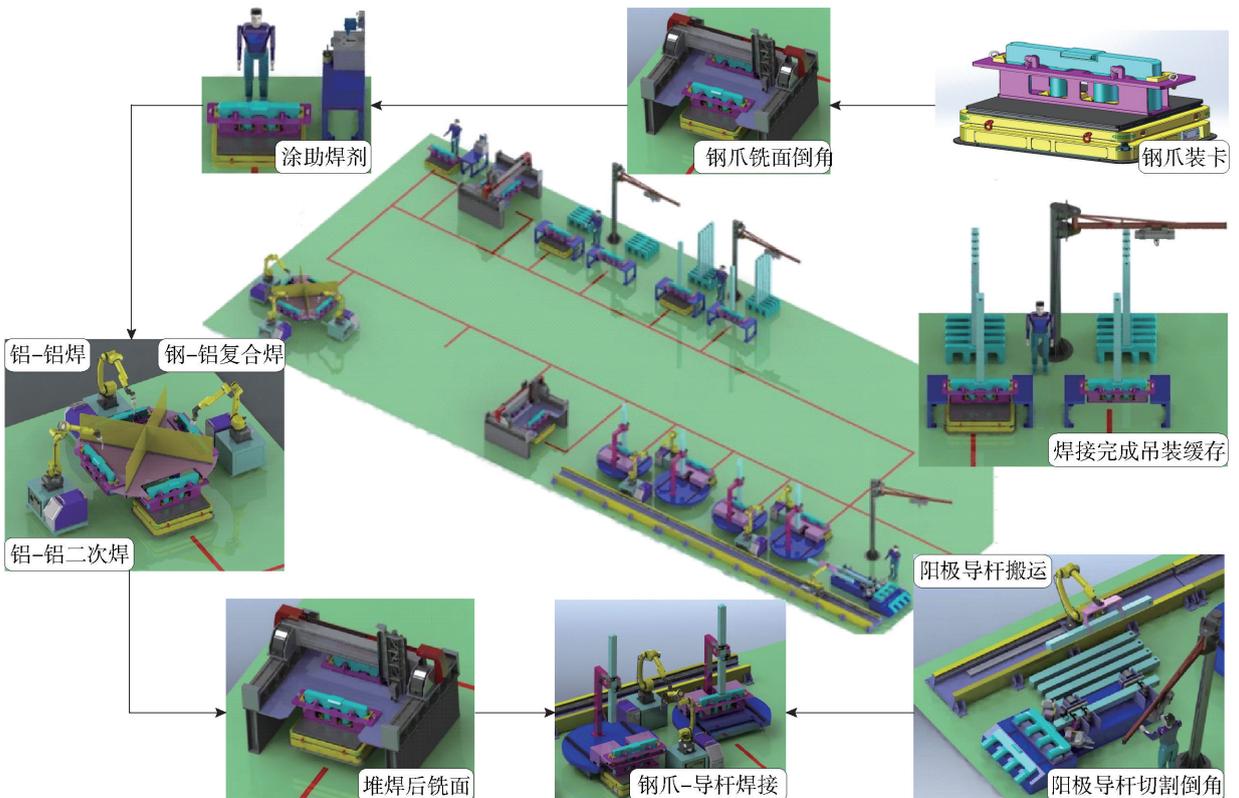


图8 钢铝直焊生产线

表面,将焊接面铣削平整与切割倒角后的阳极导杆进行坡口铝制焊接工件熔化焊,配合混合离线编程方法,利用激光检测模块及红外热成像分析,动态调整焊接工艺参数,得到满足焊接质量的焊接工艺。

3 阳极导杆组焊接效果评价

在重庆某铝厂选择运行状态相同的电解槽分别测量4类阳极导杆组压降情况,测量方法如图2(a)

所示,测量点一端在阳极导杆与爆炸焊块焊接面上部,另一端在内侧钢爪距磷铁浇铸上部的20 mm处。考虑入槽时间的影响,测量批次分别选择在阳极导杆组入槽的第5天、第15天、第25天、第35天,并在每个批次中每类阳极导杆组随机选取10组数据进行压降分析,每批数据平均处理后的结果见表2,测量数据如图9所示。

由图9可见,结构型阳极钢爪压降明显低于铸

表2 阳极导杆组节能效果对比

时间	铸钢爆炸焊 压降/mV	铸钢钢-铝直焊 压降/mV	型钢爆炸焊 压降/mV	型钢钢-铝直焊 压降/mV	整体优化压降 差值/mV	总节约电耗/ (kW·h/t-Al)
第5天	28.48	19.39	21.58	16.45	12.03	38.75
第15天	28.04	17.68	23.32	15.97	12.07	38.89
第25天	32.56	17.33	22.82	16.85	15.71	50.60
第35天	32.67	17.98	22.75	17.14	15.53	50.04
平均	30.44	18.09	22.62	16.60	13.84	44.57

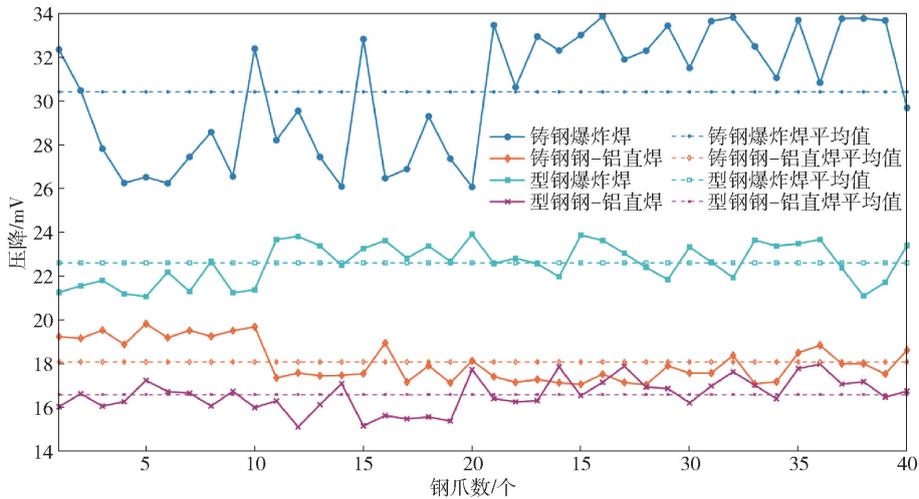


图9 压降数据对比图

造型钢爪,且铸造型钢爪因存在铸造缺陷,个体差异较大,结构型钢爪压降均一稳定,质量接近于母材,且无焊接过渡,可靠性强;不良率控制在2%以下,产出率达到98%以上。从阳极导杆焊接技术分析,钢-铝直焊导杆组焊缝压降波动较小,稳定在20 mV以下,较传统爆炸焊块焊接技术导电性能提升显著。由表2可知,传统的铸造爆炸焊阳极钢爪组在结构上进行改良压降平均可降低7.82 mV,采用钢铝直焊压降进一步可降低13.84 mV,以92.5%的电流效率计算,生产每吨铝可实现节电44.57 kW·h,节能效果明显。

4 结论

1) 针对阳极导杆组制造及修复困难的现状,提出一种结构型节能阳极导杆组机器人焊接方案,实现精确可靠的机器人自动化焊接。

2) 通过改进焊接工艺,提出了阳极钢爪坡口多层多道焊接及阳极导杆钢-铝直焊的最优焊接工艺,实现阳极导杆组高效率、高质量的制造及修复。

3) 实验证明结构型钢铝直焊阳极钢爪有显著的节能效果,性能可靠,不良率控制在2%以下,产出率达到98%以上,具有良好的经济效益。

[参考文献]

- [1] 张金梁,卢萍,丁晓亮,等. 铝电解阳极钢爪腐蚀及防腐技术[J]. 轻金属,2017(9):32-36.
- [2] 马军义,李昌林,侯光辉,等. 新材料在大型铝电解槽节能降碳技术中的应用与展望[J]. 绿色矿冶,2024,40(2):41-42,72.
- [3] 李姝婷,王日昕,伍永福,等. 电解铝用新型阳极钢爪[J]. 中国有色冶金,2017,46(05):29-33,47.
- [4] 王日昕,饶泽世. 电解铝阳极钢爪修复新技术的应用实践[J]. 轻金属,2014(9):53-57.
- [5] 张天华,孔工. 阳极钢爪组换爪材料选择和重焊工艺要求的建议[J]. 民营科技,2013(7):19.
- [6] 王平军,王鑫. 超大直径,超大截面惯性摩擦焊研究应用[J]. 机械研究与应用,2023,36(2):154-157.
- [7] ZAYED S, SHAMROUKH A M, OMRAN A M, et al. New partial repair technique for deformed yoke[J]. Light Metals, 2021: 1010-1017.
- [8] 吴道林,李猛,伍祖槐,等. 阳极导杆组全流程自动化修复解决方案[J]. 有色设备,2023,37(4):14-19,47.
- [9] 赵玉春. 一种电解铝阳极钢爪的堆焊方法:202010917100.6[P]. 2021-01-08.
- [10] 王涛. 改进阳极导杆组焊接工艺提高导杆组的循环利用效率[J]. 甘肃冶金,2012,34(3):120-121,124.
- [11] 黄群贤. 爆炸块焊接特点改进导杆组维修工艺提高其循环利用效率[J]. 世界有色金属,2015,(1):39-40.
- [12] 刘云云. 铝电解槽阳极导杆组修复实践[J]. 山西冶金,2015,38(1):96-98.
- [13] 李经纬. 电解铝阳极导杆铝-钢相位摩擦焊技术研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2014.
- [14] 王旭东,冯晓强,白庆国,等. 电解铝阳极钢-铝熔钎焊焊接方法:201810334065.8[P]. 2020-02-21.
- [15] 温永策,卢庆亮,曹永华,等. 厚板V形坡口焊接路径规划[J]. 矿山机械,2020,48(3):61-65.

Robotic Welding Process for Structural Energy-Saving Anode Guide Rod Pack

SHANG Hepeng¹, WANG Wenjie¹, ZHAO Ting², CAO Guowu³, WANG Yuangeng¹, HU Xinyu¹, WU Yongfu⁴, ZHAO Yuchun⁵

- (1. Institute of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;
2. Inner Mongolia North Heavy Industry Group Scientific Research and Trial Production Center, Baotou 014010, China;
3. Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd. Ordos Power Supply Branch, Erdos 017004, China;
4. Institute of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;
5. Inner Mongolia Anda Hengyuan Technology Co., Ltd., Baotou 014010, China)

Abstract: Anode guide rod group is an important conductive component in electrolytic aluminum production. Its conductivity and service life are important indicators to measure economic benefits. In order to solve the problem of quality instability in conventional welding, this paper analyzed the disadvantages of current automatic welding, and proposed a structural energy-saving anode guide rod group robot welding scheme. The groove cutting, positioning and clamping, visual inspection and welding process of the anode guide rod group were reformed in an all-round way. The welding processes such as bidirectional double bead surfacing of anode steel claw and direct welding of anode guide rod steel-aluminum were used and improved to solve the problems of welding cracking, damage and high pressure drop. The production practice shows that the pressure drop of the structural anode steel claw is significantly lower than that of the cast steel claw. Compared with the traditional cast steel explosive welding block, the weld pressure drop of the steel-aluminum direct welding guide rod group can be reduced by 13.84 mV, and the pressure drop fluctuation is small, stable below 20 mV, and the conductivity is significantly improved. Using steel-aluminum direct welding, with 92.5% current efficiency calculation, per ton of aluminum can save electricity by about 44.6 kW·h, and the energy saving effect is obvious.

Key words: anode steel claw; welding robots; direct welding of steel and aluminum; welding process