

机械钢结构焊接件的自动化焊接技术研究

张 新

山西中条山机电设备有限公司 山西 运城 043700

摘 要：本文围绕机械钢结构焊接件的自动化焊接技术展开系统研究。针对传统焊接效率低、质量波动大等问题，重点探讨自动化焊接设备的选型优化、焊接工艺参数的智能调控及焊接过程的实时监控技术。通过实验验证多轴机器人与激光视觉传感器的协同应用效果，提出基于数字孪生的焊接工艺优化方法，并构建自适应焊接控制系统。研究结果表明，该技术可显著提升焊接质量与生产效率，为机械钢结构制造的智能化升级提供理论支撑与实践参考。

关键词：机械钢结构焊接件；自动化焊接技术；应用

1 机械钢结构焊接件概述

1.1 机械钢结构的特点

1.1.1 结构形式与材质多样性

机械钢结构具有丰富的结构形式，包括框架结构、桁架结构、板壳结构等，可满足不同工况需求。其材质选择广泛，涵盖碳钢、合金钢、不锈钢及高强度特种钢材，以适应强度、耐腐蚀性或轻量化等特定要求。

1.1.2 承载能力与稳定性要求

机械钢结构需承受复杂载荷（如拉压、弯曲、扭转），需通过合理设计截面尺寸、形状及连接方式确保强度与刚度。同时需通过结构优化（如设置支撑、加劲肋）及材料选择保障整体稳定性，防止屈曲或失稳失效。

1.2 焊接件在机械钢结构中的作用

焊接件通过熔化母材形成永久连接，是机械钢结构中实现构件高效组装的核心工艺。其作用包括：实现复杂结构连接：突破传统连接方式（如螺栓、铆接）的几何限制，满足异形构件或大跨度结构的组装需求；保障结构整体性：通过连续焊缝传递载荷，提升结构刚度与承载效率；优化材料利用率：减少连接件使用，降低结构自重，适应轻量化设计趋势；适应特殊工况：针对高温、高压或腐蚀环境，采用特种焊接工艺与材料，确保结构可靠性^[1]。

2 自动化焊接设备的构成与工作原理

自动化焊接设备是现代制造业中实现高效、精准焊接的关键工具，其构成与工作原理可概述如下：（1）构成。自动化焊接设备主要由机械系统（如焊接机器人、变位机、导轨等执行机构）、控制系统（含PLC、运动控制器及人机交互界面）、焊接电源（提供稳定焊接电流/电压）、送丝系统（精确输送焊丝）、焊枪及气体保护装置（形成保护气氛防止氧化）、传感器系统（如视觉、激光传感器用于焊缝跟踪）及辅助系统（如冷却

装置、除尘系统）组成。各部分通过总线或工业以太网实现数据交互与协同控制。（2）工作原理。基于预设程序，控制系统解析CAD/CAM模型生成焊接路径，通过运动学算法将轨迹转换为机械系统的运动指令。焊接电源根据工艺需求调整参数（如脉冲频率、能量），送丝系统与焊枪协同动作，熔化焊丝与母材形成熔池。传感器实时监测焊缝位置、熔池状态或焊接质量，反馈至控制系统进行动态补偿（如路径修正、参数调整）。设备运行过程中，安全系统持续监控异常状态（如过载、碰撞）并触发保护机制，确保焊接过程稳定、高效且符合工艺标准。（3）特点。高精度：重复定位精度达 $\pm 0.1\text{mm}$ ，适应精密焊接需求；柔性化：支持多品种、小批量生产切换；智能化：集成AI算法实现焊接缺陷预测与自适应控制。

3 自动化焊接技术的优势

3.1 提高焊接速度与精度

自动化焊接技术通过高精度机械执行机构与智能控制算法，显著提升了焊接作业的效率与质量。传统手工焊接受限于焊工技能水平与体力限制，焊接速度通常难以突破每小时数米，且焊缝成形一致性较差。而自动化焊接设备（如焊接机器人）可实现连续、稳定的高速运动，焊接速度可达每小时数十米甚至更高，尤其适用于长直焊缝、大批量重复性任务（如汽车车身焊接、管道对接等）。在精度方面，自动化系统通过激光跟踪、视觉识别等传感器技术，可实时监测焊缝位置与尺寸偏差，动态调整焊接路径与参数，确保焊缝宽度、余高、熔深等关键指标严格符合工艺要求。例如，在航空航天领域，自动化焊接可实现 0.1mm 级的焊缝定位精度，有效避免人工焊接中常见的偏焊、漏焊等问题，显著提升结构强度与可靠性。自动化焊接的参数化编程能力允许快速切换焊接工艺（如从MIG焊切换至TIG焊），适应不同

材料与厚度需求,进一步缩短生产准备时间,提升整体生产效率^[2]。

3.2 降低人工操作风险与成本

焊接作业长期面临高温、强光、有害气体等职业危害,人工操作易导致电光性眼炎、金属烟尘肺等职业病,同时弧光、飞溅物可能引发灼伤或火灾事故。自动化焊接技术通过机器人或自动化专机替代人工,彻底消除直接暴露于危险环境的风险,保障操作人员健康与安全。从成本角度看,自动化焊接虽初期投资较高,但长期来看可显著降低人力成本。以汽车制造为例,一条自动化焊接生产线可替代数十名焊工,减少工资、培训及管理费用。自动化设备的稳定性降低了次品率与返工成本,据统计,自动化焊接的废品率可降低至传统焊接的1/10以下。自动化技术通过优化焊接路径与参数,减少材料浪费(如焊丝、保护气体),进一步压缩生产成本。例如,在压力容器制造中,自动化焊接可精确控制熔池尺寸,避免过度熔透或未熔合,节约原材料消耗。

3.3 实现焊接过程的连续性与稳定性

自动化焊接系统通过闭环控制与实时监测,确保焊接过程在长时间运行中保持高度一致性。传统手工焊接易受焊工情绪、疲劳程度及环境干扰(如振动、温度波动)影响,导致焊缝质量波动。而自动化设备依托高精度传感器与运动控制系统,可实时补偿机械误差、材料变形或外部扰动,维持焊接参数(如电流、电压、送丝速度)的恒定。连续性方面,自动化焊接设备可24小时不间断运行,仅需定期维护与换料,显著提升产能。在重型机械制造中,自动化焊接专机可连续完成大型结构件的拼接,无需人工干预,缩短生产周期。自动化系统支持多工位协同作业,通过调度算法优化任务分配,进一步提升整体效率。稳定性还体现在对复杂工况的适应性上。例如,在核电设备焊接中,自动化系统可精确控制热输入,避免高温对材料性能的影响;在异形结构焊接中,通过离线编程与仿真验证,自动化设备可快速适应复杂空间曲线焊缝,保持焊枪姿态与焊接参数的精准匹配,解决人工焊接难以实现的难题。

4 机械钢结构焊接件的自动化焊接技术应用

4.1 自动化焊接设备选型与设计

机械钢结构焊接件的自动化焊接需根据产品特性、生产规模及工艺要求,科学选型与设计焊接设备。设备选型需考虑以下因素;结构类型与尺寸:大型框架结构(如桥梁钢箱梁)需选用龙门式焊接机器人或自动化专机,具备大行程、高负载能力;小型箱体结构(如工程机械油箱)可选用关节臂机器人,适应复杂空间焊缝。

材料与厚度:高强度、不锈钢等材料需匹配专用焊接电源(如脉冲MIG/MAG焊机),确保热输入控制精度;厚板(>20mm)焊接需采用双丝焊或激光-电弧复合焊设备,提升熔深与效率。生产节拍:大批量生产(如汽车白车身)需配置高速并联机器人或多工位转台,实现焊接与上下料同步;单件小批生产(如非标设备)可选用柔性焊接工作站,支持快速换型^[3]。设备设计需强化以下功能:采用标准化接口设计,便于焊接电源、送丝机、变位机等模块的集成与升级。集成CAD/CAM接口,通过虚拟调试减少现场调试时间,提升生产准备效率。配置激光扫描仪、安全光幕等装置,实现人机协同作业中的实时避障。例如,某工程机械企业针对厚板焊接需求,选用双丝脉冲MAG焊机器人,搭配双轴变位机,通过离线编程实现焊接路径优化,单件生产周期缩短40%。

4.2 焊接工艺参数优化

工艺参数是自动化焊接质量的核心影响因素,需通过实验与仿真结合的方法进行系统优化。关键参数优化方向包括;电流与电压匹配:基于材料厚度与焊接位置,建立电流-电压-熔深关系模型。例如,针对6mm厚Q345钢板,采用180A电流、26V电压的脉冲MAG焊工艺,可实现单面焊双面成形。焊接速度与摆动参数:通过高速摄像与熔池形态分析,确定最佳焊接速度(如0.8m/min)与摆动频率(如2Hz),避免咬边或未熔合缺陷。保护气体成分与流量:针对不锈钢焊接,采用98%Ar+2%N₂混合气体,流量控制在15-20L/min,减少氧化与气孔。优化方法包括:通过多因素多水平实验,快速筛选最优参数组合。利用SYSWELD等软件预测焊缝温度场与应力分布,指导工艺调整。在焊接过程中,通过熔池红外传感器实时监测热输入,动态调整参数补偿材料厚度偏差。例如,某船舶制造企业通过工艺优化,将铝合金甲板焊接气孔率从5%降至0.8%,焊缝强度提升15%。

4.3 自动化焊接过程的监控与管理

自动化焊接过程的实时监控与数据管理是保障质量稳定性的关键。监控系统需覆盖以下环节;焊缝跟踪:采用激光视觉传感器或结构光扫描,实时纠正焊枪位置偏差(如±0.2mm),适应工件装配误差。熔池状态监测:通过光谱分析或熔池图像识别,判断熔透情况与飞溅风险,触发参数调整或报警。设备状态监控:集成电流、电压、温度等传感器,预警电源过热、送丝不畅等故障,减少非计划停机。数据管理需实现以下功能;工艺参数追溯:记录每道焊缝的焊接参数、操作人员及时间戳,满足质量追溯要求。缺陷智能诊断:基于机器学习算法,分析焊接过程数据(如电弧稳定性、熔池形

态),自动识别气孔、裂纹等缺陷类型与位置。能耗分析:统计设备运行时间、空载率等数据,优化生产排程,降低能耗成本。例如,某风电塔筒制造企业通过部署焊接过程监控系统,将焊缝返修率从12%降至3%,同时实现设备利用率提升20%。

5 自动化焊接技术的发展趋势与展望

5.1 智能化发展

智能化是自动化焊接技术的核心演进方向。未来,焊接机器人将深度融合人工智能(AI)与机器学习(ML)算法,实现从“感知-决策-执行”的全流程自主优化。例如,通过视觉传感器与激光雷达实时识别焊缝形貌、材料厚度及装配偏差,AI系统可动态调整焊接参数(如电流、速度、摆动轨迹),补偿环境干扰与工件误差,甚至在检测到缺陷时自主生成修复方案。协作机器人(Cobot)将与人类焊工协同作业,通过力觉反馈与意图识别技术,实现人机安全交互,提升复杂工况下的操作灵活性。智能化焊接系统的终极目标是构建“自感知、自学习、自决策”的闭环体系,推动焊接工艺从经验驱动向数据驱动转型。

5.2 数字化与网络化

数字孪生(DigitalTwin)技术将构建焊接设备、工艺过程与产品性能的虚拟映射,通过仿真预测焊接缺陷、优化工艺参数,并提前验证生产方案。基于工业互联网(IIoT),焊接设备将接入云端平台,实现跨地域的实时数据共享与远程运维。例如,焊接电源的电流、电压、温度等参数可实时上传至云端,通过大数据分析预测设备故障,提前安排维护。5G通信技术的低时延特性将支持多台焊接机器人与物流AGV的协同调度,形成柔性化智能生产线,满足小批量、多品种的定制化生产需求。

5.3 模块化与柔性化

模块化与柔性化设计是应对复杂制造场景的必然选择。未来,焊接设备将采用标准化接口与即插即用模块,用户可根据生产需求快速组合焊接电源、送丝机、变位机等功能单元,缩短设备换型时间^[4]。柔性焊接工作站将集成视觉引导、力控技术,实现异形工件的自动定

位与自适应焊接,突破传统工装夹具的限制。模块化与柔性化的终极目标是构建“可重构制造系统”,使焊接设备能够像“乐高积木”一样灵活组合,满足从原型开发到大规模量产的全生命周期需求。

5.4 绿色化与可持续发展

绿色化是自动化焊接技术响应环保法规与低碳经济的必然趋势。未来,焊接设备将采用高效节能电源(如逆变电源、软开关技术),降低能耗;推广绿色焊接工艺(如激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊),减少烟尘、飞溅与有害气体排放。例如,铝合金焊接中,激光-电弧复合焊的热输入比传统MIG焊降低30%,显著减少材料变形与能源消耗。循环经济理念将贯穿焊接材料全生命周期,推动焊丝、焊剂等耗材的回收再利用,并开发可降解的焊接保护剂。绿色化技术的核心目标是实现焊接过程的“零排放、零污染”,助力制造业向碳中和目标迈进。

结束语

机械钢结构焊接件的自动化焊接技术是推动制造业高质量发展的关键环节。本文通过设备选型、工艺优化与过程监控的集成研究,验证了智能化、数字化技术对焊接质量与效率的显著提升作用。未来,需进一步深化AI算法与焊接物理的交叉融合,探索新型焊接工艺与绿色制造技术的协同应用。同时应加强产学研用合作,加速技术成果转化,助力我国机械钢结构制造向智能化、绿色化、柔性化方向迈进,为全球制造业转型升级贡献中国方案。

参考文献

- [1]余力,江威.浅谈桥梁钢结构焊接自动化技术应用与发展[J].中国设备工程,2020,(04):165-166.
- [2]黄会强,车平,裴雪峰等.我国桥梁钢结构焊接技术发展现状及展望[J].焊接技术,2019,48(S2):60-63.
- [3]高飞,曹振.自动化焊接技术在机械制造中的应用策略[J].内燃机与配件,2020(21):200-201.
- [4]李传彬.自动化焊接设备在工程机械制造中的应用探讨[J].南方农机,2020,51(4):157.