

绿色焊接技术在工程机械制造中的应用及减排效果分析

韩涛 王新宇 周胜利

内蒙古蒙电华能热电股份有限公司乌海发电厂 内蒙古 乌海 016000

摘要:“双碳”目标下,工程机械制造作为高耗能、高排放行业,迫切需技术革新以绿色转型,绿色焊接技术是关键。焊接工序是该行业核心环节,传统模式能耗高、污染大,制约可持续发展。本文界定绿色焊接技术内涵,系统梳理其分类,着重探讨激光焊接、搅拌摩擦焊等在工程机械制造中的应用场景,构建减排评估体系,对比分析绿色与传统技术减排差异,剖析关键影响因素,为企业推广提供参考,助力行业降碳与效益协同提升。

关键词:绿色焊接技术;工程机械制造;减排效果

引言:全球“双碳”目标下,工程机械制造亟需绿色转型。传统焊接工序高能耗、高污染,制约行业可持续发展。绿色焊接技术通过创新实现节能、减排、资源高效利用,为行业突破瓶颈提供核心支撑。本文聚焦其应用与减排效果,梳理技术分类,分析先进技术场景,构建评估体系,为企业技术选型和工艺升级提供参考,助力行业生态与经济效益协同提升,服务国家“双碳”战略。

1 绿色焊接技术的定义

绿色焊接技术绝非是一个孤立、单一的特定技术概念,而是一个全面覆盖焊接全流程的综合性技术体系。它犹如一个精密运转的生态系统,在保障工程机械焊接质量与性能达到高标准要求这一坚实基础上,通过持续不断的技术创新以及对焊接流程的深度优化,全力以赴地降低能源消耗、减少污染物排放,并显著提升资源利用效率。该技术紧紧围绕“减量化、无害化、资源化”这三大核心原则展开。在焊接前的材料准备阶段,精心挑选环保型、可回收的焊接材料,从源头上减少资源浪费和环境污染;焊接过程中,对参数进行精准调控,依据不同的焊接材料和工件要求,合理设置电流、电压、焊接速度等参数,确保焊接过程既高效又节能;焊接后的废料处理环节,对产生的废料进行分类回收与再利用,将原本可能成为污染源的废料转化为可再次投入生产的资源。与传统焊接技术相比,绿色焊接技术有着显著的不同。它不再仅仅聚焦于焊接接头的强度、韧性等传统力学性能,而是将能源消耗指标、污染物排放浓度、材料回收利用率等一系列绿色指标纳入综合评价体系^[1]。其本质是充分融合材料科学、自动化技术、智能化控制等多学科的先进成果,让焊接工序在低能耗、低污染、高效率的状态下稳定运行,为工程机械制造行业的绿色转型筑牢核心技术根基,高度契合当前制造业可持续发展的时代主流趋势。

2 常见绿色焊接技术分类

2.1 高效节能焊接技术

高效节能焊接技术以降低单位焊接长度的能源消耗为核心目标,通过优化焊接热源特性与能量传递方式提升能源利用效率。这类技术的关键在于采用能量集中、热损失小的焊接热源,如逆变式电弧焊技术通过高频逆变技术将工频交流电转换为高频直流电,使电弧稳定性显著提升,能源转换效率从传统弧焊的50%左右提高至75%以上,单位焊缝能耗降低30%。此外,等离子弧焊接技术利用压缩电弧产生高温高密度热源,焊接速度较传统手工电弧焊提升2-3倍,同时减少了因焊接速度慢导致的热量散失。该类技术还包括脉冲焊接技术,通过控制电流脉冲频率与幅值,在保证焊缝成形质量的前提下,减少无效能量输出,特别适用于工程机械薄壁结构件的焊接,既能降低能耗,又能避免材料过热变形。

2.2 低污染焊接技术

低污染焊接技术重点针对传统焊接过程中产生的烟尘、有害气体、弧光辐射等污染物,通过技术改进实现源头控制与过程减排。无铅钎焊技术是典型代表,采用锡银铜合金替代传统锡铅钎料,彻底消除铅元素对操作人员健康的危害及对环境的重金属污染。在电弧焊接领域,活性气体保护焊技术通过优化保护气体配比(如采用80%Ar+20%CO₂混合气体),减少焊接过程中氮氧化物与一氧化碳的生成量,同时抑制烟尘飞扬,使焊接烟尘浓度降低40%以上。此外,水下焊接技术通过水介质隔绝空气,不仅减少弧光辐射与烟尘扩散,还能降低焊接过程中的噪声污染,适用于工程机械大型结构件的现场修复,在保障作业安全的同时实现污染减排。

2.3 焊接过程自动化与智能化技术

焊接过程自动化与智能化技术通过减少人工干预提升焊接稳定性,从流程层面实现节能降耗。自动化技

术以焊接专机与机器人系统为核心,如工程机械车架焊接专用生产线,通过可编程逻辑控制器(PLC)协调多台焊接机器人同步作业,焊接参数的重复精度控制在 $\pm 0.1\text{mm}$,避免人工操作导致的参数波动,减少因焊缝缺陷引发的返工能耗。智能化技术则融入视觉识别与自适应控制,通过高清摄像头采集焊缝图像,经机器视觉算法实时识别焊缝轨迹与坡口尺寸,自动调整焊接电流、电压与行走速度。部分先进系统还搭载红外测温模块,实时监测熔池温度,防止过热导致的能源浪费,使焊接过程的能源利用率进一步提升,同时降低因人为失误产生的废料率^[2]。

2.4 焊接材料回收与再利用技术

焊接材料回收与再利用技术聚焦焊接废弃物的资源化处理,减少固体废弃物排放,实现资源循环利用。该技术涵盖焊接烟尘回收、废旧焊材处理及焊缝余料再利用三个核心环节。在烟尘回收方面,采用静电除尘与滤筒过滤组合系统,对焊接烟尘的捕捉效率达98%以上,回收的铁粉可作为冶金原料重新冶炼,实现废料资源化。对于废旧焊条、焊丝等,通过分类拆解、成分分析,将可回收金属进行熔融提纯,制成焊材原料,材料回收率超过85%。针对工程机械焊接产生的钢材余料,通过计算机辅助切割系统优化下料方案,将余料精准切割为小型结构件的焊接原料,如将大型铲斗焊接余料用于制作连接支架,使材料利用率从传统的65%提升至80%以上,大幅减少固体废弃物产生。

3 不同绿色焊接技术在工程机械制造中的具体应用

3.1 激光焊接技术在工程机械结构件焊接中的应用

激光焊接技术凭借能量密度高、焊接变形小的优势,在工程机械结构件焊接中应用广泛,尤其适用于高强度钢车架、履带板等关键部件的制造。以某装载机车架焊接为例,传统电弧焊焊接车架主梁时,需采用多道焊缝拼接,焊接变形量大,后续矫正工序能耗高,而采用光纤激光焊接技术,利用10kW级激光发生器产生的高能量光束,实现单道焊缝一次成形,焊接速度达1.5m/min,较传统工艺提升4倍。激光焊接的热影响区宽度仅为传统电弧焊的1/3,车架焊接后的平面度误差控制在0.5mm/m以内,彻底省去矫正工序,减少相关能耗。另外,在挖掘机斗杆焊接中,激光焊接可实现不同厚度高强度钢的可靠连接,焊缝抗拉强度达母材的95%以上,满足工程机械重载作业需求,同时降低焊接过程中的能源消耗与烟尘排放。

3.2 搅拌摩擦焊技术在铝合金工程机械部件焊接中的应用

搅拌摩擦焊技术作为固相焊接方法,因无熔化、无烟尘、接头性能优异的特点,在铝合金工程机械部件焊接中展现出独特优势,主要应用于铝合金驾驶室框架、液压油箱、散热器芯体等轻质部件的制造。铝合金材料导热系数是钢材的3倍,传统MIG熔焊焊接时,热量快速散失导致熔池稳定性差,易出现气孔、热裂纹等缺陷,在中联重科某挖掘机铝合金驾驶室焊接中,传统氩弧焊焊接的框架气密性检测合格率仅为85%,且焊缝区域因合金元素烧损导致强度下降15%。搅拌摩擦焊技术通过直径18mm的WC-Co搅拌头高速旋转,与6061-T6铝合金工件摩擦产生热量,使焊接区域材料温度升至450°C,处于塑性流动状态,在搅拌头的挤压与搅拌作用下实现冶金结合,整个过程无弧光、无有害气体排放,焊接烟尘排放量几乎为零^[3]。在该挖掘机驾驶室框架焊接中,采用搅拌摩擦焊技术后,焊缝表面光滑平整,经X射线探伤检测无内部缺陷,气密性检测合格率提升至100%,完全满足驾驶室密封要求。焊接铝合金液压油箱时,搅拌摩擦焊焊缝抗拉强度达320MPa,比传统氩弧焊提高20%,且焊缝耐腐蚀性通过500小时盐雾试验无锈蚀,延长油箱使用寿命至8年以上。另外,该技术无需填充焊丝与保护气体,单台挖掘机铝合金部件焊接成本降低30%,焊接效率达0.8m/min,较氩弧焊提升2倍,完美契合工程机械绿色制造的双重需求。

3.3 焊接机器人技术在工程机械大规模生产中的应用

焊接机器人技术已成为工程机械大规模生产的核心装备,凭借焊接精度高、稳定性强的优势,在推土机履带架、起重机吊臂、装载机车架等标准化程度高的产品制造中实现规模化应用。柳工机械某推土机生产基地构建的机器人焊接生产线,包含20台ABBIRB6700六轴焊接机器人,搭配AGV自动上下料装置与激光焊缝跟踪系统,形成推土机履带架全自动焊接闭环。生产过程中,通过离线编程软件提前规划12条焊接路径,履带架工件由AGV精准输送至焊接工位后,机器人搭载的激光传感器实时扫描焊缝轮廓,动态修正焊接路径偏差,修正精度达 $\pm 0.05\text{mm}$ 。传统人工焊接履带架时,因操作手法差异导致焊接合格率仅为92%,而机器人焊接合格率提升至99.5%,单班生产可减少15件缺陷产品返工,每年节省返工消耗的钢材20吨、电能3.6万kWh。在徐工集团起重机吊臂焊接中,采用两台KUKAKR500机器人协同作业模式,通过总线控制实现动作同步,同时从吊臂两侧的对称焊缝进行焊接,有效抵消焊接应力,避免吊臂变形。该模式使吊臂焊接效率提升60%,单台吊臂焊接时间从传统人工的8小时缩短至3.2小时,单位产品焊接能耗从10kWh/m

降至5.5kWh/m,降低45%。此外,机器人焊接参数波动范围控制在 $\pm 5\%$ 以内,使焊接烟尘排放量稳定在120mg/min,便于通过集中除尘系统高效收集,烟尘捕捉率达98%,较人工焊接的分散排放实现减排效果质的提升。

4 绿色焊接技术的减排效果分析

4.1 减排效果评估指标体系构建

绿色焊接技术减排效果评估指标体系需兼顾定量与定性指标,构建“能源消耗-污染物排放-资源利用”三维评估框架。定量指标包括单位焊缝能耗($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}$)、单位产品二氧化碳排放量($\text{kg}/\text{台}$)、焊接烟尘排放浓度(mg/m^3)、有害气体(NO_x 、 CO)排放速率(mg/s)、材料利用率($\%$)及废旧焊材回收率($\%$),这些指标可通过能源监测仪、气体分析仪等设备直接测量。定性指标涵盖焊接作业环境改善程度、操作人员健康风险降低情况及技术成熟度,采用专家评分法进行量化。指标权重通过层次分析法确定,其中单位产品二氧化碳排放量与焊接烟尘浓度权重最高,分别占25%与20%,突出减排核心目标。该体系通过加权评分计算综合减排效果指数,实现不同绿色焊接技术减排性能的横向对比,为企业技术选型提供科学依据^[4]。

4.2 不同绿色焊接技术与传统焊接技术的减排效果对比分析

以工程机械常用的Q690高强度钢焊接为例,对比不同技术的减排效果:传统手工电弧焊单位焊缝能耗为 $8.2\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}$,二氧化碳排放量为 $12.5\text{kg}/\text{m}$,焊接烟尘浓度达 $180\text{mg}/\text{m}^3$;采用逆变式气体保护焊(高效节能技术)后,单位焊缝能耗降至 $5.7\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}$,二氧化碳排放量减少至 $8.3\text{kg}/\text{m}$,烟尘浓度降至 $100\text{mg}/\text{m}^3$,各项指标分别降低30.5%、33.6%与44.4%。在铝合金部件焊接中,传统氩弧焊二氧化碳排放量为 $6.8\text{kg}/\text{m}$,烟尘浓度 $85\text{mg}/\text{m}^3$,而搅拌摩擦焊无二氧化碳排放,烟尘浓度趋近于零,同时省去保护气体消耗,综合减排效果显著。焊接机器人技术与人工焊接相比,单位产品二氧化碳排放量降低42%,因返工减少使材料浪费量降低80%,充分体现绿色焊接技术的减排优势。

4.3 绿色焊接技术减排效果的影响因素分析

绿色焊接技术减排效果受技术本身特性、应用条件及管理水平多因素影响。技术特性方面,热源能量密度直接决定能耗与排放,激光焊接、等离子焊等高能密度技术减排效果优于传统电弧焊;焊接材料类型也有显著影响,采用低污染焊材与免保护焊接技术可大幅降低污染物排放。应用条件中,焊接工件的材质、厚度与结构复杂度会影响技术适配性,如搅拌摩擦焊在厚板铝合金焊接中减排效果突出,但不适用于高强度钢焊接。管理水平方面,设备维护状况直接影响能源利用效率,定期校准的焊接机器人能耗比未维护设备低15%;操作人员技能水平决定参数设置合理性,熟练技工操作的自动化设备可使减排效果提升10%~20%。此外,生产批量规模也会影响减排效益,大规模生产中自动化技术的减排优势更易凸显。

结束语:

绿色焊接技术是工程机械制造行业达成“双碳”目标的关键支撑,在节能降耗、控污及资源循环上优势显著,实践中已获验证。本文界定其内涵、梳理分类、探讨应用场景、构建减排评估体系,明确减排性能与影响因素,推动焊接工序转型。但推广面临成本高、适配复杂工况不足等问题。未来要加强产学研协同,研发低成本材料装备、提升适配力;企业完善绿色生产管理体系,强化培训运维,以技术创新与管理升级促行业生态与经济效益协同共进。

参考文献:

- [1]王清墨.激光焊接技术导入工程机械结构件制造的范式研究[J].电焊机,2023,53(7):67-72.
- [2]王清华,陈超.探析焊接与切割装备在工程机械制造高效焊接中的应用[J].内燃机与配件,2020,No.309(09):106-107.
- [3]田鹏,廖秋琴.自动化焊接设备在工程机械制造中的应用研究[J].中国高新技术企业,2021(14):45-46.
- [4]吴新华,李坡.焊接技术及自动化现状挑战与未来发展的深度剖析[J].冶金与材料,2025,45(9):175-177.