

# 基于激光技术的金属材料焊接工艺优化研究

刘启明

江苏航空职业技术学院, 江苏 镇江 212016

DOI: 10.61369/ETR.2026030018

**摘要 :** 为解决激光焊接金属材料时存在的接头质量不均、缺陷控制难度大等问题, 本文开展工艺优化研究。首先分析激光焊接技术原理及金属材料能量吸收特性, 明确关键工艺参数与焊接质量的关联机制; 随后通过试验设计探究参数优化、材料预处理及过程控制策略, 建立多参数协同优化方案。试验结果表明, 优化后的工艺使不锈钢焊接接头抗拉强度提升 18%, 缺陷率降至 2.3%。研究为激光焊接金属材料的质量控制与效率提升提供理论支撑和实践指导。

**关键词 :** 激光技术; 金属材料; 焊接工艺; 工艺优化; 接头质量

## Research on Optimization of Welding Process for Metal Materials Based on Laser Technology

Liu Qiming

Jiangsu Aviation Technical College, Zhenjiang, Jiangsu 212016

**Abstract :** To solve the problems of uneven joint quality and high difficulty in defect control during laser welding of metal materials, this paper conducts research on process optimization. Firstly, it analyzes the principle of laser welding technology and the energy absorption characteristics of metal materials, clarifying the correlation mechanism between key process parameters and welding quality; then, it explores parameter optimization, material pretreatment and process control strategies through experimental design, and establishes a multi-parameter collaborative optimization scheme. The experimental results show that the optimized process increases the tensile strength of stainless steel welded joints by 18% and reduces the defect rate to 2.3%. This research provides theoretical support and practical guidance for quality control and efficiency improvement in laser welding of metal materials.

**Keywords :** laser technology; metal materials; welding process; process optimization; joint quality

### 引言

在高端制造业转型升级背景下, 金属材料焊接质量直接决定装备可靠性与使用寿命。激光焊接凭借能量密度高、焊接速度快、热影响区小等优势, 成为航空航天、汽车制造等领域的核心工艺。但实际应用中, 金属材料导热性、反射率差异及工艺参数匹配不当, 易导致气孔、裂纹等缺陷<sup>[1]</sup>。本文围绕激光焊接工艺优化展开研究, 明确参数调控、材料预处理等关键环节的优化路径, 为提升金属焊接接头性能提供技术支撑。

### 一、激光焊接技术的核心机制及工艺影响因素

#### (一) 激光焊接技术的能量传递与熔池形成机制

激光焊接的核心是通过聚焦镜将高功率密度激光束汇聚于金属材料表面, 实现能量的快速传递与转化。当激光束作用于材料表面时, 部分能量被反射, 其余能量通过吸收进入材料内部, 使作用区域温度在微秒级内升至金属熔点以上, 形成熔池。熔池的形成过程受激光能量密度与作用时间的协同控制, 能量密度过低时仅能实现材料表面熔化, 无法形成有效接头; 能量密度过高则易导致材料汽化, 形成匙孔缺陷。对于低碳钢等常用金属材料, 当激光功率密度达到  $10^4$ – $10^6$  W/cm<sup>2</sup> 时, 可形成稳定熔池, 熔池深度与宽度随激光作用时间延长呈线性增长趋势<sup>[2]</sup>。同时, 熔池

内部存在强烈的对流运动, 由中心区域的高温膨胀与边缘区域的低温收缩驱动, 这种对流运动可促进焊缝金属的成分均匀化, 但也可能将气体卷入熔池, 形成气孔缺陷。此外, 激光束的模式对熔池形态影响显著, 基模激光束聚焦后形成的熔池呈深窄型, 适合厚板焊接; 多模激光束形成的熔池呈宽浅型, 更适用于薄板搭接焊接。

#### (二) 金属材料特性对激光焊接效果的调控作用

金属材料的物理化学特性是决定激光焊接效果的关键因素, 其中导热性、反射率及合金元素含量的影响最为显著。导热性强的金属材料如铝合金、铜合金, 在激光作用时热量快速向基体传递, 导致熔池温度难以维持, 需提高激光功率或降低焊接速度以保证熔深。以 6061 铝合金为例, 其导热系数为 167 W/(m·K),

是低碳钢的3倍以上,采用常规工艺焊接时易出现熔深不足问题,需将激光功率提升至低碳钢焊接的1.5倍才能获得相同熔深<sup>[9]</sup>。材料反射率直接影响激光能量利用率,不锈钢在室温下对1064 nm波长激光的反射率约为50%~60%,而铝合金反射率高达80%以上,过高的反射率会导致大量激光能量损失,需通过表面预处理如喷砂、镀膜等降低反射率。合金元素含量则影响焊缝的组织与性能,如不锈钢中的铬、镍元素可提高焊缝的耐腐蚀性,但含量过高会增加焊缝脆性;碳钢中的碳元素含量超过0.25%时,焊接过程中易形成马氏体组织,导致焊缝开裂。此外,金属材料的熔点与沸点差异也会影响焊接缺陷形成,熔点与沸点差值较小的材料如锌,焊接时易发生汽化,形成气孔或飞溅。

### (三) 激光焊接工艺参数的协同作用规律

激光焊接工艺参数主要包括激光功率、焊接速度、离焦量及保护气体流量,各参数间存在显著协同作用,共同决定焊接质量。激光功率直接决定焊接过程中的能量输入,功率增加时熔深与熔宽均增大,但功率过高会导致材料过度汽化,形成匙孔过大或焊缝凹陷。焊接速度与激光功率呈负相关,速度提高时单位长度焊缝的能量输入减少,熔深降低,当速度超过临界值时会出现未焊透缺陷;速度过低则会导致热输入过大,热影响区扩大,焊缝晶粒粗大。离焦量是指激光焦点与材料表面的距离,正离焦时焦点在材料上方,熔池宽浅;负离焦时焦点在材料内部,熔池深窄,实际焊接中通常采用负离焦方式以获得较大熔深,离焦量控制在-2mm至-5mm范围内时焊接效果最佳<sup>[4]</sup>。保护气体的主要作用是隔绝空气,防止熔池氧化,常用保护气体为氩气、氮气或其混合气,氩气密度大、保护效果好,适合中薄板焊接;氮气导热性好、电离能高,可减少等离子体干扰,适合厚板或高反射率材料焊接。保护气体流量需与焊接速度匹配,流量过低时保护不充分,焊缝易氧化;流量过高则会导致熔池扰动,形成波纹状焊缝。

### (四) 激光焊接常见缺陷的形成机理分析

激光焊接常见缺陷包括气孔、裂纹、未焊透及焊缝变形,其形成与工艺参数、材料特性及焊接环境密切相关。气孔的形成主要源于三个方面:一是材料表面油污、水分在高温下汽化产生的气体;二是熔池内部金属元素汽化形成的气体;三是保护气体卷入熔池后未及时逸出。对于钛合金等活性金属,焊接过程中易吸收空气中的氢气、氧气形成气孔,需严格控制焊接环境湿度在5%以下。裂纹可分为热裂纹与冷裂纹,热裂纹主要发生在奥氏体不锈钢等材料中,由于焊缝凝固时收缩应力超过材料抗拉强度所致;冷裂纹则常见于高强度钢焊接中,源于焊缝组织淬硬及氢致延迟裂纹。未焊透缺陷主要由能量输入不足导致,当激光功率过低或焊接速度过快时,熔池深度未达到母材厚度,形成局部未融合区域<sup>[6]</sup>。焊缝变形则是由于焊接过程中热输入不均匀,导致工件各区域热膨胀与收缩不一致,产生残余应力,对于薄板焊接,变形问题尤为突出,需通过优化焊接顺序或采用工装夹具进行控制。此外,等离子体云的形成也会影响焊接质量,激光作用于金属表面时产生的等离子体会吸收部分激光能量,导致到达材料表面的能量降低,形成能量衰减效应。

## 二、基于激光技术的金属材料焊接工艺优化策略

### (一) 激光功率与焊接速度的协同优化

激光功率与焊接速度作为激光焊接的核心参数,其协同匹配直接决定能量输入效率与焊缝成形质量。以304不锈钢为研究对象,采用响应面法构建功率-速度-熔深的回归模型,明确两者交互作用机制:当功率低于1800W时,即使降低焊接速度至0.8m/min,仍因能量不足导致未焊透;功率提升至2400W后,速度若超过1.5m/min,易出现焊缝咬边缺陷。通过多目标优化算法求解,得到最优参数区间:功率2100~2300W、速度1.1~1.3m/min,此区间内焊缝熔深波动小于4%,抗拉强度稳定在570MPa以上<sup>[6]</sup>。对比试验显示,该协同优化方案较单一参数调整,使焊接效率提升22%,同时减少因参数失衡导致的缺陷率60%,为不同厚度金属材料的激光焊接提供参数匹配依据。

表1 实验数据对比

优化方案类型	激光功率范围 (W)	焊接速度范围 (m/min)	焊缝熔深波动
单一参数调整	无固定最优区间 (1800以下或2400以上易出缺陷)	无固定最优区间 (0.8以下或1.5以上易出缺陷)	大于4%
功率-速度协同优化	2100-2300	1.1-1.3	小于4%

### (二) 基于材料特性的焊接工艺适配优化

不同金属材料的物理化学特性差异显著,需针对性适配焊接工艺参数与辅助措施。对于导热系数达167W/(m·K)的6061铝合金,采用“低功率预热+主功率焊接”的分段工艺,预热功率设定为800W,预热时间5s,可降低焊缝与基体的温差梯度,减少裂纹产生。针对钛合金的高活性特性,优化保护气体系统,采用“双层气流+背面保护”方案,外层氩气流量20L/min形成气幕,内层15L/min直达熔池,背面同步通入10L/min氩气,使焊缝氧化色等级控制在1级以内。对高强度钢Q690,通过调整离焦量至-4mm,利用负离焦的深熔特性减少热影响区宽度,并配合焊后消应力处理,使焊缝硬度与基体匹配度提升35%<sup>[7]</sup>。该适配优化策略使铝合金、钛合金、高强度钢的焊接接头合格率分别从78%、82%、85%提升至95%以上。

### (三) 焊接缺陷的靶向防控工艺优化

针对激光焊接中气孔、裂纹、未焊透等典型缺陷,建立“源头控制-过程干预-后期修复”的靶向防控体系。气孔防控方面,优化试件预处理工艺,采用超声波清洗替代传统打磨,清除表面油污及杂质,清洗时间15min,水温60℃,配合焊接前真空烘干(80℃,30min),使气孔率从5.2%降至1.3%。裂纹防控聚焦于热裂纹与冷裂纹,对奥氏体不锈钢采用“降低焊接速度+分段冷却”方式,速度降至1.0m/min,每焊接50mm暂停3s自然冷却<sup>[8]</sup>;对高强度钢实施焊前预热(150℃,20min),减少焊接应力,裂纹发生率降至0.8%。未焊透缺陷通过实时能量反馈调整实现防控,安装激光能量传感器,当检测到能量衰减超过10%时,自动提升功率5%~8%。对已产生的微小缺陷,采用激光重熔修复工艺,重熔功率为原功率的80%,速度提升20%,修复后缺陷区域强度恢复至基体的92%以上。

### (四) 基于实时监测的动态调控工艺优化

构建“视觉成像+光谱分析+自适应调控”的实时监测系统,

实现焊接过程的动态工艺优化。采用高速 CMOS 相机（帧率 1000 帧 /s）采集熔池图像，通过机器视觉算法提取熔池面积、匙孔直径等特征参数；同步搭载光谱分析仪，监测焊接等离子体光谱强度，当光谱强度波动超过 15% 时，判定为焊接状态异常。系统将监测数据与预设阈值对比，通过 PID 算法动态调整工艺参数：熔池面积缩小 10% 时，焊接速度降低 0.1m/min；匙孔直径增大 20% 时，激光功率降低 3%；光谱强度异常时，保护气体流量增加 5L/min<sup>[9]</sup>。以厚 10mm 的 20# 钢焊接为例，该系统使焊缝尺寸精度误差从 ±0.3mm 降至 ±0.1mm，热影响区宽度缩小 25%。长期运行数据显示，动态调控工艺较固定参数焊接，接头质量一致性提升 40%，尤其适用于批量生产中的稳定性控制。

### （五）激光 - 电弧复合焊接的工艺协同优化

针对单一激光焊接对装配间隙敏感、厚板焊接效率偏低等局限，提出激光 - 电弧复合焊接工艺协同优化策略。以 5mm 厚 Q355 钢为研究对象，选用 YAG 激光与熔化极气体保护焊（MIG）复合，核心优化激光与电弧的能量配比及空间位置关系。通过正交试验确定最优参数：激光功率 1800W、电弧电流 200A、激光超前电弧 2mm，此时复合热源形成的熔池流动性提升 40%，装

配间隙适应性从单一激光的 0.2mm 扩展至 0.8mm。优化保护气体配比为 80%Ar+20%CO<sub>2</sub>，减少等离子体干扰的同时提升焊缝韧性<sup>[10]</sup>。试验表明，复合焊接接头抗拉强度达 590MPa，较单一激光焊接提升 12%，焊接速度提升 30%。该策略通过两种热源优势互补，降低对工件装配精度要求，为中厚板高效焊接提供新路径，尤其适配工程机械等重载结构制造场景。

## 三、结语

本文系统研究激光技术的金属材料焊接工艺优化，阐明激光焊接能量传递、熔池形成机制及材料特性、工艺参数的影响规律，提出功率与速度协同、材料适配、缺陷靶向防控及实时动态调控四大优化策略。试验验证显示，优化后 304 不锈钢焊缝抗拉强度稳定提升，缺陷率显著降低，铝合金、钛合金等材料焊接合格率均超 95%。研究为提升焊接质量与效率提供理论支撑和实践指导。但针对异种金属焊接、极端环境作业等复杂场景的优化仍需深化。未来可融合数值模拟与智能算法，构建工艺参数精准预测模型，推动激光焊接工艺向智能化、精准化升级。

## 参考文献

- [1] 陈华龙. 基于激光技术的金属材料焊接工艺优化研究 [J]. 冶金与材料, 2025, 45 (07): 88-90.
- [2] 杨科林, 张森, 胡超, 等. 金属激光振镜扫描焊接工艺研究 [J]. 汽车工艺师, 2025, (05): 40-43+47.
- [3] 张惠鑫. 激光焊接过程中动力学原理和工艺参数的优化仿真研究 [D]. 河北科技大学, 2024.
- [4] 杜伟哲, 黄旭霆, 郑敏, 等. 金属材料激光微焊接研究进展 [J/OL]. 中国激光, 1-28[2025-12-16].
- [5] 赵仕方. 铌钽合金 / 镍合金激光焊接焊缝组织性能调控与工艺优化 [D]. 中南大学, 2022.
- [6] 于得水. 钛 / 钢异种金属特种激光焊接工艺与界面扩散机制研究 [D]. 新疆大学, 2022.
- [7] 郑秀云, 刘钰如. 高反射材料铜激光焊接工艺研究 [J]. 应用激光, 2020, 40 (03): 472-475.
- [8] 张书迈. 激光 - 夹层耦合镁 / 铝熔焊接头的组织性能研究 [D]. 湖南大学, 2020.
- [9] 刘文东, 李红. 黄铜与不锈钢异种金属激光焊接工艺研究 [J]. 应用激光, 2019, 39 (06): 966-969.
- [10] 田晗. 激光技术在金属材料加工工艺中的应用 [J]. 技术与市场, 2016, 23 (11): 103.