铝合金薄板激光焊接工艺参数优化及接头性能研究

李玄涛
苏州江南航天机电工业有限公司　江苏　苏州　215312

摘　要：铝合金薄板激光焊接中，工艺参数优化对接头性能提升至关重要。本文深入探讨了激光功率、焊接速度、离焦量等核心工艺参数的选取依据，系统阐述了单因素变量与多因素耦合优化方法，并构建了工艺参数与接头性能的关联模型。通过力学性能测试、微观组织观察及缺陷检测等手段，全面评估了接头性能。研究揭示了多参数协同作用规律，为铝合金薄板激光焊接工艺的精准调控提供了理论依据，对提升焊接质量与生产效率具有重要指导意义。

关键词：铝合金薄板；激光焊接；工艺参数优化；接头性能；多因素耦合

引言：铝合金薄板因质量轻、强度高、耐腐蚀等特性，广泛应用于航空航天、汽车制造等领域。激光焊接作为先进连接技术，具有能量密度高、热影响区小、焊接速度快等优势，成为铝合金薄板连接的首选方法。然而，铝合金的高反射率、高导热性及易氧化特性，使得激光焊接过程复杂多变，工艺参数的微小波动均可能引发接头性能显著变化。因此，系统研究工艺参数优化方法，揭示参数与接头性能的内在关联，对提升铝合金薄板激光焊接质量、推动相关领域技术进步具有重要现实意义。

1 铝合金薄板激光焊接工艺参数筛选研究

1.1 激光功率的选取依据

激光功率作为激光焊接的核心能量参数，直接影响焊接熔池的形成与热影响区范围。针对铝合金薄板材料特性，需综合考虑材料对激光的吸收率、板材厚度及热导率。当激光功率过低时，无法提供足够的能量密度实现完全熔透，易导致未熔合缺陷；而功率过高则可能引发材料过度蒸发，形成匙孔不稳定现象，甚至造成板材烧穿[1]。在保证焊接质量的前提下，应优先选择能够实现稳定匙孔模式的功率范围，该范围通常与材料厚度呈正相关关系。对于特定厚度铝合金薄板，需通过实验确定功率阈值，确保能量输入既能形成完整焊缝，又能控制热输入量在合理区间。

1.2 焊接速度的选取依据

焊接速度与激光功率共同构成焊接线能量控制体系。速度过快会导致单位长度热输入不足，使熔池尺寸减小，焊缝成形不良；速度过慢则造成热积累效应增强，可能引发晶粒粗化、热裂纹等缺陷。在确定焊接速度时，需结合材料熔点、热扩散系数及激光功率进行综合分析。通过建立焊接速度与熔池动态行为的数学模型，可预测不同速度条件下熔池的凝固时间与冷却速率，进而优化速度参数。实际应用中，应保证焊接速度与激光功率匹配，使熔池处于稳定流动状态，避免出现驼峰焊道或咬边等缺陷。

1.3 离焦量的选取依据

离焦量通过改变激光光斑在工件表面的聚焦状态，直接影响能量密度分布与熔池形态。正离焦条件下，光斑尺寸增大导致能量密度降低，适用于需要控制热输入的薄板焊接；负离焦则使光斑聚焦于材料内部，能量密度集中，有利于实现深熔焊接。针对铝合金薄板，需根据板材厚度与焊接模式选择离焦量：薄板焊接通常采用正离焦以控制熔深，防止烧穿；而需要获得较大熔深时，可采用适当负离焦配合高功率参数。离焦量的精确控制对焊缝成形质量至关重要，需通过实验确定最佳离焦范围。

1.4 保护气体相关参数的选取依据

保护气体在激光焊接中承担着防止氧化、稳定电弧与排除等离子体的多重作用。气体种类选择需考虑材料特性与焊接环境，铝合金焊接通常采用高纯氩气或氦气，其中氦气因电离能较高，更有利于抑制等离子体形成。气体流量与喷嘴结构共同影响保护效果：流量过小无法有效隔绝空气，流量过大则可能扰动熔池。通过数值模拟可优化气体流场分布，确保保护气体在焊接区域形成稳定层流。气体喷嘴与工件表面的距离也需精确控制，以维持最佳保护范围。

1.5 其他辅助工艺参数的选取依据

除核心参数外，辅助工艺参数对焊接质量同样具有重要影响。激光束偏转角度通过改变能量作用方向，可优化焊缝成形；脉冲波形设计通过控制能量输入模式，能够抑制飞溅并改善熔池流动性[2]。对于高反射率铝合金材料，采用光束振荡技术可提高能量吸收率，减少焊接缺陷。这些辅助参数需与核心工艺参数协同优化，通过系统实验建立参数耦合关系模型，最终形成完整的铝合金

薄板激光焊接工艺规范。

2 铝合金薄板激光焊接工艺参数优化方法

2.1 单因素变量优化思路

单因素变量优化通过控制单一工艺参数变化，分析该参数对焊接质量的影响规律，为多参数协同优化奠定基础。在铝合金薄板激光焊接中，可依次调整激光功率、焊接速度、离焦量等核心参数，保持其他参数恒定，观察焊缝成形、熔深、气孔率等质量指标的变化趋势。例如，研究激光功率对熔深的影响时，需固定焊接速度与离焦量，通过逐步提升功率值，记录熔深随功率变化的曲线关系。这种优化方式能够清晰揭示各参数的独立作用机制，但需注意实验条件的一致性，避免环境波动对结果产生干扰。单因素优化结果可为后续多参数耦合分析提供边界条件与初始参考值，是工艺参数优化的重要基础步骤。

2.2 多因素耦合优化思路

多因素耦合优化致力于揭示工艺参数间的协同作用规律，通过构建多变量响应模型实现整体性能提升。铝合金薄板焊接过程中，激光功率与焊接速度的匹配关系决定线能量输入，直接影响熔深均匀性与热影响区范围。离焦量与保护气体流量的协同作用则调控熔池稳定性，避免气孔与飞溅缺陷产生。采用正交实验设计或响应面法，可系统分析多参数组合对焊接质量的影响程度。例如，通过构建功率-速度-离焦量三因素响应模型，利用方差分析识别关键影响因素，并预测不同参数组合下的焊缝成形质量。数值模拟技术为多因素耦合分析提供有力支持，通过建立热-力耦合模型，可直观呈现参数交互作用下的熔池动态行为。优化过程中需平衡不同性能指标间的矛盾关系，如提高焊接效率可能降低熔深稳定性，而强化接头强度可能牺牲部分塑性。最终优化方案需通过标准化实验验证，确保其在工程实际中的适用性与稳定性。

2.3 工艺参数优化的核心逻辑

工艺参数优化的本质是建立输入参数与输出质量之间的定量映射关系，通过数学建模与实验验证实现工艺窗口的精准定位。针对铝合金薄板激光焊接，需以焊接质量评价指标体系为基础，构建包含熔深均匀性、气孔率、表面粗糙度等指标的多目标优化模型。优化过程中需平衡不同指标间的矛盾关系，例如提高焊接速度可能降低熔深均匀性，而增加功率则可能加剧气孔缺陷。通过引入权重系数或约束条件，可将多目标问题转化为单目标优化问题。最终优化方案应满足工程实际需求，在保证焊接质量的前提下，兼顾生产效率与成本控制。参数优化结果需通过标准化实验进行验证，确保其在实际生产环境中的适用性与稳定性。

3 铝合金薄板激光焊接接头性能测试方法

3.1 接头力学性能测试方法

铝合金薄板激光焊接接头的力学性能测试需围绕抗拉强度、屈服强度及延伸率等核心指标展开。标准拉伸试样通常沿垂直于焊缝方向截取，试样尺寸需符合相关规范要求，以确保测试结果具有可比性[3]。测试过程中，采用万能材料试验机以恒定速率加载，记录载荷-位移曲线，通过数据处理获得接头的强度与塑性指标。对于薄板焊接接头，需特别注意夹具设计对测试结果的影响，避免因应力集中导致数据失真。此外，弯曲试验可评估接头的塑性变形能力，通过观察试样弯曲后的表面裂纹情况，判断焊接接头的韧性水平。硬度的分布特征对焊接质量评价同样重要，维氏硬度计沿焊缝横截面进行多点测试，能够揭示热影响区与熔合区的硬度变化规律，为工艺优化提供依据。

3.2 接头微观组织观察方法

微观组织观察是分析焊接接头性能内在机制的关键手段。金相制备需依次完成切割、镶嵌、研磨与抛光等工序，确保试样表面平整无划痕。采用化学腐蚀或电解抛光方法显示组织特征，腐蚀剂选择需针对铝合金特性进行优化，以清晰呈现晶界与第二相分布。光学显微镜可初步观察焊缝区、热影响区及母材的组织差异，而扫描电子显微镜则能进一步分析微观缺陷与相组成。电子背散射衍射技术可获取晶粒取向信息，为研究焊接接头的各向异性提供数据支持。透射电子显微镜在纳米尺度下观察析出相形态与位错结构，有助于揭示强化机制对力学性能的影响。微观组织观察结果需与力学性能数据关联分析，建立组织-性能的定量关系模型。

3.3 接头焊接缺陷检测方法

焊接缺陷的准确检测是保证接头可靠性的重要环节。无损检测技术中，X射线实时成像可检测气孔、裂纹等体积型缺陷，通过调整曝光参数与图像处理算法，提高微小缺陷的识别率。超声波检测对未熔合、夹渣等平面型缺陷敏感，采用相控阵超声技术可实现缺陷的精确定位与尺寸测量。激光散斑干涉法通过分析表面变形场，能够检测接头内部的应力集中区域，为缺陷危害性评估提供参考。对于疑似缺陷区域，需结合破坏性检测进行验证，金相切片观察可明确缺陷类型与尺寸，而能谱分析则能确定夹杂物的化学成分。缺陷检测标准需依据焊接质量等级要求制定，确保检测结果满足工程应用需求。检测数据的统计分析有助于识别工艺缺陷的产生规律，

为焊接工艺改进提供方向。

4 工艺参数与接头性能的关联分析

4.1 激光功率与接头性能的关联

激光功率作为核心能量输入参数，对铝合金薄板焊接接头的熔深、热影响区范围及微观组织演变具有决定性影响。功率提升直接导致能量密度增加，使熔池尺寸扩大，熔深显著增大。当功率超过临界值时，熔池稳定性下降，易引发匙孔坍塌，形成气孔缺陷[4]。微观层面，高功率条件下熔池冷却速率加快，晶粒细化趋势增强，但过高的热输入可能促使第二相粒子粗化，降低接头硬度。力学性能测试表明，适当提高功率可提升抗拉强度，但过度增加会导致韧性下降，裂纹敏感性提高。功率对热影响区宽度的影响呈非线性关系，需通过实验确定最佳功率范围，以平衡熔透需求与组织劣化风险。

4.2 焊接速度与接头性能的关联

焊接速度通过改变单位长度热输入量，调控熔池动态行为与凝固过程。速度加快时，熔池停留时间缩短，熔深减小，焊缝成形系数增大。快速焊接条件下，熔池凝固前沿推进速度提升，柱状晶生长方向性增强，可能导致各向异性加剧。速度对热影响区的影响表现为：低速焊接时热积累效应显著，热影响区晶粒粗化；高速焊接则因冷却速率过快，易产生淬硬组织，增加冷裂纹倾向。力学性能方面，速度提升通常导致强度略有下降，但延伸率可能因组织细化而改善。需结合材料特性优化速度参数，避免因速度过快引发未熔合或速度过慢导致热损伤。

4.3 离焦量与接头性能的关联

离焦量通过改变激光光斑能量分布特征，影响熔池形态与能量吸收效率。正离焦条件下，光斑尺寸增大导致能量密度降低，适用于薄板焊接以控制熔深，防止烧穿。负离焦使光斑聚焦于材料内部，能量密度集中，有利于实现深熔焊接，但可能加剧等离子体屏蔽效应。离焦量对焊缝成形的影响表现为：适当正离焦可获得表面平整的焊缝，负离焦则可能因能量过度集中导致焊缝下塌。微观组织方面，离焦量影响熔池对流模式，进而调控晶粒取向与第二相分布。通过优化离焦量，可改善焊缝与母材的过渡区质量，降低应力集中风险。

4.4 多参数耦合对接头性能的关联

实际焊接过程中，工艺参数间存在复杂的交互作用，单一参数优化难以全面提升接头性能。激光功率与焊接速度的匹配关系决定线能量输入，直接影响熔深均匀性与热影响区范围。离焦量与保护气体流量的协同作用调控熔池稳定性，避免气孔与飞溅缺陷。多参数耦合优化需建立响应面模型，通过统计方法分析参数间的交互效应。例如，高功率条件下适当提高速度可抑制热影响区粗化，而配合负离焦与氦气保护则能提升熔池流动性，减少缺陷形成。数值模拟技术可揭示多参数耦合下的熔池动态行为，为工艺窗口定位提供理论支持[5]。最终优化方案需满足强度、韧性及耐蚀性等多指标要求，通过加权评分法实现综合性能最优。多参数耦合优化是突破单因素局限、实现焊接质量跃升的关键路径。

结束语

铝合金薄板激光焊接工艺参数优化研究，全面剖析了各核心及辅助参数的选取依据，通过单因素与多因素耦合优化方法，构建了参数与接头性能的关联模型。借助多种测试手段，深入分析了参数对接头力学性能、微观组织及缺陷的影响。研究成果为铝合金薄板激光焊接工艺的精准调控提供了坚实依据，有助于提升焊接质量，降低生产成本，推动该技术在更多领域的广泛应用，增强相关产业的市场竞争力。

参考文献

[1]钟林君,陶永杰,蒋平,等.考虑碳排放的铝合金薄板激光摆动焊接工艺参数优化[J].激光与光电子学进展,2022,59(23):169-178.

[2]宫照亮,蒋平,施建宏,等.动力电池1060铝合金薄板可调环形光斑激光搭接焊工艺优化[J].焊接学报,2023,44(11):67-79.

[3]王健强,赵而远,李家曙,等.车用铝合金薄板激光深熔焊工艺参数研究[J].合肥工业大学学报（自然科学版）,2023,46(6):727-731.

[4]李国旗,张玲玲,陈媛.6061铝合金薄板激光摆动填丝焊接头性能研究[J].应用激光,2025,45(7):89-100.

[5]宋少东,王燕燕,舒林森,等.基于RSM-PSO的6061铝合金激光焊接工艺优化[J].激光与光电子学进展,2022,59(17):217-223.