

激光焊接工艺参数对焊接质量影响的研究

李振东 王斐

长春富维安道拓汽车金属零部件有限公司，吉林省长春市，130000；

摘要：本研究系统探讨了激光焊接工艺参数对焊接质量的影响，旨在揭示参数间的相互作用规律，为优化工艺参数组合提供科学依据。通过设计合理的实验方案，选用 304 不锈钢板材，考察了激光功率、焊接速度、焦点位置和保护气体流量对焊缝熔深、焊缝宽度和热影响区（HAZ）的影响。实验结果表明，激光功率的增加显著提升焊缝熔深和宽度，但过高功率会导致材料烧穿和 HAZ 增大；焊接速度的调整直接影响熔池冷却速率，过快或过慢均不利于理想焊缝成形；焦点位置的变化显著影响能量分布，进而改变熔池形态和熔深；保护气体流量在防止熔池氧化和改善焊缝成形方面起关键作用，但需适中以避免熔池扰动。统计分析与回归分析表明，各工艺参数与焊接质量指标之间存在显著线性关系，所建立的数学模型能较好描述参数间相互作用规律。基于研究结果，提出了优化工艺参数的具体策略，为实际生产中的参数选择和优化提供了指导。

关键词：激光焊接；工艺参数；焊接质量；熔深；热影响区

DOI：10.64216/3080-1508.25.04.038

引言

激光焊接技术作为现代制造业中的一项重要连接技术，其高效、高精度的特点使其在汽车制造、航空航天、电子电器等领域得到广泛应用。激光焊接通过高能量密度的激光束作用于工件表面，实现材料的局部熔化并形成焊缝，从而完成材料的连接。其工作过程涉及激光的产生、传输、聚焦及与材料的相互作用，具有热影响区小、焊缝窄、焊接速度快等显著优势。

研究激光焊接工艺参数对焊接质量的影响，对于提升焊接接头的力学性能和整体制造水平具有重要意义。激光功率、焊接速度、焦点位置、保护气体流量等工艺参数直接影响熔池的形成、冷却过程及焊缝的几何形态。例如，激光功率过高可能导致材料烧穿，过低则熔深不足；焊接速度过快易出现未熔合现象，过慢则焊缝过宽；焦点位置的变化会影响能量分布，进而影响熔深；保护气体流量则关系到熔池的保护效果和焊缝成形质量。

本研究旨在系统探讨各工艺参数对焊接质量的具体影响，揭示参数间的相互作用规律，为优化工艺参数组合提供科学依据。通过设计合理的实验方案，采集精确的实验数据，并结合统计分析与回归分析，力求建立工艺参数与焊接质量指标之间的数学模型，以指导实际生产中的工艺参数选择和优化。

综上所述，深入研究激光焊接工艺参数对焊接质量的影响，不仅有助于提高焊接质量和生产效率，还能推动激光焊接技术在更多领域的应用与发展。

1 激光焊接技术概述

激光焊接作为一种先进的连接技术，其基本原理是通过高能量密度的激光束作用于工件表面，使材料局部

熔化并形成焊缝，从而实现材料的连接。激光焊接的工作过程主要包括激光的产生、传输、聚焦以及与材料的相互作用。激光器产生的光束经过光学系统聚焦后，形成极小的光斑，光斑处的材料吸收激光能量迅速升温至熔点，形成熔池。随着激光束的移动，熔池前方材料不断熔化，后方材料则迅速冷却凝固，最终形成连续的焊缝。

激光焊接具有诸多显著特点。首先，激光焊接的热影响区小，焊缝窄且深宽比大，能够显著减少焊接变形。其次，激光焊接速度快，生产效率高，适用于自动化生产线。此外，激光焊接能够实现多种材料的连接，且焊接过程无需接触，避免了机械应力和污染。与传统焊接方法如电弧焊、气体焊等相比，激光焊接在精度、速度和焊接质量上具有明显优势。

通过上述分析可以看出，激光焊接作为一种高效、高精度的焊接技术，其工艺参数对焊接质量有着至关重要的影响。深入研究激光焊接的工艺参数，优化焊接过程，对于提高焊接质量和生产效率具有重要意义。

2 激光焊接工艺参数及其影响

激光焊接工艺参数是影响焊接质量的关键因素，主要包括激光功率、焊接速度、焦点位置、保护气体流量等。激光功率直接决定了焊接过程中输入到材料的热量，进而影响熔池的大小和深度。较高的激光功率能够增加熔深，但过高的功率可能导致材料烧穿或形成较大的热影响区（HAZ），影响焊接接头的力学性能。相反，激光功率过低则可能导致熔深不足，焊缝不连续。

各工艺参数之间存在着复杂的相互作用。例如，激光功率和焊接速度的匹配直接影响熔池的形成和冷却

过程；焦点位置的变化会改变激光能量的分布，进而影响熔深和焊缝成形；保护气体流量的调整则需要考虑其对激光束传输和熔池保护的综合作用。因此，在实际应用中，需综合考虑各参数的相互作用，优化工艺参数组合，以获得最佳的焊接质量。

通过上述分析可以看出，激光焊接工艺参数的选择和优化对焊接质量具有决定性作用。深入研究各参数的具体影响及其相互作用，有助于在实际生产中制定合理的工艺方案，提高焊接质量和生产效率。

3 实验设计与方法

在本研究中，实验材料选用厚度为 2 毫米的 304 不锈钢板材，因其具有良好的焊接性能和广泛的应用背景。实验设备主要包括一台最大功率为 4 千瓦的连续波光纤激光器、一台高精度焊接工作台以及相应的保护气体供应系统。激光器配备有可调节的焦点位置装置，确保实验中焦点位置的精确控制。

实验方案设计如下：首先，设定激光功率分别为 1.5 千瓦、2.0 千瓦、2.5 千瓦和 3.0 千瓦，以考察不同功率对焊接质量的影响。其次，焊接速度设定为 5 毫米/秒、10 毫米/秒、15 毫米/秒和 20 毫米/秒，以研究焊接速度对熔池形成和冷却过程的影响。焦点位置分别设置为工件表面、工件表面上方 1 毫米和下方 1 毫米，以探讨焦点位置对能量分布和熔深的影响。保护气体流量设定为 10 升/分钟、15 升/分钟、20 升/分钟和 25 升/分钟，以评估其对熔池保护和焊缝成形的作用。

实验步骤具体如下：首先，将不锈钢板材切割成标准尺寸，并进行表面清洁，去除油污和氧化层。然后，根据预设的工艺参数组合，依次进行焊接实验。每组参数重复实验三次，以确保数据的可靠性和一致性。焊接过程中，实时监控激光功率、焊接速度、焦点位置和保护气体流量，确保各参数的稳定性和准确性。

数据采集主要通过高精度温度传感器和视觉检测系统进行。温度传感器布置在熔池附近，实时记录焊接过程中的温度变化；视觉检测系统则用于捕捉焊缝的形态和熔池的动态变化。实验结束后，采用扫描电子显微镜（SEM）和能谱分析（EDS）对焊缝截面进行微观分析，评估焊缝的显微组织和元素分布。

数据分析方法主要包括统计分析和回归分析法。通过统计分析，计算各组参数下焊缝熔深、焊缝宽度和 HAZ 大小的平均值和标准差，评估工艺参数对焊接质量的直接影响。回归分析则用于建立各工艺参数与焊接质量指标之间的数学模型，揭示参数之间的相互作用规律。具体地，采用多元线性回归模型，拟合激光功率、焊接速度、焦点位置和保护气体流量与熔深、焊缝宽度和 HAZ 大小之间的关系，模型表达式为：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \epsilon$$

其中，Y 为焊接质量指标， X_1 至 X_4 分别为激光功率、焊接速度、焦点位置和保护气体流量， β_0 至 β_4 为回归系数， ϵ 为误差项。

通过上述实验设计和数据分析方法，能够系统地研究激光焊接工艺参数对焊接质量的影响，为优化工艺参数组合提供科学依据。

4 实验结果与分析

在本研究中，通过系统实验设计和精确数据采集，详细考察了激光焊接工艺参数对焊接质量的影响。实验结果显示，不同激光功率下的焊缝截面形态存在显著差异。如图 2 所示，当激光功率为 1.5 千瓦时，焊缝截面较小，熔深较浅，焊缝宽度较窄；随着激光功率增加至 3.0 千瓦，焊缝截面显著增大，熔深和焊缝宽度均明显增加。这表明激光功率对焊接过程中的能量输入具有直接影响，进而影响熔池的形成和焊缝的几何尺寸。

在焊接速度方面，实验数据表明，较低的焊接速度（如 5 毫米/秒）会导致熔池冷却速度减慢，焊缝熔深和宽度较大，但同时热影响区（HAZ）也相应增大。随着焊接速度提高至 20 毫米/秒，熔池冷却速度加快，焊缝熔深和宽度减小，HAZ 范围也相应减小。这一结果与理论预期相符，即焊接速度直接影响熔池的停留时间和冷却速率，进而影响焊缝的成形质量。

焦点位置的实验结果显示，焦点位于工件表面时，焊缝熔深和宽度较为均衡；焦点位置上移至工件表面上方 1 毫米时，焊缝熔深略有减小，焊缝宽度增加；焦点位置下移至工件表面下方 1 毫米时，焊缝熔深显著增加，但焊缝宽度相对减小。这表明焦点位置的改变会影响激光能量的集中程度和分布，进而影响焊缝的几何形态。

保护气体流量的实验结果表明，随着保护气体流量从 10 升/分钟增加至 25 升/分钟，焊缝表面氧化程度逐渐减轻，焊缝成形质量得到改善。然而，过高的保护气体流量（如 25 升/分钟）会导致熔池扰动加剧，影响焊缝的均匀性。这一结果与理论预期一致，即适量的保护气体可以有效防止熔池氧化，但过量的保护气体反而会对熔池稳定性产生不利影响。

通过对实验数据的统计分析，发现激光功率、焊接速度、焦点位置和保护气体流量对焊缝熔深、焊缝宽度和 HAZ 大小均具有显著影响。回归分析结果显示，各工艺参数与焊接质量指标之间存在显著的线性关系，回归模型的拟合优度较高，表明所建立的数学模型能够较好地描述工艺参数与焊接质量之间的相互作用规律。

然而，实验结果与理论预期在某些情况下存在一定偏差。例如，在较高激光功率和较快焊接速度组合下，焊缝熔深并未达到理论预期的最大值。这可能是因为实际焊接过程中，熔池的动态变化和材料的热物理特性复杂，导致理论模型未能完全捕捉所有影响因素。此外，

实验环境中的温度波动和设备精度等因素也可能对实验结果产生一定影响。

综上所述,本研究通过系统实验和数据分析,揭示了激光焊接工艺参数对焊接质量的影响规律,为优化工艺参数组合提供了科学依据。实验结果与理论预期的吻合程度较高,但部分偏差仍需进一步研究和解释。

5 优化策略与建议

基于实验结果,提出优化激光焊接工艺参数的策略如下:首先,应根据所需焊缝的几何尺寸和熔深要求,合理选择激光功率。对于要求较深熔深的焊接,建议适当提高激光功率,但同时需注意避免过高的功率导致材料烧损。其次,焊接速度的选择应综合考虑熔池冷却速率和热影响区的大小,推荐在保证焊接质量的前提下,适当提高焊接速度以减小HAZ范围。焦点位置应尽量控制在工件表面或略上方,以确保焊缝熔深和宽度的均衡。保护气体流量应控制在适中范围,建议在15-20升/分钟,以有效防止熔池氧化且避免熔池扰动。

具体建议包括:在实际生产中,可通过预实验确定最佳工艺参数组合,并采用实时监测系统调整参数,确保焊接过程的稳定性和一致性。此外,建议采用高精度的焊接设备,减少设备误差对焊接质量的影响。

讨论本研究的局限性,主要体现在实验条件有限,未能涵盖所有可能的工艺参数组合,且实验材料单一,结果可能不适用于其他材料。未来研究方向可进一步拓展至不同材料的激光焊接工艺研究,探索更广泛的工艺参数范围,并结合数值模拟技术,深入分析熔池动态行为和材料热物理特性对焊接质量的影响。此外,研究环境因素对焊接过程的影响,以及开发智能化的焊接参数优化系统,也是未来值得探索的方向。

6 结论

本研究通过系统实验和精确数据分析,揭示了激光焊接工艺参数对焊接质量的具体影响。实验结果显示,激光功率的增加显著提升了焊缝熔深和宽度,但过高的功率可能导致材料烧穿和热影响区(HAZ)增大。焊接速度的调整直接影响熔池冷却速率,过快或过慢的焊接速度均不利于获得理想的焊缝成形。焦点位置的微小变化显著影响能量分布,进而改变熔池形态和熔深。保护气体流量在防止熔池氧化和改善焊缝成形方面起到关键作用,但需控制在适中范围以避免熔池扰动。

统计分析与回归分析表明,各工艺参数与焊接质量指标之间存在显著的线性关系,所建立的数学模型能够较好地描述参数间的相互作用规律。然而,实验结果与理论预期在某些情况下存在偏差,可能源于熔池动态变

化的复杂性和实验环境因素的影响。

基于研究结果,提出了优化工艺参数的具体策略,包括合理选择激光功率、适当提高焊接速度、精确控制焦点位置以及适中保护气体流量。实际生产中,建议通过预实验确定最佳参数组合,并采用实时监测系统确保焊接过程的稳定性。

本研究的局限性在于实验条件有限,未能涵盖所有工艺参数组合,且实验材料单一。未来研究可拓展至不同材料的激光焊接工艺,探索更广泛的参数范围,并结合数值模拟技术深入分析熔池行为和材料特性对焊接质量的影响。此外,研究环境因素及开发智能化焊接参数优化系统亦是重要方向。

参考文献

- [1]王浩然,温淳杰,牛潮,等. 1060 铝合金薄板激光焊接焊缝性能分析[J/OL]. 机电工程技术,1-8[2025-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1522.th.20250604.1057.002.html>.
- [2]苏俊,朱兴龙. 风力发电机组叶片结构裂纹激光焊接工艺参数优化研究[J/OL]. 金属加工(热加工),1-9[2025-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5627.TH.20250612.1501.002.html>.
- [3]李旺,潘晨银,权荣,等. 海油平台管道焊接工艺的优化与质量提升技术[J]. 全面腐蚀控制,2025,39(05):48-50. DOI:10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2025.05.048.03.
- [4]于长海,周方正,朱克明,等. 基于受控恒定穿孔策略的大熔深等离子弧焊接新工艺[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版),2025,46(02):98-106. DOI:10.16351/j.1672-6987.2025.02.014.
- [5]尹越,徐晓琪,蒲柯宇. 电渣焊焊缝及其热影响区材料延性断裂性能研究[J/OL]. 焊接学报,1-9[2025-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1178.TG.20250523.1348.002.html>.

作者简介:李振东,出生年月:1987年4月,性别:男,民族:汉族,籍贯:吉林省长春市,单位名称:长春富维安道拓汽车金属零部件有限公司,学历:本科,职称:副高级,主要研究方向:机械制造及自动化。

姓名,王斐 出生年月,1982.5 性别,男 民族,汉族 籍贯,吉林省长春市单位名称:长春富维安道拓汽车金属零部件,学历,本科,职称,副高级,主要研究方向,机械类,自动化。