

激光与光电子学进展

基于 RSM-PSO 的 6061 铝合金激光焊接工艺优化

宋少东¹, 王燕燕^{1*}, 舒林森^{1,2}, 何雅娟¹¹陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723001;²陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723001

摘要 工艺参数是决定铝合金激光焊接质量的关键因素。因此,在保证焊缝形貌质量优良的前提下,提出一种响应面与粒子群(RSM-PSO)的组合算法,探究 2 mm 厚 6061 铝合金薄板激光焊接最优工艺参数。基于 Design-Expert 10.0 软件进行光纤激光焊接试验设计,以焊缝塌陷和薄板弯曲变形为响应,建立了焊接参数多元线性回归模型,分析了各工艺参数对焊接质量的影响,并采用粒子群智能算法进行优化。结果表明:本研究试验条件下,扫描速度和离焦量的交互作用对焊缝塌陷影响比较大,激光功率与扫描速度对薄板变形量的影响比较大。优化后的最佳工艺参数组合为激光功率 2629 W、扫描速度 6.85 mm/s、离焦量 -0.18 mm。此参数下,6061 铝合金薄板塌陷深度仅为 85.66 μm ,弯曲变形也处于较低水平,为 1.2 mm,表明该算法所寻参数可有效提高焊接质量。

关键词 激光光学; 响应面法; 粒子群算法; 激光焊接; 工艺优化

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1714004

Optimization of 6061 Aluminum Alloy Laser Welding Process Based on RSM-PSO

Song Shaodong¹, Wang Yanyan^{1*}, Shu Linsen^{1,2}, He Yajuan¹¹College of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China;²Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, Shaanxi, China

Abstract Process parameters are the key factors determining the quality of laser welding aluminum alloys. Therefore, to ensure good weld morphology quality, a combined response surface methodology and particle-swarm optimization (RSM-PSO) algorithm was proposed to explore the optimal process parameters to laser weld 2 mm-thick 6061 aluminum alloy sheets. The experimental design of the fiber laser welding was performed using Desk-Expert 10.0 software. In response to weld collapse and sheet bending, multiple linear regression of the welding parameters was established. The effects of various process parameters on the welding quality were analyzed, and the particle-swarm intelligence algorithm was used for optimization. The results show that under the experimental conditions of this study, the scanning speed and defocusing have a strong influence on the weld collapse, and the laser power and scanning speed have a great influence on the sheet deformation. The optimal process parameters are laser power, scanning speed, and defocusing amount of 2629 W, 6.85 mm/s, and -0.18 mm, respectively. Under these parameters, the collapse depth and bending of the 6061 aluminum alloy sheet are only 85.66 μm and 1.2 mm, respectively, indicating that the parameters obtained via this algorithm can effectively improve the welding quality.

Key words laser optics; response surface method; particle swarm optimization; laser welding; process optimization

1 引言

随着我国高铁列车的飞速发展,为秉承绿色发展理念,轻量化逐渐成为轨道交通技术的一个热点^[1]。铝合

金由于其强度高、耐锈性好、塑性成形性好等优点,在航空、汽车等领域备受青睐,其焊接问题也成为工程应用的一个重要研究领域^[2-3]。然而,铝合金热导率高及存在表面氧化膜等原因^[4-5],对焊接工艺提出了新要求。

收稿日期: 2021-06-25; 修回日期: 2021-08-02; 录用日期: 2021-09-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51505268)、陕西省教育厅专项科研项目(18JK0150)、陕西理工学院科研计划项目(SLGKY14-13)

通信作者: wangyanyanustb@163.com

随着科学技术的不断发展,铝合金焊接工艺也在不断进步。国内外学者采用不同焊接方法对铝合金进行焊接连接及模拟仿真,并对其力学性能及组织进行研究,降低了连接难度^[6-8]。但在焊接过程中,仍存在变形量大、裂纹多等连接质量问题^[9-10],且焊接时辅助工作繁多,增大了工业应用难度。激光焊接技术作为一种高效清洁的制造技术,在加工时有着冷却速度快、热变形小等特点^[11],在铝合金焊接方面有着极为不俗的效果。但是,焊接质量取决于各个工艺参数的良好组合^[12-13],任意参数的微小调整都会对焊接质量产生很大影响。因此,研究焊接工艺参数的优化对铝合金焊接具有重大意义。舒服华等^[14]提出一种正交试验与灰色关联分析相结合的方法对 MIG 电弧焊接 6005A 铝合金进行优化,显著提高了接头质量,但对于多因素试验,该方法计算过程繁琐,样本点采集较多。邓德伟等^[15]在 FV520B 钢板的激光自熔焊中,采用正交试验方法寻找最优参数,但该方法有着信息涵盖不全、数据处理较为简单等问题。

响应面法采用多项式回归方法拟合函数,模型可靠性高、数学理论支撑性强、实用性高、所需样本采集点少。粒子群算法具有收敛速度快、搜索能力强、程序实现难度低等特点,适于实值性处理。因此,本文将响应面法与粒子群优化算法相结合,提出一种响应面与粒子群(RSM-PSO)组合算法,对 2 mm 厚的 6061 铝合金薄板激光焊接工艺参数进行优化,研究了各工艺参数对焊接质量的影响规律,并基于该方法获得最优工艺参数组合,进而有效改善了焊接质量。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料及装置

本次试验母材为 2 mm 厚的 6061 铝合金板,板材长宽尺寸为 100 mm × 150 mm,其化学成分(质量分数,%)为 Cu(0.15~0.4),Mn(0.15),Mg(0.8~1.2),Zn(0.25),Cr(0.04~0.35),Ti(0.15),Si(0.4~0.8),Fe(0.7),Al(余量)。试验采用功率为 3 kW 的半导体光纤输出激光焊接设备对板材进行连接,焊接设备由激光系统、水冷系统等组成,如图 1 所示。在开始焊接前,对薄板进行砂纸打磨、酒精清洗等预处理,而后进

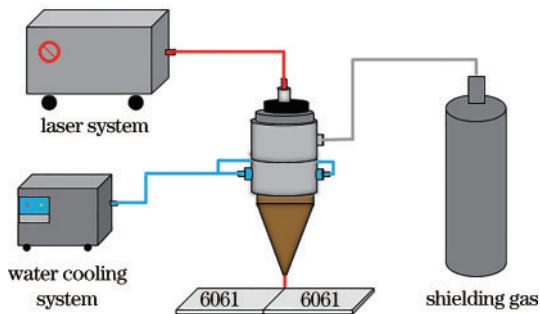


图 1 激光焊接系统

Fig. 1 Laser welding system

行定位夹紧。本试验衡量薄板连接质量的指标为焊接后薄板的弯曲变形和焊缝塌陷。为精确测量 6061 铝合金薄板焊接后的变形,参考文献^[16]的方法,将薄板由夹具取下进行测量。测量前先对整个测量系统进行校准,以水平工作作为基准,使其 z 坐标为 0 值,然后按照薄板表面上所规划的测量点进行逐点测量。其中,设定垂直焊缝方向变形为弯曲变形,其值由 $p_{x1} \sim p_{x7}$ 七点的 z 坐标值算出,测量示意图如图 2 所示。

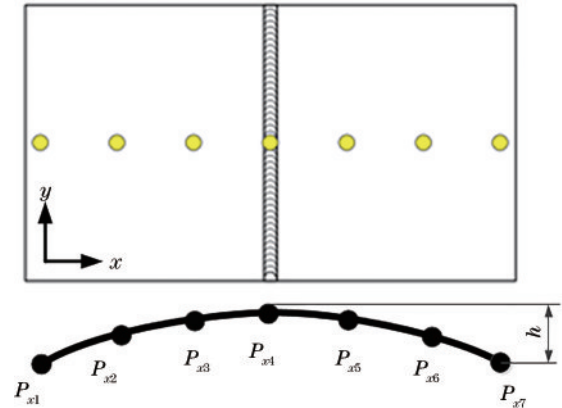


图 2 变形测量示意图

Fig. 2 Diagram of deformation measurement

2.2 基于 RSM-PSO 算法的优化策略

基于 RSM-PSO 算法的优化策略如图 3 所示,具体方法如下:1) Box-Behnken(BBD)试验方法设计试验;2) 基于响应面法建立输入因素与响应的数学模型;3) RSM-PSO 算法输出最佳工艺参数组合。

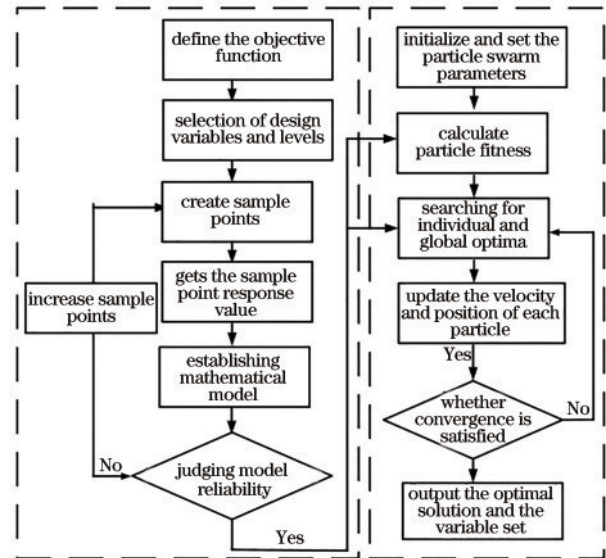


图 3 RSM-PSO 优化流程图

Fig. 3 RSM-PSO optimization flow chart

本研究采用 BBD 试验设计方法,该方法可在保证模型准确的前提下进行尽可能少的试验,实际操作时,也不会超出安全区域。以激光功率 P 、扫描速度 V 、离焦量 f 作为变量,薄板弯曲变形、塌陷深度作为响应

值,进行激光焊接试验。设计了 17 组三因素三水平的激光焊接试验,试验设计变量及响应值如表 1 所示。

表 1 试验设计与响应
Table 1 Experimental design and response

No.	P/W	$V/(mm \cdot s^{-1})$	f/mm	Bending deformation /mm	Collapse depth / μm
S1	2580	5	-0.2	1.0	642.00
S2	2640	7	-0.2	2.8	548.75
S3	2580	7	0	1.4	578.56
S4	2640	7	-0.2	3.1	610.83
S5	2580	9	-0.2	2.1	554.36
S6	2640	7	-0.2	2.4	568.39
S7	2640	7	-0.2	2.8	590.45
S8	2640	9	-0.4	2.2	652.84
S9	2640	5	0	2.0	660.23
S10	2640	7	-0.2	3.4	600.48
S11	2700	9	-0.2	3.1	356.25
S12	2700	7	-0.4	2.1	493.13
S13	2640	9	0	3.3	89.63
S14	2700	5	-0.2	1.8	634.12
S15	2580	7	-0.4	2.2	557.13
S16	2700	7	0	3.8	221.04
S17	2640	5	-0.4	2.0	243.52

3 试验结果与分析

3.1 数学模型的建立和检验

响应面法通过合理设计试验获得数据,并基于非线性拟合方式对响应和输入因素间的复杂关系进行函数表征,建立相应数学模型,来解决多变量问题。当输入变量在可控范围内变化且误差可忽略不计时,响应面函数可表征为

$$y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (1)$$

式中: n 为输入变量的数量。

数学建模以数学方程来表示多个因素和响应之间的关系,响应面一般以二次回归方程来表示,即

$$y = r_0 + \sum_{j=1}^k r_j x_j + \sum_{i < j} r_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k r_{jj} x_j^2 + \dots + \sum_{j=1}^k r_{jk} x_j^k, \quad (2)$$

式中: y 为响应; x 为独立变量; $r_0, r_j, r_{ij}, r_{jj}, r_{jk}$ 为各项变量的系数。

在 Design Expert 10.0 中,根据表 1 试验数据进行二次回归响应面分析,剔除不显著项,分别得到了以激光功率 P 、扫描速度 V 和离焦量 f 为变量,塌陷深度和弯曲变形为响应的回归方程,塌陷深度和弯曲变形分

别表示为

$$Y_1 = 592.33 - 78.44P - 65.85V - 49.65f - 73.38Pf - 244.98Vf - 0.68P^2 - 51.59V^2 - 135.80f^2, \quad (3)$$

$$Y_2 = 2.90 + 0.51P + 0.49V + 0.25f + 0.05PV + 0.63Pf - 0.45P^2 - 0.45V^2 - 0.08f^2. \quad (4)$$

对模型显著性进行检验,表 2 为塌陷深度、弯曲变形量模型的方差分析表。由表 2 可知,焊缝塌陷的回归方程模型 F 值为 17.47,概率 $P > F$ 的值为 0.0003 (< 0.05),说明模型高度显著,拟合效果可以接受。模型失拟度为 0.0879,结果不显著,模型可靠性高^[17]。除此之外,模型拟合效果还可通过模型的决定系数 (R-Squared) 来衡量,决定系数可评估所建立方程与实际输出之间的相似程度,R-Squared 值越大,表明回归方程拟合效果越好,模型可信度越高。表 2 中,焊缝塌陷模型决定系数为 0.9459,与实际输出相似度为 94.6%。同理可对弯曲变形量模型进行分析,概率 $P > F$ 的值为 0.0041,模型显著性较高,模型失拟度为 0.5896,结果不显著,R-Squared 的值为 0.9221,均表明其拟合效果可靠度较高。

图 4 为铝合金薄板焊缝塌陷模型与弯曲变形的残差正态概率分布图,可见两个模型的残差分布基本在

表 2 模型方差分析表
Table 2 Model analysis of variance table

Model	Sum of squares	Mean square	F value	Value of $P > F$	Lack of fit	R-squared
Collapse depth	4.58×10^5	57245.96	17.47	0.0003(significant)	0.0879(not significant)	0.9459
Bending deformation	8.24	0.92	9.19	0.0041(significant)	0.5896(not significant)	0.9221

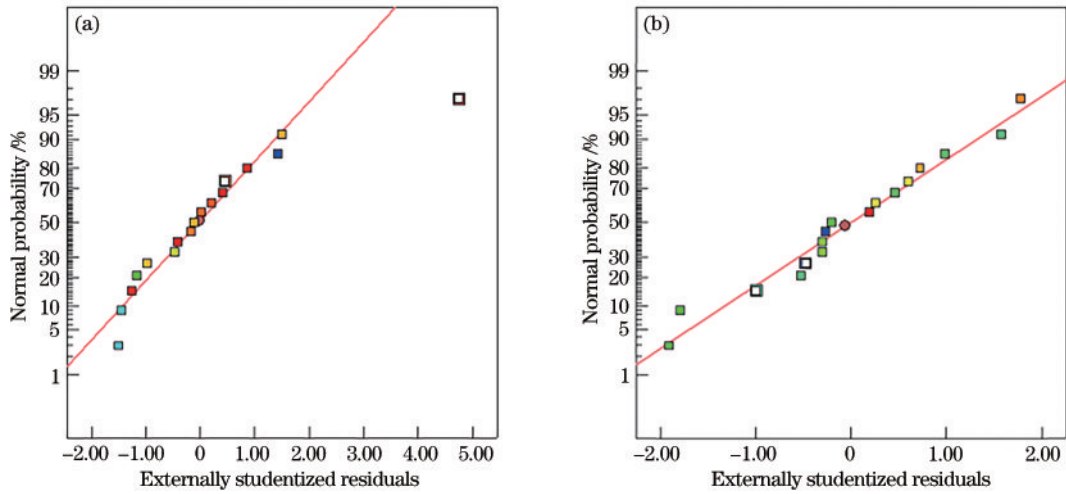


图 4 模型正态概率残差图。(a)塌陷模型；(b)弯曲变形模型

Fig. 4 Normal probability residuals of the model. (a) Collapse model; (b) bending deformation model

一条直线上,反映出这两种回归模型拟合较好,误差分布较均匀,几乎没有偏差较大的奇异点,模型可以准确地预测响应值。

3.2 焊缝截面

图 5 显示了试验获得的 6061 铝合金激光焊接接头的横截面。17 组试样均出现了一定程度的塌陷,这是

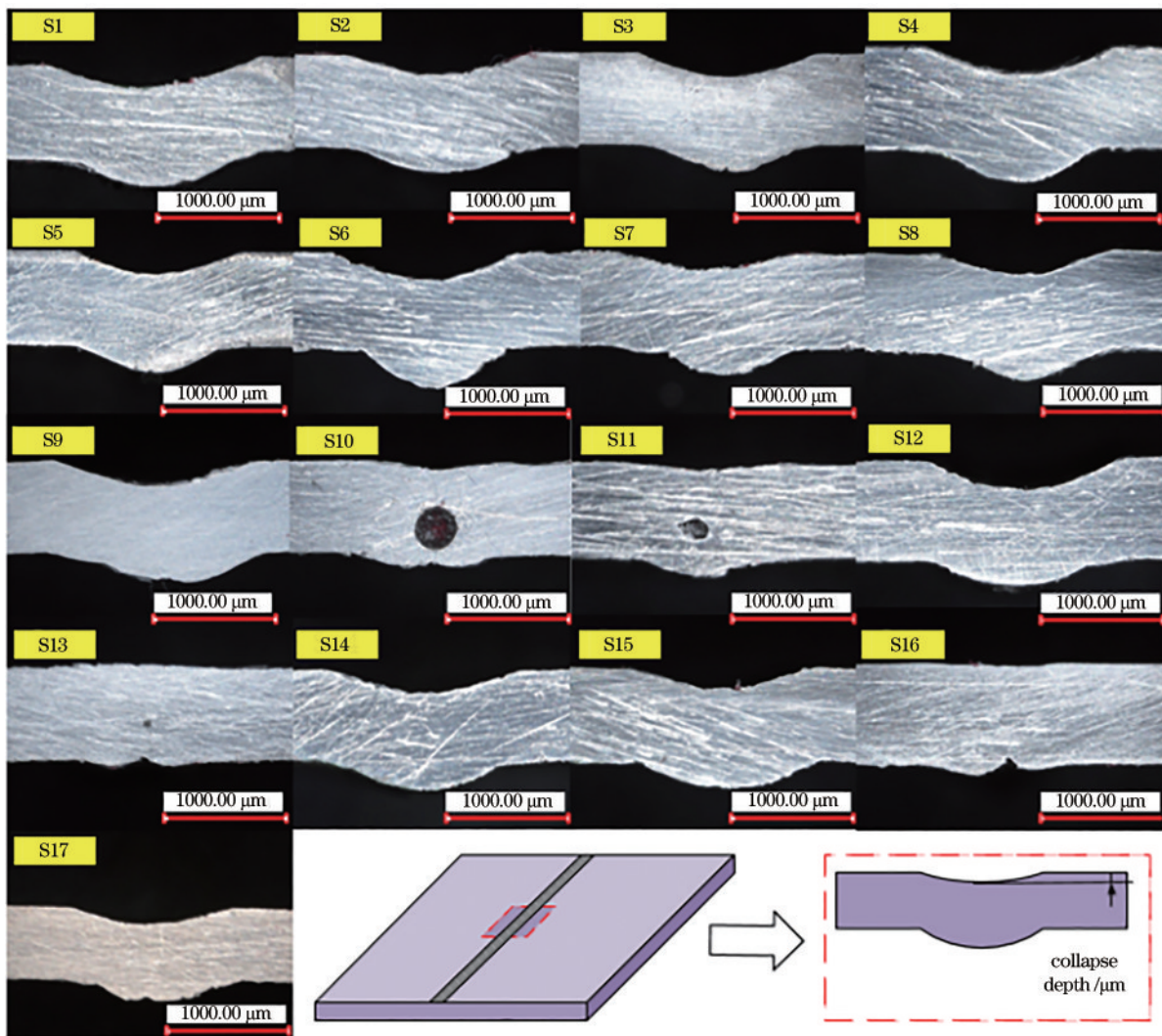


图 5 焊缝截面图

Fig. 5 Weld section diagram

因为在焊接时,铝合金特殊的物理性质使得熔池呈现一种水滴状特征,熔池背部表面张力较低,重力及焊接时所产生的气压之和大于熔池背部的表面张力,熔池产生下凹,最终导致塌陷。其中,10、11组试样横截面处出现了明显气孔,这可能是由于铝合金散热能力较强,在焊接时,热量很快散出,熔池开始凝固,但熔池中尚有许多未排出的氢,在焊缝成型时形成气泡,还未浮出,导致内部产生气孔。

3.3 工艺参数对焊接质量的影响

图 6(a)给出了在各个工艺参数偏离中心点之后,塌陷深度对应的变化趋势。当离焦量逐渐增加时,塌陷深度呈现先上升后下降的趋势。这是由于处在负离焦下,熔池上表面的表面张力较大,更容易造成塌陷。离焦量增大,作用在工件上的能量密度降低,一定程度

上减少了塌陷深度。而扫描速度和激光功率的大小决定了激光束在工件表面的停留时间及能量密度,进而影响到工件熔池表面的张力,塌陷深度随着两者的增加而降低。结合塌陷深度回归方程[式(3)]可知,对薄板塌陷深度的因素影响次序由大到小为离焦量、扫描速度、激光功率。图 6(b)为各个变量对薄板弯曲变形的影响趋势。可见,变形量随着激光功率和扫描速度的增加先增大后减小。激光功率和扫描速度是决定焊接热输入的两个基本因素,热输入增大,使得焊接温度提高,更易产生热变形。但扫描速度增大,激光停留时间变短,热输入降低,薄板变形也随之降低。通过对变形量回归方程[式(4)]及图 6(b)的分析可知,影响薄板变形的因素次序由大到小为激光功率、扫描速度、离焦量。

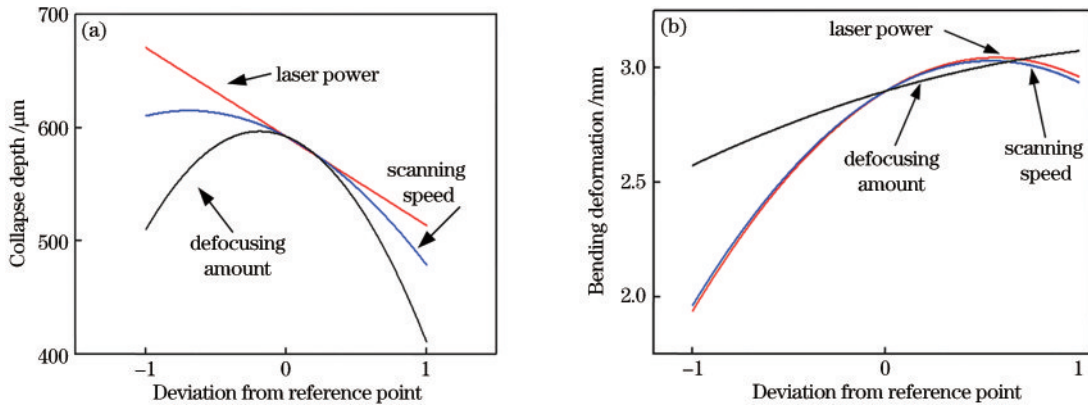


图 6 响应值为中心参照点偏离量的函数扰动趋势图。(a)塌陷深度;(b)弯曲变形

Fig. 6 Response value is the functional perturbation trend graph of the deviation of the central reference point. (a) Collapse depth; (b) bending deformation

图 7 为焊接参数交互作用对焊接塌陷的影响曲面图。可见,高扫描速度及零离焦有利于减小焊接时产生的塌陷,且扫描速度与离焦量的三维响应面图倾斜

度较高,变化趋势较大,说明扫描速度与离焦量的交互作用较为显著。

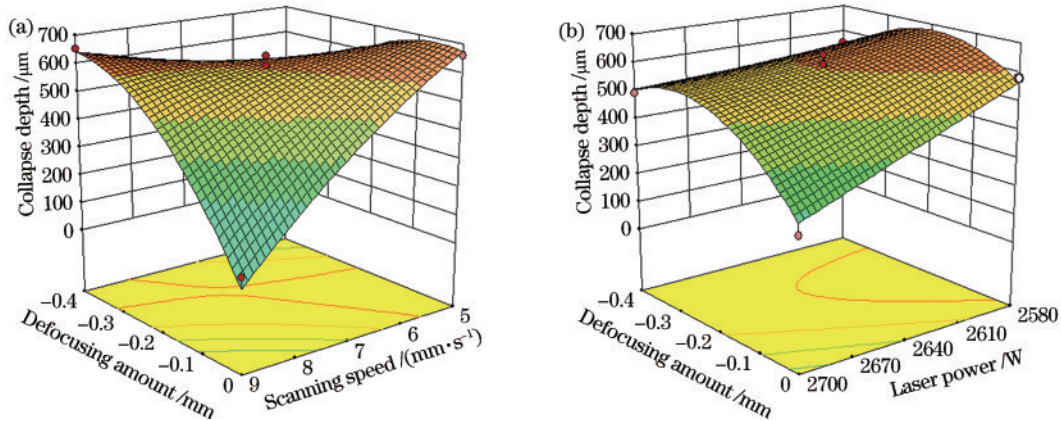


图 7 工艺参数对塌陷深度的交互作用。(a)扫描速度与离焦量;(b)离焦量与激光功率

Fig. 7 Interaction of process parameters on collapse depth. (a) Scanning speed and defocusing amount; (b) defocusing amount and laser power

图 8 为工艺参数交互作用对弯曲变形的三维响应面图。可以明显看出,较小的激光功率产生较小薄板

变形,较低的扫描速度也有利于减小弯曲变形。此外,激光功率和扫描速度交互作用对弯曲变形的影响趋势

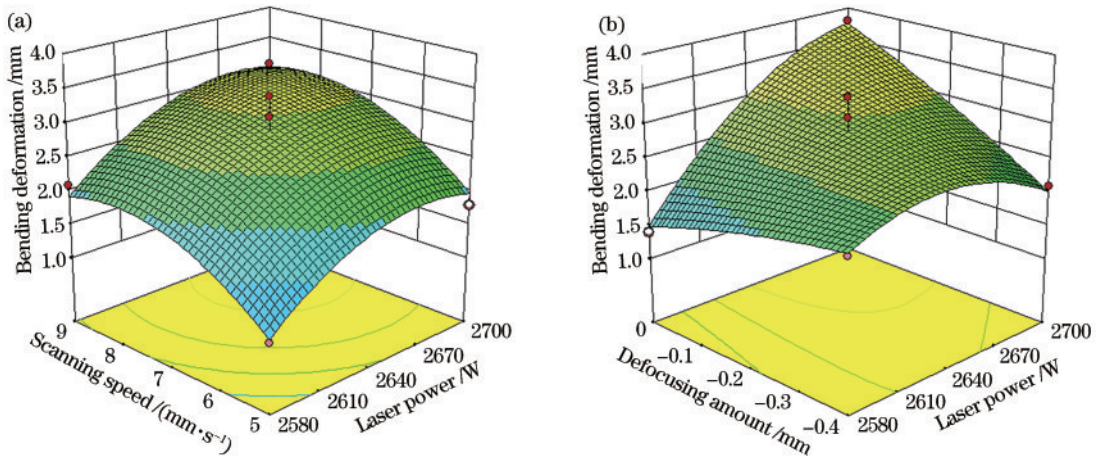


图 8 工艺参数对弯曲变形的交互作用。(a)激光功率与扫描速度;(b)激光功率与离焦量

Fig. 8 Interaction of process parameters on bending deformation. (a) Laser power and scanning speed; (b) laser power and defocusing amount

呈一个陡峭的曲面,其交互作用影响非常显著,而激光功率和离焦量的交互作用影响较小。

4 工艺参数优化

几何变形和薄板塌陷程度是衡量铝合金焊接质量好坏的重要标准,特别是薄板塌陷深度,决定了薄板的可用性。在工程应用中,要求焊接的薄板塌陷较小,同时尽可能减小薄板的几何变形。基于式(3)、式(4)所建立的模型,采用粒子群智能算法进行优化,参数设置如下:算法最大迭代次数为 300,学习因子 $c_1=0.6$ 、 $c_2=0.6$,种群规模设置为 50,目标函数权值 $w_1=w_2=0.5$ 。图 9 为算法迭代结果。可见粒子位置随着迭代次数不断下降,目标函数值不断减小,即薄板塌陷深度及变形在不断减小。当迭代次数达到 12 时,曲线趋于平直,表明此时已搜寻到最优粒子,最优粒子所对应的工艺参数组合为:激光功率 2629 W,扫描速度 6.85 mm/s,离焦量 -0.18 mm。

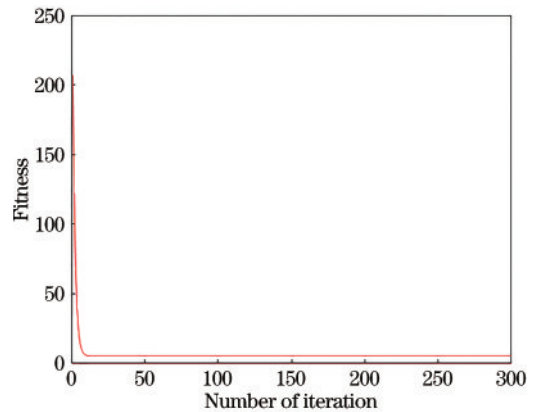


图 9 适应度曲线

Fig. 9 Fitness curve

图 10 显示了该试验获得的 S9、S10 与优化后的接头截面。明显可见,相比于 S9、S10 试样,此最优参数所得试样塌陷深度较小,仅为 85.66 μm ,弯曲变形量为 1.2 mm,薄板较为平直,未出现气孔等缺陷。

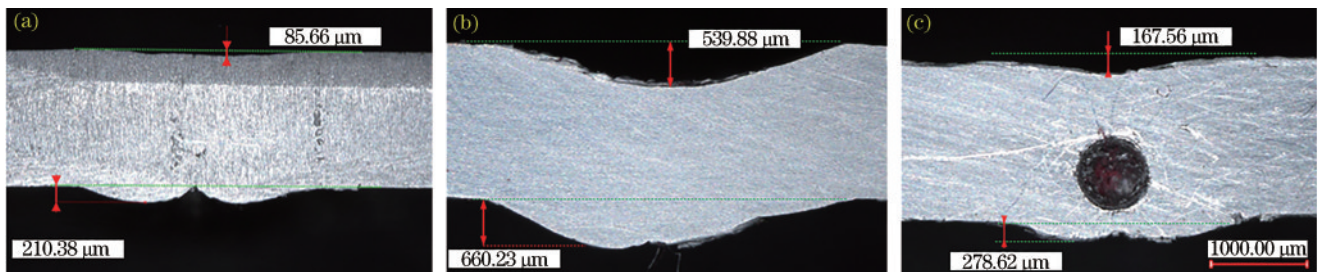


图 10 接头截面。(a)最优试样;(b) S9 试样;(c) S10 试样

Fig. 10 Joint section views. (a) Optimal sample; (b) S9 sample; (c) S10 sample

5 结 论

本文基于 Design-expert 10.0 软件对光纤激光焊接 2 mm 厚 6061 铝合金薄板进行了相关试验设计,建立了 6061 铝合金薄板塌陷深度、弯曲变形和激光焊接

工艺参数之间的数学模型,分析了工艺参数对两种响应的影响规律,并检验了所建立模型的可靠性,为后续的优化分析提供了基础。

模型分析及试验结果表明:对于焊缝塌陷,因素影响次序由大到小为离焦量、扫描速度、激光功率,扫描

速度和离焦量的交互作用对薄板塌陷有着重要影响;影响薄板变形的因素次序为激光功率、扫描速度、离焦量,激光功率和扫描速度的交互作用影响较为显著。

采用粒子群智能算法进行优化,得到一组塌陷最小,变形量最小的最优工艺参数:激光功率为 2629 W,扫描速度为 6.85 mm/s,离焦量为 -0.18 mm。此工艺参数组合下的 6061 铝合金薄板,塌陷深度为 85.66 μm ,变形量为 1.2 mm,表明该 RSM-PSO 算法实用性较高,可为实际生产决策提供借鉴。

参 考 文 献

- [1] Wang H X, Zhang J Y, Wang B, et al. Influence of surface enhanced treatment on microstructure and fatigue performance of 6005A aluminum alloy welded joint[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 60: 563-572.
- [2] Li Y W, Zou W F, Lee B, et al. Research progress of aluminum alloy welding technology[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(5/6): 1207-1218.
- [3] 谢超杰, 杨尚磊, 刘浩博, 等. 7050 高强铝合金激光焊接接头的组织性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 031403.
Xie C J, Yang S L, Liu H B, et al. Microstructures and mechanical properties of 7050 ultrahigh-strength aluminum alloy joints by laser welding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031403.
- [4] 刘敬萱, 沈健, 李锡武, 等. 6005A-T5 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与疲劳性能[J]. *材料导报*, 2021, 35(2): 2092-2097.
Liu J X, Shen J, Li X W, et al. Microstructure and fatigue properties of friction stir welded 6005A-T5 aluminum alloy[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(2): 2092-2097.
- [5] 徐从昌, 李佳, 向瀚林, 等. 6063 铝合金焊接接头力学性能及韧性断裂失效仿真分析[J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(3): 110-117.
Xu C C, Li J, Xiang H L, et al. Simulation analysis of mechanical properties and ductile fracture failure of 6063 aluminum alloy welded joint[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28(3): 110-117.
- [6] Kumar P R, Nandhakumar S, Seenivasan S, et al. Parametric optimization of friction stir spot welded aluminium AA6063 alloy joints[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 37: 2897-2902.
- [7] 汤一博, 孙宏波, 余海东, 等. 夹具约束下大型薄壁铝合金结构搅拌摩擦焊接变形特性[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(15): 1881-1889.
Tang Y B, Sun H B, Yu H D, et al. Friction stir welding deformation behaviors of large thin-walled aluminium alloy structures with different clamping restraints[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(15): 1881-1889.
- [8] 丁吉坤, 宋建岭, 蒙丹阳, 等. 2219 厚板铝合金钨极和熔化极惰性气体保护焊焊接接头组织与性能对比[J]. *宇航材料工艺*, 2020, 50(5): 93-97.
Ding J K, Song J L, Meng D Y, et al. Comparison of microstructure and properties of welded joints in tungsten & metal inert gas welding of 2219 thick plate aluminum alloy [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2020, 50(5): 93-97.
- [9] 缪素菲, 刘敬喜, 刘元丹, 等. 焊接缺陷对铝合金板架疲劳寿命影响的试验分析[J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(1): 95-101.
Miao S F, Liu J X, Liu Y D, et al. Test analysis on influence of welding defects on fatigue life of aluminum alloy plate frames[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(1): 95-101.
- [10] 李剑, 向延鸿. 冷却方式对铝合金薄板搅拌摩擦焊接头性能的影响[J]. *有色金属工程*, 2016, 6(6): 6-8.
Li J, Xiang Y H. Influence of cooling method on joint properties of thin aluminum alloy by friction stir welding [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2016, 6(6): 6-8.
- [11] 王磊, 许雪宗, 王克鸿, 等. 中厚板 7A52 铝合金光纤激光焊接接头组织与性能[J]. *焊接学报*, 2020, 41(10): 28-31, 37, 98.
Wang L, Xu X Z, Wang K H, et al. Microstructures and mechanical properties of fiber laser beam welded 7A52 alloy joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(10): 28-31, 37, 98.
- [12] 丁亚茹, 陈芙蓉, 杨帆, 等. 响应面法分析 7075 铝合金激光焊接参数对焊接质量的影响规律[J]. *材料导报*, 2021, 35(2): 2103-2108, 2114.
Ding Y R, Chen F R, Yang F, et al. Analyzing the influence of laser welding parameters on the welding quality of 7075 aluminum alloy by response surface methodology[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(2): 2103-2108, 2114.
- [13] 王晓兵, 李学梅, 岳智, 等. 汽车顶盖激光钎焊工艺参数试验研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(5): 821-824.
Wang X B, Li X M, Yue Z, et al. Experiments on laser brazing process parameters of automobile roof[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(5): 821-824.
- [14] 舒服华, 梁芳. 基于灰色关联的铝合金板材焊接工艺优化[J]. *特种铸造及有色合金*, 2016, 36(6): 580-583.
Shu F H, Liang F. Welding process optimization for aluminum alloy sheet based on relation[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2016, 36(6): 580-583.
- [15] 邓德伟, 吕捷, 马玉山, 等. FV520B 钢激光焊接工艺参数优化及组织性能[J]. *材料导报*, 2021, 35(8): 8127-8133.
Deng D W, Lü J, Ma Y S, et al. Processing parameters optimization, microstructures and properties of laser welded FV520B steel[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(8): 8127-8133.
- [16] 梁伟, 夏洋, 冯伟, 等. 焊接变形的高精度测量方法及预测方法研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(16): 65-70.
Liang W, Xia Y, Feng W, et al. Investigations on high-precision methods to measure and predict welding deformation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(16): 65-70.
- [17] 贾志宏, 万晓慧, 郭德伦. 基于响应面法的超高频电弧增材制造工艺优化[J]. *焊接学报*, 2020, 41(6): 90-96, 102.
Jia Z H, Wan X H, Guo D L. Optimization of UHFPGTAW process based on response surface method[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(6): 90-96, 102.