

激光与光电子学进展

考虑碳排放的铝合金薄板激光摆动焊接工艺参数优化

钟林君, 陶永杰, 蒋平, 舒乐时*

华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要 激光摆动焊接在抑制气孔缺陷方面的突出作用, 为铝合金薄板焊接提供了一种有效技术手段, 激光摆动焊接工艺参数的选择对焊接质量及碳排放有直接影响。为实现铝合金薄板搭接焊接的低碳化, 对铝合金薄板搭接激光摆动焊接碳排放进行量化, 并基于多输出高斯过程构建了表征工艺参数与焊接质量、碳排放之间对应关系的近似模型, 在此基础上结合非支配排序遗传算法(NSGA-II)搜索最优的焊接目标, 获得对应的最佳工艺参数。经工艺试验验证, 在最佳工艺参数下焊缝成形质量得到有效提升, 且气孔、熔池下塌、内凹等焊接缺陷得到抑制, 焊接过程碳排放有效减少 12.99%, 而接头最大承载力仅降低 2.47%, 能够在保障焊接质量的同时显著减少焊接过程碳排放。

关键词 激光光学; 工艺参数优化; 激光摆动焊接; 低碳制造; 多输出高斯过程; 多目标优化

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2314002

Process Parameter Optimization for Oscillating Laser Welding of Aluminum Sheet Considering Carbon Emission

Zhong Linjun, Tao Yongjie, Jiang Ping, Shu Leshi*

School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract Oscillating laser welding provides an effective technical method for welding aluminum alloy sheets due to its outstanding role in suppressing pore defects. The process parameters for oscillating laser welding have a direct impact on welding quality and carbon emissions. This paper quantifies the carbon emission of lap oscillating laser welding of aluminum alloy sheets to achieve low carbonization of aluminum alloy sheet lap welding. To characterize the welding quality and carbon emission according to the process parameters, it constructs a surrogate model based on a multi-output Gaussian process. The optimal welding objectives are found using the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), and the corresponding optimal process parameters. The process test results show that the weld forming quality corresponding to the best process parameters is effectively improved, and the welding defects such as porosity, molten pool collapse, and concave are restrained. The carbon emission in the welding process is effectively reduced by 12.99%, while the maximum bearing capacity of the joint is only reduced by 2.47%, which can significantly reduce carbon emissions in the welding process while maintaining welding quality.

Key words laser optics; process parameters optimization; oscillating laser welding; low carbon manufacturing; multi-output Gaussian process; multi-objective optimization

1 引言

铝合金以其轻量化、安全性高、比强度高及成形性能良好等特点, 被广泛地应用于汽车制造领域^[1-2]。激光摆动焊接通过光束的摆动作用促进熔池流动, 能够有效保障匙孔稳定性, 抑制气孔缺陷产生, 提高焊缝质量, 是铝合金薄板搭接焊接的理想焊接方式^[3-4], 且合

理选择工艺参数对保障焊接质量至关重要。随着环境问题的日益严峻, 减少碳排放已成为行业共识^[5], 综合考虑焊接质量和碳排放含量对工艺参数进行优化是保障高质低碳焊接的重要手段^[6]。

国内外学者在铝合金激光摆动焊接方面已开展了大量研究。在机理和工艺方面: Chen 等^[7]研究了“∞”形摆动轨迹时摆动频率及振幅对 5052 铝合金焊缝成

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-10-19; 录用日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51861165202, 52105256)

通信作者: *leshishu@hust.edu.cn

形的影响;Wang 等^[8]针对圆形摆动轨迹下 AA6061 铝合金焊缝截面形貌的影响规律展开了研究;贾少辉等^[9]通过试验探索及仿真分析研究了激光摆动作用对碳纤维增强热塑性塑料(CFRTP)/铝合金焊接的影响;文献[10-12]进一步对激光摆动下铝合金焊接的组织性能等开展研究,探寻了其焊接过程的微观机理。在工艺参数优化方面:Rizvi 等^[13]基于田口方法对 SS304H 奥氏体钢进行工艺参数优化;陶亚平^[14]采用正交试验设计,研究了 5A06 铝合金冷金属转移(CMT)焊中工艺参数对焊缝抗拉强度的影响规律,并确定了合适的工艺参数范围;段诚茂等^[15]将生产率、焊接质量与焊接成本三类生产价值与碳排放的比率作为碳效率,并建立了焊接工艺参数与碳效率间的优化模型,但仅以恒定的权重考虑焊接质量过于刚性。重复试验的方法往往只能得到次优解,但同时会带来巨大的资源浪费^[16]。为提升激光焊接工艺参数优化的效率与精度,国内外一些学者将近似模型应用于焊接工艺参数优化中,通过构建焊接输入工艺参数与输出质量特征之间的近似模型提升优化求解效率。Lim 等^[17]基于 Kriging 模型建立了工艺参数与焊接质量间的对应关系,为钛合金钨极氩弧焊提供了最优的工艺参数。Katherasan 等^[18]建立了工艺参数与焊接质量指标的人工神经网络模型,并采用粒子群优化算法获得了良好的工艺参数。Zhou 等^[19]采用组合元模型方法建立了焊接工艺参数与焊缝形貌特征间的数学联系,并基于非支配排序遗传(NSGA-II)

获得了能有效改善焊缝成形的最优工艺参数。然而,以上研究多着眼于焊接质量,而极少考虑焊接过程中的碳排放强度,碳排放特征未得到深刻理解。

对此,本文以 6061 铝合金薄板搭接焊接为研究对象,在考虑碳排放量的同时对铝合金激光摆动焊接的工艺参数进行优化。首先,通过对焊接过程能源消耗及物料消耗的分析,建立了铝合金激光摆动焊接过程碳排放量化公式;其次,考虑多个输出焊接质量特征及焊接过程碳排放之间的相互影响,建立了基于多输出高斯过程的铝合金激光摆动焊接结果预测模型;然后,在此基础上,对所构建模型进行多目标优化,采用 NSGA-II 算法获得最优工艺参数组合;最后,对所得优化工艺参数进行了工艺试验验证与分析。结果表明,在最佳工艺参数下焊接过程碳排放可有效降低 12.99%,接头最大承载力仅降低了 2.47%,同时焊缝成形良好,气孔、熔池下塌等缺陷也得到抑制,即所得最佳工艺参数可以在保障良好焊接质量的同时有效降低焊接过程碳排放。

2 试验设计

2.1 试验材料与设备

本试验所用材料为 6061-T6 铝合金板材。6061 铝合金化学成分如表 1 所示,力学性能如表 2 所示。试板尺寸选择 300 mm×100 mm×1 mm 和 300 mm×100 mm×2 mm 两种,试验采用平板搭接的接头形式,1 mm 试板在上,2 mm 试板在下,搭接量为 30 mm。

表 1 试验用 6061 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy for experiment

Element	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
Mass fraction / %	1.15	0.65	0.7	0.35	0.15	0.3	0.25	0.15	Bal.

表 2 试验用 6061 铝合金力学性能

Table 2 Mechanical properties of 6061 aluminum alloy for experiment

Status	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Microhardness /MPa	Elongation /%
6061-T6	309.5	279.2	85	11.96

本文采用最大功率为 30 kW 的光纤激光器(YLS-30000)进行激光摆动焊接工艺试验,此外,使用 IPG 公司生产的 FLW-D50-W 焊接头、KUKA 公司生产的 KR C4 六轴联动机器人配合实现具体焊接过程,使用 AWS2013E PLUS 功率测试仪采集焊接过程中的电能消耗,试验平台如图 1 所示。

此外,试验前使用砂轮机打磨试验板材表面以及边缘的氧化膜,并用无水乙醇擦去油污,保证试板表面清洁干燥。激光摆动焊接搭接试验示意图如图 2 所示,使用夹具夹紧板材,保证试验过程搭接间隙为 0。以纯度为 99.99% 的氩气作为保护气,保护气流量恒定为 25 L/min。经前期试验探索和研究结果总结可知,本文选定∞形摆动轨迹。

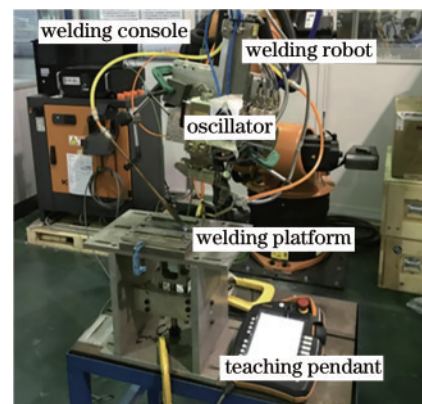


图 1 激光摆动焊接试验平台

Fig. 1 Test platform of oscillating laser welding

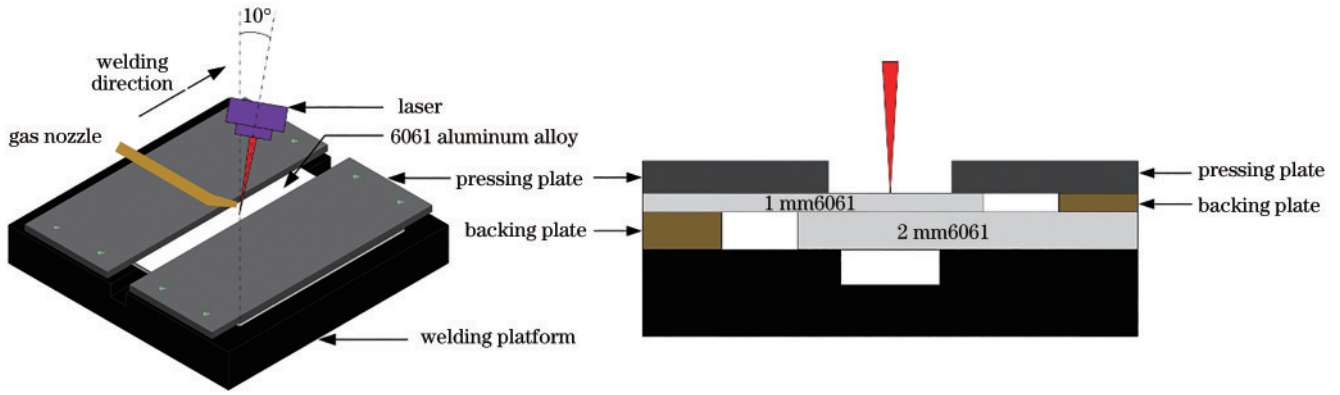


图 2 激光摆动焊接搭接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of oscillating laser welding lap joint

2.2 工艺参数与性能评价指标

在铝合金激光摆动焊接过程中,影响焊接结果的工艺参数主要包含激光功率、焊接速度、摆动频率、摆动振幅、离焦量等,因此,本文针对激光功率(P)、焊接速度(V)、摆动频率(f)和摆动振幅(A)四类工艺参数展开研究,而离焦量固定为0。为避免焊接过程中上下试板未熔合以及下试板焊穿现象,设置焊缝熔深(D_{DP})取值范围为 $1\text{ mm} < D_{DP} < 3\text{ mm}$ 。根据前期实

践经验积累,确定上述四类工艺参数取值范围:激光功率为 $4.0\sim 5.0\text{ kW}$;焊接速度为 $40\sim 52\text{ mm/s}$;摆动频率为 $80\sim 240\text{ Hz}$;摆动振幅为 $1.5\sim 2.5\text{ mm}$ 。

为评价焊缝接头力学性能,根据 GB/T2651—2008 制备拉伸试样进行拉伸性能测试,如图 3 所示。较大的接头最大承载力意味着较强的焊缝接头抗拉伸能力,因此,选取接头最大承载力(F)作为焊接结果中力学性能的评价指标。

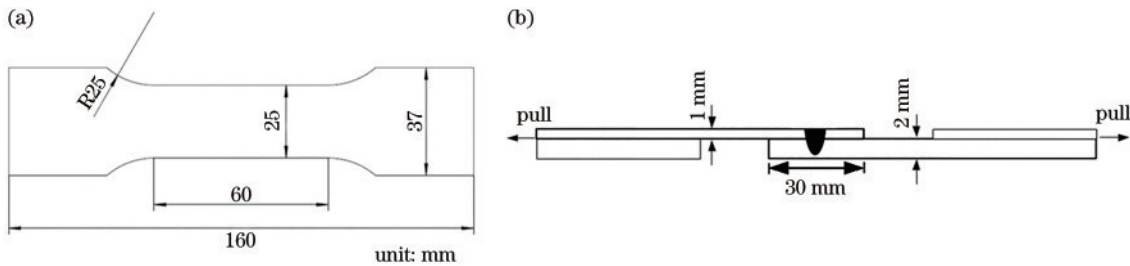


图 3 示意图。(a)拉伸试样;(b)焊接接头

Fig. 3 Schematic. (a) Tensile specimen; (b) welded joint

为保障上板焊透的同时,下板不完全焊透,熔深需尽可能接近上下板厚度之和,因此,以搭接面熔宽(W_{BW})及熔深作为焊缝截面形貌的评价指标。

焊接过程中的碳排放强度指铝合金激光焊接制造全生命周期碳排放量,主要包含能耗碳排放及物料碳排放。其中,能耗碳排放主要来自激光器、焊接机器人及冷水机等设备工作过程中的能耗,可体现为电能消耗量。能耗碳排放的计算公式为

$$C_e = (E_1 + E_2 + E_3) \times k_e \quad (1)$$

式中: C_e 为能耗碳排放强度; k_e 为电能碳排放因子,即单位物料生产所产生的二氧化碳排放当量,本文根据华中地区标准将 k_e 设置为 $0.4733\text{ kgCO}_2/\text{kWh}$; E_1 、 E_2 、 E_3 分别表示焊接过程中采集的激光器、焊接机器人及冷水机的电能消耗量。

物料碳排放为焊接过程中保护气消耗所产生的碳排放,物料碳排放的计算公式为

$$\begin{cases} C_w = m_w \times k_w \\ m_w = t_w \times Q \times \rho \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_w 为氩气碳排放因子; m_w 为所消耗保护气质量; t_w 为保护气排放时间; $Q = 25\text{ L/min}$ 为保护气流量; ρ 为保护气密度。

由此可知,每组工艺试验下所产生的碳排放总量(E_{CE})即为衡量焊接过程低碳水平的评价指标。

$$E_{CE} = C_e + C_w \quad (3)$$

3 基于多输出高斯过程的多目标近似建模方法

3.1 训练样本构建

采用合适的试验设计方法,可以获得数量合适且位置合理的样本点,以更好地保障模型精度、降低建模成本、提高优化效率。最优拉丁超立方设计法(OLHD)在随机拉丁超立方的基础上,能够使有限样本点填充整个设计空间,并尽可能地均匀分布。

因此,本文采用 OLHD 方法在激光功率(P)、焊接速度(V)、摆动频率(f)和摆动振幅(A)四类工艺参数的取值区间内获取 35 组样本点进行工艺试验,并记录 2.2 节所涉及的四类焊接质量评价指标的试验结果。

根据江淮汽车铝合金焊接质量评价标准,在焊缝长度方向的 1/4、1/2 和 3/4 处进行切割制备镶嵌样,以

三处焊缝截面的熔深平均值及搭接面熔宽平均值作为每组的熔深及熔宽。在相同位置制备焊接接头拉伸试样,以垂直焊缝方向进行拉伸试验,记录焊缝接头最大承载力 F 。根据式(3)计算每组工艺试验下的碳排放强度。在 35 组试验样本中,剔除存在上下试板未熔合以及下板焊穿的样本,剩余 26 组满足基本焊接质量要求的试验数据,如表 3 所示。

表 3 焊缝形貌尺寸、最大接头承载力和碳排放量的样本点数据

Table 3 Sample point data of weld morphology size, maximum joint bearing capacity, and carbon emission

No.	Power / kW	Speed / (mm·s ⁻¹)	Frequency / Hz	Amplitude / mm	Depth / μm	Width / μm	Bearing capacity / kN	Carbon emission / g
1	4.27	42.8	226	1.6	1710	2085	5.33	34.858
2	4.79	44.9	240	2.1	1538	2280	5.47	35.502
3	4.15	49.5	104	1.8	2179	2687	5.36	32.312
4	4.88	44.6	118	2.4	2007	2984	4.76	34.179
5	4.35	43.2	113	2.5	1726	2836	4.90	34.464
6	4.50	46.0	169	2.0	1599	2317	5.14	33.158
7	4.68	40.7	146	1.6	2483	2649	5.29	35.719
8	4.59	52.0	151	1.9	1852	2269	4.75	30.710
9	4.74	50.6	108	2.4	1995	2855	4.37	31.097
10	4.94	48.1	188	2.4	1527	2445	5.41	32.757
11	4.91	49.2	202	1.8	1862	2268	5.23	31.705
12	4.53	40.4	212	1.9	1711	2323	5.14	35.420
13	5.00	42.5	174	2.0	2117	2555	5.31	35.734
14	4.18	41.4	99	2.1	1863	2772	5.23	34.604
15	4.21	41.1	179	2.3	1346	2389	5.43	34.768
16	4.09	51.3	184	1.8	1412	2058	5.34	30.039
17	4.12	41.8	155	1.7	2019	2578	4.96	34.480
18	4.71	42.1	193	2.4	1464	2545	5.08	35.206
19	4.29	47.4	160	1.5	1982	2327	4.91	31.397
20	4.44	47.8	165	2.5	1108	462	1.44	32.476
21	4.97	48.8	127	2.0	2301	2694	4.96	33.148
22	4.62	40.0	132	2.1	2005	2703	4.83	36.608
23	4.47	47.1	85	2.1	2397	2917	4.95	32.480
24	4.41	48.5	235	1.7	1555	1963	5.04	31.774
25	4.00	45.7	207	1.9	1292	2135	5.62	32.613
26	4.24	51.7	122	2.2	1525	2380	5.12	30.373

为进一步客观说明后续优化结果的焊接结果特性,可将表 3 所示训练样本数据与优化结果的焊接性能指标进行对比分析。可以看出,组 2 的接头最大承载力 F 最大,即说明有最佳的拉伸性能。因此,在后续分析中,将以其焊接结果:焊接熔深为 1538 μm、搭接面熔宽为 2280 μm、最大承载力为 5.47 kN、碳排放为 35.502 g,与优化组的试验结果进行对照。

3.2 基于多输出高斯过程的多目标近似建模

本试验所考虑的目标为焊缝熔深、搭接面熔宽、接头最大承载力和碳排放强度四类性能评价指标,因此需要采用适用于多目标问题的近似模型来获得准确度

良好的输出结果。传统方法是多对单个目标独立建模,进而预测各响应值,如单输出高斯过程(SOGP)模型、Kriging 模型等,但这类方法没有考虑各目标相关性的影响,可能导致有效信息丢失而无法兼顾各目标的预测精度。多输出高斯过程(MOGP)模型通过构建多个输出端口间的协方差矩阵,衡量各个输出间的潜在关系,避免了单独建模割裂各个输出之间的相关性,可以提高预测精度。因此,本研究基于 MOGP 建立输入工艺参数与输出焊接评价指标间的近似模型。

$D(D=4)$ 个目标 $f_d(x)$ 可以描述为若干个光滑核函数和隐函数的卷积积分之和,

$$f_d(x) = \sum_{q=1}^Q \int_x G_{d,q}(x-z) \mu_q(z) dz, \quad (4)$$

式中: $G_{d,q}(x)$ 为核函数。采用高斯核函数表示为

$$G_{d,q}(x) = S_{d,q} N(x|0, \mathbf{P}_d^{-1}), \quad (5)$$

式中: $S_{d,q}$ 为输出端 d 与隐函数 q 的协方差系数; \mathbf{P}_d^{-1} 为输出端口之间的精度矩阵。

相同高斯形式时, 隐函数的协方差可以表述为

$$kq(x, x') = N(x - x'|0, \mathbf{U}_q^{-1}), \quad (6)$$

式中: \mathbf{U}_q^{-1} 代表隐函数的精度矩阵。

任两输出端 d 与 d' 之间的协方差函数可以进一步表述为

$$k_{jd, jd'}(x, x') = \sum_{q=1}^Q S_{d,q} S_{d',q} N(x - x'|0, \mathbf{P}_d^{-1} + \mathbf{P}_{d'}^{-1} + \mathbf{U}_q^{-1}). \quad (7)$$

由此, 该模型的似然函数的数学表达为

$$P(\mathbf{y}|\mathbf{X}, \theta) = N(\mathbf{y}|0, \mathbf{K}_{f,f} + \mathbf{\Sigma}), \quad (8)$$

式中: $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_D]^T$ 表示各输出端数据; 超参数 θ 可由最大似然估计获得; $\mathbf{K}_{f,f}$ 表示卷积过程的协方差矩阵, 其中的各元素可以根据式(7)计算获得; 考虑实际的环境不确定性, 添加独立高斯白噪声过程矩阵 $\mathbf{\Sigma}$ 。

根据上述理论可得, 基于多输出高斯过程模型的预测输出分布的数学表达式为

$$p(f_*|\mathbf{y}, \mathbf{X}, \mathbf{X}_*, \hat{\theta}) = N[f_*|\mathbf{K}_{f,f}(\mathbf{K}_{f,f} + \mathbf{\Sigma})^{-1}\mathbf{y}, \mathbf{K}_{f,f} - \mathbf{K}_{f,f}(\mathbf{K}_{f,f} + \mathbf{\Sigma})^{-1}\mathbf{K}_{f,f}]. \quad (9)$$

由此, 基于 MOGP 模型构建了表征 4 个输出焊接性能指标的预测模型, 通过充分考虑各个性能指标间的相关性, 获得 4 类目标的响应值。

为验证模型预测精度, 随机选取 5 组样本数据的工艺参数进行工艺试验, 将试验结果作为验证值与近似模型的预测值进行对比, 验证结果如图 4 所示。可以看出, 各模型预测值与真实值的变化基本趋于一致。

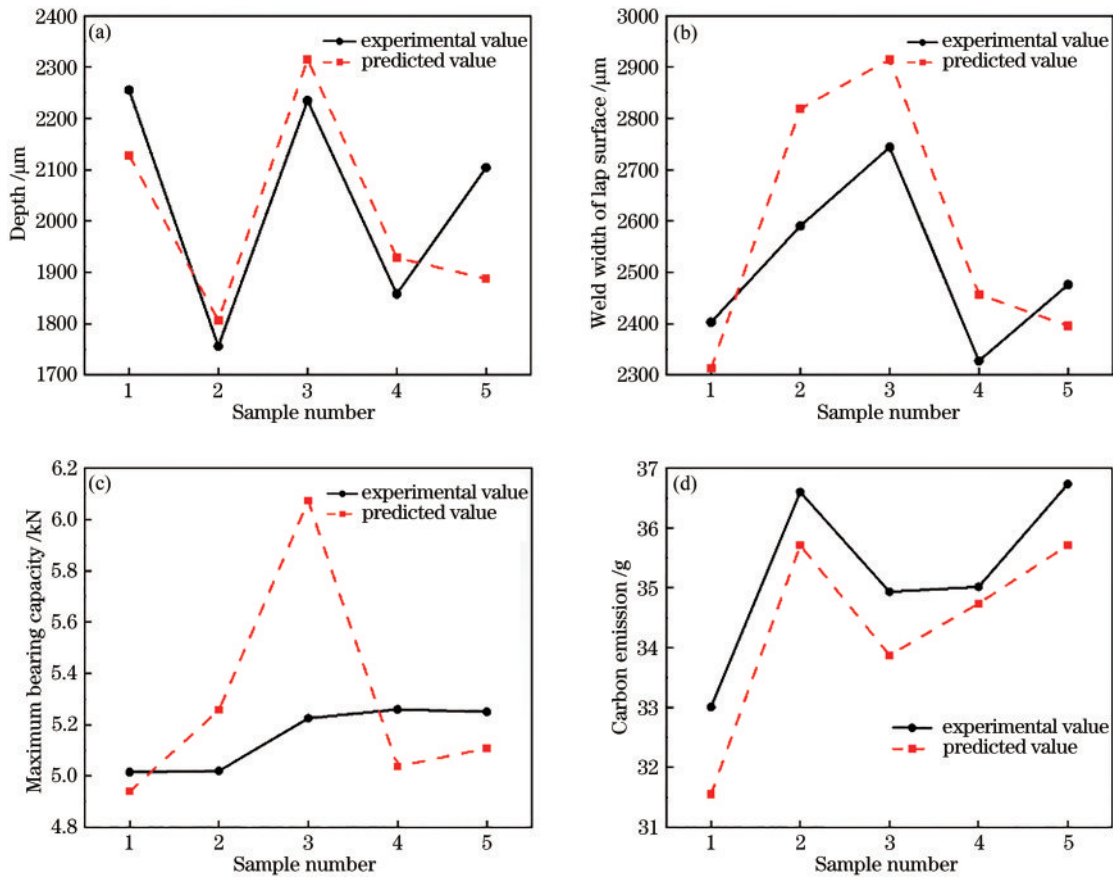


图 4 MOGP 模型的预测精度。(a) 熔深; (b) 搭接面熔宽; (c) 最大承载力; (d) 碳排放

Fig. 4 Prediction accuracy of MOGP model. (a) Depth; (b) weld width of lap surface; (c) maximum bearing capacity; (d) carbon emission

采用相对误差 (RE) 作为模型预测精度的评价标准定量分析模型预测精度, 相对误差的计算公式为

$$R_{RE} = \frac{|y_i - \hat{y}_{MF}|}{y_i}, i = 1, \dots, N, \quad (10)$$

式中: N 为验证样本点的总数; y_i 及 \hat{y}_{MF} 分别为每个验证样本点的真实试验值和近似模型的预测值。

经测试, 本文所构建的近似模型对熔深、搭接面熔宽、接头最大承载力和碳排放的预测平均相对误差分别为 5.24%、5.51%、5.86% 和 2.69%, 均在误差允许范围内 ($R_{RE} \leq 10\%$), 即所构建的基于 MOGP 模型的铝合金激光摆动焊接预测模型的预测性能良好, 能够达到所需预测精度要求。

为进一步说明 MOGP 模型在本试验中的良好预测性能,采用基于 SOGP 的近似模型与所构建 MOGP 模型的预测准确度进行对比。以相同的样本点数据构建 SOGP 模型,记录相同 5 组测试样本下的模型预测结果,并将其与实际工艺试验结果进行对比,计算模型预测相对误差。所构建 SOGP 模型对熔深、搭接面熔宽、接头最大承载力和碳排放的预测平均相对误差分别为 7.87%、9.52%、10.21% 和 4.54%,均高于基于 MOGP 模型的预测平均相对误差。由此可见,考虑多目标相互作用的 MOGP 模型对焊接质量的预测精度优于 SOGP 模型。

4 铝合金激光摆动焊接工艺参数优化

4.1 基于 NSGA-II 的工艺参数优化

铝合金激光摆动焊接工艺参数优化问题是一个多目标非线性优化问题,因此,需要采用多目标优化方法进行求解。NSGA-II^[20]融合了精英策略,具有较高的优化精度,所采用的拥挤度和拥挤度比较算子可保证种群多样性,快速非支配排序算法在降低计算复杂度的同时能够有效保留所有优秀个体,在多目标优化中得到了广泛应用^[21]。本文采用 NSGA-II 算法,通过搜索铝合金激光摆动焊接的最优性能指标,求解对应最佳工艺参数组合。

NSGA-II 算法的基本流程为:对种群大小为 N 的父代种群 P_t ,经选择、交叉、变异后生成子代种群 Q_t ,将 P_t 与 Q_t 结合为新的集合,并对集合进行非支配排序与拥挤度排序后分类,当分类后的最优个体数量达到 N 时得到新的父代种群 P_{t+1} ,以此循环至最大遗传代数 Gen,获得最优的 Pareto 解集。NSGA-II 设置种群数量 $N=40$,最大迭代次数 Gen 为 300。

将 MOGP 模型对 4 类性能指标的预测值作为多目标优化过程中种群的适应度评价依据。采用 NSGA-II 算法对焊接性能指标进行优化求解,最终得到 Pareto 解如图 5 所示。3 个坐标轴分别代表熔深、搭接面熔宽和接头最大承载力,每个圆球的颜色代表对应的碳排放量。在实际焊接过程中,可选择某一组解对应的工艺参数组合进行激光摆动焊接。

为验证优化结果的有效性,从所得 Pareto 解中随

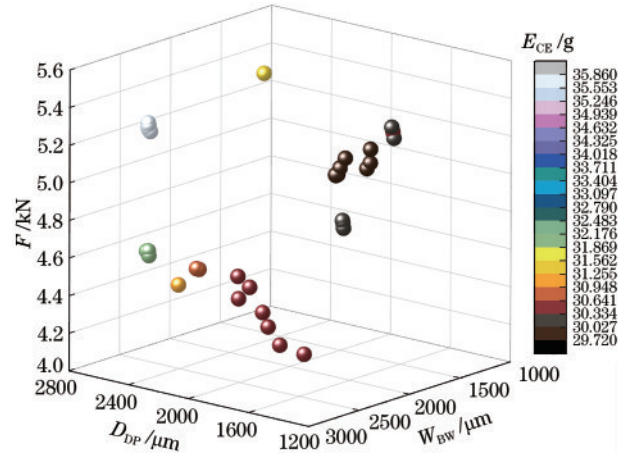


图 5 NSGA-II 求解得到的 Pareto 解集
Fig. 5 Pareto set obtained by NSGA-II

机选取 2 组解对应的工艺参数组合进行工艺试验。所选取优化组的接头拉伸试验结果如图 6 所示,其中:组 1# 的焊缝熔深为 2310 μm ,搭接面熔宽为 3148 μm ,接头最大承载力为 5.10 kN,碳排放为 31.736 g;组 2# 的焊缝熔深为 1700 μm ,搭接面熔宽为 2296 μm ,接头最大承载力为 5.32 kN,碳排放量为 30.892 g。

2 个优化工艺参数组合所对应的焊接性能预测结果与实际试验结果对比如表 4 所示。其中,熔深的最

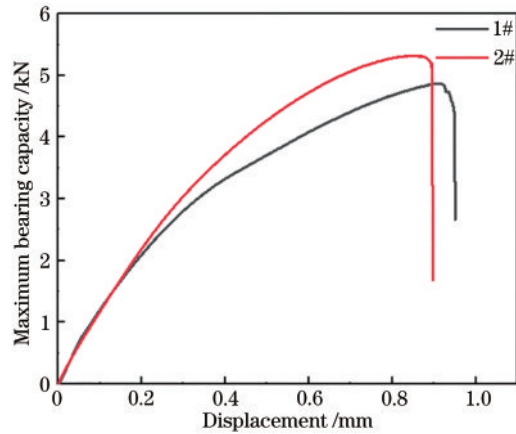


图 6 优化工艺参数的焊缝接头拉伸试验结果
Fig. 6 Tensile test results of welded joints with optimized process parameters

表 4 最优工艺参数组合下的相对验证结果

Table 4 Relative error results of optimal process parameter combination

No.	P/kW	$V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	F/Hz	A/mm	Type of values	Results			
						E_{CE}/g	$D_{\text{DP}}/\mu\text{m}$	$W_{\text{BW}}/\mu\text{m}$	F/kN
1#	4.85	48.8	86	2.3	Predicted value	32.121	2225	3090	4.76
					Actual value	31.736	2310	3148	4.87
					Relative error / %	1.2	3.7	1.8	2.3
2#	4.06	52	106	2.0	Predicted value	31.506	1743	2646	5.72
					Actual value	30.892	1700	2296	5.32
					Relative error / %	2.0	2.5	15.2	7.5

大误差为 3.7%，搭接面熔宽的最大误差为 15.2%，最大承载力的最大误差为 7.5%，碳排放量的最大误差为 2.0%，4 个目标的相对误差均小于 20%，平均相对误差为 4.5%。由验证结果可知，在构建 MOGP 模型的基础上，采用 NSGA-II 算法所得铝合金激光摆动焊接工艺参数优化结果可靠有效，能够降低碳排放且实现良好的焊接质量。

4.2 优化组焊接性能分析

为进一步对优化结果的可靠性与优越性进行验证，本节从焊缝成形、焊缝金相组织、焊缝硬度、焊缝接头拉伸性能以及焊接过程碳排放等方面，将优化组与

未优化组工艺参数下各自对应的焊接结果进行了分析与比较。

1) 焊缝成形分析

在优化后的工艺参数下进行工艺试验，焊缝表面形貌如图 7(a) 所示，可见鱼鳞纹均匀致密，焊缝成形美观，无明显的焊接缺陷。而在未优化的工艺参数(组 A#、B#、C#)下，焊缝表面形貌如图 7(b) 所示，所获得的焊缝存在表面气孔、咬边、飞溅、内凹、熔池下塌等缺陷，焊缝成形质量不佳。因此可以说明，经过多目标优化后的工艺参数可以有效改善焊缝形貌、抑制焊接缺陷。

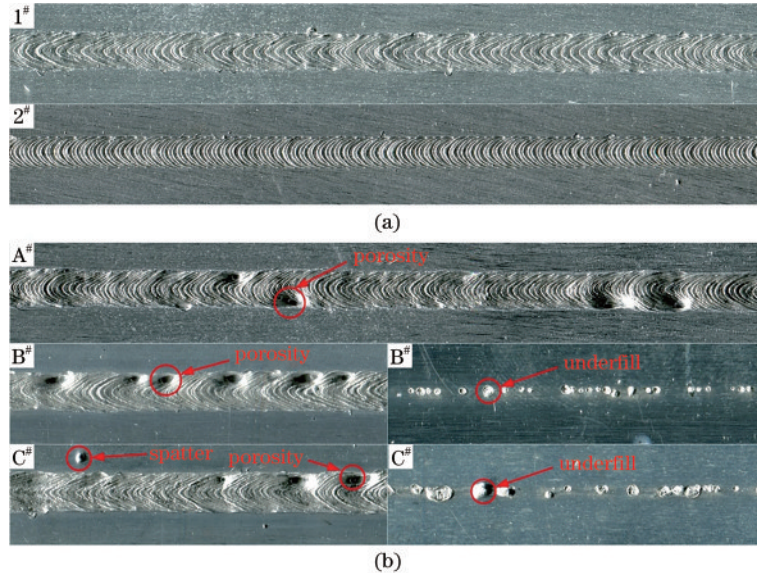


图 7 焊缝表面形貌。(a)优化后;(b)未优化

Fig. 7 Weld surface morphology. (a) After optimization; (b) before optimization

2) 焊缝金相组织分析

同样地，对 2 个优化组及 3 个未优化组的焊缝金相组织进行对比分析。优化组焊缝熔合线处的显微组织如图 8 所示，由于柱状晶的生长具有各向异性，晶体将沿着温度梯度下降速度最快的方向生长，在焊接过程中温度梯度下降最快的方向为垂直于熔合线指向焊缝中心方向，因此显微组织中存在明显的垂直于熔合线向焊缝中心生长的柱状晶。此外，优化组焊缝中心等轴晶的晶粒尺寸小于未优化组，即优化组焊缝熔合线处分布着的细小柱状晶，有利于增强焊缝的强度、韧性

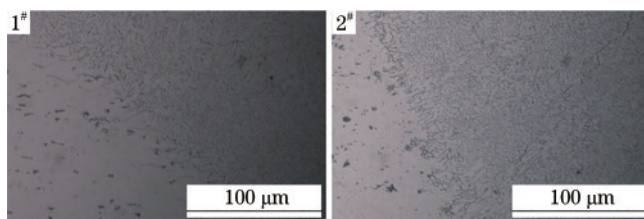


图 8 优化工艺参数后熔合线处的显微组织

Fig. 8 Microstructure at fusion line of optimized process parameters

和塑形，且在焊缝中心分布着大量的细小等轴晶，说明焊缝晶粒得到细化。由此可见，优化后的工艺参数可有效改善焊缝微观组织，提升焊缝性能。

3) 焊缝硬度分析

对 2 个优化组及 3 个未优化组进行焊接接头硬度测试，测试过程中沿焊缝横截面水平方向及焊缝中心垂直方向打点，相邻打点间距为 250 μm，焊缝硬度分布如图 9 所示。

由图 9 可知，优化组与未优化组焊缝的硬度分布走势一致：焊缝区硬度最低，两侧热影响区硬度逐渐上升，直至达到母材最大硬度。本文所采用的 6061-T6 态铝合金，中心最小硬度为 60~70 HV，母材最大硬度为 100~105 HV。在激光摆动作用下，6061-T6 态热处理强化铝合金板材经热循环而导致融合区与热影响区的强化相在高温下溶解，出现软化现象，同时，由于 Mg 元素的大量蒸发烧损，焊缝中的 Mg₂Si 强化相减少，因而焊缝硬度低于母材。

4) 焊缝接头拉伸性能分析

对焊缝进行拉伸试验，各组最大承载力结果如图 10 所示。2 个优化组的焊接接头最大承载力分别为

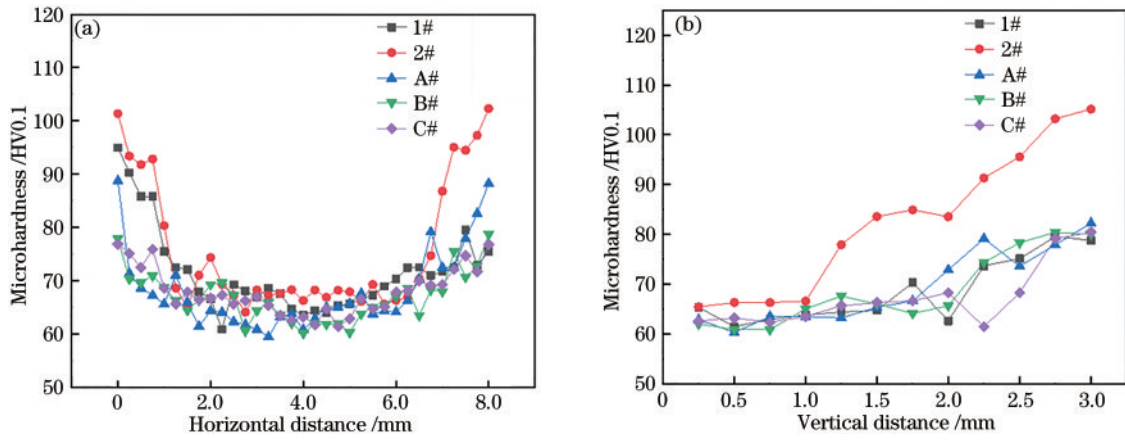


图 9 优化工艺参数前后的接头硬度分布。(a)水平硬度分布;(b)垂直硬度分布

Fig. 9 Joint hardness distributions before and after optimization of process parameters. (a) Horizontal hardness distribution; (b) vertical hardness distribution

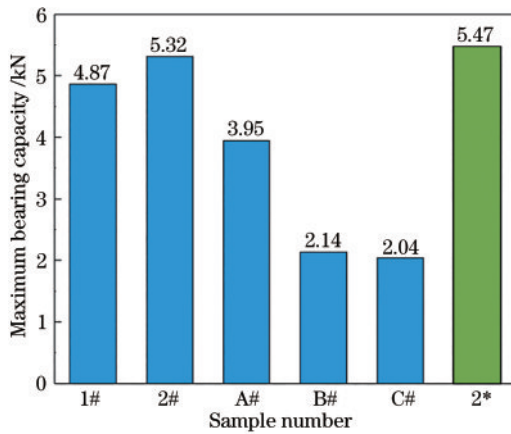


图 10 焊接接头最大承载力测试结果

Fig. 10 Test results of maximum joint bearing capacity

4.87 kN 和 5.32 kN, 3 个未优化组的焊接接头最大承载力分别为 3.95 kN、2.14 kN 和 2.04 kN。在表 3 初始训练样本中选取接头最大承载力最大的一组样本数据, 与优化组、未优化组进行对比分析。表 3 中组 2 最大承载力为 5.47 kN, 因此以优化组中接头最大承载力较高的组 2 为例(图中设置为 2*), 其较未优化组中最高的一组 A#, 最大承载力增加了 34.68%, 较对照组 2# 降低了 2.74%。由此说明, 考虑碳排放时的工艺参数可能导致焊接接头的最大承载力有所牺牲, 但经多目标优化后的最佳工艺参数仍能保障相对良好的接头力学性能。

5) 焊接过程碳排放分析

碳排放强度是本文关注的重点之一, 因此, 对各组工艺参数下的碳排放量进行对比分析。碳排放量对比结果如图 11 所示, 其中: 2 个优化组的碳排放量分别为 31.736 g 和 30.892 g; 3 个未优化组的碳排放量分别为 36.025 g、33.219 g 和 35.611 g; 组 2* 碳排放量为 35.502 g。同样地, 优化组中的 2#, 较未优化组 A# 碳排放量降低 14.25%, 较对照组 2* 降低 12.99%。由此可以说明, 所得最佳工艺参数能够显著减少焊接过程的碳排放。

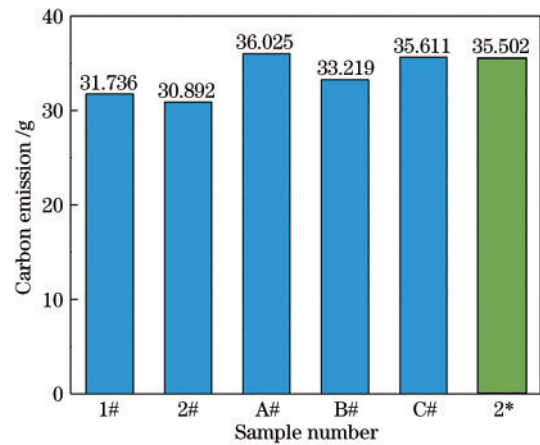


图 11 焊接过程碳排放含量测试结果

Fig. 11 Carbon emission content test results of welding process

综上所述, 结合 MOGP 模型并采用 NSGA-II 算法进行优化, 在所得优化工艺参数下, 焊缝成形得到有效改善, 焊缝晶粒细化, 且表面气孔、飞溅、内凹、内部气孔等缺陷均有所抑制, 相比初始样本的焊接结果, 接头最大承载力降低 2.74%, 而焊接过程碳排放可降低 12.99%, 说明接头力学性能虽然存在一定程度的牺牲, 但仍满足铝合金搭接接头质量评价标准, 且焊接过程中碳排放显著减少。

4.3 工艺参数贡献度分析

为探究各工艺参数对焊接结果的影响程度, 分别分析各工艺参数对焊接结果的贡献度。分析结果如图 12 所示, 其中, $P \cap V$ 、 $P \cap f$ 、 $P \cap A$ 、 $V \cap f$ 、 $V \cap A$ 和 $f \cap A$ 均代表对应的两个焊接工艺参数对焊接结果产生的交叉贡献作用。由图 12 可知, P 对熔深具有最大的正向贡献度 (19.7%), f 和 A 对熔深具有显著的负贡献率 (-30.3%, -26.3%), $P \cap f$ 、 $V \cap A$ 、 $f \cap A$ 、 $P \cap V$ 及 $P \cap A$ 对熔深的贡献度均小于 -5%, 即影响不明显。由图 12(b) 可知, $P \cap A$ (15%) 和 P (8.6%) 能够促进搭接面熔宽的增大, 而 $P \cap f$ 、 $P \cap V$ 对搭接面熔宽的贡献度

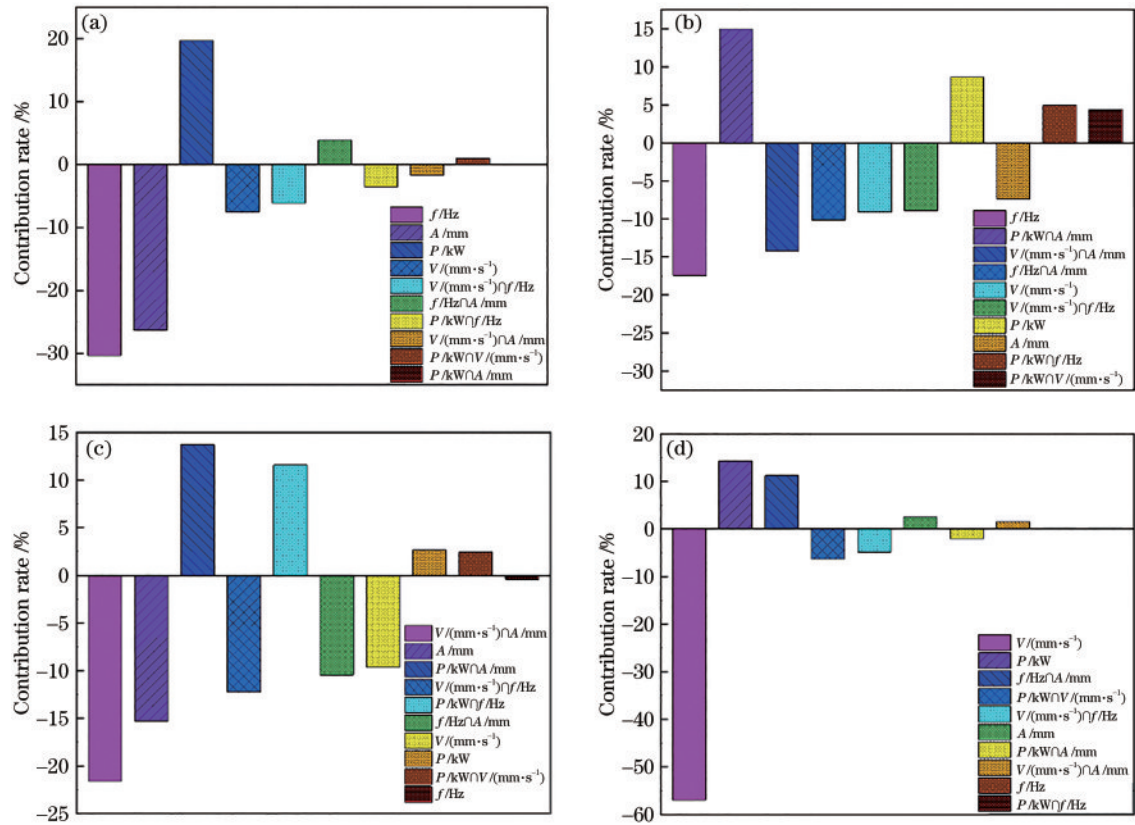


图 12 焊接工艺参数对不同焊接结果的贡献度。(a)熔深;(b)搭接面熔宽;(c)最大承载力;(d)碳排放

Fig. 12 Contribution of welding process parameters on different welding results. (a) Depth; (b) weld width of lap surface; (c) maximum bearing capacity; (d) carbon emission

均小于 5%，影响不明显。由图 12(c)可知， P/A (13.7%)和 P/V (11.6%)有利于提升接头最大承载力， V/A 将产生最大负贡献度(-21.6%)，而 P 、 P/V 及 f 对最大承载力的影响不明显(贡献度小于 5%)。由图 12(d)可知， V (-57%)对减少碳排放具有决定性影响，同时， P (14.3%)和 f (11.2%)将导致碳排放的增加，此外其余因素均对碳排放影响很小。

5 结 论

本文针对考虑碳排放的 6061 铝合金激光摆动焊接工艺参数优化问题，建立了 MOGP 近似模型表征工艺参数与焊接结果的对应关系，并采用 NSGA-II 算法对铝合金激光摆动焊接问题进行多目标优化，获得最佳工艺参数组合。根据上文研究内容，可得到以下结论：

1) 从能耗碳排放及物料碳排放两方面对激光摆动焊接过程的碳排放进行量化，提出了铝合金薄板搭接激光摆动焊接碳排放量化公式。

2) 建立了焊接功率、焊接速度、摆动频率、摆动振幅四类工艺参数与熔深、搭接面熔宽、接头最大承载力、碳排放强度四类焊接结果对应关系的 MOGP 近似模型，经验证，所构建近似模型对四类焊接结果的预测相对误差分别为 5.24%、5.51%、5.86% 和 2.69%，说

明所构建 MOGP 模型能够实现对焊接结果的良好预测。

3) 在所构建 MOGP 模型的基础上，采用 NSGA-II 算法对铝合金激光摆动问题进行多目标优化，得到最优焊接结果下的最佳工艺参数组合。经分析可知，优化后的工艺参数下最大承载力会降低 2.74%，虽然焊接质量有所牺牲，但碳排放可降低 12.99%，并经工艺试验观察，所得最佳工艺参数能够有效抑制气孔、内凹等焊接缺陷，在保证较好焊接质量的同时降低焊接过程碳排放。

4) 采用贡献度分析方法，分析了工艺参数对各焊接结果的影响，即激光功率对熔深有明显促进作用，激光功率-摆动振幅交叉因素有利于提升搭接面熔宽，激光功率-摆动频率和激光功率-摆动振幅交叉因素能增强接头最大承载力，焊接速度是降低碳排放的决定性因素。

参 考 文 献

[1] 陈根余, 江东远, 王彬, 等. 6061 铝合金超声波辅助激光焊接变形控制研究[J]. 激光技术, 2021, 45(5): 541-547.
Chen G Y, Jiang D Y, Wang B, et al. Research on deformation control of ultrasonic-assisted laser welding of 6061 aluminum alloy[J]. Laser Technology, 2021, 45(5):

- 541-547.
- [2] 李宇强, 郭玲玉, 蒋平, 等. 铝合金激光清洗表面形貌变化的实验研究及工艺参数优化[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202016.
Li Y Q, Guo L Y, Jiang P, et al. Experimental study on surface morphology changes of aluminum alloy using laser cleaning and optimization of process parameters[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202016.
- [3] Zhang X D, Chen W Z, Bao G, et al. Improvement of weld quality using a weaving beam in laser welding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2004, 20(5): 633-636.
- [4] 温鹏, 栗忠秀, 张松, 等. 摆动光纤激光-CMT 复合焊接 6A01-T5 铝合金型材接头的气孔特征及组织性能研究[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0802003.
Wen P, Li Z X, Zhang S, et al. Investigation on porosity, microstructures and performances of 6A01-T5 aluminum alloy joint by oscillating fiber laser-CMT hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0802003.
- [5] Zheng H, Yang S, Lou S H, et al. Knowledge-based integrated product design framework towards sustainable low-carbon manufacturing[J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 48: 101258.
- [6] Moglia F, Raspa A. New trends in laser beam welding how automotive applications are driving the future of laser technologies[J]. PhotonicsViews, 2020, 17(5): 26-29.
- [7] Chen G Y, Wang B, Mao S, et al. Research on the “∞”-shaped laser scanning welding process for aluminum alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 115: 32-41.
- [8] Wang L, Gao M, Zeng X Y. Experiment and prediction of weld morphology for laser oscillating welding of AA6061 aluminium alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2019, 24(4): 334-341.
- [9] 贾少辉, 贾剑平, 焦俊科, 等. 碳纤维增强热塑性复合材料/铝合金激光搅拌焊接实验及仿真研究[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702006.
Jia S H, Jia J P, Jiao J K, et al. Experimental and numerical studies on laser stir welding of carbon fiber reinforced thermal polymers/aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702006.
- [10] Kim C, Kang M, Kang N. Solidification crack and morphology for laser weave welding of Al5 J32 alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(1): 57-61.
- [11] Kang M, Han H N, Kim C. Microstructure and solidification crack susceptibility of Al6014 molten alloy subjected to a spatially oscillated laser beam[J]. Materials, 2018, 11(4): 648.
- [12] Wang Z M, Oliveira J P, Zeng Z, et al. Laser beam oscillating welding of 5A06 aluminum alloys: Microstructure, porosity and mechanical properties[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 58-65.
- [13] Rizvi S A, Ali W. Optimization of welding parameters and microstructure and fracture mode characterization of GMA welding by using taguchi method on SS304H austenitic steel[J]. Mechanics and Mechanical Engineering, 2018, 22(4): 1121-1132.
- [14] 陶亚平. 基于正交试验的 CMT 焊接 5A06 铝合金超薄板工艺参数优化[J]. 焊接技术, 2019, 48(3): 2, 34-36.
Tao Y P. Optimization of CMT welding process parameters for 5A06 aluminum alloy ultra-thin plate based on orthogonal test[J]. Welding Technology, 2019, 48(3): 2, 34-36.
- [15] 段诚茂, 曹华军, 李洪丞, 等. 基于碳效率的铝合金激光焊接工艺系统低碳优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(5): 1309-1318.
Duan C M, Cao H J, Li H C, et al. Low-carbon optimization method of aluminum alloy laser welding process system based on carbon efficiency[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(5): 1309-1318.
- [16] Jiang P, Wang C C, Zhou Q, et al. Optimization of laser welding process parameters of stainless steel 316L using FEM, Kriging and NSGA- II [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 99: 147-160.
- [17] Lim N K. Optimization of TIG weld geometry using a Kriging surrogate model and Latin Hypercube sampling for data generation[M]. Long Beach: California State University, 2014.
- [18] Katherasan D, Elias J V, Sathiya P, et al. Simulation and parameter optimization of flux cored arc welding using artificial neural network and particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2014, 25(1): 67-76.
- [19] Zhou Q, Jiang P, Shao X Y, et al. Optimization of process parameters of hybrid laser - arc welding onto 316L using ensemble of metamodels[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(4): 2182-2196.
- [20] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA- II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [21] 赵凯, 梁旭东, 王伟, 等. 基于 NSGA- II 算法的同轴送粉激光熔覆工艺多目标优化[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102004.
Zhao K, Liang X D, Wang W, et al. Multi-objective optimization of coaxial powder feeding laser cladding based on NSGA- II [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102004.