

基于炯的铝合金激光焊接能效建模及影响因素分析

雷冶炼, 何彦, 熊家骥, 田树飞, 张炯

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 与传统焊接技术相比, 激光焊接技术具有高能量密度聚焦、高灵活性等优势, 是先进制造业中非常重要的部分, 但仍然存在高能耗、低能效的问题。基于炯理论定义能效指标, 对焊接工艺的能效进行了研究。本文以 2mm 厚 6061 铝合金薄板为试验样件, 通过正交试验设计进行光纤激光焊接试验。基于试验数据, 通过响应曲面法建立了激光焊接能效与工艺参数的关系模型。然后, 基于试验数据分析工艺参数对焊接能效的影响。结果表明, 激光功率对焊接能效的影响最大, 其次为焊接速度, 离焦量的影响最小。此外, 通过响应曲面分析得出在合理范围内选择较大激光功率和较大的焊接速度对提高焊接能效有积极的作用。

关键词: 机械制造工艺; 焊接能效; 炯分析; 响应曲面法; 6061 铝合金; 光纤激光焊接

中图分类号: TH16

Energy efficiency modeling and analysis of influencing factors for laser welding of aluminum alloy based on exergy

LEI Zhilian, HE Yan, XIONG Jiayi, TIAN Shufei, ZHANG Jiong

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: Compared with traditional welding technology, laser welding technology is a very important part in advanced manufacturing with the advantages of high energy density focusing, high flexibility, etc., but it still has the problems of high energy consumption and low energy efficiency. The energy efficiency index was defined based on exergy theory, and the energy efficiency of welding process was studied. In this paper, 2mm thick 6061 aluminum alloy sheets were used as the test sample, and the optical fiber laser welding experiments were performed based on orthogonal test design. Based on experimental data, the parameterized model of laser welding energy efficiency was established by response surface method. Then, the influence of process parameters on welding energy efficiency was analyzed based on experiment data. The results show that the laser power has the greatest impact on the welding energy efficiency, followed by the welding speed and the focus position. In addition, the response surface analysis shows that choosing a larger laser power and a larger welding speed within a reasonable range has a positive effect on improving welding energy efficiency.

Key words: Mechanical manufacturing process; welding energy efficiency; exergy analysis; response surface method; 6061 aluminum alloy; fiber laser welding

0 引言

激光加工技术已成为全球先进制造业中越来越不可缺少的部分, 具有高能量密度聚焦, 易于操作, 高灵活性等显著优势。尽管具有许多优势, 然而高能耗、低能效^[1]的特性是限制激光加工应用的障碍。随着生产需求的增长和能源价格的上涨, 提高能效已经成为可持续制

基金项目: 国家自然科学基金 国际(地区)合作与交流项目 (51861165202)

作者简介: 雷冶炼 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 绿色制造

通信联系人: 何彦 (1981-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向: 智能制造、绿色制造. E-mail: heyang@cqu.edu.cn

造的相关问题^[2]。节能是发展可持续制造的有效途径，提高能效可以实现节能减排。

随着先进制造工艺朝着高能量密度方向发展，其能量密度相比传统工艺高 2-3 个数量级^[3]，因此提高其工艺过程能效尤为重要。激光加工是典型的高能量密度制造工艺，随着激光加工的推广和应用，有必要对其能效进行研究。目前，在激光增材制造工艺能效方面，Verma 等^[4]针对选区激光烧结工艺开发了一种多步骤优化方法，实现选区激光烧结增材制造工艺的节能。Peng 等^[2]建立了激光熔覆工艺过程比能的预测模型，分析了激光功率、扫描速度、送粉速率、主轴提升量对能效的影响。Liu 等^[5]基于热力学物理能量转换的本质建立了金属激光沉积工艺能效与工艺参数的关系模型并进行能效评估与影响因素分析。在激光焊接能效研究方面，Daub 等^[6]研究了激光光斑尺寸与能效的关系。Dahmen 等^[7]比较了激光源在加工过程的能效，指出不同的激光源能量转换效率不同，采用光纤激光器等能够提高激光焊接能效。Wei 等^[1]针对双镀锌高强度钢 DP800 的热丝激光焊接进行了研究，建立了节能效比的数学模型，研究表明热丝激光填充焊接节能效比与对接间隙和焊丝电辅加热温升正相关。综上所述可以看出激光增材制造工艺能效方面开展了大量研究，取得了很多可借鉴的成果。但对于激光焊接工艺能效的研究则主要集中焊接节能的整体认知，缺乏基于工艺参数的激光焊接工艺能效建模与分析评估。

因此，本文以 2mm 厚 6061 铝合金激光焊接为研究对象，对焊接能效进行了试验研究。基于试验设计和响应曲面法建立激光焊接能效的二阶多项式参数化模型。并通过数据分析，研究工艺参数及其交互作用对焊接能效的影响，提出改善激光焊接能效的策略。

1 激光焊接能效指标

通常的能效定义为能量产出与投入的比率，激光焊接过程能效可定义为输出成形焊缝所需的最小理论能量与输入总能量之比。与传统的利用能量平衡方法（热力学第一定律）建立能效指标不同，本文基于焓分析（热力学第一定律、第二定律）对激光焊接过程能效进行评估。焓是对各种能量形式的有用性、价值或质量的度量^[8]。作为一种评价能量价值的参数，焓从能量的品质上揭示了不同形式的能量在转换成有用功的能力上是有差别的，若能量在数量上相同而形式不同，其做功能力是不同的。激光焊接焓分析从焊接过程能量的“数量”和“质量”的角度出发，衡量激光焊接过程中能量的有效利用率。激光焊接能效定义为实际被消耗利用的焓值（有效焓值）与输入的所有能源的总焓值之比，焊接能效计算公式可表示为：

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{out, effective}}{Ex_{in, energy}} \times 100\% \quad (1)$$

式中， $Ex_{out, effective}$ ——激光焊接过程的有效输出焓值（J）； $Ex_{in, energy}$ ——激光焊接过程的输入能量焓值（J）。

激光焊接过程中输入的能量为激光器经过电-光转换产生的激光能量，输入能量焓值可当量为产生激光能所需的电能焓值，电能可以完成转化做功，电能值在数量上与焓值相等。

因此, 输入能量焓值计算如下所示。

$$Ex_{in,energy} = Ex_{in,elec} = P_{in} \frac{l}{v} \quad (2)$$

75 式中, $Ex_{in,elec}$ ——激光焊接过程的有效输出焓值 (J); P_{in} ——激光焊接过程激光系统总功率 (W); l ——激光焊接焊缝长度 (mm); v ——焊接速度 (mm/s)。

激光焊接的有效输出为焊接成形焊缝,在激光焊接过程中熔化焊缝金属所需的能量来源于工件材料吸收的激光光能。熔化焊缝金属所需的激光能量受金属材料定压比热、熔点温度、熔化潜热等热物理特性影响。激光焊接有效输出焓利用焊缝金属所需的最小理论能量焓计算。

80 激光焊接有效焓值计算公式如下所示。

$$\begin{aligned} Ex_{out,effective} &= Ex_{out,weld} = m_{weld} ex_{weld} = m_{weld} (ex_{melt} - ex_{in}) \\ &= \rho l S_{weld} \{c_{ps} (T_m - T_0) + L_m - T_0 [c_{ps} \ln(\frac{T_m}{T_0}) + \frac{L_m}{T_m}]\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $Ex_{out,weld}$ ——焊接成形焊缝的最小理论能量焓值 (kg); m_{weld} ——激光焊接形成的焊缝的质量 (kg); ρ ——激光焊接过程被熔融工件材料的密度 (kg/m³); l ——激光焊接形成的焊缝长度 (m); S_{weld} ——激光焊接过程被熔融形成焊缝截面积 (m²); c_{ps} ——工件材料固体状态定压比热容(J/kg*K); T_m ——焊接工件材料的熔点温度 (K); L_m ——焊接工件材料的熔化潜热 (J/kg)。

根据以上分析, 得到焊接能效函数为:

$$\begin{aligned} \eta_{ex} &= \frac{Ex_{out,effective}}{Ex_{in,energy}} \times 100\% = \frac{Ex_{out,weld}}{Ex_{in,energy}} \times 100\% \\ &= \frac{\rho v S_{weld} \{c_{ps} (T_m - T_0) + L_m - T_0 [c_{ps} \ln(\frac{T_m}{T_0}) + \frac{L_m}{T_m}]\}}{P_{in}} \end{aligned} \quad (4)$$

2 试验设计方案

2.1 激光焊接试验条件

90 本文使用 IPG YLR-4000 型光纤激光器进行 6061 铝合金激光焊接试验, 该光纤激光器激光功率连续可调, 最大输出功率为 4KW。实验采用德国 Precitec 公司生产的 YW50 激光焊接头, 激光焊接头搭载 ABB IRB4400 工业机器人。本试验以 6061 铝合金为试验对象, 样件尺寸为 100mm×75mm×2mm。6061 铝合金具有加工性能极佳、优良的焊接特点, 广泛的应用于汽车、航空航天等领域, 其化学成分如表 1 所示。焊前, 采用机械打磨去除铝合金焊接区域表面氧化膜, 并利用酒精清理样件表面油污和杂质, 避免油污等杂质影响激光焊接过程。焊接完成后, 为了得到焊缝截面积, 通过制样并利用显微镜观测焊缝截面, 结合图像处理软件计算获得焊缝截面形貌及焊缝面积等数据。

本试验中，使用日置 PW3337 型号功率仪对激光焊接过程能耗进行测量，在激光器系统的电器柜的总电源处获取电流和电压信号，通过软件进行实时监测和保存功率数据。激光焊接系统能耗监测示意图如图 1 所示。

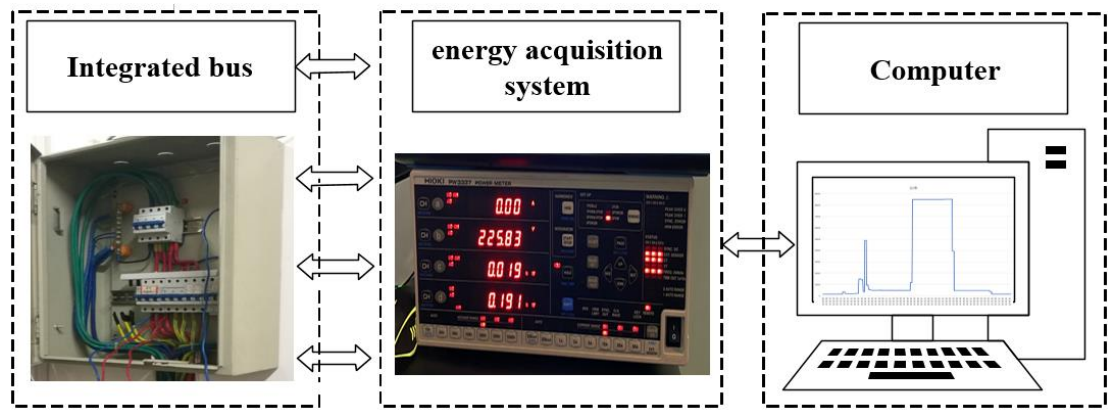


图 1 激光焊接系统能耗监测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy consumption monitoring of laser welding system

表 1 6061 铝合金材料化学成分 (wt%)

Tab. 1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy (wt%)

成分	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Mn	Zn	Ti	Al
Wt.%	0.8-1.2	0.4-0.8	0.7	0.15-0.4	0.04-0.35	0.15	0.25	0.15	余量

2.2 试验设计

激光焊接过程中，激光功率、焊接速度和离焦量是影响焊接过程激光能量吸收形式和激光能量利用率的关键变量。因此，本文选取激光功率、焊接速度和离焦量三个工艺参数作为能效响应的设计变量，以焊接能效为响应目标。本次试验选择激光功率范围 2.5-3.5kw，焊接速度范围 30-50mm/s，离焦量范围为-1~+1mm 区间。每个工艺参数在范围内平均选取 5 个水平进行正交试验设计，得到 25 组参数组合。随机安排试验进行铝合金激光焊接，获取试验数据。

3 结果与讨论

3.1 参数化建模

激光焊接工艺参数对响应不仅存在单因素的影响，而且工艺参数的相互作用对响应也存在影响，考虑交互效应和二次效应，建立如下二阶多项式响应面回归数学模型以构建各响应目标的参数模型。

$$y_u = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_{iu} + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_{iu}^2 + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_{iu} x_{ju} \tag{5}$$

利用 Minitab 软件对能效试验数据进行处理，拟合得到激光功率、焊接速度和离焦量与激光焊接能效的简化二阶响应曲面模型：

125

$$\eta_x = -13.8549 + 11.0018 * LP - 0.0980 * WS - 1.1363 * FP + 0.0407 * LP * WS + 0.3621 * LP * FP - 1.9697 * LP^2 \tag{6}$$

式中：LP、WS、FP 分别为激光功率、焊接速度、离焦量。

130

进行方差分析（Analysis of variance ,ANOVA）对回归模型的显著性进行检验，得到结果如表 2 所示。表 2 中 SS 为离均差平方和，df 为自由度，MS 表示均方，F 为 F 统计量，P 为显著性概率。P=0.05 通常被认为是可接受的边界水平，显然焊接能效模型的 P 值小于 0.0001 表明该模型是非常显著的。模型的判定系数 R-Sq 表明模型的拟合度，其值为 96.89%，同样表明该模型是显著的。

表 2 能效模型方差分析（ANOVA）
Tab. 2 ANOVA of energy efficiency model

来源	SS	df	Mean Square	F-value	p-value	R-sq	Adjusted R-sq
模型	4.31	8	0.5390	66.93	< 0.0001	96.89%	95.85%
残差误差	0.1289	16	0.0081				
合计	4.44	24					

135

3.2 工艺参数影响分析

对激光焊接能效进行分析，利用主效应图、交互效应图以及等值线图、响应曲面图等来解释评估工艺参数对焊接能效的影响。图 2 给出了各工艺参数对能效影响的主效应图，从图中可以看出随着激光功率的增大，激光焊接能效均值先增加后减小；随着焊接速度的增大，能效逐渐增加；随着离焦量的变化，负离焦量时能效响应更大；此外，可以看出激光功率对能效的影响最大，焊接速度次之，离焦量对能效影响最小。因此，为了获得较大的激光焊接能效，应在合适的功率范围内下取较大焊接速度。

140

交互作用图表示每个因子水平在另一个因子水平保持恒定时的均值图。当某一因子水平上的响应依赖于其他因子的水平时，即存在交互作用。当交互作用图中显示为平行线，则表示不存在交互作用。当交互作用图偏离平行状态则表示存在交互作用，偏离的程度越大，交互作用越明显。能效交互作用如图 3 所示，从图中可以看出，激光功率和焊接速度交互作用以及激光功率和离焦量交互作用对于响应的影响是显著的，焊接速度和离焦量交互作用对于响应的影响不显著(两条线几乎平行)。

145

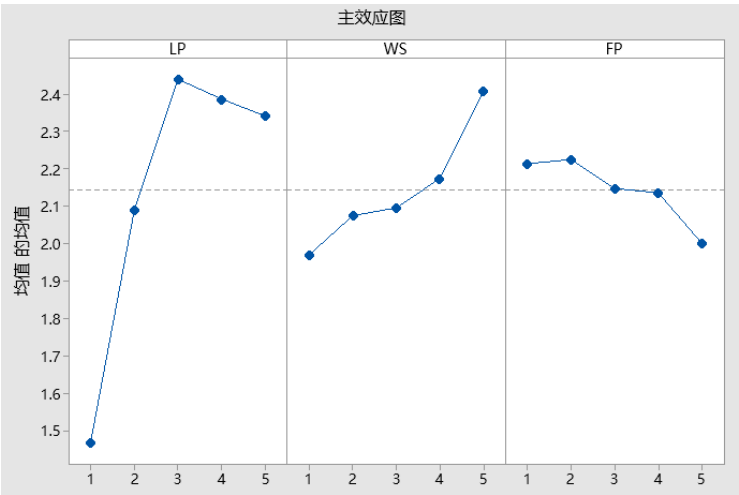


图 2 能效主效应图

Fig. 2 Main effect diagram of energy efficiency

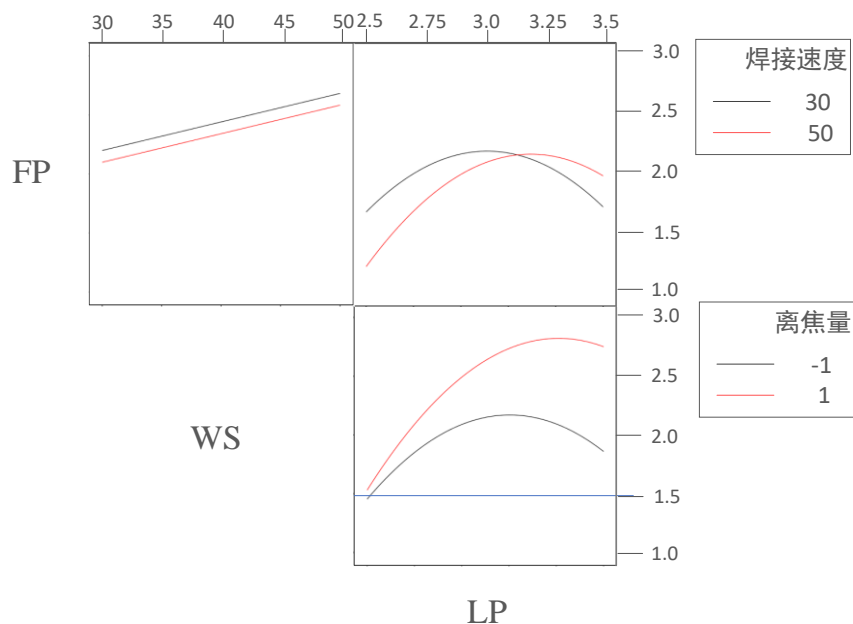


图 3 能效交互效应图

Fig. 3 Interaction effect diagram of energy efficiency

155 根据交互作用分析得到激光功率和焊接速度交互作用以及激光功率和离焦量交互作用对能效的影响显著。在离焦量为中点水平定值（FP=0 mm）时，激光功率和焊接速度对于能效响应的等值线图、曲面图分别如图 4、图 5 所示，从图中可以看出，激光功率和焊接速度交互作用对于能效响应的影响确实是显著的。激光焊接能效随着激光功率的增大呈现出先增大后减小的现象，随着焊接速度的增大而增大，该结论与前面主效应的分析结果一致。此外，
160 可以发现在激光功率处于低水平时，焊接速度的增大会提高能效，但当激光功率处于高水平时焊接速度对能效的影响变得更加显著。

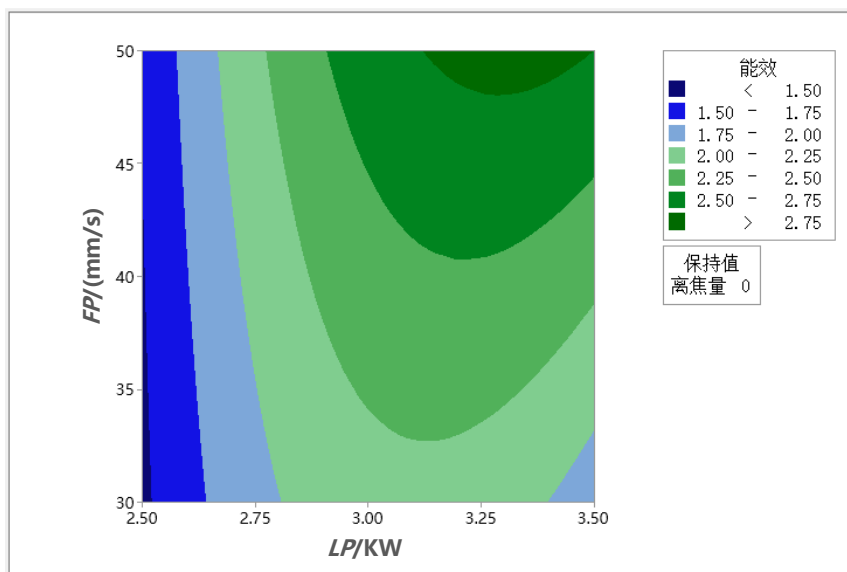


图 4 激光功率和焊接速度与能效的等值线图

Fig. 4 Contour plot of laser power and welding speed vs. energy efficiency

165

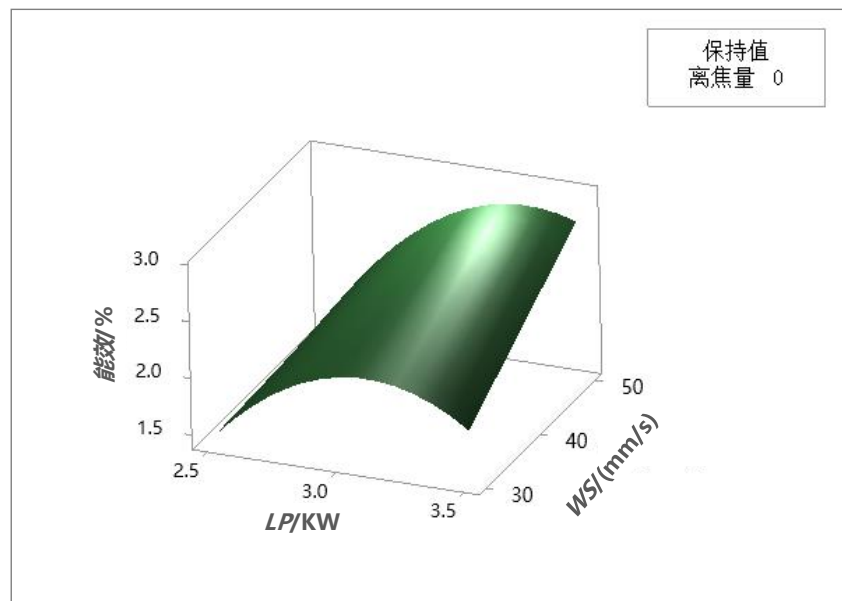


图 5 激光功率和焊接速度与能效的响应面图

Fig. 5 Response surface plots of laser power and welding speed vs. energy efficiency

170 在保持焊接速度为 midpoint 水平定值 (WS=40 mm) 时, 激光功率和离焦量对于能效响应的等值线图、曲面图分别如图 6、图 7 所示。从图中可以看出, 激光焊接能效随着激光功率的增大呈现出先增大后减小的现象, 该结论也与前面主效应的分析结果一致。同时, 可以发现正离焦量对能效的影响更大。此外, 可以发现在激光功率处于低水平时, 由负离焦量变化到正离焦过程能效减小, 但当激光功率处于高水平时由负离焦量变化到正离焦过程对能效影响较小。由于在激光功率水平较低时, 负离焦量相对正离焦量可以使焊接过程中工件材料在相同的激光功率下吸收更多的热量, 从而熔融更多材料, 增大焊接过程能效。

175

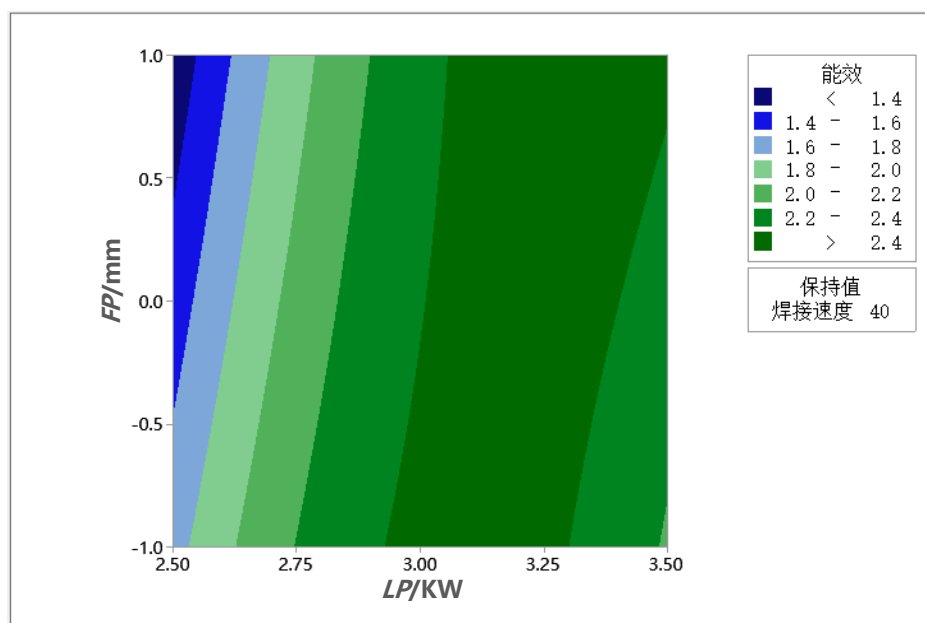


图 6 激光功率和离焦量与能效响应等值线图

Fig. 6 Contour plots of laser power and focus position vs. energy efficiency

180

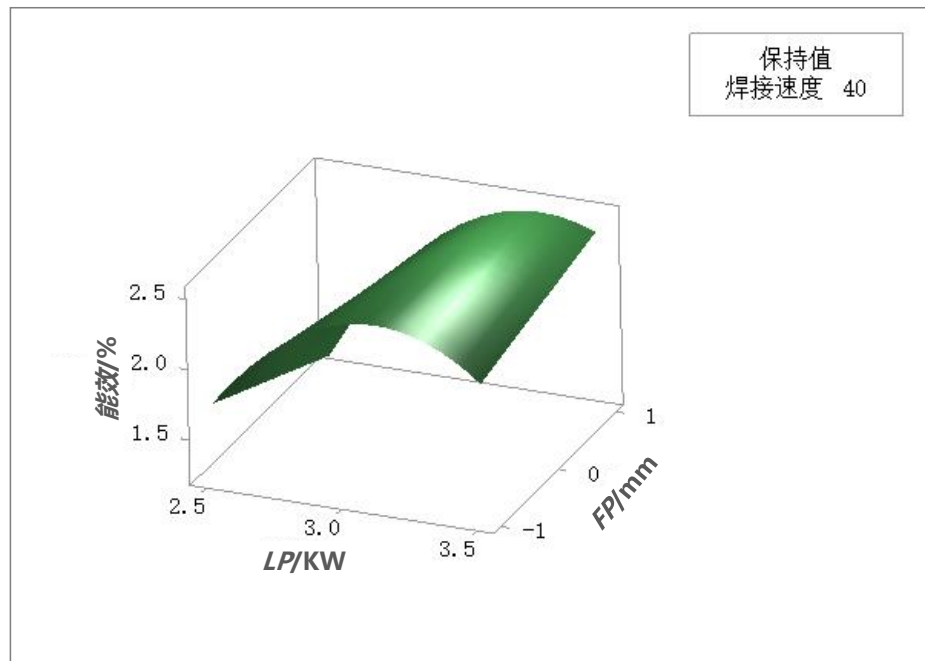


图7 激光功率和离焦量与能效响应面图

Fig. 7 Response surface plots of laser power and focus position vs. energy efficiency

4 结论

本文针对 2mm 厚度的 6061 铝合金光纤激光焊接进行了试验研究，基于响应曲面法建立了焊接能效与焊接工艺参数的关系模型，并通过试验数据分析工艺参数对焊接能效的影响规律。研究得出以下结论：1) 利用响应面法建立的焊接能效与工艺参数之间的参数模型，较好的反映焊接工艺参数对焊接能效影响变化的函数规律。2) 分析得出，激光功率对焊接能效的影响最大，其次为焊接速度，离焦量对焊接能效影响最小。随着激光功率的增大，焊接能效先增加后减小；随着焊接速度的增大，能效逐渐增大；负离焦量时能效响应更大。3) 激光功率与焊接速度交互作用和激光功率与离焦量交互作用对焊接能效影响显著；激光功率和焊接速度分析表明，相对于低水平，激光功率处于高水平时焊接速度对能效的影响更显著；激光功率和离焦量分析表明，当激光功率处于低水平时，离焦量的变化对能效响应影响更大，激光功率处于高水平时，离焦量的变化对能效影响很小。因此，实际铝合金激光焊接过程中应在合理范围内选择的较大激光功率和较大的焊接速度以提高焊接能效。此外，可以根据实际焊接情况以更利于操作或得到更好焊接质量的标准选取离焦量。

[参考文献] (References)

- [1] Wei H , Zhang Y , Tan L , et al. Energy efficiency evaluation of hot-wire laser welding based on process characteristic and power consumption[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87:255-262.
 - [2] Peng S, Li T, Zhao J, et al. Towards energy and material efficient laser cladding process: Modeling and optimization using a hybrid TS-GEP algorithm and the NSGA-II[J]. Journal of cleaner production, 2019, 227: 58-69.
 - [3] 董萌萌, 李涛, 郭燕春, 等. 激光熔覆系统能耗建模分析方法研究[J]. 大连理工大学学报, 2018 (3): 2.
- DONG M M, LI T, GUO Y C, et al. Research on energy consumption modeling and analysis method of laser cladding system[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2018 (3):2. (in chinese)

- [4] Verma A, Rai R. Energy efficient modeling and optimization of additive manufacturing processes[C]//solid freeform fabrication symposium, Austin, TX. 2013: 231-241.
- 210 [5] Liu W, Wei H, Huang C, et al. Energy efficiency evaluation of metal laser direct deposition based on process characteristics and empirical modeling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(1-4): 901-913.
- [6] Daub R, Wiedenmann R, Mahrle A, et al. Influence on the efficiency of the heat conduction mode laser beam welding process regarding different laser spot geometries[C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Laser Institute of America, 2010, 2010(1): 200-208.
- 215 [7] Dahmen M, Gündükkurt O, Kaierle S. The ecological footprint of laser beam welding[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 19-28.
- [8] Rosen M A , Dincer I , Kanoglu M . Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact[J]. Energy Policy, 2008, 36(1):128-137.