

# 基于遗传算法-响应曲面方法的激光透射焊接 聚碳酸酯工艺的多目标优化

王 霄 张 成 王 凯 李 品 高 阳 阳 胡 杨 刘 会 霞

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 采用旋转中心复合设计进行激光透射焊接热塑性聚合物的试验规划,运用响应曲面法建立焊接工艺参数和焊接强度、焊缝宽度的关系模型,采用满意度函数和遗传算法相结合,对焊接强度、焊缝宽度和焊接成本进行了多目标优化及优化结果的验证。结果表明,优化的预测结果和实验结果取得了较好的一致性,可以为提高焊接质量和降低生产成本提供有效的指导。

**关键词** 激光技术;激光透射焊接;工艺参数优化;多目标优化;响应曲面;满意度函数;遗传算法

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0603003

## Multi-Objective Optimization of Laser Transmission Welding of Polycarbonate Process Based on Genetic Algorithm-Response Surface Methodology

Wang Xiao Zhang Cheng Wang Kai Li Pin Gao Yangyang Hu Yang Liu Huixia

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** A central composite rotatable experimental design is used to plan the experiment of laser transmission welding of polymers. Response surface methodology (RSM) is employed to establish the mathematical models of relations between the welding process parameters and the weld strength as well as weld seam width, and then the desirability function coupled with genetic algorithm is used to carry out the multi-objective optimization of the weld strength, weld width and weld cost. It demonstrates that the predicted results of the optimization are in good agreement with the experimental results, so this study provides an effective direction to enhance the weld quality and minimize the weld cost.

**Key words** laser technique; laser transmission welding; process parameters optimization; multi-objective optimization; response surface methodology; desirability function; genetic algorithm

**OCIS codes** 140.2020; 140.3460; 140.3510; 350.3390

### 1 引 言

激光透射焊接同种或异种生物相容性材料在医学领域有着广泛的应用前景。聚合物中的聚碳酸酯(PC)材料具有无毒、耐化学腐蚀、绝缘、尺寸稳定、高弹性、高强度-质量比、易于成形复杂形状以及可调整其表面性能来加强其生物相容性等特点,适用于微器件和生物植入体(BioMEMS)的焊接和封装等应用。激光透射焊接与热粘结、摩擦焊接、电磁焊接相比具有无接触、速度快、精度高、柔性、热影响区域小等优点<sup>[1~3]</sup>。

随着激光透射焊接研究的深入,优化焊接工艺参数已经成为提升工业产品质量的有效手段。由于用传统方式获得一种新材料的最佳连接工艺参数范围需要花费大量时间,而且成本高、效率低<sup>[4]</sup>,因此,为了快速寻找最佳焊接工艺参数范围,正交、田口、满意度函数、响应曲面、人工神经网络和遗传算法等实验设计和优化方法被广泛地用来建立焊接工艺参数和输出响应之间的关系模型及优化焊接工艺参数。Sathiya等<sup>[5]</sup>采用正交试验设计和田口方法进行了焊接工艺参数的优化,然而激光透射连接过程

收稿日期: 2012-01-06; 收到修改稿日期: 2012-02-29

作者简介: 王 霄(1964—),男,教授,主要从事激光加工和数字化设计与制造方面的研究。E-mail: wx@ujs.edu.cn

是一个复杂的多因素交互影响的过程,因此需要对激光透射焊接工艺参数的优化进行更加深入的研究。Bappa 等<sup>[6]</sup>运用响应曲面方法分析和讨论了热塑性塑料聚甲基丙烯酸甲酯焊接参数的交互作用对连接强度和焊缝宽度的影响。测量和计算结果表明建立的响应曲面模型在焊接参数范围内能有效预测连接强度和焊缝宽度。Bappa 等<sup>[7]</sup>应用人工神经网络模型预测了热塑性塑料激光透射焊接的连接质量,建立了焊接工艺参数对搭接剪切强度和焊缝宽度的关系模型,该模型预测的结果和实验数据取得了很好的一致性。当前研究表明对激光透射焊接工艺参数的优化主要集中在单目标优化方面。然而,在聚合物的激光透射焊接与封装过程中,焊接强度、焊缝宽度和焊接成本之间是矛盾的,需要进行协调和折中处理,即实际焊接工艺参数的优化是一个面向满意的焊接强度、焊缝宽度和焊接成本的多目标优化问题。在金属焊接领域已有学者应用响应曲面优化方法进行了多目标优化的研究<sup>[8,9]</sup>。如何综合运用现有优化方法有效解决焊接工艺参数多目标优化已成为一种趋势。

本文应用响应曲面建立焊接强度和焊缝宽度的二阶多项式模型,然后将满意度函数和遗传算法相结合,对激光透射焊接工艺参数进行多目标优化,并通过对比优化实验结果和模型预测结果来获得焊接 PC 薄板的最佳性能参数。

## 2 试验设计方案

### 2.1 试样准备与试验设备

激光透射焊接一般要求上层材料能够透过激光光束,而下层材料能够吸收激光能量。试验选用的两层热塑性聚合物 PC 试样为相同的高透明性透光材料。其中,在下层材料上表面的待焊接区域均匀地涂覆一层炭黑涂料,作为激光能量的吸收剂。激光会穿过上层透明的 PC 材料,激光能量在下层材料涂有炭黑的上表面被吸收,从而使得上层材料在界面处得到直接加热,当温度超过材料的熔点,在两试样界面处的材料熔化。冷却后,在 PC 板材的界面处形成焊缝。激光透射焊接的原理如图 1 所示,图 2 显示了激光透射焊接后的试样,可以看出焊缝宽度比较均匀和美观。

采用搭接的方式进行激光透射焊接,试样尺寸均为 25 mm×80 mm×1 mm。在激光透射焊接前,先将试样用超声波清洗机清洗 8 min,然后用酒精轻微擦拭,最后放在干燥箱内干燥 12 h,以去除聚

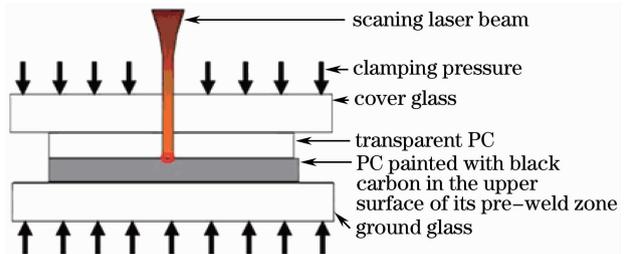


图 1 激光透射焊接的原理图

Fig. 1 Schematic illustration of the experiment



图 2 焊接试样的宏观照片

Fig. 2 Macro picture of the welding sample

合物表面的水分、油污等杂质,从而避免其对焊接强度的影响。实验采用 Dilas 公司 Copmact130/140 型激光器,DL. S20P 扫描振镜。激光器最大输出功率为 130 W,输出波长为(980±10)nm,光纤的芯径 D=400 nm,数值孔径 NA=0.22 μm,扫描振镜工作范围为 140 mm×140 mm,光斑直径为 2.8 mm。

采用微机控制电子万能试验机进行拉伸试验。拉伸机的型号 WDW-10 KN,电源功率为 750 W,使用的试验速度 1 mm/min,负荷分辨率为 0.01 N。所有的样本采用分辨率为 0.001 mm 光学显微镜进行焊缝宽度的测量。焊接强度  $\sigma$  为<sup>[10]</sup>

$$\sigma = F / (L \times T), \quad (1)$$

式中  $F$  表示拉伸失效载荷, $L$  表示焊缝长度, $T$  表示材料厚度。

### 2.2 试验方法

采用 4 因素 5 水平旋转中心复合设计 (CCRD)<sup>[11]</sup> 规划。在单因素试验的基础上确定各因素的工艺参数范围。选择焊接工艺参数范围时,需要进行大量的单因素试验。如:选择激光器功率时,要将焊接速度、夹紧压力和扫描次数固定在一个适当的值上,让激光功率在其允许的范围内进行连续变动。激光功率的最小值要能够保证试样的可靠焊接;以焊接试样出现烧蚀时的激光功率作为它的最大值。其他焊接参数的选择也是这样的过程。选择激光功率、扫描速度、夹紧压力、扫描次数作为独立的试验参数,焊接强度、焊缝宽度和焊接成本作为优化目标。表 1 给出了试验设计水平和试验参数范围。表 2 给出了中心复合旋转设计的变量设计表和相应的试验结果数据。

表 1 焊接强度的 CCRD 试验设计参数的实际值和对应的编码值

Table 1 Actual and corresponding coded values of parameters in CCRD of experiments for the welding quality

Factor	Code	Extreme value				
		-2	-1	0	1	2
Power /W	W	9.2	21	31.5	41.6	51.6
Velocity /(mm/s)	V	2	5	9	13	16
Clamp pressure /MPa	P	0	0.25	0.5	0.75	1
Scanning number	N	1	2	3	4	5

表 2 焊接强度的试验设计矩阵和对应的测量结果

Table 2 Design of experimental matrix and corresponding measured results of the welding quality

No.	W /W	V /(mm/s)	P /MPa	N	Joint strength /MPa	Joint width / $\mu\text{m}$
1	51.6	9	0.50	3	36.112	3814.76
2	31.5	9	0.50	3	43.750	3490.43
3	20.9	5	0.75	2	36.385	3386.26
4	41.6	5	0.25	4	41.314	4069.70
5	31.5	9	0.50	3	43.827	3514.45
6	20.9	13	0.75	2	26.415	3106.98
7	31.5	9	0.50	3	44.926	3589.53
8	31.5	9	0.50	3	44.194	3622.18
9	41.6	13	0.25	2	30.750	3452.58
10	31.5	9	0.50	3	43.021	3556.25
11	41.6	13	0.75	2	41.777	3583.90
12	20.9	13	0.25	2	25.844	2976.35
13	20.9	13	0.25	4	40.510	3240.37
14	31.5	9	0.50	5	45.082	3714.53
15	20.9	5	0.25	4	36.311	3470.16
16	41.6	5	0.75	2	42.254	3786.04
17	20.9	13	0.75	4	30.079	3157.09
18	31.5	9	1.00	3	44.930	3578.51
19	9.2	9	0.50	3	25.239	2599.35
20	20.9	5	0.75	4	36.988	3464.53
21	31.5	16	0.50	3	29.763	3342.91
22	31.5	9	0.50	3	45.153	3532.09
23	31.5	2	0.50	3	40.818	4170.04
24	41.6	13	0.25	4	43.496	3877.82
25	41.6	5	0.25	2	39.448	3774.78
26	41.6	13	0.75	4	43.702	3662.16
27	31.5	9	0.50	1	27.970	3345.47
28	31.5	9	0.00	3	42.400	3352.48
29	20.9	5	0.25	2	36.073	3347.97
30	41.6	5	0.75	4	41.915	4110.36

### 3 结果与讨论

由于平均预测误差  $\epsilon_{AME}$  和均方根预测误差  $\epsilon_{RSME}$  与评价响应曲面模型的建模和遗传算法的优化有关,因此介绍如下:

$$\epsilon_{AME} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left( \frac{|y_{i,e} - y_{i,p}|}{y_{i,e}} \times 100 \right), \quad (2)$$

$$\epsilon_{RSME} = \left[ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (y_{i,e} - y_{i,p})^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中  $p$  表示实验的组数;  $y_{i,e}$  表示实验数据;  $y_{i,p}$  表示与实验数据相对应的预测值;  $i$  表示  $0 \sim p$  的变量。

#### 3.1 焊接强度

根据方差分析(ANOVA)表 3 可以得出:焊接强度模型遵循的  $F$  分布的检验统计量值为 12.14,  $P$  值表示建立模型可靠性的一种统计检验方法。一般,  $P$  值为 0.05 通常被认为是可接受错误的边界水平。显然,焊接强度模型的  $P$  值小于 0.0001 表明该模型显著。模型的决定性系数  $R^2$  表明了模型的拟合度,其值为 0.9189,表明该模型有不到 9% 的总变异无法解释。  $P_A = 11.575$  ( $P_A$  表示模型的信噪比,其值大于 4 就表示建立满意模型是满意的)和

$R_p^2=0.7857$  ( $R_p^2$  表示模型预测新数据精确程度) 同样表明建立的焊接模型是显著的。实际参数的二阶多项式焊接强度模型可以表达为

$$Y = -7.158 + 1.532x_1 + 0.215x_2 + 2.51x_3 + 12.424x_4 + 0.0265x_1x_2 + 0.569x_1x_3 - 0.0163x_1x_4 - 0.189x_2x_3 + 0.479x_2x_4 - 5.915x_3x_4 - 0.0274x_1^2 - 0.162x_2^2 + 0.923x_3^2 - 1.727x_4^2, \quad (4)$$

约束条件:  $9.2W \leq x_1 \leq 51.6W$ ;  $2 \text{ mm/s} \leq x_2 \leq 16 \text{ mm/s}$ ;  $0 \leq x_3 \leq 1 \text{ Mpa}$ ;  $1 \leq x_4 \leq 5$ 。

表 3 焊接强度的方差分析

Table 3 ANOVA for the welding strength model

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square
Model	1124.45	14	80.32
Residual	99.25	15	6.62
Pure error	3.15	5	0.63
Cor total	1223.71	29	

$R^2$	$P_A$	$R_p^2$	$F$ -value	$P$ -value
0.9189	11.575	0.7857	12.14	0.0001

通过(2)式和(3)式可以计算出焊接强度模型的绝对平均预测误差和均方根误差分别为 3.72% 和 1.82。焊接强度模型实验结果与预测结果之间的对比如图 3 所示,可以看出,焊接强度模型实验结果的预测值和实验值之间存在着一定的偏差。这是因为模型的预测能力在一定程度上的偏离,引起了焊接强度的实验值和预测值之间的误差<sup>[13]</sup>,但是该模型仍然能给出一个满意的焊接工艺参数预测值。

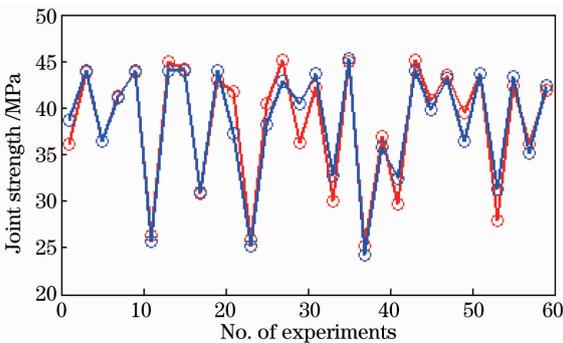


图 3 焊接强度的实验结果和预测结果的对比

Fig. 3 Comparison of experimental data and predicted data of the welding strength

### 3.2 焊缝宽度

根据 ANOVA 表 4 可以得出:焊缝宽度模型遵循的  $F$  分布检验统计量值为 34.93,焊缝宽度模型的  $P$  值小于 0.0001 表明该模型显著。模型的  $R^2=0.9702$ ,表示模型有不到 1% 的总变异无法解释。

$P_A=26.232$  和  $R_p^2=0.8543$  同样表明建立的焊缝宽度模型是显著的。实际参数的二阶多项式焊缝宽度模型可以表达为

$$Z = 2449.19 + 58.584x_1 - 121.073x_2 + 955.749x_3 + 69.39x_4 + 0.0214x_1x_2 - 2.549x_1x_3 + 3.664x_1x_4 - 7.598x_2x_3 - 0.0323x_2x_4 - 143.853x_3x_4 - 0.68x_1^2 + 4.52x_2^2 - 292.676x_3^2 - 2.166x_4^2, \quad (5)$$

约束条件:  $9.2W \leq x_1 \leq 51.6W$ ;  $2 \text{ mm/s} \leq x_2 \leq 16 \text{ mm/s}$ ;  $0 \leq x_3 \leq 1 \text{ Mpa}$ ;  $1 \leq x_4 \leq 5$ 。

表 4 焊缝宽度的方差分析

Table 4 ANOVA for the welding seam width model

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square
Model	$3.08 \times 10^6$	14	$2.20 \times 10^5$
Residual	94586.25	15	6305.75
Pure error	11940.74	5	2388.15
Cor total	$3.18 \times 10^6$	29	

$R^2$	$P_A$	$R_p^2$	$F$ -value	$P$ -value
0.9702	26.232	0.8543	34.93	<0.0001

通过(2)式和(3)式可以计算出焊缝宽度模型的绝对平均预测误差和均方根误差分别为 1.315% 和 56.15。图 4 显示了焊缝宽度模型实验结果和预测结果的对比。可以看出,焊缝宽度模型的预测值和实验值之间有着较好地一致性。也就是说建立的焊缝宽度模型能较好地反应焊缝宽度和激光功率、扫描速度、夹紧压力、扫描次数之间的内在规律。

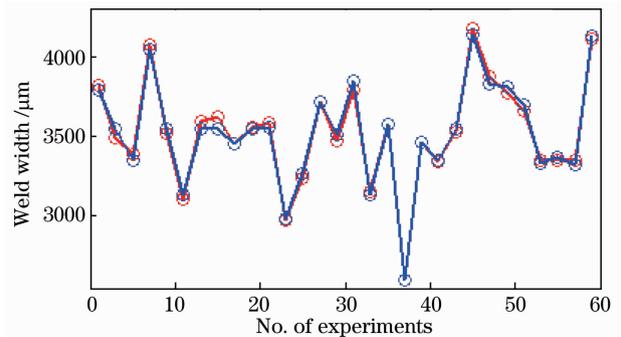


图 4 焊缝宽度的实验结果和预测结果的对比

Fig. 4 Comparison of the welding seam width and the experimental data and predicted data

### 3.3 焊接成本

根据焊缝单位长度来计算焊接成本<sup>[8]</sup>。激光器系统的焊接成本可分为不同的类别,如表 5 所示其中,  $P_f$  表示将功率的单位 kVA 转换为 kWh 的功率转换因子,对焊接成本的计算没有考虑设备因意外损坏而造成的附加成本。从表中的成本分类可以得

出每小时近似的总焊接成本是功率的函数,也就是说消耗的电能是每小时近似的总焊接成本的可变成本;而其它的折算成本则与激光器的使用寿命直接相关,即每小时近似的总焊接成本的常数项。因此,每小时近似的总焊接成本  $c = 20.36028 + 1.3152 \times P$ 。而焊缝单位长度的近似总焊接成本是激光功率、扫描速度和扫描次数的函数,因此可以通过优化

此 3 个参数来降低焊接成本。焊缝单位长度的近似总焊接成本为

$$c = \frac{20.36028 + 1.3152 \times PW}{0.85 \times V \times 3600 \times (1/1000)} \times N, \quad (6)$$

式中  $c$  的单位为  $\text{¥/m}$ ;  $W$  表示激光器功率,单位为  $\text{kW}$ ;  $V$  表示扫描速度,单位为  $\text{mm/s}$ ;  $N$  表示扫描次数。

表 5 焊接成本的分类

Table 5 Categories of the welding cost

Elements of cost	Calculations	Welding cost / ( $\text{¥/h}$ )
Laser power	$(2.4 \text{ kVA}) \times (0.8 P_i) \times (\text{¥}0.685 \text{ kWh}) \times W$	1.3152W
Two PC and drive power	$1 \text{ kWh} \times (\text{¥}0.685 \text{ kWh})$	0.685
Laser head assembly (include fixing bench)	$\text{¥}160274/20000 \text{ h}$	8.0137
Laser controller (include two PC)	$\text{¥}142914/20000 \text{ h}$	7.1457
Optical fiber	$\text{¥}63421/20000 \text{ h}$	3.17105
Traverse table	$\text{¥}27246/80000 \text{ h}$	0.340575
Clamp	$\text{¥}32341/80000 \text{ h}$	0.40425
Maintenance labour	$12 \text{ h}/2000 \text{ h} \times \text{¥}100$	0.6
Total approximated operating cost per hour ( $\text{¥}20.36028 + 1.3152 \times W$ ) / h		

## 4 优 化

在前面运用响应曲面方法建立焊接强度和焊缝宽度的二阶多项式模型的基础上,把满意度函数和遗传算法相结合,并采用 Matlab 软件的遗传算法工具箱来进行焊接工艺参数的多目标优化。研究采用两种优化准则进行优化结果的对比。焊接强度主要取决于焊缝宽度。优化的第一条准则是在不考虑焊接成本的情况下达到最大的焊接强度和最小的焊缝宽度。然而第二条准则是以较低的焊接成本来实现焊接强度最大和焊缝宽度最小。表 6 总结了满意度函数的两种优化准则。表中  $y_1$  表示响应焊接强度,  $y_2$  表示响应焊缝宽度,  $y_3$  表示响应焊接成本,  $L$  表示第  $i$  个响应期望的最小值,  $v$  为第  $i$  个响应期望的最大值。  $w_i$  为第  $i$  个响应的权重值。准则 1 的优化总体满意度函数可以表达为

$$D_1 = \left( \frac{y_1 - 41}{48 - 41} \times \frac{3800 - y_2}{3800 - 3325} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

准则 2 的优化总体满意度函数可以表达为

$$D_2 = \left( \frac{y_1 - 41}{48 - 41} \times \frac{3800 - y_2}{3800 - 3325} \times \frac{2.24 - y_3}{2.24 - 0.86} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

分别采用满意度函数(7)式和(8)式作为遗传算法的适应度函数,来评价各个个体优劣和度<sup>[14]</sup>。选择浮点编码方式,初始种群的数量为 200,终止函数为 maxGenTerm,最大迭代次数 100,选择函数为

normGeomSelect,其参数设置 0.08,交叉函数为 heuristicXover,其参数设置为 2、3,变异函数为 multiNonUnifMutationnon,其参数设置为 6、100 和 3。基于响应曲面满意度函数的遗传算法的最终迭代优化结果如表 7 所示。根据准则 1,PC 薄板焊接的最佳焊接工艺参数如下:激光功率为 36.89 W,扫描速度为 9 mm/s,夹紧压力为 1 MPa,扫描次数为 2,预测的最大焊接强度为 45.9 MPa,焊缝宽度为 3580.9  $\mu\text{m}$ ,焊接成本为  $\text{¥}1.4821$ 。根据准则 2,PC 薄板焊接的最佳焊接工艺参数如下:激光功率为 39.9 W、扫描速度为 10 mm/s,夹紧压力为 1 MPa,扫描次数为 2,预测的最大焊接强度为 45.466 MPa,焊缝宽度为 3572.9  $\mu\text{m}$ ,焊接成本为  $\text{¥}1.3342$ 。可见,在焊接强度减少 0.95%和焊缝宽度降低 0.22%的情况下,焊接成本可以减少大约 9.98%。

为了验证优化的结果,根据优化结果进行了试验。表 7 给出了焊接强度、焊缝宽度的实验结果、预测结果、预测误差以及焊接成本。根据优化的试验结果可以得出:焊接强度的最大预测误差为 3.92%,焊缝宽度的最大预测误差为 2.43%。实验结果和预测结果取得了较好的一致性,说明了该优化模型可行。运用响应曲面满意度函数的遗传算法是进行多目标优化的一种有效方法。从优化结果中随机选择根据优化条件得到的焊接试样的微观照片如图 5(a)所示。由于气泡的生成和迅速膨胀会产生

较高的压力,使得 PC 板材间形成足够强的焊接<sup>[15]</sup>。从焊接试样中可以观察到在焊缝区域有大量的气泡产生。从观察和拉伸试样的结果可以得出:很多小而均匀的气泡能够增加其焊接强度。从图 5(b)的

拉伸断面图可以看出焊缝区域被撕裂拉断。通过焊缝区域的断面图也说明了优化了的焊接的强度是很高的。

表 6 满意度函数优化参数

Table 6 Parameters for optimization by desirability function approach

Response	$y_i$	$L$	$T$	$U$	$w_i$	Criteria1	Criteria2
Weld strength /Mpa	$y_1$	41	48		1	maximize	maximize
Weld width / $\mu\text{m}$	$y_2$		3325	3800	1	minimize	minimize
Weld cost / $\text{¥}$	$y_3$		0.86	2.24	1		minimize

表 7 优化结果

Table 7 Optimization results

Criteria	W /W	V /(mm/s)	P /MPa	N		Joint strength /MPa	Weld width / $\mu\text{m}$	Welding cost / $\text{¥}$
1	36.89	9	1	2	Actual	44, 26	3495.78	1, 4821
					predict	45.9	3580.9	
					error	3.71%	2.43%	
2	39.9	10	1	2	Actual	43, 75	3488.43	1, 3342
					predict	45.466	3572.9	
					error	3.92%	2.42%	

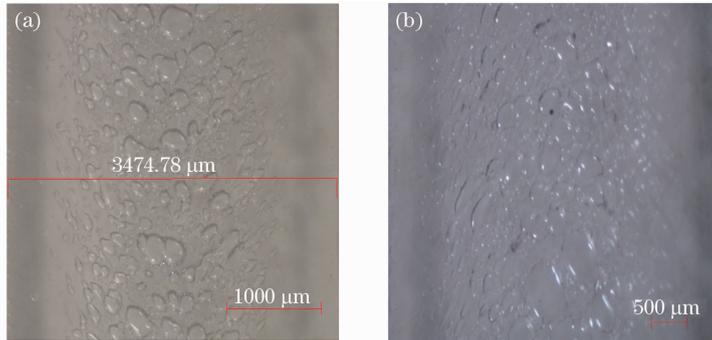


图 5 从优化结果中随机选择的焊接区域的微观照片

Fig. 5 Micro pictures of the welding bead area for the optimal joint conditions randomly chosen from the optimal results

## 5 结 论

根据试验数据建立了焊接强度、焊缝宽度和焊接成本的响应曲面模型,并采用满意度函数和遗传算法相结合,对焊接质量和焊接成本进行了多目标优化。通过以上的试验结果,可以得出以下结论:1)运用响应曲面方法建立的焊接质量模型和焊接工艺参数之间二阶多项式数学模型,较好地反映了焊接工艺参数对焊接强度和焊缝宽度影响变化的函数规律。2)优化的试验结果和预测结果取得了较好的一致性。说明运用响应曲面建立模型,并使用满意度函数和遗传算法相结合进行多目标优化是一种有效的方法。

## 参 考 文 献

- X. Wang, P. Li, Z. Xu *et al.*. Laser transmission joint between PET and titanium for biomedical application [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2010, **210**(13): 1767~1771
- Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guoming *et al.*. Laser transmission welding polypropylene plastics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 466~471  
王 霄, 张惠中, 丁国明 等. 聚丙烯塑料激光透射焊接工艺[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 466~471
- Li Pin, Liu Huixia, Xu Zhenkai *et al.*. Laser transmission joining process of PET films and titanium[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1914~1920  
李 品, 刘会霞, 许振凯 等. 医用 PET 薄膜与薄钛板激光透射连接工艺研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1914~1920
- K. Y. Benyounis, A. G. Olabi. Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches-a reference guide[J]. *Advances in Engineering Software*, 2008, **39**(6): 483~496

- 5 P. Sathiya, M. Y. Abdul, D. Katherasan *et al.*. Optimization of laser butt welding parameters based on the orthogonal array with fuzzy logic and desirability approach[J]. *Struct Multidisc Optim*, 2011, **44**(4): 499~515
- 6 A. Bappa, M. Dipten, B. Dipankar *et al.*. Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, **41**(8): 956~967
- 7 A. Bappa, M. Subrata, T. Bipan *et al.*. Application of artificial neural network for predicting weld quality in laser transmission welding of thermoplastics[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, **11**(2): 2548~2555
- 8 K. Y. Benyounis, A. G. Olabi, M. S. J. Hashmi. Multi-response optimization of CO<sub>2</sub> laser-welding process of austenitic stainless steel [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**: 76~87
- 9 S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian. Predicting tensile strength, hardness and corrosion rate of friction stir welded AA6061-T<sub>6</sub> aluminium alloy joints[J]. *Materials and Design*, 2011, **32**(5): 2878~2890
- 10 S. Taslema, N. Golam, L. Grigor *et al.*. A study of titanium thin films in transmission laser micro-joining of titanium-coated glass to polyimide[J]. *Thin Solid Films*, 2010, **518**(10): 2632~2636
- 11 D. C. Montgomery. Design and Analysis of Experiments[M]. Fu Juesheng, Zhang Jian, Wang Zhenyu Transl.. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2009. 347~398  
蒙哥马利. 实验设计与分析[M]. 傅珏生, 张健, 王振羽等译. 北京: 人民邮电出版社, 2009. 347~398
- 12 Zhou Ming, Sun Shudong. Genetic Algorithms: Theory and Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 32~64  
周明, 孙树栋. 遗传算法原理和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 32~64
- 13 M. D. Kiran, A. S. Shrikant, S. Parag *et al.*. Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in fermentation media optimization: Case study of fermentative production of scleroglucan[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2008, **41**(3): 266~273
- 14 K. Deb. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms[M]. Singapore: Wiley Ltd, 2003
- 15 K. Seiji, K. Yousuke. Laser direct joining of metal and plastic [J]. *Scripta Materialia*, 2008, **59**(12): 1247~1250

栏目编辑:宋梅梅