

基于响应面分析的T型接头激光深熔焊焊缝形貌预测及工艺参数优化

褚振涛 于治水 张培磊* 卢庆华 李绍伟 马 凯

上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620

摘要 为了预测激光深熔焊T型接头的焊缝形貌并优化工艺参数,基于响应面分析的方法,建立了激光深熔焊工艺参数与焊缝形貌特征参数之间的数学模型,进行了方差分析、模型验证。基于所建模型,研究了工艺参数对焊缝形貌的影响规律,并对工艺参数进行了优化,从而实现了焊缝形貌的预测。结果表明,所建立模型能够准确预测焊缝形貌,预测值与实验值误差很小,经优化的工艺参数既满足焊缝形貌要求也可降低热输入约27%。

关键词 激光技术; 激光深熔焊; T型接头; 焊缝形貌预测; 参数优化; 响应面分析

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0203006

Weld Profile Prediction and Process Parameters Optimization of T-joints of Laser Full Penetration Welding via Response Surface Methodology

Chu Zhentao Yu Zhishui Zhang Peilei Lu Qinghua Li Shaowei Ma Kai

School of Material Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract In order to predict weld profile of T-joints and optimize the process parameters of the laser full penetration welding, the statistical models between parameters and the weld bead geometry of T-joints are established using response surface methodology. Then the analysis of variance is checked and these mathematical models are validated. Based on this model, effects of different process parameters on the weld profile are investigated, the process parameters are optimized, and the weld profile is predicted. The results indicate that the proposed models predict the responses adequately and the predicted values are consistent with experimental results. The optimum welding conditions are found that it can reduce the heat input about 27%.

Key words laser technique; laser full penetration welding; T-joints; weld profile prediction; process parameters optimization; response surface methodology

OCIS codes 140.3390; 140.3150; 160.3900

1 引言

三明治结构夹芯板结合了激光焊接技术(深宽比大,变形小,易于实现自动化)和三明治结构(高比强度、高比刚度)的优点^[1-2],在船舶轻量化过程中具有广阔的应用前景。T型接头为三明治结构的主要接头形式,由于结构的特殊性及其制造效率的要求,焊缝为深熔焊形式,即激光能量穿透面板、穿入芯板,形成焊缝,实现连接^[3]。所以,焊缝熔深、面板与芯板结合区焊缝的宽度等形貌特征对T型接头性能具有重要影响,可以通过优化焊缝形貌来优化激光深熔焊工艺。预测焊缝形貌,对于激光深熔焊数值模拟同样具有指导意义。对于

收稿日期: 2014-08-22; 收到修改稿日期: 2014-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(51375294)、上海市教委创新重点项目(12ZZ186)、上海市自然科学基金(12ZR1444500)

作者简介: 褚振涛(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光焊接工艺及数值模拟方面的研究。E-mail: czt_jghj@163.com

导师简介: 于治水(1960—),男,博士,教授,主要从事钎焊及激光焊接方面的研究。E-mail: yu_zhishui@163.com

* 通信联系人。E-mail: peilei@sues.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

激光深熔焊热-耦合分析来说,应用较多的是体积热源模型,然而体热源模型参数,特别是熔深,需要通过实验的方法确定^[4]。所以,建立焊缝形貌与焊接参数之间的数学模型,预测焊缝形貌,可以指导焊接热源参数的确定。

响应面分析(RSM)是参数优化问题的重要研究方法,Acherjee等^[5-7]引入响应面分析的方法,来研究激光透射焊的焊缝形貌及力学性能;姜敏凤等^[8-9]也基于响应面分析的方法对激光透射连接工艺进行了优化;Reisgen^[10]通过响应面分析的方法建立了激光焊接参数与响应值(热输入、焊缝形貌参数、加工成本)之间的统计模型;卢兵兵^[11]以焊缝金相尺寸作为优化指标,采用响应面法,对车用镀锌钢板激光搭接焊工艺参数进行了优化。Meng等^[12]通过高速摄影和X射线透射观测系统,研究了装配间隙对激光深熔焊T型接头性能的影响,讨论了间隙对形成气孔的影响。然而,关于T型接头激光深熔焊焊缝形貌预测的系统研究鲜有报道。

因此,通过Box-Behnken统计设计(BBD)设计实验,基于响应面分析,建立激光深熔焊工艺参数与焊缝形貌特征参数之间的数学模型,研究工艺参数对焊缝形貌的影响规律。第一,实现预测焊缝形貌的目的;第二,通过优化指标(熔深、面板与芯板结合区焊缝的宽度、热输入)优化工艺参数,从而对激光焊接三明治结构的生产工艺进行指导。

2 实验设计

2.1 实验方法

响应面分析是典型的实验设计方法,利用合理的实验设计方案,采用多元二次回归方程来拟合因子和响应值之间的函数关系,最后实现变量的优化和响应值的预测^[13]。假设有 k 个独立变量,所有独立变量均可测、可控、连续,则响应函数表示为^[14]

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} X_i X_j + \varepsilon, \quad (1)$$

式中 Y 为预测响应值, X_i 为考察因子, b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} 为回归系数, ε 为噪音或误差项。

期望方法可以简单、灵活地实现多响应值的优化^[12],把任意响应变量 Y_i 转化为取值范围在0~1之间的期望值 D_i, D_i 越大响应值越优。

通过三因素三水平BBD试验方法^[15]设计实验方案,激光功率 P 、焊接速度 V 、装配间隙 G 为激光深熔焊独立变量,实验水平编码如表1所示。熔深 W_p 、熔宽 W_w 、面板与芯板结合区焊缝的宽度 W_b 、热输入 H_1 为响应值,实验设计矩阵和实验结果如表2所示。其中成本指标为热输入 H_1 ,其计算方法为^[11]

$$H_1(\text{kJ/mm}) = \frac{P(\text{kW})}{V(\text{mm/s})}. \quad (2)$$

表1 BBD实验因素和水平设计

Table 1 Independent variable and experimental design levels used

Variable	Code		
	Low (-1)	Medium (0)	High (+1)
Laser power P /kW	3	3.75	4.5
Welding speed V /mm/s	20	25	30
Assembly gap G /mm	0	0.1	0.2

2.2 激光焊接过程及焊缝几何

实验材料为304不锈钢,焊接系统如图1(a)所示,采用IPG YLS-5000型光纤激光器、KUKA KR60 HA六轴机器人,实验参数如表2,离焦量固定为-3 mm,保护气体为纯氩,流量为20 L/min。装配间隙由塞尺控制,如图1(b)所示。

图2(a)为三明治夹芯板,图2(b)为激光深熔焊焊缝横截面示意图。 t 表示面板和芯板的厚度,间隙 G 控制在0~0.2 mm,间隙若大于0.2 mm,虽然有可能增大熔深,但会造成下塌缺陷。为保证接头性能, W_p 应大于 $1.5t$,面板与芯板结合区焊缝宽度 W_b 应大于 $1/3t$ 。

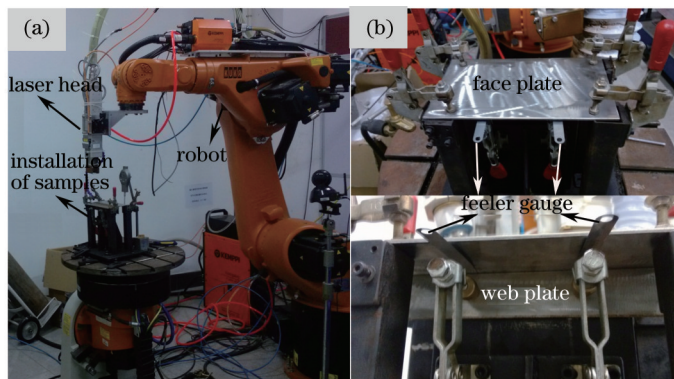


图1 实验系统及装配间隙控制

Fig.1 Laser welding setup and clamping arrangement

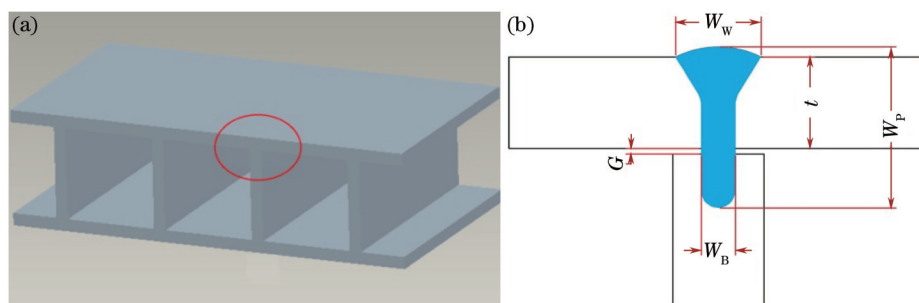


图2 (a) 三明治夹芯板; (b) 激光深熔焊缝横截面示意图

Fig.2 (a) Web-core steel sandwich structure; (b) weld bead geometry of T-joints

表2 实验设计矩阵和实验结果

Table 2 Design matrix and experimental measured responses

Std	Run	Value			Weld profile geometry			Cost
		P /kW	V /(mm/s)	G /mm	W_p /mm	W_w /mm	W_b /mm	H_1 /(kJ/mm)
1	17	3.00	20.00	0.10	4.505	2.517	1.08	0.15
2	14	4.50	20.00	0.10	5.636	2.707	1.25	0.225
3	10	3.00	30.00	0.10	3.952	2.04	0.851	0.1
4	16	4.50	30.00	0.10	5.56	2.986	1.36	0.15
5	6	3.00	25.00	0.00	4.067	2.529	0.985	0.12
6	3	4.50	25.00	0.00	5.35	2.701	1.02	0.18
7	11	3.00	25.00	0.20	4.092	2.243	0.851	0.12
8	8	4.50	25.00	0.20	5.573	3.304	1.3	0.16
9	2	3.75	20.00	0.00	4.963	2.961	1.125	0.1875
10	12	3.75	30.00	0.00	4.67	2.262	1.118	0.125
11	7	3.75	20.00	0.20	5.166	3.12	1.214	0.1875
12	5	3.75	30.00	0.20	4.416	2.275	0.972	0.125
13	13	3.75	25.00	0.10	4.823	2.382	1.156	0.15
14	15	3.75	25.00	0.10	4.829	2.542	1.429	0.15
15	9	3.75	25.00	0.10	4.778	2.599	1.303	0.15
16	4	3.75	25.00	0.10	4.823	2.383	1.156	0.15
17	1	3.75	25.00	0.10	4.855	2.357	1.277	0.15

3 数学模型

3.1 方差分析

W_p 采用2FI模型,方差分析(ANOVA)如表3所示,模型 F 值为103.41,表明模型显著,其由于噪音产生错误的几率小于0.01%("Prob> F "的值小于0.05,意味着模型显著)。测量值方差 $R^2=0.9792$ 接近1(R^2 越接近1,

越显著),信噪比(A_p)为33.308远大于4(大于4,模型满意)。预测拟合系数 $R^2_{Pred}=0.9157$ 与修正拟合系数 $R^2_{Adj}=0.9697$ 基本吻合(两个值越接近,模型越显著)。以上分析说明回归模型可以很好地模拟真实的曲面,模型拟合很好。由表3可知,激光功率 P ,焊接速度 V ,对熔深的影响显著;最终的数学模型为

$$W_p = 4.81794 + 0.12217P - 0.1382V + 0.0318PV - 0.2285VG. \quad (3)$$

W_w 采用立方模型,方差分析如表4所示, F 值检验, R^2 检验,信噪比检验,均表明模型显著。激光功率 P ,焊接速度 V ,对熔宽影响最为显著;其最终的回归模型为

$$W_w = -31.28518 + 20.24955P + 1.4163V - 13.87467G - 0.84693PV + 2.96333PG - 2.85481P^2 + 6.86711G^2 + 0.11964P^2V \quad (4)$$

W_B 采用平方模型,方差分析如表5所示。模型的分析方法与熔深、熔宽分析方法相同,结果表明模型显著。对模型影响最显著的项为激光功率 P 和装配间隙的平方项 G^2 ,最终的数学模型为

$$W_B = 0.45279 + 0.8268P - 0.0822V + 0.0226PV + 1.38PG - 0.1175VG - 0.17813P^2 - 12.81974G^2. \quad (5)$$

表3 熔深模型方差分析

Table 3 ANOVA for weld penetration reduced 2FI model

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F value	Prob>F
Model	4.25	5	0.85	103.41	<0.0001
A-P	3.79	1	3.79	460.68	<0.0001
B-V	0.35	1	0.35	42.53	<0.0001
AB	0.057	1	0.057	6.92	0.0234
BC	0.052	1	0.052	6.35	0.0284
Residual	0.090	11	8.217×10 ⁻³		
Lack of fit	0.087	7	0.012	16.22	0.0086
Pure error	3.075×10 ⁻³	4	7.688×10 ⁻³		
Cor total	4.34	16			

$R^2=0.9792$, $R^2_{Adj}=0.9697$, $R^2_{Pred}=0.9157$, $A_p=33.308$

表4 熔宽模型方差分析

Table 4 ANOVA for weld width reduced cubic model

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F value	Prob>F
Model	1.83	8	0.23	29.17	< 0.0001
A-P	0.70	1	0.70	89.50	< 0.0001
B-V	0.60	1	0.60	76.03	< 0.0001
C-G	0.030	1	0.030	3.81	0.0866
AB	0.14	1	0.14	18.23	0.0027
AC	0.20	1	0.20	25.21	0.0010
C^2	0.12	1	0.12	15.32	0.0045
A^2B	0.23	1	0.23	28.89	0.0007
Residual	0.063	8	7.838×10 ⁻³		
Lack of fit	0.014	4	3.578×10 ⁻³	0.30	0.8675
Pure error	0.048	4	0.012		
Cor total	1.89	16			

$R^2=0.9669$, $R^2_{Adj}=0.9337$, $R^2_{Pred}=0.8957$, $A_p=19.914$

表5 结合区焊缝宽度模型方差分析

Table 5 ANOVA for weld binding region width reduced quadratic model

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F value	Prob>F
Model	0.39	8	0.049	5.73	0.0117
A-P	0.17	1	0.17	19.85	0.0021
B-V	0.017	1	0.017	1.99	0.1963
AB	0.029	1	0.029	3.37	0.1036
AC	0.043	1	0.043	5.03	0.0552
BC	0.014	1	0.014	1.62	0.2387
A ²	0.042	1	0.042	4.98	0.0562
C ²	0.069	1	0.069	8.15	0.0213
Residual	0.068	8	8.517×10 ⁻³		
Lack of fit	0.016	4	3.974×10 ⁻³	0.30	0.8621
Pure error	0.052	4	0.013		
Cor total	0.46	16			

$R^2 = 0.8514$, $R^2_{pred} = 0.7029$, $R^2_{pred} = 0.5072$, $A_p = 8.192$

3.2 模型验证

图3(a)~(c)分别为熔深、熔宽、结合区焊缝宽度的实际值与预测值的关系图。残差沿对角线呈直线分布,表明实际值与预测值非常接近、误差很小,所建模型合适。

为了进一步验证模型的适用性,另外选取3组参数,设计验证实验,在相同的实验条件下,对实验结果与模型预测值进行误差分析,如表6所示。验证结果表明,预测值和实际值之间存在一定的误差,但误差较小,在允许的范围,所建模型及分析过程正确,可用于焊缝形貌预测及进一步优化工艺参数。

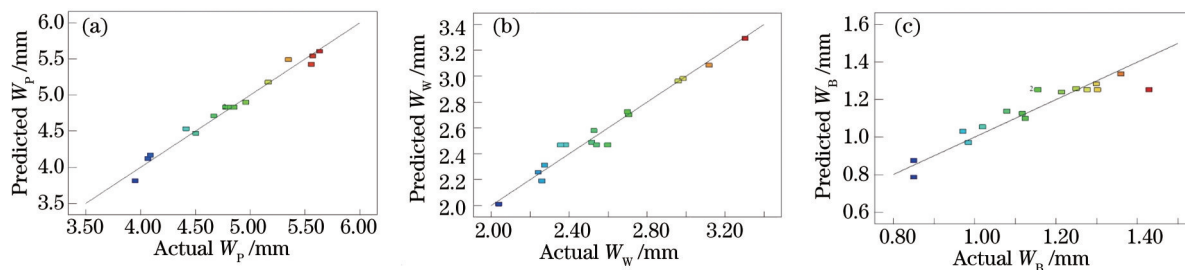


图3 实际值与预测值的关系图。(a) 熔深;(b) 熔宽;(c) 结合区焊缝宽度

Fig.3 Relationship between experimental and predicted values. (a) Weld penetration; (b) weld width and (c) weld binding region width

表6 验证实验结果

Table 6 Confirmation experiments of the W_p , W_w and W_b responses

Exp No.	P /kW	V /(mm/s)	G /mm	W_p /mm		Error /%	W_w /mm		Error /%	W_b /mm		Error %
				Act.	Pred.		Act.	Pred.		Act.	Pred.	
1	4	25	0	5.09	5.03	1.19	2.62	2.61	0.38	1.13	1.11	1.77
2	3.5	20	0.1	4.38	4.25	2.96	2.74	2.79	1.79	1.19	1.22	2.46
3	4.5	30	0.11	4.93	4.76	3.44	3.05	3.01	1.31	1.19	1.29	7.75

4 激光深熔焊参数对焊缝形貌的影响

4.1 焊接参数对熔深的影响

图4为各因素交互作用对熔深的影响,可以看出,激光功率对熔深的影响最为显著,其次是焊接速度,熔深随激光功率的增加而增加,随焊接速度的增加而减小,然而仅增大装配间隙对熔深的影响很小。图5为装配间隙等于0.1 mm时,激光功率和焊接速度对熔深的交互影响,图5(a)为等值线图,图5(b)为响应曲面图。由等值线可以看出,不同的参数组合可以达到相同的熔深,可以根据等值线区域优化参数组合。当激光功率大于3.75 kW时,熔深普遍大于4.6 mm;由响应曲面可以看出,激光功率和焊接速度对熔深的影响规律。

图6为激光功率为3.75 kW时,焊接速度和装配间隙对熔深的交互影响,由图可知,当速度在20~24 mm/s时,增大装配间隙有助于增大熔深。

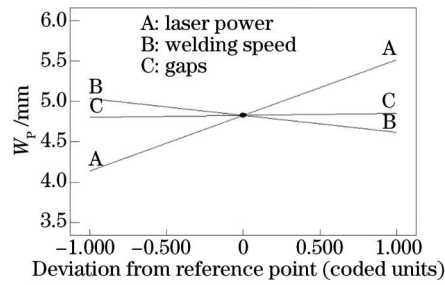


图4 各因素交互作用对熔深的影响

Fig.4 Perturbation plot showing the effect of all factors on weld penetration

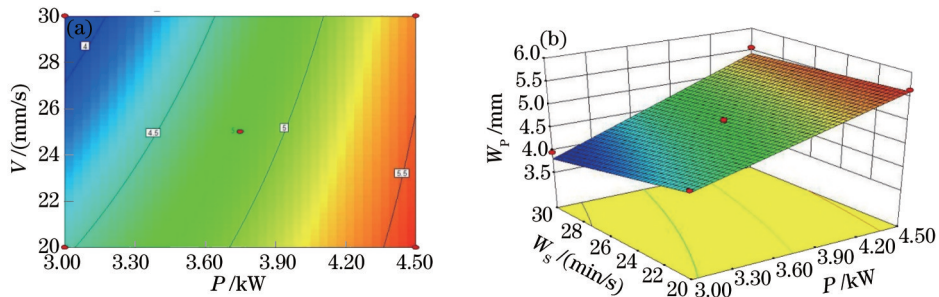


图5 激光功率和焊接速度对熔深的影响。(a) 等值线图;(b) 响应曲面图

Fig.5 Effect of laser power and welding speed on weld penetration. (a) Contour graph; (b) 3D graph

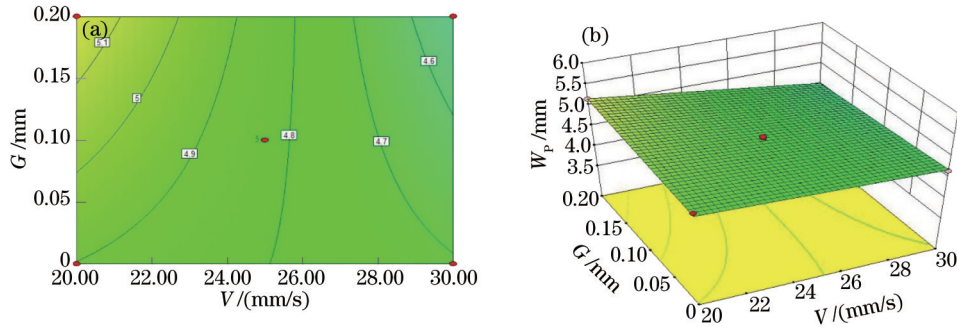


图6 焊接速度和装配间隙对熔深的影响。(a) 等值线图;(b) 响应曲面图

Fig.6 Effect of welding speed and assembly gap on weld penetration. (a) Contour graph; (b) 3D graph

4.2 焊接参数对熔宽的影响

图7反映各因素交互作用对熔宽的影响,如图所示,焊接速度对熔宽影响最显著,其次是激光功率。随着速度增大,熔宽明显减小;随着功率增大,熔宽增大;仅增大装配间隙,熔宽变化不显著,当间隙较小或较大时有助于增大熔宽。图8为装配间隙为0.1 mm时,激光功率和焊接速度对熔宽的交互影响,由等值线

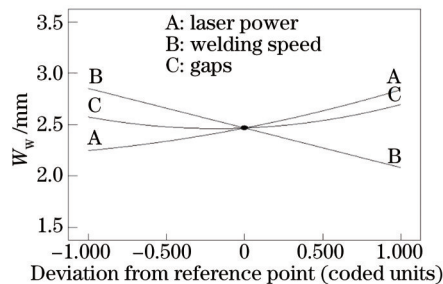


图7 各因素交互作用对熔宽的影响

Fig.7 Perturbation plot showing the effect of all factors on weld width

图可知,值为2.4的等值线右侧的参数组合均可获得较大熔宽。图9为焊接速度为25 mm/s时,激光功率和装配间隙对熔宽的影响,由图可以看出,当功率处于较高水平时,间隙增大,有助于增大熔宽。

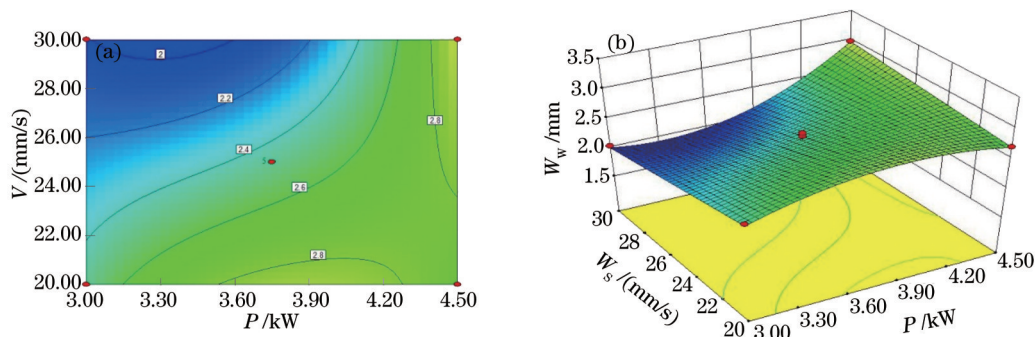


图8 激光功率和焊接速度对熔宽的影响。(a)等值线图;(b)响应曲面

Fig.8 Effect of laser power and welding speed on weld width. (a) Contour graph; (b) 3D graph

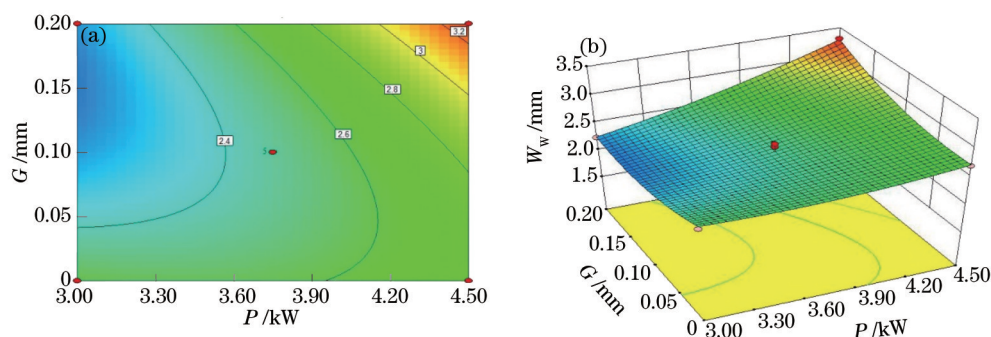


图9 激光功率和装配间隙对熔宽的影响。(a)等值线图;(b)响应曲面

Fig.9 Effect of laser power and assembly gap on weld width. (a) Contour graph; (b) 3D graph

4.3 焊接参数对结合区焊缝宽度的影响

图10反映各因素交互作用对结合区焊缝宽度的影响,由图可知,三因素对其都有影响,相对而言,激光功率影响最为显著,随着功率增大,结合区焊缝宽度增大。图11为焊接速度为25 mm/s时,激光功率和装配间隙对结合区焊缝宽度的影响,由图可知,值为1.2的等值线所圈区域(黄色区域)的参数组合可获得较大的焊缝结合区宽度。由图10中C曲线和图11等值线的对比可以明显看出,装配间隙取中间值时,有助于增大结合区焊缝宽度。

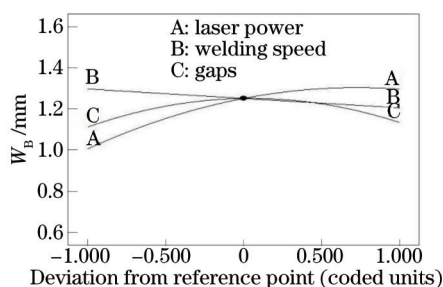


图10 各因素交互作用对结合区焊缝宽度的影响

Fig.10 Perturbation plot showing the effect of all factors on weld binding region width

5 参数优化

为保证焊接质量同时节约成本,除了以焊缝形貌为优化指标外,还要尽量减小能耗,以焊接热输入为能耗指标,使热输入趋向于最小,从而实现节约成本的目的。即优化目标为: $W_p > 1.5t$, $W_w > 0.8t$, $W_b > 1/3t$, $H_f \rightarrow \min(t=2.8 \text{ mm})$ 。

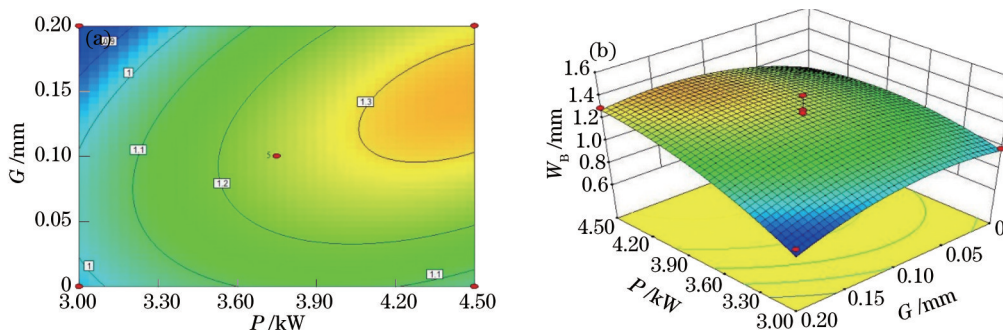


图 11 激光功率和装配间隙对结合区焊缝宽度的影响。(a) 等值线图; (b) 响应曲面

Fig.11 Effect of laser power and assembly gap on weld binding region width. (a) Contour graph; (b) 3D graph

优化准则如表 7 所示, 部分优化结果如表 8 所示, 在满足优化焊缝形貌的基础上, 热输入控制在 0.15 kJ/mm, 未优化前热输入为 0.18 kJ/mm, 经优化可以有效地节约加工成本的 27% 左右。

表 7 优化准则和权重

Table 7 Optimization criteria and importance

Name	Goal	Criteria		Importance
		Lower	Upper	
Laser power	In range	3.5	4.5	
Welding speed	In range	20	30	
Assembly gap	In range	0	0.1	
Weld penetration	Maximize	4.2	5.36	5
Weld width	In range	2.24	3.2	3
Weld binding region width	Maximize	1.12	1.2	5
Cost	Minimize	0.15	0.225	5

表 8 优化结果

Table 8 Optimal solution

Number	P	V	G	W_p	W_w	W_b	Cost	Desirability
1	4.42	29.7	0.06	5.37	2.77	1.29	0.149	1.00
2	4.50	30.0	0.10	5.43	2.98	1.34	0.150	1.00
3	4.47	29.2	0.15	5.40	3.09	1.33	0.153	1.00
4	4.37	27.2	0.20	5.36	3.19	1.25	0.161	1.00

6 结 论

1) 基于响应面分析建立了激光深熔焊参数与熔深 W_p 、熔宽 W_w 、面板与芯板结合区焊缝的宽度 W_b 之间的数学模型。经方差分析、模型验证, 证明所建模型可用于焊缝形貌预测及工艺参数优化。

2) 对于熔深, 激光功率影响最显著且为正相关, 其次是焊接速度且为负相关, 装配间隙单独变化对熔深影响不显著, 然而装配间隙和焊接速度的交互作用对熔深有影响; 对于熔宽、焊接速度影响最显著且为负相关, 其次是激光功率且为正相关, 装配间隙和激光功率的交互作用对熔宽影响显著; 对于结合区焊缝宽度, 三因素对其都有影响, 激光功率和装配间隙的影响较显著。

3) 通过焊缝形貌和热输入两项指标, 对工艺参数进行了优化, 得到了优化结果, 经优化可以有效地降低热输入 27% 左右。

参 考 文 献

1 Romanoff J, Remes H, Jutila M, *et al.*. The stiffness of laser stake welded T-joints in web-core sandwich structures[J]. Thin-Walled Struct 2007, 45(4): 453 - 462.

2 Jeffrey D Poirier, Senthil S Vel. Multi-objective optimization of laser-welded steel sandwich panels for static loads using a genetic

- algorithm[J]. Engineering Structures, 2013, 49: 508-524.
- 3 J Jelovica, J Romanoff, S Ehlers. Influence of weld stiffness on buckling strength of laser-welded web-core sandwich plates[J]. Journal of Constructional Steel Research 2012, 77: 12-18.
- 4 Xu Guoxiang. Numerical Simulation of Weld Formation in Laser+GMAW-Phybrid Welding[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
胥国祥. 激光+GMAW 复合热源焊缝成形的数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- 5 Acherjee B, Misra D, Bose D, *et al.*. Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 4(8): 956-967.
- 6 Xiao Wang, Cheng Zhang, Kai Wang. Multi-objective optimization of laser transmission joining of thermoplastics[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(8): 2393-2402.
- 7 Bappa Acherjee, Arunanshu S Kuar, Souren Mitra. Experimental investigation on laser transmission welding of PMMA to ABS via response surface modeling[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(5): 1372 - 1383.
- 8 Jiang Minfeng, Xu Zhenkai, Liu Huixia, *et al.*. Optimization of laser transmission joining process parameters for thermoplastic using response surface methodology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(7): 071408.
姜敏凤, 许贞凯, 刘会霞. 基于响应曲面法的激光透射连接聚合物工艺参数优化[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7): 071408.
- 9 Xue Guochun, Liu Huixia, Li Pin, *et al.*. Process study on laser transmission bonding of silicon with glass via response surface methodology[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303004.
薛国春, 刘会霞, 李 品, 等. 基于响应曲面法的激光透射连接硅与玻璃的工艺研究[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303004.
- 10 U Reisgen. Statistical modeling of laser welding of DP/TRIP steel sheets[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 92-101.
- 11 Lu Bingbing. Analysis and optimization for auto roof to body-side laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1375-1379.
卢兵兵. 白车身车顶侧围激光焊接工艺参数分析与优化[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1375-1379.
- 12 Wei Meng, Zhuguo Li, Fenggui Lu. Porosity formation mechanism and its prevention in laser lap welding for T-joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(8): 1658-1664.
- 13 A Ruggiero. Weld-bead profile and costs optimisation of the CO₂ dissimilar laser welding process of low carbon steel and austenitic steel AISI316[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1): 82-90.
- 14 A G Olabi. Optimizing the CO₂ laser welding process for dissimilar materials[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(7): 832-839.
- 15 Benyounis K Y, Olabi A G, Hashmi M S J. Effect of laser-welding parameters on the heat input and weld-bead profile[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164-165: 978-985.

栏目编辑: 张 雁