

基于 RSM 的铝/钢异种金属激光 熔钎焊工艺研究与参数优化

周建忠 余杰 黄舒 孟宪凯

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 采用铝硅焊丝(ER4043)对 6061 铝合金和 SUS304 不锈钢试样进行激光填丝熔钎焊, 焊接接头采用对接方式。使用响应曲面法建立了焊接工艺参数与抗拉强度的数学模型。然后使用抗拉强度作为优化目标, 采用数值优化方法确定了焊接最佳工艺参数, 并使用优化后的工艺参数进行焊接试验。结果表明, 基于响应曲面法建立的数学模型具有较好的准确性, 各焊接参数对抗拉强度的交互作用明显, 使用优化后的工艺参数焊接获得的最大抗拉强度可达 180 MPa, 金属间化合物厚度约为 2.85 μm 。

关键词 激光技术; 铝/钢异种金属; 激光填丝; 熔钎焊; 响应曲面法; 工艺参数优化

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.s103004

Research of Aluminum/Steel Dissimilar Metal Laser Welding-Brazing and Parameter Optimization Based on RSM

Zhou Jianzhong She Jie Huang Shu Meng Xiankai

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

Abstract Dissimilar metal butt joints of 1 mm thickness 6061 aluminum alloy and 1 mm 304 stainless steel are welded with filler material by fiber laser welding-brazing method. The mathematical model of relationships between welding parameters and tensile strength is established based on the response surface methodology. Effects of different parameters on the tensile strength are discussed. Afterwards, the tensile strength is used as an optimization goal and the optimum welding parameters are determined with the aid of the numerical optimization method. In order to test the suitability of the mathematical model, the optimized process parameters are used to carry out the welding experiment. The interaction effects of welding parameters on the tensile strength is significant. The results indicate that the maximum tensile strength of the welded joints can reach 180 MPa and the thickness of the intermetallic compounds is almost 2.85 μm .

Key words laser technique; aluminum/steel dissimilar metal; laser filler wire; welding-brazing; response surface methodology; optimization of process parameters

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引言

铝合金由于具有较高的比强度, 良好的机加工性能, 利于回收等优点, 在汽车、造船、航空航天等行业显示出了巨大的应用前景。因此在制造业中可以采用铝合金代替部分钢材。铝合金与钢材的高效连接已经成为先进制造工艺的一部分。

铝与钢的熔点相差很大, 热导率相差 2~13 倍, 线性膨胀系数相差 1.4~2 倍。如此大的物理性能差异,

收稿日期: 2015-01-04; **收到修改稿日期:** 2015-02-10

基金项目: 江苏省科技支撑项目(工业)(BE2013097)、江苏大学高级人才启动基金(13JDG109)、江苏省自然科学基金(BK20141166)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金项目(GZ201305)

作者简介: 余杰(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: tristanaragorn@163.com

导师简介: 周建忠(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事先进激光制造技术、微塑成形理论与微加工技术方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

使得铝与钢很难进行直接焊接。此外,在焊接过程中,很容易产生 Fe-Al 脆性金属间化合物而使接头的力学性能下降。但从铝-铁合金相图的富铁侧来看,可以形成铝固溶于铁的固溶体。因此在焊接过程中保持铁为固态,使铝熔化较为合理。铁与铝在接触面上加热会形成多种金属间化合物:Fe₃Al、FeAl、Fe₂Al₅、FeAl₃。前两种低铝金属间化合物(IMC)具有相对较高的塑性和韧性,后两种高铝化合物则为高硬度的脆性相。因此减少高铝金属间化合物的形成以及控制金属间化合物的厚度,对保证焊接接头质量至关重要^[1]。Sierra 等^[2-3]发现将焊接过程的热输入控制在一定范围,或者控制焊接温度以及金属间化合物反应时间能够有效控制金属间化合物的厚度。Mai 等^[4-5]指出高的冷却速率对减小中间层相当有益,其中铜作为背冷块的效果最为明显。Su 等^[6]指出硅元素能抑制高铝金属间化合物 Fe₂Al₅ 的形成。激光熔钎焊利用两种母材熔点的差异和激光能量集中且利于控制的特点,通过激光加热使低熔点母材局部熔化,而高熔点母材基本维持固态,熔化的低熔点母材浸润高熔点母材界面并发生冶金反应从而实现材料的永久连接^[7]。

目前主要研究单因素对铝合金和不锈钢焊接接头性能的影响,缺乏各因素对焊接质量的交互影响分析,尚不能对工艺参数进行合理的优化。响应曲面法(RSM)^[12-15]是数理统计与计算机技术紧密联系发展的结果,它将受多个因素影响的问题进行建模分析并以此来优化响应。中心复合试验设计是用于拟合二阶响应曲面最常用的方法。利用中心复合设计编制试验方案,既能满足试验要求,大大减少试验次数,还能使二次设计在一次设计的基础上进行,充分利用一次设计所提供的信息。因此本试验使用中心复合试验设计方法进行激光熔钎焊试验,探讨了工艺参数对接头拉伸强度的影响,并对焊接参数进行优化,检测了优化后焊接接头金属间化合物的厚度。

2 试验设备及试验方法

2.1 试样准备与试验设备

采用的试验材料是 1 mm×50 mm×100 mm 的 6061 铝合金和 304 不锈钢,焊丝选用硅质量分数为 5%、直径为 1.2 mm 的铝硅焊丝(ER4043)^[10]。试验材料的化学组成如表 1 所示。钎剂选用质量分数为 65%的 KAlF₄ 和 35%的 K₃AlF₆ 的 Nocolor 钎剂^[11-16]。

表 1 母材和焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of substrates and filler wire(mass fraction,%)

material	composition of substrate								
6061Al	0.15~0.4Cu	0.4~0.8Si	0.7Fe	0.15Mn	0.8~1.2Mg	0.25Zn	0.04~0.35Cr	0.15Ti	remains Al
304	0.08C	2.00Mn	0.045P	0.030S	1.00Si	18~20Cr	8.0~10.5Ni		remains Fe
ER4043	5Si	0.10Mg	0.04Fe	0.05Cu					remains Al

试验采用 IPG 公司生产的 YLS-2000 型掺镱激光器,最大激光功率为 2000 W,激光波长 1070 nm,最小光斑直径 0.4 mm。

2.2 试验方法

试验之前,将铝合金和不锈钢裁剪成规格为 100mm×50mm 的长方形试样,在钢板一侧开 45°的坡口后^[8],使用砂纸打磨不锈钢和铝合金的待焊部位,以去除表面的氧化膜,最后使用乙醇和丙酮清洗试样表面,去除试样表面的油污后烘干待焊。焊接过程中采用对接形式,使用氩气对焊缝表面进行保护。焊接过程的试验原理图如图 1 所示。

焊接结束后,将焊接后的试样切割成拉伸试样、利用万能试验机进行拉伸测试,拉伸速度为 1 mm/min^[9]。随后以抗拉强度作为响应值,使用响应曲面法对焊接工艺进行建模和优化。最后利用优化后的工艺参数进行焊接试验,将焊接得到的接头切割、打磨、抛光等一系列处理后,使用 Keller 试剂进行腐蚀,然后使用光镜观察焊接接头的组织形貌以及金属间化合物的厚度,测试接头的抗拉强度以验证数学模型预测是否准确。

试验采用 3 因素 5 水平旋转中心复合试验设计(CCD)来设计。试验研究的主要工艺参数为激光功率、焊接速度和离焦量。首先,在单因素试验的基础上确定各独立因素的工艺参数范围。然后按照 CCD 试验设

设计的工艺参数矩阵分别进行试验,最后使用 RSM 处理试验数据以获得响应的回归方程。表 2 给出了连接强度的 CCD 试验设计参数的实际值和对应的编码值,以及连接强度的试验设计矩阵和对应的测量结果。

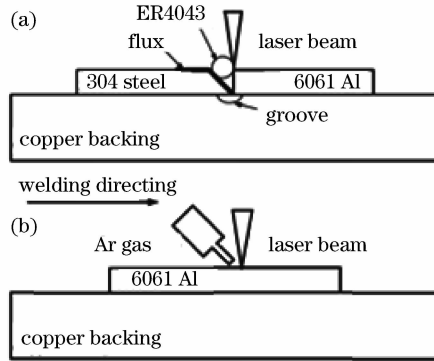


图 1 试验过程原理图。(a)正视图;(b)侧视图

Fig. 1 Schematic illustrations of the setup and specimen preparation. (a) Frontal view; (b) side view

表 2 试验设计数据与结果

Table 2 Design matrix and measured experimental responses

No.	Run	Power/kW	Velocity/(mm/min)	Defocus/mm	Tensile strength/MPa
1	5	1790	843.24	-6	121.90
2	15	1909	843.24	-6	40.77
3	18	1790	1556.76	-6	43.65
4	4	1909	1556.76	-6	66.76
5	8	1790	843.24	0	115.88
6	3	1909	843.24	0	46.00
7	13	1790	1556.76	0	126.61
8	17	1909	1556.76	0	71.77
9	12	1750	1200	-3	46.40
10	19	1950	1200	-3	112.37
11	10	1850	900	-3	33.16
12	11	1850	1500	-3	99.80
13	20	1850	1200	-8.05	122.66
14	9	1850	1200	2.05	90.04
15	7	1850	1200	-3	143.44
16	16	1850	1200	-3	140.10
17	1	1850	1200	-3	133.35
18	2	1850	1200	-3	139.66
19	6	1850	1200	-3	140.33
20	14	1850	1200	-3	122.68

模型是否合适可以通过方差分析来检查。方差分析主要包括 F 检验、 P 检验、决定系数 R^2 检验。其中 F 检验是方差齐性检验,用来检验样本的方差是否有显著性差异, P 检验反映的是某一事件发生的可能性大小。统计学根据显著性检验方法所得到的 P 值,一般以 $P < 0.05$ 为显著, $P < 0.01$ 为非常显著,其含义是由抽样误差所致的样本的不同的概率小于 0.05 或 0.01。上述这些检验方法给出了 RSM 模型的适合性。此外,决定系数 R^2 是试验数据和试验数据所拟合出的直线之间的相关系数。 R^2 值通常介于 0~1 之间, R^2 越接近 1,说明试验数据拟合出的直线与真实试验数据之间的偏差越小。理论上完美的统计模型的决定系数 R^2 的值应当是 1。 R^2 的值越接近 1,表明得到的模型越准确。

3 试验结果及分析

3.1 焊接工艺数学模型与分析

试验采用抗拉强度作为优化目标。响应值是激光功率、焊接速度和离焦量的函数。采用三阶多项式来

近似地表示输入变量和 RSM 响应值之间的真实关系。三阶回归模型采用以下形式：

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^3 \sum_{i=1}^3 a_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j}^3 \sum_{i=1}^3 b_{ij} x_i x_j^2, \quad (1)$$

式中 y 为响应值, a_0 为 $f(0,0,0,0)$ 的响应值, 即中心点的响应值。 a_i 为线性系数, a_{ii} 为交互项系数, a_{ij} 为二次项系数, b_{ij} 为三次项系数。响应值的大小通过拉伸试验测量得到, 各种工艺参数组合所对应的响应结果列于表 2 中。对表 2 中的试验数据进行多元计算拟合后, 得到的抗拉强度 T 与工艺参数之间的二阶多项式模型表达式如下：

$$T = -25470.37307 + 36.18982 \cdot x_1 + 28.38201 \cdot x_2 + 13837.68369 \cdot x_3 - 0.044538 \cdot x_1 \cdot x_2 - 14.94918 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0.010357 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.012141 \cdot x_1^2 + 0.010245 \cdot x_2^2 - 1.74449 \cdot x_3^2 + 1.58660 \times 10^{-5} \cdot x_1^2 \cdot x_2 + 4.02770 \times 10^{-3} \cdot x_1^2 \cdot x_3 - 5.60982 \times 10^{-6} \cdot x_1 \cdot x_2^2, \quad (2)$$

式中 x_1 为激光功率, x_2 为焊接速度, x_3 为离焦量。图 2 为激光熔钎焊接工艺参数对焊接强度的影响摄动图。从图中可以看出, 焊接强度随着激光功率和焊接速度的增大呈现先增大后减小的趋势, 随着离焦量减小呈现增大的趋势。这时之间的分子扩散比较少, 甚至焊接未能完全焊透导致接头力学性能比较低。当功率增加或者焊接速度减小时, 输入能量增加, 焊接区域材料充分融合, 从而增加了接头强度。当激光功率进一步增加或者焊接速度进一步减小时, 热输入量过高导致铝与铁界面之间的脆性金属间化合物含量增多, 从而导致力学性能降低。随着离焦量的降低, 熔池体积也有相应的差异。在相同热输入量的作用下, 离焦量越小, 熔池也就越小, 较小的熔池升温较快, 从而获得理想的焊接质量。

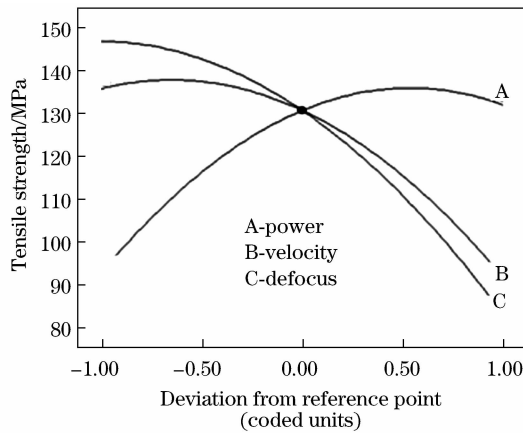


图 2 激光熔钎焊接工艺参数对焊接强度的影响

Fig. 2 Effects of the laser brazing-fusion welding parameters on the tensile strength

图 3(a)~(c) 分别给出了离焦量为 -3 mm 时, 激光功率和焊接速度对焊接强度的交互影响; 焊接速度为 1200 mm/min 时, 激光功率和离焦量对焊接强度的交互式影响; 激光功率为 1850 W 时, 焊接速度和离焦量对焊接强度的交互式影响。从图中可以看出, 当激光功率在 $1800 \sim 1840 \text{ W}$ 之间, 焊接速度在 $843 \sim 1200 \text{ mm/min}$ 之间, 离焦量在 -6 mm 左右时, 能够获得较好的抗拉强度。

3.2 连接工艺数学模型的验证

对模型方程进行方差分析和显著性检验后的结果如表 3 所示。其中 D_i 、 F value 和 P value 分别表示各变量的自由度和各变量实际的 F 值及 P 值。从表中可以看出, 离焦量和激光功率平方的乘积对响应的影响最大, 其次是激光功率和速度平方的乘积、激光功率的平方以及离焦量的平方, 各因子之间的交互作用明显。在试验设计范围内, 模型的 P 值为 0.0033 , 小于 0.05 , 模型的决定系数 R^2 为 0.9412 。用最大预测响应与最小预测响应的差除以所有预测响应的标准差, 信噪比 (Adeq Precision) 统计量的值为 8.412 , 其值大于 4 , 表明该模型在预测方面有相当好的预测性能。

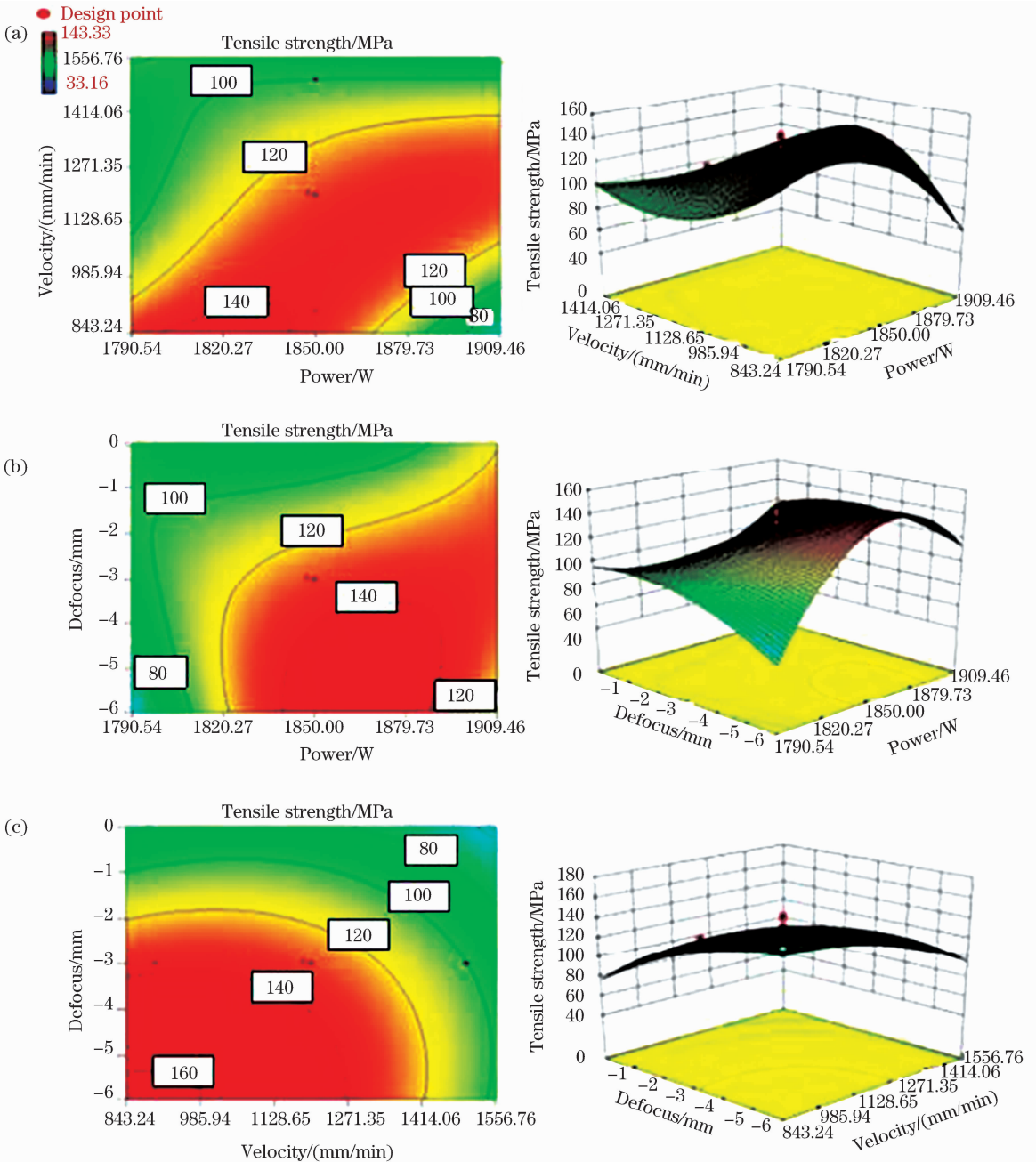


图3 工艺参数对焊接强度的交错影响

Fig. 3 Staggered effects of process parameters on the tensile strength

对抗拉强度模型的合适性检查结果的残差分布图如图4所示,可以看出残差的数据分布情况近似于对角线,标准化后的残差值介于-2~2之间,可以认为模型的误差分布服从正态分布。图5给出了抗拉强度的预测值与试验所测得的真实值之间的关系,可以看出部分真实值准确落在了预测值上,部分真实值对称分布在预测值的两侧,这说明了分析拟合后得到的回归模型能准确的预测试验的真实情况。

3.3 工艺参数优化

基于上述的三阶多项式数学模型,可以通过RSM方法进一步实现焊接过程的工艺参数优化,以提高焊缝的焊接质量。使用数值优化方法寻找设计空间,使用回归模型优化试验设计中的焊接强度。上述讨论已经得到了焊接参数的大致范围,即激光功率1790.54~1909.46 W,焊接速度为843.24~1556.76 mm/min,离焦量为-6 mm左右。以表4中给出的范围为优化准则,对回归模型进行数值优化。表5中给出了详细的最优焊接工艺参数和相应的响应值。根据表中给出的结果,在优化后的工艺条件下,其预测的理想焊接强

度为 166.849 MPa。

表 3 模型的方差分析
Table 3 ANOVA analysis for the model

Source	Sum of squares	D_f	Mean square	F value	P -value Prob> F			
Model	27993.84	12	2332.82	9.34	0.0033	Significant		
A-power	2176.02	1	2176.02	8.71	0.0213			
B-velocity	683.39	1	683.39	2.74	0.1420			
C-defocus	5742.70	1	5742.70	23.00	0.0020			
AB	1778.46	1	1778.46	7.12	0.0321			
AC	556.11	1	556.11	2.23	0.1792			
BC	984.79	1	984.79	3.94	0.0874			
A^2	4666.73	1	4666.73	18.69	0.0035			
B^2	1202.16	1	1202.16	4.81	0.0643			
C^2	3435.87	1	3435.87	13.76	0.0076			
A^2B	481.31	1	481.31	1.93	0.2076			
A^2C	6058.65	1	6058.65	24.26	0.0017			
AB^2	5972.86	1	5972.86	23.92	0.0018			
Lack of fit	1013.44	2	506.72	0.13	0.1144		Not significant	
				$R^2 = 0.9412$		$R^2_{Pre} = -0.9747$		
				$R^2_{Adj} = 0.8405$		Adeq Precision is 8.412		

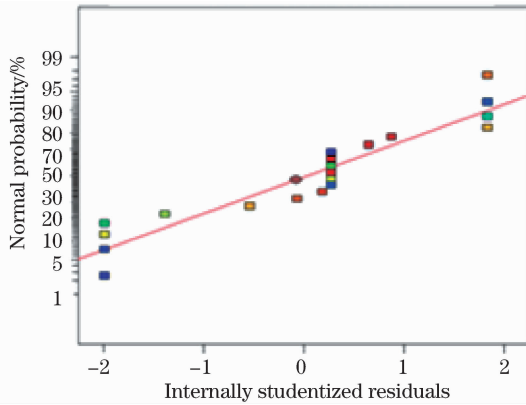


图 4 模型的合适性

Fig. 4 Desirability function of the model

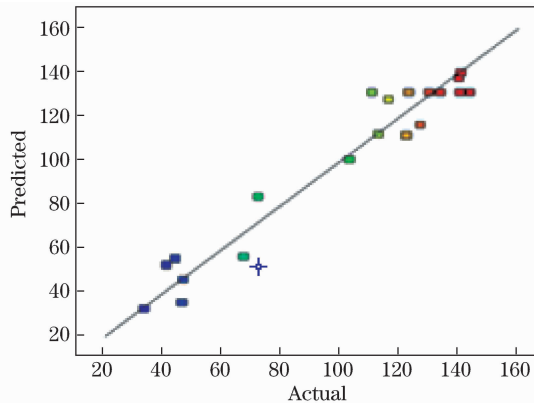


图 5 试验值与预测值对比

Fig. 5 Plot of the experimental data against the predicted results

表 4 优化准则

Table 4 Optimization criterias

Parameter or response	Limits		Criterion
	Lower	Upper	
Power/W	1790.54	1909.46	In range
Velocity/(mm/min)	843.24	1556.76	In range
Defocus/mm	-8	0	In range
Tensile strength/MPa	0	200	Maximize

表 5 优化结果

Table 5 Optimal results

No.	Power/W	Velocity/(mm/min)	Defocus/mm	Tensile strength/MPa	Desirability
1	1841.50	843.24	-6.90	166.849	0.801
2	1841.48	843.24	-6.91	166.849	0.801
3	1841.85	843.24	-6.93	166.845	0.801

由于试验设备精度所限,对优化后的焊接工艺参数四舍五入舍去小数点后位数,然后采用上述试验方案后进行试验,获得了成形饱满、无裂纹的焊缝,如图 6(a)和(b)所示。图 6(c)为光镜下焊缝截面的成形图,从图中可以看出钎料熔化后与铝合金母材充分地冶金结合,在铝合金一侧形成了熔化焊接头。图 7 分别给出了不同工艺参数下,焊接接头的微观组织,从图中可以看出在钢的连接界面上生长有一层金属间化合物,图 7(a)中优化参数后所得的焊缝与钢界面处生成的金属间化合物厚度约为 $2.85 \mu\text{m}$,图 7(b)、(c)、(d)未优化的焊缝金属间化合物厚度分别为 35.77 、 23.7 、 $27.69 \mu\text{m}$ 。金属间化合物越厚,焊接接头的抗拉强度越低。使用优化后参数进行焊接,钢与焊缝之间依旧出现明显的分层结构,在钢一侧形成了典型的钎焊接头。对优化条件下的接头进行拉伸试验后显示其抗拉强度可达到 180 MPa ,并且从断裂面观察可知,熔钎焊对接接头拉伸试样断裂发生在钢/铝的钎接的界面处。

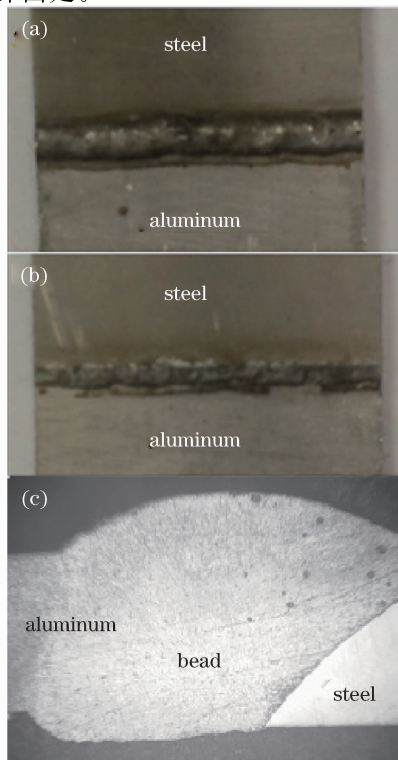


图 6 熔钎焊对接接头宏观图像。(a)焊缝正面;(b)焊缝背面;(c)横截面

Fig. 6 Macro section of the welding-brazing butt joint. (a) Surface appearance of the front seam; (b) surface appearance of the back seam; (c) cross section

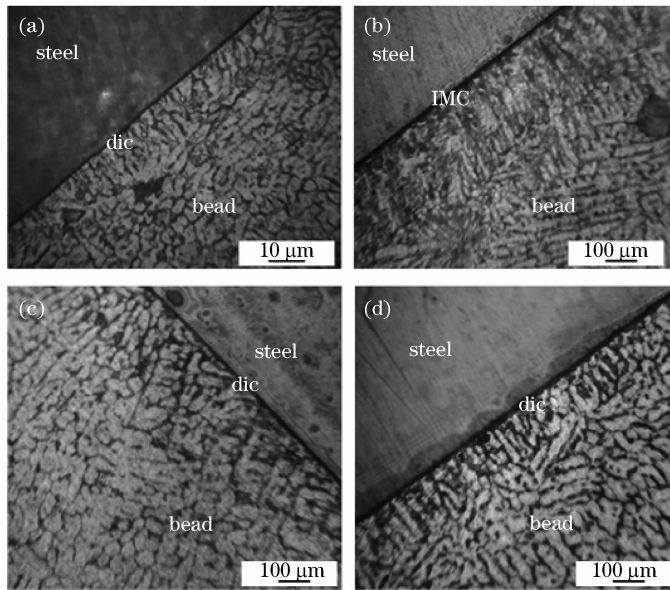


图 7 不同参数下焊接接头的显微组织。(a) 功率为 1841 W,速度为 843 mm/min,离焦量为-6 mm;
 (b) 功率为 1850 W,速度为 1200 mm/min,离焦量为 2.05 mm; (c) 功率为 1790 W,速度为 1556.76 mm/min,离焦量为 0;
 (d) 功率为 1909 W,速度为 1556.76 mm/min,离焦量为 0

Fig. 7 Microstructure of the welded joints under different parameters. (a) Power is 1841 W, velocity is 843 mm/min, defocus is -6 mm; (b) power is 1850 W, velocity is 1200 mm/min, defocus is 2.05 mm; (c) power is 1790 W, velocity is 1556.76 mm/min, defocus is 0; (d) power is 1909 W, velocity is 1556.76 mm/min, defocus is 0

4 结 论

采用激光填丝焊接工艺,实现了 6061 铝合金和 304 不锈钢板的对接熔钎焊。根据试验数据建立了基于响应曲面法的抗拉强度和焊接参数的数学模型,通过对以上试验结果和数学模型分析,可以得出以下结论:

- 1) 响应曲面法能够用于优化焊接工艺参数,并能给出焊接接头抗拉强度同焊接工艺参数直接的关系。
- 2) 建立了激光焊接工艺参数和焊缝尺寸之间的回归模型。方差分析显示,离焦量和激光功率对抗拉强度的影响最大,焊接速度对抗拉强度的影响比较小,各因素之间的交互作用明显。
- 3) 通过 RSM 方法确定最佳工艺参数为激光功率 1841 W,焊接速度 843 mm/min,离焦量-6 mm。使用优化后参数进行焊接的对接接头的抗拉强度可达 180 MPa,金属间化合物厚度约为 2.85 μm。

参 考 文 献

- 1 Wang Juan, Liu Qiang. Brazing and diffusion bonding technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
王 娟,刘 强. 钎焊及扩散焊技术[M]. 北京:化学工业出版社,2013.
- 2 Sierra G, Peyre P, Deschaux Beaume F, *et al.*. Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes[J]. Materials characterization, 2008, 59(12): 1705-1715.
- 3 Dharmendra C, Rao K P, Wilden J, *et al.*. Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(3): 1497-1503.
- 4 Mai T A, Spowage A C. Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 374(1~2): 224-233.
- 5 Liedl G, Bielak R, Ivanova J. Joining of aluminum and steel in car body manufacturing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 150-156.
- 6 Su Y, Hua X, Wu Y. Influence of alloy elements on microstructure and mechanical property of aluminum-steel lap joint made by gas metal arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(4): 750-775.
- 7 Xiao Rongshi, Dong Peng, Zhao Xudong. Progress in laser fusion welding brazing of dissimilar alloys[J]. Chinese J Laser, 2011, 38(6): 0601004.

- 肖荣诗,董 鹏,赵旭东. 异种合金激光熔钎焊研究进展[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601004.
- 8 Gao Wei, Yan Qi, Huang Jian. Microstructure and mechanical property of laser wire fusion brazing welded butt joints of steel/aluminum dissimilar metal[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(06): 0603006.
- 高 伟,阎 启,黄 坚. 钢/铝异种金属激光填丝熔钎焊对接接头组织与性能分析[J]. 中国激光, 2014, 41(06): 0603006.
- 9 Zhao Xudong, Xiao Rongshi. Fluxless joining between aluminium alloy and galvanized steel by fiber laser fusion welding-brazing with filler powder[J]. Chinese J Laser, 2012, 39(4): 0403004.
- 赵旭东,肖荣诗. 铝/钢异种金属无钎剂激光填粉熔钎焊[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0403004.
- 10 Wang S, Qin G, Su Y. Laser-MIG arc hybrid brazing-fusion welding of Al alloy to galvanized steel with different filler metals[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 26(2): 177-182.
- 11 Dong H, Yang L, Dong C, *et al.*. Arc joining of aluminum alloy to stainless steel with flux-cored Zn-based filler metal[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(26): 7151-7154.
- 12 Benyounis K Y, Olabi A G, Hashmi M S J. Optimizing the laser-welded butt joints of medium carbon steel using RSM[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164: 986-989.
- 13 Zhao Yangyang, Zhang Yansong, Hu Wei, *et al.*. Optimization of laser welding thin-gage galvanized steel via response surface methodology [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(9): 1267-1273.
- 14 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 Laser, 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.
- 15 He Wei, Xue Weidong, Tang bin. Optimize Experimental Design and Data Analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- 何 为,薛卫东,唐 斌. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2012.
- 16 Chen Zhanlu. Research of Aluminium Alloy/Stainless Steel Dissimilar Metal Pipe TIG Welding-Brazing Technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- 陈占录. 铝合金/不锈钢异种金属管 TIG 熔—钎焊工艺技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

栏目编辑: 张 雁