

激光与光电子学进展

304L/316 异种钢薄板激光增材焊接工艺及性能研究

陈彦龙¹, 舒林森^{1,2*}, 宋少东¹¹陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723001;²陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723001

摘要 为了获得 304L/316 异种钢薄板激光焊接的最优工艺参数, 采用灰色关联度分析法, 通过 Taguchi L9 正交试验方案, 以激光功率、扫描速度、离焦量为主要影响因素, 对接头形貌、几何变形以及拉伸力学性能进行实验研究。结果发现: 激光焊接薄板的角变形随离焦量的增加而减小; 弯曲变形随激光功率的增加而增大; 抗拉强度随离焦量的增加呈现先增后减的规律。当激光功率为 1500 W、扫描速度为 15 mm/s、离焦量为 +2 mm 时, 304L/316 异种钢焊接薄板抗拉性能最强且变形最小, 接头强度高于母材, 填料粉末熔化后沿着对接缝隙渗到板材底部, 形成包含细小柱状晶和少量等轴晶的金属填料接头, 最终填料粉末与母材形成了有效的冶金结合。

关键词 激光技术; 304L/316 钢薄板; 激光增材焊接; 灰色关联度; 拉伸性能

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP2022059.2314005

Study on Laser Additive Welding Process and Properties of 304L/316 Dissimilar Steel Sheets

Chen Yanlong¹, Shu Linsen^{1,2*}, Song Shaodong¹¹School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China;²Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, Shaanxi, China

Abstract In order to obtain the optimal process parameters of 304L/316 dissimilar steel sheet laser welding, the joint morphology, geometric deformation, and tensile mechanical properties were studied by using the grey correlation analysis method and Taguchi L9 orthogonal test scheme with laser power, scanning speed, and defocusing amount as the main influencing factors. The results show that the angular deformation of laser welded sheet decreases with the increase of defocusing amount. The bending deformation increases with the increase of laser power. The tensile strength increases first and then decreases with the increase of defocusing amount. When the laser power is 1500 W, the scanning speed is 15 mm/s, and the defocusing amount is + 2 mm, the tensile strength of the 304L/316 dissimilar steel welded sheet is the strongest and the deformation is the smallest, and the joint strength is higher than that of the base metal. After melting, the filler powder penetrates along the butt gap to the bottom of the sheet, forming a metal filler joint containing fine columnar crystals and a small amount of equiaxed crystals. Finally, the filler powder and the base metal form an effective metallurgical combination.

Key words laser technique; 304L/316 steel sheet; laser additive welding; grey correlation degree; tensile property

1 引言

异种钢焊接结构既可以满足不同工况条件下的复杂要求, 又能充分发挥两种材料的性能^[1], 还可以节约贵金属并降低成本, 在机械、化工、电力等领域很受欢迎。近年来, 由于复杂的工作环境, 异种合金钢的连接工艺及性能受到广泛关注^[2]。王波等^[3]采用 Nd:YAG

脉冲激光器 Q235/316 异种薄钢板进行激光拼焊试验, 研究各工艺参数对断后伸长率、抗拉强度的影响。Zhang 等^[4]优化了混合激光电弧焊接工艺, 获得了力学性能优异的 EH36 和 316L 异种接头焊缝。Yan 等^[5]采用 YLR-4000 光纤激光器对 Fe-Al 异种合金进行了激光焊接, 发现在 Fe-Al 接头界面处产生的多种 Fe-Al 金属间化合物可以提高界面层的硬度。尽管如此, 异种

收稿日期: 2022-02-14; 修回日期: 2022-03-07; 录用日期: 2022-06-15

通信作者: *3500603604@qq.com

金属的焊接仍存在较大问题,主要是连接的两种母材在组成成分、物理性能、化学性能等方面存在明显差异,导致其在操作上比同种金属的焊接要困难得多^[6]。

对于厚度尺寸小的异种钢薄板而言,对焊则更易诱发未焊透和过烧等现象,焊接工艺更为苛刻。Singh 等^[7]探讨了在不同的焊接工艺变量下,不锈钢 304 和中碳钢 EN 8 异种焊接接头的组织发展模式及相关力学行为。Pankaj 等^[8]研究了焊接速度和激光功率对低碳钢和 AISI 304 钢薄板焊接接头的机械性能、残余变形等的影响。Antony 等^[9]采用 CO₂ 激光焊接商业纯铜和 316L 不锈钢,发现采用较高的激光功率和恒定的焊接速度参数可以有效提高 CU-SS316L 焊接接头的质量。Yilmaz 等^[10]研究了 DP1000-QP1180 钢板在不同焊接电流和焊接时间下的显微组织变化、拉伸剪切性能等。张迪等^[11]以钢铁材料、镁合金、钛合金和异种材料为基材进行激光焊接试验,探究了激光能量对焊接熔深、气孔及微观组织的影响。李继红等^[12]采用铜/不锈钢异种材料进行光学显微镜、扫描电镜、能谱及拉伸、硬度试验,研究了不同光束偏移量对焊接接头组织及性能的影响。孙文昊等^[13]通过多种方式对复合材料(SiC_p/Al)进行激光焊接,对比分析得出双光束激光焊接可使焊缝具有较好的连续性和表面特性。张成竹等^[14]研究了超窄间隙激光填丝焊接接头中的残余应力分布情况。这些研究优化了异种钢薄板的焊接工艺,但是焊接前仍然需要进行接头界面的特殊处理(如:磨边、预紧和夹持等)来保证其平面度和表面粗糙度,提高工业应用的有效性。有幸的是,送粉填料增材的方式具备实现异种钢冶金连接的能力,对薄板的错边包容能力更强,能够有效降低其连接难度并提高异种钢薄板的焊接强度。

为了获知工艺参数对 304L/316 不锈钢薄板激光填粉增材焊接后的板材几何变形和拉伸力学性能影响,并找出最优工艺参数,本文采用“光内同轴”送粉方式将金属粉末增材填充到 304L/316 不锈钢对接结构的缝隙并形成焊接接头,根据设计的 Taguchi L9 正交

试验方案,探讨各因素对角变形、弯曲变形和抗拉强度的影响规律,并利用灰色关联度方法讨论不同工艺参数与理想变形和抗拉强度的关系,从而找出适合 304L/316 异种钢薄板连接的最佳填粉增材焊接工艺。

2 试验方法

2.1 试验材料与装置

本次试验基材是尺寸为 100 mm×90 mm×1 mm 的 304L 不锈钢和 316 不锈钢薄板,激光增材焊接的填充材料是 316L 金属球形粉末(河北越涵金属材料销售有限公司),粉末颗粒尺寸为 15~65 μm,粉末形貌如图 1 所示。材料的力学性能和化学成分如表 1 和表 2 所示。

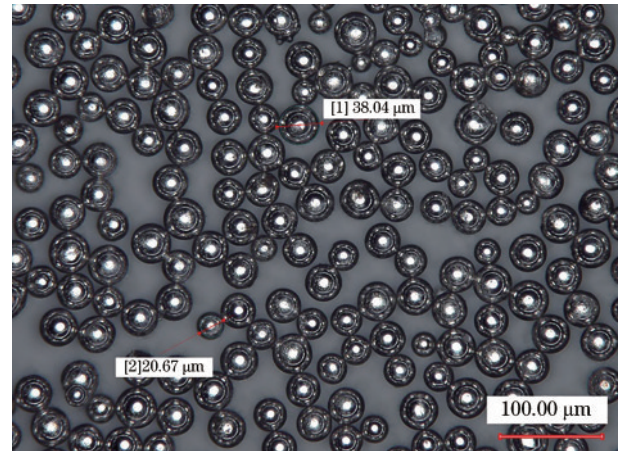


图 1 粉末形貌

Fig. 1 Powder morphology

表 1 304L 不锈钢和 316 不锈钢的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 304L stainless steel and 316 stainless steel

Material	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation / %
304L	≥205	≥520	≥40
316	≥175	≥480	≥40

表 2 304L 不锈钢和 316 不锈钢的化学成分

Table 2 Chemical composition of 304L stainless steel and 316 stainless steel

Material	Mass fraction / %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Mo
304L	≤0.03	≤1.0	≤2.0	18.0-20.0	9.0-12.0	≤0.03	≤0.045	—
316	≤0.08	≤1.0	≤2.0	16.0-18.5	10.0-14.0	≤0.03	≤0.035	2.0-3.0
316L powder	≤0.03	≤1.0	≤2.0	16.0-18.0	10.0-14.0	≤0.03	≤0.045	2.0-3.0

试验设备是功率为 3 kW 的半导体光纤激光熔覆系统,该系统由半导体激光器(YLS-3000)、机器人手臂(ABBIRB2600)、熔覆头(ZF-KDPZ-001A)、水冷装置(CWFL-3000)和送粉装置(RH-DFOM-01)组成,采用高纯度氩气作为送粉气体和保护气体^[15],其运动由 ABB 机器人及控制程序实现。试验之前,用砂纸打

磨去除薄板上较明显的加工痕迹及氧化层等杂质,并用丙酮清洗试件,用乙醇擦拭对接部位,然后将 304L 和 316 薄板固定在自主研发的专用夹具上,保持对接处的间隙小于 0.10 mm,夹具体为连接板材提供定位,柔性压板给薄板与夹具体的位置保持提供夹紧力约束。试验设备及连接工艺如图 2 所示。焊接完成后,

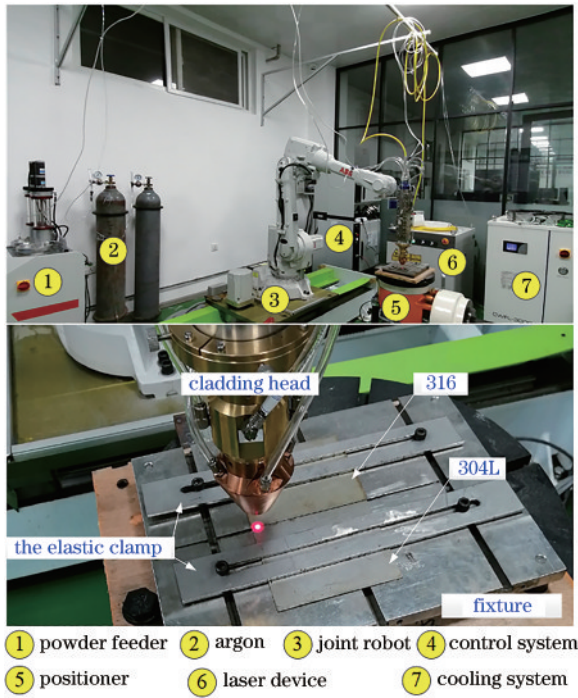


图 2 试验设备和装夹形式

Fig. 2 Experimental equipment and clamping styles

采用电火花切割的方式在焊缝处进行金相试件的取

样, 然后进行打磨, 抛光, 利用王水($\text{HNO}_3\text{:HCl}$, 体积比为 1:3) 进行腐蚀, 并采用基恩士超景深显微镜观察接头截面及金相组织。

2.2 变形测量和拉伸测试

根据焊接薄板面外变形机制^[15-16], 焊接薄板变形通常表现为凹-凸变形模式, 即焊缝沿横向发生角变形和沿着纵向发生弯曲变形, 这种变形模式在后续的试验中也得以证实。鉴于此, 对填粉增材焊接后的异种不锈钢薄板几何变形量进行测量, 设置如图 3(a) 所示的测量点。将填粉增材焊接好的不锈钢薄板放在变位机上的 V 型块上, 取薄板宽度方向为 x 轴、长度方向为 y 轴、高度方向为 z 轴, 将精度 0.01 mm 的激光位移传感器安装至 ABB 机器人上, 调整工件测量路径的始末两点到水平基准面, 等间距移动机器人测量各点的 z 坐标值, 其中: 横向角变形 θ 值由 x 向五点 z 坐标值算出, 纵向变形量 h 直接由 y 向五点 z 坐标值算出, 测算方式示意说明如图 3(b) 所示。

为了测试激光填粉增材焊接不锈钢板材的抗拉性能, 利用线切割机进行切割取样制备拉伸试件, 拉伸试件的形状和尺寸如图 4(a) 所示。拉伸试验是在型号 WDW-100 的复合材料试验机上进行, 如图 4(b) 所示。

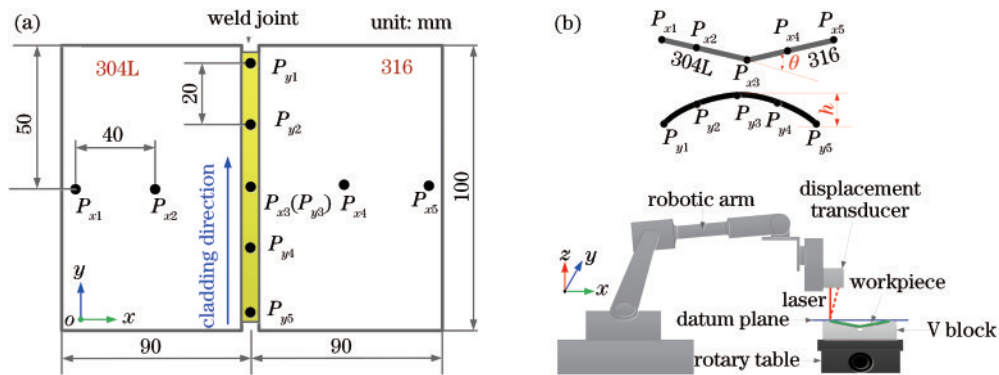


图 3 薄板变形测量方案。(a) 测量点示意图; (b) 测算方式示意图

Fig. 3 Sheet deformation measurement scheme. (a) Schematic diagram of measuring points;

(b) schematic diagram of calculation method

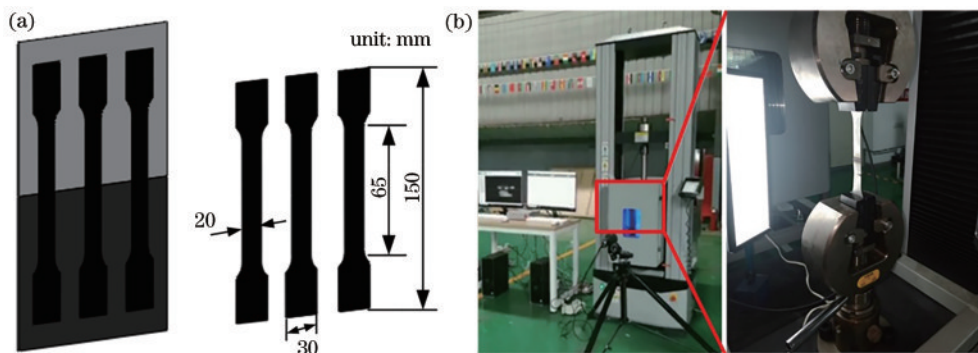


图 4 拉伸试件与试验设备。(a) 拉伸试件的形状和尺寸; (b) 拉伸试验示意图

Fig. 4 Tensile specimen and experimental equipment. (a) Shape and size of tensile specimen; (b) schematic diagram of tensile test

2.3 Taguchi L9 阵列安排

以激光功率、扫描速度和离焦量为 Taguchi L9 正交列表的试验因素,研究异种钢填粉增材焊接薄板的机械性能,工艺参数及其数值范围如表 3 所示。以角变形、弯曲变形及抗拉强度为优化目标对 304L/316 异种钢薄板进行激光焊接,试验方案及结果如表 4 所示。

表 3 工艺参数及其范围

Table 3 Process parameters and their ranges

No.	Process parameter	Range		
		1	2	3
1	Laser power /kW	0.9	1.2	1.5
2	Scan speed /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	5	10	15
3	Focal distance /mm	0	2	4

表 4 用于激光焊接试验和响应的 L9 正交阵列

Table 4 L9 orthogonal array used for laser welding trials and responses

No.	Laser power / W	Cladding speed / ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	Focal offset / mm	Angular deformation / ($^{\circ}$)	Bending deformation / mm	Tensile strength / MPa
1	0.90	5	0	3.93	0.35	677.23
2	0.90	10	2	1.40	0.50	644.81
3	0.90	15	4	0.43	0.37	287.39
4	1.20	5	2	2.87	0.70	746.44
5	1.20	10	4	1.30	0.72	163.38
6	1.20	15	0	1.06	0.40	422.79
7	1.50	5	4	1.17	0.75	715.77
8	1.50	10	0	4.53	1.11	621.60
9	1.50	15	2	1.04	0.45	754.93

3 结果与讨论

3.1 试验结果

3.1.1 接头形貌

图 5 为正交试验获得的 9 组 304L/316 异种钢薄板填粉增材焊接接头的正面形貌。从宏观形貌可以看出,1、2、3 号试样的接头宽度是随扫描速度的增大而减小,通过横向对比 4、5、6 和 7、8、9 号两组试样可获得相同的结论,结合表 4 可知,离焦量对接头宽度影响并不显著,可见,扫描速度是影响连接接头宽度的关键因素。2、3、6 号试样填粉增材焊接接头上表面粉末颗粒附着较多,5、8、9 号试样的颗粒附着较少。结合表 4 可知,功率密度对接头表面粉末熔化程度的影响最大,小功率密度下,粉末熔化不充分使得接头粉末附着量增加。初步判断 3、5 号试样的接头承载能力较弱。

由图 5 中 9 组 304L/316 异种钢薄板填粉增材焊接接头的右侧端面获得对应横截面轮廓,如图 6 所示。

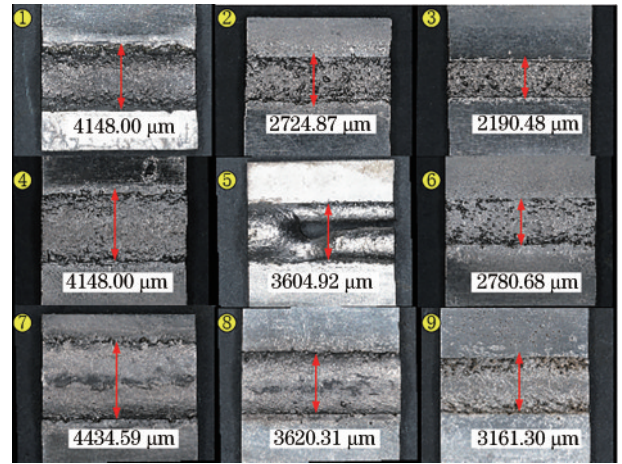


图 5 不同工艺参数下试样的表面形貌

Fig. 5 Surface morphologies of samples under different process parameters

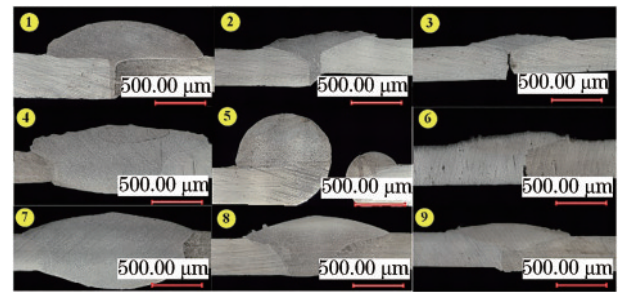


图 6 接头截面轮廓

Fig. 6 Section profiles of joints

由图 6 可知,1、4、7、8 号试样的填粉增材焊接接头截面轮廓显示出填充粉末完全熔化,但是粉末熔化量过大,造成接头余高偏大。3、5、6 号试样的填粉增材焊接接头存在金属粉末填充不完整或者烧穿现象,说明对应的激光功率密度过小或过大,焊接接头形貌截面进一步证实了上述推论。2、9 号试样的填粉增材焊接接头截面轮廓反应出填充粉完全熔化实现充分填充,粉末熔化量适中,但是 2 号试样接头存在明显错边现象,可见填粉增材焊接对错边有着较强包容性。

3.1.2 拉伸性能

图 7 为试样拉伸试验后的整体形貌。1、2、3、5、6、8 组试样均在连接接头处断裂,母材几乎没有产生裂纹,说明这几组工艺参数下激光填粉增材焊接接头的抗拉强度均小于母材的强度。其中:1、2、8 组工艺参数下的增材焊接接头发生断裂破坏,但接头断裂面呈现圆弧状,有着不错的结合强度,断裂机制比较复杂,拉伸时可能承受拉剪应力和较高的残余应力;3、5、6 组工艺参数下的增材焊接接头发生了更为严重的断裂破坏,接头断口平直,试件增材焊接接头抗拉强度低于母材;4、7、9 组试样的填粉增材焊接接头结构完好,断裂位置均在 316 母材上,拉伸强度较高,断口方向与拉伸方向呈锐角关系,说明在拉伸过程中,试件承受较大切应力,试样拉长反映接头抗拉强度明显高于母材。表 4 所示

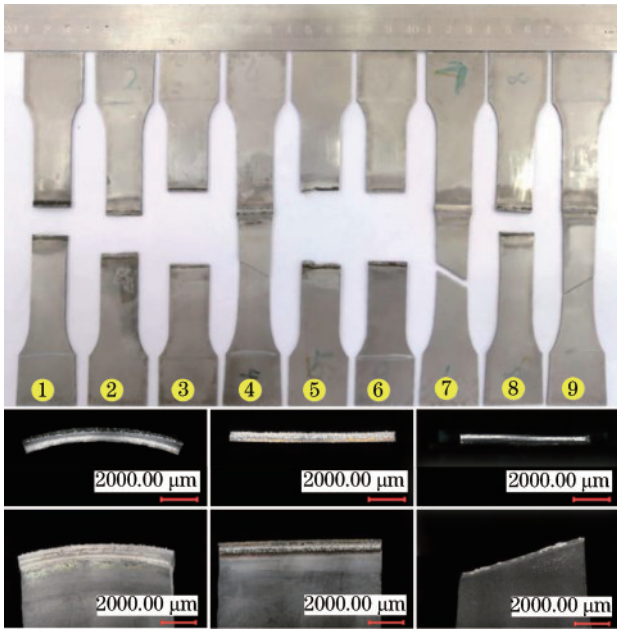


图 7 拉伸试验后的试样形貌

Fig. 7 Morphologies of specimen after tensile test

的拉伸强度值证实了上述拉伸试样整体形貌分析结论的合理性。

从连接接头的横截面轮廓(图 6)和拉断后的形貌(图 7)可知,接头部位填充粉末的熔化程度直接影响抗拉力学性能,适宜的填充粉末熔化量是取得优良抗拉性能的关键。填充粉末熔化量由各个工艺参数共同决定,所以优选工艺参数来提升抗拉性能是非常有效的途径。

3.2 极差分析

采用极差分析对表 4 中的数据进行处理,其结果如表 5 所示。极差分析法是通过比较各因素相应水平的综合平均值来找到最佳因素水平组合,采用比较各因素平均值的极差大小来确定影响指标的主要因素,极差值大说明所对应的因素对试验结果的影响大,是主要因素,否则就是次要因素^[11]。由表 5 可知:影响角变形大小的作用次序为离焦量(C)>扫描速度(B)>激光功率(A);对于弯曲变形,因素影响次序为 B>A>C;影响填粉增材焊接接头抗拉强度的因素影响大小次序为 C>A>B。由极差分析结果可知,薄板填粉增材焊接的质量由不同工艺参数共同决定,在选取最佳工艺参数时,应考虑不同工艺参数对连接质量所造成的不同影响。因此,本文分析了对薄板填粉增材焊接质量影响较大的主要因素和次要因素的交互作用,以此来确定单一工艺参数的影响。

表 5 极差分析

Table 5 Range analysis

No.	Angular deformation / (°)			Bending deformation /mm			Tensile strength /MPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	1.92	2.66	3.17	0.41	0.60	0.62	536.48	713.15	573.87
2	1.74	2.41	1.77	0.61	0.78	0.55	444.20	476.60	715.39
3	2.25	0.84	0.48	0.77	0.41	0.61	697.43	488.37	388.85
Range	0.51	1.82	2.69	0.36	0.37	0.07	253.23	236.55	326.54
Influence /%	10.10	36.29	53.61	45.23	46.06	8.71	31.02	28.98	40.00

3.3 单因素分析

3.3.1 角变形

由表 5 可知,扫描速度和离焦量是影响薄板角变形的的主要因素,且离焦量的占比较高,故分析了三种不同扫描速度下薄板焊接角变形随离焦量的变化情况,如图 8 所示。

在扫描速度一定的情况下,随离焦量的增加,薄板的角变形呈现下降的趋势。这是由于随着离焦量的增大,激光作用在薄板表面的单位面积不断扩大,热量更加分散,焊件上的热量分布更加均匀^[17],从而减小了热应力产生的区域,进而降低了薄板焊接变形程度。

3.3.2 弯曲变形

对于弯曲变形而言,由表 5 可知,主要由激光功率和扫描速度共同决定,且两个工艺参数的影响比例相近,均为主要因素。因此,分别绘制弯曲变形与激光功率和扫描速度的变化趋势曲线,如图 9、10 所示。

由图 9 可知,在扫描速度一定的前提下,随着激光功率增加,薄板的弯曲变形逐渐增大。主要原因是激

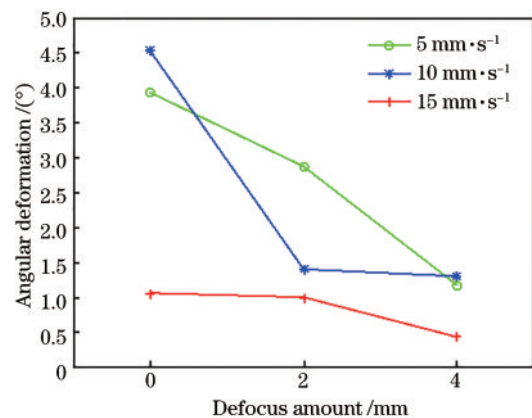


图 8 离焦量对角变形的影响

Fig. 8 Effect of defocus amount on angular deformation

光功率增大,输入到薄板连接接头处单位面积的能量增加,薄板表面所吸收的能量随之增加,导致薄板对接处的温度升高,薄板表面产生较大的温度梯度,使得局部热应力增大,热应力所引起的弯曲力矩也随之增加,

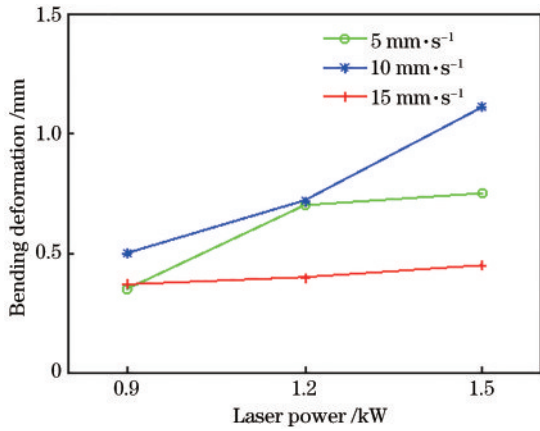


图 9 激光功率对弯曲变形的影响

Fig. 9 Influence of laser power on bending deformation

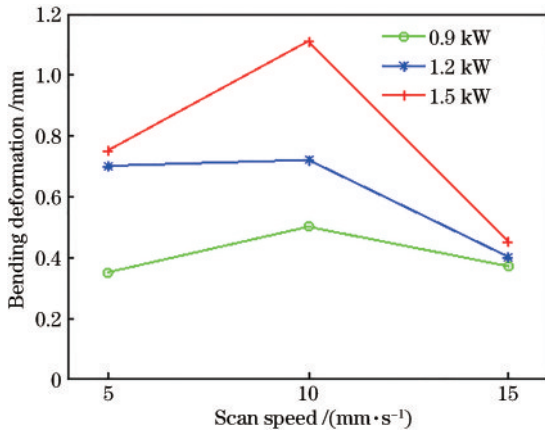


图 10 扫描速度对弯曲变形的影响

Fig. 10 Influence of scanning speed on bending deformation

最终导致薄板的弯曲变形量不断增大。

由图 10 可知,在激光功率一定的条件下,随着扫描速度的增加,薄板的弯曲变形总体上呈现出先上升后下降的趋势。扫描速度决定了激光束在加工位置的停留时间,扫描速度越大,停留时间越短,薄板所吸收的能量较少,产生的弯曲变形也较小,过大的扫描速度可能造成未熔透的现象。

3.3.3 抗拉强度

由表 5 可知,对抗拉强度影响较大的因素为激光功率和离焦量,其中离焦量的影响比例高于激光功率,因此绘制了不同功率下,抗拉强度随离焦量变化的曲线如图 11 所示。

在激光功率一定时,焊接后薄板的抗拉强度随离焦量的增加先上升后下降,这是因为随离焦量的增加,焊点变大,特别是连接处的宽度逐渐增加,增大了抗拉强度。但当离焦量增加到 2 mm 以后,抗拉强度降低,这是因为随着离焦量的进一步增加,光束质量变差以及光斑变大,激光功率密度降低,导致熔深降低,抗拉强度也随之降低。

3.4 灰色关联度分析

由极差分析可知,各工艺参数对接头连接质量指

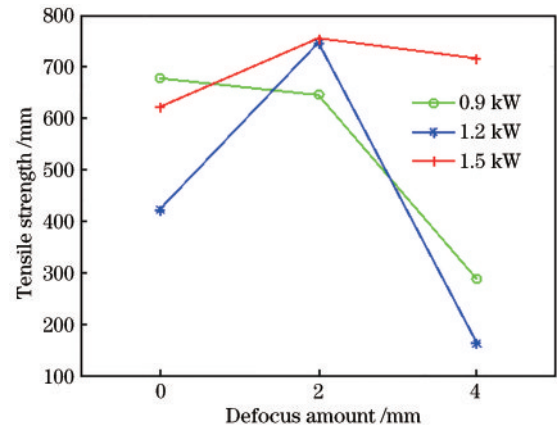


图 11 离焦量对抗拉强度的影响

Fig. 11 Effect of defocus amount on tensile strength

标的敏感度各不相同,各参数之间还存在复杂的相互作用关系,是一种典型的灰色系统。304L/316 薄板激光填粉增材焊接的理想状态是抗拉强度高、角变形和弯曲变形小。薄板角变形和弯曲变形越小,抗拉强度越大,表明填粉增材焊接质量越好。在保证较大抗拉强度的同时,尽量减小薄板的角变形和弯曲变形,故设定这三个工艺参数为分析指标,

$$x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}\} \quad (1)$$

同时定义各个分析指标中的最佳值为理想指标,

$$x_0 = \{0.43, 0.35, 754.93\} \quad (2)$$

对表 4 所示激光填粉增材焊接试验数据进行处理,然后计算各组指标与理想指标之间的关系,

$$|x_0(k) - x_i(k)|, k = 1, 2, 3, i = 1, 2, \dots, 9. \quad (3)$$

可得最值,表示为

$$\begin{cases} \Delta_{\min} = \min \{ \min \{ |x_0(k) - x_i(k)| \} \} \\ \Delta_{\max} = \max \{ \max \{ |x_0(k) - x_i(k)| \} \} \end{cases} \quad (4)$$

则各个指标的关联系数为

$$\zeta_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \Delta_{\max}} \quad (5)$$

式中: ρ 为分辨系数,一般在 0~1 之间,若分辨系数越小,则关联系数间差异越大,区分能力越强。通常 ρ 取 0.5。各组试验与理想指标的关联度为

$$r_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^3 \zeta_i(k) \quad (6)$$

各个试验组的灰色关联系数如表 6 和图 12 所示。

九组试样的关联度曲线如图 12 所示,可见第九组试样所对应的激光填粉增材焊接参数为最优工艺参数,与理想工艺参数最为接近。因此,优化后的激光填粉增材焊接工艺参数是激光功率为 1500 W、扫描速度为 15 mm/s、离焦量为 +2 mm。

图 13 为 304L/316 钢激光填粉增材焊接接头的微观组织。图中 I 区为激光增材焊接材料和基材 316 不锈钢结合部位放大后的金相组织。可以看出,增材焊

表 6 灰色关联系数

Table 6 Grey correlation coefficient

Trial No.	Grey relation coefficient			Grade
	$\theta / (^{\circ})$	h / mm	Tensile strength /MPa	
1	0.988	1.000	0.792	0.927
2	0.997	0.999	0.729	0.908
3	1.000	1.000	0.387	0.796
4	0.992	0.999	0.972	0.988
5	0.997	0.999	0.333	0.776
6	0.998	1.000	0.471	0.823
7	0.997	0.999	0.883	0.960
8	0.986	0.997	0.689	0.891
9	0.998	1.000	1.000	0.999

接材料和 316 不锈钢产生了清晰的结合边界,结合边界上部为焊接组织,主要是细小的柱状晶、等轴晶和少量的树枝晶[见Ⅲ区放大图熔覆区(CZ)]组成。在结合边界上部,温度最低, G/R (温度梯度 G 、凝固速率 R)最小,冷却速度较快,晶粒生长速度较快,形成等轴晶,晶粒继续生长,温度升高, G/R 增大,冷却速度逐渐降低,晶粒生长速度缓慢,形成柱状晶。结合边界下部为结合区,即焊接材料与基材组织互相渗透的区域,主要由奥氏体晶粒和沿晶体分布的 δ 铁素体构成。底部母材组织为晶粒粗大的奥氏体和呈带

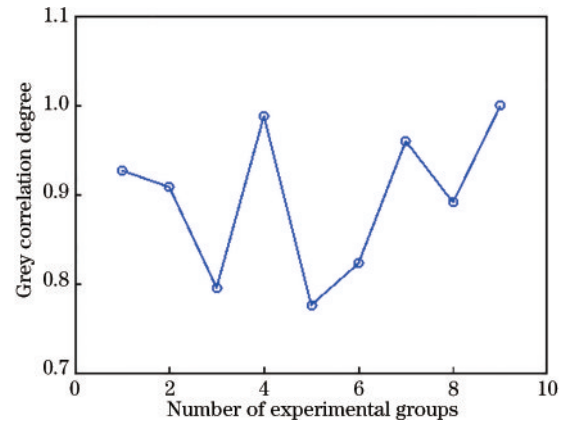


图 12 灰色关联度

Fig. 12 Grey correlation degree

状分布的长条状 δ 铁素体,且越靠近热影响区 δ 铁素体越多。图中Ⅲ区为熔合区和基材 304L 结合部位放大后的金相组织,主要组织是奥氏体和铁素体熔合后的混合物,底部母材热影响区组织为等轴奥氏体及少量白色条状奥氏体。图中Ⅱ区为熔合区,是填料粉末与两种基材 316、304L 熔凝后的混合结构金相组织放大图。可见焊接组织和两种不锈钢组织在该区域产生深度熔合,熔化金属沿着不锈钢对接缝隙垂直渗到板材底部,在板材底部末端形成更为细小的柱状晶和少量等轴晶(见Ⅳ区),将 304L 和 316 两种不锈钢很好地连接起来。

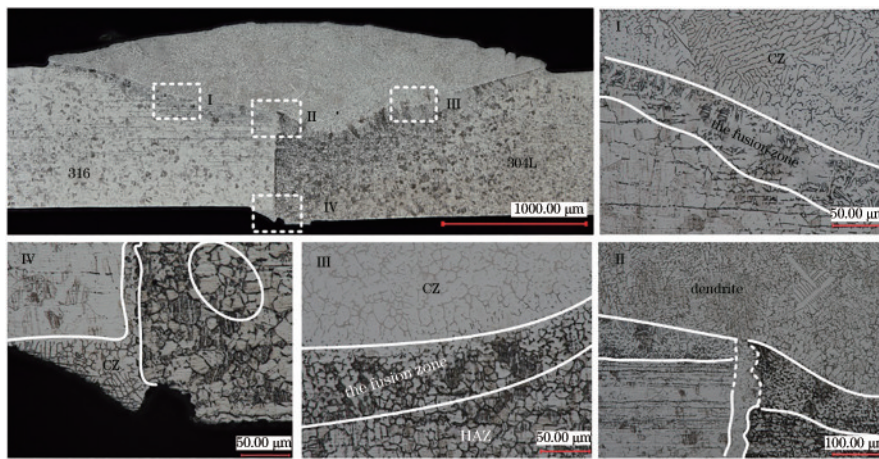


图 13 304L/316 增材焊接接头显微组织

Fig. 13 Microstructure of 304L/316 additive welded joint

3.5 验证试验

为了验证最优工艺参数的有效性,在最优工艺参数下进行三组重复试验,其角变形和弯曲变形的结果如表 7 所示。经测量计算(图 3),发现平均角变形量为 1.14° ,平均弯曲变形值为 0.53 mm ,两类变形的测量值与平均值偏差低于 5.3% ,角变形和弯曲变形验证试验的重复性较好。

图 14 为重复试验的拉伸性能测试结果。三组重复拉伸试样的断裂部位和形式基本相同,拉断后的宏

表 7 角变形和弯曲变形结果

Table 7 Results of angular deformation and bending deformation

Result	1	2	3	Average
Angular deformation /($^{\circ}$)	1.09	1.20	1.13	1.14
Bending deformation /mm	0.51	0.55	0.53	0.53

观形貌如图 14(a)所示。可见,拉伸断裂部位发生在母材 304L 薄板上,断口与拉伸方向呈约 60° 角,断口部位的试件宽度约为 15.2 mm ,填粉增材焊接接头结构

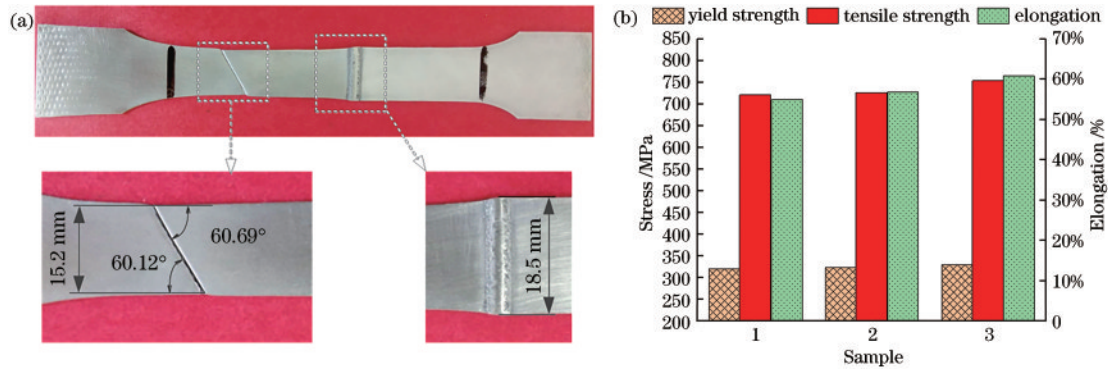


图 14 验证试验。(a)拉伸后的试件宏观形貌;(b)试件拉伸力学性能

Fig. 14 Validation experiment. (a) Macroscopic morphology of specimen after stretching; (b) tensile mechanical properties of specimens

仍然完整,但宽度也由原来的 20 mm 缩小到 18.5 mm。图 14(b)为重复试验的拉伸性能结果对比。可见,三组试样的屈服强度为 320~330 MPa 左右,抗拉强度约为 720~750 MPa,伸长率达到 55%~60%。验证结果表明,经灰色关联分析对异种钢板激光焊接的工艺参数进行寻优具有合理性。

4 结 论

极差分析结果表明,304L/316 异种钢薄板激光填粉增材焊接头的角变形主要取决于离焦量且随着离焦量的增加而减小,而弯曲变形则由激光功率和扫描速度共同决定。接头弯曲变形量随着激光功率的增加而增大,随着扫描速度的增加表现为先增大后减小。影响连接接头抗拉强度的主要因素是离焦量,随着离焦量的增加接头抗拉强度表现为先增大后减小的规律。

本文利用正交试验优化结果进行灰色关联度分析,获得 304L/316 异种钢薄板激光填粉增材焊接的最优工艺参数是激光功率 1500 W、扫描速度 15 mm/s、离焦量 +2 mm。在该参数下,金属粉末材料和两种不锈钢实现了良好的冶金结合,熔化的填料金属沿着对接缝隙渗流到板材底部,在底部末端形成更为细小的柱状晶和少量等轴晶组织。

通过验证试验还发现,最优参数试样的接头强度高于母材,焊接后板材角变形值和弯曲变形值分别为 1.14° 和 0.53 mm,屈服强度和抗拉强度分别为 320~330 MPa 和 720~750 MPa,而延伸率为 55%~60%。该结果表明了所提工艺参数优化方法的正确性。

参 考 文 献

[1] Liu H H, Aoki Y, Aoki Y, et al. Principle for obtaining high joint quality in dissimilar friction welding of Ti-6Al-4V alloy and SUS316L stainless steel[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 46: 211-224.
 [2] Ahmad H W, Chaudry U M, Tariq M R, et al. Assessment of fatigue and electrochemical corrosion

characteristics of dissimilar materials weld between alloy 617 and 12 Cr steel[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 53: 275-282.

- [3] 王波,舒林森.基于正交试验的 Q235/316 薄钢板激光焊接工艺优化[J].*应用激光*, 2019, 39(4): 580-585.
 Wang B, Shu L S. Optimization of process parameters of laser cladding 304L alloy powder based on orthogonal experiment[J]. *Applied Laser*, 2019, 39(4): 580-585.
 [4] Zhang X, Mi G Y, Wang C M. Microstructure and performance of hybrid laser-arc welded high-strength low alloy steel and austenitic stainless steel dissimilar joint[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 122: 105878.
 [5] Yan F, Fang X, Chen L, et al. Microstructure evolution and phase transition at the interface of steel/Al dissimilar alloys during Nd: YAG laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108: 193-201.
 [6] de Luca A, Greco A, Mazza P, et al. Numerical investigation on the residual stresses in welded T-joints made of dissimilar materials[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2019, 24: 800-809.
 [7] Singh D K, Sahoo G, Basu R, et al. Investigation on the microstructure: mechanical property correlation in dissimilar steel welds of stainless steel SS 304 and medium carbon steel EN 8[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 36: 281-292.
 [8] Pankaj P, Tiwari A, Bhadra R, et al. Experimental investigation on CO₂ laser butt welding of AISI 304 stainless steel and mild steel thin sheets[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 119: 105633.
 [9] Antony K, Rakeshnath T R. Dissimilar laser welding of commercially pure copper and stainless steel 316L[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 26: 369-372.
 [10] Yilmaz I O, Bilici A Y, Aydin H. Microstructure and mechanical properties of dissimilar resistance spot welded DP1000-QP1180 steel sheets[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(1): 25-42.
 [11] 张迪,赵琳,刘奥博,等.激光能量对激光焊接接头熔化形状、气孔和微观组织的影响及其调控方法[J].*中国激光*, 2021, 48(15): 1502005.
 Zhang D, Zhao L, Liu A B, et al. Understanding and controlling the influence of laser energy on penetration, porosity, and microstructure during laser welding[J].

- Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1502005.
- [12] 李继红, 张云龙, 杜明科, 等. 合金元素对铜/钢接头连接机理及性能的影响[J]. 焊接学报, 2021, 42(3): 34-41, 100.
Li J H, Zhang Y L, Du M K, et al. Effect of alloy elements on the interface connection mechanism and properties of copper/steel welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(3): 34-41, 100.
- [13] 孙文昊, 范永强, 张国涛, 等. SiC_p/Al复合材料的激光焊接接头组织与性能对比[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002105.
Sun W H, Fan Y Q, Zhang G T, et al. Comparison of structure and performance of laser welded joints of SiC_p/Al composite materials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002105.
- [14] 张成竹, 陈辉. B950CF 高强钢超窄间隙激光焊接头组织对残余应力的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602101.
Zhang C Z, Chen H. Effect of microstructures of ultranarrow gap laser welded B950CF steel joints on residual stress distribution[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602101.
- [15] Shi Y L, Wu S K, Liao H B, et al. Microstructure and mechanical properties of CLF-1/316 L steel dissimilar joints welded with fiber laser welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 54: 318-327.
- [16] Gao X L, Liu J, Zhang L J. Dissimilar metal welding of Ti6Al4V and Inconel 718 through pulsed laser welding-induced eutectic reaction technology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1): 1061-1071.
- [17] Winarto W, Anis M, Riastuti R, et al. Study the effect of welding position and plate thickness to the mechanical and microstructural properties of the TIG dissimilar metal welded between carbon steel ASTM A36 and stainless steel 304 plates[J]. Materials Science Forum, 2020, 1000: 364-372.