

不锈钢与铝合金纳秒激光焊接的工艺研究

王树勇, 邹逢, 易鑫, 叶兵

(武汉华工激光工程有限责任公司, 湖北 武汉 430223)

摘要 采用 Raycus 纳秒激光器对 0.2 mm 的 301 不锈钢和 0.2 mm 的 6063 铝合金进行叠焊工艺研究。焊接方式为点焊, 图形为螺旋线, 影响纳秒激光点焊接性能的主要参数有波形、脉冲频率、平均功率、速度和螺旋线间距, 对这五因素进行正交试验, 使用直观分析法和方差分析法, 验证这五个因素对焊点拉力和余高的影响程度。结果表明, 其焊点余高的影响因素由主到次依次为波形、脉冲频率、平均功率、速度和螺旋线间距; 对焊点拉力的影响因素由主到次为平均功率、脉冲频率、波形、速度和螺旋线间距。并且通过正交试验方法, 可以找到更多更佳的焊接参数。

关键词 纳秒激光焊接; 不锈钢; 铝合金; 正交试验

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20183805.777

Technical Study on Nanosecond Laser Welding of Stainless Steel and Aluminum Alloy

Wang Shuyong, Zou Feng, Yi Xin, Ye Bing

(Wuhan Huagong Laser Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract A Raycus nanosecond laser was used to technical study the stitch welding of 0.2 mm 301 stainless steel and 0.2 mm 6063 aluminum alloy. The welding method is spot welding and the pattern is spiral. The main parameters that affect the nanosecond laser spot welding performance are waveform, frequency, average power, speed and spiral line spacing. The orthogonal tests of these five factors were carried out to verify the influence of these five factors on the tensile force and residual height of the solder joints by using visual analysis and variance analysis. The results show that the influencing factors on the residual height of the solder joints from the primary to secondary are waveform, pulse frequency, average power, speed and spiral line spacing, the influencing factors on the tensile force of the solder joints from the primary to secondary are average power, pulse frequency, waveform, speed and spiral line spacing. And through the orthogonal test method, more and better welding parameters can be found.

Key words nanosecond laser welding; stainless steel; aluminum alloy; orthogonal test

0 引言

目前, 激光焊接由于其优秀焊接性能, 已经应用于航空航天、核能设备、汽车医疗等领域^[1-4], 在汽车白车身焊接已经实现了全自动化焊接^[5-6]。由于其成本较高, 实现自动化难度较大, 而小功率激光器, 如毫秒激光器、纳秒激光器等, 在超薄板领域有着广泛的应用^[7-11], 利用激光焊接特有的强度高、速度快、变形小的优异性能, 已经广泛应用于新能源、电脑、手机、精密加工等领域。研究者已经研究了不锈钢同种材料的焊接工艺, 以及不锈钢与紫铜异种材料焊接工艺, 探究了激光功率、焊接速度和离焦量对焊缝强度硬度的影响^[12-13]。

本文采用 Raycus100W 的纳秒光纤激光器焊接 301 不锈钢薄片和 6063 铝合金薄片, 焊接方式采用螺旋线图形进行激光点焊, 研究激光器波形、脉冲频率、平均功率、速度、螺旋线间距对焊点拉力和余高的影响程度, 探究其影响机理, 从而便于实际应用中得到更优的焊点和焊缝, 并提高生产效率。

1 实验方法

1.1 试验材料及设备

实验材料采用尺寸为 0.2 mm 厚的 301 不锈钢和 0.2 mm 厚的 6063 铝合金, 其尺寸规格是 50 mm × 30 mm, 试验采用 Raycus100W 纳秒光纤激光器进行叠焊, 不锈钢片在上面, 铝片在下面。实验设备

收稿日期: 2018-01-25; 收到修改稿日期: 2018-06-04

作者简介: 王树勇(1990-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事激光焊接工艺的研究。E-mail: wangshuyong123@163.com

如图 1 所示,其最大输出功率为 100 W,脉宽范围 10~240 ns。



图 1 Raycus 100 W 纳秒光纤激光器
Fig.1 Raycus 100 W nanosecond fiber laser

设备的参数如表 1 所示,该锐科激光器主要有 8 个波形及脉宽,在进行正交试验时,由于激光器波形自身的限制,不能进行等脉宽间距的选取,因此主要选中间的五个脉宽参数(40、58、100、130 和 160 ns)。

1.2 实验方案设计

纳秒焊接是采用低脉冲宽度的脉冲激光,在高频率脉冲作用下,通过填充图形,如螺旋线形成焊点,焊点直径为 0.5 mm,螺旋线如图 2(a)所示,扫描振镜的 X 轴、Y 轴在软件运动控制系统下联合运动,完成软件上设置的图形轨迹,同时软件控制系统给激光器持续出光信号,激光器出光焊接,由于激光器为脉冲激光器,每次触发为单个脉冲点,实际出光焊接的点如图 2(b)所示。

表 1 Raycus 100 W 激光器设备参数表

Tab.1 Raycus 100 W laser equipment parameter table

Waveform	PRF 0 /kHz	PRF max /kHz	Pulse energy max /mJ	Pulse width at 50% /ns	Pulse width at 10% /ns	Peak power /kW
0	70	1 000	1.00	46	240	13
4	105	1 000	0.69	38	160	11
6	119	1 000	0.61	35	130	11
10	144	1 000	0.50	30	100	10
14	179	1 000	0.40	33	58	10
19	245	1 000	0.29	32	40	10
25	490	1 000	0.15	16	20	9
28	999	1 000	0.07	9	10	7

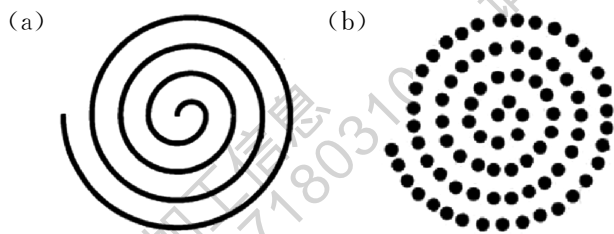


图 2 纳秒激光焊接轨迹图
(a)软件上设置的图形 (b)激光焊接的图形
Fig.2 Nanosecond laser welding trajectory

试验使用 Raycus 纳秒光纤激光器采用点焊的方式进行叠焊,焊点图形是螺旋线,直径为 0.5 mm,焊接 7 个点,由中心分别向两侧的顺序进行焊接,并加焊接延时减少相邻焊点之间的热影响,点与点中心距离为 1 mm,焊接后测量七点拉力,并测量焊点的余高。

焊接试验后主要检测焊点的 7 点拉力和余高,

为了降低人为误差,对薄片进行拉力测试标准化,如图 3 所示,焊点离薄片边缘 5 mm,焊点离薄片折弯夹持端 10 mm。焊点余高用激光共聚焦扫描显微镜进行测量。

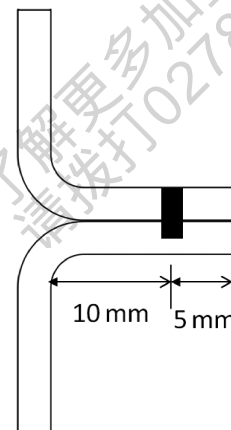


图 3 拉力测试标准化
Fig.3 Standardization of tensile testing

1.3 正交试验方法

本次试验着重研究波形脉宽、脉冲频率、平均功率、焊接速度和螺旋线间距对焊点拉力及余高的影

响程度和采用五因素五水平正交试验,试验根据五因素五水平表进行,工艺参数如表 2 所示。

表 2 正交试验工艺参数
Tab. 2 Orthogonal test process parameters

Symbol	Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
A	Pulse width/ns	40	58	100	130	160
B	Frequency/kHz	500	600	700	800	900
C	Average power/W	60	65	70	75	80
D	Speed/(mm/s)	180	200	220	240	260
E	Spacing/mm	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060

2 实验结果及分析

2.1 试验结果

依据正交表进行了 25 组焊接试验,测量焊接后拉力和余高,测试结果如表 3 所示。

表 3 正交试验结果

Tab. 3 Results of orthogonal test

Orthogonal test No. (ABCDE)	Pull strength /kgf	Reinforcement / μm
1(1,1,1,1,1)	8.90	90
2(1,2,2,2,2)	8.00	90
3(1,3,3,3,3)	8.31	80
4(1,4,4,4,4)	9.59	79
5(1,5,5,5,5)	5.25	75
6(2,1,2,3,4)	8.76	102
7(2,2,3,4,5)	8.24	53
8(2,3,4,5,1)	8.65	47
9(2,4,5,1,2)	0.56	75
10(2,5,1,2,3)	9.26	46
11(3,1,3,5,2)	8.50	66
12(3,2,4,1,3)	1.00	63
13(3,3,5,2,4)	3.25	74
14(3,4,1,3,5)	0.71	13
15(3,5,2,4,1)	4.62	0
16(4,1,4,2,5)	9.98	60
17(4,2,5,3,1)	5.17	45
18(4,3,1,4,2)	0.69	15
19(4,4,2,5,3)	0.63	19
20(4,5,3,1,4)	9.66	21
21(5,1,5,4,3)	8.45	62
22(5,2,1,5,4)	0.00	7
23(5,3,2,1,5)	9.27	16
24(5,4,3,2,1)	9.43	36
25(5,5,4,3,2)	8.06	26

不锈钢与铝合金薄片的叠焊焊接要求是在满足余高低于 $50\ \mu\text{m}$ 的情况下尽可能得到最大拉力,通过正交试验结果可以看出,8[#]、10[#]、20[#]、23[#]、24[#]和 25[#] 在满足余高要求按前提下,拉力均可以达到 8 kgf 以上。这六组试验既有小脉宽和大脉宽下参数,又有不同速度与频率下的参数,而对于不锈钢和铝合金的叠焊,既可以在低脉宽高峰值高速下,通过高峰值将不锈钢扎入铝合金薄片并得到一定的熔深,同时用低脉宽和高的焊接速度可以降低热量累积,避免导致铝合金过烧,得到合适的拉力和余高;也能通过大脉宽低峰值低速下,通过一定的热量累积,将不锈钢扎入铝合金薄片,从而得到合适的拉力余高。因此通过正交试验方法可以在不同波形脉宽下找到符合要求的焊接参数。

2.2 正交试验直观分析

在正交试验的 25 组试验中,因素 A(脉宽)取水平 1(Pulse width=40 ns)的共有 5 组试验,将这 5 次试验的拉力和余高分别进行累加得统计量 K_{1A} ,同理将各因素在各水平下的试验结果叠加,结果如表 4 所示。

表 4 中 R 为极差,为同一因素在不同水平下的 K_i 值中最大与最小值之差。 R 值描述了分散程度的大小, R 值越大,表明该因素对指标的影响大;反之, R 值小表明该因素对指标的影响小。从表 4 可知,对余高指标的影响因素由主到次依次为脉宽、脉冲频率、平均功率、速度和螺旋线间距;对拉力指标的影响因素由主到次为平均功率、脉冲频率、脉宽、速度和螺旋线间距。作出因素水平与指标的折线图,如图 4 所示。

表 4 正交试验直观分析表

Tab. 4 Visual analysis table of orthogonal test

Target	Statistical magnitude	Factor				
		Pulse width /ns	Frequency /kHz	Average power /W	Speed /(mm/s)	Spacing /mm
Pull strength /kgf	K_1	8.010	8.918	3.912	5.878	7.354
	K_2	7.094	4.482	6.256	7.984	5.162
	K_3	3.616	6.034	8.828	6.202	5.530
	K_4	5.226	4.184	7.456	6.318	6.252
	K_5	7.042	7.370	4.536	4.606	6.690
	R	4.394	4.734	4.916	3.378	2.192
Reinforcement /mm	K_1	82.8	76.0	34.2	53.0	52.4
	K_2	64.6	51.6	45.4	61.2	53.0
	K_3	43.2	46.4	51.2	53.2	40.5
	K_4	32.0	44.0	55.0	41.8	50.4
	K_5	29.4	33.6	66.2	42.8	58.2
	R	53.4	42.4	32.0	19.4	17.7

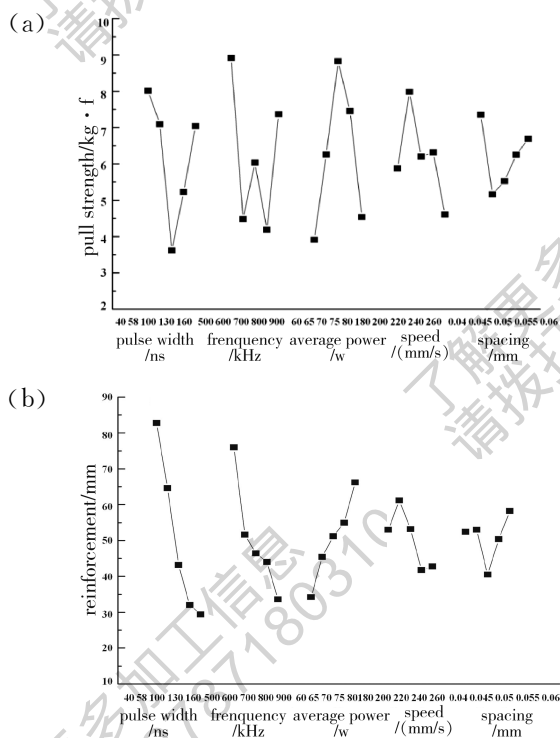


图 4 因素水平和指标的关系图

(a) 拉力指标 (b) 余高指标

Fig. 4 The relationship between factor level and index

2.3 正交试验方差分析

直观分析法通过计算分散程度,计算因素对指标的影响程度,非常方便迅速,但不能把实验条件的改变而引起的数据波动同实验误差引起的数据波动区分开,而方差分析一部分反映因素水平变化引起的波动,另一部分反映实验误差引起的波动^[14]。

方差分析结果如表 5 所示, S 是指偏差平方和; f 是指自由度; V 是指平均偏差平方和。其中, $f=n-1$, n 为正交试验的水平数; $V=S/f$,通过平均偏差平方和 V 反映不同组数据的分散或集中程度。实验得出在 $\alpha=0.05$ (α 为信度) 显著水平下,指标为拉力时,频率和平均功率分散程度较大,说明频率和平均功率对拉力的影响比较显著;指标为余高时,脉宽和频率对余高的影响比较大,且脉宽对余高的影响最为显著。

表 5 正交试验方差分析表

Tab. 5 Variance analysis table of orthogonal test

Target	Factor	S	f	V
Pull strength	Pulse width	62.050	4	15.51
	Frequency	78.999	4	19.75
	Average power	82.454	4	20.61
	Speed	29.205	4	7.30
	Spacing	15.504	4	3.88
Reinforcement	Pulse width	10 414.0	4	2 603.50
	Frequency	4 955.2	4	1 238.80
	Average power	2 794.4	4	698.60
	Speed	1 314.8	4	328.70
	Spacing	813.2	4	203.30

通过对比表 4 和表 5,通过平均偏差平方和极差计算五个因素对拉力和余高的分散程度规律是一致的,因此通过直观分析和方差分析均能计算出脉宽、脉冲频率、平均功率、速度和螺旋线间距五个因素对拉力和余高影响的主次关系,且通过方差分析

可以比较五个因素对拉力和余高的影响程度。

2.4 理论分析研究

对不锈钢与铝合金的叠焊焊点做切片,如图5所示,图5(a)是焊点实际切片形貌,焊点截面呈锯齿形,图5(b)是焊点截面的示意图,不锈钢和铝合金的厚度均为0.2 mm。

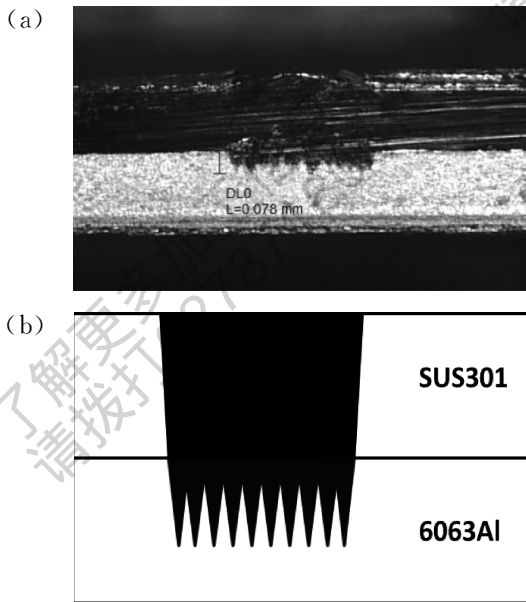


图5 不锈钢与铝合金叠焊焊点截面形貌
(a)焊点实际切片形貌 (b)焊点截面示意图
Fig.5 Cross-section morphology of stitch welding solder joint of stainless steel and aluminium alloy

焊点拉力主要取决于材料的结合强度和接触面积,由于焊接方式和焊接材料一致,因此材料的结合强度基本是一致的,焊点拉力大小主要取决于接触面积以及下层材料的剪切力。对接触面积最直接的影响因素是焊点熔深,当熔深较小,随着熔深增大,接触面积随之增大,拉力也会不断增大;当熔深达到一定深度时,接触面积变化不大,焊点拉力基本保持稳定不变;当熔深较深时,在焊点拉拔过程中,焊点处下层材料由于剪切面积较小导致直接被剪切掉,焊点拉力反而变小。影响焊点熔深的主要因素是峰值功率,峰值功率越大,焊点熔深越深。影响焊接峰值功率的主要因素是平均功率,其次是脉冲频率,峰值功率随平均功率呈正比例变化,脉冲频率与峰值功率呈接近反比关系,脉冲频率越高,峰值功率越小,但脉冲焊接次数会增多,接触面积会有所增大。脉宽指单个脉冲的作用,脉宽越大,每个脉冲的焊点越宽,接触面积会有所增大,拉力随着增大,当每个脉冲的焊点宽度超过螺旋线间距,接触面积反而会

减小。焊接速度主要影响焊接图形上焊点的疏密,当速度降低时,焊接图形上相邻脉冲焊点的间距会变小,接触面积会有所增大,当焊接速度降低一定值,随着速度进一步降低,接触面积反而会减小,也会导致焊点过烧,拉力反而会降低。

焊点余高主要取决于脉冲激光焊接的熔融量。由于金属材料固态转变熔融态时体积会增大,金属材料的熔融量越大,体积增大越明显,因此凝固后的余高越大。影响焊接熔融量的主要因素是单脉冲能量,其次是焊点的累积能量。图6所示是用示波器测量的锐科激光器波形图,横坐标为时间,纵坐标为功率,一个波形宽度就是脉宽,一个波形面积就是单脉冲能量,因此影响单脉冲能量的因素主要是脉宽、脉冲频率和焊接功率。脉宽增大,单脉冲能量越大,余高越大;脉冲频率对余高有双重影响,一方面在平均功率恒定情况下,随着频率增大,单脉冲能量会减小,余高随之减小,另一方面随着频率增大,累积焊点的数量会增多,余高会有小幅增大;在频率保持不变情况下,焊接平均功率越大,单脉冲能量越大,余高越大。焊接速度和螺旋线间距主要累积焊点的数量,焊接速度越快,累积焊点数量越少,余高小幅减小;螺旋线间距越小,累积焊点数量越多,余高会有小幅增大。



图6 锐科激光器波形图(58 ns,500 kHz)
Fig.6 Waveform of Raycus laser(58 ns,500 kHz)

3 结论

对于不锈钢和铝合金的纳秒激光焊接,其焊点余高的影响因素由主到次依次为脉宽、脉冲频率、平均功率、速度、螺旋线间距;对拉力指标的影响因素由主到次为平均功率、脉冲频率、脉宽、速度、螺旋线间距。并且通过正交试验方法,可以找到不同波形脉宽下符合试验要求的焊接参数,可以提高调试效率。

参考文献

- [1] 王新明,康凯,冯小东. 激光焊接与传统焊接的区别及比较分析[J]. 产业与科技论坛,2016,15(24):55-56.
- [2] 王家淳. 激光焊接技术的发展与展望[J]. 激光技术,2001,25(1):48-54.
- [3] 张文毓. 激光焊接技术的研究现状与应用[J]. 新技术新工艺,2009(1):48-51.
- [4] 徐炜,李章. 大功率激光焊接技术及其工业应用[J]. 机械工人,2005(3):32-36.
- [5] 陈颢. 汽车白车身激光焊接质量影响因素研究[D]. 长沙:湖南大学,2011.
- [6] 黎爱琼,阮小进. 汽车白车身激光焊接生产线自动化系统研究[J]. 轻工科技,2016(4):36-37.
- [7] 孙加强. 紫铜激光焊接工艺及应用研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2015.
- [8] 赵方东. 毫秒脉冲激光对金属和半导体材料热损伤的研究[D]. 成都:四川大学,2007.
- [9] LUO C,LIN L. The application of nanosecond-pulsed laser welding technology in MEMS packaging with a shadow mask[J]. Sensors & Actuators A Physical,2002,97(1):398-404.
- [10] FORTUNATO A,ASCARI A,ORAZI L,et al. Numerical simulation of nanosecond pulsed laser welding of eutectoid steel components[J]. Optics & Laser Technology,2012,44(7):1999-2003.
- [11] ASCARI A,FORTUNATO A. Nanosecond pulsed laser welding of high carbon steels[J]. Optics & Laser Technology,2014,56(1):25-34.
- [12] 李旭. 纳秒激光焊接紫铜与不锈钢工艺研究[J]. 应用激光,2017,37(2):247-250.
- [13] 吴晓红. 不锈钢纳秒激光与毫秒激光焊接工艺研究[J]. 应用激光,2017,37(4):540-543.
- [14] 栾军. 试验设计的技术与方法[M]. 上海:上海交通大学出版社,1987:50-58.