

不锈钢与钛合金纳秒激光焊接工艺研究

王丽¹, 谢非²

(1. 中山职业技术学院, 广东 中山 528404; 2. 明阳智慧能源集团股份公司, 广东 中山 528400)

摘要: **目的** 针对不锈钢与钛合金异种金属焊接时, 容易产生间化合物, 导致焊点拉力低的现象, 通过纳秒激光焊接工艺来提高不锈钢与钛合金异种金属焊接的焊点拉力。**方法** 采用纳秒光纤激光器进行 304 不锈钢与 TC4 钛合金的焊接实验, 通过激光运行螺旋线组成焊点, 并对工艺参数进行正交试验, 得到焊点拉力最大的工艺参数。**结果** 当激光功率为 90 W, 激光频率为 600 kHz, 焊接速度为 200 mm/s, 螺旋线间距为 0.04 mm, 脉冲时间为 10 ns 时, 得到焊点拉力最大, 为 29 N。**结论** 采用纳秒光纤激光器进行不锈钢与钛合金的焊接时, 由于激光与材料作用的时间极短, 约为 10 ns, 熔池的温度也相对较低, 产生的间化合物来不及生长, 从而极大提高了焊点的拉力。

关键词: 纳秒激光器; 不锈钢; TC4 钛合金; 激光焊接

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.022

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)04-0149-05

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

WANG Li¹, XIE Fei²

(1. Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528404, China;

2. Mingyang Smart Energy Group Co., Ltd., Zhongshan 528400, China)

ABSTRACT: During stainless steel and titanium alloy dissimilar metal welds, it was easy to produce inter-compound, resulting in low solder joint tension. This paper aims to improve the tension of the welding spot. The welding experiment of 304 stainless steel and TC4 titanium alloy was carried out using nanosecond laser. The welding spot was composed of laser running helix. Through orthogonal experiment on the process parameters, the maximum welding force was obtained. When the laser power was 90 W, the laser frequency was 600 kHz, the welding speed was 200 mm/s, the helix spacing was 0.04 mm, and the pulse time was 10 ns, the maximum solder joint tension was 29 N. When stainless steel and titanium alloy were welded using nanosecond fiber laser, the time of laser and material action was very short, which was 10 ns, the temperature of the molten pool was relatively low, and the produced inter-compound was too late to grow, which can greatly improve the tension of the weld spot.

KEY WORDS: nanosecond laser; stainless steel; TC4 titanium alloy; laser scanning

TC4 钛合金具有较低的密度 (4.43 g/cm³), 是非常重要的轻质合金, 而且具有高比强度、良好的耐高温性以及耐腐蚀性, 在大多数酸、碱、盐环境中不容易被腐蚀, 被广泛应用于航天航空、汽车制造等领域^[1-3], 但是 TC4 钛合金的焊接和机械加工性能

较差, 而且制造成本较高, 使其应用受到了一定的限制^[4]。304 不锈钢具有优良的焊接性、耐磨性, 而且制造成本较低^[5-7], 但是 304 不锈钢在耐高温及耐蚀性方面远不如钛合金, 而且密度 (7.62 g/cm³) 较大。随着生产技术的进一步发展, 对产品的使用性能

收稿日期: 2021-02-25

基金项目: 中山市 2020 年省科技专项资金 (2020sdr004)

作者简介: 王丽 (1983—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为理化测试与质检技术、焊接技术及自动化。

以及成本控制方面均提出了更高的要求,需要采用钛合金和不锈钢材料组合形成结构件,焊接是实现两者之间组合的最佳方式。由于钛合金和不锈钢材料在物理性能以及化学成分之间差异较大,传统的焊接,如氩弧焊、电子束焊、电阻焊均无法达到理想的焊接效果。激光焊接技术具有热输入少,焊接后变形小,焊接强度大,容易实现自动化生产^[8-15]的优点,已经在生产中得到大量应用,但是激光焊接钛合金/不锈钢时,会在两种材料之间形成间化合物,这种间化合物是脆性的,会降低焊缝的强度。一般采用在钛合金/不锈钢之间添加过渡层材料,来降低间化合物,提高焊缝强度,但是添加过渡层需要增加生产工序,增加生产成本。纳秒激光器每个脉冲的出光时间很短,为 ns 级,与传统光纤激光器(连续出光)以及 Nd: YAG 固体激光器(每个脉冲出光时间为 ms 级)有极大差异,在不锈钢与铝合金异种金属焊接方面取得了较好的效果^[16]。截至目前,未见有采用纳秒激光对不锈钢/钛合金进行焊接的报道出现。

文中采用纳秒激光器对 304 不锈钢和 TC4 钛合金进行搭接焊接,提高焊点的拉力,为实际生产提供参考。

1 实验

1.1 设备

采用的激光器为纳秒光纤激光器,平均功率为

100 W,脉冲频率为 25~1000 kHz,波长为 1064 nm,每个激光脉冲的出光时间为 10~240 ns,激光束从激光器发出后,经过光纤进行传输,经过聚焦镜聚焦后,在激光焦点处的光斑直径为 0.04 mm,实验平台如图 1 所示。

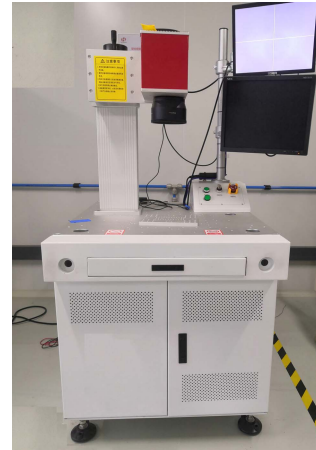


图 1 实验平台
Fig.1 Experimental platform

1.2 材料

材料为 304 不锈钢,厚度为 0.2 mm;TC4 钛合金,厚度为 0.5 mm。将材料切割成尺寸为 100 mm×50 mm 的板材,材料的化学成分见表 1。采用 304 不锈钢在上、TC4 钛合金在下的方式进行搭接焊接,采用自制工装夹具将待焊工件夹紧。

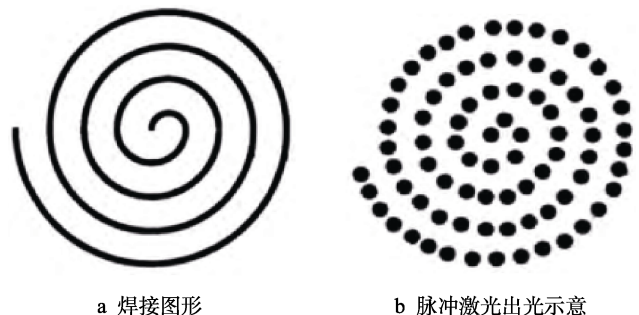
表 1 304 不锈钢和 TC4 钛合金的化学成分(质量分数)
Tab.1 Chemical composition of 304 stainless steel and TC4 Titanium alloy (mass fraction) %

材料	Fe	Al	Si	Cr	Ni	Mn	Ti	C	V
304 不锈钢	余量		≤1.0	18.0~20.0	8.0~10.5	≤1.0		0.08	0.0
TC4 钛合金	0.3	5.5					余量	0.08	3.5

2 实验过程及结果分析

2.1 方法

激光束在扫描振镜的引导下,在平面运行一个螺旋线图形,设置螺旋图形的直径为 1 mm,激光在产品上形成一个直径为 1 mm 的圆点即激光焊点,螺旋线图形如图 2a 所示。纳秒激光焊接时,激光能量是以脉冲的形式出光,激光束在运行螺旋线图形时,相当于多个脉冲激光形成的点连接成为了螺旋线,如图 2b 所示。由于激光频率较高,达到 kHz,焊接速度为 100~200 mm/s,多个脉冲激光形成的点会在螺旋线图形上进行重叠,产生热量堆积,温度升高,使焊接区域材料熔化形成熔池,激光离开后,熔池冷却凝固形成焊缝。



a 焊接图形 b 脉冲激光出光示意

图 2 焊接图形
Fig.2 Welding graphics

2.2 焊接预实验

纳秒激光焊接的工艺参数较多,为节约实验时间及样品,首先进行预实验。为获得较大的功率密度,采用激光焦点作用在产品表面的方式进行焊接,即离

焦量设置为 0。单个脉冲的出光时间最短为 10 ns，脉冲时间太长（超过 200 ns）的情况下，热影响较大，容易产生材料损伤，导致焊点拉力降低。激光在焦点处的光斑大小为 0.04 mm，螺旋线间距越小，两条螺旋线之间重叠越多，这样热量堆积越大，热影响区域较大，熔深较大；两条螺旋线之间的间距越大，两条螺旋线之间几乎无重叠，这样热量堆积较小，热影响区域较小且熔深较小，设置螺旋线的间距分别为 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06 mm。焊接速度是指激光运行螺旋线图形的速度，焊接速度越快，热量堆积

越小，焊接速度越慢，热量堆积越小。激光频率为 kHz 级，频率越高，单位时间内脉冲数量越多，反之，频率越低，单位时间内的脉冲数量越低。为了达到焊点的拉力最大，对激光功率、激光频率、焊接速度、螺旋线间距、脉冲时间这 5 个因素进行正交试验，根据预实验的结果，每个因素分别取 5 个水平参数，如表 2 所示。

2.3 正交试验及直观分析

依据五因素五水平正交试验，共 25 组，对焊点

表 2 因素水平表
Tab.2 Factor level

因素	A 激光功率/W	B 激光频率/kHz	C 焊接速度/(mm·s ⁻¹)	D 螺旋线间距/mm	E 脉冲时间/ns
1	60	500	120	0.02	10
2	70	600	140	0.03	20
3	80	700	160	0.04	40
4	90	800	180	0.05	60
5	100	900	200	0.06	100

表 3 正交试验及结果
Tab.3 Analysis of orthogonal experiment

编号	A 激光功率/W	B 激光频率/Hz	C 焊接速度/(mm·s ⁻¹)	D 螺旋线间距/mm	E 脉冲时间/ns	焊点拉力/N
1	60	500	120	0.02	10	19
2	60	600	140	0.03	20	15
3	60	700	160	0.04	40	24
4	60	800	180	0.05	60	15
5	60	900	200	0.06	100	11
6	70	500	140	0.04	60	22
7	70	600	160	0.05	100	19
8	70	700	180	0.06	10	16
9	70	800	200	0.02	20	12
10	70	900	120	0.03	40	25
11	80	500	160	0.06	20	23
12	80	600	180	0.02	40	11
13	80	700	200	0.03	60	14
14	80	800	120	0.04	100	23
15	80	900	140	0.05	10	25
16	90	500	180	0.03	100	20
17	90	600	200	0.04	10	29
18	90	700	120	0.05	20	21
19	90	800	140	0.06	40	22
20	90	900	160	0.02	60	17
21	100	500	200	0.05	40	13
22	100	600	120	0.06	60	19
23	100	700	140	0.02	100	14
24	100	800	160	0.03	10	22
25	100	900	180	0.04	20	16

进行拉力测试,当激光功率为 90 W,激光频率为 600 kHz,焊接速度为 200 mm/s,螺旋线间距为 0.04 mm,脉冲时间为 10 ns 时,焊点拉力达到最大的 29 N,此时的工艺参数为最佳工艺参数。

对正交试验的 25 组焊点拉力结果进行直观分析,因素 A(激光功率)取水平 1(60 W)的共 5 组,将这 5 组试验的拉力值进行累加得统计量 K_1 ,同理

将各因素在各水平下的试验结果叠加,如表 4 所示,其中同一因素在不同水平下的 K 值中最大与最小值之差为极差 R , R 值越大,表明该因素对焊点拉力指标的影响越大;反之, R 值小表明该因素对焊点拉力指标的影响小。从表 4 可知,对焊点拉力指标的影响因素由主到次,依次为螺旋线间距、焊接速度、激光功率、脉冲时间以及激光频率。

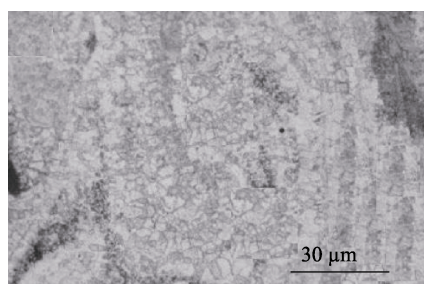
表 4 正交试验直观分析表
Tab.4 Visual analysis table of orthogonal test

目标	统计数据	A 激光功率/W	B 激光频率/Hz	C 焊接速度/(mm·s ⁻¹)	D 螺旋线间距/mm	E 脉冲时间/ns
焊点拉力值/N	K_1	84	97	107	73	111
	K_2	94	93	98	96	87
	K_3	96	89	105	114	95
	K_4	109	94	78	93	87
	K_5	84	94	79	91	87
	R	25	8	29	41	24

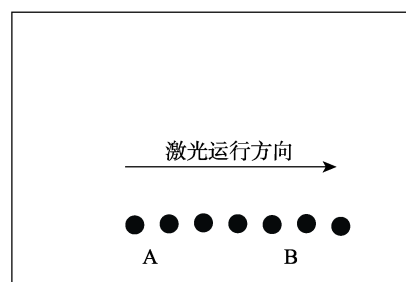
2.4 纳秒激光焊缝微观结构分析

图 3a 为 304 不锈钢与 TC4 钛合金在最佳工艺参数条件下的激光焊接焊缝区微观组织,主要由块状的灰色区组成,通过 EDS 对焊缝中元素进行分析,结果为含有 44.21%的 Fe,43.56%的 Ti,6.98%的 Ni,5.41%的 Cr(质量分数),结合 Ti-Fe 二元相图分析,焊缝中组织主要由 Ti 和 Fe 相组成,没有间化合物 $TiFe_2$ 存在。熔池的最高温度和冷却速率决定了焊缝中金属间化合物的生长速度以及宽度^[17],熔池的温度

越高以及冷却速率越大,产生间化合物的速度及宽度将越大。纳秒激光焊接过程中,激光脉冲时间为 10 ns,激光与材料作用的时间很短,熔池的温度相对较低,产生的间化合物来不及生长,纳秒激光焊接也可称为“低温焊接”。另外,由于采用的是脉冲激光持续运行轨迹(螺旋线),如图 3b 所示,当激光到达出光位置 B 时,会对后面的熔池 A 区域,进行持续的传输热量,起到对熔池 A 区域进行保温的作用,这样熔池的冷却速率大幅降低,将抑制间化合物的生长。间化合物的减少,将有利于提高焊点的拉力。



a 焊点焊缝的微观结构



b 激光加热示意

图 3 焊点焊缝的微观结构及激光加热示意

Fig.3 Microstructure of welds and laser heating schematic

3 结论

采用纳秒激光器对 304 不锈钢与 TC4 钛合金进行焊接形成焊点,通过正交优化试验,焊点拉力达到最大的 29 N,焊点拉力直观分析结果表明,影响焊点拉力的因素由主到次,依次为螺旋线间距、焊接速度、激光功率、脉冲时间以及激光频率。

焊缝微观结构分析结果表明,由于激光脉冲时间

为 10 ns,激光与材料作用的时间很短,熔池的温度相对较低,有利于抑制间化合物的生长,进而提高焊点的拉力。

参考文献:

- [1] 王林青,周永涛,王军军,等. TC4 钛合金在模拟海水中腐蚀-磨损交互行为研究[J]. 摩擦学学报, 2019,

- 39(2): 78—84.
WANG Lin-qing, ZHOU Yong-tao, WANG Jun-jun, et al. Corrosion-Wear Interaction Behavior of TC4 Titanium Alloy in Simulated Seawater[J]. Tribology, 2019, 39(2): 78—84.
- [2] 姜军, 李细锋, 陈军. 脉冲电流频率对退火态 TC4 钛合金耐腐蚀性能的影响[J]. 模具技术, 2018(4): 1—7.
JIANG Jun, LI Xi-feng, CHEN Jun. Effect of Pulse Current Frequency on Corrosion Resistance of Annealed TC4 Titanium Alloys[J]. Die and Mould Technology, 2018(4): 1—7.
- [3] 蔡雨升, 吉海宾, 雷家峰, 等. 热处理对激光选区熔化 TC4 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2020, 37(1): 9—16.
CAI Yu-sheng, JI Hai-bin, LEI Jia-feng, et al. Influence of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Titanium Industry Progress, 2020, 37(1): 9—16.
- [4] 陆鑫. TC4 钛合金 TIG 焊接头组织及缺陷分析[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(4): 74—79.
LU Xin. Microstructures and Defect Analysis of TC4 Titanium Alloy Joints by the TIG Welding[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(4): 74—79.
- [5] 李滋亮, 刘剑桥, 任森栋, 等. 尺寸因素对 SUS304 不锈钢残余应力和焊接变形的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(10): 59—67.
LI Zi-liang, LIU Jian-qiao, REN Sen-dong, et al. Influences of Dimension Factors on Residual Stress and Welding Distortion in SUS304 Stainless Steel Butt Joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 59—67.
- [6] 王成, 江峰, 王福会. 3.5%NaCl 溶液中 AISI304 不锈钢的电化学行为及有机硅涂层的防护[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(4): 200—203.
WANG Cheng, JIANG Feng, WANG Fu-hui. Electro-Chemical Behavior of 304 Stainless Steel in 3.5% NaCl Solution and Its Protection by Organic Silicon Paint[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2003, 15(4): 200—203.
- [7] 叶陈清, 胡融刚, 侯瑞青. 敏化处理 304 不锈钢局部腐蚀行为的扫描微电极法研究[J]. 电化学, 2013, 19(6): 507—511.
YE Chen-qing, HU Rong-gang, HOU Rui-qing. Localized Corrosion Behavior of Sensitized 304 Stainless Steel by Scanning Reference Electrode Technique[J]. Journal of Electrochemistry, 2013, 19(6): 507—511.
- [8] 徐甄真, 董志强, 余钊辉, 等. 不同焊速下 Ti6Al4V 激光焊接头显微硬度、组织和晶粒取向联系[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2020, 30(5): 1277—1289.
XU Zhen-zhen, DONG Zhi-qiang, YU Zhao-hui, et al. Relationships between Microhardness, Microstructure, and Grain Orientation in Laser-Welded Joints with Different Welding Speeds for Ti6Al4V Titanium Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(5): 1277—1289.
- [9] 王廷, 张秉刚, 陈国庆, 等. 钛/钢异种金属焊接存在问题及研究现状[J]. 焊接, 2009(9): 29—33.
WANG Ting, ZHANG Bing-gang, CHEN Guo-qing, et al. Problems and Research Status of Welding of Dissimilar Metals between Titanium Alloy and Steel[J]. Welding & Joining, 2009(9): 29—33.
- [10] 牛靖, 张恩涛, 吕玉海, 等. X70 大变形管环焊接头及断裂机制研究[J]. 精密成形工程, 2020, 12(1): 86—91.
NIU Jing, ZHANG En-tao, LYU Yu-hai, et al. X70 Large Deformed Pipe Ring Welded Joint and Fracture Mechanism[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(1): 86—91.
- [11] 刘键, 石岩, 刘佳, 等. 保护气体对奥氏体不锈钢激光焊接的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2014(5): 122—127.
LIU Jian, SHI Yan, LIU Jia, et al. Effect of Shielding Gas on Laser Welding of Austenitic Stainless Steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014(5): 122—127.
- [12] 耿志杰, 王善林, 陈玉华, 等. 不同填充材料下 316LN/Inconel 718 异种激光焊接头的显微组织与力学性能[J]. 精密成形工程, 2019, 11(5): 71—77.
GENG Zhi-jie, WANG Shan-lin, CHEN Yu-hua, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 316LN/Inconel 718 Dissimilar Alloy Laser Welding Joint with Different Filling Materials[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(5): 71—77.
- [13] 李扬, 胡绳荪, 申俊琦. 紫铜与 316L 不锈钢脉冲激光焊微观组织及力学性能[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 93—98.
LI Yang, HU Sheng-sun, SHEN Jun-qi. Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Pulsed Nd: YAG Laser Welded Copper and 316L Stainless Steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 93—98.
- [14] 王红阳, 李权, 宋刚, 等. 基于铜合金中间层的钛合金与不锈钢激光-电弧复合热源焊接研究[J]. 激光加工与应用, 2016, 43(5): 38—44.
WANG Hong-yang, LI Quan, SONG Gang, et al. Laser-Arc Hybrid Welding of Titanium Alloy and Stainless Steel with Copper Interlayer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 38—44.
- [15] 夏纯阳, 虞钢, 何秀丽, 等. 纯镍与 304 不锈钢激光异种焊接的工艺及其接头的组织性能[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(7): 87—92.
XIA Chun-yang, YU Gang, HE Xiu-li, et al. Laser Dissimilar Welding Process of Pure Nickel and 304 Stainless Steel and Microstructure and Properties of Welded Joint[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(7): 87—92.
- [16] 王树勇, 邹逢, 易鑫, 等. 不锈钢与铝合金纳秒激光焊接的工艺研究[J]. 应用激光, 2018, 38(5): 777—782.
WANG Shu-yong, ZOU Feng, YI Xin, et al. Technical Study on Nanosecond Laser Welding of Stainless Steel and Aluminum Alloy[J]. Applied Laser, 2018, 38(5): 777—782.
- [17] TOMASHCHUK Iryna. The Formation of Intermetallics in Dissimilar Ti6Al4V/Copper/AISI 316L Electron Beam and Nd: YAG Laser Joints[J]. Intermetallics, 2011, 19(10): 1466—1473.