

激光填粉焊接不锈钢板的性能

于永清¹, 鞠恒², 林成新^{2*}, 刘志杰², 田一鸣²

¹驻天津 707 所军事代表室, 天津 300131;

²大连海事大学交通运输装备与海洋工程学院, 辽宁 大连 116026

摘要 对 304 不锈钢板进行了激光填粉焊接试验,研究了不同焊接工艺参数对焊缝横截面形貌、抗拉强度、断口形貌的影响规律,并获得了最优工艺参数组合。结果表明,在试验范围内,焊缝宽度与激光能量密度正相关。从零离焦量向正、负离焦量变化时,上焊缝宽度增加,下焊缝宽度减小;低功率和零离焦量会降低试样的抗拉强度。焊接件抗拉强度随着焊接速度的增加呈先增大后减小的趋势;断口形貌随抗拉强度的增大依次表现为解理断裂台阶状,准解理断裂河流状,塑性断裂韧窝状。由正交试验得到的焊接最优工艺参数为:激光功率 2.7 kW,焊接速度 160 mm·min⁻¹,离焦量 +5 mm。

关键词 激光技术;激光填粉焊接;工艺参数;焊缝形貌;抗拉强度

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.121402

Property of Stainless Steel Plates by Laser Welding with Powder Filling

Yu Yongqing¹, Ju Heng², Lin Chengxin², Liu Zhijie², Tian Yiming²

¹Military Delegate Room, Tianjin-Based 707 Institute, Tianjin 300131, China;

²Transportation Equipments and Ocean Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China

Abstract The laser welding experiment of 304 stainless steels with powder filling is carried out, the effects of different laser welding process parameters on the cross-sectional morphology, tensile strength and fracture morphology of welding seam are studied, and the optimal process parameters are obtained. The results show that, in the experimental range, there is a positive correlation between the width of welding seam and the laser energy density. When the defocusing distance changes from zero to positive or negative value, the top welding seam width increases while the bottom welding seam width decreases. The low laser power and the zero defocusing distance can weaken the tensile strength of welding specimen. With the increase of welding speed, the tensile strength of specimens increases first and then decreases. With the increase of tensile strength, the fracture appearance is, in turn, manifested as a side-shaped cleavage fracture, a quasi river-like cleavage fracture, and an alveolate-dimpled plastic fracture. The optimal process parameters obtained from the orthogonal test are a laser power of 2.7 kW, a welding speed of 160 mm·min⁻¹, and a defocusing distance of +5 mm.

Key words laser technique; laser welding with powder filling; process parameters; weld morphology; tensile strength

OCIS codes 140.3510; 140.3390; 160.3900

1 引言

激光焊接是将高能量密度的激光束作为热源的一种高效精密焊接方法,具有热源能量密度高、焊接速度快、焊接变形小、无需真空加工环境、柔性好等^[1-2]优势,被广泛应用于航空航天、飞机、汽车、电子等领域^[3]。

收稿日期: 2017-05-22; **收到修改稿日期:** 2017-06-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(3132016354)

作者简介: 于永清(1966—),男,本科,高级工程师,主要从事船舶导航、激光加工技术方面的研究。

E-mail: yyq8357@sina.com

* **通信联系人.** E-mail: lchxin@dlnu.edu.cn

然而,常采用的不添加材料形式的激光焊接对焊接装配间隙、材料坡口加工精度要求高,且激光吸收率低^[4],制约了激光焊接技术的发展。激光填料焊接技术^[5]是在激光对工件进行加热的同时,采用添加材料的方式补充液态金属,解决了焊接件间隙过大、焊缝区液态连接金属过少和金属表面大幅度反射激光等问题,减少了焊缝的咬边、凹陷等缺陷,并提高了激光利用率。另外,添加粉末可控制焊缝成分及粉末与母材的冶金结合程度,改善焊缝金属组织,提高焊接接头性能。激光焊接材料的添加种类分为填丝和填粉。

奥氏体 304 不锈钢具有优良耐腐蚀性、无磁性、高韧性和高塑性等特点,大量应用于机械、航空航天、医疗器械、核工艺等领域,是激光焊接的常用材料^[6-8]。目前,不锈钢焊接多采用激光焊接^[9]和激光填丝焊接^[10]。虽然填丝与填粉均能得到良好的焊缝成形质量,提高接头性能,但是填丝焊接对送丝速度和方向的要求都非常严格,装夹定位时要求位置精确,且小间隙填丝焊接时易产生堵丝、定位不精准等问题;填粉焊接中粉末的输入量容易掌握,粉末的材料选用灵活方便,可根据实际焊接材料配置特定的粉末,故激光填粉焊接 304 不锈钢技术具有重要的研究意义。目前,激光填粉焊接的研究主要集中于焊接钛合金^[11-12]、铝合金^[13-14]和镁合金等稀有金属,关于 304 不锈钢材料的填粉焊接工艺的研究则鲜有报道。

本文选用 304 不锈钢板作为焊接母材,利用 CO₂ 激光器对母材进行激光填粉焊接试验。在不同激光焊接单因素工艺条件下,观察并测量焊接件的横截面形貌、抗拉强度和断口形貌。同时,以抗拉强度为评判标准,优化了激光填粉焊接工艺。

2 试验材料及方法

采用沈阳大陆激光成套设备有限公司生产的 DL-LPM-V 型 5 kW 横流 CO₂ 激光加工系统进行焊接试验,聚焦工具为铜抛物镜,焦距为 300 mm。试验材料为 2 mm 厚的 304 不锈钢,其成分见表 1。通过线切割方式,将钢板切成 100 mm×100 mm 的试样,焊接坡口厚度为 2 mm,坡口角度为 45°,试验前使用丙酮棉球擦拭钢板以清除油污。激光焊接添加的粉末为经过球磨和干燥处理的 Fe 基自熔性合金粉末。为了保证焊缝形貌均匀、性能稳定,利用自制刮板将厚度为 1 mm 的粉末对称预置于 304 不锈钢板的对焊中心处,激光填粉焊接过程如图 1 所示。

表 1 304 不锈钢组成(质量分数,%)

Table 1 Compositions of 304 stainless steel (mass fraction, %)

Element	Cr	Ni	Mn	Si	C	Fe
Content	18.14	8.71	1.148	0.404	0.069	Bal.

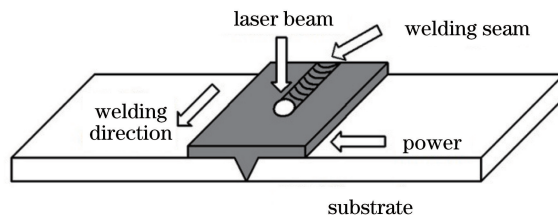


图 1 激光填粉焊接示意图

Fig. 1 Schematic of laser welding with powder filling

在激光焊接过程中,影响焊接件性能的主要工艺参数为激光功率、焊接速度和离焦量。在保证焊缝宏观形貌平整、粉末和焊接母材形成较好冶金结合的前提下,选用表 2 所示的参数研究单因素工艺对焊接件性能的影响。

利用线切割方式,沿激光焊接件焊缝中心将焊缝试样切割对称加工成尺寸为 20 mm×3 mm 的试样,经过冷镶、水磨处理后制备成金相试样,采用体积分数为 5% 的硝酸乙醇溶液对金相试样腐蚀后,利用德国 Lecia 公司生产的 OLYMPUS G×51 型金相显微镜观察试样横截面形貌。

激光填粉焊接后,将焊接接头制备成图 2 所示的拉伸试样,采用长春机械科学研究院有限公司生产的 SDS100 电液伺服疲劳试验机进行拉伸试验,加载速度为 2 mm·min⁻¹。利用德国 ZEISS 公司生产的 SUPRA55 场发射扫描显微镜观察拉伸断裂试样的断口形貌。

表 2 激光焊接单因素试验的工艺参数

Table 2 Process parameters of single factor experiments for laser welding

Test number	Laser power /kW	Welding speed /($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	Defocusing distance /mm
1#	2.0	150	0
2#	2.2	150	0
3#	2.4	150	0
4#	2.6	150	0
5#	2.8	150	0
6#	2.4	100	0
7#	2.4	125	0
8#	2.4	150	0
9#	2.4	175	0
10#	2.4	200	0
11#	2.4	150	-5
12#	2.4	150	-2.5
13#	2.4	150	0
14#	2.4	150	2.5
15#	2.4	150	5

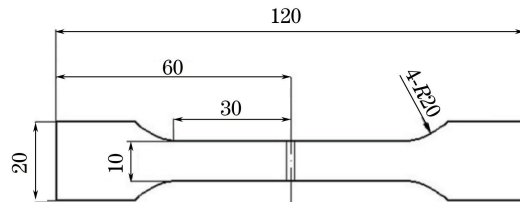


图 2 拉伸试样尺寸示意图

Fig. 2 Diagram of tensile specimen size

3 试验结果及讨论

3.1 焊接工艺对焊接件横截面形貌的影响

根据表 2 中不同工艺参数获得的焊缝横截面形貌如图 3 所示,并由焊缝形貌测得各横截面上、下焊缝宽度,结果如图 4 所示。

由图 4(a)可知,在其他工艺参数保持不变的情况下,随着激光功率的增加,光斑能量密度增大。由于基体和填充粉末的熔化量与光斑能量密度成正比,随着光斑能量密度的增大,更多金属熔化并在重力作用下向下移动,因此焊接件上、下表面焊缝变宽^[15]。观察 6#~10# 试样焊缝的横截面形貌和上、下表面焊缝宽度,可以发现,焊接速度的影响规律与激光功率的相反。当离焦量恒定时,焊缝吸收的能量由线能量表征,线能量与激光功率成正比,与扫描速度成反比,因此两者对横截面形貌和焊缝宽度的作用相反。当激光功率和焊接速度保持不变,离焦量由 0 mm 向 ± 5 mm 变化时,上焊缝宽度逐渐增大,下焊缝宽度逐渐减小。这是因为当离焦量由 -5 mm 向 +5 mm 变化时,激光焦点的位置由工件下方变化至工件上方,激光的能量密度先增大后减小,而 0 mm 离焦量处的线能量密度最大。在开坡口形式下,基体承载能力较小,当能量密度增加时,粉末熔化量增加,熔化金属受重力作用向下移动,焊缝下表面宽度逐渐变宽。当离焦量由 0 mm 向 ± 5 mm 变化时,粉末接收的能量密度较小,焊接母材熔化较少,熔化粉末受到未熔化母材的阻碍而不能向下移动,转而向焊缝两侧移动,导致焊缝上表面宽度增加。故由 0 mm 离焦量向 ± 5 mm 离焦量变化时,上焊缝宽度逐渐增大,下焊缝宽度逐渐减小。

3.2 焊接工艺对焊接件抗拉强度的影响

在不同工艺参数条件下,焊接件的抗拉强度如图 5 所示。试验中 304 不锈钢板抗拉强度的平均值为 750.789 MPa,各试样的抗拉强度均达到板材的 90%,满足焊接的基本要求。

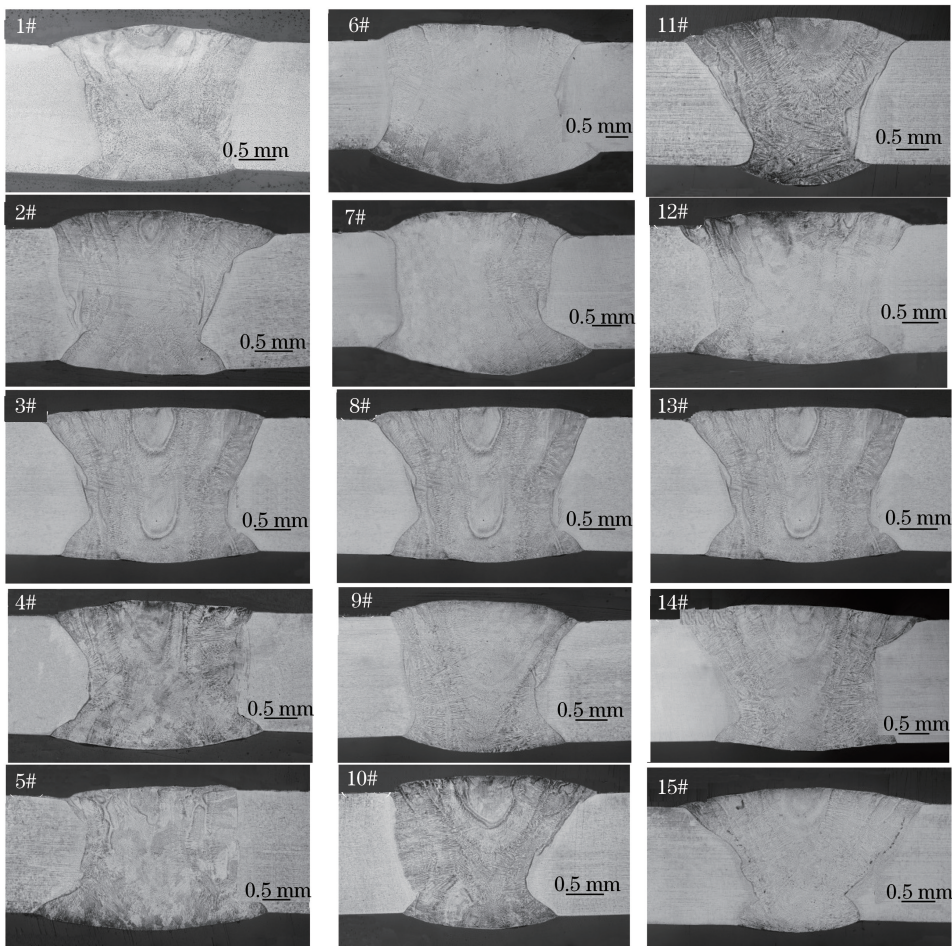


图 3 焊缝横截面形貌

Fig. 3 Cross sectional morphologies of welding seams

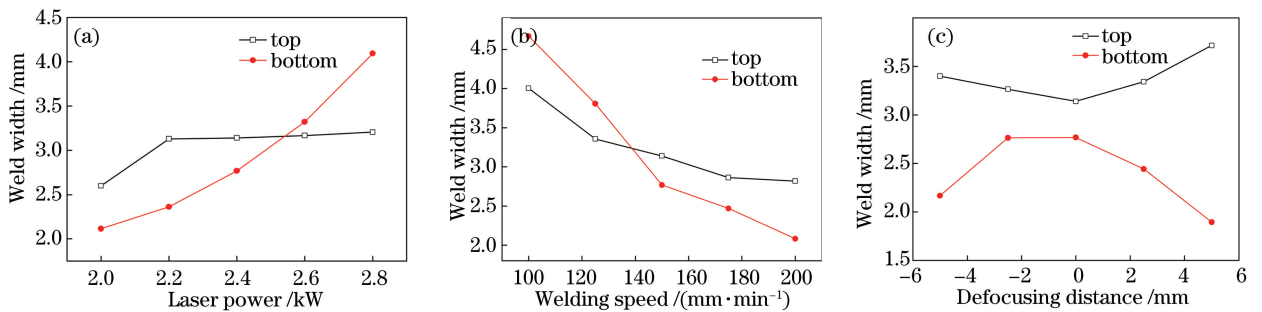


图 4 单因素工艺对焊缝熔宽的影响。(a)激光功率;(b)焊接速度;(c)离焦量

Fig. 4 Effect of single parameter on weld width. (a) Laser power; (b) welding speed; (c) defocusing distance

由图 5(a)可知,试样的抗拉强度随激光功率的增加呈逐渐增大的趋势。这是因为当激光功率较小时,焊缝吸收的能量较小,填充粉末和母材的冶金结合程度低,所以焊接件抗拉强度低;随着激光功率的增加,两者的结合程度增加,焊接件抗拉强度增大^[16]。观察图 5(b)发现,焊接件的最大抗拉强度在焊接速度为 $175 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的工艺条件下产生。这是因为过低的焊接速度会导致激光焊接线能量偏高,焊缝冷却时初始温度过高,冷却过程中焊缝晶粒粗大,所以焊接件的抗拉强度降低;而当焊接速度过快时,焊缝与母材的结合程度下降,焊接件的抗拉强度也会降低。由图 5(c)得到,在试验范围内,焊接件抗拉强度呈现由中间区域向两侧区域逐渐增大的趋势。在开坡口焊接的情况下,填充粉末较多会使焊接件抗拉强度对离焦量变化的

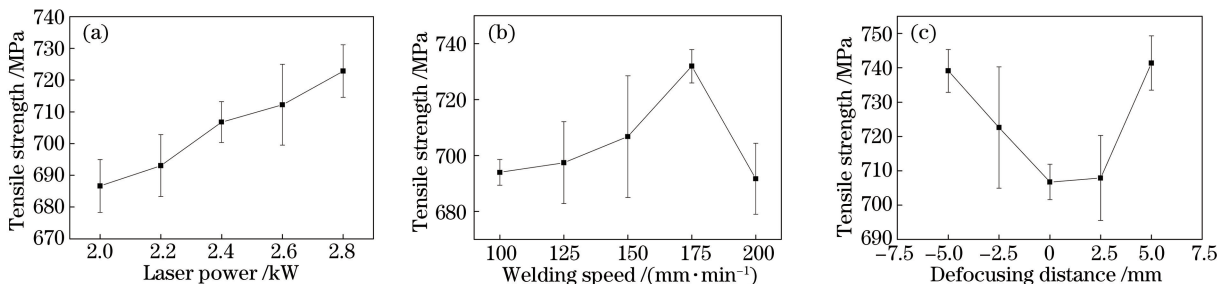


图 5 单因素工艺参数对焊接件抗拉强度的影响。(a)激光功率;(b)焊接速度;(c)离焦量

Fig. 5 Effects of single parameter on tensile strength of weldment.

(a) Laser power; (b) welding speed; (c) defocusing distance

敏感程度较高。当焊接件光斑直径为 0 mm 和 +5 mm 时,焊缝晶粒组织如图 6 所示,主要由树枝状晶构成^[17]。由于焊缝距离热影响区较远,其成分过冷度较大,而温度梯度较小,因此在晶体内部产生了一个很长的主干,并在四周生成了二次横枝。由图 6 可以看出,当离焦量为 0 mm 时,激光能量密度较高会导致焊缝晶粒粗大,焊接件的抗拉强度较低。随着激光光斑直径的增加,激光的能量密度减小,在保证焊接母材与粉末形成良好冶金结合的前提下,+5 mm 离焦量时焊缝组织得到细化,且均匀性较好,试样的抗拉性能得到提升。

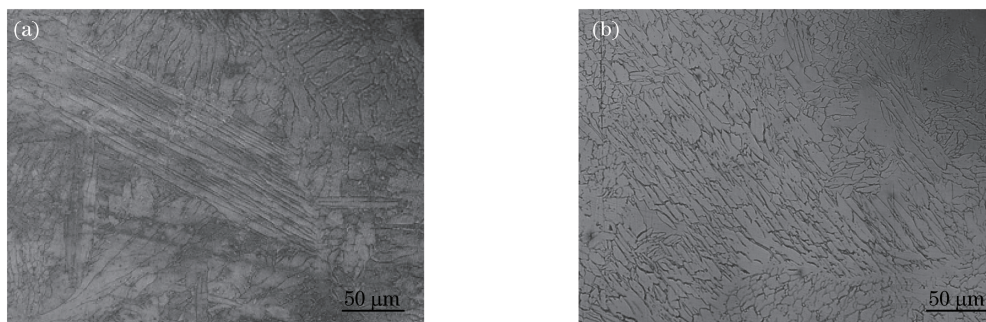


图 6 不同离焦量下的焊缝金相组织。(a) 0 mm;(b) +5 mm

Fig. 6 Metallographic structures of welding seams under different defocusing distances.

(a) 0 mm; (b) +5 mm

以抗拉强度作为自变量,选用单因素试验中具有代表性的 1#, 3#, 9#, 15# 焊接件观察断口形貌,结果如图 7 所示。1#, 3#, 9#, 15# 焊接件接头的抗拉强度依次为 682.629, 706.783, 731.913, 741.403 MPa。

图 7(a)中 1# 焊接件的断口具有大量的解理台阶和尺寸较大的撕裂棱,这种断裂属于解理断裂。因为焊缝中晶体内部存在许多缺陷,所以晶粒是沿一簇相互平行的晶面解理,不同高度解理面之间的裂纹相互贯通形成台阶。解理断裂属于宏观脆性断裂,裂纹发展十分迅速,存在解理断裂的焊接接头抗拉强度较低,易造成零件或构件灾难性的总崩溃,在工程应用中应尽量避免。由图 7(b)观察得到,3# 焊接件的断口处出现大量短且弯曲的撕裂棱线条,撕裂棱从中央向四周放射形成河流状花纹,这种断裂属于准解理断裂,也是脆性断裂的一种。准解理断裂在焊接件不同部位产生解理裂纹核,进而扩展成解理刻面,最后以塑性方式撕裂,断裂面具有局部塑性变形,因此,3# 焊接件接头的抗拉强度有所提高。由图 7(c)观察得到,9# 焊接件的断口中除了河流状花纹和撕裂棱外,还包括韧窝断裂,属于塑性断裂^[18]。图 7(d)中 15# 焊接件的断口呈现蜂窝状,断口处分布着大小不一的韧窝。韧窝是金属韧性断裂的主要特征,该断裂属于塑性断裂。韧窝又称作迭波、孔坑、微孔等,是材料在微区范围内塑性变形产生的显微空洞,经形核、长大、聚集后相互连接,进而断裂后在断口表面留下的痕迹。韧窝的大小和深浅与材料断裂时空隙核心的数量及塑性有关。15# 焊接件的断裂位置为母材,母材组织较细密,故撕裂棱较小,表明该工艺条件下焊缝的抗拉强度优于母材的。即该断裂形式具有良好的塑性,焊接件的抗拉强度较高。

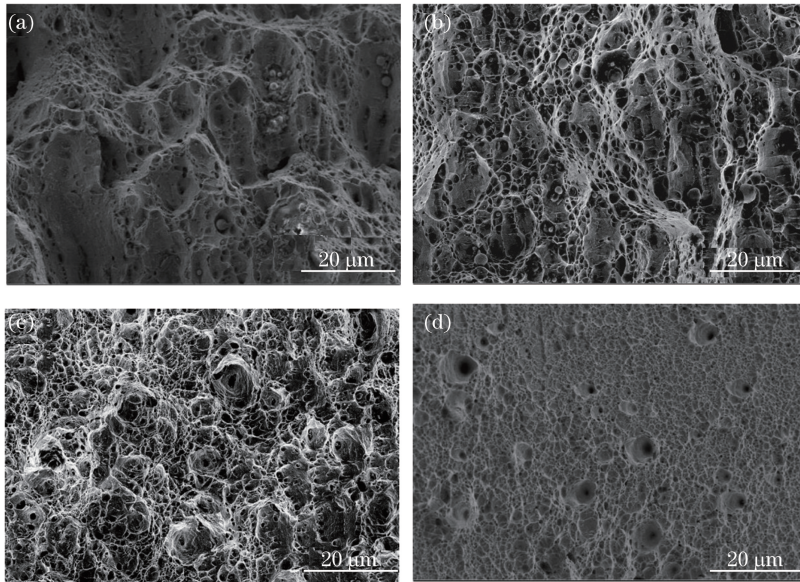


图7 激光填粉焊接件的拉伸断口形貌。(a) 1#;(b) 3#;(c) 9#;(d) 15#

Fig. 7 Tensile fracture morphologies of weldments after laser welding with powder filling.

(a) 1#; (b) 3#; (c) 9#; (d) 15#

3.3 焊接工艺参数的优选

为了得到以抗拉强度为评判标准的最佳工艺条件,根据前期单因素试验,进行正交试验,其中因素 A 为激光功率,因素 B 为焊接速度,因素 C 为离焦量。正交试验工艺参数及试验结果见表 3,4。

表3 正交试验

Table 3 Orthogonal test

Laser power /kW	Welding speed / ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	Defocusing distance /mm	Factor combination	Tensile strength /MPa
2.7	160	+4	$A_1B_1C_1$	730.337
2.7	175	+5	$A_1B_2C_2$	724.748
2.7	190	+6	$A_1B_3C_3$	714.914
2.8	160	+5	$A_2B_1C_2$	725.146
2.8	175	+6	$A_2B_2C_3$	724.171
2.8	190	+4	$A_2B_3C_1$	707.437
2.9	160	+6	$A_3B_1C_3$	709.072
2.9	175	+4	$A_3B_2C_1$	706.919
2.9	190	+5	$A_3B_3C_2$	704.925

表4 正交试验结果

Table 4 Results of orthogonal test

Factor	Poor value	Quadratic sum	Mean square	F-value	P-value
A	16.4	423.23	211.615	7.03	0.125
B	12.4	251.42	125.709	4.18	0.193
C	3.4	15.90	7.952	0.26	0.791

研究表明,在试验范围内, A 、 B 两个因素对评判标准抗拉强度具有一定的影响, C 因素影响效果稍差。这是由于功率处于波动状态,焊接速度、离焦量变化区间较窄,但正交试验结果仍具有一定意义。由表 4 中的极差值 P 值可知,正交试验中三个因素对焊接件抗拉强度的影响效果从大到小为依次激光功率、焊接速度、离焦量。根据焊接工艺的试验指标,选择抗拉强度最大时的因素水平作为最优工艺组合,即最优工艺组合为 $A_1B_1C_2$ 。在 $A_1B_1C_2$ 工艺参数条件下,进行试样的激光填粉焊接以及拉伸试验,测量三次并取平均值,得到焊接件的抗拉强度为 745.427 MPa,大于单因素试验及正交试验其他工艺条件下的焊接件抗拉强

度,验证了正交实验的准确性。因此,激光填粉焊接的最优工艺条件是激光功率为 2.7 kW,焊接速度为 $160 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,离焦量为 +5 mm。最优工艺条件下激光填粉焊接的焊缝正、反面形貌如图 8 所示,可以看出,焊缝连贯,无气孔、焊渣等缺陷,表明激光填粉焊接件具有良好的拉伸性能,表面较为连续平整。

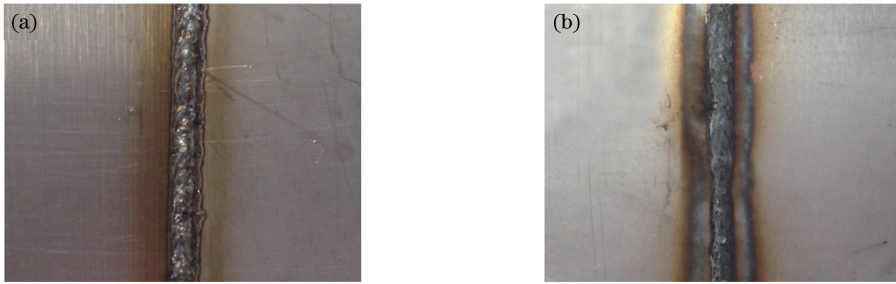


图 8 激光填粉焊接试样宏观形貌。(a)正面;(b)背面

Fig. 8 Macro morphology of specimen after laser welding with powder filling. (a) Front; (b) back

4 结 论

在试验范围内,焊缝的宽度随着激光功率的增加或焊接速度的减小而逐渐增大;当离焦量由 0 mm 向 $\pm 5 \text{ mm}$ 变化时,上焊缝宽度逐渐增大,下焊缝宽度逐渐减小。焊接件的抗拉强度与激光功率成正比,且随着焊接速度的增加呈先增大后减小的趋势;当离焦量由 0 mm 向 $\pm 5 \text{ mm}$ 变化时,焊接件的组织细化,抗拉强度逐渐增大。通过正交试验发现,对焊接件的影响效果由大到小的因素依次为激光功率、焊接速度、离焦量。正交试验最优工艺条件下焊接件的抗拉强度为 745.427 MPa,优于其他试样的。

参 考 文 献

- [1] Wei Jing, Wang Huan, Shi Shaojian, *et al.* Microstructure and properties of fiber laser wire welded joints of 10CrSiNiCu high strength shipbuilding steel[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0303003.
魏菁,王欢,石少坚,等. 10CrSiNiCu 船用高强度钢光纤激光焊接接头组织和性能[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303003.
- [2] Zhang Xinge, Ren Zhen'an, Li Kun, *et al.* Study on process characteristics of fiber laser welding of AZ31B magnesium alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091411.
张新戈,任振安,李坤,等. AZ31B 镁合金光纤激光焊接特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091411.
- [3] Cao X, Jahazi M, Immarigeon J P, *et al.* A review of laser welding techniques for magnesium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(2): 188-204.
- [4] Zhang Y, Li F N, Guo G L, *et al.* Effects of different powders on the micro-gap laser welding-brazing of an aluminium-steel butt joint using a coaxial feeding method[J]. Materials & Design, 2016, 109: 10-18.
- [5] Zhang Yi, Duan Linyong, Zhou Dianwu, *et al.* Monitoring mechanism of plasma generated by laser welding galvanized steel with powder feeding[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0503005.
张屹,段林勇,周惦武,等. 镀锌钢激光添粉焊接的等离子体监测机理[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0503005.
- [6] Zhang Guowei, Xiao Rongshi. Microstructure and mechanical property of 60 mm-thick 304 stainless steel joint by ultra-narrow gap fiber laser beam welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0803007.
张国伟,肖荣诗. 60 mm 厚 304 不锈钢板超窄间隙光纤激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803007.
- [7] Yan J, Gao M, Zeng X Y. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(4): 512-517.
- [8] Liu Jian, Shi Yan, Liu Jia, *et al.* Effect of shielding gas on laser welding of austenitic stainless steel [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 051402.
刘健,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, 51(5): 051402.
- [9] Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plants[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.

- 吴世凯, 肖荣诗, 陈凯. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422-2425.
- [10] Xu Guojian, Zhong Liming, Hang Zhengxiang, *et al.* Performance of narrow gap laser welding with filling wire for SUS304 stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1003001.
徐国建, 钟立明, 杭争翔, 等. SUS304 不锈钢窄间隙激光填丝焊接性能[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1003001.
- [11] Zhou Dianwu, Liu Yuanli, Li Ningning, *et al.* Effect of Sn-5% Zr powder addition on microstructure and mechanical property of steel/Al laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0503004.
周惦武, 刘元利, 李宁宁, 等. 添加 Sn-5% Zr 粉末对激光焊接钢/铝显微组织和性能影响[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503004.
- [12] Chen Kai, Yang Wuxiong, Xiao Rongshi, *et al.* Laser welding of some aluminum alloys with powder[J]. Applied Laser, 2005, 25(4): 222-226.
陈铠, 杨武雄, 肖荣诗, 等. 几种高强铝合金的激光填粉焊接[J]. 应用激光, 2005, 25(4): 222-226.
- [13] Smal C A, Meacock C G, Rossouw H J. Laser powder welding of a $Ti_{52}Al_{46.8}Cr_1Si_{0.2}$ titanium aluminide alloy at elevated temperature[J]. High Temperature Materials & Processes, 2011, 30(1/2): 157-160.
- [14] Chen B, Shi T L, Li M. Laser welding of $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12}Ni_{10}Be_{23}$ bulk metallic glass: Experiment and temperature field simulation[J]. Advanced Engineering Materials, 2013, 15(5): 407-413.
- [15] Wang Hongying, Mo Shouxing, Li Zhijun. CO₂ laser welding of AZ31 magnesium alloys with filler wire [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(6): 93-96.
王红英, 莫守形, 李志军. AZ31 镁合金 CO₂ 激光填丝焊工艺[J]. 焊接学报, 2007, 28(6): 93-96.
- [16] Padmanaban G, Balasubramanian V. Optimization of laser beam welding process parameters to attain maximum tensile strength in AZ31B magnesium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(8): 1253-1260.
- [17] Wei Huakai, Sun Fujuan. Technology of laser welding on Al-Mg-Sc and 2Al2 [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(10): 1615-1618.
魏华凯, 孙福娟. Al-Mg-Sc 与 2Al2 激光对焊工艺[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1615-1618.
- [18] Buddu R K, Chauhan N, Raole P M, *et al.* Studies on mechanical properties, microstructure and fracture morphology details of laser beam welded thick SS304L plates for fusion reactor applications[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 95: 34-43.