

磁场对激光焊接钢/铝异种金属焊缝性能的影响

丁浩¹, 徐家乐¹, 谭文胜², 黄舒¹, 周建忠¹

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²常州信息职业技术学院, 江苏 常州 213164

摘要 将磁场引入激光焊接系统中,开展了DC51D+AZ镀锌钢和6061铝合金的激光对接焊试验和焊接试样的拉伸试验,研究了交变磁场对焊缝成形、气孔缺陷、断口形貌、金属间化合物与焊缝力学性能的影响。结果表明,添加磁场后,焊缝抗拉强度得到提高;磁场搅拌能改善焊缝的形貌,减少焊缝中气孔的数量,细化针状FeAl₃相,抑制脆性Fe/Al化合物的生长,从而有效提高焊缝的力学性能。

关键词 激光技术; 磁场搅拌; 钢/铝异种金属; 激光焊接; 金属间化合物

中图分类号 TG457

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0902003

Influence of Magnetic Field on Properties of Fe/Al Dissimilar Metal Laser Welding Joints

Ding Hao¹, Xu Jiale¹, Tan Wensheng², Huang Shu¹, Zhou Jianzhong¹

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

²Changzhou College of Information Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China

Abstract A magnetic field is introduced into the laser welding process, and the butt welding experiment of DC51D+AZ galvanized steels and 6061 aluminum alloys and the tensile experiment of welding samples are conducted. The influences of the alternating magnetic field on weld formation, porosity defects, fracture morphologies, intermetallic compounds, and mechanical properties of Fe/Al welding joints are investigated. The results show that the tensile strength of welding joints is improved after the introduction of the magnetic field. The magnetic stirring can improve the welding morphology, reduce the number of pores in welding joints, refine the acicular FeAl₃ phase, and inhibit the growth of brittle Fe/Al compounds, which thus improves the mechanical properties of welding joints.

Key words laser technique; magnetic-field stirring; Fe/Al dissimilar metal; laser welding; intermetallic compounds

OCIS codes 140.3510; 140.3390; 160.3900

1 引言

轻量化是汽车发展的新趋势,实现轻量化最有效的措施是采用轻质材料^[1]。车身主体结构材料使用镀锌钢,其余部分材料使用高强度铝合金,可以在保证安全的前提下达到减轻车身质量的目的^[2-3]。与常规焊接方法相比,激光焊接具有能量高、热量集中、热影响区小以及自动化程度高等优点,是理想的钢/铝焊接方法。但是,钢与铝在焊接时易形成FeAl₃、Fe₂Al₅等脆性Fe/Al金属间化合物,导致焊缝质量降低^[4]。

在钢/铝焊接过程中添加其他元素,可以改变钢/铝界面主要物相组成及脆性相与延性相的比例,从而获

收稿日期: 2017-04-06; 收到修改稿日期: 2017-04-25

基金项目: 江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划(KYZZ16_0330)、常州市高技术研究重点实验室开放基金(CM20153001)

作者简介: 丁浩(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: 614809491@qq.com

导师简介: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事先进激光制造技术方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn(通信联系人)

得优质钢/铝焊缝^[5-6]。宋建岭等^[7]研究了硅元素对钢/铝焊缝质量的影响,证明了硅元素可以抑制钢/铝脆性化合物的生长,提高焊缝强度。添加粉末状合金元素可以提高激光的利用率^[8],但是焊缝中极易残留气孔,影响了激光焊接质量。目前,电磁搅拌方法广泛用于去除焊缝中的气孔,改善焊接质量。Kern 等^[9]在激光焊接时加入磁场,通过电磁搅拌改变熔池的流动速度,抑制了驼峰现象,提高了焊接质量。华爱兵等^[10]通过外加纵向磁场发现,外加磁场产生的电磁力能对熔池产生搅拌作用,使得焊缝的力学性能、抗疲劳性都得到较大改善。贾华^[11]通过在镁合金的焊接过程中加入磁场,使得镁合金焊缝中的气孔明显减少,焊缝质量得到提高。Vollertsen 等^[12]采用交变磁场辅助激光焊接铝合金,研究了熔池电磁搅拌的机理,发现电磁搅拌能提高铝合金焊接质量,随着磁场强度的增加,电磁搅拌作用增强。上述研究结果表明,无论是铁磁性金属还是非铁磁性金属,在焊接时添加磁场,焊接质量都会得到改善。通过电磁搅拌可以细化组织,减少气孔、裂纹等缺陷,但是目前关于磁场辅助异种材料预置合金粉末的激光焊接研究鲜有报道。

本文将交流磁场应用于钢/铝异种金属预置铝硅合金粉末的激光焊接中,将添加磁场前后焊缝的焊接质量进行了对比分析,研究了磁场对焊缝气孔、金属间化合物以及焊缝力学性能的影响,为磁场在钢/铝异种材料激光焊接中的推广应用提供了一定的参考。

2 试验材料、设备及方法

试验所用材料为 DC51D+AZ 镀锌钢和 6061 铝合金。焊接试样尺寸均为 100 mm×50 mm×1 mm,钢侧开 45°倒角。添加的合金粉末为 AlSi₁₀,粒径为 75 μm,将粉末预置在对接口的上方,试验示意图如图 1(a)所示。试验用磁场由自制磁场发生装置产生,磁场强度可调范围为 0~50 mT,磁场发生频率为 50 Hz,试验装置如图 1(b)所示。在交变磁场作用下进行激光对接焊,试验装置包括:励磁线圈;硅铁(放置于线圈中心以增强磁场强度);交流电源(向线圈提供电流,通过改变电流大小调节磁场大小);高斯计(测量磁场的实际大小)。磁场强度设为 45 mT 不变。

试验材料的化学组成见表 1,2。钎剂选用 Nocolok 钎剂(KAlF₄ 的质量分数为 65%,K₃AlF 的质量分数为 35%)。

试验采用美国 IPG 公司生产的 YLS-2000 型光纤激光器作为焊接热源,主要技术参数为:波长 1070 nm,最大功率 2 kW,功率连续可调,工作台三轴联动。

表 1 DC51D+AZ 镀锌钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of DC51D+AZ zinc-coated steels (mass fraction, %)

Composition	C	Mn	P	S	Si	Fe
Content	0.1	0.45	0.030	0.025	0.03	Bal.

表 2 6061 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of 6061 aluminum alloys (mass fraction, %)

Composition	Si	Mg	P	S	Cu	Zn	Al
Content	1.0-1.5	0.25-0.6	0.030	0.025	<0.2	<0.2	Bal.

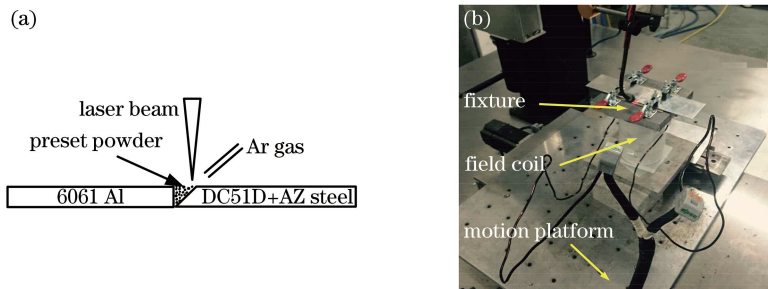


图 1 激光焊接试验(a)示意图和(b)装置

Fig. 1 (a) Schematic and (b) setup of laser welding experiment

试验前,使用超声波清洗仪除去试样表面的污垢,利用砂纸去除端面氧化层,最后用酒精清洗细磨好的试样。在添加磁场焊接前,选择合适的工艺参数:激光功率为 1600 W,焊接速度为 1200 mm/min,激光光斑直径为 1 mm,保护气为 Ar,流量为 12 L/min。

添加磁场前后各焊接工艺参数相同。焊接完成后,线切割焊接试样以制取镶嵌样,打磨抛光后选用体积分数为 4% 的硝酸酒精试剂对焊缝截面进行腐蚀,腐蚀时间为 10 s。首先采用光学显微镜观察焊缝区域的形貌,采用万能试验机测试焊缝的拉伸强度,最后采用扫描电子显微镜(SEM)观察焊缝和断口的微观形貌,利用 SEM 自带的能谱仪(EDS)检测焊缝和断口中各元素的含量,并结合 X 射线衍射(XRD)仪推测金属间化合物的种类。

3 结果与分析

3.1 焊缝成形性分析

图 2(a)、(c)所示分别为添加磁场前后钢/铝焊缝的宏观形貌。在没有磁场的情况下,焊缝表面存在较多气孔。加入磁场后,焊缝表面的气孔减少并变得光滑,这主要是由于在焊接过程中,气孔在磁力作用下被排出焊缝外。另外,在磁场辅助作用下,焊接过程中熔池的流动趋于稳定^[13],飞溅残渣减少,焊接成形质量得到了改善。

图 2(b)、(d)所示分别为添加磁场前后钢/铝焊缝的截面形貌。可以发现,未添加磁场时,焊缝上半区域(A'处)气孔较大且密集;而添加磁场后,焊缝上半区域(B'处)几乎没有气孔。焊缝内部的气孔数量是影响焊缝力学性能的主要因素。焊缝内部的气孔主要是氢气气孔,粉末中吸附的水分和空气中的水分是产生氢气气孔的主要来源。激光加热时,高温下水分解产生氢气,激光焊接冷却的速度极快;随着温度的快速降低,氢在焊缝中的溶解度减小,逸出的氢气很少,未逸出的氢气遗留在熔池中形成气孔^[14]。

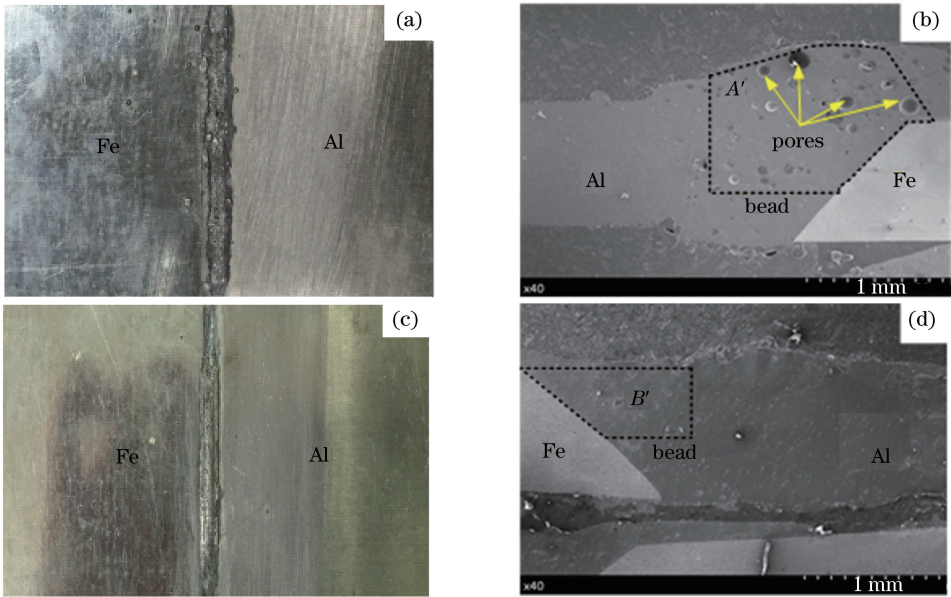


图 2 未添加磁场时钢/铝焊缝的(a)宏观形貌和(b)截面形貌;添加磁场后钢/铝焊缝的(c)宏观形貌和(d)截面形貌
Fig. 2 (a) Macro-morphology and (b) cross-sectional morphology of Fe/Al welding joints without magnetic field;
(c) macro-morphology and (d) cross-sectional morphology of Fe/Al welding joints with magnetic field

未加入磁场时,阻碍气泡产生的条件^[15]为

$$P_A = P_B + h\gamma + 2\sigma/r, \quad (1)$$

式中 P_A 为阻止气泡产生的外部压力, P_B 为熔池上方的气体压力, h 为熔池液体的高度, γ 为金属比体积, σ 为气体界面液态金属表面张力, r 为气泡半径。

当 P_A 较小时,焊接时熔池中就会产生气孔。加入磁场后,阻碍气泡产生的条件^[15]为

$$P_A = P_B + h\gamma + 2\sigma/r + P_C, \quad (2)$$

式中 P_C 为增加的动压力。

电磁搅拌过程是电磁场与熔池相互作用的过程,熔池除受到外部压力、流体重力等作用外,还会受电磁力的作用。在磁场的作用下,熔池内液态金属产生复杂的洛伦兹力(F_L), F_L 使液态金属加速流动,产生 P_C ,导致 P_A 增大,故焊缝中气孔的数量减少。在气泡产生后,电磁搅拌还会加快熔池内液态金属的流动,小气泡聚集形成大气泡的几率增大,大气泡加速上浮,有利于气体的逸出。此外,电磁搅拌作用还降低了液态金属中气体的饱和度,减小了生成气孔的可能性^[16]。

图3所示为简化的电磁搅拌原理图。在电磁感应作用下,熔池内部产生 F_L ,由于本试验选用的是交流电源,电场、磁场(B)、 F_L 的方向呈周期性变化,在 F_L 的作用下熔池流动方向(V)不断改变,即电磁搅拌作用促进了熔池内元素的均匀扩散和稀释。

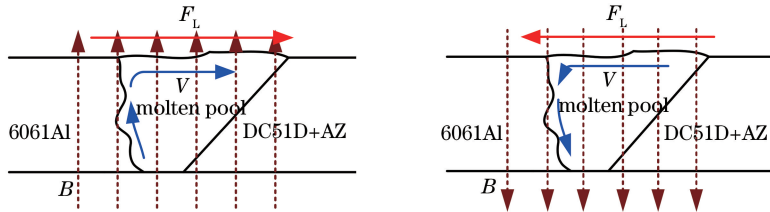


图3 电磁搅拌原理图

Fig. 3 Schematic of electromagnetic stirring

对添加磁场前后的焊缝区域进行EDS分析,结果如图4所示。未加磁场时,如图4(a)所示,Al、Si两种元素含量的波动幅度较大。添加磁场后,如图4(b)所示,Fe、Al、Si三种元素分布均较未添加磁场时的更均匀,这说明交变磁场具有搅拌与促进元素均匀扩散的作用。激光焊接的缺点之一是焊缝处元素分布不均匀,焊缝处力学性能变差^[17]。交变磁场产生的电磁搅拌使熔池的结晶方向发生周期性变化,提高了熔池结晶过程的稳定性,促进了元素与热量的均匀扩散,降低了熔池的结晶速度^[18],即晶粒发生细化,热应力分散到更多的晶粒中,有效防止了裂纹的产生。

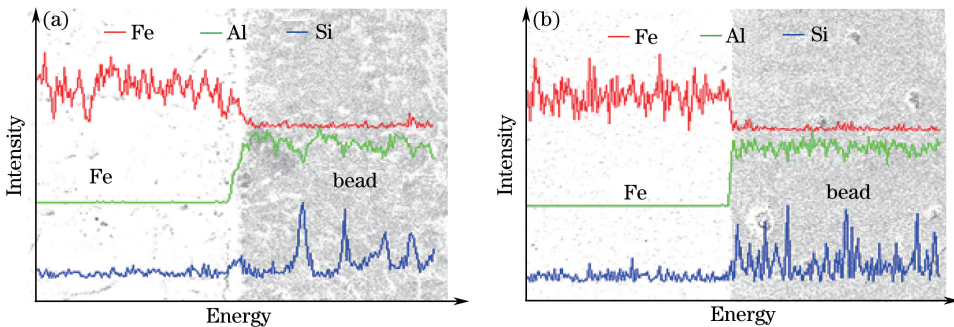


图4 焊缝的EDS图。(a)未添加磁场;(b)添加磁场后

Fig. 4 EDS diagrams of welding joints. (a) Without magnetic field; (b) with magnetic field

3.2 金属间化合物与EDS分析

钢/铝异种金属焊接后主要产生 Fe_2Al_5 和 $FeAl_3$ 两种金属间化合物^[19-20]。图5所示为钢/铝焊缝区域的SEM图。从图5中可以看出,钢/铝连接界面主要有两种金属间化合物,形状分别为针尖状和层状。对焊缝区域进行XRD分析,结果如图6所示。由图6可知,焊缝区域的金属间化合物主要为 Fe_2Al_5 和 $FeAl_3$,分别对应图5所示的针尖状和层状化合物。沿图5中黄色箭头方向,对“+1”至“+4”4个点进行EDS点扫描分析,测试结果见表3。

根据表3中Fe与Al的原子比,结合XRD分析结果(图6)可知:针尖状的化合物为 $FeAl_3$,层状化合物为 Fe_2Al_5 。

图7所示为焊缝区域的EDS线扫描分析,可以看出,焊缝中钢/铝金属间化合物的厚度为 d ,从钢/铝结合界面到虚线处为其分布范围。在钢/铝化合物中,距离Fe界面越远,Fe元素的含量越低,化合物右侧的焊缝区域,Fe元素的原子数分数几乎为0,因此可以通过控制Fe元素在焊缝中的扩散来降低Fe/Al化合物层的厚度。

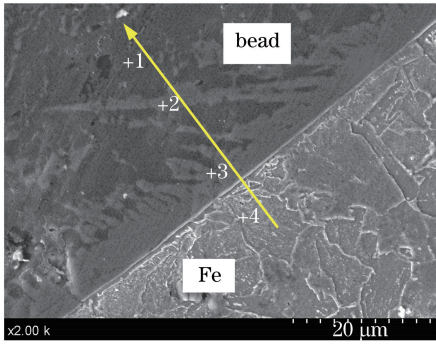


图 5 钢/铝焊缝区域 SEM 图

Fig. 5 SEM image of Fe/Al welding-joint area

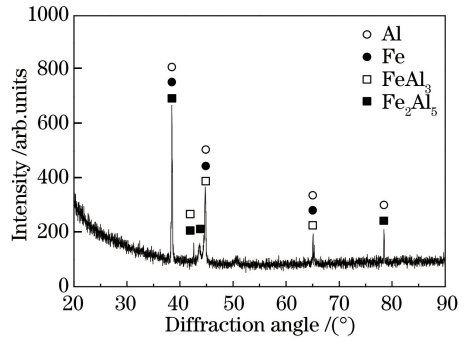


图 6 钢/铝焊缝区域 XRD 分析

Fig. 6 XRD analysis of Fe/Al welding-joint area

表 3 钢/铝焊缝区域 EDS 分析结果

Table 3 EDS analysis results of Fe/Al welding-joint area

Point	Chemical composition (atomic fraction, %)			Main phase
	Al	Fe	Si	
+1	90.37	1.35	5.21	Al
+2	70.18	22.82	5.16	FeAl ₃
+3	57.74	32.69	5.62	Fe ₂ Al ₅ , Fe
+4	0.18	96.70	0.97	Fe

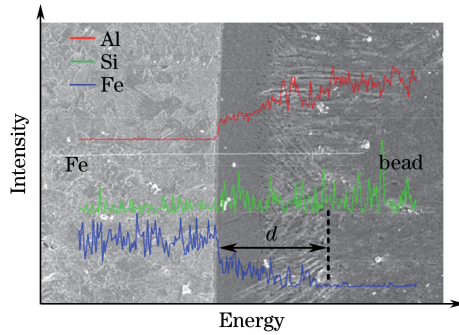


图 7 钢/铝焊缝区域 EDS 线扫描分析

Fig. 7 EDS line-scanning analysis of Fe/Al welding-joint area

图 8 所示为加入磁场前后焊缝的微观结构,观察的位置为钢与焊缝的结合处。对比图 8(a)与图 8(b)可以发现,添加磁场后,金属间化合物层变薄,其原因是针尖状化合物(FeAl₃)被磁场产生的洛伦兹力打破。另外,磁场搅拌作用使熔池产生强烈的混合对流,对流加速使得熔池内温度分布均匀^[21-22],加速了熔池的冷却,减少了化合反应时间。由于 Fe 元素在熔池中的溶解量与焊接时的温度以及反应时间有关,因此冷却过程的缩短也使 Fe 的溶解量减少。

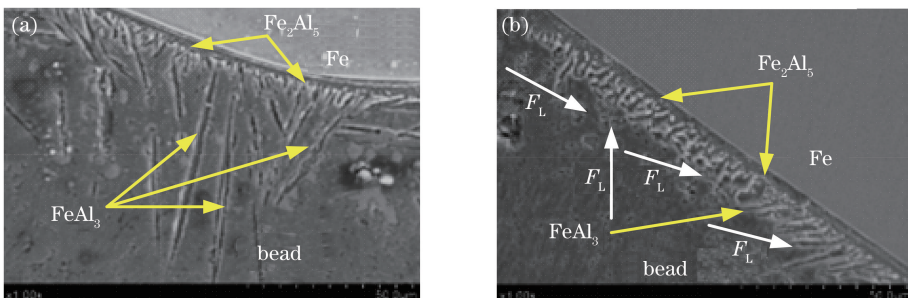


图 8 焊缝形貌与微观结构。(a)未添加磁场时;(b)添加磁场后

Fig. 8 Morphology and microstructure of welding joints. (a) Without magnetic field; (b) with magnetic field

3.3 拉伸力学性能与断口分析

在相同工艺参数下,进行焊缝的拉伸性能测试。发现未添加磁场时,试样的平均抗拉强度为109.87 MPa,而添加磁场后试样的平均抗拉强度为 136.26 MPa,即添加磁场后焊缝的抗拉性能提高了 24.02%。

断口 SEM 图如图 9 所示。对添加磁场前后焊缝的断口进行 EDS 分析,分析结果见表 4。可以看到,未添加磁场时,断口区域 Al 元素含量很高,几乎不含 Fe 元素,说明断口区域不含 Fe/Al 金属间化合物;添加磁场后,Fe 元素含量较高,说明断口区域有 Fe/Al 金属间化合物。断口 XRD 分析结果如图 10 所示,结合 3.1 节的分析可知,未添加磁场时,断裂主要发生在焊缝中气孔密集处,而不是金属间化合物层中;添加磁场后,断口区域为 $FeAl_3$ 和 Fe_2Al_5 的混合相,断裂发生在脆性 Fe/Al 金属间化合物层中。气孔和脆性化合物共存时,断裂主要是由气孔导致的,因此气孔对焊缝力学性能的影响要大于脆性化合物的,通过磁场搅拌去除焊缝中的气孔后,焊缝力学性能提高。当断裂发生在脆性 Fe/Al 金属间化合物层时,降低化合物层的厚度成为提高焊缝力学性能的主要方法,根据上文对图 8 的分析,增大磁场强度能进一步减小化合物的厚度,提高焊接质量。

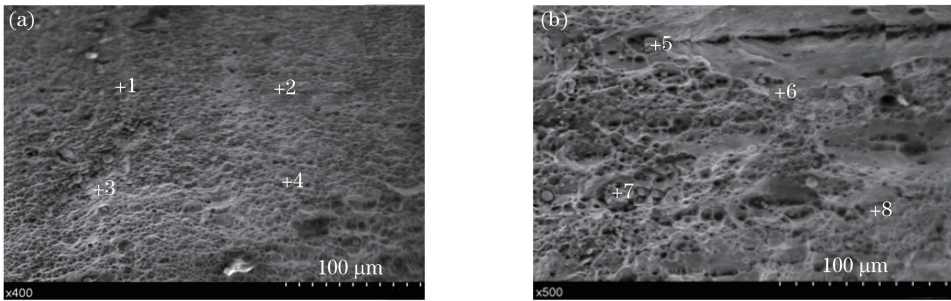


图 9 断口 SEM 图。(a)未添加磁场时;(b)添加磁场后

Fig. 9 SEM images of fractures. (a) Without magnetic field; (b) with magnetic field

表 4 断口 EDS 分析结果(原子数分数,%)

Table 4 EDS analysis results of fractures (atomic fraction, %)

Composition	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8
Fe	—	—	—	—	26.1	25.9	26.7	25.2
Al	91.2	89.9	92.0	89.5	64.5	67.0	65.9	67.7

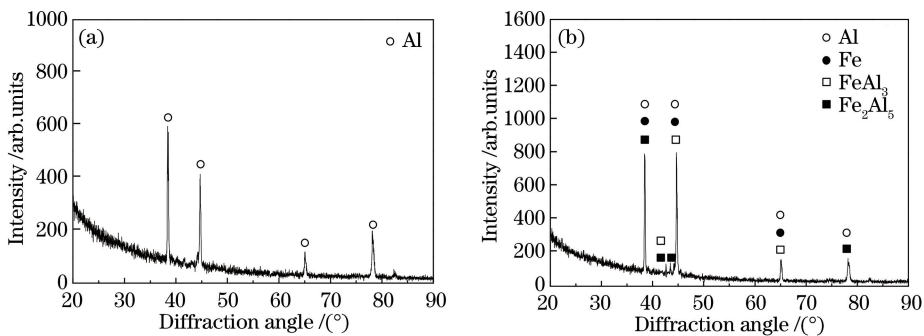


图 10 断口 XRD 图。(a)未添加磁场时;(b)添加磁场后

Fig. 10 XRD diagrams of fractures. (a) Without magnetic field; (b) with magnetic field

图 11 所示为添加磁场前后断口形貌的局部放大图。由图 11(a)可知,未添加磁场时,断口表面分布着少量的韧窝,大小不一。在拉伸过程中,气孔受力被拉长,成为裂纹源,韧窝尺寸小说明焊缝韧性较差。由图 11(b)可知,当磁场强度为 45 mT 时,断口有韧窝存在,韧窝形貌规则,尺寸大且较深,分布均匀,说明加入磁场后焊缝的塑性性能较好。

4 结 论

将交流磁场应用于钢/铝异种金属预置铝硅合金粉末的激光焊接中,对添加磁场前后焊缝的焊接质量进

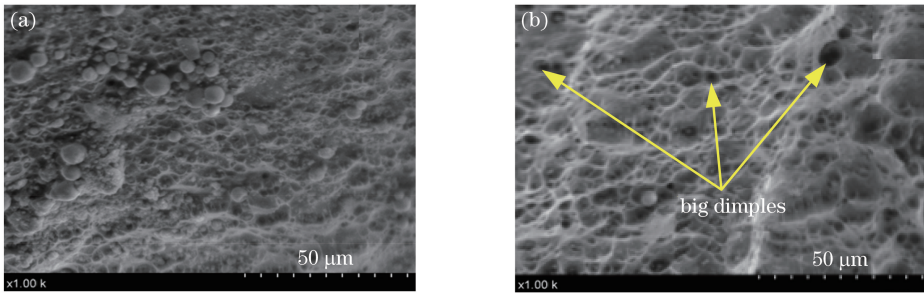


图 11 断口局部放大图。(a)未添加磁场;(b)添加磁场

Fig. 11 Partial enlarged images of fractures. (a) Without magnetic field; (b) with magnetic field

行了对比分析,得到如下结论。

1) 当激光功率为 1600 W、焊接速率为 1200 mm/min、激光光斑直径为 1 mm、保护气体为 Ar、流量为 12 L/min 时,可实现钢/铝异种金属的高质量焊接。在磁场强度为 45 mT 的加工工艺条件下,焊接质量得到明显提高。

2) 未加入磁场时,焊缝的断裂发生在焊缝气孔聚集区域,加入磁场后,交变磁场在熔池中产生电磁搅拌作用,气孔的数量减少,焊缝中元素分布均匀化,焊接缺陷得到改善,断裂发生在 Fe/Al 脆性金属间化合物层。

3) 磁场的加入对层状 Fe_2Al_5 相及针状 $FeAl_3$ 相的生长有抑制作用,针状 $FeAl_3$ 相被洛伦兹力打碎,层状 Fe_2Al_5 相的数量也减少,Fe/Al 脆性金属间化合物层的厚度降低,焊缝的抗拉性能提高了 24.02%。

参 考 文 献

- [1] Cao R, Huang Q, Chen J H, *et al.* Cold metal transfer spot plug welding of AA6061-T6-to-galvanized steel for automotive applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 585: 622-632.
- [2] Sun J, Yan Q, Li Z, *et al.* Effect of bevel angle on microstructure and mechanical property of Al/steel butt joint using laser welding-brazing method[J]. Materials & Design, 2016, 90: 468-477.
- [3] Sun J, Yan Q, Gao W, *et al.* Investigation of laser welding on butt joints of Al/steel dissimilar materials[J]. Materials & Design, 2015, 83: 120-128.
- [4] 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.
- [5] Zhang Shenghai, Cheng Kai, Xiao Rongshi, *et al.* Influence of metal powder on high power CO₂ laser welding of aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(6): 860-863.
张盛海, 陈 铠, 肖荣诗, 等. 填充粉末对铝合金高功率 CO₂ 激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 860-863.
- [6] Mathieu A, Pontevicci S, Viala J C, *et al.* Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si)[J]. Materials Science and Engineering, 2006, 435/436: 19-28.
- [7] Song Jianling, Lin Sanbao, Yang Chunli, *et al.* Research on alloy agent for improving welded joint properties of aluminum to steel dissimilar material[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(12): 26-28.
宋建岭, 林三宝, 杨春利, 等. 合金元素改善铝/钢异种金属接头性能的研究[J]. 航空制造技术, 2008(12): 26-29.
- [8] Zhang Lijuan, Zhou Dianwu, Liu Jinshui, *et al.* Laser welding of steel/aluminum dissimilar metal with powder addition [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013(12): 3401-3409.
张丽娟, 周惦武, 刘金水, 等. 钢/铝异种金属添加粉末的激光焊接[J]. 中国有色金属学报, 2013(12): 3401-3409.
- [9] Kern M, Berger P, Hugel H. Magneto-fluid dynamic control of seam quality in CO₂ laser beam welding[J]. Welding Research, 2000: 72-78.
- [10] Hua Aibing, Chen Shujun, Yin Shuyan, *et al.* Effect of external longitudinal magnetic field on weld formation of MAG welding[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(7): 876-881.
华爱兵, 陈树君, 殷树言, 等. 外加纵向磁场对 MAG 焊缝成形的影响机理[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(7): 876-881.
- [11] Jia Hua. Study on weld ability of magnesium alloy under magnetic field [D]. Shenyang: Shenyang University of

- Technology, 2010.
- 贾 华. 磁场作用下镁合金焊接性的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
- [12] Vollertsen F, Thomy C. Magnetic stirring during laser welding of aluminum[J]. *Journal of laser Applications*, 2006, 18(1): 28-34.
- [13] Thomy C, Vollertsen F. Influence of magnetic fields on dilution during laser welding of aluminium[J]. *Advanced Materials Research*, 2005, 6-8: 179-186.
- [14] Wang wei, Xu Guangyin, Duan Aiqin, *et al.* Porosity formation mechanism of laser welding 1420 aluminum lithium alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(11): 59-62.
王 威, 徐广印, 段爱琴, 等. 1420 铝锂合金激光焊接气孔形成机理[J]. *焊接学报*, 2005, 26(11): 59-62.
- [15] Zhang Zhongdian, Li Dongqing, Yin Xiaohui, *et al.* Influence of adding magnetic field on welding process[J]. *Welding & Joining*, 2002(3): 10-14.
张忠典, 李冬青, 尹孝辉, 等. 外加磁场对焊接过程的影响[J]. *焊接*, 2002(3): 10-14.
- [16] Ambrosy G, Berger P, Huegel H, *et al.* The use of electromagnetic body forces to enhance the quality of laser welds [C]. *SPIE*, 2002, 5120: 596-600.
- [17] Liu Y, Sun Q, Liu J, *et al.* Effect of axial external magnetic field on cold metal transfer welds of aluminum alloy and stainless steel[J]. *Materials Letters*, 2015, 152: 29-31.
- [18] Liang Baixian. Electromagnetism course[M]. Beijing: Higher Education Press, 1984: 65-73.
梁百先. 电磁学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984: 65-73.
- [19] Shao L, Shi Y, Huang J K, *et al.* Effect of joining parameters on microstructure of dissimilar metal joints between aluminum and galvanized steel[J]. *Materials & Design*, 2015, 66: 453-458.
- [20] Sierra G, Peyre P, Beaume F D, *et al.* Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes [J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(12): 1705-1715.
- [21] Gatzen M, Tang Z, Vollertsen F. Effect of electromagnetic stirring on the element distribution in laser beam welding of aluminium with filler wire[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(A): 56-65.
- [22] Xu Hua, Zheng Qiguang, Ding Zhouhua, *et al.* Study on laser cladding hard alloy with electromagnetic stirring [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 449-451.
许 华, 郑启光, 丁周华, 等. 电磁搅拌辅助激光熔覆硬质合金的研究[J]. *激光技术*, 2005, 29(5): 449-451.