

铝/镀锌钢电弧辅助激光涂粉填丝熔钎焊方法

李春玲^{1,2} 樊 丁² 于晓全² 余淑荣¹

¹兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050

²兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050

摘要 采用电弧辅助激光焊接方法通过添加 Al-12%Si 焊丝进行了铝/镀锌钢异种金属涂粉对接熔钎焊工艺试验, 分析了送丝速度对焊缝成形的影响; 运用光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、材料试验机等观察分析了焊接接头各区域的微观组织、断口形貌、物相成分和接头力学性能。结果表明: 在适当的焊接参数和工艺条件下, 能够得到正反面成形良好的对接接头。当焊接速度一定时, 随着送丝速度的增大, 焊缝正面的铺展宽度减小, 背面的铺展宽度增大。Si 元素主要富集在接头上部, 焊缝中的组织主要有 $\alpha(\text{Al})$ 基体及沿晶界分布的 Al-Si 共晶相。铝/钢界面层生成了不均匀的金属间化合物层, 其主要物相有 $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ 、 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 和 Fe_2Al_5 , 接头最大抗拉强度可达 130 MPa, 断口表面形貌呈现韧性和脆性共存的混合型断裂特征。

关键词 激光技术; 铝/钢异种金属; 电弧辅助激光; 填丝焊; 金属间化合物; 力学性能

中图分类号 TG457.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0702007

Method of Arc-Assisted Laser Wire Welding-Brazing Between Aluminum and Galvanized Steel with Filler Powder

Li Chunling^{1,2} Fan Ding² Yu Xiaoquan² Yu Shurong¹

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

²State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

Abstract By means of arc-assisted laser welding and with the addition of Al-12%Si welding wire, the butt welding-brazing experiment of dissimilar metals joining aluminum alloy to galvanized steel sheet with filler powder is conducted. The influence of wire feeding speed on weld appearance is discussed. The microstructure, fracture morphology, phase composition, and mechanical property of welded joints are investigated by means of optical microscope, scanning electron microscope, X-ray diffractometer, and material testing machine. The results show that under suitable welding parameters and process conditions, a welding-brazing joint with high quality appearances at both front and back sides can be obtained. When the welding speed is fixed, with the increment of wire feeding speed, the spreading width of welds at the front side decreases, while that of the back side increases. Si element enriches mainly in the upper part of joints, and the welded seams consist of $\alpha(\text{Al})$ substrate and Al-Si eutectic phases along grain boundaries. A kind of non-uniform intermetallic compounds is formed in the Al/steel interface layer which consists of $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$, $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$, and Fe_2Al_5 . The maximum tensile strength of joints is up to 130 MPa, and the surface morphology of fractures possesses a ductile and brittle hybrid characteristic.

Key words laser technique; aluminum/steel dissimilar metals; arc-assisted laser; welding with filler wire; intermetallic compounds; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900

收稿日期: 2015-12-23; **收到修改稿日期:** 2016-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51465031)、兰州市科技基金(2014-2-12)

作者简介: 李春玲(1981—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事材料激光加工及数值模拟方面的研究。

E-mail: yxplcl@lut.cn

导师简介: 樊 丁(1961—), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事焊接方法与焊接物理方面的研究。

E-mail: fand@lut.cn(通信联系人)

1 引 言

近年来,国家大力倡导节能减排,通过材质、工艺和设计等多方面的轻量化,尽可能地减少车身重量。在车身部分结构中采用轻质铝合金材料是最有效方法之一,可较好地实现轻量化效果^[1]。焊接作为一种最常用的连接手段,在异种金属的连接中得到了广泛关注。

Fe 在 Al 中的固溶度几乎为零,使得焊接时铝/钢界面发生反应,极易生成脆性的金属间化合物层(IMC)。为了避免化合物层过厚而降低接头性能,化合物层的厚度常常需要控制在合适的范围之内^[2-3]。与其他热源相比,激光具有加热速度和冷却速度快的特点,可以有效地控制界面化合物层的生长,因而被广泛应用于异种金属的连接之中。在发挥单一激光热源优势的基础上,国内外研究学者对双光束激光焊^[4]、激光-电弧复合焊^[5]、激光辅助电弧焊^[6]等新方法和新工艺进行了探索。文献^[6]研究结果表明,增加辅助激光热源之后,液态金属的流动更加充分,钎焊界面的润湿长度增加,接头成形和力学性能得到显著提高。除了焊接方法,接头内合金元素的反应对接头性能也有很大影响,期望所加入的合金元素能够参与界面冶金反应,从而改善接头的界面结构以及液态填充材料在钢表面的润湿铺展性能。在铝/钢异种金属的焊接过程中,常采用填充各类焊丝^[7-8]、添加金属粉末^[9-11]以及采用中间夹层^[12]等方式。Dong 等^[8]在铝/钢的焊接中,分别利用 Al-5%Si(5%为 Si 的质量分数,下同)、Al-12%Si、Al-6%Cu、Al-10%Si-4%Cu 和 Zn-15%Al 焊丝进行试验,当添加 Al-12%Si 焊丝时,接头化合物层的厚度最小,力学性能最佳。周愆武等^[9]在铝/钢异种金属的连接中添加了 Sn-5%Zr 粉末,形成了新的物相,增加了延性相化合物层的比例,改善了接头的力学性能。

铝/钢电弧辅助激光熔钎焊是一种新型的焊接方法,可显著提高液态铝在镀锌钢背面的润湿铺展性,促进接头成形,在预涂钎剂和金属粉末的基础上实现铝合金和镀锌钢单面焊双面成形的焊接工艺^[13]。在前期的工作基础上,本文试验了铝/镀锌钢的电弧辅助激光填丝焊,通过加入 Al-12%Si 焊丝来增加焊缝的铺展宽度。研究了焊丝的加入对焊缝成形、金属间化合物层的厚度及类型以及接头力学性能的影响。重点讨论了在不同送丝速度下接头的润湿铺展性能。测试了接头的力学性能,并对断口进行了分析。

2 试验材料、设备及方法

试验母材为 5052 铝合金和镀锌钢板,大小均为 150 mm×50 mm×1 mm,填充材料选用直径为 0.8 mm 的 ER4047 铝硅焊丝,预置粉末为混合的金属粉末,母材和焊丝的化学成分见表 1。

表 1 母材和焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of parent metals and welding wires (mass fraction, %)

Alloy	Element											
	Si	Mg	Mn	Cr	Cu	Zn	Fe	P	B	S	Ni	Al
5052	0.25	2.2~2.8	0.10	0.15~0.35	0.10	0.10	0.40	-	-	-	-	Bal.
Steel	≤0.40	-	0.40	-	≤0.15	≤0.15	-	0.02	-	≤0.30	≤0.15	-
Metal powder	1~2	5~8	1~3	-	-	5~10	-	-	0.5~1.0	-	-	Bal.
ER4047	11.0~13.0	0.10	0.15	-	0.30	0.20	0.80	-	-	-	-	Bal.

焊接过程示意图如图 1 所示,高频横流 CO₂ 激光器(GS-TFL-10KCO₂,武汉大族金石凯激光系统有限公司,中国)、华意隆 WSE-250 钨极氩弧(TIG)焊接机和送丝枪之间由专用夹具连接。激光波长为 10.6 μm,CO₂ 激光器设备里 P(CO₂):P(N₂):P(He)=1:10:20,其中 P(·)为气体压强。试验中采用激光在前,TIG 电弧在后的辅助方式,激光光束和 TIG 焊枪均偏离铝合金母材边缘一定距离,激光光束偏离距离约为 1 mm,TIG 焊枪偏离距离约为 3 mm。TIG 焊枪和送丝枪分别位于激光光束的两侧,焊枪与焊件水平面的夹角为 60°。采用后送丝方式,并调整送丝枪的角度,将焊丝直接送入到激光辐照区的后方边缘,送丝角度约为 30°,送丝示意图如图 1(b)所示。

试验前,铝板采用化学方法去除表面氧化膜,用丙酮去除铝合金和镀锌钢板表面及侧边的水渍和油污。焊接前依次将用丙酮调和均匀的助熔剂和混合金属粉末涂覆在焊件对接处上表面,不开坡口,预留 0.4 mm 间隙。焊接过程中各参数分别设置为:激光功率 0.6 kW,焊接速度 12 mm/s,送丝速度 20~60 mm/s,离焦量 0 mm,热源间距 10 mm,焊接电流 10 A,焊接电压 15 V,电弧弧长 3 mm。保护气体采用 Ar(氩)气,在焊

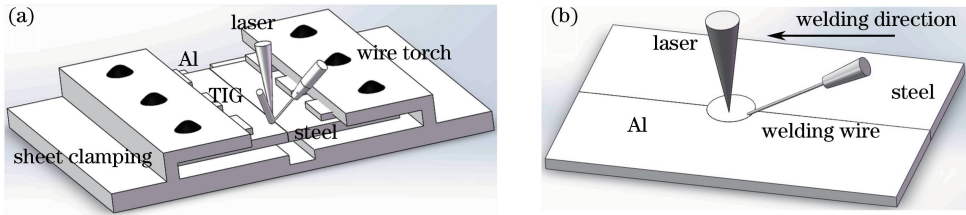


图 1 TIG 电弧辅助激光填丝熔钎焊示意图。(a) 焊接总示意图；(b) 焊丝位置

Fig. 1 Schematic diagram of TIG arc-assisted laser wire welding-brazing. (a) General view of welding; (b) welding wire position

件的正面,激光热源的前方采用 45°侧吹保护;在焊件的背面,将气体通入夹具成形槽中作低吹保护,流量均为 15 L/min,TIG 保护气体流量为 10 L/min。

焊接完成后采用线切割取样,分别制作金相试样和拉伸试样,以体积分数为 5% 的氢氟酸(FH)溶液对焊缝进行腐蚀。制样完成后采用大型金相显微镜(OM)观察焊缝组织形貌;采用场发射扫描电子显微镜(SEM)对焊缝、钎焊界面的微观形貌以及拉伸断口形貌进行观察和分析;采用 SEM 自带的能谱仪(EDS)分别进行点扫描和线扫描,检测元素的扩散情况;采用 X 射线衍射仪(XRD)分析镀锌钢一侧钎焊界面以及拉伸断口的主要组成;室温条件下,在微机控制电子万能材料试验机上作拉伸性能测试,拉伸速度设置为 1.0 mm/s。

3 结果与分析

3.1 送丝速度对接头成形的影响

在激光热源的作用下,5052 铝合金母材边缘熔化,添加到熔池内的 Al-12%Si 焊丝在热传导和对流作用下充分熔化,在适宜的对接间隙下,熔化的金属与固态钢形成了良好搭桥,加之电弧吹力的作用,液态金属在镀锌钢的正、背面铺展良好,形成了钎焊接头。前期研究表明,焊接电流对接头成形和力学性能有很大的影响,在保持其他焊接参数不变的条件下,调整送丝速度。当送丝速度在 20~60 mm/s 范围内变化时,送丝速度与焊丝的熔化速度保持平衡,可以获得稳定的焊接过程,不同送丝速度下铝/镀锌钢焊缝接头横截面形貌如图 2 所示。

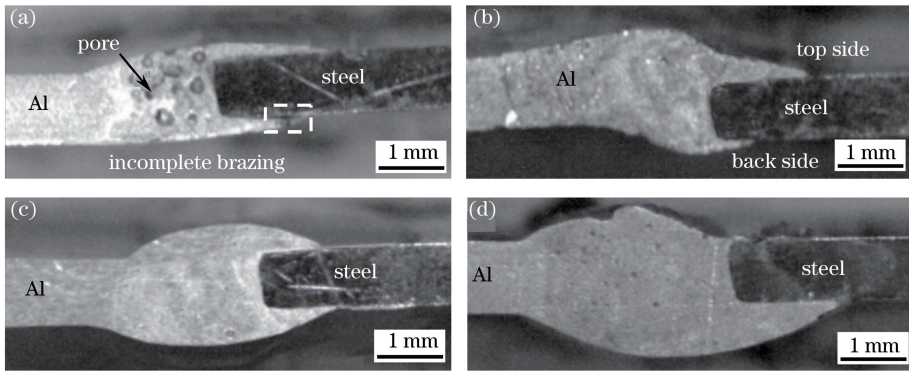


图 2 不同送丝速度下接头横截面形貌。(a) 20 mm/s; (b) 30 mm/s; (c) 50 mm/s; (d) 60 mm/s

Fig. 2 Cross sectional morphologies of joints at different wire feeding speeds.

(a) 20 mm/s; (b) 30 mm/s; (c) 50 mm/s; (d) 60 mm/s

由图 2 可知,当送丝速度不同时,熔化的液态金属在镀锌钢正、背面的铺展宽度也不同,在焊缝区出现大量气孔,多集中在熔化区的上部。当送丝速度较小时,焊缝余高最小,在靠近铝一侧的熔化区出现了较多容积较大的气孔,在镀锌钢背面出现“未钎合”现象[图 2(a)]。出现这一现象的原因是当热输入恒定时,相同时间内熔化的金属量少,熔池保持液态的时间较短,在母材热导率大的情况下,熔池中吸收及产生的气体来不及溢出,产生了大量的气孔。随着送丝速度的增加,焊丝的熔化量增多,焊缝余高增大,焊缝成形得到改善[图 2(b)];当送丝速度为 50 mm/s 时,液态金属在镀锌钢正、背面的铺展宽度几乎一致,焊缝成形良好

[图 2(c)];当送丝速度达到 60 mm/s 时,焊缝内出现较多较小的气孔,液态金属在钢正面的铺展宽度明显减小[图 2(d)],这是因为在一定的工艺参数范围内,如果激光离焦量保持不变,激光入射到焊缝和焊丝上的光斑直径也保持不变。试验过程中,焊丝直接插入激光熔池之中,当送丝速度较小时,焊丝熔化对熔池的推压作用较小,熔化的焊丝主要依靠表面张力作用铺展在焊缝上表面;随着送丝速度的增加,焊丝端部对熔池的推力作用增强,熔化的金属量增多,熔化的焊丝无法大面积地铺展开,熔池中液态金属向焊缝的背面流动,导致焊缝背面的铺展宽度随送丝速度的增加而增大,而焊缝的正面熔宽逐渐减小。随着进入熔池中的液态金属的增多,熔池中的含气量也增大了,大量金属铺展到镀锌钢背面使得气体的溢出受阻,从而促成了图 2(d)中气孔的生成,所以送丝速度不宜过快。

当送丝速度为 30 mm/s 时对接接头的横截面形貌如图 3 所示,镀锌钢的正面铺展宽度明显大于背面。将接头分成三大区域,即:铝侧热影响区(F 区),焊缝的熔合区(FZ 区:上部 D 区和下部 E 区),以及钎焊界面区(A、B、C 区)。

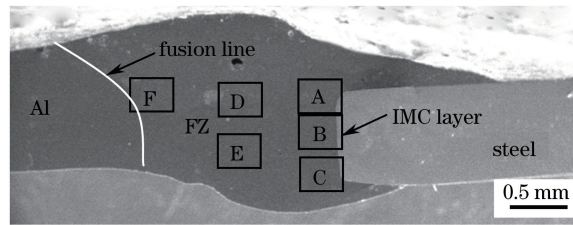


图 3 焊接接头横截面 SEM 像

Fig. 3 Cross sectional SEM images of welding joints

热影响区和焊缝熔合区的显微组织如图 4 所示。在焊接熔池边缘,熔化后的液态金属以热影响区附近未熔化母材界面为核心重新形核,沿垂直于熔合线方向快速生长,熔合线附近的晶粒呈细长椭圆形的典型柱状晶组织,如图 4(a)所示。然而,由于散热条件的改变,焊缝中心形成了等轴树枝晶组织 [图 4(b)],焊缝由 $\alpha(\text{Al})$ 及枝晶间的 Al-Si 共晶组织组成。在焊缝的上部 D 区 [图 4(c)],Si 的含量较高,大量的 Si 元素固溶于 Al 中,形成了 Al-Si 过共晶组织,且晶界间出现共晶硅富集或偏聚。在焊缝的下部 E 区 [图 4(d)],Si 的含量比上部 D 区少,Al-Si 共晶圆滑,呈卵虫状。另外,通过后续的能谱分析发现,预置粉末中的 Mg 熔化后,在焊缝中出现富集。同时,在焊接过程中,Si 元素更易于和 Zn 元素相互作用形成更低熔点的物质,增加液态金属的铺展润湿作用,因而 Si 元素也常在焊缝的上部或焊趾中聚集。

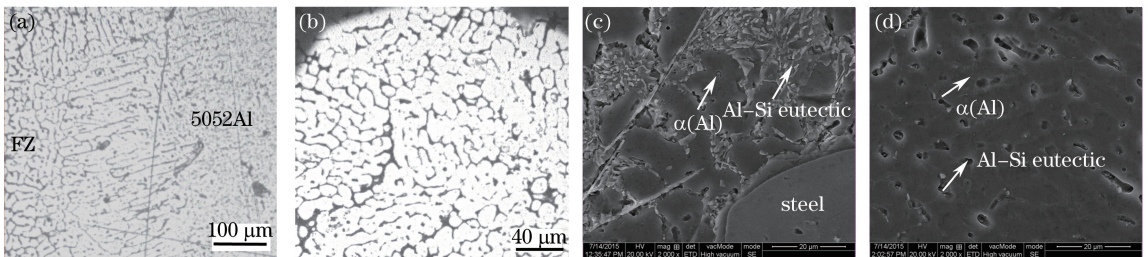


图 4 图 3 中不同区域接头的 OM 及 SEM 像。(a) F 区; (b) 熔合区; (c) D 区; (d) E 区

Fig. 4 OM and SEM images of joints at different areas in Fig. 3. (a) Area F; (b) fusion zone; (c) area D; (d) area E

3.2 熔钎焊界面层微观结构

图 3 中钎焊界面 A、B、C 区的 SEM 像,分别对应于图 5(a)、(b)、(c)。由图可见,钎焊界面不同位置化合物层的厚度与形态不尽相同。从形态上来看,在接头最上部的 A 区域[图 5(a)],化合物层明显分为两层,靠近焊缝侧基本呈絮状结构,靠近钢侧呈锯齿状结构,最大厚度约为 $10 \mu\text{m}$,平均厚度约为 $8 \mu\text{m}$;在接头中部 B 区域[图 5(b)],靠近钢侧的化合物层明显呈现出锯齿状结构,且锯齿较宽,平均厚度约为 $4 \mu\text{m}$;在接头下部 C 区域[图 5(c)]的化合物层形态和厚度与 B 区域的非常相似,平均厚度约为 $4 \mu\text{m}$ 。接头从上部到下部,钎焊界面化合物层的厚度相差 $4 \mu\text{m}$ 左右;从中部到下部,化合物层的厚度基本一致。铝/钢电弧辅助激光熔钎焊过程属于热传导焊,在接头上部,热源直接辐射,界面温度最高,化合物层的厚度最厚;在接头中部

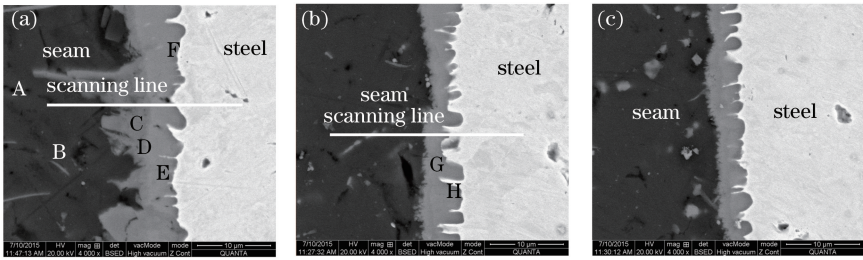


图5 图3中不同区域界面层的SEM像。(a) A区；(b) B区；(c) C区

Fig. 5 SEM images of interfacial layers at different areas in Fig. 3. (a) Area A; (b) area B; (c) area C

和下部,界面反应的温度主要通过熔池对流换热获得,明显低于接头上部,但是附加的同步 TIG 电弧对熔池强烈的搅拌作用,使得接头下部的温度升高,因此接头下部界面层产生了与中部厚度基本一致的化合物层。

对图 5(a)、(b)的界面显微组织从钢侧到焊缝侧进行能谱线扫描和点分析,扫描区域及结果如图 6 所示,各个特征点元素成分分析结果见表 2。线扫描数据显示,钎焊界面发生了 Al、Fe 原子向对方基体的扩散,元素含量曲线形成了两个明显的平台,表明界面层包含有两层金属间化合物。在接头上部, Si 在焊缝中有聚集,且在界面层的含量也较高;在接头中下部, Si 的含量较少。由化合物的微观组织形貌图并结合 Al-Fe-Si三元相图、Al-Fe 二元合金相图和 EDS 分析,确定焊缝中的 A 点为 Al-Si 共晶组织, B 点为 $\alpha(\text{Al})$ 。

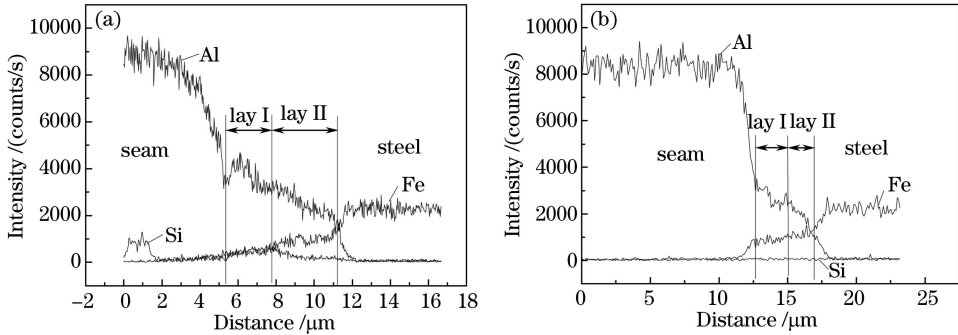


图6 界面层 EDS 扫描结果。(a) 接头上界面；(b) 接头下界面

Fig. 6 EDS scanning results of interfacial layers. (a) Upper part of joints; (b) lower part of joints

表2 图5中各点 EDS 分析结果(原子分数, %)

Table 2 EDS analysis results of points shown in Fig. 5 (atom fraction, %)

Main element	Point							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Al	76.25	89.72	73.26	73.56	70.94	71.84	73.46	68.47
Fe	0.64	1.23	16.87	16.46	26.23	25.71	26.05	31.02
Si	22.43	8.49	9.58	9.43	2.82	2.45	0.49	0.51

对界面层镀锌钢侧进行 XRD 检测,分析结果如图 7 所示,其中 2θ 为衍射角,结合 EDS 分析和相关文献,确定钎焊界面层包含了 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 相, $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 相和 Fe_2Al_5 相。界面层包括二层,在接头上部,向焊缝侧生长的化合物是 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$,向镀锌钢一侧生长的是 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$;而在接头中下部,向焊缝侧生长的絮状金属间化合物是 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$,向镀锌钢一侧生长的锯齿状的化合物是 Fe_2Al_5 。接头上部和下部化合物形态的区别主要是 Si 元素聚集于接头上部,生成了 Al-Fe-Si 三元相。在电弧辅助铝/钢激光熔钎焊过程中,不添加焊丝时,界面层组织主要为 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 和 Fe_2Al_5 。文献[8]表明,当界面层中的 Si 元素达到一定含量时, Si 元素参与界面化合物层的生长,抑制了 Fe 原子向焊缝中的扩散,降低了化合物层的厚度,提高了液态金属的浸润铺展作用。从接头的上部到中部,界面化合物层的厚度相差不大,原因就在于接头的上部聚集了较多的 Si 元素,抑制了化合物层的生长。

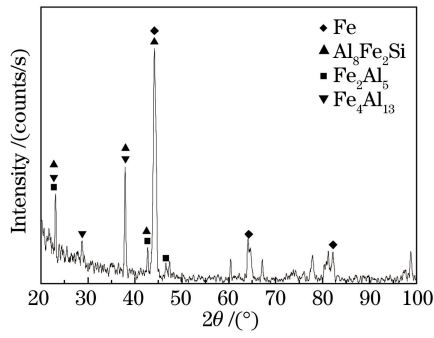


图 7 界面层钢侧的 XRD 分析结果

Fig. 7 XRD analysis results of interface in the steel side

3.3 接头抗拉强度与断裂行为

对不同送丝速度下的焊接接头进行拉伸强度测试。在拉伸试验中,接头上部断裂于焊缝处,下部断裂于钎焊界面处,断裂形式属于混合断裂。当送丝速度在 30~50 mm/s 范围内时,接头的力学性能最好,接头的最大抗拉强度可达 130 MPa。采用扫描电子显微镜观察铝合金侧和镀锌钢一侧的断裂界面,如图 8(a)、(b)所示,断口形貌均分为两部分,一部分断口出现较多气孔,粘连着填充的焊缝金属,另一部分断口较为平整、光滑。图 8(a)的 K 区域、气孔的内壁形貌及图 8(b)的 H 区域的放大图分别如图 8(c)~(e)所示。其中图 8(c)所示颜色深暗的部分为 Al 基体;图 8(d)所示的气孔内壁的枝状晶凸起清晰可见,为典型的氢气孔断裂形貌^[14];图 8(e)所示区域表面平整,有明显撕裂痕迹,出现大量短而弯曲的撕裂岭,这表明该区域硬度高,脆性强,属于解理断裂特征。由 EDS 分析发现图 8(e)中的 P₁点处 Al 原子数分数为 69.66%、Fe 原子数分数为 29.83%,可推测出该断面区域内含有较多的 Fe₂Al₅相。

对铝一侧拉伸断口进行 XRD 分析,结果如图 9 所示,在熔池凝固过程中,除了 Al-Si 共晶,也可能产生低熔点的 Mg-Si、Al-Mg₂Si 相,这些低熔共晶易产生结晶裂纹。在整个断口中,影响接头抗拉强度的主要因素有界面化合物层的类型、厚度、接头成形以及接头内部的气孔等。在界面金属间化合物层中,Fe₂Al₅的微观硬度最高,其显微硬度可达 1100 HV。在承受拉应力时,裂纹易于在化合物层间萌发,导致接头断裂于钎焊界面。填加 Al-Si 焊丝之后,界面上部生成了一定厚度的 Al₈Fe₂Si 相,较 Fe₂Al₅相,它的硬度低,脆性弱。由此可以推断,在接头承受拉应力载荷时,接头是沿着脆、硬的 Fe₂Al₅相发生断裂;而在接头上部,由于此处的气孔以及低熔点的共晶组织发生开裂,裂纹沿着焊缝扩展,从而出现了混合断裂模式。

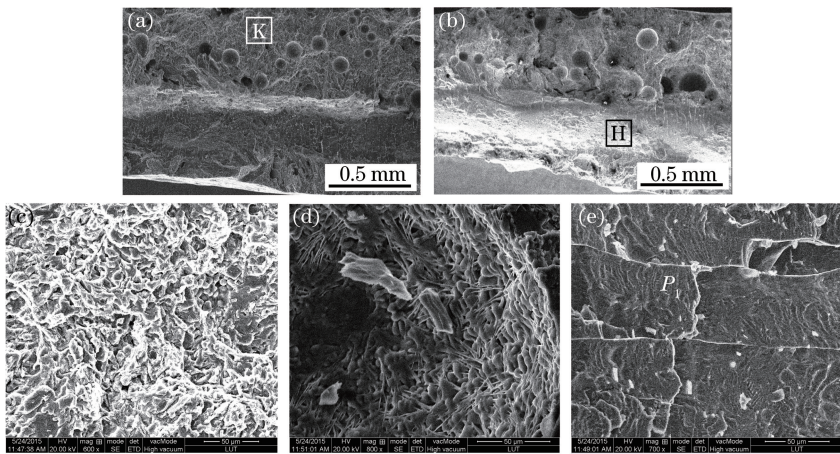


图 8 接头拉伸断口形貌。(a) 铝侧断口; (b) 钢侧断口; (c) K 区; (d) 气孔形貌; (e) H 区

Fig. 8 Fracture morphology of joints. (a) Al side; (b) steel side; (c) area K; (d) micromorphology of pores; (e) area H

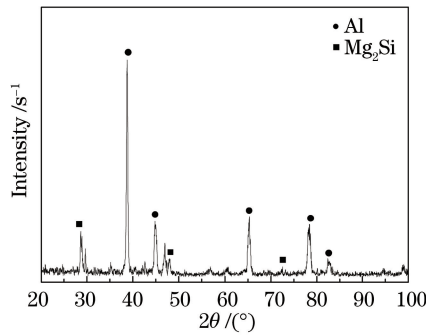


图 9 铝一侧断面 XRD 分析结果

Fig. 9 XRD analysis results of fracture surface at the Al side

4 结 论

1) 采用 TIG 电弧辅助激光焊实现了铝/镀锌钢填丝熔钎焊,通过采用两个热源偏置铝板、焊丝直接送入激光辐照区后方的工艺方法,得到了成形良好的对接接头。随送丝速度的增加,填加的焊丝增加了焊缝背面的铺展宽度,适宜的送丝速度使得焊缝正反面铺展宽度基本相同,改善了焊缝的表面成形;

2) 在接头界面的上下部位形成了不均匀分布的金属间化合物层。从上到下, Si 元素的含量逐渐降低,接头上部化合物层较厚,主要物相由靠近焊缝侧的 Al_3Fe_2Si 相和靠近镀锌钢侧的 Fe_4Al_{13} 相组成;接头中部和下部化合物层的厚度和形态非常相似,主要是靠近焊缝侧絮状的 Fe_4Al_{13} 和靠近钢侧锯齿状的 Fe_2Al_5 组成;

3) 拉伸试验结果表明,5052 铝合金与镀锌钢电弧辅助激光填丝熔钎焊接头的抗拉强度可达 130 MPa。拉伸试样的断裂属于混合断裂方式,接头下部脆硬的 Fe_2Al_5 相以及接头上部的气孔和低熔点的共晶相导致了整个接头的断裂。

参 考 文 献

- Schubert E, Klassen M, Zerner I, *et al.*. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry[J]. J Mater Process Technol, 2001, 115(1): 2-8.
- Rathod M J, Kutsuna M. Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding[J]. Weld J, 2004, 83(1): 16s-26s.
- Katayama S. Laser welding of aluminium alloys and dissimilar metals[J]. Welding International, 2004, 18(8): 618-625.
- Laukant H, Wallmann C, Korte M, *et al.*. Flux-less joining technique of aluminum with zinc-coated steel sheets by a dual-spot-laser beam[J]. Adv Mater Res, 2005, 6: 163-170.
- Mei Shuwen, Cheng Qunlin, Jiang Yong, *et al.*. Interfacial properties and tensile strength of laser arc hybrid welded dissimilar Al/steel joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 351-359.
梅述文, 成群林, 姜 勇, 等. 铝/钢异种合金激光-电弧复合焊接接头的界面性能及抗拉强度[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 351-359.
- Qin G L, Lei Z, Su Y H, *et al.*. Large spot laser assisted GMA brazing-fusion welding of aluminum alloy to galvanized steel[J]. J Mater Process Technol, 2014, 214(11): 2684-2692.
- Gao Wei, Yan Qi, Huang Jian. Microstructure and mechanical property of laser wire fusion brazing welded butt joints of steel/aluminum dissimilar metal[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603006.
高 伟, 阎 启, 黄 坚. 钢/铝异种金属激光填丝熔钎焊对接接头组织与性能分析[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603006.
- Dong H G, Hu W J, Duan Y P, *et al.*. Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu and Zn-Al filler wires[J]. J Mater Process Technol, 2012, 212(2): 458-464.
- 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.

- 10 Zhao Xudong, Xiao Rongshi. Fluxless joining between aluminum alloy and galvanized steel by fiber laser fusionwelding-brazing with filler powder[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0403004.
赵旭东, 肖荣诗. 铝/钢异种金属无钎剂激光填粉熔钎焊接[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0403004.
- 11 Liu J, Jiang S C, Shi Y, *et al.*. Laser fusion-brazing of aluminum alloy to galvanized steel with pure Al filler powder[J]. Opt Laser Technol, 2015(66): 1-8.
- 12 Chen Shuhai, Huang Jihua, Yang Dongdong, *et al.*. Influence of Ni-foil interlayer on laser penetration welding of stainless steel to aluminium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(8): 9-12.
陈树海, 黄继华, 杨冬冬, 等. 镍箔中间层对不锈钢/铝合金激光深熔焊的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(8): 9-12.
- 13 Li C L, Fan D, Wang B. Characteristics of TIG arc-assisted laser welding-brazing joint of aluminum to galvanized steel with preset filler powder[J]. Rare Met, 2015, 34(9): 650-656.
- 14 Yu Yangchun. Study on the technology and filler wire melting dynamics during the laser welding with filler wire[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010: 68-75.
余阳春. 激光填丝焊的焊丝熔入行为及工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 68-75.