

# 钢/铝异种金属激光填丝熔钎焊对接 接头组织与性能分析

高 伟<sup>1,2</sup> 阎 启<sup>1</sup> 黄 坚<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 宝钢集团汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室, 上海 201900 )  
(<sup>2</sup> 上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240 )

**摘要** 采用光纤激光和铝硅焊丝对 2.5 mm 厚 6013 铝合金和镀锌低碳钢的异种金属对接接头进行了激光填丝熔钎焊。采用光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)分析了熔钎焊对接接头的微观组织,采用拉伸试验测试了接头强度,并研究了热输入对钢/焊缝界面处金属间化合物和接头强度的影响。试验结果表明,在适当焊接参数下可以获得成形良好和具有一定抗拉强度的钢/铝对接接头。进一步分析表明,钢/焊缝界面处主要生成了 FeAl<sub>2</sub> 和 FeAl<sub>3</sub> 金属间化合物。随着热输入量的增加,金属间化合物的厚度随之增加。焊缝中的组织则为  $\alpha$ -Al 基体晶界上均匀分布着条状 Al-Si 共晶组织。在钢板采用 30°坡口时可以获得的最大抗拉强度为 88 MPa,采用 45°坡口时强度可以达到 135 MPa。

**关键词** 光学制造; 钢/铝异种金属; 对接接头; 激光填丝焊; 熔钎焊; 金属间化合物

**中图分类号** P755-1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0603006

## Microstructure and Mechanical Property of Laser Wire Fusion Brazing Welded Butt Joints of Steel/Aluminum Dissimilar Metal

Gao Wei<sup>1,2</sup> Yan Qi<sup>1</sup> Huang Jian<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Development and Application Technology of Automotive Steels, Baosteel Group, Shanghai 201900, China  
<sup>2</sup> Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Dissimilar metal butt joints of 2.5 mm thick 6013 aluminum alloy and galvanized low carbon steel are welded by fiber laser wire fusion brazing method. The microstructure of the fusion brazing welded joints is investigated by optical microscope, scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The joint strength is measured by tensile test. The effect of heat input on interface intermetallic compounds of aluminum/steel butt joint and joint strength are discussed. Experimental results show that butt joints with good appearance and certain tensile strength can be obtained under appropriate welding parameters. Further analysis reveal that this kinds of intermetallic compounds on the interface are mainly FeAl<sub>2</sub> and FeAl<sub>3</sub>. With the increase of heat input, the thickness of the intermetallic compound is also increased. The uniform distribution of Al-Si eutectic along grain boundaries on  $\alpha$ -Al substrate shows in welded seams. The maximum tensile strength of welded joints with a 30° groove is 88 MPa, the strength can reach up to 135 MPa when using a 45° groove.

**Key words** optical fabrication; steel/aluminum dissimilar metals; butt joint; laser wire welding; fusion brazing; intermetallic compound

**OCIS codes** 000.2658; 140.3390; 350.3390; 160.3900

收稿日期: 2013-12-10; 收到修改稿日期: 2014-01-23

基金项目: 汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室 2011 年开放基金课题

作者简介: 高 伟(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: gaowei913@sjtu.edu.cn

导师简介: 黄 坚(1967—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事激光焊接方法及其组织与性能和激光表面改性等方面的研究。E-mail: jhuang@sjtu.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

随着各国对环保的重视和节能减排政策的出台,汽车轻量化成为目前各个汽车行业都在重点研究的课题。而汽车轻量化的重点在于使用轻质合金代替传统的钢材,其中铝合金是应用最为广泛的一种汽车用轻质合金<sup>[1]</sup>。因此,汽车车身等结构中不可避免地存在着铝合金和钢的连接,铝合金和钢的高效连接也成为汽车车身制造工艺的一部分。对于钢和铝来说,两者间热物理性能差异很大,相互之间的溶解度很小,很难实现熔化焊接。采用熔钎焊是目前进行钢铝之间连接的主要方法之一,具体焊接工艺主要是熔化极气保护焊。

在钢/铝的熔钎焊过程中形成的金属间化合物是影响其焊接接头性能的重要因素。研究表明,钢/铝熔钎焊接头在室温条件下可以有 FeAl、Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>、Fe<sub>3</sub>Al、FeAl<sub>3</sub>、FeAl<sub>2</sub>等多种金属间化合物形式存在,而且钢/铝界面易形成 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>和 FeAl<sub>3</sub>的富铝脆性组织层<sup>[2-4]</sup>。过大热输入导致的过厚的铁铝金属间化合物层很容易导致界面处产生裂纹甚至开裂。冷金属过渡焊接技术(CMT)和交流脉冲熔化极气保护焊的熔钎焊接头中金属间化合物厚度可控制在 4~6 μm 之间,抗拉强度约 116 MPa<sup>[5-6]</sup>。激光焊接具有能量密度高、热输入量小、热源易控制、焊缝深宽比大、热影响区窄、焊接变形小以及易实现自动化焊接等优点,也被用于钢/铝的焊接研究<sup>[7-11]</sup>。目前激光焊接的搭接形式,主要有激光深熔焊<sup>[7-8]</sup>、钎焊<sup>[9]</sup>等,可以在适当工艺条件下有效控

制金属间化合物的厚度到约 5 μm,在双焊缝时获得抗拉强度达 155 MPa 的搭接接头。

目前国内外开展的钢/铝异种金属激光填丝焊主要集中于搭接接头<sup>[10]</sup>,采用对接形式的激光焊接采用添加粉末的方式<sup>[11]</sup>,钢/铝异种金属的填丝对接焊不易实现。本文针对钢/铝异种金属对接接头形式,对在特殊设计的坡口形式基础上采用光纤激光填丝熔钎焊获得的钢/铝熔钎焊对接接头进行了微观组织分析,并进一步分析了热输入量对接头组织和力学性能的影响。

# 2 试验条件和分析方法

试验材料采用时效强化处理的 6013 铝合金和经过镀锌处理的普通低碳钢板,使用 AlSi5 (ER4043)焊丝,其化学成分和力学性能分别见表 1 和表 2。焊接试板尺寸分别为 2.5 mm×50 mm×120 mm(铝板)和 2.5 mm×75 mm×120 mm(低碳钢板)。焊接前对试板进行丙酮超声波清洗,铝合金试板采用质量分数为 20% NaOH 溶液清洗以去除氧化膜。试验中采用 IPG10000 光纤激光器作为焊接热源,聚焦光斑直径 0.6 mm,焦距 300 mm,波长 1070 nm,由 KUKA 焊接机器人夹持激光头实施焊接操作。试验中采用对接形式,对接接头钢板一侧开斜坡口,该斜坡口与铝板端面成 30°。采用氩气(Ar)对焊缝表面进行气保护。焊接设备及对接装置示意如图 1 所示。

表 1 母材和焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of substrates and filler wire (mass fraction, %)

Alloy	Element										
	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Ti	C	S	P
6013	0.6~1.0	0.6~1.1	0.8~1.2	≤0.25	0.2~0.8	≤0.1	≤0.5	≤0.25	—	—	—
ER 4043	4.5~6.0	≤0.3	≤0.05	≤0.1	≤0.05	—	≤0.6	≤0.2	—	—	—
Mild steel	≤0.5	—	—	—	≥2.5	—	—	—	≤0.21	≤0.035	≤0.035

表 2 6013 铝合金和低碳钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 6013 Al alloy and mild steel

Alloy	Yield strength	Tensile strength	Elongation
6013	359	379	5
Mild steel	≥235	400~520	≥22

焊接试验时光纤激光光斑作用偏置在铝板一侧,与结合缝(即接头铝板端面)存在一定的偏移量,以避免激光对钢板直接作用而使其产生熔化。在焊接试验中,激光将 ER 4043 焊丝和铝合金侧部分母材熔化,形成的熔池金属与铝合金母材形成熔化连接;由

于钢一侧的斜坡口设计,熔池金属在镀锌钢板斜坡面上铺展并形成钎焊连接。两者共同作用下形成熔钎焊接头。焊接中,焊接速度和送丝速度分别固定为 6 m/min 和 1.8 m/min,激光功率范围为 2.85~3.05 kW,偏移量为 0.5 mm,焦点离焦量为+2mm。

对焊接获得的接头,经过线切割取样后,镶嵌、打磨、抛光制取检测试样,以 KELLER 试剂对焊缝进行腐蚀。采用体式显微镜观察接头的横截面形貌;采用 JSM7600F 场发射扫描电子显微镜(SEM)观察焊缝微观形貌组织,利用自带能谱仪(EDS)分

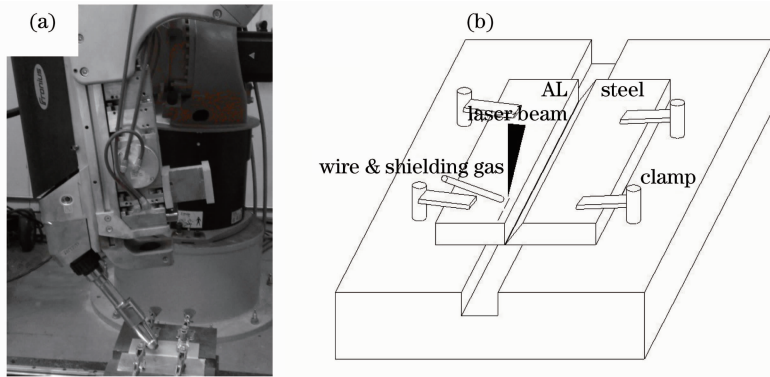


图 1 钢/铝异种金属激光熔钎对接焊示意图。(a) 焊接设备图；(b) 激光填丝熔钎焊对接头  
Fig. 1 Schematic diagram of laser fusion brazing butt joint setup for steel-aluminum dissimilar metals.

(a) Laser welding device; (b) laser wire fusion brazing welded butt joints

析焊缝各区域化学成分及元素分布。采用线切割制取拉伸试样,用磨床去除试样上下面余高,并打磨去除试样侧面的线切割痕迹,然后利用 Zwick T1-FR020TN. A50 万能试验机进行拉伸测试。拉伸试样的尺寸如图 2 所示。

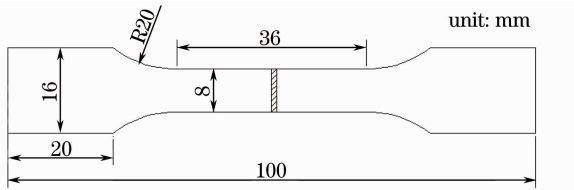


图 2 拉伸试验试样尺寸  
Fig. 2 Size of tensile test specimens

### 3 试验结果及分析

在焊接时,当激光功率为 2.85 kW 时,对接接头未被熔透。在其他同等条件下,激光功率为 2.95 kW 时接头正好熔透,而激光功率为 3.05 kW 时部分已呈过熔透状态。激光偏移量也是钢/铝激光熔钎焊的重要参数之一。试验表明,在 1 mm 偏移量下难以形成钎焊连接。图 3 为本试验中在送丝速度为 6 m/min,焊接速度为 1.8 m/min,激光功率为 2.95 kW,偏移量为 0.5 mm 时获得的成形良好的熔钎焊焊缝横截面。

#### 3.1 典型对接焊缝微观组织分析

图 4 中所示是在焊接速度 1.8 m/min,激光功率 2.95 kW,填丝速度 6 m/min 和偏移量 0.5 mm 时获得的典型对接焊缝的钢一侧连接界面局部微观结构的 SEM 背散射图像。由图像可知,对接焊缝与钢界面处生成的金属间化合物厚度约为 4 μm,且出现明显的分层结构。经过 EDS 分析,紧靠钢一侧的金属间化合物中 Fe 原子百分比为 34.3%,Al 原

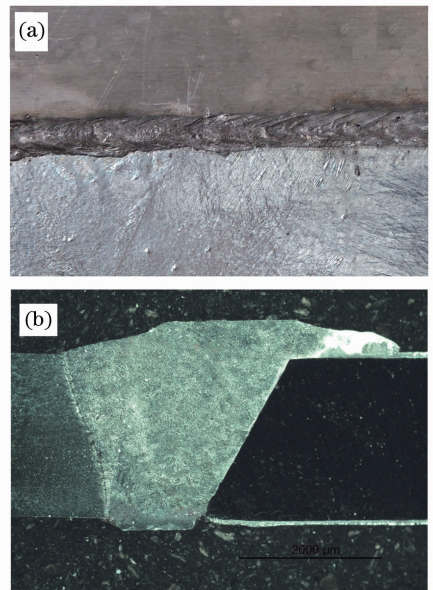


图 3 熔钎焊对接头宏观图像。(a) 表面形貌；  
(b) 横截面

Fig. 3 Macro section of the fusion brazing welded butt joint. (a) Surface appearance; (b) cross section  
子百分比为 62.8%,主要成分为 FeAl<sub>2</sub>,靠近焊缝一侧的金属间化合物中 Fe 原子百分比为 24.4%,Al 原子百分比为 71.6%,主要成分为 FeAl<sub>3</sub>,两层之间



图 4 钢一侧连接界面处的 SEM 图像  
Fig. 4 SEM image of joining interface at a side of steel

厚度比约为 3:1, 钢一侧熔合线附近各组织形貌和其成分点分析结果如图 4 所示。由图可知, 熔合线越靠近钢一侧则熔入的 Fe 元素更多, 远离钢界面处的金属间化合物中 Fe 元素含量降低。金属间化合物主要是由浓度梯度驱动下 Fe、Al 元素的互扩散形成的。在钎焊对接接头中, Fe 元素由钢板一侧向焊缝中扩散, 随着扩散元素浓度梯度变化, 在钢一侧界面处分别形成了 FeAl<sub>2</sub> 以及 FeAl<sub>3</sub> 两种成分的金属间化合物。经过对比发现, 靠近钢板一侧的金属间化合物的边缘较为平直, 而靠近铝合金焊缝的

一侧则参差不齐, 这表明焊接时金属间化合物层是由钢板侧界面向液态金属一侧生长的。

金属间化合物生成主要在焊缝和钢的界面处, 垂直于界面的跨界线扫描结果(如图 5 所示)更明显地显示出 Fe、Al 两种元素含量随着由钢侧界面进入焊缝的距离变化而变化。根据热力学计算分析<sup>[12]</sup>, Fe-Al 化合物的生成顺序是 FeAl, FeAl<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, FeAl<sub>3</sub>, 而由前面的分析可以看出, 在本试验的焊接工艺条件下, 金属间化合物的分层组织主要是 FeAl<sub>2</sub> 和 FeAl<sub>3</sub>, 且变化规律满足热力学计算结果。

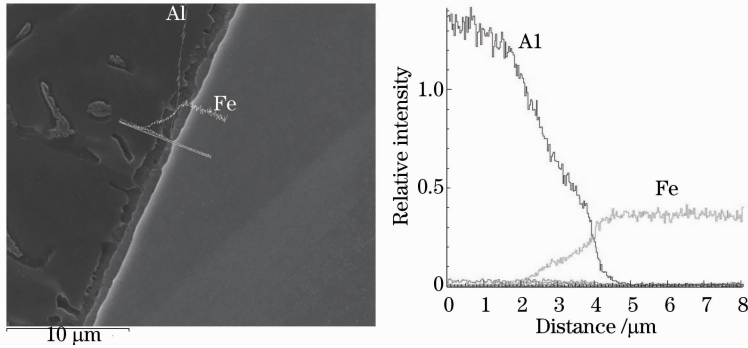


图 5 垂直于钢/铝焊缝界面的 EDS 线扫描结果

Fig. 5 EDS line scan result perpendicular to the interface of steel/Al weld seam

图 6 为沿平行界面方向所得到的线扫描结果, 可以看出, 在紧靠钢侧界面的化合物区内且与界面距离

保持相对固定时, 所产生的金属间化合物成分也相对固定, 生成了 FeAl<sub>2</sub> 的金属间化合物。

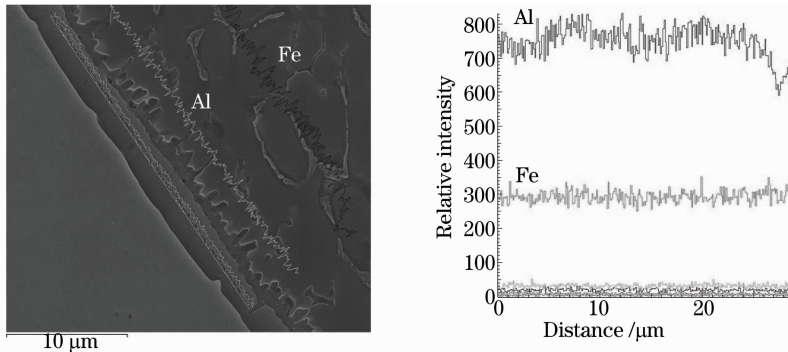


图 6 平行于钢/铝焊缝界面的沿金属间化合物层的 EDS 线扫描结果

Fig. 6 EDS line scan result along the intermetallic compound layer parallel to the interface of steel/Al weld seam

对于焊缝区域来说, 是由 ER4043 Al-Si 焊丝和熔化的 6013 铝合金母材熔合形成的, 典型微观组织形貌的 SEM 照片如图 7 所示。条状物为 Al-Si 共晶组织, 其余为 α-Al 基体, 焊缝中的 Si 主要是由焊丝带入的。在焊缝冷却过程中, 焊缝中 Si 元素在晶界处富集而形成 Al-Si 共晶组织, 共晶组织较为均匀地分布于枝晶晶界上。

焊丝与铝合金母材熔合的过程可以看成是 Si 元素扩散的过程。熔融的焊丝和铝合金母材受浸润铺展作用的影响, 在焊缝与铝合金母材熔合的边缘

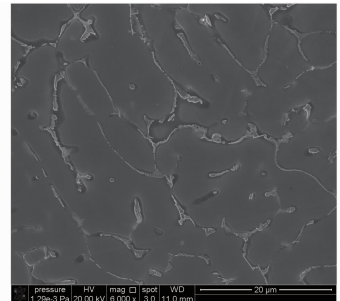


图 7 焊缝中心区 SEM 图像

Fig. 7 SEM image of weld seam center

形成了过共晶组织,如图 8 所示。在焊丝的熔入过程中,伴随着 Si 向铝合金母材的扩散,但由于 Si 扩

散需要的时间较长,故形成了过共晶组织。

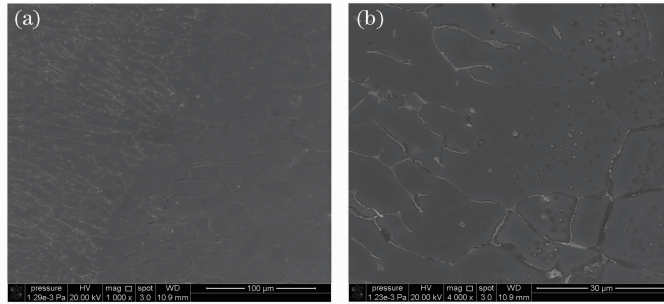


图 8 铝合金一侧熔合线 SEM 图像。(a) 1000 $\times$ ; (b) 4000 $\times$

Fig. 8 SEM images of fusion line at a side of the aluminum alloy. (a) 1000 $\times$ ; (b) 4000 $\times$

### 3.2 热输入量对金属间化合物厚度的影响

钢/铝光纤激光填丝熔钎对接焊来说,影响其焊接效果的主要方面为热输入量的控制,即对钢侧界面处铁铝金属间化合物厚度的控制。在钢/铝焊接过程中改变钢侧的热输入量可改变金属间化合物的厚度。本次试验中在焊接速度固定下通过改变激光功率来实现钢侧热输入量改变,并观察其影响。

试验中采用 2.85、2.95 和 3.05 kW 三种不同功率参数来改变热输入量,如图 9 所示为三种不同功率下的焊缝在钢一侧的熔合线附近微观组织 SEM 图像。金属间化合物厚度依次为 1.8、4.3、5.4  $\mu\text{m}$ ,即随着激光功率的增加,其金属间化合物厚度随之增加。

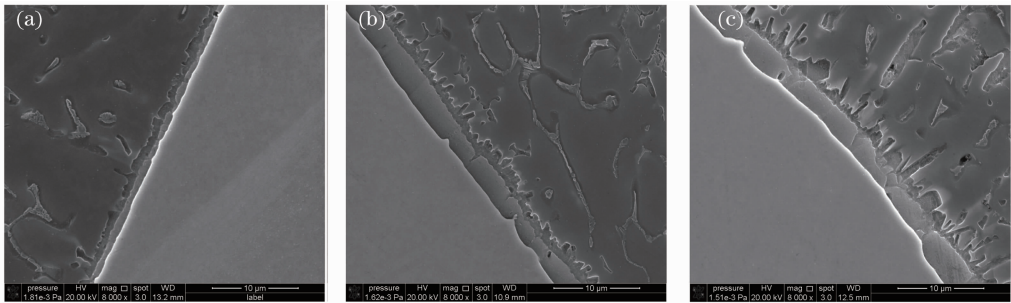


图 9 不同激光功率下钢一侧连接界面的 SEM 图像。(a) 2.85 kW; (b) 2.95 kW; (c) 3.05 kW

Fig. 9 SEM images of joining interface at a side of the steel under different laser powers.

(a) 2.85 kW; (b) 2.95 kW; (c) 3.05 kW

### 3.3 力学性能分析

在 30°坡口角度和不同激光功率下,激光填丝熔钎焊对接接头的拉伸强度进行测试。由断裂面直接观察可知,熔钎焊对接接头拉伸试样均断裂在钢/铝的钎接界面处,断裂试样宏观形态如图 10 所示。由前面焊缝组织分析可知,钎接界面处存在一定厚度的金属间化合物层,金属间化合物厚度是影响熔钎焊对接接头抗拉强度的重要因素。

结果显示,在其他参数相同情况下,激光功率为 2.85 kW 的未熔透接头如按熔透深度计算,其抗拉强度为 113 MPa,功率 2.95 kW 时抗拉强度为 88 MPa,功率为 3.05 kW 时抗拉强度为 74 MPa。而在 2.85、2.95、3.05 kW 功率下,金属间化合物厚度分别为 1.8、4.3、5.4  $\mu\text{m}$ 。由此可见,随着钢侧热输入增加,金属间化合物厚度增加,接头强度也随之



图 10 断裂拉伸试样的宏观形态。(a) 上表面; (b) 侧面  
Fig. 10 Macro form of a broken tensile sample.

(a) Top view; (b) side view

降低,如图 11 中 1~3 试样所示。

设计的对接接头坡口形式下的熔钎焊接头强度不仅受钎接处金属间化合物厚度的影响,还受钎接面积大小的影响。显然增加钢侧斜坡口的角度将增

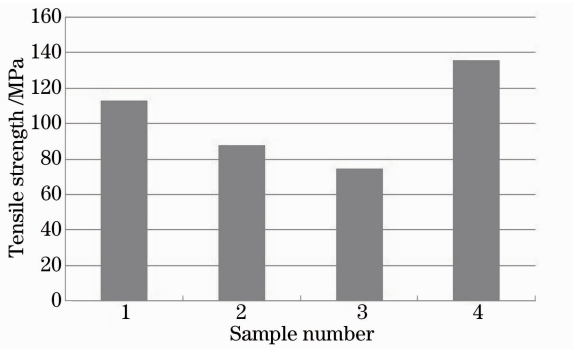


图 11 不同熔钎焊对接接头的抗拉强度。(1) 激光功率为 2.85 kW; (2) 激光功率为 2.95 kW; (3) 激光功率为 3.05 kW; (4) 坡口角度为 45°

Fig. 11 Tensile strength of different fusion brazing welded butt joints. (1) Laser power of 2.85 kW; (2) laser power of 2.95 kW; (3) laser power of 3.05 kW; (4) groove angle of 45°

加钎接面积,当接头钢板坡口角度从 30°增加到 45°,钎接面的面积得到提高(约 22%)。此外,坡口角度为 45°时界面处金属间化合物厚度因热源相对远离而会有所下降,从而使接头抗拉强度提高。对坡口角度为 45°的接头进行的拉伸试验显示其抗拉强度可达到 135 MPa,(即图 11 中的试样 4)与时效强化处理的 6013 铝合金母材的抗拉强度相比,此对接接头的抗拉强度约为铝合金母材的 35.6%。

## 4 结 论

1) 采用自行设计的钢板侧为斜坡口的接头形式和激光光斑偏置铝板的激光填丝焊接工艺,实现了 6013 铝合金和镀锌低碳钢板的激光熔钎焊对接,获得的焊缝成形良好。

2) 接头钢/焊缝界面处生成的金属间化合物主要是  $\text{FeAl}_2$  和  $\text{FeAl}_3$  两种化合物,其中  $\text{FeAl}_2$  相对厚度较大,是钢/铝异种金属焊接接头中最容易生成的金属间化合物。接头中金属间化合物厚度在 2~6  $\mu\text{m}$  之间,且随着热输入的增加而增加。焊缝中的组织则为  $\alpha\text{-Al}$  基体晶界上分布着条状 Al-Si 共晶组织。

3) 优化工艺和 45°坡口角度下激光填丝熔钎焊对接接头的抗拉强度最大可达 135 MPa,约为时效强化 6013 铝合金母材的 35.6%。

## 参 考 文 献

- Chen Jian, Pu Juan, Wu Mingfang, *et al.*. The study progress on the joining technology of Al and Al alloys to steel[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 22(2): 39-44.
- 陈健,浦娟,吴铭方,等. 铝及铝合金与钢连接技术研究进展[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2008, 22(2): 39-44.
- Rattana Borrisutthekul, Taisei Yachi, Yukio Miyashita, *et al.*. Suppression of intermetallic reaction layer formation by controlling heat flow in dissimilar joining of steel and aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 467(1-2): 108-113.
- H Laukant, C Wallmann, M Müller. Fluxless laser beam joining of aluminum with zinc coated steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(2): 219-226.
- H Uzun, C D Donne, A Argagnotto, *et al.*. Friction stir welding of dissimilar Al6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel [J]. Materials and Design, 2005, 26(1): 41-46.
- Cui Qingqing. Study on CMT Welding Technology Between Aluminum Alloy and Galvanized Steel[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2012.
- 崔晴晴. 铝合金和镀锌钢的 CMT 焊接技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2012.
- Sun Jianxiang, Li Yajiang, Qin Guoliang, *et al.*. Microstructure analysis of aluminum and Q235 galvanized steel lap GMAW welding-brazing joint[J]. Modern Welding, 2013, (3): 26-28.
- 孙建雄,李亚江,秦国良,等. 铝和 Q235 镀锌钢搭接 GMAW 熔-钎焊接头组织分析[J]. 现代焊接, 2013, (3): 26-28.
- G Sierra, P Peyre, F Deschaux-Beaume, *et al.*. Galvanized steel to aluminum joining by laser and GTAW processes[J]. Material Characterization, 2008, 59(12): 1705-1715.
- Zhang Mingjun, Chen Genyu, Li Shichun, *et al.*. Experimental investigation on fiber laser overlap welding of automotive aluminum to galvanized steel[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603010.
- 张明军,陈根余,李时春,等. 车用铝合金与镀锌钢光纤激光搭接焊试验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 134-139.
- Zhao Xudong, Xiao Rongshi. Fluxless joining between aluminum alloy and galvanized steel by fiber laser fusion welding-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.
- G Sierra, P Peyre, F Deschaux-Beaume, *et al.*. Steel to aluminum braze welding by laser process with Al-12Si filler wire [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(5): 430-437.
- Wang Tao, Zhou Dianwu, Peng Yan, *et al.*. Steel to aluminum fiber laser butt welding with Si powder pre-filling[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0303009.
- 王涛,周惦武,彭艳,等. 钢/铝异种金属预置 Si 粉的光纤激光焊接[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303009.
- Kobayashi S, Yakou T. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment [J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 338(1): 44-53.

栏目编辑:韩峰