

Si, Mg 对铝/钢熔钎焊焊接接头力学性能的影响

黄健康¹, 李 杰¹, 沈利民², 石 玗¹, 顾玉芬¹, 樊 丁¹

(1. 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, 兰州 730050;
2. 长城汽车股份有限公司, 保定 071000)

摘 要: 采用脉冲旁路耦合电弧 MIG 熔钎焊方法, 分别采用 4043, 5356 铝合金焊丝对 5052 铝合金/镀锌钢异种金属进行了搭接焊. 通过扫描电镜(SEM), 能谱仪(EDS), X 射线衍射仪(XRD)对铝/钢连接界面、接头断裂行为及断口形貌进行了分析, 发现 5356 铝合金焊丝焊接接头的润湿角要大于 4043 铝合金焊丝焊接接头的润湿角, 合金元素 Si 既可改变界面反应层金属间化合物的形态同时还可显著减少 Fe₂Al₅ 层的厚度. 拉伸试验发现 5356 铝合金焊丝焊接所得接头主要断裂于界面反应层, 属于脆性断裂; 4043 铝合金焊丝焊接所得接头主要断裂于熔合区, 是以韧性断裂为主的混合断裂. 通过对 4043 铝合金焊丝焊接所得接头进行显微硬度测试, 发现热影响区组织的显微硬度明显低于其它区域的显微硬度, 这导致 4043 铝合金焊丝焊接接头主要断裂于熔合区.

关键词: 铝/钢熔钎焊; 金属间化合物; 组织与性能; 断口形貌

中图分类号: TG 457 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)08-0096-05

0 序 言

铝及铝合金与钢的热物理性能差异较大且在高温时极易生成脆性的 Al-Fe 金属间化合物, 因此很难实现铝/钢异种金属的良好连接. 为了获得机械性能优良的铝/钢焊接接头, 一方面激光焊、电阻焊、冷金属过渡和激光 + MIG 复合焊等不同的焊接方法被用于铝/钢异种金属的焊接. 另一方面, 在铝/钢焊接过程中通过在焊接接头中引入合金元素来改善铝/钢焊接接头的性能.

因此, 目前, 关于合金元素对铝/钢焊接接头机械性能的影响国内外学者开展了一些研究. 部分研究表明合金元素能够抑制金属间化合物的生成, 改变界面处金属间化合物的物相组成、形态及分布, 最终获得力学性能相对较好的焊接接头^[1-3]. 另一方面, 一些研究结果表明合金元素还可改善液态铝在钢表面的浸润与铺展, 由此实现铝/钢异种金属的良好连接. 宋建岭等人^[4]采用铝硅钎料进行了铝与钢异种合金 TIG 熔钎焊试验, 开发出了适用于 TIG 电弧热源下的特种钎剂, 分析了合金元素 Zn, Sn 对铝与钢焊接浸润性的影响. 此外, Leonardo A J 等人^[5]通过研究不同焊丝对铝/钢焊接接头结构和力学性能的影响, 发现合金元素 Mn 的加入不会改变

反应层中金属间化合物的种类和形态, 对金属间化合物的厚度也无明显影响, 但合金元素 Mn 的存在能够改善接头的整体行为, 选用 Al-3% Si-1% Mn 焊丝时其接头的力学性能最佳. 彭艳等人^[6]用第一性原理研究了 Co, V, Zn, Sn 等元素微合金化在 Fe/Al 界面处的作用并对微合金化的机理做了分析, 微合金化使 Fe/Al 界面的断裂功增加, 其中 Co 的增强效果最好. 由此看来, 一些合金元素的添加对提高铝/钢焊接接头的质量是十分有效的, 因此进一步深入研究合金元素对接头力学性能的影响非常必要.

文中针对合金元素 Si 和 Mg 对铝/钢焊接接头力学性能影响的问题, 分别采用 Al-Si 和 Al-Mg 焊丝用脉冲旁路耦合电弧 MIG 熔钎焊的方法进行了 5052 铝合金和镀锌钢板的搭接焊. 用万能拉伸试验机对两种接头的抗剪强度进行了测试并对接头的断裂行为进行了分析, 采用 SEM 并结合 EDS, XRD 对接头的界面组织、断口形貌及断口的物相组成进行了分析与研究.

1 试验方法

文中采用脉冲旁路耦合电弧 MIG 熔钎焊的方法^[7]进行了铝/镀锌钢异种金属的搭接焊. 试验母材为 5052 铝合金和镀锌钢板, 母材规格均为 200 mm × 80 mm × 1 mm. 填充焊丝为直径 1.2 mm 的 4043(Al-Si), 5356(Al-Mg) 铝合金焊丝, 焊丝化学成

收稿日期: 2014-09-26
基金项目: 973 计划前期研究专项(2014CB660810); 兰州理工大学红柳青年人才培养计划项目(Q201202)

分如表 1 所示.

表 1 铝合金焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of filler wires

焊丝	Mg	Cr	Si	Fe	Zn	Mn	Ti	Al
Al-Si	0.05	0.05	5.00	0.40	0.15	0.05	0.15	余量
Al-Mg	5.00	0.10	0.30	0.40	0.05	0.15	0.01	余量

试验中采用铝板在上,镀锌钢板在下的搭接形式,搭接宽度为 10 mm. 焊接过程中用氩气作为保护气,主路氩气流量为 20 L/min,旁路氩气流量为 5 L/min. 焊接主路平均电流 35 A,旁路平均电流 27 A,旁路、主路采用同步脉冲,脉冲频率 80 Hz,焊接速度 0.8 m/min.

2 试验结果及分析

2.1 铝/镀锌钢熔钎焊焊接接头

焊接接头的拉伸曲线如图 1 所示. 测试结果表明,使用 Al-Si 焊丝焊接接头的平均抗剪强度约为 180 MPa,而使用 Al-Mg 焊丝接头的平均抗剪强度约为 140 MPa.

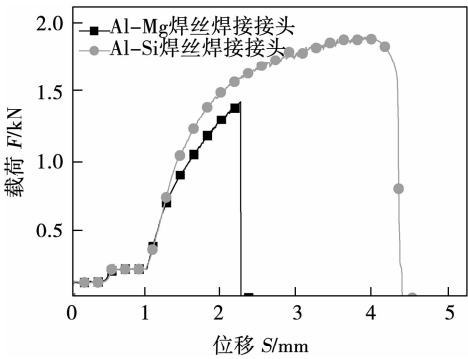
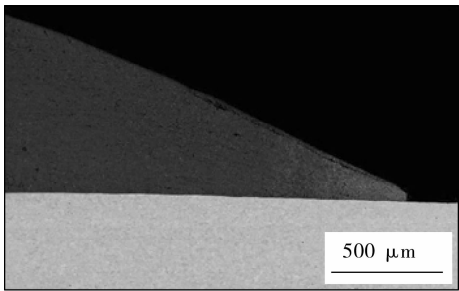


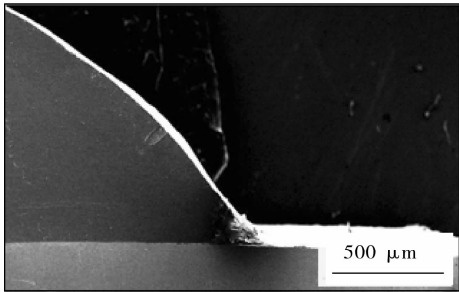
图 1 焊接接头拉伸应力-位移曲线

Fig. 1 Tensile stress-displacement curve of welding joint

铝/钢焊接接头的拉伸性能与接头浸润角的大小密切相关,浸润角较小的焊接接头其拉伸性能相对较好. 试验结果表明使用 Al-Si 和 Al-Mg 焊丝获得的两种焊接接头的浸润角差异较大如图 2 所示,这是由于与 Al-Mg 焊丝相比 Al-Si 焊丝的熔点较低,在焊接过程中液态铝合金在钢表面的浸润与铺展就较好. 试验中对两种焊接接头的浸润角进行了近似测量,Al-Si 焊丝作为填充金属的焊接接头浸润角为 22°,以 Al-Mg 焊丝作为填充金属的接头浸润角为 45°.



(a) Al-Si 焊丝焊接接头

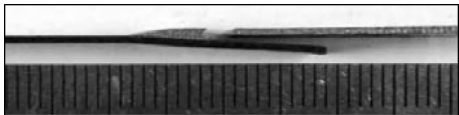


(b) Al-Mg 焊丝焊接接头

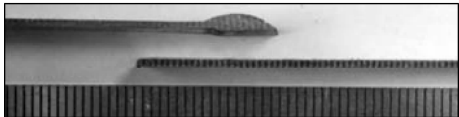
图 2 焊接接头焊趾宏观形貌

Fig. 2 Macrostructures of cross-section of welding toe

图 3 所示为两种不同焊接接头的断裂形式,其中 Al-Si 焊丝焊接接头主要断裂于铝熔合区,Al-Mg 焊丝焊接接头主要断裂于熔钎焊界面. 浸润角较大的铝/钢熔钎焊焊接接头的焊缝宽度相对较小,所以填充 Al-Mg 焊丝所获得焊接接头界面反应层的钎接面积就较小,较小的钎接面积使得接头界面反应层的机械强度较低,在拉伸试验时焊接接头更容易在熔钎焊界面上发生断裂.



(a) Al-Si 焊丝焊接接头



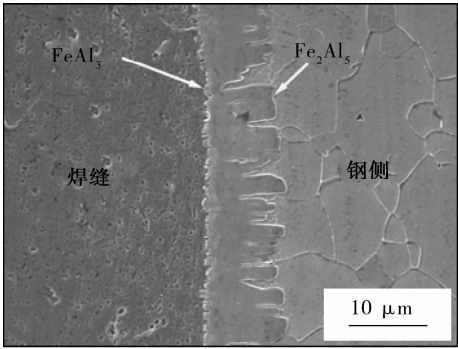
(b) Al-Mg 焊丝焊接接头

图 3 焊接接头断裂宏观形貌

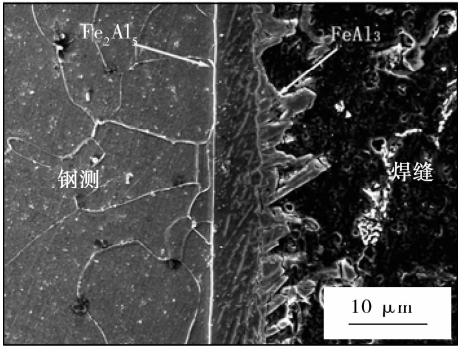
Fig. 3 Macrographs of fractured joint

2.2 焊接接头微观组织分析

图 4a,b 分别展示了焊丝 5356 和 4043 铝焊丝作为填充金属时铝/钢熔钎焊焊接接头界面反应层的微观组织形貌. 以 5356 作为填充金属时铝/钢熔钎焊界面处生成了一层厚约 12 μm 的金属间化合物,前期研究表明^[8],该金属间化合物由靠近钢侧的



(a) Al-Mg焊丝焊接接头



(b) Al-Si焊丝焊接接头

图 4 铝/钢熔钎焊界面微观组织

Fig. 4 Interfacial microstructures of cross-section by aluminum and steel welding-brazing

锯齿状 Fe_2Al_5 和靠近焊缝侧少量块状的 FeAl_3 组成. 当选用 4043 为填充金属时铝/钢熔钎焊界面反应层的金属间化合物明显有两层组成, 研究发现接近钢侧的层状金属间化合物为 Fe_2Al_5 , 靠近焊缝侧的枝晶状金属间化合物为 FeAl_3 .

已有研究结果表明金属间化合物 Fe_2Al_5 是一个脆性相, 对铝/钢熔钎焊钎接面的连接强度是不利的. 除此之外文献[9]还表明铝铁原子反应生成 Fe_2Al_5 时体积会发生明显的膨胀, 这样冷却过程中在基体与金属间化合物层间会产生较大的热应力进而影响钎接面的力学性能. 通过对比图 4a、图 4b 中金属间化合物层的形态、分布及厚度发现, Al-Si 焊丝作为填充金属时金属间化合物 Fe_2Al_5 的厚度要小于 Al-Mg 焊丝作为填充金属时 Fe_2Al_5 的厚度且该金属间化合物的形态有明显的差别. 同时文献[9]表明金属间化合物 Fe_2Al_5 的 C 轴方向存在着大量的空位, 在铝铁原子扩散反应形成 Fe_2Al_5 的过程中大量空穴成了 Al 原子向铁侧快速扩散的通道, 这种特性使得 Al 原子沿 Fe_2Al_5 的 C 轴的扩散速度较快最终在钢基体侧长成锯齿状. 在选用 4043 焊丝作为填充金属时焊丝中的合金元素 Si 会扩散进入 Fe_2Al_5 的空穴中, 从而减缓了 Al 原子沿着这些通道向铁侧扩

散的速度. 一方面导致 Fe_2Al_5 以层状的形态向铁基体侧生长, 另一方面, 使得金属间化合物层 Fe_2Al_5 的厚度明显减少. 因此在选用 4043 焊丝作为填充金属时其界面反应层的金属间化合物 Fe_2Al_5 较薄, 这样更容易获得力学性能较好的钎接面.

在选用 5356、4043 两种填充金属时, 界面反应区 FeAl_3 的厚度和形态也有所不同. 文献[10]表明当液态铝中的 Si 含量从 0%、5% (质量分数) 增加到 10% 时, Fe 在液态铝中的溶解度将从 5.30%、8.7% 增加到 12%. 因此用 Al-Si 合金丝作为填充金属时可增加 Fe 在液态铝中的溶解度和溶解速率, 从而获得较厚的 FeAl_3 . 另一方面, FeAl_3 是小平面相, 晶面择优取向特别强, 在通常生长条件下, FeAl_3 相将以 (100) 和 (001) 两个晶面沿 [010] 晶向生长, 因此焊缝中长大的 FeAl_3 相呈枝晶状. 这种以枝晶状分布在焊缝侧的 FeAl_3 , 一定程度上对焊缝组织有钉扎作用, 能有助于提高界面反应区的力学性能.

图 5 所示为焊接接头的焊缝组织, 结合 Al-Si 合金相图, 发现焊缝中组织重要由初生相 $\alpha(\text{Al})$ 和 Al-Si 共晶体组成. EDS 分析结果表明沿晶界分布的白色组织为 Al-Si 共晶体.

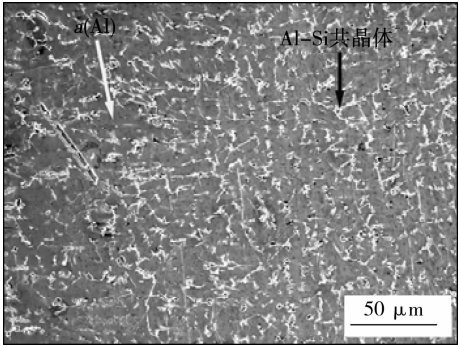


图 5 铝/钢焊接接头焊缝组织

Fig. 5 microstructure of weld bead by aluminum and steel welded joint

图 6 所示为焊接接头铝熔合区附近的组织, 发现熔合区两侧组织分布不均匀. 由于铝熔合线两侧组织的不均匀, 外力在作用于搭接接头时极易引起铝熔合线附近的应力集中, 以致于最易在此处产生裂纹并发生断裂.

为了进一步对使用 4043 填充金属时铝/钢熔钎焊搭接接头的断裂行为作深入分析, 对直线 L 所示区域的显微硬度进行了测试如图 7 所示. 分析发现铝/钢焊接接头焊缝及铝母材的显微硬度均高于铝热影响区的显微硬度, 这是由于在电弧热的作用下

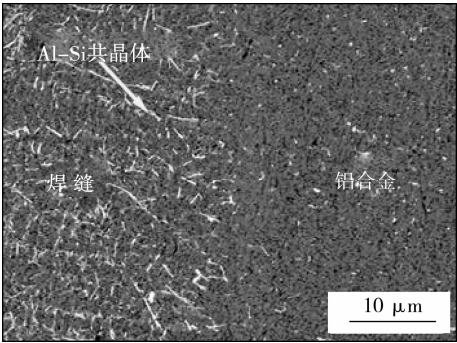


图 6 铝/钢焊接接头铝熔合区组织

Fig. 6 microstructure of aluminum fusion area by aluminum and steel welded joint

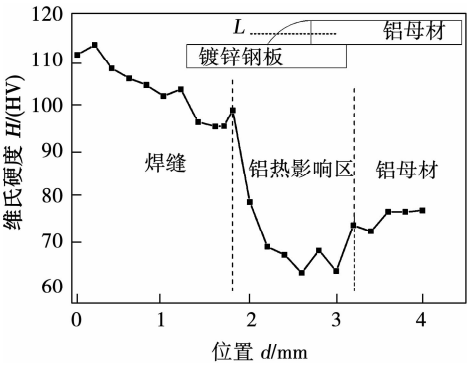


图 7 Al-Si 焊丝接头显微硬度分布

Fig. 7 Distribution of Vickers hardness by Al-Si filler wire welded joint

靠近焊缝侧的铝母材发生了软化. 对比测试结果表明焊缝与热影响区的显微硬度差异较大,因此两侧的组织的抗拉强度及组织的塑性差异也较大,这样在拉应力作用于焊接接头时应力极易在两侧的连接界面即铝熔合区集中,当应力集中到一定程度时接头将在该区域发生断裂.

2.3 拉伸断口分析

为研究影响铝/钢焊接接头力学性能及断裂机理的因素,用 SEM 及 XRD 对接头断口进行了分析. 图 8 所示填充金属为 5356 时,焊接接头断裂于熔钎焊界面的断口形貌. 图 8a 为熔钎焊界面铝侧的断口形貌,图 8b 为图 8a 中 A、B 区域放大像. 图 8c 为熔钎焊界面钢侧的断口形貌,图 8d 为图 8c 中 C 区域放大像. 可以看出断口表面整体较为平整,局部区域有撕裂的痕迹如图 8b 下图所示,断口整体属于脆性断裂. 用 EDS 对图 8 中不同区域断口表面的物相进行了分析,分析发现,整个接头断口表面由 Al-Zn 固溶体、三元 Al-Fe-Zn 金属间化合物及 Al-Fe 金属间化合物组成.

铝/钢焊接接头断口表面接近焊趾处的组织为 Al-Zn 固溶体和连续分布的三元金属间 $\text{Al}_5\text{Fe}_2\text{Zn}_{0.4}$,

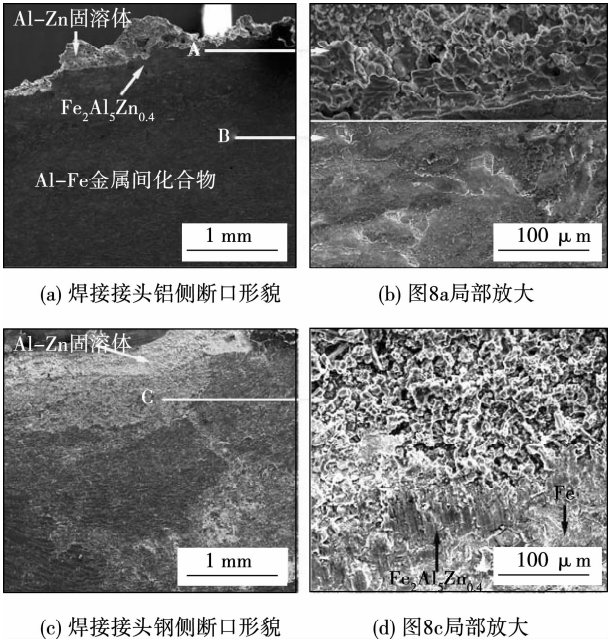


图 8 Al-Mg 焊丝焊接接头断口形貌

Fig. 8 Fracture morphologies of the joint with Al-Mg filler wire

该三元金属间化合物的存在通过对断口表面进行 XRD 测试进一步被证实如图 9 所示. 断口其他区域

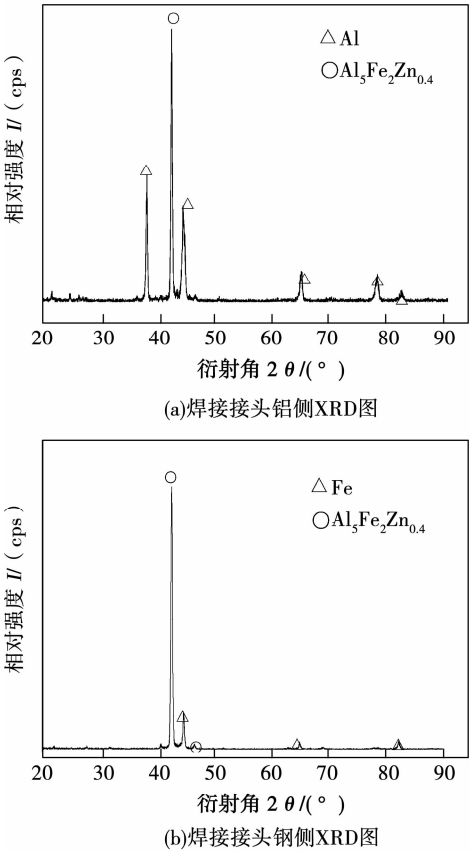


图 9 铝/钢焊接接头断口表面 XRD 图谱

Fig. 9 XRD patterns of fracture appearances by aluminum and steel welded joint

分布着大量的 Al-Fe 金属间化合物. 通过对断口钢侧焊趾附近组织进行分析发现,断口表面分散分布着片状的三元金属间化合物 $Al_5Fe_2Zn_{0.4}$,除此之外还有铁基体存在.

图 10 所示为 4043 焊丝作为填充金属时铝/钢焊接接头断裂于铝熔合区的断口形貌,将断口 D 局部区域进行了放大,可以看出断口表面存在着大量的较浅的韧窝,但局部区域有脆性断口的特征. 因此认为该断口是以韧性断裂为主的混合断裂.

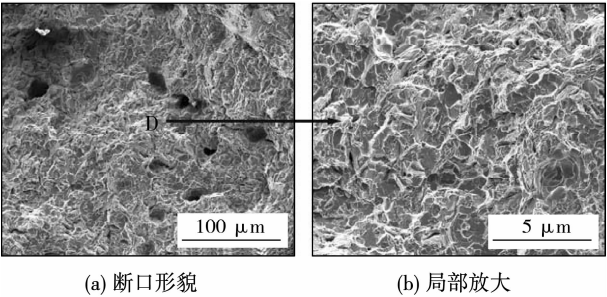


图 10 Al-Si 焊丝焊接接头断口形貌

Fig. 10 Fracture morphologies of the joint with Al-Si filler wire

3 结 论

(1) 4043 铝合金焊丝焊接接头的浸润角要小于 5356 铝合金焊丝焊接接头的浸润角. 拉伸试验时 5356 铝合金焊丝焊接接头主要断裂于界面反应层,属于脆性断裂;4043 铝合金焊丝焊接接头主要断裂于铝熔合区,是以韧性断裂为主的混合断裂.

(2) 在铝/钢熔钎焊中,合金元素 Si, Mg 可改变界面反应层金属间化合物的形态. 同时 Si 还可显著减少 Fe_2Al_5 层的厚度,这对提高铝/钢熔钎焊搭接接头钎接面的力学性能是有利的.

(3) 4043 铝合金焊丝作为填充金属时熔合区附近的显微硬度要小于两侧组织的显微硬度,熔合区两侧组织的力学性能差异较大使得在该区应力集中较大,从而导致焊接接头主要断裂于铝熔合区.

参考文献:

[1] Dong Honggang, Hu Wenjin, Yu Ping, *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]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(2): 458 - 464.

[2] Shi Y, Shao L, Huang J K, *et al.* Effects of Si and Mg elements on the microstructure of aluminum-steel joints produced by pulsed DE-GMA welding-brazing[J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(6): 1118 - 1124.

[3] 董红刚, 胡文金, 段玉平, 等. Si 和 Cu 元素对铝-镀锌钢 GTAW 接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 9 - 12.

Dong Honggang, Hu Wenjin, Duan Yuping, *et al.* Effects of Si and Cu addition on properties of dissimilar aluminum-galvanized steel weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 9 - 12.

[4] 宋建岭, 林三宝, 杨春利, 等. 特种钎剂辅助铝/钢异种合金 TIG 熔-钎焊[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 45 - 48.

Song Jianling, Lin Sanbao, Yang Chunli, *et al.* TIG welding-brazing of special flux assisted aluminum-steel dissimilar alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 45 - 48.

[5] Leonardo A J, Sebastian W, Alois L, *et al.* Influence of filler composition on the microstructure and mechanical properties of steel-aluminum joints produced by metal arc joining[J]. Advanced Engineering Materials, 2009, 11(5): 350 - 358.

[6] 彭 艳, 周恺武, 徐少华, 等. 钢/铝异种金属激光焊接 Fe/Al 界面微合金化的第一性原理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(2): 302 - 305.

Peng Yan, Zhou Dianwu, Xu Shaohua, *et al.* First-principles studies of the effects of microalloy elements on Fe/Al interface for laser lap welding of steel and aluminum[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(2): 302 - 305.

[7] 石 玟, 王 钊, 黄健康, 等. 铝/镀锌钢板脉冲旁路耦合电弧 MIG 熔钎焊工艺及接头组织分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 1 - 4.

Shi Yu, Wang Zhao, Huang Jiankang, *et al.* Study on microstructure of fusing-brazing joint of aluminum to galvanized steel to by pulsed DE-MIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5): 1 - 4.

[8] Shi Yu, Shao Ling, Huang Jiankang, *et al.* Effects of Si and Mg elements on the microstructure of aluminum-steel joints produced by pulsed DE-GMA weld-brazing[J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(9): 1118 - 1124.

[9] Chen Z W, Gregory J T, Sharp R M. Intermetallic phases formed during hot dipping of low carbon steel in a Zn-5 pct Al melt at 450°C[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1992, 23(9): 2393 - 2400.

[10] Chang Y Y, Cheng W J, Wang C J. Growth and surface morphology of hot-dip Al-Si on 9Cr-1Mo steel[J]. Materials Characterization, 2009, 60(2): 144 - 149.

作者简介: 黄健康,男,1981 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师. 主要从事异种金属焊接、焊接物理与焊接过程检测与控制的研究. 发表论文 100 余篇. Email: sr2810@163.com