

DOI: 10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2017.1.02

# Cu 对铝/钢异种金属电阻点焊接头组织 及性能的影响

张月莹, 孙大千, 李洪梅\*, 谷晓燕

(吉林大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

**摘要:** 研究了 Cu 对铝/钢异种金属电阻点焊的影响。结果表明, 铝/钢接头具有熔-钎焊的特点, 主要由熔核区和铝/钢界面区组成。熔核区主要为  $\alpha$ -Al 固溶体; 界面区主要由  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  层和  $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$  层组成, 是接头最薄弱的区域。Cu 对界面区微观组织及接头力学性能具有明显的影响。随着纯 Cu 中间层厚度(0、50、100  $\mu\text{m}$ )增加, 界面区宽度减小, 接头拉剪力提高。这主要归因于 Cu 抑制了 Al-Fe 金属间化合物生长, 改善铝/钢界面区的综合力学性能。因此, 采用纯 Cu 中间层是提高铝/钢电阻点焊接头力学性能的有效途径。

**关键词:** 铝合金; 高强度钢; 电阻点焊; 微观组织; 力学性能

**中图分类号:** TG 457.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2017)01-0008-06

## Effects of Cu on microstructures and properties of resistance spot welded joints of aluminium and steel

ZHANG Yueying, SUN Daqian, LI Hongmei\*, GU Xiaoyan

(School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Effects of Cu on the dissimilar resistance spot welding of aluminium and steel have been investigated in this paper. The results show that the Al-steel joint have welding-brazing characteristics and included the nugget zone and Al/steel interface zone. The nugget zone contains of  $\alpha$ -Al solid solution, and the interface zone contains the  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  layer and  $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$  layer, which is the weakest region in the joint. The Cu has significant effects on the interface zone microstructures and joint properties. With increasing of pure Cu interlayer thickness(0, 50 and 100  $\mu\text{m}$ ), the interface zone width decreased and joint tensile shear force enhanced, which is mainly attributed to Cu restraining the growth of Al-Fe intermetallic compounds and improving properties of Al/steel interface zone. It is an effective way to use the Cu interlayer for enhancing mechanical properties of resistance spot welded joints of aluminium and steel.

收稿日期: 2016-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275204)

作者简介: 张月莹(1988-), 女, 汉族, 内蒙古通辽人, 吉林大学博士研究生, 主要从事异种金属连接方向研究, E-mail: zhangyy12@mails.jlu.edu.cn. \* 通讯作者: 李洪梅(1982-), 女, 汉族, 吉林农安人, 吉林大学高级工程师, 主要从事先进材料连接方向研究, E-mail: lihongmei@jlu.edu.cn.

**Key words:** aluminium alloy; high strength steel; resistance spot welding; microstructures; mechanical properties.

## 0 引言

随着能源危机和环境污染问题的不断加剧,汽车轻量化已成为当今发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。增加铝合金等轻量化材料的使用量是实现汽车轻量化的有效方法<sup>[2]</sup>。随之而来的铝/钢异种金属的连接成为亟待解决的问题。固相焊方法有利于实现铝/钢的连接,但其柔性相对较差,在实际生产中的应用有一定的局限性。近年来,铝/钢熔-钎焊引起人们的普遍关注。目前有代表性的铝/钢熔-钎焊方法主要包括:TIG电弧熔-钎焊<sup>[3]</sup>、MIG电弧熔-钎焊<sup>[4]</sup>、激光熔-钎焊<sup>[5]</sup>、冷金属过渡熔-钎焊<sup>[6]</sup>、激光-MIG复合熔-钎焊<sup>[7]</sup>、脉冲旁路耦合电弧MIG熔-钎焊<sup>[8]</sup>等。电阻点焊是汽车工业广泛应用的焊接方法。研究表明,铝/钢界面的Al-Fe金属间化合物是影响铝/钢电阻点焊接头性能的主要因素<sup>[9]</sup>。文中研究了Cu对铝/钢异种金属电阻点焊接头组织及性能的影响,其目的旨在为改善铝/钢接头的力学性能提供必要的理论依据。

## 1 试验材料、方法及设备

试验选用一汽-大众公司使用的EN AW 6008-T66铝合金板和H220YD-Z100镀锌高强度板作为母材,其板厚分别为1.5 mm和1.0 mm。将铝合金、高强度板加工成尺寸为100 mm × 25 mm的试件,点焊接头为搭接形式,如图1所示。

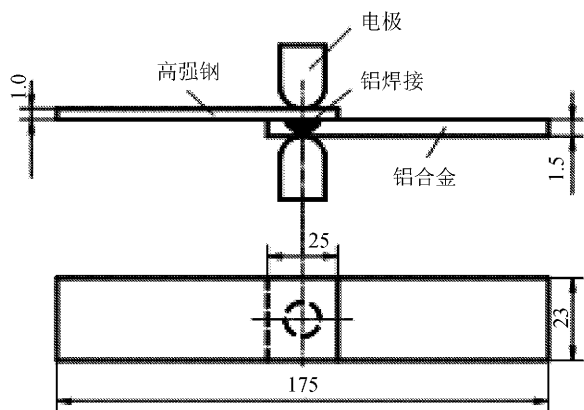


图1 铝/钢电阻点焊示意图

采用Nimak公司生产的中频电阻点焊设备进行铝/钢异种金属电阻点焊试验,主要焊接参数见表1。

表1 铝/钢电阻点焊工艺参数

焊接电流/ kA	焊接时间/ ms	电极压力/ kN	保留时间/ ms
24	350	3.5	400

试验选用厚度为50、100  $\mu\text{m}$ 的纯铜箔作为中间层,将其置于铝合金与高强度钢之间,研究铜对铝/钢点焊接头组织及性能的影响。

试验采用OLYMPUS SZ61型体式显微镜、Hitachi S-3400N型扫描电子显微镜(SEM)、EDAX型能谱仪(EDS)和D/Max 2500PC型X射线衍射仪(XRD)研究铝/钢接头的微观组织。采用MTS810型电液伺服力学性能测试系统测试铝/钢点焊接头的拉剪力。

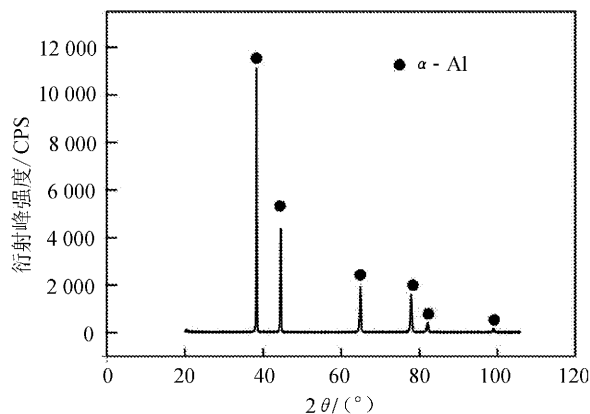
## 2 试验结果与分析

### 2.1 铝/钢接头组织结构特点

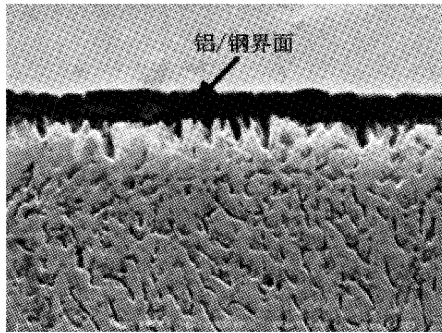
不加纯Cu中间层条件下铝/钢电阻点焊接头的截面形貌、XRD分析及断裂位置如图2所示。



(a) 接头截面



(b) XRD分析

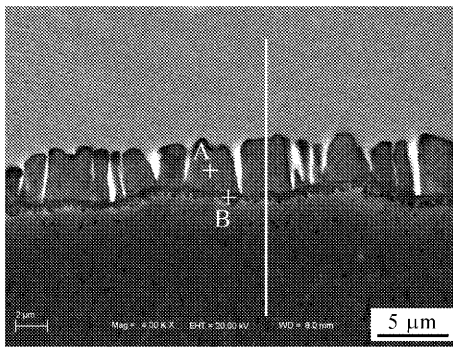


(c) 断裂位置

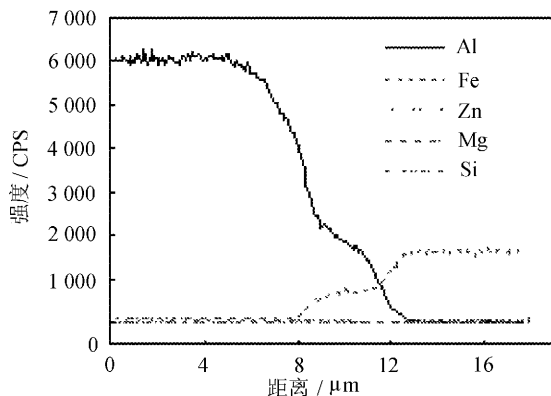
图 2 铝/钢点焊接头截面形貌、XRD 分析及断裂位置

由图 2(a)可知,在焊接过程中,铝合金熔化形成液态熔核,而钢保持固态,铝和钢的连接主要通过液态铝在固态钢表面的润湿、铺展和界面反应。因此,该接头具有熔-钎焊的特点,主要由熔核区和铝/钢界面区组成。试验结果表明,熔核直径约 9.6 mm,主要为  $\alpha$ -Al 固溶体(图 2(b)),在拉-剪载荷作用下接头断裂主要发生在铝/钢界面区(图 2(c)),这意味着界面区是影响铝/钢接头力学性能的主要因素。

铝/钢界面区的微观组织及 EDS 线扫描分析结果如图 3 所示。



(a) 微观组织



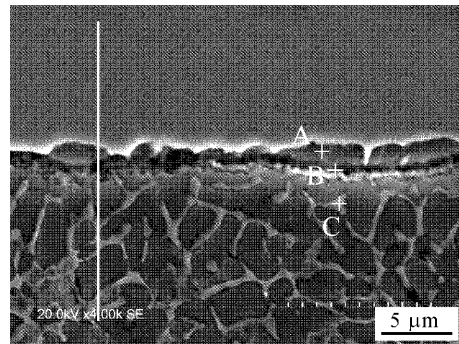
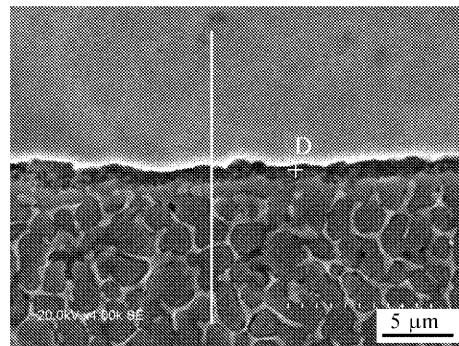
(b) EDS 分析

图 3 铝/钢界面区微观组织及 EDS 线扫描分析结果

根据 SEM、EDS 及 XRD 分析结果,不加 Cu 中间层条件下,界面区的平均宽度为 4.3  $\mu\text{m}$ (图 3(a));焊接过程中,在浓度梯度作用下主要发生 Al、Fe 原子的互扩散(图 3(b));界面反应形成的界面区具有双层结构特点:靠近钢母材侧为舌形的  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  层,靠近铝熔核侧为细小针状的  $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$  层<sup>[9]</sup>。由于脆硬的 Al-Fe 金属间化合物促进裂纹的萌生与扩展,因此,它是恶化铝/钢电阻点焊接头力学性能的本质原因。

## 2.2 Cu 对铝/钢接头微观组织的影响

研究表明,Cu 对熔核直径无明显的影响,但对铝/钢界面区具有较明显的影响。Cu 中间层厚度 50、100  $\mu\text{m}$  条件下界面区的微观组织及 EDS 分析结果分别如图 4~图 6 所示。

(a) 50  $\mu\text{m}$ (b) 100  $\mu\text{m}$ 图 4 Cu 中间层厚度 50、100  $\mu\text{m}$  条件下铝/钢界面区的微观组织

由图 4 可见,与图 3(a)相比 Cu 对界面区宽度具有明显的影响。Cu 中间层厚度由 50  $\mu\text{m}$  增至 100  $\mu\text{m}$ ,界面区宽度由 2.0  $\mu\text{m}$  降至 1.1  $\mu\text{m}$ 。这一结果证明,Cu 具有抑制 Al-Fe 金属间化合物生长的作用。根据 EDS 线扫描分析结果,焊接过程中主要发生 Al、Fe 原子的互扩散(见图 5)。EDS 面扫描结果表明,随着 Cu 中间层厚度增加,

熔核区和界面区的 Cu 浓度有增加的趋势(见图 6)。

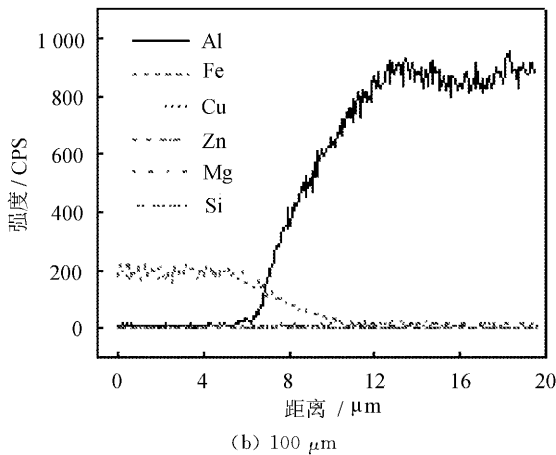
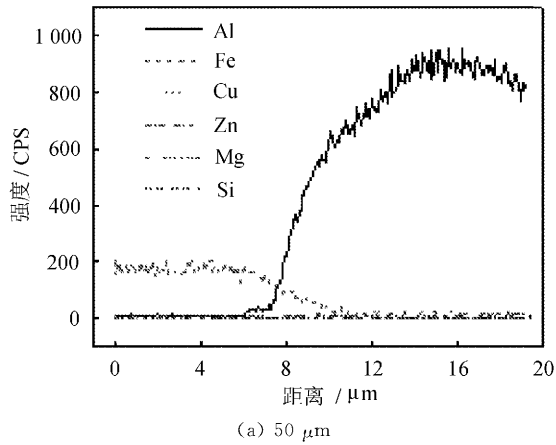


图 5 Cu 中间层厚度 50、100 μm 条件下铝/钢界面区的 EDS 线扫描分析结果

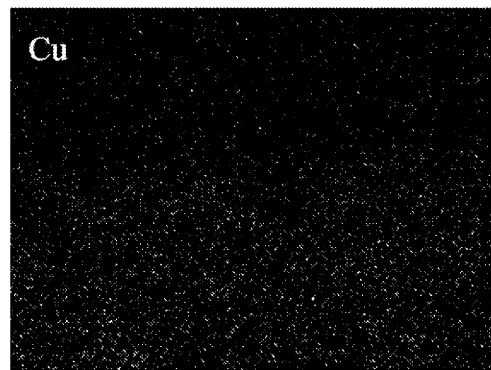
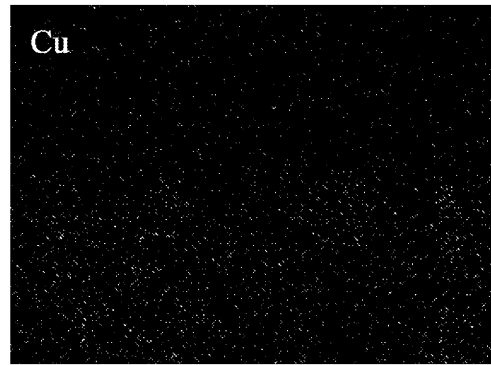


图 6 Cu 中间层厚度 50、100 μm 条件下铝/钢界面区的 EDS 面扫描分析结果

界面区及相邻熔核区的化学成分 EDS 分析结果见表 2。

表 2 界面区及相邻熔核区的化学成分 EDS 分析结果

Elements	Al		Fe		Cu		Zn		Si	
	wt. %	at. %	wt. %	at. %	wt. %	at. %	wt. %	at. %	wt. %	at. %
A	51.55	68.73	46.24	29.79	1.22	0.69	0.67	0.37	0.23	0.29
B	57.92	74.03	37.88	23.39	2.90	1.57	0.91	0.48	0.14	0.17
C	61.72	78.66	1.71	1.05	35.69	19.31	0.23	0.12	0.29	0.35
D	61.39	76.88	32.33	19.56	5.36	2.85	0.62	0.32	0.13	0.16

随着 Cu 中间层厚度增加, 界面区 Cu 含量增加。Cu 中间层厚度为 50 μm 时, 图 4(a) 中微区 A、B、C 的主要化学成分分别为 51.55wt.% Al + 46.24wt.% Fe + 1.22wt.% Cu; 57.92wt.% Al + 37.88wt.% Fe + 2.90wt.% Cu; 61.72wt.% Al + 35.69wt.% Cu。根据它们的原子百分比及 Al-Fe-Cu 三元合金相图, 界面区靠近钢母材侧的 A 区主要为 (Fe, Cu)<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 相, 靠近铝熔核侧的 B 区主要为 (Fe, Cu)<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> 相; 靠近界面的 C 区应主要由

α-Al + CuAl<sub>2</sub> 组成。Cu 中间层为 100 μm 时, 界面区 D 的主要化学成分为 61.39wt.% Al + 32.33wt.% Fe + 5.36wt.% Cu, 因此, 应主要为 (Fe, Cu)<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> 金属间化合物。

Cu 对铝/钢界面区的影响主要归因于影响 Al、Fe 原子的互扩散和形成 Al-Fe 金属间化合物固溶体。在焊接过程中, Cu 原子不断向 Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> 晶面沉积, 一定程度上阻隔了 Al、Fe 原子的互扩散, 抑制了 Al-Fe 金属间化合物的生长。随着 Cu

中间厚度增加,界面区 Cu 含量增加,抑制金属间化合物生长的作用增强,因此导致界面区宽度减小。Cu 原子的晶体结构与 Fe 原子相近,在 Al-Fe 金属间化合物形成过程中 Cu 原子可部分置换 Fe 原子形成  $(\text{Fe}, \text{Cu})_2 \text{Al}_5$ 、 $(\text{Fe}, \text{Cu})_4 \text{Al}_{13}$  相。由于 Al-Cu 键相对于 Al-Fe 键具有相对更高的金属性,因此,有利于降低 Al-Fe 金属间化合物的脆硬性,改善其综合力学性能<sup>[10]</sup>。

### 2.3 铜对铝/钢接头力学性能的影响

试验结果表明, Cu 对铝/钢异种金属电阻点焊接头的力学性能具有明显的影响。Cu 对接头拉剪力影响的试验结果如图 7 所示。

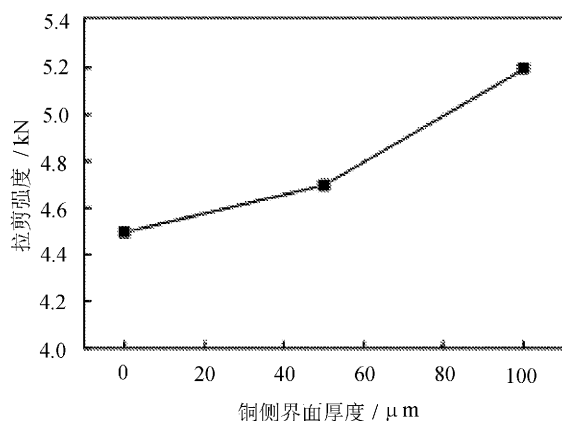
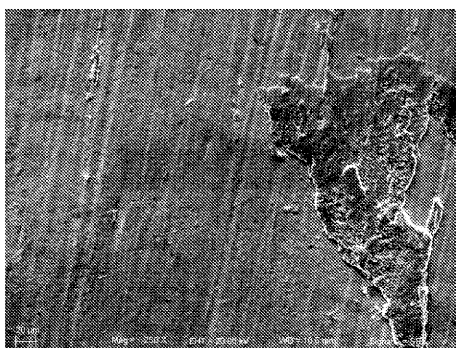
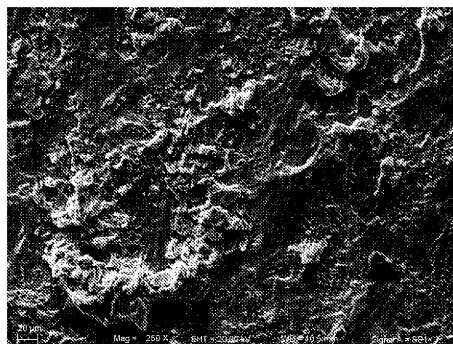


图 7 Cu 对铝/钢接头拉剪力的影响

由图可见,不加 Cu 中间层时铝/钢接头的拉剪力为 4.5 kN, Cu 中间层厚度由 50  $\mu\text{m}$  增至 100  $\mu\text{m}$ ,接头拉剪力由 4.7 kN 增至 5.2 kN。这主要归因于 Cu 的溶入形成  $(\text{Fe}, \text{Cu})_2 \text{Al}_5$ 、 $(\text{Fe}, \text{Cu})_4 \text{Al}_{13}$  金属间化合物,降低界面区的脆硬性,改善其综合力学性能。研究表明,在拉剪力作用下铝/钢电阻点焊接头断裂主要发生在铝/钢界面区。Cu 对铝/钢接头断口形貌的影响如图 8 所示。



(a) 不加 Cu 中间层



(b) Cu 中间层厚度 100  $\mu\text{m}$

图 8 Cu 对铝/钢电阻点焊接头断口形貌的影响

不加 Cu 中间层时,断口表面较为平坦,具有脆性断裂特征(图 8(a)); Cu 中间层厚度 100  $\mu\text{m}$  时,在断口表面可看到一定的塑性特点(图 8(b)),这进一步证明 Cu 有利于改善界面区的综合力学性能。基于以上研究结果,加纯 Cu 中间层是改善铝/钢异种金属电阻点焊接头组织及性能的有效途径。

### 3 结 语

1) 铝/钢异种金属电阻点焊接头具有熔-钎焊的特点,主要由熔核区和铝/钢界面区组成。熔核区主要为  $\alpha$ -Al 固溶体;界面区具有双层结构,主要由  $\text{Fe}_2 \text{Al}_5$  层和  $\text{Fe}_4 \text{Al}_{13}$  层组成,它是铝/钢接头最薄弱的区域。

2) Cu 对铝/钢界面区具有明显的影响。随着 Cu 中间层厚度增加,界面区宽度减小。中间层厚度 50  $\mu\text{m}$  时,界面区主要有  $(\text{Fe}, \text{Cu})_2 \text{Al}_5$  层和  $(\text{Fe}, \text{Cu})_4 \text{Al}_{13}$  层;中间层厚度 100  $\mu\text{m}$  时,界面区主要为  $(\text{Fe}, \text{Cu})_4 \text{Al}_{13}$  金属间化合物。

3) Cu 对铝/钢接头的力学性能具有明显的影响。随着 Cu 中间层厚度增加,接头拉剪力提高,主要归因于 Cu 能抑制 Al-Fe 金属间化合物生长,改善其综合力学性能。因此,采用纯 Cu 中间层是提高铝/钢电阻点焊接头力学性能的有效途径。

#### 参考文献:

- [1] Miller W S, Zhuang L, Bottema J, et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 280(1): 37-49.
- [2] Pfestorf M. Manufacturing of high strength steel and aluminum for a mixed material body in white

- [J]. *Advanced Materials Research*, 2005, 68: 109-124.
- [3] Lin S B, Song J L, Yang C L, et al. Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal[J]. *Materials and Design*, 2010, 31(5): 2637-2642.
- [4] Su Y C, Hu X M, Wu Y X. Influence of alloy elements on microstructure and mechanical property of aluminum-steel lap joint made by gas metal arc welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214: 750-755.
- [5] Zhang M J, Chen G Y, Zhang Y, et al. Research on microstructure and mechanical properties of laser keyhole welding-brazing of automotive galvanized steel to aluminum alloy[J]. *Materials and Design*, 2013, 45: 24-30.
- [6] Yang S L, Zhang J, Lian J, et al. Welding of aluminum alloy to zinc coated steel by cold metal transfer [J]. *Materials and Design*, 2013, 49: 602-612.
- [7] 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]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214: 2684-2692.
- [8] Shi Y, Shao L. 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(9): 1118-1124.
- [9] Zhang W H, Sun D Q. Interfacial microstructure and mechanical property of resistance spot welded joint of high strength steel and aluminium alloy with 4047 AlSi<sub>12</sub> interlayer[J]. *Materials and Design*, 2014, 57: 186-194.
- [10] Song J L, Lin S B, Yang C L, et al. Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal[J]. *Materials and Design*, 2010, 31(5): 2637-2642.