

# 纯铝 1060/镀锌钢电阻点钎焊工艺及接头性能

张昌青<sup>1</sup>, 金鑫<sup>2</sup>, 王维杰<sup>2</sup>, 秦卓<sup>2</sup>, 荣琛<sup>2</sup>

(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. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050)

**摘 要:** 采用电阻点钎焊进行了纯铝 1060 与 SGCC 热镀锌钢板的搭接试验, 研究了接头界面组织, 并测试了接头力学性能. 结果表明, 试验所用铝硅 (Al-Si) 合金钎料润湿良好, 焊后接头焊缝界面处产生了具有双层结构且厚度不均的金属间化合物, 厚度小于 10  $\mu\text{m}$ ; 焊接电流为 7.8 kA 时, 接头抗拉剪载荷达到峰值, 约为 4.72 kN, 在相同工艺参数下, 电阻点钎焊接头的抗拉剪载荷明显高于点焊接头; 接头断裂大都发生在铝板侧, 且主要在热影响区处而不在焊点处, 说明点钎焊接头质量良好, 但由于焊缝铝侧界面局部存在“未钎合”缺陷, 焊缝界面会产生拉应力且在金属间化合物的应力作用下易产生裂纹.

**关键词:** 纯铝; 镀锌钢; 电阻点钎焊; 微观组织; 力学性能

**中图分类号:** TG 438.2; TG 454

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400252

## 0 序 言

铝及其合金相较于钢因其密度低, 可在不增加重量的前提下增加结构强度而越来越广泛应用于汽车制造等行业, 尤其对重载汽车的轻量化作用十分明显<sup>[1]</sup>, 铝制汽车的轻量化优势和环保价值不断突出<sup>[2]</sup>. 但单一材料往往不能满足实际应用中, 对车辆的各项要求, 尤其在碰撞过程中全铝车架变形明显, 相比高强度钢车架很难保证生存空间不被挤压. 在充分利用这两种金属材料的固有优势, 减轻重量、节约成本方面, 铝/钢异种金属复合结构具有独特的优势<sup>[3-6]</sup>. 但铝和钢之间的固溶度较低、热物理性能差异较大等问题会导致在焊接时, 铝与钢极易反应生成脆性的金属间化合物, 这种金属间化合物降低了接头的力学性能, 对焊接质量产生严重的不利影响<sup>[7]</sup>. 因此研究发展铝/钢连接技术并将其应用于实际生产是突破汽车轻量化难题的关键一步.

电阻点焊因其生产效率高、能耗低、易于实现自动化等优点而广泛应用于汽车生产中连接环节<sup>[8]</sup>. 日本熊本大学 Qiu 和 Satonaka 等人<sup>[9]</sup>采用电阻点焊对 A5052 铝合金和 SPCC 低碳钢进行焊接, 在接头界面处发现  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  和  $\text{FeAl}_3$  等金属间化合物的生成, 降低了接头力学性能. 接头中金属间化

合物层的厚度增加会使抗拉强度下降, 试验所得接头的金属间化合物层 1.5  $\mu\text{m}$  厚时, 其抗拉强度最高只能达到 6.5 MPa<sup>[10]</sup>. 河南科技大学张柯柯等人<sup>[11]</sup>采用了电阻点焊热补偿法对 A6061 铝合金和 Q235 低碳钢做了焊接试验, 焊接电流和压力增大时, 接头熔核直径和拉剪力也随之增大, 高焊接电流下铝钢间有效连接面积增大, 接头质量提高, 并且在试验过程中发现在界面区域会生成  $\text{FeAl}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  等脆性金属间化合物. 哈尔滨工业大学何鹏等人<sup>[12]</sup>对纯铝板与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板进行钎焊, 在两板材间预置硅焊膏作为钎料, 钎焊过程中 Si 元素在连接界面处富集, 形成隔层, 阻碍了金属间化合物向铝侧的生长, 当金属间化合物脆性层厚度较小 (低于 10  $\mu\text{m}$ ) 时, 接头由脆性断裂向韧性断裂转变, 其强度明显提高.

基于铝/钢电阻点焊存在的缺陷, 提出了一种用于铝/钢连接的钎焊与电阻点焊的复合连接方法, 该方法综合了钎焊和电阻点焊的优点, 称为“点钎焊”, 实现了 1060 纯铝与镀锌钢的优质连接.

## 1 试验方法

试验用母材为 1060 工业纯铝板以及 SGCC 热镀锌钢板, 尺寸均为 100 mm  $\times$  25 mm  $\times$  1 mm, 纯铝及镀锌钢母材的化学成分如表 1 所示. 试验所用钎

料为铝硅 (Al - Si) 合金钎料, 其具有良好的漫流性及耐腐蚀性, 在焊接热输入下易均匀地填满接头间隙. 铝/钢进行电阻点钎焊的过程中, 由于铝表面附着有一层致密氧化膜, 不处理直接焊接易引起飞溅等焊

接缺陷, 且其对接头性能产生有害影响, 因此在焊前必须对试板进行预处理, 利用打磨机和砂纸将铝板表面及侧边的氧化膜去除, 再将铝板与镀锌钢板用丙酮清洗, 以防止板材表面杂质对试验的影响.

表 1 母材化学成分及力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of base metal

材料	化学成分(质量分数, %)							屈服强度 $R_{eL}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断后伸长率 $A$ (%)
	C	Mn	P	S	Si	Fe	Al			
1060铝	—	0.03	—	—	0.25	0.35	>99.60	90	100	12.0
镀锌钢	0.06	0.16	0.02	0.01	0.02	—	—	297.40	370.80	32.4

钎料涂覆方式如图 1 所示, 以搭接件的搭接区域中心点为圆心, 涂覆的钎料区为该圆心的同心圆环, 外径为 5 mm, 环宽 0.20 mm.

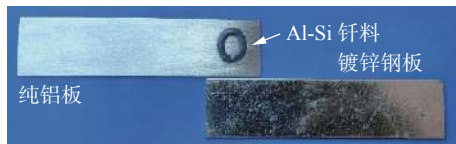


图 1 钎料涂覆方式示意图  
Fig. 1 Mode of solder coating

采用搭接形式进行焊接, 铝板在下, 钢板在上, 并在铝板下端添加工艺垫片, 用以改善铝侧热量不均匀现象, 焊接形式如图 2 所示. 第一阶段采用短时、强电流、大压力参数形成点焊熔核; 第二阶段采用小电流或不通电使温度场平衡均匀化; 在第三阶段采用长时、大电流、小压力参数使钎料溶解、润湿铺展并与母材进行冶金结合, 完成钎焊过程形成焊点. 试验选用自行研制的 KDWJ-17 型智能电阻点焊机, 其额定负载持续率为 30%, 额定初级电流为 100 A, 最大电极压力为 5.5 kN, 初级电压为 380 V, 次级电压范围为 4.75 ~ 9.5 V.

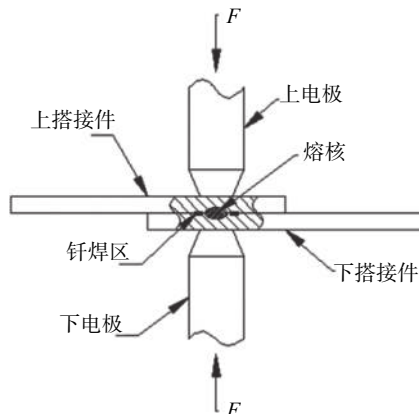


图 2 点钎焊形式示意图  
Fig. 2 Schematic of resistance spot braze welding

试验采用正交优化并利用单元素变化法分别分析焊接电流  $I$ 、焊接时间  $t$  和电极压力  $P$  三个主要参数对铝/钢点钎焊接头质量的影响. 经过后期试验确定焊接时间  $t$  为 10 s, 焊接电流范围为 7.6 ~ 8.0 kA 时点钎焊接头质量较高, 针对此焊接电流范围重点进行了搭接试验, 电极压力  $P$  对接头质量的影响有限, 不作为考察变量. 焊后取部分成形良好试件沿焊点中心线剖开制成金相试样, 用金相显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 观察接头组织, 通过线扫描及能谱分析 (EDS) 分析界面组织结构; 另取焊后试件采用 WDW-100 型电子万能拉伸机进行抗拉剪载荷测试, 每一种焊接电流条件拉剪三组试样, 将所得三组拉剪载荷求平均值, 做为该焊接电流参数点钎焊接头抗拉剪载荷值. 进行了相同焊接电流参数下电阻点钎焊与电阻点焊的对比试验.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 接头组织结构分析

为确定试验所得焊接接头的连接机理, 通过光学显微镜对接头焊点区的金相组织进行观察, 由图 3 可清晰地观察到在纯铝板和镀锌钢板之间存在着

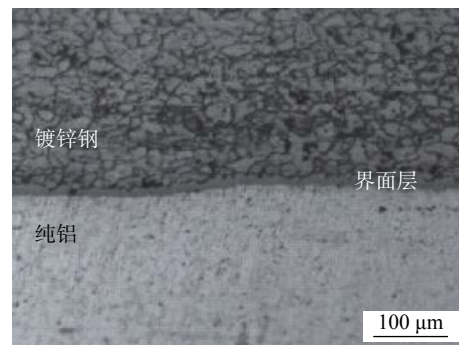


图 3 点钎焊接头微观组织  
Fig. 3 Microstructure of the welded joint

界面层, Al-Si 钎料受热润湿铺展并能够与基体金属紧密结合. 为了进一步研究接头是否达到有效连接, 通过 SEM 扫描电子显微镜和 EDS 能谱线扫描分析对焊缝进行了进一步的观察与分析.

2.1.1 接头宏观形貌及微观组织结构

图 4 为接头宏观形貌及不同区域微观组织. 由图 4b 和图 4c 可以观察到, 纯铝与镀锌钢的焊缝界

面产生了厚度不均匀的金属间化合物层. 远离接头中心的 A 区中焊缝界面处的金属间化合物明显具有双层结构的特征, 靠近镀锌钢一侧的金属间化合物呈现出细密的板状结构, 厚度约为 8  $\mu\text{m}$ , 它与镀锌钢之间的界面为平直态; 靠近铝一侧的金属间化合物为粗细不均的针状和棒状结构, 厚度约 2.5 ~ 9  $\mu\text{m}$  不等, 针状金属间化合物向铝侧母材生长.

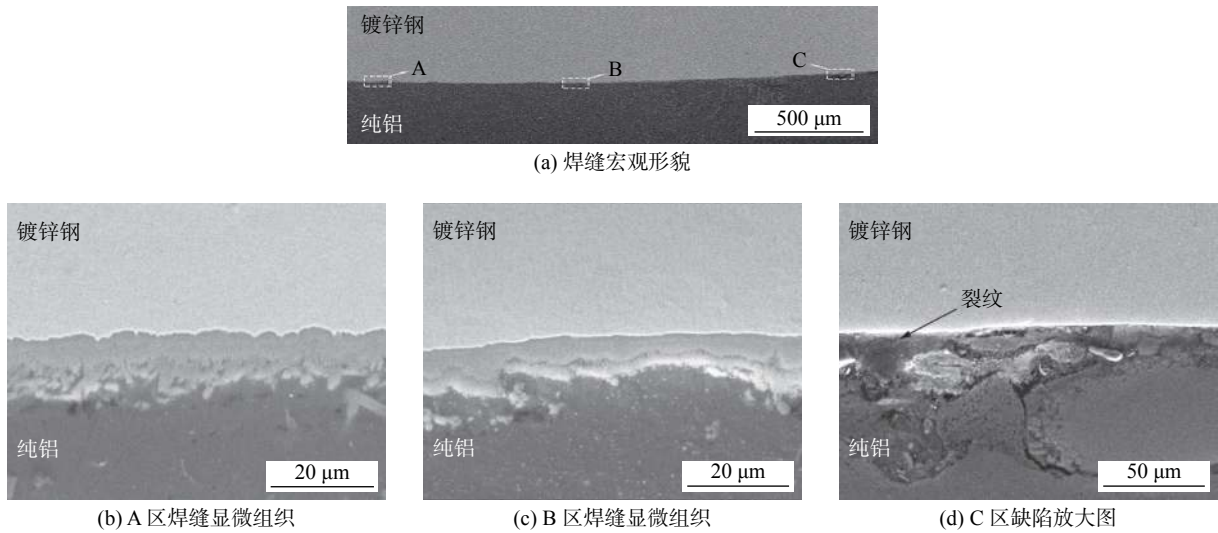


图 4 接头宏观形貌及不同区域微观组织

Fig. 4 Macroscopic morphology and microstructure in different areas of the joint

接头中心 B 区界面处金属间化合物层的厚度相较于 A 区明显减小, 其厚度约为 3.0  $\mu\text{m}$ . 该区域界面的金属间化合物也具有双层结构. 但是其界面形貌特征与远离接头中心处界面的金属间化合物层相比具有明显的不同: 靠近镀锌钢侧为板状结构, 靠近铝合金侧为细小的絮状结构.

因为铝/钢之间的线膨胀系数等物化性能相差较大, 焊缝界面处存在焊接缺陷, 如图 4d 所示. 图中所示焊缝界面处的裂纹缺陷, 是由于在焊接过程中存在着迅速升温 and 冷却的过程, 温度的迅速变化

导致接头焊缝处易出现不均匀的应力应变现象, 在加热过程中纯铝母材温度较高, 且受到压应力的作用; 在冷却时, 铝板焊点处凝固成核, 熔核中心温度迅速下降, 焊缝界面产生拉应力同时在界面间金属化合物的应力作用下产生了裂纹.

2.1.2 接头界面层扩散分析

由图 4c 可明显观察到在铝侧有一层明亮的金属间化合物, 为进一步分析该金属间化合物层的元素扩散, 对其进行了线扫描能谱分析试验 (EDS), 如图 5 所示.

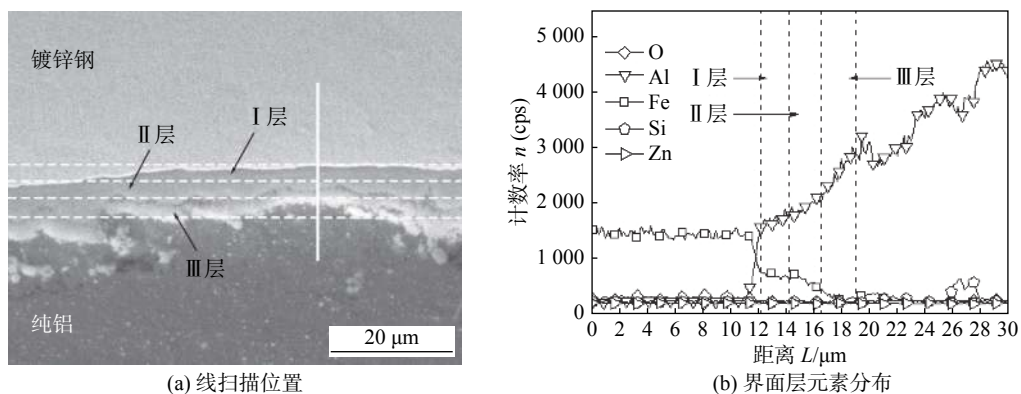


图 5 界面层线扫描曲线

Fig. 5 Line scan curve of interface



对接头焊缝中心处界面层进行线扫描, I层为厚度约  $2.0\ \mu\text{m}$  的钢侧扩散层, II层为厚度约  $2.4\ \mu\text{m}$  的中间扩散层, III层为厚度约  $2.8\ \mu\text{m}$  的铝侧扩散层, 如图 5a 所示. 图 5b 为垂直于铝钢界面的线扫描结果, 可观察到 Si 元素的存在, 随着保温时间的增加, 界面处的金属间化合物的厚度会增加, 而选用的 Al-Si 钎料中含有 20% 的 Si 元素, 能够抑制金属间化合物的生成. 通过比较图 4b 和图 4c 可清楚观察到在铝一侧的金属间化合物分别具有不同的结构, 图 4b 中有针状和棒状金属间化合物向铝母材生长, 而图 4c 中则没有出现, 这正是由于接头中心处焊缝 Si 元素富集成功抑制了金属间化合物的生长.

## 2.2 接头力学性能分析

基于后期的正交试验优化结果, 选取的焊接电流范围为  $7.6\sim 8.0\ \text{kA}$ . 在与电阻点钎焊工艺参数相同的条件下进行了电阻点焊的对比试验, 对不同焊接电流下的点钎焊和点焊焊件分别进行了力学拉伸试验, 并将抗拉剪载荷结果随焊接电流变化的趋势做了比较.

由图 6 可知, 电阻点钎焊时, 焊接电流小于  $7.8\ \text{kA}$  时, 电流越大, 接头抗拉剪载荷越高, 且在焊接电流为  $7.8\ \text{kA}$  时, 抗拉剪载荷达到最大, 约为  $4.72\ \text{kN}$ , 当电流大于  $7.8\ \text{kA}$  时, 抗拉剪载荷随焊接电流的增大而减小. 电阻点焊时, 接头的抗拉剪载荷随着焊接电流的增加而增加, 焊接电流为  $8\ \text{kA}$  时达到约  $2.5\ \text{kN}$ .

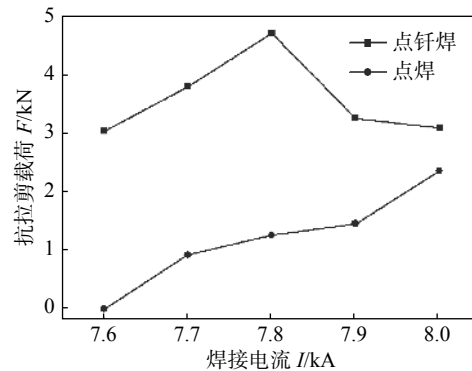


图 6 断裂载荷峰值变化曲线  
Fig. 6 Peak load curve of fracture

在相同工艺参数下, 电阻点钎焊接头的抗拉剪载荷明显高于电阻点焊接头, 是因为在焊接过程中, 钎料在电阻热作用下熔化, 润湿铺展, 能够与两侧母材在结合界面处形成良好的冶金结合, 得到致密接头. 由于钎料层的存在, 增大了两母材之间的有效连接面积, 当电极加压时, 焊接工件的接触间隙减小, 接触电阻降低, 并且焊接过程中会将多余的钎料和气体排出, 保证接头的焊接质量.

如图 7 所示, 焊接接头断裂方式及位置主要分为“纽扣”状、焊点边缘处和热影响区断裂. 图 7a 接头的断裂形式为“纽扣”状撕裂; 图 7b 中接头在铝板靠近焊点熔核处断裂; 图 7c 中接头在铝板的焊接热影响区断裂. 多次力学拉伸试验的结果表明, 接头断裂大部分发生在铝板一侧, 且主要都在热影响区处而不在焊点处, 说明以 Al-Si 合金为钎料的纯铝 1060 与 SGCC 镀锌钢的点钎焊接头质量良好.

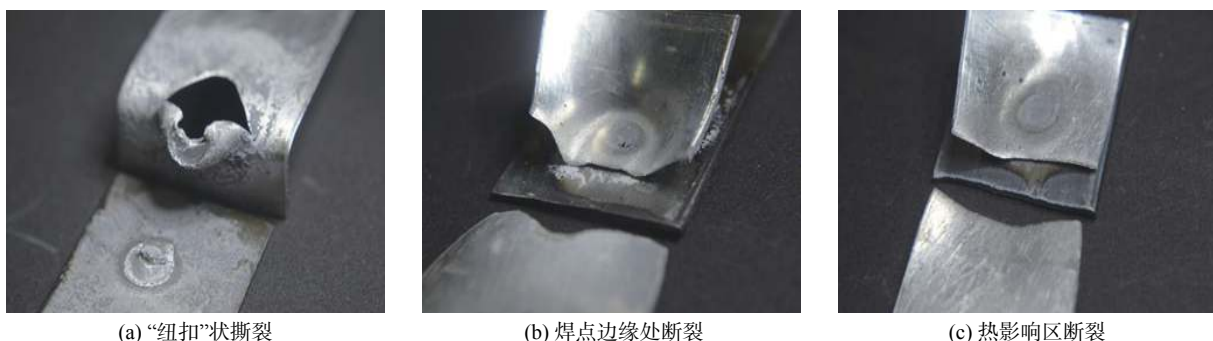


图 7 接头断裂方式及位置  
Fig. 7 Fracture mode and location of the joint

## 3 结 论

(1) 试验所用 Al-Si 合金钎料在铝/钢界面润湿性良好, 纯铝与镀锌钢的焊缝界面产生了厚度不均

匀的金属间化合物层, 接头边缘焊缝界面处靠近镀锌钢侧的金属间化合物为细密的板状结构, 厚度约  $8\ \mu\text{m}$ , 靠近铝侧的金属间化合物为粗细不均的针状和棒状结构, 厚度约  $2.5\sim 9\ \mu\text{m}$  不等, 针状金属间

化合物向铝侧母材生长;接头中心界面处金属间化合物层厚度约为  $3.0\ \mu\text{m}$ ,靠近镀锌钢侧为板状结构,靠近铝合金侧为细小的絮状结构。

(2) 焊接电流小于  $7.8\ \text{kA}$  时,电流越大,抗拉剪载荷越高,且在焊接电流为  $7.8\ \text{kA}$  时,抗拉剪载荷达到最大,约为  $4.72\ \text{kN}$ ,当电流大于  $7.8\ \text{kA}$  时,抗拉剪载荷随焊接电流的增大而减小,在相同工艺参数下,电阻点钎焊接头的抗拉剪载荷明显高于电阻点焊接头。

(3) 接头断裂大部分发生在铝板一侧,且主要都在热影响区处而不在焊点处,说明钎料为铝硅 Al-Si 合金钎料的纯铝 1060 与 SGCC 镀锌钢的点钎焊接头质量良好,但由于焊缝铝侧界面局部存在“未钎合”缺陷,焊缝界面会产生拉应力且在金属间化合物的应力作用下易产生裂纹。

#### 参考文献:

- [1] 谢群,宋禹田.轻量化是汽车工业可持续发展的保证[J].轻合金加工技术,2013,41(12):14-16.  
Xie Qun, Song Yutian. Lightening is the guarantee for the sustainable development of automobile industry[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2013, 41(12): 14-16.
- [2] Santos J, Gouveia R M, Silva F J G. Designing a new sustainable approach to the change for lightweight materials in structural components used in truck industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 164: 115-123.
- [3] 李亚江,吴娜.钢/铝异种金属焊接的研究现状[J].焊接,2010(3):5-12.  
Li Yajiang, Wu Na. Current Research Status of Steel/Aluminum Dissimilar Metal Welding[J]. Welding & Joining, 2010(3): 5-12.
- [4] 李永兵,李亚庭,楼铭,等.轿车车身轻量化及其对连接技术的挑战[J].机械工程学报,2012,48(18):44-54.  
Li Yongbing, Li Yating, Lou Ming, et al. Lightweighting of car body and its challenges to joining technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 44-54.
- [5] Yang J, Li Y L, Zhang H. Microstructure and mechanical properties of pulsed laser welded Al/steel dissimilar joint[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(4): 994-1002.
- [6] Winnicki M, Malachowska A, Korzeniowski M, et al. Aluminum to steel resistance spot welding with cold sprayed interlayer[J]. Surface Engineering, 2018, 34(3): 235-242.
- [7] Kimura M, Suzuki K, Kusaka M, et al. Effect of friction welding condition on joining phenomena, tensile strength, and bend ductility of friction welded joint between pure aluminium and AISI 304 stainless steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25: 116-125.
- [8] 凌展翔,罗震,冯悦娇,等.铝钢点焊铆接复合连接技术[J].焊接学报,2017,38(2):101-104.  
Ling Zhanxiang, Luo Zhen, Feng Yueqiao, et al. A combination joining technology of spot welding and riveting for aluminum and steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 101-104.
- [9] Qiu R, Satonaka S, Iwamoto C. Effect of interfacial reaction layer continuity on the tensile strength of resistance spot welded joints between aluminum alloy and steels[J]. Materials and Design, 2009, 30(9): 3686-3689.
- [10] Qiu R, Satonaka S, Iwamoto C. The influence of reaction layer on the strength of aluminum/steel joint welded by resistance spot welding[J]. Materials Characterization, 2009, 60(2): 156-159.
- [11] 张柯柯,杜宜乐,邱然锋,等.A6061铝合金与Q235钢电阻点焊接头组织与性能[J].材料热处理学报,2012,33(12):64-67.  
Zhang Keke, Du Yile, Qiu Ranfeng, et al. Microstructure and properties of A6061 aluminum alloy/Q235 steel joint welded by resistance spot welding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(12): 64-67.
- [12] 何鹏,冯吉才,钱乙余,等.接触反应法解决铝/不锈钢钎焊的缺陷及脆性[J].材料科学与工艺,2005,13(1):82-85.  
He Peng, Feng Jicai, Qian Yiyu, et al. Resolve of fragile and defect problem for a new contact reaction brazing aluminum to stainless steel[J]. Materials Science & Technology, 2005, 13(1): 82-85.

第一作者简介:张昌青,1973年出生,博士,副研究员。主要从事焊接设备及其自动化、固相连接技术及焊接质量控制方面的研究工作,发表论文10余篇。Email: zcq321@sina.com