

doi: 10.11951/j.issn.1005-0299.20150218

## 铝/镀锌钢搅拌摩擦铆焊接头组织与力学性能

王希靖 张亚州 李经纬 孙学敏

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

**摘要:**为实现铝钢之间的优质连接,采用搅拌摩擦铆焊新方法对 6061 铝合金和 DP600 镀锌钢进行搭接点焊。利用扫描电子显微镜、能谱仪及拉伸试验对接头的微观组织及力学性能进行了研究。结果表明:接头成形平整美观,中心没有匙孔;接头包含铆接区和扩散区。其中在铆接区铝合金以铝柱的形式嵌入到钢板的圆孔中,形成了一个“铝铆钉”,底部有富铝的  $\alpha$  固溶体偏聚,圆孔四周形成扩散区。铝和钢形成了冶金结合,依靠金属间化合物  $\text{FeAl}_3$  连接在一起;接头有 3 种断裂形式。在最佳工艺参数下接头的抗剪力达到 8.2 kN;铝柱上断口的微观形貌是被拉长的韧窝,扩散区的断口由灰色基体和白色颗粒组成。

**关键词:** 搅拌摩擦铆焊; 铝合金; 镀锌钢; 微观组织; 力学性能

**中图分类号:** TG456.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-0299(2015)02-0103-06

## Microstructure and mechanical properties of friction stir rivet welding joint between aluminum and galvanized steel

WANG Xijing, ZHANG Yazhou, LI Jingwei, SUN Xuemin

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals  
(Lanzhou University of Technology), Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** To achieve the high-quality connection between aluminum steel, a novel process of friction stir rivet welding (FSRW) was carried out for spot joining Al6061 and DP600 galvanized steel. Microstructure and mechanical properties of FSRW joints were investigated using scanning electron microscopy, energy disperse spectroscopy and tensile tests. The results indicated that the beautiful joints without keyhole were achieved. The joint included riveted zone and diffusion zone: aluminum alloy like a rivet inserted the hole of the steel sheet in the riveted zone and there was accumulative rich-aluminum  $\alpha$  solid solution at the rivet's bottom, the metallurgical bonding interface of diffusion zone was mainly composed of  $\text{FeAl}_3$  which joined aluminum and galvanized steel around the hole. The joints had three fracture modes and the shearing resistance of the joint with the optimum welding parameter could reach 8.2 kN. The fracture morphology of the aluminum rivet showed elongated dimples, but the fracture of the diffusion zone was composed of gray substrate and white granules.

**Keywords:** friction stir rivet welding; aluminum alloy; galvanized steel; microstructure; mechanical property

随着能源和环境问题的日益突出,轻量化技术成为汽车行业发展的一个重要趋势,而采用轻量化材料又是轻量化技术的主导方向。铝及铝合金是目前应用最广的有色金属,具有密度小、比强度高、耐腐蚀和导热导电性好的优点<sup>[1]</sup>。DP600 双相钢是一种高强度、高成形性的新钢,尤其适用于

汽车车身的制造<sup>[2]</sup>。因此,汽车轻量化技术势必会涉及到铝和钢异种金属的连接问题<sup>[3-4]</sup>。

由于铝和钢具有不同的晶体结构和热物理性能,如热膨胀系数、导热率和比热容,铝-钢接头处易产生内应力、裂纹和夹渣。除此之外,产生的较厚的金属间化合物也会严重影响接头强度<sup>[5]</sup>。尽管熔焊<sup>[6-7]</sup>、钎焊<sup>[8-10]</sup>和熔钎焊<sup>[11-14]</sup>等方法可以实现铝和钢异种金属的连接,但往往有缺陷且抗拉强度较低,无法获得焊缝成形和力学性能俱佳的优质接头。

收稿日期: 2013-12-31。

作者简介: 王希靖(1956—),男,教授,博士生导师。

通信作者: 王希靖, E-mail: wangxj@lut.cn。

搅拌摩擦铆焊 (friction stir rivet welding, FS-RW) 是本课题组提出的一种新型无匙孔搅拌摩擦点焊方法。该方法与普通搅拌摩擦点焊相比,避免了钢母材对搅拌头的磨损,延长了工具的使用寿命,且接头无匙孔,焊点平整美观,兼有铆接和冶金结合双重连接<sup>[15]</sup>,特别适用于轻质合金与钢等异种金属的搭接连接。本文采用该方法来实现汽车工业中铝和钢异种金属的连接,通过拉剪试验评定接头的力学性能,并分析接头的表面成形、微观组织及断口形貌。

## 1 试验

试验材料选用 3 mm 厚的 6061-T6 变形铝合金和 1 mm 厚的 DP600 镀锌双相钢板,几何尺寸均为 150 mm×50 mm。采用由高温合金制成的圆柱形无针搅拌头,其中轴肩直径为 20 mm。

采用搅拌摩擦铆焊方法,搭接方式如图 1 所示。首先,在较硬的钢母材上钻孔,将铝板置于钢板上方,钢板下有 1 个开圆孔的垫板,无针搅拌头端面与工件表面沿垂直方向高速局部顶锻摩擦,将达到塑性流动状态的铝合金旋挤压入钢板的孔内;然后,搅拌头开始上升,离开工件,即完成焊接。根据预实验结果,焊接时轴肩下压量为定值 0.2 mm,搅拌头转速选用 800 和 1 000 r/min,在每种转速下钢板上的圆孔直径分别选用 6、7、8 mm 3 种参数。

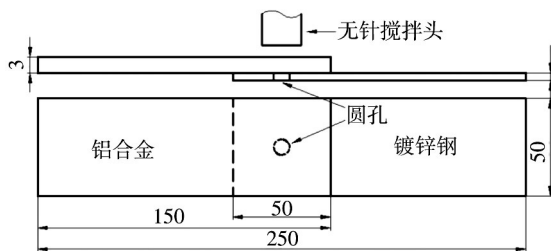


图 1 搅拌摩擦铆焊搭接示意图

焊后,沿焊点直径横切接头,经研磨、抛光后,用扫描电镜 (SEM) 及能谱分析 (EDS) 对接头的微观组织及断口进行观察分析,采用 WDW-100E 型万能材料试验机测试接头的力学性能。

## 2 结果与分析

### 2.1 接头表面成形

试验过程中对不同焊接参数下的接头成形进行观察。图 2(a) 为转速 800 r/min、圆孔直径 7 mm 时的接头表面成形,可以发现,焊点表面平整,基本与工件表面齐平,外形美观,中心没有匙孔,周围只有少许的飞边。焊点背面如图 2(b) 所示,铝

合金嵌入钢板的圆孔中形成圆柱形的铝柱,焊点周围镀锌钢板颜色只是略有变化,这说明镀锌层被破坏得较少,有利于保持其抗腐蚀性。

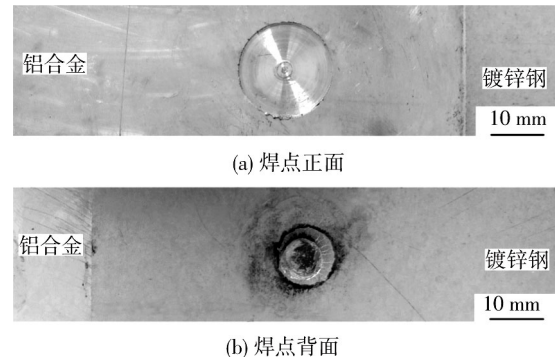


图 2 转速 800 r/min、孔直径 7 mm 时的接头成形

### 2.2 接头的宏观组织特征

典型接头的横截面形貌如图 3 所示。由图 3 可知:在铆接区,铝合金在搅拌头的摩擦顶锻作用下产生了充分的塑性流变,以铝柱的形式饱满地嵌入钢板的圆孔中;由于垫板的作用,铝柱在钢板的外侧出现了翻卷,形成了比圆孔直径略大些的“铆钉帽”,可防止钢板和铝板的分离,将铝和钢以“铝铆钉”的方式连接在一起;另外,铝柱四周的钢板发生了向下弯曲。同时,在铆接区周围,铝、钢和镀锌层在热-力条件下相互作用生成反应层,形成了分界明显的冶金结合。

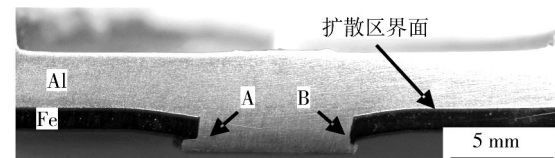


图 3 接头的横截面形貌

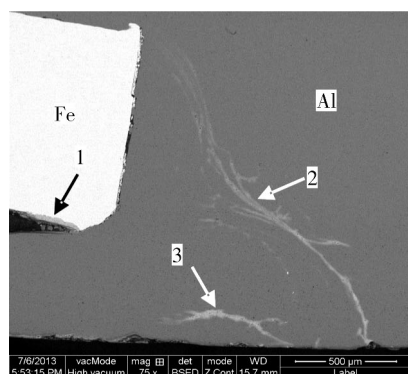
### 2.3 铆接区的微观组织

铝柱与钢板上圆孔侧壁形成的界面如图 4 所示,图 4(a)、图 4(b) 分别是图 3 中 A、B 区域的背散射放大图像。由图 4 可知:嵌入圆孔的铝柱相对饱满,在钢板与“铆钉帽”连接处有少量灰色的过渡层 (1、4 区域) 形成;铝柱上有河流状的白色物相存在,由钢板的上表面流向铝柱的底部。

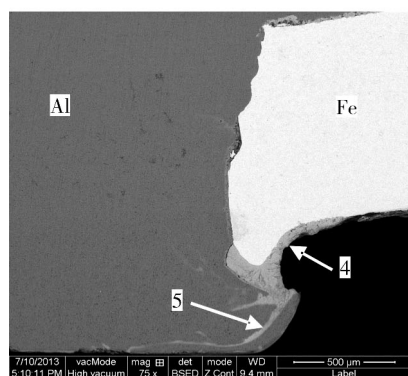
为确定界面上物相的成分组成,对图 4 中 1~5 区域做了点能谱分析 (EDS) 结果如表 1 所示。结合 Fe-Al、Al-Zn 二元相图可知,灰色过渡层应为金属间化合物  $Fe_2Al_5$ ,而白色物相可能是 Zn 固溶于 Al 中形成的富铝的  $\alpha$  固溶体<sup>[16-17]</sup>。

由以上分析可推断,焊接过程中锌层最先熔化成液态薄膜,铺展在铝/钢界面上;同时在搅拌头的热-力联合作用下,铝合金达到热塑性流动

状态, 圆孔边缘处的钢板也开始向下弯曲, 成为一个斜面<sup>[18-19]</sup>. 于是, 液态锌沿着斜面与达到流态的铝一起流入孔中, 在冷却过程中铝、锌形成了  $\alpha$  固溶体, 并在铝柱底部有一定的积淀. 另外, 钢板在焊接开始时弯曲变形小, 与铝柱的“钉帽”紧密接触, 有 Fe-Al 金属间化合物生成. 随着钢板弯曲程度越来越大, 下表面与“钉帽”的间隙也开始变大, 最终两种基体分离, 又由于化合物层与钢基体的连接更致密, 所以形成的金属间化合物主要粘附在钢板下表面.



(a) 图 3 中 A 区域的放大图



(b) 图 3 中 B 区域的放大图

图 4 铆接界面的背散射电子扫描电镜照片

表 1 图 4 中 EDS 点成分分析(原子数分数 / %)

测试点	Fe	Al	Zn	生成相
1	27.6	71.2	1.2	$Fe_2Al_5$
2	0.3	87.2	$\alpha$ 固溶体	
3	0.1	82.3	17.6	$\alpha$ 固溶体
4	27.1	70.4	2.5	$Fe_2Al_5$
5	3.1	79.5	17.4	$\alpha$ 固溶体

### 2.4 扩散区的微观组织

扩散区的微观组织如图 5 所示, 铝/钢界面上形成了一层厚度约为  $5 \mu\text{m}$  的反应层, 与两侧母材连接十分致密, 且在界面上均匀分布.

为进一步分析扩散界面的元素分布情况, 沿

着图 5 中线 AB 做了能谱分析, 结果如图 6 所示, 可以看出, 在反应层区域铁和铝的含量较为均匀, 且出现了平台, 这说明 Fe 和 Al 两个主元素发生了相互扩散. 焊接时, 锌层熔化后形成微量液相, 润湿填充接头间隙, 扩大了待焊表面的物理接触, 同时界面在搅拌头压力作用下产生了微观塑性变形, 也使铝/钢界面紧密接触, 于是, 塑性态铝与固态铁相互扩散、相互渗透发生固相态冶金反应, 生成了一层均匀、致密的 Fe-Al 金属间化合物, 两种金属在扩散界面上形成了冶金结合<sup>[20]</sup>. 对图 5 中 1 区域进行能谱点分析, 化合物层主要由 24.0% Fe、75.2% Al 和 0.8% Zn (原子数分数) 组成, 其中, 铁和铝的原子个数比接近 1:3. 结合 Fe-Al 二元相图, 该金属间化合物可初步判定为  $FeAl_3$ , 该结果与文献中 Al-Fe 金属间化合物的热力学分析结果一致<sup>[21]</sup>.

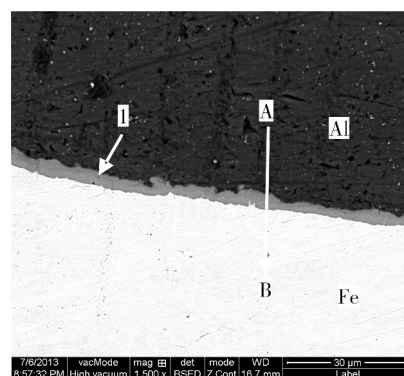
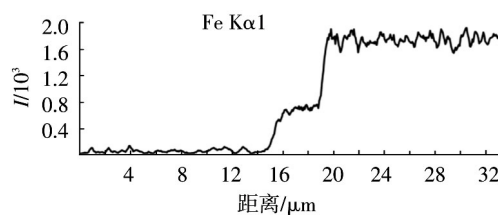
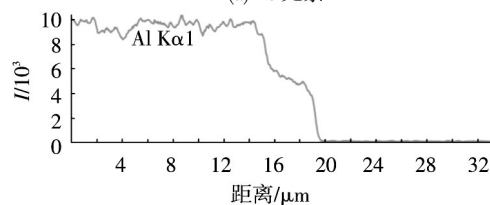


图 5 扩散界面的背散射电子扫描电镜图像



(a) Fe 元素



(b) Al 元素

图 6 扩散界面主元素的线分析结果

### 2.5 接头的力学性能

为了测试铝合金和镀锌钢板搅拌摩擦铆焊接头的力学性能, 进行了拉剪试验, 发现接头有 I、II、III 型 3 种断裂形式, 分别如图 7(a)、7(b)、7(c) 所示.

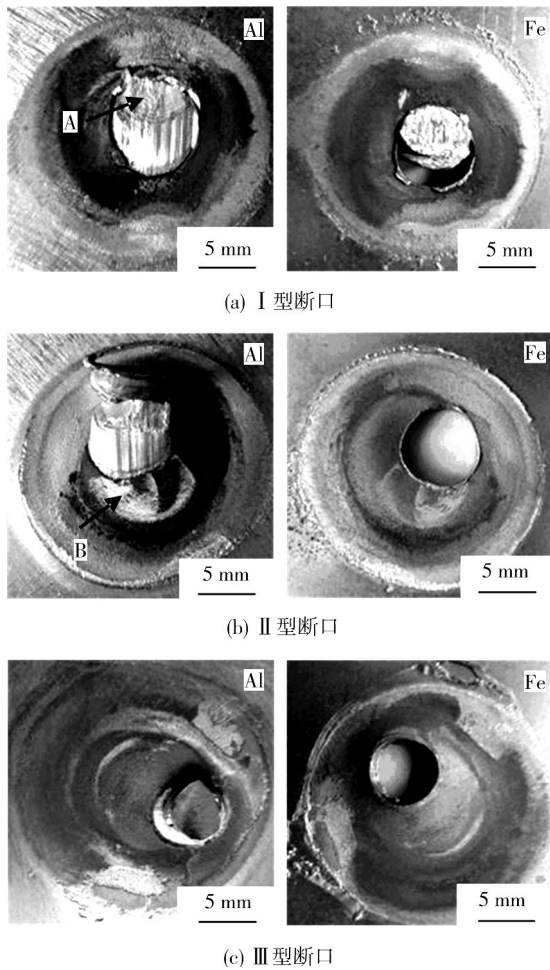


图 7 搅拌摩擦铆焊接头的断裂形式

对于 I 型断裂,铝柱发生明显塑性变形后,沿两板的界面剪断成两部分,其中一部分留在钢板的孔中,断口表面细致,呈浅灰色.该断裂方式在拉剪的所有接头中最为常见,也有少数的断口为 II 或 III 型. II 型断口中,铝柱发生塑性变形后从钢板的孔中被拔出来,且“钉帽”几乎与铝柱体分离;而在 III 型断口中,铝柱基本上没有塑性变形,直接从圆孔中完全拔出来,往往会发生在没有“钉帽”的接头上.

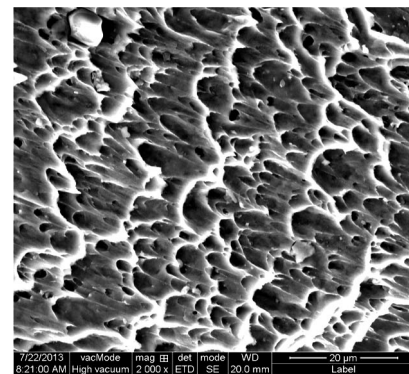
不同焊接参数下接头的抗剪力见表 2,由表 2 可知:在相同转速下,孔直径 7 mm 时,接头的强度相对较高,这是因为孔直径 6 mm 时,用于铆接的铝柱太细,无法承受较大的抗剪载荷;当孔直径为 8 mm 时,在该试验条件下所得的铝-钢铆焊接头中,嵌入的铝柱不饱满,与圆孔侧壁的间隙较大,且形成的“钉帽”较小,拉剪时接头易发生 II 型或 III 型断裂,强度较低.圆孔直径相同时,高转速下得到的接头强度较低,这主要是由铝合金的软化导致,6061 铝合金属于可热处理强化铝合金,其主要强化相是  $Mg_2Si$ ,该合金在焊接过程中受热循环的影响,致使铝柱出现严重软化,接头力

学性能下降<sup>[22-23]</sup>.因此,当搅拌头转速为 800 r/min、孔直径为 7 mm 时,接头的抗剪力达到最大值 8.2 kN,此时接头的抗剪强度为 213 MPa (按铝柱的横截面积计算),高于 6061-T6 铝棒母材的抗剪强度 155 MPa,这说明接头中既有铝柱的铆接,同时也有靠金属间化合物连接的冶金结合,但在两种连接方式中,铆接起主要作用.因此,经双重连接的铝/钢搅拌摩擦铆焊接头的力学性能较好,可以用于铝/钢结构件的点焊连接.

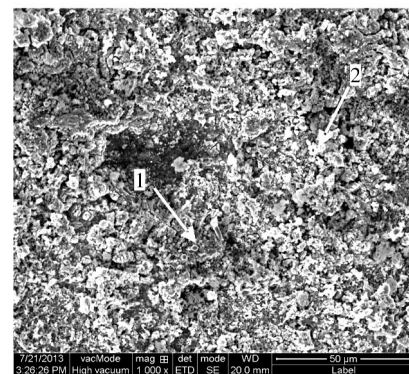
表 2 不同焊接参数下接头的力学性能

搅拌头转速/ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	圆孔直径/ mm	抗剪力/kN	断裂类型
800	6	5.8	III
800	7	8.2	I
800	8	6.9	I
1 000	6	5.3	I
1 000	7	7.5	I
1 000	8	6.6	II

接头拉剪断口的微观形貌如图 8 所示,图 8 (a)、8 (b) 分别是铆接区和扩散区的断口微观形貌.



(a) 图 7 中 A 区域的放大图



(b) 图 7 中 B 区域的放大图

图 8 接头 SEM 断口形貌

由图 8 可知,铝柱上的断口由大量的被拉长了的韧窝组成,韧窝圆形端在同一方向上,这是典

型的剪切韧窝,其长轴在剪力方向上.扩散区的断口主要由灰色的基体及大量的白色颗粒物质组成,其中灰色基体(1区域:3.7% Fe、41.5% Al、13.7% Zn、41.1% O)可能为氧化物和 $\alpha$ 固溶体的混合物,而白色颗粒(2区域:23.6% Fe、75.1% Al、1.3% Zn)应为金属间化合物 $FeAl_3$ ,进一步证实了扩散界面有金属间化合物生成.

### 3 结 论

1) 对6061铝合金和DP600镀锌钢板进行搅拌摩擦钎焊,得到的接头平整美观、飞边少、中心没有匙孔.

2) 接头具有钎接和冶金结合双重连接:铝母材达到塑性流变状态后,以铝柱的形式嵌入钢板上的孔中,形成一个“铝铆钉”,将铝和钢钎接在一起;在圆孔四周,铝和钢形成了扩散界面,依靠均匀分布的金属间化合物 $FeAl_3$ 连接在一起.

3) 当搅拌头转速800 r/min、孔直径7 mm时,接头的抗剪力最大;接头的断裂形式有3种,其中以铝柱明显塑性变形后沿铝/钢界面被剪断最为常见;铝柱上的断口由被拉长的韧窝组成;扩散界面的断口由灰色基体和白色颗粒组成.

### 参考文献:

- [1] 李军,杨建国,路浩,等. 铝合金薄板焊件旋转挤压矫形研究[J]. 材料科学与工艺,2010,18(2): 293-296.  
LI Jun, YANG Jianguo, LU Hao, et al. Controlling welding distortion of aluminum alloy thin plates with rotating extrusion [J]. Materials Science & Technology, 2010, 18(2): 293-296.
- [2] 马明图. 先进汽车用钢[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 55-57.
- [3] ZHOU Yunjiao, LAN Fengchong, CHEN Jiqing. Crashworthiness research on S-shaped front rails made of steel-aluminum hybrid materials [J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(2): 291-297.
- [4] CHOI C Y, KIM D C, NAM D G, et al. A hybrid joining technology for aluminum/zinc coated steels in vehicles [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2010, 26(9): 858-864.
- [5] 李亚江,王娟,刘鹏. 异种难焊材料的焊接及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 170-175.
- [6] SIERRA G, PEYRE P, STUART D, et al. Steel to aluminium key: hole laser welding [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 447(12): 197-208.
- [7] 张秉刚,何景山,曾如川,等. LF2铝合金与Q235

钢加入中间Cu层电子束焊接接头组织及形成机理[J]. 焊接学报,2007,28(6): 37-41.

- ZHANG Binggang, HE Jingshan, ZENG Ruchuan, et al. Microstructures and formation of EBW joint of aluminum alloy LF2 to steel Q235 with transition metal Cu [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(6): 37-41.
- [8] ROULIN M, LUSTER J W, KARADENIZ G, et al. Strength and structure of furnace-brazed joints between aluminum and stainless steel [J]. Welding Journal, 1999, 78(5): 151-155.
- [9] MATSUMOTO T, SASABE S. Laser braze welding for dissimilar metal joining of aluminium alloys to steel [J]. Welding International, 2012, 26(4): 270-274.
- [10] WU M F, SI N C, CHEN J. Contact reactive brazing of Al alloy/Cu/stainless steel joints and dissolution behaviors of interlayer [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(5): 1035-1039.
- [11] ZHANG H T, FENG J C, HE P. Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium-zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding-brazing process [J]. Materials Characterization, 2007, 58(7): 588-592.
- [12] 秦国梁,苏玉虎,王术军. 铝合金/镀锌钢板脉冲MIG电弧熔-钎焊接头组织与性能[J]. 金属学报, 2012, 48(8): 1018-1024.  
QIN Guoliang, SU Yuhu, WANG Shujun. Microstructures and properties of pulsed MIG arc brazed-fusion welded joint of Al alloy and galvanized steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(8): 1018-1024.
- [13] 樊丁,张诗正,余淑荣,等. 5A02铝合金与镀锌钢 $CO_2$ 激光熔-钎焊接工艺[J]. 热加工工艺, 2012, 41(11): 140-142.  
FAN Ding, ZHANG Shizheng, YU Shurong, et al. Fusion-brazing welding for dissimilar metals between 5A02 aluminum alloy and zinc-coated steel by  $CO_2$  laser [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(11): 140-142.
- [14] 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 by pulsed DE-MIG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5): 1-4.
- [15] 周云郊,兰凤崇,黄信宏,等. 钢铝板材压力连接模具几何参数多目标优化[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(6): 86-93.  
ZHOU Yunjiao, LAN Fengchong, HUANG Xinhong,

- et al. Multi-objective optimization of geometry of clinching tools for steel-aluminum blank sheets [J]. *Materials Science & Technology*, 2011, 19( 6) : 86-93.
- [16] 卢燕平. Al55%-Zn 合金镀层钢板组织与腐蚀特性 [J]. *材料科学与工艺*, 1997, 5( 4) : 61-65.  
LU Yanping. Microstructure and corrosion properties of Al55% - Zn alloy coated steel sheet [J]. *Materials Science & Technology*, 1997, 5( 4) : 61-65.
- [17] 石常亮, 何鹏, 冯吉才, 等. 铝/镀锌钢板 CMT 熔钎焊界面区组织与接头性能 [J]. *焊接学报*, 2006, 27( 12) : 61-64.  
SHI Changliang, HE Peng, FENG Jicai, et al. Interface microstructure and mechanical property of CMT welding brazed joint between aluminum and galvanized steel sheet [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27( 12) : 61-64.
- [18] 黎俊初, 周德生, 刘大海, 等. 2A12 铝合金筋板件 T 型搅拌摩擦焊工艺及焊后热处理 [J]. *材料科学与工艺*, 2011, 19( 2) : 80-85.  
LI Junchu, ZHOU Desheng, LIU Dahai, et al. Friction stir welding and successive heat treatment of T-shaped rib-web parts of 2A12 aluminum alloy [J]. *Materials Science & Technology*, 2011, 19( 2) : 80-85.
- [19] 姬书得, 刘伟, 张利国, 等. FGH96 合金惯性摩擦焊过程材料流动行为的数值模拟 [J]. *材料科学与工艺*, 2013, 21( 1) : 109-112.  
JI Shude, LIU Wei, ZHANG Liguang, et al. Numerical simulation of material flow behavior in inertia friction welding of FGH96 alloy [J]. *Materials Science & Technology*, 2013, 21( 1) : 109-112.
- [20] 张建, 罗国强, 沈强, 等. 钼铜扩散焊接接头界面显微组织 [J]. *材料科学与工艺*, 2012, 20( 4) : 61-64.  
ZHANG Jian, LUO Guoqiang, SHEN Qiang, et al. Microstructure in interface zone of diffusion welded joint of Mo and Cu [J]. *Materials Science & Technology*, 2012, 20( 4) : 61-64.
- [21] 何翠翠, 黄健康, 石玢, 等. 铝/钢异种金属焊接接头界面 Al-Fe 金属间化合物生成及其热力学分析 [J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2014, 44 ( 4) : 1037-1041.  
HE Cuicui, HUANG Jiankang, SHI Yu, et al. Thermodynamic analysis of Al - Fe intermetallic compounds formed by dissimilar joining of aluminum and galvanized steel [J]. *Journal of Jilin University ( Engineering and Technology Edition )*, 2014, 44 ( 4) : 1037-1041.
- [22] MA T, OUDEN G D. Softening behaviour of Al-Zn-Mg alloys due to welding [J]. *Materials Science and Engineering*, 1999, 266( 1/2) : 198-204.
- [23] 江超, 陈辉, 车小莉, 等. 高速列车 A6005A 铝合金焊接接头断裂韧性研究 [J]. *材料科学与工艺*, 2013, 21( 2) : 55-60.  
JIANG Chao, CHEN Hui, CHE Xiaoli, et al. Fracture toughness of welded joints of A6005A aluminum alloy for high speed train [J]. *Materials Science & Technology*, 2013, 21( 2) : 55-60.

( 编辑 程利冬)