

镀锌层厚度对铝/镀锌板 CMT 搭接接头 组织和性能的影响

王志平, 靳朋礼, 杨斯楠, 贾 鹏

(中国民航大学 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300)

摘 要: 文中研究厚度分别为 10, 30, 60 μm (依次为 1 号, 2 号, 3 号) 的镀锌层对 6082 铝合金/镀锌板搭接接头组织和性能的影响, 结果表明, 1 号焊缝成形较差, 边缘有锌层烧蚀, 3 号焊缝形貌较美观, 润湿性较好; 1 号和 3 号焊接接头拉伸性能较差, 2 号的焊接接头拉伸承载力达到 9 519.5 N; 镀锌层主要影响了富锌区和界面区, 发现富锌区有枝晶和裂纹生成, 界面区的金属间化合物均为 Fe-Al-Zn 化合物, 仅在界面中间位置附近生成, 3 号的化合物层达到 4~6 μm , 1 号和 2 号的化合物层为 1~2 μm . 综上所述, 合适的镀锌层厚度才能得到性能良好的焊接接头.

关键词: 冷金属过渡; 铝; 镀锌板; 搭接; 镀锌层厚度

中图分类号: TG 444

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400093

0 序 言

汽车轻量化对保护环境, 节约能源越来越重要, 同时由于铝合金具有密度小, 耐腐蚀性好, 机械强度高优点, 使得铝合金在汽车制造的应用比例不断增加^[1-4]. 然而铝和钢的物理性能相差较大, 导致铝和钢的可焊性较差^[5], 所以, 研究者在铝和钢之间加入了中间过渡层, 来提高铝和钢的可焊性, 增强结构的力学性能.

目前大多数研究是关于铝和镀锌板的焊接, 钢板表面镀有锌层, 在焊接过程中锌层有利于铝和钢板的连接. Qin 等人^[6]模拟了 MIG 焊接铝和镀锌板的过程, 得出焊接时的温度分布不均匀, 要同时调节焊接电流和速度, 使其相互匹配才能获得良好的焊缝; Dharmendra 等人^[7]采用激光作热源, 并用锌基焊丝进行焊接铝和镀锌板, 研究了不同的焊接速度下的焊缝组织及性能, 得出中间层厚度在 3~23 μm 之间, 硬度 348 HV, 激光功率 110 J/mm 时接头的抗拉强度为 220 MPa; Arghavani 等人^[8]研究了锌层对铝/钢电阻点焊的影响, 得出锌有效的减少了 Al-Fe 化合物层的厚度, 锌的出现也降低了接头的力学性能; Haddadi 等人^[9]研究了不同的镀锌层对铝/镀锌

板超声钎焊的影响, 结果显示, 热浸蘸镀锌的试板拉伸性能可达到铝-铝焊接的效果; Miyamoto 等人^[10]研究镀锌层对铝/钢焊接接头性能的影响, 得出接头中极易生成 Al-Fe (Zn) IMC, 导致焊接接头的力学性能下降.

论文主要研究镀锌层厚度对铝/镀锌板 CMT 焊接接头组织和性能的影响, 目的是得出镀锌层厚度对焊接接头组织成分和金属间化合物形成的影响规律, 检测出镀锌层厚度对接头力学性能的影响, 综合分析镀锌层厚度在铝/镀锌板 CMT 熔-钎焊中的作用, 为实际生产提供理论依据.

1 试验方法

试验采用材料为 6082-T6 变形铝合金和冷轧热镀锌板 HDG60(镀锌层厚度分别为 10, 30, 60 μm , 分别命名为 1 号, 2 号, 3 号), 尺寸均为 200 mm $\times$ 100 mm $\times$ 3 mm, 焊丝选用直径为 1.2 mm 的 ER4043 (AlSi5) 焊丝.

选用奥地利 Fronius 公司生产的 TPS3200 系列数字化 CMT 焊机, 与实验室自主设计的门式机械手配合并由 ROB5000 控制, 对铝合金和镀锌板进行搭接焊接.

焊前采用钢丝刷对工件表面进行清洁. 将表面清洁干净的试板装卡成搭接接头的形式 (铝合金板

在上,镀锌钢板在下,搭接量为 15 mm)。焊枪施焊方式为“倾斜前推”(前进方向与倾角相反)方式,夹角为 135° ,焊枪侧面倾斜角为 45° ,焊接示意图如图 1 所示,表 1 为焊接工艺参数。

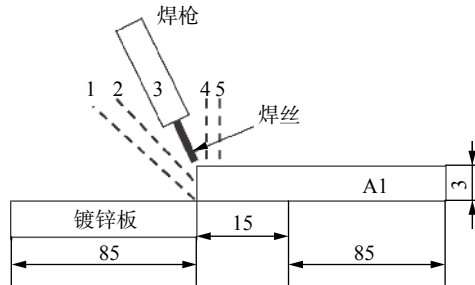


图 1 焊接示意图 (mm)
Fig. 1 Diagram of welding

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding process parameters

送丝速度 $v_s/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	氩气流量 $q/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
20	20	127	20

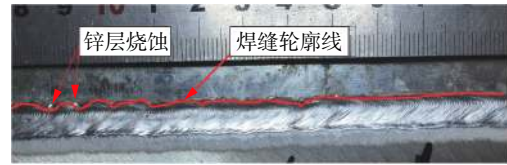
2 试验结果

2.1 镀锌层厚度对焊缝的外观形貌的影响

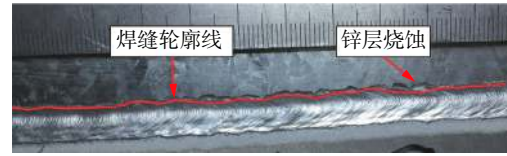
不同镀锌层厚度下的焊缝外观形貌如图 2 所示。镀锌层厚度不同对焊缝的成形影响也不同,1 号焊缝靠近镀锌板一侧的焊缝边缘呈现出锯齿状,参差不齐,部分位置出现明显锌层烧蚀现象,如图 2a 所示;3 号焊缝边缘比 1 号焊缝要平齐,锌层烧蚀的现象也较少,但是有部分位置出现锯齿状,如图 2b 所示;当锌层厚度增加到 $60 \mu\text{m}$ 时,焊缝成形比较美观,焊缝边缘平齐,无锌层烧蚀现象出现,随着锌层厚度的增加,锌层熔化后有助于焊缝液态金属在钢板上铺展的结果与文献 [11] 一致。上述现象是由于焊接热输入量没有变,蒸发的锌量是不变的,随着锌层的增厚,熔化的锌就会越多,越有助于熔化的焊缝金属铺展,焊缝边缘就越平齐,且没有烧蚀的现象。

2.2 焊接接头的拉伸性能测试

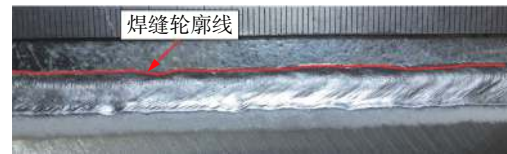
经拉伸性能测试得出,不同镀锌层厚度的焊接接头拉伸性能相差很大,如图 3 所示,1 号接头拉伸承载力为 6 381.7 N,3 号接头拉伸承载力 6 332.3 N,而 2 号接头拉伸承载力为 9 519.5 N;接头断裂形式有两种与文献 [12] 一致,如图 4a, 4b 所示,



(a) 1号焊缝



(b) 2号焊缝



(c) 3号焊缝

图 2 不同镀锌层厚度下的焊缝外观形貌

Fig. 2 Appearance of welds under different galvanized layer thicknesses

1 号和 3 号接头在钢铝界面处断裂,2 号接头在铝板熔合线断裂;如图 4c 所示,经 SEM 观察断口微观形貌发现有大量的韧窝存在,可以判断焊接接头是韧性断裂。

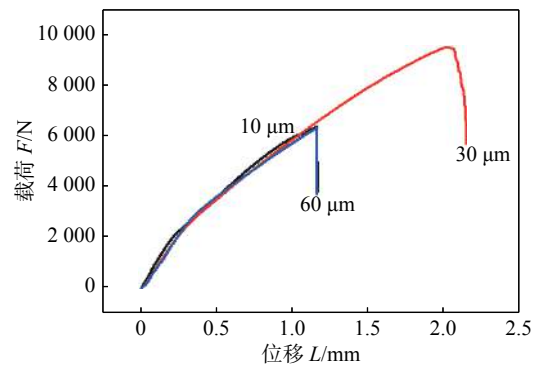
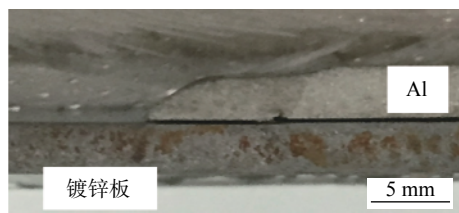


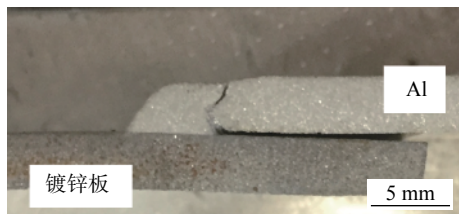
图 3 焊接接头的载荷-位移曲线

Fig. 3 Load - displacement curves of welded joints

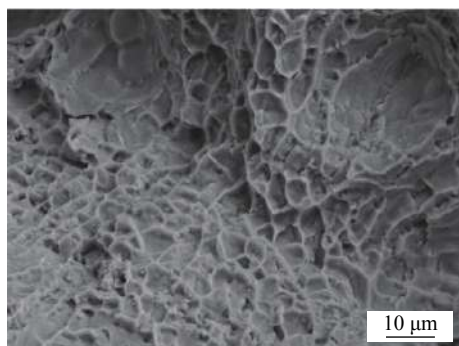
拉伸试验结果表明,锌层厚度过薄和过厚都会降低接头的力学性能。镀锌层过薄导致焊接时熔化金属不易润湿铺展,焊缝成形不均匀,边缘有部分区域锌层烧蚀,如 2.1 节所述,并且由于锌层含量较少,易形成 Fe/Al 金属间化合物,这些原因都会导致接头的力学性能的下降;3 号接头由于镀锌层过厚焊接时熔化的锌层较多,液态焊缝金属大部分都铺展在液态锌金属层上,形成了较厚的 Al-Fe-Zn 的化合物层,降低了接头的力学性能^[10],且随着锌层的增厚,锌蒸气增多导致焊缝中的气孔增多^[13-15],对三种焊接接头的气孔率进行计算,得出 1 号,



(a) 1号与3号接头在界面处断裂



(b) 2号接头在熔合线断裂



(c) 断口微观形貌

图4 不同镀锌层厚度的接头拉伸断口和断裂形式

Fig. 4 Tensile fracture and fracture form of joints under different galvanized layer thickness

2号, 3号接头的气孔率分别是0.46%, 0.83%, 6.10%, 气孔的增多也会导致焊缝接头的力学性能下降。

2.3 焊接接头微观组织和物相分析

焊接接头的截面微观组织如图5所示。接头主要分为4个区域: 熔合区、中心熔合区、铝/镀锌板熔合界面区、富锌区, 由于4个区域的位置不同, 镀锌层厚度对焊接接头组织的不同区域影响不同。富锌区与铝/镀锌板熔合界面区与镀锌层直接接触影响较大, 其它区域影响较小。在焊接过程中电弧边缘的温度较低, 无镀锌板熔化, 而熔化的焊缝金属使得焊缝边缘锌层熔化, 并在液态金属锌的引导下铺展^[1], 最终在熔化的液态金属锌膜上凝固, 温度较低, 凝固速率过快, 从而产生枝晶组织, 缩孔和微裂纹, 影响了接头力学性能, 如图6a~6c所示, 3号的接头富锌区裂纹最多最长, 1号,

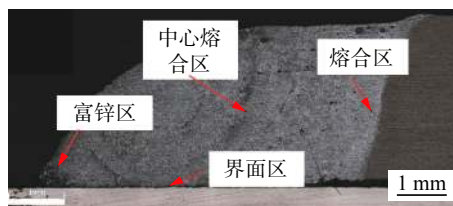
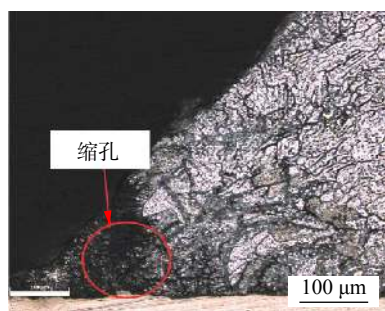
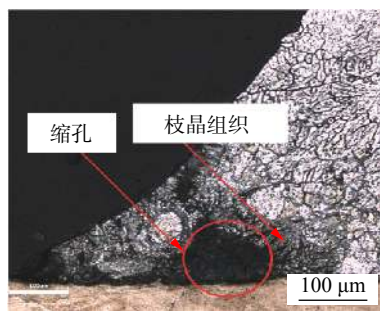


图5 焊接接头不同区域

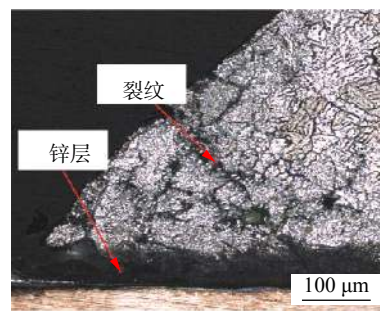
Fig. 5 Different zone of welded joint



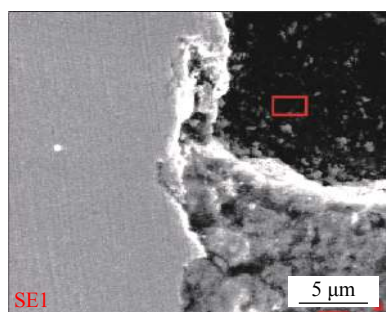
(a) 1号富锌区



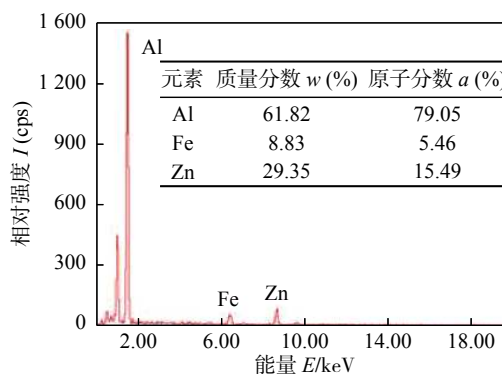
(b) 2号富锌区



(c) 3号富锌区



(d) 富锌区能谱检测



(e) 富锌区能谱图

图6 不同锌层厚度的富锌区及能谱

Fig. 6 Zinc rich area and EDS of different thicknesses of zinc layer

2 号的接头富锌区有少量裂纹和缩孔出现, 并且 2 号的接头富锌区出现了枝晶组织, 经能谱测定富锌区主要成分是 Al, Zn 元素和有少量 Fe 元素, 如图 6d, 6e 所示.

铝/镀锌板熔合界面处微观组织如图 7 所示, 界面区均有 Fe-Al-Zn 金属间化合物生成, 3 号试样的界面区金属间化合物厚度大约 4~6 μm , 主要是因为镀锌层较厚, 在焊接的过程中锌层熔化, 大量液态锌金属与熔化的焊缝金属混合在一起, 有效地阻止了 Fe/Al 金属间化合物的生成, 并产生了大量 Fe-Al-Zn 金属间化合物; 1 号试样的接头界面区 Fe-Al-Zn 金属间化合物平均厚度大约 1 μm , 厚度不均匀; 2 号试样的接头界面区 Fe-Al-Zn 金属间化合

物平均厚度大约 2 μm , 厚度均匀. 在富锌区和焊趾附近处没有发现金属间化合物, 在界面区中心附近有金属间化合物生成, 呈现出从富锌区到焊趾先增厚, 再变薄的过程, 变化轨迹呈一条弧线, 这是由于焊缝中间部位的温度高, 部分 Fe 元素熔化进入焊缝中间生成了中间层, 焊缝两边温度低, 没有生成中间层, 与文献 [16] 结果一致.

Fe-Al 金属间化合物层能谱分析结果如图 8 所示, 由图可知, 在 Fe-Al 金属间化合物层中有 Al, Fe, Zn 存在, 1 号试样金属间化合物层中 Fe 元素含量较高, 而 Al 元素含量较低. 随着镀锌层厚度变厚, 金属间化合物层中的 Zn 元素从 0.95% 增加到 14.17%, 而 Fe 元素含量减少, 这是因为镀锌层厚度

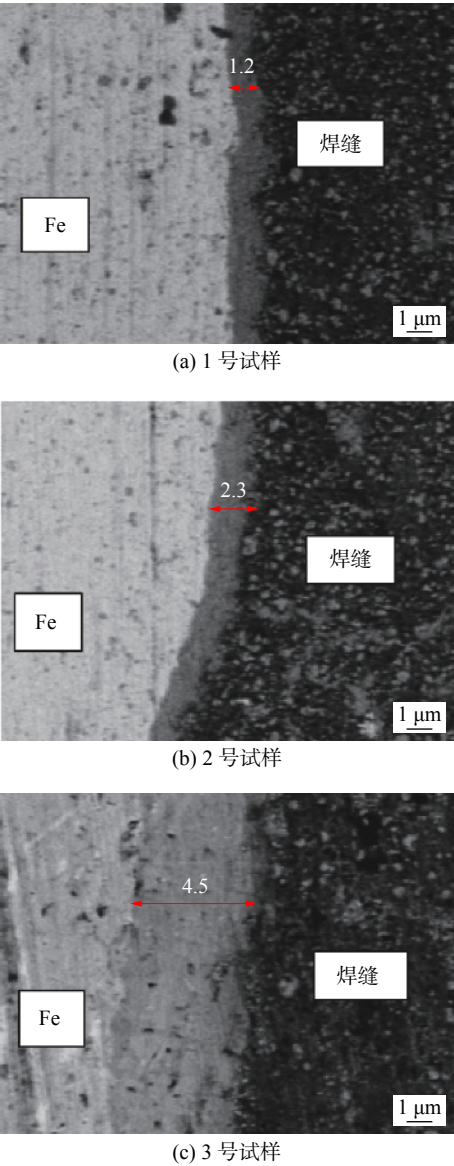


图 7 铝/镀锌板熔合界面处金属间化合物层微观形貌
Fig. 7 Micromorphology of intermetallic compound layer at aluminum / galvanized plate fusion interface

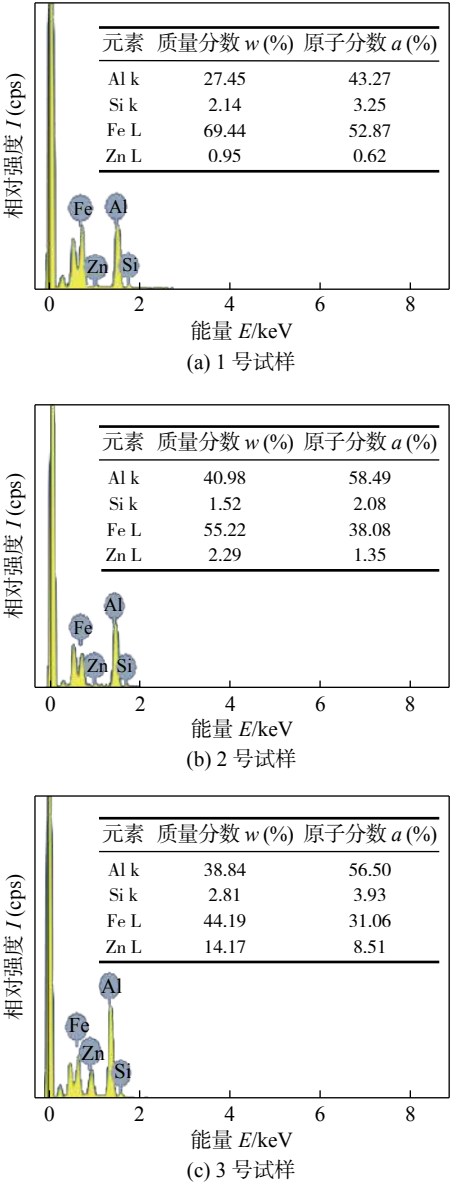


图 8 金属间化合物层面扫描能谱结果
Fig. 8 Surface scanning energy spectrum of intermetallic compound layer

的增加,焊接电弧热量主要作用在镀锌层上,钢熔化量较少,进而减少了 Fe-Al 金属间化合物的形成,促使焊缝的力学性能增强. EDS 检测结果显示,在界面区 Fe-Al-Zn 金属间化合物层中不同区域,所生成的化合物不同^[17],靠近镀锌板一侧是 $\text{Fe}_2\text{AlZn}_{0.2}$, $\text{FeAlZn}_{0.3}$,靠近焊缝一侧是 $\text{FeAl}_9\text{Zn}_{0.3}$.

2.4 焊接过程中的飞溅及接头缺陷

铝/镀锌板焊接过程中,1号试样焊接时,由于镀锌层的部分烧蚀使得焊接电弧燃烧不稳定;3号试样镀锌层较厚,焊接时熔化和蒸发的较多,锌蒸气使电弧边缘不规则上翘,当熔滴滴入焊缝时,熔池剧烈震荡,造成了大量的飞溅,如图9所示,现象与文献[18-19]一致;2号试样焊接时较稳定,没有飞溅产生.

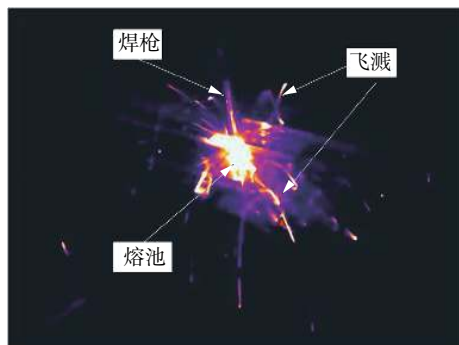


图 9 3号试样焊接过程中的飞溅

Fig. 9 Splash during welding process of No.3 specimen

在铝/镀锌板焊接中,焊缝中的气孔也随镀锌层的增厚而增多,这是由于一部分锌蒸气进入到液态金属中没有及时逸出,造成了大量的气孔,气孔过多,减小了焊缝的有效承载面积,降低了焊缝的机械性能^[20].

在焊缝靠近镀锌板侧的边缘区域是富锌区,该区域的形成是由于熔化金属铺展在液态锌形成的液膜上,最前端的液态金属的热量使得锌层熔化并混合到焊缝边缘金属区,在冷却的过程中,焊缝前端边缘金属由于液态锌的润湿作用,铺展较薄,冷却速度较快,形成大量的微裂纹,降低焊缝的力学强度,所以镀锌层的厚度不应过薄或过厚,应该在一个适当的区间内,这样才能得到性能良好的焊接接头.

3 结 论

(1) 1号试样焊缝边缘呈现出锯齿状,部分位置

出现明显锌层烧蚀现象,2号试样焊缝锌层烧蚀的现象较少,部分位置出现锯齿状,当锌层厚度增加到 $60\text{ }\mu\text{m}$ 时,焊缝成形比较美观,焊缝边缘平齐,无锌层烧蚀现象出现,镀锌层厚度越厚焊缝成形越美观.

(2) 1号和3号试样焊接接头拉伸性能较差,2号试样接头拉伸承载力为 $9\,519.5\text{ N}$,拉伸性能较好;断裂形式有两种,1号和3号试样在钢铝界面处断裂,2号试样接头在铝合金板熔合线断裂;试验结果表明,锌层厚度过薄和过厚都会降低接头的力学性能.

(3) 镀锌层对焊接接头富锌区和界面区的中间层影响较大,富锌区出现了裂纹、缩孔和枝晶组织,3号接头的金属间化合物厚度大约 $4\sim 6\text{ }\mu\text{m}$,锌层越厚生成的金属间化合物层越厚,成分越复杂.

(4) 焊接接头缺陷中,气孔随镀锌层厚度的增加而增多,影响了接头的力学性能,表明镀锌层不应过厚,应选用合适的厚度,才能保证焊接接头的力学性能.

参考文献:

- [1] 冯 健,韩 靖,张雪梅,等. 7A04 铝合金/304 不锈钢连续驱动摩擦焊及焊后热处理 [J]. 焊接学报, 2018, 39(8): 11-17.
Feng Jian, Han Jing, Zhang Xuemei, *et al.* Continuous drive friction welding and post welding heat treatment of 7A04 aluminum alloy and 304 stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(8): 11-17.
- [2] Zhang C Q, Lü G M, Jin X, *et al.* Study of joining mechanism of ABS polymer and steel/aluminum by resistance spot welding[J]. China Welding, 2018, 27(2): 57-62.
- [3] Lei Z, Li X Y, Xu F J, *et al.* Laser-pulsed MIG hybrid welding technology of A6N01S aluminum alloy[J]. China Welding, 2017, 26(4): 10-19.
- [4] 李晓靓,于治水,张培磊,等. 激光熔-钎焊镀锌钢/铝异种金属的接头性能影响因素及改善措施 [J]. 材料导报, 2015, 29(5): 123-126, 144.
Li Xiaoliang, Yu Zhihui, Zhang Peilei, *et al.* Influencing factors and improvement measures of joint performance by laser fusion-brazing between zinc-coated steel and aluminum alloy[J]. Materials Reports, 2015, 29(5): 123-126, 144.
- [5] 黄健康,李 杰,沈利民,等. Si, Mg 对铝/钢熔钎焊焊接接头力学性能的影响 [J]. 焊接学报, 2016, 37(8): 93-100.
Huang Jiankang, Li Jie, Shen Limin, *et al.* Effects of Si and Mg on mechanical properties of aluminum steel welded-brazed joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016,

- 37(8): 93 – 100.
- [6] Qin G L, Su Y H, Meng X M, *et al.* Numerical simulation on MIG arc brazing-fusion welding of aluminum alloy to galvanized steel plate[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(9–12): 1917 – 1925.
- [7] Dharmendra C, Rao K P, Wilden J, *et al.* Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528(3): 1497 – 1503.
- [8] Arghavani M R, Movahedi M, Kokabi A H. Role of zinc layer in resistance spot welding of aluminium to steel[J]. *Materials & Design*, 2016, 102: 106 – 114.
- [9] Haddadi F, Strong D, Prangnell P B. Effect of zinc coatings on joint properties and interfacial reactions in aluminum to steel ultrasonic spot welding[J]. *Journal of Metals*, 2012, 64(3): 407 – 413.
- [10] Miyamoto K, Nakagawa S, Tsushima K, *et al.* Effect of Zn insertion on diffusion bonded joint properties of steel and aluminum alloy: - dissimilar metals joining of steel and aluminum alloy by Zn insertion[J]. *Journal of the Japan Welding Society*, 2014, 32: 15 – 30.
- [11] 张洪涛. 铝/镀锌钢板 CMT 熔—钎焊机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [12] 杨 硕, 林 健, 杨上陆, 等. 钢/铝 CMT 接头熔合面积对接头抗剪强度及破坏模式的影响 [J]. *材料工程*, 2014(4): 34 – 39.
Yang Shuo, Lin Jian, Yang Shanglu, *et al.* Effect of bonded area on shear strength and failure mode in steel/Al CMT brazed joint[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014(4): 34 – 39.
- [13] 李超豪, 华学明, 张跃龙, 等. 镀锌板 CMT 焊缝气孔影响因素及产生机理 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(1): 94 – 98.
Li Chaohao, Hua Xueming, Zhang Yuelong, *et al.* Study on influence factor and formation mechanism of porosities in CMT welding of galvanized steel sheet[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(1): 94 – 98.
- [14] Lim Y M, Jang B S, Koh J H. The effect of shielding gas and arc voltage on the bead shape and pore generation of galvanized steel pipe welds with gas metal arc welding[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 746: 240 – 244.
- [15] 苗玉刚, 吴斌涛, 韩端锋, 等. 铝/镀锌钢异种金属旁路分流 MIG 电弧熔钎焊界面区组织与接头性能 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(9): 6 – 10.
Miao Yugang, Wu Bintao, Han Duanfeng, *et al.* Characteristics of joint and interface layer during bypass current MIG welding-brazing of aluminum and steel dissimilar[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(9): 6 – 10.
- [16] Feng J C, He P, Hackl H. Distribution of Zn and interfacial microstructure of braze-welding CMT joints between aluminium and galvanized steel sheets[J]. *Solid State Phenomena*, 2007, 127: 43 – 48.
- [17] 石 珂, 李 杰, 黄健康, 等. Si 和 Zn 对铝/钢异种金属熔钎焊接头界面组织的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2015(1): 30 – 35.
Shi Yu, Li Jie, Huang Jiankang, *et al.* Effects of Si and Zn on interface microstructures of aluminum steel welding brazing joint[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015(1): 30 – 35.
- [18] Reimann W, Pfriem S, Hammer T, *et al.* Influence of different zinc coatings on laser brazing of galvanized steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 239: 75 – 82.
- [19] 张洪涛, 冯吉才, 何 鹏, 等. 镀锌层对铝/镀锌钢板 CMT 熔—钎焊电弧加热行为的影响 [J]. *焊接学报*, 2009, 30(8): 37 – 40.
Zhang Hongtao, Feng Jicai, He Peng, *et al.* Effect of zinc coating on arc heating behavior for joining Al and zinc coated steel by welding-brazing process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(8): 37 – 40.
- [20] 张 帆, 李 芳, 王诗恩, 等. 镀锌钢板搭接光纤激光焊接中搭接间隙的研究 [J]. *中国激光*, 2014(10): 113 – 118.
Zhang Fan, Li Fang, Wang Shien, *et al.* Research of lap gap in fiber laser lap welding of galvanized steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014(10): 113 – 118.
-
- 第一作者简介:** 王志平, 男, 1963 年出生, 博士, 教授. 主要从事航空材料加工与测试的科研和教学工作. 发表论文 100 余篇. Email: zpwang@cauc.edu.cn