

铝合金与镀锌钢薄板熔钎焊接头组织与力学性能

Microstructure and Mechanical Properties of the Welding-brazed Joint for the Aluminium and Galvanized Steel Sheet

李玉龙, 姜智超, 禹业晓

(南昌大学 机电工程学院 机器人与焊接自动化重点实验室, 南昌 330031)

LI Yu-long, JIANG Zhi-chao, YU Ye-xiao

(Key Lab of Robot & Welding Automation, School of Mechanical & Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

摘要: 为了对铝合金和镀锌钢板进行优质高效焊接, 采用 Fronius 冷金属过渡焊机对锻铝 6061 和 SPCC 镀锌钢板进行了熔钎焊实验。焊接实验结果表明可以采用专家系统提供的参数进行焊接获得成型良好的接头; 组织分析表明接头界面可以分为边缘富锌区、铝熔化区和铝钢界面反应层三个反应区。能谱分析结果表明边缘富锌区主要组成元素是锌和铝, 铝钢之间的反应层主要是 Fe_2Al_5 反应相; 接头上的缺陷主要有气孔、冷隔和低熔共晶缩孔。力学性能测试结果表明: 铝、钢熔钎焊接头强度达到 80MPa; Fe_2Al_5 反应相平均硬度 HV410, 镀锌钢母材的平均显微硬度 HV130, 铝熔化区的平均显微硬度 HV55。

关键词: 铝合金; 镀锌钢; 熔钎焊; 组织; 力学性能

中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 1004-4381(2010)10-0082-04

Abstract: For joining aluminium and galvanized steel sheet with high efficiency and quality, the 6061 aluminium sheet and SPCC galvanized steel sheet were welding-brazed using Fronius cold metal transfer (CMT) equipment. Results show that the sample can be well welded using the proposed parameters of expert system; cross-section of the joint can be divided into three zones: the Zn-rich zone, the aluminium melted zone and the reaction layer between aluminium and steel; EDS results show that the Zn-rich zone is mainly composed of Zn and Al, and the reaction phase in the reaction layer between aluminium and steel is Fe_2Al_5 . There are flaws in the joint, such as blow holes, cold laps and eutectic shrinkage cavities. Tensile tests show the average joint strength value was up to 80MPa; hardness tests show the average hardness of the Fe_2Al_5 layer, the galvanized steel and the melted aluminium are HV410, HV130 and HV55, respectively.

Key words: aluminium alloy; galvanized steel; welding-brazing; microstructure; mechanical property

由于“铝+钢”异种金属结构具有轻质、高强、良好的导热导电性能等优点, 在工业产品中应用越来越多, 特别是在汽车行业更是得到了特别关注^[1,2]。采用摩擦焊、超声波焊、扩散焊和冷压焊等压焊方法对铝和钢焊接, 可以得到良好的接头, 但这些方法共同的缺点就是焊件形状受到限制^[3-6]; 采用一般熔化焊接方法, 由于钢与铝的物理化学性能相差很大, 两者之间的焊接困难较大^[5,6]。国内外研究人员对铝和钢的熔钎焊进行了实验研究, 在这种方法中, 低熔点的铝板熔化, 同时保持钢板为固态, 借助熔融铝的润湿铺展形成搭接接头实现两者之间的连接。比较有代表性的铝钢熔钎焊方法包括直流脉冲 MIG 电弧钎焊^[7]、激光 YAG

+ MIG 复合热源熔钎焊^[8,9]、TIG 电弧钎焊^[10]以及 CMT (Cold Metal Transfer) 冷金属过渡熔钎焊^[11]。其中 CMT 熔钎焊的方法热输入量比一般的熔化焊方法要少得多, 并且容易实现自动化焊接, 特别适用于汽车工业。本工作进行了镀锌钢和铝合金薄板的焊接实验, 研究了铝合金和镀锌钢熔钎焊工艺、焊接接头组织特征、焊接缺陷以及力学性能。

1 实验材料及设备

实验所用的母材为锻铝 6061 和镀锌钢板 SPCC, 两者的性能分析如表 1 所示。镀锌钢板和锻铝母材焊

前组织观察表明, 镀锌钢板基体成分近工业纯铁, 室温下为铁素体组织; 锻铝基体上分布着点状、棒状增强相。锻铝和镀锌钢板焊接试件几何尺寸均为 300mm×55mm, 厚度为 1.1mm, 焊件搭接。焊丝选用 $\phi 1.2\text{mm}$ 的 AlSi5 焊丝。焊接设备为奥地利 Fronius 公司的 CMT 5000i MIG 焊机。焊接过程采用氩气保护, 其流量为 15L/min。

表 1 铝、钢性能

Table 1 Properties of the Al and steel

Material	T/℃	N ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	α ($10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	ρ ($10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$)
6061	610	146.5	2.7	23.6	4.0
Q235	1500	77.5	7.86	11.76	1.5

2 焊接工艺实验

Fronius CMT 焊机内置优化的专家数据库系统, 焊接电压、焊接电流不能随意改动, 它们与送丝速率一一对应, 通过改变送丝速率, 可以使焊接电压和焊接电流同时改变, 简单易行方便操作; 同时也可以改变电弧长度和脉冲来修正并微调焊接电流和焊接电压, 以达到满意的焊接效果, 给人们一个方便快捷的操作环境。选定母材为铝、钢薄板后, 设备专家数据库系统可以提供参考焊接参数数据, 按照参考参数, 锻铝 6061 和镀锌钢板 SPCC 可获得良好的焊接成型。图 1 所示为成

型良好的铝、钢熔钎焊接头宏观形貌照片。其中的送丝速率、焊接电流、焊接电压分别为: (A) 3.9m/min, 69.0A, 12.0V; (B) 4.0m/min, 73.0A, 12.1V; (C) 4.1m/min, 76A, 12.3A; (D) 4.2m/min, 79A, 12.3V。

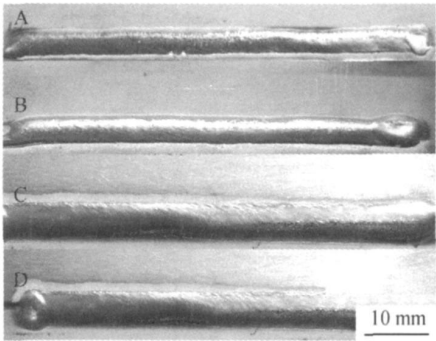


图 1 镀锌钢板和锻铝熔钎焊宏观照片
Fig. 1 The macro photos of melting brazed galvanized steel and forged aluminum

3 接头组织及性能

3.1 接头组织特征及形成分析

锻铝的熔点为 610℃, 钢的熔点为 1500℃, 熔点差别很大, 在电弧的作用下只有铝熔化, 而镀锌钢板几乎没有熔化(可能局部微熔), 铝在钢板表面润湿铺展形成接头。图2(a)所示为熔钎焊接头沿垂直于焊缝方

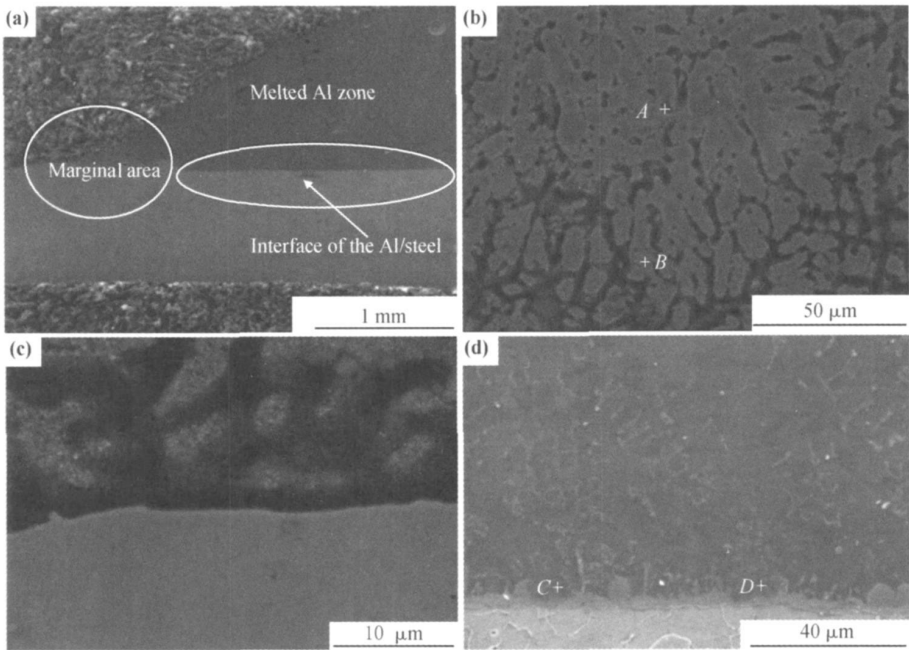


图 2 镀锌钢板和锻铝熔钎焊接头组织特征

(a) 整体低倍; (b) 熔钎焊边缘富锌区; (c) 富锌区与钢的界面; (d) 铝熔化区与钢界面

Fig. 2 Microstructure character of the galvanized steel and forged aluminum brazed joints

(a) low magnification; (b) marginal Zn-rich area; (c) interface of the Zn-rich zone/ steel; (d) interface of the melted Al zone/ steel

向的 SEM 切面照片, 从图 2(a) 中可见接头宏观上可分为铝熔化区、铝与钢界面反应区和熔钎焊边缘富锌区。其中铝熔化区是由熔化的铝和铝硅焊丝相互熔合, 降温冷却结晶后所形成的区域; 铝与钢界面反应区是熔化的铝和未熔化的钢板之间相互作用在加热条件下形成界面的反应层; 熔钎焊边缘主要是由镀锌钢板上没有挥发的锌富集所形成的。图 2(b) 所示为边缘富锌区的形貌, 富锌区由灰色的树枝晶和枝间的黑色网状相组成。能谱分析结果表明在这一区域中含有较多的 Al 和 Zn, 而只有很少量的 Fe 和 Si 元素, 灰色树枝晶铝锌原子比 4:1, 黑色网状相铝锌原子比 10:1。焊接进行过程中, 电弧边缘温度较低, 聚集的锌和镀锌钢板上的锌只发生熔化没有挥发并被保留了

下来, 在熔化的铝的推动下, 聚集在接头的一侧形成富锌区。由于锌与铝的相互作用阻隔了铁铝相互作用, 而且在电弧边缘温度较低, 因此在富锌区与钢之间几乎没有反应层, 如图 2(c) 所示。图 2(d) 所示为铝熔化区以及铝熔化区与钢的界面, 从图 2(d) 中可见铝熔化区主要是铝的基体和铝硅共晶组织, 铝钢界面上有明显的反应层。C、D 两点的能谱分析结果显示, 反应层主要是 Fe、Al 元素和少量的 Si, 铁铝原子比接近 2:5, 该反应层可能为 Fe_2Al_5 。

3.2 焊接缺陷及其形成

对接头界面组织进行了观察, 发现接头的缺陷包括气孔、冷隔和低熔共晶缩孔, 并且这些缺陷主要集中在接头上部, 如图 3 所示。

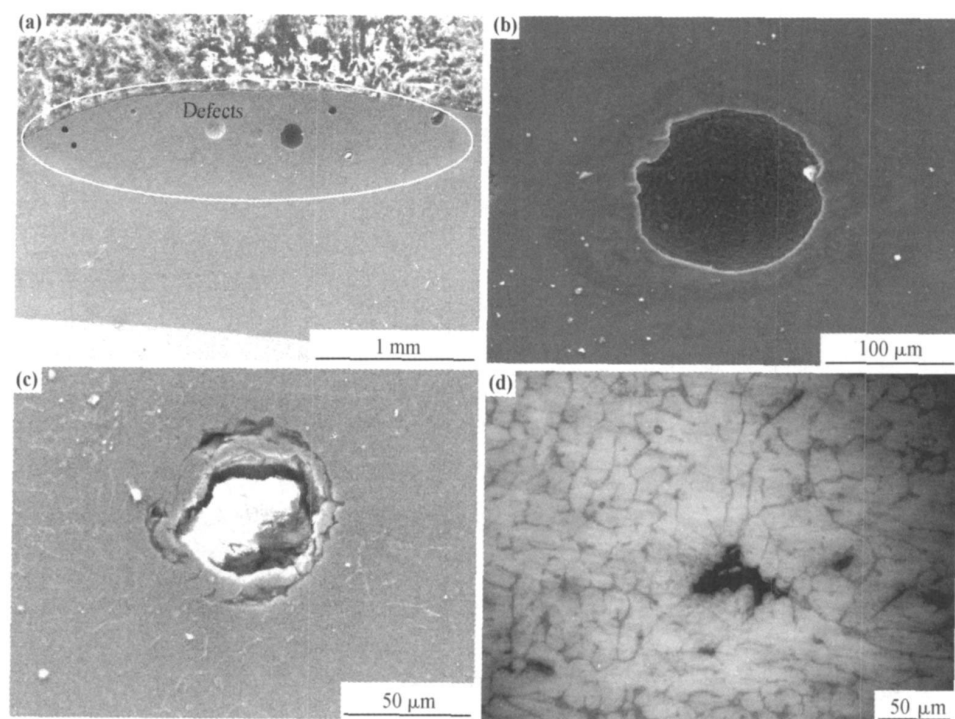


图 3 铝和镀锌钢板熔钎焊接头组织中的缺陷

(a) 缺陷聚集; (b) 气孔形貌; (c) 冷隔; (d) 低熔缩孔

Fig.3 The defects of aluminum and galvanized steel brazed joints

(a) defect cluster; (b) appearance of the blow hole; (c) cold shut; (d) low melting shrinkage

气孔大部分集中在熔化区的顶部及其边角区域, 气孔的直径大小一般 $100\mu\text{m}$ 左右。气孔形成的原因可能有两个: 一是由于铝合金母材表面的氧化膜容易吸附水分、油脂等污染, 焊接过程中分解产生气体(氢气、氧气等), 焊缝冷却时没有及时的逸出而形成了气孔; 第二是由于锌挥发。锌的熔点约为 420°C , 沸点温度为 906°C , 高温电弧接触到镀锌钢板上时中心部分的锌就挥发了, 由于焊接热循环的瞬态作用, 不足以使

全部的锌蒸汽从焊缝中逸出而形成了气孔。

在铝熔化区中靠近焊缝的表面处还发现了少量的冷隔, 呈不规则圆形, 冷隔与周围金属存在明显的分界内部含有较多的杂质, 如图 3(c) 所示。能谱分析表明冷隔内含有较多的 Si 元素。在 CMT 法焊接过程中, 送丝机周期性回抽焊丝, 熔滴与焊丝之间存在着半熔化状态的焊丝球有可能进入熔池中。由于 CMT 法是在短路状态下熔滴过渡, 热量输入低, 熔池温度不够

高,表面温度更低,熔池表面不足以使固态焊丝球熔化。在冷却结晶过程中,晶粒就以焊丝球或其他夹杂物为晶核优先长大,而较早完成结晶过程,因此在焊缝形成后该晶粒就会与其他晶粒在晶界处产生明显分界线,而形成冷隔。

在铝熔化区中靠近焊缝的表面处还发现了少量的低熔共晶缩孔,缩孔轮廓沿着铝硅共晶花纹,呈不规则形状。这些缩孔的产生是由于铝熔化区结晶过程中,结晶前沿溶质的重新分配导致局部成分达到低熔点共晶成分,而在已经凝固区内部产生共晶液相,继续降温,体积收缩而无液体补充,从而形成低熔共晶缩孔。

综上所述,在铝和镀锌钢板熔钎焊接头中存在气孔、冷隔和低熔缩孔等焊接缺陷,这些焊接缺陷主要存在于铝熔化区的上部,所以对焊接接头的性能影响不大。

3.3 接头力学性能

为了测试铝和镀锌钢板熔钎焊接头力学性能,进行了拉剪实验。在焊件接头上沿垂直焊缝方向切割取出 $70\text{mm} \times 12\text{mm}$ 的条形试样,并保证焊缝处于试样中部。拉伸实验在 INSTRON 1100 电子万能实验机上进行,温度条件:室温 26°C ,拉伸速率: $1\text{mm}/\text{min}$ 。拉剪 5 个试样,接头均断在铝合金母材的热影响区;强度分别为 78, 86, 70, 82, 84MPa , 平均强度为 80MPa 。

对接头界面的反应区和反应相进行了显微硬度测试,结果显示前面所述的 Fe_2Al_5 反应层的平均显微硬度为 HV 470,镀锌钢母材的平均显微硬度 HV 130,铝熔化区的平均显微硬度 HV 55,显微硬度的测试进一步从硬度上确认上述铝钢界面反应层是金属间化合物。

4 结论

(1) 对于铝、镀锌钢薄板的熔钎焊可以采用焊机附带的专家系统提供的参数进行焊接,对推荐的参数进行微调可以获得成型良好的接头。

(2) 组织分析表明接头界面可以分为边缘富锌区、铝熔化区和铝钢界面反应层三个反应区。能谱分析结

果表明边缘富锌区主要组成元素是锌和铝,铝钢之间的反应层主要是 Fe_2Al_5 反应相。

(3) 在铝镀锌钢板接头上的焊接缺陷主要有气孔、冷隔和低熔共晶引起的缩孔,由于这些缺陷主要集中在铝熔化区的上部,对力学性能影响不大。

(4) 铝、钢熔钎焊接头强度达到 80MPa ; Fe_2Al_5 反应相平均硬度 HV 410,镀锌钢母材的平均显微硬度 HV 130,铝熔化区的平均显微硬度 HV 55。

参考文献

- [1] 刘绪功,王洪志,康剑. 汽车覆盖件冲压工艺设计系统及其应用[J]. 机械工人冷加工, 2006, (4): 22- 25.
- [2] 陈永华,李富荣,徐夕斌. 汽车车架焊接工艺分析及工装设计[J]. 现代零部件, 2006, (4): 84- 85.
- [3] 傅莉,毛信孚,史学芳. LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢摩擦焊接[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 9- 14.
- [4] TSUJINO J, HIDAI K, HASEGAWA, et al. Ultrasonic butt welding of aluminum, aluminum alloy and stainless steel plate specimens[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1- 8): 371- 374.
- [5] 李亚江,王娟,刘强. 有色金属焊接及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 251- 256.
- [6] 里亚博夫 B P. 铝及铝合金与其他金属的焊接[M]. 北京: 宇航出版社, 1990. 144- 172.
- [7] MURKAMIT, NAKATA K, TONG Hon-jun. Dissimilar metal joining of aluminum to steel by MIG arc brazing using flux cored wire[J]. ISIJ International, 2003, 43(10): 1596- 1602.
- [8] 雷振,秦国梁,林尚扬,等. 铝/钢异种金属 Nd: YAG 激光 MIG 复合热源熔钎焊工艺[J]. 焊接, 2006, (6): 35- 37.
- [9] 林尚扬,雷振,游爱卿,等. 一种用于大光斑激光电弧复合热源连接异种金属的钎剂[P]. 中国专利: CN101088696A, 2009-07-08.
- [10] 于治水. 镀锌钢板氩弧钎焊润湿铺展及界面行为[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学工学博士学位论文, 2003. 96- 156.
- [11] 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.

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(2008GQC0013); 江西省教育厅科技项目(GJJ10033)

收稿日期: 2010-06-20; 修订日期: 2010-07-20

作者简介: 李玉龙(1978—),男,副教授,工学博士,研究方向为光纤智能金属结构、钎焊、熔焊成型,联系地址,江西省南昌市红谷滩新区学府大道 999 号,南昌大学机电工程学院(330031), E-mail: liyulong1112ster@gm ail. com