

采用 AISi5 焊丝 CMT 熔钎焊 7075 铝合金/镀锌钢板
接头组织及性能分析

秦优琼, 焦国力

(上海工程技术大学 材料工程学院,上海 201620)

摘 要:采用 CMT 熔钎焊,对车用镀锌钢板和 7075 铝合金进行焊接试验. 通过光学显微镜、扫描电镜(SEM)、EDS 能谱分析和 X 射线衍射仪对接头的显微组织及断口形貌进行分析. 结果表明,焊缝成形美观,焊接时铝侧发生熔化焊,钢侧发生钎焊. 焊接接头分为富锌区、焊缝区、焊缝热影响区和钢侧界面层,其中钢侧界面层主要生成 FeAl₃ 和 Fe₂Al₅. 同时对熔钎焊接头进行拉剪试验,发现接头的断裂部分发生在钢侧界面层为解离断裂,属于脆性断裂,发生在热影响区的为韧窝断裂,属于韧性断裂,接头承受的最大拉剪强度为 127 MPa.

关键词:冷金属过渡熔钎焊; 微观组织; 力学性能; 7075 铝合金; 镀锌钢板

中图分类号: TG 454 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20151025002

0 序 言

为了节能减排,轻量化是汽车行业发展的方向. 采用铝合金等轻质材料代替钢是汽车轻量化的最主要途径. 这就必然涉及到了铝板与车用钢板的异种材料连接^[1]. 但是由于铝合金与钢在密度、比热容、热导率、线膨胀系数和熔点等物理性能方面相差悬殊,致使二者间的焊接比较困难. 另外,铝在铁中的溶解度几乎为零,且 Fe-Al 之间容易产生脆性的金属间化合物,比如 Fe₂Al₅, FeAl₃ 等化合物^[2]. Lu 等人^[3]对铝 3A21 和镀锌钢板采用 LEI 焊接,发现在界面区域形成连续且致密的金属间化合物层,厚度约为 3~4 μm,其成分主要是 Fe₂Al₅ 和 FeAl₃. Shi 等人^[4]对 JSC270CC 冷轧钢板和 A6111-T4 铝合金采用双光束激光焊接,发现中间化合物层主要为 Fe₃Al 和 FeAl. 宋新华等人^[5]采用激光深熔钎焊的方法对 6061 铝合金和 H200YD+ZF 镀锌钢使用 ER4043 焊丝进行搭接,发现金属间化合物主要为 Al₁₇.2Fe₂Si 和 (Al,Si)₁₃Fe₄ 等. Cao 等人^[6]通过 CMT 焊接实现 AA6061 与 Q235 镀锌钢板的搭接,发现中间化合物层包括 γ-Fe 固溶体, Fe₃Al, FeAl₂, FeAl₃, Fe₂Al₅ 和 α-Al-Si 共晶化合物. Zhang 等人^[7]采用 MIG 熔钎焊对铝合金 2B50 和不锈钢 1Cr18Ni9Ti 进行搭接,用 4043Al-5Si 做焊丝,发现中间化合物为 Al₄Si.

Liu 等人^[8]采用激光熔钎焊将 5052 铝合金和钢 ST07Z 异种金属进行搭接,使用纯铝粉作为填充材料,发现金属间化合物 Fe₂Al₅Zn_{0.4}. Agudo 等人^[9]对 A6061 T4 铝合金和镀锌钢板 DX56D 进行 CMT 焊接,发现中间化合物层为 Fe₂Al₅ 和 FeAl₃.

试验采用 ER4043 焊丝,对 7075 铝合金和镀锌钢板进行 CMT 熔钎焊,对接头的微观组织和力学性能进行更进一步的研究.

1 试验方法

试验材料为 7075 铝合金和 DC51D 镀锌钢板,所用的焊丝为 ER4043,其成分为 AISi5 (质量分数,%),使用奥地利 Fronius 公司生产的 CMT5000 系列焊机. 试验前对铝合金和镀锌钢板进行切割,7075 铝合金的尺寸为 150 mm×100 mm×2.7 mm,镀锌钢板尺寸为 150 mm×100 mm×2 mm,表面镀锌层的厚度 80 g/m². 然后对 7075 铝合金板用机械和化学清理方法去掉表面的氧化膜,用丙酮去掉镀锌钢板表面的油污. 采用的试验参数为保护气体为纯氩气,气体流量 15 L/min、焊接速度 0.4 m/min、送丝速度 3~8 m/min. 焊接时焊丝与镀锌钢板保持 62°,与焊接方向保持 105°,采用搭接方式进行焊接,铝板在上,钢板在下,搭接宽度为 10 mm,焊接示意图如图 1 所示.

焊接后采用线切割方法将焊件切割成标准拉伸试样和金相试样. 拉伸试样在 AG-25TA 试验机上进行拉伸试验,加载速率为 1.0 mm/min. 同时,金相

收稿日期: 2015-10-25
基金项目: 上海工程技术大学研究生科研创新计划资助项目 (16KY0516); 上海汽车工业科技发展基金项目 (1404)



图 1 焊接示意图
Fig. 1 Schematic drawing of welding

试样采用打磨和抛光处理,先用 1% 的氢氟酸溶液对铝合金进行腐蚀处理,然后用 4% 硝酸酒精溶液对镀锌钢进行腐蚀,采用 KEYENCE 公司 VHX-600 型号的超景深三维分析系统在金相显微镜下观察焊缝横截面;采用日立 S-3400N 扫描电子显微镜 (SEM) 及其配备的能谱仪 (EDS) 和 XperpPRO X 射线衍射仪 (XRD) 对接头显微结构、相组织和断口结构进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 宏观分析

图 2 为焊缝的宏观形貌,可以看出,焊缝成形良好,焊缝表面没有气孔,镀锌层几乎没有影响. 从图 2c 中可以看出,焊接时铝侧发生熔化焊,钢侧发生的是钎焊,为熔钎焊连接. 接头分为富锌区 (A), 钢侧界面层 (B), 焊缝区 (C) 和焊接热影响区 (D)。

2.2 微观组织分析

图 3 为图 2 中 A, B, C 和 D 四个区域的放大, 图 3a 为对富锌区的放大,对图中的 1 处进行能谱分析,结果如表 1 所示. 发现 1 处主要含有锌和铝, 锌的含量达到 18.39%, 根据 Al-Zn 二元相图可知, 1 处为 Al-Zn 固溶体. 富锌区主要集中于焊趾部分, 产生富锌区的原因主要是在电弧的边缘温度较低, 镀锌层熔化, 锌能溶于铝中, 因此富集在焊趾部分. 而处于电弧中心的温度较高, 锌发生蒸发, 锌的残留量极少. 富锌区的形成阻碍了 Fe-Al 中间化合物的形成, 并且在富锌区与镀锌钢板之间几乎没有界面化合物层产生.

图 3b 为图 2 钢侧界面层的放大,可以看出在镀

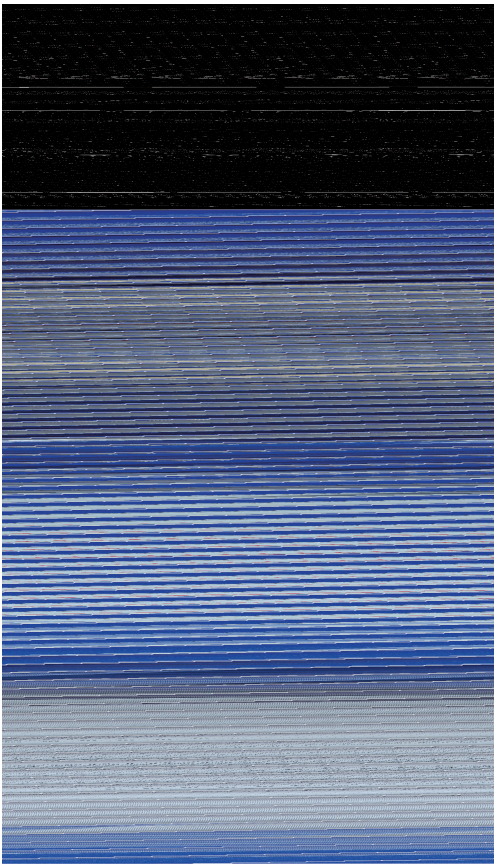


图 2 焊缝的宏观形貌
Fig. 2 Appearance of CMT weld-brazed joint

锌钢与焊缝界面生成了一个化合物层,该层靠镀锌钢板一侧边缘较为整齐,另一侧参差不齐,呈锯齿状,界面层的厚度约为 3~4 μm . 沿图 3b 白线方向进行线扫描其结果如图 4 所示. 可以看出, Al 元素在焊缝处的含量远大于 Fe 元素,在界面 Al 元素开始减小, Fe 元素开始增加,因此 Al 元素和 Fe 元素在界面处可能发生扩散或者产生金属间化合物。

为了进一步分析界面反应层的产物,对界面反应层的 2 处和 3 处进行 EDS 能谱分析,结果如表 1 所示. 可以看出 2 处 Al 72.34, Fe 17.54, 2 处靠近焊缝,根据 Fe-Al 相图可知, 2 处成分主要为 FeAl_3 . 而 3 处的 Al 67.08, Fe 26.10, Al 元素与 Fe 元素的比例约为 5:2, 根据 Fe-Al 相图可知 3 处的成分为 Fe_2Al_5 . 为了进一步分析界面层化合物的成分,对从界面断裂试件断裂面进行 X 射线衍射分析,如图 5 所示. 从图中可以看出,界面断裂处的化合物有铝和 Fe_2Al_5 ,这与扫描电子显微镜的结果相符. 产生金属化合物层的主要原因是,电弧的温度较高,镀锌层的熔化蒸发,导致铁与铝直接接触,且铁和铝形成金属间化合物的速度远远大于液体铝向钢表面的扩散速

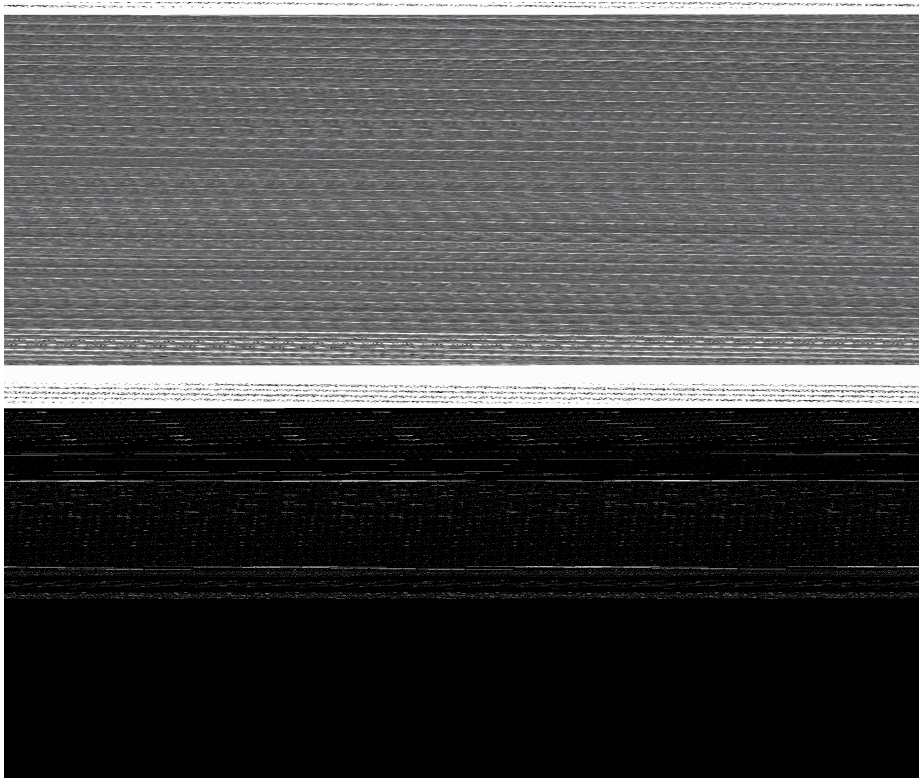


图 3 焊缝的微观组织形貌
Fig. 3 Microstructure of weld

度^[10],因此熔化的铁与铝在界面处产生金属间化合物.

表 1 EDS 能谱分析 (原子数,%)

Table 1 EDS energy spectrum analysis

位置	Al	Zn	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	可能相
1	70.38	18.39	00.63	09.34	00.54	00.17	00.56	Al-Zn 固溶体
2	72.34	00.54	17.54	08.60	00.36	00.00	00.58	FeAl ₃
3	67.08	00.80	26.10	04.88	00.67	00.13	00.34	Fe ₂ Al ₅
4	95.68	00.64	00.73	01.72	00.94	00.16	00.13	α-Al
5	76.90	01.06	00.73	20.03	00.62	00.34	0.32	Al-Si 共晶

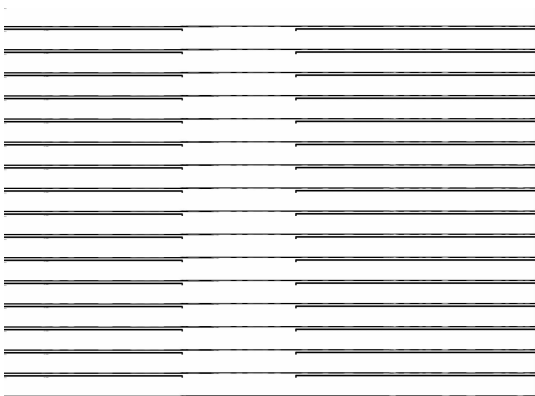


图 5 界面层处物相分析
Fig. 5 XRD analysis in interface layer



图 4 界面层线扫描分析
Fig. 4 EDS analysis of interface layer

图 3c 为焊缝区的放大,对图中 4 处和 5 处进行 EDS 能谱分析,结果如表 1 所示. 可以看出 4 处主要含有 Al 元素,含量为 Al 95.68,因此可知 4 处的主要成分为 α-Al 固溶体. 而 5 处主要含有 Al 元素和 Si 元素,含量为 Al 76.90,Si 20.03,根据 Al-Si 二元相图可知,5 处的主要成分为 Al-Si 共晶. 因为焊接时铝的熔点低,钢的熔点远高于铝,因此铝侧发生熔焊,而镀锌钢侧发生钎焊,所以焊缝区主要是由熔化的铝和焊丝所组成的.

图 3d 为焊接热影响区,其宽度约为 270 μm,主要是由于在焊接过程中,靠近焊缝的母材受到不同

程度的热量,组织发生变化所形成的区域. 焊接热影响区对接头的力学性能有很大的影响.

通过以上分析可知,焊接接头的富锌区位于焊趾部位,主要是 Al-Zn 固溶体;焊缝区主要是 α -Al 固溶体和 Al-Si 共晶;焊接热影响区宽度约为 270 μm ,对接头的力学性能有很大的影响;钢侧界面层厚度约为 3 ~ 4 μm ,靠近镀锌钢一侧边缘较为整齐,另一侧参差不齐,呈锯齿状,其成分主要为 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 .

2.3 力学性能测试与断口分析

对 7075 铝合金和镀锌钢板的熔钎焊接头进行拉剪试验,图 6 为接头和母材的载荷-位移曲线,图 7 为接头的拉伸断裂形貌. 可以看出接头的断裂位置存在两种形式,分别为从钢侧界面层处断裂和焊缝热影响区断裂. 其中焊缝热影响区处断裂的拉剪强度为 127 MPa,如图 6 中的曲线 1. 中间化合物层断裂处的拉剪强度为 112 MPa,如图 6 中的曲线 2,接头的拉剪强度都低于母材.

进一步通过扫描电子显微镜对焊接接头断裂处的形貌进行分析,如图 8 所示. 当断口发生在钢侧

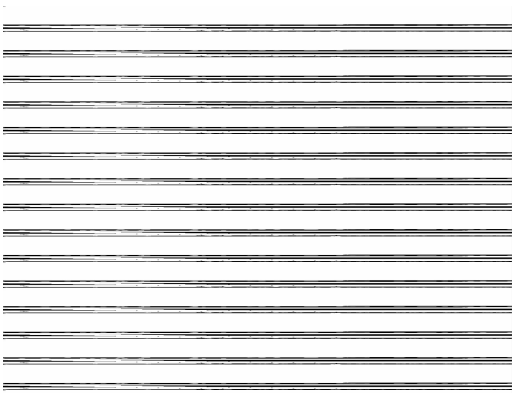


图 6 接头和母材载荷-位移曲线
Fig. 6 Stress-strain curves joints and base metal

界面层处,发生的是解离断裂,主要是由于试样在受到剪切力的作用下,从界面部分产生撕裂,撕裂正好发生在脆性的过渡层. 当断口发生在焊缝热影响区处,发生的是韧窝断裂,从图中可以看出韧窝断裂时,韧窝较大,试样在拉伸应力下变形时,热影响区首先裂开形成韧窝源.

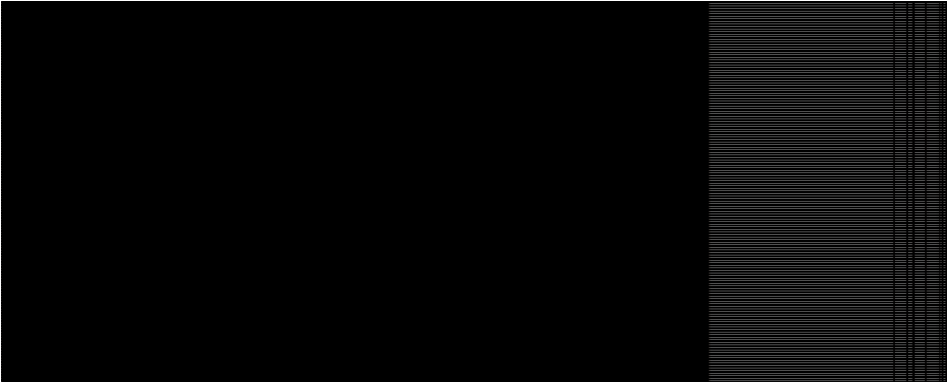


图 7 接头拉伸断裂形貌
Fig. 7 Tensile fracture morphology of joints

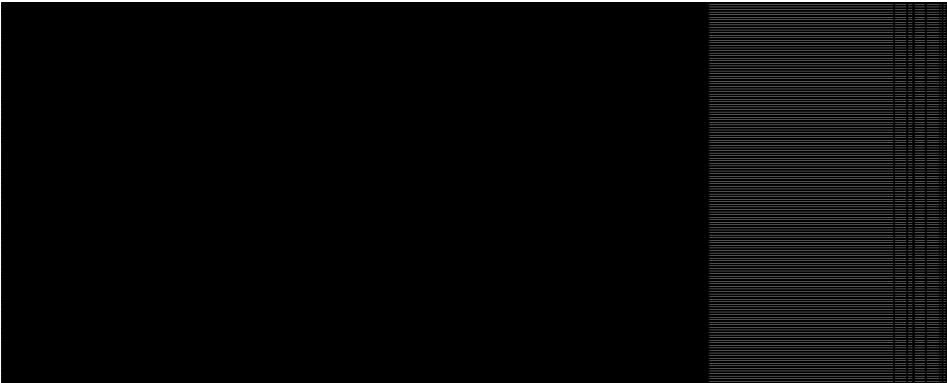


图 8 接头断口形貌
Fig. 8 SEM morphology of joints

3 结 论

- (1) 由于镀锌钢板与 7075 铝合金熔点的巨大差异,CMT 熔钎焊接头分为富锌区、焊接热影响区、焊缝区和钢侧界面层。
- (2) 焊接接头的富锌区位于焊趾部位,主要是 Al-Zn 固溶体;焊缝区主要是 α -Al 固溶体和 Al-Si 共晶;焊接热影响区宽度约为 270 μm ,对接头的力学性能有很大的影响;钢侧界面层厚度约为 3 ~ 4 μm ,靠近镀锌钢一侧边缘较为整齐,另一侧参差不齐,呈锯齿状,其成分主要为 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 。
- (3) 在拉剪载荷的作用下,接头发生两种断裂,一种位于焊缝热影响区,属于韧窝断裂,属于韧性断裂。另一种发生在钢侧界面层属于解理断裂,属于脆性断裂。接头承受的最大拉剪强度为 127 MPa,具有较高的力学性能。

参考文献:

[1] 杨 硕,林 健,雷永平,等. 预置间隙对铝/钢 CMT 接头强度与失效模式的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(6): 5 - 8.
Yang Shuo, Lin Jian, Lei Yongping, *et al.* Influence of preset gap on strength and failure mode of aluminum/steel CMT joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35 (6): 5 - 8.

[2] 石 玟,何翠翠,黄健康,等. 几种铝钢异种金属熔钎焊工艺的对比与分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 1 - 4.
Shi Yu, He Cuicui, Huang Jiankang, *et al.* Comparison and analysis on dissimilar metals welding of aluminum alloy to galvanized steel by different welding-brazing methods [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 1 - 4.

[3] Lu Zhenyang, Huang Pengfei, Gao Wenning, *et al.* ARC weld-

ing method for bonding steel with aluminum[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2009, 4(2): 134 - 146.

[4] Shi Yan, Zhang Hong, Takehiro Watanabe, *et al.* CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010(48): 732 - 736.

[5] 宋新华,金湘中,袁 江,等. 激光深熔钎焊车用铝/钢异种金属试验研究[J]. 激光技术, 2014, 38(3): 342 - 346.
Song Xinhua, Jin Xiangzhong, Yuan Jiang, *et al.* Experimental investigation of laser deep penetration welding-brazing of automotive aluminum/steel galvanized metal [J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 342 - 346.

[6] Cao R, Yu Gang, Chen J H, *et al.* Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(10): 1753 - 1763.

[7] Zhang Hongtao, Liu Jiakun. Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy/stainless steel lap joints fabricated by MIG welding-brazing process[J]. Materials Science and Engineering A, 2011(528): 6179 - 6185.

[8] Liu Jia, Jiang Shichun, Shi Yan, *et al.* Laser fusion-brazing of aluminum alloy to galvanized steel with pure Al filler powder[J]. Optics & Laser Technology, 2015(66): 1 - 8.

[9] Leonardo Agudo, Dominique Eyidi, Christian H. Schmaranzer, *et al.* Intermetallic FeAl₃-phases in a steel/Al-alloy fusion weld [J]. Materials Science, 2007(42): 4205 - 4214.

[10] 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.

作者简介: 秦优琼,女,1978 年出生,博士,副教授. 主要从事新材料及异种材料连接技术的研究与开发工作. 发表论文 20 余篇.
Email:qyqqin@163.com