

镁 - 铝异种金属冷金属过渡 连接焊接性分析

汪佐瑾 温宝峰 曹睿 陈剑虹

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

摘要: 通过 CMT(Cold Metal Transfer) 冷金属过渡焊接的工艺对镁(AZ31B) - 铝(6061) 异种金属焊接性进行了研究, 试验中选用 AZ61 4043 焊丝、采用热镀锌钢板 HDG60 作为过渡金属, 分别用于镁 - 钢、铝 - 钢侧焊接, 选取合适的焊接工艺参数, 使其间接实现了镁 - 铝异种金属连接的目的。研究得出: 使用这种方法可以形成镁 - 钢熔钎焊接接头, 铝 - 钢熔钎焊接接头组成的复合接头; 同时冷金属过渡焊接可以通过保持较低焊接热输入从而降低界面反应层的厚度; 而且镀锌钢板中间过渡层的使用也避免了镁 - 铝直接焊接时形成的脆性金属间化合物, 如 Al_3Mg_2 , $Mg_{17}Al_{12}$ 等。采用该方法连接的镁 - 铝异种金属焊接接头的抗拉强度超过 180 MPa, 并且有较好的断后伸长率, 相比铝镁异种金属 CMT 直接焊接, 性能得到很大的改善, 因此使用镀锌钢板中间过渡层的使用实现铝镁异种金属之间的连接是一种行之有效的办法。

关键词: 异种金属; 焊接; 镁合金; 铝合金; 镀锌钢板

中图分类号: TG457.19

0 前言

众所周知, 当代汽车生产制造领域, 在追求更高使用性能的同时, 要兼顾压缩车辆制造成本, 为此, 就需要提高材料使用种类, 使不同的材料在不同构件中发挥自身优势, 这样就可以在保证产品使用性能的同时, 最大程度减少贵金属的使用量。考虑到这一点, 异种金属的有效连接便成为这一构想能否实现工业应用的关键所在。当前, 越来越多的汽车厂商致力于降低汽车自身重量的研究, 以期达到降低能耗, 提高汽车燃油经济性的目的。铝合金、镁合金作为轻质材料将被使用于汽车车身的设计制造中, 提高铝及其合金、镁及其合金在汽车用料中的占比, 成为降低车身重量的有效途径。为了能很好的解决汽车自身重量, 镁合金和铝合金的连接问题尤为重要, 铝合金和镁合金的异种金属连接已成为焊接领域的难点和热点^[1-4]。

镁、铝熔点接近, 在镁铝焊接过程中很容易产生脆性的镁铝金属间化合物, 且此类化合物硬度极高、塑性极差, 进而大大降低接头的性能, 并且接头容易氧

化, 这些缺点严重影响了镁铝之间的连接^[5]。目前主要通过钎焊、扩散焊、搅拌摩擦焊等固相连接技术实现一定强度的连接^[6-9]。使用传统熔化焊接方法对镁铝异种金属进行连接时, 因为容易产生脆性的镁铝金属间化合物而使接头强度难以保证, 尤其是在过渡区大量金属间化合物(Al_3Mg_2 , $Mg_{17}Al_{12}$) 的产生, 极大地削弱了铝镁异种金属的连接强度。论文作者考虑到冷金属过渡焊接是一种低热输入的焊接方法, 可用于镁 - 铝的连接, 但研究结果表明镁 - 铝之间很容易形成 Al_3Mg_2 , $Mg_{17}Al_{12}$ 金属间化合物, 导致接头性能较低^[10]。针对现有焊接方法对铝镁金属连接都存在的不足之处, 研究提出一种基于镁合金与铝合金异种金属新的连接方法。

1 试验材料

试验过程中采用变形镁合金(AZ31B) 和变形铝合金(6061-T6) 作为焊接母材, 其元素成分见表 1。

使用镀锌钢板(热镀锌钢板 HDG60) 作为 CMT 过渡金属中间层, 其化学成分见表 2。镀锌钢板的熔点高

表 1 镁合金(AZ31B) 和铝合金(6061-T6) 的成分(质量分数 %)

材料	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Mg
AZ31B	3.18	1.02	0.34	0.002	0.022	余量
6061	余量	0.25	0.15	0.700	0.600	0.9

收稿日期: 2018 - 10 - 23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675255, 51265028)

doi: 10.12073/j.hj.20181023001

2019 年第 2 期 17

表2 热镀锌钢板 HDG60 的化学成分(质量分数,%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.01	0.01	0.39	0.30	0.025	余量

表3 铝合金焊丝 4043 和镁合金焊丝 AZ61 的化学成分(质量分数,%)

牌号	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
4043	4.5~6	0.8	0.3	0.05	0.05	0.1	余量
AZ61	≤0.05	≤0.005	≤0.05	0.15~0.5	余量	0.4~1.5	5.8~7.2

2 试验方法及装置

试验采用冷金属过渡(Cold Metal Transfer, CMT)焊接方法对镁-铝异种金属进行连接,氩气作为保护气体,选用镀锌钢板作为过渡金属,铝镁异种金属两侧分别选用 ER4043 铝硅焊丝和 AZ61 镁铝焊丝。调节焊枪位置,使之正对铝合金板材、镁合金板材边缘,并在铝合金板材、镁合金板材之间放置一高熔点过渡金属,来阻止液态镁焊缝金属和液态铝焊缝金属的相互接触,在镁合金以及铝合金两侧分别与过渡金属形成两个熔钎焊接头,最终达到镁合金和铝合金两种异种金属连接的目的。

试验所用镁合金和铝合金板均为 200 mm × 100 mm × 1 mm 薄板,镀锌钢板为 200 mm × 20 mm × 1 mm 薄板。镁铝两侧均采用搭接接头,如图 1 所示。试验所用焊接设备为 CMT3200 焊机和全自动焊接系统。焊前用丙酮清洗镀锌钢板,除去表面油污;用钢丝刷和砂纸去除镁合金表面的氧化膜,并用丙酮清洗;分别使用酸、碱溶液对铝合金表面进行清洗,使用自来水冲洗后用丙酮擦拭烘干。采用图 1 所示的方法将待焊铝合金和镁合金板材搭接起来,分别放置在镀锌钢板上。为保证焊接质量,需使焊枪与工件成 45°角,焊嘴端部离工件 10 mm,焊丝离母材 2 mm,焊接过程中选用氩气作为保护气。

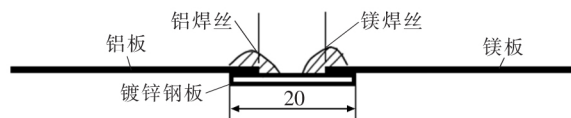


图1 焊接装配示意图

3 试验结果与分析

3.1 焊接接头宏观成形

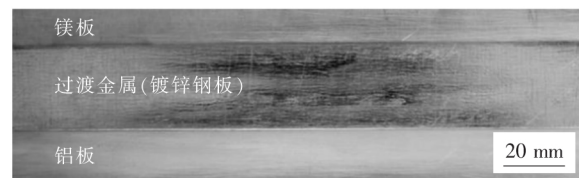
使用经过优化的焊接参数得到的镁-铝焊接接头,如图 2 所示。所使用的焊接参数为铝侧焊缝焊接

达 1 538 °C 左右,镁、铝的熔点分别为 648 °C 和 660 °C 远低于过渡金属熔点且相互接近,试验选用直径为 1.2 mm 的铝合金焊丝(4043)和直径 1.6 mm 的镁合金焊丝(AZ61),化学成分见表 3。

电压 12.3 V、焊接电流 82 A、送丝速度 4.5 m/min、焊接速度 6.0 mm/s、弧长修正 0%。镁侧焊缝焊接电压 10.5 V、焊接电流 95 A、送丝速度 8.0 m/min、焊接速度 6.0 mm/s、弧长修正 0%。从焊接接头宏观形貌可以看出焊缝成型良好,无宏观缺陷。



(a) 接头正面成形



(b) 接头背面成形

图2 焊接接头焊缝成形

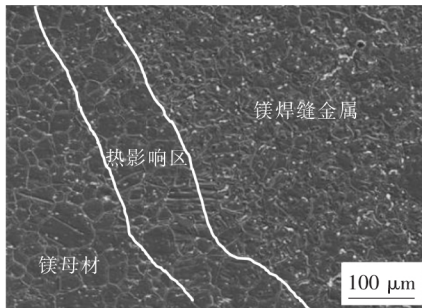
3.2 焊接接头组织与连接机理

由图 1 可知,镀锌钢板位于镁铝合金板下方,起到过渡金属中间连接层的作用,结合图 2 可知镁焊缝和铝焊缝位于镀锌钢板同侧,且成型良好。图 3 为焊接所得到的镁合金-铝合金接头的宏观截面形貌。由图 3 可知,采取镀锌钢板为中间连接过渡层、分别采取镁焊丝和铝焊丝最终连接镁合金-铝合金,在其两侧分别形成镁-镀锌钢板、铝-镀锌钢板的两个熔钎焊接接头,从而间接达到镁铝异种金属连接的目的。

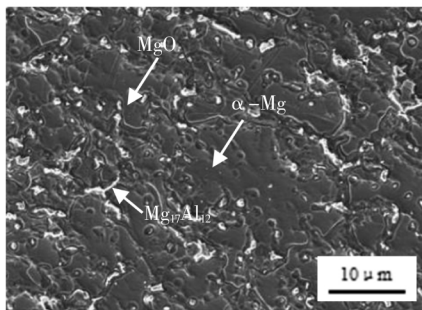
从图 3 的焊缝横截面中可以看出,镁合金一侧焊缝余高较大,且焊趾部位润湿角较大,这主要是由液态镁合金熔滴与镀锌钢板之间的润湿性差造成的。镁侧熔钎焊接头由热影响区、焊缝区和镁/过渡金属结合界面三个区域组成,分别用 A、B、C 表示这三个区域,其微观形态如图 4 所示。



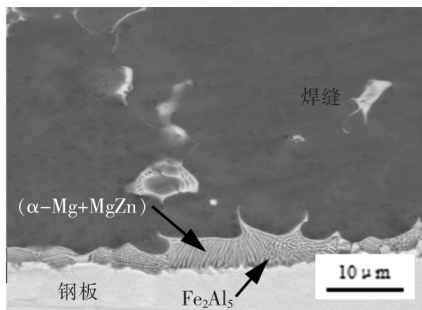
图3 镁-铝接头的宏观形貌



(a) 镁侧热影响区



(b) 镁合金焊缝区

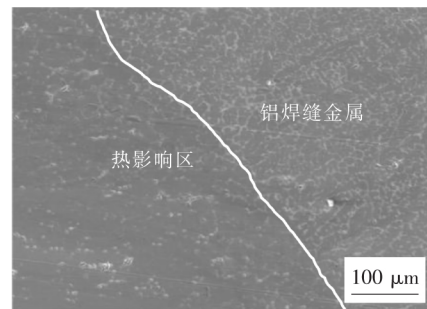


(c) 镁/过渡金属(镀锌钢板)结合界面

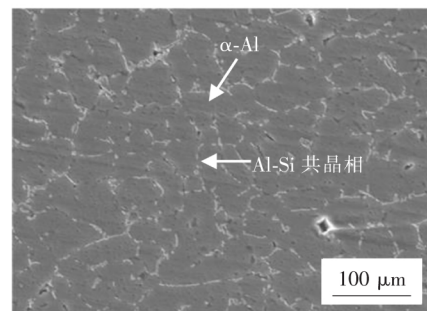
图4 镁钢接头微观组织

由图4a可知镁合金AZ31B由黑色基体 α -Mg组成;由于焊接热输入的影响,镁焊缝热影响区母材晶粒发生长大,基体仍保持 α -Mg不变。镁焊丝与镁合金母材熔化形成图4b所示的焊缝区,该区域由黑色的 α -Mg基体、白色骨架状组织 $Mg_{17}Al_{12}$ 和少量的氧化物组成。由图4c可知为镁焊缝金属与镀锌钢板的结合界面主要由靠近焊缝侧的 α -Mg与MgZn共晶相和靠近钢侧的薄层 Fe_2Al_5 金属间化合物组成。由图3可以看出铝侧焊缝金属在镀锌钢板上润湿角相对较小,润湿性较好,接头分为热影响区、焊缝区和钎焊界面区,分别对应图

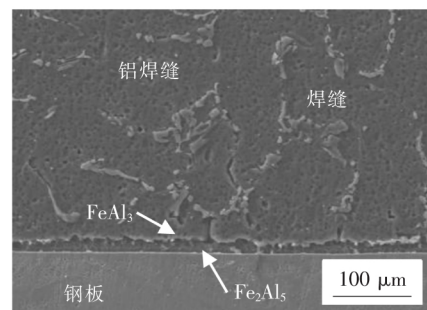
3中的D、E、F三个区域,相应的SEM组织如图5所示。由图5a可知,铝侧焊缝热影响区的晶粒较母材发生明显长大;在图5b中灰色的 α -Al基体和晶粒边界不连续分布着的铝硅共晶相组成了焊缝金属区域;图5c为铝焊缝金属和钢板的钎焊界面SEM组织,可以看到钎焊界面由靠近铝焊缝金属的 $FeAl_3$ 以及靠近钢侧的 Fe_2Al_5 金属间化合物组成。



(a) 铝侧热影响区



(b) 铝合金焊缝区



(c) 铝合金/过渡金属(镀锌钢板)结合界面

图5 铝钢接头微观组织

铝的熔点仅为 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$,而钢板的熔点为高达 $1538\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于两种金属的熔点存在较大差异,对其进行焊接时,铝板和铝焊丝完全融化形成焊缝金属,而钢板则几乎不融化(局部发生微熔),从而焊缝金属在钢板表面润湿铺展形成钎焊区,与熔化的铝板形成熔焊区。试验所用6061铝合金为热处理强化型。在焊接热源的作用下,一方面铝合金热影响区发生过时效现象,另一

方面热影响区的晶粒严重长大,这两方面的共同作用使得热影响区的力学性能明显降低^[11]。

3.3 焊接接头力学性能

将焊好的铝镁焊接接头制备成如图 6 所示的拉伸试样,使试验力的加载方向垂直于焊缝长度方向。

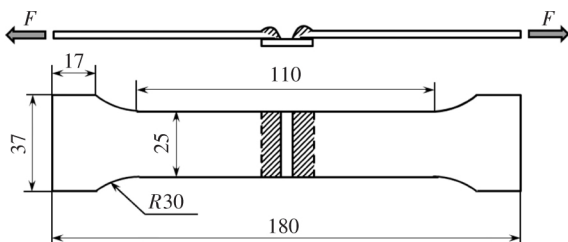


图 6 镁-铝接头拉伸示意图

通过对比试验可知铝-铝搭接接头的抗剪强度约 200 MPa ($5 \text{ kN}/25 \text{ mm}^2$); 镁-镁搭接接头的抗剪强度约为 208 MPa ($5.20 \text{ kN}/25 \text{ mm}^2$)。使用镀锌钢板作为过渡金属的镁-铝异种金属连接接头的平均抗剪强度为 180 MPa ($4.5 \text{ kN}/25 \text{ mm}^2$) ,该强度达到了铝-铝接头抗剪强度的 90% ,镁-镁接头抗拉剪强度的 87% ,且接头断后伸长率比铝-铝、铝-钢有所提升。因此,使用该工艺可以获得力学性能较好的镁铝异种金属连接接头。此外,图 7 表明镁-铝异种金属接头断裂形成于铝侧的热影响区,这是由于铝母材在焊接过程中经历热循环引起的晶粒长大和热影响区软化所导致^[8]。铝镁异种金属 CMT 直接焊接对比试验结果表明,由于镁铝金属间化合物硬度极高,而塑韧性极差,同时其厚度又较厚,严重影响了焊缝接头的力学性能。

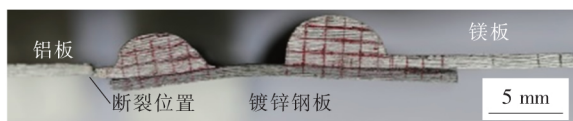


图 7 拉伸试样断裂图(断裂在铝热影响区)

4 结论

文中主要研究了以 HDG60 镀锌钢板作为中间过渡金属,通过 CMT 冷金属过渡焊接方法实现对 AZ31B 镁合金和 6061 铝合金异种金属的连接,得到以下结论:

(1) 通过采用不同的焊接工艺,得到焊缝成形美观、变形量较小的镁-钢、铝-钢熔-钎焊接接头。

(2) 研究所用 CMT 连接方法具有较低的焊接热输入,可以有效控制界面层金属间化合物的厚度,保证了接头强度,实现镁合金-铝合金异种金属的有效连接。

(3) 由于试验采用了 HDG60 镀锌钢板作为过渡金属,使得镁合金-钢、铝合金-钢分别形成两个熔钎焊接接头,避免了镁合金与铝合金直接焊接形成的大量脆性金属间化合物,从而使接头平均抗拉剪强度达到 180 MPa,显著提高了接头强度,结合较好的断后伸长率,能够有效满足结构件在实际中的应用需求。

参考文献

- [1] Larsson J K. Overview of joining technologies in the automotive industry [J]. *Welding Research Abroad*, 2003, 49(6): 29-45.
- [2] Mohammadi J, Behnamian Y, Mostafaei A, et al. Friction stir welding joint of dissimilar materials between AZ31B magnesium and 6061 aluminum alloys: Microstructure studies and mechanical characterizations [J]. *Materials Characterization*, 2015, 101: 189-207.
- [3] 雷祥,单际国,郑世卿. 焊接工艺对 6005A 铝合金激光-MIG 复合焊缝成形的影响 [J]. *焊接*, 2008(7): 25-32.
- [4] 帅朋,吴志生,赵菲,等. 镁/铝异种材料焊接研究现状 [J]. *焊接技术*, 2017, 46(2): 1-4.
- [5] 李慧. 镁铝异种金属激光焊接的研究 [D]. 北京: 北京工业大学硕士学位论文, 2007.
- [6] 魏强. 镁铝异种材料点焊研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学硕士学位论文, 2012.
- [7] 任大鑫. 镁合金及镁铝异种金属胶焊技术研究 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学博士学位论文, 2011.
- [8] 柳绪静,刘黎明,王恒,等. 镁铝异种金属激光-TIG 复合热源焊接性分析 [J]. *焊接学报*, 2005, 26(8): 40-43.
- [9] 王快社,王训宏,沈洋,等. MB3 镁合金与 1060 铝合金搅拌摩擦焊接研究 [J]. *热加工工艺*, 2005(9): 29-31.
- [10] Cao R, Wen B F, Chen J H, et al. Cold metal transfer joining of magnesium AZ31B-to-aluminum A6061-T6 [J]. *Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2013, 560: 256-266.
- [11] Cao R, Sun J H, Chen J H, et al. Weldability of CMT joining of AA6061T6 to boron steels with various coatings [J]. *Welding Journal*, 2014, 93: 193-204.

第一作者简介: 汪佐瑾,1992 年出生,硕士;主要从事高熵合金断裂机理及高熵合金焊接方面的研究。

通信作者简介: 曹睿,1977 年出生,博士,教授,博士研究生导师;主要从事材料的焊接性及材料的变形断裂行为的研究,已发表论文 100 余篇。

CMT mode, the metal transfer is mainly short circuiting. For hybrid modes of pulse + CMT and CMT + pulsed, the CMT waveform does not change, but the current and voltage of the pulse waveform are fluctuation. The variety of current and voltage and metal transfer are important to the change of arc length. In the front wire of pulse mode, the weld penetration and width are large, while in the rear wire of CMT mode, the reinforcement is high.

Key words: double-wire welding, pulse, CMT, droplet transfer, electrical signal waveform

Analysis of weldability of Mg-Al dissimilar metal cold metal transfer welding

Wang Zuojin, Wen Baofeng, Cao Rui, Chen Jianhong

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p17 – 20

Abstract An investigation of dissimilar metal joining between AZ31B Mg and 6061 Al by CMT (Cold Metal Transfer) welding was conducted. To achieve successful welding of Mg-Al dissimilar metals, hot-dip galvanized steelplate of HDG60 was selected as transition metal, AZ61 and 4043 welding wires were utilized in welding process of Mg-steel and Al-steel, respectively, and different welding parameters were used on each side. It is shown that the heat input is controlled effectively and the interface reaction layer is thin via CMT welding. The vacancy of brittle Al_3Mg_2 and $Mg_{17}Al_{12}$ intermetallic compounds during the direct welding of Mg to Al can be attributed to the appropriate selection of transition metal. The mechanical properties of the welded joint were optimized because $MgZn$, $FeAl_3$ and Fe_2Al_5 phases with smaller thickness are mainly formed on the welded joint interface. For example, the tensile strength is higher than 180 MPa and the elongation is good with regard to the CMT welded joint of Mg-Al dissimilar metals, which indicates that the Mg-Al dissimilar metal can be joined effectively by means of the transition metal.

Key words: dissimilar metal, welding, magnesium alloy, aluminum alloy, galvanized steel sheet

Effect of different surface treatment on 316L steel welds in the liquid lead-bismuth alloy

Ding Xiangbin¹, Luo Meng², Lu Guangyao¹, Lei Yucheng², Chen Shuai¹

(1. China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518124, Guangdong, China; 2. Jiangsu Province Key Laboratory of High-end Structural Materials, Jiangsu university, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China). p21 – 25

Abstract A high-speed flow liquid metal corrosion test device was designed and manufactured to study the corrosion behavior of 316L stainless steel welds with different grades of sandpaper and different polishing treatments in the flow liquid lead-bismuth alloy at 550 °C (relative flow rate of 2.62 m/s). The studies found that all the samples formed a double oxide layer structure, the inner layer is mainly loose Fe_3O_4 , and the outer layer is mainly dense $FeCr_2O_4$. The smaller the surface roughness, the slower the element mass transfer process. The smaller the abrasive effect of the high-speed liquid LBE, the better the corrosion resistance of the 316L steel weld.

Key words: 316L stainless steel, weld, liquid lead-bismuth alloy, surface treatment, corrosion

Selection of activating flux in halogen-free flux used for SAC105 solder

Lin Yusheng¹, Dai Zongbei², Liu Fengmei², Che Xin¹, Yi Jianglong²

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang 410083, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding), Guangzhou 510651, China). p26 – 30

Abstract Glycolic acid and phthalic acid were used as weak organic acid activators of halogen-free rosin-based flux that was utilized to solder low silver content SAC105 solder on Cu substrate. The influence of activators content and the corresponding proportional ratio of glycolic acid and phthalic acid on the solderability, spreading rate and electronic stability was studied. It is found that, the adequate solderability and spreading rate of SAC105/Cu can be achieved by using the designed flux with 4 wt. % of weak organic acids consisted of glycolic acid and phthalic acid with a proportional ratio of 1:1. In addition, by using aforesaid flux, very few residues are left with strong electronic stability via the evaluation of surface insulation resistance, which indicates the failure due to ionic migration under hygrothermal condition can be avoided. Therefore, glycolic acid and phthalic acid have the potential for commercial use in soldering flux.

Key words: Sn-1.0Ag-0.5Cu (SAC105), halogen-free rosin-based flux, glycolic acid, phthalic acid

Analyses of interfacial microstructures and mechanical properties of low-temperature bonded copper/graphite joints

Shao Qize¹, Wang Meirong^{2,3}, Hu Shengpeng^{2,3}, Chai Jianhang^{2,3}, Song Xiaoguo^{2,3}

(1. Shenzhen Gas Corporation Ltd., Shenzhen 518049, Guangdong, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Tech-