

基于 BC-MIG 焊的铝/钢异种金属增材制造工艺

苗玉刚¹, 曾 阳¹, 王 腾¹, 吴斌涛¹, 封小松²

(1. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 上海航天设备制造总厂, 上海 200245)

摘 要: 以 2 mm 厚 Q235 镀锌钢板为基板, 直径 1.2 mm 的 4043 铝合金焊丝为增材材料, 利用 BC-MIG 焊工艺进行增材试验, 得到了成形美观, 性能优良的 T 型材结构。采用金相显微镜、显微硬度计、万能拉伸试验机对接头的组织形貌、硬度分布、剪切性能进行研究, 获得了沉积层的组织和力学性能的变化规律。结果表明, 沉积层最底部靠铝一侧和靠钢一侧分别形成细长针状和带状 Fe/Al 化合物, 沉积层中部由向上生长的树枝晶组成, 而在沉积层顶部的组织没有定向生长的趋势。剪切试验表明, 铝/钢异种金属 T 型材最大可承受 2 108 N 的剪切力, 剪切角达到 13.5° 时, 受力一侧堆焊层根部发生断裂, 堆焊层上无明显裂纹。

关键词: 增材制造; 铝/钢异种金属; BC-MIG 焊; 微观组织

中图分类号: TG 402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)07-0005-04

0 序 言

作为一项集光、机、电、计算机、数控及新材料于一体的先进制造技术, 增材制造(3D 打印)技术已广泛应用于电子产品、汽车、航空航天、医疗、国防等领域^[1]。增材制造技术将三维复杂形状零件制造离散为简单的二维平面形状的逐层叠加, 为设计人员奇思妙想的实现提供了有效的途径, 该技术还可以大幅度缩短生产周期、降低制造成本、节省材料消耗和加工制造费用, 为制造业的变革提供了可能。目前增材制造主要用于制造单一材料的零件^[2], 如单一高分子材料和单一金属材料, 而关于制造复合材料、异质金属材料零部件的研究结果尚不多见。

针对激光、电子束等金属增材制造技术的效率低、成本高问题^[3], 提出一种低热输入高效电弧增材技术——旁路分流 MIG 焊(bypass-current MIG welding, BC-MIG)方法^[4,5]。试验证明, 该新技术不仅具有熔敷速度快、沉积效率高等, 还具有热输入低、成形精度高等优势, 既可实现同种材料的增材制造, 如钛、钢、铝、铜等, 又能够用异种金属结构的电弧增材, 如铝/钢、铝/钛等。

文中以 Q235 镀锌钢板为基板, 4043 铝合金焊丝为增材材料, 进行异种金属增材工艺试验, 利用金相显微镜、显微硬度计、万能拉伸试验机对增材制造的沉积层组织与力学性能进行研究。

1 试验方法

采用 2 mm 厚的 Q235 镀锌钢板为基板, 以直径 1.2 mm 的 4043 铝合金为增材焊丝, 材料的化学成分如表 1 所示。利用自制的 BC-MIG 焊接设备进行增材试验, 在 Q235 镀锌钢基板上逐层堆焊出铝合金 T 型材的腹板。图 1 为 BC-MIG 增材工艺机理, 在 MIG 焊枪一侧施加旁路焊枪进行分流, 这样焊接时流经 MIG 主弧的电流 I 被分成两部分, 由旁路流回焊接电源 I_p 与施加到母材上的电流 I_m 。这样既能充

表 1 Q235 钢和 4043 铝合金的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of Q235 and 4043

	Fe	Si	Mn	Zn	Cu	C	Al
Q235	余量	0.3	0.48	—	—	0.14~0.22	0.45
ER4043	≤0.8	4.5~6.0	0.05	0.1	0.3	—	余量

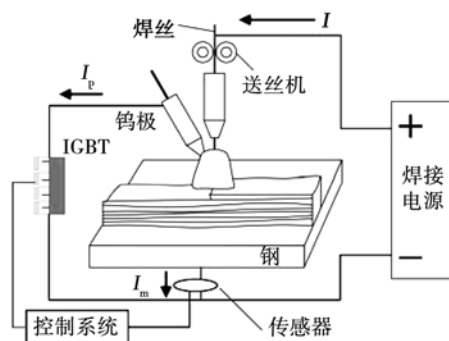


图 1 BC-MIG 增材制造工艺机理

Fig. 1 Schematic diagrams of BC-MIG process

收稿日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005049); 哈尔滨市高新技术产业专项资金资助项目(ZX2012ZC006015)

分熔化焊丝,也能控制母材的焊接热输入,使得每道焊缝都熔合良好,使增材质量得到保障。

试验优化后的工艺参数为:主路 MIG 电流为 74 A,电弧电压为 16.6 V,旁路 TIG 电流为 55 A,焊接速度为 0.78 m/min,钨极与焊丝间距为 5 mm,钨极与母材间距为 5 mm,MIG 焊枪喷嘴与母材间距为 12 mm,旁路 TIG 焊枪保护气体流量为 5 L/min,主路 MIG 焊枪保护气体流量为 15 L/min。

2 试验结果及分析

2.1 增材成形

图2为采用BC-MIG增材工艺制造的T型材结构,其腹板由6层铝合金堆焊而成,高度为8 mm,宽度为4.5 mm。可以看出,堆焊出的铝腹板表面光滑美观,呈银灰色金属光泽,增材制造的整体尺寸精度较高。



图2 增材制造的T型材结构

Fig. 2 T-section structure of additive manufacturing

图3为铝/钢T型材结构的横截面形貌。可以看出,堆焊的6层铝合金焊缝重叠较好,基本垂直于面板,层与层之间融合良好,在铝合金的边缘部分能看出不同堆焊层的轮廓,沉积层内有少许气孔。

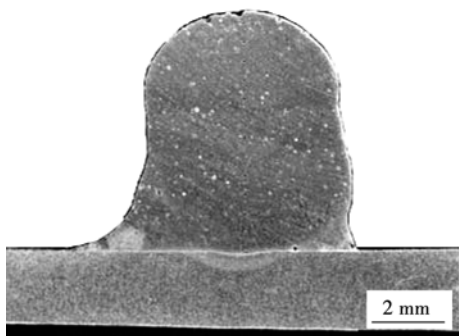


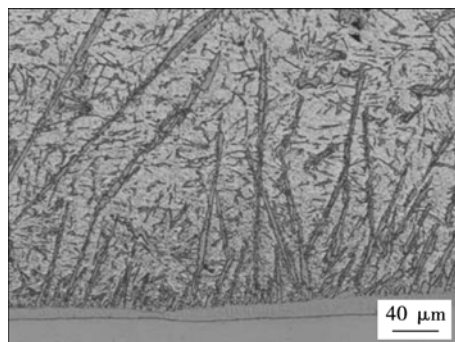
图3 铝/钢T型材结构的横截面形貌

Fig. 3 Cross-section of Al/steel T-section structure

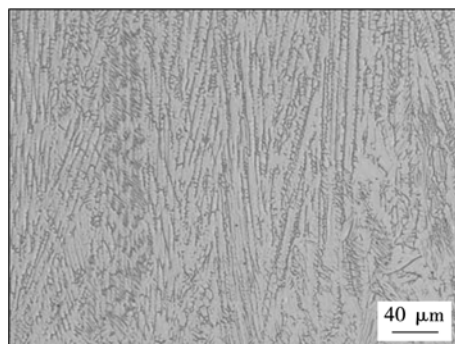
2.2 沉积层微观组织

图4为增材制造得到的铝/钢异种金属T型材结构的沉积层微观组织形貌。图4a为沉积层最底部微观组织,即铝/钢连接界面的微观组织。可以看出,界面层由靠近铝侧的针状组织和靠近钢侧的带

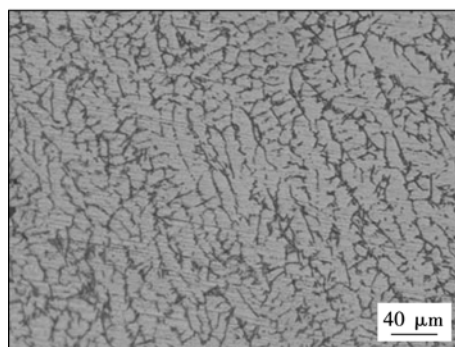
状组织构成。这是由于堆焊过程中Fe元素在铝合金中的扩散速度远大于Al元素在钢基体中的扩散速度^[6],即Fe元素更容易扩散到铝合金内,而Al元素不易扩散到钢基体内,容易在界面层出现Al元素富集,形成带状金属间化合物。由于锌的熔点和沸点都很低,在电弧作用下很容易挥发,所以界面层金属间化合物主要都是Fe/Al化合物组成^[6]。从堆焊层中部的微观组织(图4b)可以看出,该区域由向上生长的树枝晶结构组成,该区域为铝合金焊丝堆积而成。这种枝晶结构的主要成因是每一道焊缝的堆积电弧都会对该区域进行一次加热和冷却,导致树枝晶一直向上生长,最终布满整个沉积层的中部。最后一道堆焊层,由于没有受到电弧的重复加热作用,并未生成与中部相同的树枝晶,且顶部的冷却



(a) 沉积层最底部微观组织



(b) 沉积层中部微观组织



(c) 沉积层顶部微观组织

图4 T型材沉积层微观组织形貌

Fig. 4 Microstructure of T-section deposited layer

快,温度骤降对 Al 原子结晶影响很大,最终在顶部形成结晶方向相对杂乱的晶枝结构,见图 4c.

2.3 显微硬度分析

采用型号为 HVS-1000Z 的显微硬度计对铝/钢异种金属 T 型材试件进行显微硬度测试,测试区域为整个堆焊增材区域,每隔 0.5 mm 打一个点. 载荷为 1.96 N,保荷时间为 10 s. 试样的硬度测试结果如图 5 所示.

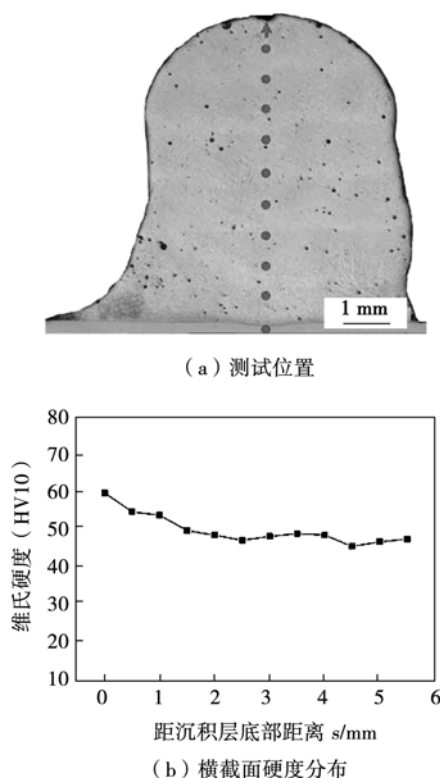


图 5 T 型材横截面显微硬度

Fig. 5 Micro-hardness of T-section structure

由图 5 可知,沉积层底部硬度较高,达到 60 HV10,这主要是由于靠近焊缝底部,Fe 元素含量较高,导致该区域的硬度较高. 沉积层中部的硬度在 48 HV10 左右,且波动较小,这是因为沉积层内组织均匀一致,且层与层之间熔合程度较好,这说明该增材制造工艺具有可行性.

2.4 力学性能

利用型号为 Zwick/Roell Z010 的电子万能材料试验机对增材制造的 T 型材试件进行剪切试验,采用非标准光滑试样,试验温度为 27 °C. 图 6 为 T 型材剪切试验示意图. 试验时将剪切试件竖直放置,用夹具固定翼板,剪切力竖直施加在腹板中部,剪切角 α 由剪切力施力行程和腹板尺寸求出,剪切力可直接读出. 图 7 为 T 型材剪切力—剪切角曲线.

从剪切力—剪切角曲线可知,铝/钢 T 型材试件

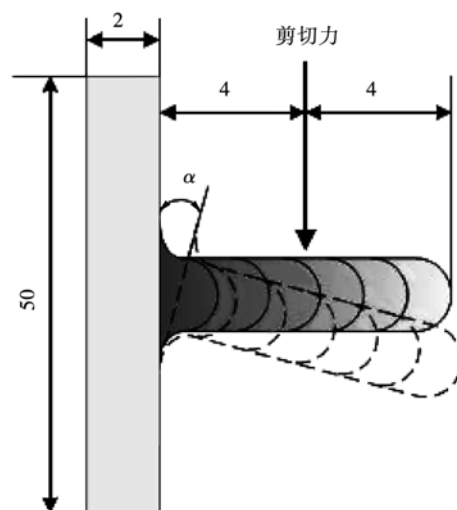


图 6 剪切试验尺寸 (mm)

Fig. 6 Schematic diagram of shear sample

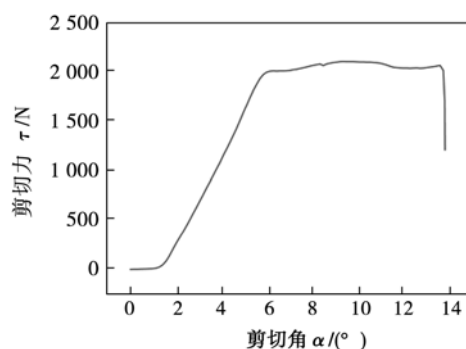


图 7 T 型材剪切力—剪切角曲线

Fig. 7 Stress-shearing angle curve of T-section structure

可承受的最大剪切力为 2 108 N,当剪切力小于 2 000 N 时,试件发生弹性变形,之后在 6°~13°的剪切角范围内发生塑性变化,此时该结构已经开始破坏,随着剪切力的增加,当剪切角达到 13.5°时,结构最终开裂. 图 8 为剪切试验前后的试件.

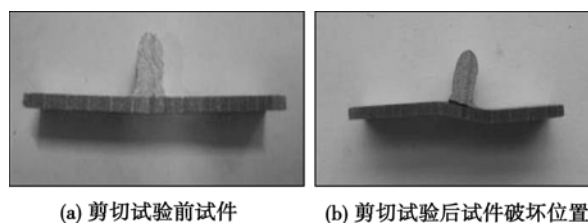


图 8 剪切前后的试件

Fig. 8 Shear specimen of T-section structure

从图 8 可以看出,试件在堆焊层根部发生断裂,断裂处几乎没有堆焊层留在 Q235 镀锌钢母材表面,在整个堆焊层侧面没有发现明显的裂痕,说明整个

堆焊层的剪切力大于铝合金焊缝与镀锌钢板的剪切力.

3 结 论

(1) 以 Q235 钢为基板, 4043 铝合金焊丝为增材材料, 利用 BC-MIG 电弧增材制造工艺, 得到了成形美观、性能优良的铝/钢异种金属 T 型材结构.

(2) 电弧增材制造的铝/异种金属 T 型材的沉积层熔合性好、组织均匀. 沉积层内显微硬度波动不大, 但在沉积层底部由于 Fe, Al 元素的扩散使其硬度偏大, 达到 60 HV10, 其它部位硬度约为 48 HV10.

(3) 增材制造的铝/钢异种金属 T 型材可承受的最大剪切力为 2 108 N, 试件先发生弹性形变, 随着剪切力的继续增加, 当剪切角达到 13.5° 时, 在结构受力侧的堆焊层根部发生断裂, 增材制造的腹板上未发现明显的裂纹.

参考文献:

- [1] Vilario T, Colin C, Bartout J D, *et al.* Microstructural and mechanical approaches of the selective laser melting process applied to a nickel-base superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 534(2): 446–451.
- [2] Bartkowiak K, Ullrich S, Frick T, *et al.* New developments of laser processing aluminium alloys via additive manufacturing technique[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(1): 393–401.
- [3] Buchbinder D, Schleifenbaum H, Heidrich S, *et al.* High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts original research article[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(1): 271–278.
- [4] 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 Binta, Han Duanfeng, *et al.* Characteristics of joint and interface layer during bypass-current MIG welding-brazing of aluminum and steel dissimilar metals[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(9): 6–10.
- [5] Miao Y G, Xu X F, Wu B T, *et al.* Effects of bypass current on the stability of weld pool during double sided arc welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(8): 1590–1596.
- [6] 石 圩, 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.

作者简介: 苗玉刚, 男, 1978 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师. 主要从事船舶与海洋工程结构的高效焊接工艺开发与数值模拟方面的教学和科研工作. 发表论文 30 余篇. Email: miaoyg@hrbeu.edu.cn