

铝/钛异种金属冷金属过渡熔钎焊接头分析

孙军浩, 曹 睿, 陈剑虹

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

摘 要: 以 ER4043 的铝焊丝对 6061 铝合金和 TA2 纯钛进行 CMT 熔钎焊, 采用金相显微镜、扫描电镜 (SEM) 和能谱分析仪 (EDS) 分析了焊接接头的微观组织特征, 并通过拉伸试验对接头进行了力学性能的评定。结果表明, 焊接接头具有熔焊和钎焊双重性质: 铝母材局部熔化, 与熔化的焊丝金属混合后凝固形成焊缝; 而没有熔化的钛母材通过 Ti 原子的扩散与焊缝金属形成金属间化合物结合层的钎焊界面。钎焊界面处反应层可分为靠近钛板一侧的连续层 Ti_3Al 和向焊缝内部生长的锯齿状的反应层 $TiAl_3$ 。当钛板坡口角度为 30° 时, 钎焊界面化合物生长均匀良好, 接头会断裂在铝母材的热影响区, 最高抗拉强度达到 197.5 MPa。

关键词: 铝/钛异种金属; 冷金属过渡熔钎焊; 金属间化合物; 接头强度

中图分类号: TG 457.19 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)03-0051-04

0 序 言

Ti/Al 异种金属材料的复合构件在航空航天和汽车工业中应用广泛。然而采用熔焊时两种金属液相混合会生成大量的脆硬金属间化合物, 严重降低接头的性能^[1]。所以钎焊^[2]、扩散焊^[3]及摩擦焊^[4]等连接方法被应用于钛/铝两者间的连接, 金属间化合物的生长受到抑制从而使接头的性能得到提升。根据这两种金属熔点差异较大, Ni 等人^[5]利用激光实现了铝/钛异种金属的熔钎焊连接, 接头的抗拉强度可高达 290 MPa。

冷金属过渡 (cold metal transfer, CMT) 技术作为一种新型的异种金属焊接方法, 在异种金属连接中具有较大的优势^[6]。文中以 ER4043 焊丝为填充材料, 用 CMT 焊接方法对 6061 铝合金及 TA2 纯钛进行熔钎焊对接连接, 分析了熔钎焊接头的宏观及微观组织特征, 并采用拉伸试验对接头的力学性能进行了评定。

1 试验方法

试验过程中选用 Al 6061-T6 变形铝合金和 TA2 纯钛板材, 尺寸均为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 用铣床将铝板加工 30° 的坡口, 钛板加工 30° 和 60° 两种坡口形式。填充金属是直径为 1.2 mm 的 ER4043

(5% Si 的铝焊丝) 焊丝, 焊接设备为 Fronius 公司生产的 TPS3200 系列数字化 CMT 焊机。

将表面氧化膜和油污清除干净的板材组合成对接接头, 如图 1 所示。焊接过程中焊炬与工件表面夹角为 45° , 焊接速度为 7 mm/s, 弧长修正为 0, 并采用气体流量为 15 L/min 的 100% 氩气保护。CMT 采用一元化的焊接程序 (焊接电压和电流随送丝速度的改变而变化), 送丝速度分别选用 5.5、5.7 和 6.0 m/min, 每种送丝速度下分别对铝合金与两种不同坡口角度的 TA2 纯钛进行焊接。

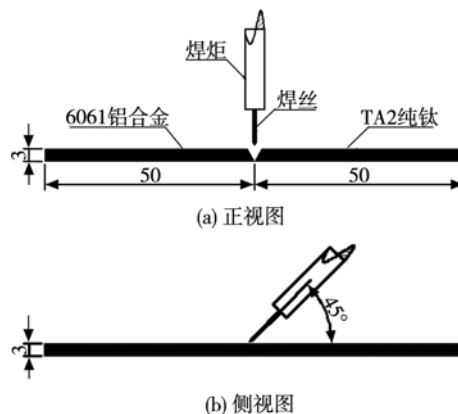


图 1 焊接装置示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of welding device

焊接后切取焊接接头的横截面, 经打磨、抛光和腐蚀后, 用金相显微镜、扫描电镜 (SEM) 及能谱分析仪 (EDS) 对钎焊界面及焊缝的微观组织进行观察分析, 并用电子万能材料试验机测试接头的抗拉强度。

2 试验结果和讨论

2.1 熔钎焊接头宏观结构特征

试验中将铝合金板材分别与坡口角度为 30°和 60°两种形式的钛板进行 CMT 焊接,所得到的接头横截面如图 2 所示. 在电弧作用下,低熔点的铝合金(熔点为 607 ~ 650 ℃)局部熔化,然后与熔化的填充金属混合后凝固形成焊缝,并且从接头的横截面可以看出明显的熔合区. 纯钛 TA2 的熔点(1 670 ℃)较高,焊接过程中没有发生熔化,而是与熔融的焊缝金属相互作用形成钎焊界面. 因而所得到的焊接接头具有熔焊和钎焊双重性质.

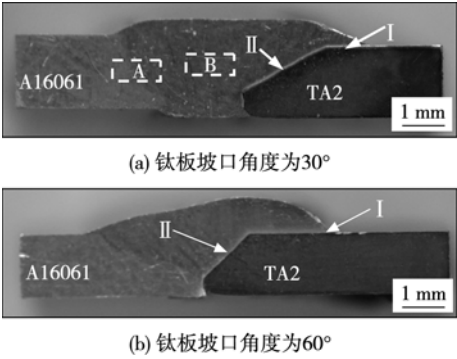


图 2 焊接速度 5.7 m/min 时焊接接头截面特征
Fig. 2 Cross sections of welded joint with wire feeder speed of 5.7 m/min

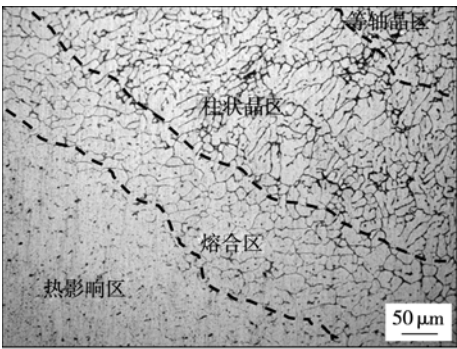
2.2 焊接接头的显微组织

2.2.1 熔焊区接头的显微组织

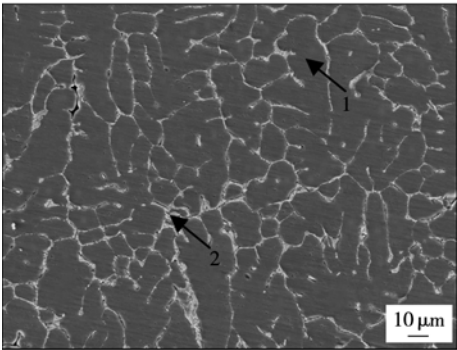
CMT 焊接过程中,局部熔化的铝母材与熔化的焊丝金属混合后凝固成焊缝金属,图 3a 所示为接头熔合区部位 A 的放大图,图 3b 为接头焊缝中心部位 B 的放大图. 从图 3b 可以看出,焊缝中心由于熔液温差较小,凝固后形成细小的 α -Al 等轴晶组织(点 1)及分布在 α -Al 晶界处的网状 Al-Si 共晶组织(点 2). 而从图 3a 看出,从铝母材到焊缝中心分为四个不同区域:热影响区、熔合区、柱状晶区和等轴晶区. 其中熔合区是由于紧邻焊缝的铝母材受到焊缝金属传热而晶粒发生局部熔化形成. 在靠近熔合线一侧的焊缝金属中,由于在与熔合区垂直方向上热传导速度最大,使得近熔合区的焊缝金属垂直于熔合线生长为柱状晶组织. 图 3b 中点 1 和点 2 的成分见表 1 所示.

2.2.2 钎焊界面的微观组织

图 4 所示为钛母材与焊缝金属的钎焊界面反应层. 根据 Ti-Al 二元合金相图^[7],在 Ti-Al 互扩散的



(a) 图2中熔合区A放大



(b) 图2中焊缝金属区域B放大

图 3 熔焊区接头的微观组织
Fig. 3 Microstructure of fusion weld joint

表 1 图 3 中 EDS 点成分分析(摩尔分数,%)
Table 1 EDS results of zone 1 and 2 in Fig. 3

测试点	Al	Si
1	100	0
2	76.40	23.60

过程中可以形成很多的金属间化合物,例如 Ti_3Al , TiAl , TiAl_2 , Ti_2Al_3 和 TiAl_3 等. Ti-Al 在低温下反应时,钛母材微熔或者不熔,Ti 原子扩散到液态的铝金属中,并在钛母材表面首先形成 TiAl_3 金属间化合物,在随后的保温过程中,靠近钛母材一侧的 TiAl_3 金属间化合物继续与 Ti 原子作用,从而有可能形成 Ti_3Al 或者 TiAl 金属间化合物^[8]. 由图 4 可以看出,钎焊界面上的金属间化合物主要分为两层,即靠近钛板一侧的颜色亮的连续层以及向焊缝内部生长的颜色暗的锯齿状的化合物. 根据表 2 钎焊界面处成分分析,颜色亮连续层的主要成分为含一定 Si 元素的 Ti_3Al (点 1),而颜色暗的锯齿状的化合物主要成分为含一定 Si 元素 TiAl_3 (点 2). 由于 TiAl_3 是一种有序结构,因而在其生长过程中存在着择优生长的取向,结晶过程中一般形成条状或棒状的 TiAl_3 金属间化合物^[5]. CMT 焊接过程中,在电弧的剧烈搅动下,脆硬的棒状 TiAl_3 金属间化合物就会断裂并进入焊缝金属内部,因而钎焊界面附近会发现一些随机

分布的棒状的 TiAl_3 金属间化合物(点3)。此外钎焊界面附近还分布着一些 Al-Si 共晶组织(点4)。

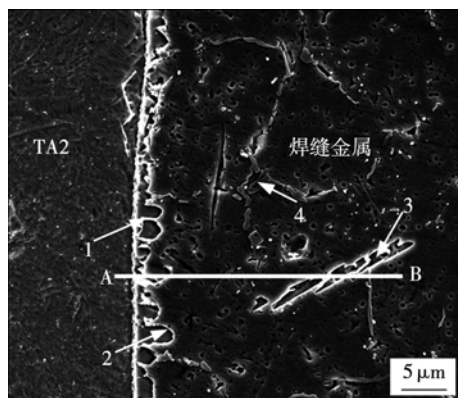


图4 钎焊界面的微观组织

Fig. 4 Microstructure of brazing interface

表2 图4中EDS点成分分析(摩尔分数,%)

Table 2 EDS results of zone 1-4 in Fig. 4

测试点	Al	Ti	Si	可能的生成相
1	21.04	75.08	3.88	Ti_3Al
2	65.40	23.90	10.70	TiAl_3
3	80.50	13.00	6.50	TiAl_3
4	67.94	0	32.06	Al-Si 共晶物

为进一步分析钎焊界面处的原子分布情况,对钎焊界面沿着线 AB 做了线能谱分析,结果如图5所示。可以看出,界面处及焊缝金属中棒状的金属间化合物处,Al 及 Ti 元素按一定比例呈台阶分布,这从侧面说明反应层为金属间化合物。随着远离钎焊界面,Ti 原子含量逐渐下降,而 Al 原子含量则逐渐增加。反应界面及棒状化合物处 Si 元素发生了偏聚富集,Ti/Al 激光熔钎焊^[9]也发现同样现象。分析认为界面反应过程中 Si 元素之所以发生了这种“上坡扩散”,是由于 Ti 和 Si 元素之间的亲和能力较大,Ti 元素可以降低 Si 元素在液态中的化学势,而在界面附近出现钛母材向液态钎料溶解,致使界面附近的液态钎料中含有 Ti 元素,因而液态钎料中的 Si 原子在凝固的过程中不断向含有钛溶质的界面附近聚集,造成了 Si 元素在界面的偏聚。

对于铝合金与坡口角度不同的 TA2 焊接时,在同样的送丝速度下,所得到的钎焊界面处金属间化合物的厚度不一样。图6为两种接头(图2)的部位 I 和 II 处的界面反应层。可以看出当钛板坡口角度为 30° 时,由于坡口角度较缓,电弧对整个反应界面辐射均匀,金属间化合物呈锯齿状向焊缝金属生长,厚度为 $2 \sim 6 \mu\text{m}$ 。坡口角度为 60° 时,反应界面受热不

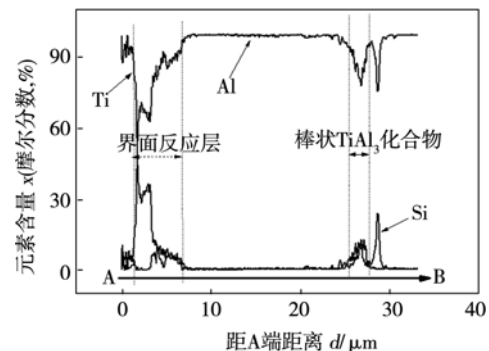


图5 钎焊界面能谱线扫描分析

Fig. 5 EDS line scanning at brazing interface

均匀,因而界面结合不均匀。其中部位 I 金属间化合物呈锯齿状向焊缝金属生长,厚度为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$;而钎焊界面下部(部位 II)结合较差,化合物厚度为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$,从图 2b 看出,钎焊面下部甚至出现未熔合,说明此部位是整个结合面的危险点,接头破坏时可能是裂纹的起裂源。

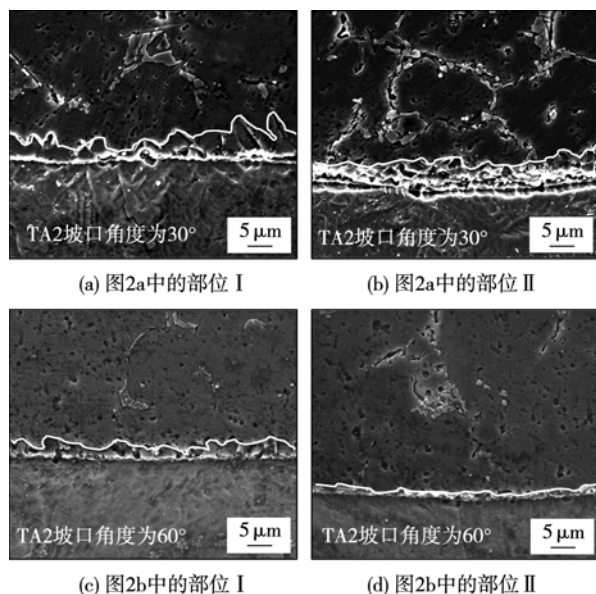


图6 不同接头钎焊界面的不同部位处显微组织

Fig. 6 Microstructure of brazing interface at different zones of various welding joints

2.3 焊接接头的力学性能

对于铝/钛异种合金 CMT 熔钎焊接头进行系列拉伸试验,获得的接头强度如图7所示。可以看出,接头的断裂方式主要有两种:一种断裂在铝母材的热影响区,另外一种断裂在钎焊界面——焊缝金属中。当钛板坡口为 30° 时,由于钎焊界面结合均匀,且厚度为 $2 \sim 6 \mu\text{m}$,因而接头性能良好,送丝速度为 $5.7 \sim 6.0 \text{ m/min}$ 时,断裂位置在铝母材的热影响区。而当钛板坡口为 60° 时,钎焊界面结合不均

匀,尤其是焊缝下部(部位 II)结合较差,所以裂纹会从钎焊界面下部开始扩展.当裂纹扩展到一定长度,一方面由于钎焊界面上部(部位 I)结合较好,另一方面拉伸载荷作用下接头出现应力集中,使得最终裂纹沿着焊缝金属断裂.由此可见,坡口形式不同,钎焊界面处金属间化合物的形态及厚度不同.钛板坡口为 30° 时的焊接接头性能优于钛板坡口为 60° 时的焊接接头,最高抗拉强度为 197.5 MPa.

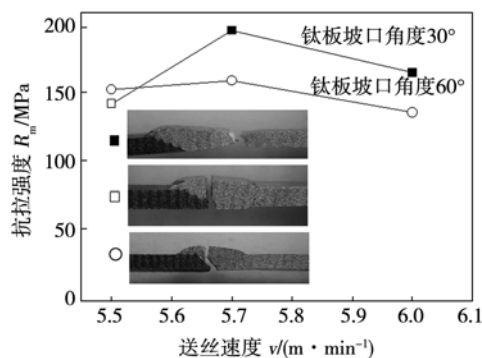


图 7 接头的抗拉强度

Fig. 7 Tensile strength of different joints

3 结 论

(1) 铝/钛 CMT 焊接接头具有熔焊和钎焊双重性质:铝母材局部熔化,与熔化的焊丝金属混合后凝固形成焊缝;而钛母材则没有熔化,通过 Ti 原子扩散与熔融的焊缝金属作用后形成金属间化合物结合层.

(2) 熔焊接头从铝母材到焊缝中心组织分为热影响区、熔合区、柱状晶区及等轴晶区,焊缝金属基体为 α -Al,晶界处组织为 Al-Si 共晶物.钎焊界面处组织可分为两层,即靠近钛板一侧的颜色亮的含一定 Si 元素的 Ti_3Al 连续层和向焊缝内部生长的颜色暗的锯齿状的含一定 Si 元素 $TiAl_3$ 反应层.

(3) 当钛板坡口为 30° 时,钎焊界面化合物生长均匀良好,接头会断裂到铝母材的热影响区,抗拉强度达到 197.5 MPa;而当钛板坡口为 60° 时,钎焊界面下部结合较差,接头断裂在钎焊界面——焊缝金

属中,接头抗拉强度低.

参考文献:

- [1] Jiang S Y, Li S C. Formation mechanism and growth law of diffusion solution zone [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(6): 983–986.
- [2] Takemoto T, Okamoto I. Intermetallic compounds formed during brazing of titanium with aluminum filler metals [J]. Journal of Material Science, 1998, 23(4): 1301–1308.
- [3] 姚 为, 吴爱萍, 邹贵生, 等. LF6/TA2 扩散焊接接头组织结构及性能 [J]. 焊接学报, 2007, 28(12): 89–96.
Yao Wei, Wu Aiping, Zou Guisheng, et al. Structure and performance of LF6/TA2 diffusion bonded joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(12): 89–96.
- [4] 白建红, 傅 莉, 杜随更, 等. 钛合金/纯铝异种金属摩擦焊接工艺 [J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 228–232.
Bai Jianhong, Fu Li, Du Suigeng, et al. Friction welding technology between titanium alloy and pure aluminum [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(11): 228–232.
- [5] Ni J M, Li L Q, Chen Y B, et al. Characteristics of laser welding-brazing joint of Al/Ti dissimilar alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(4): 617–622.
- [6] 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 weldind brazed joint between aluminium and galvanized steel sheet [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(12): 61–64.
- [7] Ohnuma I, Fujita Y, Mitsui H, et al. Phase equilibria in the Ti – Al binary system [J]. Acta Materialia, 2000, 48(12): 3113–3123.
- [8] Yang W Y, Weatherly G C. A study of combustion synthesis of Ti-Al intermetallic compounds [J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(14): 3707–3713.
- [9] Chen S H, Li L Q, Chen Y B, et al. Si diffusion behavior during laser welding-brazing of Al alloy and Ti alloy with Al-12Si filler wire [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 64–70.

作者简介: 孙军浩,男,1987 年出生,硕士研究生.主要从事异种金属的焊接性研究.发表论文 2 篇. Email: 1392672372@qq.com

通讯作者: 曹 睿,女,博士,博士研究生导师. Email: caorui@lut.cn