

铝/钛异种金属旁路分流 MIG 电弧熔钎焊特性

苗玉刚¹, 王 腾¹, 周 玥², 韩端锋¹

(1. 哈尔滨工程大学 水下机器人技术重点实验室, 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要:以 1 mm 厚 6061 铝合金与 TC4 钛合金板为试验材料,进行旁路分流 MIG 电弧熔钎焊工艺试验,得到均匀美观的焊缝成形. 分别采用金相显微镜、扫描电镜、万能拉伸试验机进行研究. 结果表明,界面层上方金属间化合物以柱状晶形式存在,呈现短而密集的状态. 界面层靠近钛侧易形成 AlTi,而界面层靠近铝侧易形成 Al₃Ti, TiSi₂ 等金属间化合物,由于焊接过程中熔池内部温度的变化不均,会使界面层中出现 Al₁₁Ti₅ 过渡相. 拉伸试验表明,接头最高抗剪强度达 182.6 MPa,约为铝母材的 97.6%,断裂发生在铝母材热影响区,断口出现一定量的颈缩.

关键词:旁路分流 MIG 电弧熔钎焊; 异种金属; 接头特性; 力学性能

中图分类号: TG 402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)01-0047-04

0 序 言

异种金属的复合连接使结构具有低价、轻质、高性能等特点^[1]. 铝/钛复合结构因其优越的性能被广泛应用于航天航空工业^[2]. 然而由于铝、钛之间的物理性能的巨大差异,铝钛连接仍面临很大挑战. 这是因为在铝/钛连接中极易产生大量脆性金属间化合物,降低接头的力学性能. 尽管激光电弧复合焊^[3]、电弧熔钎焊^[4]、搅拌摩擦焊^[5]等技术可实现铝与钛的有效连接,但这些方法需要采用真空环境或关键设备使焊接成本增高.

由于具有热输入低、电弧和熔滴过渡稳定性好、焊接成本低等特点,旁路分流 MIG 电弧熔钎焊^[6,7]可用于铝/钛等熔点相差较大的异种金属材料的连接. 该工艺利用旁路电弧与 MIG 主弧形成耦合电弧并产生分流作用,从而改变作用于熔滴和熔池上的力场分布和热输入,在保证焊接成形的同时,可避免焊缝缺陷的产生. 采用该方法对 6061 铝合金与 TC4 钛合金板进行了焊接试验,利用金相显微镜、电镜扫描及能谱分析、拉伸试验机对接头组织和力学性能

进行研究,分析了铝/钛旁路分流 MIG 电弧熔钎焊接头形貌界面组织特性. 研究结果将为深刻理解铝/钢异种金属旁路分流 MIG 电弧熔钎焊过程提供基础理论数据,并为该项技术的工程应用提供技术依据.

1 试验方法

利用 1 mm 厚 6061 铝合金与 TC4 钛合金板为试验材料,其化学成分如表 1 和表 2 所示. 焊接时采用直径为 1.2 mm 的 4043 铝合金焊丝作为填充材料,其化学成分如表 3 所示.

表 1 6061 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 6061 aluminium alloy

Mg	Si	Mn	Cu	Zn	Ti	Fe	Al
0.80~1.20	0.40~0.80	0.15	0.15~0.40	0.25	0.15	0.70	余量

表 2 TC4 钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of TC4 titanium alloy

Fe	Si	N	C	O	H	V	Al
≤0.30	0.15	≤0.05	≤0.10	≤0.20	≤0.15	3.50~4.50	5.50~6.80

表 3 4043 铝合金焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical compositions of filler wire

Mg	Si	Mn	Cu	Zn	Ti	Fe	Al
0.80~6.80	≤0.40	0.50~0.80	≤0.10	≤0.20	0.02~0.10	0~0.04	余量

收稿日期: 2014-10-09

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)

利用自制的旁路分流 MIG 电弧焊设备进行焊接试验,其工艺示意图见图 1. 焊接时在 MIG 焊枪

一侧施加钨极氩弧焊枪进行分流,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 ,同时利用绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT) 系统控制

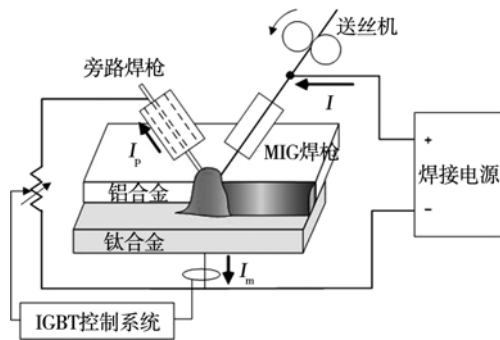


图 1 旁路分流 MIG 电弧熔钎焊工艺示意图
Fig. 1 Schematic diagrams of BC-MIG process

调节旁路电流 I_p ,以此调节母材电流 I_m ,使得作用于熔池和熔滴上的热、力处于理想水平.

试验将在主路 MIG 焊电流较小的情况下,实现铝/钛的焊接成形. 试验采用惰性气体氩气(纯度为 99%)对熔池进行保护. 另外旁路钨极的存在产生美观稳定的耦合电弧形态,减小电弧压力与母材热输入,增大熔化焊丝的电流,在保证稳定溶滴过渡的同时,实现了良好的焊缝成形. 试验焊接参数如表 4 所示.

2 试验结果及分析

2.1 焊缝成形与接头形貌

图 2 是铝/钛旁路分流 MIG 电弧熔钎焊的焊缝成形. 可以看出,该工艺可获得表面成形光滑、均匀美观的焊缝. 试验采用铝母材位于钛母材之上的搭

表 4 试验焊接参数

Table 4 Parameters used for study

主路电流 I/A	MIG 焊氩气流量 $q_1/(L \cdot \min^{-1})$	旁路电流 I_2/A	旁路氩气流量 $q_2/(L \cdot \min^{-1})$	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	钨极母材间距 h_1/mm	MIG 焊枪母材间距 h_2/mm	钨极焊丝间距 h_3/mm
56	15	40	5	15.4	13.1	3.5	11	3

接方式,可使得电弧离铝母材更近,电弧中心位于铝母材与钛母材中间,使得电弧热量先作用于铝母材上,然后作用于钛母材上,同时由于铝/钛之间较大差异的熔点,可保证在微量 Ti 元素熔化的同时,合理增加铝母材的熔化,对浸润焊缝和钎焊层的形成产生有益效果. 另一方面,采用旁路分流技术,旁路电弧的存在不仅可分流一部分流经母材的焊接电流,还可使 MIG 主电弧变得更加稳定,并且明显减少焊接飞溅. 与此同时,旁路与主路形成的耦合电弧在熔化焊丝的同时可对钛板进行预热,使得熔融的液态钎料在钛母材上的润湿铺展更加均匀,焊缝成形更为美观.

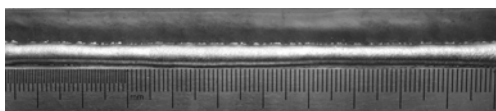
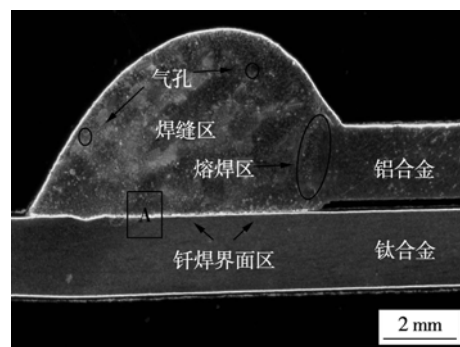


图 2 接头外观形貌

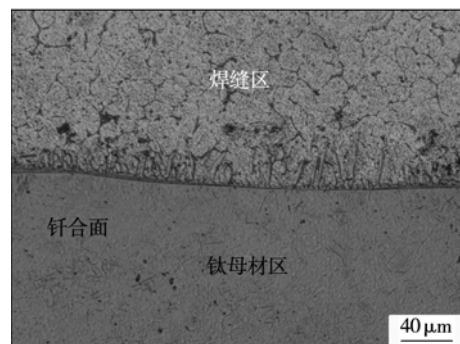
Fig. 2 Seam appearance of Al/Ti joint by BC-MIG

图 3 为铝/钛旁路分流 MIG 电弧熔钎焊的接头形貌. 由图 3a 可知,在适当热输入条件下,焊缝附近的铝合金母材局部熔化,与液态填充钎料金属混合凝固后成形,在搭接接头上部形成熔焊区;接头下

侧的钛合金由于高熔点的缘故而未发生熔化,而液态铝合金钎料在钛合金表面润湿、铺展,通过元素间



(a) 宏观形貌



(b) 微观形貌

图 3 接头组织

Fig. 3 Cross-section of Al/Ti joint

相互溶解扩散作用形成钎焊连接,整个接头呈典型的熔焊—钎焊的接头形貌. 图 3b 为钎焊界面层的微观形貌(A 区域). 由图 3b 可知,界面层上部靠近铝侧金属间化合物以柱状晶的形式存在,针状物柱状晶呈现短而密集的状态. 在焊缝区,界面元素熔融凝固后形成共晶网状组织,部分网状晶组织较为粗大,并有一定的过烧情况.

2.2 界面物相分析

图 4 为铝钛接头界面组织微观形貌及线扫描. 由图 4a 可知界面层厚约为 3 μm ,Ti,Al 元素在界面层中渐变过程十分明显,Si 元素在界面层偏铝一侧出现富集现象,Mg,V 元素在焊缝区至母材区变化不明显,这是由于含量较少的缘故,见图 4b. 分析发现,由于焊接热输入带来的热循环,Ti,Al 及其合金元素通过相互溶解扩散在界面层区域形成合金相,合金相的生成与焊缝区域的温度分布及其热导率息息相关. 另外由于 Ti 元素与 Si 元素间具有较强的亲和力,导致 Si 元素在界面层中富集. 对界面元素含量测量,根据二元合金相图分析发现,在界面区靠近钛侧,易形成 AlTi,而界面层靠近铝侧易形成 Al_3Ti , TiSi_2 等金属间化合物. 在焊接过程中,随界面层温度的变化,还会出现 $\text{Al}_{11}\text{Ti}_5$ 过渡相. 另外由于钛合金母材中的 V 元素随着钛母材微量的熔化

扩散到熔池内部,在界面层也将与 Al 元素结合生成了 Al_{23}V_4 金属间化合物.

对界面层进行 XRD 分析以进一步确认界面金属间化合物,分析结果如图 5 所示. 在界面位置含有 Al_3Ti , TiSi_2 及 TiAl 等金属间化合物,还含有 Ti,Al,Si 等元素金属相,同时相关峰值显示有 $\text{Al}_{11}\text{Ti}_5$ 金属相的产生.

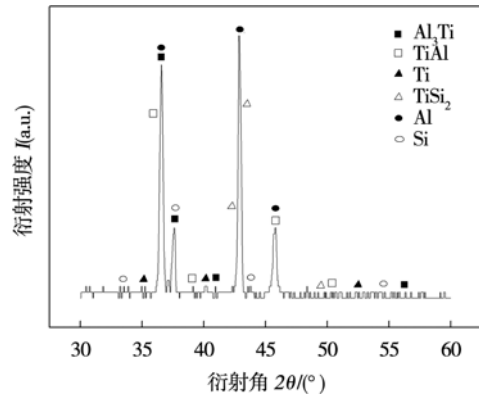
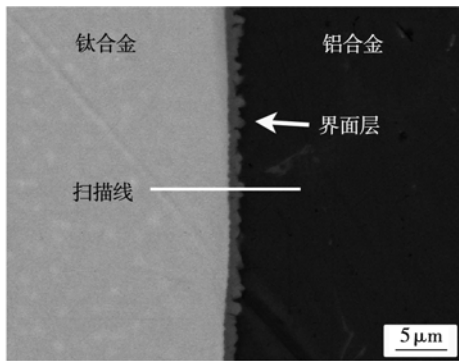


图 5 接头界面层 XRD 谱

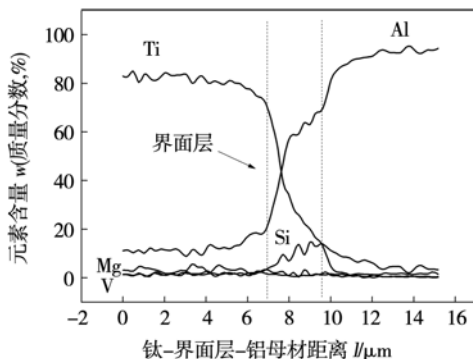
Fig. 5 XRD pattern of interface layer

2.3 力学性能

利用型号为 Zwick/Roell Z10 的电子万能材料拉伸试验机进行铝/钛异种金属熔钎焊接头拉伸试验,拉伸速度为 2 mm/min,拉伸试样采用非标准光滑试样,数据点为每秒 10 个,温度为室温. 图 6 为接头试样拉伸试验结果,由图 6 可知,所有焊接接头平均抗剪强度达 180.8 MPa,约为母材的 96.6%,接头最大抗剪强度可达 182.6 MPa,约为铝母材强度 (187.1 MPa) 的 97.6%. 图 7 为铝/钛接头的拉伸位移—应力曲线. 图 8 为拉伸试样的断裂位置. 由图 8 可知拉伸试样的断裂位置发生在铝母材热影响区区域,拉伸断面平整光滑. 从图 7 和图 8 还可以看出,断裂前接头试样有一定的拉伸位移,且在断裂



(a) 微观界面



(b) 元素分布

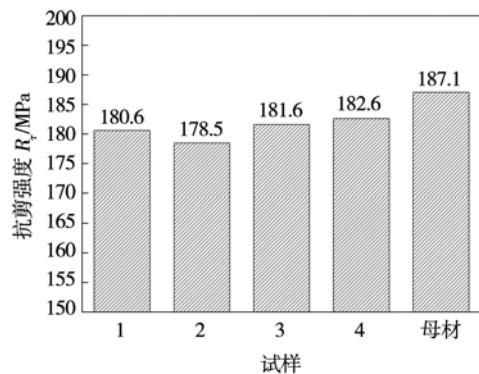


图 6 铝/钛接头拉伸试样抗剪强度

Fig. 6 Strength of different specimen joints

图 4 接头界面层微观形貌及线扫描

Fig. 4 Morphology and EDS of interface layer

前拉伸试样发生了一定的颈缩,这说明旁路分流 MIG 电弧钎焊接头具有良好的塑性和较高的抗剪强度^[7].

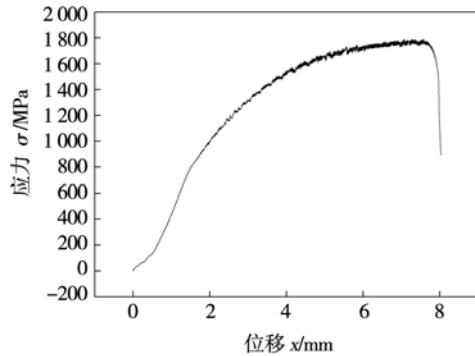


图7 铝/钛接头的拉伸位移—应力曲线

Fig. 7 Relation between tensile displacement and strength of Al/Ti joint

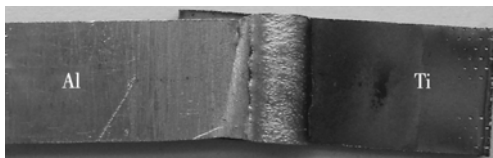


图8 拉伸试样的断裂位置

Fig. 8 Fracture location of tensile test

3 结 论

(1) 采用旁路分流 MIG 电弧熔钎焊的方法可获得高质量铝/钛搭接接头的成形,为铝/钛高质量焊接提供新的参考。

(2) 接头形貌为典型的熔钎焊接头形貌,钎焊界面层上方金属间化合物以柱状晶形式存在,呈现短而密集的状态。界面层靠近钛侧易形成 AlTi,而界面层靠近铝侧易形成 Al_3Ti , $TiSi_2$ 等金属间化合物,另外界面层中也出现 $Al_{11}Ti_5$ 过渡相。

(3) 铝/钛旁路分流 MIG 电弧熔钎焊接头的最大抗剪强度可达 182.6 MPa,约为铝母材抗剪强度

(187.1 MPa) 的 97.6%。接头断裂发生在铝母材热影响区,断口有一定的颈缩发生。

参考文献:

- [1] Rendigs K H. Aluminium structures used in aerospace status and prospects[J]. Materials Science Forum, 1997, 242: 11-24.
- [2] Faller K, Froes F H. The use of titanium in family auto-mobiles: current trends[J]. JOM, 2001, 53(4): 8-27.
- [3] 兰天,董鹏,肖荣诗. 铝/钛异种合金激光深熔钎焊试验分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 109-112.
Lan Tian, Dong Peng, Xiao Rongshi. Analysis of laser deep penetration brazing of aluminum and titanium alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 109-112.
- [4] 吕世雄,崔庆龙,黄永宪,等. Ti/Al 异种合金电弧熔钎焊接头界面断裂行为分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 33-37.
Lü Shixiong, Cui Qinglong, Huang Yongxian, et al. Analysis of interface fracture behavior of arc fusion-brazed joint between titanium and aluminum dissimilar alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6): 33-37.
- [5] Chen Y C, Nakata K. Microstructural characterization and mechanical properties in friction stir welding of aluminum and titanium dissimilar alloys[J]. Materials & Design, 2009, 30: 469-474.
- [6] 苗玉刚,吴斌涛,韩端峰,等. 旁路分流 MIG 电弧熔钎焊接镁/钢异种金属接头特性[J]. 焊接学报, 2014, 35(1): 25-28.
Miao Yugang, Wu Bintao, Han Duanfeng, et al. Joint characteristics of magnesium/steel dissimilar metals during bypass-current MIG welding-brazing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(1): 25-28.
- [7] 石珩,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焊接工艺及数值模拟方面的教学和科研工作。发表论文 20 余篇。Email: miaoyg@hrbeu.edu.cn