

# Ti-Al-Si 对 SiCp/Al 基复合材料等离子弧焊焊缝的组织与性能的影响\*

雷玉成 张振 聂加俊 陈希章

(江苏大学材料科学与工程学院 镇江 212013)

**摘要** 以 Ti-Al-Si 合金作为合金化填充材料,用氩氮混合等离子气体对 SiCp/Al 基复合材料进行等离子弧原位焊接,研究了 Ti-Al-Si 对焊缝的组织性能的影响.结果表明:添加 Ti-75Al-5Si 合金时,熔池中 Si 和 Ti 的联合作用有效抑制了针状脆性相  $Al_4C_3$  的生成,形成了稳定的熔池,得到了以 TiN、AlN、TiC 和  $Ti_5Si_3$  等为二次增强相的焊缝.焊缝的组织致密,结合良好,其最大拉伸强度为 225 MPa.

**关键词** 复合材料, SiCp/Al 基, 等离子弧, 原位焊接, Ti-Al-Si 合金

**分类号** TG456, TG407

**文章编号** 1005-3093(2008)04-0420-05

## Influence of Ti-Al-Si on microstructures and mechanical properties of weld in plasma arc “in-situ” welding of SiCp/Al MMCs

LEI Yucheng\*\* ZHANG Zhen NIE Jiajun CHEN Xizhang

(School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

\* Supported by National Nature Science Foundation of China No.50475126.

Manuscript received August 13, 2007; in revised form March 10, 2008.

\*\* To whom correspondence should be addressed, Tel:(0511)88791786, E-mail: yclei@ujs.edu.cn

**ABSTRACT** Contrasting with that adding Ti-Al alloy, the present work investigated the influences of Ti-Al-Si on microstructures and mechanical properties of weld produced by plasma arc “in-situ” weld-alloying welding of SiCp/Al MMC with argon-nitrogen mixture as plasma gases and Ti-Al-Si alloy as filled composite. The results show that the formation of needle-like harmful phases  $Al_4C_3$  are effectively inhibited by the joint role of [Si] and [Ti] adding Ti-75Al-5Si alloy sheet filler. The stable molten pool was gained, and the mechanical properties of joint is effectively enhanced due to the compact-grain structure and the second reinforced composites of welded joint such as TiN, AlN, TiC,  $Ti_5Si_3$  etc. The test results of mechanical property show that the maximum tensile strength of welded joint gained with Ti-Al-Si alloy as filled composite is 225 MPa.

**KEY WORDS** composites, SiCp/Al MMCs, plasma arc, in-situ welding, Ti-Al-Si alloy

铝基复合材料 (MMCS) 具有高比强度、比刚度、比模量、优异的耐磨性能、良好的耐高温性能以及较强的性能和加工可设计性等特点,在航天、航空、汽车工业和光学仪器等领域显示出良好的应用前景<sup>[1,2]</sup>.但是,铝基复合材料 (MMCS) 的焊接性很差,阻碍了它的广泛应用<sup>[3,4]</sup>.抑制脆性相  $Al_4C_3$  的生成,是实现铝基复合材料成功焊接的关键所在.为了实现

铝基复合材料焊接的实用化,还要解决导致焊缝强度不高的问题,如气孔、微观裂纹和增强颗粒分布不均匀等<sup>[5,6]</sup>.对 SiCp/Al 基复合材料进行等离子弧原位焊接时在焊缝中加入纯钛片,使其在凝固过程中优先与碳结合形成高稳定的碳化物,可抑制脆性相  $Al_4C_3$  的生成<sup>[7,8]</sup>.但是,由于 Ti 的熔点远高于母材,焊接时需要很强的电流, Ti 的流动性不佳导致在焊缝中产生较多的未熔合、气孔、裂纹等缺陷,降低了接头的力学性能.

为了解决铝基复合材料的熔焊问题,在工艺方面,应该提供适当的熔池热输入;在冶金方面,加入

\* 国家自然科学基金 50475126 资助项目.

2007 年 8 月 13 日收到初稿; 2008 年 3 月 10 日收到修改稿.

本文联系人: 雷玉成, 教授

某些元素,改善了熔池的流动性和抑制界面反应<sup>[9]</sup>. 本文选用低熔点 Ti-Al-Si 合金为添加材料,以氩、氮混合气体作为等离子气,对 SiCp/Al 基复合材料进行等离子弧原位焊接,研究 Ti-Al-Si 对焊缝的组织与性能的影响.

## 1 实验方法

试验所用的母材是 SiCp/6061 颗粒增强铝基复合材料,增强体 SiC 颗粒体积分数为 10%,颗粒的平均尺寸为 6  $\mu\text{m}$ ,退火状态下其最大拉伸强度为 320 MPa. 由于制备方法的限制,复合材料中增强相颗粒的分布是不均匀的,基体 6061Al 的化学成分列于表 1.

试验用填充材料是将 Ti、Al 或 Ti、Al、Si 单质放入高真空真空吸铸系统真空熔炼成的两种不同质量比的 Ti-Al-Si 合金: Ti-57Al-3Si 和 Ti-75Al-5Si,其主要组成是 TiAl、Ti<sub>3</sub>Al 和 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 相. 对比试验选用两种不同质量比的 Ti-Al 合金: Ti-60Al, Ti-80Al,其主要组成是 TiAl 和 Ti<sub>3</sub>Al 相.

表 1 基体材料的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of aluminum alloy (mass fraction, %)

Cu	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Al
0.35	0.76	0.25	<0.05	1.25	<0.05	Bal.

用线切割将 SiCp/Al 基复合材料加工成尺寸为 60 mm×20 mm×3 mm 的板材,焊前将其打磨并清洗干净. 用线切割将添加材料 Ti-Al 和 Ti-Al-Si 合金块切割成横截面为 0.8 mm×1mm 的条状材料. 以 Ar+N<sub>2</sub> 为离子气,使用型号为 HPT-8 的等离子焊枪对 SiCp/6061 颗粒增强铝基复合材料进行等离子弧焊接.

用扫描电子显微镜 (SEM JSM-6301F) 分析焊缝的组织. 用 X 射线衍射法 (XRD: D/max-rB) 结合能谱分析 (EDS: IE 300 X) 鉴定焊缝的物相,扫描角度为 20°-80°,速度为 8°/min. 用扫描电镜分析拉伸试样的断口. 在万能试验机 (美国 Instron5882) 上进行拉伸试验,拉伸速度为 0.5 mm/min.

## 2 结果与讨论

添加 Ti-60Al 合金片后得到的组织致密,分布较为均匀,没有发现针状相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> (图 1a). 添加 Ti-80Al 合金片后,中心组织中的颗粒比较细小,有一定量的灰色针状相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 生成 (图 1b). 在焊接过程中,熔池内的 Ti 与其它元素发生一系列化学反应,能够抑制 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相的形成<sup>[10]</sup>. 添加材料 Ti-60Al 合金后,

有足够的 Ti 参与这些反应,因而有效地抑制了脆生相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的形成. 而添加 Ti-80Al 的合金中 Ti 的含量较低 (20%), 不能保证熔池内的一系列反应顺利进行,因而不能完全抑制脆生相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的生成.

图 2 和 3 分别为添加 Ti-57Al-3Si 和 Ti-75Al-5Si 合金片的 SiCp/Al 基复合材料等离子弧原位焊接的焊缝中心区和熔合区的微观组织照片. 添加 Ti-57Al-3Si 时,组织中有许多灰色的块状相 (图 2a). 与添加 Ti-60Al 的情况 (图 1a) 相比,其尺寸明显减小,说明 Si 的加入细化了颗粒. 在这些相之间出现了大量均匀分布的具有规则几何外形的新生相,没有发现针状相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>,也没有发现气孔和裂纹等缺陷. 结合能谱分析 (EDS) 和 X 射线衍射 (图 4) 可以判断,焊缝中心区的灰色块状相为 Al<sub>3</sub>Ti,具有规则几何外形的新生相是 TiN、AlN、TiC 和 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>.

添加 Ti-75Al-5Si 合金时,焊缝中心区组织中铝钛化合物的数量大为减少,各种颗粒的尺寸明显减小,且分布均匀,没有发现气孔和裂纹等缺陷 (图 3a),组织中只有极少量针状相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 生成. 与添加不含 Si 的 Ti-80Al (图 1b) 相比,数量大为减少,在熔合区 (图 3b) 也没有发现 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相. 这说明添加含 Si 5% 和 Ti 20% 的 Ti-Al-Si 合金对 SiCp/Al 基复合材料进行等离子弧原位焊接,可以有效抑制针状相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的生成.

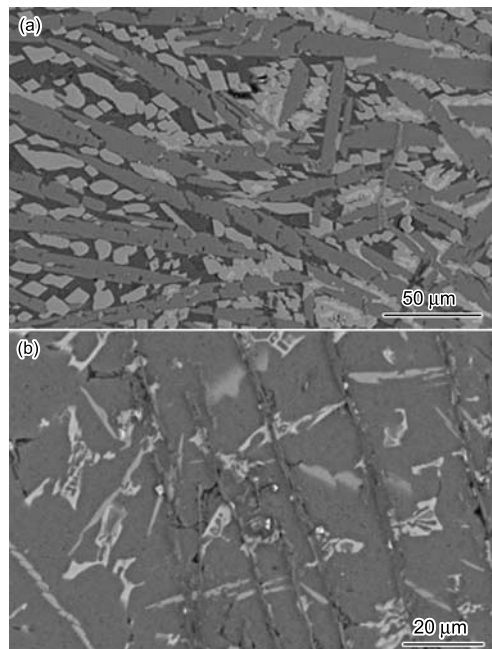


图 1 添加不同质量比 Ti-Al 合金片时接头 SEM 显微组织

Fig.1 Weld microstructure of the welded joint adding different Ti-Al alloy sheet fillers. (a) the centre of weld with Ti-60Al alloy, (b) the centre of weld with Ti-80Al alloy

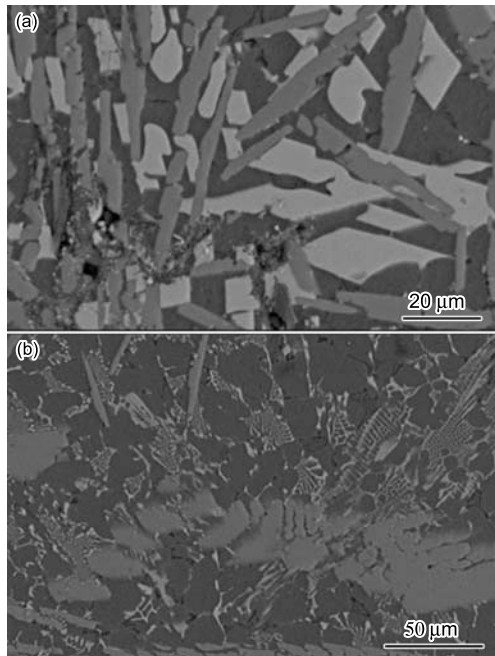


图2 填加 Ti-57Al-3Si 合金片时接头 SEM 显微组织  
Fig.2 Weld microstructure of the welded joint adding Ti-57Al-3Si alloy sheet filler (a) the centre of weld, (b) the fusion zone

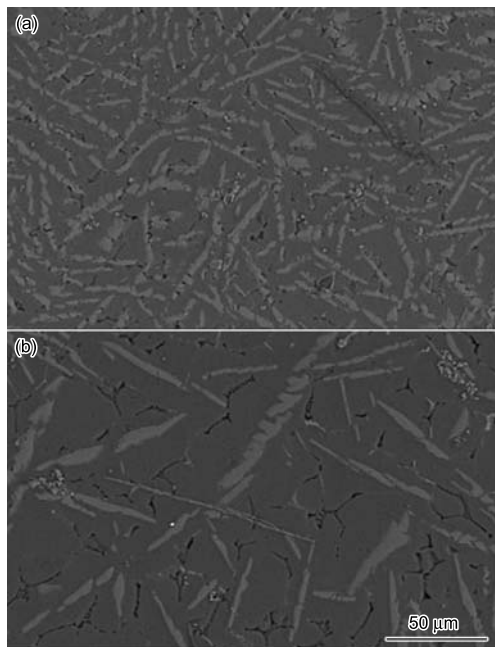


图3 填加 Ti-75Al-5Si 合金片时接头 SEM 显微组织  
Fig.3 Weld microstructure of the welded joint adding Ti-75Al-5Si alloy sheet filler (a) the centre of weld, (b) the fusion zone

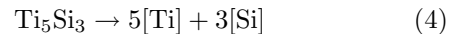
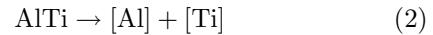
以上分析表明, 填加 Ti-80Al 合金时, 由于钛的含量较低 (20%), 不能完全抑制脆生相  $Al_4C_3$  的生成. 而填加 Ti-75Al-5Si 合金时, 可以有效抑制针状相  $Al_4C_3$  的生成, 说明, 适当降低填加材料中钛的含量, 加入一定量的 Si, 能够有效抑制脆生相  $Al_4C_3$  的

生成.

在焊接过程中, Al(S) 与 SiC(L) 反应生成脆生相  $Al_4C_3$  和 [Si] 离子:



同时, 在焊接过程中填充材料中的钛铝化合物 AlTi、 $Ti_3Al$  和  $Ti_5Si_3$  分解, 生成 [Ti] 和 [Si] 离子:



因此在熔池中有了一定浓度的 [Ti] 和 [Si]. [Ti] 能抑制脆生相  $Al_4C_3$  的形成<sup>[7,8]</sup>. 同时, 填充材料 Ti-75Al-5Si 合金的加入大幅度提高焊缝中硅的浓度, 能够减缓反应 (1) 的进程, 使参加反应的 SiC 减少, 使高浓度的 SiC 颗粒与 [Ti] 联合作用抑制了脆生相  $Al_4C_3$  的形成. 与填加纯金属钛片相比, Ti-75Al-5Si 合金的熔点较低, 焊接时能适当降低焊接线能量, 有利于减少焊接缺陷.

在焊接过程中, 熔池内的各种元素构成一个含钛的合金体系, 熔池的流动性主要由其化学成分决定. 金属的结晶间隔越小, 其流动性越好<sup>[11]</sup>. 合金化元素的添加增大钛合金的结晶间隔, 使其流动性比纯钛差. 但是, 随着铝含量的提高, 结晶热显著提高, 从而改善了钛合金的流动性<sup>[12]</sup>. 与以钛片为填加材料相比, 本文熔池合金体系内 Al 含量大大增加, 从而改善了熔池的流动性, 因此有利于焊接过程中氢的扩散逸出, 降低气孔产生的几率, 得到比较致密的组织.

加入 Si 的作用包括两个方面. 一是 Al、Si 的加入大幅度提高焊缝中硅的浓度, 同时也使 SiC 颗粒处于高浓度 Si 的接触面中, 参加反应的 SiC 减少, 降低了界面反应进行的趋势. 另一方面, Al、Si 在熔池中形成共晶合金, 其熔点比纯组元低, 且具有比纯金属有更好的流动性<sup>[13]</sup>. 因此, Si 的加入有助于抑制脆生相  $Al_4C_3$  的生成, 提高了熔池的流动性, 能获得组织致密、结合良好的焊缝, 有利于提高接头的力学性能.

由图 4 可见, 焊缝组织由 Al、AlN、 $Al_3Ti$ 、TiN、TiC、SiC、 $Ti_5Si_3$ 、Si 等相构成. 对分别填加 Ti-57Al-3Si 和 Ti-75Al-5Si 合金片的 SiCp/Al 基复合材料等离子弧原位焊接接头的拉伸试验结果表明, 最大拉伸强度分别为 215 MPa、225 MPa, 达到了母材的 70% 左右. 但是, 与母材相比接头的塑性有所下降.

填加 Ti-57Al-3Si 合金片的试样拉伸断口, 其显微组织为块状和条状, 没有发现韧窝, 脆性断裂特征

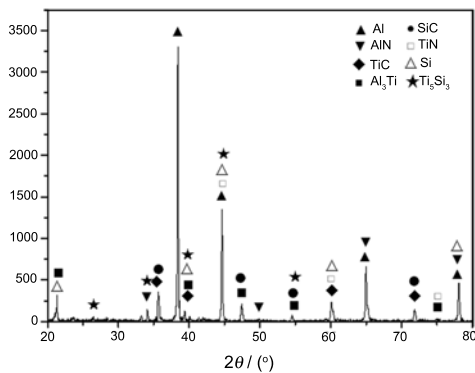


图 4 填加 Ti-57Al-3Si 合金时接头组织 XRD 图

Fig.4 XRD of welded joint adding Ti-57Al-3Si alloy sheet filler

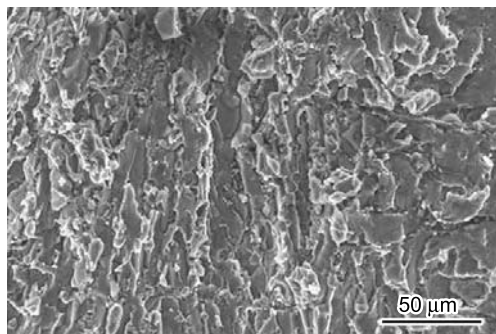


图 5 填加 Ti-57Al-3Si 合金片时接头断口

Fig.5 Microfractograph of joint adding Ti-57Al-3Si alloy sheet filler

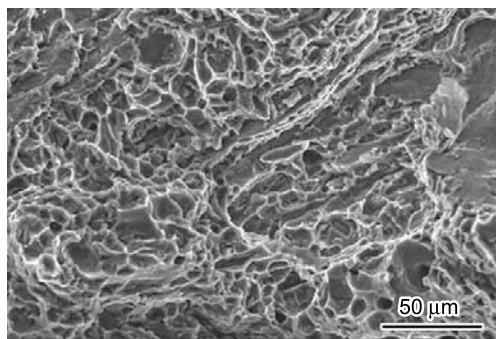


图 6 填加 Ti-75Al-5Si 合金片时接头断口

Fig.6 Microfractograph of joint adding Ti-75Al-5Si alloy sheet filler

比较明显(图 5)。这种断裂主要是焊缝结合处块状  $\text{Al}_3\text{Ti}$  对晶界的割裂作用造成的。填加 Ti-75Al-5Si 合金片的试样拉伸断口,其显微组织中块状和条状区域比较细小,其间分布有较多韧窝,表现出较好的韧性特征(图 6)。 $\text{Al}_3\text{Ti}$  是一种脆性化合物,少量的  $\text{Al}_3\text{Ti}$  存在于基体中可起到增强的作用。但是含量过高、尺寸粗大的  $\text{Al}_3\text{Ti}$  贯穿整个晶粒,对基体的连续性有较大的破坏作用,使材料的塑性和强度降低<sup>[14]</sup>。因此,减小并细化  $\text{Al}_3\text{Ti}$  相有利于提高接头的力学性能。

能。填加 Ti-57Al-3Si 的接头组织中  $\text{Al}_3\text{Ti}$  相比较多,且体积较为粗大;而填加 Ti-75Al-5Si 的焊缝组织中的  $\text{Al}_3\text{Ti}$  明显减少,且颗粒尺寸大为减小。这表明,适当减少钛含量、提高 Si 含量能够减小并细化  $\text{Al}_3\text{Ti}$  相,有助于提高接头的力学性能。

### 3 结 论

1. 使用氮、氩混合离子气,填加 Ti-75Al-5Si 合金对 SiCp/Al 基复合材料进行等离子弧原位焊接时,[Ti] 和 [Si] 离子的联合作用能有效抑制针状脆生相  $\text{Al}_4\text{C}_3$  的生成。

2. 填加 Ti-Al-Si 合金对 SiCp/Al 基复合材料进行等离子弧原位焊接,焊缝的最大拉伸强度为 225 MPa,是母材拉伸强度的 70%,焊缝中的脆性化合物相  $\text{Al}_3\text{Ti}$ ,使焊缝的塑性比母材有所下降。适当降低填加材料中钛的含量并加入一定量的 Si,能够减少、细化  $\text{Al}_3\text{Ti}$  相,并对脆生相  $\text{Al}_4\text{C}_3$  的生成有一定的抑制作用。

### 参 考 文 献

- LLOYD D J, Particle reinforced aluminum magnesium matrix composites, *International Materials Review*, **39**(1),1 (1994)
- ALLISON JE, Cole, G.S. Metal-Matrix Composites in The Automotive Industry: Opportunites and Challenges, *JOM*, **45**(2), 19(1993)
- J Ahearn J S, Cooke C, Fishman S G. Fusion welding of SiC-reinforced Al composites, *Metal Construction*, **14**(4), 192(1982)
- Ells M B D. Joining of aluminum based metal matrix composites, *International Materials Reviews*, **41**(2), 41(1996)
- LEE C S, Li H, Chandel R S. Vacuum-free diffusion bonding of aluminium metal matrix composite. *Journal of Materials Processing Technology*, **89-90**(2), 326(1999)
- NIU Jitai, ZHANG Deku, JI Guojuan, Effect of pulse parameters on microstructure of joint in laser beam welding for SiCp/6063 composite. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **13**(2), 289(2003)
- LEI Yucheng, YUAN Weijin, ZHU Fei, BAO Xudong, "In-situ" weld-alloying of plasma arc welding of SiCp/Al MMC, *Transactions of the China Welding Institution*, **26**(12), 13(2005)  
(雷玉成, 袁为进, 朱 飞, 包旭东, 等离子弧焊接 SiCp/Al 基复合材料焊缝“原位”合金化分析, *焊接学报*, **26**(12), 13(2005))
- LEI Yucheng, ZHU Fei, CHEN Xizhang, YUAN Weijin, CHENG Xiaonong, Effect of temperature field on species and distribution of reinforcing phase in "in-situ" weld-alloying/PAW of SiCp/Al, *China Welding*, **15**(4), 13(2006)
- JI Guojuan, XIE Jiangang, XUE Wentao, TIG welding with filler for SiCp/101 aluminum matrix composite, *Nonferrous Metals*, **55**(4), 21(2003)  
(冀国娟, 谢建刚, 薛文涛, SiCp/101 铝基复合材料的填加焊丝 TIG 焊, *有色金属*, **55**(4), 21(2003))

- 10 LEI Yucheng, YUAN Weijin, CHEN Xizhang, ZHU Fei, CHENG Xiaonong, "In-situ" weld-alloying plasma arc welding of SiCp/Al MMCs, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **17**(2), 313(2007)
- 11 GUO Shaoqing, YUAN Hong, GU Weihua, LI Yan, LI Xiaohong, Current research situation of welding of SiCp/Al composites, *Aerospace Materials & Technology*, **35**(4), 19(2005)  
(郭绍庆, 袁 鸿, 谷卫华, 李 艳, 李晓红, SiCp/Al 的熔化焊及高能束焊研究现状, *宇航材料工艺*, **35**(4), 19(2005))
- 12 ZHANG Yumei, GUO Tianwen, LI Zuochen, A castability study of Ti-75 alloy for dental clinic use *Journal Of Practiacal Stomatology*, **16**(2), 105(2000)  
(张玉梅, 郭天文, 李佐臣, 铸模温度对 Ti-75 合金铸流率影响的研究, *实用口腔医学杂志*, **16**(2), 105(2000))
- 13 LI Gaohong, ZHAO Yuhou, LI Jianping, GUO Yongchun, DONG Shengquan, YANG Zhong, Mechanical properties of AlN-Al<sub>3</sub>Ti/ZL101 in situ composite, *Foundry*, **51**(10), 595(2002)  
(李高宏, 赵玉厚, 李建平, 郭永春, 董晟全, 杨 忠, AlNAl<sub>3</sub>Ti/ZL101 原位复合材料力学性能研究, *铸造*, **51**(10), 595(2002))
- 14 WANG H M, Chen Y L, Yu L G, "In-situ" weld-alloying/laser beam welding of /6061Al MMC, *Materials Science and Engineering A*, **293**(1-2), 1(2000)