文章编号: 1004-0609(2009)02-0241-06

Ti-Al 合金对 SiC_p/6061Al 复合材料 等离子弧焊焊缝组织的影响

雷玉成, 邵奇栋, 张 振, 聂加俊

(江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013)

摘 要:以不同 Ti 含量的 Ti-Al 合金作为合金化填加材料,采用氮氩混合等离子气体对 SiC_p/6061Al 复合材料进 行等离子弧原位焊接,研究填加材料 Ti-Al 中 Ti 质量分数的变化对焊缝组织的影响。结果表明:在熔池凝固过程 中,填加材料中 Ti 质量分数为 10%时,可有效抑制有害针状相 Al₄C₃的生成;随填加材料中 Ti 质量分数的降低, 焊缝中未出现脆性相 Al₄C₃,组织中颗粒相的形貌发生较大变化,Al₃Ti 相的形状由粗大块状变为细长针状,并且 数量大为减少;焊缝中其余增强相的尺寸均变得较为细小。

关键词: SiC_p/Al 复合材料; Ti-Al 合金; 等离子弧; 原位焊接 中图分类号: TG 456 文献标识码: A

Effect of Ti-Al alloy on microstructures of weld in plasma arc 'in-situ' welding of SiC_p/6061Al MMCs

LEI Yu-cheng, SHAO Qi-dong, ZHANG Zhen, NIE Jia-jun

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

Abstract: The effect of the content variation of titanium in Ti-Al alloy on microstructures of weld of $SiC_p/6061AI$ MMC was investigated. The weld was produced by plasma arc 'in-situ' weld-alloying welding, argon-nitrogen mixture as plasma gases and Ti-Al alloy as filled composite. The results indicate that when the mass fraction of titanium is 10% in Ti-Al alloy sheet filler, the formation of needle-like harmful phases Al_4C_3 is effectively prevented during the solidification process of molten pool. With decreasing titanium content in Ti-Al alloy, the morphology of particles changes greatly. The number of phases in microstructures decreases, and the particle morphology of phase Al_3 Ti changes from massive block to short rod-like shape.

Key words: SiC_p/Al composite material; Ti-Al alloy; plasma arc; 'in-situ' welding

随着科学技术的快速发展, 铝基复合材料(MMCS) 以其高的比强度、比刚度、比模量, 优异的耐磨性能, 良好的耐高温性能以及在性能和加工方面较强的可设 计性等特点, 在航天、航空、汽车工业、光学仪器和 体育用品等领域取得较大的经济效益, 显示出广阔的 发展前景^[1-5]。但是, 铝基复合材料(MMCS)的焊接性 很差, 阻碍了其在工业中的广泛应用^[6-7]。 铝基复合材料的焊接技术是其走向工业化必须解 决的问题。针对这个问题,国内外已经进行广泛深入 的研究,抑制脆生相 Al₄C₃的生成是实现铝基复合材 料成功焊接的关键所在;在本课题的前期研究中,通 过在焊缝中加入纯钛片,对 SiC_p/6061Al 复合材料进 行等离子弧原位焊接,有效抑制脆性相 Al₄C₃的生成, 并分析合金化元素 Ti 对脆性相 Al₄C₃ 的抑制机理^[8-11],

通讯作者: 雷玉成,教授,博士; 电话: 0511-8791919; E-mail: yclei@ujs.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475126);先进焊接技术省级重点实验室基金资助项目(JSAWT-07-04);江苏大学科技创新团队资助项目 收稿日期:2008-05-14;修订日期:2008-09-10

但是,并未对熔池中 Ti 含量与其对抑制脆性相 Al₄C₃的效果之间的关系进行细致的研究。研究熔池中抑制 脆性相 Al₄C₃所需的 Ti 含量对降低填加材料的熔点、 降低焊接热输入、改善接头的性能有重要意义。因此, 本文作者采用 Ti-Al 合金为填充材料,以氩、氮混合 气体作为等离子气,对 SiC_p6061/Al 复合材料进行等 离子弧原位焊接,研究不同 Ti 含量的合金填加材料对 焊缝组织的影响。

1 实验

1.1 试验材料

试验所用母材为 SiC_p/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6μm,退火状态下其最大拉伸强度为320 MPa。 该复合材料在扫描电镜下的显微组织由于制备方法的 限制,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。

试验所用填加材料是将 Ti、Al 单质放入高真空吸 铸系统真空熔炼而成的 Ti-Al 合金, Ti 和 Al 之间的质 量比可随意调整。本实验选用 3 种不同质量比的 Ti-Al 合金即 Ti-60Al, Ti-80Al 和 Ti-90Al。

表1 基体材料的化学成分

Table 1 Chemical compositions of aluminum alloy (massfraction, %)

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

表2 Ti-Al合金的化学成分

Table 2(Chemical	compositions	of Ti-Al alloy
----------	----------	--------------	----------------

Sample No.	w(Ti)/%	w(Al)/%
1	40	60
2	20	80
3	10	90

1.2 试验过程

采用线切割方法将 SiC_p/6061Al 复合材料加工成 60 mm×20 mm×3 mm 的板材,焊前将试件用 150[#] SiC 砂纸进行打磨,然后用丙酮清洗干净。实验时, 以不同质量比的 Ti-Al 合金为填加材料,采用 Ar+N₂ 为离子气,使用型号为 HPT-8 的等离子焊枪对 SiC_p/6061 颗粒增强铝基复合材料进行等离子弧焊接。 用线切割方法将 Ti-Al 合金块切割成 0.8 mm×1 mm 的 条状材料作为填加材料。

用光学显微镜和扫描电镜对焊缝组织进行分析。 用 X 射线衍射法结合能谱分析(EDS)进行物相鉴定, 扫描角度为 20°~80°,速度为 8(°)/min,用扫描电镜分 析拉伸试样的断口形貌。

2 结果及讨论

图 1 所示为 SiC_p/6061Al 复合材料等离子弧直接 熔化焊接焊缝显微组织像。由图可知:焊缝中增强相 SiC 颗粒在等离子弧直接熔化焊接过程中基本溶解, 并在随后的凝固过程中析出少量的细长针状相和大量 较短的针状相,其中较短的针状相为长矩形,呈针状, 并含少量黑色不规则块状物。根据能谱(见图 2)和 X 射线衍射分析结果(见图 3),可以确定该较短的针状相 为 Al₄C₃,与铝合金中对 Al₄C₃的描述基本一致:



图 1 SiC_p/6061Al 直接熔化焊焊缝的 SEM 像

Fig.1 SEM image of welded joint in PAW without filler



图 2 焊缝中较短针状相定的性能谱分析

Fig.2 Energy spectrum qualitative analysis of short needlelike phase in weld

Al₄C₃,矩形,厚度 *t*<1 μm,长度 *d*=0.5~25 μm,灰 色。黑色块状物为初生单质 Si。结合图 4 可以确定其 中少量细长针状相为 AlN。



图 3 直接熔化焊接焊缝的 XRD 谱

Fig.3 XRD pattern of welded joint without filler



图 4 焊缝中长针状相的定性能谱分析

Fig.4 Energy spectrum qualitative analysis of long needlelike phase in weld

由上述结果可见,焊接过程中基体 Al 和增强相 SiC 之间发生了如下界面反应:

$$3SiC+4Al=Al_4C_3+3Si$$
 (1)

生成物 Al₄C₃分布在 SiC 界面,破坏了增强相与 基体原有良好的结合界面,削弱了增强相 SiC 对焊缝 原有的强化作用;同时,生成相 Al₄C₃ 不仅是一种脆 性物,而且极易与水发生发应,形成的气泡又进一步 降低了接头的力学性能。

由上述结果可知: 在 SiC_p/6061Al 复合材料等离 子弧直接熔化焊接过程中,增强相 SiC 颗粒的溶解以 及随后针状有害相 Al₄C₃ 在焊缝中凝固析出,使得增 强相 SiC 颗粒大量减少,同时,生成物脆性相 Al₄C₃ 改变了基体与增强相之间的结合机理,降低了焊接接 头的力学性能;初生相 Si 使得焊接接头塑性下降。

图 5 所示为 Ti-60Al 合金作为填加材料对 SiC_p/6061Al 复合材料进行等离子弧原位焊接得到的 接头 OM 形貌。从图中可以看出,接头组织致密,与 母材结合良好,没有发现气孔、微观裂纹等缺陷,熔 合线附近组织过渡明显,说明在焊接过程中,填加材 料 Ti-Al 合金提高了熔池金属的流动性,有利于 H 的 排出,从而得到质量较高的焊接接头。



图 5 填加 Ti-60Al 合金片时焊接接头的 OM 形貌 Fig.5 OM macrostructure of joint adding Ti-60Al alloy sheet filler

图6所示分别为填加Ti-60Al、Ti-80Al、Ti-90Al合 金片时SiC_p/6061Al复合材料等进行离子弧原位焊接 接头焊缝中心区的微观组织照片。

从图6(a)可知,组织中存在许多粗大块状相(长度 50~200 μm,宽度2~5 μm),这些相之间出现大量均匀 分布的具有规则几何外形的块状物,没有发现针状相 Al₄C₃,也没有发现气孔和裂纹等缺陷。结合能谱分析 (见图7)和X射线衍射分析,表明焊缝中心区的粗大块 状相为Al₃Ti,具有规则几何外形的新生相是TiN和 TiC。Al₃Ti具有低密度,高比强度,良好的耐热性和 抗氧化性,然而,Al₃Ti在室温下极脆^[12],少量小体积 的Al₃Ti存在于基体中,可起增强作用。但当其含量过 高、尺寸过大时,会贯穿整个晶粒,对基体的连续性 有较大的破坏作用^[13],造成接头韧性较差,严重降低 接头的力学性能。

由图6(b)和(c)可知,填加Ti-80Al、Ti-90Al合金片 时焊缝组织的成分与填加Ti-60Al时基本一致,均没有 发现针状相Al₄C₃生成,但是,组织中的颗粒相的形貌 发生较大变化。对比图6(a)、(b)和(c)可以发现:随填 加材料中Ti含量的降低,焊缝中的Al₃Ti相的形状由Ti



图 6 填加不同质量比的 Ti-Al 合金片时焊缝的 SEM 像 Fig.6 SEM images of welded zone with Ti-Al alloy sheet of different mass ratios: (a) Ti-60Al; (b) Ti-80Al; (c) Ti-90Al



图7 焊缝中针状相的定性能谱分析

Fig.7 Energy spectrum qualitative analysis of needlelike phase in weld

含量高时的粗大块状,逐渐变为细长针状,并且数量 大为减少。焊缝中其余增强相的尺寸也都变得十分细 小。周怀营等^[14]认为:细化晶粒可以提高Ti-Al合金的 延展性,合金化改善Ti-Al合金的室温拉伸性能和断裂 韧性。因此,减小Al₃Ti相的尺寸将对接头的力学性能 产生积极的影响。

图8所示为填加Ti-90Al合金片时SiC_p/6061Al复合 材料等离子弧原位焊接熔合区的SEM像。由图可以看 出,组织中分布着比较细小的弥散相,没有发现针状 Al₄C₃的生成。



图 8 填加 Ti-90Al 合金片时熔合区的 SEM 像 Fig.8 SEM image of fusion zone adding Ti-Al alloy sheet filler



图 9 填加 Ti-60Al 合金片时焊接接头组织的 XRD 谱 Fig.9 XRD patterns of welded joint adding Ti-60Al alloy sheet filler

以上对分别填加 Ti-60Al、Ti-80Al 和 Ti-90Al 合 金片时接头组织的观察中,均未发现针状相 Al₄C₃ 生 成,说明填加 Ti-Al 合金对 SiC_p/6061Al 复合材料进行 等离子弧原位焊接时,当填加材料 Ti-Al 合金中 Ti 的 质量分数为 10%时,仍然可以有效抑制 Al₄C₃ 的生成。

在高真空吸铸系统中,在电弧作用下,Al 与Ti 熔 合成为Ti-Al 合金,由Ti-Al 状态图可知,Ti 在α(Al) 固溶体中的最大溶解度为1.3%。合金中Ti 元素一部 分是溶解在α(Al)固溶体中,剩下部分与Al 结合形成 钛铝化合物。因此,填充材料中的主要成分是 α(Al) 固溶体和钛铝化合物,如 Al₃Ti 相和 AlTi 等。

填加 Ti-Al 合金对 SiC_p/Al 复合材料进行等离子弧 原位焊接时,钛铝化合物熔化分解为[Al]和[Ti]。

焊接过程中,熔池内的Ti与其他元素之间发生一系列化学反应,能够抑制Al₄C₃相的形成。抑制机理如下:

 $SiC \rightarrow Si+C$ (2)

 $Al+3C \rightarrow Al_4C_3 \tag{3}$

 ΔG^{Θ} =-184 000 J/mol

 $Ti+C \rightarrow TiC$ (4)

 $\Delta G^{\Theta}_{T, \text{TiC}} = -186\ 600 + 13.22T$

 $Al+N_2 \rightarrow AlN$ (5)

 $\Delta G^{\Theta}_{T, AIN} = -618\ 000 + 209.2T$

 $Ti+N_2 \rightarrow TiN$ (6)

 $\Delta G^{\Theta}_{T, \text{TiN}} = -676\ 600 + 190.2T$

在熔池中,[Ti]质量分数小于 75%,由 Ti-Al 二元 状态相图可知,[Ti]和[Al]结合形成的钛铝化合物是 Al₃Ti。

 $3[Al]+[Ti] \rightarrow A1_3Ti \tag{7}$

 $\Delta G_{T,A1_{3}Ti}^{\Theta} = -184\ 800 + 21T$

LEI 等^[10]分析了填加纯 Ti 片对 SiC_p/6061Al 复合 材料进行等离子弧原位焊接时元素 Ti 对脆性相 Al₄C₃ 的抑制机理,分析主要是针对反应(2)~(6):在反应能 自发进行的条件下,ΔG 越小,反应越优先进行。比 较反应式(3)与(4)、反应式(3)与(5)可知,TiC 和 AlN 的形成自由能均比 Al₄C₃的小,说明反应(4)和(5)比反 应(3)优先发生,从而抑制了反应(3)的进行,也就抑制 了脆性相 Al₄C₃的生成。

本文作者主要讨论 TiC 与 A1₃Ti 的形成机理,分 析填加材料 Ti-Al 合金中 Ti 的含量与对脆性相 Al₄C₃ 的抑制效果之间的关系。

在焊接过程中, 熔池温度 $T \approx 1$ 700 K, 此时, $\Delta G^{0}_{T,A1_{3}Ti} \gg \Delta G^{0}_{T, TiC}$,因此,反应(4)比反应(7)先发生, TiC 先生成,当熔池中的 C 被耗尽时, Ti 才会与 Al 反应形成 A1_3Ti。在反应(4)中, [C]主要来源于反应(2) 中 SiC 颗粒的分解,因此,可以认为元素 Ti 抑制 Al_4C_3 的生成主要发生在反应(4)终止之前,即熔池内[C]被耗 尽之时。在此之后,熔池中不再生成[C],也就不会产 生 Al_4C_3。多余的元素 Ti 与 Al 结合发生反应(7),以 A1_3Ti 的形式析出。因此, A1_3Ti 相的析出可以看作是 抑制反应结束的标志。

通过以上分析可以得出,与填加纯金属 Ti 片时 不同,填加 Ti-Al 合金对 SiCp/6061Al 复合材料进行等 离子弧原位焊接时,熔池内反应更加复杂,在熔池凝 固过程中,只要维持熔池内元素 Ti 饱和,就可以有效 抑制有害针状相 Al₄C₃的生成。由于 Ti 在基体铝中溶 解度比较微小,因此,抑制 Al₄C₃相所需的元素 Ti 是 微量的。Ti 参与一系列抑制 Al₄C₃的反应过程中, 生 成物主要是 TiC、TiN,可以结合焊缝中 C、N 原子的 质量分数和 Ti 在基体铝中的溶解度计算出抑制针状 相Al₄C₃所需的理论Ti含量。离子气中的N是可控的, 可以控制其为微量。因此,根据C原子个数和Ti在基 体铝中的溶解度可以计算出相应 Ti 的理论含量。通过 反应式 Ti+SiC→TiC+Si 进行计算(SiC_p/6061 Al 复合 材料中的质量分数为 11.79%),每单位质量的复合材 料需要 Ti 的质量分数为: 11.79%×47.9/(12+28)+ 1.3%~15%.

在焊接过程中,部分SiC_p溶解,因此,填加材料 Ti-90Al合金中含Ti量为10%时,能够有效抑制针状相 Al₄C₃的生成。

3 结论

1) 填加不同质量比的 Ti-Al 合金对 SiC_p/6061Al 复合材料进行等离子弧原位焊接,随 Ti 的质量分数降低,组织中的颗粒相的形貌发生了较大变化,Al₃Ti 相的形状由粗大块状变为细长针状,并且数量大为减少。焊缝中其余增强相的尺寸也都变得十分细小。

2) 填加 Ti-Al 合金对 SiC_p/6061Al 复合材料进行 等离子弧原位焊接过程中,合金化元素 Ti 有效抑制了 有害针状相 Al₄C₃ 的生成,在熔池凝固过程中,只要 维持熔池内元素 Ti 的含量饱和,就可以有效抑制针状 相 Al₄C₃ 的生成。多余的元素 Ti 以 Al₃Ti 的形式析出。

3) 在焊接过程中,当填加材料 Ti-90Al 合金中含 Ti 量为 10%时,能够有效抑制针状相 Al₄C₃ 的生成。

REFERENCES

(1) 樊建中,桑吉梅,石力开.颗粒增强铝基复合材料的研制、应用与发展[J].材料导报,2001,15(10):49-55,57.
 FAN Jian-zhong, SANG Ji-mei, SHI Li-kai. Fabrication, application and development of particle reinforced aluminium matrix composites[J]. Materials Review, 2001, 15(10): 49-55, 57.

[2] ALLISON J E, COLE G S. Metal-matrix composites in the

automotive industry: Opportunities and challenges[J]. Journal of Metals, 1993, 45(1): 19–25.

- [3] BEUYUKIAN C S. Brazing of refractory, superalloy and composite materials for space shuttle applications[J]. Welding Journal, 1971, 50(7): 491–499.
- [4] THOMAS F. KLIMOWIZ. The large-scale commercialization of aluminum-matrix composites[J]. Journal of Metals, 1994 (11): 49–53.
- [5] ROBERTSON A R, MILLER M F, MAIKISH C R. Soldering and brazing of advanced metal-matrix structures[J]. Welding Journal, 1973, 51(10): 446–453.
- [6] 牛济泰,刘黎明,韩立红. 铝基复合材料焊接研究现状及展望[J]. 哈尔滨工业大学学报,1999,31(1):130-136.
 NIU Ji-tai, LIU Li-ming, HAN Li-honng. Present situation and prospect of welding aluminum matrix composites[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(1): 130-136.
- [7] ELLS M B D. Joining of aluminum based metal matrix composites[J]. International Materials Reviews, 1996, 41(2): 41–58.
- [8] 雷玉成,袁为进,朱 飞,包旭东. 等离子弧焊接 SiC_p/Al 复合材料焊缝'原位'合金化分析[J]. 焊接学报,2005,26(12):13-16.

LEI Yu-cheng, YUAN Wei-jin, ZHU Fei, BAO Xu-dong. 'In-situ' weld-alloying of plasma arc welding of SiC_p/Al MMC [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(12): 13–16.

[9] 袁为进. 合金化填充材料 Ti 及其它工艺参数 SiC_p/6061Al 等 离子弧焊焊缝组织及性能的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2005. YUAN Wei-jin. Effect of alloying filler titanium and other welding parameters on microstructure and mechanical properties of welded joint during PAW of SiC_p/6061Al[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2005.

- [10] ADAMIAK M, FOGAGNOLO J B, RUIZ-NAVAS E M, DOBRZANSKI L A, TORRALBA J T. Mechanically milled AA6061/(Ti3Al)p MMC reinforced with intermetallics—The structure and properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155/156: 2002–2006.
- [11] 雷玉成,朱 飞,袁为进,程晓农.Ti对SiC_p/Al等离子弧焊焊 缝组织的影响[J]. 材料科学与工艺,2006,14(6):565-567.
 LEI Yu-cheng, ZHU Fei, YUAN Wei-jin, CHENG Xiao-nong.
 Effect of Ti on weld microstructure of PAW SiC_p/Al MMCs[J].
 Materials Science and Technology, 2006, 14(6): 565-567.
- [12] 文九巴, 戎咏华, 陈世朴, 胡赓祥. Al₆₇Mn₈Ti₂₅ 合金的解理裂 纹[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(3): 40-44.
 WEN Jiu-ba, RONG Yong-hua, CHEN Shi-pu, HU Geng-xiang. Initiation of cleavage cracks in intermetallic Al₆₇Mn₈Ti₂₅ alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(3): 40-44.
- [13] 赵玉厚,严 文,周敬恩. Si、Mg 对原位铝基复合材料中增强 体 Al₃Ti 形貌的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2001, 24(2): 34-37.

ZHAO Yu-hou, YAN Wen, ZHOU Jing-en. Influence of Si and Mg on shape of Al₃Ti reinforcing phase in in-situ Al-based composite[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2001, 24(2): 34–37.

- [14] 周怀营, 湛永钟. TiAl 金属间化合物的研究进展[J]. 广西大学 学报, 1999, 24(4): 262-264.
 ZHOU Huai-ying, KAN Yong-zhong. Development of studies on TiAl intermetallics[J]. Journal of Guangxi University, 1999, 24(4): 262-264.
- [15] LEI Yu-cheng, YUAN Wei-jin, CHEN Xi-zhang. In-stu weld-alloying plasma arc welding of SiC_p/Al MMCs[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17(2): 313–317.

(编辑 龙怀中)

246