文章编号: 1004-0609(2007)04-0567-05

# $N_2$ 在等离子弧原位焊接 SiC<sub>p</sub>/Al 基复合材料中的作用

雷玉成,李 贤,陈 刚,张建会,程晓农

(江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013)

摘 要:以0.8 mm 钛片作为填充材料,采用纯氩和氮氩混合等离子气体对 SiC<sub>p</sub>/Al 基复合材料进行等离子弧原位 焊接,分析加入的 N<sub>2</sub> 对焊缝成形、焊缝组织和性能的影响。结果表明,随氮气体积分数增大,焊缝熔深也相应 增大:增加氮气还改善了熔池中的热循环状态和冶金反应,生成 TiN、AlN 等新的增强相,有效地抑制脆性相的 生成,改善了焊接接头的性能。力学性能实验表明,采用 Ar+N<sub>2</sub> 作为离子气进行焊接时,焊缝硬度和强度都有提 高。当 N<sub>2</sub> 体积分数约占 15%时,拉伸强度达到最大值 233.5 MPa。

关键词: SiC<sub>p</sub>/Al 基复合材料; 原位焊接; Ar+N<sub>2</sub>; 组织

中图分类号: TG 456 文献标识码: A

# Effect of nitrogen on plasma arc in-situ welding of SiC<sub>p</sub>/Al MMCs

LEI Yu-cheng, LI Xian, CHEN Gang, ZHANG Jian-hui, CHENG Xiao-nong

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

**Abstract:** In order to analyze the weldability of SiC particle reinforced aluminum metal matrix composites(SiC<sub>p</sub>/Al MMCs), Plasma arc in-situ welding of SiC<sub>p</sub>/Al MMCs was carried out using pure argon and argon-nitrogen mixture as plasma gases with 0.8 mm thick titanium filler-plate as in-situ material. The effect of nitrogen addition into plasma gases on the appearance of weld, microstructure and mechanical properties was investigated. The results show that when the nitrogen volume increases, the weld penetration also correspondingly increases. The thermal cycle state and metallurgy response of the molten poor are also improved by adding nitrogen. A new composite reinforced by TiN, AlN is produced in the weld, effectively suppressing the formation of  $Al_4C_3$ , consequently ensuring the quality of joints. The mechanical testing results show that the microhardness and tensile strengths of joins welded by adding nitrogen are both increased. The highest tensile strength of joints is 233.5 MPa when the nitrogen volume is approximately 15%.

Key words: SiC<sub>p</sub>/Al MMCs; plasma arc in-situ welding; Ar+N<sub>2</sub>; microstructure

SiC<sub>p</sub>/Al 基复合材料由于具有高比强度、高比模 量、耐磨以及耐高温等优异的综合性能,且其制造成 本较低,被认为是一种具有极大应用前景的新结构材 料<sup>[1-5]</sup>。同其他结构材料一样,SiC<sub>p</sub>/Al 基复合材料的 推广应用也受到了焊接技术的制约。由于增强相与基 体间物理化学性质存在巨大差异,焊接时极易发生界 面反应生成脆性相,并产生气孔、疏松等缺陷,严重 影响了焊接接头的性能<sup>[6-8]</sup>。因此,探求改善焊接熔池 冶金性能的新方法和新工艺,就显得极为重要。从已 有的研究结果来看,SiC 颗粒增强铝基复合材料的连 接主要包括熔化焊、钎焊和扩散焊三大类,同时研究 人员还提出了许多新型的铝基复合材料连接技术,主 要包括搅拌摩擦焊、脉冲激光焊、闪光对焊和等离子 喷涂等。总体来看,颗粒增强铝基复合材料的连接技 术应具备如下几个条件<sup>[9]</sup>:1)能形成良好的连接接 头,界面反应少;2)必须有效避免铝合金基体的氧化;

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475126); 江苏省研究生创新计划资助项目(xm04-27)

收稿日期: 2006-09-26; 修订日期: 2006-01-16

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

尽量减少连接接头处增强颗粒的偏聚;4)操作简
 单,尽可能避免使用外加材料。

本文作者在离子气中直接加入氮气,以 0.8 mm 钛片作为填充材料,对 SiC<sub>p</sub>/Al 基复合材料进行等离 子弧原位焊接,研究加入的氮气对焊缝成形、焊缝组 织以及性能的影响,进而寻求提高焊接接头性能的新 途径。

# 1 实验

实验材料为挤压铸造法制造的以 SiC 为强化相的 6061Al 基复合材料,其中强化相直径为 6 μm,体积 分数为 10%,在基体中分布不均匀。拉伸实验测定其 断裂强度为 398.5 MPa,材料尺寸为 80 mm×20 mm ×3.5 mm,其化学成分见表 1。

#### 表1 基体材料的化学成分

**Table 1** Chemical composition of aluminum alloy(massfraction, %)

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

实验使用钨极氩弧焊机 AC/DC TIG 500 GP 和 HPT-8 等离子焊枪进行焊接。焊前在基体中间开 V 形 坡口,用 150<sup>#</sup>砂纸进行打磨以去除氧化膜,然后用丙 酮进行清洗。焊接时分别采用对接接头和单板直接熔 化两种形式以相同的工艺参数进行焊接,见表 2。焊 完后在试件的横断面(与焊接方向垂直面上)取金相试 样,用 3%~5%的 Keller's 试剂腐蚀后用 S-570 线性扫 描 电子 显 微镜 (SEM)观察焊缝的显微组织,用 D/max-rB 旋转阳极 X 射线衍射仪(XRD)确定焊缝组 织的物相结构。显微硬度测量在ΠMF-3 型显微硬度计 上进行,所加载荷为 1 N,加载时间为 20 s。拉伸实 验在美国 Instron 公司生产的万能实验机上进行,拉 伸速度为 0.5 mm/min,按照 GB/T 228-2002 进行拉伸 实验。之后用扫描电镜观察拉伸试样的断口,并拍摄 断口照片。

#### 表2 焊接工艺参数

Table 2Parameter of welding

Current/A	Welding rate/ (mm·s <sup>-1</sup> )	Plasma gas flow/( $L \cdot min^{-1}$ )	Preservation gas flow/ (L·min <sup>-1</sup> )
80	2	4	10

# 2 结果与分析

## 2.1 氮气对焊缝成形的影响

在等离子气中加入体积分数为 5%的氮气后,在 焊缝表面即生成一层灰色的粉末层。随氮气含量增加, 灰色物质增多。对其进行分析,表明灰色物是 AIN 和 AI 的混合物。其原因是:在等离子弧的高温作用下, 分解的氮原子与熔池表面挥发的铝原子发生激烈的反 应,生成 AIN 以及 AIN 和 AI 的混合物。

在等离子气中加入氮气时对焊缝熔深也具有一定 的影响。图1所示为等离子气中氮气体积分数与熔深 的关系。可以看出,随氮气体积分数的增大,焊缝熔 深尺寸也相应增大。这是因为含氮气的离子焰热焓高, 传热快,解离吸热使得电弧收缩而使电场强度、能量 密度增加<sup>[10]</sup>。因此,在其他条件一定的情况下,随氮 气体积分数增加,阳极热输入也增大,从而使焊缝熔 深增加。



图1 等离子气中氮气体积分数对熔深的影响

Fig.1 Effect of nitrogen volume fraction in plasma gases on weld penetration

#### 2.2 氮气对焊缝组织的影响

图 2(a)所示为采用纯氩进行等离子弧原位焊接时的焊缝组织 SEM 照片。可以看出,当采用纯氩作为等离子气时,焊缝中虽没有脆性相生成,但颗粒较少, 仅有焊缝体积的 8%左右,颗粒尺寸多在 5~15 µm。经 XRD 分析,如图 3(a)所示,颗粒相主要为 SiC 和 TiC。 在等离子弧高温作用下,大量 SiC 增强颗粒发生分解, 而 TiC 的生成则取决于 SiC 的分解程度,因此部分 C 的逃逸,会造成焊缝中颗粒的总体含量降低。图 2(b) 所示为采用氮气体积分数为 15% 的氮氩混合等离子



图 2 焊缝组织 SEM 照片

Fig.2 SEM micrographs of welded joint: (a) Purity Ar; (b)  $\varphi(N_2)=15\%$ 



图 3 焊缝 XRD 谱

Fig.3 XRD patterns of welded joint: (a) Purity Ar; (b)  $\varphi(N_2)=15\%$ 

气进行等离子弧原位焊接时的焊缝组织。由图可见, 焊缝中也没有发现脆性相生成,但焊缝中颗粒大量增加,约占焊缝体积含量的19%,颗粒尺寸为3~15 μm, 偏聚现象较为严重,并且出现了一些不同于采用纯氩 焊接时的新相。经 XRD 分析,如图 3(b)所示,焊缝中 有 TiN、AlN 等新颗粒生成。这是因为氮高温分解生 成的氮原子较为活泼,易与钛、铝发生反应,生成的 TiN、AlN 等颗粒具有良好的增强效果<sup>[11-12]</sup>,极大地 改善了焊缝的性能。

## 2.3 熔池冶金反应分析

根据前面的分析结果,当加氮后,熔池中除有新颗粒 TiC 生成,还有 TiN、AlN 等氮化物形成,并且熔池中也没有发现脆性相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的生成,熔池的冶金反应过程可以从两个方面进行解释。图 4 所示为几种化合物的生成自由能与温度关系曲线<sup>[3, 13]</sup>。从图中可以看出,自由能由低到高即反应的热力学可能性由大到小依次为:TiN、AlN、TiC、Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>和 Al<sub>3</sub>Ti。这说明 TiN、AlN和 TiC 的形成自由能动力比其他产物要大。因此,反应首先形成 TiN、AlN、TiC 颗粒。由于它们的生成使熔池中的 Ti、C 元素含量大大降低,从而抑制了Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>和 Al<sub>3</sub>Ti 的生成。





Fig.4 Relationship curves of free energy of formation and temperature

从相图角度进行分析<sup>[14-15]</sup>可知,由于 TiC 的熔点 (3 140 ℃)高于 TiN 的熔点(2 950 ℃),所以当温度降 低时,熔池中的 TiC 应当首先析出。但由于熔池中的 N 是由氦气解理出的活性 N 原子,与活性元素 Ti 以 反应时间短的动力学优势优先形成 TiN,从而抑制了 TiC 的形成。因此,合金液中各元素的化学反应不仅 受热力学控制,而且受动力学控制。当温度降至 2 573 ℃时,析出 AIN。随 TiC 的不断析出,熔池中的 C 元素含量消耗较多,其液相成分点逐渐由 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>存在区

域向 TiC<sub>x</sub>存在区域移动,从而抑制了 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>的生成。 由于离子气中氮气含量较多,极大地消耗了合金化区 中元素 Ti 的含量,从而抑制了 Al<sub>3</sub>Ti 的形成。因此, 采用氮、氩混合气体作为等离子气对 SiC<sub>p</sub>/Al 基复合 材料进行原位焊接时,焊缝显微组织是由基体铝合金 和 TiN、TiC、AlN 等新颗粒共同组成,进而抑制了 有害相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>和 Al<sub>3</sub>Ti 的生成。

## 2.4 氮气对焊缝性能的影响

### 2.4.1 硬度

焊缝显微硬度与氮气体积分数之间的关系如图 5 所示。可以看出,随氮气体积分数增大,焊缝的显微 硬度也随之增加。进而可以从另一个角度表明,填加 氮气后,焊缝的组织发生了变化。造成这种情况的主 要原因是生成的颗粒的种类与数目发生了变化。纯氩 时,焊缝中的增强相主要为 TiC、SiC 等颗粒,且数 目较少,从而造成整体硬度不高。加入氮气后,除原 有的颗粒外,还生成了高硬度的 TiN 颗粒,且随氮气 体积分数增大,TiN 的颗粒数目也随之增大,从而使 焊缝的整体硬度增加。



图 5 焊缝力学性能与氮气体积含量关系图

Fig.5 Curves of nitrogen volume fraction and mechanical properties of welded joint

### 2.4.2 拉伸性能

在室温下对试样进行拉伸实验,结果如图 5 所示。 可以看出,随等离子气中氮气体积分数的增加,焊缝 拉伸强度也随之增加。在氮气体积分数约占 15%时达 到最大值 233.5 MPa。之后,拉伸强度随等离子气中 氮气体积分数的增加而减少。造成这种情况的原因是 采用纯氩时,TiC 的生成建立在 SiC 的分解之上,从 而造成焊缝的总体颗粒减少,拉伸强度不高。而加入 氮气后,氮气分解与熔池中的 Ti、Al等元素反应,生 成的 TiN、AlN等物质可以作为新的增强相,弥补了 烧损的 SiC 增强相,从而使焊接接头的性能得到提高。 但随着氮气的增加,焊缝中产生气孔和裂纹的敏感性 增大,拉伸强度反而随氮气体积分数的增加而减少。

试样拉伸断口 SEM 照片如图 6 所示。其中图 6(a) 所示为采用纯氩作为等离子气进行等离子弧原位焊接 时的断口形貌。由图可见,断口组织中虽有韧性断口 形貌,但主要表现出脆性断裂。当氮气体积分数为 15% 时,如图 6(b)所示,韧窝组织较多,从而表现出较好 的拉伸性能。图 6(c)所示为氮气体积分数为 30%的焊 接试样拉伸断口形貌。由图可见,断口内气孔较多, 尺寸也较大,这些气孔的存在严重削弱了焊缝的力学 性能。实验表明,离子气中的氮气体积分数控制在 30% 以下较佳。





 $\varphi(N_2)=15\%$ ; (c)  $\varphi(N_2)=30$ 

# 3 结论

 采用含氮、氩混合等离子气对 SiC<sub>p</sub>/Al 基复合 材料进行等离子弧原位焊接,随氮气体积含量增大, 阳极热输入增加,焊缝熔深也相应增大。

2) 采用 Ar+N<sub>2</sub>作为离子气进行焊接,获得了由基体铝合金和 TiN、TiC、AIN 等新颗粒共同组成的焊缝显微组织,进而抑制了有害相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>和 Al<sub>3</sub>Ti 的生成。

3) 采用氮、氩混合等离子气进行焊接比采用纯氩 焊接具有更高的力学性能。但随着 N<sub>2</sub> 的增加,焊缝中 产生气孔和裂纹的敏感性增大。离子气中的氮气体积 含量控制在 30%以下较佳。

#### REFERENCES

- YAN Jiu-chun, XU Zhi-wu, WU Gao-hui, et al. Interface structure and mechanical performance of TLP bonded joints of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061Al composites using Cu/Ni composite interlayers[J]. Scripta Materialia, 2004, 51: 147–150.
- [2] 贺春林,李风琴,刘常升,等. SiC<sub>p</sub>/2024 Al 铝基复合材料的 耐蚀性[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 1074-1077.
  HE Chun-lin, LI Feng-qin, LI Chang-sheng, et al. Corrosion properties of SiC<sub>p</sub>/2024Al matrix composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(6): 1074-1077.
- [3] 雷玉成,袁为进,朱 飞,等. 等离子弧焊接 SiC<sub>p</sub>/Al 基复合 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. "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.

- [4] Gotman I, Koczak M J, Shtessel E. Fabrication of Al matrix in situ composites via selfpropagating synthesis [J]. Mater Sci Eng A, 1994, A187: 189–199.
- [5] 江润莲,赵玉涛,戴起勋,等. Al-Zr-O 体系反应合成原位复 合材料的微结构与磨损特性[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(12): 1986–1991.

JIANG Run-lian, ZHAO Yu-tao, DAI Qi-xun, et al. Microstructures and wear properties of in situ composite synthesized by direct melt reaction in Al-Zr-O system[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(12): 1986–1991.

[6] 陈茂爱,武传松,王建国. 焊丝成分对 SiC<sub>p</sub>/Al 基复合材料 MIG 焊焊缝组织及性能的影响[J]. 焊接学报,2003,24(5): 69-72. CHEN Mao-ai, WU Chuan-song, WANG Jian-ghuo. Effect of composition of welding wire on microstructure and mechanical properties of weld metal in SiC particle reinforced 6061 Al matrix composite[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(5): 69–72.

- [7] Ellis M B D. Joining of aluminum based metal matrix composites[J]. International Material Reviews, 1996, 41(2): 41–58.
- [8] 陈永来,尚敏佳,于利根,等. SiC<sub>p</sub>/6061A1 金属基复合材料 激光焊接研究[J]. 应用激光, 1999, 19(5): 289-292.
   CHEN Yong-lai, SHANG Min-jia, YU li-gen, et al. Laser beam welding of SiC particle reinforced 6061 aluminum alloy metal matrix composite [J]. Applied Laser, 1999, 19(5): 289-292.
- [9] 陈 刚, 雷玉成. 等离子弧焊对 SiC<sub>p</sub>/6061 复合材料颗粒 分布的影响[J]. 焊接学报, 2006, 27(7): 1-4.
   CHEN Gang, LEI Yu-cheng. Effects of plasma arc welding on particle distribution of SiC<sub>p</sub>/6061 composite[J]. Transactions of the China Welding Institu-tion, 2006, 27(7): 1-4.
- [10] 雷玉成,李彩辉,郁雯霞,等. 钨极氦弧焊焊接电弧数值分析[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2006, 27(1): 47-50.
   LEI Yu-cheng, LI Cai-hui, YU Wen-xia, et al. Numerical analysis on nitrogen protecting of TIG welding arc[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(1): 47-50.
- [11] Mussler B H. Advanced materials & powders[J]. Am Ceram Soc Bull, 2000, 79(6): 45–47.
- [12] Sheppard L M. Aluminum nitride: a versatile but challenge material [J]. Am Ceram Soc Bull, 1990, 69(11): 1801.
- [13] 崔春翔,吴人洁,张国定,等. 原位 TiC-AlN/Al 复合材料制 备及炉内气氛对反应的影响[J]. 复合材料学报, 1998, 15(1): 62-67.

CUI Chun-xiang, WU Ren-jie. ZHANG Guo-ding, et al. Fabrication of in situ TiC-AlN/Al composite and effect of atmosphere in furnace on the reaction[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1998, 15(1): 62–67.

[14] 陈永来. SiC<sub>p</sub>/6061Al 金属基复合材料焊缝"原位"合金化激光 焊接及其物理冶金问题研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2000: 64-65.

CHEN Yong-lai. 'In-situ' Weld-alloying/laser Beam Welding of SiC<sub>p</sub>/6061 Al MMC and the Related Physical Metallurgy Issues[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000: 64-65.

[15] 虞觉奇,易文质,陈邦迪,等.二元合金状态图集[M].上海: 上海科学技术出版社,1984:574.
YU Jue-qi, YI Wen-zhi, CHEN Bang-di, et al. Handbooks of Binary Alloy Phase Diagrams[M]. Shanghai: Shanghai Scientific Press, 1984: 574.

(编辑 何学锋)