

## SiC 颗粒增强 Al-Fe-V-Si 复合材料的 SiC/Al 界面形貌

贺毅强<sup>1</sup>, 王娜<sup>2</sup>, 乔斌<sup>1</sup>, 冯立超<sup>1</sup>, 陈志钢<sup>3</sup>, 陈振华<sup>4</sup>

(1. 淮海工学院 机械工程学院, 连云港 222005; 2. 淮海工学院 人事处, 连云港 222005;  
3. 湖南科技大学 机电学院, 湘潭 411201; 4. 湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

**摘要:** 采用喷射沉积工艺制备 SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 复合材料, 并通过热压和热轧工艺对沉积坯进行致密化; 通过高分辨电镜观察其 SiC/Al 界面形貌, 并对比热暴露后的界面形貌。结果表明: 复合材料主要存在两种 SiC/Al 界面, 一种是厚度为 3 nm 左右的晶态 Si 界面层, 且在界面附近的基体中生成细小的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相; 另一种是厚度为 5 nm 的非晶态 SiO<sub>2</sub> 界面层, 部分溶解的 SiC 颗粒向附近 Al 基体中注入游离态的 Si, 在界面附近形成 Si 的浓度梯度; 两种界面都具有良好的润湿性, 界面结合强度高; 经 640 °C 热暴露 10 h 后, SiC/Al 界面处生成的粗大 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 脆性相降低界面结合强度, 从而降低复合材料的力学性能。

**关键词:** 耐热铝合金; Al-Fe-V-Si 复合材料; SiC 颗粒; 喷射沉积; 界面

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

## SiC/Al interface feature of Al-Fe-V-Si alloy reinforced with SiC particles

HE Yi-qiang<sup>1</sup>, WANG Na<sup>2</sup>, QIAO Bin<sup>1</sup>, FENG Li-chao<sup>1</sup>, CHEN Zhi-gang<sup>3</sup>, CHEN Zhen-hua<sup>4</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China;  
2. Department of Human Resource, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China;  
3. College of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
4. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si composites were prepared by spray deposition, and the as-deposited preforms were hot pressed and subsequently rolled. The SiC/Al interface of the as-rolled composite sheets was observed by high resolution transmission electron microscopy (HRTEM). The results show that there are two kinds of SiC/Al interfaces in the composites. One is crystalline silicon transition layer with about 3 nm in thickness, and some dispersed Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> phases appear in the matrix near the interface. And the other one is amorphous silica layer with about 5 nm in thickness and SiC particles solve partly to inject Si into the matrix, resulting in Si concentration gradient. Both of the two kinds of interfaces are characterized with good wettability, which contributes to the strong bonding between SiC particles and Al matrix. Coarse Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> phases appear at the SiC/Al interface for the composite exposed at 640 °C for 10 h, which result in the interface weakening followed by decrease of the composite strength.

**Key words:** heat resistance aluminium alloy; Al-Fe-V-Si composite; SiC particle; spray deposition; interface

近年来人们采用不同方法制备复合材料以改进材料的力学性能, 同时降低成本、减轻质量, 使其适合

用作结构材料。与传统工程材料相比, 陶瓷颗粒如 SiC 颗粒(SiC<sub>p</sub>)增强金属基复合材料有许多优点: 高比强

基金项目: 江苏省高校自然科学研究资助项目(09KJD430001); 淮海工学院引进人才科研启动基金资助项目(KQ09028); 江苏省重点学科建设资助项目

收稿日期: 2009-12-24; 修订日期: 2010-04-25

通信作者: 贺毅强, 讲师, 博士; 电话: 0518-85895330; E-mail: ant210@sina.com

度、高弹性模量和拉伸强度、良好的抗蠕变性能以及加工性能<sup>[1-2]</sup>,因此在汽车、电子以及航空工业等领域有着广泛应用<sup>[3-4]</sup>。过去的研究主要是关于金属基复合材料的基体硬化、残余应力的影响以及室温下的断裂行为<sup>[5-7]</sup>,集中于 Al-Fe-V-Si 合金和 SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 的力学性能和蠕变行为<sup>[8-14]</sup>,但很少有研究涉及该复合材料的界面。界面对金属基复合材料的力学性能有着决定性的作用,如对其强度、韧性、断裂性能和疲劳强度都有着极其重要的影响。对于 SiC 颗粒增强 Al 基复合材料来说,在液相制备过程中 SiC 颗粒与铝液接触反应容易在界面处或界面附近生成 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相。如果在界面处形成大量不连续的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 层(针状、六角形板片)<sup>[3-4]</sup>,对其性能极为有害,如降低界面强度、增加腐蚀敏感性。因此,在材料制备过程中应当尽量避免形成大块的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相。主要有 3 种方法来抑制 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相的形成:1) 改变基体的化学成分,如在 Al 基体中添加 Si 来抑制界面反应<sup>[15]</sup>;2) 对增强粒子进行表面改性,如对 SiC 颗粒进行表面涂覆<sup>[16]</sup>和氧化处理<sup>[17]</sup>;3) 控制工艺参数以使界面反应程度最轻。多种复合材料制备方法如半固态成型法、粉末冶金法和喷射成型法得以应用。

增强体和基体通过界面结合在一起,构成复合材料整体,界面结合状态和强度对复合材料的性能有重要影响。本文作者发现在 SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 中同时存在晶态和非晶态的 SiC/Al 界面,并研究热暴露过程中界面形态的演变,对于优化该复合材料的制备工艺以及界定其应用范围都有着重要的意义。

## 1 实验

### 1.1 原料及成分设计

以名义成分为 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si/15SiC<sub>p</sub> (SiC<sub>p</sub> 的数据为体积分数,其余的为质量分数,%)的复合材料为研究对象,基体合金中 Fe 和 V 分别以 Al-40Fe 和 Al-40Fe-10V 中间合金的形式加入。首先,在中频感应炉中熔配 Al-40Fe、Al-40Fe-10V 中间合金;然后,再添加适量的纯铝和纯硅,在 1 020 ℃ 熔配 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 母合金。SiC 颗粒为 β-SiC,平均粒径约为 10 μm,在复合材料中体积分数约为 15%。将 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 母合金和 SiC 粉末在多层喷射沉积制备圆坯装置上进行喷射共沉积得到复合材料沉积坯圆坯料。

### 1.2 塑性加工

将沉积坯坯车削成直径为 155 mm 的圆柱形坯

料,然后在 1025T 挤压机上的挤压筒内进行热模压,锭坯加热温度为 450 ℃,保温 1 h,模具及挤压筒加热温度为 400 ℃,保温 1 h。热压得到的坯料垂直于高向锯成圆片,再将圆片锯成矩形板坯以进行轧制,轧制温度为 480 ℃,轧制前保温 1 h,道次间退火保温 20 min,采用石墨+机油润滑,轧速为 0.43 m/s。

### 1.3 显微组织观察

轧制薄板材料取样后,减薄至 0.1 mm 以下,利用硝酸和甲醇(1:3,体积比)作电解液,采用 35~45 V 电解双喷。采用电子 JSM-3010 型高分辨电子显微镜对 Al 晶粒与 SiC 颗粒的结合界面和析出相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 等进行观察,分析界面和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 对复合材料力学性能的影响机制。

## 2 结果与分析

有 4 种解释 SiC 颗粒和 Al 基体之间存在的结合状况<sup>[18-19]</sup>:1) 在基体和增强体之间存在一层 SiO<sub>2</sub> 层;2) 界面处的原子通过电子粘结;3) 通过界面反应生成另一种化合物如 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 形成化学粘结;4) 界面处互扩散结合。结果表明,在多层喷射共沉积 SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 复合材料中主要存在两种 SiC/Al 界面,一种是纳米级晶态界面层的 SiC/Al 界面扩散性结合,另一种是纳米级非晶态界面层的 SiC/Al 界面结合。

### 2.1 晶态 SiC/Al 界面层

图 1 所示为喷射沉积轧制态 SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 复合材料的 SiC/Al 界面的高分辨透射电镜照片。从图 1 可以清楚地看到, SiC/Al 界面为一平直的宽度在 3 nm 以下的直线结构,且晶格取向与两侧的基体 Al 以及 SiC 增强相颗粒均不相同,通过测量可知图中标出的晶面间距为 0.313 nm,与 Si 的(111)晶面间距相吻合,因此,可以推断该界面主要由 Si 原子组成。界面十分干净,没有出现任何缺陷,结合牢固,这与文献[20]的分析是一致的。此外, Si 纳米过渡层提高了界面润湿性,这样的界面结合对于提高复合材料的力学性能是十分有利的。

SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 复合材料在 SiC/Al 界面附近有 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相生成。图 2 所示为 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相的高分辨透射电镜照片。从图 2(a)可以看出,在 SiC/Al 界面附近生成的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相呈棒状(侧面为长方形),长度约为 40 nm,直径约为 10 nm,长径比约为 4:1。从图 2(b)可以清楚地看出, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相具有微孪晶结构,其对称轴以及晶面间

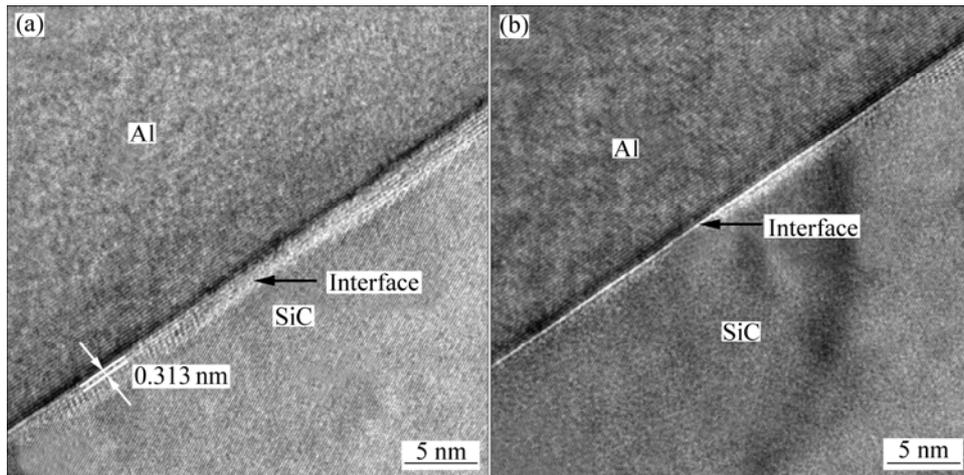


图1 晶态 SiC/Al 界面的高分辨透射电镜照片

Fig.1 HRTEM micrographs of crystalline SiC/Al interface: (a) Lower magnification; (b) Higher magnification

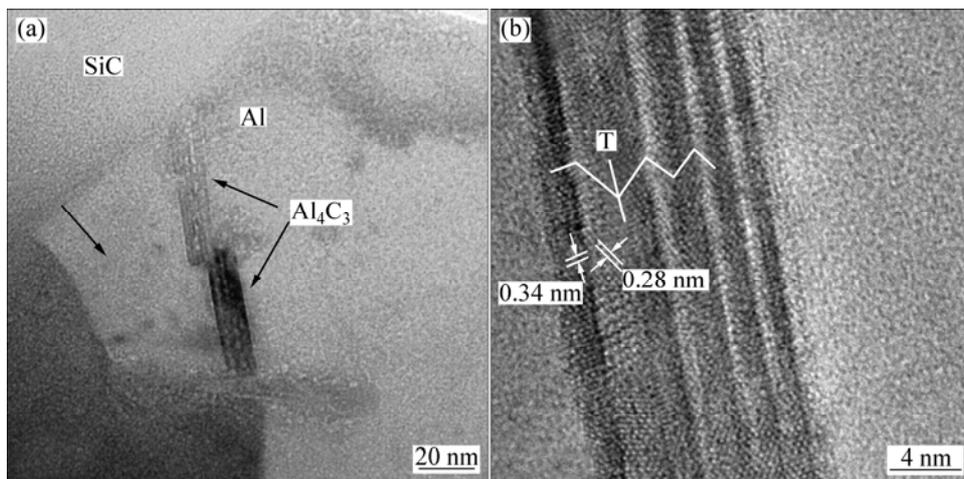


图2 晶态 SiC/Al 界面附近  $Al_4C_3$  相的高分辨透射电镜照片

Fig.2 HRTEM micrographs of  $Al_4C_3$  phases near crystalline SiC/Al interface: (a) Lower magnification; (b) Higher magnification

距也在该图标出。 $Al_4C_3$ 相以孪晶方式存在,属于六方晶系并以(003)面为孪晶面,以[001]方向为旋转轴的 $180^\circ$ 二次旋转孪晶;其中,(003)面平行于杆的长轴方向,[001]方向垂直于杆的长轴方向;杆的长轴生长方向为[210],以(003)为孪晶面,以[001]方向为旋转轴的 $180^\circ$ 二次旋转孪晶<sup>[21]</sup>。

在 SiC/Al 复合材料板材的制备过程中,由于加工温度较高,达 480 ,且保温时间较长,存在着 Al 与 SiC 的轻度反应,并在此反应中生成了 Si 和  $Al_4C_3$ ,反应方程式如下<sup>[5]</sup>:



并且,随着温度的升高,式(1)所示的化学反应程度逐渐增大<sup>[22]</sup>。文献[23]指出,上述化学反应可以在低至

450 的温度下进行。

在  $SiC_p/Al-Fe-V-Si$  复合材料的制备过程中,复合材料内部发生了式(1)的化学反应。在喷射沉积以及后续的热加工过程中,复合材料所处的温度较高,时间较长, SiC 颗粒的表面与 Al 基体相互接触并发生化学反应;在接触的同时, SiC 颗粒的表面溶解与扩散,与基体中的 Al 发生了反应。生成的 Si 因为扩散速率比 C 的低,所以部分 Si 存在于 SiC/Al 的界面,而另一部分扩散到 Al 基体中。EDS 分析结果证实了 Si 元素向 Al 基体方向的扩散。通过分析界面化学反应的可能性并结合测定的界面原子的晶面间距与 Si 的(111)晶面间距十分吻合,可以判定界面主要是由 Si 原子所组成的。此外,文献[5]也证实了这样的界面组成形态。扩散速率较快的 C 元素迅速地扩散到基体 Al 中,并

与 Al 元素发生化学反应生成  $Al_4C_3$  相。虽然在喷射沉积过程中, SiC 颗粒接触基体液滴时温度较高, 但由于冷却速率快, 二者在高温下停留时间较短。因此 SiC 增强颗粒与 Al 基体生成的  $Al_4C_3$  相尺寸小(纳米尺度)。细小的  $Al_4C_3$  相粒子弥散分布在基体中, 不仅未对复合材料性能造成不利影响, 反而可以进一步提高复合材料的力学性能<sup>[24]</sup>。

## 2.2 非晶态 SiC/Al 界面层

在喷射沉积  $SiC_p/Al-Fe-V-Si$  复合材料中的另一种 SiC/Al 界面是如图 3 所示的  $SiO_2$  非晶界面层。当 SiC 颗粒在高于 800 °C 暴露在空气中时, SiC 颗粒由于氧化在其表面生成一层  $SiO_2$ ,  $SiO_2$  层厚度取决于暴露的温度和时间。在喷射沉积过程中, 当 SiC 颗粒插入雾化液滴时同时卷入空气, SiC 颗粒通过熔融液滴热传递加热到高于 800 °C, SiC 氧化在其表面形成一层约为 5 nm 厚的  $SiO_2$  非晶界面层(见图 3(c))。通常认为在 SiC 颗粒表面自然生长的  $SiO_2$  过渡层能起到保护作用, 防止生成粗大的  $Al_4C_3$  脆性相, 因而有利于改善

复合材料的力学性能。同时,  $SiO_2$  能提高 SiC 与 Al 基体之间的润湿性, 良好的润湿性是增强颗粒和液相之间产生良好粘结的必要条件, 从而使载荷从基体传递到增强颗粒上而不产生裂纹。SiC 颗粒氧化层的另一个有益作用就是能清除界面处的污染物, 吸收杂质和水分, 从而形成一个干净、均匀的  $SiO_2$  保护界面层(见图 3(a))。还可以从图 3(b)中看到大小约为数纳米的胞状组织, 这可能是由于 SiC 颗粒的部分溶解向附近 Al 基体中注入的游离态的 Si。

表 1 列出了图 3(a)中 A、B、C、D 处 Si 原子的含量, 可以看出在 SiC 颗粒附近的基体中存在明显的 Si 浓度梯度。从离 SiC 颗粒最近的 A 点的 30.13%(摩尔分数), 下降到离 SiC 颗粒 0.2  $\mu m$  处 B 点的 28.39%, 再下降到离 SiC 颗粒 0.5  $\mu m$  处 C 点的 25.32%, 到离 SiC 颗粒 0.8  $\mu m$  处 D 点的 21.22%。随着离 SiC 颗粒距离的增大, 基体中的 Si 含量逐渐下降, 但即使离 SiC 颗粒最远处的 D 点其 SiC 含量也远高于基体合金中的平均硅含量。因此, 可以推断在复合材料的制备过程中 SiC 颗粒表面部分溶解, 向基体 SiC 颗粒中注

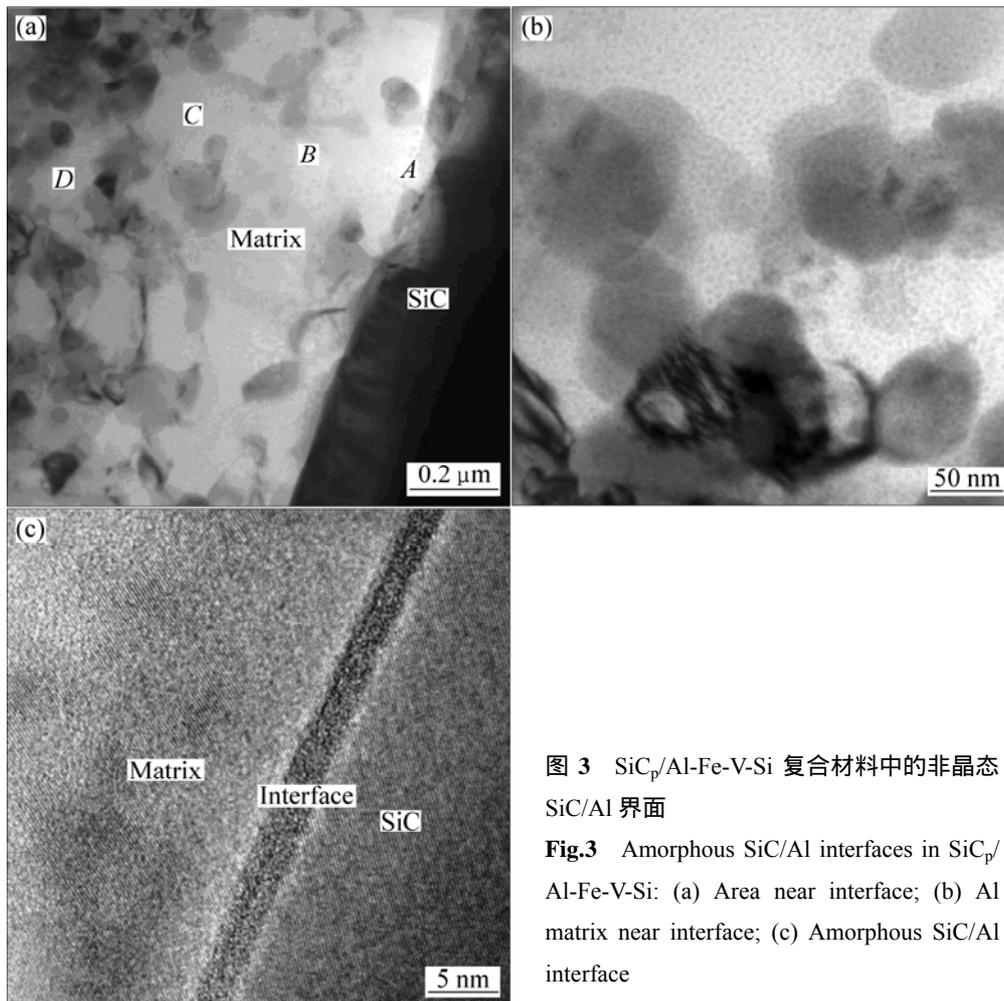


图 3  $SiC_p/Al-Fe-V-Si$  复合材料中的非晶态 SiC/Al 界面

**Fig.3** Amorphous SiC/Al interfaces in  $SiC_p/Al-Fe-V-Si$ : (a) Area near interface; (b) Al matrix near interface; (c) Amorphous SiC/Al interface

表1 图3(a)中A、B、C、D处Si的含量

Table 1 Si concentrations at points A, B, C, D in Fig.3(a) (mole fraction, %)

A	B	C	D
30.13	28.39	25.32	21.22

入 Si, 从而造成 SiC 颗粒附近基体合金中的 Si 浓度梯度。

### 2.3 热暴露过程中的界面演变

在高温制备和热暴露过程中, 由于 Al 基体和 SiC 颗粒增强体接触存在着发生界面反应的可能性和多样性, 这些界面反应影响着界面结合状态, 最终对复合材料的性能产生重大影响。图 4 所示为 SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 材料热暴露后的 SiC/Al 界面形貌。从图 1 和图 3 可以看出轧制板材中 SiC/Al 界面干净, 看不到明显的界面反应物。前面已经讨论过轧制态板材中的 SiC/Al 界面, 在 SiC/Al 界面附近有纳米级的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 生成, 而当 SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 在 640 °C 下热暴露 10 h 后, 界面上生成了粒度约为 1 μm 的块状 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相。

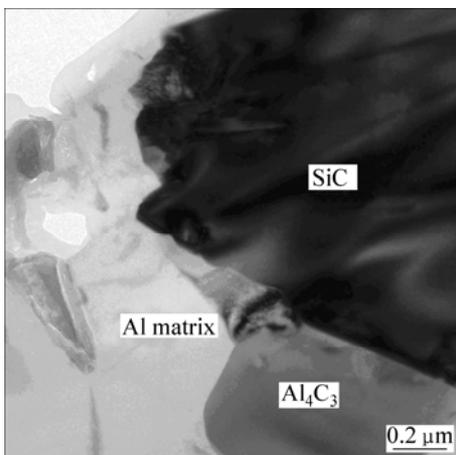


图4 SiC/Al 界面在 640 °C 热暴露 10 h 后的 TEM 像

Fig.4 TEM image of SiC/Al interface after being exposed at 640 °C for 10 h

HAMBLETON 等<sup>[25]</sup>将 SiC 颗粒增强 Al-Fe-V-Si 材料在 600 °C 暴露了 100 h 后观察到了 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相, 而没有看到 Al<sub>14</sub>Fe<sub>3</sub> 相。SHI 等<sup>[26]</sup>将 SiC 颗粒增强的 2014Al 在 620 °C 暴露 2 h 后观察到了 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相, 并且认为 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相结构为六方形的片状结构, 然后通过六方形片状结构堆垛。SiC<sub>p</sub>/Al 基复合材料的界面反应过程分为以下几个步骤<sup>[27]</sup>: 1) SiC 在 Al 液的作用下溶解; 2) Si 和 C 原子自 SiC 表面向 Al 基体中扩散; 3) Si 和 C 在浓度及温度合适的条件下在 SiC/Al 界面发生界面反应, 形

成界面反应产物。通过 SiC/Al 界面附近基体的成分分析, 发现 Si 浓度梯度, 也证实了 SiC 的溶解和扩散, 且 SiC 在 Al 中的溶解速度与 Si 和 C 在 Al 液中的扩散速率有关, 温度越高, 扩散速率越高, 溶解也越快。

在复合材料的制备过程中, 界面反应一方面能有效地改善界面润湿性能, 提高界面强度; 另一方面, 过度的界面反应使界面脆弱, 反而降低材料的性能。在高温下由于基体和增强体的化学活性迅速提高, 温度越高反应越激烈, 在高温下停留时间越长, 反应越严重, 因此在制备方法和工艺参数的选择上首先考虑制备温度、高温停留时间, 以防过度的界面反应。

## 3 结论

1) 在多层喷射共沉积 SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 复合材料中主要存在两种 SiC/Al 界面, 一种是晶态界面层的 SiC/Al 界面, 另一种是非晶态界面层的 SiC/Al 界面。两种界面都有良好的润湿性能, 保证了 SiC 颗粒与 Al 基体结合的界面强度。

2) 晶态 SiC/Al 界面为一平直的厚度在 3 nm 左右的 Si 原子界面层。SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 复合材料在 SiC<sub>p</sub>-Al 界面附近有 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相的生成, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相呈圆棒状(侧面为长方形), 长度约为 40 nm, 直径约为 10 nm, 长径比约为 4:1, 细小的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相粒子弥散分布在基体中。

3) 非晶态 SiC/Al 界面为厚度约为 5 nm 的 SiO<sub>2</sub> 非晶界面层, SiO<sub>2</sub> 过渡层能起到保护层的作用, 从而防止生成粗大的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 脆性相, 提高 SiC 与 Al 基体之间的润湿性, 清除界面处的污染物。在制备和加工过程中 SiC 颗粒部分溶解, 向基体中注入 Si, 在界面中形成 Si 的浓度梯度。

4) 在高温下长时间的热暴露后, 过度的界面反应在 SiC/Al 界面生成粗大的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 脆性相降低了界面结合强度, 从而降低了复合材料的力学性能。SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 经 640 °C 下热暴露 10 h 后, 界面上生成了粒度约为 1 μm 的块状 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相。

## REFERENCES

- [1] 于 澍, 李云平, 李溪滨. Ni 涂覆 SiC 颗粒增强 Al-Fe-V-Si 耐热铝基复合材料[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 1094-1098.  
YU Shu, LI Yun-ping, LI Xi-bing. Mechanical properties of Ni-coated SiC particulates reinforced heat resistance aluminium matrix composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,

- 2001, 11(6): 1094-1098.
- [2] 李云平, 李溪滨. SiC<sub>p</sub>颗粒增强耐热铝基复合材料孔隙率与力学性能[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 2002, 33(2): 177-180.  
LI Yun-ping, LI Xi-bing. The relationship of viscosity and properties of SiC<sub>p</sub> particulates reinforced heat resistant alumina matrix composites[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 2002, 33(2): 177-180.
- [3] LEE J C, PARK S B, SEOK H K, OHB C S, LEEA H I. Prediction of Si contents to suppress the interfacial reaction in the SiC<sub>p</sub>/2014Al composites[J]. Acta Mater, 1998, 46(8): 2635-2643.
- [4] LEE J C, BYUN J Y, PARK S B, LEE H I. Prediction of Si contents to suppress the formation of Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> in the SiC<sub>p</sub>/Al composite[J]. Acta Mater, 1998, 46(5): 1771-1780.
- [5] LEE J C, SEOK H K, LEE H I. Alloy design of thixoformable wrought SiC/Al alloy composites[J]. Materials Research Bulletin, 1999, 34(1): 35-42.
- [6] SRIVATSAN T S, LAVERNIA E J. Use of spray techniques to synthesize particulate-reinforced metal-matrix composites[J]. Journal of Materials Science, 1992, 27(22): 5965-5981.
- [7] GAO N F, MIYAMOTO Y, ZHANG D. Dense Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> prepared by reactive HIP[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(18): 4385-4392.
- [8] CHEN Zhen-hua, HE Yi-qiang, YAN Hong-ge, CHEN Zhi-gang, CHEN Gang. Ambient temperature mechanical properties of Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si/SiC<sub>p</sub> composite[J]. Mater Sci Eng A, 2007, 460/461: 180-185.
- [9] CHEN Zhen-hua, HE Yi-qiang, YAN Hong-ge, YIN Xian-jue, CHEN Zhi-gang, CHEN Gang. Microstructure and mechanical properties of Al-Fe-V-Si/SiC<sub>p</sub> composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(s1): s238-s243.
- [10] 肖于德, 钟掘, 黎文献, 马正青. 快速凝固 Al-Fe-V-Si 合金喷射沉积坯的显微组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(11): 1869-1875.  
XIAO Yu-de, ZHONG Jue, LI Wen-xian, MA Zheng-qing. Microstructural features and mechanical properties of spray deposited billets of rapidly solidified Al-Fe-V-Si aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(11): 1869-1875.
- [11] 熊柏青, 张永安, 韦强, 石力开, 孙玉峰, 沈宁福. 喷射成形 Al-F-V-Si 系耐热铝合金的制备工艺和性能[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 250-254.  
XIONG Bo-qing, ZHANG Yong-an, WEI Qiang, SHI Li-kai, SUN Yu-feng, SHEN Ning-fu. Technique and property of heat resisting Al-Fe-V-Si alloys prepared by spray forming process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(2): 250-254.
- [12] 陈振华, 贺毅强, 陈志钢, 尹显觉, 陈刚. SiC<sub>p</sub>/Al-11.7Fe-1.15V-2.4Si 复合材料的显微组织及室温力学性能研究[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(6): 858-863.  
CHEN Zhen-hua, HE Yi-qiang, CHEN Zhi-gang, YIN Xian-jue, CHEN Gang. Microstructure and ambient temperature mechanical properties of SiC<sub>p</sub>/Al-11.7Fe-1.15V-2.4Si composite [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(6): 858-863.
- [13] 贺毅强, 陈振华, 王娜, 郝亮, 陈志钢, 陈刚. SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si 复合材料组织与性能的热稳定性[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(3): 432-438.  
HE Yi-qiang, CHEN Zhen-hua, WANG Na, HAO Liang, CHEN Zhi-gang, CHEN Gang. Thermostability and microstructure of SiC<sub>p</sub>/Al-Fe-V-Si composite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(3): 432-438.
- [14] 詹美燕, 陈振华, 夏伟军. 喷射沉积-轧制工艺制备的 FVS0812 薄板的高温组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(8): 1348-1352.  
ZHAN Mei-yan, CHEN Zhen-hua, XIA Wei-jun. Microstructure and properties of spray-deposited heat-resistant FVS0812 aluminum alloy at high temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(8): 1348-1352.
- [15] FERRO A C, DERBY B. Wetting behaviour in the Al-Si/SiC system: Interface reactions and solubility effects[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43: 3061-3073.
- [16] THANH L N, SUERY M. Influence of oxide coating on chemical stability of SiC particles in liquid aluminium[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25: 2781-2786.
- [17] LLOYD D J, LAGACE H, MCLEOD A, MORRIS P L. Microstructural aspects of aluminium-silicon carbide particle composites produced by a casting method[J]. Mater Sci Eng A, 1989, 107: 73-80.
- [18] TAJIMA Y, KINGERY W D. Grain-boundary segregation in aluminium-doped silicon carbide[J]. Journal of Materials Science, 1982, 17(2): 2289-2297.
- [19] CAO L, GENG L, YAO C K, LEI T C. Interface in silicon carbide whisker reinforced aluminum composites[J]. Scripta Metallurgica, 1989, 23(2): 227-230.
- [20] ROMERO J C, ARSENAULT R J. Anomalous penetration of Al into SiC[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43: 849-857.
- [21] 文九巴, 张金, 张伟, 张智强, 张永辉, 张海峰. 热浸渗铝钢中 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相的晶体学特征[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(2): 75-78.  
WEN Jiu-ba, ZHANG Jin, ZHANG Wei, ZHANG Zhi-qiang, ZHANG Yong-hui, ZHANG Hai-feng. The crystallographic features of Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> phase in hot-dip aluminized steel[J]. Transactions of Metals and Heat Treatment, 2006, 27(2): 75-78.
- [22] 张永俐, 罗素华. SiC-Al 界面 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的生成及其控制[J]. 材料

- 科学与工程, 1998, 16(1): 32-35.
- ZHANG Yong-li, LUO Su-hua. The formation and control of  $Al_4C_3$  at the interface of SiC-Al[J]. Materials Science and Engineering, 1998, 16(1): 32-35.
- [23] PARK K, LUCAS J P. Moisture effect on SiCp/6061 Al MMC: Dissolution of interfacial  $Al_4C_3$ [J]. Scripta Metallurgica, 1997, 37(4): 511-516.
- [24] GARIBAY-FEBLES V, CALDERON H A, ROBLES-HERNÁNDEZ F C, UMEMOTO M, MASUYAMA K, CABANAS J G. Production and characterization of (Al, Fe)-C (graphite or fullerene) composites prepared by mechanical alloying[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2000, 15(4): 547-576.
- [25] HAMBLETON R, JONES H, RAINFORTH W M. Effect of alloy composition and reinforcement with silicon carbide on the microstructure and mechanical properties of three silicide dispersion strengthened aluminium alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 304/306(1/2): 524-528.
- [26] SHI Z L, YANG J M, LEE J C, ZHANG D I, LEE H I, WU R J. The interfacial characterization of oxidized SiCp/ 2014 Al composites[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 303: 46-53.
- [27] 喇培清, 许广济, 丁雨田. 高体积分数 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料中界面现象研究[J]. 材料工程, 1997(9): 28-30.
- LA Pei-qing, XU Guang-ji, DING Tian-yu. TEM and XRD investigation of interfacial phenomenon in high volume fraction SiC<sub>p</sub>/Al composites[J]. Materials Engineering, 1997(9): 28-30.

(编辑 杨华)