

P/ M 制备的 SiC_p/ Al 复合材料的界面结构^①

樊建中 姚忠凯 杜善义

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 100051)

杨改英 孙继光 郭 宏 李义春 张少明 石力开

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

摘 要 粉末冶金制备的 SiC_p/ Al 复合材料中, 基体与增强体之间存在多种界面类型。除了少数的干净界面、台阶界面外, 具有纳米厚度的界面微区在材料中占大多数。进一步研究发现: 界面微区是铝多晶体, 而且微区中存在镁元素富集, 并分布着点状的 MgAl₂O₄ 氧化物。

关键词 粉末冶金 SiC_p/ Al 界面结构

中图法分类号 TB323

颗粒增强金属基复合材料具有比强度高、比刚度高、热膨胀系数低、导热性能好等优异性能, 并可采用传统加工设备进行二次加工, 制备加工成本较低, 应用前景十分广泛^[1]。然而, 这类材料的某些性能不够理想或不稳定等问题严重阻碍了复合材料的工业化应用及发展^[2]。究其原因, 除了制备工艺不完善导致材料中产生缺陷(如增强体分布不均匀)外, 基体与增强体之间的界面结合还未达到预期的状态也是影响复合材料力学性能的关键因素。颗粒增强金属基复合材料所受的载荷由基体和增强体共同承担^[3], 基体与增强体之间的界面完成了载荷从基体向增强体的传递。因此, 界面结合状况的研究一直是复合材料领域极为重要的研究课题。众多研究表明, SiC/ Al(包括晶须和颗粒增强体)复合材料界面结合机制主要分为 4 种: 机械结合、化学键结合、界面扩散结合、界面化学反应结合。虽然对有关复合材料界面已进行了大量研究, 但由于复合材料界面现象十分复杂, 目前的制备工艺技术和人们对界面的认识水平还难以准确控制界面状况, 提高材料力学性能。复合材料的界面结构主要取决于

增强体和基体的性质以及材料的制备方法。目前, 关于采用铸造法或压铸法制备的 SiC_p/ Al 复合材料界面结构已有大量文献报道。但 P/ M 制备的 SiC_p/ Al 复合材料界面研究文献报道很少。因此, 本文针对 P/ M 制备的 SiC_p/ Al 复合材料, 从界面形貌观察、结构和成分分析等方面, 研究 SiC_p/ Al 复合材料界面结构, 以揭示 P/ M 对材料界面结构的影响。

1 材料及试验方法

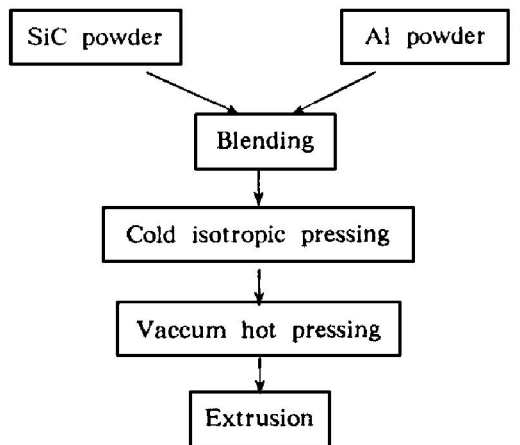
本文采用的基体材料为 7075 和 6061 铝合金, 化学成分如表 1 所示。增强体为 α -SiC 颗粒, 平均尺寸为 3.5 μ m。材料采用粉末冶金法制备, 工艺路线如图 1 所示。粉末混合采用干混方式, 混料时间为 7h, 7075Al 基和 6061Al

表 1 基体合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of matrix alloy

	Cu	Mg	Mn	Si	Zn	Cr	Al
7075Al	1.52	2.93	—	—	5.54	0.28	bal
6061Al	0.45	0.67	0.27	0.88	—	—	bal

① 国家自然科学基金资助项目 59631080 收稿日期: 1996- 10- 04; 修回日期: 1997- 04- 28
樊建中, 男, 28 岁, 博士研究生

图1 SiC_p/Al 复合材料制备工艺流程图Fig. 1 Flowing chart of fabrication of SiC_p/Al composites

基复合材料的真空热压温度分别为 $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $620\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高于基体固相线温度 (7075Al 和 6061Al 的固相线温度分别为 $483\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $582\text{ }^{\circ}\text{C}$), 材料挤压比为 19。

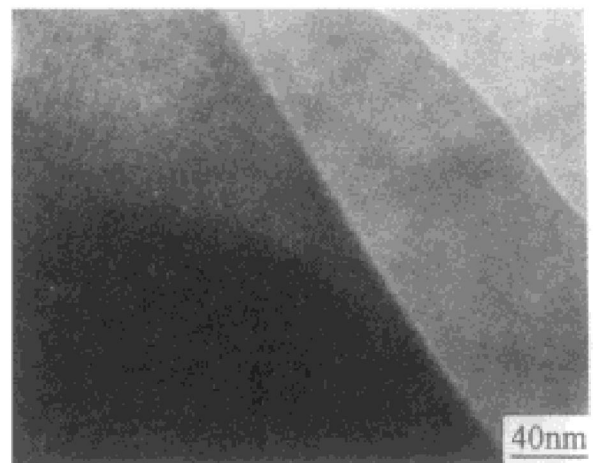
复合材料中界面微观结构、化学成分分析在 JEOL-2000FX 分析型电子显微镜上进行。采用离子减薄法制备透射电镜 (TEM) 样品。

2 实验结果

2.1 $\text{SiC}_p/7075\text{Al}$ 复合材料的界面结构

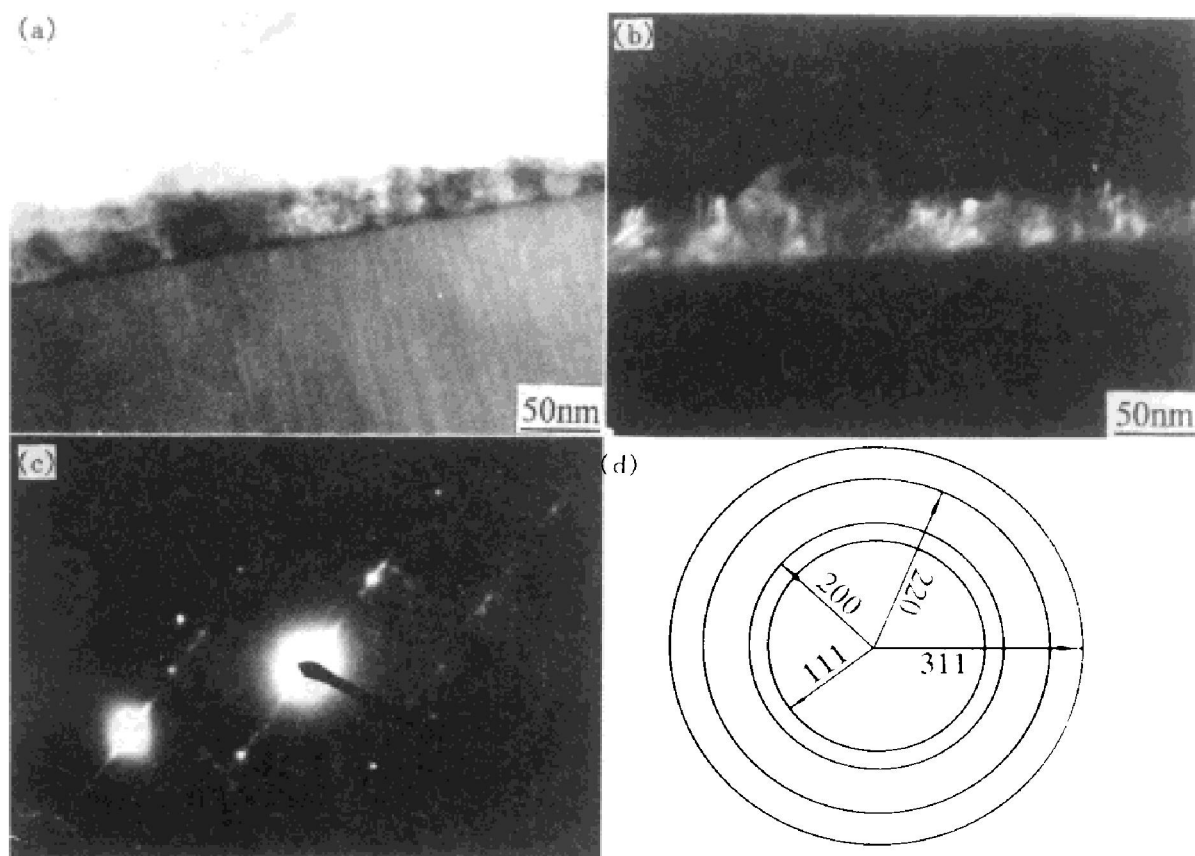
大量观察发现, P/M $\text{SiC}_p/7075\text{Al}$ 复合材料界面基本上分为二种类型。一种是界面干净、平直, 具有二维性质的特点, SiC 颗粒表面形貌没有改变, 如图 2 所示。另一种是基体和增强体之间存在宽约几十 nm 的界面微区, 增强体表面形貌无变化。图 3(a) 和 3(b) 给出了界面明场像和暗场像。由图中看出, 铝和 SiC 之间存在明显的界面微区, 界面微区的衬度不同于铝基体, 微区内分布着与微区本身衬度不同的点状物质, 这种类型界面在材料中占多数。图 3(c) 给出了界面微区的选区衍射结果, 由于界面微区宽度较小, 采用选区衍射分析界面结构较为困难。因此, 图 3(c) 给出的衍射图中除了弱的界面微区衍射斑外, 还包括 SiC 衍射斑。图 3(d) 的标定结果发现界面微区是面心

立方铝的多晶体, 并且图 3(b) 界面暗场像是由铝的 (111) 晶面产生的。界面的形貌观察和衍射分析发现: 尽管界面微区仍然是铝晶体, 但其衬度不同于界面微区附近的铝基体, 而且界面微区中还分布有点状物质。这是由于材料热压温度超过基体合金固相线温度, 导致铝合金粉末表面局部熔化。当其凝固结晶时, 为了减小铝和 SiC 之间界面能, 铝液结晶后的晶体取向在很大程度上取决于 SiC 的六方结构, 因此, 界面微区中铝晶粒的晶体取向与周围基体的晶体取向存在一些差异, 导致界面微区与基体的衬度有所不同; 此外, 铝液凝固过程中, 发生基体合金元素在界面处偏聚^[4] 或者产生新相, 如尖晶石^[5, 6] 等, 导致界面微区中存在点状物质。后面的 6061Al 基复合材料的研究结果证实了这一点。

图2 $\text{SiC}_p/7075\text{Al}$ 复合材料界面形貌Fig. 2 Interfacial morphology of $\text{SiC}_p/7075\text{Al}$ composites

2.2 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 复合材料界面结构

6061 基复合材料的界面类型与 7075 基复合材料类同, 除了少数干净、具有二维性质的界面外, 大多数界面表现为基体和增强体之间存在纳米厚度的区域, 并且界面微区分布有点状物质。能谱分析发现界面微区存在镁元素富集。事实上, 基体合金元素在 SiC_p/Al 界面处富集是一种普遍现象^[4, 7, 8], 特别是在粉末冶金液相烧结或者高于基体固相线温度热压的条

图3 SiC_p/7075Al 复合材料界面形貌**Fig. 3 Interfacial morphology of SiC_p/7075Al composites**

(a) —Bright field; (b) —Dark field; (c) —Selected diffraction pattern;

(d) —Diffraction result of SiC_p/7075Al composites

件下, 镁元素富集最为严重。微衍射分析表明, 界面区点状物质是 MgAl_2O_4 , 由于 MgAl_2O_4 的(220)面间距 d_{220} ($= 0.2858 \text{ nm}$) 与对应的 MgO 、 Al_2O_3 的面间距不等, 界面上可能出现的氧化物中除了 MgAl_2O_4 外, 其它都不与衍射斑符合, 因此我们仍可确定界面微区点状物质是 MgAl_2O_4 。界面上生成氧化物通常是由于在基体中含有镁元素^[9]、基体粉末表面氧化(或 SiC 表面氧化^[6]), 以及在高于基体固相线温度压制的情况下, 原始铝粉末表面氧化层(铝粉表面存在 $0.65\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ ^[5])与基体中镁元素反应生成更稳定的 MgO 或 MgAl_2O_4 , 或者, 当 SiC 表层存在 SiO_2 时, 基体合金元素与 SiO_2 反应生成 MgAl_2O_4 ^[6]。

同样, 6061 铝基复合材料中存在 SiC 表面形貌变化, 如图 4 所示。由图可见, 界面上出

现了明显的台阶, 通过研究界面台阶及其电子衍射谱发现: 台阶晶面垂直于 $[0001]_{\text{SiC}}$ 和 $[202]_{\text{Al}}$ 方向, 即 $(0001)_{\text{SiC}} // (202)_{\text{Al}}$ 。台阶界面的产生是由于在高于基体固相线温度热压时, 液相基体对 SiC 择优损伤, 并且陶瓷粉末制备产生的表面损伤也影响 SiC 颗粒损伤途径; 此外, SiC 晶体具有取向各向异性, 当液相基体与 SiC 颗粒结合时, 界面能具有各向异性的特点, 为了减小系统界面能, SiC 表面的高能量位置发生溶解, 从而产生台阶界面, 使得与基体结合的 SiC 晶面都是低能量低指数晶面^[10]。

3 结论

(1) 粉末冶金法制备的 SiC_p/Al 复合材料存在多种界面类型。除了少数干净界面、台阶

界面外, SiC 与铝之间存在纳米级厚度的界面微区在材料中占大多数。

(2) 界面微区是铝多晶体, 微区内存在镁元素富集, 并分布着点状的 MgAl₂O₄ 氧化物。

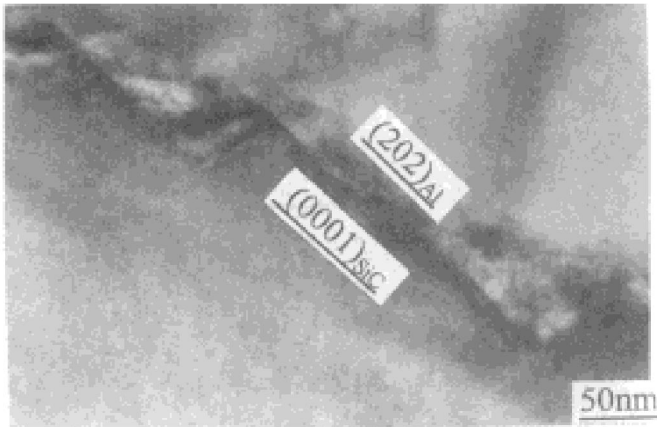


图4 SiC_p/6061Al 界面形貌

Fig. 4 Interfacial morphology of SiC_p/6061Al composites

REFERENCES

1 Lloyd D J. International Materials Reviews, 1994,

39 (1): 1.

2 Huang Zewen(黄泽文). In: Proc 2th Youth Annu Meeting of Chinese National Association of Science and Technology(中国科学技术协会第二届青年学术年会论文集). Beijing: Science and Technology Press of China, 1995: 41.

3 Clyne T W and Withers P J. An Introduction to Metal Matrix Composites. Cambridge: Cambridge University Press, 1993: 8.

4 Strangwood M. Scripta Metallurgia et Material, 1990, 24: 1483- 1487.

5 Janowski G M and Pletka B J. Material Science and Engineering, 1990, A129: 65.

6 Ribes H. Materials Science and Technology, 1990, 6 (7): 621.

7 Foo K S, Banks W M and Craven A J. Composites, 1994, 25 (7): 677.

8 Nutt S R and Carpenter R W. Material Science and Engineering, 1985, 75: 169.

9 Ma Zongyi(马宗义). Acta Metallurgica, Sinica(金属学报), 1994, 30 (9): 420.

10 Handwerker C A, Cahn J W and Manning J R. Material Science and Engineering, 1990, A126: 173.

INTERFACIAL STRUCTURE OF SiC_p/Al COMPOSITES MADE BY POWDER METALLURGY

Fan Jianzhong, Yao Zhongkai and Du Shanyi

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China

Yang Gaiying, Sun Jiguang, Guo Hong, Li Yichun, Zhang Shaoming and Shi Likai

General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China

ABSTRACT There are several types of interface in SiC_p/Al composites fabricated by powder metallurgy. Besides a few of the planar and clean interfaces, there are a large number of micro-interface zones between the reinforcements and the matrix, which comprised of the aluminium crystals with different orientation from the Al matrix near the interface zone, Mg segregation and MgAl₂O₄ spinel particles.

Key words powder metallurgy SiC_p/Al interfacial structure

(编辑 黄劲松)