

# 3D-Si/LG5 复合材料微观组织及热物理性能研究

修子扬, 陈国钦, 王晓峰, 武高辉, 邓宗权

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**采用压力浸渗技术制备 Si<sub>p</sub>/LG5 复合材料并对其进行高温扩散处理。组织观察表明:复合材料增强体形貌经过高温扩散处理后由不规则的尖角形状转变为三维网络结构(3D)。对 3D-Si/LG5 复合材料界面的研究表明,与高温扩散处理前复合材料的界面相比,三维网络结构 3D-Si/LG5 复合材料的界面更光滑,界面结合程度也更好。三维网络结构 3D-Si/LG5 复合材料界面处及基体合金内部有 Si 析出,基体合金中存在着孪晶;三维网络结构 3D-Si/LG5 复合材料的平均线膨胀系数与高温扩散处理前相比,降低了 10.5%;增强体三维网络化减少界面及基体中大量细小弥散的 Si 析出,使得三维网络 3D-Si/LG5 复合材料的热导率变化不大。

**关键词:** Si<sub>p</sub>/LG5; 网络结构; 微观结构; 热膨胀系数; 热导率

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2010)01-0065-04

近年来,利用空间网络结构增强体,采用浸渗技术制备新型的铝基复合材料,已引起了人们的广泛关注<sup>[1]</sup>。这种复合材料以金属为基体,以具有网络结构的陶瓷或骨架为增强相,具有三维网络结构特征,相互缠结和盘绕,互相贯穿和渗透,从而具有高耐磨性、高断裂强度、高比强度和可控制的电、热性能,在航天航空、汽车、电子、机械制造等工业领域展示了广泛的应用前景<sup>[2]</sup>。网络结构增强体具有特殊的空间拓扑结构,与轻质铝合金有机地结合在一起,形成新型的互联互通复合材料(IPMCMs),使材料具有质量轻、高比模量、高比强度、低热膨胀系数等特点<sup>[2-7]</sup>。目前,运用热等静压法(Hot Isostatic Pressing)<sup>[2,3]</sup>、原位自生法(In situ Reactive Synthesis Method)<sup>[2]</sup>、浸渗法(Infiltration Technique)<sup>[2,4-7]</sup>等可以制备出三维网络结构增强金属基复合材料。

但用这些方法制备三维网络结构增强金属基复合材料都很不成熟,相关文献报道很少,有的甚至只给出了材料设计制备的思路<sup>[2]</sup>。

为此,本研究选取平均粒度为 10 μm 的高纯 Si 颗粒作为增强体, LG5 纯铝为基体,采用压力浸渗法制备出复合材料后,通过高温扩散处理的方式,使得增强体 Si 由不规则的尖角形状转变为光滑的三维(3D)网络形状,改善 Si-Al 界面,进而改善复合材料的性能。

## 1 实验

收稿日期: 2009-01-16

基金项目: 国家“863”计划(2003AA305110); 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划(HITQJNS.2008.057)资助项目

作者简介: 修子扬,男,1975年生,博士,讲师,哈尔滨工业大学基础与交叉科学研究院,黑龙江 哈尔滨 150001,电话: 0451-86412164, E-mail: xiuziyang@hit.edu.cn

试验材料以高纯 Si 粉为增强体,基体合金选用 LG5,采用压力浸渗法制备后,在密封容器中进行 700 ℃, 2 h, 0.2 MPa 的高温扩散处理。

利用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜观察 Si/Al 复合材料中颗粒增强体的形态及分布。利用 Philips CM-12 和 JEOL200CX 透射电镜(TEM)进一步观察与分析复合材料微观组织,加速电压分别为 100-120 kV 和 200 kV。

试验材料的热膨胀系数采用德国 NETZSCH 公司的 DIL 402C 型热膨胀测试仪测定。考察温度范围为 20-495 ℃,升温速率为 5 ℃/min。试样通过线切割加工,尺寸为 Φ6 mm×25 mm。复合材料与基体的热导率测试用德国产 JK2 型激光导热综合测试仪测量材料的热扩散率和比热。测试样品尺寸为 Φ12.7 mm×3 mm,两端面用金相砂纸磨光,测试温度范围 25~500 ℃,升温速度 5 ℃/min。

## 2 结果及分析

### 2.1 3D-Si/LG5 复合材料微观组织

图 1 为经复合材料高温扩散处理前后的金相组织照片。可以看出, Si<sub>p</sub>/Al 复合材料中的增强相 Si 在高温热处理前是不规则的尖角状,而在一定压力和时间下高温处理后,材料横截面和纵截面的增强相 Si 都联结在一起,很明显已经成为了三维网络结构 Si,原来

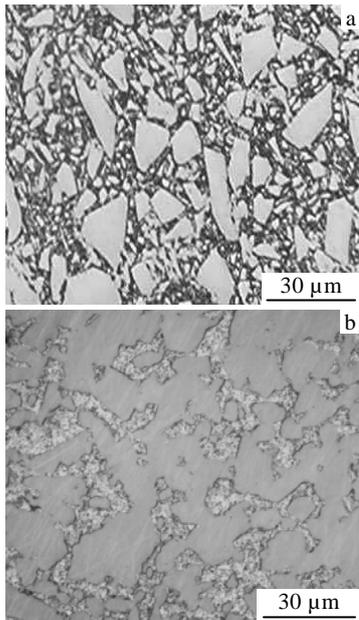


图 1 Si<sub>p</sub>/Al 转变为 3D-Si/Al 复合材料金相组织照片

Fig.1 OM microstructure of transformation from Si<sub>p</sub>/Al to 3D-Si/Al: (a) Si<sub>p</sub>/Al composite before high temperature diffusion and (b) Si<sub>p</sub>/Al composite after high temperature diffusion

的颗粒增强铝基复合材料 Si<sub>p</sub>/LG5 转变为三维网络结构 3D-Si/LG5 复合复合材料。

图 2 为 Si 增强相内部显微结构。可以看到, Si 相中存在大量的孪晶。图 2a, 2b 分别为 3D-Si/LG5 复合材料的明暗场像, 图 2c 为该位置的选取电子衍射花样。从电子衍射的标定结果可以看出, 该晶向为 Si 的 <110> 方向, 孪晶面为 {111} 晶面, 具体的标定结果如图 2d 所示。这些孪晶多是在颗粒破碎过程中形成的, 多数情况下, 孪晶的存在, 将会成为裂纹优先形成的源及裂纹优先扩展的通道, 从而对 3D-Si/LG5 复合材料的断裂行为产生影响。金属基复合材料中增强体颗粒大都是陶瓷相的非金属颗粒, 它们的导热主要由声子的热运动来实现。声子热运动的平均自由程越大, 则材料的热传导能力越强。在实际晶体中孪晶这些晶体缺陷的存在会对声子的热运动产生很强的散射作用, 进而减小声子热运动的自由程, 因此会对材料的热传导产生不利影响。在金属基复合材料的增强体颗粒内部观察到大量的晶体缺陷, 它们使得增强体材料的热传导能力下降, 这也是金属基复合材料热导率相对于基体合金比较低的一个原因。

图 3 为 3D-Si/LG5 复合材料 TEM 组织。可见, 经过高温扩散处理后, 增强体 Si 与铝基体之间的界面由平直光滑的界面变成光滑洁净的曲面, 在界面附近

以及基体合金中有细小弥散的 Si 相析出。这些依附于原 Si 颗粒形核长大的新生 Si 相, 改善了增强体颗粒与基体合金之间的界面结合。

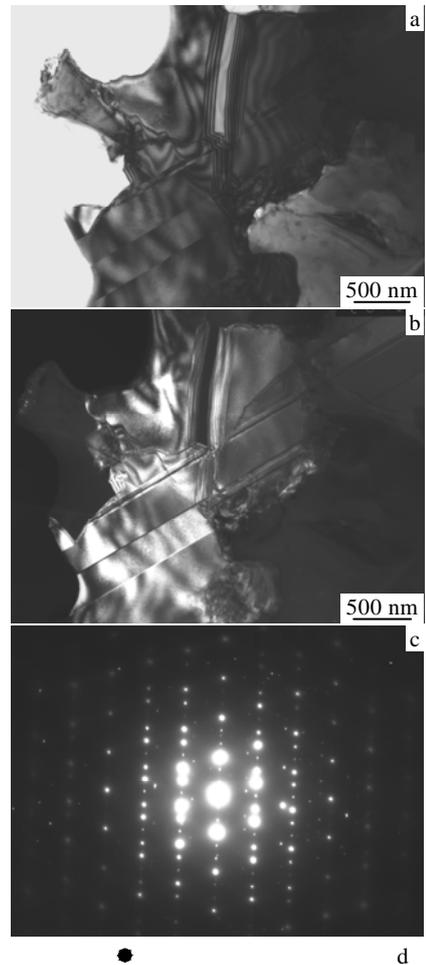
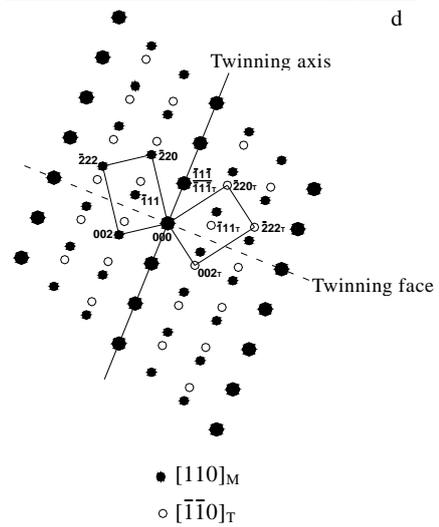


图 2 3D-Si/ LG5 复合材料中 Si 相的 TEM 显微组织及选区衍射花样

Fig.2 TEM image and corresponding pattern of eutectic Si in 3D-Si/LG5 composite: (a) bright field image, (b) dark field image, (c) SAED pattern of [110]Si, and (d) exponent labeled of Fig.2c



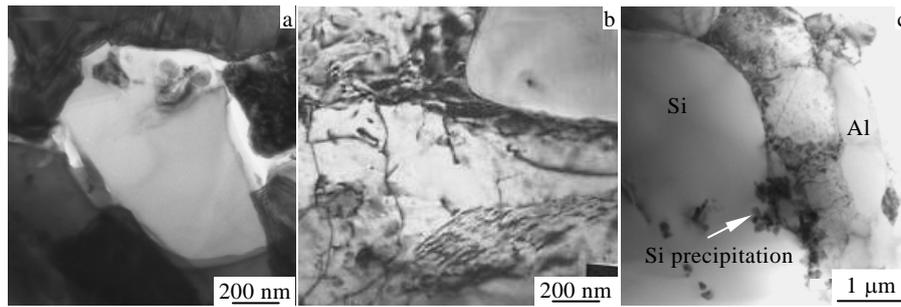


图 3 3D-Si/LG5 复合材料 TEM 组织

Fig.3 TEM micrographs of 3D-Si/ LG5 composite: (a) the interfaces in 3D-Si/LG5 composites, (b) dislocations morphology in the matrix of 3D-Si/LG5 composites, and (c) precipitation in Si/Al composites

## 2.2 3D-Si/LG5 复合材料热物理性能

图 4 为经高温处理前后复合材料的平均线膨胀系数。可以看出,在各阶段温度范围内,三维网络结构 3D-Si/LG5 复合材料的平均线膨胀系数低于高温扩散前。其中,三维网络结构 3D-Si/LG5 复合材料在 20~100 的平均线膨胀系数为  $8.1 \times 10^{-6} \text{ } ^{-1}$ ,与高温扩散处理前相比,降低了 10.5%。

增强相的种类不同,复合材料的热膨胀性能也存在差异,除增强相自身热膨胀性能的影响外,还与显微结构和应变交互作用有关:根据两相颗粒邻接和连接情况,复合材料可分为弥散型和互连型两种结构。三维网络互连型,即呈现固体颗粒多面体骨架与沿固体颗粒边缘分布的液相凝固态结构,这种界面结合强度要优于弥散性颗粒与金属基体之间界面的机械结合强度<sup>[2]</sup>。从图 3 可以看到,在三维网络结构 3D-Si/LG5 复合材料基体合金中,靠近界面处存在一些较小的析出物,远离界面处存在大量弥散细小的析出 Si 相。这些 Si 相对基体合金的膨胀有抑制作用,有利于降低材料的热膨胀系数。

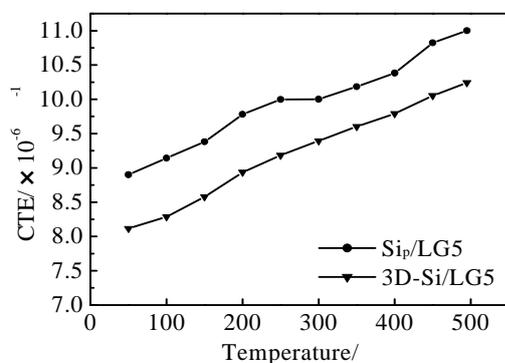


图 4 不同结构 Si/Al 复合材料的线膨胀系数

Fig.4 Effect of different structure on the CTEs of Si/Al composites (CTEs: composite thermal expansion)

增强体三维网络结构的形成,首先减少增强体颗粒的表面积,即减小 Si-Al 界面,改善了复合材料的导热能力;同时通过 Si 元素在铝合金中的溶解、析出,颗粒间的联结,改善了 Si-Al 之间的界面,有利于导热的进行;三维连续网络结构 Si 提供一种连续的畅通的导热通道,连续的铝合金基体也是一个畅通的导热通道。因此,这种结构有利于材料的热、电传导的进行。但是,在三维网络 3D-Si/LG5 复合材料的微观组织中,存在较多的析出物 Si 和亚晶,析出物和亚晶都会增加界面热阻作用,所以不利于材料的导热性,因此,三维网络 3D-Si/LG5 复合材料导热性能与预备材料相比差别不大。

## 3 结 论

1) 通过对 Si<sub>p</sub>/LG5 复合材料进行高温扩散处理,可以使不规则形状的增强体 Si 颗粒联结成为三维网络结构 Si。

2) Si<sub>p</sub>/LG5 复合材料 Si-Al 界面平直干净,没有界面反应物生成,而三维网络结构 3D-Si/LG5 复合材料界面是一光滑的曲面,增强体边界附近存在析出物,基体铝合金内部有大量的细小弥散 Si 析出物。与高温扩散处理前相比,三维网络结构 3D-Si/LG5 复合材料的界面更光滑,界面结合程度也更好。基体合金中存在着孪晶。

3) 三维网络结构 3D-Si/LG5 复合材料的平均线膨胀系数与高温扩散处理前相比,降低了 10.5%;增强体三维网络化减少界面及基体中大量细小弥散的 Si 析出,使得三维网络 3D-Si/LG5 复合材料导热率变化不大。

## 参考文献 References

[1] Zhao Longzhi(赵龙志), Fang Zhigang(方志刚), Cao Xiaoming(曹小明) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous*

- Metals*(中国有色金属学报)[J], 2006, 16(6): 945
- [2] Wang Xiaofeng(王晓峰). *Study on the Preparation and Properties of 3D Network Si/Al Composites*(三维网络结构 Si-Al 复合材料的制备工艺与性能研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 6
- [3] Aldrich D E, Fan Z. *Materials Characterization*[J], 2001, 47: 167
- [4] Lin Junpin(林均品), Zhang Yong(张勇), Chen Guoliang(陈国良). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2000, 6: 20
- [5] Zhou Wei(周伟), Hu Wenbin(胡文彬), Zhang Di(张荻). *Chinese Science Bulletin*(科学通报)[J], 1999, 44(6): 608
- [6] Cui Yan(崔岩), Zhang Zhuwei(张祝伟), Chen Xudong(陈续东). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2005, 15(2): 139
- [7] Hong Changqing(洪长青), Han Jiecai(韩杰才), Zhang Xinghong(张幸红) et al. *Materials Science and Technology*(材料科学与工艺)[J], 2006, 14(2): 151

## Study on Microstructure and Thermophysical Properties of 3D-Si/LG5 Composites

Xiu Ziyang, Chen Guoqin, Wang Xiaofeng, Wu Gaohui, Deng Zongquan  
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Dense and uniform Si<sub>p</sub>/LG5 composites were fabricated by squeeze casting process, and then were treated by high temperature diffusion. Microstructure observation indicated that Si transformed from irregular sharp-particles to 3D network structure after high temperature diffusion treatment. Si-Al interface of 3D-Si<sub>p</sub>/LG5 composites is smoother and has better bonding degree, compared with the interface of the untreated composites. There are Si precipitation in the interface and the matrix of 3D-Si<sub>p</sub>/LG5 composites. Twin crystals were observed in the matrix of 3D-Si<sub>p</sub>/LG5 composites. The average linear thermal expansion (CTE) of the composites is decreased by 10.5% after high temperature diffusion treatment. However, the thermal conductivity of 3D-Si<sub>p</sub>/LG5 composites does not change significantly due to the decreased Si precipitation in the interface and matrix by 3D network structure of Si.

**Key words:** Si<sub>p</sub>/LG5 composite; 3D network structure; microstructure; thermal expansion coefficient; thermal conductivity

---

Corresponding author: Xiu Ziyang, Ph. D., Lecturer, Academy of Fundamental and Interdisciplinary Sciences, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86412164, E-mail: xiuzu@hit.edu.cn