

文章编号:1000-582X(2006)07-0064-05

颗粒增强铝基复合材料弹性模量的影响因素*

王文明¹, 潘复生¹, Lu Yun², 曾苏民³

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030;

2. Faculty of Engineering, Chiba University, Chiba, Japan;

3. 西南铝业(集团)有限公司, 重庆 401326)

摘要:以SiC_p/6066Al复合材料为例, 计算和分析了界面性能参数(界面/基体模量比、界面泊松比和界面体积含量)及细观结构参数(颗粒形状、排列方式和尺寸变化方式)对颗粒增强铝基复合材料弹性模量的影响。结果表明:组分性能与界面性能对复合材料的弹性模量影响显著, 细观结构的影响不明显, 在工程应用中可以忽略细观结构的影响。在保证复合材料延伸率的前提下, 最有效增加复合材料弹性模量的途径是改善复合材料的界面结合情况。当界面模量为基体模量的20%~30%时即可获得满意的增强效果。

关键词:颗粒增强铝基复合材料; 弹性模量; 界面性能; 细观结构

中图分类号: TB333

文献标识码: A

影响铝基复合材料弹性模量的因素可以从复合材料的组分性能、复合材料的细观结构以及复合材料的界面结合情况3方面着手分析。复合材料的组分性能方面, 包括基体的弹性模量、泊松比和基体含量, 增强体的弹性模量、泊松比和增强体含量等; 复合材料的细观结构方面, 包括增强体的形状、排列方式、尺寸变化方式等; 复合材料的界面结合情况方面, 包括强界面结合和弱界面结合等。复合材料的制备工艺、热处理工艺等将影响复合材料的界面结合强弱。

借助颗粒增强金属基复合材料的宏-细观统一本构模型以及颗粒增强金属基复合材料力学性能预测系统^[1], 对复合材料的界面结合情况以及细观结构影响复合材料弹性模量的规律进行研究。通过不同模型预测结果以及试验结果的对比, 表明宏-细观统一本构模型具有最佳的预测效果。

1 界面性能对复合材料弹性模量的影响

颗粒增强金属基复合材料的力学性能不仅与其各组分弹性性能、各组分的体积比以及颗粒的形状、排列

方式、尺寸变化方式等有关, 还与基体和颗粒界面间的结合好坏有关。在其它因素相同的情况下, 由于界面结合的差异, 复合材料的弹性性能相差甚远。有时复合材料的弹性模量甚至低于基体的模量。界面性能是影响复合材料性能的重要因素。有的研究表明颗粒增强金属基复合材料的界面或为一反应层, 或为一过渡层^[2-3]。笔者将界面看成复合材料中除了基体相和增强相的第3种相, 并假设界面层为各向同性材料。界面相的厚度极薄, 具有与颗粒和基体不同的力学性能。以下以SiC_p/6066Al复合材料为例, 研究存在一定厚度界面时不同的界面性能对复合材料的弹性模量的影响。

1.1 界面/基体模量比K对复合材料弹性模量的影响

界面/基体模量之比反映了复合材料变形过程中基体、界面以及颗粒之间协同变形的匹配程度, 通常在界面/基体模量之比相差悬殊时, 细观特征的较细微差别可能会带来宏观性能的较明显差别。因此界面/基体模量之比对复合材料宏观性能有重要影响。

* 收稿日期: 2006-03-21

基金项目: 国家“863”项目(2002AA332520); 重庆市院士基金资助项目(2002-6285)

作者简介: 王文明(1975-), 男, 安徽东至人, 重庆大学博士研究生, 主要从事新型金属基复合材料的研究工作。

通过计算得到界面/基体模量比 K 对弹性模量 E 的影响, 见图 1(a). 从图中可以看出, 复合材料弹性模量随界面/基体模量比的增加而提高. 界面/基体模量比 K 从 10^{-6} 变化到 1.5 时, 弹性模量 E 从 0.1 增加到 102GPa(可能达到的最高模量). 当界面/基体模量比 $K < 1\%$ 时, 复合材料的弹性模量小于基体的弹性模量, 说明界面模量太低时, 复合材料中颗粒没有起到增强效果; 当界面/基体模量比 $K = 1\%$ 时, 复合材料的弹性模量接近于基体的弹性模量; 当界面/基体模量比 $K = 10\%$ 时, 复合材料的弹性模量达到理想模量的 92% 左右; 当界面/基体模量比 $K = 25\%$ 时, 复合材料的弹性模量即可达到理想模量的 97% 左右; 这说明, 当界面/基体模量比 K 超过 25% 时, 再增加界面的模量对提高复合材料的弹性模量效果已不显著. 可见, 界面/基体模量比 K 的不同对弹性模量的影响十分显著. 工程实际中, 只要把界面/基体模量比 K 控制在 20% ~ 30% 即可获得满意的增强效果.

1.2 界面泊松比对复合材料弹性模量的影响

通过计算得到界面泊松比对弹性模量 E 的影响, 见图 1(b). 从计算结果来看, 颗粒泊松比从 0.1 变化到 0.42 时, 弹性模量 E 最大改变只有 0.3%. 可见, 界面泊松比的不同对弹性模量的影响很小, 在模型计算中有时可不考虑这个因素.

1.3 界面体积含量对复合材料弹性模量的影响

通过计算得到复合材料的弹性模量随界面体积含量变化的关系, 见图 1(c). 从图中可以看出, 弹性模量随界面体积含量增加而减小, 界面体积含量从 0.012% 变化到 1.2% 时, 弹性模量 E 最大改变达到 31%. 可见, 界面体积含量的不同对弹性模量的影响也比较显著. 当界面体积含量增加时, 界面在复合材料中起的作用就越来越重要, 它影响着界面模量与复合材料弹性模量的关系.

2 微观结构对复合材料弹性模量的影响

以 SiCp/6066Al 复合材料为例, 研究弱界面(界面模量为基体模量的 10% ~ 20%) 时颗粒形状、颗粒排列方式及颗粒尺寸变化方式对复合材料弹性模量的影响.

2.1 颗粒形状对复合材料弹性模量的影响

考虑的颗粒形状有三角形、方形、矩形、圆形、椭圆形, 颗粒在基体中呈方形排列均匀分布. 首先, 计算不同颗粒形状复合材料的弹性模量随界面/基体模量比的变化情况, 计算结果见图 2(a). 其次, 计算不同颗粒形状复合材料的弹性模量随界面体积分含量的变化情

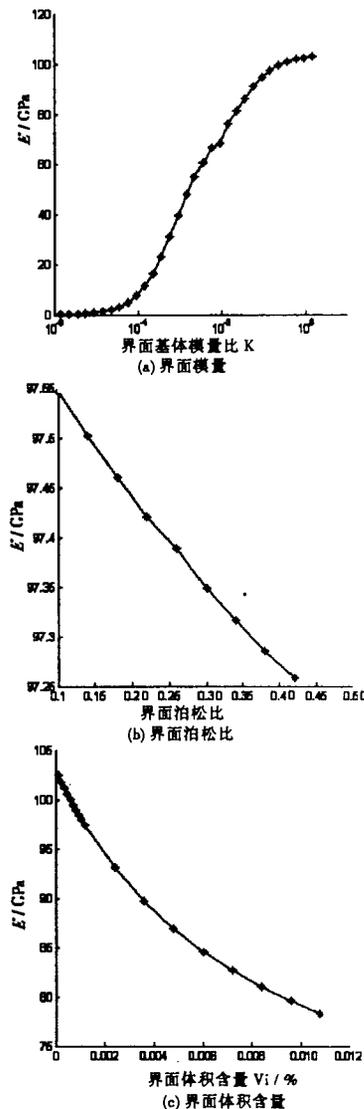


图 1 界面性能对复合材料弹性模量的影响

况, 计算结果见图 2(b). 从图 2(a)、(b) 可以看出, 颗粒形状对复合材料弹性模量有一定影响. 因颗粒形状不同造成的复合材料的弹性模量随界面/基体模量比的变化最大值分别为 3%, 0.94%, 0.04%, 0.10%, 随界面体积分含量的变化最大值分别为 0.09%, 0.06%, 0.05%, 0.04%. 可见, 当界面模量很低时, 颗粒形状对复合材料弹性模量和剪切模量的影响显著一些. 随着界面模量的增加, 不同颗粒形状带来的弹性模量的差异, 对复合材料弹性模量的改变可以忽略.

2.2 颗粒排列方式对复合材料弹性模量的影响

考虑的颗粒排列方式有方形排列、矩形排列、方形对角(方形转动 45°) 排列、六角形排列(或称正三角形排列). 颗粒形状均选为圆形, 颗粒均匀分布. 首先, 分析复合材料不同颗粒排列方式的弹性模量随界面/基体模量比的变化情况, 计算结果见图 2(c). 其次, 分析复合材料不同颗粒排列方式的弹性模量随界面体积分

量的变化情况,计算结果见图 2(d).从图 2(c)、(d)可以看出,颗粒排列方式对复合材料弹性模量有一定影响.因颗粒排列方式不同造成的复合材料的弹性模量随界面/基体模量比的变化最大值分别为 1.5%, 0.4%, 0.4%, 0.1%, 随界面体积分含量的变化最大值分

别为 0.2%, 0.25%, 0.28%, 0.42%.可见,当界面模量很低时,颗粒排列方式对复合材料弹性模量的影响显著一些.随着界面模量的增加,不同颗粒排列方式带来的弹性模量的差异,对复合材料弹性模量的改变可以忽略.

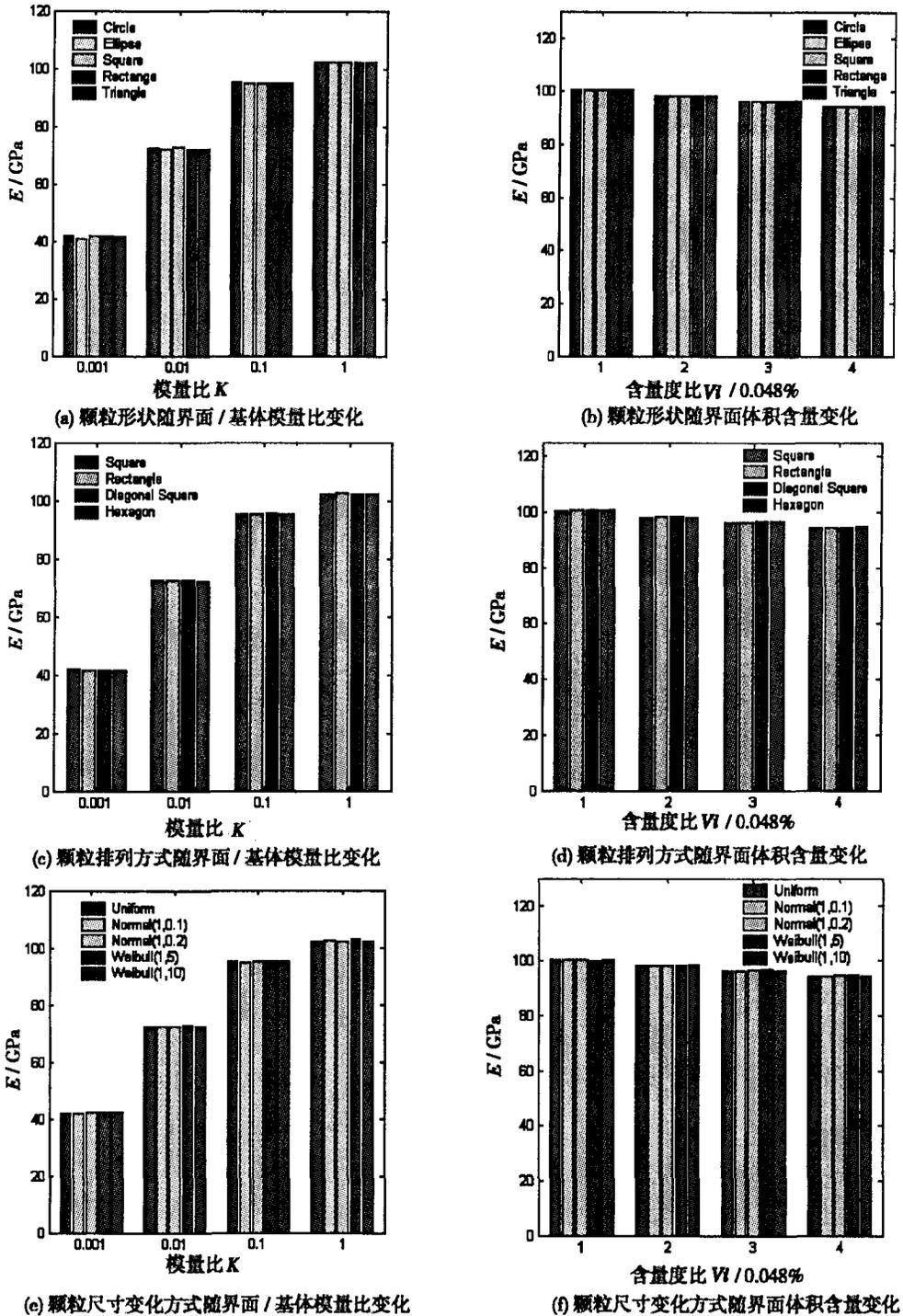


图 2 细观结构对复合材料弹性模量的影响

2.3 颗粒尺寸变化方式对复合材料宏观弹性模量的影响

考虑的颗粒尺寸变化方式有均匀、正态和威布尔

分布.其中正态分布取 $N(1,0.1)$ 和 $N(1,0.2)$ 2 种情况,威布尔分布取 $W(1,5)$ 和 $W(1,10)$ 两种情况,表征方差不同时的情形.颗粒形状均选为圆形,颗粒排布为

方形排布. 首先, 分析不同颗粒尺寸变化方式时复合材料的弹性模量随界面/基体模量比的变化情况, 计算结果见图 2(e). 其次, 分析不同颗粒尺寸变化方式时复合材料的弹性模量随界面体积分数的变化情况, 计算结果见图 2(f). 从图 2(e)、(f) 可以看出, 颗粒尺寸变化方式对复合材料弹性模量也几乎没有影响. 因颗粒尺寸变化方式不同造成的复合材料的弹性模量随界面/基体模量比的变化最大值分别为 0.72%, 0.57%, 0.26%, 0.58%, 随界面体积分数的变化最大值分别为 0.54%, 0.72%, 0.80%, 0.41%. 不同颗粒尺寸变化方式带来的弹性模量的差异, 对复合材料弹性模量的改变基本可以忽略.

3 分析与讨论

以上对复合材料弹性模量的影响因素进行了细致的分析, 结果可归纳如表 1 所示. 从表 1 可以看出, 组分性能与界面性能对复合材料的弹性模量影响显著, 细观结构的影响不明显, 在工程应用中可以忽略细观结构的影响. 在确定基体和增强体种类后, 控制复合材料弹性模量的途径主要是改变增强体的体积分数和改善复合材料的界面结合情况. 其中, 通过增加增强体的体积分数来提高复合材料的弹性模量带来的缺陷是增强体体积分数增加, 使延伸率显著降低. 因此在保证复合材料延伸率的前提下, 最有效增加复合材料弹性模量的途径是改善复合材料的界面结合情况.

表 1 复合材料弹性模量的影响因素及其影响程度

结合情况	复合材料弹性模量的影响因素		影响程度
理想界面结合	组分	颗粒/基体模量比	强
	性能	颗粒泊松比	弱
弱界面结合		颗粒体积含量	强
	细观	颗粒形状	弱
	结构	颗粒排列方式	弱
		颗粒尺寸变化方式	弱
弱界面结合	界面	界面/基体模量比	强
	性能	界面泊松比	弱
		界面体积含量	强
	细观	颗粒形状	弱
弱界面结合	结构	颗粒排列方式	弱
		颗粒尺寸变化方式	弱

关于界面结合情况显著影响复合材料弹性模量的机制, 众多研究表明, 界面把载荷从基体传递到增强体是复合材料弹性变形阶段的重要强化机制^[4-8]. 强化

机制作用的发挥程度取决于基体与增强体之间界面结合力的大小.

界面是制约复合材料性能的关键因素. 由复合材料的弹性模量和界面模量的关系得出: 复合材料的弹性模量随界面模量的升高而升高, 只是在不同界面模量范围内增加的幅度不同而已. 具体的说, 在界面模量比较低的时候, 也就是界面结合比较差的时候, 复合材料的弹性模量随界面模量的升高而显著增加; 当界面模量接近于金属基体的弹性模量时, 复合材料的弹性模量随界面模量增加而变化不大; 当界面模量等于或高于基体模量时, 复合材料的弹性模量几乎不再随界面模量的变化而变化. 这表明, 在界面结合较差的时候, 界面性能对复合材料的性能的影响是至关重要的.

目前复合材料的界面模量和界面体积分数的测定还比较困难. 一般假定界面体积分数为增强体体积分数的 1%. 复合材料的弹性模量可以较方便的测出, 如采用基于共振频率的动态弹性模量测定法. 获得复合材料的弹性模量后, 可以通过“颗粒增强金属基复合材料力学性能预测系统”反算出复合材料的界面模量^[1]. 例如, 已知基体的弹性模量为 70 GPa, 泊松比为 0.33; 颗粒的弹性模量为 340 GPa, 泊松比为 0.17; 颗粒体积含量为 12%; 界面体积含量取为 0.12%, 泊松比取为 0.25; 测得复合材料的弹性模量为 80 GPa; 先假设复合材料的界面模量为 10 GPa, 算出复合材料的弹性模量为 97.4 GPa; 减小界面模量值, 例如 1 GPa, 此时算得复合材料的弹性模量为 76 GPa; 进一步减小界面模量的取值区间, 当输入的界面模量值经计算得出的复合材料的弹性模量值为测量值时, 即表明输入的界面模量值为实际的界面模量值. 经验算可得, 复合材料的弹性模量为 80 GPa 时, 其界面模量值为 1.43 GPa.

4 结论

1) 组分性能与界面性能对复合材料的弹性模量影响显著, 细观结构的影响不明显, 在工程应用中可以忽略细观结构的影响. 在确定基体和增强体种类后, 控制复合材料弹性模量的途径主要是改变增强体的体积分数和改善复合材料的界面结合情况. 在保证复合材料延伸率的前提下, 最有效增加复合材料弹性模量的途径是改善复合材料的界面结合情况. 当界面模量为基体模量的 20% ~ 30% 时即可获得满意的增强效果.

2) 在实验测得复合材料的弹性模量后, 可以通过“颗粒增强金属基复合材料力学性能预测系统”反算出复合材料的界面模量, 作为界面模量的一种确定方法.

参考文献:

- [1] WANG W M, PAN F S, LU Y, et, al. Prediction System Development of Mechanical Performance for Particulate Reinforced Metal Matrix Composite [A]. Siyuan Long. UK - China Advanced Materials Symposium 2005 [C]. Chongqing: Chongqing Publish House, 2005.
- [2] 康国政, 高庆, 刘世楷. 界面对短纤维增强金属基复合材料力学行为的影响[J]. 复合材料学报, 1999, 16(1): 35 - 40.
- [3] LEE J, AHN J P, SHI Z L. Methodology to Design the Interface in SiC/Al Composites [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32A(6): 1 541 - 1 550.
- [4] 陈建, 潘复生, 刘天模. Al/SiC界面结合机制的研究现状[J]. 轻金属, 2000, 9: 52 - 54.
- [5] KYUNGHOOON LEE, SURESH MOORTHY, SOMNATH GHOSH. Multiple Scale Computational Model for Damage in Composite Materials [J]. Computer Methods in Mechanics and Engineering, 1999, 172: 175 - 201.
- [6] ANDREW(C), GARNICH M. A Multicontinuum Theory for Structural Analysis of Composite Material System [J]. Composites Engineering, 1995, 5(9): 1 091 - 1 103.
- [7] BAXTER S (C), HOSSAIN M I, GRAHAM L L. Micromechanics Based Random Material Property Fields for Particulate Reinforced Composites [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38: 9 209 - 9 920.
- [8] BENVENISTE Y, DVORAK G J, CHEN T. On Diagonal and Elastic Symmetry of the Approximate Effective Stiffness Tensor of Heterogeneous Media [J]. J Mech Phys Solids, 1999, (39): 927 - 946.

Influence of Interface and Meso-structure on Elastic Modulus of Particulate Reinforced Aluminium Matrix Composite

WANG Wen-ming¹, PAN Fu-sheng¹, LU Yun², ZENG Su-min³

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Faculty of Engineering, Chiba University, Chiba, Japan;

3. Southwest Aluminum Industry(Group) Company, Ltd, Chongqing 401326, China)

Abstract: Taking SiCp/6066Al composite as an example, calculate and analyse influence of interface performance parameters (interface/matrix modulus ratio, interface Poisson ratio and interface volume fraction) and meso-structural parameters (particulate shape, arrangement pattern and dimensional variance mode) on elastic modulus of particulate reinforced aluminium matrix composite. It is proven: Components' performances and interface performances influence elastic modulus of the composite remarkably, meso-structure does not influence obviously. In engineering practice, effect of meso-structure can be negligible. Under the precondition of guaranteeing specific elongation of the composite, the approach that can enhance elastic modulus of the composite at maximum efficiency is to improve interfacial bonding situation of composite. The satisfying result can be obtainable when interface modulus is 20% ~ 30% of matrix modulus.

Key words: particulate reinforced aluminium matrix composite; elastic modulus; interface performance; meso-structure

(编辑 成孝义)