

# SiC<sub>p</sub>/Al-2618 复合材料的应力-应变曲线和 增强颗粒受力的模拟\*

徐娜 宗亚平 张芳 左良

(东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室, 沈阳 110004)

**摘要** 对体积分数为 15% 的 SiC 颗粒增强 Al-2618 复合材料, 采用不同的热处理条件得到硬基体和软基体两种不同性能的合金. 建立了一个基于 Eshelby 等效夹杂方法的颗粒复合体力学模型, 通过引入基体割线模量和切线模量的方法模拟了上述两种复合材料的应力-应变曲线, 计算增强粒子的受力情况. 采用基于单胞模型的有限元方法, 利用 ANSYS 商品软件进行了同样的模拟工作并进行对比. 通过与实验曲线的对照表明, Eshelby 颗粒复合体力学模型可以更准确的预测出硬基体和软基体两种复合材料的应力-应变曲线, 而有限元单胞模型不适用于预测软基体复合材料. 预测出的粒子中的受力远高于基体中的受力, 表明载荷传递是颗粒增强金属基复合材料强度提高的主要机理.

**关键词** 颗粒强化, Eshelby 方法, 有限元分析, 强度计算, 性能模拟

中图法分类号 TB333

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2007)08-0863-05

## SIMULATION OF STRESS IN REINFORCEMENTS AND STRESS-STRAIN CURVE OF SiC<sub>p</sub>/ Al-2618 MATRIX COMPOSITE

XU Na, ZONG Yaping, ZHANG Fang, ZUO Liang

Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004

Correspondent: ZONG Yaping, professor, Tel: (024)83681311, E-mail: ypzong@mail.neu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (Nos.50471024 and 50171018)

Manuscript received 2006-12-26, in revised form 2007-03-29

**ABSTRACT** A 15% (volume fraction) SiC particle-reinforced Al-2618 matrix composite was selected to simulate its stress-strain curve and the stress in the reinforcing particles. The simulation was also carried out to two composites with hard matrix (T6 treatment) and soft matrix (T4 treatment). An analytical model was established based on Eshelby equivalent inclusion approach to do the simulation by introducing numerical secant moduli and tangent moduli scheme, respectively. The same modeling work was carried out by FEM analysis based on the unit cell model using a commercial ANSYS code. Through the comparison of the results between the simulation and experimental results, it is shown that the Eshelby model can predict the stress-strain curve of the composite with both hard matrix and soft matrix by introducing different numerical moduli, while the FEM model can not be used to simulate the stress-strain curve of composite with soft matrix. The stress in the particles is much higher than that in matrix shown by the simulation, which indicates that load transfer is the main strengthening mechanism for the particle-reinforced metal matrix composite.

**KEY WORDS** particulate reinforcement, Eshelby approach, finite element analysis, strength calculation, property simulation

颗粒增强金属基复合材料由于具有高强度、高刚度、低成本、易加工等特点已在航空、航天以及精密仪器等领

域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>. 为了得到性能更高的颗粒增强金属基复合材料, 许多学者提出了很多不同的模型来研究此种材料的基体和粒子中的受力状况, 而在这些模型中应用最广泛的为 Eshelby 等效夹杂力学模型<sup>[2,3]</sup> 和有限元数值模型<sup>[4]</sup>. 大部分用 Eshelby 等效夹杂模型的模拟研究没有与实验值进行比较<sup>[3,5]</sup>, 而文献<sup>[6]</sup>模拟了材料的应力-应变曲线并与实验值进行了比较, 但是模型中没有引

\* 国家自然科学基金项目 50471024 和 50171018 资助

收到初稿日期: 2006-12-26, 收到修改稿日期: 2007-03-29

作者简介: 徐娜, 女, 1980 年生, 博士生

进基体扰动应变,对模拟高含量颗粒复合体误差很大,对于基体材料采用了 Ludwik 近似表达:  $\sigma = \sigma_y + h(\tilde{\varepsilon}_p)^n$ , 并且对于相同的材料分别采用割线和切线模量法时,  $h$  和  $n$  的取值完全不同且相差一个数量级以上. 有限元方法模拟颗粒增强复合材料的研究报道很多,但由于有限元法是数值模拟的这一特征,使得其模拟结果的广泛适用性和对材料开发的指导意义受到很大的限制. 而且,通常用两种模拟方法进行模拟的文献多是由不同的研究者完成的,能够同时采用两种方法进行对比模拟并与实验曲线对照具有重要学术进步的意义,有望发展出可以被材料学界认可的颗粒复合体力学性能模拟方法. 本文采用前期工作建立的 Eshelby 颗粒复合体力学模型<sup>[7]</sup>,提出了引入基体合金割线模量和切线模量实验值的方法,计算颗粒增强材料的应力-应变曲线及其中载荷的分配情况,同时采用基于轴对称单胞模型的有限元方法利用 ANSYS 商品软件,模拟了复合材料的应力-应变曲线和加载过程中增强颗粒的应力变化,并将结果与 Eshelby 模型模拟的结果及实验拉伸曲线进行了比较.

## 1 实验方法

本文所用实验材料为体积分数为 15% 的 SiC 的颗粒增强 Al-2618 复合材料. SiC 选用商用  $\alpha$ -SiC 粉末,粉末的平均尺寸为  $9.1 \mu\text{m}$ . 基体合金 Al-2618 的化学成分(质量分数)为 Al-2.5%Cu-1.5%Mg-1.1%Ni-1.1%Fe. 材料经过喷射共沉积工艺制备而成,制成的坯料在  $510^\circ\text{C}$  挤压成截面积为  $40 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的型坯,最后进行空冷.

实验材料在  $530^\circ\text{C}$  固溶处理 2 h 后进行冰水淬火,最后将其加工成直径为 5 mm、长度为 25 mm 的柱状拉伸试样. 将这些拉伸试样分两部分处理:其中一部分试样在  $200^\circ\text{C}$  下时效 20 h,即经峰值时效(T6)处理,所得的材料称为硬基体材料;另一部分试样不经人工时效,即经 T4 处理,所得材料称为软基体材料. 这里的软、硬基体沿用传统的颗粒增强复合材料说法,即软基体是指无时效析出相的单一基体合金,硬基体指存在时效析出相的峰值硬化合金. 拉伸实验在 CSS 电子拉伸机上进行,使用引伸仪和应变片以获得应力-应变曲线及材料的力学性能数据. 基体材料经 T6 处理和 T4 处理后,材料的屈服强度分别为 396 和 245 MPa,延伸率分别为 6.7% 和 17.1%.

## 2 Eshelby 模型模拟

Mori 和 Tanaka<sup>[8]</sup> 研究了用平均场模型中的 Eshelby 等效夹杂方法来模拟增强粒子中的受力情况. Brown 等<sup>[9]</sup> 提出了用平均基体应力作为相邻颗粒间的背景应力的想法,这一想法的提出使得只对单一夹杂严格有效的 Eshelby 方法可以被应用到含有高体积分数增强颗粒的复合材料中. Zong 等<sup>[7]</sup> 用这种方法对因存在受损颗粒而强度降低的颗粒增强金属基复合材料的弹性

模量进行了理论研究. 本文应用该模型,通过引入基体的实测割线模量及切线模量对复合材料的应力-应变曲线和颗粒的受力情况进行预测.

按照 Eshelby 设想的切割、变形和焊合操作,夹杂与基体之间产生错配应变  $e^{\text{T}}$ ,此时夹杂中的应力可以由一个鬼夹杂(基体材料)中的应力来表达. 这个鬼夹杂与基体有着一个假想的应变  $e^{\text{T}}$ ,被称为转变应变或者本征应变. 当鬼夹杂与基体达到平衡时,鬼夹杂受到一个约束应变  $e^{\text{C}}$  ( $e^{\text{C}} = Se^{\text{T}}$ ,其中  $S$  为 Eshelby 张量). 当复合材料系统被施加了一个外部应力  $\sigma_0$  时,错配应变  $e^{\text{T}}$  可用下式表达:

$$e^{\text{T}} = C_1^{-1}C_m e_m - e_m \quad (1)$$

式中,  $C_1$  和  $C_m$  分别为夹杂和基体的刚度张量,  $e_m$  为基体的应变. 在外加应力  $\sigma_0$  的作用下,由于是非稀薄体系,有其它夹杂物的存在,基体中产生的平均应变不是  $e^0(C_m^{-1}\sigma_0)$ ,而是又增加了一项基体的平均扰动应变  $\bar{e}$ ,即  $e_m = e^0 + \bar{e}$ . 由此,引入 Zong 等<sup>[7]</sup> 关于复合材料柔度张量  $C_c^{-1}$  计算公式

$$C_c^{-1} = C_m^{-1}[I + f_1 Q_1(I + L) + f_2 Q_2(I + L)] \quad (2)$$

式中,  $I$  为单位矩阵;  $f_1$  和  $f_2$  为两种增强颗粒各自的体积分数,本文中  $f_2=0$ ;  $Q_1 = [(C_1 - C_m)S_1 + C_m]^{-1}(C_m - C_1)$ ;  $Q_2 = [(C_2 - C_m)S_2 + C_m]^{-1}(C_m - C_2)$ ;  $L = [I + f_1(S_1 - I)Q_1 + f_2(S_2 - I)Q_2]^{-1} \cdot [-f_1(S_1 - I)Q_1 - f_2(S_2 - I)Q_2]$ . 对于非稀薄系统的复合材料,在外加应力  $\sigma_0$  的作用下,根据 Eshelby 等效夹杂物理论,粒子上的平均受力可以表达为

$$\sigma_p = \sigma_1 + \bar{\sigma}_1 = C_m(e^0 + e^{\text{C}} - e^{\text{T}}) +$$

$$C_m(\bar{e} + e^{\text{C}} - e^{\text{T}}) = C_m[(I + 2(S - I)Q)(I + L)e^0] \quad (3)$$

式中,  $e^0$  是基体材料在拉伸过程中的应变值. 请注意式(3)与文献[7]中粒子受力的表达式不同,这是因为文献[7]没有把基体标准弹性应变与基体平均扰动应变对粒子受力的贡献分别表达清楚.

模拟复合材料应力-应变曲线时,在弹性阶段,将基体和颗粒的弹性模量和 Poisson 比代入式(2)可求出复合材料的弹性模量,从而得到复合材料弹性阶段的应力-应变关系. 复合材料应力-应变曲线的塑性部分分别采用割线模量法和各向同性化的切线模量法进行模拟.

割线模量法是一种全量处理方法,基体的割线模量  $E_m^{\text{s}}$  和割线 Poisson 比  $\nu_m^{\text{s}}$  的定义如下<sup>[2]</sup>:

$$E_m^{\text{s}} = \{1/E_m^0 + \tilde{\varepsilon}_p/[\sigma_y + h(\tilde{\varepsilon}_p)^n]\}^{-1} \quad (4)$$

$$\nu_m^{\text{s}} = \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2} - \nu_m^0\right) \frac{E_m^{\text{s}}}{E_m^0} \quad (5)$$

式中,  $E_m^0$  为基体的弹性模量,  $\tilde{\varepsilon}_p$  为等效塑性应变,  $\sigma_y$  为基体的屈服应力,  $h$  和  $n$  分别为强化系数和加工硬化

指数, 而  $[\sigma_y + h(\tilde{\epsilon}_p)^n]$  为材料发生塑性变形时的流变应力, 可以从基体的拉伸实验数据中直接读取. 当给定一个应变值  $\epsilon$  时, 从基体的拉伸实验数据中读取相应的应力值  $\sigma$ , 计算出此时的  $\tilde{\epsilon}_p = \epsilon - \sigma/E_m^0$ , 代入式 (4) 计算出此应变下基体的割线模量  $E_m^s$ , 再将  $E_m^s$  代入式 (5) 计算出基体的割线 Poisson 比  $\nu_m^s$ , 最后将计算所得的  $E_m^s$  和  $\nu_m^s$  代入到式 (2) 中, 求出复合材料此应变时的割线柔度张量  $(C_c^s)^{-1}$ , 再将  $(C_c^s)^{-1}$  代回到与式 (4) 相似的复合材料的割线模量表达式中, 计算出此时的复合材料的流变应力, 以给定的应变和求出的这个应力值就可以得到复合材料应力 - 应变曲线上的一个点, 反复以上过程就可以得到复合材料塑性阶段的应力 - 应变曲线.

各向同性化的切线模量法是一种增量方法, 该方法认为基体进入塑性变形后其应力 - 应变增量关系可以用切线模量描述, 并假设切线模量张量是各向同性的. 基体的切线模量  $E_m^t$  和切线 Poisson 比  $\nu_m^t$  定义为 [10]

$$E_m^t = (1/E_m^0 + d\tilde{\epsilon}_p/d\tilde{\sigma}_y)^{-1} \quad (6)$$

$$\nu_m^t = \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2} - \nu_m^0\right) \frac{E_m^t}{E_m^0} \quad (7)$$

给定一个应变值并设定一个固定的小应变增量  $d\tilde{\epsilon}_p$ , 可以从基体合金的拉伸实验数据中读取此时的应力增量  $d\tilde{\sigma}_y$ , 代入式 (6) 求出切线模量  $E_m^t$ , 再将  $E_m^t$  代入式 (7) 计算出 Poisson 比  $\nu_m^t$ , 同样将得到的  $E_m^t$  与  $\nu_m^t$  代回式 (2) 中可以求出相应的复合材料的切线柔度张量  $(C_c^t)^{-1}$ , 用应变增量  $d\tilde{\epsilon}_p$  除以切线柔度张量  $(C_c^t)^{-1}$  就可以得到复合材料此应变下的应力增量, 重复此过程便可以得到复合材料塑性阶段的应力 - 应变曲线.

图 1 给出了分别用割线模量法和切线模量法 Eshelby 处理模型预测出的复合材料的拉伸曲线, 并与实验曲线进行了对比. 从图中可以看出, 由于增强颗粒的加入, 复合材料的强度相对于基体合金有显著的提高. 在弹性阶段, 用这两种方法模拟出的复合材料的拉伸曲线与实验曲线几

乎重合. 在塑性阶段, 对于硬基体材料, 各向同性化的切线模量法预测出的结果与实验值吻合很好, 而用割线模量法测出的结果显著高于实验值; 而对于软基体材料, 割线模量法模拟的结果与实验曲线十分接近, 而切线模量法模拟结果则偏离实验值. 这表明, 本文所提出的结合割线模量和切线模量法的 Eshelby 处理模型是可行的, 并且对于不同基体的复合材料可以分为两大类选用不同的方式, 时效硬化基体的复合材料应采用切线模量方法, 而单相塑性基体的复合材料应采用割线模量法.

### 3 有限元模型模拟

本文所用的有限元模型是 Bao 等 [11] 提出的轴对称单胞模型, 它是一种用来描述在弹塑性基体中增强颗粒均匀分布的 3D 模型, 是最简单、未加任何微观修订的有限元基本模型, 因此具有有限元分析最清晰的物理关系. 复合材料被假想为由一系列轴对称六棱柱胞组成, 每个胞的中心含有一个球形增强粒子. 为便于分析, 将六棱柱胞简化为圆柱胞. 此模型的边界条件是: 柱侧面 (BC) 限定为或进或出, 但要保证侧面平均张力等于零, 且在运动中始终保持柱体形状; 垂直于拉伸应力方向的柱面 (CD) 要始终保持平直, 且剪应力为零, 并施加正位移载荷, 如图 2 所示. 图 2 中的阴影部分为 SiC 颗粒, 并假设该颗粒是长轴为  $a$ 、短轴为  $b$  的椭球形颗粒. 本文中  $a/b=1.2$ . SiC 颗粒的体积分数定义为 15%, 即阴影部分的体积占整个圆柱体体积分数的 15%.

图 3 给出了有限元模型模拟结果与实验值的比较. 从图中可以看出, 由于增强颗粒的加入, 复合材料的强度远高于单一基体合金的强度. 基体经 T6 处理的复合材料其模拟结果与复合材料的实验曲线接近, 略低于实验值 (图 3a). 而材料经 T4 处理的模拟结果却与实验值相差较大 (图 3b). 这是由于有限元模拟中设定了复合材料基体的本构函数就是基体合金的拉伸曲线, 显然对于软基体复合材料, 由于强化颗粒的存在, 基体的本构函数与没有强化粒子的基体合金不同. 因此, 本研究表明可以用此模型来

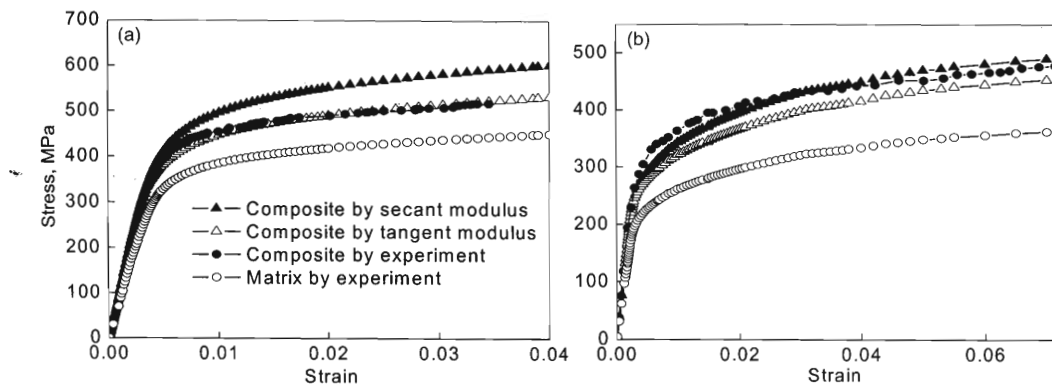


图 1 硬基和软基复合材料的 Eshelby 方法预测结果和实验曲线之间的比较

Fig.1 Comparisons of predictions by Eshelby approach modeling with experimental results for the composites with hard matrix (a) and soft matrix (b)

近似模拟硬基体复合材料,但不能用来模拟软基体复合材料.当然,对有限元单胞模型进行一定的假设和修订,是可以用于模拟软基体复合材料的应力-应变曲线,但这样会增加模拟的复杂性,也会失去一部分模拟物理模型的准确性.

由于图 1 和图 3 所示的实验曲线是同一条,因此可以将 Eshelby 方法模拟和有限元模拟的结果进行比较.从两个图的对比可以看出,对于硬基体复合材料,采用各

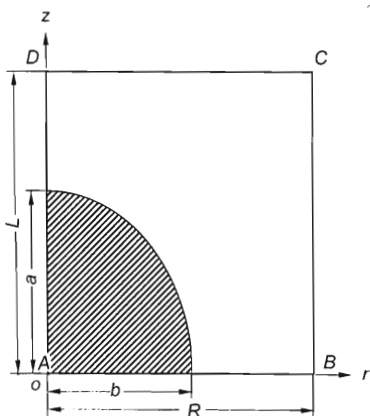


图 2 有限元模型示意图

Fig.2 Schematic illustration of finite element model

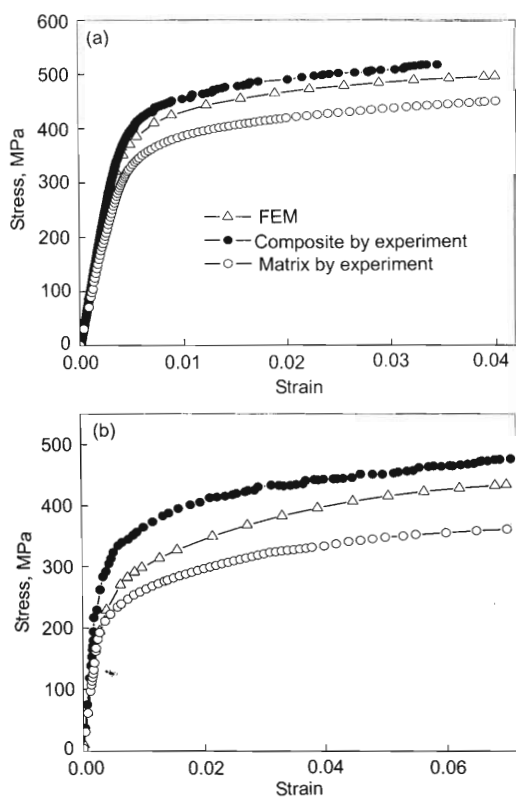


图 3 硬基体和软基体复合材料的有限元方法预测结果和实验曲线之间的比较

Fig.3 Comparisons of predictions by finite element modeling with experimental results for the composites with hard matrix (a) and soft matrix (b) (the experimental curves of the monolithic matrix is also given)

向同性化切线模量法的 Eshelby 模型模拟出的复合材料应力-应变曲线和实验值吻合得最好;对于软基体复合材料,割线模量法的 Eshelby 模型模拟出的应力-应变曲线和实验值最接近,而用有限元方法模拟出的曲线显示出该方法不适用于模拟软基体复合材料.这表明, Eshelby 复合力学模型可以准确地预测出硬基体和软基体复合材料的应力-应变曲线,比有限元模拟有显著的优势.并且说明用 Eshelby 模型研究拉伸过程中增强颗粒和基体的应力分配情况具有准确性,比有限元模拟的结果更可靠.

#### 4 增强颗粒中的应力

能够正确模拟出复合材料的应变-应变曲线说明可以用同样的模型模拟强化粒子中的受力情况,进一步研究复合材料的强化机理.

利用 Eshelby 模型中的式 (3) 可以计算出复合材料任何给定应变值下的粒子平均受力情况,但硬基体材料用切线模量法,而软基体用割线模量法.式 (3) 中的  $Q$  和  $L$  是此时的割线或切线模量值,而  $e^0$  就是此时给定的应变值.使用此应变下复合材料应力的模拟值(图 1),利用混合定律就可以计算出此时复合材料中基体的平均应力值,反复计算不同的应变值,就可以得到粒子和基体应力随不同应变变化的曲线.有限元模型的粒子和基体中所受的应力值,可以直接从 ANSYS 有限元软件的后处理菜单中相应网格单元的体积平均值得到.

图 4 所示分别为用 Eshelby 方法和有限元轴对称模型预测出的硬基体和软基体复合材料中增强颗粒和基体在应变过程中的平均受力情况,并将对基体的模拟结果与单一合金的拉伸曲线进行对照.从图中可以看出,在拉伸过程中增强粒子中的平均受力比基体中所受平均应力大得多,颗粒承担了大部分的载荷,可见由于颗粒的存在使得金属基复合材料的强度得到了提高.图 4a, c 所示的用 Eshelby 方法模拟出的颗粒中所承受的应力均高于用有限元模型模拟出的结果.这说明, Eshelby 模型能更准确模拟应力-应变曲线的原因在于 Eshelby 模型能准确模拟强化粒子中的受力.图 4b, d 中用 Eshelby 方法和用有限元模型预测的复合材料中基体的受力基本上与单一基体合金的应力-应变曲线相吻合,而在硬基体材料中用 Eshelby 方法得到的基体的中的受力略低于单一基体合金的应力-应变曲线,这是因为由于增强颗粒的存在并承担了大部分的载荷,从而减少了基体所受的应力.

值得注意的是,通常人们所说的载荷传递机理是指纤维及短纤维增强复合材料,是因为纤维和基体之间存在的界面摩擦力通过界面将载荷传递到纤维上.然而对于颗粒增强体,由于粒子和基体之间的界面很小,不足以将载荷通过界面摩擦来传递,因此目前人们通常认为增强颗粒是通过弥散强化、细化晶粒、增加位错密度等方法提高基体的强度<sup>[12]</sup>,认为增强颗粒不能进一步提高已经时效强化合金的强度.而本模拟放弃微观强化模型,采用颗粒复合

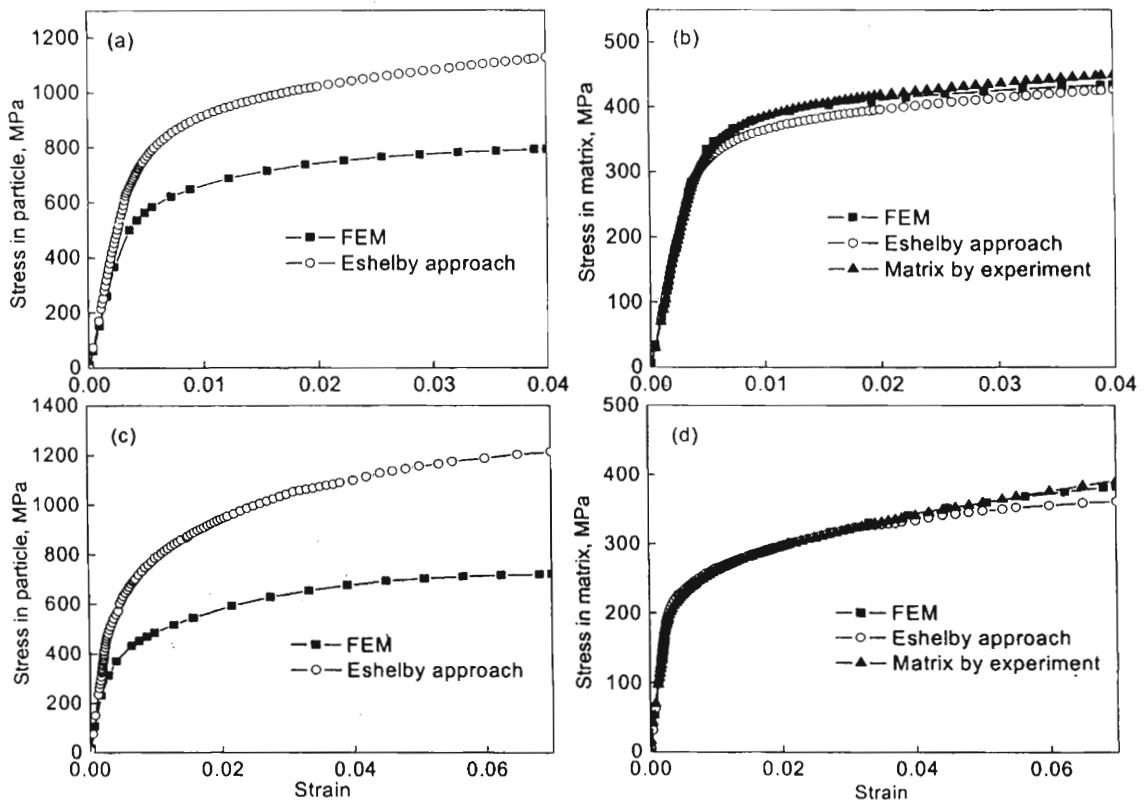


图 4 硬基体和软基体复合材料中增强颗粒模拟及基体模拟的拉伸曲线和实验的拉伸曲线

Fig.4 Simulated tensile curves of reinforcing particle (a, c) and simulated and measured tensile curves of matrix (b, d) in the composite after T6 treatment (hard matrix) (a, b) and T4 treatment (soft matrix) (c, d)

体力学模型, 模拟结果与实验曲线一致的事实说明, 本文所研究的材料是增强颗粒分担了基体上的载荷, 从而提高了复合材料的强度, 颗粒的存在并没有提高基体的强度. 利用这一理论可以解释本研究颗粒增强峰值时效硬基体复合材料的强度显著高于峰值时效合金强度的实验事实.

### 5 结论

(1) 本研究提出的 Eshelby 模型采用基体合金实验曲线方法, 比有限元单胞模型法能更好的模拟颗粒增强复合材料的拉伸曲线和强化粒子中的受力.

(2) 同性化切线模量法的 Eshelby 模型适合时效强化复合材料的性能模拟, 而单相塑性基体的复合材料应采用割线模量法.

(3) 有限元轴对称单胞模型可以用来预测时效强化复合材料的应力 - 应变曲线, 不适于预测单相塑性基体复合材料.

(4) 特别是对于时效强化复合材料, 增强颗粒承担大载荷是材料的主要强化机理.

### 参考文献

- [1] Kaczmar J W, Pietrzak K, Wlosinski W. *J Mater Process Technol*, 2000; 106: 58
- [2] Zhao Y H, Weng G J. *Int J Plast*, 1996; 12: 781
- [3] Roatta A, Bolmro R E. *Mater Sci Eng*, 1997; A229: 192
- [4] Farrissey L, Schmauder S, Dong M, Soppa E, Poech M H, McHugh P. *Comput Mater Sci*, 1999; 15: 1
- [5] Benedikt B, Rupnowski P, Kumosa M. *Acta Mater*, 2003; 51: 3483
- [6] Tian F, Hu G K, Yang G Y. *J Beijing Inst Technol*, 1996; 16: 477  
(田 峰, 胡更开, 杨改英. 北京理工大学学报, 1996; 16: 477)
- [7] Zong B Y, Guo X H, Derby B. *Mater Sci Technol*, 1999; 15: 827
- [8] Mori T, Tanaka K. *Acta Metall*, 1973; 21: 571
- [9] Brown L M, Stobbs W M. *Philos Mag*, 1976; 34: 1185
- [10] Li Y Y, Chen Y. *J Appl Mech*, 1990; 57: 562
- [11] Bao G, Hutchinson J W, McMeeking R M. *Acta Metall Mater*, 1991; 39: 1871
- [12] Hirth J P. *Scr Metall Mater*, 1991; 25: 1