

SiC_P 颗粒增强金属基 6151Al 复合材料中的 增强颗粒尺寸效应*

刘龙飞^{1,2}, 戴兰宏², 杨国伟¹

(1. 湘潭大学物理系现代物理研究所, 湖南 湘潭 411105;

2. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

[摘要] 利用分离式 Hopkinson 压杆和 MTS-810 通用材料试验机研究了 SiC_P/6151Al 复合材料在不同应变率下的变形行为和增强颗粒尺寸对复合材料力学性能的影响。结果表明:对于这类复合材料,存在着明显的增强颗粒尺寸效应,具体表现为颗粒越小,材料的强化效果越明显。基于位错增强理论并结合 Gao H 等人基于压痕实验提出的应变梯度概念,发展了颗粒增强金属基复合材料中应变梯度强化律,并对增强颗粒尺寸效应给予了合理的解释。

关键词: 尺寸效应; 应变梯度

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1000-5900(2001)04-0046-05

Reinforced Particle Dimension Effect in SiC_P Particle Reinforcing Metal Base 6151Al Composite

LIU Long-fei^{1,2}, DAI Lan-hong², YANG Guo-wei¹

(1. Institute of Modern Physics, Department of Xiangtan University, Xiangtan 411105 China;

2. National major Lab of nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

[Abstract] Using the split Hopkinson pressure bar and MTS-810 universal material testing machine, this paper researches the deformation behavior under different strain rate of SiC_P/6151Al composite and the effectiveness of reinforced particle dimension on the mechanical property of the composite. The result shows there exists the evident effectiveness of reinforced particle dimension to such kind of composite, i. e. the smaller the particle is, the more evident the strengthened effect of composite would be. Based on the dislocation reinforcing theory and combined the strain gradient concept on the indentation test by Gao H et al., it also develops the strain gradient strengthening law in particle reinforcing metal base composite and gives a reasonable explanation to the reinforcing particle dimension effectiveness.

Key words: dimension effectiveness; strain gradient

颗粒增强金属铝基复合材料由于其重量轻、强度高许多不同于一般金属的优良性能而倍受到人们重视,并已在航空航天、国防和交通运输等部门显示出广泛的应用前景^[1,2]。众所周知,作为一类微结构敏感材料,其力学性能显著地依赖于它的增强相,所以理解增强行为和微结构的关系是发展先进的颗粒增强金属基复合材料中的一个关键的问题。在过去的几十年中,人们一直在努力探索这种复合材料中微结构与变形行为之间的关系,包括单胞的连续介质模

* 收稿日期: 2001-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(19902017)和中国科学院重大项目资助课题(K-951-201)

作者简介: 戴兰宏(1965-),男,博士,研究员。

型、改进的剪切滞后理论以及均匀化模型都导出流动应力与增强颗粒体积相关,但不能反映增强颗粒尺寸效应.然而,有些初步的研究^[3-6]表明增强颗粒尺寸对这类复合材料的力学性能和微结构的影响显著,但有关不同应变率下增强颗粒尺寸对复合材料变形行为及微结构影响的研究报道很少.基于此,本文利用分离式 Hopkinson 压杆和 MTS 材料试验机研究了 SiC_p/6151Al 复合材料在不同应变率条件下的变形行为,重点考察了在变形过程中,复合材料中增强颗粒尺寸大小(d_p)的变化对复合材料的宏观力学性能的影响,并用基于位错强化机理的应变梯度强化理论成功地表征了增强颗粒尺寸效应.

1 实验

1.1 实验材料

实验采用的实验材料是碳化硅颗粒(SiC_p)增强 6151Al 铝基复合材料,复合材料中分别含有两种不同尺寸的碳化硅颗粒($d_p = 7 \mu\text{m}$ 、 $d_p = 28 \mu\text{m}$),体积百分含量都是 7%.图 1 是未经加载的 SiC_p/6151Al 复合材料($d_p = 28 \mu\text{m}$)的原始微观图象.由图知,这些材料密实,碳化硅颗粒与铝基体之间无明显脱落和开裂现象,碳化硅颗粒分布较均匀.

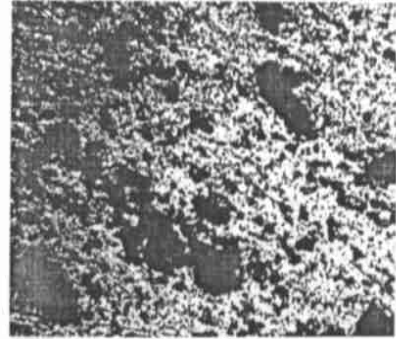


图 1 未经加载的复合材料

Fig.1 The unloaded composites

1.2 实验过程

1.2.1 静态压缩实验 静态压缩实验是在 MTS - 810 材料试验机上完成的.实验过程中把试样加工成 16 mm × 10 mm 的圆柱形试样,三种材料的试样各取多个,编号以后分别进行实验.加载速度为 0.5 mm/min,应变率 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

1.2.2 动态冲击压缩实验 冲击压缩实验是在典型的分离式 Hopkinson 压杆上完成的. Hopkinson 杆是由高强度钢材加工而成,输入和输出杆长都是 1 m,直径为 13 mm,通过改变子弹的长度和冲击速度可以调节加载应力波脉宽和幅度.实验过程中我们采用与静态压缩实验中规格完全相同的圆柱形试样,取多个试样在同一条件下($1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$)进行实验.通过实测,得到了应力应变关系.

1.2.3 典型的 Hopkinson 压杆装置(见图 2)

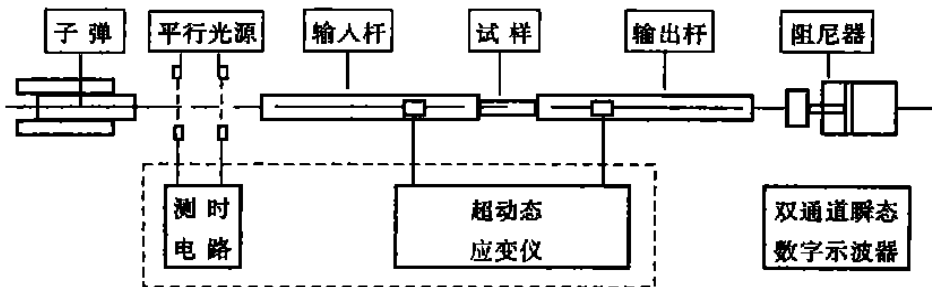


图 2 分离式 Hopkinson 压杆及测试系统示意图

Fig.2 Split hopkinson pressure bar and acquisition system

在输入输出杆中部相对 180° 两侧各贴一 120 Ω 的电阻应变片,测量使用时将电阻片串联

连接,目的在于消除弯曲波的影响;同时也可放大信号,提高检测灵敏度.把采集的数据存盘后在PC机上处理,得到材料的应变关系曲线.

1.2.4 冲击压缩实验原理 Hopkinson 压杆实验技术建立在三个基本假定基础上.一个是一维假定(又称平面假定),另一个是均匀假定,同时不计导杆与试件端部的摩擦效应和惯性效应.根据一维假定,我们可直接利用一维应力波理论确定试件材料的应变率 $\dot{\epsilon}(t)$ 、应变 $\epsilon(t)$ 和应力 $\sigma(t)$.

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{C}{l_0} (\dot{\epsilon}_i - \dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_t) \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = \frac{C}{l_0} \int_0^t (\dot{\epsilon}_i - \dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_t) dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A}{2A_0} E (\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \quad (3)$$

式中 $\dot{\epsilon}_i$ 、 $\dot{\epsilon}_r$ 和 $\dot{\epsilon}_t$ 分别表示入射、反射和透射应变脉冲.进而可以根据实验测到的 $\dot{\epsilon}_i(t)$ 、 $\dot{\epsilon}_r(t)$ 和 $\dot{\epsilon}_t(t)$, 利用(1)~(3)式得到材料在冲击压缩(高应变率)下的应力应变关系.式中的应力、应变均以压为正, E 、 C 和 A 分别为 Hopkinson 杆的弹性模量、纵波波速和横截面积, A_0 和 l_0 分别为试件的初始横截面积和长度.

2 实验结果

我们在静态压缩和冲击压缩实验中测得的实验数据,得到了不同应变率下基体材料

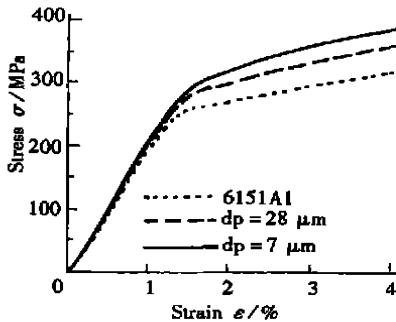


图 3a 静态压缩应力应变曲线

Fig. 3a Static compressive stress - strain curve

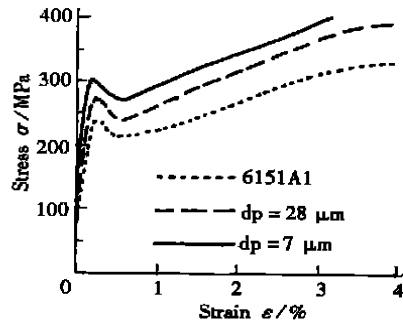


图 3b 动态应力应变曲线

Fig. 3b Dynamic compressive stress - strain curve

(6151Al)和各种粒径颗粒增强 $\text{SiC}_p/6151\text{Al}$ 复合材料的应力应变关系曲线,如图 3a、3b 所示.由图可知,在不同应变率下,这类材料都具有明显的增强颗粒尺寸效应,即颗粒越小,其流动应力越大,屈服强度越高.

3 应变梯度理论

虽然晶粒尺寸对单相金属材料屈服应力的影响已有大量的研究,但增强颗粒尺寸对细观非均质复相颗粒增强金属基复合材料变形强化作用机理还很不清楚.初步研究表明,由于第二相粒子(SiC_p)的弹性模量、热膨胀系数与铝基体之间差异较大,使得两相变形即使在均匀载荷下也极不协调,由此在变形时复合材料内将产生大量的几何必需位错来满足变形的需要.由变形失配引起的几何必需位错密度记为 ρ_g ,可用下式来估计^[7]

$$G = \frac{12f_p}{bd_p} \quad (4)$$

其中 b 、 f_p 和 d_p 分别为 Burgers 矢量、第二相粒子的体积百分含量和直径大小。从上式可以看出,对于一定体积分数的颗粒增强金属基复合材料,协调小颗粒变形的几何必需位错密度比大颗粒要高。

假设颗粒增强金属基复合材料的强化主要由与变形协调相关的几何必需位错的积聚决定,根据 Taylor 位错强化关系,复合材料塑性流动应力为:

$$c = \sqrt{3} \mu_m b \sqrt{\tau} = \sqrt{3} \mu_m b \sqrt{G + s} \quad (5)$$

而金属基体材料的塑性流动应力为:

$$m = \sqrt{3} \mu_m b \sqrt{s} \quad (6)$$

这里应用了 von Mises 屈服准则,其中 s 为与均匀变形相对应的统计储存位错密度,并认为颗粒的加入不会改变统计储存位错的密度。 μ_m 为基体的剪切模量,为 Taylor 强化系数。根据 Gao H 等人所做压痕实验确定的应变梯度 c/b 和几何必需位错密度 G 之间的关系^[10]

$$c/b \quad (7)$$

经简单推演,可得到如下的颗粒增强金属基复合材料应变梯度强化律:

$$\left(\frac{c}{m} \right)^2 = 1 + l \quad (8)$$

而材料微结构特征几何参数 l 定义为

$$l = \frac{1}{s b} \quad (9)$$

(8) 式将增强颗粒的强化 $\left(\frac{c}{m} \right)$ 与增强颗粒尺寸 (d_p)、应变梯度 (τ) 通过材料微结构特征几何参数 l 直接联系在一起。由 (4) ~ (8) 式可知,对于增强颗粒体积分数一定的同一基体复合材料(此时, l 一定),复合材料的强化完全取决于增强颗粒的尺寸大小,即:增强颗粒越小,在变形时产生的几何必需位错密度越高,从而导致应变梯度越大,强化效果越好,材料承受载荷的能力就越强。所以复合材料的力学性能对增强颗粒尺寸敏感,具有增强颗粒尺寸效应。显然,上述理论结果与已有的实验现象是定性相符的,而且与 Dai 等^[7-9] 得到的颗粒增强金属基复合材料应变梯度强化律具有相同的形式和结果,但是却避免了其应变梯度 $\tau = \tau_p$ 为平均应变梯度的缺陷,具有更为清楚的物理背景。

从以上的分析中可以看出:由增强颗粒诱发的应变梯度强化律在颗粒增强金属基复合材料的变形强化中起着十分重要的作用,而且把增强颗粒尺寸 (d_p) 与复合材料的力学性能显式地联系在一起。据此可以清楚地看到,如何理解和确定应变梯度的大小及作用机理对颗粒增强金属基复合材料在工程实际中的应用和选材具有十分重要的意义和价值。

4 结 论

a. 本文研究的颗粒增强金属基复合材料力学行为具有明显的颗粒尺寸依赖效应,在不同应变率下均发现,含较小碳化硅颗粒($d_p = 7 \mu\text{m}$)复合材料的屈服及流动应力明显高于含较大碳化硅颗粒($d_p = 28 \mu\text{m}$)复合材料,分析为含较小碳化硅颗粒($d_p = 7 \mu\text{m}$)复合材料中应变梯度强化效果较好所致.

b. 颗粒增强金属基复合材料力学行为具有一定的应变率效应,在冲击压缩(高应变率)载荷下复合材料的屈服强度和流动应力普遍高于静态压缩(低应变率)载荷下的屈服强度和流动应力,体现出一般金属材料所具有的应变率效应.

c. 基于 Taylor 位错强化关系及 Gao H 等人根据压痕实验确定的应变梯度概验,发展了具有较强物理背景的颗粒增强金属基复合材料应变梯度增强律,从而把增强颗粒尺寸(d_p)与复合材料的力学性能显式地联系在一起,成功地表征了在这一类复合材料中存在的增强颗粒尺寸依赖变形强化行为.

参 考 文 献

- [1] 吴人洁. 金属基复合材料的现状与展望[J]. 金属学报, 1997, 33(1): 78 - 84
- [2] Clyne T W, Withers P J. An Introduction to Metal Matrix Composites[M]. London: Cambridge University Press, 1993.
- [3] Ling Z, L Luo, Dood B. Experimental study on the formation of shear bands and effect of microstructure in 2124Al/SiC_p composite under dynamic compression[J]. J de Physique, 1994, 4: 453 - 458.
- [4] Ling Z. Deformation Behavior and Microstructure effect of 2124Al/SiC_p Composite[J]. Journal of composites materials, 2000, 1. 34(2): 101 - 115.
- [5] Chichili D R, Ramesh K T. Recovery experiments for adiabatic shear localization a novel experimental technique[J]. J App Mech, 1999, 66: 10 - 20.
- [6] Zhou M. Effects of microstructure on resistance to shear localization for a class of metal matrix composites[J]. Technique & Fracture of Engineering Materials & Structure, 1998, 21: 425 - 438.
- [7] Dai L H, Ling Z, Bai YL. A strain gradient - strengthening law for particle reinforced metal matrix composites[J]. Scripta Materialia, 1999, 1. 41(3): 245 - 251.
- [8] Dai L H, Ling Z, Bai YL. Size - dependent inelastic behavior of particle reinforced metal matrix composites[J]. Composites Science and Technology, 2001, 6, 126.
- [9] Dai L H, Ling Z, Bai YL. Strain gradient effect on Initiation of Adiabatic Shear Localization in Metal Matrix Composites[J]. Key Engineering Materials, 2000, 177 - 180: 401 - 406.
- [10] Gao H, Huang Y, Nix W D et al. Mechanism - based strain gradient plasticity theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1999, 47: 1 239 - 1 263.