

文章编号: 1000-5773(2001)01-0005-07

颗粒增强金属基复合材料变形强化中的应变梯度效应

戴兰宏, 凌中, 白以龙

(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: 针对单轴压缩实验, 根据颗粒增强金属基复合材料中颗粒和基体两相的局部变形协调条件, 并通过简单的位错模型, 确定出与变形协调相应的几何必需位错密度, 进而导出一种颗粒强化-应变梯度律。从中可以清楚地看出, 颗粒增强金属基复合材料的强化由材料的微结构特征几何参数 l 和基体应变梯度联合控制。对于颗粒含量一定的复合材料, 颗粒越小, 应变梯度越高, 强化效果越好。这一结果揭示了, 颗粒强化及尺寸效应主要是通过应变梯度效应来表现的。这也同时说明, 应变梯度可能是控制材料变形与断裂的重要因素之一。

关键词: 金属基复合材料; 应变梯度; 尺寸效应; 位错; 变形局部化

中图分类号: O344.1 **文献标识码:** A

1 引言

虽然在均匀的基体相中弥散或填充相对较硬的第二相颗粒, 以强化材料的力学性能(如屈服强度、流动应力等)的思想渊源流长, 并在颗粒增强金属基复合材料(PRMMCs)的开发实践中不断得到应用和发展^[1], 但目前仍有些疑难问题一直在困惑我们, 其中之一便是增强颗粒的尺寸效应。

近年来, 越来越多的理论和实验研究证实^[2~5], 颗粒尺寸对非均质材料系统的变形与断裂的影响显著。显然, 已有的对颗粒强化机制的定性认识和各种基于均匀化思想的、仅含单个微结构参数(颗粒体积分数 f_p)的细观力学理论无法预测复合材料的尺寸效应^[6]。为了理解材料力学性能的尺寸依赖性, Fleck 等^[7~9]通过在传统的本构关系中引入应变梯度项, 发展了一种唯象性的应变梯度塑性理论。最近, Nix 和 Cao^[10]依据单晶和多晶金属材料的硬度实验结果和“几何必需位错”的概念^[11], 将唯象性的应变梯度塑性理论建立在较为坚实的物理机制之上, 这无疑是应变梯度塑性理论发展中的一个重要进展。虽然, 应变梯度塑性理论很好地解释了单相金属材料的尺寸效应, 但如何依此理论理解颗粒增强金属基复合材料的屈服或流动强化机制及尺寸效应还有待于探究。

基于此认识, 本工作从颗粒增强金属基复合材料试样单轴压缩受载构型出发, 根据颗粒和基体两相材料变形协调的要求, 确定出与之相应的几何必需位错密度(ρ_g), 进而得到颗粒增

收稿日期: 2000-08-21; 修回日期: 2000-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(19902017); 国家自然科学基金“九五”重大项目(19891180); 中国科学院“九五”重大项目(KI-951-1-201)

作者简介: 戴兰宏(1965—), 男, 理学博士, 副研究员。

强金属基复合材料塑性流动应力强化对基体应变梯度的依赖律。

2 单轴压缩实验结果

为了考察颗粒尺寸对复合材料总体力学行为的影响,凌中^[5]在 Hopkinson 压杆上对 $\text{SiC}_p/2124\text{Al}$ 复合材料进行了冲击压缩实验研究。在同一应变率 ($\dot{\epsilon} = 2100\text{s}^{-1}$) 下,测定了 2124Al 基体及同一体积分数 ($f_p = 17\%$)、三种粒径 ($d_p = 3\mu\text{m}$ 、 $13\mu\text{m}$ 、 $37\mu\text{m}$) SiC_p 陶瓷粒子增强复合材料的应力-应变曲线。实验结果显示,该复合材料的屈服强度和流动应力对颗粒尺寸呈反向响应关系:颗粒尺寸越小,屈服强度和流动应力越高。对卸载后试样进行微观观测发现,复合材料中基体的塑性变形极不均匀(图 1)。显然,复合材料的宏观力学行为对其微观构元特征尺寸的依赖性与基体的塑性变形不均匀度密切相关。这种变形不均匀完全是由硬颗粒的引入造

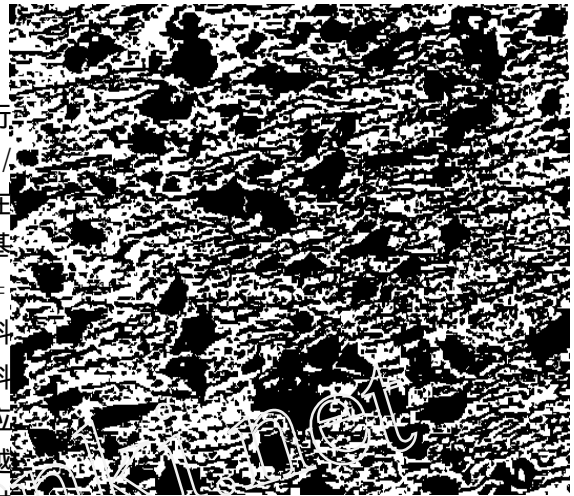


图 1 $\text{SiC}_p/2124\text{Al}$ 复合材料微观非均匀塑性变形

Fig. 1 Inhomogeneous plastic deformation pattern in $\text{SiC}_p/2124\text{Al}$ composite

成两相变形不协调所致,而这种变形不协调正是颗粒复合材料强化及尺寸效应原因所在。因此,研究两相变形不协调产生的机制及其定量表征无疑是问题的关键。

3 变形不协调性的表征——几何必需位错密度

单相金属材料进入塑性变形后,其内部位错的积聚可分为两类:一种是在简单拉伸、压缩等均匀变形中位错相互随机捕获,从而导致位错在晶粒周围大量缠结(Trapping),通常将这部分位错称为“统计储存位错”(Statistically Stored Dislocations);另一种是与材料在剪切、弯曲等载荷作用下其形状改变相协调的“几何必需位错”(Geometrically Necessary Dislocations)。Ashby^[11]证实,材料的尺寸效应主要由与变形协调相应的几何必需位错控制。Fleck 等人^[9]的实验结果表明,单相金属材料在均匀拉伸载荷下无明显的尺寸效应。这主要是因为单相金属材料在均匀载荷作用下其内部变形也是均匀的,材料内部不会产生与形状畸变相对应的几何必需位错,因而也就不会产生尺寸效应。然而对于颗粒增强金属基复合材料,情况却与此不同。即使在均匀载荷下,由于复合材料中两相的弹性模量差异较大,也将使基体产生明显的非均匀变形(如图 2 所示的均匀压缩情形),从而可能呈现出明显的尺寸效应。

现考虑球形颗粒增强金属基复合材料单轴压缩实验,试样几何与载荷构型如图 2(a) 所示。颗粒统计均匀地分布于金属基体中,且颗粒在整个变形过程中始终保持弹性,而基体材料为弹塑性材料。这里我们仅考虑塑性应变梯度效应。用下标“m”、“p”和“c”分别表示基体、颗粒和复合材料。由上述分析知道,颗粒和基体模量的不匹配将导致颗粒附近材料形状的畸变。因此,必然在颗粒周围积聚一定数量的几何必需位错以协调这种畸变。

这里,我们采用类似于 Eshelby^[12]等效夹杂的思想来确定几何必需位错密度(ρ_g)。首先假想将图 2 复合材料试样中的所有球形颗粒全部用基体材料取代,这样实际的颗粒变为“基体

球”。于是,整个试样在均匀压缩载荷作用下产生一处处均匀轴向应变,致使“基体球”畸变为“基体椭球”。然而,对于复合材料试样,由于颗粒弹性模量较高而几乎不变形,这种“球—椭球”的畸变是不允许的。因此,为了协调这种畸变,需在基体靠近颗粒表面处施加一定数量的几何必需位错环,如图 2 (b) 所示。于是根据变形几何条件,有

$$nb = d_p \quad (1)$$

其中 b 为 Burges 矢量,为无量纲的几何因子, n 为施加于每个颗粒表面的几何必需位错环数。假定颗粒体积分数及直径分别为 f_p 和 d_p ,单位体积内颗粒总数为

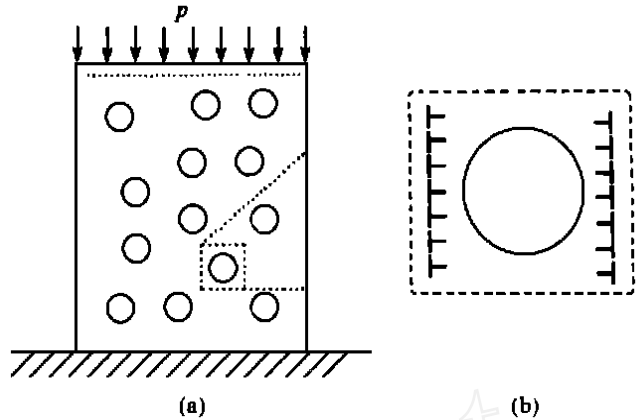


图 2 MMC_p 单轴压缩构型及位错模型
Fig. 2 Configuration of MMC_p under uniaxial compressive loading and dislocation model

$$N_p = \frac{6f_p}{d_p^3} \quad (2)$$

颗粒表面每个位错环长取为 d_p ,则几何必需位错密度 G 为

$$G = \frac{6f_p}{bd_p} \quad (3)$$

从式中可以看出,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。

4 颗粒强化应变梯度律

假定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所决定,根据 Taylor 位错强化关系,复合材料塑性流动应力为

$$\sigma_c = \sqrt{3} \mu_m b \sqrt{\tau} = \sqrt{3} \mu_m b \sqrt{G + s} \quad (4)$$

而金属基体材料的塑性流动应力为

$$\sigma_m = \sqrt{3} \mu_m b \sqrt{s} \quad (5)$$

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明显改变统计储存位错的积聚。 μ_m 为基体的剪切模量, k 为一比例系数。假定硬颗粒不变形,定义基体相平均应变梯度为

$$\epsilon_p = \frac{\sigma_c - \sigma_m}{p} \quad (6)$$

其中 p 为颗粒统计平均间距,可表示为^[13]

$$p = \frac{1}{2} d_p \left(\sqrt{\frac{2}{3f_p}} - \frac{4}{3} \right) \quad (7)$$

由(6)式和(7)式容易看出,颗粒越小,应变梯度越高。于是,综合(3)式~(7)式可得到如下的颗粒增强复合材料的强化-应变梯度律

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

其中 $l = 9 \frac{\mu_m}{G} \left(\frac{\mu_m}{d_p}\right)^2$ 。而材料微结构特征几何参数 l 的定义为

$$l = b \frac{\mu_m}{G} \left(\frac{\mu_m}{d_p}\right)^2 \quad (9)$$

其中 $l = 9 \frac{\mu_m}{G} \left(\frac{\mu_m}{d_p}\right)^2$ 为几何滑移距离^[11],它是一种与变形无关的微结构特征参量。上式将颗粒的强化(σ/σ_m)与颗粒尺寸(d_p)、应变梯度(μ_m)通过材料微结构特征参数 l 直接联系在一起。从中可以看出,颗粒的强化效应是由微结构特征参数 l 和基体平均应变梯度 μ_m 共同决定的。对于颗粒体积分数一定的同一基体复合材料(l 一定),复合材料强化完全取决于颗粒尺寸的大小,即:颗粒越小,应变梯度越高,强化效果越好。

显然,上述理论结果与已有的实验现象定性相符。为了定量检验本工作得到的复合材料强化-应变梯度律的适用性,现特与文献[5]报道的 $\text{SiC}_p/2124\text{Al}$ 复合材料单轴压缩实验结果作一比较。首先由实验得到的基体和 $3\mu\text{nr SiC}_p/2124\text{Al}$ 复合材料的流动应力数据确定出式(8)中的比例参数 $l = \frac{\sigma}{\sigma_m} - 1$,然后用已得到的 l 和(8)式来预测 $13\mu\text{nr SiC}_p/2124\text{Al}$ 和 $37\mu\text{nr SiC}_p/2124\text{Al}$ 复合材料的流动应力,表1和表2分别给出这两种复合材料流动应力的理论预测和实验结果的比较情况。从表中可以看出,理论预测值较实验值偏低,相对误差小于15%,从总体上看二者是相符合的。若考虑到本工作尚未计及应变率效应、颗粒和基体两相间载荷的转移、两相热膨胀系数的差异所造成的热残余应力对复合材料强化的贡献,本文中得到的复合材料强化-应变梯度律预测的结果还是可以接受的。

表1 $13\mu\text{nr SiC}_p/2124\text{Al}$ 复合材料流动应力理论值与实验值的比较

Table 1 Comparison of flow stresses for $13\mu\text{nr SiC}_p/2124\text{Al}$ calculated by the model with experimental data

Parameters	$l = 0.02$	$l = 0.10$	$l = 0.20$	$l = 0.30$	$l = 0.40$
Experimental σ_{sh} / (MPa)	457	686	843	982	1130
Theoretical σ_{th} / (MPa)	404	618	752	868	971
$(\sigma_{sh} - \sigma_{th})/\sigma_{sh} \times 100\%$	11.6	9.9	10.8	11.6	13.5

现在回到式(8),考察其可能蕴含的物理意义。从(8)式可以看出,材料微结构特征几何参数 l 在复合材料的强化中扮演着十分重要的角色。在基体应变梯度一定的条件下, l 越大,强化效果越好。不难发现,当颗粒体积分数一定时, l 是一个与颗粒尺寸无关的特征几何参数。但是,它不是材料常数,与基体变形状态密切相关。图3和图4分别给出 l 随颗粒体积分数 f_p 和基体流动应力 σ_m 演变情况。从图3可以发现,不同的基体变形状态(μ_m/σ_m)下都有一个特征颗粒体积分数($f_p \approx 0.30$),从而使 l 取最大 l_{\max} 。目前还不清楚这对特征参数 f_p 和 l_{\max} 是否潜在对应着复合材料某种宏观力学性能的优化值。一种可能是颗粒增强复合材料的断裂韧性,大量的

实验均证实,存在一个特征颗粒体积分数,使颗粒复合材料增韧效果最佳。当然,我们现在无法肯定二者之间一定存在对应关系,这需要进一步的实验验证。

表 2 37 μm SiC_p/2124Al 复合材料流动应力理论值与实验值的比较

Table 2 Comparison of the flow stresses for 37 μm SiC_p/2124Al calculated by the model with the experimental data

Parameters	= 0.02	= 0.10	= 0.20	= 0.30	= 0.40
Experimental σ_{sh} / (MPa)	444	661	764	889	1056
Theoretical σ_{th} / (MPa)	378	583	721	831	914
$(\sigma_{sh} - \sigma_{th}) / \sigma_{sh} \times 100\%$	14.8	11.8	5.6	6.5	13.4

此外,由图 4 可以看出, l 随基体的不断硬化而逐渐变小,这说明变形后期基体的应变梯度必须维持较高的水平才能达到与变形初期相同的强化效果。而一旦材料开始软化出现变形局部化, l 将随之变大,颗粒的强化再次增强,从而抑制变形局部化的进一步发展。因此,增强颗粒的加入不仅能强化材料的屈服和流动强度,同时也可以抑制变形局部化的发生和发展。

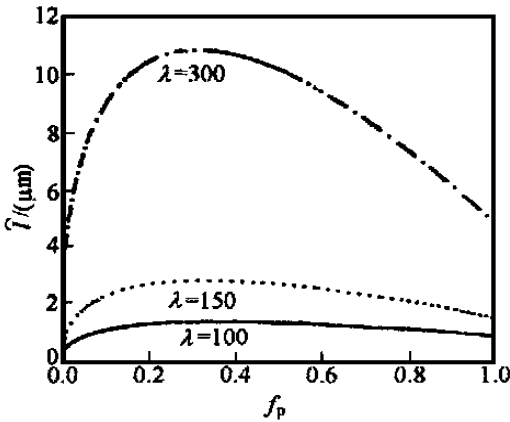


图 3 特征几何参数随体积分数变化

Fig. 3 Variation of characteristic length with volume fraction of particles ($l = \mu_m / \lambda$)

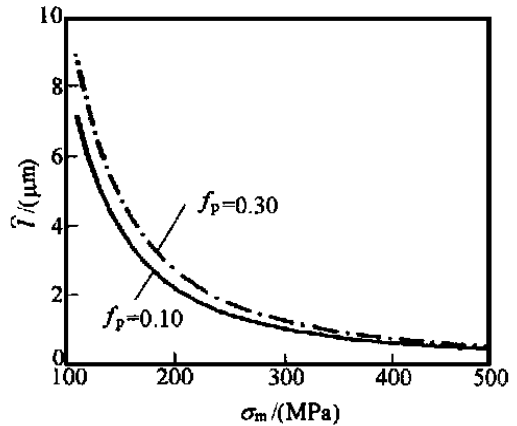


图 4 特征几何参数随基体流动应力变化

Fig. 4 Variation of characteristic length with flow stress of matrix

5 结 语

在本文中以单轴压缩实验为例,根据颗粒增强金属基复合材料中颗粒和基体两相局部变形协调条件,并通过简单的位错模型,确定出与变形协调相应的几何必需位错密度,进而导出一种颗粒强化-应变梯度律。从中可以清楚看出,颗粒增强金属基复合材料的强化由材料微结构特征几何参数 l 和基体应变梯度联合控制。对于颗粒含量一定的复合材料,颗粒越小,应变梯度越高,强化效果越好。这一结果揭示了,颗粒强化及尺寸效应主要是通过应变梯度效应来

表现的,同时也说明,应变梯度可能是控制材料变形与断裂的重要因素之一。

此外,颗粒增强金属基复合材料的强化除了受本文中所考虑的两相变形不协调因素的影响之外,还有颗粒和基体两相间载荷的转移、两相热膨胀系数的差异所造成的热残余应力等因素的影响。这些都需要在下一步的工作中深入研究。

参考文献:

- [1] Clyne T W, Withes P J. Introduction to Metal Matrix Composites [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [2] 郑哲敏. 连续介质力学与断裂 [J]. 力学进展, 1982, 12: 133-140.
- [3] Hong Y S, Qiao Y, Liu N, et al. Effect of Grain Size on Collective Damage of Short Cracks and Fatigue Life Estimation for a Stainless Steel [J]. Fatigue & Fracture of Eng Mater & Structures, 1998, 21: 1317-1326.
- [4] Kao A S, Kuhn H A, Richmond O, et al. Workability of 1045 Spheroidized Steel under Superimposed Hydrostatic Press [J]. Met Trans, 1989, 20A: 1735-1741.
- [5] 凌 中. 2124Al/SiCp 复合材料的动态变形行为及微结构效应 [J]. 力学学报, 1998, 30(4): 442-448.
- [6] 戴兰宏. 细观非均质多相复合材料有效弹塑性理论 [R]. 北京: 北京大学博士后研究报告, 1998.
- [7] Fleck N A, Hutchinson J W. Aphenomenological Theory for Strain Gradient Effects in Plasticity [J]. J Mech Phys Solids, 1993, 41: 1825-1857.
- [8] Fleck N A, Hutchinson J W. Strain Gradient Plasticity [J]. Adv Appl Mech, 1997, 33: 295-361.
- [9] Fleck N A, Muller G M, Ashby M F, et al. Strain Gradient Plasticity: Theory and Experiments [J]. Acta Mater, 1994, 42: 475-487.
- [10] Nix W D, Gao H. Indentation Size Effects in Crystalline Materials: A Law for Strain Gradient Plasticity [J]. J Mech Phys Solids, 1998, 46: 411-425.
- [11] Ashby M F. The Deformation of Plastically Non-Homogeneous Materials [J]. Phil Mag, 1970, 21: 399-424.
- [12] Eshelby J D. The Determination of the Field of an Ellipsoidal Inclusion and Related Problems [J]. Proc Roy Soc, 1957, A241: 376-396.
- [13] Kamat S V, Rollett A D, Hirth J P. Plastic Deformation in Al Alloy Matrix-Alumina Particulate Composites [J]. Scripta Metall, 1991, 25: 27-32.

STRAIN GRADIENT EFFECTS ON THE STRENGTHENING BEHAVIORS OF PARTICLE REINFORCED METAL MATRIX COMPOSITES

DAI Lan-hong ,LING Zhong ,BAI Yi-long

(*State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM) ,Institute of Mechanics ,
Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100080 , China*)

Abstract: Although much efforts have been made to understand the relationship between microstructures and deformation behaviors of particle-reinforced metal matrix composites (PRMMCs) during the past several decades, there are still some phenomena remained to be understood, one of which is size effects in PRMMCs. Recently, many experimental results demonstrate that reinforcing particle sizes have a significant influence on yield and flow stresses of PRMMCs. However, various micromechanical models which are based upon homogenization technique for particulate composites predict particle volume fraction effects on deformation behavior of composite materials but show an independence of particle sizes. According to this observation, a strengthening-strain gradient relation for particle-reinforced metal matrix composites was developed by making use of the concept of geometrically necessary dislocation and proposed dislocation model. A comparison with existing experimental results demonstrates that the relation predicts a dependence of yield and flow stresses of composites on reinforcing particle sizes. From this relation, we found that the strengthening effect of mechanical behavior of composites is controlled by both characteristic microstructure geometrical parameters and strain gradient in matrix. For a given PRMMCs, the strengthening effect of the composite is completely controlled by particle size or strain gradient in the matrix. This tells us that the strain gradient in matrix may be an important factor controlling deformation and fracture behavior of heterogeneous material systems. Moreover, effects of characteristic microstructure geometrical parameters on deformation localization of PRMMCs are also discussed.

Key words: particle reinforced metal matrix composites ; strain gradient ; size effect ; dislocation ; deformation localization