复合材料学报 第19卷 第4期 8月 2002年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 19 No. 4 August 2002

文章编号: 1000-3851(2002)04-0051-05

冲击剪切载荷下 SiC_P/6151Al 复合材料变形局部化及增强颗粒尺寸效应

刘龙飞[1,2], 戴兰宏[1], 凌 中[1], 杨国伟[2]
(1. 中国科学院 力学研究所 非线性力学国家重点实验室(LNM), 北京 100080; 2. 湘潭大学物理系, 湘潭 411105)

摘 要: 利用特殊设计的"hat shape"试样, 在分离式 Hopkinson 压杆和 MTS 通用材料试验机上实验研究了颗粒尺寸和应变率对颗粒增强金属基复合材料(SiC_P/6151Al)变形局部化行为的影响。结果表明: 颗粒尺寸对复合材料的变形强化与变形局部化行为有显著影响。具体表现为: 颗粒越小, 复合材料流动应力越高, 即强化效果越好; 另一方面, 对受载试样的微观检测发现, 颗粒越小, 复合材料剪切变形局部化越明显。同时发现, 冲击载荷(高应变率)下复合材料更容易发生变形局部化。

关键词: 冲击; 金属基复合材料; 变形局部化; 尺寸效应
中图分类号: TB331 **文献标识码:** A

LOCALIZED DEFORMATION AND PARTICLE SIZE-EFFECT IN PARTICLE-REINFORCED SiC_P/6151Al COMPOSITES UNDER IMPULSIVE SHEAR LOADINGS

LIU Long-fei[1,2], DAI Lan-hong[1], LING Zhong[1], YANG Guo-wei[2]
(1. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. Department of Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: The effects of the reinforcing particle size and strain rate on deformation localization behavior of SiC_P/6151Al composites are investigated by making use of Split Hopkinson Bar and MTS-810 Materials Testing System with specially-designed hat-shaped specimens, which can produce a shear loading in the specimen. The experimental results demonstrate that the strengthening effect for the small-size particle-reinforced composite is higher than that for the large-size particle-reinforced composite. However, the small-size particle-reinforced composite is more prone to deformation localization than the large-particle composite under impact loading. The mechanisms leading to deformation localization in particle reinforced metal matrix composites are discussed in this paper as well.

Key words: high strain rate; metal matrix composites; deformation localization; size-effect

颗粒增强金属铝基复合材料由于其重量轻、强度高等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]。

然而这种材料在实际使用过程中往往容易受到冲击载荷的作用, 这将给材料的破坏带来难以预料的结果。众所周知, 绝热剪切变形局部化是材料在冲击载荷下特有的一种微损伤形式, 而变形局部化的形成往往是材料宏观破坏的先兆。因此, 理解和表征变形局部化的形成机理及演化动力学规律具有十分重要的意义。在过去的半个多世纪里, 国内外学者对材料的绝热剪切变形局部化行为进行了大量的研究工作, 系统地发展了变形局部化理论如 Zener and Hollmon[3], Rogers[4], Bai[5] 及 Meyers[6] 等。其工作大

收稿日期: 2000-12-01; 收修改稿日期: 2001-01-15
基金项目: (国家自然科学基金(19902017)及中科院重大项目(KJ-951-1-201)
作者介绍: 刘龙飞(1975), 男, 硕士研究生, 主要从事材料动态力学性能方面的研究。

多是在单相金属材料上进行的。对于细观非均质复相颗粒增强金属基复合材料, Ling 等[7,8]的实验研究和 Zhou[9]的数值研究工作均表明, 在这类材料中同样存在绝热剪切变形局部化, 并且其局部化行为对增强颗粒尺寸非常敏感。关于增强颗粒尺寸对颗粒增强金属基复合材料绝热剪切变形局部化的形成与发展的影响虽有些初步的认识[10~12], 但许多问题还有待于系统深入的研究。由于已有的实验研究是在冲击压缩条件下进行的, 试样内部的应力状态极为复杂, 不易辨认局部化形成的机理。为此, 笔者特殊设计了一种 "帽型" 试样, 利用 Hopkinson 压杆和 MTS 实验机研究了均匀剪切载荷下增强颗粒尺寸和应变率对复合材料力学性能的影响, 通过微观观察探讨了复合材料变形局部化中增强颗粒尺寸效应。

1　实验材料

本工作中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 μm、d_p= 28 μm), 体积百分含量都是 7%。

2　实验过程

2.1　试样设计与制备

为了测得在均匀剪力作用下材料的变形行为, 将试样设计加工成 "帽型" 形状, 在圆棒和圆筒相交的圆环区域形成剪切变形(图 1), 由于圆环区域中的 Δd 很小, 可近似认为该区域中剪应力分布均匀。

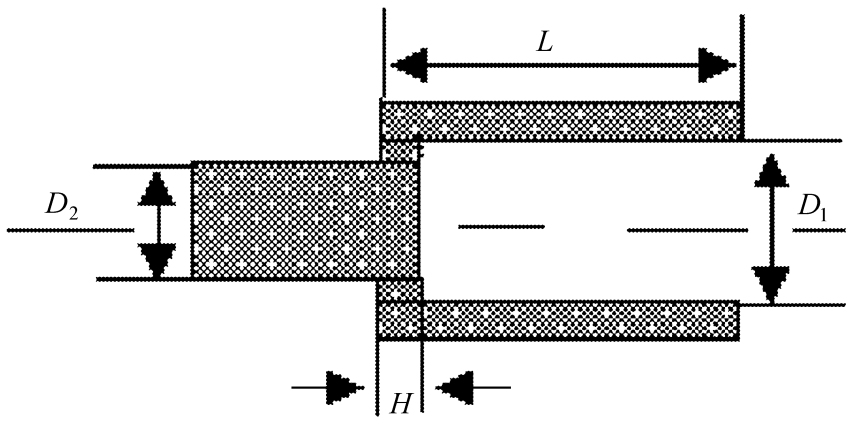


图 1　试样形状与尺寸

Fig. 1　Shape and dimensions of the specimen

试样尺寸为: D_1 = 5.60 mm, D_2 = 5.20 mm, H = 4.00 mm, L = 10.00 mm, Δd = (D1- D2)/2。

2.2　静态压缩剪切实验

静态压剪实验是在 MTS-810 材料实验机上完成的。实验过程中三种材料的试样各取多个, 编号以后分别进行实验。实验时, 沿试样轴线施加压缩载荷, 试样承受的剪应力、应变率及应力-应变关系可直接由实验测得数据计算得到。加载速度为 0.5 mm/min。根据试样及加载构型, 试样材料的平均剪切应力可由下式计算

$$f = \frac{P}{\pi D H} \tag{1}$$

其中: P 为施加的压缩载荷, D= (D1+ D2)/2 为剪切区圆环半径, H 为试样中受剪区域的高度。

2.3　冲击压缩剪切实验

冲击压缩剪切实验是在典型的分离式 Hopkinson 压杆上进行的。Hopkinson 压杆是由高强钢材加工而成, 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脉宽和加载幅度。实验过程中采用与静态压缩剪切实验规格完全相同的 "帽子" 试样, 取多个试样在同一条件下进行冲击压缩剪切实验。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。根据 Hopkinson 压杆实验原理, 可直接采用一维应力波理论确定试样材料的应变率、应变和应力。

$$V(t) = \frac{2C_0}{B}[X_i(t) - X_t(t)] \tag{2}$$

$$V(t) = \frac{2C_0}{B}\int_0^t [X_i(t) - X_t(t)]\,dt \tag{3}$$

$$f(t) = \frac{A_0}{\pi D H} d_0 C_0^2 X_t(t) \tag{4}$$

其中: $X_i(t)$, $X_t(t)$ 分别为入射和透射应变脉冲, d_0、C_0 和 A_0 分别 Hopkinson 杆的密度、波速和横截面积, B = (D_1- D_2)/2。实验中根据测到的 $X_i(t)$, $X_t(t)$ 便可由方程(2)、方程(3)、方程(4)得到试样材料的应变率 $V_i(t)$、应变 $V_t(t)$ $f(t)$ 和应力。

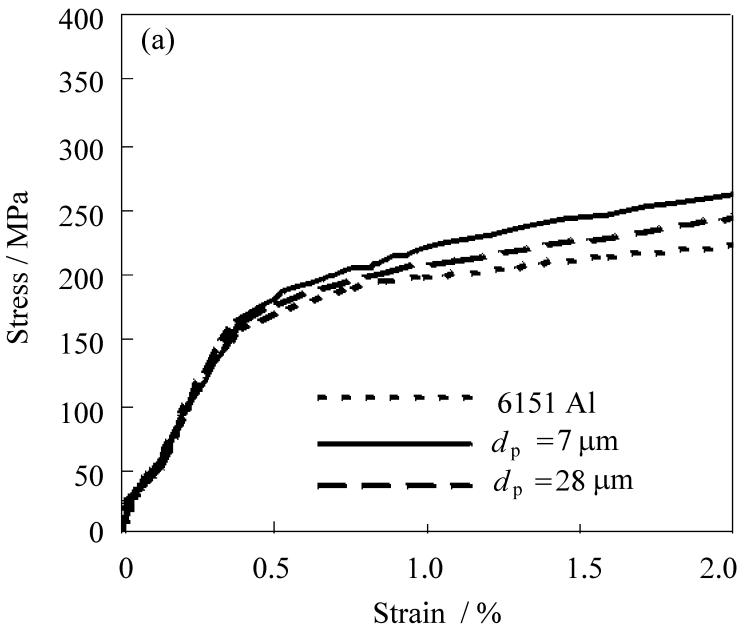
2.4　微观观察

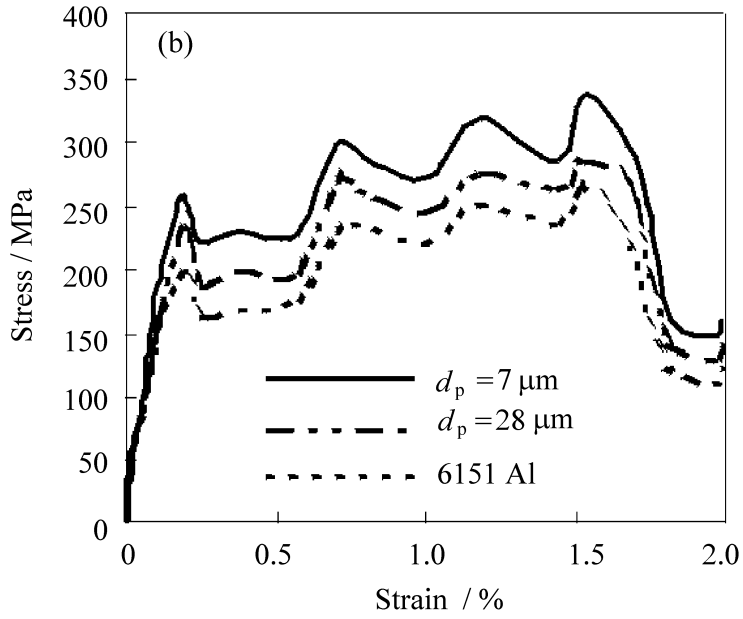
为了观察材料在受载后微结构的变化情况, 实验完毕后, 将回收试样沿其轴线方向切开, 磨平精细抛光并腐蚀后在高倍显微镜下进行微观观察。

3　实验结果与讨论

3.1　实验结果

(1) 图 2(a)、图 2(b) 分别为铝基体和两种尺寸颗粒的复合材料在静态压缩剪切、冲击压缩剪切下测得的剪切应力-应变曲线。从图 2 中可以发现材料的流动应力具有较明显的尺寸效应, 即在相同的应





(a) 静态压缩剪切应力-应变曲线

(b) 冲击压缩剪切应力-应变曲线

(a) Static shear stress-strain curve

(b) Dynamic shear stress-strain curve

图 2 应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve

变下, 增强颗粒尺寸越小应力越大。如在应变为 1 % 时($X \approx 4\times10^3 s^{-1}$), SiC_P 颗粒尺寸 d_P = 7 μm 的复合材料达到 290 MPa 左右, 而基体材料的流动应力为最小, 仅为 230 MPa 左右, SiC_P 颗粒尺寸 d_P = 28 μm 的复合材料则介于两者之间, 为 250 MPa 左右。另外, 在冲击压缩剪切载荷下这类材料的应力-应变曲线比在静态压缩剪切载荷下表现得更为曲折, 图 2(a)、图 2(b), 具有一定的应变率效应, 其形成机理尚需进一步的研究。从 e-X曲线上还可以发现, 这三种材料的剪切模量几乎不受增强颗粒尺寸的影响, 在应变强化阶段, 这些材料的应变强化也没有明显的区别。

(2) 将回收试样沿轴线切开, 经精细磨平抛光腐蚀在高倍显微镜下进行观察。观察发现, 在静态压缩剪切下, (图 3(a)、图 3(c)、图 3(e))所示, 三种材料试件中没有出现明显的局部化变形。而在冲击压缩剪切下, (图 3(d)、图 3(f))所示, 复合材料中破坏区域邻近有较明显的晶粒细化发生, 表明动载下基体局部化变形较为显著。而且局部化变形具有较明显的增强颗粒尺寸效应, 增强颗粒越小, 变形局部化越明显, 表现为晶粒细化越显著。SiC_P 颗粒尺寸为 d_P = 7 μm 的复合材料中较明显, d_P = 28 μm 的复合材料不是很明显, 而基体材料中几乎没有。

3.2 结果讨论

(1) 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(geometrically necessary dislocation)密度记为 d_G, 可用下式来估计[10]

$$d_G = \frac{12 f_P}{I d_P} X \tag{5}$$

其中 f_P 和 d_P 分别为第二相粒子的体积百分含量和直径大小。由几何必需位错积聚造成复合材料变形强化行为可有如下的应变梯度塑性增强律来表征[10]

$$\left(\frac{e_c}{e_m}\right)^2 = 1 + lZ \tag{6}$$

其中应变梯度 Z 和几何必需位错密度 d_G 关系由下式确定[13]:

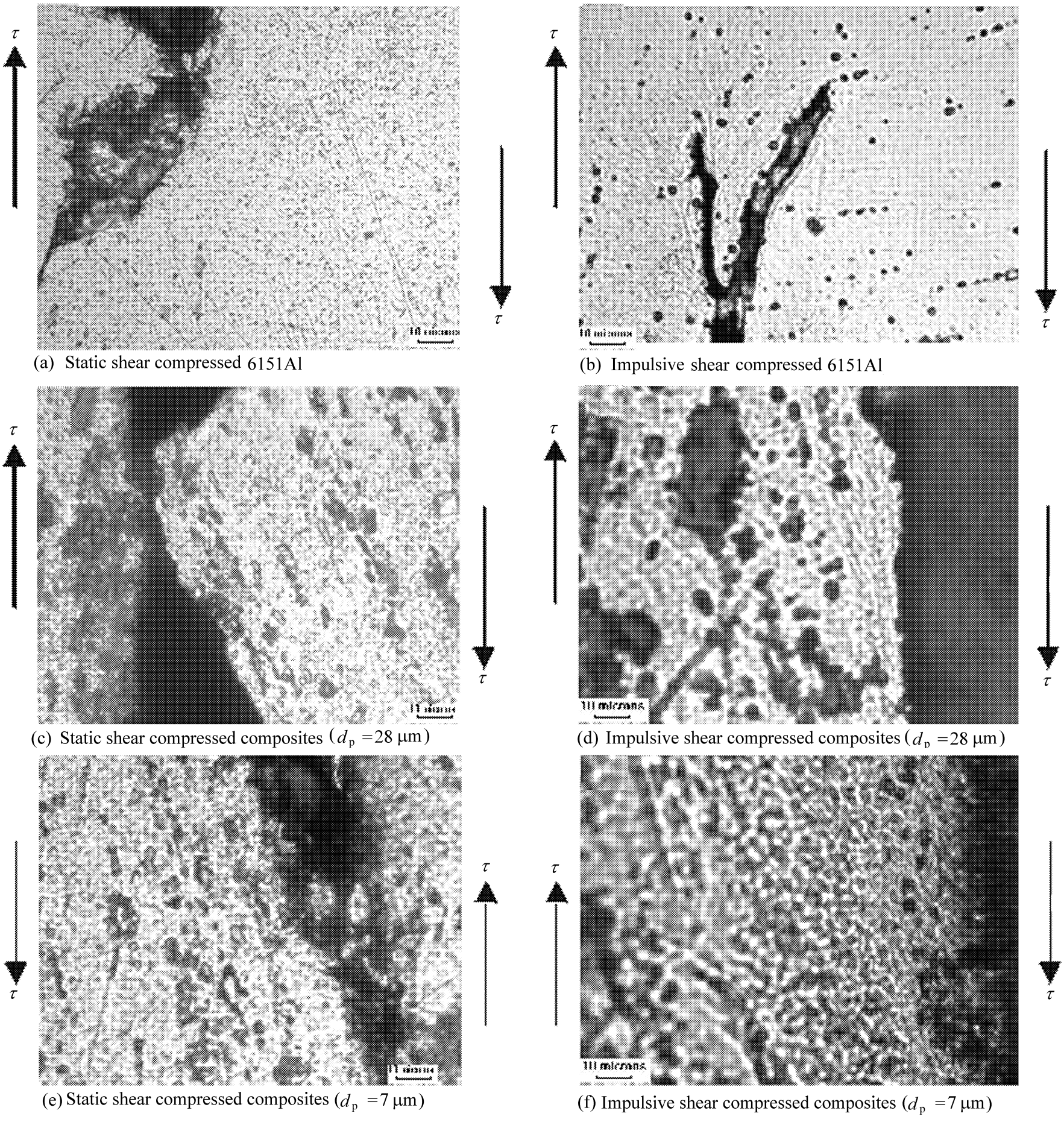
$$Z \sim d_G I \tag{7}$$

式中: I、l 和 Z 分别为伯格斯矢量、材料的特征几何参数和应变梯度, e_c 和 e_m 分别为复合材料和基体的流动应力。由式(5)～式(7)可知, 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。

(2) 高应变率下, 金属基体是一种典型的热粘塑性材料, 其本构行为可由下式表征:

$$f_m = A V^n V^m [^{-} \tag{8}$$

式中: f、V、V 和 [分别为剪切应力、剪切应变、剪切应变率和温度, V、` 和 n、m 均为正参数。根据应变梯度强化律(6), 颗粒增强金属基复合材料应变梯度依赖本构关系可表示为



(a) Static shear compressed 6151Al

(b) Impulsive shear compressed 6151Al

(c) Static shear compressed composites (d_p =28 μm)

(d) Impulsive shear compressed composites (d_p =28 μm)

(e) Static shear compressed composites (d_p =7 μm)

(f) Impulsive shear compressed composites (d_p =7 μm)

图 3　微观照片

Fig. 3　Micrographs

$$f = f_m(1 + lZ)^{\wedge} \tag{9}$$

按照最大应力准则，复合材料绝热剪切失稳临界应变 V_c 可表示为[12]

$$V_c = \left(\frac{ndC}{a`V^m(1 + lZ)^{\wedge}}\right)^{\frac{1}{n+1}} \left[\frac{`+1}{n+1}\right. \tag{10}$$

式中 d、C 和 a 是密度、比热和功热转换系数。由上式可知应变梯度越大，临界应变 V_c 越小，即容易出现绝热剪切局部化。从而颗粒越小，变形时应变梯度就越大，就越容易出现绝热剪切局部化。

从上式(1)和式(2)的分析中可以看出：应变梯度一方面在材料的变形中起强化作用，而另一方面又使材料的临界应变 V_c 减小，诱发其发生局部化变形，促进材料失效。据此可以清楚地看到，应变梯度在颗粒增强金属基复合材料的变形中起到非常重要的作用，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

(1) 本文中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, 含较小碳化硅颗粒(d_p= 7 μm)的复合材料的屈服及流动应力明显高于含较大颗粒(d_p= 28 μm)复合材料。这主要是因为小颗粒复合材料中的应变梯度强化效果较好所致。

(2) 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)剪切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)剪切下的屈服强度和流动应力。

(3) 显微观察表明: 冲击剪切载荷(高应变率)下所研究的复合材料较容易形成局部化变形, 而且增强颗粒尺寸大小对局部化变形也有明显的影响, 即小尺寸颗粒增强材料更易发生局部化变形, 这是因为随着颗粒尺寸的减小, 材料中应变梯度增加, 临界应变减小, 局部化变形更易发生。

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]. UK: Cambridge University Press, 1993. 1- 10.

[3] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. J Appl Phys, 1944, 15(1): 22- 27.

[4] Rogers H C. Adiabatic shear deformation [J]. Int Rev Mat Sci, 1979, 9(1): 283- 311.

[5] Bai Y L. Thermo-plastic instability in simple shear [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1982, 30(1): 195- 207.

[6] Meyers M A. Dynamic Behaviors of Materials [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1994. 448- 486.

[7] Ling Z, Luo L, 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(1): 453- 458.

[8] Chichili D R, Ramesh K T. Recovery experiments for adiabatic shear localization: a novel experimental technique [J]. J App Mech, 1999, 66(1): 10- 20.

[9] Zhou M. Effects of microstructure on resistance to shear localization for a class of metal matrix composites [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure, 1998, 21(1): 425- 438.

[10] Dai L H, Ling Z, Bai Y L. A strain gradient-strengthening law for particle reinforced metal matrix composites [J]. Scripta Materialia, 1999, 41(3): 245- 251.

[11] Dai L H, Ling Z, Bai Y L. Size-dependent inelastic behavior of particle reinforced metal matrix composites [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(5): 1057- 1063.

[12] Dai L H, Ling Z, Bai Y L. Strain gradient effect on initiation of adiabatic shear localization in metal matrix composites [J]. Key Engineering Materials, 2000, 177- 180: 401- 406.

[13] Gao H, Huang Y, Nix W D, et al. Mechanism-based strain gradient plasticity I. Theory [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1999, 47(10): 1239- 1263.