

2124 Al/SiC_p 复合材料的动态变形 行为及微结构效应¹⁾

凌 中

(中国科学院力学研究所 LNM 开放实验室, 北京 100080)

摘要 研究了在动态压缩时 2124 Al/SiC_p 复合材料的变形行为与微结构效应. 分析结果表明, 对于给定材料, 复合材料的流动应力主要取决于微结构尺度效应. 若增强相尺寸, 基体晶粒尺寸以及增强相间距三者大小相当, 则复合材料的流动应力取决于增强相的分散程度和位错密度; 若增强相尺寸及其间距大小相当, 但比基体晶粒大得多, 那复合材料的流动应力主要取决于增强相的分散度. 微观观测发现在同样加载条件下, 变形局部化更容易在含较小碳化硅颗粒的复合材料内形成; 变形区内的微损伤几乎都是基体与粒子界面脱粘和粒子角点邻近的微裂纹. 对于所研究的这类复合材料, 弹性模量及应变硬化几乎不受增强颗粒尺寸影响.

关键词 微结构效应, 流动应力, 微观变形, 损伤

引 言

材料的变形行为是材料各组分和微结构因素对于宏观力学性能产生影响的综合反映, 因而, 其力学行为与微结构的相关性一直是人们关注的问题之一. 典型的工作是对于含有第二相粒子的合金材料的研究. 实验与分析研究的结果表明, 在受载过程中, 合金材料中第二相粒子阻止基体变形, 从而提高合金材料的强度. 一般地讲, 二相粒子的存在及其分布不仅直接影响材料的屈服强度, 破坏强度等^[1], 其尺寸还是评价材料断裂性能的必要因素^[2, 3]. 与合金材料类似, 在颗粒增强金属基复合材料中, 由于增强相颗粒的强度、硬度往往高于基体材料的, 微观非均匀以及微结构效应更为突出. 因此, 对于这类高性能、新型复合材料来说, 微结构效应的影响依然是研究热点^[4]. 有关这类复合材料的动态力学行为与微结构效应的研究工作的报道十分有限^[5]. 本文从实验分析角度描述一种颗粒增强金属基复合材料在动态压缩条件下的变形行为及微结构尺寸效应, 重点考察了在变形过程中, 复合材料中各组成相尺寸的变化和对复合材料的宏观力学行为的影响以及相应发生在材料内部的微观变形与损伤.

1 材料与实验

1.1 实验材料

本工作采用的材料是英国 BP 金属复合材料公司提供的含有碳化硅颗粒 (SiC_p) 的 2124 Al 基复合材料. 这些复合材料中分别含有三种不同尺寸的碳化硅颗粒 (3 μm, 13 μm, 37 μm), 碳化硅颗粒的体积比均为 17% ($f_v = 17\%$). 2124 Al 的基本力学性能参数等在表 1 列出. 图 1 是

1) 国家自然科学基金(19672068)和中国科学院“九五”KJ-951-20-1 重大项目基金资助.

1997-06-24 收到第一稿, 1997-01-14 收到修改稿.

未经加载的 2124 铝基复合材料(含 13 μm SiC 颗粒)的原始微观图像. 由图像可见, 这些材料密实, 碳化硅颗粒与基体之间无明显脱落和开裂, 碳化硅颗粒分布均匀.

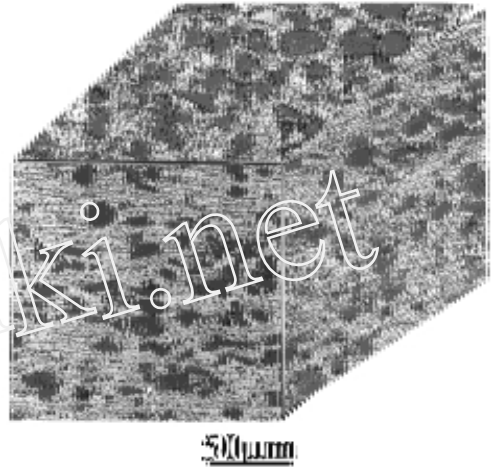


表 1 2124 Al (T4)的基本力学性能参数等(静态拉伸试验)

Table 1 The mechanical property of 2124 Al(T4)

Tensile strength (MPa)	Young's module (GPa)	Grain size (μm)
460	72	3 ~ 4

1.2 实验

动态压缩实验是在 Hopkinson 压杆 (16) (SHPB)上进行. 分别在四种材料按同一取向截取直径为 5 mm, 高 5 mm (5 ×5)的圆柱为试件. 动态加载将沿圆柱轴线方向进行. 实验前, 将试件加热至 530 , 保温 55 min, 冷水淬火后 2 h 之内进行动态实验. 试件承受的最大压应力, 应变率及材料应力-应变关系可直接由实验测试数据计算得到. 动态实验后, 将回收试件沿其轴线方向切开, 磨平精细抛光后在高倍金相显微镜下进行微观观察.

图 1 未卸载的 2124 Al 基复合材料的原始微观图像(2124 Al/ SiC_p(13 μm))

Fig. 1 The micrograph of original composite 2124 Al/ SiC_p(2124 Al/ SiC_p(13 μm))

2 实验结果

2.1 宏观力学响应

图 2 是同一应变率下 (̇ = 2100 1/s) 四种材料的轴向应力应变曲线. 曲线中最明显的是, 随着所含碳化硅颗粒尺寸改变, 这四种材料的流动应力不同. 其中, 含较小碳化硅颗粒 (3 μm) 的 2124 Al 的流动应力最大, 在应变为 40 %时, 应力约 1300 MPa. 在同样应变下, 纯 2124 Al 的流动应力最小, 应力约 900 MPa. 含 13 μm 碳化硅颗粒的 2124 Al 的流动应力小于含 3 μm 碳化硅颗粒的, 大于含 37 μm 碳化硅颗粒的. 另外, 试件的最大轴向变形明显受到颗粒尺寸的影响. 含小的碳化硅颗粒的试件的最大轴向变形为 40 %时, 试件几乎接近破坏. 其他试件的轴向变形已明显大于 40 %, 却没有破坏的兆头, 从曲线上看, 这些材料的弹性模量似乎不受增强颗粒尺寸的影响. 在应变硬化阶段, 这些材料的应变硬化也没有明显的变化.

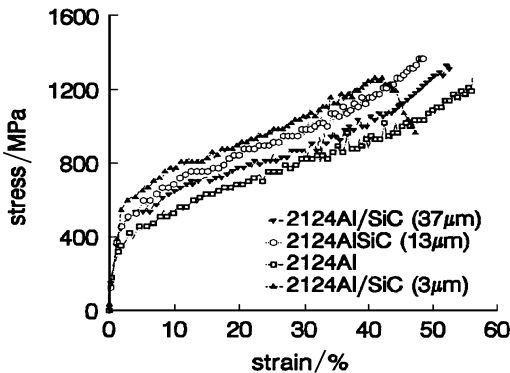


图 2 应变率为 2100 1/s 时, 2124 Al 及其复合材料的应力应变关系

Fig. 2 stress-strain curves of 2124 Al and its composites under dynamic compression, ̇ = 2100 1/s

2.2 微观观测结果

将回收试件沿轴线切开,经精细磨平抛光后,在纵截面可直接看见暗色的,呈“V”形的区域,这些区域一般沿样品纵截面的对角线方向.在高倍金相显微镜下观察发现这些区域就是变形区.在变形区内,基体晶粒沿确定方向发生变形,变形程度随着增强颗粒尺寸变化而不同.在纯 2124 Al 的变形区,晶粒明显沿流动方向(图 3(a)).在含 $3\ \mu\text{m}$ 碳化硅颗粒的样品中,已可见到“V”形裂纹,裂尖前方已出现明显的变形局部化,基体晶粒和碳化硅颗粒随着变形流动发生偏转,形成窄带(图 3(b)).图 3(c),图 3(d)给出含较大碳化硅颗粒的样品的微观变形图像.在同样的放大倍数下,含 $13\ \mu\text{m}$ 碳化硅颗粒的样品的变形区内无法找到明显的变形局部化,这与图 3(b)不同.但沿样品纵截面对角线方向,基体晶粒依然呈现出较明显流动趋势,碳化硅颗粒也略有偏转(图 3(c)).从含有 $37\ \mu\text{m}$ 碳化硅颗粒的样品的微观图像可见(图 3(d)),仅各大颗粒之间的基体有流动趋势.由于受碳化硅颗粒影响,其流动方向不确定.在碳化硅颗粒角点处,

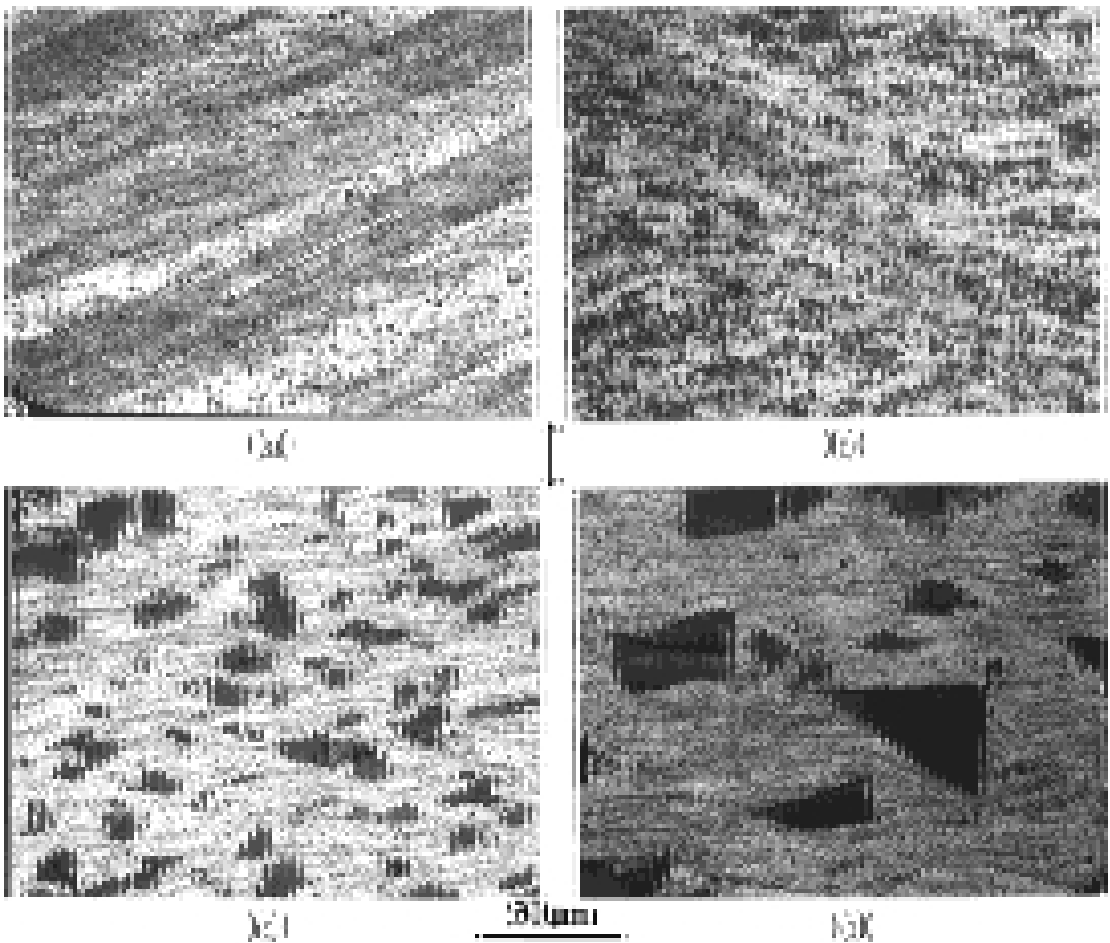


图 3 在同一加载条件下 ($\dot{\epsilon} = 2100\ 1/s$),四样品纵截面变形区内微观图像,其中箭头表示加载方向.

(a) 2124 Al, (b) 2124 Al/SiC_p(3 μm), (c) 2124 Al/SiC_p(13 μm), (d) 2124 Al/SiC_p(37 μm)

Fig. 3 Micrograph of deformation in 2124 Al and its composites under dynamic compression,

$\dot{\epsilon} = 2100\ 1/s$, in which, the arrow direction is loading direction

基体晶粒畸变明显比远离角点处厉害. 与其他三样品的微观图像比较, 在同样的放大倍数下, 这些大的碳化硅颗粒几乎没有任何移动和偏转. 图 4 是 SEM 微观观测图像. 从图像中我们可以看到, 在变形区内, 微损伤大多是碳化硅颗粒与基体间脱粘和开裂. 尤其在变形局部区域内 (含 3 μm 碳化硅颗粒的样品), 基体内已出现沿剪切流动方向的裂纹和孔洞, 基体与颗粒间界面和角点处发生脱粘(图 4). 在含较大碳化硅颗粒的样品中也可观察这样的微损伤.



图 4 扫描电镜下观察到的发生在 2124 Al/ SiC_p 样品内变形区中的微损伤(含 3 μm 碳化硅颗粒)

Fig. 4 The SEM micrograph of microdamage occurred in 2124 Al/ SiC_p (3 μm SiC particles)

3 分析与讨论

3.1 关于流动应力

本文实验条件下, 2124 Al/ SiC_p 复合材料的流动应力依赖碳化硅颗粒的尺寸, 同时微观变形图像也有区别. 针对本文情况, 我们将分析这些复合材料的流动应力究竟与哪些微结构因素相关. 设复合材料的流动应力 f , 可表为 $f = f(E_m, \sigma_{mf}, d_m; E_p, d_p, \rho, \lambda)$, 其中, E_m, σ_{mf}, d_m 为基体的弹性模量, 流动应力和晶粒尺寸; E_p, d_p, ρ 分别为颗粒相的弹性模量, 颗粒尺寸和粒子间距; λ 位错密度, 即基体中单位长度上的位错数; 粒子间距 d_p [6]

$$d_p = \frac{1}{2} d_p \left[\frac{\rho}{\sqrt{3} f_v} - \sqrt{\frac{8}{3}} \right] \text{ 粒尺} \quad \text{这四}$$

其中, f_v 是碳化硅颗粒的体积比. 注意到 d_m, d_p, ρ 为长度量纲, 即 $[d_m] = [d_p] = [\rho] = L$, 而 $[\lambda] = 1/L$. 按量纲分析 [7], 有

$$\frac{f}{\sigma_{mf}} = f \left[\frac{E_m}{E_p}, \frac{d_p}{d_m}, \frac{d_m}{d_p}, \frac{1}{\lambda d_p} \right] \text{ 微结}$$

在本文, 复合材料的基体和增强相材料是确定的, 即 $E_m/E_p = \text{常数}$. 于是

$$\frac{f}{\sigma_{mf} h} = f \left[\frac{d_p}{e \xi_p}, \frac{d_m}{d_p}, \frac{1}{\rho d_p} \right]$$

d_p/d_p 是相对间距, λ 是在粒子间距上的位错数. 因为这三种复合材料中的碳化硅颗粒的尺寸, 晶粒尺寸, 粒子间距均为已知, 且相对间距 (对于这三种复合材料来说) 是常数, 故 $\frac{f}{\sigma_{mf}} =$

$f \left(\frac{d_m}{p} \right)^{\frac{1}{p}}$. 注意到基体为同一材料, d_m 亦为定值, 于是, 流动应力直接由增强粒子间距和在
该间距上的位错数控制. 关于位错的影响, 可估计如下: 一般地, 粒子边界邻近位错密度高于
远离粒子的地方. 设含小粒子的基体的位错密度为 $(3 \mu\text{m})$, 含大粒子的基体的位错密度为
 $(37 \mu\text{m})$, 注意在本文的条件下, 小粒子 $p \sim d_m$, 流动应力 $f \sim f(1/(3 \mu\text{m})^p)$; 大粒子 $p \sim$
 $10 d_m$, 流动应力 $f \sim f(1/10, 1/(37 \mu\text{m})^p)$. 实验结果明显有 $f(3 \mu\text{m}) > f(37 \mu\text{m})$, 即

$$f \left(1, \frac{1}{(3 \mu\text{m})^p} \right) > f \left(\frac{1}{10}, \frac{1}{(37 \mu\text{m})^p} \right); \text{ 或}$$

$$f \left(1, \frac{1}{\text{弹}_{(3 \mu\text{m})} d_m} \right) > f \left(\frac{1}{10}, \frac{1}{(37 \mu\text{m}) 10 d_m} \right) \text{ 为 弹 性 模}$$

于是可知, 当粒子间距足够大, 位错对于材料的流动应力影响让位于粒子间距的影响. 或者说,
对于本文涉及的复合材料, 其流动应力的提高, 增强相的分散度是一主要因素. 这一结果与以
前关于第二相粒子对合金材料的增强性结论一致^[1].

3.2 关于微观分析

实验结果表明, 在同样的加载条件下 ($\dot{\epsilon} = 2100 \text{ 1/s}$), 由于所含的碳化硅颗粒的尺寸不同,
本文涉及的四种材料的流动应力发生变化, 且这些样品中变形区的微观图像也不相同 (图 3 (a)
~ 图 3 (d)). 其中, 含最小碳化硅颗粒的样品的流动应力最高, 变形局部化也非常明显. 一方
面, 这是因为加入碳化硅颗粒后, 在加载过程中, 硬粒子阻止其周围基体变形使复合材料的流
动应力提高, 促使塑性变形. 另一方面, 高应变率下, 不可逆塑性功转换为热, 热软化又加速塑
性变形^[8]. 于是, 同样加载条件下, 含小碳化硅颗粒的 2124 Al 中的变形局部化比纯 2124 Al 中
的更明显. 从图 2 可见, 含 $3 \mu\text{m}$ 碳化硅颗粒的 2124 Al 的塑性功比纯 2124 Al 的大, 塑性功是
促使形变带变窄的驱动力^[5], 实验结果与此完全一致. 但是, 在同样条件下, 若所含的碳化硅
颗粒较大, 其微观图像就不同了. 如含 $37 \mu\text{m}$ 碳化硅颗粒的样品, 其微观变形图像 (图 3 (d)) 与
纯 2124 Al 的 (图 3 (a)) 完全不一样. 这可解释为, 尽管加入较大的碳化硅颗粒可使复合材料的
流动应力有所提高, 但塑性功中一部分使基体变形, 而另一部分则可能消耗来使粒子变形或驱
使粒子发生偏转. 由于粒子很硬且很大, 现有的条件很难使其发生较大的变形和偏转, 因此我
们观察到的仅仅是碳化硅颗粒之间基体的流动 (图 3 (d)), 而整个图像几乎是均匀变形图像. 在
本文的加载条件下 ($\dot{\epsilon} = 2100 \text{ 1/s}$), 含 $37 \mu\text{m}$ 碳化硅颗粒的复合材料中不能形成明显的变形局部
化. 关于这些复合材料变形区域内的微损伤, 它们大多发生在基体与碳化硅颗粒界面, 特别是
碳化硅颗粒的角点邻近. TEM 观察到这些地方往往位错密集^[4], 计算分析也表明, 粒子角点邻
近区域是三轴应力集中区^[9], 所以高倍显微镜下可观察到粒子角点邻近区的微裂纹及界面脱开
(图 4). 须指出, 无论是含大碳化硅颗粒的还是含小碳化硅颗粒的复合材料, 在其变形区内, 均
可见上述形式的微损伤. 因此, 这些材料的破坏应是塑性变形损伤积累和变形局部化耦合一起
形成的.

4 结 论

1) 用量纲分析方法分析了 2124 Al/ SiC_p 复合材料的流动应力与材料微结构效应的相关性.
认为:

i) 在一般情况下, 材料给定时, 复合材料的流动应力取决于增强相尺寸, 基体晶粒尺寸, 增

强相间距和位错密度;

ii) 若增强相尺寸, 基体晶粒尺寸以及增强相间距三者大小相当, 则复合材料的流动应力取决于增强相的分散程度和位错密度;

iii) 若增强相尺寸及其间距大小相当, 且比基体晶粒大得多, 那复合材料的流动应力主要取决于增强相的分散度.

2) 在同样加载条件下, 变形局部化更容易在含较小碳化硅颗粒的复合材料内形成; 而加入较大的碳化硅颗粒(一般比基体晶粒大得多)时, 大颗粒阻止基体晶粒的流动, 使变形局部化难以形成.

3) 在这几种复合材料中, 应变硬化几乎不受所含碳化硅颗粒大小的影响, 基本上取决于基体材料的应变硬化.

4) 无论是含大的碳化硅颗粒还是含小的碳化硅颗粒, 这些复合材料变形区内的微损伤几乎都是基体与粒子界面脱粘和粒子角点邻近的微裂纹. 这些材料的破坏是塑性变形损伤积累和变形局部化耦合而形成.

致谢 感谢骆利民博士、沈还高级工程师在冲击实验和微观实验中的帮助.

参 考 文 献

- 1 Edelson B I and Jr. Baldwin W M. The effects of second phases on the mechanical properties of alloys. *Transaction of ASM*, 1962, 55: 230 ~ 250
- 2 郑哲敏. 连续介质力学与断裂. 力学进展, 1982, 12: 133 ~ 140. (Cheng C M. Fracture and mechanics of continuous media, *Advances in Mechanics*, 1982, 12: 133 ~ 140(in Chinese))
- 3 Hong Y S, Ye Y G and Xia X X. The effects of the size of the second phase particles on the mechanical properties of a low alloy steel, *ICM 4*, 1983: 849 ~ 855
- 4 Clyne T W, Withers P J. *An Introduction to Metal Matrix Composites*. Cambridge University Press, Cambridge: 1992
- 5 Hong S I, Gray G T and Lewandowski J J. Dynamic deformation behavior of Al-Zn-Mg-Cu alloy matrix composites reinforced with 20% SiC. *Acta Metall Mater*, 1993, 41: 2337 ~ 2351
- 6 Roy G L E, Embury J D, Edward G and Ashby M F. A model of ductile fracture based on the nucleation and growth of voids. *Acta Metall*, 1981, 29: 1509 ~ 1522
- 7 Sedev L I. *Dimensional and Similarity Methods in Mechanics* (translated). Infosearch, London: 1959
- 8 Bai Y L and Dodd B. *Adiabatic Shear Localization*. Pergamon Press, 1992
- 9 Christman T, Needleman A and Suresh S. An experimental and numerical study of deformation in metal-ceramic composites. *Acta Metall*, 1989, 37(11): 3029 ~ 3050

THE DEFORMATION BEHAVIOR AND MICROSTRUCTURE EFFECT OF 2124 Al/ SiC_p UNDER IMPACT LOADING¹⁾

Ling Zhong

(LNM, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract An investigation has been carried out on the deformation and microstructure effect of 2124 Al/ SiC_p composites under dynamic compression. The experimental materials are 2124 Al alloy and its composites, reinforced with SiC particles of 3 μm, 13 μm and 37 μm, the volume fractions of SiC particles is about 17%. One of the experimental results is that, in these composites, their flow stress varies with the SiC particle size under same loading condition, $\dot{\epsilon} = 2100$ 1/s. The further analysis show that the flow stress of these MMC_p is related mainly to the microstructure scale effect. Particularly, the flow stress depends on the dispersion of reinforcements and the density of dislocation in the matrix if the reinforcement size, their distance and the size of matrix grain are almost equal to one another. The flow stress mainly depends on the dispersion of reinforcement if the matrix grain size is much smaller than that of reinforcements and their distance while the latter two are almost equal. This agrees with those of previous researches. Microscopic observations showed that, for the present materials, the localized deformation occurred more readily in the MMC_p containing 3 μm SiC particles, which is due to the plastic work of the present material during deformation. The microdamages occurred in these composites are almost exclusively the debonding in the interface between SiC particle and matrix and microcracks at corners of hard particles. Additionally, the Young's modulus and the strain hardening, in these materials, are not affected by SiC particle size.

Key words microstructural effect, flow stress, micro-deformation, damage

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 19672068) and Key Project of Chinese Academy of Sciences(KJ-951-1-201).

Received 24 June 1997, revised 14 January 1997.