

SiC_p/6151Al 复合材料的微结构效应*

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) 2. 湘潭大学)

摘要 利用分离式 Hopkinson 压杆和 MTS 通用材料试验机研究了 SiC_p/6151Al 颗粒增强复合材料在不同应变率下的变形行为和增强颗粒的尺寸对复合材料微结构及变形行为的影响。结果表明: 对于在不同应变率下的 SiC_p/6151Al 复合材料, 增强颗粒尺寸小的流动应力高于增强颗粒尺寸大的流动应力。根据位错强化理论中的 Hall-Petch 关系对这个结果进行了解释。首次在实验上观测到增强颗粒对复合材料微损伤-微带形成的影响, 并根据微带 (microband) 形成的双位错墙理论 (double dislocation walls), 分析了增强颗粒对复合材料微带损伤及力学性能影响的微结构效应。

关键词 应变率 微结构效应 尺寸效应 微带

分类号 TB331

文章编号 1005-3093(2002)03-0238-05

MIROSTRUCTURE EFFECTS OF SiC_p PARTICLE-REINFORCED 6151Al MATRIX COMPOSITES

LIU Longfei^{1,2} DAI Lanhong^{1**} LING Zhong¹ YANG Guowei²

(1. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Science, Beijing 100080

2. Department of Physics, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105)

* Supported by the National Nature Science Foundation of China 19902017 and Chinese Academy of Science (KJ-951-1-201). Manuscript received Jun 7, 2001; in revised form Dec, 6, 2001

** To whom Correspondence should be addressed, E-mail: LHDAI@LNM.imech.ac.cn

ABSTRACT The deformation behavior under different strain rates and effect of particle size in SiC_p particle-reinforced 6151Al matrix SiC_p/6151Al composites were investigated. The experimental results demonstrate that there have been microstructure effects under different strain rates in particle-reinforced composites. That is the strengthening effect of the small-size particle-reinforced composite is higher than that of the large-size particle-reinforced composite. The explanation is given based on the dislocation-reinforced theory. At the same time, according to the theory of double dislocation walls on formation of microband, the effect of reinforced particle size on the microband formation is explicated. The micrographs of loaded samples showed that reinforcing particles block the formation of microbands. The microstructure analysis shows that reinforcing particles and its size are the main cause of microstructure change and reinforcing effect.

KEY WORDS metal matrix composite, size effect, microband, high strain rate

* 国家自然科学基金资助项目 19902017; 中国科学院资助 KJ-951-1-201.

2001年6月7日收到初稿; 2001年12月6日收到修改稿.

本文联系人: 戴兰宏, 北京市 100080, 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

颗粒增强金属基复合材料具有高硬度、高强度以及好的抗疲劳性能, 有广阔的应用前景^[1]. 作为微结构敏感材料, 其力学性能显著地依赖它的增强相, 所以理解增强行为与微结构的关系是发展先进的颗粒增强金属基复合材料的一个关键的问题. 人们研究了这种复合材料中微结构与变形行为之间的关系^[2~5], 以及增强颗粒尺寸对这类复合材料的力学性能和微结构的显著影响^[6,7]. 本文研究 SiC_p/6151Al 复合材料在不同应变率条件下的微结构效应.

1 实验方法

实验用材料为 6151Al 合金和 SiC_p/6151Al 复合材料, 两种复合材料中碳化硅颗粒的尺寸 d_p 分别为 $7\ \mu\text{m}$ 和 $28\ \mu\text{m}$, 体积分数为 7%. 圆柱形试样的横截面积为 $16\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$. 静态压缩实验在 MTS-810 型材料试验机上完成, 加载速度为 $0.5\ \text{mm/min}$, 应变率 $\dot{\epsilon} \approx 5 \times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$. 冲击压缩实验是在典型的分离式 Hopkinson 压杆上完成的. 实验试样为圆柱形, 取多个试样在同一条件下 ($\dot{\epsilon} \approx 1 \times 10^3\ \text{s}^{-1}$) 进行实验. 将实验后的试样沿其轴线方向切开, 磨平、精抛和腐蚀后在高倍金相显微镜下观察受载后微结构.

2 结果与讨论

由图 1 可见, 在不同的应变率下, 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. 在应变相同的条件下, 冲击压缩 ($\dot{\epsilon} \approx 1 \times 10^3\ \text{s}^{-1}$) 的流动应力普遍高于静态压缩 ($\dot{\epsilon} \approx 5 \times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$) 的流动应力, 具有较明显的应变率效应. 而且, 颗粒越小, 应变率效应越明显.

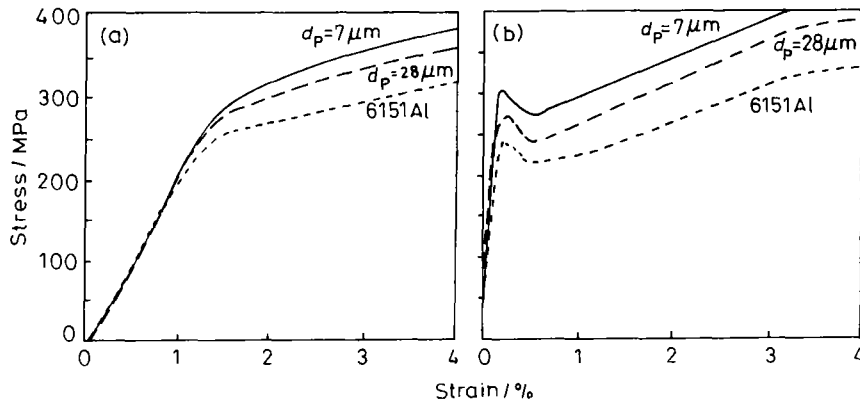


图 1 6151Al 合金和 SiC_p/6151Al 颗粒增强复合材料的静态 (a) 和动态 (b) 压缩应力-应变曲线

Fig.1 Static (a) and dynamic (b) compressive stress-strain curve of 6151Al alloy and particle-reinforced composites d_p : reinforced particle size

经过静态 ($\dot{\epsilon} \approx 5 \times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$) 压缩后, 在基体材料 6151Al 合金中出现较多的微带 (图 2a). 试样受载方向为水平方向. 在碳化硅增强颗粒尺寸为 $28\ \mu\text{m}$ 的复合材料只有少量微带 (图 2c), 而在碳化硅颗粒尺寸为 $7\ \mu\text{m}$ 的复合材料只有很少甚至没有微带 (图 2e). 显然, 在复合材料中微

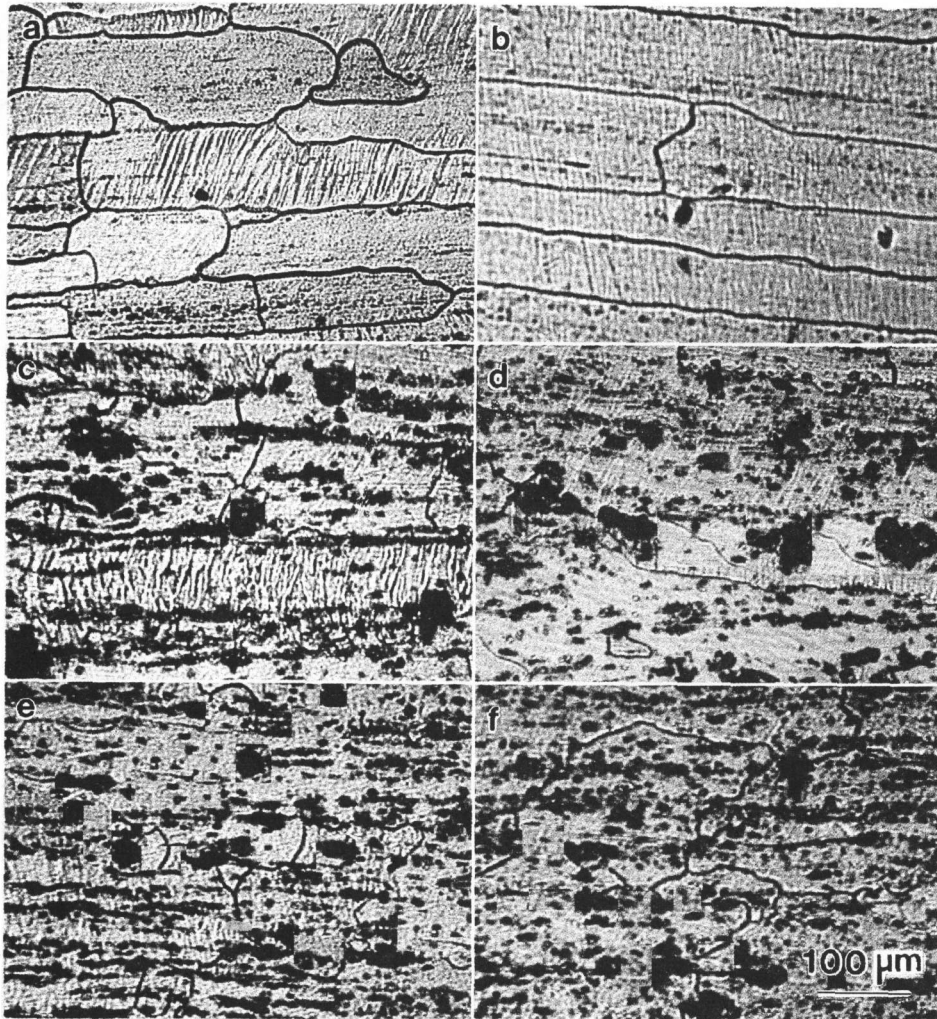


图 2 6151Al, SiC_p/6151Al(28 μm), SiC_p/6151Al(7 μm) 的静态和动态压缩后的显微照片

Fig.2 Micrographs of matrix materials 6151Al alloy and SiC_p/6151Al composites after static (a, c, e) and dynamic (b, d, f) compress (a) and (b) 6151Al alloy; (c) and (d) SiC_p/6151Al composites, $d_p = 28\mu\text{m}$; (e) and (f) SiC_p/6151Al composites, $d_p = 7\mu\text{m}$

带的形成受到碳化硅颗粒及其尺寸的影响, 具有尺寸效应. 在冲击压缩的试样中几乎没有观察到微带, 应变率效应依然很明显, 出现晶粒的碎裂和沿晶界的滑移(图 2b, d, f).

在颗粒增强金属基复合材料中, 载荷从基体到增强颗粒的转移属于直接增强方式, 增强部分对基体微结构和变形模式的影响属于间接增强方式. 间接增强的一个典型例子是增强颗粒与基体材料之间由于变形失配产生的位错增强机制. 根据改进的 Hall-Petch 关系^[8]: $\sigma = \sigma_0 + KD^{-1/2} + K'\rho^{1/2}$, 其中 σ_0 为基体材料中的流动应力, D 为晶粒的直径, ρ 为位错密度, K, K' 为与材料有关的常数. 可知流动应力与材料的晶粒大小及材料内的位错密度密切相关. 由应力与应变的关系曲线可知, 在引入比基体晶粒小的 SiC_p 颗粒后, 流动应力和屈服强度增加. 这主

要是因为 SiC_p 颗粒引入后, 由于其弹性模量、热膨胀系数等与基体材料之间的失配而产生几何必需位错, 增加复合材料的位错密度, 使得材料强化. 由弹性模量和热膨胀失配引起的位错密度分别为^[9,10]: $\rho^{EM} = \frac{12f_p}{bd_p} \epsilon$, $\rho^{CTM} = \frac{6f_p}{bd_p} \Delta C \Delta \theta$. ρ 与 ρ^{EM} 和 ρ^{CTM} 之和记作 ρ_c . 于是关于颗粒增强金属基复合材料的 Hall-Petch 关系可写成 $\sigma_c = \sigma_0 + KD^{-1/2} + K'\rho_c^{1/2}$.

可以看出, 位错密度越大, 材料的流动应力越高. 在复合材料中, SiC_p 颗粒的引入, 增加了材料中的位错密度, 改变了基体材料的微结构, 提高了材料的流动应力和屈服强度. 并且颗粒越小, 影响越明显, 具有颗粒尺寸效应, 与实验结果一致.

微结构观察发现, 基体材料 (6151Al) 中存在较多微带, 在颗粒尺寸为 28 μm 的复合材料中, 只观察到了少量的微带; 颗粒尺寸为 7 μm 的复合材料中几乎没有观察到微带. 根据微带 (microband) 形成的双位错墙理论^[11] (double dislocation walls), 微带的形成必须有符号相反的位错在变形时向局部区域两侧聚集形成双位错墙, 进而才能在双位错墙中形成微带. 在复合材料中, 由于颗粒的引入, 一方面阻碍了同符号位错的聚集, 使微带形成必须的双位错墙难以形成; 另一方面, 由于碳化硅颗粒的强度和硬度等明显高于基体材料, 所以必需有大量的位错来满足复合材料在变形时的匹配需要, 因此在复合材料中难以形成微带. 同时, 在相同的体积百分含量下, 小粒径颗粒 (SiC_p) 增强复合材料中颗粒 (SiC_p) 数量比大粒径颗粒 (SiC_p) 增强复合材料中颗粒 (SiC_p) 数量多得多, 可以计算, 在本实验中, 含 7 μm 粒径碳化硅的复合材料中碳化硅颗粒数是含 28 μm 粒径碳化硅的复合材料中碳化硅颗粒数的数倍, 即 $N_7/N_{28}=4^3=64$. 这就使得在含小粒径碳化硅的复合材料中需要更多的位错来满足材料变形的匹配需要, 从而其对双位错墙形成的阻碍作用也更强, 所以在粒径小的复合材料中更难形成微带. 微带作为材料在变形过程中形成的一种微损伤, 使材料的承载能力下降. 在颗粒增强金属基复合材料中, 增强颗粒具有阻止微带形成的作用, 增强颗粒越小, 这种作用越大. 因而小颗粒增强复合材料具有更好的力学性能, 表现出增强颗粒尺寸效应.

3 结 论

对于颗粒增强复合材料, 在应变相同的情况下, 在高应变率下的流动应力高于在低应变率下的流动应力; 在同一应变率下, 其屈服强度和流动应力比基体材料的屈服强度和流动应力高; 增强颗粒越小, 其屈服强度和流动应力越高; 颗粒的引入阻碍材料中微带的形成和发展, 增强颗粒越小, 这种作用越大.

参 考 文 献

- 1 T.W.Clyne, P.J.Withers, *An Introduction to Metal Matrix Composites* (London, Cambridge University Press, 1993) p.5~38
- 2 WANG Ying(王 莺), ZHOU Yuanxin(周元鑫), XIA Yuanxing(夏源明), The Experimental Research of the Punching Mechanical Properties of SiC Particles Reinforced Aluminum Matrix Composite (SiC 颗粒增强铝基复合材料冲击拉伸力学性能的实验研究), *Mater.Sci.&Tech.* (材料科学与工艺), **6**(3), 1(1998)
- 3 Y.ZHOU, Y.XIA, Experimental Study of the Rate-Sensitivity of SiCP/Al Composite and the Establishment of a Dynamic Constitutive Equation, *Comp.Sci. & Tech.*, **60**, 403(2000)
- 4 ZHANG Guoding(张国定), CHEN Yu(陈 煜), LIU Cheng(刘 澄), The Heterogeneity of Mechanical Properties in the Microzone of Metal Matrix Composites (金属基复合材料微区力学性能的不均匀现象), *Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报), **11**(1), 21(1997)

- 5 HUANG Zanjun(黄赞军), YANG Bin(杨 滨) CUI Hua(崔 华), DUAN Xianjin(段先进), ZHANG Jishan(张 济山), Fabrication and Microstructure of Al Matrix Composite Strengthened by In-Situ Alloying and In-Situ Particulate (原位铝基复合材料的制备及微观组织), Chinese Journal of Materials Research(材料研究学报), **15**(4), 432(2001)
- 6 Z.LING, Deformation Behavior and Microstructure Effect of 2124Al/SiC_p Composite, J. Comp. Mater., **34**(2), 101(2000)
- 7 D.J.Lloyd, Particle Reinforced Aluminum and Magnesium Matrix Composites, Int.Mater.Rev., **39**, 1(1994)
- 8 M.A.Meyersand, K.K.Chawla, Mechanical Metallurgy: Principles and Applications (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984) p.136
- 9 L.H.DAI, Z.LING, Y.L.BAI, A Strain Gradient-Strengthening Law for Particle Reinforced Metal Matrix Composites, Scripta Material, **41**(3), 245(1999)
- 10 L.H.DAI, Z.LING, Y.L.BAI, Particle Size Effects on the Overall Mechanical Behavior of Metal Matrix Composites. ICCE/6, 147(1999)
- 11 J.C.Huang, G.T.Gray, Microband Formation in Shock-Loaded and Quasi-Statically Deformed Metals, Acta Metall., **37**(12), 3335(1989)

www.cnki.net