

[文章编号] 1004-0609(2001)02-0227-04

# 25SiC<sub>w</sub>/LD2 复合材料超塑变形过程中 位错的分布规律<sup>①</sup>

谷万里<sup>1</sup>, 宋伟<sup>1</sup>, 席慧智<sup>1</sup>, 李庆芬<sup>1</sup>, 王德尊<sup>2</sup>, 姚忠凯<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 材料科学与工程系, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程系, 哈尔滨 150001)

**[摘 要]** 采用挤压铸造法制成复合材料并热挤压成板材, 然后对其进行了超塑拉伸实验。当拉伸温度为 570 ℃, 应变速率为  $2.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  时获得了 280% 的延伸率, 用 TEM 观察了超塑变形过程中位错的变化分布规律。结果表明, 位错的密度及分布与变形温度及应变速率有一定关系。在最佳变形条件下, 变形初期位错主要集中在晶界处分布, 随着变形量的加大, 位错向晶粒中间扩展, 并发现有层错及孪晶出现, 这对协调变形具有一定作用。

**[关键词]** 复合材料; 超塑性; 位错; 晶界; 层错; 孪晶

**[中图分类号]** TB333

**[文献标识码]** A

金属基复合材料(MMC)是近二三十年发展起来的新型材料。与传统的金属材料相比, 它虽具有许多优良的性能, 但由于其塑性较差, 影响了它在实际中的应用。近年来人们开始研究它的超塑变形问题并已取得了一些进展<sup>[1~4]</sup>。然而关于金属基复合材料超塑变形中的许多微观过程还不清楚<sup>[5, 6]</sup>。本文作者报道了金属基复合材料超塑变形过程中位错的分布规律与变形条件的关系并在此基础上对变形机理进行了初步探讨。

## 1 实验

制造复合材料所用的基体为 LD2 铝合金, 其成分(质量分数, %)为: 0.44 Cu, 0.67 Mg, 0.27 Mn, 0.014 Cr, 0.37 Fe, 97.2 Al, 0.15 其它元素。增强体为  $\beta$  型 SiC 晶须, 直径 0.1~10  $\mu\text{m}$ , 长度为 30~100  $\mu\text{m}$ 。先用预制块压力渗透凝固铸造法制得复合材料, 再在 470 ℃ 将其挤压成为板材, 宽度 30 mm, 厚 5 mm, 用比重法测得其晶须的质量分数为 25%。

拉伸试样分为拉伸方向与挤压方向相平行的纵向试样和与挤压方向垂直的横向试样。纵向试样在拉伸温度为 570 ℃, 应变速率为  $2.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  时获得了最大达 280% 的延伸率, 而横向试样在同样条

件下的延伸率为 210%。

将在上述条件下拉伸到不同阶段的试样及在其条件下处理的一些对比试样制成透射电镜试样, 并用 Philip CM12 透射电镜观察了不同变形条件下位错的密度变化及形态分布。

## 2 结果与讨论

图 1 所示为在不同变形条件下试样的延伸率为 120% 时的位错密度分布 TEM 照片。从图 1 中可以看出, 在拉伸刚开始时, 位错的密度及分布已经有一些差异, 这些差异主要表现在分布形态上。当变形条件为最佳超塑变形条件时, 位错平均密度较低, 主要分布在晶界附近, 而当变形温度或应变速率与最佳变形条件有差异时, 位错密度较高, 分布也比较均匀。

这种位错分布的差异说明, 在不同的变形条件下, 变形初期的微观变形过程就有差异。在最佳变形条件下位错集中分布在晶界处, 说明此时的变形主要是以晶界滑动来实现的, 而位错运动则主要是为了协调晶粒变形; 晶内位错密度低说明晶粒的变形不是很大, 因此对材料内部没有太大的影响。而在其它的变形条件下, 位错不仅分布在晶界处, 还分布在晶粒内部, 这表明此时晶粒变形较为严重,

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59381002); 黑龙江省自然科学基金资助项目

[收稿日期] 2000-03-21; [修订日期] 2000-09-20

[作者简介] 谷万里(1965-), 男, 副教授。

也进一步证明此时晶界的滑动已不能顺利地进行。

图 2 所示则是在最佳变形条件下试样被进一步拉伸时的位错密度及形态变化。从图中可以看出,随着拉伸的不断进行,位错密度增大,位错分布也开始由晶界附近逐渐向晶粒内部扩展并在晶粒内部形成胞状结构。位错密度由晶界附近向晶粒内部的

扩展表明,即使在最佳变形条件下,随着变形程度的增大,晶粒的形状也会发生较大的变化。而胞状亚晶的形成则证明,在晶粒内部各处局部的变形主要是通过位错运动来协调。

当变形量超过 100% 后,开始有层错和孪晶出现,图 3 所示即为层错与孪晶的 TEM 照片。经电

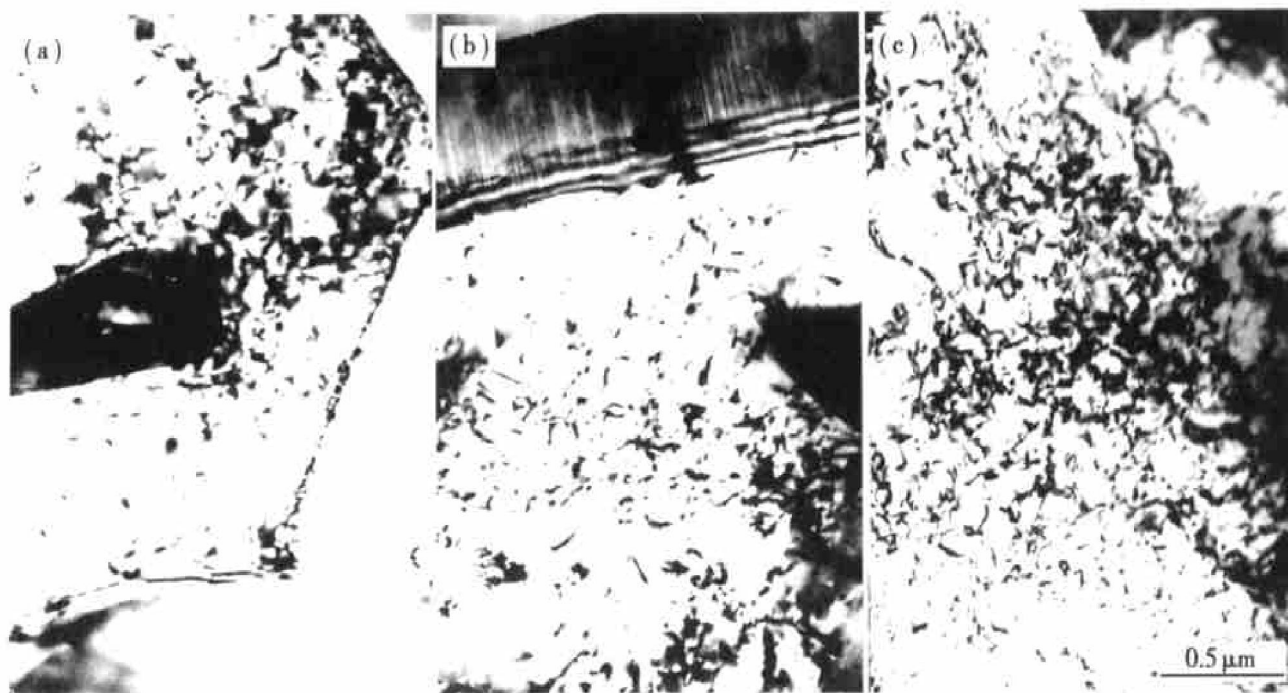


图 1 纵向试样在不同条件下拉伸至 120% 时位错形貌的 TEM 照片

**Fig. 1** TEM morphologies of dislocation in longitudinal tensile samples drawn to 120% under different conditions

(a)  $-570\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $2.0 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ; (b)  $-570\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1.0 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ; (c)  $-525\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $2.0 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$

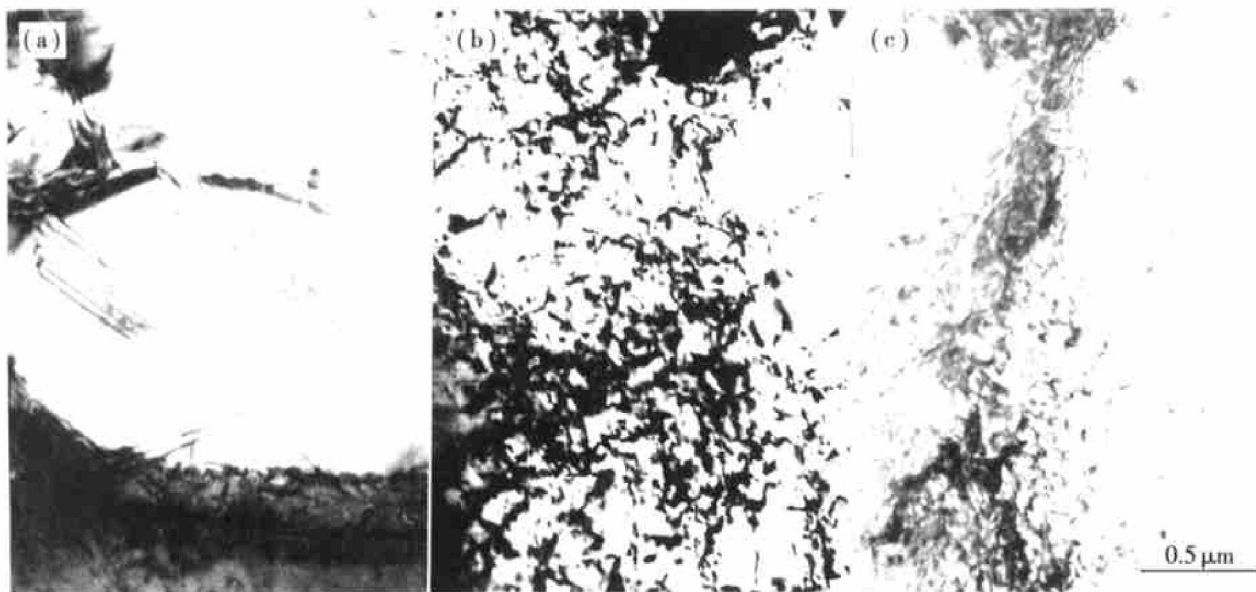


图 2 纵向试样在  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $2.0 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$  时拉至不同阶段的位错形态

**Fig. 2** TEM morphologies of dislocation in longitudinal tensile samples drawn to different stages at  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $2.0 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$

(a) —Drawn to 120%; (b) —Drawn to 160%; (c) —Drawn to 380%

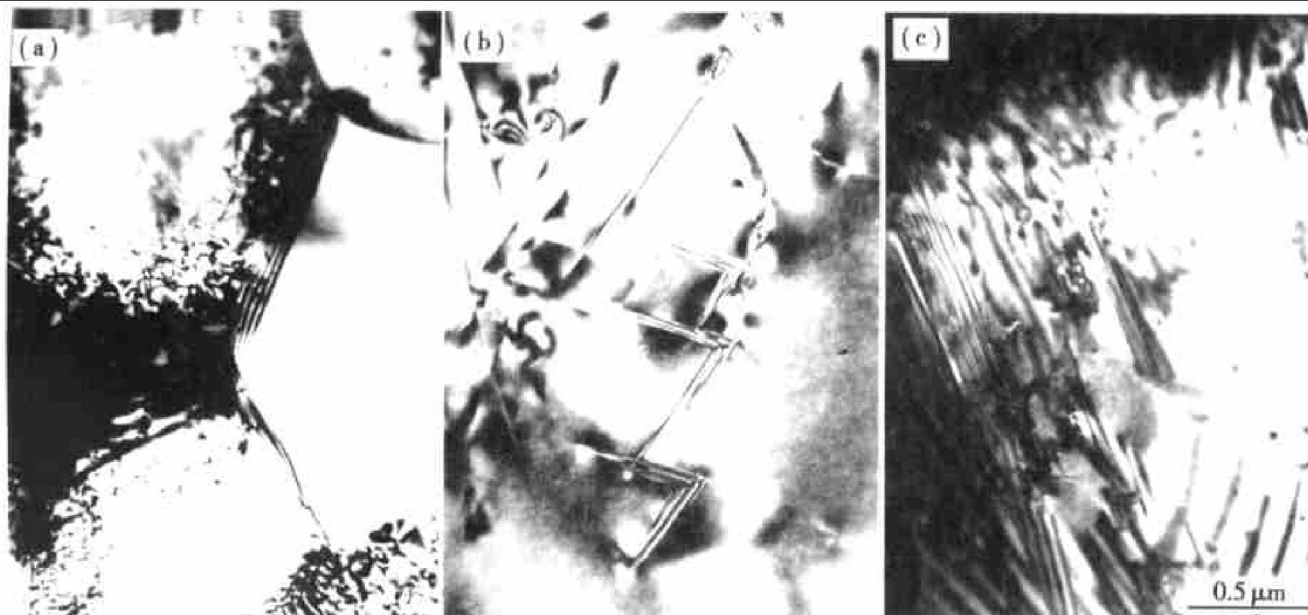


图 3 层错与孪晶的 TEM 照片

Fig. 3 TEM morphologies of stacking faults and twin crystal

(a) —Twin crystal; (b), (c) —Stacking faults

子衍射分析及数学模型计算(另文专门讨论)可知,图 3(a)中的直平行条纹是孪晶,而图 3(b)及图 3(c)中带有 60°及 120°折角的条纹是层错。图中夹角不精确等于 60°或 120°的情况是由于拍摄平面与层错面不平行造成的。

层错和孪晶的出现是超塑变形时特有的现象,它们的出现对位错的调节变形起到一定的辅助作用<sup>[7]</sup>。当变形量较大时,位错之间可能形成缠结或塞积,因而限制了位错运动。层错和孪晶的出现可使位错改变运动方向,从而进一步实现变形。

以上实验结果有助于进一步了解超塑变形的微观过程。根据以往的研究,在超塑变形过程中晶界滑动为主要变形机制<sup>[8]</sup>,而晶粒的形状则基本保持等轴状不变<sup>[9]</sup>。在晶界滑动的过程中,晶粒的形状总要发生改变才能保证在变形时不出现过早的孔洞长大<sup>[10]</sup>,这样就势必要使晶界附近发生比较大的变形,而这正是变形开始阶段位错聚集在晶界附近的根本原因。同时这也表明晶粒变形是从晶界处首先开始的。随着变形的进一步继续,位错向中间发展,这表明单靠晶界附近的变形已不能维持超塑性变形的顺利进行。当出现层错与孪晶时,说明晶粒的整体变形已较为困难,要进一步变形必将造成孔洞的长大,而从结果上看,出现层错与孪晶的阶段与孔洞的突发性长大阶段恰好是一致的。

### 3 结论

在 25SiC<sub>w</sub>/LD2 复合材料中,位错的密度及分布与变形条件有关。在最佳变形条件下,变形初期

位错集中分布在晶界处,而变形进一步进行时则在晶粒内形成胞状结构,并有层错与孪晶的出现。这种分布规律表明晶粒的变形首先从晶界处开始,然后才是晶粒的整体变形,层错与孪晶的出现是晶体整体变形困难的重要标志。

### [ REFERENCES ]

- [ 1 ] Nieh T G. High strain rate superplasticity in aluminum matrix composites [ J ]. Material Science and Engineering, 1992, A147: 129– 142.
- [ 2 ] Higashi K. Superplastic behavior in a mechanically alloyed aluminum composites reinforced with SiC<sub>p</sub> [ J ]. Scripta Metallurgica, 1992( 26 ): 185.
- [ 3 ] Jeong H G. The roles of partial melting on superplasticity of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al-Cu-Mg composites [ J ]. Scripta Metallurgica, 2000, 42( 5 ): 479– 485.
- [ 4 ] Woo Jin Kim. The size effect of SiC particulates on activation energy for superplastic flow in a 2124Al metal matrix composite script [ J ]. Scripta Metallurgica, 1999, 41 ( 10 ): 1131– 1136.
- [ 5 ] Ridley N. Superplastic microstructure [ J ]. Material Science and Technology, 1990, 6( 11 ): 1145.
- [ 6 ] ZHAO Qing( 赵 青 ). 碳化硅颗粒强化铝基复合材料的现状 [ J ]. Metal Forming Technology( 金属成形工艺 ), 1993, 11( 5 ): 236– 240.
- [ 7 ] GU Wan-li. Roles of orientation relationship and recrystallization in superplasticity of SiC<sub>w</sub>/6061Al composite [ J ]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1997, 7( 1 ): 134– 136.
- [ 8 ] Perevezutsev V N. The theory of structural superplastic-

- ity [J]. Acta Metall Mater, 1992, 40(5): 887– 893.
- [9] GU Wan-li(谷万里). 25SiC<sub>w</sub>/LD2 复合材料超塑变形过程中的组织形态及其变化 [J]. Chinese Journal of Materials Research(材料研究学报), 1996, 10(3): 324 – 328.
- [10] GU Wan-li(谷万里). SiC<sub>w</sub>/LD2 复合材料超塑变形过程中的孔洞演化规律 [J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1999, 35(11): 1229– 1232.

## Distribution of dislocation during superplastic deformation in 25SiC<sub>w</sub>/LD2 composites

GU Wan-li<sup>1</sup>, SONG Wei<sup>1</sup>, XI Hu-zhi<sup>1</sup>, LI Qing-fen<sup>1</sup>, WANG De-zun<sup>2</sup>, YAO Zhong-kai<sup>2</sup>

(1. Department of Material Sciences and Engineering, Harbin Engineering University,  
Harbin 150001, P. R. China;

2. Department of Material Sciences and Engineering, Harbin Institute of Technology,  
Harbin 150001, P. R. China)

**[ Abstract ]** The 25SiC<sub>w</sub>/LD2 composites were fabricated using squeeze casting and then hot extruded. Its superplastic behavior was investigated under temperature condition from 550 °C to 580 °C and strain rate ranging from  $8.33 \times 10^{-4}$  to  $8.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  in a constant strain rate test. A maximum elongation of 280% was recorded at a strain rate of  $2.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  at 570 °C. The roles of dislocations during the superplastic deformation was studied. The result indicates that the dislocation distributes near the boundary of grains at the best draw condition. As the deformation continues, the dislocation expands to the internal of grain. When the elongation is over 100%, stacking faults and twin crystal emerge and play an important part in superplasticity deformation.

**[ Key words ]** composites; superplasticity; dislocation; boundary of grain; stacking faults; twin crystal

(编辑 何学锋)