

# 冷热循环对颗粒增强铝基复合材料 微屈服行为的影响<sup>①</sup>

李义春 樊建中 张奎 张少明 石力开

(北京有色金属研究总院国家金属复合材料工程技术研究中心, 北京 100088)

武高辉 孙东立 杨德庄

(哈尔滨工业大学材料学院, 哈尔滨 150001)

**摘要** 采用微屈服强度测试、透射电镜和高分辨透射电镜分析, 对经过不同冷热循环工艺处理后的颗粒增强铝基复合材料的微屈服行为进行了研究。结果表明, 冷热循环次数虽然对颗粒增强铝基复合材料微屈服行为的宏观规律没有本质的影响, 但是仍然影响颗粒增强铝基复合材料的微屈服行为。对球形颗粒而言, 小应变下的微屈服强度随冷热循环次数的增加而增高; 但对棱形颗粒而言, 循环次数的影响较为复杂。研究还表明, 冷热循环次数影响颗粒增强铝基复合材料微屈服行为的主要原因是其位错组态和残余应力在不同的循环次数下有明显的不同。

**关键词** 颗粒增强铝基复合材料 微屈服行为 冷热循环处理

**中图法分类号** TG151

材料的微屈服行为指塑性应变很小时材料的应力与应变的关系(通常指 $(1\sim 2) \times 10^{-6}$ 残余应变), 它反映了材料在微小变形量的情况下抵抗塑性变形的能力。所以, 材料的微屈服行为与尺寸稳定化密切相关。随着金属基复合材料的开发及应用, 颗粒增强铝基复合材料的尺寸稳定性成为目前研究的焦点<sup>[1, 2]</sup>。由于冷热循环处理可以消除材料中的残余应力, 并稳定材料内部的位错组态, 故在铝合金的尺寸稳定化处理工艺中常常被采纳<sup>[3-7]</sup>。因此, 研究冷热循环处理对颗粒增强铝基复合材料微屈服行为的影响, 可初步了解颗粒增强铝基复合材料的尺寸稳定性规律, 对颗粒增强铝基复合材料的开发及应用有重要意义。

## 1 材料及试验方法

### 1.1 材料

本试验所用的材料是采用 6061 铝合金为基体, 以  $Al_2O_3$  和 SiC 颗粒为增强体的复合材料, 用压铸技术制备, 颗粒体积分数为 35%。 $Al_2O_3$  颗粒是由日本四国化成公司制造的, 其平均粒度为  $0.3 \mu m$ , 颗粒形状近似为球形; SiC 颗粒是由中国郑州白鸽集团制造的, 其平均粒度为  $1.8 \mu m$ , 颗粒形状为不规则棱形, 晶体结构均为六方晶系结构。颗粒的物理性质见表 1。颗粒在基体中分布均匀, 并具有很好的界面结合。采用高分辨透射电镜观察材料的界面结合情况, 发现界面上非常“干净”, 无析出物、孔隙和裂缝等缺陷存在(见图 1)。

### 1.2 试验方法

本试验采用 3 种冷热循环处理工艺, 它们是在上限温度  $160^\circ C$  保温 4 h 后快冷至下限温度  $-196^\circ C$  保温 2 h, 分别循环 1, 3 和 5 次。材料的微屈服强度在 Instron 1186 电子拉伸试验

① 哈尔滨工业大学金属精密热加工国防科技重点实验室资助项目

收稿日期: 1997-07-02; 修回日期: 1997-08-29 李义春, 男, 34 岁, 高级工程师, 博士

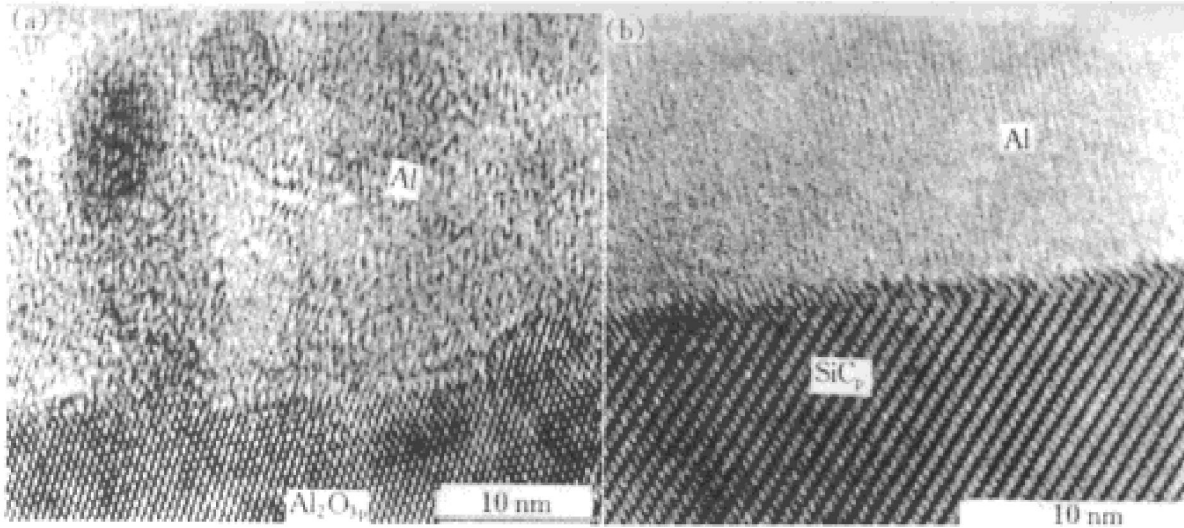


图1 颗粒增强铝基复合材料界面的HREM照片

Fig. 1 HREM morphologies of particle-reinforced aluminium matrix composites

(a) —Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/6061; (b) —SiC<sub>p</sub>/6061

表1 增强体颗粒的物理性质

Table 1 Physical properties of reinforcements

Particle	Lattice	$t_m$ / °C	$\rho$ (g·cm <sup>-3</sup> )	$E$ /GPa	$\alpha$ /10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hexagonal	2288	3.89	345	8.3
SiC	Hexagonal	2735	3.25	570	4.3

机上测定。显微组织结构观察分为普通透射电镜观察和高分辨透射电镜观察。在JSM-800扫描透射电镜上主要观察试样的位错组态及其分布，在JEOL-2000FX高分辨透射电镜上主要观察试样的析出相及界面。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 冷热循环处理对颗粒增强铝基复合材料的 $\sigma - \epsilon_p^{1/2}$ 曲线的影响

根据位错理论，Brown和Lukens提出了金属材料微屈服应力同微塑变之间存在如下抛物线关系：

$$\epsilon_p = \frac{\rho d^3 (\sigma - \sigma_0)^2}{2G\sigma_0} \quad (1)$$

式中  $\rho$  为位错的密度， $d$  为晶粒尺寸， $\sigma$  为施加的应力， $\sigma_0$  为第一个位错运动所必须的应力， $G$  为切变模量。

上式可以改写成如下形式：

$$\sigma = \sigma_0 + K \epsilon_p^{1/2} \quad (2)$$

式中  $K = \sqrt{2G\sigma_0/(\rho d^3)}$ 。很显然， $\sigma_0$  和  $K$  均为材料组织结构敏感参数。复合材料中的颗粒体积分数、残余应力水平、不同的尺寸稳定化处理工艺均可对上述两个参数产生重要的影响。大量的实验事实表明，Brown和Lukens的微屈服理论可以很好地描述金属材料的微屈服行为，因此得到了广泛的应用。

经不同冷热循环处理后，颗粒增强铝基复合材料的  $\sigma - \epsilon_p^{1/2}$  曲线示于图2。各种不同残余应变下的微屈服应力与循环次数的关系示于图3。由图2和图3可以发现如下规律：

(1) 经过冷热循环处理后，颗粒增强铝基复合材料的微屈服行为仍然可用上述的Brown-Lukens理论来描述；也就是说，经过不同次数的冷热循环处理后，颗粒增强铝基复合材料的微屈服机制没有发生本质上的变化。

(2) 对于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/6061 复合材料，当循环次数多于一次时，无论是在小应变量下，还是在大应变量下，循环次数越多，微屈服应力越高，表明冷热循环处理对提高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/6061 复合材料的微屈服应力是有益的；

(3) 对于 SiC<sub>p</sub>/6061 复合材料，当应变量比较小时，随循环次数的增加，微屈服强度先

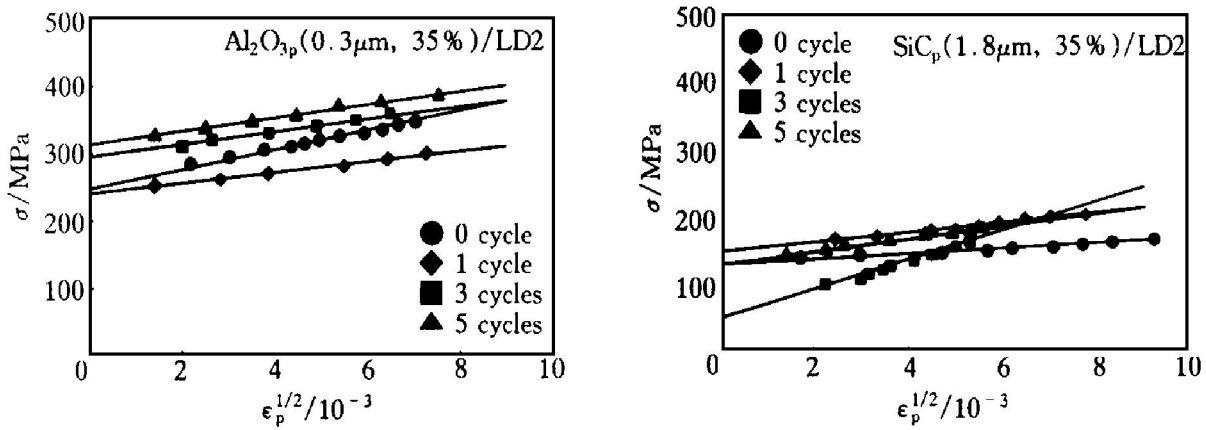


图 2 经不同次数冷热循环处理后, 颗粒增强铝基复合材料的  $\sigma-\epsilon_p^{1/2}$  曲线

Fig. 2  $\sigma-\epsilon_p^{1/2}$  curves of particle-reinforced aluminium matrix composites after different cold/hot cycling times

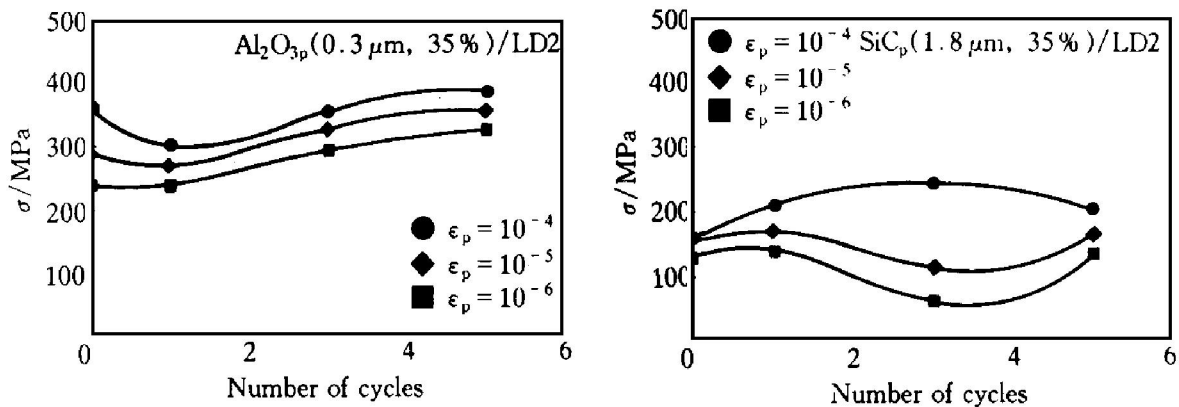


图 3 不同残余应变下颗粒增强铝基复合材料的微屈服应力与循环次数的关系

Fig. 3 Relationship between microyield stress and number of cycles of particle-reinforced aluminium matrix composites under different residual strains

是降低, 而后升高; 当应变变量较大时, 随循环次数增加, 微屈服强度先是增加然后下降。

(4) 经过不同冷热循环处理以后,  $\sigma_0$  和  $K$  均发生不同程度的变化, 这些变化反映了颗粒增强铝基复合材料经过冷热循环处理后微观组织结构的变化。

### 2.2 冷热循环处理后颗粒增强铝基复合材料的微屈服机制

为了分析经过冷热循环处理后复合材料的微屈服机制, 用图 4(a), (b) 给出了  $\sigma_0$  和  $K$  与循环次数的关系。可以发现,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{p}/6061$  复合材料随循环次数增加,  $\sigma_0$  逐渐增加,  $K$  值则逐渐减小;  $\text{SiC}_p/6061$  复合材料随循环次数增

加,  $\sigma_0$  先是下降, 而后上升。由  $K$  的解析式可知, 由于冷热循环的上限温度低于铝合金的再结晶温度, 且位错密度较低, 所以可以认为, 对  $K$  值影响最大的是  $\sigma_0$  和位错源(可动位错)密度  $\rho$ 。在较小应变变量下,  $\sigma_0$  对微屈服强度的贡献很大, 从而使微屈服强度对循环次数的依赖关系类似于  $\sigma_0$  随循环次数的变化规律。

为了进一步分析冷热循环对  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{p}/6061$  复合材料微屈服行为的影响机制, 本文对经 1 次和 5 次循环处理后的复合材料的组织结构进行了 TEM 分析, 其结果分别示于图 5。由于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒呈球状, 尽管随循环次数增加复合材料基体中的位错密度有所提高, 但位错组态

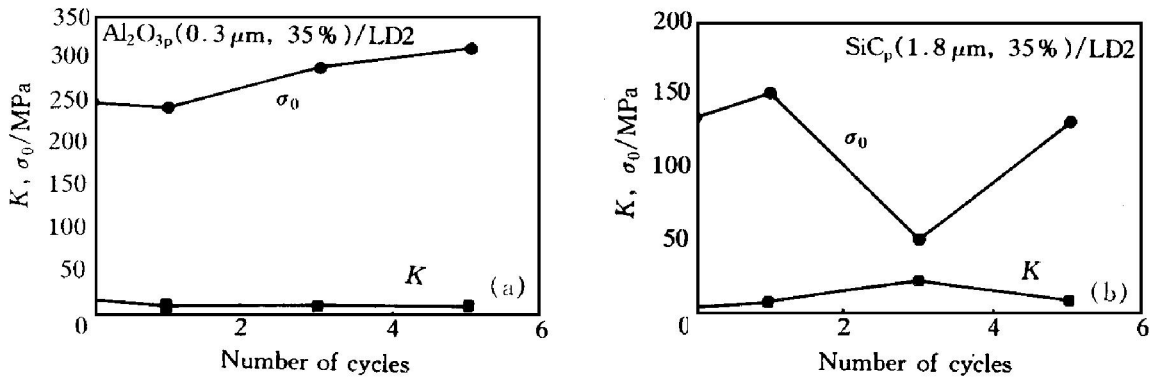


图4 不同残余应变下颗粒增强铝基复合材料的微屈服应力与循环次数的关系

Fig. 4 Relationships between K or σ<sub>0</sub> and number of cycles of particle reinforced aluminium matrix composites

(a) —Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>/6061; (b) —SiC<sub>p</sub>/6061

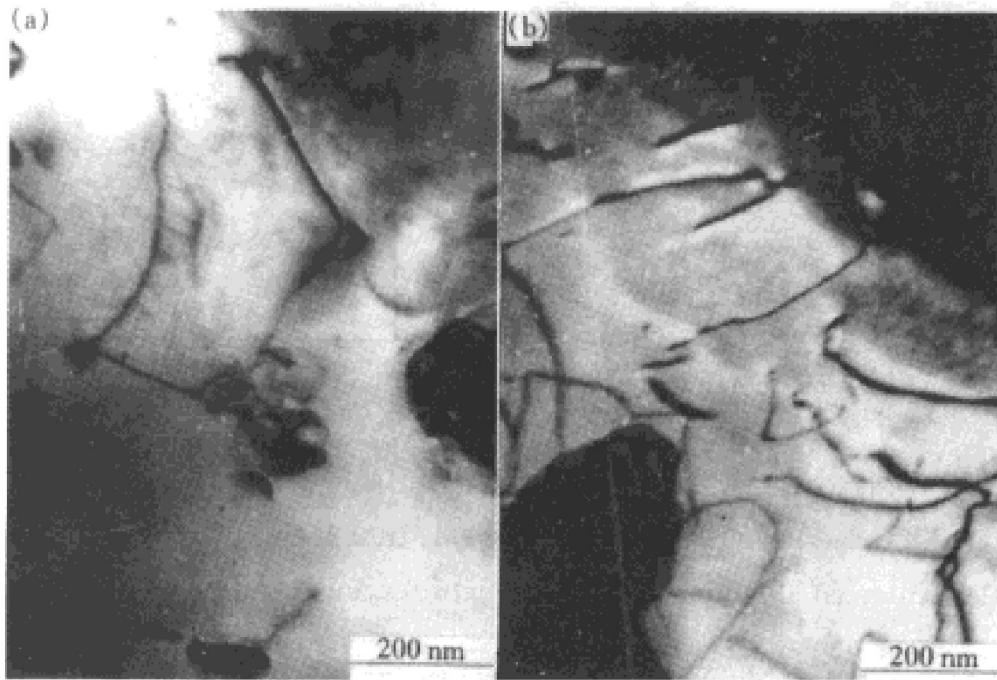


图5 经不同冷热循环处理后, Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>/6061 复合材料的 TEM 照片

Fig. 5 TEM morphologies of Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>/6061 composites after different cold/hot cycling times

(a) —Cycling 1 time; (b) —Cycling 5 times

较为简单, 大部分位错呈直线状。因此对循环次数影响  $\sigma_0$  和  $K$  的机制可做如下分析: 随循环次数增加, 复合材料的残余应力逐渐降低, 与之对应, 位错的起始运动阻力逐渐增加; 另一方面, 随位错密度提高, 位错之间的相互作用增加, 这种位错间的交互作用提高了位错运动的阻力。在上述两个因素的影响下,  $\sigma_0$  随冷热循环次数增加而增加。由  $K$  的解析式可知, 由于冷热循环的上限温度低于铝合金的再结晶温度, 且位错密度较低, 因此可以认为, 对  $K$

值影响最大的是  $\sigma_0$  和位错源(可动位错)密度  $\rho$ 。由图 5 可以发现, 随冷热循环次数增加, 位错密度增加, 且位错基本上为直线状, 也就是说, 在 5 次循环范围内, 循环次数增加提高了 Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>/6061 复合材料基体中的可动位错密度。正因为如此, 循环次数增加导致了  $K$  值的下降。由图 3(a) 还可以发现, 经过 1 次循环后, Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>/6061 复合材料的微屈服强度有所下降, 尤其是在较大残余应变下更是如此。这可通过 Brown-Lukens 关系式加以说明: 对于

小应变量而言, 微屈服强度主要由  $\sigma_0$  决定, 随着应变量增加,  $K$  值对微屈服强度的影响越来越大。由于  $\sigma_0$  随循环次数的增加而增加,  $K$  随循环次数的增加而降低, 所以在较大残余应变下, 当循环次数较小时, 复合材料的屈服强度表现为一定程度的降低。从以上的研究结果可以发现, 欲使大应变量和小应变量下的屈服强度均有较大幅度的提高, 应当选择较多的循环次数。

对于  $\text{SiC}_p/6061$  复合材料, 从图 4(b) 可以发现, 当循环次数低于 3 次时, 随循环次数增加,  $K$  值逐渐增加; 当循环次数高于 3 次时,  $K$  值随循环次数增加而降低。这一变化规律与较大应变时的微屈服强度随循环次数的变化规律定性符合。这可由 Brown-Lukens 理论来理解, 当应变量增加时,  $K$  值对材料微屈服强度的影响愈来愈大, 从而大应变量时的微屈服强度随循环次数的变化规律便与  $K$  的变化规律定性相符合。从图 6 可以发现, 随循环次数增加, 复合材料基体中位错的密度逐渐增加, 且位错状态愈来愈复杂。复合材料经过 3 次冷热循环处理后, 有些位错已经形成了网络状结构。由于  $\text{SiC}$  颗粒为带有棱角的多面体,

随循环次数提高, 在颗粒尖角附近所造成的应力集中愈来愈大, 颗粒尖角附近基体中所储存的应变能愈来愈高。所以当循环次数为 5 次时, 部分位错在复合材料于循环温度上限保温时已经发生了回复, 由此而造成的亚晶界在图 6 中清晰可见。由于冷热循环处理提高了颗粒尖角附近基体中的应力集中, 这种应力集中使得位错开动的临界外切应力下降, 所以循环次数增加时,  $\sigma_0$  先随循环次数提高而下降。当位错发生回复以后(循环次数为 5 次), 回复过程造成了应力集中的释放或部分释放, 从而使复合材料的  $\sigma_0$  值又开始升高。当应力集中所造成的位错密度愈来愈高, 特别是当位错网络形成时, 作为位错源的位错密度愈来愈小,  $K$  值便愈来愈高, 所以随循环次数增加,  $K$  值先是增加, 而当复合材料发生回复以后, 减少了位错之间的相互缠结, 使得可动位错的数量提高, 所以  $K$  值又随循环次数的提高而下降。

### 3 结论

(1) 冷热循环次数对颗粒增强铝基复合材料微屈服行为的宏观规律没有本质的影响。

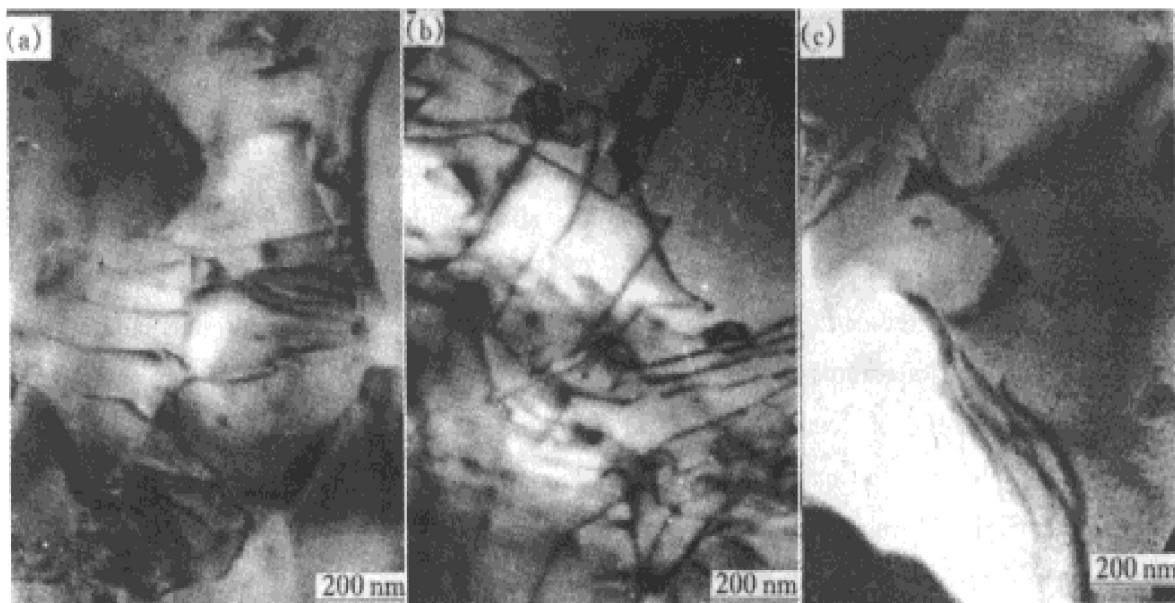


图 6 经不同冷热循环处理后,  $\text{SiC}_p/6061$  复合材料的 TEM 照片

Fig. 6 TEM morphologies of  $\text{SiC}_p/6061$  composites after different cold/hot cycling times

(a) —Cycling 1 time; (b) —Cycling 3 times; (c) —Cycling 5 times

(2) 颗粒增强铝基复合材料的微屈服行为可用 Brown-Lukens 理论加以描述, 即  $\sigma - \epsilon_p^{1/2}$  曲线为直线。

(3) 冷热循环次数对  $Al_2O_3p/6061$  复合材料的微屈服行为有重要影响, 对小应变下的微屈服强度而言, 冷热循环次数越多, 微屈服强度越高。

(4) 冷热循环次数影响颗粒增强铝基复合材料微屈服行为主要原因是其位错组态和残余应力在不同的循环次数下有明显的不同。

## REFERENCES

1 Mohn W R and Vukobratovich D. *J Mater Eng*,

1988, 10: 225.

2 Mohn W R. *SAMPE Journal*, 1988, 1: 26.

3 Kula E. *Residual Stress and Stress Relaxation*. New York: Plenum, 1982.

4 Wang Mengzeng(王萌曾). *Aeronautical Precision Mechanical Engineering(航空精密机械工程)*, 1986, 1: 1.

5 Arsenault R J and Taya M. *Acta Metall Mater*, 1987, 35: 651.

6 Barlow C Y and Hansen N. *Acta Metall Mater*, 1991, 39: 1171.

7 Kumar S and Singh R N. *Acta Metall Mater*, 1995, 43: 2417.

# EFFECT OF THERMAL CYCLING TREATMENT ON MICROYIELD BEHAVIOR OF PARTICLE REINFORCED ALUMINUM MATRIX COMPOSITES

Li Yichun, Fan Jianzhong, Zhang Kui, Zhang Shaoming and Shi Likai  
*General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China*

Wu Gaohui, Sun Dongli and Yang Dezhuang  
*School of Materials Science and Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China*

**ABSTRACT** An aluminum alloy(6061) matrix composite reinforced with 35% volume fraction of  $Al_2O_3$  particles or SiC was fabricated by squeeze casting method. The  $Al_2O_3$  particles are spherical, and SiC particles are angular. The microyield behavior of the composite was investigated, and the effect of different thermal cycling treatments on the microyield behaviors of the composite was studied. Based on TEM and HREM observations of microstructures, the mechanism of microyield behavior in the  $Al_2O_3p/6061$  or  $SiC_p/6061$  composites was analyzed. Results indicate that the microyield behavior of the particles reinforced aluminum matrix composites can be described by Brown-Lukens' s theory which satisfactorily explained that of aluminium alloys and other light alloys, and is greatly affected by the different thermal cycling treatments. The more the numbers of thermal cycling treatments, the higher the microyield strength at small strains in the  $Al_2O_3p/6061$ . Thermal cycling treatment mainly affects the thermal mismatch stress and the density of movable dislocations in the matrix.

**Key words** Al matrix composites microyield behavior thermal cycling treatment

(编辑 彭超群)