

Zn-22% Al 合金的电致超塑性效应^①

李 尧 董晓华

(湖北工学院机械工程系, 武汉 430068)

摘 要 以普通处理的 Zn-22% Al 合金为研究对象, 研究了脉冲电流对其超塑性效应的影响。结果表明, 合金的延伸率显著提高并以更高的 m 值为特征; 最佳超塑变形温度扩宽为一区间。电镜观察表明, 合金局部表现出强烈的变形强化特征, 同时局部又以很高的应力松弛为特点, 这两个过程达到动态平衡, 有效地提高了合金的均匀变形能力。

关键词 电致超塑性 Zn-22% Al 合金 位错

电流和电场对金属的塑性变形、疲劳、应力和相变均有很大影响^[1-3]。早在 60 年代就观察到直流电可提高位错运动。首次实验是在对 Zn 单晶体变形时用 1 MeV 电子辐射, 发现 Zn 的塑性提高, 应力下降, 并提出了电致塑性效应(Electroplastic Effect)概念^[2]。以后又对各种纯金属进行研究, 观察晶体中的漂移电子对其流动应力及塑性的影响^[4]。这些实验表明电流可促进金属中的原子扩散, 改变位错形态, 加快位错运动。根据这一基础及受电致塑性效应概念的启发, 作者研究了 Zn-22% Al 合金的电致超塑性效应。其目的是通过施加高密度的脉冲电流观察合金的超塑性变形行为, 并探讨其变形机理。

1 实验方法

实验材料为 Zn-22% Al 合金, 成分为(%)为: Al 20.62, Fe 0.23, Si 0.30, 余量为 Zn。

试样制备工序如下: 石墨坩锅熔化→除气 $\xrightarrow{630\text{ }^{\circ}\text{C}}$ 铸锭(300 mm × 180 mm × 25 mm)→均热 $\xrightarrow{370\text{ }^{\circ}\text{C}, 6\text{h}}$ →水淬 $\xrightarrow{270\text{ }^{\circ}\text{C}}$ →热轧至 3 mm→冷轧至 1.0 mm $\xrightarrow{\text{退火}}$ →370 °C, 1h→水淬

超塑拉伸在岛津 AG-10TA 型电子拉伸机上进行, 并通以直流脉冲电流。电流密度 $J=7.4 \times 10^2 \text{ A/mm}^2$, 脉冲间隔时间 50 μs , 脉冲频率 10 Hz。加热炉为三段连续控温对开式加热炉, 温度偏差 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。拉伸以恒机头速率方式进行。 m 值(应变速率敏感性指数)计算采用速度突变法。电镜观察在 JEM-100CX 型透射电镜和 SEM-SX40 型扫描电镜下进行。

2 实验结果及讨论

图 1 为合金延伸率(δ)与应变速率($\dot{\epsilon}_0$)的关系。由图 1 可见, 与无脉冲电流的拉伸结果相比较, 施加脉冲电流后其延伸率有了很大提高, 在不算低的应变速率 $\dot{\epsilon}_0 \leq 1.67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 下, 材料的延伸量超出了拉伸机横梁所能到达的极限位置, 这时的 $\delta > 1250\%$, 故延伸率值不能给出, 因此对 Zn-22% Al 合金的处理是采用最普通的处理方式。在 $T = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}_0 = 8.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时, $\delta > 1060\%$ 。这表明高的延伸率可在高应变速率下获得, 而且所要求的变形温度降低。同时, 在 $\dot{\epsilon}_0 = 3.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (高应变速率)下, δ 仍高达 400%。图 2 为延伸率与变形温度的关系。可见, 无脉冲电流时, 合金的

① 国家自然科学基金和湖北省自然科学基金资助项目
李 尧, 男, 39 岁, 副教授, 博士

收稿日期: 1995- 11- 16; 修回日期: 1996- 03- 14

延伸率在 250 °C 表现出最大值。施加脉冲电流后, 最佳超塑变形温度向低温度方向偏移, 且超塑变形温度范围扩宽, 从 230 °C 至 280 °C, 合金的延伸率相当, 峰值为一温度区间。

另外, 在脉冲电流作用下, 只要变形温度高于 200 °C, $\dot{\epsilon}_0$ 低于 $2.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, 其 δ 均大于 700%。众所周知, 普通超塑状态产生在有条件保证原子大扩散迁移率的情况下, 而较高的变形温度 ($\geq 0.5 T_m$) 和较易扩散的相分界或晶粒边界表面就属于这样的条件。高温是提高原子扩散系数的决定性因素。显然低温度、高应变速率就不是上述所要求的条件。因此, 无脉冲电流时, 合金在低温、高应变速率下, 延伸率很低。但施加脉冲电流后, 情况发生了变化, 晶体中的漂移电子在电场力作用下, 可促进原子扩散和位错滑移, 部分补偿变形温度低的不足, 这样合金由非超塑状态进入准超塑状态或完全超塑状态。因此合金在低温、大应变速率下仍表现出较高的延伸率和良好的超塑性特征。另由图 3 的结果知, 施加脉冲电流, 合金的 m 值均得以提高。表明了该合金在电流作用下, 体现以大 m 值为特征及抗颈缩能力的增强。

对于 Zr-22% Al 这类双相合金而言, 晶粒间滑动是尤为重要的变形机制, 它是通过晶界位错在晶界上滑动来实现的, 这由许多学者所做的研究得以证实。因此该合金在超塑变形过

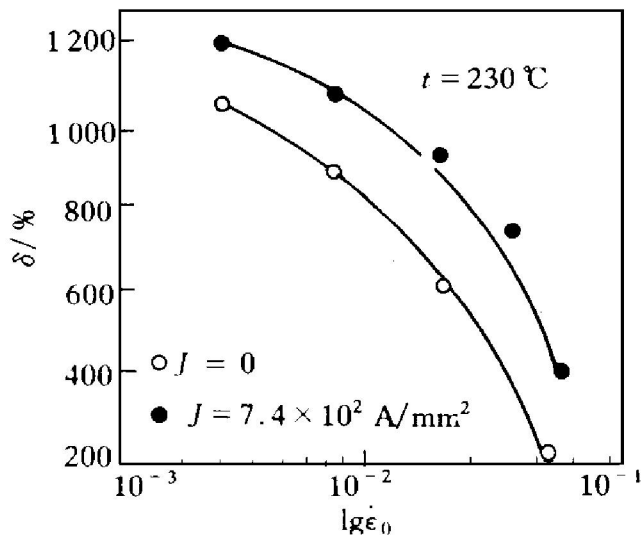


图 1 合金的延伸率(δ)与应变速率($\dot{\epsilon}_0$)的关系

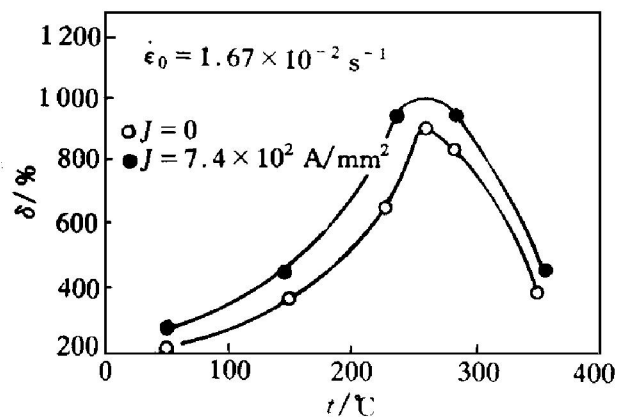


图 2 合金的延伸率(δ)与变形温度(t)的关系

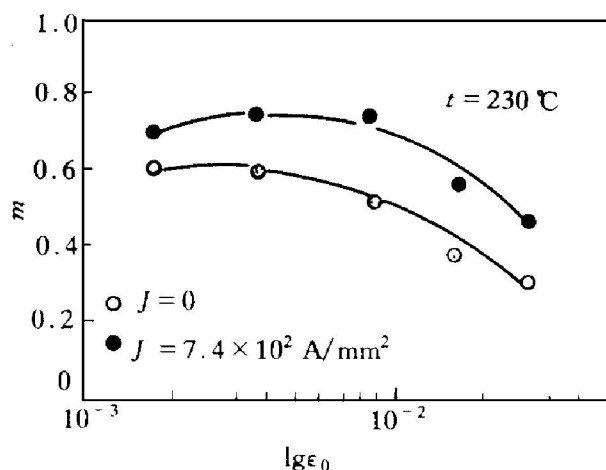


图 3 m 值与应变速率($\dot{\epsilon}_0$)的关系

程中晶粒形状为等轴状或通过动态再结晶使晶粒变为等轴晶粒, 见图 4(a)、(b)。但是, 当合金超塑变形时, 施加脉冲电流, 合金中是局部发生动态回复和动态再结晶, 见图 4(c)、(d) 所示, 表现为当位错在晶界上的滑动遇到障碍受阻便会形成位错塞积, 在位错塞积前端形成应力集中, 当位错塞积达到一定值时, 位错便发生动态回复进而发生动态再结晶降低由此造成的应力集中; 另一方面, 由于电流的参与作用, 造成电子与位错的交互作用, 晶内可动位错密度提高, 同时位错又受电子风的推力作用, 晶内位错的滑移能力增强, 阻止位错滑移的障碍得以克服, 由位错造成的应力集中的可能性降低, 位错的塞积程度下降, 不足以产生动态回复和动态再结晶, 因此部分变形组织(纤维组织)遗留下来, 见图 4(e)、(f)。这样

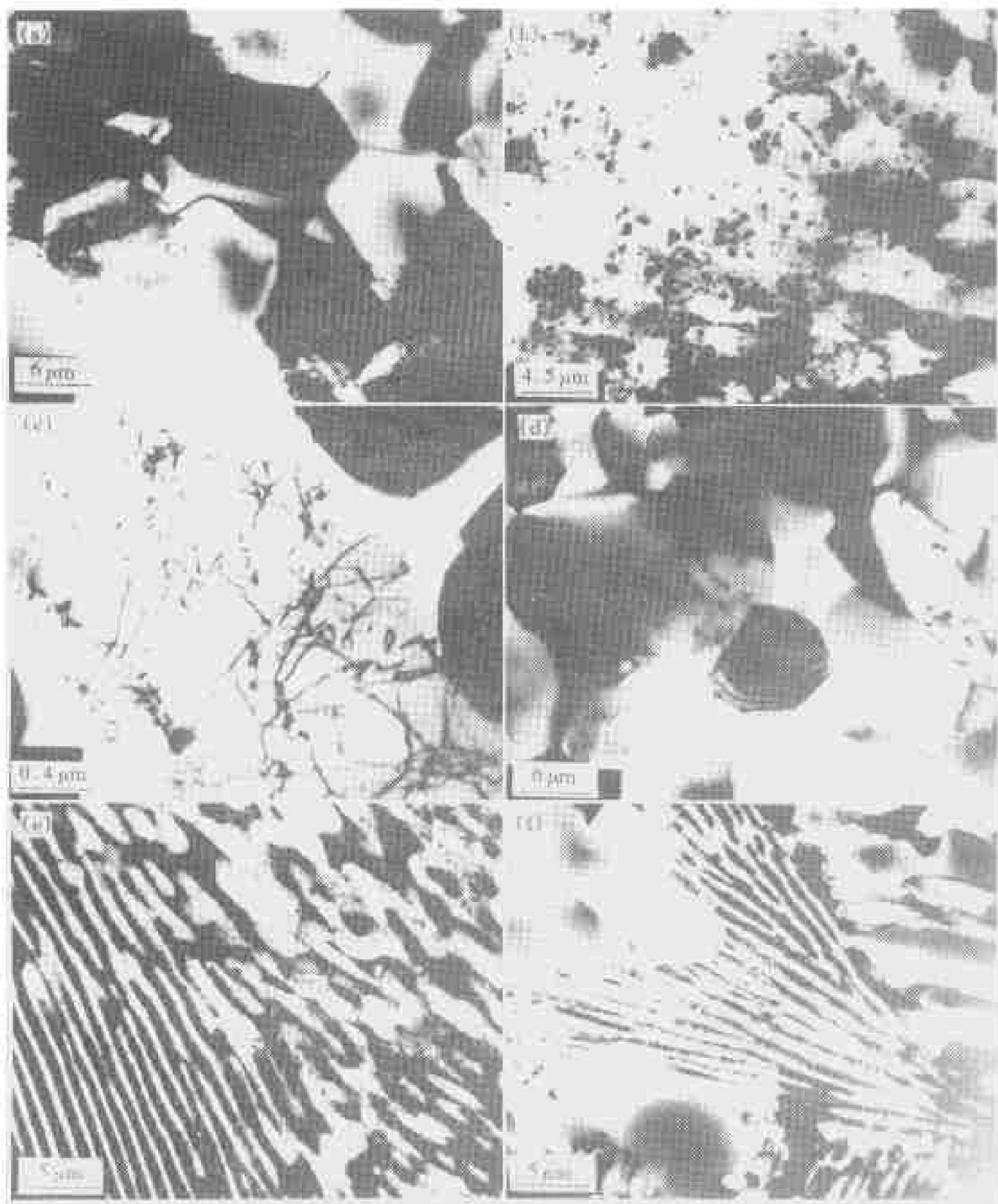


图4 Zr-22% Al 合金超塑变形时的组织

($T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}_0 = 8.3 \times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$)

(a), (b) 一无脉冲电流时, 合金的组织状态;

(c) 一有脉冲电流时, 发生的动态回复;

(d) 一有脉冲电流时, 发生的动态再结晶;

(e) 一有脉冲电流时, 局部的纤维组织; (f) 一有脉冲电流时, 呈放射状的纤维组织

晶粒发生变形被拉长,与此同时位错在晶界上的滑移能力下降,位错产生塞积。只有当位错塞积达到更高的密度时,才发生动态回复和动态再结晶以降低由位错塞积引起的应力集中,见图4(c)、(d)。这体现了晶内位错受电子风力方向的影响,在最易于滑动的平面内运动,而直接参与对塑性变形的贡献。因此,施加脉冲电流,该合金的超塑变形的物理特征是更高的 m 值;微观上,各部分晶粒变形不均匀,局部表现出强烈的变形强化特征,同时局部又以非常高的应力松弛为特点,这样拉伸试验时,合金的强化与恢复这两种过程的连续较量,达

到动态平衡,宏观上表现出更高的均匀变形,有效地实现了文献[4]所述的细颈游动机理,也是对该机制的有力证实。

参 考 文 献

- 1 李 尧. 轻金属, 1992, (4): 55.
- 2 Silveira V, Porto M F S, Mannheimer W A. Script Metall, 1981, 15(8): 945.
- 3 Okazaki K, Kagawa M, Conrad H. Script Metall, 1979, 13(4): 277.
- 4 季霍诺夫 A C 著, 刘春林译. 金属与合金的超塑性效应. 北京: 科学出版社, 1983: 61—63.

ELECTROSUPERPLASTIC EFFECT OF Zr-22% Al ALLOY

Li Yao, Dong Xiaohua

*Department of Mechanical Engineering,
Hubei Institute of Technology, Wuhan 430068*

ABSTRACT The effect of pulse electric current on the superplasticity of the common-treated Zr-22% Al alloy was studied. The results showed that the elongation of the alloy was appreciably increased, which was characterized by a higher m value, and the optimum superplastic deformation temperature was enlarged to be a temperature range. With the SEM, we could find that part of the alloy exhibited strong deformation-strengthened character, and concurrently occurred high stress relaxation. These two processes reached dynamic equilibrium, which increased the homogeneous deformability effectively.

Key words electro-superplasticity Zr-22% Al alloy dislocation

(编辑 彭超群)