

工业硬铝 LY₁₂ 合金 超塑变形过程的激活能

黄海冷 吴庆龄

(东北工学院)

摘要: 本文研究了 LY₁₂ 硬铝合金在最佳超塑预处理工艺条件下超塑变形时的流动应力和应变速率的对数关系, 测定了该合金超塑变形过程的激活能, 从能量角度探讨了该合金在超塑变形过程中的变形机理。研究表明, 在超塑变形 II 区, 界面扩散控制着变形过程; 在超塑变形 III 区, 体积扩散控制着变形过程。此结果与 SEM 扫描电镜观察结果一致。

一、前 言

探讨发掘工业合金材料超塑性潜力的原则, 必须了解该材料具有超塑性的变形机理。本文就是从能量的角度来探讨 LY₁₂ 硬铝合金超塑变形的机理。

超塑变形实质上是热激活的过程, 其应变速率与变形温度遵守 Arrhenius 关系^[1]:

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^m \exp\left(-\frac{Q_s}{RT}\right) \quad (1)$$

式中 $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, σ 为真实应力, m 为应力对应变速率敏感性指数, Q_s 为超塑变形的表现激活能, R 为气体常数, T 为绝对温度, A 为常数。

式 (1) 还可以表示为:

$$\sigma = A'\dot{\epsilon}^m \exp\left(-\frac{Q_s}{RT}\right) \quad (2)$$

式 (2) 中 Q_s 为恒应变速率下的激活能, A' 为常数。

因此, 根据式 (1), 在恒应力条件下, $\ln \dot{\epsilon}$ 与 $\frac{1}{T}$ 之间有线性关系; 根据式 (2), 在恒应变速率条件下, $\ln \sigma$ 与 $\frac{1}{T}$ 也有一个线性关系^[2]。Padmanaban 等^[3]已经证明:

$$mQ_s = Q_s \quad (3)$$

根据上述关系式, 我们可以通过实验的方法来估算材料在超塑变形过程中的激活能, 解决直接地定量测定超塑变形过程中合金激活能的困难, 从而能够定性地从能量角度探讨该合金超塑变形过程的机理。

二、实 验

本实验用材料为供应状态的工业硬铝合金 LY₁₂, 合金成份见表 1。

表 1 试验合金 LY₁₂ 的成份

| LY ₁₂ | 主要成份 | | | 杂质成份 | | | | 余量 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|-------|----|
| 元素 | Cu | Mg | Mn | Fe | Si | Zn | Ti | Al |
| 含量 | 4.62 | 1.61 | 0.52 | 0.28 | 0.20 | <0.2 | <0.05 | |

该合金材料经过最佳超塑预处理，晶粒尺寸大约为5~7μm^[4]。

超塑拉伸试验是在WD-5型电子万能拉伸试验机上进行的，拉伸夹头移动速度的误差为±5%，载荷测量精度为±1%，采用劈开式筒形电阻炉加热和保温，其控温精度达±5℃，试样到温后保温时间为10分钟。

表面观察是在SEM505扫描电子显微镜下进行，试样表面经过机械抛光之后，在光栅刻划机上，于垂直试样拉伸轴的方向上刻上间距为8μm的平行划痕，划线宽度小于1μm，然后在485℃的温度下，分别以初始速度为8.33×10⁻⁴sec⁻¹和1.67×10⁻²sec⁻¹的变形速度，变形到30%左右的程度，迅速淬水冷却。

表面观察可以直观地看到试样在超塑变形后的晶界滑动和晶内变形的情况。

三、结果与讨论

图1为试验合金在430、450、470、485℃时的lnσ—lnε̇的关系曲线，其形状接近于扁的超塑性的“S”形状，具有比较清楚的超塑Ⅱ区与Ⅲ区，超塑Ⅱ区大约为小于3×10⁻³s⁻¹的应变速率范围，超塑Ⅲ区大约为大于3×10⁻³s⁻¹的应变速率范围。

按照文献^[5]的方法，选取4.67×10⁻⁴s⁻¹ (lnε̇ = -7.64)，4.18×10⁻³s⁻¹ (lnε̇ = -5.48)分别作为超塑变形Ⅱ区的应变速率的基准，其对应的平均应力分别为0.6kg/mm² (lnσ = 0.506)和1.46kg/mm² (lnσ = 0.368)，由流动应力和应变速率

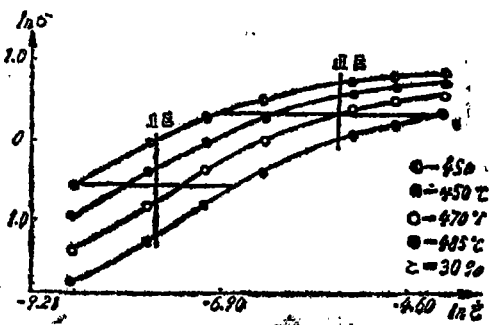


图1 流动应力和应变速率的对数曲线

的对数曲线，可以分别作出lnσ—1/T和lnε̇—1/T的关系曲线。图2为超塑变形Ⅱ区的曲线，图

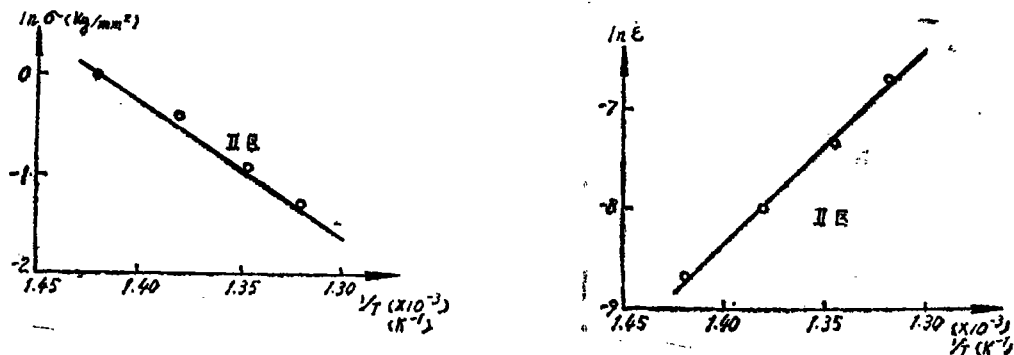


图2 超塑Ⅱ区的lnσ—1/T, lnε̇—1/T曲线

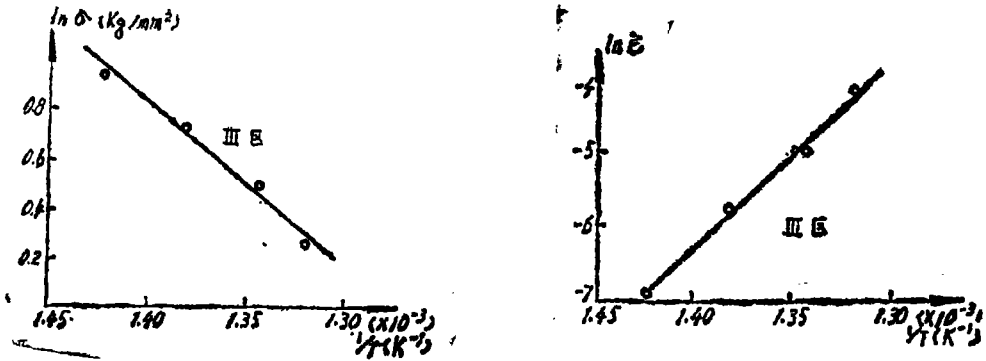


图3 超塑III区的 $\ln \sigma - \frac{1}{T}$, $\ln \dot{\epsilon} - \frac{1}{T}$ 曲线

3 为超塑变形 III 区的曲线。图中的两条曲线的斜率分别表示其超塑变形区域的 Q_i/R 和 Q_o/R 的数值。它们的斜率用线性回归的方法求出。线性回归结果表明： $\ln \sigma - \frac{1}{T}$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \frac{1}{T}$ 的相关系数都达到 0.95 以上。

计算结果：

在超塑变形 II 区为，

$$Q_i = 18.87 \text{ kcal/mol}$$

$$Q_o = 33.45 \text{ kcal/mol}$$

$$m = Q_i / Q_o = 0.56$$

在超塑变形 III 区为，

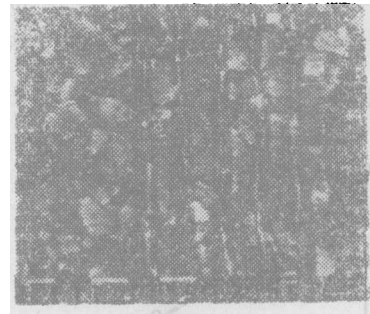
$$Q_i = 12.4 \text{ kcal/mol} \quad Q_o = 43.2 \text{ kcal/mol} \quad m = Q_i / Q_o = 0.28$$

在选定的变形速率上，我们得到接近直线形式的 Arrhenius 图，这说明在所研究的范围内，变形温度和应变速率的关系基本和 Arrhenius 关系一致，即该合金的超塑变形过程的确是一个热激活的过程。

对于该试验合金，按照 Backöfen 速度突变法测定的同一温度和速率范围的 m 值，其平均值分别为 0.50 和 0.26，按照 $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$ 的曲线计算出来的 m 值的平均数值分别为 0.54 和 0.29，而本文利用激活能测定出来的 m 值分别为 0.56 和 0.28。因此，不同实验方法的结果基



(a)



(b)

图4 超塑变形过程表面形貌

(a) 超塑 II 区电镀照片

$$\dot{\epsilon}_0 = 8.33 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$$

$$\epsilon = 28\% \quad u_0 = 8 \mu\text{m}$$

$$T = 485^\circ\text{C}$$

(b) 超塑 III 区电镀照片

$$\dot{\epsilon}_0 = 1.67 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$$

$$\epsilon = 32\% \quad u_0 = 8 \mu\text{m}$$

$$T = 485^\circ\text{C}$$

本是一致的。

研究表明,超塑变形过程的表现激活能接近于该合金扩散过程的激活能。根据 Fisher^[6]对界面扩散的数学分析结果,沿晶界面扩散的激活能比体积扩散的激活能小很多,有 $Q_{\text{界面}} = (0.3 \sim 0.7) Q_{\text{体积}}$ 的关系式。因此,我们有理由认为,在超塑变形的 II 区,是界面扩散控制着超塑变形过程,它是该区域超塑变形的机理。在超塑变形的 III 区内,是晶内的体积扩散控制着变形过程。这与扫描电子显微镜表面观察的结果相一致。图 4 (a) 和 (b) 分别为 LY₁₂ 合金经最佳超塑预处理之后在超塑变形 II 区和 III 区的扫描电子显微镜的表面形貌。图 4 (a) 表明,在超塑变形 II 区,晶粒基本保持完好,说明超塑变形以晶界滑动和晶粒转动为主,而晶界滑动和晶粒转动都必须借助晶粒界面扩散来实现和协调。图 4 (b) 表明,在超塑变形 III 区,表面出现纤维状和带状显微组织破碎,晶内发生剧烈的变形,晶内体积扩散作用明显。因此,在不同的超塑变形区域,合金的超塑变形过程的激活能不同,其超塑变形的机理也不同。

四、结 论

1. LY₁₂ 合金超塑变形过程的激活能,超塑 II 区: $Q_i = 18.87 \text{ kcal/mol}$, $Q_o = 33.45 \text{ kcal/mol}$; 超塑 III 区: $Q_i = 12.4 \text{ kcal/mol}$, $Q_o = 43.2 \text{ kcal/mol}$ 。

2. LY₁₂ 合金超塑变形过程的应力对应变速率敏感性指数,超塑 II 区中, $m = 0.56$; 超塑 III 区中, $m = 0.28$ 。

3. LY₁₂ 合金超塑变形时,在超塑 II 区,是晶粒的界面扩散控制着变形过程;在超塑 III 区,是晶内体积扩散控制着变形过程。

参 考 文 献

- [1] J.W. Edington, et al, Prog. Mater. Sci., 21(1976) P61
- [2] H. Nazirand, R. Pearce, J. Inst. Met., 97(1969) P326
- [3] K.A. Padmanabhan and G.J. Davies, Phys. Stat. Sol., (a) 18(1973) P295
- [4] 黄海冷,《东北工学院86届硕士论文》
- [5] R.H. Bricknell, A.P. Bentley, J. Mater. Sci., 14(1979), P2547
- [6] J.C. Fisher, J. Appl. Phys., (1951), 22 P74

Activation Energy During Superplastic Deformation of Commercial Aluminium Alloy LY₁₂

Huang Hailing Wu Qingling

Abstract

This paper has represented a research on the natural logarithm stress and strain-rate during superplastic deformation of the commercial Aluminium Alloy LY₁₂.

On the basis of measuring the activation energy of the alloy during the superplastic deformation the mechanisms of the alloy during the superplastic deformation was expounded from the point of energy. The results have showed that, the diffusion in the surfaces of crystal boundary controls the superplastic deformation in the superplastic II region and the diffusion in the body of crystal grains controls the deformation in the superplastic III region. The above results are confirmed by SEM.