

工业供应态 LY12 铝合金的超塑性*

许晓静 王 伟

(江苏理工大学 镇江 212013)

文 摘 对工业供应态 LY12 铝合金棒材的超塑性进行了研究。结果表明:该合金在温度为 753 K、应变速率为 $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的拉伸变形条件下,断裂延伸率为 313%,应变速率敏感性指数 m 值约为 0.33;断裂延伸率的实验值与 Gosh-Ayres 公式的理论值吻合;超塑性变形的主导机制符合 Langdon 大晶粒模型。

关键词 超塑性,铝合金

Superplasticity of a Commercial LY12 Aluminum Alloy

Xu Xiaojing Wang Wei

(Jiangsu University of Science and Technology Zhenjiang 212013)

Abstract Superplasticity of a commercial LY12 aluminum alloy is investigated. The alloy exhibits an elongation-to-break of 313% and a strain-rate sensitivity (m) of about 0.33 at the condition of initial strain rate of $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ and temperature of 753 K. The experimental value of elongation-to-break matches the theoretical value by Gosh-Ayres formula, and primary superplastic deformation mechanism is in agreement with Langdon model.

Key words Superplasticity, Aluminum alloy

1 引言

超塑性具有大延伸、小应力等显著特点,对于复杂工件尤其是大型复杂工件的制造具有重要价值。目前国内外在研究铝合金超塑性的工作中,为获得组织超塑性,都要经过繁杂的预处理过程,因而在实际生产中受到限制。另外,对实验结果从理论上进行定量分析的报道也很少。为此本文研究了工业供应态的 LY12 铝合金棒材在未经超塑性预处理情况下的超塑性,并对其超塑性断裂及变形机制从理论上进行定量分析,以期丰富对铝合金超塑性的认识。

2 试验方法

试验材料为工业供应态 LY12 铝合金棒材,棒材的直径为 40 mm,状态为 CZ 即“挤压+固溶处理

+ 自然时效”,名义化学成分(质量分数)为 Al - 4.26Cu - 1.45Mg - 0.71Mn - 0.28Fe - 0.24Si - 0.067Zn - 0.039Ti。超塑性拉伸试样沿着棒材长度方向取,标距尺寸为长 \times 宽 \times 厚 = 7.5 mm \times 6 mm \times 1 mm。超塑性拉伸试验采用岛津 DCS-2000 型拉伸试验机,加热装置为三区控温电阻炉,三区温度误差控制在 ± 1 K 范围内。试样在温度为 753 K 保温 20 min、应变速率为 $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的拉伸变形条件下进行拉伸试验。

3 试验结果与讨论

3.1 超塑性变形力学行为

图 1 和图 2 分别为 LY12 铝合金高温变形时流变应力、断裂延伸率与应变速率之间的关系。

收稿日期:2002-01-16

*国家自然科学基金资助项目 59631080

许晓静,1967 年出生,博士,主要从事超细晶块体材料制备和超塑性的研究工作

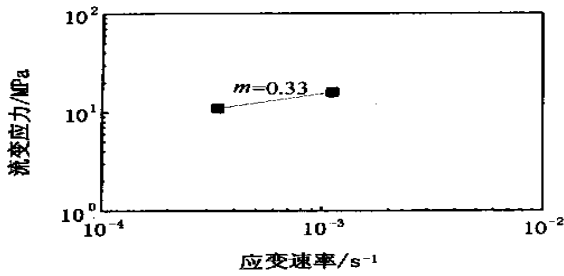


图1 流变应力和应变速率之间的关系

Fig. 1 Relation between flow stress and strain rate

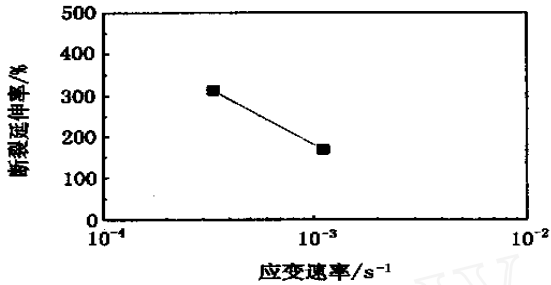


图2 断裂延伸率和应变速率之间的关系

Fig. 2 Relation between elongation-to-break and initial strain rate

从以上试验结果可以看出,在稳定的条件下,流变应力为 11 MPa,应变速率敏感性指数 m 值约为 0.33(见图 3),断裂延伸率为 313%,显示出超塑性变形的力学特征,表明该铝合金具有超塑性,试样的最终断裂系颈缩发展所致(见图 4)。Ghosh 和 Ayres 对颈缩断裂进行了深入研究,给出了 f 与 m 值之间的关系式:

$$f = [1 - (1 - f)^{1/m}]^m - 1$$

式中, f 为试样的起始几何缺陷,当 f 取 0.005 时,和许多实验结果吻合较好^[1]。对于本研究,将 $f = 0.005$ 、 $m = 0.33$ 代入上述关系式,可得 $f = 300%$,与 313% 的实验值基本吻合。

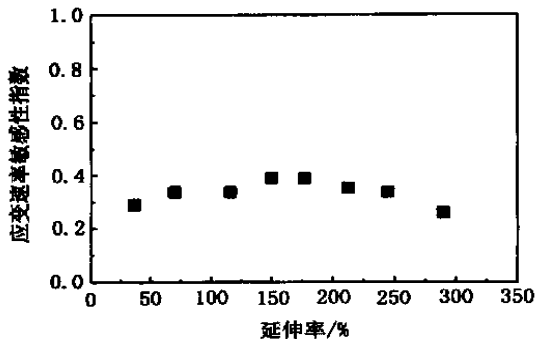


图3 应变速率敏感性指数与延伸率之间的关系

Fig. 3 Relation between strain rate sensitivity and elongation

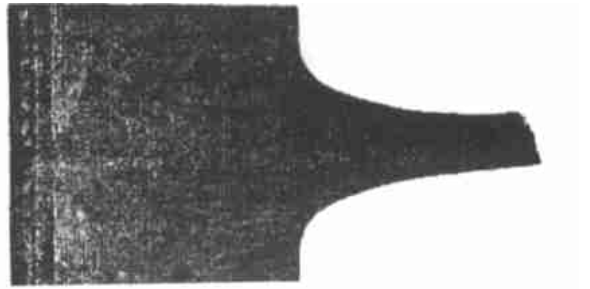
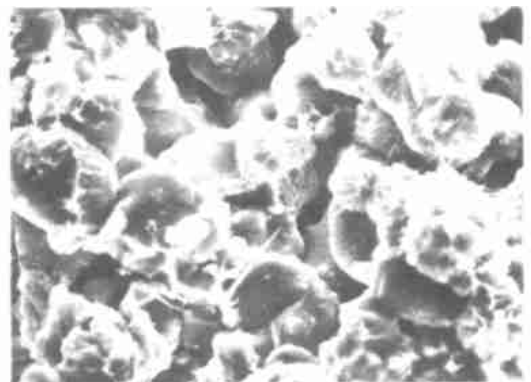


图4 超塑变形后的宏观照片

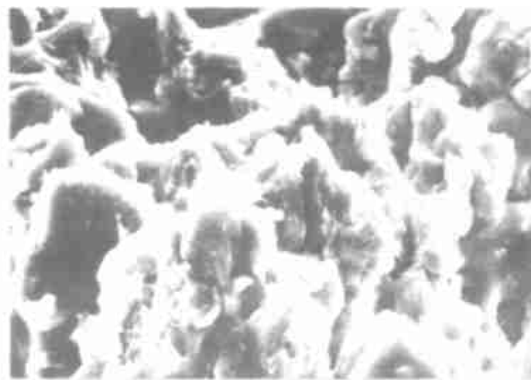
Fig. 4 Photograph after superplastic deformation

3.2 断口观察

图 5 为 LY12 铝合金超塑性变形后的断口形貌。从图 5(a) 可以看出,断口呈典型高温沿晶断裂,晶界“圆滑”,晶粒尺寸在 $10 \mu\text{m}$ 级,说明超塑性变形的主导机制是晶界滑动。从图 5(b) 可以看出,晶粒沿颈缩剪切力方向被拉长,证实试样的最终断裂系颈缩发展所致。



(a) 中间



(b) 边缘

图5 超塑性变形后的断口形貌

Fig. 5 SEM fractographs after superplastic deformation

3.3 TEM 观察

图 6 为 LY12 铝合金超塑性变形后的 TEM 组织。可以看出,LY12 合金内存在着大量的亚晶粒。亚晶界由于吸收位错,其角度已高达约 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$,但仍属不可滑动的小角度晶界。

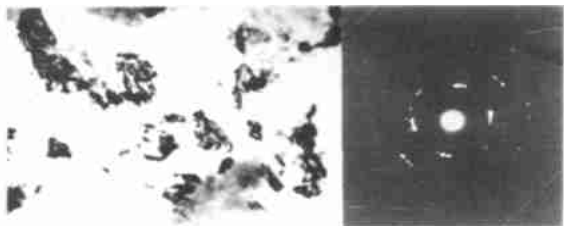


图 6 超塑性变形后的 TEM 微结构

Fig. 6 TEM microstructure after superplastic deformation

3.4 超塑性变形机制

Langdon 对超塑性变形机制进行了深入的研究,提出大晶粒($10 \mu\text{m}$)材料超塑性变形的机制为晶格扩散控制亚晶界吸收位错协调的晶界滑动,如图 7 所示,并给出下列数学模型^[2,3]:

$$\dot{\epsilon} = 1000 \frac{D G b}{k T} \cdot \frac{b}{d} \cdot \left(\frac{\sigma}{G}\right)^3$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, D 为晶格扩散系数, G 为剪切模量, b 为位错柏氏矢量大小, k 为波尔茨曼常数, T 为绝对温度, d 为晶粒尺寸, σ 为流变应力。

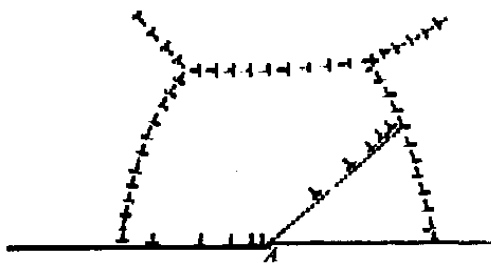


图 7 亚晶界吸收位错协调的晶界滑动模型

Fig. 7 A model of grain sliding accommodated by subgrain boundary absorbing dislocation

对于本研究 LY12 铝合金,将 $T = 753 \text{ K}$, $d = 10 \mu\text{m}$, $\sigma = 11 \text{ MPa}$, $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, $D = 1.86 \times 10^{-4} \exp(-142000/RT) \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[4], $G = 18.17 \text{ GPa}$ ^[4], $b = 2.86 \text{ nm}$ ^[4]和 $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 代入上述数学模型,可得理论应变速率 $\dot{\epsilon} = 8.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,与实验应变速率 $\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 基本吻合;因此本研究 LY12 铝合金超塑性变形的机制符合 Langdon 大晶粒模型,为晶格扩散协调的晶界滑动。

4 结论

(1) 工业供应态 LY12 铝合金棒材在未经超塑性预处理的情况下具有超塑性,在变形温度为 753 K 、应变速率为 $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的拉伸变形条件下,断裂延伸率为 313% ,应变速率敏感性指数 m 值约为 0.33 。

(2) 断裂延伸率的实验值与 Ghosh-Ayres 公式的理论值吻合,超塑性断裂系颈缩发展所致。

(3) 超塑性变形的主导机制符合 Langdon 大晶粒模型,为晶格扩散控制亚晶界吸收位错协调的晶界滑动。

参考文献

- 1 Ghosh A K, Ayres R A. On reported anomalies in relating strain rate sensitivity (m) to ductility. *Metall. Trans.*, 1976; A7a: 1 589 ~ 1 591
- 2 Langdon T G. A unified approach to grain boundary sliding in creep and superplasticity. *Acta. Metall. Mater.*, 1994; 42(7): 2 437 ~ 2 443
- 3 Langdon T G. Grain boundary sliding as a deformation process in creep and superplasticity. *Mat. Sci. Forum.*, 1994; 170 ~ 172: 53 ~ 58
- 4 Langdon T G. Cavitation in high strain rate superplasticity - implications for the flow process. *Mater. Sci. Forum.*, 1997; 233 ~ 234: 47 ~ 62

(编辑 李洪泉)