

LY12硬铝合金超塑性压缩的力学特性

姚祖斌

(精密机械工程系)

摘 要

本文对供应状态的LY12R和LY12CZ合金棒材的超塑性等温压缩试验结果进行讨论,分析了压缩变形过程,确认未经任何超塑预处理的供应状态LY12合金具有轻微超塑性能,确定了两种状态的LY12合金的最佳变形工艺参数,研究了试样尺寸对压缩变形过程的影响.本试验结果为压缩类成形零件提供了较佳的工艺参数.

关键词 铝合金, 超塑性变形, 压缩, 力学特性

一、前 言

铝合金以其优越的性能(如比重小、比强度大、耐腐蚀等)在现代工业中得到广泛的应用,但是它的塑性还不能满足复杂零件加工变形的要求.有关超塑性铝合金(如Al-6Cu-0.5Zr、Al-5Ca-5Zn等)的研究已有不少报导,然而对工业铝合金超塑性的研究还是很不够,尤其是对国产工业铝合金超塑性的研究,仅局限于研究其超塑性拉伸性能.在实际生产中,压缩类的成形零件较多,因此有必要对工业铝合金的超塑性压缩问题进行系统的研究,寻找在压缩变形条件下最佳的超塑性工艺参数,以便充分利用工业铝合金的超塑性能.

LY12工业硬铝合金已广泛应用于现代工业,尤其在航空、航天领域中应用更为普遍,因此研究LY12在供应状态下的超塑性能更具有现实意义.本文着重研讨供应状态LY12硬铝合金的超塑性压缩的力学特性,为生产实际应用LY12合金的超塑性能提供较系统的变形力学数据.

二、试验方法及装置

试验所用材料是供应状态LY12R(热挤压态)和LY12CZ(淬火+自然时效)工业硬铝合金,未经任何超塑预处理.经过拉伸试样测定,两种材料的抗拉强度是:LY12R为 $\sigma_b = 523.2\text{MPa}$,LY12CZ为 $\sigma_b = 541.8\text{MPa}$.经抗压试验,室温下抗压强度平均值为:LY12R为 $\sigma_b =$

本文1989年1月16日收到.

733.4MPa, LY12CZ为 $\sigma_b = 751.9\text{MPa}$ 。试样的尺寸LY12R以 $\phi 15 \times 16$ 为主, 也使用部分 $\phi 8 \times 8$ 的试样, LY12CZ则只用 $\phi 8 \times 8$ 试样。为探讨试样的 d/h 对变形过程的影响, 还试验了少量其它尺寸的试样。

压缩试验是在350、400、425、450、475、500℃等6种温度和1.544—0.007mm/s 7种不同卡头速度下进行的。

等温压缩试验是在10t 液压式万能试验机上安装的等温加热炉内进行, 炉温自动控温在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 之内。用拉压传感器测量压缩力、位移传感器测量下压的位移量, 由函数记录仪自动记录载荷-行程曲线。

三、试验结果及分析

经500个试样试验及测试结果, 归纳如下:

1. 流动应力

(1) σ - ϵ 关系:

LY 12R 用两种不同尺寸的试样 ($\phi 15 \times 16$ 和 $\phi 8 \times 8$) 在6种不同温度和7种不同速度下进行等温压缩试验, 获得了 σ - ϵ 关系曲线, 这里仅示出 $T = 475^\circ\text{C}$ (图1)和 $V = 0.0154$ (图2)的 σ - ϵ 关系曲线, 在其余温度及速度下的 σ - ϵ 有类似的关系。从真应力-真应变关系曲线可以看到, 开始应力随应变上升, 约在0.1-0.2真应变之间应力出现最大值, 然后下降到一个最低值, 达到稳定状态, 约在0.3-0.4真应变处。在0.2-0.6真应变范围内, 真应力变化较小。在 $\epsilon > 0.6$ 后, 应力随应变急剧增大, 这是由于上下两个模具端面越来越接近引起的“末

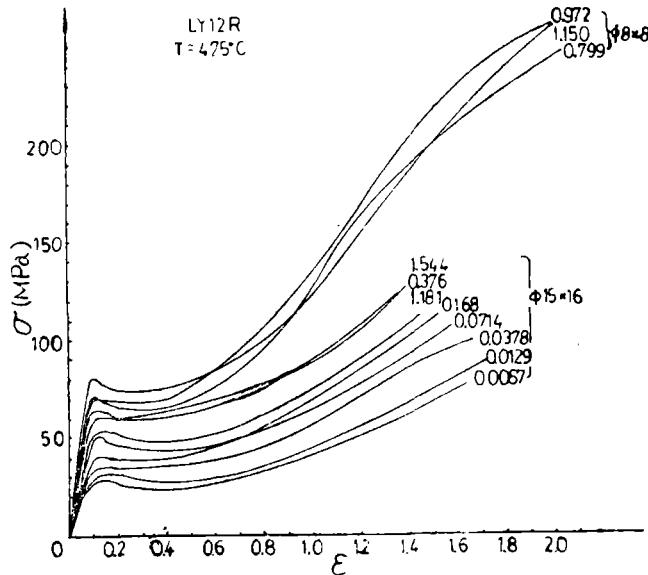


图1 在475℃、不同速度下压缩时的 σ - ϵ 关系曲线

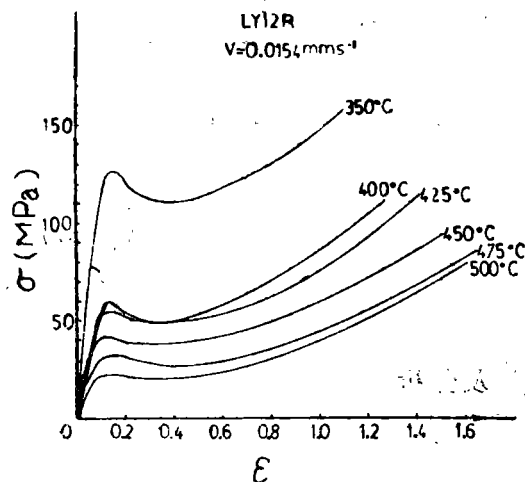


图2 在 $V=0.0154$ 、不同温度下压缩时的 σ - ϵ 关系曲线

“末端”效应的结果。这时试样的高度显著减小，引起材料体积中摩擦作用的增大，同时由于稳定阶段效应贡献的增加，其结果使应力更进一步上升，其中一小部份是应变率增大的结果。“末端”效应比起应变率效应的作用更大。

变形初期，应力达到峰值后，应力随应变的增加而下降，这纯粹是加工软化。这点在拉伸变形的所有曲线中同样存在，但不同之处是：拉伸时应变率随应变的增加而逐渐减少，而应变率的减少也促进应力的下降，也就是拉伸时，应力的下降是加工软化和应变率减小共同作用的结果；而压缩时，随应变的增大应变率也同时增大，这时应力下降

则完全是由加工软化所引起的。这个初始的应力降落，可考虑为瞬时非稳定区，在最小应力发生的那一点，达到了稳定阶段。达到稳定阶段所需的真应变，随初始应变率的增加而增大。由于在该系统中，表面的平均速度增大，每个单位内质点（晶粒）的碰撞数量将增加，这就推迟了稳定阶段的开始，引起稳定阶段应变随卡头速度的增大而增加。

由图1可看出，在同样温度下，卡头速度越大，即应变率越大，流动应力就上升了。由图1还可看到，同样材料的不同尺寸的两种试样变形过程有差别， $\phi 8 \times 8$ 的应力上升较快，曲线较陡。这是由于在相同真应变下， $\phi 8 \times 8$ 试样压缩后的绝对高度较小，上下两模具较接近，“末端”效应的影响比 $\phi 15 \times 16$ 试样的大，促使曲线急剧上升。由图2可见，在相同的卡头速度下，温度升高，流动应力则下降了。

LY12CZ合金的 σ - ϵ 曲线的规律与LY12R合金类似。

(2) σ - T 的关系：

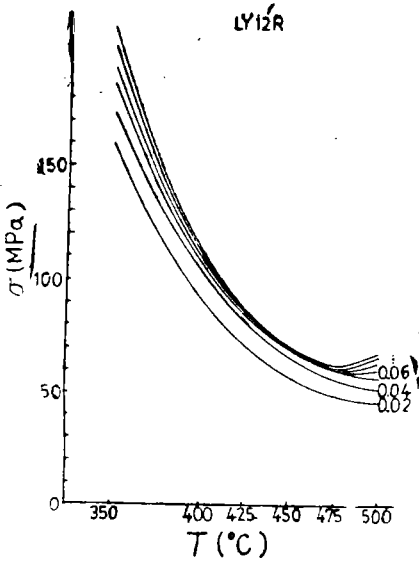
图3表示在不同应变率 $\dot{\epsilon}$ 下压缩时的 σ - T 关系曲线。温度上升，应力下降，靠近较低温度，随温度升高应力下降较快，曲线较陡；靠近较高温度，应力下降趋缓和，曲线较为平坦。另外，随应变率的降低，应力均呈下降趋势。

值得注意的是，虽然两种状态合金的变化规律相似，但对LY12CZ合金，在450-475℃之间有一个更明显的拐点，应力的下降更明显。图3还表明，当温度提高到500℃时，应力下降得并不多，甚至当应变率上升时，其流动应力甚至超过475℃时的流动应力。由此，可认为供应状态的LY12合金最佳的变形温度为475℃。

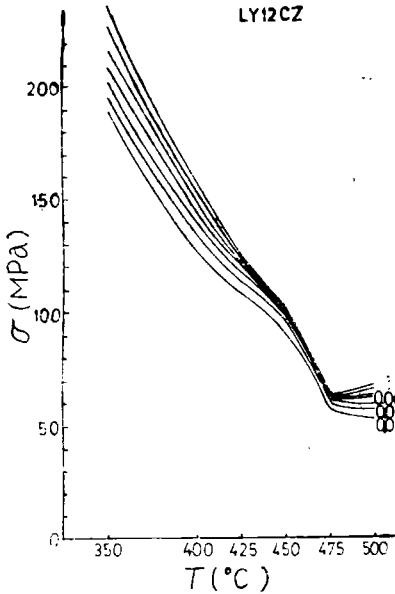
(3) σ - $\dot{\epsilon}$ 关系：

在6种不同的变形温度下，改变应变率对应力的影响，其结果可见图4。随应变率的提高，流动应力上升的幅度不同，475℃时上升得较少，而在较高应变率下压缩变形时，其流动应力最低，甚至比500℃变形时还要低。这点同样证明：475℃为较佳的变形温度。

另外，由图4(a)、(b)的比较可见，低于475℃变形时，LY12CZ的流动应力比LY12R的

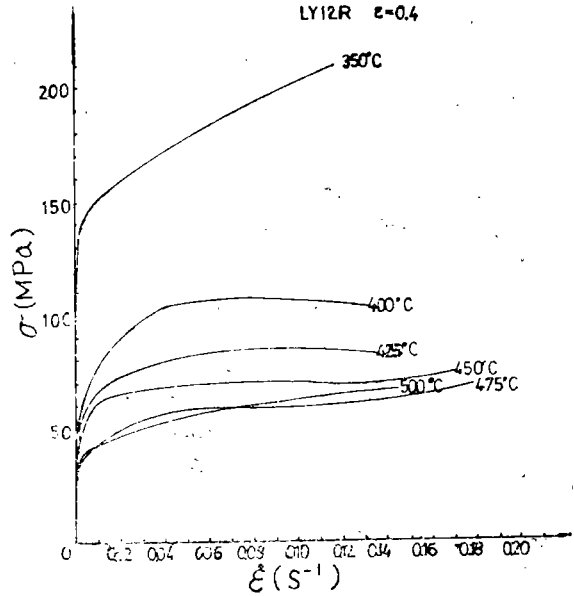


(a)

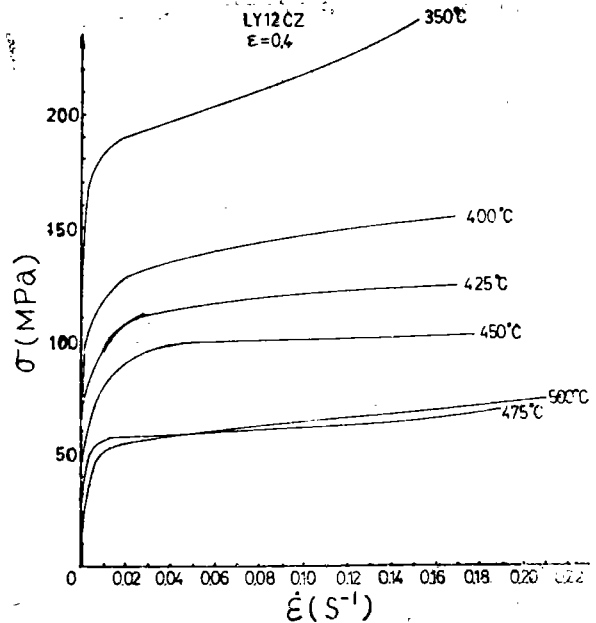


(b)

图 3 在各种不同应变率下压缩时的 σ - T 关系曲线



(a)



(b)

图 4 各种不同温度下 σ - $\dot{\epsilon}$ 的关系曲线

要高，但在475-500℃则较接近。

(4) 试件尺寸对流动应力的影响：

在压缩变形中，试样的尺寸 d 、 h 特别是 d/h 对流动应力有很大的影响。当试样直径不变高度减小时，在给定的应变率下，变形时的流动应力增大了。图 5 表示直径15mm的试样，其高度不同时，在相同的应变率下，较大的 d/h 值有较大的流动应力，这是由于 d 相同，较

短的 h 在压缩变形时, 上下模具的两平面越接近, 其“末端”效应也就越大, 因而流动应力就增大了。

另外, 试样虽有相同的 d/h 值, 但直径不同, 如 $d/h = 12/12 = 1$ 、 $8/8 = 1$ 和 $4/8 = 0.5$ 与 $15/30 = 0.5$ 等, 真应力-真应变的曲线图形不同 (图 6), 直径较小 (高度亦较低)

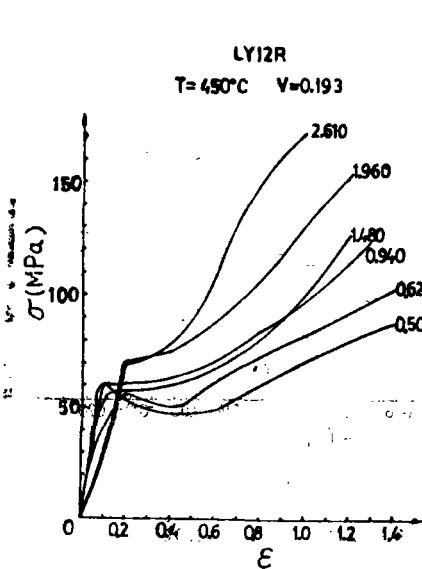


图 5 $\phi 15$ 试样在不同 d/h 时 σ - ϵ 的变化曲线

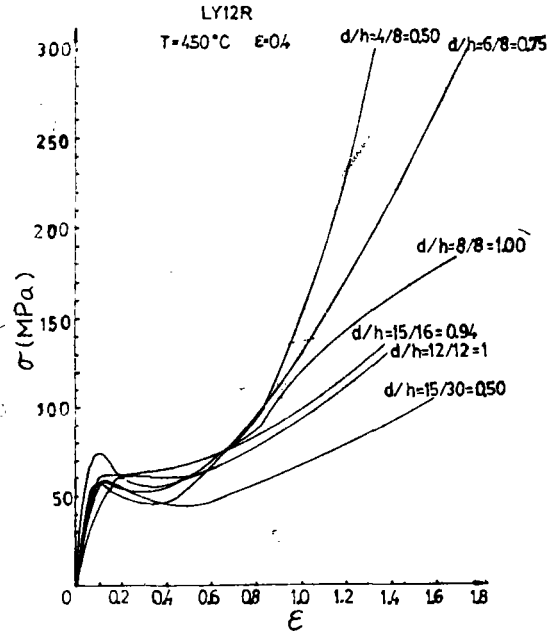


图 6 不同 d 和 h 的试样变形时的 σ - ϵ 变化曲线

的试样, 其流动应力均比直径较大的试样大, 同时, 流动应力随真应变的上升较快, 曲线较陡。这是由于在相同的真应变中, 直径较小、高度较低的试样变形时, 上下两模具间距离越近, 因而流动应力上升得越快, 曲线也就越陡。

图 7 表示直径 15mm 的试样, 具有不同的 d/h 值。其流动应力随应变率的变化趋势基本相同, 但它的数值随 d/h 的减小而降低。

当 $d/h < 2.5$ 、在给定的应变率时, 真应力与 d/h 关系是线性的 (图 8)。较低的应变率, 直线斜率较小, 随应变率的加大斜率也增大。当 $d/h > 2.5$, 其关系是非线性的, 它的上升趋势要快得多, 与非应变率敏感性材料在 $\sim 60\%$ 压缩后的类似, 其非线性同样可归因于“末端”效应。

2. 真应变

拉伸变形时, 随试样的伸长, 直径在不断减小而最终断裂, 拉伸变形也就停止了, 这样很容易得到极限延伸率。可是在超理性压缩变形时, 由于是在密闭的等温变形装置内进行压缩, 即使试样已经出现裂纹, 压缩变形仍可继续进行下去, 也就很难通过试验取得无裂纹的极限压缩变形程度, 因为对每个试样无法观察到刚出现裂纹时刻的变形程度。

图 9 为 LY12R $\phi 15 \times 16$ 试样在不同温度、不同卡头速度下, 在等值总压力 8.5t 压缩时所能达到的变形程度。图 10 表示 LY12CZ 合金 $\phi 8 \times 8$ 试样在 6 种温度下的 ϵ - V 关系曲线。图 9 和 10 中的 (O) 点表示无出现裂纹的试样, (x) 点表示出现裂纹的试样。从图中可以看

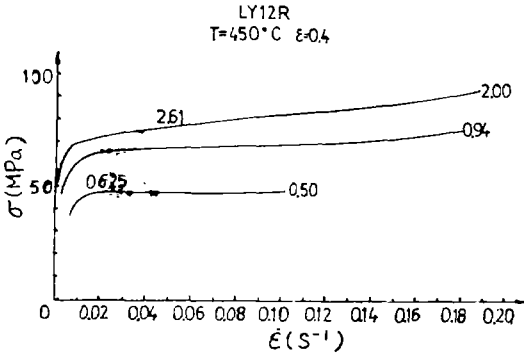


图 7 $d=15\text{mm}$ 时, 不同的 d/h 有不同的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线

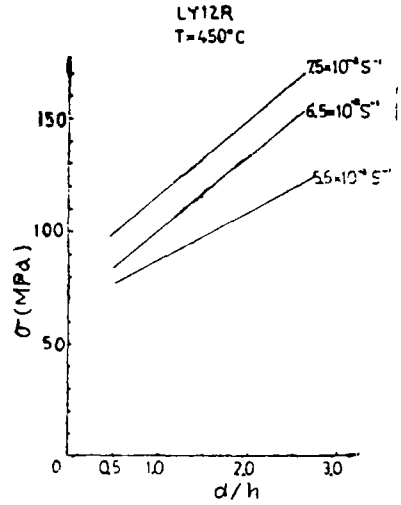


图 8 随 d/h 的不同应变率对真应力的影响

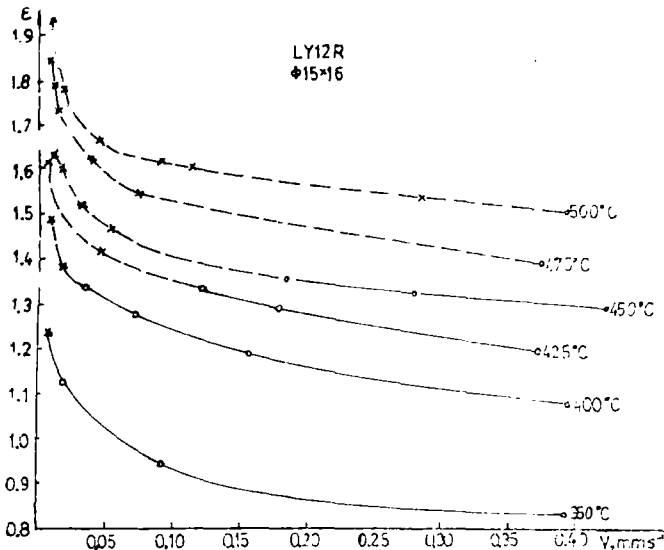
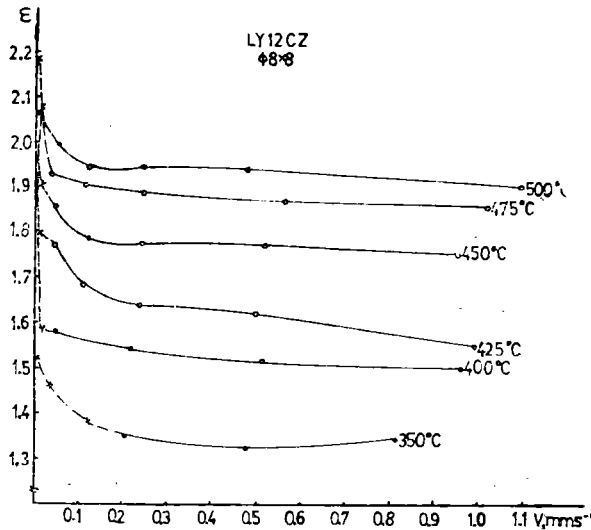


图 9 LY12R合金 $\varepsilon-V$ 的关系

到: (A)温度越低, 在同等压力下, 所能达到的应变程度也越小, 同时, 在相同温度下, 以越低的卡头速度压缩, 所能达到的应变程度越大, 这是由于在较低速度下流动应力较小的缘故; (B)用较低的卡头速度压缩时, 虽然能够达到较大的应变程度, 但是对较高温度, 压缩试样出现裂纹的现象就越严重。由此可见, 随温度的提高, 卡头速度也应该相应地提高。

对 LY12R 合金来说, 由于直径 $\phi 15$ 的试样在10t总压力下不可能达到较大的应变程度。为了取得尽可能大的应变, 补充进行了直径为 $\phi 8$ 试样的压缩试验。图11表示两种合金在 6 种不同温度下所能达到无裂纹的变形程度。当然这不是极限变形程度, 因为它受液压机的吨位

图10 LY12CZ在不同温度下的 ϵ - V 关系

(10t) 所限制。图11可以看出, 在 475°C 进行压缩变形时能够得到最大的无裂纹的变形程度。用 LY12R $\phi 4 \times 8$ 试样, 在 450°C, $V = 0.267$ 下, 曾获得无裂纹的应变量 $\epsilon = 2.31$ 。

从试验结果还可以看出, LY12合金压缩变形时, 达到较大无裂纹应变的卡头速度还是比较大的。温度提高时, 变形速度需要加快, 这可能是由于在高温下长时间停留引起组织内部晶粒长大, 从而使超塑性下降, 这个问题将在微观组织研究中作进一步的探讨。

3. 应变率

压缩变形时, 应变率随应变的增加而增大 (图12), 其增大的程度随卡头速度的加快而

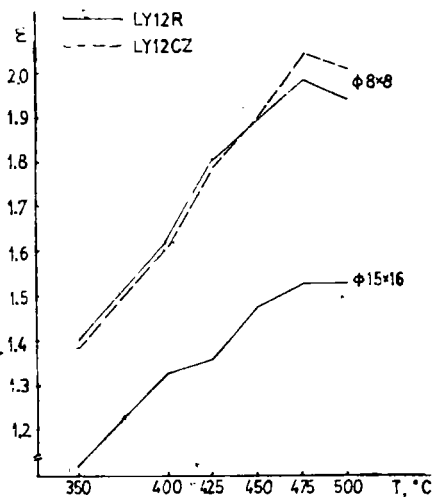


图11 两种合金在不同温度下所达到的最大变形程度

迅速增加。由图可见, 卡头速度加快时, 曲线陡峭上升, 即应变率增大很快。而在卡头速度很慢时, 应变率随应变上升的速度很平缓, 即应变率的增大很慢。

4. 应变率敏感性系数 m 值

根据应变率敏感性系数的定义 $m = \log \sigma / \log \dot{\epsilon}$, 由试验数据可得到 $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$ 关系曲线 (参见图4), 其各处的曲线斜率即为 m 值。

图13和图14所示为 LY12R 合金和 LY12CZ 合金, $\epsilon = 0.4$ 时各种不同温度下的 $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$ 关系曲线, 曲线各段上的数据即为该处的 m 值。由图可见, 两种状态的 LY12 合金的 m 值均不高, 对 LY12R 合金 (图13), 最大的 m 值为 0.34-0.359, 处于 450-500°C,

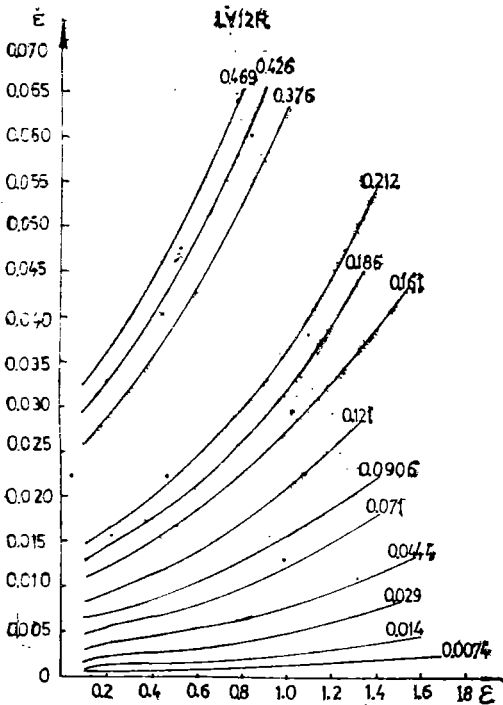


图12 在各种不同卡头速度下, 应变率随应变的变化

而且在较高速度 ($V = 0.5 \text{ mm/s}$ 以上)、较高应变率 $(1-2) \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的情况下, 其流动应力均较高, $\sigma = 60-70 \text{ MPa}$ 以上, 是否属于超塑性范围, 还要通过微观组织的分析才能确定。LY12CZ合金 (图14) 的 m 最大值为 0.316, 它是在 475°C 、 $\varepsilon = (2.8-7.65) \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时得出的, 此时 $\sigma = 40-50 \text{ MPa}$ 左右。由于应变率随应变的增大而加快, 所以 m 值随应变的增大而呈下降趋势。

四、结 论

1. 压缩变形过程是: 开始时, 应力随应变上升, 出现最大值后下降到一个最低值, 约在 $\varepsilon = 0.3-0.4$ 处达到稳定状态, 在 $\varepsilon > 0.6$ 后, 应力急剧上升, “末端”效应影响显著。

2. 压缩变形初期, 应力达到峰值后, 随应变的增加而下降, 这纯粹是加工软化。而在拉伸变形中, 应力下降是加工软化和应变

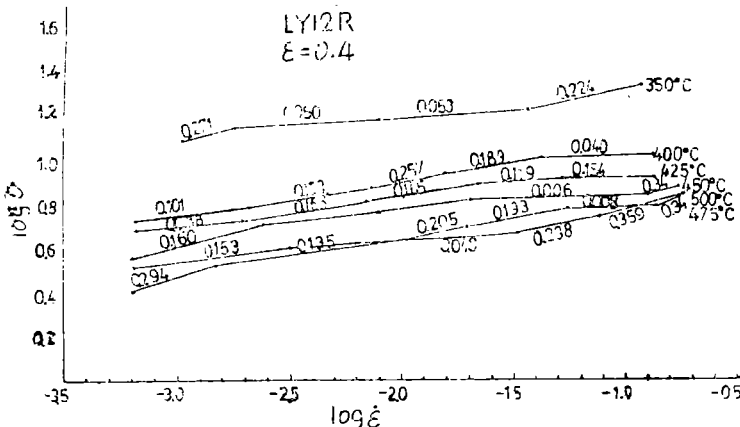


图13 LY12R合金在 $\varepsilon = 0.4$ 时各种温度下的 $\log \sigma - \log \dot{\varepsilon}$ 关系

率减小共同作用的结果。

3. 压缩变形中, 试样的直径 d 、高度 h 及 d/h 值对变形过程影响很大。

4. LY12R和LY12CZ合金, 最佳的超塑性压缩变形温度为 475°C 左右, $\varepsilon = (2.8-7.65) \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 此时 $\sigma = 40-50 \text{ MPa}$ 。

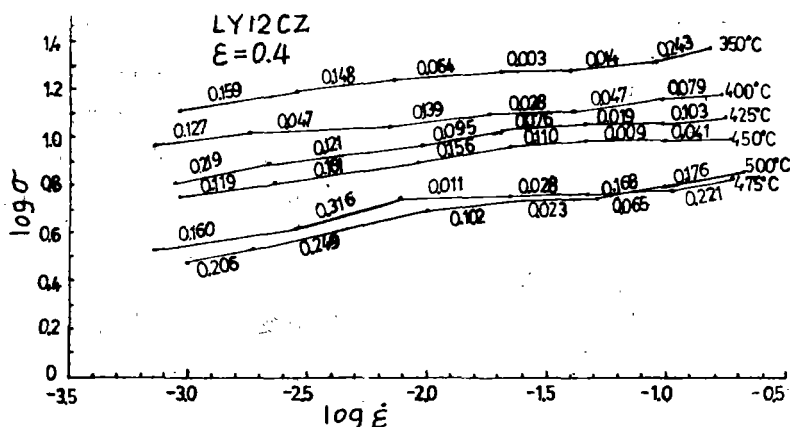


图14 LY12CZ合金在 $\varepsilon=0.4$ 时各种温度下的 $\log \sigma$ - $\log \dot{\varepsilon}$ 关系

5. 在试验过程中, 对两种状态的LY12合金 $\phi 8 \times 8$ 试样, 获得了压缩真应变 $\varepsilon > 2$, 这相当于外缘纤维的相对拉伸应变 $\delta > 170\%$ 多, 仅具有不大的超塑性。

6. 试验中所得的 m 值仅稍大于0.3, 这点也证实了它们具有不高的超塑性能。

以上所得出的变形规律及最佳变形工艺参数可作为生产压缩类LY12合金零件时的参考。

致谢: 高增法、姚文林、俞铁岳等同志参加本试验工作, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Padmanabhan, K.A. and Davies, G.J., *Metal Sci*, May (1977), 177—184.
- [2] Nasset, G.A. Suery, M. and El-Aahram, A., *Metals Technology*, 9, Sept. (1982), 355—359.
- [3] Nassef, G.A. and Suery, M., *J. Mater. Sci.*, 18 (1983), 3031—3040.
- [4] Nassef, G.A. El-Ashram, A. and Suery, M., *Metals Techn.*, 11, May (1984), 196—200.
- [5] 刘王文等, 供应状态铝合金LY12超塑性的研究, 吉林工业大学学报, 2 (1983), 20—30.
- [6] 刘道忠, 铝合金的超塑性试验及其应用, 轻金属, 6 (1986), 55—59.
- [7] 陈浦泉等, 对铝合金LF6、LY12超塑性的研究及对其塑性潜力的预测, 金属科学与工艺, 5 (1986), 43—51.
- [8] 张程勇, 供应状态下LY12合金轧制板材的超塑效应及应用, 热加工工艺, 6 (1987), 27—29.

Mechanical Behavior of LY12 Aluminum Alloy under Superplastic Compression

Yao Zubin

Abstract

The author discusses in this paper the results of superplastic isothermal compression experiment which carried on LY12R and LY12CZ alloy bars in supply condition. With respect to LY12 alloy without any pretreatment and in supply condition, a slight superplasticity is affirmed by the analysis of compression deformation process. The optimum technological parameters of deformation for LY12 alloy in two conditions are determined. The effect of the dimension of specimen on the process of compression deformation is studied. These results provide fairly good technological parameters for those parts formed by compression.

Key Words aluminium alloy, superplastic deformation, compression, mechanical behaviour