

文章编号: 1004-0609(1999)03-0493-06

半固态下 LY12 的变形力学行为^①

孙家宽 罗守靖

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为研究 LY12 合金在半固态下的力学行为, 使用拉伸与压缩试验测定了 LY12 合金在不同半固态温区及不同应变速率下的真实应力-真实应变曲线, 使用线性回归方法确定了真实应力 σ 与真实应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的关系及变形温度与真实应力的关系。结果表明, LY12 合金在半固态温区的拉压变形行为均显示出应变速率敏感性, 其拉压力学行为符合简单的幂函数关系 $\sigma = k\dot{\epsilon}^m$ 。根据试验结果, 推算出了半固态 LY12 在不同变形温度及应变速率下的幂函数系数 k 、应变速率敏感性指数 m 及变形激活能 Q 的值, 从而获得了半固态 LY12 合金变形力学行为的定量描述。

关键词: LY12 合金; 力学行为; 半固态; 拉压变形

中图分类号: TG146.3; UDC 669.71

文献标识码: A

与铸造等传统加工工艺相比, 半固态金属加工 (Semi-solid Metal Processing, 简称 SSP) 成形时金属以半固态形式存在, 比较容易处理, 且温度较低, 可以延长模具使用寿命, 提高制件精度与生产效率, 并且使制件获得相对较高的综合力学性能^[1~7]。与传统塑性加工工艺相比, 半固态金属屈服强度相当低, 且其流动性极好, 可在相对较小的成形力作用下充填模具型腔, 从而达到制件的最终形状, 且其精度较高, 并可一次成形具有复杂形状的制件^[1~7]。由此可以看出, 半固态金属成形工艺是一种高效、低耗的新兴金属加工工艺。

由于半固态合金本身特殊的性质, 使其力学行为与固态合金相比有所不同; 因此, 本文选用 LY12 合金为例, 对该合金的力学行为与变形机制进行研究, 为半固态金属加工奠定一定的基础。主要研究内容为半固态下的拉压变形行为, 关于变形机制方面的研究将在另处报导。

1 试验方法

试验用的材料为 LY12, 其主要成份为 Al-Cu-Mg, 其状态为挤压后经固溶处理和自然时效。该合金的熔化区间由差热分析法 (DTA) 确定, DTA 曲线如图 1 所示。

拉伸与压缩试验在日本岛津材料试验机上进行。变形温度根据 DTA 曲线选择在合金的半固态温区, 分别为 530 °C, 545 °C, 560 °C 和 575 °C。试验前, 试样在加热炉内保温 10 min 左右, 温差在 ± 2 °C 之内。试验在大气中进行, 拉伸与压缩变形速率分别为 0.012 s^{-1} , 0.024 s^{-1} , 0.036 s^{-1} , 0.060 s^{-1} 。为了减小摩擦力的影响, 在压缩试样两端涂油质石墨。

2 试验结果与分析

2.1 拉伸变形

① 国家自然科学基金资助项目 59675050 收稿日期: 1998-07-10; 修回日期: 1998-10-16
孙家宽 (1973-), 男, 博士研究生

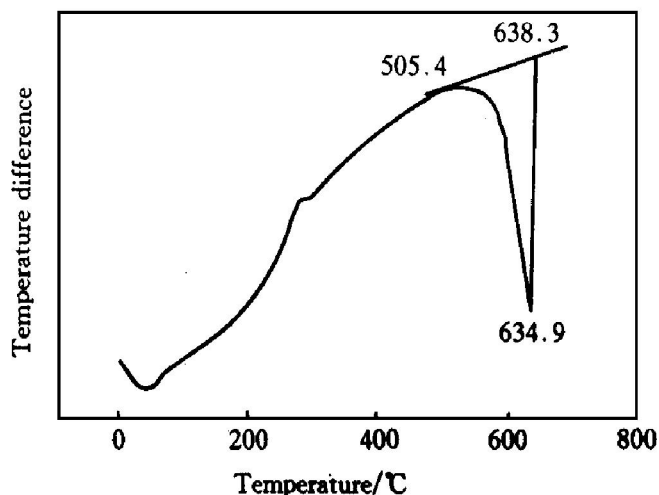


图1 试验材料差热分析曲线

Fig. 1 Differential thermal analysis (DTA) curve of an as-prepared experimental material

由图2可以看出,所有变形温度及应变速率下的拉伸真实应力-真实应变曲线具有基本相似的形状。拉伸变形开始时,应力随应变增

加而增加,当变形程度达到5%时,应力达到峰值,而后应力就迅速下降直至断裂。图2中并未给出断裂时的真实应变大小。由图2还可以看出,在530℃~575℃区间,随应变速率 $\dot{\epsilon}$ 增加,真实应力值增加,表明LY12合金在半固态下的拉伸变形行为具有应变速率敏感性。根据文献[8],当合金在固态高温变形、且应力小于80 MPa时,应变速率与流动应力之间存在如下关系:

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中 $\dot{\epsilon}$ 为真实应变速率, s^{-1} ; σ 为流动应力, MPa; Q 为变形激活能, $J \cdot mol^{-1}$; T 为变形温度, K; R 为气体常数, $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$; n 为应力指数; A 为常数。对于绝大多数金属材料,在高温固态变形时,上式又可简化为如下简单的幂函数关系^[9]:

$$\sigma = k \dot{\epsilon}^m \quad (2)$$

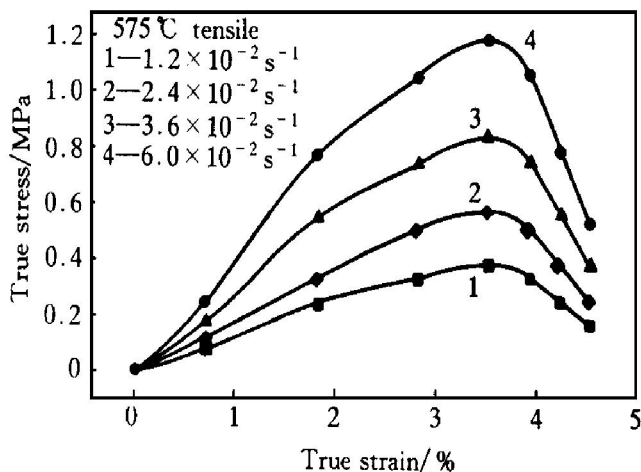
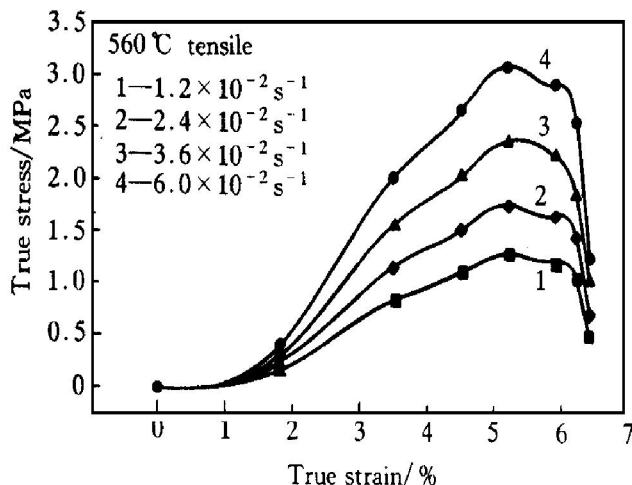
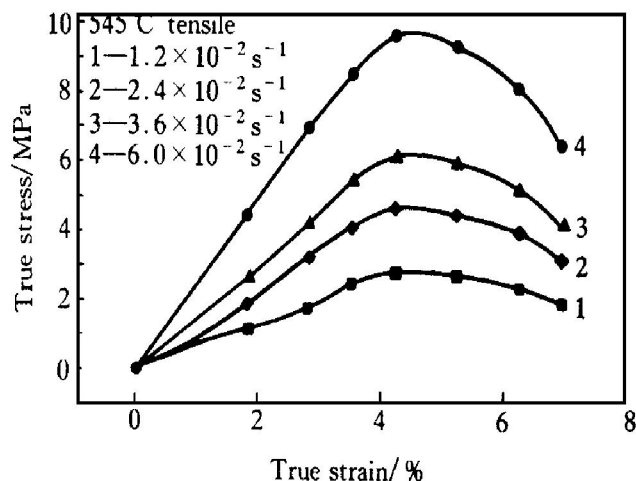
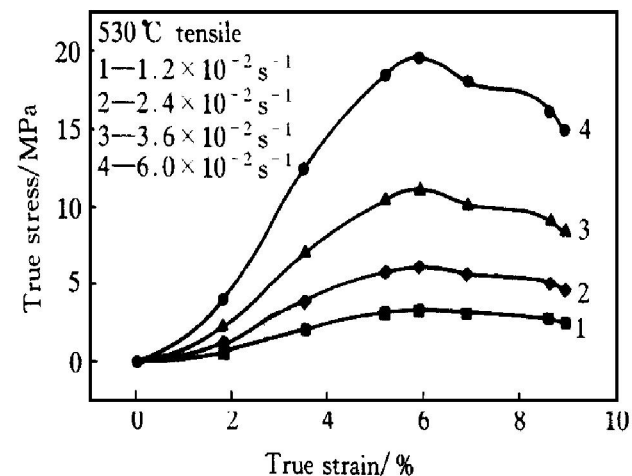


图2 不同变形温度及应变速率下的拉伸真实应力-真实应变曲线

Fig. 2 Tensile true stress-true strain curves at various deformation temperatures and strain rates

式中 m 为应变速率敏感性指数。

图 3 给出了拉伸真实应力- 真实应变速率自然对数曲线, 图中的真实应力取峰值 σ_p 。由图 3 可以看出, 对于四种变形温度, 真实应力与真实应变速率的自然对数之间存在线性关系, 也就是说 LY12 合金在半固态下的拉伸变形行为也可以由简单的幂函数关系(如式(2) 所示) 来描述, 其中图 3 中直线的斜率为应变速率敏感性指数 m 。对于 4 种拉伸温度, 式(3) 中的参数 k 与 m 如表 1 所示。由表 1 可见, 对

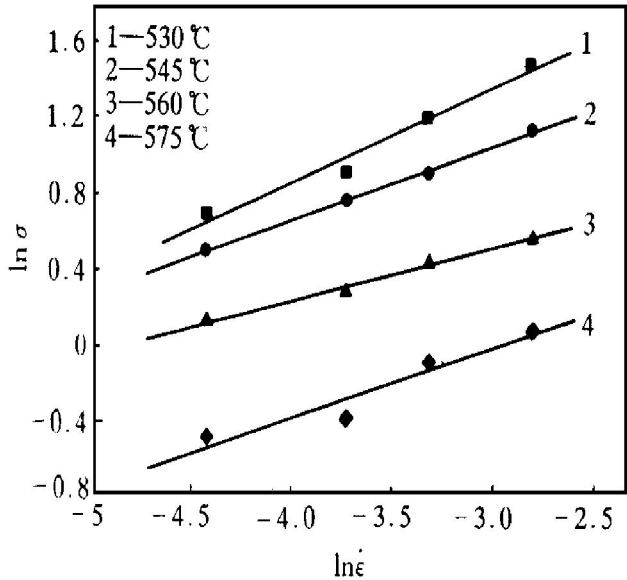


图 3 拉伸真实应力- 真实应变速率自然对数关系曲线

Fig. 3 Plot of log-scaled tensile true stress-true strain rate relationship

表 1 四种拉伸变形温度的 k 与 m 值

Table 1 k and m values at various tensile deformation temperatures

$t/^\circ\text{C}$	m	k
530	0.49	17.30
545	0.38	9.03
560	0.27	3.78
575	0.29	3.00

于不同的变形温度, m 值由 0.27 到 0.47 不等, 这些数值与其它文献^[10]中类似合金在半固态下压缩变形的 m 值比较相近。随温度不同, m 值也不相同, 其主要原因是不同温度

下, LY12 合金中液相含量也不相同, 由此变形时的主要变形机制略有不同^[11]。

由式(1) 可以看出, 流动应力除受到 $\dot{\epsilon}$ 值的影响外, 同时受温度影响。图 4 为真实应力峰值自然对数与 $1000/T$ 的关系曲线, 其中 T 为拉伸变形绝对温度。结合式(1) 与图 4, 可以得到不同应变速率下的变形激活能 Q 的值, 如表 2 所示。由表 2 可以看出, 由于变形速率不同, Q 值也有差别。这表明, 当应变速率发生变化时, LY12 合金在半固态下的拉伸变形机制也存在一些差别, 从而导致 Q 值变化。

表 2 不同应变速率下的拉伸变形激活能

Table 2 Activation energy of tensile deformation at various strain rates

$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	$Q/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
0.012	161.10
0.024	196.06
0.036	196.01
0.060	217.55

综合上述分析, 在半固态下, LY12 合金的拉伸流动应力是温度的函数, 也是应变速率的函数。

2.2 压缩变形

由图 5 可以看出, 当变形温度为 530 °C 与 545 °C 时, 压缩真实应力- 真实应变曲线形状基本相似, 变形初期, 随应变增加, 真实应力迅速增加达到一峰值后略有下降, 并随变形程度进一步增加而趋于稳定。随应变速率增加, 流动应力也增加, 并且流动应力达到峰值时的应变也略有增加。当变形温度为 560 °C 与 575 °C 时, 压缩真实应力- 真实应变曲线形状基本类似, 但是与 530 °C 和 545 °C 的曲线形状略有不同。主要区别在于: 当流动应力达到峰值后, 随变形程度增加, 流动应力有明显的降低, 而后达到一稳定阶段。

图 6 给出了压缩真实应力- 真实应变速率自然对数关系曲线, 图中的真实应力取变形稳

定阶段的流动应力值 σ_s 。由图 6 可以看出, 对于不同的变形温度, 压缩真实应力与真实应变速率自然对数之间存在线性关系。类似于拉伸变形, LY12 合金在半固态下的压缩变形行为也同样可以由式(2)的简单的幂函数进行描述。其中, 不同温度的 k 值与 m 值如表 3 所示。这些数值尽管与拉伸试样中获得的数值有所不同, 但也基本相似。

与拉伸试验相类似, 压缩时的流动应力除受到应变速率影响外, 同样受温度影响。图 7 为稳定压缩流动应力 σ_s 的自然对数与 $1000/T$ 的关系曲线, 其中 T 为压缩变形绝对温度。结合式(1)与图 7, 可以得到不同应变速率下的压缩变形激活能值, 如表 4 所示。这些数值与拉伸实验中获得的数值相类似, 但比其略高。

3 结论

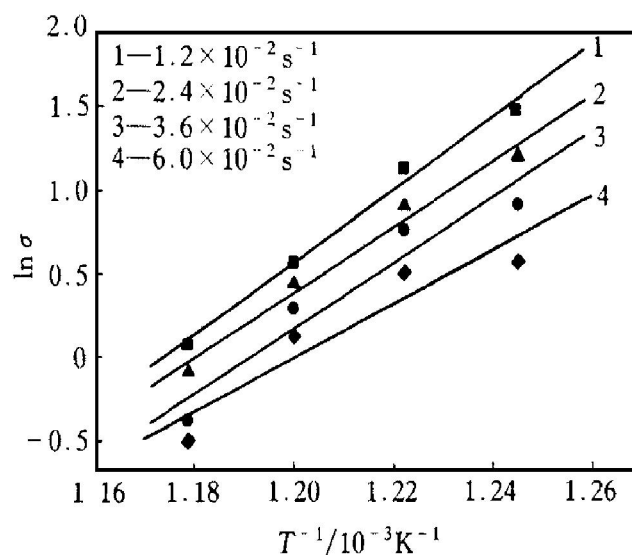
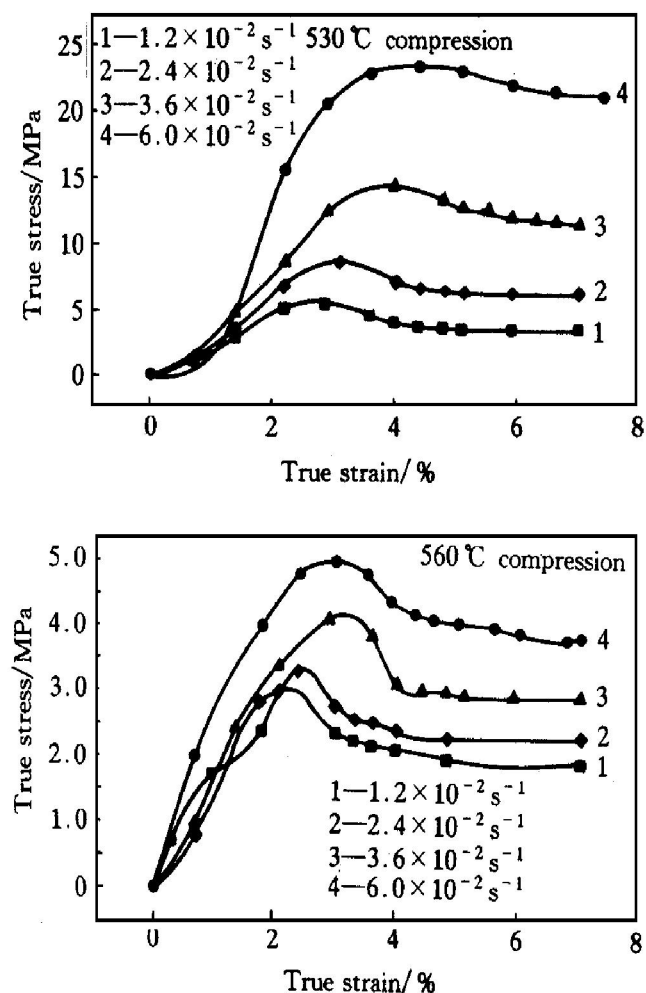


图 4 拉伸试验流动应力峰值与温度关系曲线

Fig. 4 Temperature dependence of maximum flow stress in tensile experiment at various strain rates

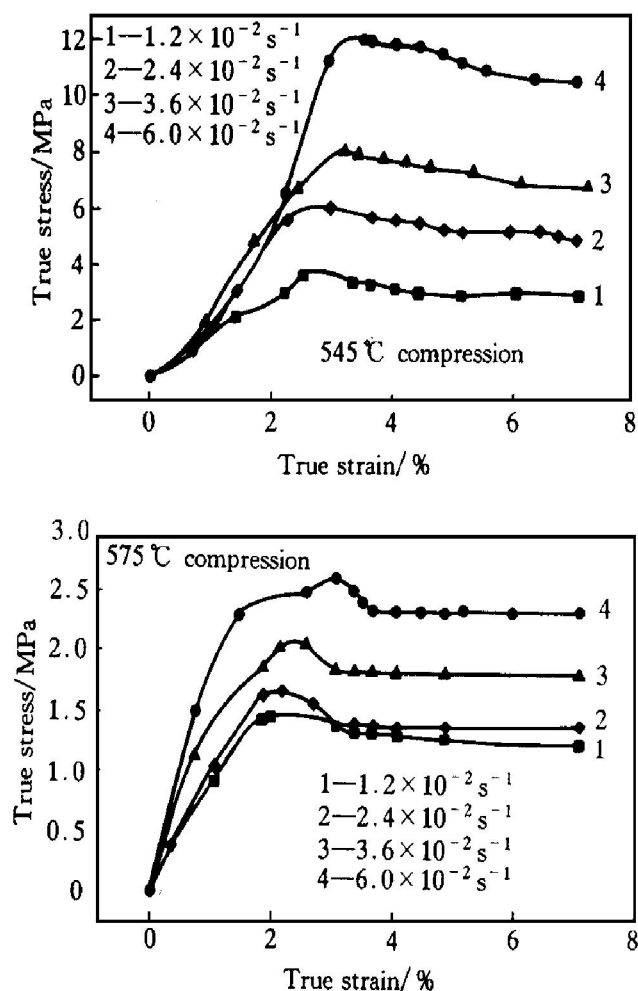


图 5 不同变形温度及应变速率下的压缩真实应力-真实应变曲线

Fig. 5 Compressive true stress-true strain curves at various deformation temperatures and strain rates

表 3 不同变形温度下的 k 值与 m 值

Table 3 k and m values at various compression deformation temperatures

$t/^\circ\text{C}$	m	k
530	0.44	14.88
545	0.39	9.58
560	0.23	3.71
575	0.23	2.70

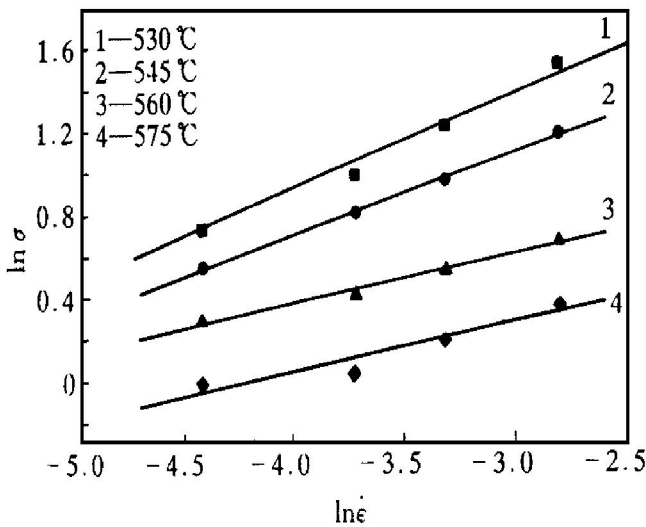


图 6 压缩真实应力- 真实应变速率自然对数关系曲线

Fig. 6 Plot of log-scaled compressive true stress-true stain rate relationship

表 4 不同应变速率下的压缩变形激活能

Table 4 Activation energy of compressive deformation at various strain rates

$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	$Q/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
0.012	175.50
0.024	215.80
0.036	217.87
0.060	217.80

LY12 合金半固态下的拉压变形均具有应变速率敏感性, 其力学行为均可用简单幂函数关系 $\sigma = k\dot{\epsilon}^m$ 进行描述。根据拉压变形的真实应力- 应变曲线, 可以推算出相应的 k , m 与 Q 值; 当 LY12 合金的拉压真实应力- 真实应

变曲线不同时, 相应的 k , m 与 Q 值也略有差别。这表明, 应力状态、变形温度及变形速率的不同, 可能引起变形机制的差别。

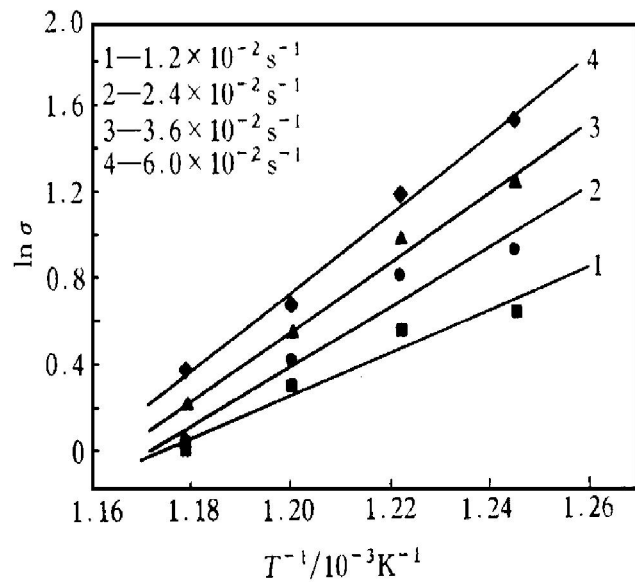


图 7 压缩试验稳定应力值与温度关系曲线

Fig. 7 Temperature dependence of steady flow stress in compressive experiment at various strain rates

REFERENCES

1 Chen C P and Tsao C Y A. Acta Mater, 1997, 45(5): 1995.

2 Luo Shoujing and Sun Jiakuan. Trans Nonferrous Met Soc China, 1997, 7(2): 113.

3 Nguyen T G, Favier D and Suery M. Int J Plast, 1994, 10(6): 663.

4 Martin M C, Favier D and Suery M. Int J Plast, 1997, 13(3): 215.

5 Martin M C, Favier D and Suery M. Int J Plast, 1997, 13(3): 237.

6 Flemings M C. Metall Trans, 1991, 22A: 957.

7 Nguyen L G and Suery M. Mater Sci Eng, 1994, 10: 894.

8 Ferry M and Munroe P R. Mater Sci Tech, 1995, 11(6): 633.

9 Urcola J J and Sellars C M. Acta Metall, 1987, 35(11): 2637.

10 Baudalet B, Dang M C and Bordeaux F. Scripta Met, 1992, 26(4): 573.

11 Bordeaux F, Dang M C and Baudalet B. J Mater, 1994, 29: 3023.

Mechanical behaviors of tension and compression deformation of 2024Al alloy at semi-solid state

Sun Jiakuan, Luo Shoujing

*School of Materials Science and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China*

Abstract: In order to investigate the mechanical behavior of 2024Al alloy deformation at the semi-solid state, the tensile and compressive experiments were employed to measure its curve of true stress vs true strain at various deformation temperatures and strain rates. Based on the experimental results, the relation of true stress σ and true strain rate $\dot{\epsilon}$ and the relation of deformation temperature and true stress were determined using the method of simple linear regression. The results showed that the tensile and compressive deformation behaviors of 2024Al alloy in semi-solid state temperature regions display the sensitivity of strain rate and they could be expressed by a simple power law $\sigma = k\dot{\epsilon}^m$. In addition, the coefficient k of power law, the exponent m of sensitivity of strain rate and the energy Q of plastic deformation were derived based on the experimental results and theoretical analyses. Consequently, the quantitative description of 2024Al alloy deformation in the semi-solid temperature region was obtained.

Key words: 2024 alloy; mechanical behavior; semi-solid state; tension and compression deformation

(编辑 彭超群)