

# AZ61 镁合金热压缩流变应力及晶粒尺寸预测

彭建<sup>1,2</sup>, 潘复生<sup>1,2</sup>, 丁培道<sup>1,2</sup>, 汤爱涛<sup>1</sup>, 于翔<sup>1</sup>

(1. 重庆大学, 重庆 400044)

(2. 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400045)

**摘要:** 通过在 Gleeble-1500D 热模拟试验机上对 AZ61 镁合金进行热模拟试验, 获得等温恒速单轴方向热压缩变形过程的流变应力-应变关系曲线。经过分析和计算曲线的特征值, 利用线性和非线性数值回归方法建立峰值应力、峰值应变、再结晶晶粒尺寸等特征值与 Zener-Hollomon 参数即带温度补偿的应变速率因子  $Z$  的定量关系。流变应力的预测计算值与实测值误差在 10% 以内, 晶粒尺寸计算值与实测值误差在 5% 以内。

**关键词:** 镁合金; 热压缩; 流变应力; 数值模拟

中图分类号: TG 146.2<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)04-0655-04

镁合金因其轻量化特征, 近年来在汽车、航空航天、电子工业领域获得了迅速的发展<sup>[1]</sup>, 展现出广阔的应用前景。由于镁合金的晶体结构为密排六方, 塑性成形能力差, 在变形镁合金开发应用中为掌握其热成形工艺, 以提高成材率和制品性能, 需系统地掌握热变形过程中的流动行为和组织演变规律<sup>[2]</sup>。本实验利用物理模拟和数值模拟, 对 AZ61 镁合金热压缩变形过程进行研究, 建立峰值应力、峰值应变、再结晶晶粒尺寸等参数同 Zener-Hollomon 参数之间的数学关系, 建立流变应力的数学模型并证明其可行性。

## 1 试验

从直径为 130 mm 的自制镁合金半连续铸锭相同位置取尺寸为  $\Phi 10$  mm $\times$ 15 mm 的试样若干, 材料名义化学成分为: 6%Al, 1%Zn, 0.3%Mn, 其余为 Mg 和微量杂质。经 400 °C, 12 h 均匀化退火处理, 在 Gleeble-1500D 热模拟试验机上进行等温恒速单轴方向热压缩试验, 变形前加热升温速度 2 °C/s, 保温 2 min。压缩变形共 16 种变形温度、变形速率组合: 温度为 300、350、400 和 450 °C, 应变速率 0.01、0.1、1 和 5 s<sup>-1</sup>。根据流变应力-应变曲线及其特征值, 运用专业统计软件 SPSS 进行回归分析。

## 2 结果及讨论

### 2.1 应力-应变曲线拟合

为了利用试验数据拟合得到流变应力-应变模型, 需要首先确立热变形本构关系模型。大量关于金属热变形本构关系研究表明, 下式(1)是比较成功的<sup>[3]</sup>:

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^m \cdot \dot{\varepsilon}^n \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

它反映了流变应力随着温度升高而降低并随着应变速率提高而提高的趋势, 但不能反映出随着变形量增大动态回复和动态再结晶对流变应力的影响。为更准确描述变形过程中流变抗力的变化规律以及变形过程中所发生的物理变化, 将式(1)改进为式(2)的形式:

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^{B_1} \cdot \exp(-B_2 \cdot \varepsilon) \cdot \dot{\varepsilon}^m \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式(2)包含了式(3)和式(4)的两种趋势:

$$\sigma = A_1 \cdot \varepsilon^{B_1} \quad (3)$$

$$\sigma = A_2 \cdot \exp(-B_2 \cdot \varepsilon) \quad (4)$$

上述式中,  $Q$  为热变形激活能,  $R$  为阿氏常数。 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$  和  $B_2$  是随变形工艺变化的系数。

式(3)表达了流变抗力随着应变量的增加而增加的趋势, 而式(4)表达了流变抗力随变形量的增加而降低的趋势, 使式(2)更能反映实际流变应力-应变曲线的形态特征。当变形速率  $\dot{\varepsilon}$  和变形温度  $T$  均为恒定值时, 式(2)的后面部分  $\dot{\varepsilon}^m \exp(Q/RT)$  也为恒定值, 式(2)所表达的流变抗力和应变量的关系可变为:

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^{B_1} \cdot \exp(-B_2 \cdot \varepsilon) \quad (5)$$

利用式(5)对 AZ61 镁合金在变形温度为恒定值

收到初稿日期: 2008-06-25; 收到修改稿日期: 2009-03-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(“973”计划)(2007CB613704); “十一五”国家支撑计划(2007BAG06B04); 国家自然科学基金(50725413)

作者简介: 彭建, 男, 1969 年生, 博士, 副教授, 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044, 电话: 023-65112291, E-mail: jpeng@cqu.edu.cn

300 °C，应变速率为恒定值 0.01 s<sup>-1</sup> 的变形条件下，流变抗力随应变变化的试验数据进行流变应力-应变关系曲线的拟合。图 1 给出了利用 SPSS 统计软件拟合所得到的计算值与试验值的比较。图中较细的曲线是 Gleeble 试验机上热压缩试验所得的实测值，较粗的曲线为用统计软件 SPSS 所得计算结果。拟合曲线和试验数据非常接近，误差小于 10%，说明了式 (5) 能很好地描述流变抗力与变形量之间的关系。300 °C，0.01 s<sup>-1</sup> 变形时的应力-应变方程为：

$$\sigma = 80.48 \cdot \epsilon^{0.134 \cdot 905} \cdot \exp(-0.525 \cdot 31 \cdot \epsilon) \quad (6)$$

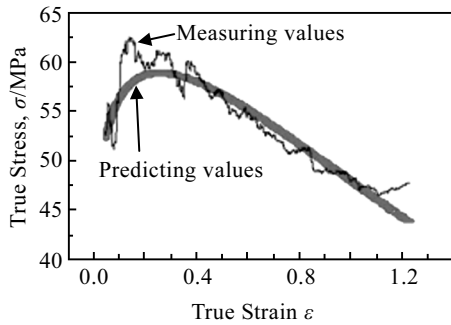


图 1 流变应力预测值与实测值

Fig.1 Predicting values and measuring values of flow stress

### 2.2 峰值变形抗力与变形参数的关系

流变应力-应变曲线中流变应力峰值是变形设备能力选择和变形工艺参数选择的重要依据，稳态流变应力则对变形组织起着决定性作用。由于峰值流变抗力取决于变形温度和应变速率，因此，可以不考虑应变变量因素。变形温度和应变速率在某一范围内时，可以认为  $n$ 、 $Q$  是只与材料本身有关而与变形参数无关的常数<sup>[4,5]</sup>，本研究同样假定  $n$ 、 $Q$  为常数。变形温度和变形速率对热变形过程的影响，可通过引入 Zener-Hollomon 参数  $Z$ ，即带温度补偿的应变速率因子来表达：

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = f(\sigma) \quad (7)$$

$f(\sigma)$  一般还可采取下面形式<sup>[6]</sup>：

$$Z = A \cdot \sigma_p^n = f(\sigma) \quad (8)$$

式中  $A$  是常数， $n$  是应力指数。由式(7)和(8)可得：

$$\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A \cdot \sigma_p^n \quad (9)$$

两边取对数，得式 (10)：

$$\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln A + n \ln \sigma_p \quad (10)$$

通过最小二乘线性回归求得各温度下  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma_p$  曲线的斜率  $n$ 。同样，利用试验所得到的各应变速率下，温

度(1000/ $T$ )所对应的变形抗力( $\ln \sigma_p$ )的关系，由最小二乘法对每一个温度下(1000/ $T$ )和  $\ln \sigma$  关系曲线按直线关系( $Y=P1+P2 \cdot X$ )进行拟合得到  $Q/Rn$  的值为 2782.75。 $n=7.80$ ， $Q=R \times n \times 2782.75=180 \ 372.29=180.37$  (kJ/mol)。利用式(10)计算每一温度和应变速率下的  $A$  值，取平均值作为公式中  $A$  的值， $A=2.014$ ； $Q/R=2782.75 \times 7.80=21 \ 705.45$ 。从而由式(9)，通过线性回归得到 AZ61 合金的流变抗力与温度、应变速率关系，即热变形本构方程：

$$2.014 \cdot \sigma^{7.8} = \dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{21 \ 705}{T}\right) \quad (11)$$

图 2a、2b、2c、2d 分别为应变速率为 0.01、0.1、1 和 5 s<sup>-1</sup> 时，变形温度 573、623、673 和 723 K 下 AZ61 合金流变应力的实测值和计算值的比较。图 2 中的点

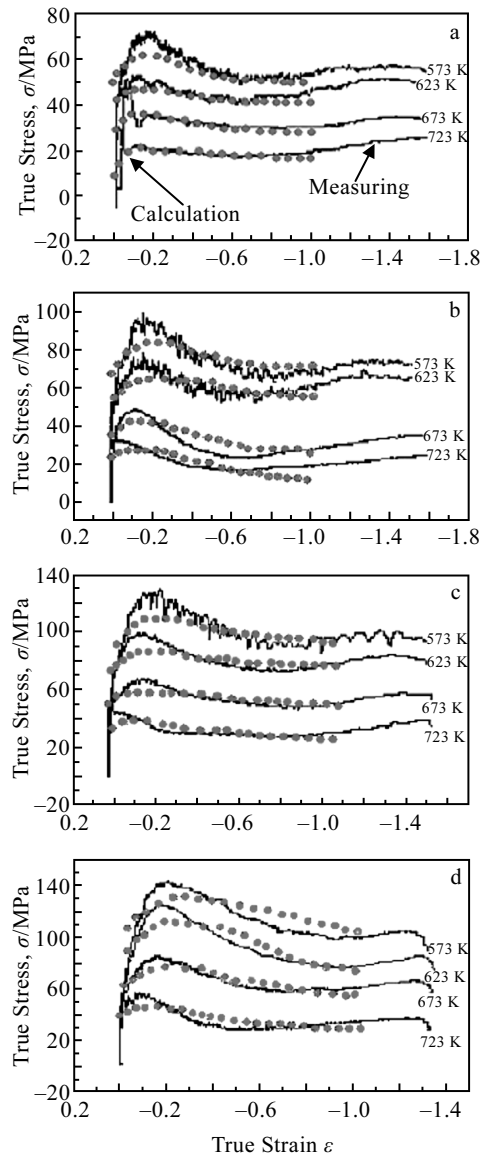


图 2 AZ61 合金的压缩流变应力

Fig.2 Flow stress of AZ61 in compressing: (a)  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ , (c)  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ , and (d)  $\dot{\epsilon} = 5 \text{ s}^{-1}$

为根据式(11)所得的计算值,连续曲线为 Gleeble 试验机记录的试验实测值。结果显示,计算值与实测值总体变化趋势基本相符,高温变形条件下符合较好,流变应力达到峰值进入稳态区域时符合得较好。实测和模拟结果均显示,AZ61 镁合金高温压缩流变应力随变形温度的升高而减小,随应变速率增加而增大。在各种应变速率下,随变形温度的降低,流变应力达到峰值的应变变量增大。

2.3 热压缩变形过程各特征量的模型

从图 2 可以看出,所有的流变应力曲线都存在峰值和软化后的稳态过程,表明其软化机制为动态再结晶。峰值应力、峰值应变、临界应变等是研究动态再结晶热变形过程的重要特征量。建立这些特征量的数学模型对掌握动态再结晶行为有重要作用。对式(8)两边取对数,得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln \sigma_p \tag{12}$$

各变形条件下的  $\sigma_p$  和  $Z$  值经线性回归,得:

$$\begin{aligned} \ln Z &= 0.700123 + 7.802 \ln \sigma_p \\ Z &= 2.014 + \sigma_p^{7.802} \end{aligned} \tag{13}$$

线性相关系数为 0.98。

峰值应力随着  $Z$  值的增大而增大,稳态应力与峰值应力有相同的变化规律,仿照峰值应力,可得稳态应力模型:

$$\begin{aligned} \ln Z &= 5.403 + 7.318 \sigma_s \\ Z &= 222.07 + \sigma_s^{7.318} \end{aligned} \tag{14}$$

线性相关系数为 0.955。

流变应力峰值对应的应变值为峰值应变  $\varepsilon_p$ ,当流变应力进入稳态时的应变值为稳态应变  $\varepsilon_s$ ,二者同  $Z$  参数的关系可表示为<sup>[7,8]</sup>:

$$\varepsilon_p = p_1 \cdot Z^{p_2} \tag{15}$$

$$\varepsilon_s = p_3 \cdot Z^{p_4} \tag{16}$$

式中,  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$  为系数。对式(15)、式(16)进行回归分析得:

$$\varepsilon_p = 8.02 \times 10^{-4} \cdot Z^{0.145} \tag{17}$$

$$\varepsilon_s = 1.02 \times 10^{-2} \cdot Z^{0.119} \tag{18}$$

线性相关系数分别为 0.97 和 0.862。所用模型对稳态流变应力的预测不及对峰值流变应力的预测准确。这是由于在不同工艺组合下的流变应力-应变曲线上确定流变应力刚好进入稳态时的应变值  $\varepsilon_s$ , 不像确定峰值应变  $\varepsilon_p$  那样容易。

2.4 再结晶晶粒尺寸和  $Z$  参数的关系

研究表明,当变形达到稳态流变后,动态再结晶和动态回复造成的软化与应变硬化达到平衡,动态再结晶晶粒尺寸不再随应变的继续而进一步细化<sup>[7]</sup>,此时动态再结晶的晶粒尺寸与初始晶粒尺寸关系不大,

而由变形工艺条件决定,晶粒尺寸同  $Z$  因子有如下关系<sup>[8]</sup>:

$$d = p_5 \cdot Z^{p_6} \tag{19}$$

$p_5$ 、 $p_6$  为常数。对式(19)两边取对数,得:

$$\ln d = \ln p_5 + p_6 \ln Z \tag{20}$$

用各变形条件下所测定的晶粒尺寸和  $Z$  参数值对式(20)进行线性回归,得:

$$d = 24.34 \cdot Z^{-0.023} \tag{21}$$

式(21)线性相关系数为 0.98。该式表明,随着  $Z$  值的增大,动态再结晶晶粒尺寸减小。为了得到细的晶粒,必须增加  $Z$  值,而由式(7)可知,适当降低变形温度和提高应变速率可使  $Z$  值增大。

以  $\ln Z$  和  $\ln d$  为坐标绘出再结晶晶粒尺寸同  $Z$  参数的关系曲线。不同变形温度和应变速率组合下变形后的各试样平均晶粒直径的实测值围绕在式(20)所描述的直线附近,距离非常近,线性程度高,晶粒尺寸计算值与实测值误差在 5% 以内,表明该模型可靠。

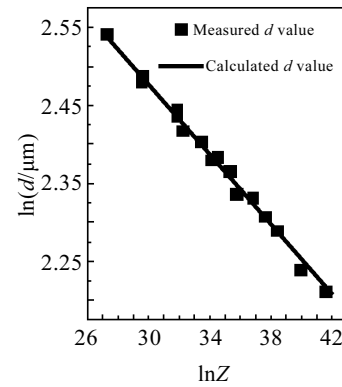


图3 再结晶晶粒尺寸同  $Z$  参数的关系  
Fig.3 Relation between  $\ln d$  and  $\ln Z$

3 结论

1) AZ61 镁合金高温压缩流变应力随变形温度的升高而减小,随应变速率增加而增大。随变形温度的降低,流变应力达到峰值的应变变量增大。

2) 当变形温度和变形速率恒定时,流变抗力和应变变量关系可采用如下模型:  $\sigma = A \cdot \varepsilon^{B1} \cdot \exp(-B \cdot \varepsilon)$ , 总体上误差小于 10%。

3) 通过数值回归方法得到 AZ61 镁合金的流变抗力与温度、应变速率关系数学模型,即热变形本构方程:  $2.014 \cdot \sigma^{7.8} = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{21705}{T}\right)$ 。

4) 经回归计算得到 AZ61 镁合金的热变形激活能  $Q=180.37$  kJ/mol。获得 AZ61 镁合金热压缩变形过程动态再结晶的重要特征量: 峰值应变  $\varepsilon_p=8.02 \times$

$10^{-4} \cdot Z^{0.145}$ , 稳态应变:  $\varepsilon_s = 1.02 \times 10^{-2} \cdot Z^{0.119}$ , 峰值应力:  
 $\sigma_p^{7.802} = Z - 2.014$ , 稳态应力  $\sigma_s^{7.318} = Z - 222.07$ , 发生  
 动态再结晶后的晶粒尺寸  $d = 24.34 \cdot Z^{0.023}$ 。

#### 参考文献 References

- [1] Aghion E, Bronfin B. *Material Science Forum*[J], 2000, 350~351: 19
- [2] Cahn R W. Translated by Ding Daoyun *et al*(丁道云等译). *Structure and Properties of Nonferrous Alloy*(非铁合金的结构与性能)[M]. Beijing: Science Press, 1999: 109
- [3] Shen G, Semiatin E L, Shivpui R. *Metal and Materials Transaction A*[J], 1995, 26(7): 1795
- [4] Long Z D. In: Loria E A ed. *Hot Workability of alloy 706, Superalloys 718,625,706 and various Derivatives*[C]. Warrendale, PA: TMS, 1997: 205
- [5] Zhang Ya(张 娅), Ma Chunjiang(马春江), Lu Chen(卢 晨). *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术)[J], 2003(7): 38
- [6] Xu S G, Cao Q X. *Journal of Materials Process Technology*[J], 1994, 43(2~4): 221
- [7] Sellars C M, Davies G J. *Hot Working and Forming Processes*[M]. London: The Metals Society, 1980: 3
- [8] Wang Youming(王有铭). *Controlled Rolling and Controlled Cooling of Steel*(钢材的控制轧制和控制冷却)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 20

## Forecast of Flow Stress and Grain Size of AZ61 Mg Alloy under Hot Compression

Peng Jian<sup>1,2</sup>, Pan Fusheng<sup>1,2</sup>, Ding Peidao<sup>1,2</sup>, Tang Aitao<sup>1</sup>, Yu Xiang<sup>1</sup>

(1. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(2. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The uniaxial isothermal hot compression test of AZ61 magnesium alloy was carried out on Gleeble-1500D thermal-mechanical simulator, the flow stress-strain curves and other information of dynamic recrystallization were investigated by numerical analysis. The relations between  $Z$  and other characteristic values of dynamic recrystallization, including peak stress, peak strain and grain size, were developed by regression analysis. The numerical simulation model of flow stress was introduced, its predicted values were proved to be close to the measured values with errors not more than 10%. The errors between predicted values and measured values for grain size were not more than 5%.

**Key words:** magnesium alloy; hot compression; flow stress; numerical simulation

---

Biography: Peng Jian, Ph. D., Associate Professor, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China, Tel: 0086-23-65112291, E-mail: jpeng@cqu.edu.cn