

## AZ31 镁合金热变形流动应力预测模型\*

孙朝阳 栾京东 刘赓 李瑞 张清东

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

**摘要** 采用近等温单轴压缩实验获得了 AZ31 镁合金变形温度为 523—723 K, 应变速率为 0.01—10 s<sup>-1</sup> 条件下的流动应力, 分析了变形温度和应变速率对流动应力的影响规律. 结果表明, AZ31 镁合金变形过程中发生了动态再结晶, 523 K 时形成细小组织; 而 723 K 时动态再结晶和长大的晶粒沿径向拉长. 考虑实验过程塑性变形功和摩擦功引起的温度升高, 在高应变速率条件下采用温度补偿修正了流动应力. 在此基础上, 建立了基于双曲正弦模型的峰值流动应力和统一本构关系, 该模型利用材料参数耦合应变来描述流动应力的应变敏感性, 进一步获得了合金热变形过程中流动应力与变形温度、应变速率和应变的定量关系. 采用该本构关系模型预测流动应力具有较高的精度, 预测值与实测值相关系数为 0.976, 平均相对误差为 5.07%, 实验条件范围内预测的流动应力与实验值几乎能保持一致.

**关键词** AZ31 镁合金, 热压缩变形, 本构关系, 流动应力

中图分类号 TG146.4

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2012)07-0853-08

## PREDICTED CONSTITUTIVE MODELING OF HOT DEFORMATION FOR AZ31 MAGNESIUM ALLOY

SUN Chaoyang, LUAN Jingdong, LIU Geng, LI Rui, ZHANG Qingdong

School of Mechanical and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

Correspondent: SUN Chaoyang, associate professor, Tel: (010)62334197, E-mail: suncy@ustb.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (Nos.50831008 and 51105029)

Manuscript received 2011-10-12, in revised form 2012-05-08

**ABSTRACT** The uniaxial compression tests of AZ31 magnesium alloy at different strain rates of 0.01—10 s<sup>-1</sup> and different deformation temperatures of 523—723 K were performed by using Gleeble-1500 simulator with a maximum strain of 0.916. The influences of deformation temperature and strain rate on the flow stress were investigated. The fine microstructure is attributed to dynamic recrystallization during compression process at 523 K. The stretched grains of dynamic recrystallization and growth up along radial direction were founded in microscopic observation at 723 K. Considering plasticity deformation and friction induced temperature rise, the flow stress was corrected at high strain rate by using temperature compensation. The peak flow stress and unified constitutive model were established based on hyperbolic sine model. Strain sensitivity of flow stress was studied to describe the coupling of materials parameters on the strain, and then the relationship between deformation temperature, strain rate and strain during hot deformation was obtained. Comparing with experimental results, the correlation coefficient and average relative error of predicted and measured values are 0.976 and 5.07% respectively, it is proved that the model reflects the real deformation feature of the AZ31 magnesium alloy.

**KEY WORDS** AZ31 magnesium alloy, hot-compressive deformation, constitutive relationship, flow stress

镁合金是实用结构中最轻的金属材料, 具有良好的比强度、比刚度、导电性及优良的阻尼减振和电磁屏蔽性能,

且其易于回收利用, 具有环保特性, 在交通、电子、通讯、航空、航天等领域具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>. 其中 AZ31 镁合金具有良好的延展性和中等高强度, 是目前商业化应用最普遍的变形镁合金. AZ31 镁合金具有六方晶体结构, 室温变形时的独立滑移系少, 导致室温塑性低, 塑性加工困难. 通常镁合金采用热或温塑性加工的方法, 如温轧、热挤压和热锻等, 与铸造产品相比, 这些产品具有更好的力

\* 国家自然科学基金项目 50831008 和 51105029 资助

收到初稿日期: 2011-10-12, 收到修改稿日期: 2012-05-08

作者简介: 孙朝阳, 男, 1976 年生, 副教授, 博士

DOI: 10.3724/SP.J.1037.2011.00641

学性能 [2].

近年来,数值模拟技术在金属塑性加工领域获得了越来越广泛的应用,为掌握高温塑性加工过程中金属流动规律及其与工艺条件(变形温度、变形速度和变形程度)的相互关系提供了保证.而获取精确的流动应力或本构模型是提高模拟计算精度的关键 [3],为此,国内外诸多学者对镁合金的流动应力本构关系进行了研究.如 Carl 等 [4] 发现 AZ31 镁合金应变速率在  $0.001\text{--}2500\text{ s}^{-1}$  范围内,应变速率对屈服应力及流动应力的影响最小; Takuda [5] 采用指数关系对 AZ31 和 AZ91 变形镁合金流动应力进行描述,用  $Z$  参数的形式简单表述了  $Z$  参数与流动应力的关系; Galiyev 等 [6] 基于幂函数关系建立了 ZK60 镁合金的本构关系; Barnett [7] 建立了 AZ31 镁合金基于双曲函数关系的本构关系方程; 范永革等 [8] 采用 Zener-Hollomon 参数的指数形式描述了 AZ31 镁合金高应变速率下的高温压缩流动应力; 王忠堂等 [9] 研究了 AZ31 镁合金高温流动应力变化规律,对 Arrhenius 本构方程进行了简化,并确定了模型参数; 黄光胜等 [10] 建立了具有动态再结晶型金属的本构方程,并确定了模型参数; 郭强等 [11] 得到 AZ31 镁合金在 623 K 时的激活能为 112 kJ/mol; 张先宏等 [12] 提出了含有软化因子的流动应力数学模型,并采用该模型对实验流动应力曲线进行回归分析,确定了模型参数; 余琨等 [13] 通过对 AZ31 镁合金热压缩变形的研究,提出应变速率和变形温度是影响变形激活能的重要参数.

目前对 AZ31 镁合金热变形本构关系的研究,主要是基于压缩实验获得某一应变的流动应力(如峰值应力或稳态应力),忽略了塑性应变和实验过程中试样温升对流动应力的影响,从而导致建立的数学模型存在明显的局限性,难以真实描述流动应力随应变的变化特征,没有形成统一的本构关系预测模型,且大多数研究的应变速率及变形温度变化范围较窄,如表 1 所示 [8,9,11,13],由此得出的流动应力本构关系很难正确反映实际生产情况.

本工作通过对 AZ31 镁合金进行近等温热压缩变形的实验,修正了试样压缩过程中温升引起的流动应力变化,研究了合金流动应力与应变速率、变形温度的关系,建立了基于考虑温升和不同应变的流动应力预测模型,以便

为合理制定 AZ31 镁合金热挤压等热塑性加工工艺参数提供指导,以及为进一步系统研究该合金加工工艺提供基本数据.

## 1 实验方法

采用商用 AZ31 镁合金铸锭,其化学成分(质量分数,%)为: Al 2.5—3.0, Zn 0.7—1.3, Mn $\geq$ 0.2, Ca $\leq$ 0.04, Si $\leq$ 0.3, Cu $\leq$ 0.05, Fe $\leq$ 0.01, Ni $\leq$ 0.005, 其它  $\leq$ 0.3, Mg 余量.将其加工成直径为 8 mm,长度为 12 mm 的圆柱形压缩试样.在 Gleeble-1500 热模拟机上进行近等温热压缩实验,压缩前在试样两端贴上石墨垫片,以减小试样与压头之间的摩擦,通过一对热电偶记录样品在变形过程中的温度变化.实验温度  $T$  为 523, 573, 623, 673 和 723 K,应变速率为 0.01, 0.1, 1 和  $10\text{ s}^{-1}$ ,试样加热速率为 10 K/s.压缩前试样在变形温度下保温 3 min,总压缩变形量为 60%(真应变 0.916),变形后立即水冷,以保留热变形组织.压缩后的试样沿轴线进行线切割,取试样的一半,在试样镶嵌机中镶嵌于电木粉中,制成金相试样.用 2000—5000 号砂纸逐级打磨,腐蚀液为 10 mL 饱和苦味酸 + 4 mL 乙酸 + 10 mL 酒精,对试样表面擦拭 2 s.对试样纵截面不同位置进行微观组织观察.整个实验过程中,通过试验机的微机处理系统自动采集实验数据,对实验数据进行处理后得到应力-应变曲线.

## 2 实验结果

根据实验数据得到 AZ31 镁合金在不同变形条件下的真应力-真应变曲线如图 1 所示.可以看出,在一定的应变速率下,流动应力随真应变的增加而迅速增加,达到峰值后逐渐下降,然后处于基本稳定状态;在同一温度下,流动应力随真应变的增加而迅速上升,出现峰值后缓慢下降,当真应变达到一定程度后其基本保持不变,达到了稳态.这说明层错能较低的镁合金在高温压缩时发生了动态回复或动态再结晶,峰值之前加工硬化占主导地位,中间只发生了部分动态回复或动态再结晶,随变形量的增加位错密度不断提高,使得动态回复或动态再结晶速度加快,软化作用逐渐加强,当软化作用大于动态再结晶时,流动应力开始下降,当二者达到动态平衡时,应力趋于相对稳定状态.还可以看出,峰值应力随温度的上升而减小,峰值发生在真应变为 0.1—0.5 时,并且随应变速率的增加

表 1 AZ31 镁合金热变形实验中选取的参数 [8,9,11,13]

Table 1 Associated parameters of hot deformation for AZ31 magnesium alloy [8,9,11,13]

| Temperature | Strain rate                        | Material          | Stress       | Activation energy | Material              | Ref. |
|-------------|------------------------------------|-------------------|--------------|-------------------|-----------------------|------|
| $T$ , K     | $\dot{\epsilon}$ , $\text{s}^{-1}$ | constant $\alpha$ | exponent $n$ | $Q$ , kJ/mol      | constant $A$          |      |
| 573—723     | 0.01—1.5                           | —                 | —            | —                 | —                     | [8]  |
| 523—623     | 0.01—1                             | 0.008             | 9.13         | 252.218           | $5.18 \times 10^{20}$ | [9]  |
| 523—723     | 0.005—5                            | 0.01              | 7            | 112               | —                     | [11] |
| 423—723     | 0.01—10                            | 0.0173            | 8.38         | 163.51            | $4.85 \times 10^{12}$ | [13] |

峰值有延后出现趋势. 这是因为温度升高, 滑移系的临界切应力下降, 导致其变形抗力降低, 随着温度的升高, 动态回复和动态再结晶更容易发生, 所以使得峰值随着温度的升高而提前. 由上述分析可以得出: 高温和低应变速率促进了热变形过程中的动态软化, 并且使热加工过程中的应力降低, 使合金易于发生塑性变形<sup>[14]</sup>.

如图 2 所示, 变形过程中, 试样开始沿轴向方向 (箭

头方向) 压缩, 晶粒沿径向拉长. 图 2a 中 523 K 时在外力作用下晶粒部分发生破碎, 同时晶粒发生动态再结晶, 最终产生细小的晶粒. 而温度较高时, 图 2b 中的 723 K 动态再结晶较早完成, 但晶界扩散和晶界迁移能力较强, 此时晶粒长大, 而导致形成粗大而分布均匀的晶粒; 在外力作用下, 动态再结晶和长大的晶粒得到充分变形, 晶粒沿径向拉长.

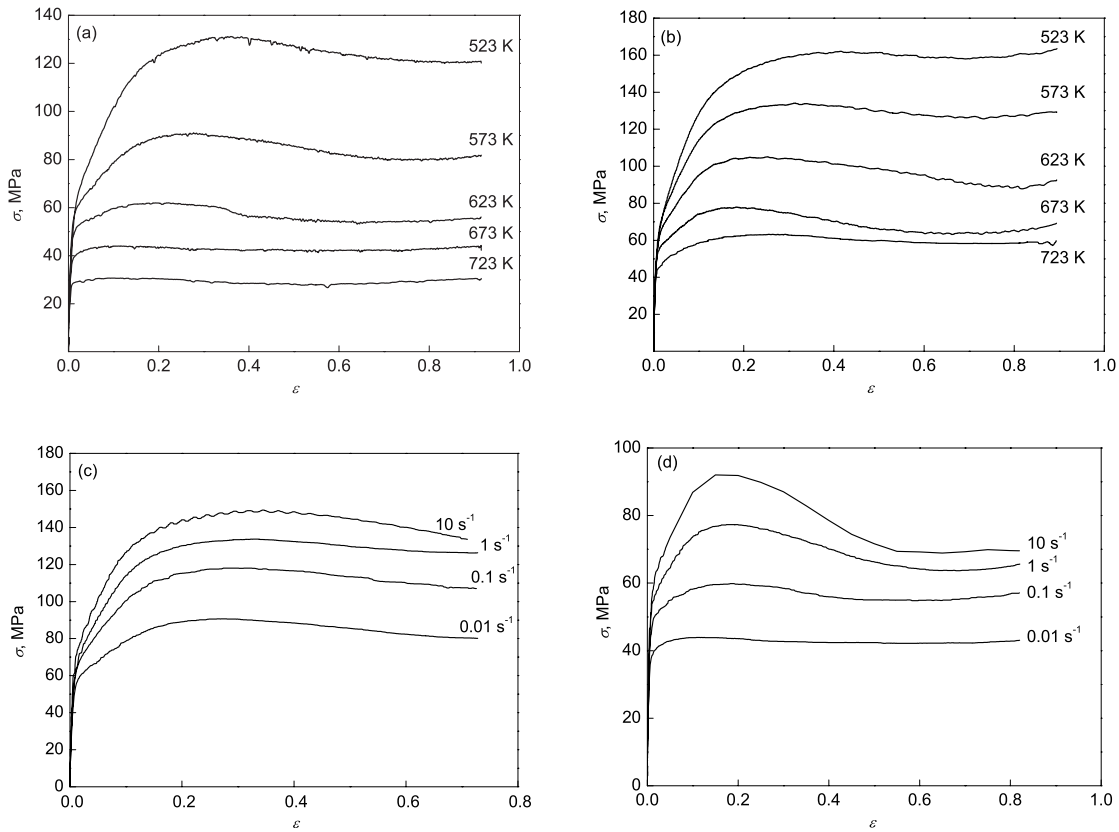


图 1 AZ31 镁合金热压缩变形真应力 - 真应变曲线

Fig.1 True stress-true strain curves of AZ31 magnesium alloy for hot compression test at  $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$  (a),  $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$  (b),  $T=573 \text{ K}$  (c) and  $T=673 \text{ K}$  (d)

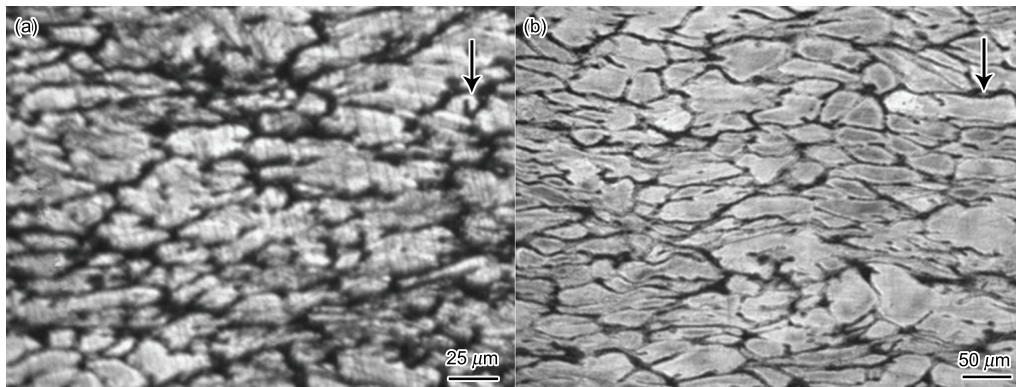


图 2 不同温度下 AZ31 镁合金的显微组织

Fig.2 Microstructures of AZ31 magnesium alloy at  $T=523 \text{ K}$ ,  $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$  (a) and  $T=723 \text{ K}$ ,  $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$  (b) (Arrows show compression direction)

### 3 分析与讨论

#### 3.1 流动应力修正

在等温恒变速率压缩过程中, 虽然试样表面温度保持恒定, 但由于变形功转化的热量无法及时消散, 导致试样内各部分温度有不同程度升高, 实际压缩过程并不是恒温不变的, 在同一温度和变形程度下, 变形热效应对合金流动应力的影响主要取决于等效应变速率<sup>[15]</sup>. 在 Gleeble-1500 试验机上, 变形过程采用热电偶瞬时测量试样中部温度稳定区域的温度, 根据实验测得的在预设温度为 523 和 723 K 时试样变形过程的瞬时温度-应变曲线如图 3 所示. 可以看出, 当应变速率大于等于  $1 \text{ s}^{-1}$  时, 由于变形热和摩擦热的原因, 试样温度持续上升, 最大温升达 60 K, 因而所得实验数据对实验结果影响较大; 当应变速率小于等于  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时, 试样温度在整个变形过程中基本维持不变, 所测数据对实验结果影响很小, 因此, 本工作只对高应变速率 ( $1$  和  $10 \text{ s}^{-1}$ ) 下的流动应力进行修正.

温升  $\Delta T$  引起流动应力的变化  $\Delta\sigma$  可以按下式确定<sup>[16]</sup>:

$$\Delta\sigma = \left(\frac{\partial\sigma}{\partial(1/T)}\right)_\varepsilon \left(\frac{1}{T+\Delta T} - \frac{1}{T}\right) \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为实验记录的初始应力, MPa.

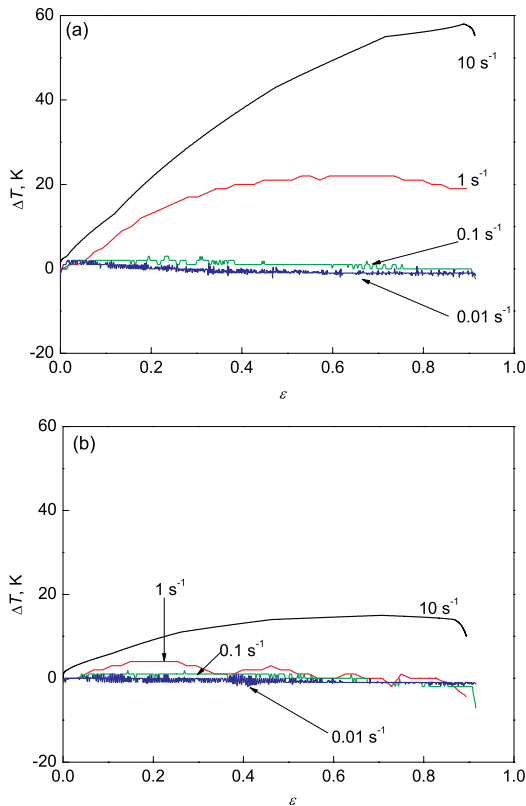


图 3 不同条件下 AZ31 镁合金热压缩的温升

Fig.3 Temperature rises  $\Delta T$  of hot compression for AZ31 magnesium alloy at  $T=523 \text{ K}$  (a) and  $T=723 \text{ K}$  (b)

根据式 (1) 修正变形速率为  $10$  和  $1 \text{ s}^{-1}$  的真应力-真应变曲线如图 4 所示. 可以看出, 对于应变速率为  $10 \text{ s}^{-1}$ , 当温度为  $523 \text{ K}$  时, 最大流动应力变化达到  $40 \text{ MPa}$ , 由此可见, 温升引起的应力误差对于精确确定镁合金本构方程的影响不能忽略, 这也足以证明本工作对应力进行修正的必要性<sup>[17]</sup>.

#### 3.2 峰值应力本构方程

材料在动态冲击载荷作用下的本构关系是高度非线性的, 因此没有普遍实用的本构模型. Arrhenius 本构方程可以用来描述变形温度、应变速率等对材料流变应力的影响. 不同的合金和金属热变形研究结果<sup>[18]</sup>表明: 材料在高温热变形过程中, 金属和合金的热变形和高温蠕变过程非常相似, 都存在热激活过程. 因此, 对于任一状态下的流动应力主要取决于  $T$  和  $\dot{\varepsilon}$ , 都存在一个应变硬化和动态软化之间的动态平衡过程. 为此 Sellars 和 McTegart<sup>[19]</sup>提出了用于修正 Arrhenius 关系的双曲正弦模型来描述这种热激活变形行为, 即

$$\dot{\varepsilon} = AF(\sigma_p)\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中,  $\sigma_p$  为峰值应力, MPa;  $R$  为摩尔气体常数,  $8.31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ;  $A$  为与材料状态有关的常数;  $F(\sigma_p)$  有

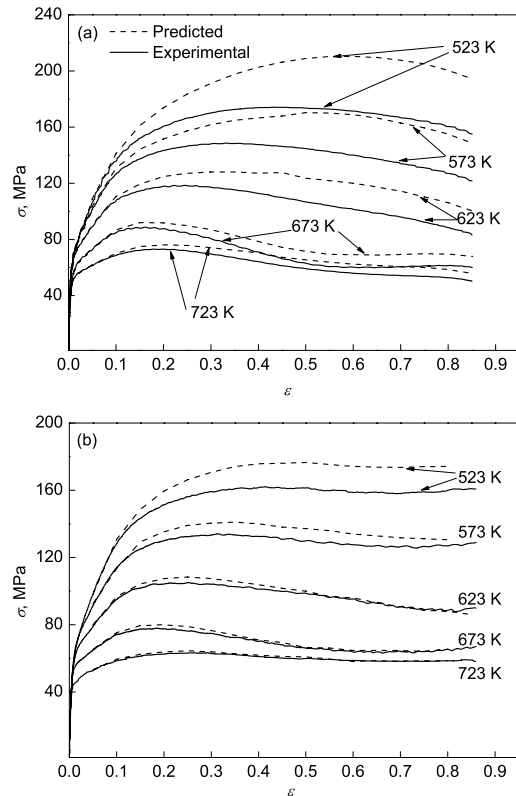


图 4 AZ31 镁合金修正前后真应力-真应变曲线

Fig.4 Comparisons between corrected and uncorrected true stress-true strain curves of AZ31 magnesium alloy at  $\dot{\varepsilon}=10 \text{ s}^{-1}$  (a) and  $\dot{\varepsilon}=1 \text{ s}^{-1}$  (b)

如下 3 种形式 [5]:

$$F(\sigma_p) = \sigma^{n_1} \quad (\text{low stress level}) \quad (3)$$

$$F(\sigma_p) = \exp(\beta\sigma) \quad (\text{high stress level}) \quad (4)$$

$$F(\sigma_p) = [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (\text{all stress level}) \quad (5)$$

式中,  $n_1, \beta, \alpha$  和  $n$  均为常数. 根据流动应力在上述方程中出现的形式, 式 (3—5) 分别称为幂函数方程、指数方程和双曲正弦方程. 文献 [19] 指出, 式 (3) 适用于流动应力较低的材料, 式 (4) 适用于流动应力较高的材料, 式 (5) 能兼顾上述 2 种情况. 研究 [20—22] 表明, 式 (5) 能较好地描述金属材料常规热变形过程. 为此, 本工作基于以上材料常数  $A, \alpha, n$  和  $Q$  均为应变的函数的前提, 采用该模型来建立 AZ31 镁合金在应变小于 0.7 时的本构方程.

在金属和合金的热加工变形时, 应变速率受到热激活的控制, Zener 和 Hollomon [23] 提出, 变形温度和应变速率对变形的影响可以采用温度补偿的变形速率因子 Zener-Hollomon 参数  $Z$  来描述

$$Z = \dot{\epsilon} \left( -\frac{Q}{RT} \right) = [A \sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (6)$$

$\beta$  和  $n$  之间存在如下关系:

$$\alpha = \beta/n_1 \quad (7)$$

将式 (3, 4) 分别代入式 (2), 两边都同时取自然对数,

移项得到

$$\ln\sigma = \frac{\ln\dot{\epsilon}}{n_1} - \frac{\ln A_1}{n_1} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{\ln\dot{\epsilon}}{\beta} - \frac{\ln A_2}{\beta} \quad (9)$$

式中,  $A_1$  和  $A_2$  均为与变形温度无关的材料常数.

根据不同变形条件下的实验数据, 绘制  $\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$  和  $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$  曲线. 流动应力取峰值时所对应的数值, 如图 5a 和 b 所示, 其斜率分别为  $n$  和  $\beta$ , 并可确定  $\alpha$  值, 这里  $\alpha = \beta/n_1 = 0.0109$ . 通过回归分析发现, 在变形温度一定时, 流动应力和应变速率之间存在对数关系, 平均线性相关系数大于 0.97.

同理, 对式 (6) 取自然对数, 移项得到

$$\ln\dot{\epsilon} = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] - Q/(RT) \quad (10)$$

对式 (10) 求偏微分可得变形激活能

$$Q = R \left[ \frac{\partial \ln\dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right]_T \left[ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} \quad (11)$$

据真应力 - 真应变曲线绘制  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  与  $\ln\dot{\epsilon}$ ,  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  与  $1/T$  关系如图 5c 和 d 所示. 对图 5 的结果进行线性回归, 可获得不同应变条件下的应力指数  $n$  以及材料常数  $A$ , 并由式 (11) 可求得不同的应变下的  $Q$ .

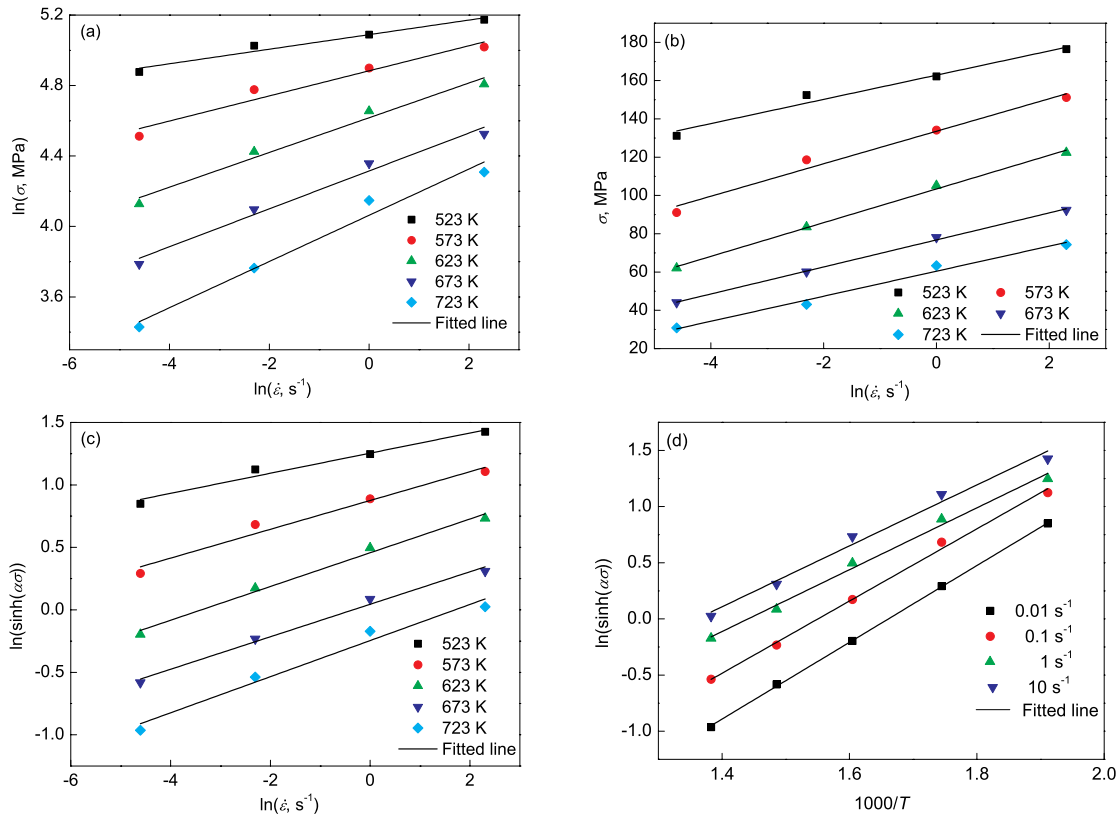


图 5 不同变量之间的线性拟合图

Fig.5 Relationships between  $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$  (a),  $\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$  (b),  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $\ln\dot{\epsilon}$  (c) and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1/T$  (d)

将上述参数数值代入式 (2) 中, 即可得到 AZ31 镁合金的峰值应力本构关系模型

$$\dot{\epsilon} = 7.465 \times 10^{14} [\sinh(0.0109\sigma)]^{7.319} \exp[-189842/(RT)] \quad (12)$$

### 3.3 统一的本构关系模型

根据反双曲正弦函数的定义

$$\sinh^{-1}(\alpha\sigma) = \ln\{\alpha\sigma + [(\alpha\sigma)^2 + 1]^{1/2}\} \quad (13)$$

由此得到流动应力  $\sigma$  表述为 Zener-Hollomon 参数的函数

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln\left\{\left(\frac{Z}{A}\right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A}\right)^{2/n} + 1\right]^{1/2}\right\} \quad (14)$$

将式 (6) 代入式 (14) 得到更容易计算的本构方程

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arcsinh}\left[\exp\left(\frac{\ln\dot{\epsilon} - \ln A + Q/(RT)}{n}\right)\right] \quad (15)$$

按照峰值应力本构方程的计算过程, 分别算出不同应变下 ( $\epsilon=0.05-0.7$ , 间隔量为 0.05) 的  $\alpha$ ,  $Q$ ,  $n$  和  $\ln A$ , 经过分析, 计算出的材料参数与真应变之间存在一定的函数关系 [24], 经过尝试发现利用四次多项式去拟合它们之间的函数关系, 拟合效果较好, 其相关系数达到 0.98 以上. 按上述方法确定的材料各参数随应变的变化关系如图 6 所示. 拟合出材料参数随应变变化的四次函数关系式

如下:

$$\begin{cases} Q/1000 = 156.1 + 175.5\epsilon + 579.1\epsilon^2 - \\ \quad 1692.38\epsilon^3 + 1254.5\epsilon^4 \\ \ln A = 27.7 + 11.3\epsilon + 247.6\epsilon^2 - 604.2\epsilon^3 + 424.9\epsilon^4 \\ n = 12.8 - 53.4\epsilon + 218.4\epsilon^2 - 356.2\epsilon^3 + 208.9\epsilon^4 \\ \alpha = 0.017 - 0.051\epsilon + 0.195\epsilon^2 - 0.307\epsilon^3 + 0.172\epsilon^4 \end{cases} \quad (16)$$

将计算得到的各材料参数代入式 (15) 即可得到各变形条件下的流动应力. 通常为了增加式 (15) 对各种变形条件的普遍适应性, 还可考虑材料变形时流动应力的应变敏感性. 但对高温塑性变形过程来讲, 当材料的软化足以抵消硬化作用时, 可以忽略应变对稳态流动应力的影响.

### 3.4 本构关系模型的验证

为了验证上述得到的统一本构方程预测流动应力的准确性, 将不同应变、不同温度及应变速率代入式 (15), 得到相应的流动应力与实际所测值共 280 组数据进行了对比, 并采用相关性和平均相对误差进行验证.

相关系数通常用来分析实验值和计算值线性关系的强弱. 图 7 为本构关系预测流动应力与实验值的相关性. 可以看出, 本构关系的预测值与实验值相关性较好, 相关系数约为 0.976. 相关系数越高并不一定代表符合性越好, 因为预测数据可能全部偏高或者偏低. 为了准确地描述建

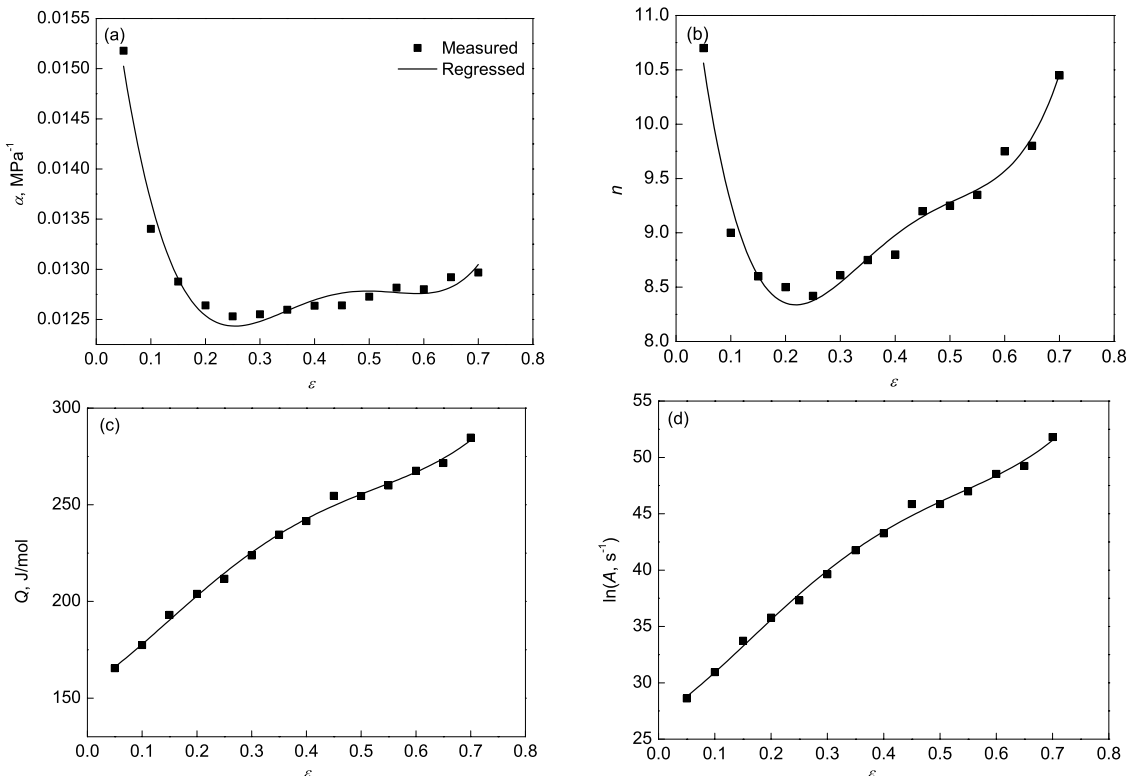


图 6 材料参数与应变的关系

Fig.6 Relationships between material parameters  $\alpha$  (a),  $n$  (b),  $Q$  (c),  $\ln A$  (d) and strain

立本构关系的精确程度, 引入平均相对误差  $\delta$ <sup>[25]</sup>

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \quad (17)$$

式中,  $E_i$  为流动应力实验值,  $P_i$  为通过本构关系方程 (15) 计算的预测值,  $N$  为实验分析的实验数据点个数 (本工作中  $N=280$ ), 通过计算实验条件范围内的偏差, 得到平均相对误差为 5.07%, 表明采用式 (15) 得到的 AZ31 镁合金流动应力具有较高的精度, 完全满足工程计算的要求.

不同应变速率下流动应力与实验值的对比如图 8 所

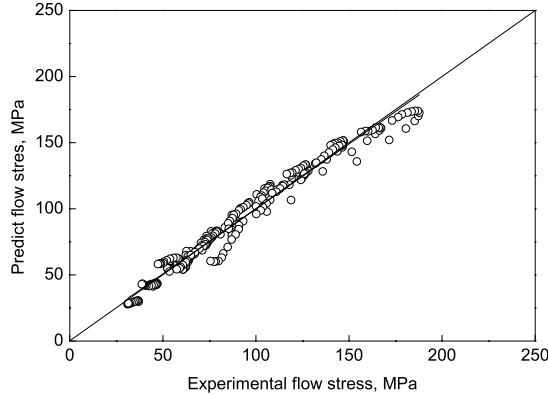


图 7 本构关系预测流动应力值与实验值的相关性

Fig.7 Correlation between the experimental and predicted flow stress data from the constitutive equation

示. 可以看出, 在图 8d 中 523 K 时计算值与预测值误差较大, 试样在变形温度为 523 K 时温度较低, 而应变速率为  $10 \text{ s}^{-1}$  过快, 处于实验的极限条件, 产生实验误差, 而导致预测值与实验值较大偏差. 除此之外, 在实验条件范围内计算的流动应力值与实验值几乎能保持一致, 这表明本工作建立的 AZ31 镁合金流动应力预测本构关系模型具有很好的预测能力.

#### 4 结论

(1) AZ31 镁合金在高温变形时的流动应力取决于变形温度和应变速率. 当应变速率一定时, 流动应力随变形温度的升高而降低; 当变形温度一定时, 流动应力随应变速率的升高而增大, 表明 AZ31 镁合金为应变速率敏感材料.

(2) 考虑实验过程塑性变形功和摩擦功引起的温度升高, 对高应变速率流动应力采用温度补偿修正流动应力, 修正后的最大流动应力变化达到 40 MPa; 采用修正的流动应力应变关系建立了基于双曲正弦模型的流动应力本构方程, 该模型考虑了应变对材料参数的影响, 可以更好地描述流动应力对应变的敏感性.

(3) 采用该本构关系模型预测流动应力具有较高的精度, 预测值与实测值相关系数为 0.976, 平均相对误差为 5.07%, 实验条件范围内预测的流动应力与实验值几乎能保持一致.

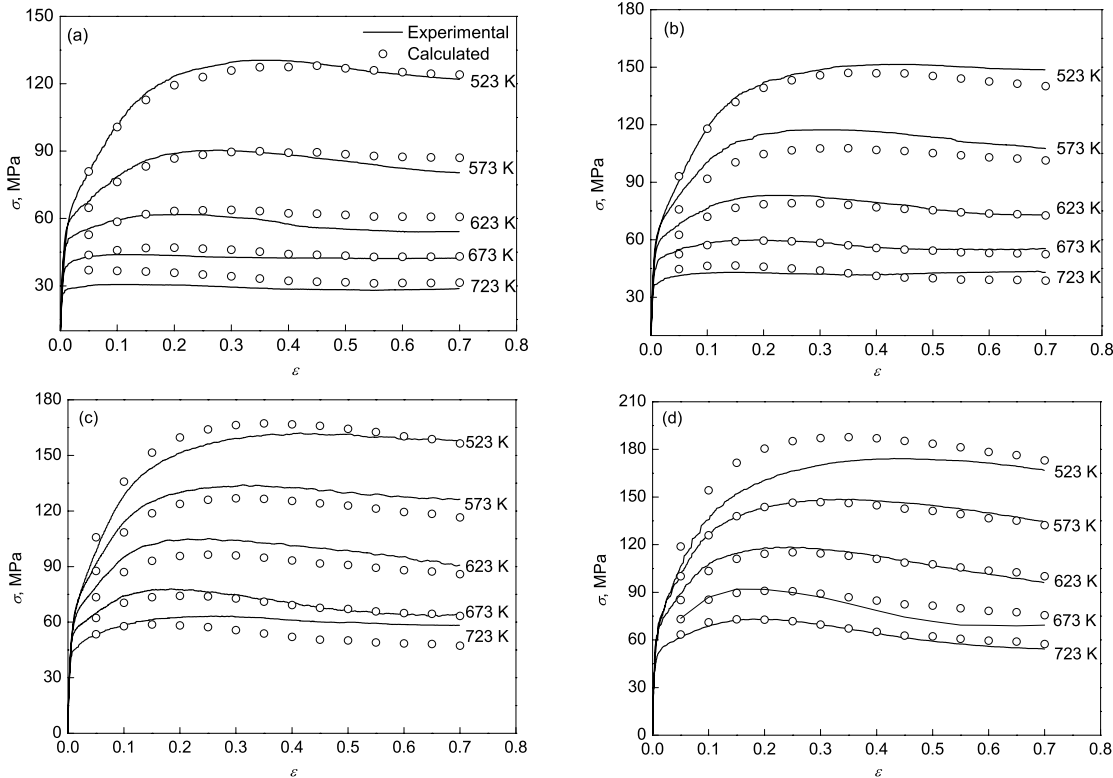


图 8 不同应变速率下预测流动应力值与实验值对比

Fig.8 Comparisons between the experimental and calculated stress from the constitutive equation at strain rates of  $0.01 \text{ s}^{-1}$  (a),  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (b),  $1 \text{ s}^{-1}$  (c) and  $10 \text{ s}^{-1}$  (d)



## 参考文献

- [1] Liu Q. *Acta Metall Sin*, 2010; 46: 1458  
(刘庆. 金属学报, 2010; 46: 1458)
- [2] Xiao P, Liu T M, Jiang D. *J Chongqing Univ (Nat Sci Ed)*, 2006; 29(11): 81  
(肖盼, 刘天模, 姜丹. 重庆大学学报(自然科学版), 2006; 29(11): 81)
- [3] Guo Q, Zhang H, Chen Z H, Yan H G, Xia W J, Fu D F. *Nat Sci J Xiangtan Univ*, 2004; 26: 108  
(郭强, 张辉, 陈振华, 严红革, 夏伟军, 傅定发. 湘潭大学自然科学学报, 2004; 26: 108)
- [4] Carl M, Korzekw A C, Cerreta E, Lopez F. *J Miner Met Mater Soc*, 2004; 56(11): 31
- [5] Takuda H. *J Mater Process Technol*, 1998; 80/81: 513
- [6] Galiyev A, Kaibyshev R, Sakai T. *Mater Sci Forum*, 2003; 419-422: 419
- [7] Barnett M R. *J Light Met*, 2001; 1: 167
- [8] Fan Y G, Wang L Y, Huang G S, Huang G J. *J Chongqing Univ (Nat Sci Ed)*, 2003; 26(2): 9  
(范永革, 汪凌云, 黄光胜, 黄光杰. 重庆大学学报(自然科学版), 2003; 26(2): 9)
- [9] Wang Z T, Zhang S H, Qi G X, Wang F, Li Y J. *Chin J Nonferrous Met*, 2008; 18: 1977  
(王忠堂, 张士宏, 齐广霞, 王芳, 李艳娟. 中国有色金属学报, 2008; 18: 1977)
- [10] Huang G S, Wang L Y, Huang G J, Lu Z W, Song M J. *Met Form Technol*, 2004; 22(2): 42  
(黄光胜, 汪凌云, 黄光杰, 卢志文, 宋美娟. 金属成形工艺, 2004; 22(2): 42)
- [11] Guo Q, Yan H G, Chen Z H, Zhang H. *Chin J Nonferrous Met*, 2005; 15: 900  
(郭强, 严红革, 陈振华, 张辉. 中国有色金属学报, 2005; 15: 900)
- [12] Zhang X H, Cui Z S, Ruan X Y. *J Shanghai Jiaotong Univ*, 2003; 37: 1874  
(张先宏, 崔振山, 阮雪榆. 上海交通大学学报, 2003; 37: 1874)
- [13] Yu K, Shi T, Wang R C, Li W X, Wang X Y, Cai Z Y. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2008; 39: 216  
(余琨, 史褪, 王日初, 黎文献, 王晓艳, 蔡志勇. 中南大学学报(自然科学版), 2008; 39: 216)
- [14] Sun C Y, Liu J R, Li R, Zhang Q D, Dong J X. *Real Met*, 2011; 30: 81
- [15] Luan N, Li L X, Li G Y, Zhong Z H. *Chin J Nonferrous Met*, 2007; 17: 1678  
(栾娜, 李落星, 李光耀, 钟志华. 中国有色金属学报, 2007; 17: 1678)
- [16] Luo Z J, Yang Q, Ji W H. *Chin J Nonferrous Met*, 2000; 10: 804  
(罗子健, 杨旗, 姬婉华. 中国有色金属学报, 2000; 10: 804)
- [17] Zhang W H, Zhang S H. *Acta Metall Sin*, 2006; 42: 1036  
(张伟红, 张士宏. 金属学报, 2006; 42: 1036)
- [18] Wang Z X, Liu X F, Xie J X. *Acta Metall Sin*, 2008; 44: 1378  
(王智祥, 刘雪峰, 谢建新. 金属学报, 2008; 44: 1378)
- [19] Sellars C M, McTegart W J. *Acta Metall*, 1966; 14: 1136
- [20] McQueen H J, Ryan N D. *Mater Sci Eng*, 2002; A322: 43
- [21] Gronostajski Z J. *J Mater Process Technol*, 1998; 78: 84
- [22] Whittenberger J D. *Mater Sci Eng*, 1986; 77: 103
- [23] Zener C, Hollomon H. *J Appl Phys*, 1944; 15: 22
- [24] Sun C Y, Liu J R, Li R, Zhang Q D. *Acta Metall Sin*, 2011; 47: 191  
(孙朝阳, 刘金榕, 李瑞, 张清东. 金属学报, 2011; 47: 191)
- [25] Ismael A M, Ahmed H, Johannes R. *Mater Sci Eng*, 2009; A504: 40

(责任编辑: 肖素红)