

铸态 AZ31B 镁合金流动应力预测模型研究

朱艳春¹, 黄庆学¹, 叶力平², 黄志权¹, 马立峰¹, 秦建平¹

(1. 太原科技大学 太原重型机械装备协同创新中心, 山西 太原 030024)

(2. 太重煤机有限公司, 山西 太原 030024)

摘要: 采用热压缩试验获得了铸态 AZ31B 镁合金高温变形时的流变曲线, 分析了变形温度和应变速率对流动应力的影响。结果表明: 峰值应变随着应变速率增加和温度减小而增大, 减小应变速率、适当提高变形温度对材料的动态回复和再结晶是有利的。利用多元回归分析建立了流动应力预测模型, 该模型可以描述流动应力的应变敏感性, 经验证发现使用其预测流动应力具有较高精度, 相关系数高达 0.9926, 能较好地描述铸态 AZ31B 镁合金在热变形过程的流动行为。

关键词: 铸态 AZ31B 镁合金; 热变形行为; 流动应力预测模型; 工艺参数

中图分类号: TG146.2²

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)10-2615-06

镁合金作为最轻的金属结构材料, 具有良好的比强度、比刚度、导电性和优良的阻尼减震及电磁屏蔽性能, 极易回收利用, 被誉为 21 世纪绿色环保材料, 在交通、电子、通讯、航空航天等领域具有广阔的应用前景^[1,2]。然而, 镁合金具有密排六方晶体结构, 室温滑移系少, 塑性变形能力低, 具有强烈的织构倾向和性能各向异性, 尤其是板材^[3]。其中, AZ31B 是一种被广泛使用的变形镁合金, 主要应用于汽车、航空和国防等领域^[4-8]。由于对铸态组织变形过程中的动态响应知之甚少, 限制了包括 AZ31B 在内的结构用镁合金的使用。因此, 研究铸态组织变形过程的流变行为尤为重要。

本研究借助铸态 AZ31B 镁合金热压缩实验获得的真应力-应变曲线, 对铸态组织的流变行为进行分析, 并建立稳态本构方程。本构方程的形式很好地表达了材料的流动应力与应变速率、变形温度等热加工参数之间的关系, 是描述材料变形的基本信息和有限元模拟中不可或缺的数学模型。I. R. Ahmad 和 D. W. Shu^[9]研究了 10^{-4} 到 3500 s^{-1} 较大范围应变速率的 AZ31B 镁合金本构模型, 认为 Johnson-Cook 模型能够较好地描述其应力应变关系。F. Feng 等^[10]利用拉伸试验, 基于 Johnson-Cook 模型建立了 AZ31B 镁合金的本构关系, 发现材料的流变行为不但依赖于应变速率和变形温度, 也依赖于应变, 尤其是铸态组织。而且足够的变形量是粗大的铸态组织破碎和动态再结晶的

保证^[11]。可见, 应变(或变形量)对材料的流变行为具有重要影响。因此, 本研究将在稳态本构方程的基础上, 建立应变相关的流动应力预测模型, 以便为铸态 AZ31B 镁合金开坯工艺的合理制定提供指导, 为进一步研究应变依赖的流变行为提供基本数据。

1 实验

原材料为直径为 92 mm 的 AZ31B 镁合金铸棒, 其化学成分为(质量分数, %): Al 3.1, Zn 1.05, Mn 0.3, Fe 0.004, Si 0.006, Cu 0.003, Ni 0.0008, Mg 余量。热模拟压缩试验在 Gleeble-1500D 型热模拟试验机上进行, 压缩试样为 $\phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱体, 圆柱体表面加工一直径为 0.5 mm, 深为 1.5 mm 的浅孔, 用于焊接电耦丝, 防止电耦在热变形过程脱落。试验温度为 350, 375, 400, 425, 450, 475, 500 °C, 应变速率为 0.1, 1, 10 s^{-1} , 试样升温速率为 10 °C/s , 到温后保温 3 min, 随后压缩 60%, 变形后空冷。实验过程中, 配有微机处理系统的试验机自动采集有关数据, 对实验数据处理后得到真应力-应变曲线。

2 实验结果与本构关系

图1为铸态AZ31B镁合金铸棒热压缩后典型真应力-应变曲线。不难发现, 峰值应力出现在应变0.04~0.2附近, 且随着应变速率的增加, 峰值应变出现的越晚, 说明高速率变形不利于铸态AZ31B镁合金的动态回复

收稿日期: 2015-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51501122); 晋城市科技计划项目(201501004-8); 博士启动基金资助项目(20132016); 2015年山西省高等学校科技创新项目(2015172, 2015170)

作者简介: 朱艳春, 女, 1982年生, 博士, 讲师, 太原科技大学, 山西 太原 030024, 电话: 0351-6998115, E-mail: lzlzyc@163.com

和再结晶。在峰值出现之前，应力-应变曲线可分为两个阶段，绝对的加工硬化区（图1中直线部分）和加工硬化占主导区（图1中直线最高点到峰值之间），且随着温度的增加，峰值应变越小，说明温度的升高对铸态AZ31B镁合金的动态回复和再结晶是有利的，尤其是从350到400 °C时，低应变速率较为明显，但是对于高应变速率10 s⁻¹及温度从450 °C增加到500 °C时，峰值应变变化不显著。随着应变增加，动态回复和再结晶加强，加工硬化逐渐减弱，峰值应变后，软化机制开始占主导地位，在低温变形时，应力急剧下降，尤其是高应变速率10 s⁻¹，而低应变速率变形时，应力变化较缓和，说明在铸态AZ31B镁合金快速变形时，必须达到足够的变形量才能实现充分的再结晶，而在低速变形时，小应变即可破碎铸态粗大组织，完成再结晶。

图 2 为不同变形条件下的稳态应力。从图 2 可以看出，随着温度的升高，在高应变速率 10 s⁻¹ 时，稳态应力减小的速度由快变慢，而低应变速率 0.1 s⁻¹ 时，稳态应力减小的速度由慢变快，应变速率 1 s⁻¹ 时，稳态应力呈线性减小，说明，应变速率越高，应力受温

度影响越小，应变速率越低，应力受温度影响越显著。

3 分析与讨论

3.1 应变为 0.8 的稳态应力本构方程

本构方程的形式很好地表达了材料的流动应力与应变速率、变形温度等热加工参数之间的关系，从图1和图2不难看出，高温流动应力 σ 强烈地依赖于变形温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 。它们之间的关系可用Arrhenius方程描述^[12]：

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

式中， $F(\sigma)$ 是应力的函数。一般将 σ 和 $\dot{\epsilon}$ 之间的数学表达式分为以下3种情况：

(1) 低应力区($\alpha\sigma < 0.8$)时：

$$\dot{\epsilon} = A_1\sigma^{n_1} \quad (2)$$

(2) 高应力区($\alpha\sigma > 1.2$)时：

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \quad (3)$$

(3) 整个应力范围(双曲正弦方程)：

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (4)$$

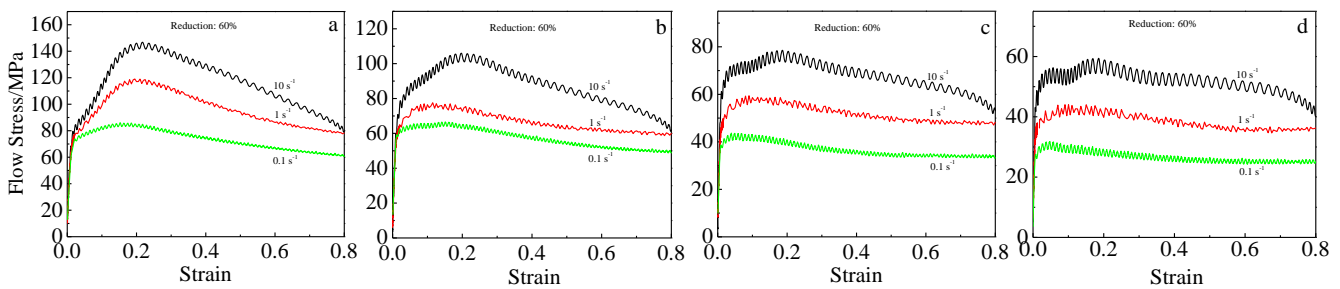


图 1 铸态 AZ31B 镁合金热变形时的流动应力-应变曲线

Fig.1 Typical flow stress-strain curves of as-cast AZ31B magnesium alloy during hot deformation: (a) 350 °C, (b) 400 °C, (c) 450 °C, and (d) 500 °C

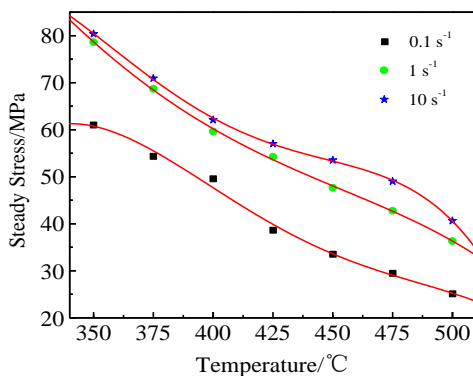


图 2 铸态 AZ31B 镁合金热变形过程中的稳态应力

Fig.2 Steady stress curves of as-cast AZ31B magnesium alloy during hot deformation

式中， A_1 、 A_2 、 A 、 n_1 、 n 、 α 、 β 均为与温度无关的常数， A 为结构因子(s^{-1})， n 为加工硬化指数， α 、 β 和 n_1 之间满足 $\alpha=\beta/n_1$ ， R 为气体常数($8.314 \text{ J/mol K}^{-1}$)， T 为变形温度(K)， Q 为变形激活能(J/mol)。

分别以 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma$ ， $\ln \dot{\epsilon}$ 和 σ 为坐标做图，则这 2 个图的斜率可分别表示 $1/n_1$ 和 $1/\beta$ ，从而可根据 $\alpha=\beta/n_1$ 求出 α 值。铸态 AZ31B 镁合金在变形温度范围内的 $\ln(\dot{\epsilon})-\ln(\sigma)$ 和 $\ln(\dot{\epsilon})-\sigma$ 曲线图如图 3a 和 3b 所示。再以 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 为坐标做线性回归（如图 3c），以 $1000/T$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 为坐标进行线性回归（如图 3d），最终求得不同变形温度下的 n 值、变形激活能 Q 和 $\ln A$ ，由此求得的材料参数列于表 1。

最终得到铸态 AZ31B 镁合金热变形的稳态应力本构方程：

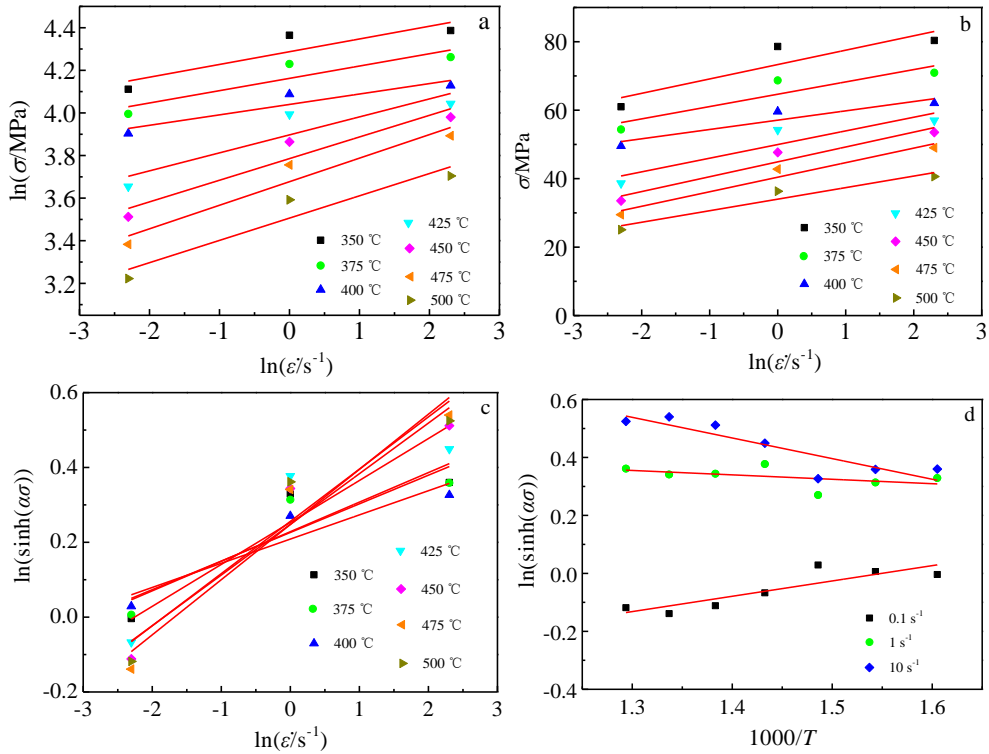


图 3 不同变量之间的线性拟合曲线

Fig.3 Linear relationships among different parameters: (a) $\ln(\dot{\epsilon})-\ln(\sigma)$, (b) $\ln(\dot{\epsilon})-\sigma$, (c) $\ln \dot{\epsilon}-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$, and (d) $1/T-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

表 1 铸态 AZ31B 镁合金稳态应力本构方程中的参数

Table 1 Parameters in steady stress constitutive equation of as-cast AZ31B magnesium alloy

Temperature/ °C	n_1	β	α	n
350	13.5408	0.1946	0.0144	10.3031
375	14.5165	0.236	0.0163	11.0468
400	17.9866	0.3277	0.0182	13.6914
425	10.001	0.2157	0.0216	7.604
450	9.0768	0.2179	0.024	6.8983
475	8.4407	0.2257	0.0267	6.4127
500	8.7252	0.2781	0.0319	6.6302

$$\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{253364.5}{RT}\right) = 1.27 \times 10^{18} [\sinh(0.0219\sigma)]^{8.94} \quad (5)$$

大量的研究表明，应变对材料流变行为影响显著，建立考虑应变的热变形流动应力预测模型具有重要的理论意义和工程应用价值。从图1也可以看出，应变对应力的影响是显著的，尤其是高速率变形时。图4为不同真应变下的组织演变，从图4可以看出，随着真应变的增加，再结晶程度增大，晶粒尺寸显著减小，可见，应变对组织演变同样具有重要影响。因此，建立考虑应变对流动应力影响的本构模型是十分必要的。

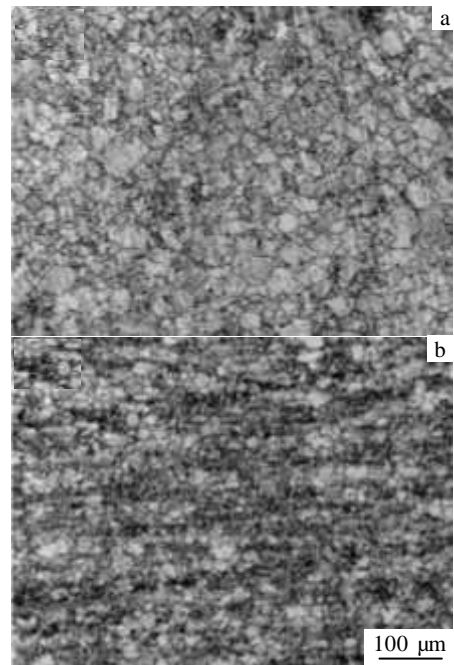


图 4 不同真应变下的显微组织

Fig.4 Microstructures of as-cast AZ31B magnesium alloy at strain of 0.3567 (a) and 0.9163 (b)

3.2 流动应力预测模型

根据实验数据提取不同应变 ($\varepsilon=0.1\sim 0.8$, 间隔为 0.1) 下的应力值, 根据双曲正弦方程, 通过 MATLAB 编程, 分别计算出不同应变下的 Q 、 $\ln A$ 、 n 和 α , 如图 5 所示。经七次多项式拟合确定 Q 、 $\ln A$ 、 n 和 α 与应变的关系, 见表 2。根据反双曲正弦函数的定义可得到本构方程形式:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arcsinh} \left[\exp \left(\frac{\ln \dot{\varepsilon} - \ln A + Q / (RT)}{n} \right) \right] \quad (6)$$

将表 2 的关系式带入公式 (6) 即可得到流动应力预

测模型, 该模型综合考虑了材料变形时, 应力对应变、温度和变形速率的敏感性, 反映了铸态 AZ31B 镁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。尤其是如图 1 所示的高速率变形, 应力对应变的敏感性较大时, 应变的影响更不可忽略。

3.3 流动应力预测模型的验证

为了验证流动应力预测模型准确性, 本研究将不同温度、应变速率和应变带入该模型, 得到预测的流动应力值, 与试验得到的流动应力值进行对比, 采用

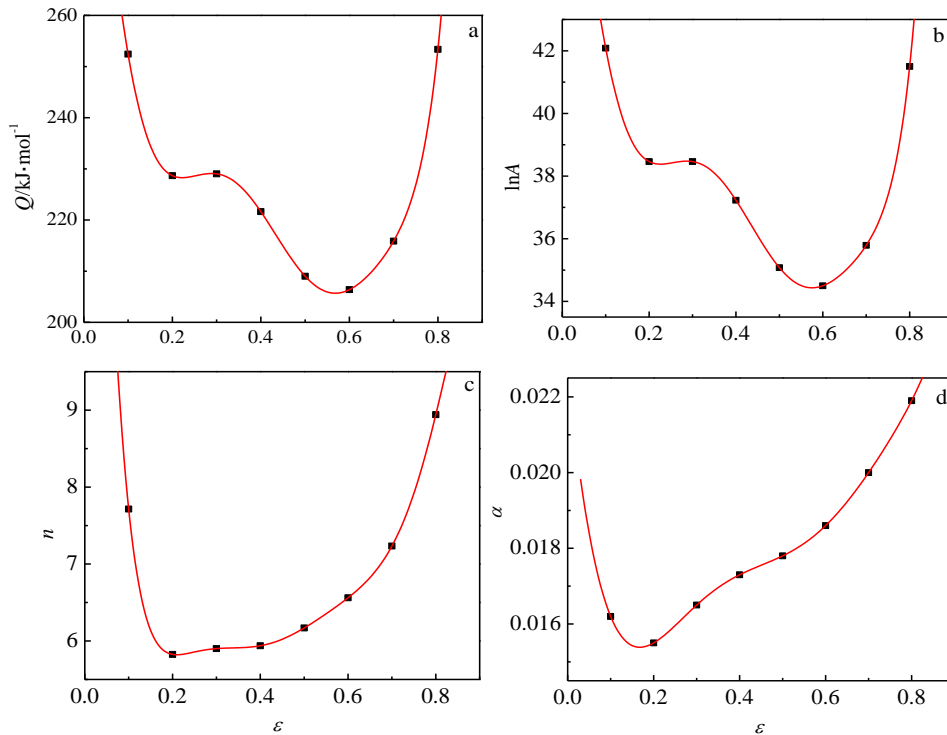


图 5 材料参数与应变之间的关系

Fig.5 Relationships of material parameters Q (a), $\ln A$ (b), n (c) and α (d) with ε

表 2 图 5 中的拟合公式及系数

Table 2 Fitting formula and parameters in Fig.5

Parameters	$Y = A + B1*\varepsilon + B2*\varepsilon^2 + B3*\varepsilon^3 + B4*\varepsilon^4 + B5*\varepsilon^5 + B6*\varepsilon^6 + B7*\varepsilon^7$				
	$Y=Q$	$Y=\ln A$	$Y=n$	$Y=\alpha$	Error
A	327.64	50.85	24.07	0.03	0
B1	-829.28	-59.45	-334.06	-0.11	0
B2	-2181.03	-967.48	2493.46	0.56	0
B3	45129.82	9932.30	-9839.69	-0.87	0
B4	-188486.84	-36886.01	22223.58	-0.74	0
B5	355339.01	66348.58	-28788.40	3.90	0
B6	-320082.36	-58316.39	19874.31	-4.31	0
B7	112309.13	20154.76	-5650.99	1.58	0

相关性进行验证, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 预测值与实验值的相关程度较好, 相关系数高达 0.9926, 表明采用流动应力预测模型预测的铸态 AZ31B 镁合金流动应力具有较高的精度, 完全满足工程计算需求。

图 7 为不同变形温度下, 根据流动应力预测模型计算的流动应力值与实验值对比。不难看出, 高应变速率 10 s^{-1} 变形时, 由于变形速度较快, 变形过程稳定性差, 存在实验误差, 导致计算值与实验值偏差较大, 其余条件下二者吻合较好, 表明本研究所建立的铸态 AZ31B 镁合金流动应力预测模型具有较好的预测能力。

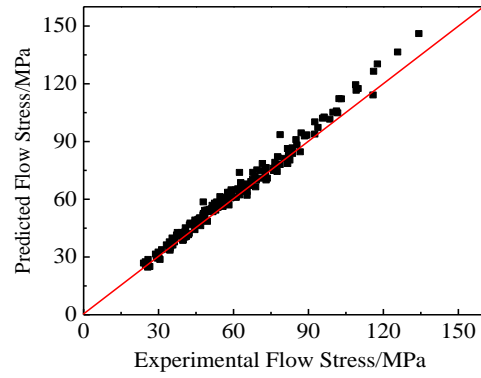


图 6 本构模型预测的应力值与实验值的相关性

Fig.6 Correlation between the predicted flow stress values from the constitutive model and experimental data

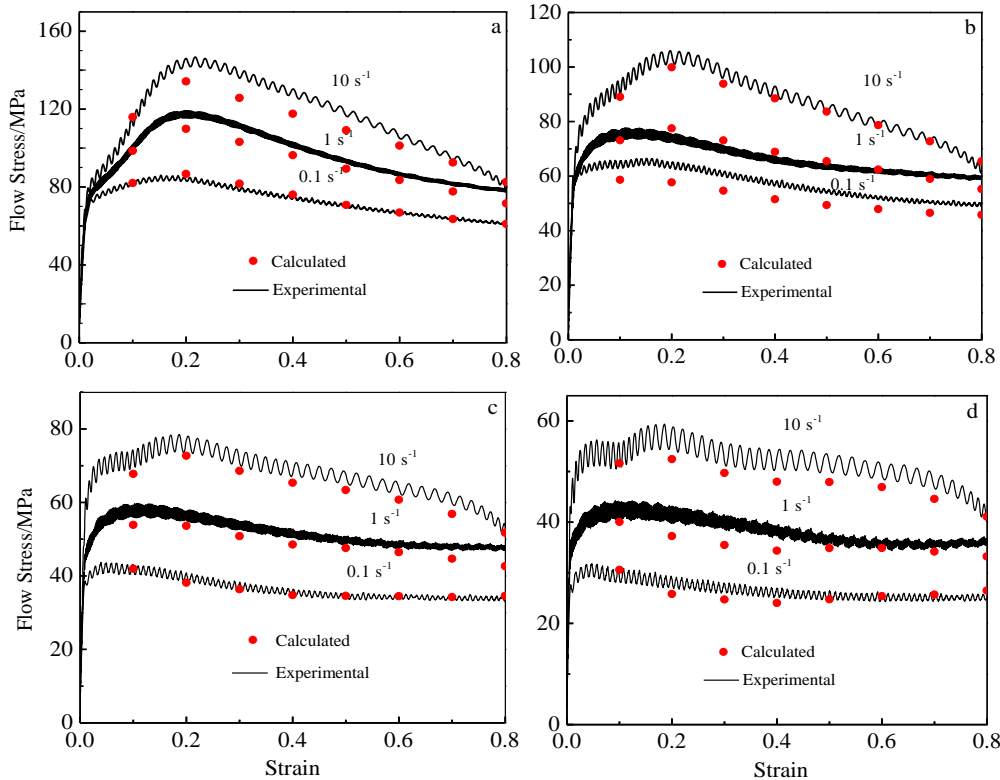


图 7 铸态 AZ31B 镁合金流动应力模型计算结果与实验数据对比

Fig.7 Comparison of calculated flow stress from the constitutive model with the experimental values of as-cast AZ31B magnesium alloy: (a) 350 °C, (b) 400 °C, (c) 450 °C, and (d) 500 °C

4 结 论

1) AZ31B 镁合金铸棒高温变形时, 其峰值应变随应变速率的增加和温度的减小而增大, 减小应变速率、适当提高变形温度对铸态 AZ31B 镁合金的动态回复和再结晶是有利的。

2) 应变对应力和组织演变的影响是显著的, 随着真应变的增加, 再结晶程度增大, 晶粒尺寸明显减小。

3) 本研究所建立的铸态 AZ31B 镁合金流动应力预测模型具有较高的预测精度, 预测值与实验值的相关系数高达 0.9926, 不同变形条件下预测的应力值与实验结果吻合较好。

参考文献 References

- [1] Zhang Qinglai(张青来), Hu Yongxue(胡永学), Wang Lili(王粒粒). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(4): 678
- [2] Sun Chaoyang(孙朝阳), Luan Jingdong(栾京东), Liu Geng(刘赓) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2012, 48(7): 853
- [3] Wu Yuanyuan(吴园园), Tan Chenwen(谭成文), Yang Yongbiao(杨勇彪) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(3): 404
- [4] Shu D W, Ahmad I R. *Adv Mater Res*[J], 2011, 168-170: 1631
- [5] Friedrich H, Schumann S. *J Mater Process Tech*[J], 2001, 117: 276
- [6] Schumann S, Friedrich H. *International Congress of Magnesium Alloys and Their Applications, The Use of Mg in Cars-today and in Future*[C]. Wolfsburg, Germany: Werkstoff-Informationsgesellschaft, 1998: 3
- [7] Friedrich H, Schumann S. *Second Israeli International Conference on Mg Science and Technology, The Second Age of Magnesium*[C]. Sdom, Israel: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2001: 6
- [8] Ahmad I R, Shu D W. *J Solid State Phenomena*[J], 2012, 82: 116
- [9] Ahmad I R, Shu D W. *Mater Sci Eng A*[J], 2014, 592: 40
- [10] Feng F, Huang S Y, Meng Z H *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2014, 594: 334
- [11] Wang K X, Zeng W D, Zhao Y Q *et al. Mater Sci Technol*[J], 2010, 27: 21
- [12] Gronostajski Z J. *J Mater Process Technol*[J], 1996, 60(5): 621

Flow Stress Prediction Model of As-cast AZ31B Magnesium Alloy

Zhu Yanchun¹, Huang Qingxue¹, Ye Liping², Huang Zhiquan¹, Ma Lifeng¹, Qin Jianping¹

(1. Collaborative Innovation Center of Taiyuan Heavy Machinery Equipment,
Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. TZ Coal Machinery Co., LTD, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The true stress-strain curves of cast AZ31B rod were obtained during deformation by hot compression tests, and the effects of deformation temperatures and strain rates on flow stress were analyzed. Results show that the peak strain increases with the increasing strain rate and the decreasing deformation temperature, and it is advantageous for dynamic recovery and recrystallization to reduce strain rate and properly raise deformation temperature. Moreover, the flow stress prediction model, which was established by multiple regression analysis, can illustrate the strain-sensitivity of flow stress. Furthermore, the correlation coefficient of the predicted and the experimental values is up to 0.9926, indicating that this model is accurate in terms of predicting the flow stress of as-cast AZ31B magnesium alloy and can describe its flow behavior during hot deformation well.

Key words: as-cast AZ31B magnesium alloy; hot deformation behavior; flow stress prediction model; processing parameters

Corresponding author: Huang Qingxue, Ph. D., Professor, Collaborative Innovation Center of Taiyuan Heavy Machinery Equipment, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-6010290, E-mail: hqx6688@126.com