

理论与实验研究

挤压态镁合金热压缩微观组织预测模型

丁小凤, 蒯玉龙, 胡建华, 双远华

(太原科技大学 重型机械教育部工程研究中心, 山西 太原 030024)

摘要: 在变形温度为 250~450 °C、应变速率为 0.005~5 s⁻¹ 的条件下, 采用热模拟压缩实验得到流动应力-应变曲线, 研究了挤压态镁合金热变形和动态再结晶行为。结果表明: AZ31 镁合金发生动态再结晶的临界应变随着变形温度的升高或应变速率的减小而降低; 镁合金变形初期发生动态再结晶所需要的激活能为 191.2 kJ·mol⁻¹。基于实验数据回归分析, 建立 AZ31 镁合金动态再结晶临界应变模型, 得到动态再结晶临界应变与流动应力曲线峰值应变的比值约为 0.57; 应用 Avrami 方程建立镁合金动态再结晶动力学模型, 预测出镁合金动态再结晶临界应变值, 与微观组织实验结果一致, 验证了模型的正确性, 可以用于 AZ31 镁合金热加工中的动态再结晶预测。

关键词: AZ31 镁合金; 热压缩; 动态再结晶; 临界应变; 微观组织; 预测模型

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.032

中图分类号: TG335.71

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 02-0199-08

Prediction model on microstructure for as-extruded magnesium alloy in thermal compression

Ding Xiaofeng, Kuai Yulong, Hu Jianhua, Shuang Yuanhua

(Engineering Research Center of Education Ministry of Heavy Machinery, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Under the conditions of the deformation temperatures of 250–450 °C and the strain rates of 0.005–5 s⁻¹, the flow stress-strain curves were obtained by thermal simulation compression experiment, and the thermal deformation and dynamic recrystallization behavior of as-extruded magnesium alloy were investigated. The results show that the critical strain of dynamic recrystallization for AZ31 magnesium alloy decreases with the increasing of deformation temperature or the decreasing of strain rate, and the activation energy required for dynamic recrystallization in the initial deformation of magnesium alloy is 191.2 kJ·mol⁻¹. Based on the regression analysis of experimental data, the dynamic recrystallization critical strain model of AZ31 magnesium alloy was established, and the ratio of dynamic recrystallization critical strain to peak strain in the rheological flow stress curve was about 0.57. Furthermore, the dynamic recrystallization kinetics model of magnesium alloy was established by Avrami equation to predict the critical strain value of dynamic recrystallization for magnesium alloy, which was consistent with the results of microstructure experiments. Thus, the correctness of the model was verified, and the model could predict dynamic recrystallization in the hot working of AZ31 magnesium alloy.

Key words: magnesium alloy; thermal compression; dynamic recrystallization; critical strain; microstructure; prediction model

镁合金具有密度低、比强度高和比刚度高的优点, 作为潜在的轻质结构材料, 被广泛应用于航空、航天、汽车等领域^[1]。但自身的密排六方结构致使其塑性变形能力差, 成为制约其发展的关键因素^[2-3]。低层错能的镁合金在热变形过程中易发生

的动态再结晶 (Dynamic Recrystallization, DRX) 行为被认为是重要的微观组织演变机制之一, 通过影响微观组织来决定成形件最终的力学性能^[4]。金属在热变形过程中, 随着应变的累积, 微观组织内部发生的位错塞积、缠结与增殖累积到一定程度, 诱发 DRX 发生^[5], 因此, 可采用相应的临界应变判断材料是否发生 DRX 并衡量其发生的难易程度。有必要研究镁合金热变形的微观组织 DRX 发生的临界条件, 并构建精确的动力学模型, 从而预测镁合金热变形过程中微观组织 DRX 行为的发生。

传统方法即采用流动应力-应变曲线分析法,

收稿日期: 2021-01-13; 修订日期: 2021-04-12

基金项目: 山西省优秀来晋博士人员科研资助 (20202002); 山西省高校科技创新项目 (2019L0626); 太原科技大学科研启动金 (20182043); 山西省科技重大专项 (20191102009)

作者简介: 丁小凤 (1987-), 女, 博士, 副教授

E-mail: dingxiaofeng@tyust.edu.cn

认为峰值应变即为 DRX 临界应变^[6], 但实际过程中未达到峰值应变就已发生 DRX 行为, 故需结合金相实验法确定临界值, 其周期长、成本高。Poliaik E I 和 Jonas J J^[7] (P-J 法) 基于热力学不可逆原理构建的 DRX 临界模型, 已被应用在镁合金^[8]、钛合金^[9]和钢^[10]等材料中。Sellars C M^[11] 基于 Avrami 方程提出了 DRX 动力学模型, 并巧妙地引入材料参数值为 0.693, 使得每个参数均有了具体的物理意义。Kim S I 等^[12] 通过热模拟实验修正 Avrami 方程, 构建了 DRX 动力学模型。Stewart G R 等^[13] 发现最大动态软化应变值为 DRX 体积分数为 50% 时对应的应变值, 并利用微观组织加以证实。

本文基于挤压态镁合金的热压缩实验所获得的流动应力-应变曲线, 研究镁合金热变形过程中的动态再结晶行为, 计算 DRX 发生的临界应变, 构建 DRX 动力学模型, 并通过定量金相实验结果验证模型的正确性, 可对镁合金热变形过程中的显微组织进行预测与控制。

1 实验材料与方法

本文采用山西银光镁业集团有限公司的挤压态 AZ31 镁合金棒材为研究对象, 化学成分如表 1 所示。

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of AZ31B magnesium alloy (% , mass fraction)

Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Mg
3.21	0.99	0.34	0.0021	0.017	0.0021	0.00061	余量

为了使变形前组织更加均匀, 在 400 °C 下对挤压棒保温 12 h, 制备 $\Phi 8$ mm×12 mm 圆柱试样。在 Gleeble1500 热模拟机上, 变形温度为 250~500 °C、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 为 0.005~5 s⁻¹ 的条件下进行等温压缩实验。实验最大压缩量控制在 60%。压缩前在试样的上、下两个面涂抹机油并粘上石墨片, 以便减小试样与压头之间的摩擦力, 防止其对实验造成影响, 具体热压缩工艺见图 1, 采用 5 °C·s⁻¹ 的速率升温, 保温 90 s 后连续压缩变形, 变形后水淬, 保留高温时试样的组织。最后, 沿中心轴向取变形后的试样, 经研磨、抛光和腐蚀后, 在蔡司扫描电镜下观察镁合金的微观组织。

2 实验结果及讨论

2.1 镁合金流动应力-应变曲线

图 2 为挤压态 AZ31 镁合金在不同变形条件下

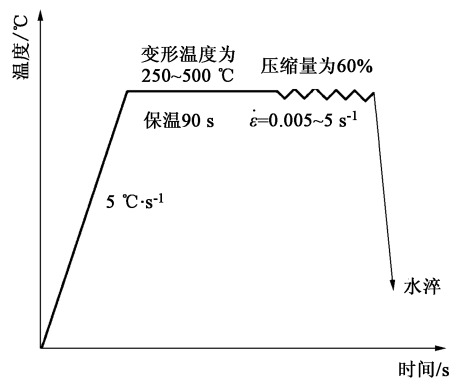


图 1 压缩过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of compression process

的流动应力-应变曲线, 由图 2 可知: 热变形初期, 应变未达到 DRX 的临界应变, 镁合金发生加工硬化, 随着应变不断增加, 流动应力快速增大; 当应变达到 DRX 的临界应变时, 开始发生 DRX, 加工硬化不断与 DRX 引起的软化相抵消, 使得流动应力增加速率降低; 当流动应力达到峰值后, DRX 开始占主导地位, 随后流动应力逐渐降低, 降低至某一值后, 开始达到流动稳定状态。此外, 流动应力随变形温度升高和应变速率的降低而降低。

应变速率一定时, 变形温度越高, 峰值应力 ϵ_p 越小; 变形温度一定时, 应变速率越低, 峰值应力 ϵ_p 也越小。基于 DRX 理论, DRX 临界应变 ϵ_c 与峰值应变 ϵ_p 存在线性关系^[14], AZ31 镁合金发生动态再结晶所需要的应变量随变形温度的升高或应变速率的降低而减小。

2.2 镁合金变形激活能

采用 3 种本构模型描述 σ 、 T 、 $\dot{\epsilon}$ 之间的关系^[15]:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT), \alpha\sigma < 0.8 \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT), \alpha\sigma > 1.8 \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \text{任意应力} \quad (3)$$

式中: σ 为流动应力; Q 为变形激活能, (J·mol⁻¹), 与材料本身有关; R 为摩尔气体常数, 为 8.314 J·(mol·K)⁻¹; T 为绝对温度, K; A_1 、 A_2 、 A 、 n_1 、 n 、 α 、 β 均为与温度无关的常数, 其中, $\alpha = \beta/n_1$ 。

应变速率一定时, 变形激活能 Q 随温度的变化而变化, 对式 (3) 两边取对数得到:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{(\ln\dot{\epsilon} - \ln A)}{n} + \frac{Q}{nRT} \quad (4)$$

$$Q = Rn \frac{d\{\ln[\sinh(\alpha\sigma)]\}}{d(1/T)} \quad (5)$$

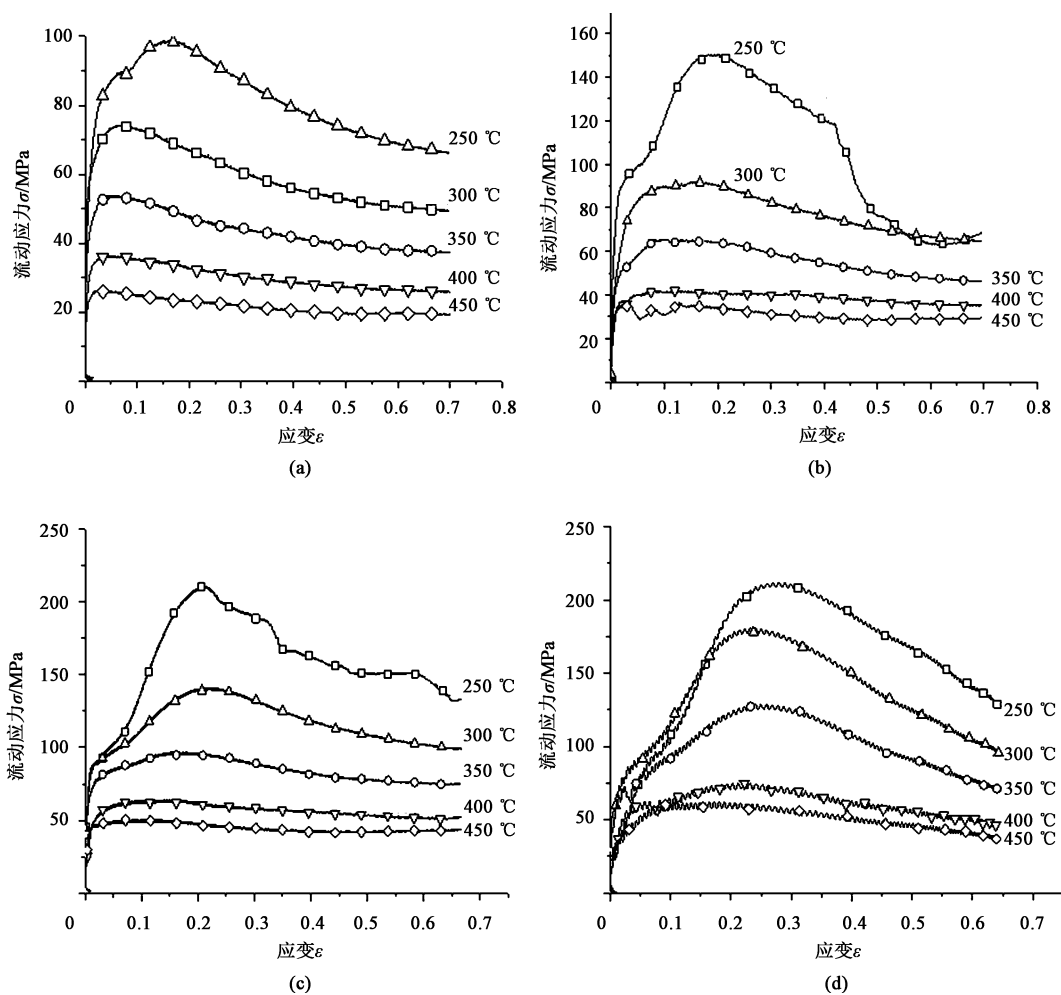


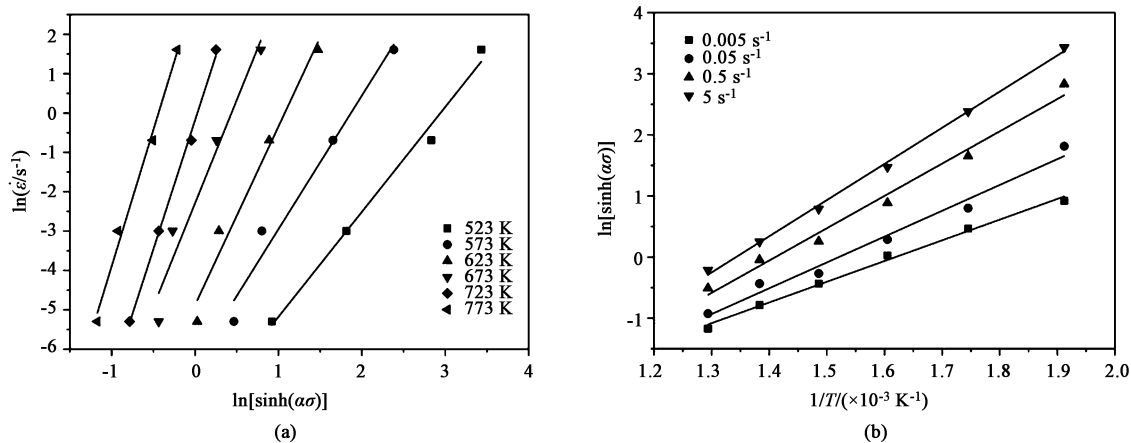
图2 挤压态 AZ31 镁合金在不同变形条件下的流动应力-应变曲线

(a) $\dot{\varepsilon} = 0.005 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\varepsilon} = 0.05 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\varepsilon} = 0.5 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ s}^{-1}$

Fig. 2 Curves of flow strain-stress for as-extruded AZ31 magnesium in different deformation conditions

同理可知: n 为 $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] - \ln\dot{\varepsilon}$ 斜率值的倒数, 而 Q/Rn 为 $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] - 1/T$ 的斜率值。其中, σ_p 为峰值应力。

挤压态 AZ31 镁合金在不同变形温度下的 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln\dot{\varepsilon}$ 和不同应变速率下的 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 的关系曲线如图 3 所示, 得到

图3 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln\dot{\varepsilon}$ (a) 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ (b) 的关系曲线Fig. 3 Relationship curves of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln\dot{\varepsilon}$ (a) and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ (b)

$n = 4.889$, $Q/Rn = 4704.528$, 则变形激活能 $Q = 191.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

2.3 动态再结晶临界应变模型

临界应变主要取决于材料的化学组成、初始晶粒大小和变形条件^[16]。采用流动应力-应变曲线来确定临界值。Shaban M 与 Eghbali B^[17] 提出加工硬化率 θ , $\theta = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$, 利用热力学不可逆原理, 认为加工硬化率 θ 与流动应力 σ 的关系曲线的拐点即为发生 DRX 的临界条件:

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \left(-\frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right) = 0 \quad (6)$$

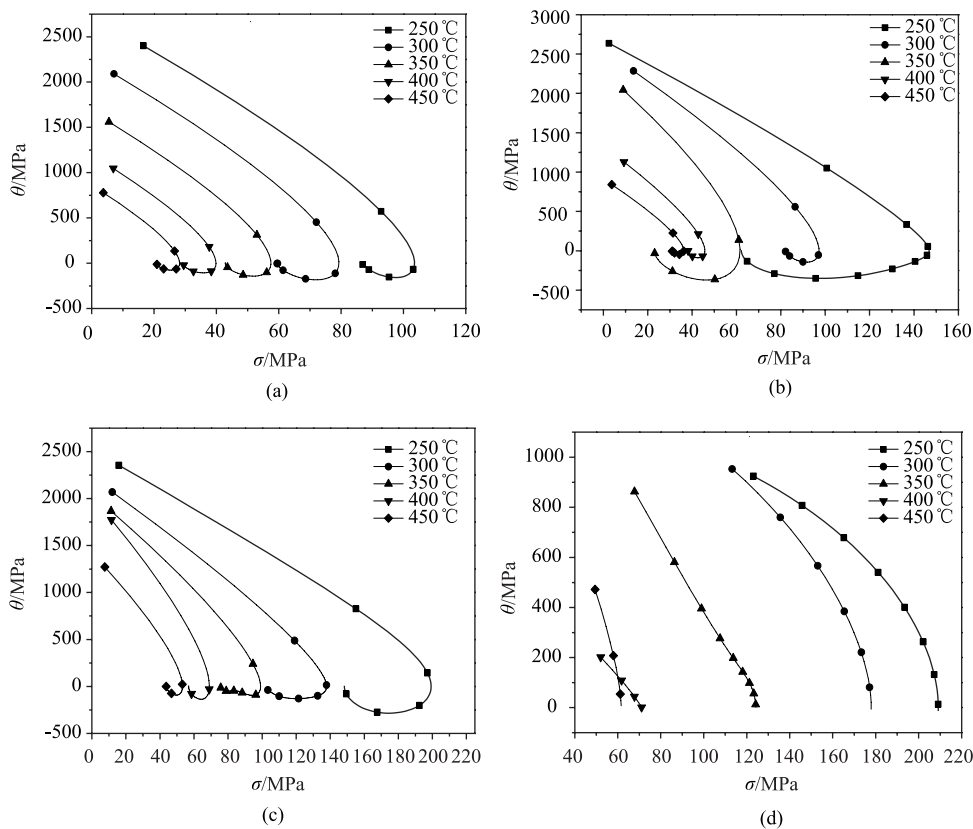


图 4 不同变形条件下的 θ - σ 关系曲线

(a) $\dot{\varepsilon} = 0.005 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\varepsilon} = 0.05 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\varepsilon} = 0.5 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ s}^{-1}$

Fig. 4 Relationship curves of θ - σ in different deformation conditions

利用偏导关系可得到关系式:

$$-\frac{\partial(\ln \theta)}{\partial \varepsilon} = -\frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \quad (7)$$

式 (7) 表明, $\ln \theta$ - ε 曲线会出现与 θ - σ 关系曲线相应的拐点特征。所以, 基于 AZ31 镁合金流动应力-应变曲线绘制 $\ln \theta$ - ε 曲线图, 并对其取微分得到 $[-(\ln \theta)/\varepsilon]$ - ε 曲线图, 曲线的最低点所对应的应变即为 DRX 发生的临界应变。AZ31 镁合金在不同变形条件下的 $\ln \theta$ - ε 曲线如图 5 所示, 可知

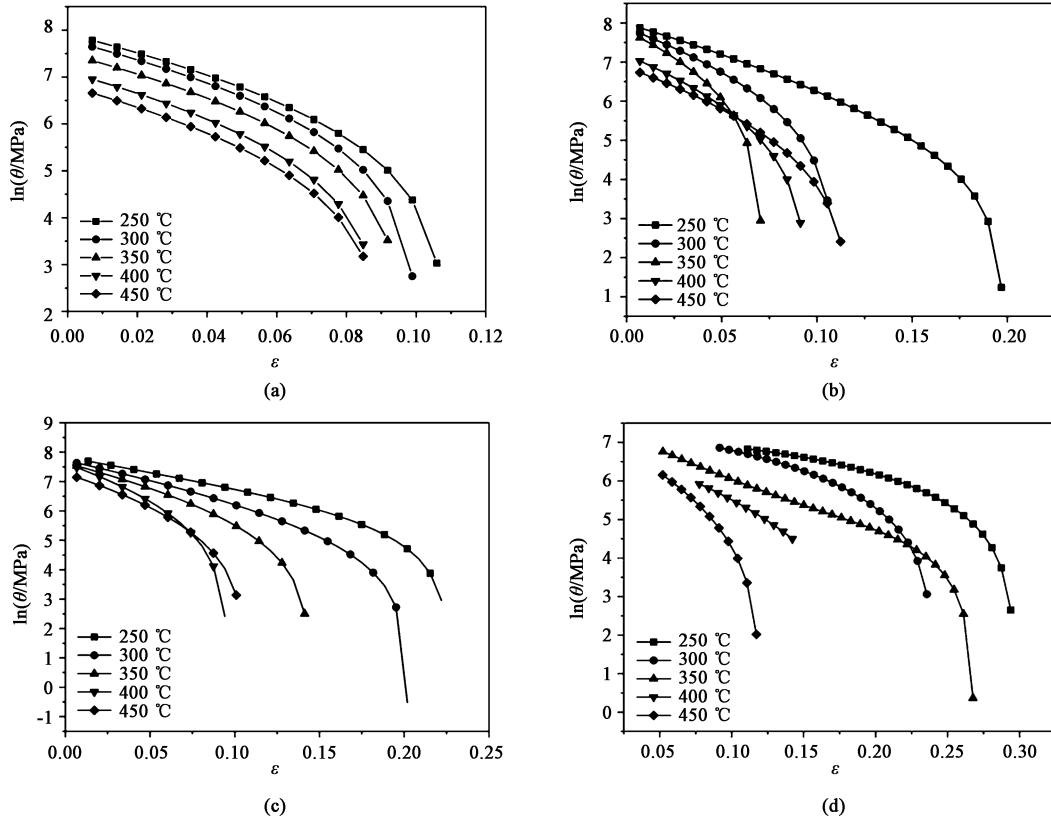
基于实验数据, 绘制不同变形条件下的 θ - σ 关系曲线 (图 4)。分析可知, θ 随 σ 的增大而降低, 这是由于 DRX 和动态回复导致的软化。当 θ 降低至 0 时, 相应的流动应力为峰值应力^[16]。在恒定的应变速率下, 峰值应力随变形温度的升高而减小。当 θ 降至 0 时, 曲线出现拐点然后又回升, 但应变速率为 5 s^{-1} 时的曲线变化趋势与其他不同, 未出现明显的拐点。依据 θ - σ 关系曲线直接精确计算出拐点值比较困难, 继续分析 θ - σ 关系曲线发现, 3 次拟合 θ - σ 关系曲线后, 拐点正好对应 $(d\theta/d\sigma)$ - σ 曲线的最低点, 所以, 本文采用 $(d\theta/d\sigma)$ - σ 曲线的最低点来求取 DRX 的临界应变 ε_c 。

$\ln \theta$ - ε 曲线均呈现出先缓慢降低, 然后快速降低的趋势, 在缓慢降低阶段的某处出现拐点。

由图 5 发现, $\ln \theta$ 与 ε 呈三次样条曲线的关系, 表达式如下:

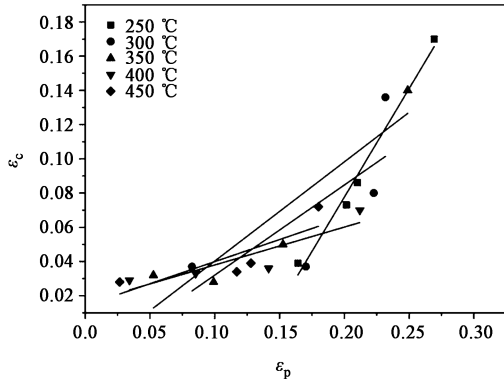
$$-\frac{\partial \ln \theta}{\partial \varepsilon} = a + b\varepsilon + c\varepsilon^2 \quad (8)$$

通过三次多项式拟合得到系数 a 、 b 、 c , 从而分别得到不同变形条件下的表达式, 继续对 ε 求二阶导数, 令 $-\frac{\partial^2(\ln \theta)}{\partial \varepsilon^2} = 0$, 求出相应的临界应

图5 不同变形条件下的 $\ln\theta$ - ε 曲线(a) $\dot{\varepsilon} = 0.005 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\varepsilon} = 0.05 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\varepsilon} = 0.5 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ s}^{-1}$ Fig. 5 Curves of $\ln\theta$ - ε in different deformation conditions

变。大量文献表明, 临界应变与峰值应变呈线性关系^[16], 线性拟合数据如图6所示, 得到关系式:

$$\varepsilon_c = 0.57\varepsilon_p \quad (9)$$

图6 挤压态 AZ31 镁合金的 ε_c - ε_p 的曲线Fig. 6 Curves of ε_c - ε_p for as-extruded AZ31 magnesium alloy

2.4 动态再结晶动力学模型

本文基于传统模型, 利用以下方程式(10)构建更加精确的镁合金 DRX 动力学模型:

$$X_{\text{DRX}} = 1 - \exp\left[-k\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_m - \varepsilon_c}\right)^{n'}\right] \quad (10)$$

式中: X_{DRX} 为动态再结晶体积分, %; k 和 n' 为材料参数; ε_m 为最大动态软化应变。

对式(10)两边取对数得到:

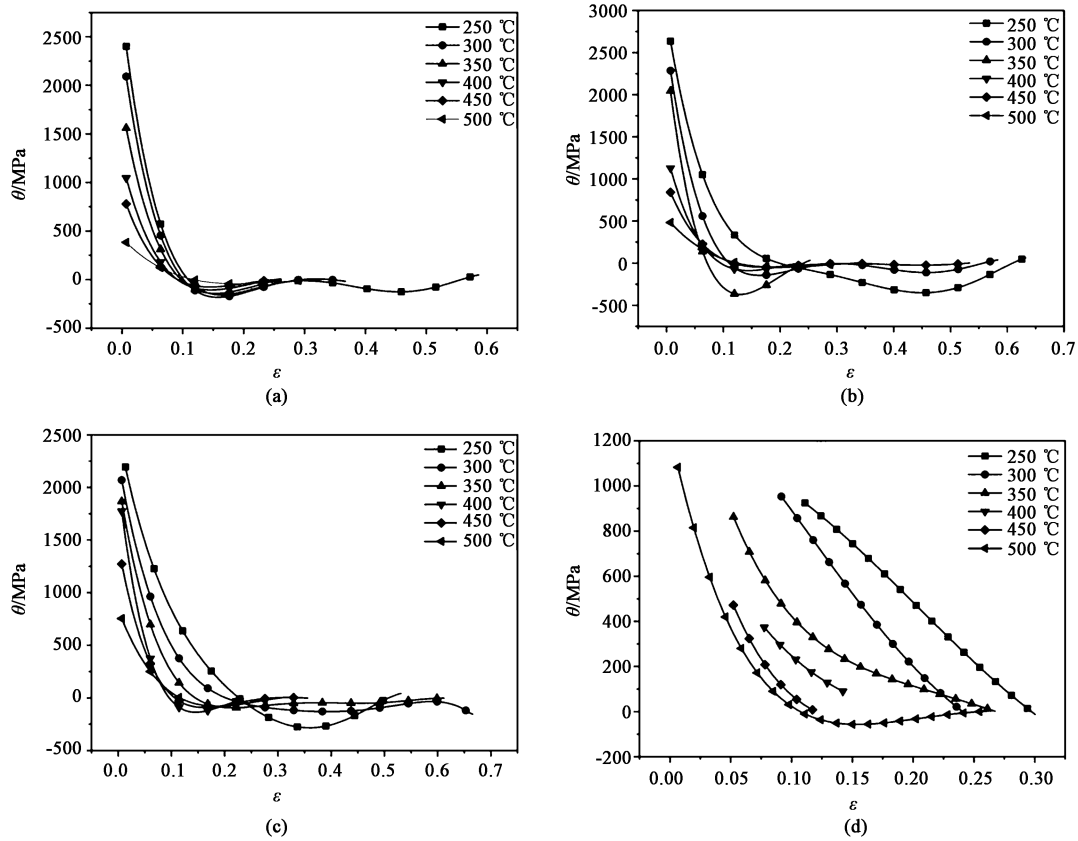
$$\ln[-\ln(1 - X_{\text{DRX}})] = \ln k + n' \ln\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_m - \varepsilon_c}\right) \quad (11)$$

确定材料参数 k 、 n' 及 ε_m 即可求得 DRX 的动力学模型, 加工硬化率 θ 与应变 ε 的关系曲线上最小值点对应的数值即为 ε_m 的值, 且此点相应的动态软化速率最大^[17]。图7为不同变形条件下的 θ - ε 关系曲线, 同上, θ - ε 呈三次多项式关系, 对拟合得到的表达式 ε 求二阶导, 同样令其等于0, 从而得到 ε_m 。

确定材料系数需求解各变形条件下的 X_{DRX} , 为此, Jonas J J 等^[18] 引入虚拟动态回复应力 σ_{recov} 与瞬时流动应力 σ_c (发生 DRX 的流动应力) 表示动态软化作用, 即:

$$X_{\text{DRX}} = \frac{\sigma_{\text{recov}} - \sigma_c}{\sigma_{\text{sat}} - \sigma_{\text{ss}}} \quad (12)$$

式中: σ_{sat} 为饱和流变应力, 为 σ_{recov} 曲线的逼近

图 7 不同变形条件下的 θ - ε 曲线(a) $\dot{\varepsilon} = 0.005 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\varepsilon} = 0.05 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\varepsilon} = 0.5 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ s}^{-1}$ Fig. 7 Curves of θ - ε in different deformation conditions

值; σ_{ss} 为 DRX 稳态应力。

对于低层错能镁合金而言, DRX 在热成形过程中发挥关键作用, 根据文献 [16], 式 (12) 中可采用峰值应力 σ_p 近似计算, 即:

$$X_{\text{DRX}} = \frac{\sigma_p - \sigma_c}{\sigma_p - \sigma_{ss}} \quad (13)$$

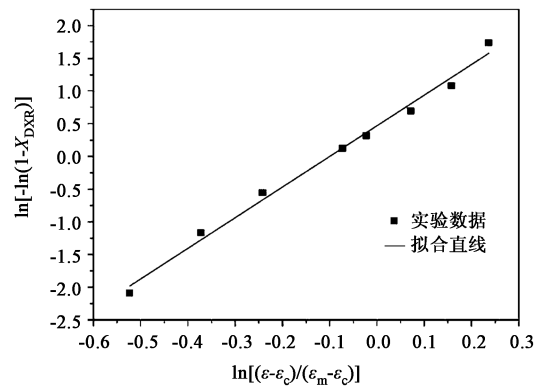
通过拟合 θ - σ 关系曲线得到相应的 σ_{ss} 。

由参考文献 [16] 可知, 挤压态 AZ31 镁合金最优工艺参数范围为: 变形温度为 350~450 °C, 应变速率为 0.005~0.05 s^{-1} , 故选取变形温度为 400 °C、应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 为 0.05 s^{-1} 变形条件下的实验数据构建 AZ31 镁合金热变形过程中 DRX 动力学模型, 选取适当的流动应力计算相应的 DRX 体积分数, 通过线性拟合 (图 8) 求得式 (10) 中的参数 k 和 n' , 得到特定条件下的 DRX 动力学模型:

$$X_{\text{DRX}} = 1 - \exp\left[-1.5979\left(\frac{\varepsilon - 0.033}{0.146}\right)^{4.68808}\right] \quad (14)$$

2.5 微观组织验证

为了验证模型的准确性, 本文选取一组变形条件 (0.05 s^{-1} , 400 °C) 进行不同应变下的热压缩实

图 8 曲线 $\ln[-\ln(1-X_{\text{DRX}})] - \ln[(\varepsilon - \varepsilon_c)/(\varepsilon_m - \varepsilon_c)]$ 的线性拟合过程Fig. 8 Linear fitting process of $\ln[-\ln(1-X_{\text{DRX}})] - \ln[(\varepsilon - \varepsilon_c)/(\varepsilon_m - \varepsilon_c)]$ curve

验, 通过相应的微观组织分析 DRX 的可靠性。图 9 为不同应变下的 AZ31 镁合金微观组织。根据本文得到的临界应变模型可计算出对应的临界应变值为 0.18。图 9a 中大晶粒晶界弓出, 在晶界周围开始产生少量的 DRX 晶粒, 可近似认为此时的应变即为 DRX 的临界应变, 表明本文构建的临界应变模

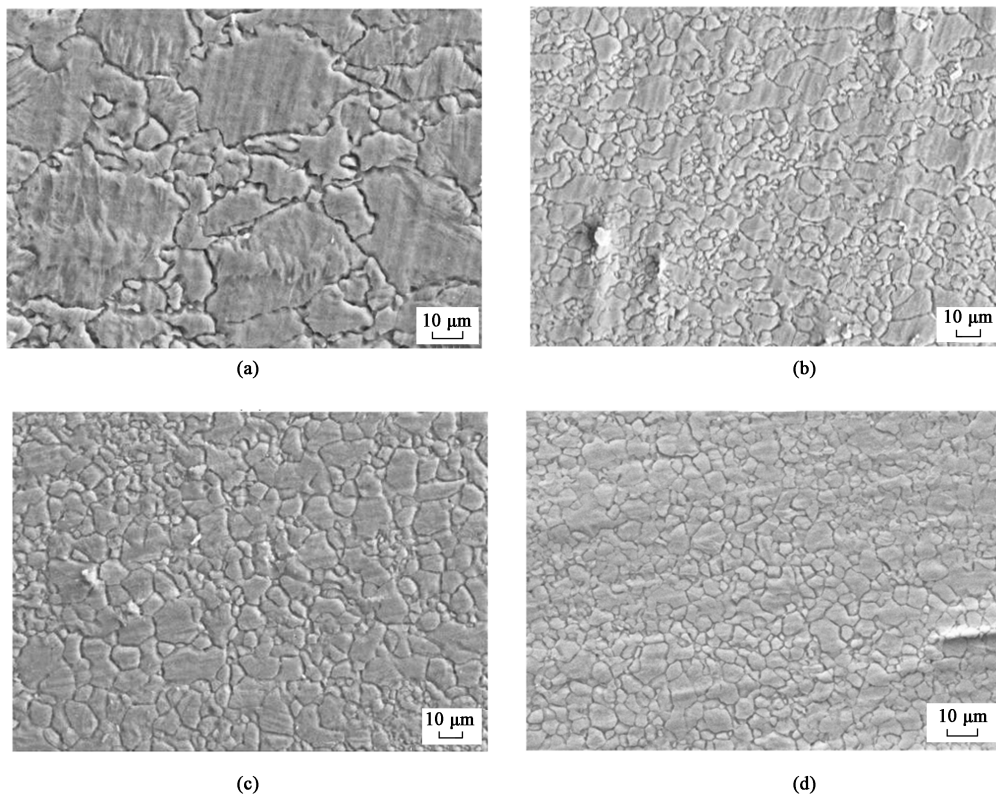


图9 挤压态 AZ31 镁合金不同变形量下的微观组织

(a) $\varepsilon=0.2$ (b) $\varepsilon=0.4$ (c) $\varepsilon=0.6$ (d) $\varepsilon=0.8$

Fig. 9 Microstructures of as-extruded AZ31 magnesium alloy at different deformation amounts

型正确, 可被应用于实际生产中预测和调控微观组织。

从图9可知: 随着应变的增大, 晶内位错塞积, 晶格畸变加剧, 诱发新晶粒形核细化晶粒, 且晶粒尺寸不断减小, 原始晶粒逐渐取代由DRX产生的无畸变等轴晶粒, 最终组织趋于等轴状完全动态再结晶。测得4种应变(0.2、0.4、0.6和0.8)的DRX体积分数分别为0.336、0.476、0.603和0.723, 通过所建立的模型计算相同变形条件下的预测值为0.346、0.489、0.621和0.743, 理论计算数值与实验数值的平均相对误差为2.87%, 验证了本文所建立的DRX模型的准确性。

3 结论

(1) AZ31 镁合金发生DRX的临界应变随变形温度的升高或应变速率的降低而减小。提高变形温度或降低应变速率能够促进镁合金变形初期DRX的发生。

(2) 根据Gleeble热模拟实验, 通过分析AZ31

镁合金的流动应力-应变曲线, 确定了镁合金变形过程中的DRX激活能 Q 为 $191.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 建立了临界应变 ε_c 和峰值应变 ε_p 的关系: $\varepsilon_c = 0.57\varepsilon_p$ 。

(3) 应用Avrami方程建立了AZ31镁合金的DRX动力学模型, 比较了相同变形条件下微观组织的DRX体积分数, 平均相对误差为2.87%, 验证了所构建的DRX模型的正确性。

参考文献:

- [1] Ding X F, Zhao F Q, Shuang Y H, et al. Characterization of hot deformation behavior of as-extruded AZ31 alloy through kinetic analysis and processing maps [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 276 (6): 116325.
- [2] 丁小凤, 双远华, 林伟路, 等. 挤压态镁合金流变行为及本构模型研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (6): 165-171.
Ding X F, Shuang Y H, Lin W L, et al. Study on the flow behavior and constitutive model of extruded magnesium alloy [J]. Journal of Plastic Engineering, 2017, 24 (6): 165-171.
- [3] 丁小凤, 双远华, 王清华, 等. AZ31 镁合金无缝管斜轧穿孔新工艺研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47 (1): 357-362.
Ding X F, Shuang Y H, Wang Q H, et al. New rotary piercing

- process for an AZ31 magnesium alloy seamless tube [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47 (1): 357–362.
- [4] Sun Y, Hu L X, Ren J S. Modeling the constitutive relationship of powder metallurgy Ti-47Al-2Nb-2Cr alloy during hot deformation [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24 (3): 1313–1321.
- [5] 万志鹏, 孙宇, 胡连喜, 等. TiAl 基金动态再结晶临界模型建立 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47 (3): 835–839.
- Wan Z P, Sun Y, Hu L X, et al. Modeling of the critical conditions on dynamic recrystallization for TiAl-based alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47 (3): 835–839.
- [6] Ying H, Liu G W, Zou D N, et al. Deformation behavior and microstructural evolution of as-cast 904L austenitic stainless steel during hot compression [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 565: 342–350.
- [7] Poliak E I, Jonas J J. A one-parameter approach to determining the critical conditions for the initiation of dynamic recrystallization [J]. *Acta Materialia*, 1996, 44 (1): 127–136.
- [8] Xu Y, Hu L X, Sun Y. Deformation behaviour and dynamic recrystallization of AZ61 magnesium alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 580: 262–269.
- [9] Xia Y F, Liu Y Y, Mao Y P, et al. Determination of critical parameters for dynamic recrystallization in Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22 (s3): 668–672.
- [10] Wang S L, Zhang M X, Wu H C, et al. Study on the dynamic recrystallization model and mechanism of nuclear grade 316LN austenitic stainless steel [J]. *Materials Characterization*, 2016, 118: 92–101.
- [11] Sellars C M. Modelling microstructural development during hot rolling [J]. *Materials Science and Technology*, 1990, 6 (11): 1072–1081.
- [12] Kim S I, Yoo Y C. Dynamic recrystallization behavior of AISI 304 stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 311 (1–2): 108–113.
- [13] Stewart G R, Elwazri A M, Yue S, et al. Modelling of dynamic recrystallisation kinetics in austenitic stainless and hypereutectoid steels [J]. *Materials Science and Technology*, 2006, 22 (5): 519–524.
- [14] 黄飏, 王振军, 陈智, 等. 铸态镁合金 AZ91D 热压缩微观组织演变本构模型 [J]. *塑性工程学报*, 2017, 24 (5): 103–112.
- Huang B, Wang Z J, Chen Z, et al. Constitutive model for microstructure evolution of as-cast magnesium alloy AZ91D during hot compression [J]. *Journal of Plastic Engineering*, 2017, 24 (5): 103–112.
- [15] Shi H, McLaren A J, Sellars C M. Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminum alloys [J]. *Materials Science and Technology*, 1997, 13 (3): 210–216.
- [16] 丁小凤. 镁合金无缝管斜轧穿孔成形机理与实验研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2018.
- Ding X F. Forming Mechanism and Experimental Research of Rotary Piercing for Magnesium Alloy Seamless Tube [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2018.
- [17] Shaban M, Eghbali B. Determination of critical conditions for dynamic recrystallization of a microalloyed steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527 (16): 4320–4325.
- [18] Jonas J J, Queleennec X, Jiang L, et al. The Avrami kinetics of dynamic recrystallization [J]. *Acta Materialia*, 2009, 57 (9): 2748–2756.

(上接第 175 页)

- [6] 孙鹏. 弹性夹片冲压工艺分析与模具设计 [J]. *锻压技术*, 2020, 45 (12): 166–170.
- Sun P. Analysis of stamping process and die design for elastic clip [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45 (12): 166–170.
- [7] 杨正军, 陈毅. 冲压弯曲复合级进模具的设计与仿真分析 [J]. *机械研究与应用*, 2018, 31 (4): 4–6, 12.
- Yang Z J, Chen Y. Design and 3D simulation on the composite progressive die of stamping and bending [J]. *Mechanical Research & Application*, 2018, 31 (4): 4–6, 12.
- [8] GB/T 15055—2021, 冲压件未注公差尺寸极限偏差 [S].
- GB/T 15055—2021, Permissible stamping variations in dimensions without tolerance indication [S].
- [9] 刘波. 基于智能制造的定位卡圈冲压模具设计 [J]. *模具技术*, 2020, 37 (5): 33–37.
- Liu B. Design of stamping die for locating ferrule based on intelligent manufacturing [J]. *Die & Mould Technology*, 2020, 37 (5): 33–37.
- [10] 胡宏伟, 肖国华, 钱应平, 等. 微形电机机壳 16 工步连续级进弯曲模结构设计 [J]. *锻压技术*, 2020, 45 (4): 159–169.
- Hu H W, Xiao G H, Qian Y P, et al. Structural design of sixteen-step continuous progressive bending die for micro-motor shell [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45 (4): 159–169.
- [11] 白治新. 电动机定子片复合冲模设计 [J]. *机械工程师*, 2020, 351 (9): 109–111.
- Bai Z X. Design of composite punching die for motor stator sheet [J]. *Mechanical Engineer*, 2020, 351 (9): 109–111.
- [12] 李金强, 王海军. 后备箱门锁保持架冲压工艺分析及级进模设计 [J]. *锻压技术*, 2020, 45 (8): 170–174, 178.
- Li J Q, Wang H J. Stamping process analysis and progressive die design on trunk door lock retainer [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45 (8): 170–174, 178.