

# 轧制态 ME20M 镁合金热拉伸变形行为及加工图

杨 柳<sup>1,2</sup>, 官英平<sup>1,2</sup>, 段永川<sup>1,2</sup>, 屈晓阳<sup>1</sup>

(1. 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室(燕山大学), 河北 秦皇岛 066004)

(2. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 在变形温度为 623~773 K, 应变速率为 0.001~0.1 s<sup>-1</sup> 的条件下, 通过 INSPEKT Table 100 kN 电子万能高温试验机对轧制态 ME20M 镁合金进行了热拉伸实验, 分析了变形温度和应变速率对材料流动应力的影响, 建立了热变形条件下的本构模型及加工图。结果表明: 随着变形温度的降低和应变速率的升高, 轧制态 ME20M 镁合金的流动应力增加; 建立的本构模型预测峰值应力与实验结果吻合较好, 平均相对误差为 5.19%; 考虑应变对本构模型中材料常数影响后的预测应力值与实验值的相关度较高, 平均相对误差为 6.00%; 最佳热加工范围为 673~773 K、应变速率 0.001~0.01 s<sup>-1</sup>。

**关键词:** ME20M 镁合金; 热变形行为; 本构模型; 热加工图

中图分类号: TG389

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)05-1715-07

热变形状态下的本构模型反映的是材料流变应力与热力学参数之间的关系, 对于数值模拟和实验过程的工艺参数确定具有重要意义<sup>[1,2]</sup>。热加工图是反映材料热加工性能的图形, 可以分析材料在不同变形温度、应变速率和变形程度下的变形机制, 从而进一步确定出材料热变形的“安全区”和“不安全区”, 以期达到控制变形组织演变、避免产品缺陷和优化工艺过程的目的<sup>[3-5]</sup>。

Bisht 等<sup>[6]</sup>分别采用分段线性拟合和 Johnson-Cook 模型 2 种方法, 对 AM30 镁合金的热压缩流变曲线进行拟合, 发现分段线性拟合方法能更好的描述高应变速率下动态再结晶(DRX)过程中的力学行为。Chen Wei 等<sup>[7]</sup>利用热物理模拟实验研究了高钛 6061 铝合金的变形行为, 建立了流动应力模型和热加工图, 借助电子背散射衍射等技术, 分析得出材料的软化主要机理为动态回复。周明扬等<sup>[8]</sup>对挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 新型镁合金进行了高温拉伸实验和微观组织观察, 通过峰值应力、应变速率和温度等数据建立了双曲正弦本构模型, 依据变形激活能推断了合金的主要变形机制。章晓婷等<sup>[9]</sup>考虑到热变形过程中应变对本构模型中材料常数的较大影响, 对 4 个材料常数与应变之间的关系进行拟合, 建立了能较为准确描述它们之间关系的四次多项式。Wang 等<sup>[10]</sup>基于实验结果对 2Cr11Mo1VNbN 马氏体不锈钢热变形过程中的加工硬化-动态回复阶段和动态软化阶段进行了评价, 建立了耦合加工硬化-动态回

复阶段的动态软化本构模型, 所建立的模型能较准确地描述研究对象的热变形行为。

ME20M 镁合金属 Mg-Mn-Re 系, 是一种中等强度变形镁合金, 具有良好的耐腐蚀性能, 并且易于焊接, 可用于制造飞机蒙皮、壁板、座舱架等要求耐蚀性的附件<sup>[11-14]</sup>。Li 等<sup>[15]</sup>研究了 ME20 镁合金板在热变形过程中, 变形条件和初始结构对组织和组织演化的影响, 并与常规镁合金 AZ31 进行了比较。结果表明, 由于 ME20 镁合金细观组织中析出物的存在, 使得 ME20 镁合金板材在平面压缩过程中具有较高的再结晶温度和较低的拉伸孪生倾向。Zhong 等<sup>[16]</sup>发现轧制态 Mg-0.5Mn-xCe 合金中的 Ce 可以起到细化晶粒和弱化织构的作用, 并且合金的导热系数随 Ce 含量的增加而逐渐降低。

虽然稀土元素 Ce 的添加, 在一定程度上能提高 ME20M 镁合金的塑性, 但是, 有关该合金在热成形过程中的流动应力随变形温度、应变速率、变形程度和化学成分等因素的影响规律, 以及热加工范围等研究较少, 缺乏系统性的认识。

本研究以轧制态 ME20M 镁合金为研究对象, 基于热拉伸实验结果, 获得不同变形温度和应变速率下的材料流变特征, 采用 Zener-Hollomon 参数法构建双曲正弦 Arrhenius 本构关系模型, 基于动态材料模型(DMM)建立热加工图, 为开展 ME20M 镁合金热成形过程的数值模拟和工艺制定提供必要的基础。

收稿日期: 2019-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(51275444, 51705448); 河北省自然科学基金(E2018203254); 河北省科技计划项目(11212104D, 15215325)

作者简介: 杨柳, 男, 1988 年生, 博士生, 实验师, 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 河北 秦皇岛 066004, 电话: 0335-8052031, E-mail: yangliu@ysu.edu.cn

## 1 实验

实验材料为商用轧制态 ME20M 镁合金板材, 其化学成分如表 1 所示, 图 1 为材料原始金相组织, 晶粒呈等轴晶形态, 平均晶粒尺寸约为 6.5  $\mu\text{m}$ 。

将轧制态的 ME20M 镁合金板材沿轧制方向电火花线切割成单向拉伸试件, 如图 2 所示。通过 INSPEKT Table 100 kN 电子万能高温试验机进行等温拉伸实验, 变形温度分别为 623, 673, 723 和 773 K, 应变速率分别为 0.001, 0.01 和 0.1  $\text{s}^{-1}$ , 应变为 0.4, 以 278 K/s 的速度加热至预设温度, 保温 3 min, 拉伸变形结束后迅速进行水淬。

## 2 结果与分析

### 2.1 流变行为

不同变形温度和应变速率下, ME20M 镁合金板材热拉伸变形的真实应力-应变曲线, 如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 当应变速率一定时, 流变应力随着温度的增加而降低; 当温度一定时, 流变应力随着应变速率的增加而增大。在变形初期, 由于材料内部位错滑移受阻, 位错不断堆积, 使得流变应力迅速增加, 主要表现为热加工硬化; 当变形量达到一定应变后, 发生动态再结晶出现动态软化, 此时热加工硬化和动态软化相互作用; 当加工硬化占主导时, 流变应力随着应变增加的速率放缓, 见图 3b 的应变 0.025~0.05 区域、图 3c 的应变 0.025~0.25 区域; 当动态软化和加工硬化达到动态平衡时, 流变应力相对恒

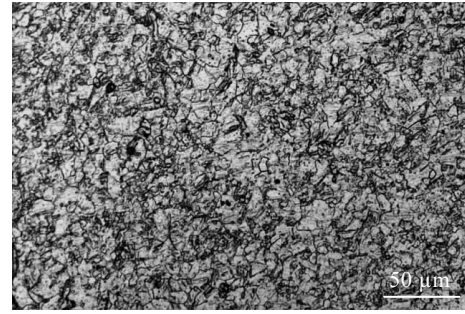


图 1 材料原始金相组织

Fig.1 Initial metallographic microstructure of materials

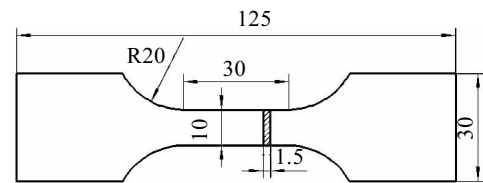


图 2 热拉伸试样尺寸

Fig.2 Dimensions of hot tensile specimen

定不变, 见图 3a 的 673 K、图 3c 的 723 和 773 K; 当动态软化占主导时, 流变应力随应变增加而下降, 见图 3a 和 3b 的 723 和 773 K、图 3c 的 673 K; 当应变速率较低时, 材料的动态软化作用明显, 流变应力在变形初期便迅速达到峰值, 而后趋于稳态, 见图 3a; 随着应变速率的增大, 加工硬化占主导的阶段较长, 见图 3b 和图 3c, 说明 ME20M 镁合金正应变速率敏感材料。

### 2.2 本构模型

由上述流变行为结果可知, ME20M 镁合金热拉伸变形是一个热激活过程, 材料的流变应力、应变速率和变形温度之间存在一定的相关性<sup>[17]</sup>。

表 1 轧制态 ME20M 镁合金化学成分

Table 1 Chemical composition of rolled ME20M magnesium alloy

Al	Zn	Mn	Ce	Cu	Ni	Si	Fe
0.022	0.0062	1.68	0.32	0.0014	0.00046	0.0042	0.0028

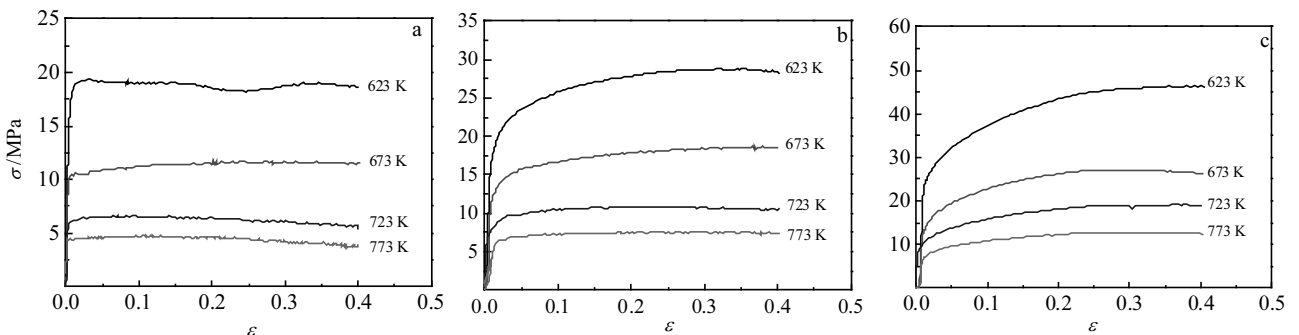


图 3 真实应力-应变曲线

Fig.3 True stress-strain curves of ME20M magnesium alloy at the strain rate of 0.001  $\text{s}^{-1}$  (a), 0.01  $\text{s}^{-1}$  (b), and 0.1  $\text{s}^{-1}$  (c)

在低应力水平 ( $\alpha\sigma < 0.8$ ) 和高应力水平 ( $\alpha\sigma > 1.2$ ) 时, 流变应力与应变速率关系可分别表示为

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT) \tag{1}$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \tag{2}$$

整个应力范围内流变应力和应变速率关系可由双曲正弦 Arrhenius 函数关系表示<sup>[18]</sup>

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \tag{3}$$

式中,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A$ 、 $n_1$ 、 $n$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  均为与材料有关的常数, 且  $\alpha = \beta/n_1$ ;  $\dot{\epsilon}$  为应变速率,  $s^{-1}$ ;  $\sigma$  为流动应力, MPa;  $Q$  为变形激活能,  $kJ/(mol \cdot K)$ ;  $R$  为摩尔气体常数,  $R = 8.314 J/(mol \cdot K)$ ;  $T$  为热力学温度, K。

Zener 和 Hollomon 提出了变形温度和应变速率对流变应力的影响可用温度补偿应变速率因子  $Z$  表示<sup>[19]</sup>

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \tag{4}$$

联立式(3)和(4)可得

$$Z = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{5}$$

参数  $\alpha$  的确定:

对式(1)和(2)两边分别取对数, 可得

$$\ln \dot{\epsilon} = n_1 \ln \sigma + \ln A_1 - Q/RT \tag{6}$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \beta \sigma + \ln A_2 - Q/RT \tag{7}$$

不同变形条件下的  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  和  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  关系曲线, 如图 4 和图 5 所示。利用线性回归, 可得直线的斜率  $n_1 = 4.9456$ ,  $\beta = 0.3463$ , 从而得出  $\alpha = \beta/n_1 = 0.07$ 。

参数  $n$  和  $Q$  的确定:

对式(3)两边取对数, 可得

$$\ln \dot{\epsilon} = n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] + \ln A - Q/RT \tag{8}$$

不同变形条件下的  $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  关系曲线, 如图 6 所示。线性回归后, 可得斜率  $n = 3.4111$ 。

当应变速率一定时, 整理式(8)可得

$$Q = nR \left\{ \partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)] / \partial (1/T) \right\} \tag{9}$$

$\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - T^{-1}$  关系曲线, 如图 7 所示。依据线性回归, 将  $n$ 、 $R$  代入式(9), 可得变形激活能  $Q = 185.6679 kJ/mol$ 。

参数  $A$  的确定:

对式(5)两边取对数, 可得

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \tag{10}$$

$\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  关系曲线如图 8 所示。对曲线线性拟合, 曲线截距  $\ln A = 26.4748$ , 即  $A = 3.1467 \times 10^{11}$ 。

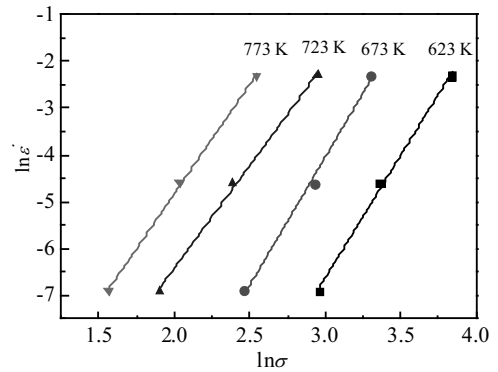


图 4 不同变形条件下  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  关系  
Fig.4 Relationship between  $\ln \dot{\epsilon}$  and  $\ln \sigma$  under different deformation conditions

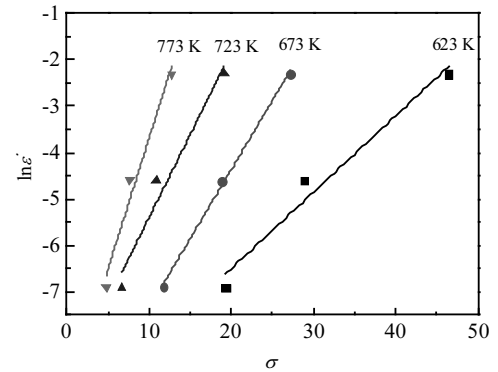


图 5 不同变形条件下  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  关系  
Fig.5 Relationship between  $\ln \dot{\epsilon}$  and  $\sigma$  under different deformation conditions

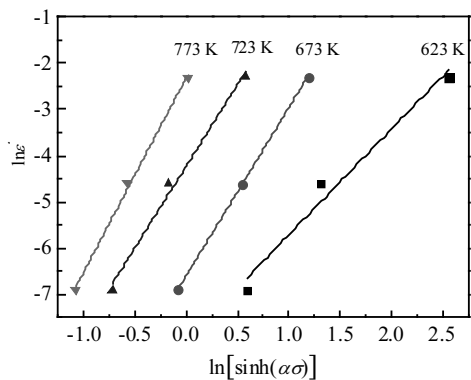


图 6 不同变形条件下  $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  关系  
Fig.6 Relationship between  $\ln \dot{\epsilon}$  and  $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  under different deformation conditions

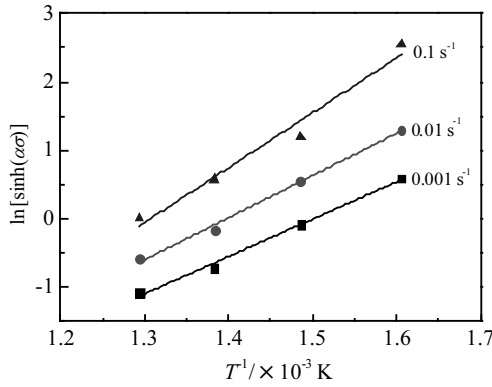


图 7 不同变形条件下  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-T^{-1}$  关系

Fig.7 Relationship between  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  and  $T^{-1}$  under different deformation conditions

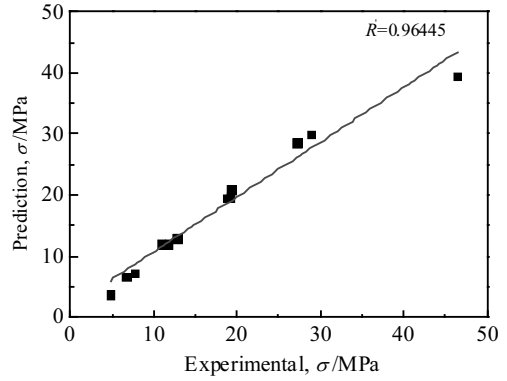


图 9 预测峰值应力与实验峰值应力关系

Fig.9 Relationship between predicted peak stress and experimental peak stress

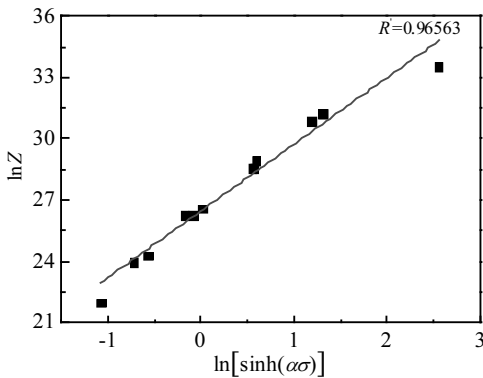


图 8 不同变形条件下  $\ln Z-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  关系

Fig.8 Relationship between  $\ln Z$  and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  under different deformation conditions

综上所述，将所求得的系数代入到式(3)中，可得双曲正弦 Arrhenius 本构模型

$$\dot{\epsilon} = 3.1467 \times 10^{11} [\sinh(0.07\sigma)]^{3.411} \exp(-185668/RT) \quad (11)$$

不同变形条件下双曲正弦 Arrhenius 本构模型预测的峰值应力与实验峰值应力对比，如图 9 所示。从图 9 可以看出：预测的峰值应力与实验峰值应力的线性回归相关系数  $R'=0.96445$ ，接近于 1。通过计算，预测峰值应力与实验峰值应力的平均相对误差 MRE 为 5.19%，说明采用双曲正弦 Arrhenius 本构模型用于描述变形过程中峰值流变应力的变化具有较高的精度。

一般情况下，认为应变对流变行为的影响不大，故而在上述本构模型中未考虑应变。但实际上，应变对本构模型中的  $n$ 、 $\alpha$ 、 $\ln A$  和  $Q$  等材料参数具有一定的

影响。因此，考虑到应变的影响，基于上述本构模型的求解计算方法，建立  $n$ 、 $\alpha$ 、 $\ln A$  和  $Q$  等参数与应变之间的关系如图 10 所示，拟合得到的关系式

$$\begin{cases} \alpha = 0.09298 - 0.20108\epsilon + 0.60853\epsilon^2 - 0.56878\epsilon^3 \\ n = 5.89934 - 23.90901\epsilon + 73.97645\epsilon^2 - 79.57404\epsilon^3 \\ Q = 296.93741 - 1139.9576\epsilon + 3680.17874\epsilon^2 - 3914.45735\epsilon^3 \\ \ln A = 44.96312 - 189.79852\epsilon + 613.33965\epsilon^2 - 652.42646\epsilon^3 \end{cases} \quad (12)$$

为了验证材料常数与应变之间的非线性关系及所建立本构模型的准确性，对理论计算与实验所得应力应变曲线进行对比，如图 11 所示。从图 11 中可以看出：不同应变速率下的理论值与实验值曲线基本吻合，相关系数  $R'$  都接近 1，说明理论值与实验值之间存在较好的相关性。平均相对误差 MRE 为 6.00%，进一步说明运用双曲正弦 Arrhenius 本构模型预测流变应力具有较高精度。

### 2.3 基于动态材料模型加工图

Prasad 和 Gegel 等人依据大塑性变形连续介质力学、物理系统模拟和不可逆热力学等基本原理，认为材料的加工是一个能量耗散的过程，提出了基于动态材料模型(DMM)的加工图<sup>[20-22]</sup>。

材料能量耗散的特征可用功率耗散效率描述

$$\eta = 2m/(m+1) \quad (13)$$

式中， $m$  为应变速率敏感系数。

根据大应变塑性变形的极大值原理，采用无量纲参数  $\xi(\dot{\epsilon})$  作为材料失稳判据因子，失稳准则为<sup>[23]</sup>

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \log[m/(m+1)]}{\partial \log \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (14)$$

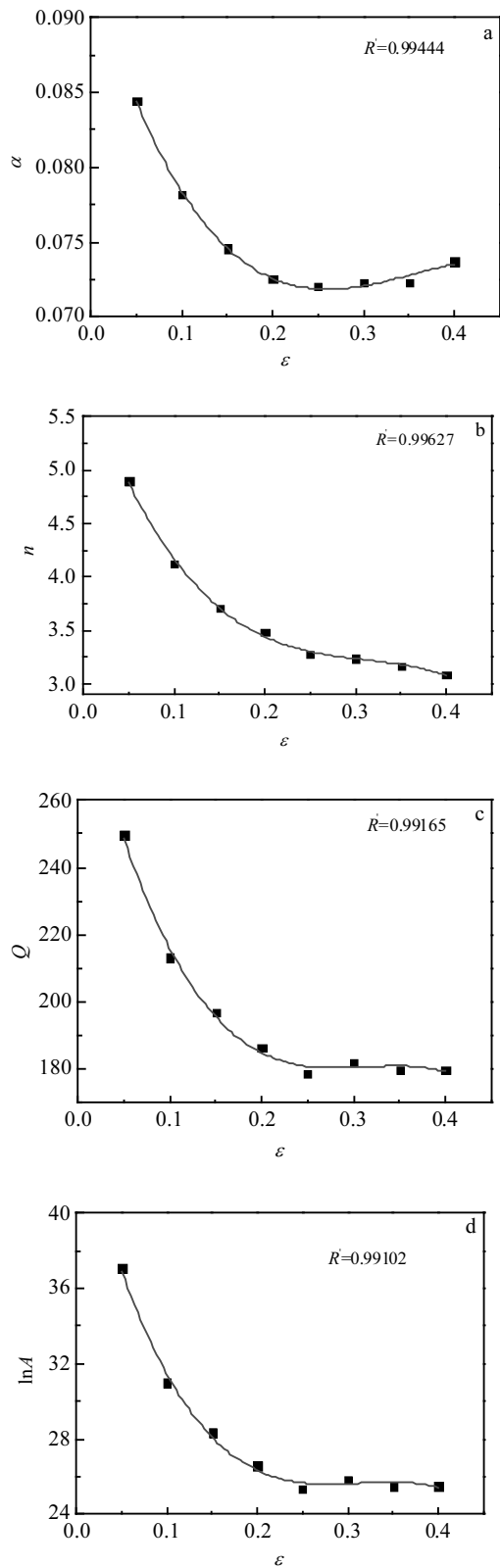


图 10 应变与材料常数之间关系

Fig.10 Relationships between strain and material constant: (a)  $\alpha$ , (b)  $n$ , (c)  $Q$ , and (d)  $\ln A$

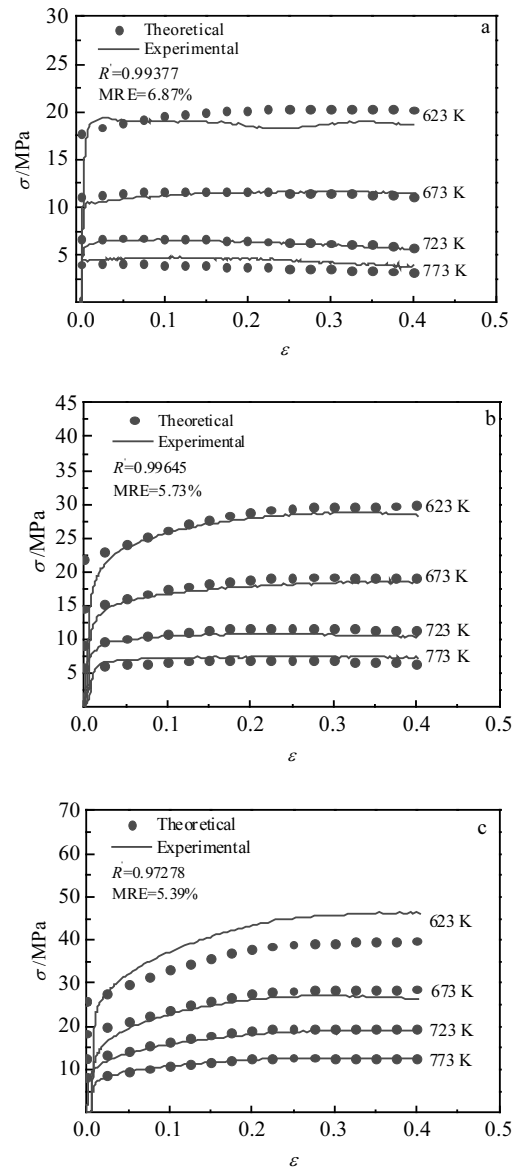


图 11 不同变形条件下理论与实验真实应力应变曲线

Fig.11 Theoretical and experimental true stress-strain curves under different deformation conditions: (a)  $0.001 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $0.01 \text{ s}^{-1}$ , and (c)  $0.1 \text{ s}^{-1}$

依据上文双曲正弦 Arrhenius 本构模型, 可得相同应变下不同温度、不同应变速率时的流变应力值, 利用绘图软件 Origin 建立不同变形条件下的功率耗散图和失稳图, 并叠加成加工图, 如图 12 所示。从图 12 中可以看出: 不同应变下的热加工图分布规律基本相同, 随着应变的增加功率耗散效率逐渐增大; 功率耗散效率较低或急剧变化的加工失稳区主要聚集在高应变速率和较低温度部分, 见图 12 灰色区域; 功率耗散效率达到 35% 的安全加工区域主要集中在 673~773 K、 $0.001 \sim 0.01 \text{ s}^{-1}$  的变形条件下。

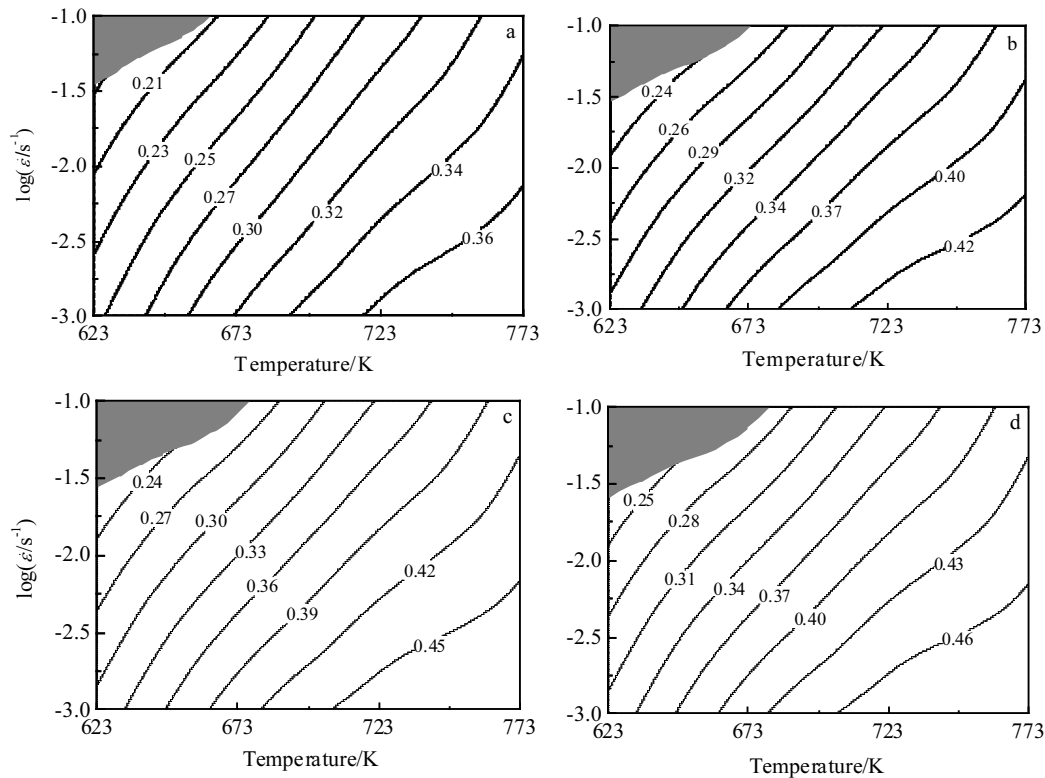


图 12 不同应变下的加工图

Fig.12 Processing maps at the strain of  $\epsilon=0.1$  (a),  $\epsilon=0.2$  (b),  $\epsilon=0.3$  (c), and  $\epsilon=0.4$  (d)

### 3 结 论

1) 温度一定时,流变应力随着应变速率的增加而增加;应变速率一定时,流变应力随温度的升高而减小,说明 ME20M 镁合金是温度和应变速率敏感材料。

2) 依据双曲正弦 Arrhenius 本构模型预测峰值应力与实验峰值应力的平均相对误差为 5.19%。ME20M 镁合金的热变形本构模型可表示为

$$\dot{\epsilon} = 3.1467 \times 10^{11} [\sinh(0.07\sigma)]^{3.4111} \exp(-185668/RT)$$

3) 考虑应变对本构模型中  $n$ 、 $\alpha$ 、 $\ln A$  和  $Q$  等材料参数的影响而建立双曲正弦 Arrhenius 本构模型的预测应力值与实验应力值之间相关性好,平均相对误差为 6.00%,能够较为准确的描述 ME20M 镁合金的热变形行为。

4) 本实验条件下加工图的热加工参考工艺范围为:变形温度为 673~773 K,应变速率为 0.001~0.01 s<sup>-1</sup>。

#### 参考文献 References

[1] Liu Shuhui, Pan Qinglin, Li Hang *et al. Journal of Materials Science*[J], 2019, 54(5): 4366

[2] Zhang Kai, Badreddine Housseem, Saanouni Khemais. *European Journal of Mechanics A-Solids*[J], 2019, 73: 169

[3] Zeng Weidong(曾卫东), Zhou Yigang(周义刚), Zhou Jun(周军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(5): 673

[4] Fan Caihe, Peng Yingbiao, Yang Haitang *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2017, 27(2): 289

[5] Wang Jingfeng(王敬丰), Xie Feizhou(谢飞舟), Liu Shijie(刘世杰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(6): 1700

[6] Bisht A, Yadav V, Suwas S *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2018, 27(9): 4900

[7] Chen Wei, Guan Yingping, Wang Zhenhua. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(2): 369

[8] Zhou Mingyang(周明扬), Su Xinxin(苏鑫鑫), Ren Lingbao(任凌宝) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(8): 2149

[9] Zhang Xiaoting(章晓婷), Huang Liang(黄亮), Li Jianjun(李建军) *et al. Journal of Central South University*(中南大学学报)[J], 2017, 48(6): 1439

[10] Wang Rui, Wang Menghan, Li Zhi *et al. Journal of Materials*

- Engineering and Performance*[J], 2018, 27(9): 4932
- [11] Mirza F A, Wang K, Bhole S D *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 661: 115
- [12] Yang Qingshan, Jiang Bin, Jiang Wei *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 628: 143
- [13] Lentz M, Nissen J., Fahrenson C *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 655: 17
- [14] Klein Martin, Wittke Philipp, Hoppe Roland *et al. Materials Testing*[J], 2018, 60(1): 15
- [15] Li X, Al-Samman T, Mu S *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(27): 7915
- [16] Zhong Liping, Peng Jian, Li Min *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 661: 402
- [17] Zhu Shaozhen, Luo Tianjiao, Zhang Ting'an *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(10): 3232
- [18] Luo Xiaoping, Dang Shu'e, Kang Li. *Advances in Materials Science and Engineering*[J], 2014, 2014(12): 1
- [19] Zhou H, Wang Q D, Ye B *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 576: 101
- [20] Suresh K, Rao K P, Prasad Y V R K *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2018, 28(8): 1495
- [21] Sahoo B N, Panigrahi S K. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 776: 865
- [22] Liu Gang, Xie Wen, Hadadzadeh Amir *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 766: 460
- [23] Prasad Y V R K. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2003, 12(6): 638

## Hot Tensile Deformation Behavior and Processing Map of Rolled ME20M Magnesium Alloy

Yang Liu<sup>1,2</sup>, Guan Yingping<sup>1,2</sup>, Duan Yongchuan<sup>1,2</sup>, Qu Xiaoyang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science (Yanshan University),

Ministry of Education of China, Qinhuangdao 066004, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The hot tensile deformation behaviors of rolled ME20M magnesium alloy at temperatures of 623~773 K and strain rates of 0.001~0.1 s<sup>-1</sup> were studied by INSPEKT Table 100 kN universal high temperature experimental machine. The effects of deformation temperature and strain rate on the flow stress of the material were analyzed, and the constitutive model and processing map under hot deformation conditions were established. The results show that the flow stress of the rolled ME20M magnesium alloy increases with the decrease of deformation temperature or the increase of strain rate. The predicted peak stress of the constitutive model is in good agreement with the experimental results, and the average relative error is 5.19%. After considering the influence of strain on the material constant in the constitutive model, the predicted stress value is highly correlated with the experimental value, and the average relative error is 6.00%. The best hot working range is 673~773 K in temperature and 0.001~0.01 s<sup>-1</sup> in strain rate.

**Key words:** ME20M magnesium alloy; hot deformation behavior; constitutive model; hot processing map

---

Corresponding author: Guan Yingping, Ph. D., Professor, Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science (Yanshan University), Ministry of Education of China, Qinhuangdao 066004, P. R. China, Tel: 0086-335-8057031, E-mail: gyp@ysu.edu.cn