

# 基于 Arrhenius 和 BP-ANN 模型的 Mg-Mn-Ce 合金热压缩变形行为

杨 阳<sup>1</sup>, 汪伟君<sup>2</sup>, 杨 柳<sup>1</sup>, 彭 昊<sup>1</sup>, 姜 浩<sup>1</sup>

(1. 河北科技师范学院 机电工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

(2. 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)

**摘要:** 在变形温度 723~873 K 和应变速率 0.0001~0.1 s<sup>-1</sup> 的条件下, 对挤压态 Mg-Mn-Ce 合金进行了热压缩实验。依据获得的真实应力-应变曲线, 分析了变形温度和应变速率对材料流动应力的影响规律; 基于 Arrhenius 和 BP-ANN 模型建立了本构关系, 并进行了准确性评估; 利用 BP-ANN 模型获取的本构数据, 绘制了热加工图并开展了数值模拟。结果表明: 随着变形温度升高和应变速率降低, 合金的流动应力下降; 建立的 BP-ANN 模型预测的精度更高, 相关系数可达 0.9990, 平均相对误差仅为 2.69%; 合金的热加工范围应选择在 0.001~0.01 s<sup>-1</sup> 和 773~823 K 的范围进行; 数值模拟与实验结果吻合较好, 可以用来指导合金的热塑性成形。

**关键词:** Mg-Mn-Ce 合金; 热压缩; 本构关系; 加工图; 数值模拟

**中图分类号:** TG389

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2025)02-0517-07

Mg-Mn-Ce 合金为含稀土元素的三元镁合金, 具有较好的耐蚀性和较高的热稳定性, 可在 200 °C 以下长期工作<sup>[1-3]</sup>。然而, 稀土元素的加入并未改善 Mg-Mn-Ce 合金的可成形性, 室温塑性差依然是制约其广泛应用的重要因素<sup>[4]</sup>。为获得不同形状、尺寸和性能要求的零件, Mg-Mn-Ce 合金常采用轧制、挤压和锻造等热变形加工方式<sup>[5-8]</sup>。

精确建立材料不同变形条件下的本构关系是有限元分析和工艺优化的前提。目前, 钢、铝等材料热加工方面的研究已较为深入<sup>[9-11]</sup>, 而有关 Mg-Mn-Ce 合金热变形方面仍不够完善。Yang 等<sup>[12]</sup>主要关注了 Mg-Mn-Ce 合金在不同成形条件下的塑性变形机理, 建立了耦合损伤的统一粘塑性本构方程, 并与不同类型的本构模型进行了比较。Zhang 等<sup>[13]</sup>研究了具有双晶粒结构的挤压 Mg-0.9Mn-0.5Ce 合金高温拉伸行为, 并在 423~523 K 下进行了拉伸实验。Chen 等<sup>[14]</sup>研究了热轧 Mg-0.9Mn-1.5Ce 合金的三维拉伸蠕变各向异性, 发现蠕变行为对加载方向有很强的依赖性, 确定蠕变阻力按 TD 近似 RD>ND 的顺序排列。Zhao 等<sup>[15]</sup>以“剪切压缩试样”为模型, 研究了纯镁在热剪切压缩条件下的变形行为和微观结构演变, 发现材料表面经历复杂的剪切压缩变形, 而芯部则是简单的单轴挤压变形。Zhang 等<sup>[16]</sup>采用粉末冶金法制备

了钕颗粒增强 AZ31 基复合材料, 开发了热压缩条件下的应变补偿 Arrhenius 本构模型, 并根据动态材料模型理论绘制了加工图。Zheng 等<sup>[17]</sup>基于真实应力应变数据建立了 GH4169 高温合金的反向传播人工神经网络 (BP-ANN) 本构模型, 研究了本构模型的预测稳定性与模型参数之间的关系。综上所述, 部分学者在金属热变形本构方面的研究已卓有成效, 但在 Mg-Mn-Ce 合金方面还存在一定欠缺。

本研究以挤压态 Mg-Mn-Ce 合金热压缩实验为基础, 获取了不同条件下的真实应力-应变曲线, 分析流变行为。建立了 Arrhenius 和 BP-ANN 模型, 验证两种模型的准确性。绘制热加工图, 确定了合金适宜的加工范围。基于有限元软件, 参比热压缩实验, 对变形过程进行数值模拟。研究结果将为 Mg-Mn-Ce 合金热变形工艺制定提供必要模型支撑。

## 1 实验

实验材料为挤压态 Mg-Mn-Ce 合金棒材, 其化学成分如表 1 所示。将合金棒材沿挤压方向加工成圆柱体压缩试件, 尺寸为  $\Phi 8$  mm $\times$ 12 mm。等温压缩实验的变形温度为 723、773、823 和 873 K, 应变速率( $\dot{\epsilon}$ )为 0.0001、0.001、0.01 和 0.1 s<sup>-1</sup>, 变形量为 50%, 为减小摩擦和防止试件粘接压头, 在试件两端涂抹高温润滑剂并粘贴钼片,

收稿日期: 2024-08-22

基金项目: 河北省自然科学基金(E2024407001); 校级研究生案例库建设项目(2024AL04)

作者简介: 杨 阳, 男, 1982 年生, 博士, 河北科技师范学院机电工程学院, 河北 秦皇岛 066004, E-mail: yangyang\_hnust@126.com

表 1 Mg-Mn-Ce 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of the Mg-Mn-Ce alloy (wt%)

Al	Zn	Mn	Ce	Be	Cu	Ni	Si	Fe	Mg
0.20	0.30	1.70	0.20	0.01	0.05	0.007	0.10	0.05	Bal.

以 10 °C/s 的速度加热至预设温度,保温 3 min,压缩变形结束后迅速进行冷却,实验步骤如图 1 所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 流变行为

不同条件下热压缩变形所得真实应力-应变曲线,如图 2 所示。可以看出:在较低应变水平时,随着应变的增

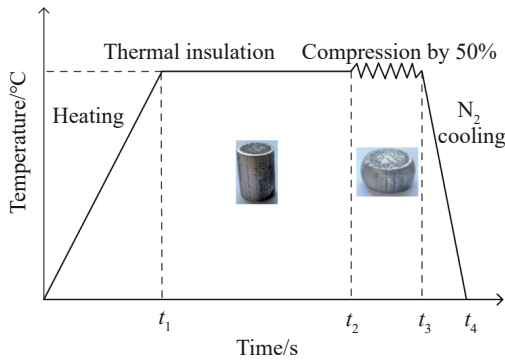


图 1 热压缩实验步骤

Fig.1 Testing process of hot compression

加应力急剧上升,加工硬化占主导地位<sup>[18]</sup>。当变形进一步的增加,开始发生动态再结晶<sup>[19]</sup>,此时曲线斜率与变形初期相比有所降低,加工硬化依然占主导地位。当动态再结晶软化和加工硬化达到平衡时,曲线出现峰值。随着变形的继续进行,动态再结晶的软化作用占主导时,曲线平缓下降。在压缩应变较大时,塑性变形引起的位错堆叠和晶粒择优取向加剧了加工硬化的趋势,曲线发生上扬。整体而言,增大变形温度和降低变形速率,材料的软化机制更显著,更有助于热压缩的进行。

### 2.2 Arrhenius 模型

通过对真实应力-应变曲线的分析可知,在合金热压缩变形过程中,其应力、应变速率和变形温度之间存在一定的关联性。可用双曲正弦 Arrhenius 函数表示<sup>[20]</sup>:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

不同应力水平时,可分别表示为:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT) \quad (\alpha\sigma < 0.8) \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (\alpha\sigma > 1.2) \quad (3)$$

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

对公式(2)和(3)两边分别取对数,可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = n_1 \ln \sigma + \ln A_1 - Q/RT \quad (4)$$

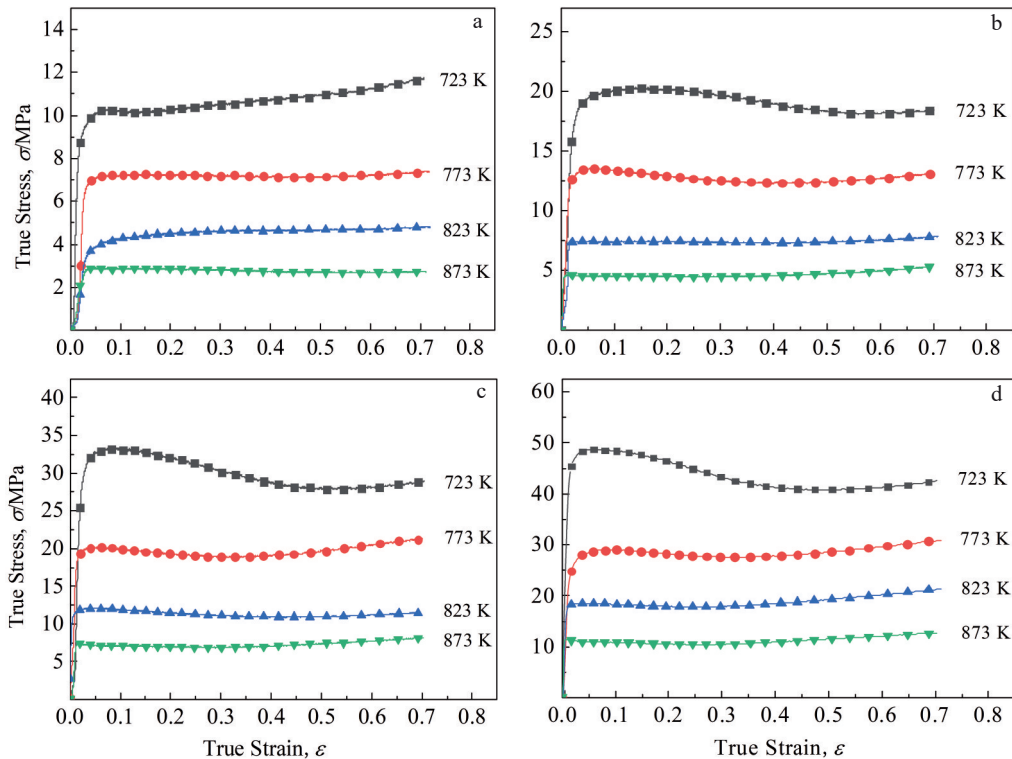


图 2 不同变形条件下真实应力-应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves under different deformation conditions: (a)  $\dot{\epsilon}=0.0001 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$ , (c)  $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$ , and (d)  $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$

$$\ln \dot{\epsilon} = \beta \sigma + \ln A_2 - Q/RT \quad (5)$$

$\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  和  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  关系拟合后, 得  $n_1 = 4.8497, \beta = 0.4418, \alpha = \beta/n_1 = 0.0911$ 。

对公式(1)两边取对数, 可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] + \ln A - Q/RT \quad (6)$$

当应变速率一定时, 整理公式(6)有

$$Q = nR \left\{ \partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)] / \partial (T^{-1}) \right\} \quad (7)$$

$\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  和  $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - T^{-1}$  关系拟合后, 得  $n = 3.3269, Q = 278.001 \text{ kJ/mol}$ 。

进一步, 温度和应变速率对应力的影响还可用  $Z$  参数表示:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (8)$$

联立公式(1)和(8)可得:

$$Z = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (9)$$

依据  $Z$  参数公式, 可将公式(1)转换如下:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ (Z/A)^{1/n} + \left[ (Z/A)^{n/2} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (10)$$

对公式(9)两边取对数, 可得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (11)$$

拟合  $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  关系后, 可得  $\ln A = 34.7974$ , 即  $A = 1.2951 \times 10^{15}$ 。

为补偿应变对应力的影响, 对不同应变下的材料常数  $n, \alpha, \ln A$  和  $Q$  进行三阶方程拟合。整理后得应变补偿 Arrhenius 本构方程。

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{n}{2}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \\ Z &= \dot{\epsilon} \exp \left( \frac{Q}{RT} \right) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \\ n &= 3.0596 + 2.7334\epsilon - 5.5539\epsilon^2 + 3.0074\epsilon^3 \\ \alpha &= 0.0934 + 0.0295\epsilon - 0.1064\epsilon^2 + 0.0601\epsilon^3 \\ \ln A &= 32.2820 + 48.4387\epsilon - 171.5905\epsilon^2 + 132.2942\epsilon^3 \\ Q &= 261.0081 + 335.0995\epsilon - 1197.3285\epsilon^2 + 927.0216\epsilon^3 \end{aligned} \right. \quad (12)$$

采用相关系数( $R'$ )、平均相对误差(AARE)和均方根误差(RMSE)3种指标来评估模型的准确性。具体为:

$$R' = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - E)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (13)$$

$$\text{AARE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\% \quad (14)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - P_i)^2} \quad (15)$$

其中,  $E_i$  和  $P_i$  分别为实验值和预测值;  $\bar{E}$  和  $\bar{P}$  分别为  $E_i$  和  $P_i$  的平均值;  $N$  为数据样本个数。

基于应变补偿本构方程, 计算得出了不同温度和应变速率条件下的真实应力-应变数据, 与实验曲线对比结果, 如图3所示。可以看出: 在较低温度(723 K)时,

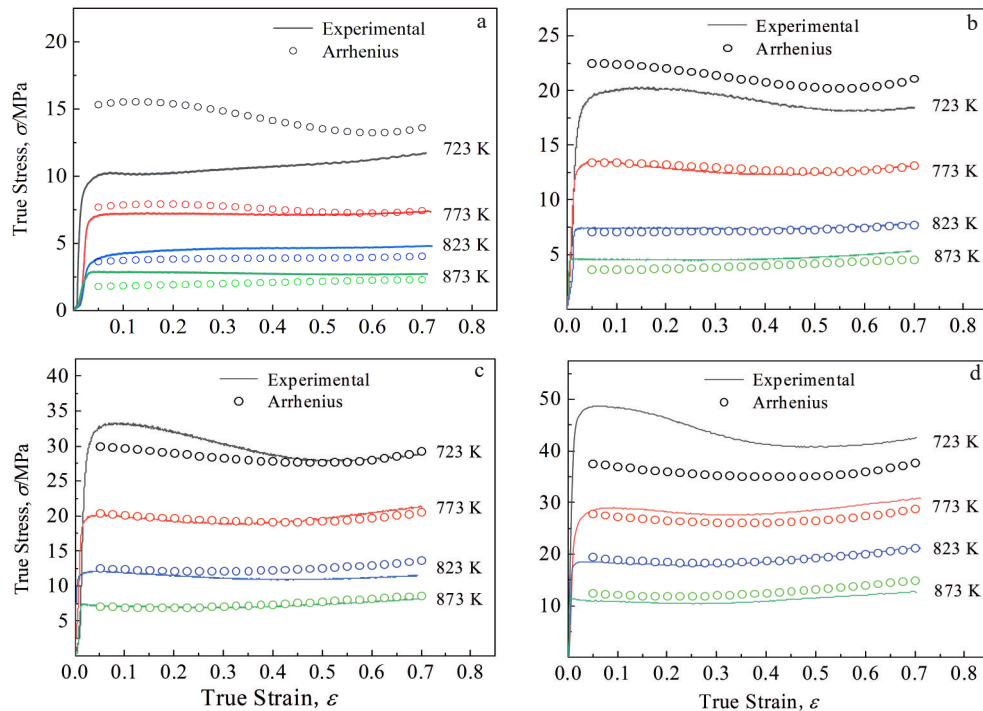


图3 Arrhenius 预测结果与实验结果对比

Fig.3 Comparison of true stress-strain curves between Arrhenius prediction results and experimental results: (a)  $\dot{\epsilon}=0.0001 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$ , (c)  $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$ , and (d)  $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$

Arrhenius 模型预测值与实验值偏离较远,在其他温度条件下重合度较好。统计分析后可知,Arrhenius 模型的相关系数为 0.9800、平均相对误差为 10.68%、均方根误差为 2.40 MPa,数值指标均显示出良好的相关性和可信度,说明 Arrhenius 模型可以用来描述合金在一定条件下的力学行为。

### 2.3 BP 神经网络模型

在热压缩变形过程中,合金的应力会受到温度、应变速率和应变的交互影响,建立能够准确表达三者关系的预测模型十分必要。BP 神经网络模型(BP-ANN)<sup>[21]</sup>在多维函数映射方面具有优良的能力,可以用来构建合金的本构关系。确定 BP 神经网络模型结构,如图 4 所示,其中输入变量分别为温度、应变速率和应变,输出变量为应力。选取不同条件下的热压缩实验数据进行训练测试,其中 84 548 组数据作为训练集,432 组数据作为测试集,网络计算最大迭代次数 1000 次,学习速率 0.01,在平均误差小于 0.0001 时停止训练。

图 5 为 BP-ANN 预测值和实验值结果对比,可以看出:相对于 Arrhenius 模型,所建立的 BP-ANN 模型预测的数据与实验真实应力-应变曲线吻合效果更好。结合相关系数和误差分析可得,基于 BP-ANN 模型下的相关

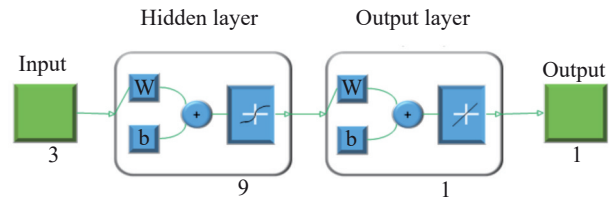


图 4 BP 神经网络结构

Fig.4 BP neural network structure

系数为 0.9990,平均相对误差和均方根误差分别为 2.69% 和 0.4734 MPa,相关性和可信度均较高,说明建立的 BP-ANN 模型可更加准确地描述 Mg-Mn-Ce 合金热压缩变形的力学行为。

### 2.4 热加工图构建

基于动态材料模型的热加工图是将功率耗散图和失稳图叠加,表征材料固有的加工性能,常用来设计和优化金属的加工工艺<sup>[22-23]</sup>。在热加工过程中,单位体积内吸收的总能量  $P$  由塑性热的耗散量  $G$  和组织演化的耗散量  $J$  组成。

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (16)$$

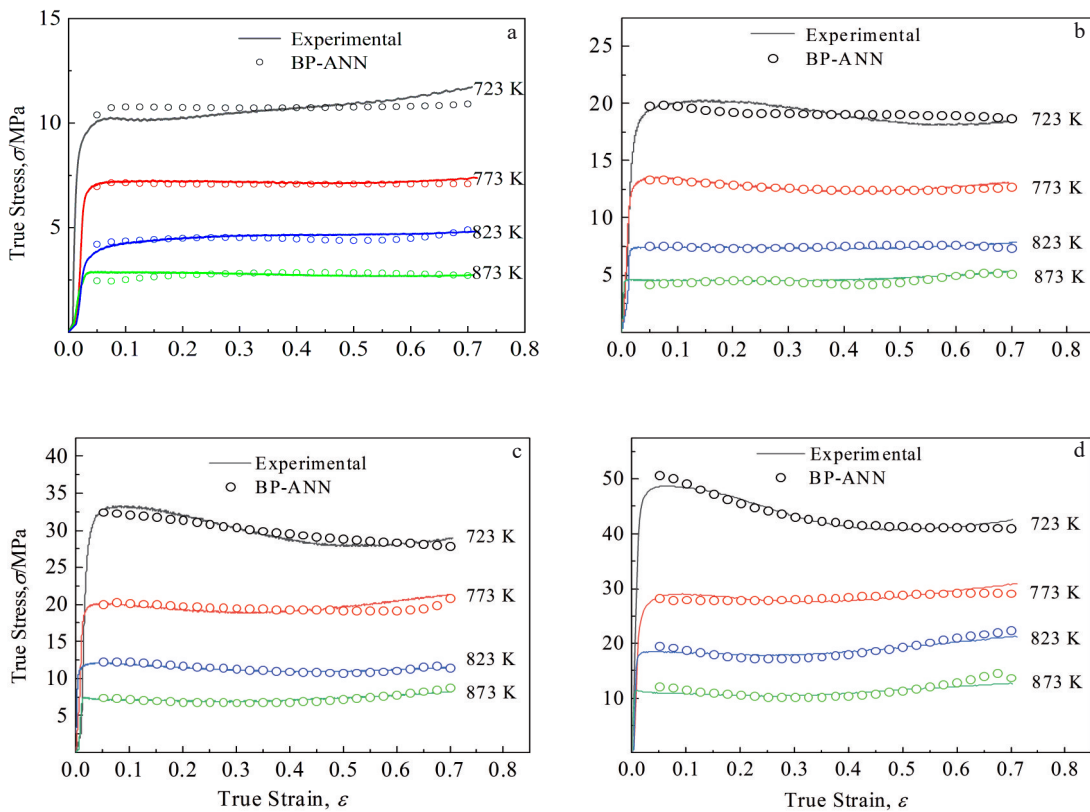


图 5 BP-ANN 预测结果与实验结果对比

Fig.5 Comparison of true stress-strain curves between BP-ANN prediction results and experimental results: (a)  $\dot{\epsilon}=0.0001 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$ , (c)  $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$ , and (d)  $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$



材料能量耗散特性服从动态本构方程：

$$\sigma = K\dot{\epsilon}^m \quad (17)$$

其中,  $K$  为材料常数;  $m$  为应变速率敏感因子。

由公式(16)和(17), 得:

$$m = \left[ \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \right]_{\epsilon, T} \quad (18)$$

$$J = \frac{m}{m+1} \sigma \dot{\epsilon} \quad (19)$$

理想线性耗散状态  $m=1$  时,  $J$  达到最大值  $J_{\max}$ :

$$J_{\max} = \frac{1}{2} \sigma \dot{\epsilon} \quad (20)$$

功率耗散效率  $\eta$ :

$$\eta = J/J_{\max} = \frac{2m}{m+1} \quad (21)$$

采用无量纲参数  $\zeta(\dot{\epsilon})$  作为失稳判据因子, 当  $\zeta(\dot{\epsilon})$  值小于 0 时, 材料发生流变失稳。

$$\zeta(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln \left[ \frac{m}{(m+1)} \right]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (22)$$

依据 BP-ANN 模型, 获取了不同变形条件下的流变应力值, 结合上述公式(18)、(21)和(22), 求得了应变速率  $0.0001 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$  和温度  $723 \sim 873 \text{ K}$  条件下的  $m$ 、 $\eta$  和  $\zeta(\dot{\epsilon})$  值。绘制了  $\ln \dot{\epsilon} - T$  二维平面不同应变下的热加工图, 如图 6 所示。从图可知, 不同应变下的热加工图分布规

律基本相同, 均显示在较低应变速率和较高温度下的加工性良好; 在应变达到 0.7 时, 应变速率  $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 、温度  $723 \sim 780 \text{ K}$  条件下发生失稳, 这可能与变形引起的位错堆叠和晶粒取向有关; 通常, 镁合金的能量耗散率  $\eta$  在 30% 以上时发生动态再结晶, 结合热加工图, 并考虑到实验过程低速和高温氧化因素的影响, 应选择中等温度和应变速率区间, 即  $0.001 \sim 0.01 \text{ s}^{-1}$  和  $773 \sim 823 \text{ K}$  范围进行加工处理。

### 2.5 热压缩数值模拟

利用 BP 神经网络模型建立的本构关系, 基于有限元分析软件 Abaqus 对 Mg-Mn-Ce 合金的热压缩变形过程进行了数值模拟。刚体和变形体分别选择 R3D4 和 C3D8R 单元类型进行网格划分, 坯料与模具之间摩擦系数为 0.2, 因不同条件下模拟所得的试件形态均与实验件匹配较好, 仅以  $823 \text{ K}$ 、 $0.001 \text{ s}^{-1}$  条件下的模拟结果进行说明, 如图 7 所示。可以看出, 由于摩擦的影响, 在坯料端面中心位置 I 区变形最小, 径向流动受阻致使试件出现腰鼓形(见图 8); 坯料内部 II 区变形最为剧烈, 应力应变值均达到最大; 坯料外围 III 区变形程度居中, 外表面受拉应力影响易出现裂纹。图 8 为一定条件下模拟与实验所得结果对比, 可以看出, 试件形态、载荷-位移曲线一致性均良好, 说明建立的本构关系可以准确地进行热压缩变形过程的数值模拟。

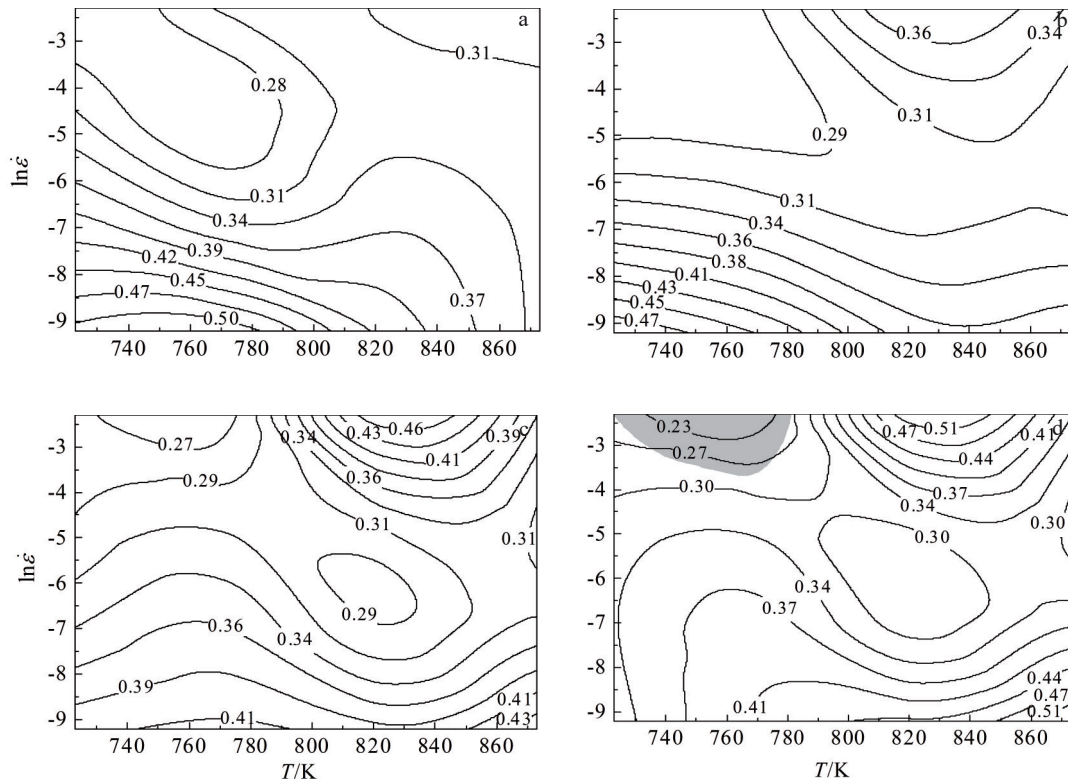


图6 不同应变下的热加工图(BP-ANN)

Fig.6 Hot processing maps under different strain conditions (BP-ANN): (a)  $\epsilon=0.1 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $\epsilon=0.3$ , (c)  $\epsilon=0.5$ , and (d)  $\epsilon=0.7$

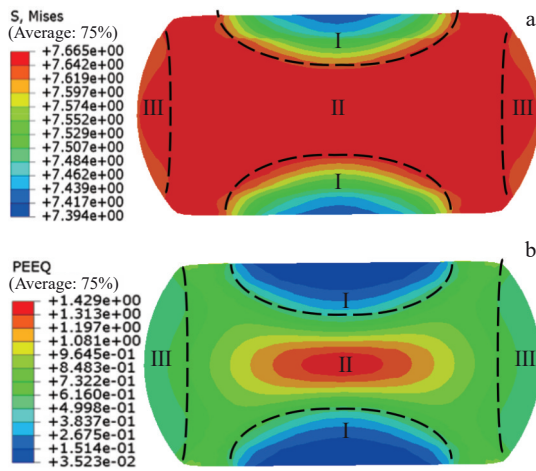


图7 数值模拟结果

Fig.7 Results of numerical simulation (823 K, 0.001 s<sup>-1</sup>):

(a) equivalent stress and (b) equivalent strain

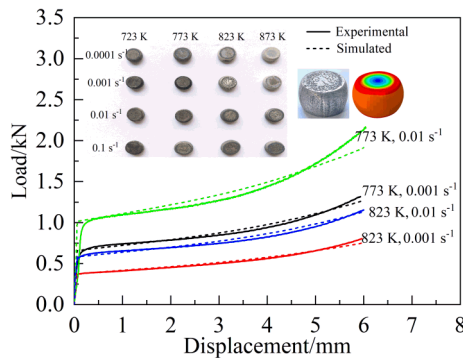


图8 模拟与实验结果

Fig.8 Simulation and experimental results

### 3 结论

1) 对挤压态 Mg-Mn-Ce 合金进行了热压缩实验, 其真实应力-应变曲线显示出再结晶软化和加工硬化两种特征, 流变应力均随应变速率的降低和温度的升高而降低。

2) 基于 Arrhenius 和 BP-ANN 模型, 分别构建了不同条件下的本构关系, 相比 Arrhenius, BP-ANN 模型预测精度更高, 更能准确描述非线性特征。

3) 利用 BP-ANN 模型获取的本构数据, 确定了适宜的热加工范围为 0.001~0.01 s<sup>-1</sup> 和 773~823 K, 建立的有限元模型可靠模拟了热压缩变形过程。

#### 参考文献

#### References

[1] Nadaraia K V, Suchkov S N, Imshinetskiy I M *et al. Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2023, 11(5): 1721

- [2] Zhang Yuxiu, Chen Dongliang, Wang Chunyu *et al. Journal of Materials Science*[J], 2022, 57: 22053
- [3] Zhou Shibo, Peng Peng, Zhang Jianyue *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 821: 141567
- [4] Bajikar V, Bhattacharyya J J, Peterson N *et al. JOM*[J], 2019, 71(6): 2040
- [5] Zhang Yuxiu, Zhang Zhirou, Wang Chunyu *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2023, 33(12): 3661
- [6] Zhang Dongdong, Pan Hucheng, Tang Weineng *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2023, 863: 144551
- [7] Liu Huaiyu, Zhu Suming, Abbott T B *et al. JOM*[J], 2022, 74(7): 2592
- [8] Zhang Y X, Chen D L, Nagaumi H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 857: 144083
- [9] Ma Zheng, Shu Xuedao, Xu Haijie *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2024, 1002: 175282
- [10] Hamedani H M, Tolaminejad B, Momeni A *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2024, 910: 146884
- [11] Huang Yao, Wang Yuqi, Yu Shanet *et al. Materials Today Communications*[J], 2024, 40: 109418
- [12] Yang Kaibo, Li Xiangji, Wang Jiahui *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 29: 5074
- [13] Zhang Yuxiu, Yang Xuyue. *Materials Today Communications*[J], 2024, 38: 107875
- [14] Chen Dongliang, Zhang Yuxiu, Zhang Zhirou *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 901: 163655
- [15] Zhao Chen, Jing Lei, Xu Bowen *et al. Materials Letters*[J], 2024, 368: 136695
- [16] Zhang Hongbin, Chen Shengchao, Huang Yilin *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2024, 999: 175047
- [17] Zheng Deyu, Xia Yufeng, Teng Haihao *et al. Journal of Central South University*[J], 2024, 31(3): 693
- [18] Hari K K, Davidson M J, Rajmohan K S *et al. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*[J], 2023, 237(1): 218
- [19] Wu Yiping, Jia Yuzhen, Zhang Sha *et al. Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2023, 11(8): 2891
- [20] Karimzadeh M, Malekan M, Mirzadeh H *et al. Intermetallics*[J], 2024, 168: 108240
- [21] Elaiyarsan U, Ananthi N, Sathiyamurthy S. *Bulletin of Materials Science*[J], 2024, 47(2): 109
- [22] Jeong H T, Kim W J. *Materials*[J], 2023, 16(3): 919
- [23] Liu Xiaoyan(刘晓燕), Li Shuaikang(李帅康), Yang Xirong(杨西荣). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(2): 409

## Hot Compression Deformation Behavior of Extruded Mg-Mn-Ce Alloy Based on Arrhenius and BP-ANN Models

Yang Yang<sup>1</sup>, Wang Weijun<sup>2</sup>, Yang Liu<sup>1</sup>, Peng Hao<sup>1</sup>, Jiang Hao<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China)

(2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science of Ministry of Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Hot compression tests were conducted on extruded Mg-Mn-Ce alloys under deformation temperatures of 723–873 K and strain rates of 0.0001–0.1 s<sup>-1</sup>. Based on the obtained true stress-strain curve, the influence of deformation temperature and strain rate on material flow stress was analyzed. A constitutive relationship was established based on Arrhenius and BP-ANN models, and its accuracy was evaluated. Using the constitutive data obtained from the BP-ANN model, a hot processing map was plotted and numerical simulations were conducted. The results indicate that as the deformation temperature increases and the strain rate decreases, the flow stress of the alloy decreases. The BP-ANN model established has higher prediction accuracy, with a correlation coefficient of 0.9990 and an average relative error of only 2.69%. The hot working range of the alloy should be selected within the range of 0.001–0.01 s<sup>-1</sup> and 773–823 K. The numerical simulation and experimental results are in good agreement and can be used to guide the thermoplastic forming of alloys.

**Key words:** Mg-Mn-Ce alloy; hot compression; constitutive relationship; hot processing map; numerical simulation

---

Corresponding author: Yang Liu, Ph. D., College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, P. R. China, E-mail: y14277@hevtc.edu.cn