

# 基于改进 Johnson-Cook 模型的 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金高温流变行为研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2021.05.010

刘畅<sup>1</sup> 陈小敏<sup>2</sup>  
陈书涵<sup>2</sup> 陈建兵<sup>1</sup>

1. 长沙理工大学  
创新创业教育学院  
湖南 长沙 410114
2. 长沙理工大学  
汽车与机械工程学院  
湖南 长沙 410114

**摘要:** 以 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金为研究对象, 分别在变形温度范围为 250~400 °C、应变速率范围为 0.001~1 s<sup>-1</sup> 的变形条件下, 利用 Gleeble-1500 热模拟试验机, 进行恒温等应变速率的热拉伸实验, 研究该合金的高温流变行为。综合考虑温度、应变速率和应变在高温变形过程中的影响, 建立了 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金改进的 Johnson-Cook 本构模型。实验结果表明: Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的流变应力与变形温度、应变速率和应变呈非线性关系, 应变速率的升高和变形温度的降低均会导致合金的流变应力明显升高。改进 Johnson-Cook 本构模型的预测数据与实验数据的平均相对误差 ( $\Delta$ ) 为 4.5%, 相关度 ( $R$ ) 为 0.994, 所建立的本构模型能够准确地描述 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的高温流变行为。

**关键词:** Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金; 流变行为; Johnson-Cook 模型

**中图分类号:** TG146.2      **文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2021)05-0068-07

**引文格式:** 刘畅, 陈小敏, 陈书涵, 等. 基于改进 Johnson-Cook 模型的 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金高温流变行为研究 [J]. 包装学报, 2021, 13(5): 68-74.

## 0 引言

镁合金以其较低的密度、优越的阻尼特性、较高的比强度等特点, 在航空航天、电子、交通运输等领域得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。镁合金的加工和强化主要依靠热塑性变形, 经过塑性加工后得到的变形镁合金, 其综合性能可以得到显著提升<sup>[3-5]</sup>。因此, 镁合金的热变形规律及其热加工工艺优化具有十分重要的研究价值。

本构模型是描述金属材料加工变形规律的一种

数学模型, 能够定量分析金属材料热变形的流动应力与各变形参数之间的关系<sup>[6-7]</sup>。根据模型建模思想的不同, 可将金属材料本构关系模型大致分为唯象学模型、物理基模型和人工神经网络模型<sup>[8]</sup>。在唯象学本构模型中, 较为常用的有 Zerilli-Armstrong (Z-A) 模型<sup>[9]</sup>、Arrhenius-Type 模型<sup>[10]</sup>和 Johnson-Cook 模型等。其中 Johnson-Cook 模型考虑了材料在实际加工过程中, 影响材料流动应力大小的 3 种主要因素, 因而得到了广泛的应用<sup>[11]</sup>。Lin Y. C. 等<sup>[12]</sup>通过单轴拉伸试验研究了一种高强合金的热变形行为, 并建立

收稿日期: 2021-07-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51905048)

作者简介: 刘畅 (1992-), 男, 河南信阳人, 长沙理工大学教师, 硕士, 主要研究方向为金属塑性成形工艺及组织性能调控, E-mail: liuc0823@163.com

了描述合金流变应力与应变速率以及变形温度关系的 Johnson-Cook 模型。Jia Z. 等<sup>[13]</sup>研究了 AA6016-T6 合金, 在  $0.001\sim 100\text{ s}^{-1}$  应变速率下的动态力学性能及断裂特征, 建立了反映应变速率影响的修正 Johnson-Cook 模型。A. Shokry 等<sup>[14]</sup>总结了不同动态加载条件下 4 种类别合金的应力-应变关系, 提出了一种改进的通用 Johnson-Cook 模型 (PMJC 模型), 并对模型的准确性进行了验证。改进的 Johnson-Cook 模型都是选取参考温度和应变速率下的应力-应变关系作为基准, 再综合考虑其它变形条件下的应力变化情况, 最后得到能够适用于所有变形参数下的流变应力本构方程<sup>[15]</sup>。因此, 改进的 Johnson-Cook 模型可以准确预测不同变形条件下各类金属的流变应力, 但应用于稀土镁合金热变形行为的研究较少。

本文以实验室制备的 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金为研究对象, 借助恒温等应变速率高温拉伸实验, 研究该合金的热变形行为。基于其不同变形条件下的真应力-真应变曲线, 建立了一种改进的 Johnson-Cook 模型, 以期为 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的加工工艺参数优化, 以及有限元数值模拟提供模型基础。

## 1 实验

### 1.1 实验材料与实验仪器

实验材料为 Mg-5.5Gd-4.4Y-1.1Zn-0.5Zr 合金, 由长沙理工大学实验室制备。

热模拟试验机, Gleeble-1500, 美国 DSI 公司。

### 1.2 实验过程

在  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度下将 Mg-5.5Gd-4.4Y-1.1Zn-0.5Zr 合金挤压成  $\Phi 400\text{ mm}$  的棒材, 并根据 ISO 783—1999《金属材料高温拉伸试验》标准, 加工成标准试样。利用 Gleeble-1500 热模拟试验机进行高温拉伸实验, 变形参数设置: 温度分别为  $250, 300, 350, 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 应变速率分别为  $0.001, 0.01, 0.1, 1\text{ s}^{-1}$ 。先将试样以  $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  的速率加热至所设置的拉伸实验温度, 保温  $3\text{ min}$  后开始加载; 将试样以恒定的温度和应变速率拉伸直到断裂。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 应力应变曲线分析

图 1 为高温拉伸实验得到的 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的真应力-真应变曲线。

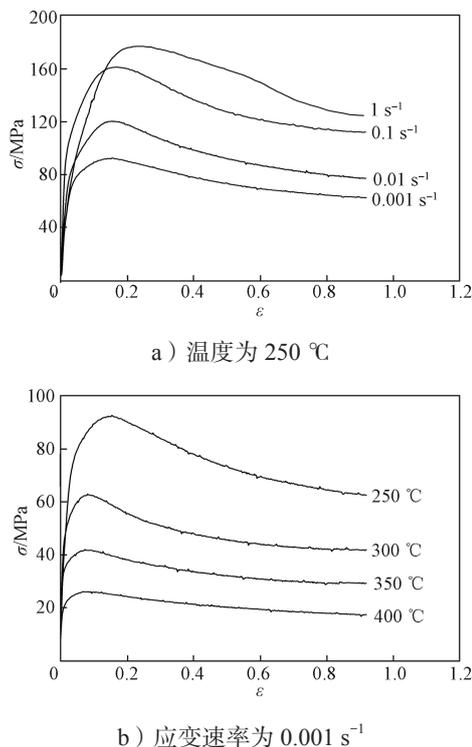


图 1 合金的真应力-真应变曲线

Fig. 1 True stress-true strain curve of the alloy

由图 1 可知, 分别在变形温度  $T=250\text{ }^{\circ}\text{C}$  以及应变速率  $\dot{\varepsilon}=0.001\text{ s}^{-1}$  的变形条件下, Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的流变应力曲线全部呈现出大致相同的变化趋势, 应变、变形温度和应变速率均显著影响流变应力的大小。在变形初始阶段, 受加工硬化作用的影响, 合金的流变应力快速增大; 随着应变的增加, 累积的变形储能加快了动态再结晶的进行, 导致流变应力在达到峰值之后趋于稳定。各变形条件下的流变曲线均在应变  $\varepsilon=0.2$  之后进入流变稳态阶段。由于本构方程描述的是材料在稳态流变阶段的流变应力与温度、应变速率等因素的关系, 因此本文选取应变  $\varepsilon$  在  $0.2\sim 0.8$  范围内的实验数据作为建模依据。

### 2.2 Johnson-Cook 模型

Johnson-Cook 模型认为在金属材料塑性变形过程中, 其流变应力的大小主要受应变速率硬化、应变硬化与热软化的影响。因此, 该模型将应变速率、应变和变形温度 3 种参数分别引入到方程中, 其形式为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为流变应力;  $A$  为材料在参考应变速率和变形温度下的屈服应力;  $B$ 、 $n$  分别为材料的应变硬化系数和应变硬化指数;  $C$ 、 $m$  均为无实际物理意义的

材料常数;  $\varepsilon$  为应变;  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ , 其中  $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\varepsilon}_0$  分别为应变速率和参考应变速率;  $T^* = (T - T_{ref}) / (T_m - T_{ref})$ , 其中  $T$ 、 $T_{ref}$ 、 $T_m$  分别为变形温度、参考变形温度和材料的熔化温度。

原始的 Johnson-Cook 模型 (式 (1)) 参数较少, 且都具有明确的物理意义, 计算方便。但原始的 Johnson-Cook 模型仅能在参考应变率和参考温度下才显示出良好的预测结果。其主要原因是原始模型假设了应变硬化、应变速率硬化和热软化是 3 个不相关的因素, 忽略了应变、应变速率和变形温度之间的相互影响。

### 2.3 改进的 Johnson-Cook 模型

基于原始的 Johnson-Cook 模型, 并针对材料热塑性变形过程中温度、应变速率与应变 3 种影响因素的耦合效应, 对模型进行改进。改进后的模型为

$$\sigma = (A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \exp\left[(\lambda_1 + \lambda_2 \ln \dot{\varepsilon}^*)(T - T_{ref})\right], \quad (2)$$

式中  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $C$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  均为无实际物理意义的材料常数。

分别选取 250 °C (523 K) 和 0.001 s<sup>-1</sup> 作为改进的 Johnson-Cook 模型的参考变形温度和参考应变速率。当变形温度和应变速率均取参考值时, 可以将式 (2) 改写为

$$\sigma = A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3. \quad (3)$$

通过对参考温度和参考应变速率下的应变、应力值进行多项式拟合, 可求得拟合曲线各项的系数, 即为模型 (3) 各参数  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  的值, 如图 2 所示。

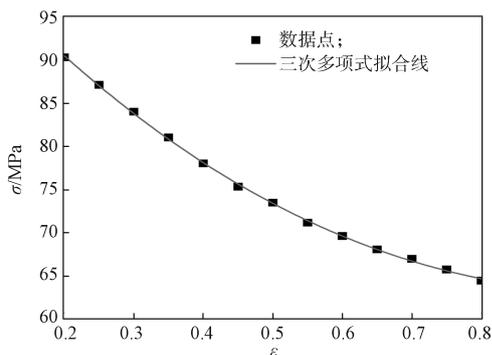


图 2 参考温度和参考应变速率下流变曲线的多项式拟合  
Fig. 2 Polynomial fitting of rheological curves at reference temperature and reference strain rate

当  $T=250$  °C (523 K) 时, 式 (2) 改写为

$$\frac{\sigma}{(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)} = (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*). \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 当  $T=250$  °C (523 K), 应变  $\varepsilon=0.2\sim 0.8$  时,  $C$  值可以通过  $\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)$  与  $\ln \dot{\varepsilon}^*$  线性拟合求得, 如图 3 所示。

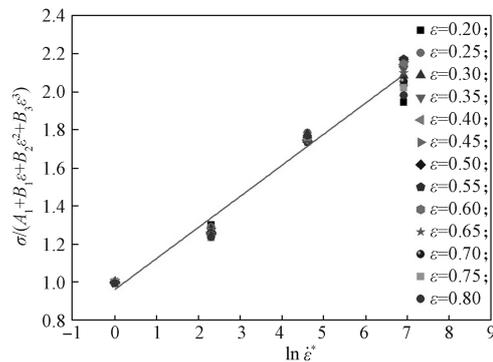


图 3 参考变形温度下  $\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)$  与  $\ln \dot{\varepsilon}^*$  的线性关系

Fig. 3 The linear relationship between  $\sigma/(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)$  and  $\ln \dot{\varepsilon}^*$  at the reference deformation temperature

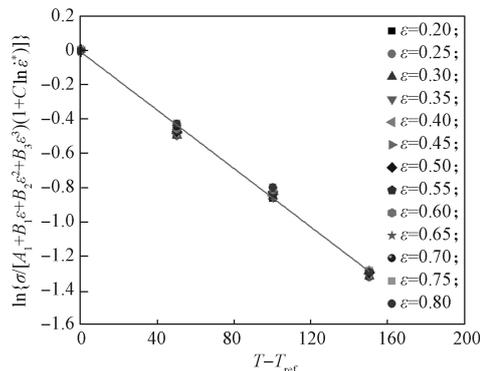
令  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 \ln \dot{\varepsilon}^*$ ,  $\lambda$  是与应变速率相关的材料常数, 对于给定的应变速率,  $\lambda$  可以被看作是一个定值。式 (2) 可改写为

$$\frac{\sigma}{(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)} = e^{\lambda(T - T_{ref})}. \quad (5)$$

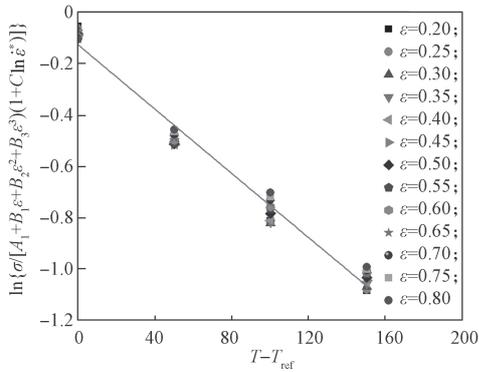
对式 (5) 两边取自然对数得

$$\ln \left[ \frac{\sigma}{(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)} \right] = \lambda(T - T_{ref}). \quad (6)$$

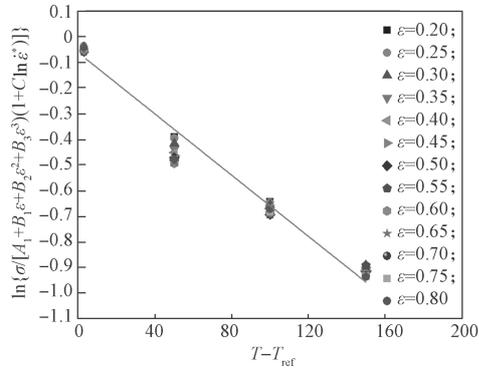
根据实验数据, 本文可以得到不同应变速率下,  $\ln \{ \sigma / [(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)] \}$  与  $T - T_{ref}$  的数据点, 并将其进行线性拟合, 结果如图 4 所示。



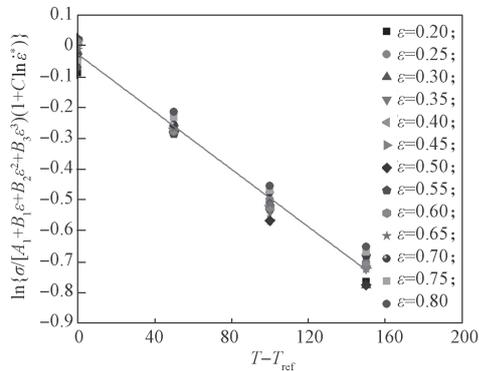
a) 应变速率  $\dot{\varepsilon} = 0.001$  s<sup>-1</sup>



b) 应变速率  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$



c) 应变速率  $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$



d) 应变速率  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

图 4 不同应变速率下  $\ln\{\sigma / [(A_1 + B_1\epsilon + B_2\epsilon^2 + B_3\epsilon^3) \cdot (1 + C\ln \dot{\epsilon}^*)]\}$  与  $T - T_{ref}$  的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between  $\ln\{\sigma / [(A_1 + B_1\epsilon + B_2\epsilon^2 + B_3\epsilon^3) \cdot (1 + C\ln \dot{\epsilon}^*)]\}$  and  $T - T_{ref}$  at different strain rates

根据图 4 中的线性拟合关系, 可以得到应变速率分别为 0.001, 0.01, 0.1,  $1 \text{ s}^{-1}$  时模型 (6) 中参数  $\lambda$  的值, 结果如表 1 所示。

根据表 1 中的数据描点, 并进行线性拟合, 结果如图 5 所示。根据  $\lambda$  与  $\ln \dot{\epsilon}^*$  的拟合直线, 可计算出

$\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的值。

表 1 不同应变速率下参数的取值  
Table 1 Values of parameter under different strain rates

参数	$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$			
	0.001	0.01	0.1	1
$\ln \dot{\epsilon}^*$	0	2.303	4.605	6.908
$\lambda$	-0.008 52	-0.006 57	-0.005 96	-0.004 66

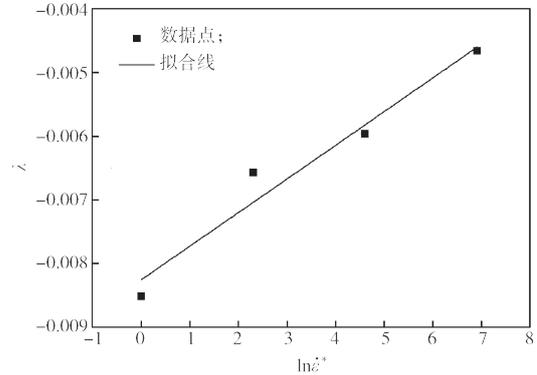


图 5  $\lambda$  与  $\ln \dot{\epsilon}^*$  的关系

Fig. 5 The relationship between  $\lambda$  and  $\ln \dot{\epsilon}^*$

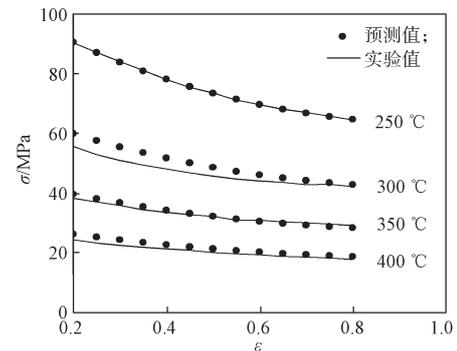
综上所述, 可求得改进 Johnson-Cook 模型 (式 (2)) 的参数, 如表 2 所示。

表 2 改进 Johnson-Cook 模型的参数值  
Table 2 The parameter values of improved

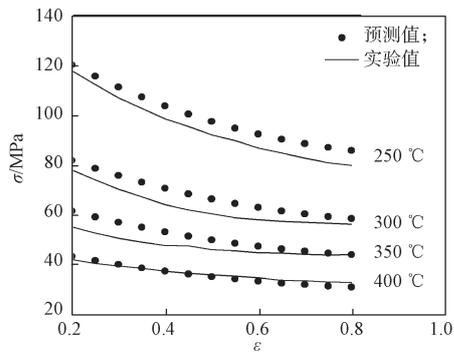
参数	$A_1$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$C$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
取值	107.07	-93.814	56.198	-6.441	0.163 21	-0.008 26	0.000 529

## 2.4 模型预测精度分析

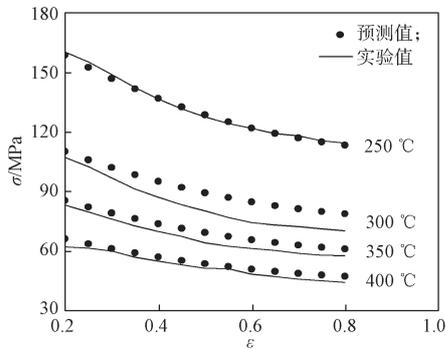
不同变形条件下, Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的流变应力, 即改进 Johnson-Cook 模型的预测值与实验值, 如图 6 所示。



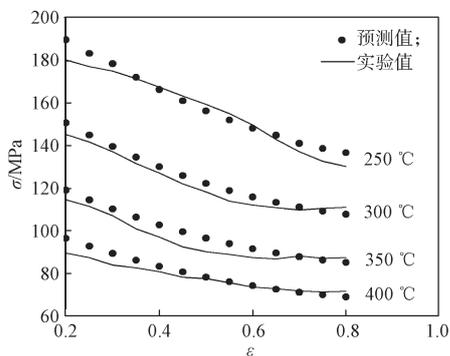
a) 应变速率  $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$



b) 应变速率  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$



c) 应变速率  $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$



d) 应变速率  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

图 6 不同变形条件下合金的流变应力模型预测值与实验值比较

Fig. 6 Comparison of predicted value and experimental value of alloy flow stress under different deformation conditions

为了进一步评估改进模型的预测精度，特引入相关度 ( $R$ ) 和平均相对误差 ( $\Delta$ ) 来定量分析<sup>[16]</sup>。相关度作为反映变量之间线性相关程度的指标，在这里用来表示改进模型预测值与实验值之间的符合程度。相关度高不一定表明预测值与实验值吻合准确，还有可能出现数值的偏离。平均相对误差指相对误差的平

均值，在这里用来表示模型预测值与实验值的偏离程度。

相关度和平均相对误差的数学表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} R &= \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{exp}}^i - \bar{\sigma}_{\text{exp}})(\sigma_{\text{p}}^i - \bar{\sigma}_{\text{p}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{exp}}^i - \bar{\sigma}_{\text{exp}})^2 \sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{p}}^i - \bar{\sigma}_{\text{p}})^2}}, \\ \Delta &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_{\text{exp}}^i - \sigma_{\text{p}}^i}{\sigma_{\text{exp}}^i} \right| \times 100\% \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中： $\sigma_{\text{exp}}$  为热拉伸实验得到的流变应力值；

$\sigma_{\text{p}}$  为改进 Johnson-Cook 模型的预测值；

$\bar{\sigma}_{\text{exp}}$ 、 $\bar{\sigma}_{\text{p}}$  分别为  $\sigma_{\text{exp}}$ 、 $\sigma_{\text{p}}$  的平均值；

$N$  为选取的观测点数量。

将不同变形条件下的预测值与实验值代入式 (7)，并将二者在 Origin 软件中进行比较分析，所得结果如图 7 所示。

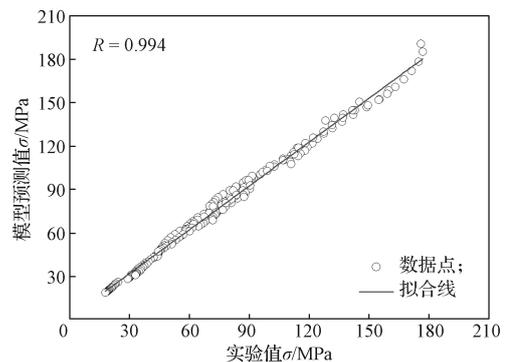


图 7 改进模型的预测值与实验值的相关度

Fig. 7 The correlation between the predicted value of the improved model and the experimental value

通过计算可得，改进 Johnson-Cook 模型的预测值与实验值的相关度为 0.994，平均相对误差为 4.5%，这表明该模型能够准确预测 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金不同变形条件下的流变应力。

### 3 结论

综上所述，可得如下结论：

1) 在 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金高温变形过程中，应变速率的升高和变形温度的降低均会导致合金的流变应力明显升高。合金流变曲线显示出典型的动态再结晶软化机制，且在较高的变形温度 (350, 400 °C)

及较低的应变速率 ( $0.001, 0.01 \text{ s}^{-1}$ ) 下, 动态再结晶软化效果明显。

2) 基于实验得到的流变曲线, 并综合考虑了热软化、应变速率硬化和应变硬化 3 种因素的影响, 建立了 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金改进的 Johnson-Cook 模型。将改进模型的预测值与实验值进行对比, 可知模型预测值与实验值的相关度 ( $R$ ) 达到了 0.994, 平均相对误差 ( $\Delta$ ) 只有 4.5%, 表明模型的精度较高, 能够准确地描述和预测 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的高温流变应力。

#### 参考文献:

- [1] YU Z J, HUANG Y D, QIU X, et al. Fabrication of a High Strength Mg-11Gd-4.5Y-1Nd-1.5Zn-0.5Zr (wt%) Alloy by Thermomechanical Treatments[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 622: 121-130.
- [2] ZHOU X J, LIU C M, GAO Y H, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloys Filled with Intragranular LPSO Phases[J]. Materials Characterization, 2018, 135: 76-83.
- [3] SUN W T, QIAO X G, ZHENG M Y, et al. Achieving Ultra-High Hardness of Nanostructured Mg-8.2Gd-3.2Y-1.0Zn-0.4Zr Alloy Produced by a Combination of High Pressure Torsion and Ageing Treatment[J]. Scripta Materialia, 2018, 155: 21-25.
- [4] 王振东, 房灿峰, 孟令刚, 等. 高强 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的微观组织和力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(1): 1-6.  
WANG Zhendong, FANG Canfeng, MENG Linggang, et al. Microstructures and Mechanical Properties of High-Strength Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(1): 1-6.
- [5] 刘良春, 黄元春, 雒晓宇, 等. 均匀化处理对 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44(4): 132-140.  
LIU Liangchun, HUANG Yuanchun, LUO Xiaoyu, et al. Effect of Homogenization on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloys[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(4): 132-140.
- [6] 张宏轩. Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金热变形机理及动态再结晶模型 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.  
ZHANG Hongxuan. Research on Hot Deformation Mechanisms and Dynamic Recrystallization Model of Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [7] PENG W W, ZENG W D, WANG Q J, et al. Comparative Study on Constitutive Relationship of as-Cast Ti60 Titanium Alloy During Hot Deformation Based on Arrhenius-Type and Artificial Neural Network Models[J]. Materials & Design, 2013, 51: 95-104.
- [8] LIN Y C, CHEN X M. A Critical Review of Experimental Results and Constitutive Descriptions for Metals and Alloys in Hot Working[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 1733-1759.
- [9] HE A, XIE G L, ZHANG H L, et al. A Modified Zerilli-Armstrong Constitutive Model to Predict Hot Deformation Behavior of 20CrMo Alloy Steel[J]. Materials & Design, 2014, 56: 122-127.
- [10] ZHOU M, LIN Y C, DENG J, et al. Hot Tensile Deformation Behaviors and Constitutive Model of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Materials & Design, 2014, 59: 141-150.
- [11] LI H Y, WANG X F, DUAN J Y, et al. A Modified Johnson Cook Model for Elevated Temperature Flow Behavior of T24 Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 577: 138-146.
- [12] LIN Y C, CHEN X M, LIU G. A Modified Johnson-Cook Model for Tensile Behaviors of Typical High-Strength Alloy Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(26): 6980-6986.
- [13] JIA Z, GUAN B, ZANG Y, et al. Modified Johnson-Cook Model of Aluminum Alloy 6016-T6 Sheets at Low Dynamic Strain Rates[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 820: 141565.
- [14] SHOKRY A, GOWID S, KHARMANDA G. An Improved Generic Johnson-Cook Model for the Flow Prediction of Different Categories of Alloys at Elevated Temperatures and Dynamic Loading Conditions[J]. Materials Today Communications, 2021, 27: 102296.
- [15] GAMBIRASIO L, RIZZI E. On the Calibration Strategies of the Johnson-Cook Strength Model: Discussion and Applications to Experimental Data[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 610: 370-413.
- [16] ABBASI-BANI A, ZAREI-HANZAKI A, PISHBIN M H, et al. A Comparative Study on the Capability of Johnson-Cook and Arrhenius-Type Constitutive Equations to Describe the Flow Behavior of Mg-6Al-1Zn Alloy[J]. Mechanics of Materials, 2014, 71: 52-61.

(责任编辑: 邓光辉)

## Research on High Temperature Rheological Behavior of Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloy Based on Improved Johnson-Cook Model

LIU Chang<sup>1</sup>, CHEN Xiaomin<sup>2</sup>, CHEN Shuhan<sup>2</sup>, CHEN Jianbing<sup>1</sup>

( 1. School of Innovation and Entrepreneurship Education, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China )

**Abstract:** In order to study the high-temperature rheological behavior of Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy, hot tensile tests were carried out on Gleeble-1500 thermal simulation testing machine at deformation temperature of 250~400 °C and strain rate of 0.001~1 s<sup>-1</sup>. Considering the effects of temperature, strain rate and strain in the high-temperature deformation process, an improved Johnson-Cook constitutive model of Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy was established. The experimental results showed that the flow stress of the Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy had a nonlinear relationship with the deformation temperature, strain rate, and strain. The increase of the strain rate and the decrease of the deformation temperature would cause the flow stress of the alloy to increase significantly. The average relative error ( $\Delta$ ) between the predicted data of the improved Johnson-Cook constitutive model and experimental data was 4.5%, and the correlation ( $R$ ) was 0.994. The established constitutive model could accurately describe high temperature rheological behavior of Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy.

**Keywords:** Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy; rheological behavior; Johnson-Cook model

.....

(上接第 67 页)

## Cushioning Packaging Design and Mechanical Property Simulation Analysis of Printer

CHANG Jiang

( College of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China )

**Abstract:** In order to study the mechanical properties and buffering effect of pulp molding materials on printer during storage and transportation, the printer buffer unit was designed. Based on the technical parameters of the printer, the mechanical properties of static stacking and dynamic impact of the printer buffer unit were simulated and analyzed by using finite element analysis software. The results showed that with 744.8 N static load applied on the printer stacking unit, the maximum static stress appeared on the corrugated box as being 0.47 MPa, less than the limit stress of 2.38 MPa. When the printer buffer unit fell in angular contact, the maximum equivalent stress of the printer buffer unit was 6.25 MPa, exceeding its limit stress, while the maximum stresses of the lower pad and the printer were 0.38 MPa and 0.11 MPa respectively, less than the limit stresses of pulp molding materials and ABS of 2.00 MPa and 49.00 MPa. The corrugated box absorbed the energy generated in the impact process and played a good role in protecting the contents. Therefore, the cushion pad designed by pulp molding could protect the printer, improve the safety in storage and transportation, and more importantly, it conformed to the green packaging design concept of sustainable development.

**Keywords:** printer; pulp molding; cushion; static stacking; drop simulation