2021 年 8 月 August 2021

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39786

采用改进和优化的 Zerilli-Armstrong 本构模型预测 AZ80 镁合金的高温流动应力



李 全,金朝阳

(扬州大学 机械工程学院, 扬州 225127)

摘 要: 合理的本构模型是实现精确模拟镁合金挤压过程的关键,基于均匀化态 AZ80 镁合金在应变速率 0.001~1 s⁻¹、变形温度 523~673 K 下的热压缩实验数据,建立了改进的 Z-A 模型来描述 AZ80 镁合金的热变 形行为,并在此基础上,通过考虑应变对材料参数的影响,提出优化的 Z-A 模型。对两种模型预测精度进 行定量分析表明:优化的 Z-A 模型对流动应力的预测效果较好,相关系数 R 和平均绝对相对误差 E_{AR}的计 算值分别为 0.9962 和 3.60%;改进的 Z-A 模型的预测结果相对较差,其 R 值和 E_{AR}值分别为 0.94 和 8%。比较分析表明,优化的 Z-A 模型具有良好的适应性,可以在整个应变范围内(0~0.9)很好地预测不同变形条 件下的流动应力,因而工程适用范围广;改进的 Z-A 模型不能描述加工硬化-动态回复阶段的流动应力,因

关键词: AZ80 镁合金; 流动应力; 本构模型; Zerilli-Armstrong 模型 文章编号: 1004-0609(2021)-08-2091-10 中图分类号: TG146.2 文献标志码: A

引文格式: 李 全,金朝阳. 采用改进和优化的 Zerilli-Armstrong 本构模型预测 AZ80 镁合金的高温流动应 力[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(8): 2091-2100. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39786 LI Quan, JIN Zhao-yang. Prediction of high temperature flow stress of AZ80 magnesium alloy by using modified and optimized Zerilli-Armstrong constitutive models [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(8): 2091-2100. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39786

镁合金作为最轻的金属结构材料,具有密度 低、比强度和比刚度高、可加工性和尺寸稳定性好、 易于回收利用等优点,在航空航天,汽车和电子行 业具有广阔的应用前景^[1]。在传统的 Mg-Al-Zn 镁 合金中,AZ80 镁合金因其较高的强度和优异的力 学而得到广泛的应用。然而,镁合金由于其密排六 方(HCP)的晶体结构,滑移系较少,导致其延展性 和室温塑形加工性较差^[2],其变形通常是在高温下 进行的。因此,选用合适的数学模型对镁合金的高 温变形行为进行预测,对于掌握镁合金的热变形规 律,进行材料的成形设计和性能研究等具有重要的 理论意义和工程应用价值^[3]。 目前,已经提出了多种本构模型来描述材料的 流动行为,LIN等^[4]将其分为:唯象型模型^[5-6]、物 理基模型^[7-9]和人工神经网络(ANN)模型^[10-11]三 类。

其中,唯象型模型由于其形式简单,建模过程 不需要考虑热变形过程的物理意义,因而应用最为 广泛^[4];而物理基模型由于其高精度而用于描述多 种材料的流动行为。与其他位错基的物理基本构模 型相比,Z-A 模型的表达式相对简单,计算效率和 精度相对较高,该模型的主要特点是针对特定结构 应变速率控制机制的不同,不同结构类型的材料会 有不同的表达式^[12]。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51901202);江苏省自然科学基金面上项目(BK20191442) 收稿日期:2020-09-12;修订日期:2021-01-15 通信作者:金朝阳,教授,博士;电话:+86-15105271009; E-mail: zyjin@yzu.edu.cn 然而, 原始的 Z-A 模型只考虑了应变和温度的 耦合效应^[13-14], 仅可用来分析在不同应变速率下, 室温至 0.6*T*_m (*T*_m 是熔点)之间不同面心立方(FCC) 和体心立方(BCC)材料的热变形行为^[15-16], 应用范 围较窄。而改进的 Z-A 模型^[8, 17]考虑了应变速率与 温度以及应变与温度间的双重耦合效应,可以在更 大的应变, 应变速率和温度范围内预测 0.6*T*_m以上 材料的高温流动行为。

因此,本文建立了改进的Z-A模型来描述AZ80 镁合金的热压缩流动行为,并在此基础上,考虑了 应变对材料参数的影响,提出了优化的Z-A模型。 在实验研究范围内,采用相关系数R和平均绝对相 对误差 *E*_{AR}定量比较了改进的和优化的Z-A模型的 预测精度,并讨论了两种模型的优缺点和适用性, 为 AZ80 镁合金热变形过程选用合适的本构模型进 行模拟仿真和工艺优化奠定了理论基础。

1 实验

本文采用铸态 AZ80 镁合金,其化学组成如表 1 所示。为了减少残余应力和不均匀变形,在热压 缩实验前对铸态 AZ80 镁合金进行均匀化处理。试 样在 400 ℃下保温 12 h 以消除第二相和树枝晶结 构。热压缩试样为直径 8 mm×12 mm 的圆柱形试 样,试样表面光滑,两端面平行。热压缩实验在 Gleeble-3500D 型热模拟试验机上进行,变形温度 为 523 K、573 K、623 K、673 K,应变速率为 0.001 s⁻¹、0.01 s⁻¹、0.1 s⁻¹、1 s⁻¹。热压缩试样以 5 K/s 的升温速率加热至规定温度,然后在该温度下保温 180 s,得到温度均匀的试样,试样的压缩量为 60%。 通过系统自动采集实验数据,利用 Origin 软件可以 绘制出热压缩真应力-应变曲线。

表1 AZ80 镁合金的化学成分

Table 1Chemical compositions of AZ80 alloy (massfraction, %)

Al	Zn	Mn	Si
8.36	0.524	0.385	0.076
Fe	Ni	Cu	Mg
0.005	0.006	0.003	Bal.

2 实验结果

AZ80 镁合金的真应力-真应变曲线如图 1 所示。由图 1 可知,流动应力曲线表现出明显的动态 再结晶(DRX)软化特征,特别是高温和低应变速率 下,出现了峰值应力后的稳态流动现象,表明 DRX 是主要的软化机制^[18-19]。根据热变形特征,可将流 动应力曲线分为加工硬化-动态回复阶段、动态软 化和稳态变形三个阶段。在加工硬化阶段,由于位 错的增殖,堆积和缠结,流动应力随应变的增加而 迅速增加。随着应变的增加,位错和塑性变形能为 动态回复和动态再结晶提供驱动力,有利于位错的 湮灭和重排,所以流动应力开始缓慢增加,直到应 力峰值。在稳态变形阶段,加工硬化和动态软化作 用达到动态平衡,流动应力趋于稳定。

3 本构模型的建立

3.1 改进的 Zerilli-Armstrong 模型

原始的 Z-A 模型考虑了位错机制,但未考虑变 形条件的影响,与实际情况不符,从而大大降低了 模型的预测精度^[4]。SAMANTARAY 等^[20]提出了改 进的 Z-A 模型来预测高温变形过程中的流动应力, 模型考虑了应变速率和温度之间的相互作用,改进 的 Z-A 模型表示为

 $\sigma = (a_1 + a_2 \varepsilon^{n_1}) \exp[-(a_3 + a_4 \varepsilon)T^* + (a_5 + a_6 T^*)\ln \dot{\varepsilon}^*]$ (1)

因此,本文基于上述改进的 Z-A 模型来预测 AZ80 镁合金的高温流动应力。其中, σ 是应力, ε 是应变, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_r$ 是无量纲的塑性应变速率, $\dot{\varepsilon}_r$ 是 参考应变速率; $T^* = T - T_{ref}$, T_{ref} 是参考温度。本 文中,参考温度和应变速率设置为 523 K 和 0.001 s⁻¹。 a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6 和 n_1 为材料常数, a_1 等于参考温度和应变速率下的屈服应力,其值为 15 MPa。该模型综合考虑了应变硬化、应变率硬化和 热软化对金属材料热变形行为的影响。对式(1)两边 取自然对数,得到:

$$\ln \sigma = \ln(a_1 + a_2 \varepsilon^{n_1}) - (a_3 + a_4 \varepsilon)T^* + (a_5 + a_6 T^*)\ln \dot{\varepsilon}^*$$
(2)

当应变速率等于 *ɛ*, 时,式(2)可简化为



Fig. 1 True stress-strain curves of AZ80 magnesium alloy: (a) $\dot{\varepsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\varepsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\varepsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$; (d) $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

$$\ln \sigma = \ln(a_1 + a_2 \varepsilon^m) - (a_3 + a_4 \varepsilon)T^*$$
(3)

在不同温度下,选用 ε =0.05~0.9(间隔 0.05)的 18 组应变和对应的应力值来描述 $\ln \sigma$ 和 T^* 之间的 关系。如图 2 所示,可以得到不同应变下的斜率 S_1



图 2 不同应变下 $\ln \sigma = T^*$ 之间的关系

Fig. 2 Relationship between $\ln \sigma$ and T^* at different strains

和截距 I_1 值,分别等于 $-(a_3 + a_4 \varepsilon)$ 和 $\ln(a_1 + a_2 \varepsilon^m)$,表示如下:

$$I_1 = \ln(a_1 + a_2 \varepsilon^{n_1}) \tag{4}$$

$$S_1 = -(a_3 + a_4\varepsilon) \tag{5}$$

由图 2,可以计算出 18 组应变下的 S₁ 和 I₁值, 如表 2 所示。

将式(4)重新排列,可得式(6)。根据不同应变下的 I_1 值,可以建立 $\ln(\exp I_1 - a_1)$ 和 $\ln \varepsilon$ 之间的关系。 如图 3 所示, $\ln a_2$ 和 n_1 分别等于拟合线的截距和斜率。经计算,得到 a_2 和 n_1 的值分别为 67.36 和 -0.172。

$$\ln(\exp I_1 - a_1) = \ln a_2 + n_1 \ln \varepsilon \tag{6}$$

图 4 所示为 S₁和 *ε*之间的关系。由图 4 可知, *a*₃和 *a*₄分别等于拟合线的截距和斜率,其值分别为 0.0088 和 0.0018。

类似图 2, 根据式(2), 可以得到在 4 组温度

2094

表2 不同应变下的 S₁和 I₁值

Table 2	Values of S_1 and I_1 for 18 s	trains
Strain	n S_1	I_1
0.05	-0.00618	4.5389
0.10	-0.00815	4.7098
0.15	-0.00925	4.7834
0.20	-0.00989	4.7963
0.25	-0.01025	4.7719
0.30	-0.01028	4.7296
0.35	-0.01015	4.6817
0.40	-0.01011	4.6341
0.45	-0.01015	4.5891
0.50	-0.01015	4.5481
0.55	-0.01004	4.5108
0.60	-0.00995	4.4753
0.65	-0.00995	4.4404
0.70	-0.00994	4.4068
0.75	-0.00980	4.3758
0.80	-0.00976	4.347
0.85	-0.00993	4.3209
0.90	-0.00974	4.2876





Fig. 3 Relationship between $\ln(\exp I_1 - a_1)$ and $\ln \varepsilon$

(523 K、573 K、623 K、673 K)和 18 组应变下 $\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}^*$ 之间的关系。同样,不同应变下的($a_5 + a_6 T^*$) 值等于拟合线的斜率 S_2 ,表示如下:

$$S_2 = a_5 + a_6 T^*$$
 (7)

因此, a_5 和 a_6 的值可以由 S_2 与 T^* 的关系得到。 如图 5 所示,为72 组 S_2 值与 T^* 的关系图, a_5 和 a_6 分别等于不同应变下拟合线的斜率和截距,其值如 表 3 所示。



图4 *S*₁与ε之间的关系

Fig. 4 Relationship between S_1 and ε



Fig. 5 Relationship between S_2 and T^* at different strains

表3 不同应变下的 a₆和 a₆值

Table 3 Values of a_5 and a_6 at different strains

Strain	a_5	<i>a</i> ₆
0.05	0.02683	0.0005002
0.10	0.05134	0.0006212
0.15	0.06549	0.0006906
0.20	0.06933	0.0007499
0.25	0.07138	0.0007794
0.30	0.0739	0.0007712
0.35	0.0763	0.0007493
0.40	0.07879	0.0007346
0.45	0.08183	0.0007232
0.50	0.08496	0.000699
0.55	0.08733	0.0006604
0.60	0.08885	0.0006272
0.65	0.09017	0.0006115
0.70	0.09159	0.0005967
0.75	0.09226	0.0005703
0.80	0.0917	0.0005691
0.85	0.09119	0.0005941
0.90	0.09233	0.0005706

通过最小化平均绝对相对误差 *E*_{AR} 的方法来确 定最适的 *a*₅和 *a*₆值。最终确定,取应变为 0.55 条 件下的 *a*₅和 *a*₆值,分别为 0.08733 和 0.00066 时, 计算的 *E*_{AR}值最小,为 8%,相应的 *R* 值为 0.94。

最后,将计算得到的材料常数代入式(1)中,建 立 AZ80 镁合金改进的 Z-A 模型如下,模型预测结 果如图 6 所示。

$$\sigma = (15 + 67.36\varepsilon^{-0.172}) \exp[-(0.0088 + 0.0018\varepsilon)T^* + (0.08733 + 0.00066T^*)\ln\dot{\varepsilon}^*]$$
(8)

3.2 优化的 Zerilli-Armstrong 模型

改进的Z-A模型仅可以较好地预测出峰值应力 后材料的流动软化行为,但不能预测出加工硬化-动态回复阶段材料的流动应力。结合 3.1 节的建模 过程,由表 2 和 3 可以看出,材料参数 *I*₁、*S*₁、*a*₅、 *a*₆的值随应变的变化而变化,而改进的 Z-A 模型未 将应变对材料参数的影响考虑在内,故一定程度上 降低了模型的预测精度。

为了更准确地描述材料的热变形行为,需要考虑应变对材料参数的影响。本文中,将本构方程中的材料参数 *I*₁、*S*₁、*a*₅、*a*₆表达为关于应变的高阶 多项式函数。在 0~0.9 的应变范围内,以 0.05 为应 变间隔,采用多项式函数来描述材料参数 *I*₁、*S*₁、 *a*₅、*a*₆与应变之间的关系,并在此基础上得到了优 化的 Z-A 模型,具体如下。

1) 由表 2 可以看出, I_1 值随应变的变化而变 化, 而图 3 中采用线性拟合不能较好的表示 $\ln(\exp I_1 - a_1) 和 \ln \varepsilon$ 之间的关系, 故本文采用五阶 多项式拟合来表示两者间的关系, 如图 7 所示。

因此, $exp I_1$ 可以表示为关于应变的五阶多项 式函数,两者间关系如图 8 所示。

$$\exp I_1 = b_1 + b_2 \varepsilon + b_3 \varepsilon^2 + b_4 \varepsilon^3 + b_5 \varepsilon^4 + b_6 \varepsilon^5 \tag{9}$$

式(9)中拟合多项式的系数 b1、b2、b3、b4、b5、 b6分别为 62.41、790.7、-3668、7028、-6274、2138。



图 6 改进的 Z-A 模型预测值与实验值的比较

Fig. 6 Comparison between experimental and predicted flow stress using modified Z-A model: (a) $\dot{\varepsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\varepsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\varepsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$; (d) $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$









图 8 $expI_1 与 \varepsilon$ 之间的关系 Fig. 8 Relationship between $expI_1$ and ε

2)同样地,S₁值也随应变的变化而变化,图4 中采用线性拟合不能较好的表示 S₁和 ε 之间的关 系,故采用五阶多项式拟合来表示两者之间的关 系,如图9所示。



图 9 $S_1 \subseteq \varepsilon$ 之间的关系 **Fig. 9** Relationship between S_1 and ε

综上所述, S_1 可表示为 ε 的五阶多项式函数, 如下:

$$S_1 = d_1 + d_2\varepsilon + d_3\varepsilon^2 + d_4\varepsilon^3 + d_5\varepsilon^4 + d_6\varepsilon^5$$
(10)

等式(10)中拟合多项式系数 d₁、d₂、d₃、d₄、d₅、 d₆分别为-0.003、-0.072、0.280、-0.513、0.453、 -0.15。

由表 3 可以看出, a₅和 a₆的值随应变的变化而变化。因此,分别绘制 a₅与 ε 和 a₆与 ε 的关系图,如图 10(a)和(b)所示。采用五阶多项式可以较好的拟合 a₅与 ε、a₆与 ε 之间的关系。





综上所述, *a*₅和 *a*₆可以表示为关于应变 *ε* 的五 阶多项式函数, 如下:

$$a_{5} = e_{1} + e_{2}\varepsilon + e_{3}\varepsilon^{2} + e_{4}\varepsilon^{3} + e_{5}\varepsilon^{4} + e_{6}\varepsilon^{5}$$
(11)

$$a_{6} = f_{1} + f_{2}\varepsilon + f_{3}\varepsilon^{2} + f_{4}\varepsilon^{3} + f_{5}\varepsilon^{4} + f_{6}\varepsilon^{5}$$
(12)

式(11)和(12)中拟合多项式的系数 e1、e2、e3、

*e*₄、*e*₅、*e*₆值分别为-0.011、0.9611、-4.31、9.38、 -9.47、3.58; *f*₁、*f*₂、*f*₃、*f*₄、*f*₅、*f*₆值分别为 0.00033、 0.0037、-0.011、0.1159、-0.0047、0.0004。

最后,将 *S*₁、*I*₁、*a*₅和 *a*₆的表达式代入改进的 Z-A 模型的表达式(1)中,得到 AZ80 镁合金优化的 Z-A 模型如下,模型预测结果如图 11 所示。

$$\begin{cases} \sigma = \exp[I_1 + S_1 T^* + (a_5 + a_6 T^*) \ln \dot{\varepsilon}^*] \\ I_1 = \ln(b_1 + b_2 \varepsilon + b_3 \varepsilon^2 + b_4 \varepsilon^3 + b_5 \varepsilon^4 + b_6 \varepsilon^5) \\ S_1 = d_1 + d_2 \varepsilon + d_3 \varepsilon^2 + d_4 \varepsilon^3 + d_5 \varepsilon^4 + d_6 \varepsilon^5 \\ a_5 = e_1 + e_2 \varepsilon + e_3 \varepsilon^2 + e_4 \varepsilon^3 + e_5 \varepsilon^4 + e_6 \varepsilon^5 \\ a_6 = f_1 + f_2 \varepsilon + f_3 \varepsilon^2 + f_4 \varepsilon^3 + f_5 \varepsilon^4 + f_6 \varepsilon^5 \end{cases}$$
(13)

3.3 模型的验证及比较分析

从图 11 可以看出,优化后的 Z-A 模型不仅在 加工硬化-动态回复阶段,而且在流动软化阶段均 可以较好的预测材料的高温流动应力。为了进一步 定量评估优化的 Z-A 模型的预测精度,本文采用相关系数 R 和平均绝对相对误差 E_{AR} 作为模型精度的 评判标准,其表达式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N} (E_i - \overline{E})(P_i - \overline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (E_i - \overline{E})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (P_i - \overline{P})^2}}$$
(14)
$$E_{AR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\%$$
(15)

式中: *E_i*是实验测得的流动应力值; *P_i*为本构模预 测的流动应力值; *E* 和 *P* 为 *E_i* 和 *P_i* 的平均值; *N* 是 用于实验研究的数据总数。相关系数 *R* 反映了实验 值与预测值间的线性关联强度。*E*_{AR} 是验证本构模 型可预测性的无偏差统计参数。图 12 所示为优化 的 Z-A 模型的预测值与实验值的相关性图,使用式 (14)和(15),计算得优化的 Z-A 模型的 *R* 值为 0.9962, *E*_{AR} 值为 3.60%。





Fig. 11 Comparison between experimental and predicted flow stress using optimized Z-A model: (a) $\dot{\varepsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\varepsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\varepsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$; (d) $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$



图 12 优化的 Z-A 模型预测值与实验值的相关性图 Fig. 12 Correlations between predicted and experimental flow stress

因此,可以得出,本文提出的优化的 Z-A 方程 可以较好地描述 AZ80 镁合金的高温流动行为。但 是,优化的 Z-A 模型中材料参数的确定过程相对复 杂,且均表达为关于应变的高阶多项式函数,模型 中共有 24 个材料常数,是改进的 Z-A 模型中的三 倍。正是由于这一特性,使得各应变水平下的流动 行为可以用不同的材料参数来描述,因此该模型具 有良好的适用前景。此外,通过调整应变区间和拟 合多项式的阶数,可以进一步提高模型的预测精 度。

4 结论

 1)通过热压缩试验,建立了基于改进的 Z-A 方程的 AZ80 镁合金的流动应力本构模型,其预测的 R 和 E_{AR}值分别为 0.94 和 8%。通过考虑应变对 材料参数的影响,建立了优化的 Z-A 模型,其预测的 R 值和 E_{AR}值分别为 0.9962 和 3.60%。优化的 Z-A 模型的预测精度更高。

 2) 改进的 Z-A 模型形式简单,模型中共有 7 个材料常数,但是拟合精度相对较低,其原因在于 该模型难以描述加工硬化-动态回复阶段的流动应 力。

3) 优化的 Z-A 模型可以预测出整个应变范围 (0~0.9)内材料的流动行为,但模型的形式相对复 杂,模型中共有 24 个材料常数。模型的主要缺点 是材料参数的计算过程相对复杂且参数较多。

REFERENCES

- TSAO L C, HUANG Yen-teng, FAN Kuo-huan. Flow stress behavior of AZ61 magnesium alloy during hot compression deformation[J]. Materials & Design, 2014, 53: 865–869.
- [2] LU Li-wei, LIU Tian-mo, CHEN Jian, et al. Microstructure and corrosion behavior of AZ31 alloys prepared by dual directional extrusion[J]. Materials & Design, 2012, 36(4): 687–693.
- [3] 冯建铭, ELIANE Giraud, 曹旭东, 等. 考虑应变补偿的 Al2024 合金本构方程研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(6): 151-156.

FENG Jian-ming, ELIANE Giraud, CAO Xu-dong, et al. Study on constitutive equations of 2024 aluminum alloy considering the compensation of strain[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(6):151–156.

- [4] LIN Yong-cheng, CHEN Xiao-min. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 1733–1759.
- [5] DONG Yuan-yuan, ZHANG Cun-sheng, LU Xing, et al. Constitutive equations and flow behavior of an as-extruded AZ31 magnesium alloy under large strain condition[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(6): 2267–2281.
- [6] 叶建华,陈明和,王 宁,等. 基于修正 JC 模型的 TA12
 钛合金高温流变行为[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(4):
 733-741.

YE Jian-hua, CHEN Ming-he, WANG Ning, et al. Flow behavior of TA12 titanium alloy based on modified JC model at high temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(4): 733–741.

- [7] LIN Yong-cheng, CHEN Xiao-min, WEN Dong-xu, et al. A physically-based constitutive model for a typical nickel-based superalloy[J]. Computational Materials Science, 2014, 83(2): 282–289.
- [8] LI Tong-yang, ZHAO Bin, LU Xi-qun, et al. A Comparative study on Johnson cook, modified Zerilli-Armstrong, and Arrhenius-Type constitutive models to predict compression flow behavior of SnSbCu alloy[J]. Materials, 2019, 12(10):

1726-1745.

 [9] 汪建强, 郭丽丽, 王长峰. AZ31 镁合金位错密度模型及热 压缩的微观组织预测[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(1):
 48-59.

WANG Jian-qiang, GUO Li-li, WANG Chang-feng. Dislocation density model of AZ31 magnesium alloy and microstructure prediction of thermal compression[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(1): 48–59.

- [10] QUAN Guo-zheng, ZHANG Zhi-hua, PAN Jia, et al. Modelling the hot flow behaviors of AZ80 alloy by BP-ANN and the applications in accuracy improvement of computations[J]. Materials Research, 2015, 18(6): 1331–1345.
- [11] SANI S A, EBRAHIMI G R, VAFAEENEZHAD H, et al. Modeling of hot deformation behavior and prediction of flow stress in a magnesium alloy using constitutive equation and artificial neural network (ANN) model[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2018, 6(2): 134–144.
- [12] LIANG R, KHAN A S. A critical review of experimental results and constitutive models for BCC and FCC metals over a wide range of strain rates and temperatures[J]. International Journal of Plasticity, 1999, 15(9): 963–980.
- [13] VOYIADJIS G Z, ABED F H. Microstructural based models for BCC and FCC metals with temperature and strain rate dependency[J]. Mechanics of Materials, 2005, 37(2/3): 355–378.
- [14] DEY S, BORVIK T, HOPPERSTAD O S, et al. On the influence of constitutive relation in projectile impact of steel plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,

34(3): 464-486.

- [15] CHIOU S T, CHENG W C, LEE W S. Strain rate effects on the mechanical properties of a Fe-Mn-Al alloy under dynamic impact deformations[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 392: 156–162.
- [16] LEE W S, LIU C Y. The effects of temperature and strain rate on the dynamic flow behaviour of different steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 426: 101–113.
- [17] CAI Jun, LEI Ying, WANG Kuai-she, et al. A comparative investigation on the capability of modified Zerilli-Armstrong and Arrhenius-Type constitutive models to describe flow behavior of BFe10-1-2 cupronickel alloy at elevated temperature[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(5): 1952–1963.
- [18] LÜ Bin-jiang, PENG Jian, SHI Da-wei, et al. Constitutive modeling of dynamic recrystallization kinetics and processing maps of Mg-2.0Zn-0.3Zr alloy based on true stress–strain curves[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 560: 727–733.
- [19] BHATTACHARYA R, LAN Y J, WYNNE B P, et al. Constitutive equations of flow stress of magnesium AZ31 under dynamically recrystallizing conditions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(7): 1408–1417.
- [20] SAMANTARAY D, MANDAL S, BORAH U, et al. A thermo-viscoplastic constitutive model to predict elevatedtemperature flow behaviour in a titanium-modified austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 526: 1–6.

Prediction of high temperature flow stress of AZ80 magnesium alloy by using modified and optimized Zerilli-Armstrong constitutive models

LI Quan, JIN Zhao-yang

(School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The reasonable constitutive model is the key to realize the accurate simulation of magnesium alloy extrusion process, based on the thermal compression test of homogenized AZ80 magnesium alloy at the strain rate of 0.001 to 1 s⁻¹ and deformation temperature of 523 to 673 K, a modified Zerilli-Armstrong (Z-A) model was established to describe the thermal deformation behavior of the alloy, and on this basis, by considering the effect of strain on material parameters, an optimized model was proposed. The quantitative analysis of the prediction accuracy of the two models shows that the optimized Z-A model has a better prediction effect on the flow stress, and the calculated values of correlation coefficient *R* and average absolute relative error E_{AR} are 0.9962 and 3.60%, respectively. The prediction result of the modified Z-A model is relatively poor, and its *R* value and E_{AR} value are 0.94 and 8%, respectively. The comparative analysis shows that the optimized Z-A model has good adaptability and can well predict the flow stress under different deformation conditions in the whole strain range (0–0.9), so its engineering application range is wide. The modified Z-A model cannot describe the flow stress in the stage of work hardening and dynamic recovery, so its prediction accuracy is low.

Key words: AZ80 magnesium alloy; flow stress; constitutive model; Zerilli-Armstrong model

Foundation item: Project(51901202) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (BK20191442) supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China

Received date: 2020-09-12; Accepted date: 2021-01-15

Corresponding author: JIN Zhao-yang; Tel: +86-15105271009; E-mail: zyjin@yzu.edu.cn

(编辑 龙怀中)