

理论与实验研究

## A356 铝合金的高温流变行为及本构模型研究

曾 胜<sup>1</sup>, 常海平<sup>2</sup>, 张 金<sup>2</sup>, 王 锐<sup>2</sup>, 罗文哲<sup>3</sup>

(1. 中南大学 轻合金研究院, 湖南 长沙 410083; 2. 中信戴卡股份有限公司 工程技术研究院, 河北 秦皇岛 066011;  
3. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** A356 铝合金的高温流变特性和本构模型对其应力状态起着重要的作用, 为铝合金流变成形过程的有限元模拟奠定了重要的基础。从 A356 铝合金轮毂铸造坯料上制取拉伸试样, 利用 Instron 3369 型实验机进行等温拉伸实验, 实验温度为 300~375 °C, 应变速率为 0.001~0.1 s<sup>-1</sup>。由此得到的真应力-真应变曲线表明, 温度和应变速率等热力学条件对材料的流变应力的影响显著。基于真应力-真应变曲线, 建立了基于位错密度理论的物理模型来表征不同热力学条件下的流变应力。将模型预测值与实验值进行对比, 并进行误差分析。结果表明, 所建立的物理模型能够较准确地预测 A356 铝合金的高温拉伸流变行为。

**关键词:** A356 铝合金; 热变形; 本构模型; 流变行为; 流变应力

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.034

**中图分类号:** TG146.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 04-0242-07

## Study on high-temperature rheological behavior and constitutive model for A356 aluminum alloy

Zeng Sheng<sup>1</sup>, Chang Haiping<sup>2</sup>, Zhang Jin<sup>2</sup>, Wang Rui<sup>2</sup>, Luo Wenzhe<sup>3</sup>

(1. Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Engineering Technology Research Institute, CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinhuangdao 066011, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The high-temperature rheological behaviour and the constitutive model of A356 aluminum alloy play an important role on its stress state, which lays a significant foundation for the finite element simulation of aluminum alloy during the rheological forming process. Therefore, the tensile specimens were prepared from A356 aluminum alloy wheel hub casting billet, the isothermal tensile experiments were conducted by test machine Instron 3369 at the experimental temperature of 300~375 °C and the strain rate of 0.001~0.1 s<sup>-1</sup>. The obtained true stress-true strain curves show that the rheological stress of material is significantly affected by thermodynamic conditions such as temperature and strain rate. Based on the true stress-true strain curve, a physical model based on dislocation density theory was established to characterize the rheological stress under different thermodynamic conditions. The predicted value of the model was compared with the experimental data, and the error analysis was carried out. The results show that the established physical model can accurately predict the high-temperature tensile rheological behaviour of A356 aluminum alloy.

**Key words:** A356 aluminum alloy; hot deformation; constitutive model; rheological behavior; rheological stress

随着汽车轻量化技术的飞速发展, 铝硅合金的应用越来越受到研究人员的关注。A356 铝合金 (Al-7Si-0.3Mg) 是典型的 Al-Si 合金, 具有耐磨性好、热膨胀系数低、可铸性好等优点<sup>[1-2]</sup>。热处理

后的 A356 铝合金具有较高的强度、塑性和冲击韧性。在汽车工业中, 低压铸造的 A356 铝合金轮毂坯料通过进行热旋压工艺来制造轮毂。

热旋压工艺主要通过旋压过程中材料的强烈热塑性变形产生强化效应, 因此, 铸旋铝合金轮毂的综合力学性能比一般铸造轮毂强。该工艺具有材料利用率高、生产效率高等优点<sup>[3]</sup>。因此, 旋压工艺是轮毂生产的理想工艺, 最终产品的力学性能主要由变形机理决定。在旋压过程中, A356 铝合金不仅受到径向和周向压应力的影响, 还受到轴向拉应力的影响。通过建立合金的本构方程来描述合金的高

收稿日期: 2020-12-22; 修订日期: 2021-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51275533); 河北省院士工作站建设专项 (179A76193H)

作者简介: 曾 胜 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: zengsheng95@csu.edu.cn

通信作者: 常海平 (1978-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: changhaiping@dicastal.com

温流变特性，为采用有限元法对旋压过程进行数值模拟奠定了重要的基础。Arrhenius 模型是一种被广泛应用的表征热变形行为的唯象本构模型，可以有效地提高预测精度<sup>[4]</sup>。然而，应变补偿的 Arrhenius 模型省略了部分物理参数，未从物理角度说明流变行为。因此，从物理学角度提出了一种考虑位错密度理论的 Kocks-Mecking 模型来分析不同材料在高温下的变形机制<sup>[5-8]</sup>，可以描述模型的应变硬化和动态软化过程。

综上所述，通过一系列不同加载条件下的等温拉伸实验，建立了基于位错理论的物理本构模型，对不同热力条件下的流变行为进行了表征，并验证了模型的预测性。

1 实验和材料

本实验中采用的 A356 铝合金来源于某轮毂制造企业的低压铸造坯料，其化学成分如表 1 所示。通过电火花线切割设备切割低压铸造轮坯，拉伸试样尺寸按照标准 GB/T 4338—2006<sup>[9]</sup> 设计，沿轴向切片来制取拉伸试样，取材方法及其尺寸如图 1 所示。然后，将获得的拉伸试样在不同温度和应变速率下，在 Instron 3369 测试设备上施加单轴拉伸应力。实验步骤如下：首先，用加热炉将拉伸试样以  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  的速率预热至  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温  $3\text{ min}$  以消除热梯度；然后，以  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度降温至设定温度 ( $375$ 、 $360$ 、 $330$  和  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ )；在快速冷却后，为了避免变形温度下的温度分布不均匀，试样保持  $10\text{ s}$ ；最后，试样温度降至设定温度后，分别在不同的应变速率 ( $0.001$ 、 $0.01$  和  $0.1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 下对拉伸试样进行拉伸实验。

表 1 A356 铝合金的化学成分 ( % , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of A356 aluminun alloy

( % , mass fraction)

Si	Mg	Ti	Sr	Fe	Mn	Al
6.8~7.4	0.28~0.33	0.10~0.15	0.015~0.030	≤0.10	≤0.05	余量

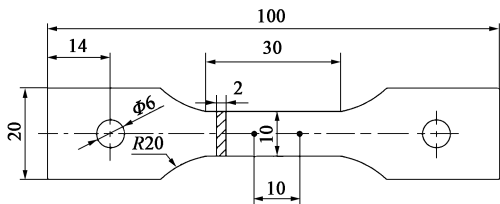


图 1 试样几何尺寸

Fig. 1 Geometry dimensions of specimen

2 结果与讨论

2.1 真应力-真应变曲线

考虑到拉伸实验过程中，应力沿拉伸试样界面的分布不均匀，拉伸过程中会产生缩颈现象进而使得变形区域产生三向拉应力，因此，需要对真应力-真应变数据进行修正<sup>[10]</sup>。Bridgeman P W<sup>[11]</sup> 提出了式 (1)，用于修正棒状拉伸试样在拉伸变形过程中的应力分布不均现象：

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{\left(1 + \frac{2r}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{2r}\right)} \tag{1}$$

式中： $a$  为拉伸试样缩颈处的半径； $r$  为缩颈表面最小横截面处的曲率半径； $\sigma$  为沿轴向的真应力； $\sigma_c$  为修正后的真应力。

此外，对于缩颈几何参数，Roy G L 等<sup>[12]</sup> 则提出了经验公式 (式 (2))：

$$\frac{a}{r} = 1.1(\varepsilon - \varepsilon_{F_{\max}}) \tag{2}$$

式中： $\varepsilon_{F_{\max}}$  为瞬时荷载达到峰值  $F_{\max}$  时对应的真应变； $\varepsilon$  为颈缩发生时通过式 (1) 计算得到的真应变。

Zhang Z L 等<sup>[13]</sup> 指出，式 (1) 同时也适用于板材试样的应力不均匀修正。

同时，对于单轴拉伸实验，缩颈前的最大应变在不同的热力条件下是不同的，为了对实验数据进行回归分析从而得到本构方程中的参数值，应在实验数据的基础上，对拉伸过程中缩颈前的真应力-真应变进行扩展，使曲线具有均匀的最大应变。通过这种方法，可以保证所有真应力-真应变曲线的回归分析的准确性。图 2 给出了不同热力条件下真应力-真应变曲线的修正曲线和扩展曲线。从图 2 中可以得出，流变应力对温度以及应变速率较敏感，流变应力随着温度的上升而减小，并随着应变速率的增大而增大。

2.2 基于位错密度理论的本构模型

关于 A356 铝合金流变行为在轮毂旋压中的应用已有相关研究，饶国举等<sup>[14]</sup> 利用 Arrhenius 本构模型对合金的流变行为进行了研究。但上述研究仅从现象学角度对流变行为进行了研究，而未涉及到相关参数的物理意义，本文从物理学角度，基于位错密度理论研究了材料的流变行为，对流变行为有了进一步研究。

热力学参数对塑性变形行为有很大影响，当外

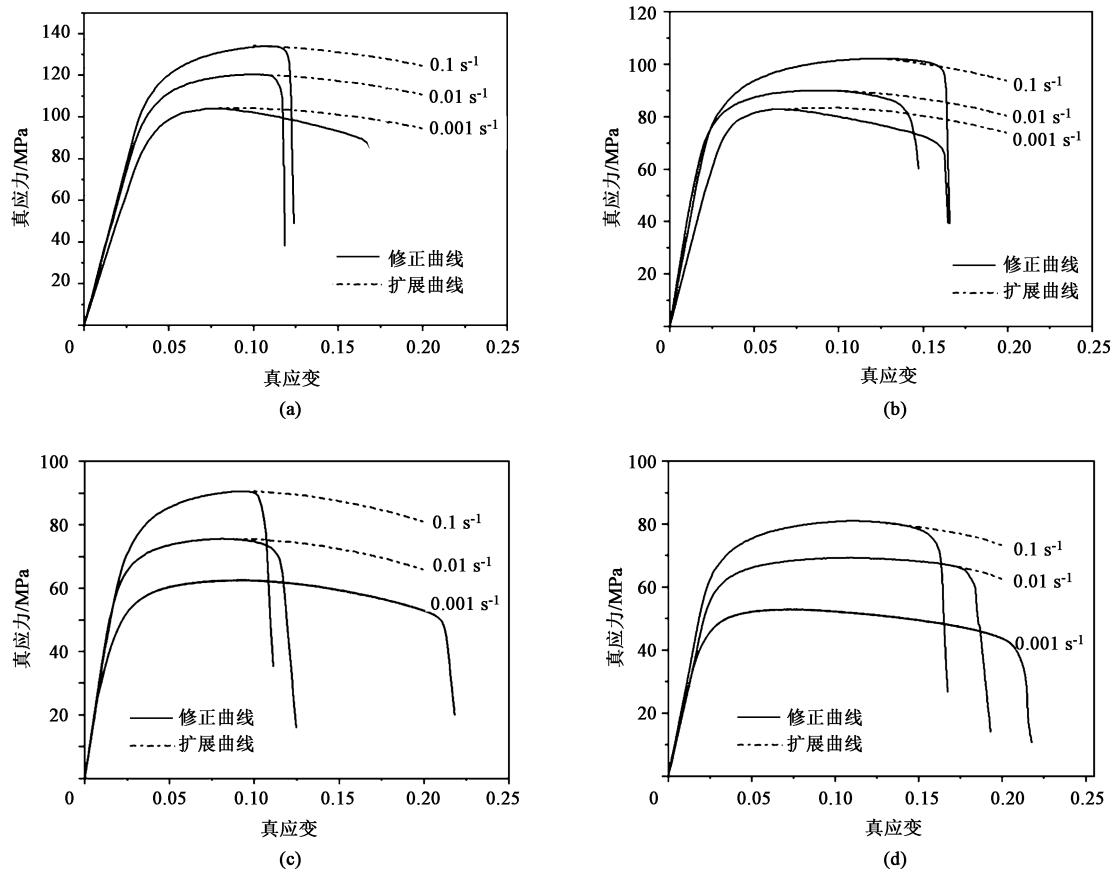


图 2 不同温度下的真应力-真应变曲线  
(a) 300 °C (b) 330 °C (c) 360 °C (d) 375 °C  
Fig. 2 True stress-true strain curves at various temperatures

部载荷超过合金的屈服极限时,合金就会发生塑性变形。Kocks U F 和 Mecking H<sup>[7]</sup>曾提出通过式 (3) 表示流变应力:

$$\sigma = \sigma_y + \sigma_p \quad (3)$$

式中:  $\sigma_y$  和  $\sigma_p$  分别为材料的屈服应力、位错相互作用而产生的应力。

表 2 中列出了不同变形条件下材料的屈服应力。此外,材料的屈服应力还与温度和应变速率有关,可以表示为式 (4):

$$\sigma_y = A_y \cdot \left[ \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q_y}{RT}\right) \right]^{n_y} \quad (4)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率,  $s^{-1}$ ;  $A_y$  和  $n_y$  为材料常数;  $Q_y$  为热活化能,  $(kJ \cdot mol^{-1})$ ;  $T$  为绝对温度, K;  $R$  为通用气体常数,  $8.314 J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$ 。

对式 (4) 求积分,得到  $\ln \sigma_y$ 、 $\ln \dot{\varepsilon}$  与  $1/T$  之间的关系曲线如图 3 所示。将表 2 所示的屈服应力值代入式 (4),采用函数拟合计算得到  $A_y$ 、 $Q_y$  和  $n_y$  的值。从而得到  $\sigma_y$  的表达式为:

$$\sigma_y = 0.396 \left[ \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{543736}{RT}\right) \right]^{0.05} \quad (5)$$

表 2 不同变形条件下试样的屈服应力 (MPa)

Table 2 Yield stresses of samples under different deformation conditions (MPa)

温度/°C	应变速率/ $s^{-1}$		
	0.1	0.01	0.001
300	106.6000	95.9930	84.4608
330	75.3127	69.7717	67.6448
360	62.9249	58.1278	50.0010
375	53.5715	47.1538	41.4472

当应变强化是位错相互作用的主要原因时,位错相互作用产生的应力可表示为:

$$\sigma_p = \alpha G M b \sqrt{\rho} \quad (6)$$

式中:  $M$  和  $\alpha$  分别为泰勒取向因子和位错相互作用常数,在本文中  $M$  和  $\alpha$  分别取 3.06 与 0.5<sup>[15-16]</sup>;  $b$  为柏氏矢量;  $G$  为剪切模量;  $\rho$  为位错密度。

流变应力主要由位错增殖以及湮灭的相互竞争来共同决定。Bergström Y<sup>[17]</sup>提出了相应的位错演变模型,模型描述了加工硬化、动态回复和应变之间的关系,表述如下:

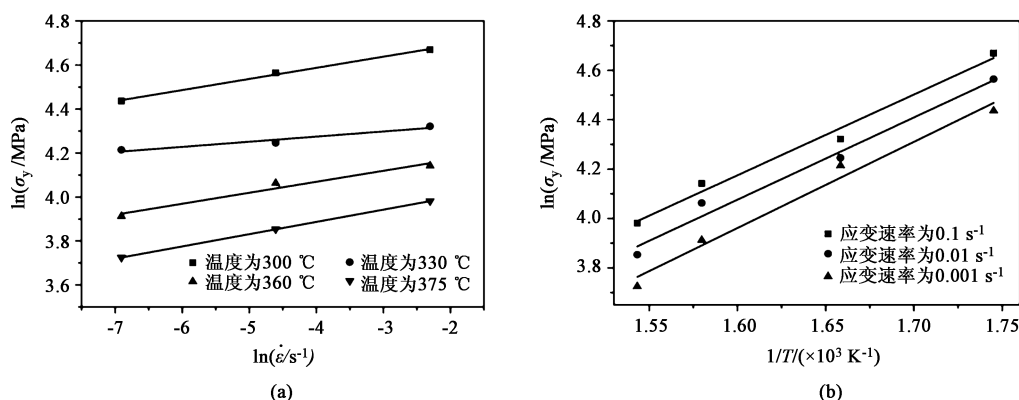


图3 关系曲线

(a)  $\ln\sigma_y - \ln\dot{\varepsilon}$  (b)  $\ln\sigma_y - 1/T$ 

Fig. 3 Relationship curves

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = U - V\rho \quad (7)$$

式中:  $d\rho/d\varepsilon$  为位错密度的增殖速率;  $U$  为加工硬化速率;  $V$  为动态回复速率。

此外, 由位错演变产生的塑性变形可以由 Kocks-Mecking 模型<sup>[15]</sup>描述:

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = k_1\sqrt{\rho} - k_2\rho \quad (8)$$

式中:  $k_1$  为加工硬化系数;  $k_2$  为动态回复系数。

已有的研究表明, 高温变形行为明显地受到应变速率以及变形温度的影响。加工硬化系数  $k_1$  和动态回复系数  $k_2$  可以表述为绝对温度  $T$  以及应变速率  $\dot{\varepsilon}$  的函数, 如式 (9)~式 (10) 所示:

$$k_1 = A_w \left( \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q_w}{RT}\right) \right)^{n_w} \quad (9)$$

$$k_2 = A_v \left( \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q_v}{RT}\right) \right)^{n_v} \quad (10)$$

式中:  $A_w$ 、 $A_v$ 、 $Q_w$ 、 $Q_v$ 、 $n_w$ 、 $n_v$  为材料常数, 他们的计算值汇总于表 3 中。

表3 材料常数的优化值

Table 3 Optimization values of material constants

参数	数值
$A_w$	3325.951
$A_v$	2786.532
$Q_w/(kJ \cdot mol^{-1})$	411.621
$Q_v/(kJ \cdot mol^{-1})$	142.283
$n_w$	-0.029
$n_v$	-0.105

在确定本构模型各个参数后, 相应的流变应力

预测值可通过本构模型得出, A356 铝合金高温拉伸真应力-真应变的实验值与本构模型的预测值对比, 结果如图 4 所示。

综上所述, 建立的描述加工硬化和动态回复阶段不同热力学条件下的流变行为的本构模型可以表示为:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_y + \sigma_\rho \\ \sigma_y = 0.396 \left( \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{543736}{RT}\right) \right)^{0.05} \\ \sigma_\rho = \alpha G M b \sqrt{\rho} \\ \frac{d\rho}{d\varepsilon} = k_1 \rho^{\frac{1}{2}} - k_2 \rho \\ k_1 = 3325.951 \left( \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{411.621}{RT}\right) \right)^{-0.029} \\ k_2 = 2786.532 \left( \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{142.283}{RT}\right) \right)^{-0.105} \end{cases} \quad (11)$$

## 2.3 现有模型的验证

建立基于位错理论的 A356 铝合金高温本构模型后, 可以计算出在整个热力学条件下的流变应力。通过计算相关系数  $R$ 、平均绝对相对误差  $AARE$ 、平均均方根误差  $RMSE$  和正交偏移误差  $NMBE$  这 4 个统计评价参数来评价两个模型的可预测性。各参数的计算公式如式 (12)~式 (15) 所示:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (12)$$

$$AARE(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100 \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - P_i)^2} \quad (14)$$

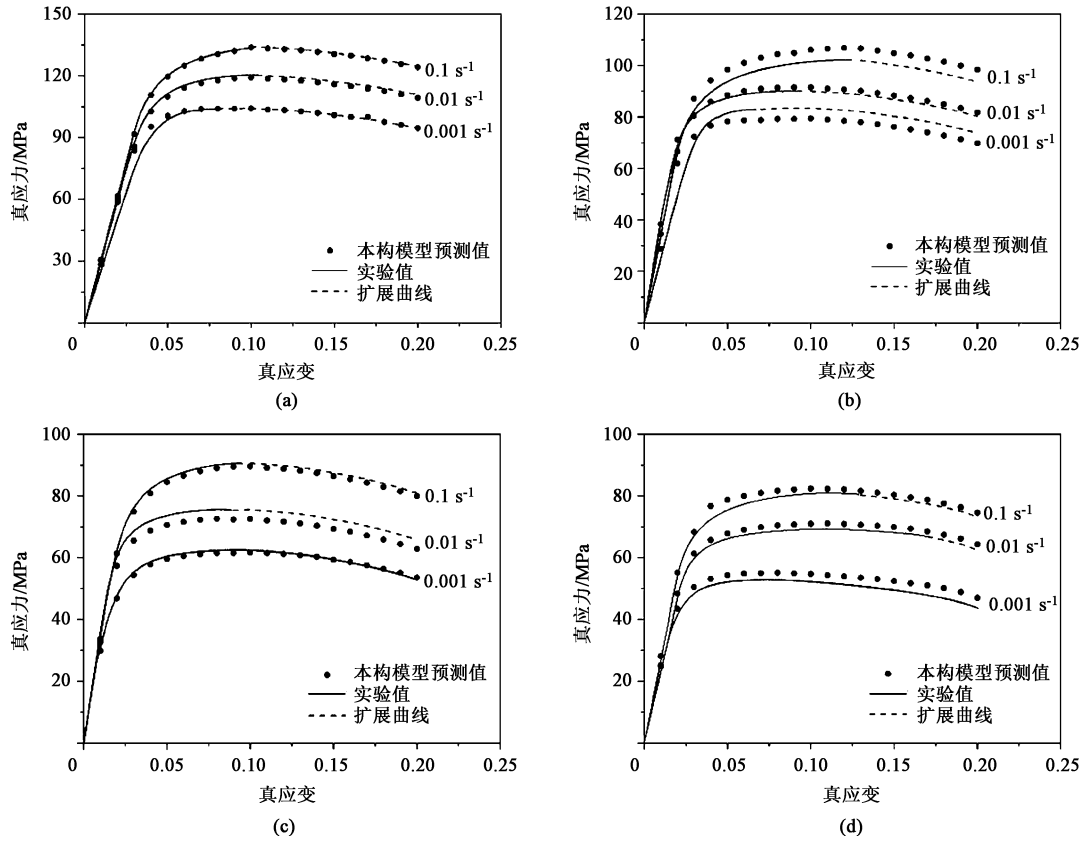


图 4 不同温度下的高温拉伸真应力-真应变实验值与本构模型预测值对比

(a) 300 °C (b) 330 °C (c) 360 °C (d) 375 °C

Fig. 4 Comparison between experimental values of tensile true stress-strain at high temperature and predicted values of constitutive model at different temperature

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - P_i)}{\sum_{i=1}^N E_i} \quad (15)$$

式中:  $E_i$  为实验值;  $i$  为实验样本对应的序号,  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  为实验样本总数;  $P_i$  为基于位错理论的本构模型的预测值;  $\bar{E}$  与  $\bar{P}$  为相对应的  $E_i$  和  $P_i$  的平均值。

相关系数  $R$  可用于衡量实验值与预测值之间的相关强度;  $AARE$ 、 $RMSE$ 、 $NMBE$  用于表征模型的预测性, 其中  $NMBE$  为正值, 表明模型过预测, 为负值则预计偏低。

图 5 为 A356 铝合金高温拉伸真应力-真应变实验值与本构模型预测值的相关性对比, 其中图 5a 为已有研究中的 Arrhenius 本构模型, 图 5b 为本文中建立的本构模型。从图 5 中可以得到, Arrhenius 本构模型的  $R$  和  $AARE$  分别为 0.993 和 3.0308%, 本文中建立的本构模型的  $R$  和  $AARE$  分别为 0.995 和 2.6158%。可以明显看出, 基于物理模型可以得到更小的  $RMSE$  和  $NMBE$  值。因此, 对比现有研究表

明, 本文所建立的物理模型具有更高的预测精度和更准确的屈服应力评估。

根据上述统计评价计算出相对误差  $RE$ , 进一步考察了两种模型的性能。 $RE$  用式 (16) 表示为:

$$RE = \left( \frac{E_i - P_i}{E_i} \right) \times 100\% \quad (16)$$

这两种模型的相对误差均服从高斯分布, 两者之间的差异基本决定了在分析中会存在数据噪声。Arrhenius 模型的  $RE$  值的范围为  $-14.7\% \sim 20.7\%$ , 物理模型的  $RE$  值的范围为  $-13.7\% \sim 12.6\%$ 。计算得到两种模型的平均  $RE$  值分别为 1.190% 和 0.137%。因此, 与两种模型相比, 物理模型具有更好的预测能力。

## 2.4 加工硬化行为

通过研究 A356 铝合金在不同热力学条件下的加工硬化率  $\left( \theta = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)$ , 作出加工硬化率与真应力的关系曲线, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 在一定的应变速率下, 随着温度的升高, 加工硬化率降低, 如图 6a 所示; 在图 6b 中, 对于相同的温度,



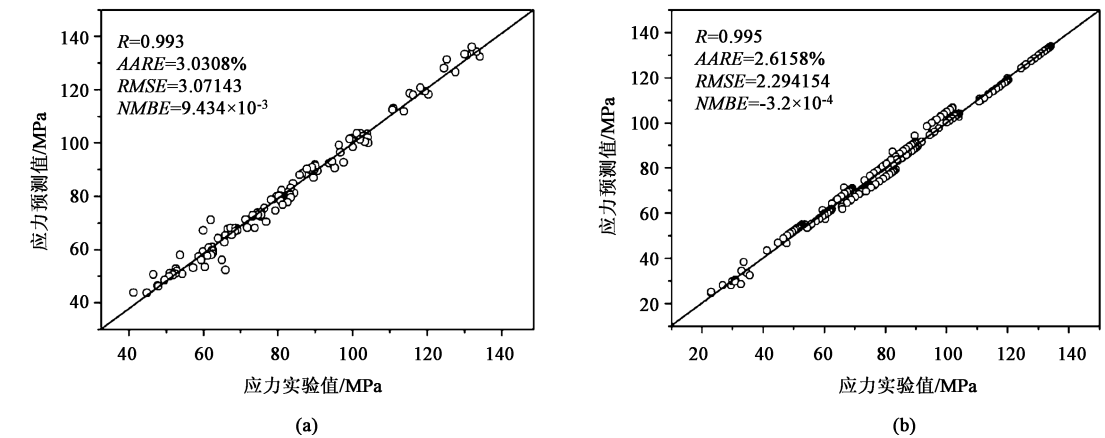


图 5 应力实验值和预测值之间的关系  
(a) Arrhenius 模型 (b) 物理模型

Fig. 5 Relationships between experimental and predicted values for stresses  
(a) Arrhenius model (b) Physically model

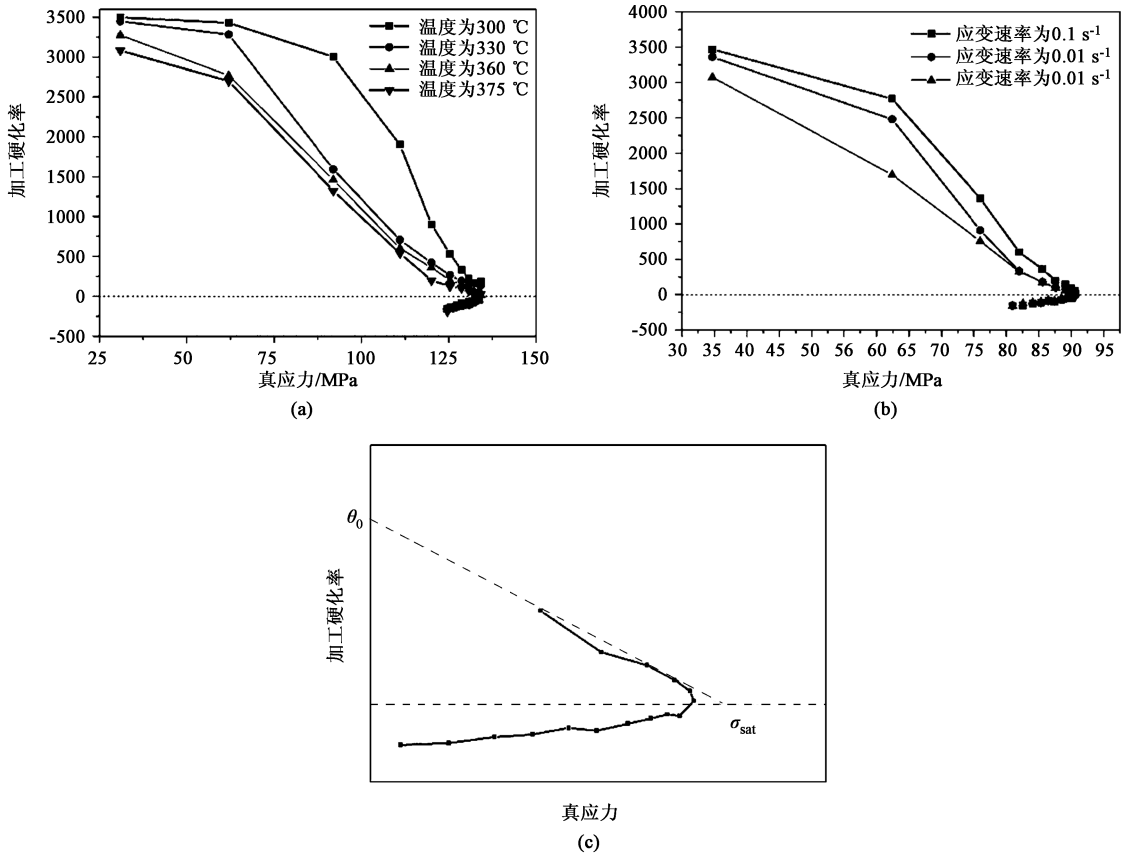


图 6 加工硬化率与真应力的关系图  
(a) 应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (b) 温度为  $360 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (c)  $\theta_0$  和  $\sigma_{\text{sat}}$  关系

Fig. 6 Relationship diagrams of work hardening rate and true stress  
(a) Strain rate of  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (b) Temperature of  $360 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (c) Relationship of  $\theta_0$  and  $\sigma_{\text{sat}}$

随着应变速率的增大，加工硬化速率增大。位错的增殖和湮灭之间的竞争导致了铝基体中位错密度的变化，从而导致了上述现象。从图 6 中可以看出，在整个拉伸变形过程中，加工硬化率随着

真应力的增大而减小。特别地,对于低应力,加工硬化率表现为快速下降,然后在高应力下逐渐线性下降。当应力值接近于饱和应力时,加工硬化率降低为 0,并且随着变形过程的继续,加工硬化率下降到 0 以下,这表明了动态回复行为的发生。根据修正的 Kocks-Mecking 模型,位错密度的演化是控制加工硬化曲线线性阶段变形行为的主要因素。在此期间,加工硬化率的瞬时值  $\theta = \theta_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{\text{sat}}}\right)$ , 其中  $\theta_0$  和  $\sigma_{\text{sat}}$  分别为初始加工硬化率和饱和应力,  $\theta_0$  和  $\sigma_{\text{sat}}$  的定义如图 6c 所示。

### 3 结论

(1) 在修正拉伸缩颈现象后,建立了基于 Kocks-Mecking 位错理论的本构模型,结合屈服应力、应变硬化系数、动态回复系数等变形参数的影响,描述了不同变形条件下的变形行为,揭示了不同变形条件下的加工硬化和动态回复行为。

(2) 通过对 A356 铝合金应变补偿的 Arrhenius 模型和考虑位错密度理论的物理模型这两种模型的比较研究表明,物理模型对 A356 铝合金的流变行为具有更好的可预测性。

(3) 位错增殖和湮灭之间的竞争导致了铝基体中位错密度的变化,从而导致了加工硬化率随着应变速率的增大而增大,并随温度升高而降低。

#### 参考文献:

- [1] Abdulwahab M, Madugu I A, Yaro S A, et al. Effects of multiple-step thermal ageing treatment on the hardness characteristics of A356. 0-type Al-Si-Mg alloy [J]. *Materials & Design*, 2011, 32 (3): 1159-1166.
- [2] Haghdadi N, Zarei-Hanzaki A, Roostaei A A, et al. Evaluating the mechanical properties of a thermomechanically processed unmodified A356 Al alloy employing shear punch testing method [J]. *Materials & Design*, 2013, 43: 419-425.
- [3] 黄涛, 郭亚明, 郑宏伟, 等. 薄壁内外齿杯形件多轮行星旋压成形 [J]. *锻压技术*, 2020, 45 (4): 126-133.  
Huang T, Guo Y M, Zheng H W, et al. Multi-wheel planetary spinning of thin-wall cup-shaped parts with internal and external teeth [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45 (4): 126-133.
- [4] 尹小燕, 刘兴凯, 丁宏翔, 等. HNi55-7-4-2 合金高温本构模型修正及变形激活能演化规律 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (7): 221-228.  
Yin X Y, Liu X K, Ding H X, et al. High temperature constitutive model modification and evolution law of deformation activation energy for HNi55-7-4-2 alloy [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (7): 221-228.
- [5] Babu B, Lindgren L E. Dislocation density based model for plastic deformation and globularization of Ti-6Al-4V [J]. *International Journal of Plasticity*, 2013, 50 (50): 94-108.
- [6] Fan X G, Yang H. Internal-state-variable based self-consistent constitutive modeling for hot working of two-phase titanium alloys coupling microstructure evolution [J]. *International Journal of Plasticity*, 2011, 27 (11): 1833-1852.
- [7] Kocks U F, Mecking H. Physics and phenomenology of strain hardening: the FCC case [J]. *Progress in Materials Science*, 2003, 48 (3): 171-273.
- [8] Liang H Q, Nan Y, Ning Y Q, et al. Correlation between strain-rate sensitivity and dynamic softening behavior during hot processing [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2015, 632: 478-485.
- [9] GB/T 4338—2006, 金属材料 高温拉伸试验方法 [S].  
GB/T 4338—2006, *Metallic Materials—Tensile testing at elevated temperature* [S].
- [10] 黄光杰, 钱宝华, 游红. 45 钢高温拉伸峰值应力和变形储能与 Z 参数的关系函数研究 [J]. *材料工程*, 2007, (12): 21-25.  
Huang G J, Qian B H, You H. Functions correlating tensile peak stress and deformation stored energy of 45 steel at elevated temperature with Zener-Hollomon parameter [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2007, (12): 21-25.
- [11] Bridgman P W. *Studies in Large Plastic Flow and Fracture; with Special Emphasis on the Effects of Hydrostatic Pressure* [D]. Cambridge: Harvard University, 1964.
- [12] Roy G L, Embury J D, Edwards G, et al. A model of ductile fracture based on the nucleation and growth of voids [J]. *Acta Metallurgica*, 1981, 29 (8): 1509-1522.
- [13] Zhang Z L, Hauge M, Odegard J, et al. Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section [J]. *International Journal of Solids & Structures*, 1999, 36 (23): 3497-3516.
- [14] 饶国举, 李新和, 孙晓冬, 等. A356. 2 铝合金高温拉伸本构行为研究 [J]. *塑性工程学报*, 2018, 25 (3): 174-180.  
Rao G J, Li X H, Sun X D, et al. Study on tensile constitutive behavior of A356. 2 aluminum alloy at elevated temperature [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2018, 25 (3): 174-180.
- [15] Mecking H, Kocks U F, Hartig C. Taylor factors in materials with many deformation modes [J]. *Scripta Materialia*, 1996, 35 (4): 465-471.
- [16] Lindgren L E, Domkin K, Hansson S. Dislocations, vacancies and solute diffusion in physical based plasticity model for AISI 316L [J]. *Mechanics of Materials*, 2008, 40 (11): 907-919.
- [17] Bergström Y. A dislocation model for the stress-strain behaviour of polycrystalline  $\alpha$ -Fe with special emphasis on the variation of the densities of mobile and immobile dislocations [J]. *Materials Science & Engineering*, 1970, 5 (4): 193-200.