

材料与成形性能

7050 铝合金流变模型及稳态热加工工艺研究

金 明, 张晋源

(重庆工业职业技术学院 车辆工程学院, 重庆 401120)

摘要: 为研究 7050 铝合金的高温流变行为和热加工工艺窗口, 在变形温度为 573~723 K、应变速率为 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 的条件下对其进行等温压缩实验, 获得了 16 组流变数据, 基于该流变数据, 提出了新本构模型并与经典模型在预测精度、材料参数及求解算法方面进行了对比分析。结果表明: 新模型的预测精度最高、HS 模型的预测精度最低; 新模型和 HS 模型的材料参数获取仅需要多元线性回归, 而 AH 模型需要使用多元非线性回归; 新模型有 30 个参数、AH 模型有 24 个参数、HS 模型有 9 个参数, 新模型在未显著增加材料参数的前提下降低了参数获取难度并显著提升了预测精度。此外, 基于新模型推导出 7050 铝合金热加工图的解析方程并绘制了热加工图, 并通过微观组织分析验证了热加工图的有效性。结果表明: 变形温度在 623~723 K、应变速率在 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 范围内发生失稳的风险较小, 能量耗散率大约在 20%~40% 范围内, 材料能够充分发生动态再结晶。

关键词: 7050 铝合金; 流变数据; 本构方程; 热加工图; 动态再结晶

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.02.033

中图分类号: TG142.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 02-0255-10

Study on rheological model and steady hot working process of 7050 aluminum alloy

Jin Ming, Zhang Jinyuan

(School of Vehicle Engineering, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China)

Abstract: In order to investigate the high-temperature rheological behavior and thermal working process window of 7050 aluminum alloy, the isothermal compression experiments were conducted under the conditions of the deformation temperature of 573–723 K and the strain rate of $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$, and sixteen sets of rheological data were obtained. Then, based on these rheological data, a new constitutive model was proposed and compared with classical models in terms of prediction accuracy, material parameters and solution algorithms. The results indicate that the new model has the highest prediction accuracy, while HS model has the lowest prediction accuracy. Material parameter acquisition obtaining of the new model and HS model only requires multiple linear regression, and AH model requires multiple nonlinear regression. The new model has thirty parameters, AH model has twenty-four parameters, and HS model has nine parameters. It can be seen that the new model reduces the difficulty of parameter acquisition and significantly improves the prediction accuracy without significantly increasing the number of material parameters. In addition, based on the new model, the analytical equation of hot processing map for 7050 aluminum alloy was deduced, and its hot processing map was drawn. The microstructure analysis results verify the effectiveness of the hot processing map. The results show the risk of instability is small at the deformation temperature of 623–723 K and the strain rate of $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$. The energy dissipation rate is approximately in the range of 20%–40%, and the material can fully undergo the dynamic recrystallization.

Key words: 7050 aluminum alloy; rheological data; constitutive equation; hot processing map; dynamic recrystallization

7050 铝合金作为一种可热处理超高强铝合金, 具有强度和硬度高, 塑性及耐磨耐蚀性能良好等优点, 近年来在汽车、高铁、航空航天等行业获得了广泛的应用^[1-2]。目前, 针对铝合金高温流变特性的研究较多, 如郝爱国等^[3]研究了 7050 铝合金的热

塑性行为, 得到了 7050 铝合金的 Arrhenius 本构模型; 夏洪均等^[4]提出了一种考虑变形条件与材料参数耦合关系的 Arrhenius 本构模型, 结果表明该模型的预测精度较高; 王运等^[5]研究了 7050 铝合金在不同温度、不同应变速率下的 JC 本构模型, 该模型能较好地预测塑性流动应力; 杨成曦等^[6]提出了一种修正的 JC 模型并对 7050 铝合金的本构关系进行拟合, 使用数值模拟验证了模型的精度和适用性; 苏燕等^[7]使用径向基神经网络模型对 7050 铝合金铸轧件的抗拉强度、屈服强度和伸长率进行预测, 拉伸

收稿日期: 2023-06-06; 修订日期: 2023-09-15

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202103209)

作者简介: 金 明 (1981-), 男, 硕士, 教授

E-mail: jinming@cqipc.edu.cn

实验结果表明, 径向基神经网络的预测精度高于同条件下的 BP 神经网络, 具有较高的预测精度; 马斌等^[8]采用 Gleeble-3500 热物理模拟实验机对 7050 铝合金进行等温热压缩实验, 建立了反向传播神经网络 (BPNN)、支持向量机 (SVR) 和随机森林 (RF) 模型并验证其预测精度; 张含茹^[9]以铸态 7050 铝合金为研究对象, 通过热模拟实验机、EBSD 测试技术、多向锻造技术和有限元仿真等手段和方法进一步展开了研究, 建立了铸态 7050 铝合金流变应力本构关系的模型并对本构方程进行了二次修正, 修正后的本构模型更加贴合实验数据。Liu S H 等^[10]基于唯物模型构建了 Al-Mg-Si-Mn-Cr 铝合金的 Zerilli-Armstrong 本构模型, 研究结果表明, 该模型在低应变速率时能够很好地描述铝合金的本构关系。Rudra A 等^[11]对比了 5083 铝合金的修正 ZA 唯物和修正 JC 唯象本构模型, 通过比较相关系数、平均绝对相对误差和预测相对误差来评价模型的精度, 结果表明, 两种模型均能很好地描述复合材料的热变形行为, 修正 ZA 模型的预测精度高于修正 JC 模型。

综上所述, 当前针对铝合金本构模型的研究主要集中于 Arrhenius 模型、JC 模型、人工神经网络模型、唯物模型及其改进模型。人工神经网络模型具有大量的权值和偏移值, 不适用于有限元仿真; Arrhenius 模型、JC 模型及其改进模型的精度提升有限; 基于唯物模型的 ZA 模型对于不同合金的适应性较差, 不同材料需要单独处理及改进。为了进一步研究 7050 铝合金的本构模型及其热加工工艺, 首先, 基于偏导分析提出了 7050 铝合金的新本构模型; 其次, 基于新本构模型推导出热加工图解析方程, 并构建了 7050 铝合金的最佳热加工图; 最后, 通过微观组织分析对热加工图进行了验证, 为 7050 铝合金锻件的热加工工艺制定提供了参考。

1 热压缩实验

1.1 材料成分

实验材料为某 7050 铝合金, 名义化学成分如表 1 所示, 其主要化学成分为 Zn、Mg、Cu、Mn 和 Cr 等, 属于 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金, 其强度和加工性较好, 能够进行热处理强化。

1.2 实验方案

将原材料切割为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的 16 个圆柱试样, 并以 $10 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度分别加热到 573、623、

表 1 7050 铝合金的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 7050 aluminum alloy (%, mass fraction)

Si	Cr	Ti	Zr	Mn	Fe	Zn	Mg	Cu	Al
0.11	0.12	0.06	0.09	0.12	0.15	5.8	2.3	2.5	余量

673 和 723 K, 随后分别以 0.01 、 0.1 、 1 和 10 s^{-1} 的应变速率在 Gleeble-3500 热模拟实验机上进行等温热压缩实验, 热模拟实验机上记录的真实应力-真实应变曲线如图 1 所示, 其中 $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率。该实验设备的温控精度为 $\pm 1 \text{ K}$ 。如图 1 所示, 7075 铝合金的真实应力受到的温度和应变速率的影响比较显著, 即该材料为应变速率和温度敏感材料。当应变速率低于 1 s^{-1} 时, 7075 铝合金具有显著的应力峰值; 当应变速率高于 1 s^{-1} 时, 没有显著的应力峰值。这说明该材料在应变速率低于 1 s^{-1} 时, 材料在 573~723 K 温度区间均能够发生动态再结晶软化; 当应变速率较大时, 尽管温度较高, 该材料也不能发生较大程度的动态再结晶。

2 本构方程及热加工图

2.1 经典本构方程

Hensel-Spittel 本构模型在塑性成形仿真软件 Forge 中作为推荐的本构模型, 具有形式简单、待定参数较少的特点, 被广泛应用于描述粘塑性材料的本构关系, 其公式如下^[12]:

$$\sigma = k_0 \exp(k_1 T) \dot{\varepsilon}^{k_2} \dot{\varepsilon}^{k_3} \exp\left(\frac{k_4}{\dot{\varepsilon}}\right) (1 + \dot{\varepsilon})^{k_5 T} \times \exp(k_6 \dot{\varepsilon}) \dot{\varepsilon}^{k_7 T} T^{k_8} \quad (1)$$

式中: σ 为真实应力, MPa; $\dot{\varepsilon}$ 为真实应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; T 为变形温度, K; k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 、 k_6 、 k_7 、 k_8 为材料常数。

对式 (1) 取自然对数得到式 (2):

$$\ln \sigma = \ln k_0 + k_1 T + k_2 \ln \dot{\varepsilon} + k_3 \ln \dot{\varepsilon} + k_4 / \dot{\varepsilon} + k_5 T \ln(1 + \dot{\varepsilon}) + k_6 \dot{\varepsilon} + k_7 T \ln \dot{\varepsilon} + k_8 \ln T \quad (2)$$

可见 $\ln \sigma$ 与 T 、 $\ln \dot{\varepsilon}$ 、 $\ln \dot{\varepsilon}$ 、 $1/\dot{\varepsilon}$ 、 $T \ln(1 + \dot{\varepsilon})$ 、 $\dot{\varepsilon}$ 、 $T \ln \dot{\varepsilon}$ 、 $\ln T$ 之间存在线性关系, 式 (2) 中的 9 个材料常数的求解问题是一个典型的多元线性回归问题。将等温压缩获得的真实应力、应变数据按照应变在 0.10~0.85 范围内等分成 20 份, 并结合相应的温度和应变速率, 通过变换可获取 16×20 组 T 、 $\ln \dot{\varepsilon}$ 、 $\ln \dot{\varepsilon}$ 、 $1/\dot{\varepsilon}$ 、 $T \ln(1 + \dot{\varepsilon})$ 、 $\dot{\varepsilon}$ 、 $T \ln \dot{\varepsilon}$ 、 $\ln T$ 与 $\ln \sigma$ 的值。其多元线性回归模型如下:

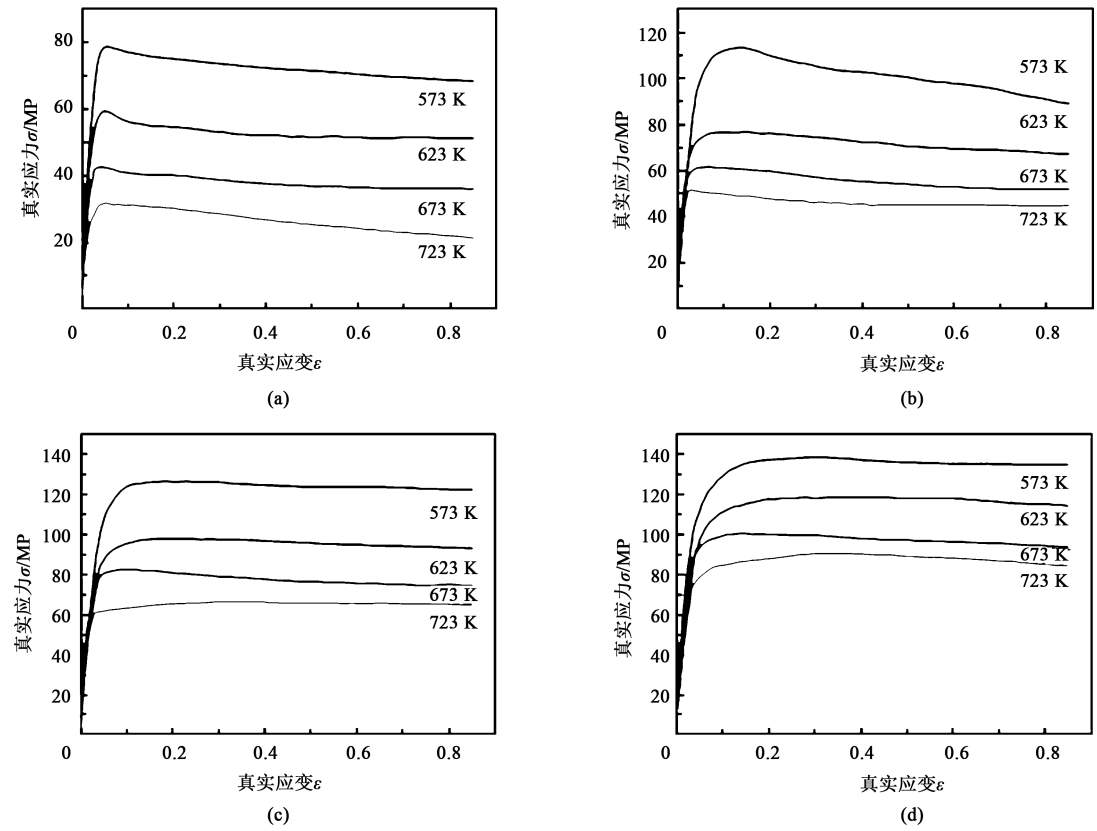


图 1 7075 铝合金的等温热压缩流变曲线
(a) $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\varepsilon}=0.1\text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\varepsilon}=1\text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\varepsilon}=10\text{ s}^{-1}$
Fig. 1 Flow curves of 7075 aluminum alloy during isothermal hot compression

$$\begin{bmatrix} \ln\sigma_1 \\ \ln\sigma_2 \\ \ln\sigma_3 \\ \vdots \\ \ln\sigma_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_1 & \ln\varepsilon_1 & \ln\dot{\varepsilon}_1 & 1/\varepsilon_1 & T_1\ln(1+\varepsilon_1) & \varepsilon_1 & T_1\ln\dot{\varepsilon}_1 & \ln T_1 \\ 1 & T_2 & \ln\varepsilon_2 & \ln\dot{\varepsilon}_2 & 1/\varepsilon_2 & T_2\ln(1+\varepsilon_2) & \varepsilon_2 & T_2\ln\dot{\varepsilon}_2 & \ln T_2 \\ 1 & T_3 & \ln\varepsilon_3 & \ln\dot{\varepsilon}_3 & 1/\varepsilon_3 & T_3\ln(1+\varepsilon_3) & \varepsilon_3 & T_3\ln\dot{\varepsilon}_3 & \ln T_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_d & \ln\varepsilon_d & \ln\dot{\varepsilon}_d & 1/\varepsilon_d & T_d\ln(1+\varepsilon_d) & \varepsilon_d & T_d\ln\dot{\varepsilon}_d & \ln T_d \end{bmatrix} \hat{k} + e \quad (3)$$

式中： d 为实验数据的数目，本文中 $d=320$ ； $\hat{k}=[\ln k_0 \ k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5 \ k_6 \ k_7 \ k_8]^T$ ，为材料常数的最大似然估计； e 为 320×1 的误差向量，服从均值为 0 的正态分布。

用离散的 320 组数据对式 (3) 进行多元线性回归并设置置信概率为 95%，得到在该置信概率下的参数置信区间及参数值，如表 2 所示。此外，得到其回归相关系数为 0.9793。

表 2 Hensel-Spittel 本构方程材料常数的置信区间及回归值

Table 2 Confidence interval and regression values of material constants for Hensel-Spittel constitutive equation									
材料参数	$\ln k_0$	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8
取值	33.4115	0.0035	-0.0376	-0.2138	-0.0088	-0.0006	0.1326	0.0005	-4.8163
下限	20.7991	-0.0001	-0.2627	-0.2451	-0.0381	-0.0013	-0.2403	0.0005	-7.1232
上限	46.0239	0.0071	0.1876	-0.1825	0.0205	0.0002	0.5056	0.0006	-2.5094

除 Hensel-Spittel 模型外，Arrhenius 本构模型也是塑性成形领域被广泛应用的 本构模型之一，其被

应用于主流塑性成形软件 Deform 中，Arrhenius 模型最初由 Sellars C M 和 Tegart W^[13] 提出，其计算公式

如式 (4) 所示。

$$\dot{\varepsilon} = \begin{cases} A\sigma^{\frac{\beta}{\alpha}} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \alpha\sigma < 0.8 \\ A \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \alpha\sigma > 1.2 \\ A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \text{所有 } \alpha\sigma \end{cases} \quad (4)$$

式中: A 、 α 、 n 、 β 为材料常数; Q 为激活能, ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$); R 为气体常数, 取 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{K} \cdot \text{mol})^{-1}$ 。

将公式 (4) 两边取对数即可得到公式 (5) 所示的 Arrhenius 模型。

$$\ln \dot{\varepsilon} = \begin{cases} \ln A + \frac{\beta}{\alpha} \ln \sigma - \frac{Q}{RT}, & \alpha\sigma < 0.8 \\ \ln A + \beta\sigma - \frac{Q}{RT}, & \alpha\sigma > 1.2 \\ \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \frac{Q}{RT}, & \text{所有 } \alpha\sigma \end{cases} \quad (5)$$

目前, 求解式 (5) 中材料参数的主要方法是固定应变, 对 $\ln \dot{\varepsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 、 $1/T$ 、 σ 之间进行线性回归后取值得到 α , 并将 α 带入式 (5) 中的第 3 个方程进行线性回归得到 $\ln A$ 、 n 和 Q 。为了更加简化求解 Arrhenius 模型的参数, 直接对第 3 个方程进行多元非线性回归, 进而得到每个应变下的材料参数, 随后对材料参数和应变之间进行 5 次多项式拟合。其具体过程为: 将所有真实应力-真实应变曲线在 0.10~0.85 之间离散为 20 个点, 并用每个应变对应的 16 组 (4 种温度×4 种应变速率) 数据对式 (5) 中的第 3 个方程进行多元非线性回归, 得到 20 个应变对应的材料参数 (表 3), 随后对 20 个应变对应的材料参数分别进行多项式拟合 (表 4), 并将多项式拟合得到的公式带入式 (5) 即可得到该材料的 Arrhenius 本构方程。

表 3 不同应变下 Arrhenius 模型材料参数的多元非线性回归结果

Table 3 Multiple nonlinear regression results of Arrhenius model material parameters under different strains

应变	$\ln A$	n	α/MPa^{-1}	$Q/(\times 10^5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1})$	应变	$\ln A$	n	α/MPa^{-1}	$Q/(\times 10^5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1})$
0.1000	19.6447	0.0284	4.0615	1.4547	0.4947	17.3514	0.0280	3.5581	1.2690
0.1395	19.8774	0.0247	4.3152	1.4206	0.5342	17.2782	0.0282	3.5352	1.2640
0.1789	19.6771	0.0239	4.3468	1.3947	0.5737	17.1538	0.0284	3.4937	1.2564
0.2184	19.2013	0.0244	4.2108	1.3689	0.6132	17.0243	0.0293	3.3955	1.2529
0.2579	18.7130	0.0244	4.1310	1.3360	0.6526	16.9015	0.0300	3.3142	1.2486
0.2974	18.2973	0.0247	4.0240	1.3099	0.6921	16.8148	0.0311	3.2286	1.2497
0.3368	17.9004	0.0255	3.8886	1.2906	0.7316	16.6493	0.0317	3.1779	1.2426
0.3763	17.6849	0.0262	3.7691	1.2813	0.7711	16.5796	0.0320	3.1585	1.2388
0.4158	17.6588	0.0267	3.7111	1.2810	0.8105	16.4567	0.0326	3.1033	1.2337
0.4553	17.5273	0.0272	3.6516	1.2744	0.8500	16.2875	0.0340	2.9910	1.2293

表 4 Arrhenius 模型材料参数的 5 次多项式拟合系数

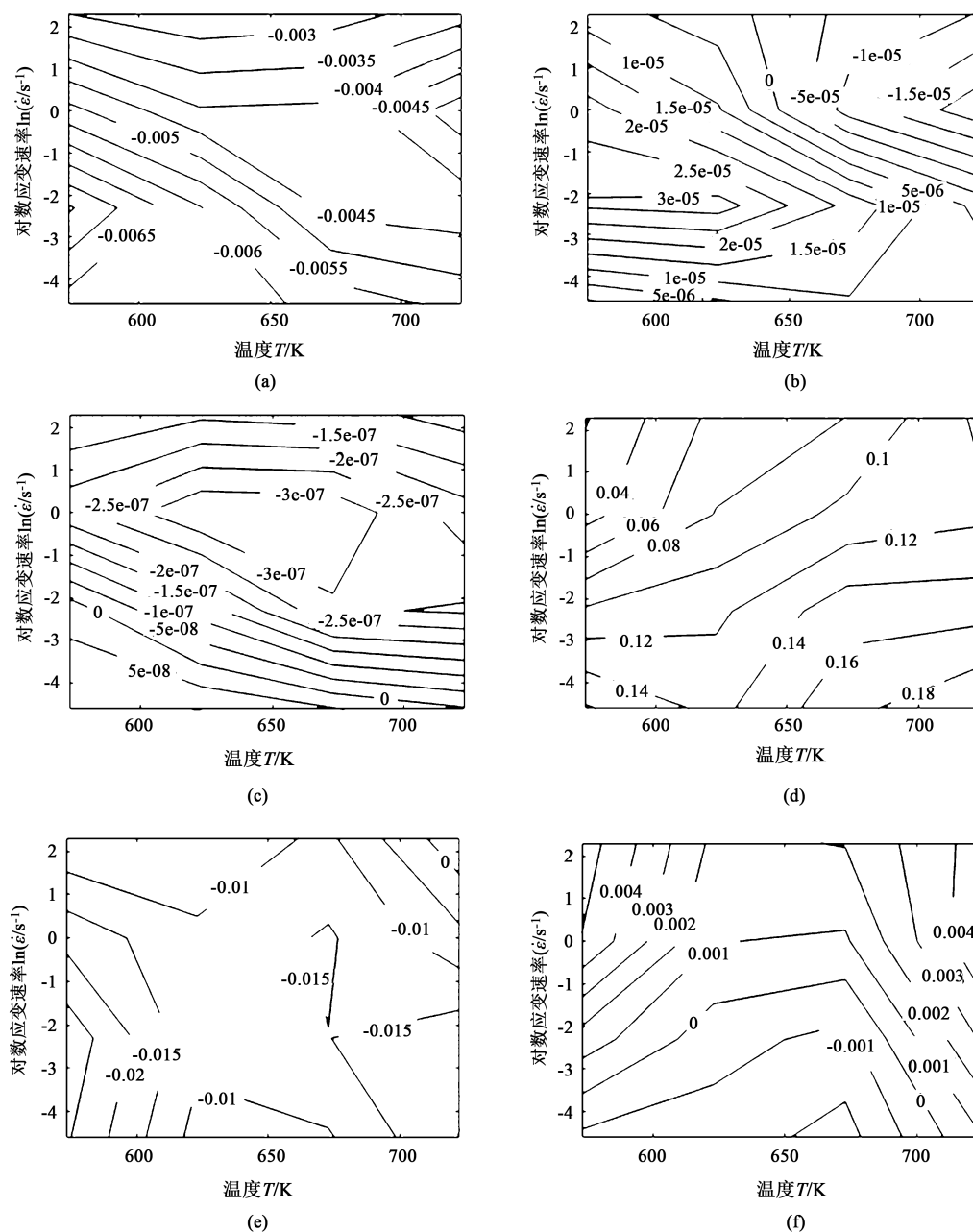
Table 4 Five degree polynomial fitting coefficients of material parameters for Arrhenius model

参数	系数					
	ε^5	ε^4	ε^3	ε^2	ε	常数项
$\ln A$	337.3931	-853.1312	796.1979	-328.9367	51.1877	17.1896
n	-1.0129	2.6966	-2.7278	1.3040	-0.2786	0.0453
α	119.4824	-313.1415	309.2773	-140.9271	26.8492	2.5404
Q	818413.0341	-1936962.9384	1579439.0823	-452418.9526	-27504.0460	151379.2722

2.2 新本构方程

为了在不显著增加材料参数的前提下, 简化本构模型材料参数的求解并且提高模型的预测精度, 本节提出一种 7075 铝合金的高精度新本构模型。从 Arrhenius 模型和 Hensel-Spittle 模型可知, $\ln \dot{\varepsilon}$ 与 $\ln \sigma$ 、 $1/T$ 、 σ 、 T 之间具有较大的线性相关性, 因

此, 选取应力、温度、应变速率相关量 $\ln \sigma$ 、 T 、 $\ln \dot{\varepsilon}$ 作为研究对象, 研究这 3 个变量之间的关系。首先, 将 $\ln \sigma$ 作为因变量, T 和 $\ln \dot{\varepsilon}$ 作为自变量, 研究其高阶偏导数的关系^[14], 通过数值计算得到 7075 铝合金的 $\ln \sigma$ 和 T 、 $\ln \dot{\varepsilon}$ 的各阶偏导数, 如图 2 所示。

图2 当应变为0.1时 $\ln\sigma$ 与 T 、 $\ln\dot{\epsilon}$ 的偏导数

(a) $\ln\sigma$ 与 T 的1阶偏导 (b) $\ln\sigma$ 与 T 的2阶偏导 (c) $\ln\sigma$ 与 T 的3阶偏导
(d) $\ln\sigma$ 与 $\ln\dot{\epsilon}$ 的1阶偏导 (e) $\ln\sigma$ 与 $\ln\dot{\epsilon}$ 的2阶偏导 (f) $\ln\sigma$ 与 $\ln\dot{\epsilon}$ 的3阶偏导

Fig. 2 Partial derivative of $\ln\sigma$ and T and $\ln\dot{\epsilon}$ at strain of 0.1

(a) First partial derivative of $\ln\sigma$ and T (b) Second partial derivative of $\ln\sigma$ and T (c) Third partial derivative of $\ln\sigma$ and T
(d) First partial derivative of $\ln\sigma$ and $\ln\dot{\epsilon}$ (e) Second partial derivative of $\ln\sigma$ and $\ln\dot{\epsilon}$ (f) Third partial derivative of $\ln\sigma$ and $\ln\dot{\epsilon}$

如图2a~图2c所示,对数应力对温度的1~3阶偏导的绝对值分别处于 10^{-2} 、 10^{-5} 和 10^{-7} 数量级;如图2d~图2f所示,对数应力对对数应变速率的1~3阶偏导的数量级分别为 10^{-1} 、 10^{-2} 和 10^{-3} 数量级。图2中的规律在应变为其他值时也存在,即在其他应变水平下对数应力对温度和对数应变速率

的偏导数分别在2阶和3阶时较小。综合考虑材料参数数量和本构模型的精度两个方面,将对数应力对温度的2阶导数假设为零,将对数应力对对数应变速率的3阶导数假设为零,即假设温度对对数应力的影响考虑为1阶逼近、对数应变速率对对数应力的影响考虑为2阶逼近。基于此假设,新的本构

模型构建如下：

$$\ln \sigma = a_0 + a_1 T + a_2 \ln \dot{\epsilon} + a_3 T \ln \dot{\epsilon} + a_4 \ln \dot{\epsilon}^2 \tag{6}$$

将上述假设的本构模型构建为多元线性回归模型为：

$$\begin{bmatrix} \ln \sigma_1 \\ \ln \sigma_2 \\ \ln \sigma_3 \\ \vdots \\ \ln \sigma_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_1 & \ln \dot{\epsilon}_1 & T_1 \ln \dot{\epsilon}_1 & \ln \dot{\epsilon}_1^2 \\ 1 & T_2 & \ln \dot{\epsilon}_2 & T_2 \ln \dot{\epsilon}_2 & \ln \dot{\epsilon}_2^2 \\ 1 & T_3 & \ln \dot{\epsilon}_3 & T_3 \ln \dot{\epsilon}_3 & \ln \dot{\epsilon}_3^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_w & \ln \dot{\epsilon}_w & T_w \ln \dot{\epsilon}_w & \ln \dot{\epsilon}_w^2 \end{bmatrix} \hat{\alpha} + \mu \tag{7}$$

式中： w 为更新后实验数据的数目，本文取 $w = 16$ ； $\hat{\alpha} = [a_0, a_1, a_2, a_3, a_4]^T$ ，为更新后的材料常数的最大似然估计，其中， $a_0 \sim a_4$ 为材料参数； μ 为 16×1 的误差向量，服从均值为 0 的正态分布。

对所有真实应力-真实应变曲线在 0.10~0.85 之间离散为 20 个点，并用每个应变的 16 组数据回归式 (7)，得到不同应变下的 5 个材料参数，如表 5 所示。

将表 5 中的各个参数与应变之间选取 5 次多项式进行线性拟合，得到如表 6 所示的材料参数多项式系数，将表 6 中的数据带入式 (6) 即可得到新本构方程的显示表达式。

表 5 不同应变下新模型材料参数的多元线性回归结果
Table 5 Multiple linear regression results of material parameters for new model under different strains

应变	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	应变	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
0.1000	7.1477	-4.08E-03	-0.2161	4.66E-04	-0.0104	0.4947	7.1980	-4.20E-03	-0.2459	5.53E-04	-0.0091
0.1395	7.2328	-4.19E-03	-0.1987	4.49E-04	-0.0102	0.5342	7.1956	-4.20E-03	-0.2480	5.58E-04	-0.0089
0.1789	7.2454	-4.21E-03	-0.1888	4.40E-04	-0.0097	0.5737	7.1966	-4.21E-03	-0.2503	5.63E-04	-0.0089
0.2184	7.2367	-4.21E-03	-0.1938	4.54E-04	-0.0092	0.6132	7.2048	-4.22E-03	-0.2563	5.72E-04	-0.0093
0.2579	7.2163	-4.18E-03	-0.1996	4.68E-04	-0.0089	0.6526	7.2080	-4.23E-03	-0.2610	5.80E-04	-0.0096
0.2974	7.2055	-4.17E-03	-0.2086	4.87E-04	-0.0088	0.6921	7.2091	-4.24E-03	-0.2643	5.85E-04	-0.0096
0.3368	7.1970	-4.17E-03	-0.2155	5.01E-04	-0.0088	0.7316	7.1978	-4.23E-03	-0.2664	5.89E-04	-0.0095
0.3763	7.1987	-4.18E-03	-0.2270	5.21E-04	-0.0088	0.7711	7.1991	-4.24E-03	-0.2627	5.83E-04	-0.0097
0.4158	7.2052	-4.20E-03	-0.2350	5.35E-04	-0.0088	0.8105	7.2011	-4.25E-03	-0.2623	5.83E-04	-0.0097
0.4553	7.2049	-4.20E-03	-0.2385	5.41E-04	-0.0090	0.8500	7.2013	-4.25E-03	-0.2676	5.91E-04	-0.0100

表 6 新模型材料参数的 5 次多项式拟合系数
Table 6 Five degree polynomial fitting coefficients of material parameters for new model

材料 参数	系数					常数项
	ϵ^5	ϵ^4	ϵ^3	ϵ^2	ϵ	
a_0	31.3781	-80.7779	78.0250	-34.6539	6.8463	6.7515
a_1	-0.0427	0.1092	-0.1044	0.0458	-0.0091	-0.0036
a_2	6.9853	-19.2810	20.3958	-10.0502	2.0932	-0.3429
a_3	-0.0111	0.0303	-0.0314	0.0150	-0.0029	0.0006
a_4	-0.1184	0.2593	-0.1847	0.0324	0.0105	-0.0117

2.3 精度对比

将相同应变速率和温度对应的 Arrhenius (AH) 模型、Hensel-Splittle (HS) 模型和新模型预测值绘制在同一张图上，得到如图 3 所示的对比图。

从图 3 中可见，在所有条件下 HS 模型的预测值偏离实验曲线最多，其次是 AH 模型，最后是新

模型。此外，HS 模型和 AH 模型在不同条件下的预测精度具有显著的不同。例如，当应变速率为 0.01 s⁻¹ 时，中温区域的预测精度较高；当应变速率为 10 s⁻¹ 时，高温区域的预测精度较高。新模型在各个条件下的误差呈现出这种差异。

如图 4 所示，HS、AH 和新模型的回归系数 R 分别为 0.977、0.981 和 0.990，因此，新模型的预测精度最高，其次是 AH 模型，最后为 HS 模型。在材料参数求解方面，新模型和 HS 模型材料参数获取仅需要多元线性回归，AH 模型需要使用多元非线性回归。在预测精度方面，新模型的预测精度最高、HS 模型的预测精度最低。在材料参数数量方面，新模型有 30 个参数、AH 模型有 24 个参数、HS 模型有 9 个参数。综合考虑，新模型在未显著增加材料参数的前提下显著降低了参数获取难度、显著提升了预测精度，因此新模型具有一定的优势。

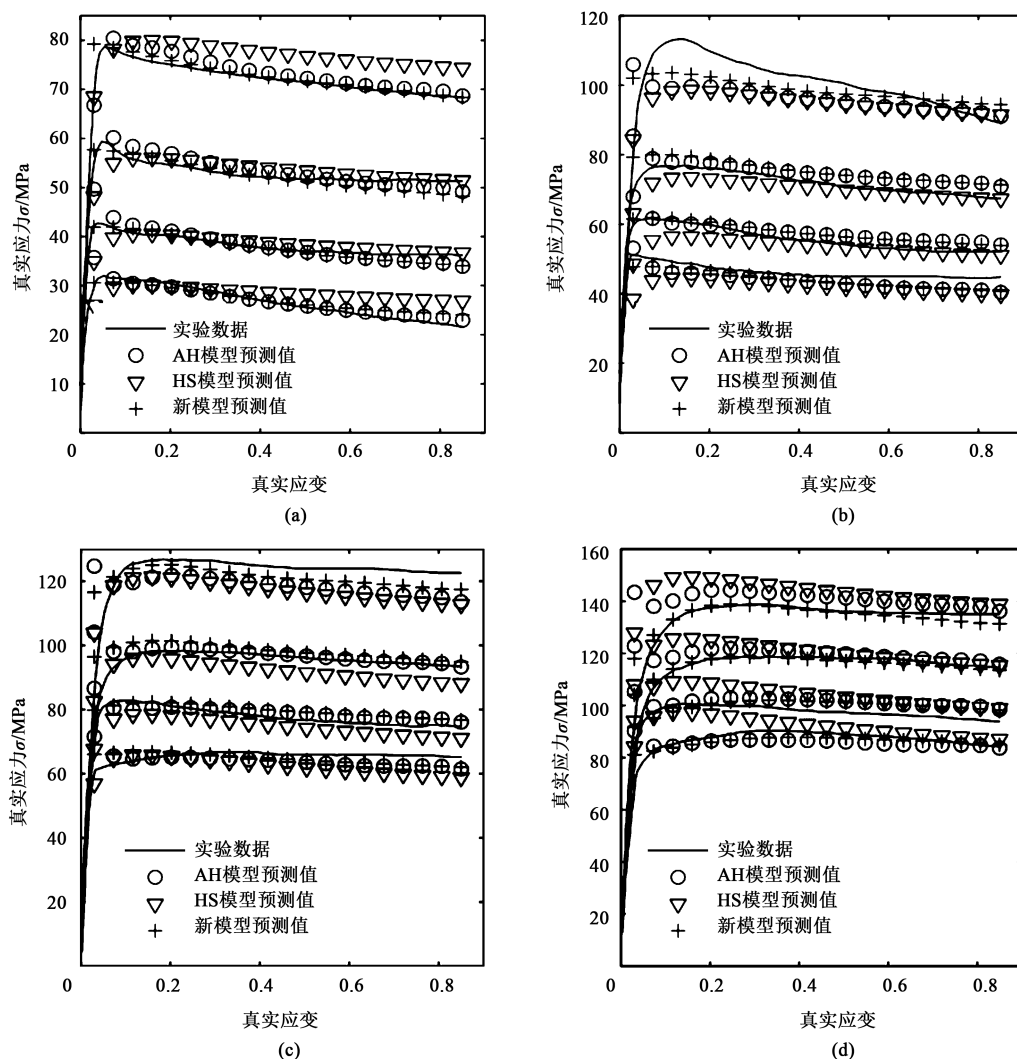


图3 不同模型下 7075 铝合金等温热压缩流变曲线对比

(a) $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$

Fig. 3 Comparison of rheological curves for 7075 aluminum alloy during isothermal hot compression under different models

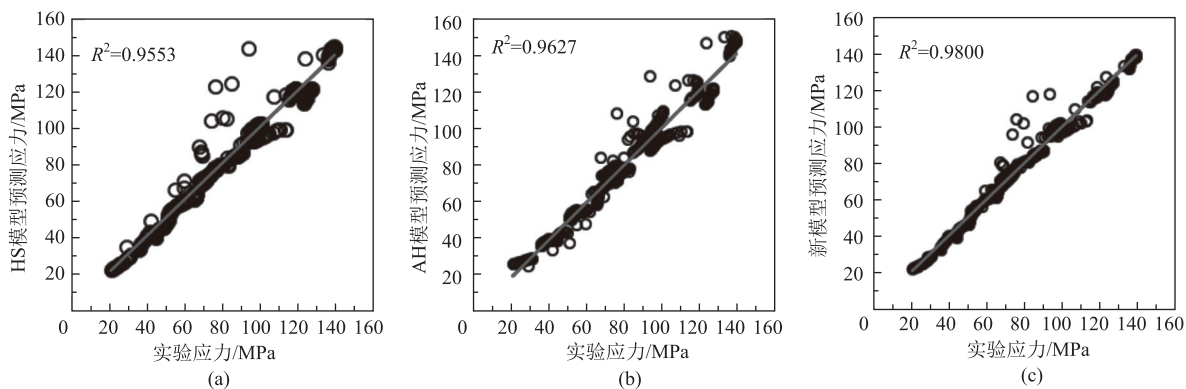


图4 不同预测模型的回归系数

(a) AH 模型 (b) HS 模型 (c) 新模型

Fig. 4 Regression coefficients of different prediction models

(a) AH model (b) HS model (c) New model

3 热加工图及微观组织

3.1 热加工图

为了确定 7050 铝合金的最佳热加工温度和应变速率窗口, 根据最大熵原理计算 7050 铝合金的应变速率敏感因子、功率耗散率及失稳判据图。根据文献 [15] 和文献 [16], 金属变形时吸收的总能量等于发生塑性变形消耗的能量和微观组织演变消耗的能量总和, 其中发生塑性变形消耗的能量和驱动微观组织演变的能量的比值定义为应变速率敏感系数 $m = d\ln\sigma/d\ln\dot{\varepsilon}$ 。金属发生塑性变形时, 功率耗散率可用 $\eta = 2m/(1+m)$ 来表示, 其值越大表明组织演变消耗的能量越大。根据最大熵原理, 金属材料失稳时, 可以用失稳判据指标 $\xi < 0$ 来判断, 其定义如下:

$$\xi = \frac{\partial \ln\left(\frac{m}{m+1}\right)}{\partial \ln\dot{\varepsilon}} \quad (8)$$

将提出的新本构方程显示表达式带入式 (8), 可以得到应变速率敏感系数 m 、能量耗散率 η 及失稳判据 ξ 的显示表达式, 如式 (9) 所示。

$$\begin{cases} m = a_2 + a_3 T + 2a_4 \ln\dot{\varepsilon} \\ \eta = \frac{2a_2 + 2a_3 T + 4a_4 \ln\dot{\varepsilon}}{1 + a_2 + a_3 T + 2a_4 \ln\dot{\varepsilon}} \\ \xi = a_2 + a_3 T + 2a_4 \ln\dot{\varepsilon} + \frac{2a_4}{1 + a_2 + a_3 T + 2a_4 \ln\dot{\varepsilon}} - \frac{2a_4(a_2 + a_3 T + 2a_4 \ln\dot{\varepsilon})}{(a_2 + a_3 T + 2a_4 \ln\dot{\varepsilon})^2} \end{cases} \quad (9)$$

对式 (9) 在应变为 0.1、0.4 和 0.7 时绘图, 得到低、中和高应变水平下的应变速率敏感系数、能量耗散率及失稳判据分布图, 如图 5 所示。

如图 5 所示, 应变速率敏感系数、能量耗散率

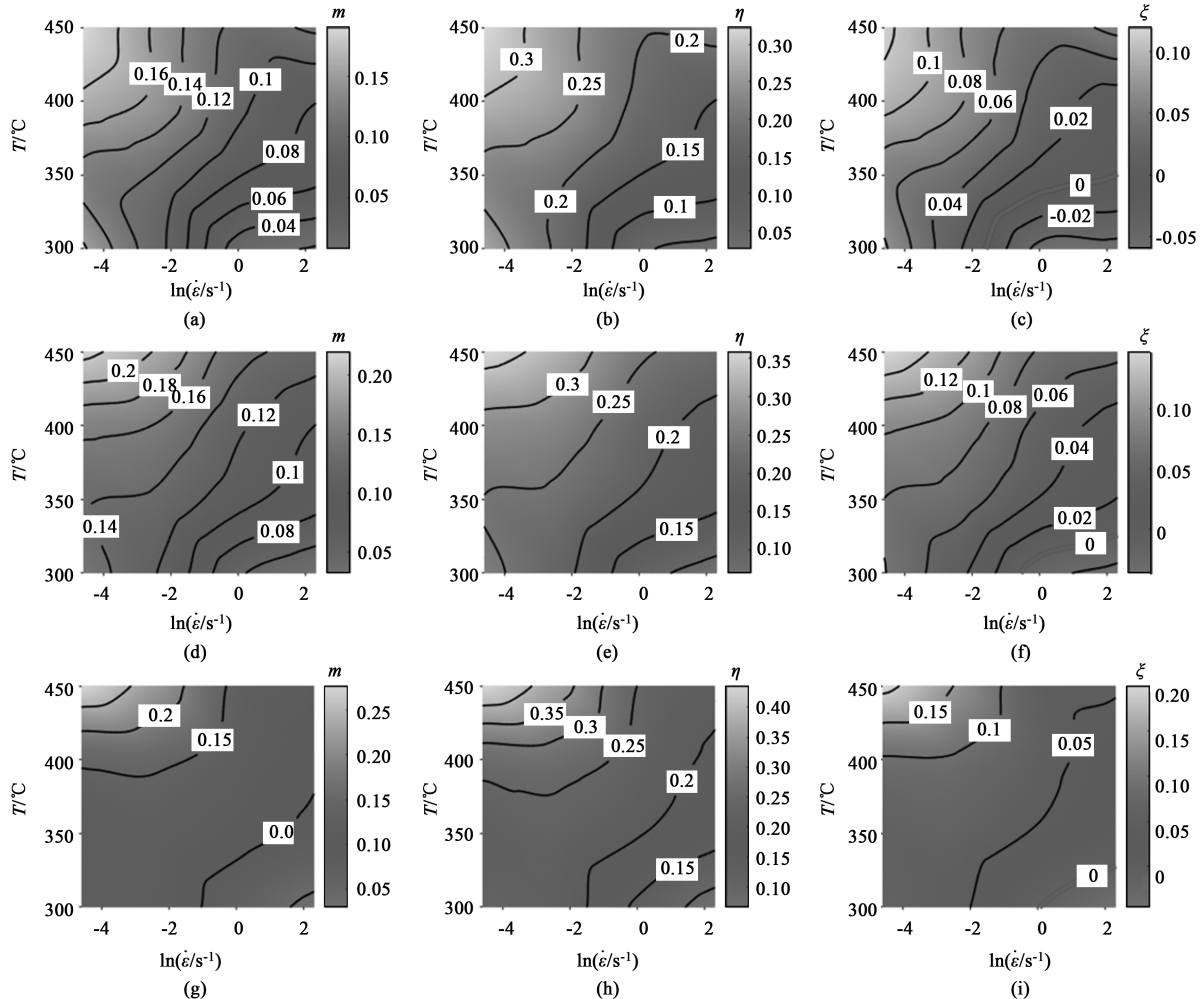


图 5 7050 铝合金在不同应变下的应变速率敏感系数 m 、能量耗散率 η 及失稳判据 ξ 图
(a) $\varepsilon=0.1$, m (b) $\varepsilon=0.1$, η (c) $\varepsilon=0.1$, ξ (d) $\varepsilon=0.4$, m (e) $\varepsilon=0.4$, η (f) $\varepsilon=0.4$, ξ
(g) $\varepsilon=0.7$, m (h) $\varepsilon=0.7$, η (i) $\varepsilon=0.7$, ξ

Fig. 5 Strain rate sensitivity coefficient m , energy dissipation rate η and instability criterion ξ diagrams of 7050 aluminum alloy at different strains

及失稳判据在不同应变下的分布趋势相同, 并且随着应变的增加失稳区域的面积减小。此外, 材料发生失稳风险的区域位于低温、高应变速率区域; 通过提高变形温度或降低变形速率均能提高材料的变形稳定性。考虑到铝合金锻件各个区域的变形速率与加载速度、坯料形状、模具形状和摩擦等因素有关, 控制锻件各个区域的变形速率比较困难, 因此, 将变形温度设置在 623 ~ 723 K 区间, 应变速率在 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 范围内时发生失稳的风险较小, 此区域的能量耗散率大约在 20% ~ 40% 范围内, 材料能够充分发生动态再结晶。

3.2 微观组织分析

为验证基于新本构模型构建的热加工图的有效性, 在热加工图失稳区域和非失稳区域分别选取两

个工况分析压缩试样的微观组织, 如图 6 所示。图 6a 和图 6b 位于变形失稳区域, 其微观组织呈现出长条状特征, 由于这些区域的变形温度较低、变形速率较大, 其动态再结晶机制未能被触发, 原始粗大组织被变形拉长, 进而形成了长条状的微观组织。这种组织的力学性能较差, 且存在一定的各向异性, 因此, 在实际成形工艺中应当避免形成此种类型的组织。图 6c 和图 6d 处于稳定热加工区域, 其微观组织呈现出等轴状, 且分布相对比较均匀, 动态再结晶机制在变形过程中能够较大幅度地细化微观组织。可见, 微观组织分析结果与热加工图的吻合度较高, 热加工图能够在一定程度上反映该材料的动态再结晶程度, 能够在一定程度上指导该铝合金热加工工艺的制定。

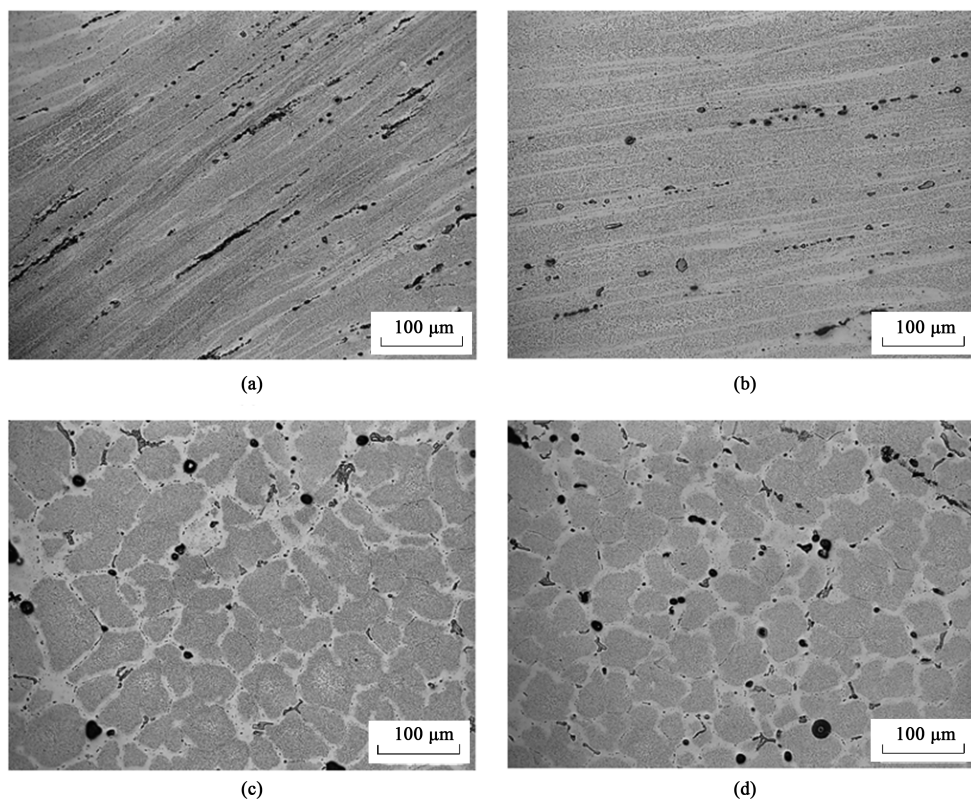


图 6 不同热压缩条件下的微观组织图

(a) 温度为 573 K, 应变速率为 10 s^{-1} (b) 温度为 573 K, 应变速率为 1 s^{-1} (c) 温度为 623 K, 应变速率为 10 s^{-1}
(d) 温度为 623 K, 应变速率为 1 s^{-1}

Fig. 6 Microstructures under different hot compression conditions

(a) Temperature of 573 K, strain rate of 10 s^{-1} (b) Temperature of 573 K, strain rate of 1 s^{-1}
(c) Temperature of 623 K, strain rate of 10 s^{-1} (d) Temperature of 623 K, strain rate of 1 s^{-1}

4 结论

(1) 7075 铝合金为应变速率和温度敏感材料,

当应变速率低于 1 s^{-1} 时, 7075 铝合金具有显著的应力峰值; 当应变速率高于 1 s^{-1} 时, 没有显著的应力峰值。在应变速率低于 1 s^{-1} 时, 该材料在 573 ~ 723 K 温度区间能够发生动态再结晶软化; 当应

速率较大时, 尽管温度较高, 该材料的动态再结晶不显著。

(2) 在材料参数求解方面, 新模型和 HS 模型材料参数获取仅需要多元线性回归, AH 模型需要使用多元非线性回归。在预测精度方面, 新模型的预测精度最高、HS 模型的预测精度最低。在材料参数数量方面, 新模型有 30 个参数、AH 模型有 24 个参数、HS 模型有 9 个参数。综合考虑, 新模型在未显著增加材料参数的前提下降低了参数获取难度、显著提升了预测精度, 因此新模型具有一定的优势。

(3) 应变速率敏感系数、能量耗散率及失稳判据在不同应变下的分布趋势相同, 并且随着应变的增加, 失稳区域的面积减小; 材料发生失稳风险的区域位于低温、高应变速率区域, 通过提高变形温度或降低变形速率均能提高材料的变形稳定性; 将变形温度设置在 623 ~ 723 K 区间时, 应变速率在 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 范围内发生失稳的风险均较小, 此区域的能量耗散率在 20% ~ 40% 范围内, 材料能够充分发生动态再结晶。

参考文献:

- [1] 董红松, 李辉. 基于 NSGA-II 的 7050 铝合金锻造力学性能多目标优化 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (8): 41-47.
Dong H S, Li H. Multi-objective optimization on forging mechanical property for 7050 aluminum alloy based on NSGA-II [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (8): 41-47.
- [2] Quan G Z, Wang T, Li Y L, et al. Artificial neural network modeling to evaluate the dynamic flow stress of 7050 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2016, 25 (2): 1-12.
- [3] 郝爱国, 吉卫, 郝花蕾. 7050 铝合金的热变形行为及热加工图研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (17): 141-144.
Hao A G, Ji W, Hao H L. Study on hot deformation behavior and hot processing map of 7050 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (17): 141-144.
- [4] 夏洪均, 唐全波, 王敬, 等. 7050 铝合金修正本构模型及 Zener-Hollomon 参数演化 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (6): 149-156.
Xia H J, Tang Q B, Wang J, et al. Modified constitutive model and Zener-Hollomon parameter evolution of 7050 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (6): 149-156.
- [5] 王运, 张昌明, 张昱. 航空 Al7050 合金的静动态力学特性研究及 JC 本构模型构建 [J]. 材料导报, 2021, 35 (10): 10096-10102.
Wang Y, Zhang C M, Zhang Y. Study on static and dynamic mechanical properties of aviation Al7050 alloy and construction of JC constitutive model [J]. Materials Reports, 2021, 35 (10): 10096-10102.
- [6] 杨成曦, 王姝俨, 吴道祥. 锻态 7050 铝合金修正 JC 本构模型建立与模拟应用 [J]. 铝加工, 2022, (4): 47-51.
Yang C X, Wang S Y, Wu D X. Construction and simulation application of modified Johnson-Cook constitutive model for forged 7050 aluminum alloy [J]. Aluminium Fabrication, 2022, (4): 47-51.
- [7] 苏燕, 梁武. 基于 RBF 神经网络的铸轧 7050 铝合金的力学性能预测 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (21): 145-147, 151.
Su Y, Liang W. Prediction of mechanical properties of casting rolling 7050 aluminum alloy based on RBF neural network [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (21): 145-147, 151.
- [8] 马斌, 梁强, 贾艳艳, 等. 基于 BPNN、SVR 和 RF 模型的 7050 合金高温流动应力预测 [J]. 材料热处理学报, 2023, 44 (3): 196-204.
Ma B, Liang Q, Jia Y Y, et al. Prediction of high temperature flow stress of 7050 aluminum alloy based on BPNN, SVR and RF models [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44 (3): 196-204.
- [9] 张含茹. 7050 铝合金热态流变行为及其微观组织演变研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
Zhang H R. Study on Thermal Rheological Behavior and Microstructure Evolution of 7050 Aluminum Alloy [D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [10] Liu S H, Pan Q L, Li H, et al. Characterization of hot deformation behavior and constitutive modeling of Al-Mg-Si-Mn-Cr alloy [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54: 4366-4383.
- [11] Rudra A, Das S, Dasgupta R. Constitutive modeling for hot deformation behavior of Al-5083+SiC composite [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28: 87-99.
- [12] 陈学文, 杨喜晴, 王纳纳. GCr15SiMn 钢的温变形行为及 Hansel-Spittel 流变应力模型 [J]. 金属热处理, 2018, 43 (5): 34-38.
Chen X W, Yang X Q, Wang N N. Warm deformation behavior and Hansel-Spittel of constitutive model of GCr15SiMn steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43 (5): 34-38.
- [13] Richardson G J, Sellars C M, Tegart W. Recrystallization during creep of nickel [J]. Acta Metallurgica, 1966, 14 (10): 1225-1236.
- [14] Zhang J S, Xiao G Q, Deng G Y. The quadratic constitutive model based on partial derivative and Taylor series of Ti6242s alloy and predictability analysis [J]. Materials, 2023, 16 (7): 2928.
- [15] Prasad Y V R K, Gegel H L, Doraivelu S M, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: Forging of Ti-6242 [J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15 (10): 1883-1892.
- [16] 赵天生. 7050 铝合金 T 形截面高筋薄壁锻件成形工艺优化及多级时效研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
Zhao T S. Study on Optimization of Forming Process and Multi Stage Aging for 7050 Alloy T-shape Section with High Reinforcement and Thin Wall Forgings [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.