新型铝锂合金温热拟静态拉伸实验及其流变应力的预测计算

杜舜尧，陈明和，谢兰生，陈 灿
(南京航空航天大学，江苏 南京 210016)

摘 要：采用 UTM5000 电子万能拉伸试验机，在变形温度 573~648 K 和应变速率 0.001~0.1 s^{-1} 条件下对 2060-T8 铝锂合金进行等温恒应变速率拉伸试验，得到其在变形过程中的真应力-真应变曲线，建立了基于应变补偿和修正项的温热变形本构方程。通过扫描电子显微镜(SEM)分析拉伸断口，对 2060-T8 铝锂合金的温热变形行为进行研究。结果表明：2060-T8 铝锂合金对变形温度和应变速率具有较高的敏感性，流变应力曲线呈现出应变硬化和流变软化的特征，随着变形温度的升高和应变速率的降低，稳态流变特征逐渐消失，其在温热变形条件下的断裂形式为韧性断裂。修正的本构模型与实验值吻合度较高，可以为 2060-T8 铝锂合金温热变形的有限元模拟提供前提条件。

关键词：2060-T8 铝锂合金；温热变形；应变补偿；修正项；本构模型

中图法分类号：TG146.21 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X(2018)07-2113-07

铝锂合金由于具有密度低、比强度和弹性模量高、优异的耐腐蚀和低温性能等特点，而广泛应用于航空航天领域。有研究表明，在铝中每加入 1%(质量分数)的锂元素，即可使合金的弹性模量提高 6%，密度降低 3%，而 2%的锂元素加入量则可使合金的弹性模量提高 25%~35%，密度降低 10%，铝锂合金在减重和降低成本方面具有无法比拟的优势。因此，其被认为是 21 世纪新一代理想的航空航天用高强轻质材料[1-7]。

但是铝锂合金在常温下的塑性较差，成型性能不佳，无法满足复杂形状零件的生产需要，其发展受到了严重制约。然而，有研究表明，升高温度可以显著改善其成形性能[8]。2060-T8 铝锂合金作为一种新型的第 3 代铝锂合金，主要用于制造飞机蒙皮，是实现我国飞机减重制造的理想材料[9,10]。因此，研究 2060-T8 铝锂合金的温热变形行为并建立精确的本构模型对于其热成形工艺的制定以及热力学参数的选择具有重要的指导意义。同时，还可以为有限元分析和成形过程的预测提供前提条件和理论基础[11-13]。

本研究在不同的变形温度和应变速率条件下对 2060-T8 铝锂合金进行等温恒应变速率拉伸试验，基于获得的真应力-真应变曲线并结合扫描电子显微镜对拉伸断口的分析来研究其温热变形行为。同时，建立了基于应变补偿和修正项的 2060-T8 铝锂合金温热变形本构模型，最后通过预测值与实验结果的对比验证了模型的可靠性。

1 实 验

试验所用的材料为厚度 2 mm 的 2060-T8 铝锂合金板材，初始显微组织如图 1 所示。由图 1 可知，晶粒间尺寸差异不是特别大且有等轴化趋势，拉伸试样尺寸如图 2 所示。拉伸试验在 UTM5000 电子万能拉伸试验机上进行，实验温度为 573、598、623 和 648 K，应变速率为 0.001、0.01 和 0.1 s^{-1}。实验时，升温至规定温度后放入试样并保温 5 min 后再开始拉伸，拉伸实验结束后试样立即进行水淬。每种实验条件下至少进行 2 次重复性实验，取 2 次有效数据进行平均[14]。利用 JSM-6380LV 型扫描电子显微镜对拉伸断口进行观察，进而分析其断裂行为。

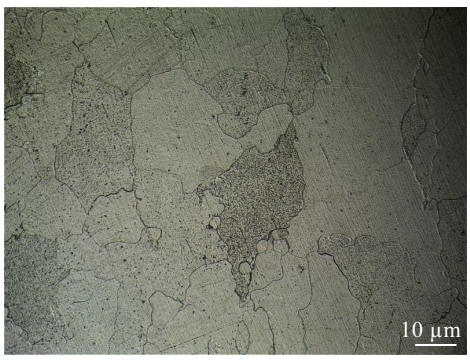


图 1 2060-T8 铝锂合金初始显微组织

Fig.1 Initial microstructure of 2060-T8 Al-Li alloy

收稿日期：2017-07-15

作者简介：杜舜尧，男，1991 年生，硕士生，南京航空航天大学机电学院，江苏 南京 210016，电话：025-84892508，E-mail: 739324766@qq.com

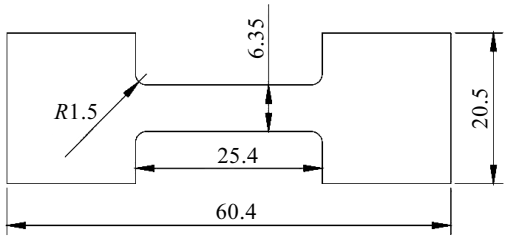


图 2　拉伸试样尺寸

Fig.2　Specification of the tensile test specimen

2　结果与讨论

2.1　温热变形行为

图 3 为 2060-T8 铝锂合金在不同变形温度和应变速率下的真应力-真应变曲线。由图 3 可知，2060-T8 铝锂合金对变形温度和应变速率的敏感性较高，其在温热拉伸过程中的流变应力随着变形温度的升高和应变速率的降低而减小。相同变形温度条件下，流变应力达到峰值时所需要的峰值应变随着应变速率的升高而增加[13]。不同条件下的真应力-真应变曲线均表现出相同的特征，即流变应力在应变硬化作用下达到最大值后，开始出现流变软化现象[14]。在低温高应变速率下，流变应力曲线呈现出一定的稳态流变特征，这是加工硬化和流变软化达到平衡时的结果，但是随着变形温度的升高和应变速率的降低，流变软化效应更加突出，稳态流变特征逐渐消失[15]。

图 4 为应变速率 0.1 s^{-1}，不同变形温度下的 2060-T8 铝锂合金拉伸断口形貌。由图 4 可知，变形温度分别为 573、598 和 648 K 对应的拉伸断口中均存在大量的韧窝，并伴有明显的塑形滑移痕迹，可以看出 2060-T8 铝锂合金在温热变形条件下的断裂形式为韧性断裂。观察图 4a~4c 可以发现，变形温度升高，拉伸断口的宽度减小。这表明，相同条件下随着变形温度的升高，材料在断裂前产生的颈缩程度增大，其塑形变形能力提高。

2.2　本构方程的建立

Arrhenius 方程可用于表征变形温度和应变速率对流变应力的影响，同时，变形温度和应变速率之间

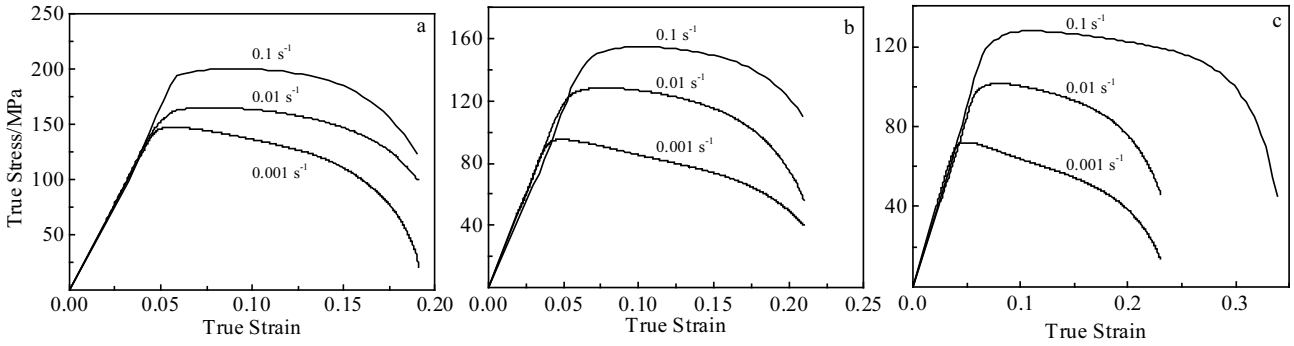


图 3　2060-T8 铝锂合金在不同变形温度和应变速率下的真应力-真应变曲线

Fig.3　True stress-strain curves of 2060-T8 Al-Li alloy at different deformation temperatures and strain rates: (a) 573 K, (b) 598 K, and (c) 623 K

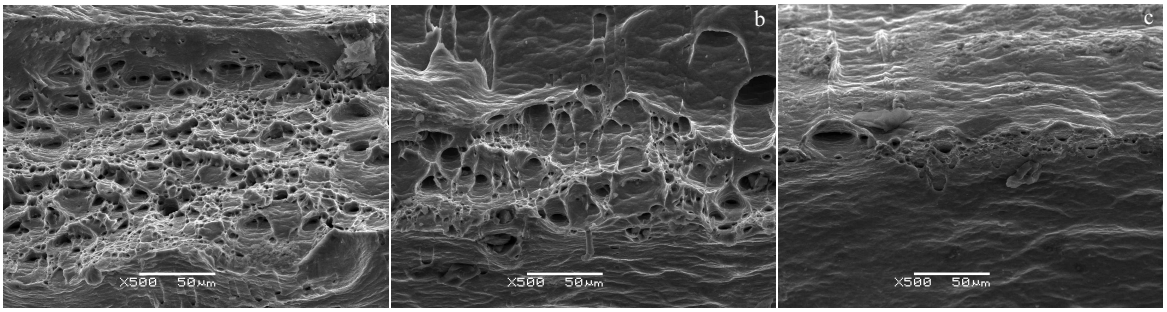


图 4　0.1 s^{-1} 应变速率时不同变形温度下 2060-T8 铝锂合金的拉伸断口形貌

Fig.4　Tensile fracture morphologies of 2060-T8 Al-Li alloy at different deformation temperatures and strain rate of 0.1 s^{-1}: (a) 573 K, (b) 598 K, and (c) 648 K

的关系可以通过 Zener-Holloman 参数来描述。Z 参数及 Arrhenius 方程的 3 种形式分别如式(1)、(2)、(3)和(4)所示[15,16]：

$$Z = \dot{\varepsilon}\exp(\frac{Q}{RT}) \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon}\exp(\frac{Q}{RT}) = B\sigma^{n_1} \qquad \alpha\sigma < 0.8 \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon}\exp(\frac{Q}{RT}) = C\exp(\beta\sigma) \qquad \alpha\sigma > 1.2 \tag{3}$$

$$\dot{\varepsilon}\exp(\frac{Q}{RT}) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \qquad \text{for all } \sigma \tag{4}$$

式中，$\dot{\varepsilon}$ 为应变速率(s^{-1})，Q 为变形激活能(kJ/mol)，R 为摩尔气体常数[8.314 J/(mol·K)]，T 为绝对温度(K)，σ 为流变应力(MPa)，A，B，C，n_1，α，β，n 均为材料常数，$\alpha=\beta/n_1$。

双曲正弦方程，即式(4)，在流变应力较低和较高的 2 种情况下均具有较好的适用性，因此本研究拟建立双曲正弦型的 Arrhenius 本构方程[12]。下面将以真应变 ε=0.1 为例来说明求解过程。

对式(2)、(3)和(4)两边取对数，可得：

$$\ln\dot{\varepsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln B + n_1\ln\sigma \tag{5}$$

$$\ln\dot{\varepsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln C + \beta\sigma \tag{6}$$

$$\ln\dot{\varepsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln A + n\ln[\sinh(\alpha\sigma)] \tag{7}$$

在温度不变的条件下，变形激活能 Q 可看作为常数，因此通过式(5)、(6)和(7)可得：

$$n_1 = \frac{\partial\ln\dot{\varepsilon}}{\partial\ln\sigma}\Big|_T \tag{8}$$

$$\beta = \frac{\partial\ln\dot{\varepsilon}}{\partial\sigma}\Big|_T \tag{9}$$

$$n = \frac{\partial\ln\dot{\varepsilon}}{\partial\ln[\sinh(\alpha\sigma)]}\Big|_T \tag{10}$$

分别对 $\ln\dot{\varepsilon}$-$\ln\sigma$、$\ln\dot{\varepsilon}$-σ 和 $\ln\dot{\varepsilon}$-$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 进行线性回归，如图 5 所示，取平均值后即可得到 n_1=8.6095，β=0.069467，n=5.4099，对应的 α=0.008069。

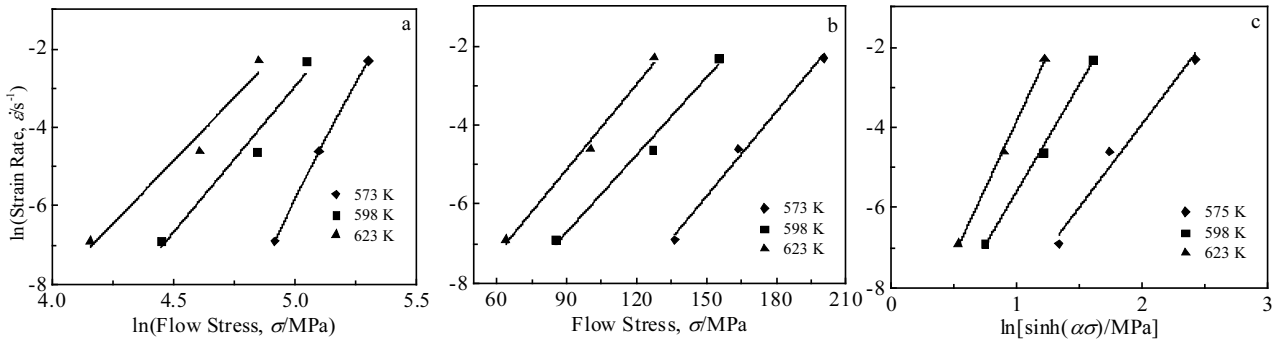


图 5　不同变形温度下 $\ln\dot{\varepsilon}$-$\ln\sigma$、$\ln\dot{\varepsilon}$-σ 与 $\ln\dot{\varepsilon}$-$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系

Fig.5　Relationship of $\ln\dot{\varepsilon}$-$\ln\sigma$ (a), $\ln\dot{\varepsilon}$-σ (b), and $\ln\dot{\varepsilon}$-$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (c) at different deformation temperatures

之后，在应变速率不变的条件下，由式(7)可得：

$$Q = Rn\frac{\partial\ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)}\Big|_{\dot{\varepsilon}} \tag{11}$$

对不同应变速率下的 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$-$1/T$ 进行线性回归，如图 6 所示，取平均值后即可得到 Q=305.03 kJ/mol。

结合式(1)和(4)，并将等式两边取对数可得：

$$\ln Z = \ln A + n\ln[\sinh(\alpha\sigma)] \tag{12}$$

对不同变形温度和应变速率下的 $\ln Z$-$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 进行线性回归，如图 7 所示，可获得回归直线的斜率为 5.1322，与通过式(10)而确定的 n=5.4099 相比吻合度较高。由图 7 并结合式(12)可知，回归直线的截距即 $\ln A$=50.141，进一步可得 $A=5.9698\times10^{21}$。

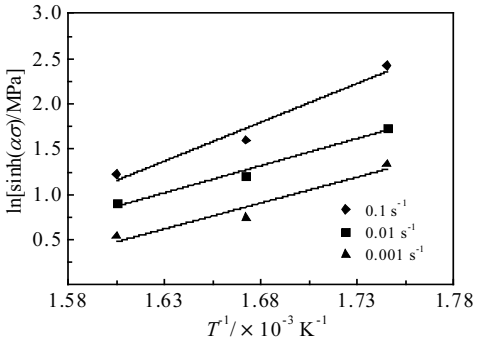


图 6　不同应变速率下 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$-$1/T$ 的关系

Fig.6　Relationship of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$-$1/T$ at different strain rates

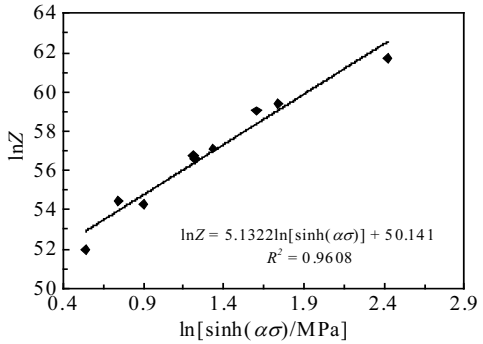


图 7　$\ln Z$-$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$的关系

Fig.7　Relationship of $\ln Z$-$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

将上述求得的材料常数与变形激活能代入式(1)和(4)中即可得到双曲正弦型的 Arrhenius 本构方程：

$$Z = \dot{\varepsilon}\exp(\frac{305.03\times10^3}{8.314T}) = 5.9698\times10^{21}[\sinh(8.069\times10^{-3}\sigma)]^{5.4099} \quad (13)$$

2.3　应变补偿与修正项

通常认为，一般材料的塑性变形行为属于稳态流变，在建立本构方程时可以忽略应变项的影响[16]，但是，通过 2060-T8 铝锂合金温热变形的真应力-真应变曲线以及相关分析可以看出，在温热条件下进行拟静态拉伸时，应力是应变的非线性函数，应变项对其本构方程的影响显著，因而需要在本构方程的各个参数中引入应变项，同时，六次多项式具有较好的拟合效果[15]，因此有如下形式：

$$\alpha = D_0 + D_1\varepsilon + D_2\varepsilon^2 + D_3\varepsilon^3 + D_4\varepsilon^4 + D_5\varepsilon^5 + D_6\varepsilon^6 \quad (14)$$

$$n = E_0 + E_1\varepsilon + E_2\varepsilon^2 + E_3\varepsilon^3 + E_4\varepsilon^4 + E_5\varepsilon^5 + E_6\varepsilon^6 \quad (15)$$

$$Q = F_0 + F_1\varepsilon + F_2\varepsilon^2 + F_3\varepsilon^3 + F_4\varepsilon^4 + F_5\varepsilon^5 + F_6\varepsilon^6 \quad (16)$$

$$\ln A = G_0 + G_1\varepsilon + G_2\varepsilon^2 + G_3\varepsilon^3 + G_4\varepsilon^4 + G_5\varepsilon^5 + G_6\varepsilon^6 \quad (17)$$

对式(14)、(15)、(16)和(17)进行六次多项式拟合，拟合系数如表 1 所示，拟合结果如图 8 所示。

联合式(1)和(4)并加入修正项 CT，即可得到考虑应变影响的用 Z 参数表示的 2060-T8 铝锂合金温热变

表 1　α、n、Q 和 $\ln A$ 关于应变多项式的拟合系数

Table 1　Coefficients of the polynomial for α, n, Q and $\ln A$

α	n	Q/J·mol^{-1}	$\ln A$
D_0=0.03395	E_0=21.64406	F_0=6.86066×10^6	G_0=1369.13923
D_1= -1.23732	E_1= -327.85099	F_1=-3.08278×10^8	G_1=-62746.1389
D_2=24.02998	E_2=-85.48582	F_2=6.12016×10^9	G_2=1.25775×10^6
D_3= -246.73013	E_3=55781.71997	F_3=-6.50413×10^{10}	G_3=-1.34768×10^7
D_4=1429.02964	E_4=-605769.47728	F_4=3.87525×10^{11}	G_4=8.08839×10^7
D_5=-4457.15512	E_5=2.65461×10^6	F_5=-1.22276×10^{12}	G_5=-2.56884×10^8
D_6=5948.75957	E_6=-4.34572×10^6	F_6=1.58751×10^{12}	G_6=3.3556×10^8

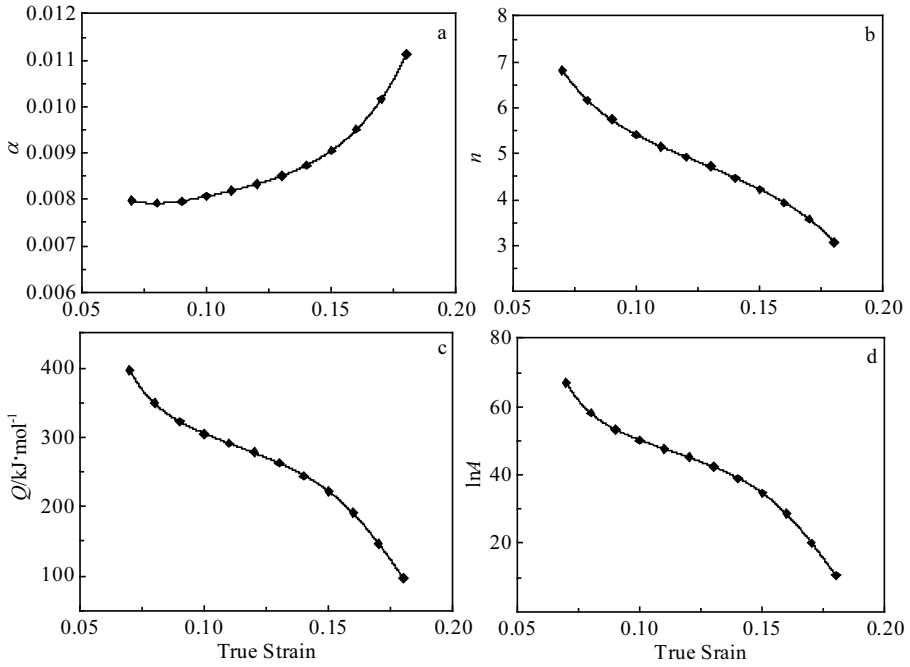


图 8　α、n、Q 和 $\ln A$ 随应变的变化

Fig.8 Variations of α (a), n (b), Q (c) and $\ln A$ (d) with true strain

形本构模型：

$$\sigma = \frac{1}{\alpha}\ln\left\{(\frac{Z}{A})^{1/n} + [(\frac{Z}{A})^{2/n} + 1]^{1/2}\right\} - CT \quad (18)$$

式中，CT 为修正项，是未添加修正项本构模型的预测值与实验值的差值，CT 是一个与变形温度、应变速率和应变有关的函数。下面将介绍 2 种基于不同修正项的本构模型。

在第 1 种修正本构模型中，修正项 CT 不考虑变形温度和应变速率的影响，将其视为是一个只与应变有关的变量：

$$CT = H_0 + H_1\varepsilon + H_2\varepsilon^2 + H_3\varepsilon^3 + H_4\varepsilon^4 + H_5\varepsilon^5 + H_6\varepsilon^6 \quad (19)$$

对式(19)进行六次多项式拟合，拟合系数如表 2 所示。

在第 2 种修正本构模型中，固定变形温度和应变速率，对不同条件下的修正项 CT 分别进行六次多项式拟合，拟合系数如表 3 所示。

2.4　2 种修正本构模型的对比

图 9 和图 10 分别为 2 种修正本构模型对流变应力的预测值与实验值的对比。从图 9 可以看出，第 1 种修正本构模型在低温与低应变速率下的预测精度较高，但是，随着变形温度和应变速率的提高，模型的预测精度有所下降，这是因为第 1 种修正本构模型中的修正项没有考虑变形温度和应变速率的影响。观察图 10 可以发现，第 2 种修正本构模型在各种变形温度和应变速率条件下均具有较高的预测精度。同时，本研究引入相关系数 R 和平均相对误差 MRE 来定量评价 2 种修正本构模型的预测精度，R 和 MRE 的表达式如下[15]：

表 2　第 1 类 *CT* 关于应变多项式的拟合系数

Table 2　Coefficients of the polynomial for the first kind *CT*

CT
H_0=-927.38455
H_1=54040.85542
H_2=-1.15247×10^6
H_3=1.29492×10^7
H_4=-8.08562×10^7
H_5=2.65503×10^8
H_6=-3.58355×10^8

表 3　第 2 类 *CT* 关于应变多项式的拟合系数

Table 3　Coefficients of the polynomial for the second kind *CT*

573 K/0.1 s^{-1}	573 K/0.01 s^{-1}	573 K/0.001 s^{-1}	598 K/0.1 s^{-1}	598 K/0.01 s^{-1}	598 K/0.001 s^{-1}	623 K/0.1 s^{-1}	623 K/0.01 s^{-1}	623 K/0.001 s^{-1}
H_0=-1652.20322	H_0=-123.2769	H_0=69.97043	H_0=46.84749	H_0=-1101.88611	H_0=-1067.64997	H_0=-1165.47259	H_0=-1676.86735	H_0=-1675.92262
H_1=94910.87088	H_1=11353.4421	H_1=3001.96619	H_1=1365.79053	H_1=62554.32878	H_1=62551.27185	H_1=65653.37409	H_1=91814.04879	H_1=93162.59991
H_2=-2.06305×10^6	H_2=-193669.01042	H_2=-76701.32875	H_2=26205.34775	H_2=-1.32243×10^6	H_2=-1.35955×10^6	H_2=-1.39387×10^6	H_2=-1.96483×10^6	H_2=-2.02436×10^6
H_3=2.36362×10^7	H_3=1.64784×10^6	H_3=1.00654×10^6	H_3=-77757.14061	H_3=1.4719×10^7	H_3=1.54977×10^7	H_3=1.55877×10^7	H_3=2.21327×10^7	H_3=2.30926×10^7
H_4=-1.50168×10^8	H_4=-7.31116×10^6	H_4=-7.34728×10^6	H_4=7.1601×10^6	H_4=-9.10165×10^7	H_4=-9.79379×10^7	H_4=-9.67119×10^7	H_4=-1.3837×10^8	H_4=-1.46003×10^8
H_5=5.00503×10^8	H_5=1.54043×10^7	H_5=2.78207×10^7	H_5=-2.95746×10^7	H_5=2.9608×10^8	H_5=3.25128×10^8	H_5=3.14919×10^8	H_5=4.54552×10^8	H_5=4.84698×10^8
H_6=-6.83561×10^8	H_6=-1.20673×10^7	H_6=-4.31787×10^7	H_6=4.61445×10^7	H_6=-3.96177×10^8	H_6=-4.43853×10^8	H_6=-4.19961×10^8	H_6=-6.12489×10^8	H_6=-6.60051×10^8

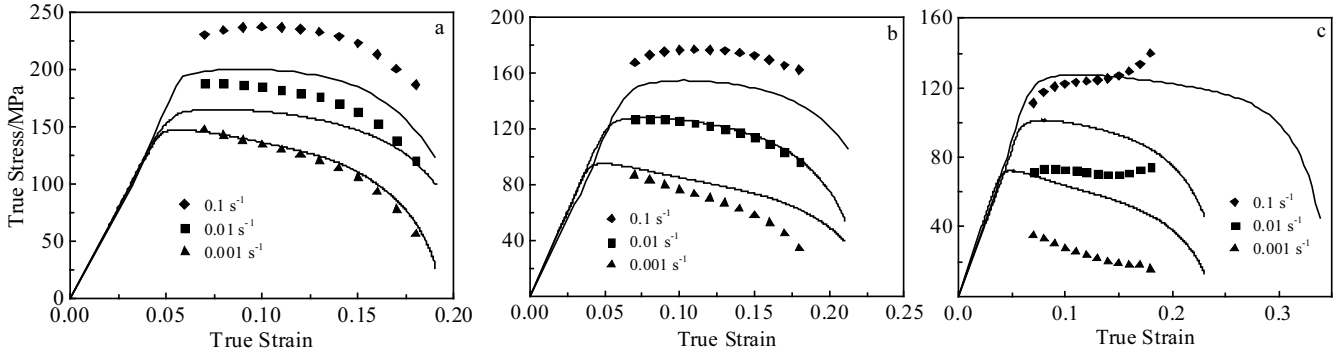


图 9　第 1 种修正本构模型的预测值与实验值的对比

Fig.9　Comparison of predicted data by the first modified constitutive model and experimental data: (a) 573 K, (b) 598 K, and (c) 623 K

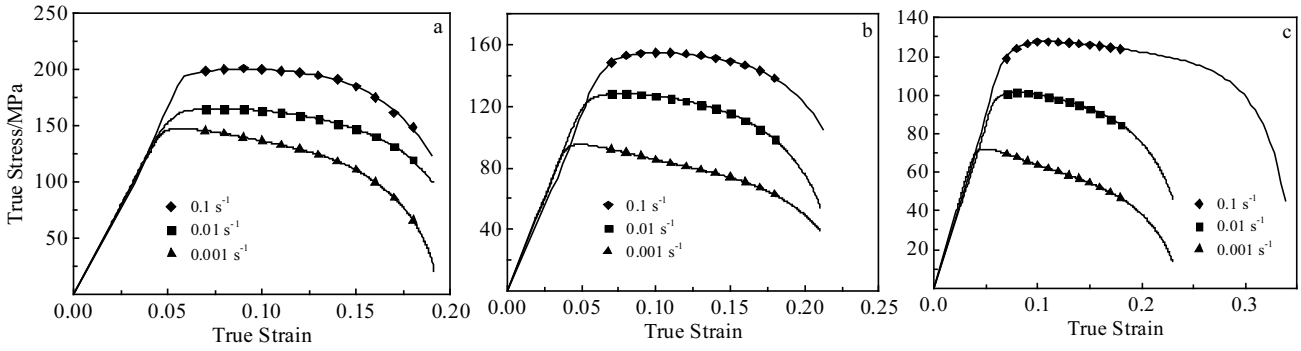


图 10　第 2 种修正本构模型的预测值与实验值的对比

Fig.10　Comparison of predicted data by the second modified constitutive model and experimental data: (a) 573 K, (b) 598 K, and (c) 623 K

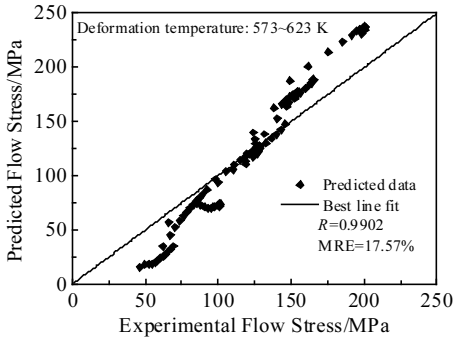


图 11　第 1 种修正本构模型预测值与实验值之间的相关程度

Fig.11　Correlation between predicted data by the first modified constitutive model and experimental data

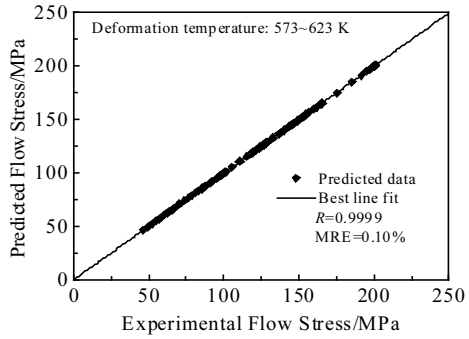


图 12　第 2 种修正本构模型预测值与实验值之间的相关程度

Fig.12　Degree of correlation between predicted data by the second modified constitutive model and experimental data

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^{N}(P_i - \bar{P})^2}} \tag{20}$$

$$\mathrm{MRE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{E_i - P_i}{E_i}\right| \times 100\% \tag{21}$$

式中，E_i 为流变应力的实验值，P_i 为修正本构模型的预测值，N 为数据组的数据量，$\bar{E}$ 为实验数据的平均值，$\bar{P}$ 为预测数据的平均值。图 11 表明第 1 种修正本构模型的预测值与实验值的相关系数 R 和平均相对误差 MRE 分别为 0.9902 和 17.57%，图 12 表明第 2 种修正本构模型的预测值与实验值的相关系数 R 和平均相对误差 MRE 分别为 0.9999 和 0.10%，这说明第 2 种修正本构模型较第 1 种而言具有更高的预测精度。

3　结　论

1）2060-T8 铝锂合金在温热变形过程中，随着变形温度的升高和应变速率的降低，其流变应力降低，稳态流变特征逐渐消失。

2）2060-T8 铝锂合金在温热变形过程中，其断裂形式为韧性断裂，材料的塑性变形能力随着变形温度的升高而提高。

3）建立了 2 种基于应变补偿和修正项的本构模型。第 1 种修正本构模型其预测值与实验值的相关系数 R 和平均相对误差 MRE 分别为 0.9902 和 17.57%。第 2 种修正本构模型其预测值与实验值的相关系数 R 和平均相对误差 MRE 分别为 0.9999 和 0.10%。对比，第 2 种修正本构模型具有更高的预测精度。

参考文献　References

[1] Zhang Xingzhen(张兴振), Li Xiaoqiang(李小强), Li Dongsheng (李东升) *et al*. *Aeronautical Manufacturing Technology* (航空制造技术)[J], 2015, 472(3): 46

[2] Rioja R J, Liu J. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2012, 43(9): 3325

[3] Xiang S, Liu D Y, Zhu R H *et al*. *Trans Nonferrous Met Soc*

China[J], 2015, 25(12): 3855

[4] Mou Haikuo(牟海阔), Huang Xinda(黄信达), Yuan Yichu(袁益楚) *et al*. *Scientia Sinica* (*Technologica*)(中国科学: 技术科学)[J], 2014, 44(1): 89

[5] Liu Bing(刘 兵), Peng Chaoqun(彭超群), Wang Richu(王日初) *et al*. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(9): 1705

[6] Li Jinfeng(李劲风), Zheng Ziqiao(郑子樵), Chen Yonglai(陈永来) *et al*. *Aerospace Materials & Technology*(宇航材料工艺)[J], 2012, 42(1): 13

[7] Lequeu P. *Advanced Materials and Processes*[J], 2008, 166(2): 47

[8] Ma Gaoshan(马高山), Wan Min(万 敏), Wu Xiangdong(吴向东). *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2007, 14(3): 68

[9] Wang Haojun(王浩军), Shi Chunling(史春玲), Jia Zhiqiang(贾志强) *et al*. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2012, 41(14): 82

[10] An Na(安 娜), Zhang Xinyi(张心怡), Wang Qiming(王启明) *et al*. *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2014, 41(10): 94

[11] Zhao Weigang(赵为纲), Li Xin(李 鑫), Lu Shiqiang(鲁世强) *et al*. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2008, 15(3): 123

[12] Zhang Xuemin(张雪敏), Cao Fuyang(曹福洋), Yue Hongyan(岳红彦) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(5): 937

[13] Cui Junhui(崔军辉), Yang He(杨 合), Sun Zhichao(孙志超). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(7): 1166

[14] Jia Baohua(贾宝华), Song Weidong(宋卫东), Tang Huiping(汤慧萍) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(9): 2157

[15] Liu Jianglin(刘江林), Zeng Weidong(曾卫东), Xie Yingjie(谢英杰) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(11): 2742

[16] Wu Yu(武 宇), Yi Nan(宜 楠), Qiao Huijuan(乔慧娟) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(10): 2117

Quasi-Static Tensile Test During Warm Deformation of New Al-Li Alloy and Its Predictive Calculation of Flow Stress

Du Shunyao, Chen Minghe, Xie Lansheng, Chen Can

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Isothermal tensile tests of 2060-T8 Al-Li alloy were conducted on a UTM5000 electronic universal tensile testing machine at deformation temperature of 573~648 K and strain rate of 0.001~0.1 s^{-1}. The true stress-strain curves of 2060-T8 Al-Li alloy were obtained and a constitutive equation considering the strain compensation as well as correction term was also established. The thermal deformation behavior of 2060-T8 Al-Li alloy was investigated by the analysis of tensile fractures using scanning electron microscopy (SEM). The results show that 2060-T8 Al-Li alloy is highly sensitive to deformation temperature and strain rate. The true stress-strain curves exhibit the characteristics of strain hardening followed by flow softening and steady flow characteristic gradually disappears with the increase of deformation temperature and the decrease of strain rate. In addition, 2060-T8 Al-Li alloy is of ductile fracture under the conditions of warm deformation. The modified constitutive model is in good great agreement with the experimental data, which can provide a precondition for the finite element analysis of 2060-T8 Al-Li alloy during warm deformation.

Key words: 2060-T8 Al-Li alloy; warm deformation; strain compensation; correction term; constitutive model

---

Corresponding author: Chen Minghe, Ph. D., Professor, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China, Tel: 0086-25-84892508, E-mail: meemhchen@nuaa.edu.cn