

2060-T8E30 铝锂合金的热变形行为及本构模型

于以标^{1,2}, 陈乐平^{1,2}, 徐 勇^{1,2}, 袁源平^{1,2}

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

(2. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063)

摘 要: 利用 Sans CMT4104 型电子万能试验机进行等温恒变速率热拉伸试验, 研究了 2060-T8E30 铝锂合金在变形温度 425~500 °C、应变速率 0.001~0.1 s⁻¹ 条件下的热变形行为。结果表明: 2060-T8E30 铝锂合金在热变形过程中, 随着温度的升高和应变速率的降低, 其峰值应力降低。合金的平均变形激活能为 240.502 kJ/mol, 平均应变速率敏感指数为 0.28。基于热拉伸试验的真应力-真应变曲线, 建立了具有应变补偿的 Arrhenius 本构方程, 模型的预测值与实验值平均相对误差为 5.89%, 模型的精确度较好。

关键词: 2060-T8E30 铝锂合金; 本构方程; 热变形行为

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)12-4388-07

铝锂合金作为一种新型的航空结构材料, 具有密度低、弹性模量和比强度高、抗腐蚀等特点, 而广泛应用于军事和航空航天领域^[1-3]。2060-T8E30 合金作为第 3 代铝锂合金, 替代 7075-T6 和 2024-T3 合金, 主要用于制造飞机的上下翼与蒙皮, 是一种性能较好的航空结构材料^[4,5]。

然而, 铝锂合金在室温下成形性能较差, 无法满足冷成型工艺加工复杂零部件的需求, 其应用发展受到了限制^[6]。提高成形温度可改善其成形性能, 因此, 铝锂合金的热成形行为研究受到科研人员的广泛关注。刘宁等^[7]对 2055 铝锂合金进行热变形行为的研究, 建立了该合金的双曲线正弦函数本构模型, 发现高温时合金组织呈现锯齿状晶界现象, 发生了应变诱发晶界迁移机制的动态再结晶。Ashtiani^[8]与 Mehtedi 等^[9]采用热变形实验方法研究了 AA1070、AA6060 和 AA606 铝合金的塑性流变行为, 通过 Johnson-Cook、Garofalo 和 Hensel-Spittel 本构方程对合金的等效应力与等效应变进行了建模。将模型预测的流变应力曲线与合金的试验结果进行了比较, 验证了模型的精确性。杨胜利等^[10]对 Al-Cu-Li 合金进行等温热变形试验, 发现高温易使合金发生软化机制, 软化效果在小于 420 °C 时取决于螺位错的变化, 大于 420 °C 时主要受动态回复和动态再结晶的影响。Nayan 等^[11]通过热等温压缩试验研究了 AA2195 合金的热加工图, 发现试

验条件范围内有 4 个不同的变形域, 其最佳的加工变形温度在 400~450 °C, 应变速率在 1×10⁻²~1×10⁻⁵ s⁻¹ 之间。但是目前对 2060 铝锂合金热变形行为的相关研究较少。杜舜尧等^[12]通过对 2060 铝锂合金的拉伸试验, 在温度 300~375 °C 和应变速率 0.001~0.1 s⁻¹ 条件下, 发现该合金对应变速率和变形温度的敏感性较高。Zheng 等^[13]在温度 20~500 °C 与应变速率 0.001~0.1 s⁻¹ 条件下, 对 2060 铝锂合金进行高温拉伸变形行为研究, 发现高温使合金主要强化相 T1(Al₂CuLi) 和 δ(Al₃Li) 相发生改变, 随着拉伸温度的升高, 合金断裂模式也由脆性向韧性转变。

本研究以铝锂合金 2060-T8E30 作为研究对象, 在变形温度 425~500 °C、应变速率 0.001~0.1 s⁻¹ 条件下进行等温恒变速率拉伸试验, 研究其热变形行为并建立该合金应变补偿的 Arrhenius 本构方程, 以期为进一步发展 2060-T8E30 铝锂合金板材成型的热变形加工提供参考依据。

1 实 验

实验材料为厚度 2 mm 的 2060-T8E30 铝锂合金板材, 其原始组织及化学成分分别见图 1 和表 1。由图 1 可知, 晶粒呈等轴状, 晶粒平均尺寸为 264 μm。拉伸试样沿板材长度方向制备, 其标距长度为 10 mm, 宽度为 6 mm, 如图 2 所示。拉伸试验在 Sans CMT4104

收稿日期: 2020-12-10

基金项目: 航空科学基金 (2019ZE056009); 江西省重点研发计划 (20202BBEL53012); 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室基金 (EG201903175)

作者简介: 于以标, 男, 1995 年生, 硕士生, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: 1083423594@qq.com



图 1 2060-T8E30 铝锂合金初始显微组织

Fig.1 Initial microstructure of 2060-T8E30 Al-Li alloy

表 1 实验用 2060-T8E30 铝锂合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2060-T8E30 Al-Li alloy (wt%)

Cu	Li	Mg	Mn	Zn	Zr	Ag	Al
3.0~3.8	0.6~1.2	0.6~0.9	0.3~0.5	0.2~0.5	0.1~0.3	0.1~0.3	Bal.

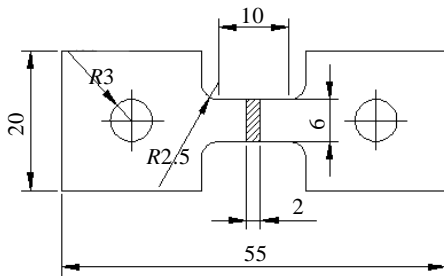


图 2 拉伸试样尺寸

Fig.2 Specification of the tensile test specimen (mm)

型电子万能试验机上进行, 实验温度为 425、450、475、500 °C, 应变速率为 0.001、0.01 和 0.1 s⁻¹。升温至实验温度后放入试样并保温 10 min, 再进行拉伸, 试样拉断后快速水冷以保留高温变形组织。

2 结果与分析

2.1 应力-应变响应

图 3 为 2060-T8E30 铝锂合金在不同温度和不同应变速率的热拉伸真应力-真应变曲线。由图 3 可知, 在拉伸过程中曲线的整体趋势相似, 在拉伸初始阶段, 即真应变到达 0.05 之前, 流动应力迅速增加; 随着应变量的加大, 流动应力增速放缓并逐渐达到峰值, 当应变进一步增大, 流动应力先缓慢下降后快速下降至试样拉断。在变形初始阶段, 因位错密度增加, 合金内部形成大量位错网格和位错缠绕, 材料产生加工硬化现象。这一阶段由于加工硬化为主导, 导致合金的流变应力迅速增大。当试样继续发生变形, 合金的流动应力增速变缓, 并达到峰值后趋于稳定; 流动应力的平稳阶段表明硬化和软化的相互作用达到平衡, 即变形达到稳态或准稳态变形^[13]。通常, 当硬化和软化达到动态平衡或准平衡状态的过程越长, 试样抑制产生缩颈的能力越强, 材料的(超)塑性延伸率越大。从图中可以看出, 在相同的变形温度下, 应变速率为 0.01 s⁻¹ 时, 稳态或准稳态变形的阶段更长。

图 4 为 2060-T8 铝锂合金不同参数条件下峰值应

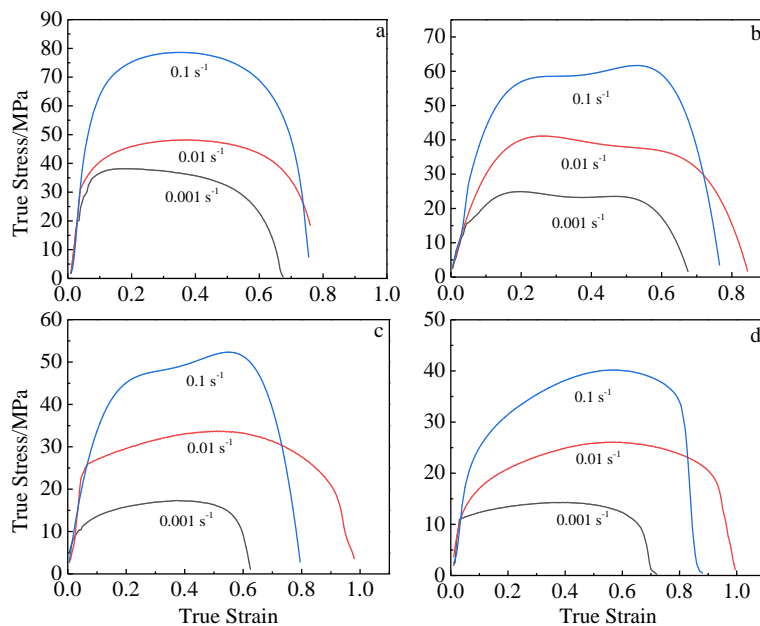


图 3 2060-T8E30 铝锂合金在不同变形温度和应变速率下的真应力-真应变曲线

Fig.3 True stress-true strain curves of 2060-T8E30 Al-Li alloy at different deformation temperatures and strain rates: (a) 425 °C, (b) 450 °C, (c) 475 °C, and (d) 500 °C

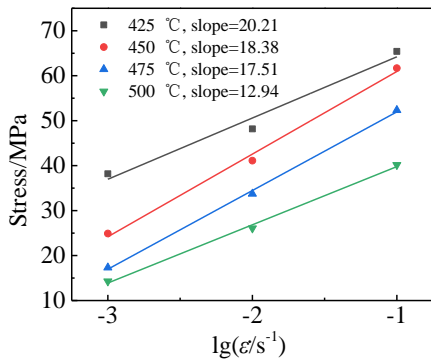


图 4 2060-T8E30 铝锂合金在不同热变形温度下的峰值应力曲线
Fig.4 Peak stress curves of 2060-T8E30 Al-Li alloy at different hot compressive deformation temperatures

力的变化情况。由图 4 可知，当变形温度恒定，应变速率取对数时与峰值应力具有线性相关。可以看出，在相同温度下，峰值应力随着应变速率的降低而减小，这是由于低应变速率可以提供更多时间发生动态软化。当温度从 425 °C 上升到 450 °C 时，随着温度的升高其斜率增大，其数值也从 12.94 增加到 20.21，斜率的变化表明峰值应力对应变速率的敏感性随着温度的升高而减弱^[14]。

2.2 本构模型的建立

建立本构方程不仅可以预测合金材料在不同工艺下的流变应力，还能描述材料在热变形过程中的流变行为^[15-18]。Arrhenius 方程因综合考虑了变形温度和应变速率对材料流变应力的影响而被广泛地应用。通常，Arrhenius 型方程有以下 3 种表达式^[19-21]：

低应力水平时 ($\alpha\sigma < 0.8$)，应变速率和应力呈幂指数函数关系：

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

高应力水平时 ($\alpha\sigma > 1.2$)，应变速率与应力呈指数函数关系：

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

适用所有应力状态 (for all σ) Sellars 双曲正弦形式：

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

式中， n_1 、 β (MPa^{-1}) 和 n 均为加工硬化指数； α 为最优因子 ($\alpha = \frac{\beta}{n_1}$, MPa^{-1})， A 为材料常数， $\dot{\epsilon}$ 为应变速率 (s^{-1})， σ 为峰值应力 (MPa)； T 为热变形温度 (K)， R 为气体常数， $R=8.314\text{J}/(\text{mol K})$ ， Q 为变形激活能。

对式 (1)、(2)、(3) 左右两边取对数可得：

$$\ln \dot{\epsilon} = n_1 \ln \sigma + \ln A_1 - \frac{Q}{RT} \quad (4)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \beta \sigma + \ln A_2 - \frac{Q}{RT} \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] + \ln A - \frac{Q}{RT} \quad (6)$$

将不同变形条件下的峰值应力代入式 (4)、(5)，可得 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 的关系曲线，如图 5a、5b 所示。 n_1 和 β 的值分别为图 5a、5b 中不同温度直线的斜率。取低应力水平下的 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 直线斜率平均，可得： $n_1=4.926$ ；取高应力水平下的 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 直线斜率平均，可得： $\beta=0.1346$ ， $\alpha=\beta/n_1=0.0273 \text{ MPa}^{-1}$ 。

式 (6) 中温度 T 或应变速率 $\dot{\epsilon}$ 保持不变时，对其偏微分可得：

$$\frac{1}{n} = \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (7)$$

$$Q = Rn \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right\} \quad (8)$$

根据式 (7)、(8) 分别作出峰值应力时的 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 的关系曲线如图 6a、6b。计算图 6a 中各个直线的斜率为 n ，平均可得

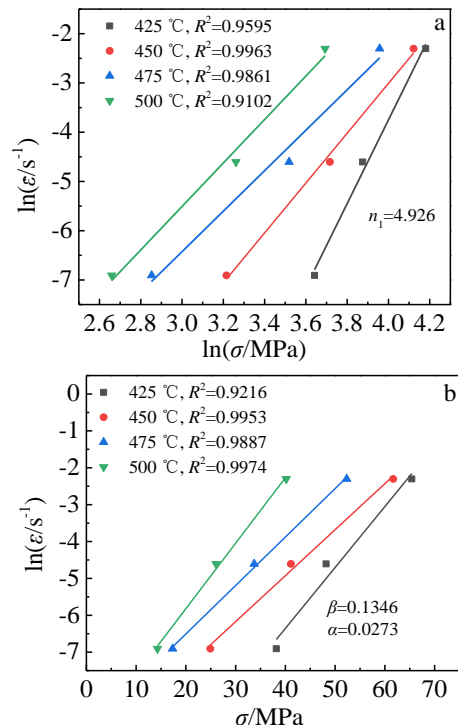


图 5 2060-T8E30 铝锂合金在不同温度下应变速率与应力的关系
Fig.5 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ (a) and $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ (b) plots of 2060-T8E30 Al-Li alloy at different temperatures

$n_{av}=3.5698$ 。各个直线的斜率的倒数为应变速率敏感指数 m , 平均可得 $m_{av}=0.2801$ 。计算不同应变速率下 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-1/T$ 直线斜率取平均值为 0.7476, 按式(8) 可得热变形激活能 $Q=221.88$ kJ/mol。

考虑到拉伸过程变形温度与应变速率具有耦合作用, Zener-Holloman 参数(Z)给出了具有温度和应变速率共同影响的参数:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (9)$$

对 (9) 式两端分别取对数并结合式 (3), 可得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (10)$$

将之前求得 Q 、 α 数值以及参数值 $\dot{\epsilon}$ 、 T 和对应的峰值应力值 σ , 分别代入式(9)与式(10), 即可得到 $\ln Z$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系, 然后继续线性拟合, 如图 7 所示。计算直线斜率可得, $n=3.5468$, $\ln A=31.1$ 。

2.3 本构模型的修正及检验

实际上, 式 (10) 并没有把应变对流动应力的影响考虑进去^[22,23]。因为一般的材料热变形过程属于稳态流变, 通过对 2060 铝锂合金的热变形拉伸曲线分析可以发现, 应力是应变的非线性函数, 在不同的应变范

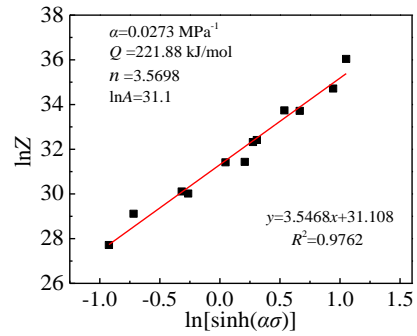


图 7 2060-T8E30 Al-Li 合金 $\ln Z$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系
Fig.7 Relationships between $\ln Z$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ of 2060-T8E30 Al-Li alloy

围其函数关系差异明显。所以只采用峰值应力求得材料常数(α 、 n 、 Q 和 $\ln A$)不具普遍性, 其拟合的结果误差非常大。因此, 需要引入应变项用来求得不同应变量的材料常数, 如图 7 所示, 采用四次多项式的方式分别得到材料常数与应变 ϵ 的关系曲线。根据不同应变下的 Q 、 m 值平均可得 425~500 °C 以及应变速率 0.001~0.1 s⁻¹ 范围内 2060-T8E30 铝锂合金的平均变形激活能为 240.502 kJ/mol, 平均应变速率敏感指数为 0.28。

将材料常数 α_ϵ 、 n_ϵ 、 Q_ϵ 和 A_ϵ 代入式 (3) 中可得到考虑应变的 Arrhenius 本构方程如式 (11) 所示:

$$\dot{\epsilon} = A_\epsilon [\sinh(\alpha_\epsilon \sigma)]^{n_\epsilon} \exp\left(-\frac{Q_\epsilon}{RT}\right) \quad (11)$$

用四阶多项式对材料常数 α 、 n 、 Q 、 $\ln A$ 分别进行拟合, 如式 (12) 所示:

$$F(\epsilon) = B_0 + B_1 \epsilon + B_2 \epsilon^2 + B_3 \epsilon^3 + B_4 \epsilon^4 \quad (12)$$

其中, $F(\epsilon)$ 表示 α 、 n 、 Q 、 $\ln A$ 4 个材料常数, ϵ 表示应变, 多项式系数如表 2 所示, 拟合结果如图 8 所示。

为验证应变补偿的 Arrhenius 本构模型的精度, 从 $\epsilon=0.1$ 开始, 每间隔 0.05 取一个应变点的应力预测值, 可得图 9 即 2060-T8E30 铝锂合金在不同温度和不同应变速率下实验真应力-真应变曲线与模型预测值的比较图。由图 9 可知, 模型预测点与实验曲线轨迹基本吻合。

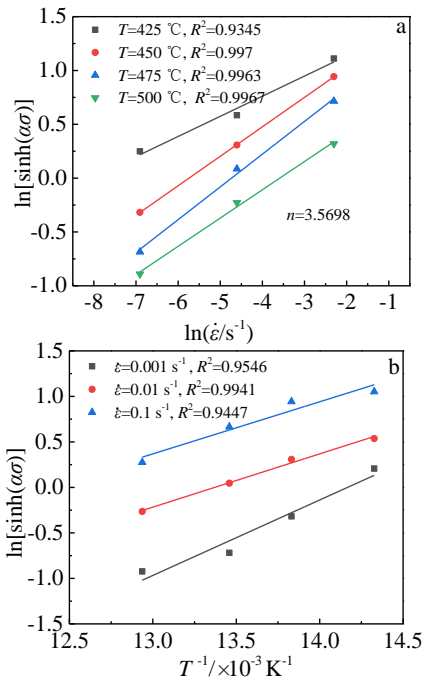
表 2 公式 (12) 的各项系数值

Table 2 Coefficients of polynomial in Eq.(12)

Constant	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
α	0.0579	-0.3217	1.3907	-2.6961	1.9373
n	5.3808	-12.107	24.208	-0.1353	-32.534
$\ln A$	67.328	-181.32	318.05	-148.61	-190.99
Q	449.4	-1164.2	2199.4	-1428	-792.36

图 6 2060-T8E30 Al-Li 合金 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 及 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $1/T$ 的关系

Fig.6 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\ln \dot{\epsilon}$ plots of 2060-T8E30 Al-Li alloy at different temperatures (a) and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-1/T$ plots of 2060 T8E30 Al-Li alloy at different strain rates (b)



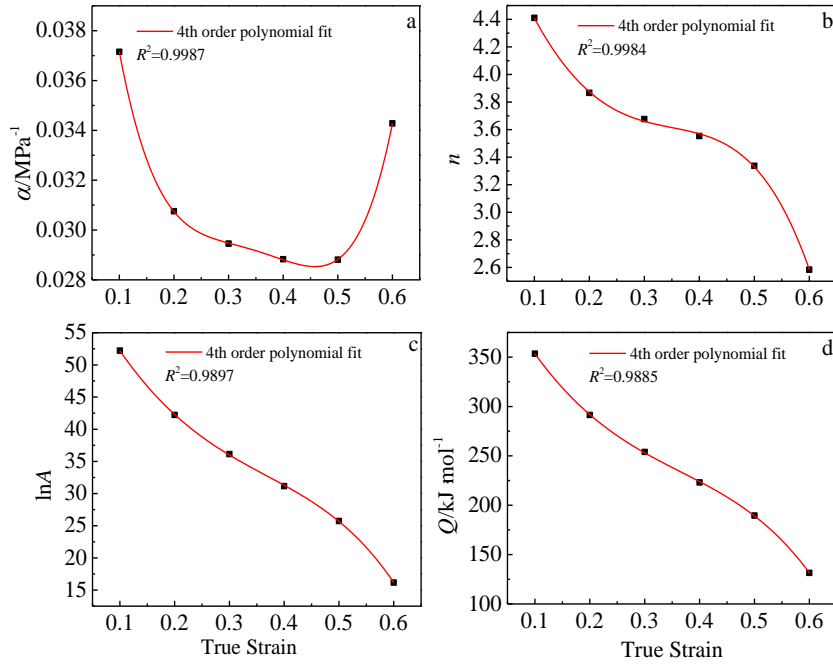


图 8 2060-T8E30 Al-Li 合金材料常数 α 、 n 、 $\ln A$ 和 Q 与应变的关系

Fig.8 Variation of α (a), n (b), $\ln A$ (c) and Q (d) with strain of 2060-TBE30 Al-Li alloy

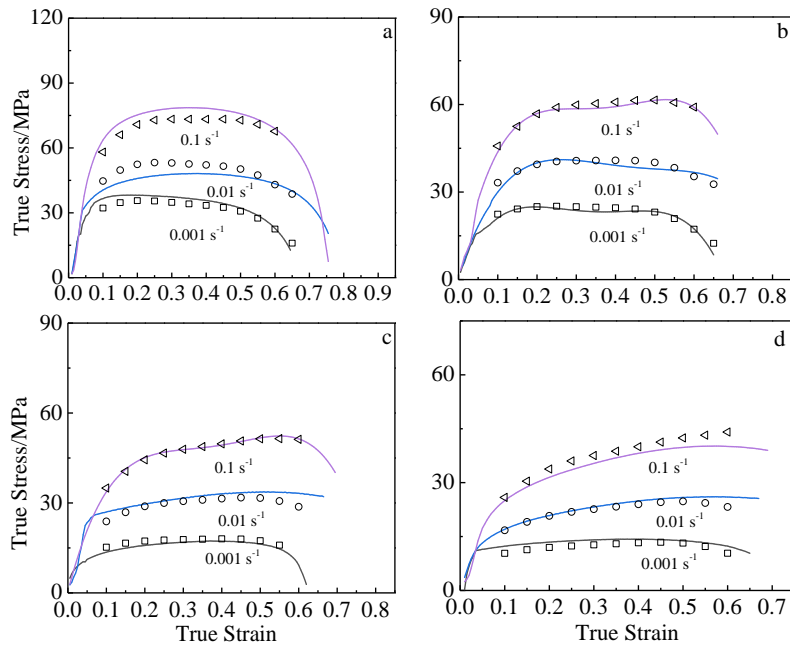


图 9 不同温度和应变速率下 2060-T8E30 Al-Li 合金的流动应力预测值与实验结果的对比

Fig.9 Comparison between predicted flow stress and experimental results of 2060-T8E30 Al-Li alloy at different temperatures and strain rates:

(a) 425 °C, (b) 450 °C, (c) 470 °C, and (d) 500 °C

采用相关系数 R 和平均相对误差 MRE 来进一步定量评价修正 Arrhenius 模型的预测精度,其表达式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (13)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\% \quad (14)$$

式中, E_i 为实验值, P_i 为修正后模型的预测值, 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。在温度为 450、475 °C, 应变速率为

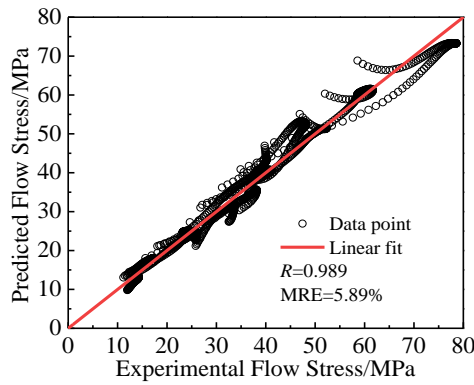


图 10 2060-T8E30 Al-Li 合金流动应力的预测值与实验值对比
Fig.10 Comparison between predicted flow stress and experimental results of 2060-T8E30 Al-Li alloy

0.001~0.1s⁻¹ 时, 模型的平均相对误差较小, 分别为 3.77% 和 5.38%; 而在温度为 425、500 °C, 应变速率为 0.1 s⁻¹ 时, 模型的平均相对误差较大分别为 6.98%、7.16%; 由上分析可知: 合金峰值应力呈现为随着温度的升高而峰值应力降低的规律, 温度越高应力变化程度越强。这可能导致拟合过程中温度范围的相对误差精准, 但在 425~500 °C 的变形温度中 425、500 °C 分别处在范围的两端, 使得拟合的应变预测值在 425 °C 时低于实际值, 500 °C 时高于实际值。

图 10 是流动应力实验值与模型预测值的对比。修正后的 Arrhenius 模型预测值与实验值的相关系数 R 和平均相对误差 MRE 分别为 0.989 和 5.89%。从图中可以看出模型预测值和实验值相关性良好, 说明建立的本构模型能够较好地预测 2060-T8E30 铝锂合金在 425~500 °C 和 0.001~0.1 s⁻¹ 范围内热变形过程的流动应力。

3 结 论

1) 2060-T8E30 铝锂合金在热变形过程中, 其峰值应力随着温度的升高和应变速率的降低而降低。

2) 建立了应变补偿的 2060-T8E30 铝锂合金 Arrhenius 本构方程, 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 0.989 和 5.89%, 能较好地预测 425~500 °C 和 0.001~0.1 s⁻¹ 范围内的流动应力。

3) 在 425~500 °C 和 0.001~0.1 s⁻¹ 范围内, 2060-T8E30 铝锂合金的平均变形激活能为 240.502 kJ/mol, 平均应变速率敏感指数为 0.28。

参考文献 References

[1] Wei Xiuyu(魏修宇), Zheng Ziqiao(郑子樵), She Lingjuan(佘玲娟) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属

材料与工程)[J], 2010, 39(9): 1583

- [2] Miao J, Sutton S, Luo A A et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2020, 777: 139 048
- [3] Zhu R H, Liu Q, Li J F et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 650: 75
- [4] Rioja R J, Liu J. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2012, 43(9): 3325
- [5] Zhang P, Chen M H. *Journal of Materials Science*[J], 2020, 55: 9828
- [6] Wu Xiuliang(吴秀亮), Liu Ming(刘 铭), Li Guoai(李国爱) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2016, 36(5): 82
- [7] Liu Ning(刘 宁), Xiao Daihong(肖代红), Liu Wensheng(刘文胜) et al. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2020, 25(2): 125
- [8] Ashtiani H R R, Shayanpoor A A. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2021, 31(2): 345
- [9] Mehtedi M E, Spigarelli S, Gabrielli F et al. *Materials Today: Proceedings*[J], 2015, 2(10): 4732
- [10] Yang Shengli(杨胜利), Shen Jian(沈 健), Chen Liyang(陈利阳) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2019, 29(4): 674
- [11] Nayan N, Murty S V S N, Chhangani S et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 723: 548
- [12] Du Shun Yao(杜舜尧), Chen Minghe(陈明和), Xie Lansheng(谢兰生) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(7): 2113
- [13] Zheng X W, Luo P, Chu Z H et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2018, 736: 465
- [14] Bi Jing(毕 静), Zhang Yanling(张艳玲), Zhang Ning(张 宁) et al. *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2015, 7(2): 41
- [15] Han Y, Liu G, Zou D et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 565(10): 342
- [16] El-Aty A A, Xu Y, Zhang S H et al. *Journal of Advanced Research*[J], 2019, 18: 19
- [17] Chen X X, Zhao G Q, Zhao X T et al. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 59: 326
- [18] Wang Guanyu(汪冠宇), Ma Guichun(马贵春), Wu Jianjun(吴建军) et al. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2019, 26 (1): 174
- [19] Yang Manzu(杨满足), Zhang Jianguo(张建国), Jia Antao(贾安涛) et al. *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2015, 40(1): 170
- [20] Ou Ling(欧 玲), Nie Yufeng(聂宇峰). *Journal of Plasticity*

- Engineering*(塑性工程学报)[J], 2012, 19(5): 16
- [21] Yin Cheng(殷 铖). *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2020, 45(10): 170
- [22] Huang Shuhai(黄树海), Zhao Zude(赵祖德), Xia Zhixin(夏志新) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(5): 848
- [23] Cui Junhui(崔军辉), Yang He(杨 合), Sun Zhichao(孙志超) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(7): 1166

Hot Deformation Behavior and Constitutive Model of 2060-T8E30 Al-Li Alloy

Yu Yibiao^{1,2}, Chen Leping^{1,2}, Xu Yong^{1,2}, Yuan Yuanping^{1,2}

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The thermal deformation behavior of 2060-T8E30 aluminum-lithium alloy at deformation temperature of 425~500 °C and strain rate of 0.001~0.1 s⁻¹ was studied by Sans CMT4104 electronic universal experimental machine. The results show that the peak stress of 2060-T8E30 aluminum-lithium alloy decreases with the increase of temperature and the decrease of strain rate during thermal deformation. The average deformation activation energy of the alloy is 240.502 kJ/mol, and the average strain rate sensitivity index is 0.28. Based on the true stress-true strain curve of the thermal tensile test, the Arrhenius constitutive equation with strain compensation was established. The average relative error between the predicted value and the experimental value is 5.89%, showing good accuracy of the model.

Key words: 2060-T8E30 Al-Li alloy; constitutive equation; hot deformation

Corresponding author: Xu Yong, Ph. D., Associate Professor, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: xuyong@nchu.edu.cn