

# X2A66 铝锂合金等温压缩时的流变变形行为

翟彩华<sup>1</sup>, 冯朝辉<sup>2</sup>, 柴丽华<sup>1</sup>, 陆政<sup>2</sup>, 聂祚仁<sup>1</sup>, 陈子勇<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学, 北京 100124)

(2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 采用 Gleeble-3500 热模拟试验机对 X2A66 合金进行等温热压缩实验, 变形温度为 623.15~743.15 K、应变速率为 0.001~10 s<sup>-1</sup>, 并利用双曲正弦函数和动态材料模型, 建立合金峰值应力的本构方程和加工图。结果表明: X2A66 合金的流变应力随温度的升高而减小, 随应变速率的增加而增大; X2A66 合金的温度敏感性不受应变速率的影响, 高应变速率(应变速率高于 0.1 s<sup>-1</sup>)时的速率敏感性高于低应变速率时的速率敏感性。X2A66 合金等温压缩时峰值流变应力和应变速率之间满足双曲正弦函数关系, 其本构方程为:  $\dot{\epsilon} = 5.09 \times 10^9 [\sinh(0.019\sigma)]^{4.54414} \exp(-145.377/RT)$ 。在实验工艺参数范围内, X2A66 合金的失稳区集中在高应变速率区, 当应变速率为 0.01~0.3 s<sup>-1</sup>, 温度为 700~743 K 时是耗散效率的峰值区域, 也是 X2A66 合金最佳的热加工工艺区。

**关键词:** X2A66 合金; 等温压缩; 本构方程; 热加工图

**中图分类号:** TG146.2<sup>1</sup>

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)01-0090-07

锂是自然界中最轻的金属元素, 向铝基体中每添加 1% (质量分数) 的 Li 可使其密度下降 3%, 弹性模量上升 5%。采用铝锂合金替代传统铝合金可使结构件质量减轻 15%, 刚度提高 15%~20%<sup>[1,2]</sup>。航空航天材料的工作环境集高温、高压、高负荷于一体, 对材料的性能要求极为苛刻, 而铝锂合金具有的低密度、高弹性模量、高比强度和比刚度等特点是其它铝合金难以比拟的, 因此其在航空航天领域显示出了广阔的应用前景<sup>[3,4]</sup>。近年来, 北京航空材料研究院结合机身壁板的整体挤压技术, 在 2A97 铝锂合金研制经验的积累之上, 成功开发出我国具有自主知识产权的第 4 代铝锂合金—X2A66 铝锂合金。X2A66 合金表现出高强、高韧(极限抗拉强度可达 510MPa 以上, 同时延伸率高于 8%, 断裂韧性可达 30 MPa m<sup>1/2</sup> 以上)、耐损伤、抗疲劳、各向异性小、耐腐蚀、热稳定性好、加工成形性好等优良的性能, 使得该合金非常适合制造飞机整体壁板结构。

飞机的整体挤压壁板结构与传统的铆接机身壁板结构相比, 因其减少型材与蒙皮之间连接部件(如铆钉、密封结构、长桁的端面等)可实现结构减重 11%~13%, 同时没有了连接部件, 可以增大机身内部的空间, 减少装配劳动量, 增强飞机的气动性, 使得外形

准确, 表面相对光滑。飞机的整体挤压壁板结构与焊接机身壁板结构相比, 前者对材料的焊接性没有要求, 这样就增加了可选材料的宽度, 同时又避免了焊接缺陷的产生。另外, 其对焊接设备和工装精度也没要求。新型铝锂合金无余量整体挤压壁板结构不仅实现了材料自身减重和结构设计减重的双重目标, 并且具有结构整体性好、静强度高优点, 符合世界未来航空技术的发展趋势, 具有广阔的应用潜力。

飞机的整体壁板挤压结构是靠大量的热加工完成的, 对 X2A66 合金热变形行为进行研究可以为合金的轧制、挤压、锻造等热加工工艺参数的制定提供指导。热加工参数影响材料的微观变形机制及变形过程中组织结构演变规律, 最终影响材料的韧性、加工硬化程度、强度、疲劳性能等, 因此有必要研究热变形行为与热变形工艺参数之间的呼应关系<sup>[5,6]</sup>。材料的流变变形的特征是材料在热变形过程中对热变形参数的一个动态响应, 目前多采用热模拟的方法来表征材料的流变变形特征, 应力-应变曲线、热力学分析、本构方程及热加工图是常用的几种表征方法<sup>[7]</sup>。所谓的本构方程是材料流变应力与热变形参数(变形温度、变形速率、应变量)之间的函数关系, 是材料数值模拟的基础, 体现了材料在热变形过程中与热加工工艺参数之

收稿日期: 2015-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(E041501)

作者简介: 翟彩华, 女, 1988 年生, 硕士, 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124, 电话: 010-67392280, E-mail: zhacaihua2014@163.com

间的呼应关系。加工图是表征材料加工性能好坏常用的方法<sup>[8]</sup>。根据加工图可以判断材料在流变变形过程中的可加工区和流变失稳区,同时结合可加工区内的功率耗散效率来制定材料的最佳热加工工艺参数,避免材料热加工时出现失稳现象。

## 1 实验

实验采用航空北京材料研究院研发的 X2A66 合金,成分见表 1。

将 X2A66 铸锭先经过 673.15 K/12 h+773.15 K/36 h 均匀化处理,然后经线切割加工成  $\Phi 10$  mm $\times$ 15 mm 的圆柱形压缩试样,对其表面进行轻微的打磨处理,同时为了减少摩擦对流变应力的影响,两端要磨光并进行轻微的倒角处理。采用 Gleeble-3500 热模拟试验机进行等温压缩实验,变形温度: 623.15, 653.15, 683.15, 713.15, 743.15 K; 变形速率: 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 s<sup>-1</sup>; 变形量: 50%; 保温时间: 2 min; 冷却方式: 空淬。系统会自动采集变形过程中的温度、速率和变形量等信息。用 TEM 观察分析材料的微观组织。TEM 试样通过双喷电解法制备,电解液为体积分数 25% HNO<sub>3</sub>+

75% CH<sub>3</sub>OH 混合溶液,双喷电压控制在 8~10 V,电流控制在 50~60 mA,温度控制在 243.15 K 左右。

变形前的组织如图 1a 所示, XRD 图谱如图 1b 所示。X2A66 合金中含有大量的 T<sub>1</sub> 相。通过透射组织可以观察到大量近乎垂直板条状的 T<sub>1</sub> 相。同时通过透射组织还发现基体里含有近似立方状的 Al<sub>20</sub>Cu<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub> 相,它能起到高温强化的作用。

## 2 结果与讨论

### 2.1 流变应力

X2A66 合金等温压缩时的真应力-应变曲线如图 2 所示。众所周知,等温压缩时的真应力-应变曲线在不同变形阶段的斜率跟变形机制的特点有关<sup>[9]</sup>。图 2a 和 2b 是变形温度为 623.15 和 653.15 K 时,不同应变速率下的真应力-应变曲线。在变形初期,曲线的斜率很大,流变应力迅速增加。这表明在变形初期有很强的加工硬化作用。这是因为在变形初期,位错密度迅速增加,位错之间的交互作用增强,位错运动的阻力增加。随着变形的进行,变形储能增加,发生了动态回复,真应力-应变曲线的斜率逐渐降低,加工硬化作用

表 1 合金成分

Table 1 Alloy composition ( $\omega/\%$ )

Li	Cu	Mg	Zr	Zn	Mn	Ti	Fe	Si	Al
1.3~1.8	3.5~4.1	0.2~0.6	0.08~0.16	0.2~0.8	0.2~0.6	<0.1	<0.1	<0.1	Bal.

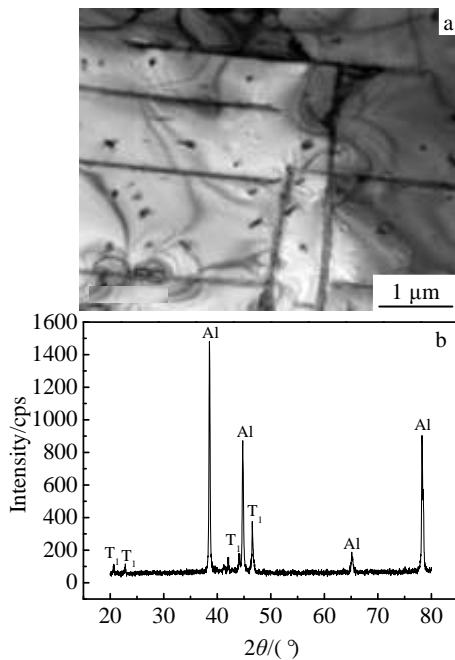


图 1 变形前的 TEM 组织和 XRD 图谱

Fig.1 TEM microstructure (a) and XRD pattern (b) before deformation

逐渐减弱,动态回复抵消了部分加工硬化,流变应力的增加速率减小。变形继续进行,真应力-应变曲线的斜率几乎减小为零。加工硬化率几乎为零。这表明加工硬化完全被动态软化抵消,变形进入稳态变形阶段。这也表明变形引起的位错密度增加及位错的交互作用增强已经完全被动态软化过程引起的位错密度减小及位错重排抵消。图 2c 和 2d 是应变速率为 0.1 和 1 s<sup>-1</sup> 在不同温度下的真应力-应变曲线。表现特征相似。在所有变形条件下真应力-应变曲线都有相似特征<sup>[10]</sup>。

图 3a 为 X2A66 合金在等温压缩时流变应力与变形温度之间的关系。从图中可以发现,当应变速率和真应变相同时,流变应力和变形温度之间的关系可以近似用直线表示,并且在所有实验应变速率下,流变应力跟温度之间的关系都是相似的。直线的斜率代表 X2A66 合金的温度敏感性。所有应变速率下直线的斜率相似,表明 X2A66 合金的温度敏感性不受应变速率的影响。温度敏感性不受应变速率影响的特征在 7075 铝合金中也曾报道过<sup>[11]</sup>。

从图 3a 还可以看出,在应变速率和应变相同时,温度越高,流变应力越低。这种现象跟组织演变有关;

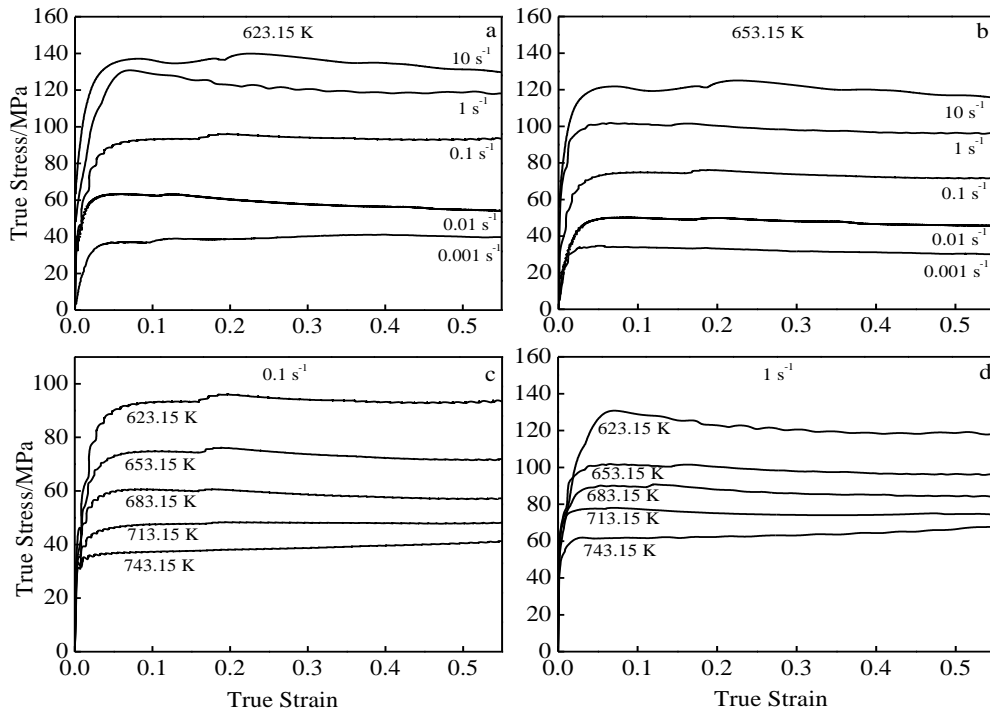


图 2 X2A66 合金等温压缩时的真应力-应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves of X2A66 alloy during isothermal compression: (a)  $T=623.15\text{ K}$ , (b)  $T=653.15\text{ K}$ , (c)  $\dot{\epsilon}=0.1\text{ s}^{-1}$ , and (d)  $\dot{\epsilon}=1\text{ s}^{-1}$

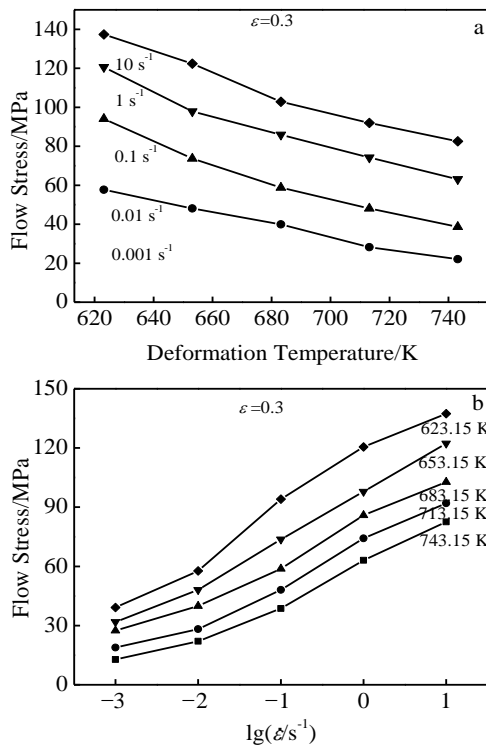


图 3 当  $\epsilon=0.3$  时不同因素对流变应力的影响

Fig.3 Effect of different factors on the flow stress when  $\epsilon=0.3$ : (a) deformation temperature and (b) strain rate

一方面温度越高，热激活作用越强，从而增强了位错的攀移和交滑移作用，促进了动态回复和动态再结晶等软化机制的进行，迫使合金的流变应力在温度高时降低。另一方面，X2A66 合金是可析出强化合金，合金的强度受析出相的分布、大小及析出相与位错的交互作用的影响。在高温变形时， $T_1$  相会出现部分破碎回熔的现象，低温时析出  $T_1$  相相对较多，流变应力就相对较高。

图 3b 是 X2A66 合金在等温压缩时流变应力跟应变速率之间的关系。从图中可以看出，应变速率对流变应力有明显的影 响，温度相同时，应变速率越大，流变应力越高。这是因为应变速率大时，位错的增殖速率加快，加工硬化作用比较明显，同时应变速率大时，动态软化进行的时间比较短，动态软化不充分，流变应力就相对较大。变形温度和应变速率相同，流变应力和应变速率之间的关系，也可以近似用直线表示，直线的斜率可以表示应变速率敏感性。如图 3b 所示，在实验应变速率范围内，应变速率敏感性可以划分为 2 个部分：当应变速率小于  $0.1\text{ s}^{-1}$  时，直线的斜率较低，这说明应变速率敏感性较小，这是因为在低应变速率时，受热激活作用的影响比较大。当应变速率大于  $0.1\text{ s}^{-1}$  时，直线的斜率比较高，应变速率敏感性较大，这是因为应变速率敏感性依赖于位错的运动，应变速率高时，位错的增殖速率比较快，应变速率对流

变应力的影响就比较大。高应变速率时, 应变速率敏感性相对比较大, 表明应变速率高时相对于应变速率低时, 对合金流变应力的影响更为显著。

### 2.2 本构方程

合金在流变变形过程中, 流变应力的大小决定了变形所需载荷的大小。合金流变应力的大小跟变形温度, 应变速率, 应变量及材料的组织特征和变形历史有关, 对于同一种材料, 通常忽略后者的影响, 只考虑变形条件对流变应力的影响<sup>[12]</sup>。本构方程是流变应力与变形条件之间的数值函数关系, 可以为热加工工艺的制定和优化提供依据。

在等温压缩过程中, 由于试样与压头之间存在摩擦, 摩擦使试样在压缩时出现了不同程度的鼓肚现象, 试样由单向压缩应力状态转变为三向应力状态, 实验所得数据与实际数据存在一定的误差。为了提高实验的准确性, 需对实验数据进行摩擦修正, 采用古布金公式进行摩擦修正。本构方程及加工图所采用的数据都是摩擦修正后的数据。

材料的热加工是一个热激活过程, 常用包含热激活能  $Q$  的 Arrhenius 双曲正弦函数来描述热变形时流变应力与应变速率、变形温度之间的函数关系<sup>[13]</sup>:

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

$\dot{\epsilon}$  为应变速率;  $A$  是结构因子 ( $s^{-1}$ );  $\alpha$  为材料应力水平常数 ( $MPa^{-1}$ );  $\sigma$  为流变应力 ( $MPa$ );  $n$  是应力指

数;  $Q$  为激活能 ( $J/mol$ );  $R$  为气体常数;  $T$  是变形温度 ( $K$ )。其中  $A$ 、 $\alpha$ 、 $n$  均为与温度无关的常数。在高应力下, 式 (1) 可简化为:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

在低应力条件下, 对  $\sinh(\alpha\sigma)$  进行泰勒级数展开后可近似简化为:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

常数  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $n_1$  之间的关系为  $\alpha = \beta/n_1$ <sup>[14]</sup>。对式 (1)、式 (2)、式 (3) 分别求对数得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] - Q/RT \quad (4)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + \beta\sigma - Q/RT \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + n_1 \ln \sigma - Q/RT \quad (6)$$

图 4a 和 4b 分别是根据式 (5)、式 (6) 做出的 X2A66 合金在不同变形温度和应变速率下等温压缩时, 合金的峰值应力随变形条件变化关系的散点图, 然后根据散点图, 线性拟合出曲线, 相关系数分别大于 0.981、0.973。当温度一定时, 由式(5)和式(6)可知, 曲线  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  和  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  拟合曲线的斜率分别为  $\beta$  和  $n_1$  (图 4a 和 4b)。在高应力下, 选取图 4a 中温度为 623.15、653.15、683.15 K 时拟合直线斜率的平均值得到  $\beta = 0.110$ ; 在低应力时选取图 4b 中 683.15、713.15、743.15 K 时 3 条拟合直线的斜率平均值, 得到  $n_1 = 5.793$ ;  $\alpha = \beta/n_1 = 0.019$ 。根据式(4), 得出  $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  的散点图, 线性拟合得到图 4c, 相关系数大于 0.988。

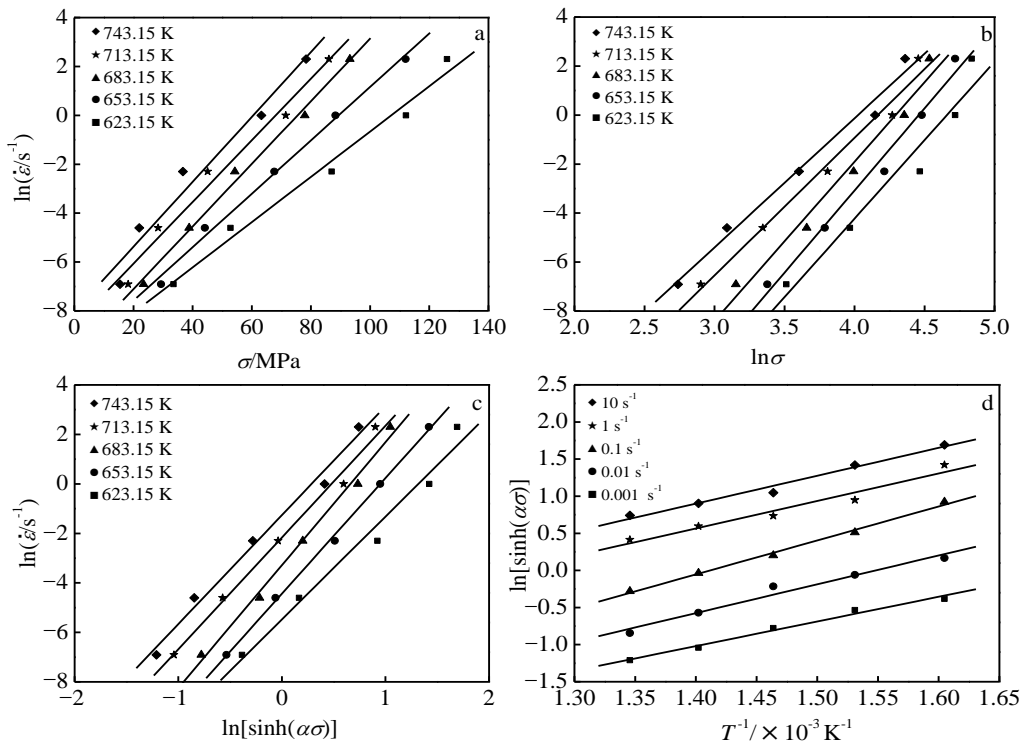


图 4 流变应力与变形参数之间的函数关系

Fig.4 Function relation between flow stress and deformation parameters: (a)  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ , (b)  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ , (c)  $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ , and (d)  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$

由相关系数可知, X2A66 合金等温压缩时双曲正弦函数最适合用来描述其流变应力与变形条件之间的函数关系, 选取 5 条拟合直线斜率的平均值得到 X2A66 合金在实验条件范围内的平均应力指数  $n=4.544$ 。

对式 (4) 求微分得:

$$Q=R\left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sinh(\alpha \sigma)}\right]_T\left[\frac{\partial \ln \sinh(\alpha \sigma)}{\partial (1/T)}\right]_{\dot{\epsilon}} \quad (7)$$

根据实验数据绘制  $\ln[\sinh(\alpha \sigma)]-1/T$  散点图, 线性拟合得到图 4d。根据拟合的  $\ln \dot{\epsilon}-\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$  和  $\ln[\sinh(\alpha \sigma)]-1/T$  线的斜率计算出在实验条件范围内的变形激活能的平均值为 145.377 kJ/mol, 接近纯铝的自扩散激活能 (142 kJ/mol), 合金在变形过程中容易发生动态再结晶。

金属的热变形和高温蠕变行为类似, 都受热激活控制, 温度补偿应变速率因子 Zener-Hollomon 参数(简称 Z 参数)<sup>[13]</sup>, 被普遍用来表示热变形时变形温度、应变速率对材料变形过程的综合影响:

$$Z=A[\sinh(\alpha \sigma)]^n=\dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (8)$$

利用计算出的变形激活能  $Q$  及实验参数, 根据式 (8) 计算不同变形条件下的 Z 参数值, 绘制  $\ln Z-\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$  散点图, 如图 5 所示, 线性拟合得到  $\ln Z-\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$  的关系为:  $\ln Z=22.350+0.995n \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ , 线性拟合的相关系数大于 0.99, 说明 Z 参数能很好地描述 X2A66 合金的流变变形行为。同时根据图 5 的截距可以计算出 A 的值为  $5.09 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 。根据双曲正弦函数的定义和式 (8) 可得  $\sigma$  与 Z 参数的关系:

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

从而可以得到 X2A66 合金流变应力满足下列方程:

$$\sigma=52.643 \ln\left\{\left(\frac{Z}{5.09 \times 10^9}\right)^{\frac{1}{4.544}}+\left[\left(\frac{Z}{5.09 \times 10^9}\right)^{\frac{2}{4.544}}+1\right]^{\frac{1}{2}}\right\}$$

$$\dot{\epsilon}=5.09 \times 10^9[\sinh(0.019 \sigma)]^{4.544} \exp(-145.377/RT)$$

### 2.3 X2A66 合金的热加工图及分析

热加工图被广泛用于优化合金的热加工工艺参

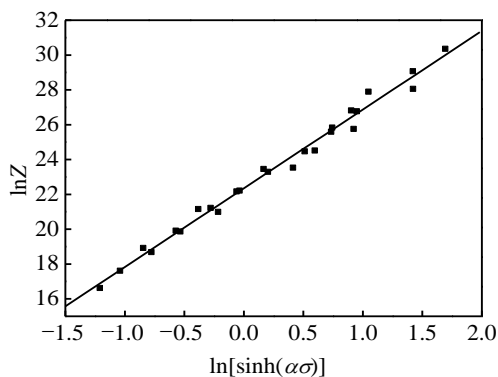


图 5  $\ln Z$  与  $\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$  之间的关系

Fig.5 Relation between  $\ln Z$  and  $\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$

数, 它能够准确地描述金属在热变形时的内部组织演变同热变形参数之间的内在关系。基于动态材料模型 (DMM) 理论的热加工图是由功率耗散图和失稳图叠加在一起构成的。材料在变形时, 外界输入给加工件的总能量  $P$  消耗在两个方面, 一是工件发生塑性变形所消耗的能量  $G$  (耗散量), 二是热变形过程中, 工件的组织演变所消耗的能量  $J$  (耗散协量)<sup>[15,16]</sup>。功率耗散图用来表示材料在热变形过程中, 微观组织演变消耗能量的变化情况, 消耗速率用无量纲参数能量耗散效率  $\eta$  来表示:

$$\eta=\frac{J}{J_{\max}}=\frac{2m}{m+1} \quad (9)$$

$m$  是应变速率敏感因子,  $J_{\max}$  是当材料处于理想线性耗散状态时, 变形过程中微观组织演变消耗的能量, 能量耗散效率  $\eta$  随应变速率和变形温度的变化构成了功率耗散图。

一般情况下, 耗散效率越高, 材料的加工性越好。但在材料的加工失稳区内也会出现耗散效率比较高的情况。将不可逆热力学的极大值原理应用于大应变塑性变形, 得到失稳判据式(10)<sup>[17]</sup>。无量纲的参数  $\zeta(\dot{\epsilon})$  随应变速率和变形温度的变化构成了失稳图。

$$\zeta(\dot{\epsilon})=\frac{\partial \ln(m/(m+1))}{\partial \ln \dot{\epsilon}}+m<0 \quad (10)$$

温度和应变不变时,  $\ln \sigma$  和  $\ln \dot{\epsilon}$  近似满足 3 次函数关系, 如式 (11):

$$\ln \sigma=K_1+K_2 \ln \dot{\epsilon}+K_3(\ln \dot{\epsilon})^2+K_4(\ln \dot{\epsilon})^3 \quad (11)$$

$K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  是与材料相关的参数, 可以根据多项式拟合求出不同变形条件下  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  的值。

根据式 (12) 计算不同变形条件下的应变速率敏感因子  $m$ :

$$m=\frac{\partial J}{\partial G}=\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}}=K_2+2K_3 \ln \dot{\epsilon}+3K_4 \ln \dot{\epsilon}^2 \quad (12)$$

能量耗散效率  $\eta$  和失稳判据  $\zeta(\dot{\epsilon})$  都是  $m$  的函数, 通过计算可以得到不同变形条件下的能量耗散效率和失稳判据  $\zeta(\dot{\epsilon})$ 。

X2A66 合金在应变速率为  $10 \text{ s}^{-1}$  时, 计算出的应变速率敏感因子  $m$  出现部分小于零的情况, 当  $m<0$  时, 失稳判据  $\zeta(\dot{\epsilon})$  失去意义 ( $m<0$  时,  $\ln(m/(m+1))$  没有意义, 无法计算)。  $m<0$  时, 材料肯定处于失稳状态, 所以本研究采用失稳判据  $\zeta(\dot{\epsilon})$  和  $m<0$  共同确定失稳区的大小。

图 6a~6c 是 X2A66 合金等温压缩时 (变形温度为 623.15 K 到 743.15 K, 应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  到  $10 \text{ s}^{-1}$ ), 真应变分别为 0.2、0.4、0.55 下的热加工图。轮廓线上的数值是 X2A66 合金在该状态时的能量耗散效率, 耗散效率为 0.05~0.4, 反映了热变形过程中微观组织

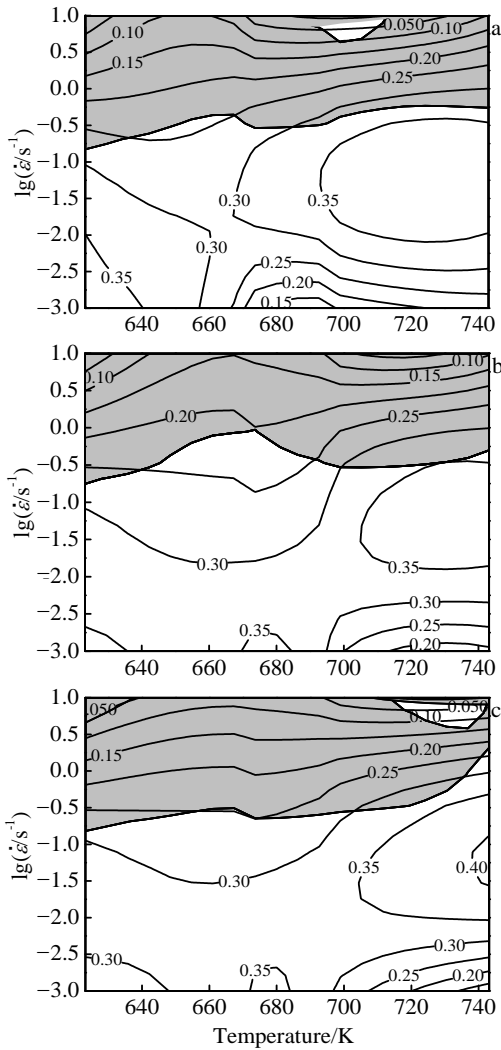


图 6 X2A66 合金热压缩时不同应变率下的加工图

Fig.6 Processing maps of X2A66 alloy with different  $\epsilon$  values under heat compression: (a)  $\epsilon=0.2$ , (b)  $\epsilon=0.4$ , and (c)  $\epsilon=0.55$

演变特征。一般来说，热加工图上耗散效率高的区域用于组织演变的能量较高，合金的热加工性能就好。阴影区域是失稳区，也就是不可加工区。从图 6 可以看出，在不同应变率下，功率耗散效率和失稳区的分布都表现出相似的特征，这表明应变率对加工图的影响不大。在应变不同时，都出现 2 个峰值耗散区域。低应变时出现的峰值耗散区域所在的位置有所不同，真应变为 0.2 时(图 6a)，在应变率为  $0.001\sim 0.01\text{ s}^{-1}$ ，温度为  $623\sim 640\text{ K}$  时出现了 1 个小的峰值耗散区域，峰值耗散效率值为 0.35。真应变为 0.4 和 0.55 时(图 6b, 6c)，低应变耗散效率峰值出现在相似的区域，在应变率为  $0.001\sim 0.003\text{ s}^{-1}$ ，应变温度为  $670\sim 685\text{ K}$  时出现了低应变耗散效率峰值区域。从图 6 还可以看出，在真应变不同时，耗散效率的另一峰值出现在近似相

同的区域。在应变率为  $0.01\sim 0.3\text{ s}^{-1}$ ，温度为  $700\sim 743\text{ K}$  时出现了另一个比较大的耗散效率峰值，耗散效率为 0.35，且第 2 个耗散效率峰值区域没有出现在失稳区内，它也是 X2A66 合金最佳的热加工工艺区域，峰值耗散效率值为 0.35。

在热加工图中，功率耗散效率越高，变形时用于组织演变的能量就越多。对于高层错能金属，动态再结晶主要受晶界的迁移率控制，其动态再结晶能量耗散效率高。热加工图中功率耗散效率较高的区域的变形软化机制主要为动态再结晶<sup>[18]</sup>。图 7 为 X2A66 合金在耗散效率峰值区域的组织，其为近似等轴的动态再结晶组织，它对应的变形温度和应变率为最佳的变形工艺参数。

由加工图可知，在变形温度为  $623\sim 743\text{ K}$ ，应变率为  $0.5\sim 10\text{ s}^{-1}$  的范围内几乎全为失稳区，也就是说在实验温度范围内，失稳区出现在应变率相对比较高的区域。在失稳区易形成绝热剪切带、局部塑形流动、开裂等热加工要避免的缺陷，在优化热加工工艺参数时要避开失稳区。

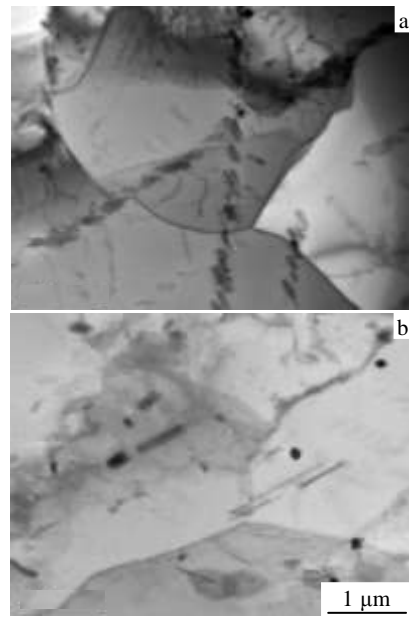


图 7 不同变形条件下 X2A66 合金的 TEM 显微组织

Fig.7 TEM microstructures of X2A66 alloy under different deformation conditions: (a)  $T=713.15\text{ K}$ ,  $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ ; (b)  $T=743.15\text{ K}$ ,  $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$

### 3 结 论

1) 新型 X2A66 合金在等温压缩时，变形温度和应变率对合金的流变应力都有显著的影响。温度相同时，应变率越大，流变应力就越大；应变率相

同时, 温度越高, 流变应力越低。

2) X2A66 合金的温度敏感性不受应变速率的影响。高应变速率(应变速率大于  $0.1 \text{ s}^{-1}$ )时, 应变速率敏感性相对于低应变速率时的应变速率敏感性要大。

3) X2A66 合金峰值应力的本构方程为:  
 $\dot{\epsilon} = 5.09 \times 10^9 [\sinh(0.019\sigma)]^{4.54414} \exp(-145.377/RT)$

4) X2A66 合金最佳的热加工工艺区是应变速率为  $0.01 \sim 0.3 \text{ s}^{-1}$ , 温度为  $700 \sim 743 \text{ K}$ 。

#### 参考文献 References

- [1] Zheng Zijiao(郑子樵), Li Jinfeng(李劲风), Chen Zhiguo(陈祖国) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(10): 2337
- [2] Cheng Xiaoyu(程晓宇), Wang Xiaomei(王晓梅). *Light Metal* (轻金属)[J], 2008(10): 68
- [3] Williams J C, Starke J E A. *Acta Materialia*[J], 2003, 51(19): 5775
- [4] Qi Yunlian(戚运连), Zeng Weidong(曾卫东), Zhao Yongqing(赵永庆) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(11): 1891
- [5] Luo J, Li M Q, Ma D W. *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 532: 548
- [6] Sun Yu(孙宇), Zeng Weidong(曾卫东), Zhao Yongqing(赵永庆) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(2): 220
- [7] Luo J, Li M, Li H *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 505(1): 88
- [8] Srinivasan N, Prasad Y, Rama R P. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 476(1): 146
- [9] Luo J, Li M Q, Wu B. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 530: 559
- [10] Yin H, Li H, Su X *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 586: 115
- [11] Lee W S, Sue W C, Lin C F *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2000, 100(1): 116
- [12] Shen Jian(沈健). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 1998, 22(1): 47
- [13] Zener C, Hollomon J H. *Journal of Applied Physics*[J], 2004, 15(1): 22
- [14] Li Huizhong(李慧中), Zhang Xinming(张新明), Chen Ming'an(陈明安) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2005, 15(4): 621
- [15] Yin Hao, Li Hongying, Su Xiongjie *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2013, 586: 115
- [16] Raj R. *Metall Trans A*[J], 1981, A12: 1089
- [17] 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
- [18] Wei Lili(韦莉莉), Pan Qinglin(潘清林), Zhou Jian(周坚) *et al.* *Journal of Central South University*(中南大学学报)[J], 2013, 44(5): 1798

## Rheological Deformation Behavior of X2A66 Aluminum-Lithium Alloy during Isothermal Compression

Zhai Caihua<sup>1</sup>, Feng Chaohui<sup>2</sup>, Chai Lihua<sup>1</sup>, Lu Zheng<sup>2</sup>, Nie Zuoren<sup>1</sup>, Chen Ziyong<sup>1</sup>

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** An isothermal compression experiment of X2A66 alloy was carried out by a Gleeble-3500 thermal simulator within the deformation temperature range of  $623.15 \sim 743.15 \text{ K}$  and the strain rate range of  $0.001 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ . The alloy peak stress constitutive equation and processing map were established by a hyperbolic sine function and a dynamic materials model. The results show that flow stress of the alloy decreases with the increase of deformation temperature while increases with the increase of strain rate. In addition, the strain rate has no effect on temperature sensitivity of X2A66 alloy; the rate sensitivity at high strain rate above  $0.1 \text{ s}^{-1}$  is higher than that at low strain rate. In isothermal compression experiment of X2A66 alloy, the relationship between the peak flow stress and strain rate satisfies the hyperbolic sine function and the constitutive equation is  $\dot{\epsilon} = 5.09 \times 10^9 [\sinh(0.019\sigma)]^{4.54414} \exp(-145.377/RT)$ . In the range of test parameters, the instability zones of X2A66 alloy are mainly concentrated in the area of high strain rate. The peak area of dissipation efficiency is in the strain rate range of  $0.01 \sim 0.3 \text{ s}^{-1}$  and the deformation temperature range of  $700 \sim 743 \text{ K}$ , which is the best thermal processing zone for X2A66.

**Key words:** X2A66 alloy; isothermal compression; constitutive equation; thermal processing map

Corresponding author: Chen Ziyong, Ph. D., Professor, Department of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, Tel: 0086-10-67392280, E-mail: czy@bjut.edu.cn