

# 2124 铝合金的热压缩变形和加工图

Hot Compression Deformation and Processing

Maps of 2124 Aluminum Alloy

李成侣, 潘清林, 刘晓艳, 何运斌, 李文斌

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

LI Cheng-lu, PAN Qing-lin, LIU Xiaoyan, HE Yurbin, LI Wenbin

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**摘要:** 采用热模拟实验研究 2124 铝合金在应变速率为  $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为  $340 \sim 500^\circ\text{C}$  条件下的流变应力行为。结果表明: 2124 铝合金热变形过程中的流变应力可用双曲正弦本构关系来描述, 平均激活能为  $170.13 \text{ kJ/mol}$ 。根据动态材料模型, 计算并分析 2124 铝合金的加工图。利用加工图确定热变形的流变失稳区, 并且获得了实验参数范围内的热变形过程的最佳工艺参数, 其热加工温度为  $450^\circ\text{C}$  左右, 应变速率为  $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 。

**关键词:** 2124 铝合金; 热压缩变形; 动态材料模型; 加工图

**中图分类号:** TG146.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2010)04-0010-05

**Abstract:** The flow stress behavior of 2124 aluminum alloy during hot compression deformation was studied by thermal simulation test, under the conditions of the strain rate range of  $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$  and the temperature range from  $340 \sim 500^\circ\text{C}$ . The results showed that the flow behavior of 2124 aluminum alloy was described by the hyperbolic sine constitutive equation, and an activation energy of  $170.13 \text{ kJ/mol}$  was calculated. The processing maps were calculated and analyzed according to the dynamic materials model. The instability zones of flow behavior can be recognized by the maps. The optimum processing parameters of hot deformation in the range of this experiment can also be attained by the maps, which the hot temperature was around  $450^\circ\text{C}$  and the strain rate is  $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ .

**Key words:** 2124 aluminum alloy; hot compression deformation; dynamic materials model; processing map

表征金属塑性成形能力的一个重要指标是材料的“加工性”。所谓加工性是指材料在塑性变形过程中不发生破坏所能达到的变形能力<sup>[1]</sup>。描述材料加工性能的图形即为加工图。利用加工图可以分析材料在不同变形温度和应变速率的高温变形机制, 从而获得热加工“安全区”和“不安全区”, 达到控制材料组织演变, 避免产生缺陷和优化材料加工工艺的目的<sup>[2-4]</sup>。加工图主要分为两类: 一类是基于原子模型的加工图; 另一类是基于动态材料模型 (Dynamic Materials Model, DMM) 的加工图。基于原子模型的加工图涉及很多材料参数, 因此它仅适用于纯金属和简单合金, 且只在稳态下才有效, 对一般的复杂合金不适用。目前, 基于动态材料模型 (DMM) 的加工图技术被广泛应用于表征材料的热加工性能和设计材料的热加工工艺<sup>[5-7]</sup>。

本工作通过热压缩实验, 获得了不同应变条件下的 2124 铝合金的流变应力数据, 分析了该合金的流变

应力行为, 并建立了热加工图, 为 2124 铝合金热加工工艺的制定与优化提供实验数据及理论依据。

## 1 实验

实验材料 2124 铝合金的名义成分如表 1 所示。铸锭于  $490^\circ\text{C}$  均匀化处理 24h, 然后加工成  $\phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  的圆柱形试样, 为了减少试样与压头之间的摩擦, 压缩试样两端各加工出深度为  $0.2 \text{ mm}$  的凹槽, 在压缩实验过程中, 将凹槽内均匀填充润滑剂 (75% 石墨 + 20% 机油 + 5% 硝酸三甲苯脂, 质量分数)。压缩实验在 Gleeble 1500 热模拟机上进行。实验应变速率为  $0.01, 0.1, 1.0 \text{ s}^{-1}$  和  $10 \text{ s}^{-1}$ , 变形温度为  $340, 380, 420, 460^\circ\text{C}$  和  $500^\circ\text{C}$ , 总压缩变形量为 60%。压缩变形结束后立即对试样进行水淬以保留高温变形组织。沿压缩轴线将试样对半切开, 利用 POLYVER-MET 金相显微镜观察合金热压缩变形后的组织。

表 1 2124 铝合金的化学成分(质量分数/%)  
Table 1 Chemical composition of 2124 Al alloy (mass fraction/%)

| Cu      | Mg      | Mn      | Cr  | Zn   | Ti   | Fe    | Si    | Al  |
|---------|---------|---------|-----|------|------|-------|-------|-----|
| 3.8 4.9 | 1.2 1.8 | 0.3 0.9 | 0.1 | 0.25 | 0.15 | < 0.3 | < 0.2 | Bal |

2 结果及分析

2.1 2124 铝合金流变应力

图 1 为 2124 铝合金在高温压缩变形时的真应力-真应变曲线。由图 1 可见,热变形初期,流变应力随着变形程度的增大而升高,并迅速达到某一峰值,随后随

着应变量的增大,真应力不发生明显变化,即呈现稳态流变特征。在同一应变速率下,随着变形温度的升高,流变应力明显降低。在同一变形温度下,随着应变速率的增加,流变应力升高。说明 2124 铝合金具有正的应变速率敏感性。

金属材料的热加工变形存在着热激活过程<sup>[8]</sup>,与

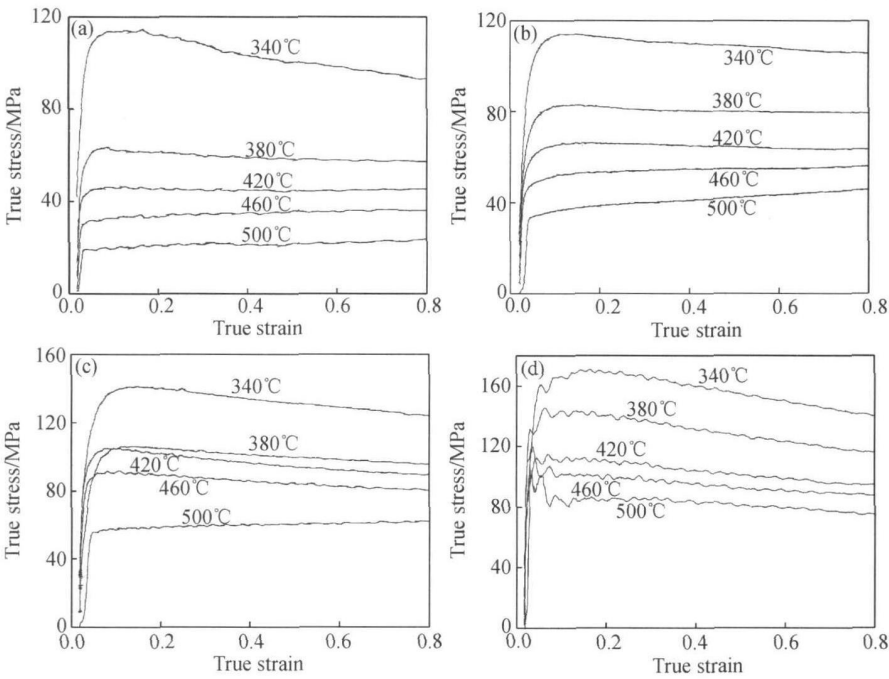


图 1 2124 铝合金热压缩变形真应力-真应变曲线  
(a) 0.01s<sup>-1</sup>; (b) 0.1s<sup>-1</sup>; (c) 1.0s<sup>-1</sup>; (d) 10s<sup>-1</sup>

Fig. 1 True stress-strain curves of 2124 Al alloy at different strain rates  
(a) 0.01s<sup>-1</sup>; (b) 0.1s<sup>-1</sup>; (c) 1.0s<sup>-1</sup>; (d) 10s<sup>-1</sup>

高温蠕变相似。Sellars 和 Tegart 根据材料变形过程与蠕变过程的相似性,采用包含变形激活能  $Q$  和温度  $T$  的双曲正弦修正的 Arrhenius 关系来描述材料热变形过程中流变应力与变形温度和应变速率  $\dot{\epsilon}$  之间的关系:

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

式中:  $A$  为结构因子;  $n$  为应力指数;  $\alpha$  为应力水平参数;  $Q$  为材料的热变形激活能,它反应材料热变形的难易程度,是材料热变形过程中重要的力学性能参数;  $T$  为变形温度;  $\sigma$  表示峰值应力或稳态流变应力,即稳态流变阶段某指定应变量对应的流变应力;  $R$  为摩尔气体常数。该式可以在整个应力范围内较好地描述金属材料常规热加工过程的流变应力变化规律。并被广泛

用于估计各种金属及合金的热变形激活能。

在低、高应力水平下,流变应力与应变速率的关系分别可用指数关系和幂指数关系描述,即:

低应力水平( $\alpha < 0.8$ )时:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^1 \exp(-Q/RT) \tag{2}$$

高应力水平( $\alpha > 1.2$ )时:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta \sigma) \exp(-Q/RT) \tag{3}$$

式中:  $A_1, A_2, n_1, \beta$  均为材料常数;  $\alpha, \beta$  与  $n_1$  之间满足  $\alpha = \beta/n_1$ 。

根据 Zener 和 Hollomon 提出的应变速率和温度关系<sup>[9]</sup>,用参数  $Z$  表示:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \tag{4}$$

假定在一定的温度下, 变形激活能  $Q$  为常数, 对式(2)和(3)两边取对数有

$$\ln \dot{\epsilon} = B_1 + n_1 \ln \sigma, \text{ 其中 } B_1 = \ln A_1 - Q/RT \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = B_2 + \beta \sigma, \text{ 其中 } B_2 = \ln A_2 - Q/RT \quad (6)$$

取不同条件下的峰值应力为流变应力, 分别绘制出  $\ln \sigma, \sigma$  与  $\ln \dot{\epsilon}$  关系图, 并分别进行线性回归, 如图2所示。可以看出, 其线性关系十分明显。根据式(5)和(6), 取图2(a)中峰值应力较低, 即温度为 420, 460, 500 °C 各直线斜率的平均值, 得到  $n_1 = 5.3492$ ; 取图2(b)中峰值应力较高, 即温度为 340, 380, 420 °C 各直线斜率的平均值, 得到  $\beta = 0.0927 \text{ MPa}^{-1}$ , 则  $\alpha = \beta/n_1 = 0.0173 \text{ MPa}^{-1}$ 。

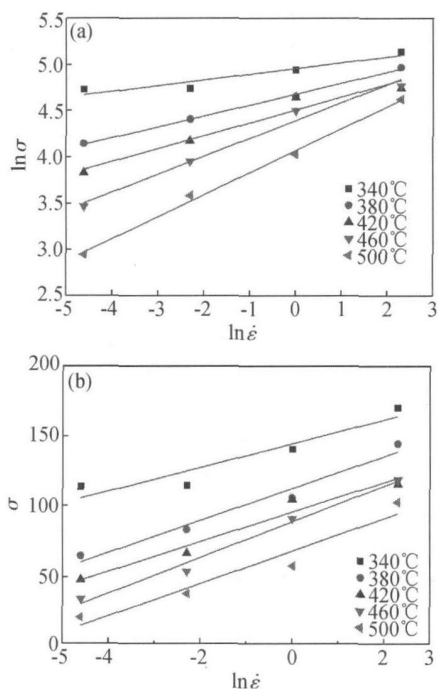


图2 峰值应力与应变速率的关系

(a)  $\ln \sigma$  vs  $\ln \dot{\epsilon}$ ; (b)  $\sigma$  vs  $\ln \dot{\epsilon}$

Fig. 2 Relationship between peak stress and strain rates

(a)  $\ln \sigma$  vs  $\ln \dot{\epsilon}$ ; (b)  $\sigma$  vs  $\ln \dot{\epsilon}$

对式(1)两边取自然对数, 整理可得

$$\ln \dot{\epsilon} = B + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] \quad (B = \ln A - Q/RT) \quad (7)$$

$\alpha$  取本实验所得  $0.0173 \text{ MPa}^{-1}$ , 以  $\ln \dot{\epsilon}$  和  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  为坐标作图, 并进行线性回归, 如图3所示。可知,  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  之间的线性关系明显。

对式(4)两边取自然对数, 并假定在恒应变速率条件下变形时, 一定温度范围内  $Q$  保持不变, 可得:

$$\ln [\sinh(\alpha \sigma)] = A_3 + B_3 \frac{1000}{T} \quad (A_3 = \frac{1}{n} (\ln \dot{\epsilon} - \ln A)),$$

$$B_3 = \frac{Q}{1000nR} \quad (8)$$

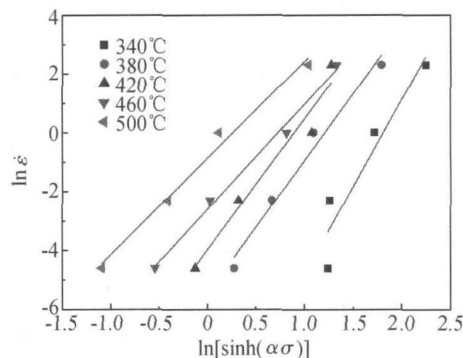


图3 不同变形温度下  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  的关系

Fig. 3 Relationship between  $\ln \dot{\epsilon}$  and

$\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  at different temperatures

以  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  和  $1000/T$  为坐标作图, 进行线性回归, 如图4所示。可见, 在相同应变速率下,  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  和  $1000/T$  呈线性关系。

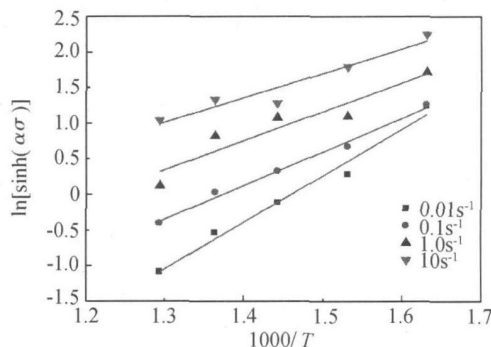


图4 不同应变速率下  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  与温度的关系

Fig. 4 Relationship between  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  and temperatures at different strain rates

考虑温度对变形激活能的影响对式(4)求偏微分:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_\epsilon = RnS \quad (9)$$

式中:  $n$  为一定温度下  $\ln \dot{\epsilon}$  vs  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  关系的斜率, 即图3中各直线斜率的平均值, 其值为 4.3515;  $S$  为应变速率一定的条件下  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  vs  $1000/T$  关系的斜率, 即图4中各直线斜率的平均值, 其值为 4.7025。将  $n$  和  $S$  的值代入, 即可求出 2124 铝合金的热变形激活能  $Q = 170.13 \text{ kJ/mol}$ 。

对式(4)两边取对数还可得

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

将  $Q$  值和变形条件代入式(4)求出  $Z$  值。绘制  $\ln Z$  vs  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  关系图并进行线性拟合, 如图5所示。其线性关系表明, 2124 铝合金高温变形流动应力-应变行为可以用  $Z$  参数描述, 即该合金的高温塑性

变形受热激活控制。由式(10)可知,图5中直线的斜率即为应力指数  $n$ , 而其截距为  $\ln A$ 。由拟合结果可得,应力指数  $n=4.1093$ , 由  $\ln A=25.6709$ , 可以求得材料常数  $A=1.4084 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ 。

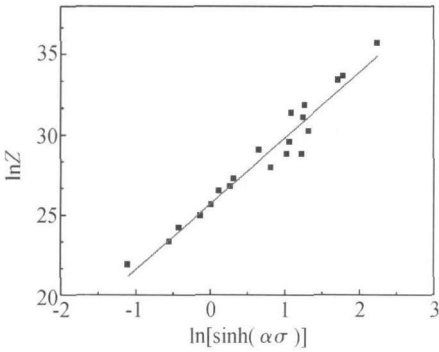


图5 Z 参数与流变应力的关系

Fig. 5 Relationship between Z parameter and flow stress

将  $Q, R, T$  值代入即可求得  $A$ 。峰值应力下的热变形材料常数如表2所示。

表2 峰值应力下 2124 铝合金的热变形材料常数

Table 2 Parameters of 2124 Al alloy at peak stress

| $A/\text{s}^{-1}$       | $\alpha/\text{MPa}^{-1}$ | $n$    | $Q/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ |
|-------------------------|--------------------------|--------|---------------------------------------|
| $1.4084 \times 10^{11}$ | 0.0173                   | 4.3515 | 170.13                                |

2.2 加工图理论

在不同的变形温度与应变速率下,加工图能反映材料在热变形时内部微观组织的变化,且能够评估材料的可加工性。按照DDM的观点<sup>[10,11]</sup>,在给定温度和应变下,材料的热变形过程满足动态本构方程:

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \tag{11}$$

式中:  $K$  为常数;  $m$  为应变速率敏感指数。热加工过程中的单位体积所吸收的总能量  $P = \sigma \dot{\epsilon}$ , 能量耗散可分为两部分: 耗散量  $G$  和耗散协量  $J$ , 其数学定义为:

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma \cdot d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} \cdot d\sigma \tag{12}$$

式中:  $G = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma \cdot d\dot{\epsilon}$ , 表示材料发生塑性变形所消耗的能量, 其中大部分转化成了热量, 小部分以晶体缺陷能的形式储存;  $J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} \cdot d\sigma$ , 表示材料变形过程中组织演化所消耗的能量。这两种能量所占比例由材料的应变敏感速率指数  $m$  决定, 即:

$$m = \frac{\partial J}{\partial G} = \frac{\dot{\epsilon} \partial \sigma}{\sigma \partial \dot{\epsilon}} = \frac{\partial (\ln \sigma)}{\partial (\ln \dot{\epsilon})} \tag{13}$$

对于理想线性耗散来说:  $J$  具有最大值  $J_{\max} = \frac{P}{2}$ ,

定义耗散效率系数  $\eta = \frac{J}{J_{\max}}$ , 则有:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2J}{P} = 2 \left( \frac{P-G}{P} \right) = 2 \left( 1 - \frac{1}{\sigma \dot{\epsilon}} \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \right) \tag{14}$$

当  $m$  为常数时, 根据式(11)和式(14)可得:

$$\eta = \frac{2m}{m+1} \tag{15}$$

$\eta$  是一个无量纲的参数, 其物理意义是指材料热变形过程中显微组织变化所耗散的能量同线性耗散能量的比例关系。在应变速率  $\dot{\epsilon}$  和变形温度  $T$  所构成的二维平面上绘出能量耗散因子  $\eta$  的等值线图, 就构成了材料的功率耗散图。

根据大应变塑性变形时的极大值原理<sup>[12-14]</sup>, 当耗散函数  $D(\dot{\epsilon})$  与应变速率  $\dot{\epsilon}$  满足不等式:  $dD/d\dot{\epsilon} < D/\dot{\epsilon}$  时, 材料会出现变形失稳, 式中  $D$  是在给定温度下的耗散函数。按照动态材料模型原理,  $D$  等于耗散协量  $J$ , 因此材料流变失稳的判据为:

$$\frac{dJ}{d\dot{\epsilon}} < \frac{J}{\dot{\epsilon}} \tag{16}$$

由于  $J = P - G = \sigma \dot{\epsilon} - \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \sigma \dot{\epsilon} - \int_0^{\sigma} K \dot{\epsilon}^m d\sigma = \frac{m}{m+1} \sigma \dot{\epsilon}$  (17)

将式(17)带入式(16)并化简可得:

$$\frac{\partial \ln(\frac{m}{m+1})}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \tag{18}$$

定义:  $\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln(\frac{m}{m+1})}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m$  (19)

则材料流变失稳的条件为:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln(\frac{m}{m+1})}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \tag{20}$$

式(20)即为 Prasad 失稳判据。在  $\dot{\epsilon}$  和  $T$  所构成的二维平面上绘出变量  $\xi(\dot{\epsilon})$  的等值线图, 这就构成了材料的流变失稳图,  $\xi(\dot{\epsilon}) < 0$  的区域为流变失稳区域。将失稳图与功率耗散图叠加便形成了加工图。

2.3 2124 铝合金加工图及其分析

采用三次样条函数拟合  $\ln \sigma$  与  $\ln \dot{\epsilon}$  的关系, 按式(13)计算  $m$ , 再按式(15)计算  $\eta$ , 按式(20)计算流变失稳区域, 从而得到 2124 铝合金在应变量为 0.6 时的加工图, 如图6所示, 图6中阴影部分为流变失稳区域, 等值线上的数字表示功率耗散系数。加工图中局部区域存在功率耗散系数最大值, 它代表特殊的显微组织机制或流变失稳机制。一般来说, 高功率耗散区对应着材料的最佳加工性能区, 然而由于楔形裂纹破坏机

制通常也对应着高功率耗散系数, 因此分析加工图需要进一步的显微组织来佐证<sup>[15]</sup>。由图 6 可见, 材料在高应变速率( $> 0.2\text{s}^{-1}$ )和低变形温度( $< 450^\circ\text{C}$ )下, 存在大范围的失稳区, 表明该合金热加工难度较大。在加工图中, 材料在中温( $450^\circ\text{C}$ 左右)与低应变速率( $0.01\sim 0.1\text{s}^{-1}$ )区的功率耗散达到最大 40%, 热变形热合金的组织细小均匀, 如图 7 所示, 表明中温区是该合金适宜的热变形区域。此外, 在本实验条件下, 变形温度为  $500^\circ\text{C}$  时样品的边缘均发生开裂, 所以, 该合金也不适宜在  $500^\circ\text{C}$  进行热加工。

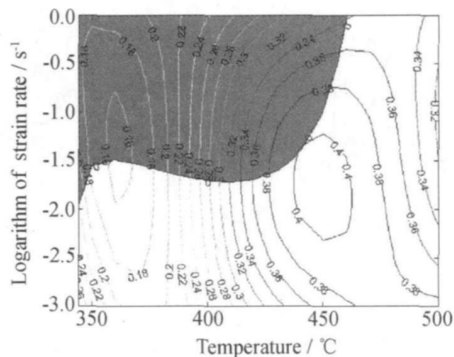


图 6 2124 铝合金在应变为 0.6 时的加工图

Fig. 6 Processing map at strain of 0.6 for 2124 Al alloy

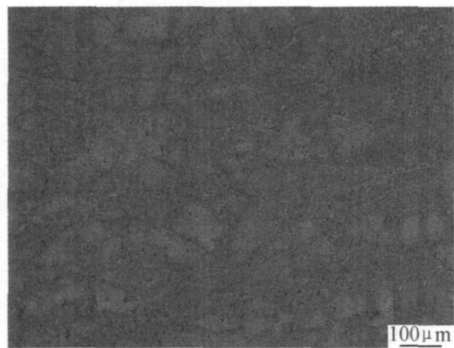


图 7 变形温度为  $420^\circ\text{C}$ , 应变速率为  $0.01\text{s}^{-1}$  时 2124 铝合金的显微组织

Fig. 7 Microstructure of 2124 Al alloy deformed at  $420^\circ\text{C}$  and a strain rate of  $0.01\text{s}^{-1}$

### 3 结论

(1) 在应变速率一定的条件下, 合金的流变应力随变形温度的升高而减小; 在变形温度一定的条件下, 合金的流变应力随应变速率的增大而增大。

(2) 2124 铝合金热变形过程中的流变应力满足双曲正弦本构关系, 其热变形材料常数为  $A = 1.4084 \times 10^{11}\text{s}^{-1}$ ,  $\alpha = 0.0173$ ,  $n = 4.3515$ , 其平均激活能为  $170.13\text{kJ/mol}$ 。

(3) 2124 铝合金的热变形失稳区为高应变速率和

低变形温度区。在变形温度为  $450^\circ\text{C}$  左右, 应变速率为  $0.01\sim 0.1\text{s}^{-1}$  的区域, 该合金功率耗散系数达到最大值 40%, 是该合金的热加工区域。

### 参考文献

- [1] 曾卫东, 周义刚, 周军, 等. 加工图理论研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 673- 677.
- [2] 周军, 李中奎, 张建军, 等. 基于 Matlab 的热加工图的数值构造方法[J]. 稀有金属, 2007, 31(增刊): 49- 52.
- [3] 鲁世强, 李鑫, 王克鲁, 等. 基于动态材料模型的材料热加工工艺优化方法[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(6): 890- 896.
- [4] RAMANATHAN S, KARTHIKEYAN R, DEEPAK K V, et al. Hot deformation behavior of 2124Al alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2006, 22(5): 611- 615.
- [5] 王蕊宁, 奚正平, 赵永庆, 等. Ti53311S 合金高温塑性变形行为及加工图[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 37(1): 10- 13.
- [6] CAI Deyang, XIONG Liangyin, LIU Weirchang, et al. Development of processing maps for a Ni-based super alloy[J]. Materials Characterization, 2007, 58(10): 941- 946.
- [7] NARAYANA MURTY S V S, NAGESWARA RAO B, KASHYAP B P. Identification of flow instabilities in the processing maps of AISI 304 stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(2): 268- 278.
- [8] 李慧宁, 张新明, 陈明安, 等. 2159 铝合金热变形流变行为[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(4): 621- 625.
- [9] 陈永禄, 陈文哲, 洪丽华, 等. 铝及其合金高温流变应力模型的研究现状[J]. 铸造技术锻压, 2008, 29(9): 1223- 1226.
- [10] MENG Gang, LI Borlong, LI Hongmei, et al. Hot deformation and processing maps of an Al 5.7wt. % Mg alloy with erbium[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 517: 132- 137.
- [11] PRASAD Y V R K, RAO K P. Processing maps and rate controlling mechanisms of hot deformation of electrolytic tough pitch copper in the temperature range  $300\sim 950^\circ\text{C}$ [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 391: 141- 150.
- [12] PRASAD Y V R K, RAO K P, HORT N, et al. Hot working parameters and mechanisms in as cast Mg 3Sr 1Ca alloy[J]. Materials Letters, 2008, 62: 4207- 4209.
- [13] 汪凌云, 范永革, 黄光杰, 等. 镁合金 AZ31B 的高温塑性变形及加工图[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(7): 1068- 1072.
- [14] 周义刚, 曾卫东, 俞汉清, 等. 加工图研究进展与应用[J]. 稀有金属材料工程, 2005, 34(增刊 3): 715- 719.
- [15] 黄光胜, 汪凌云, 陈华, 等. 2618 铝合金的热变形和加工图[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(5): 763- 767.

项目基金: 国防科工委项目资助(JGPT-SD-031)

收稿日期: 2009-03-29; 修订日期: 2010-01-06

作者简介: 李成倡(1987-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 潘清林(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 现主要从事有色金属研究, 联系地址: 中南大学材料科学与工程学院(410083), E-mail: pql@mail.csu.edu.cn