

高强高韧 Al - Cu - Li - Mg - Zr - Zn - Mn 合金热变形行为

陈永来¹ 李劲风² 吕宏军¹ 张宇玮¹ 张绪虎¹

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)
(2 中南大学材料科学与工程学院,长沙 410083)

文 摘 在 Gleeble - 1500 热模拟实验机上,采用高温等温压缩,应变速率为 0.001 ~ 10/s,变形温度为 360 ~ 520 ℃,对通用型铝锂合金在高温压缩变形中的流变应力行为进行了研究,分析了其高温变形的物理本质。结果表明:在等应变速率下,真应力随温度的升高而降低;在相同的变形温度下,随应变速率的增加,流变应力水平升高。在较低的变形速率及较高的变形温度条件下热变形时,通用型铝锂合金容易发生动态再结晶。而变形速率较高,变形温度较低时,通用型铝锂合金可能发生剪切变形,热变形过程中则主要发生动态回复。

关键词 通用型铝锂合金,热压缩变形,动态再结晶,动态回复

Hot Deformation Behavior of an Al - Cu - Li - Mg - Zr Alloy Containing Zn and Mn

Chen Yonglai¹ Li Jinfeng² Lü Hongjun¹ Zhang Yuwei¹ Zhang Xuhu¹

(1 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

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

Abstract In this paper, the hot deformation behavior of a new Al - Cu - Li - Mg - Zr alloy is studied, and its microstructure and true stress are characterized as functions of the deformation temperature and the strain rate using Gleeble - 1500 thermalmechanical simulator. The results show that with the increase of the strain rate from 0.001/s to 10/s the peak value of true stress is elevated at the same deformation temperature, and at the same strain rate the peak value of the true stress decrease with the increase of the deformation temperature from 360 ℃ to 520 ℃. Dynamic recrystallization easily occurs in the new Al - Cu - Li - Mg - Zr alloy under the lower strain rate and the higher deformation temperature, and dynamic recovery is usually seen in its alloy under the higher strain rate 10/s and the lower deformation temperature.

Key words Al - Li alloy, Hot compression deformation, Dynamic recrystallization, Dynamic recovery

1 前言

在铝合金中加入元素锂,可在降低合金密度的同时提高合金的弹性模量。研究表明^[1],在铝合金中每添加 1% (质量分数) 的 Li,可使合金密度降低 3%,弹性模量提高 6%,并可保证合金在淬火和人工时效后硬化效果良好。可见,铝锂合金作为一种高比强度和高比模量的铝合金,在航空航天领域显示出了广阔的应用前景^[2~4]。

为适应航空航天发展的需要,我国自主研制了一

种同时兼顾强度和韧性的高强高韧通用型铝锂合金,该合金不同于 2195、2197 铝锂合金。通用型铝锂合金也需经高温塑性加工成形,对其高温变形时流变应力的研究尚未开展。金属热变形流变应力是材料在高温下的基本性能之一,它不仅受变形温度、变形程度、应变速率和合金化学成分的影响,也是变形体内部组织演变的综合反映。无论在制定合理的热加工工艺方面,还是在金属塑性变形理论的研究方面都是极其重要的。近年来,国内外在这方面的研究十分活

收稿日期:2007 - 09 - 03

作者简介:陈永来,1972年出生,高级工程师,主要从事铝合金、钛合金的研究工作

跃,韩冬峰、郑子樵等人在 Gleeble - 1500热模拟实验机上,采用高温等温压缩 0.001 ~ 10/s,变形温度为 360 ~ 520 ,对 2195 铝锂合金在高温压缩变形中的流变应力行为进行了研究,分析了其高温变形的物理本质^[5]。李慧中、张新明等人也采用 Gleeble - 1500 热模拟机进行高温等温压缩实验,研究了 2519 铝合金在变形温度为 300 ~ 450 、应变速率为 0.01 ~ 10/s 条件下的流变变形行为^[6]。

基于此,本文在 Gleeble - 1500热模拟机上,采用圆柱体轴对称高温单道次压缩实验对通用型铝锂合金流变应力进行系统的研究,分析其高温变形时流变应力的变化规律和高温变形的物理本质,求解有关材料常数值,回归出变形抗力模型,分析合金的组织变化规律,为制定合理的热加工工艺提供理论依据。

2 实验

2.1 材料

研究采用通用型铝锂合金铸锭,其化学成分为 Al-3.85Cu - 1.55Li - 0.38Mg - 0.57Zn - 0.28Mn - 0.16Zr [% (质量分数)]。将经均匀化处理的通用型铝锂合金铸锭加工成尺寸为 10 mm × 15 mm、两端带有深 0.2 mm 凹槽的 Rastegaev 样品。

2.2 方法及仪器

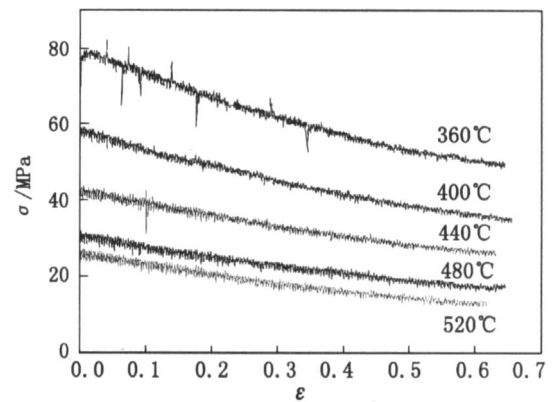
将加工好的试样在 Gleeble - 1500热模拟机上进行等温压缩实验,压缩温度为 360 ~ 520 ,应变速率为 0.001 ~ 10/s,热模拟实验的升温速率为 5 /s,保温时间为 3 min。压缩前圆柱试样两端的凹槽内填充 75% 石墨 + 20% 机油 + 5% 硝酸三甲苯脂,以减少摩擦对应力状态的影响。由 Gleeble - 1500热模拟机的计算机自动采集应力、应变、压力、位移、温度及时间等数据,绘制真应力—真应变曲线。

将试验后的试样通过机械减薄到 50 μm 后,采用电解双喷穿孔制成薄膜,电解液为 25% 的硝酸甲醇溶液。然后使用 Tecnai G2 20 型透射电镜观察样品显微组织形貌。

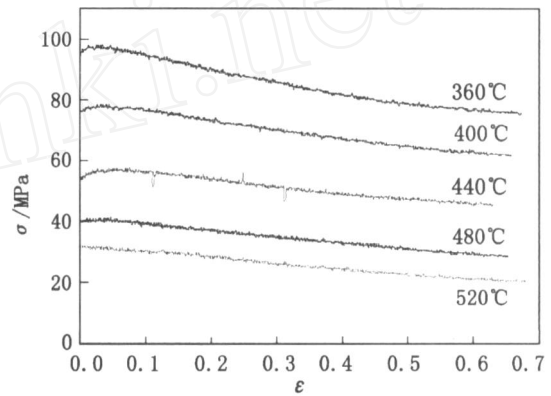
3 实验结果

3.1 通用型铝锂合金高温压缩变形的真应力—真应变曲线

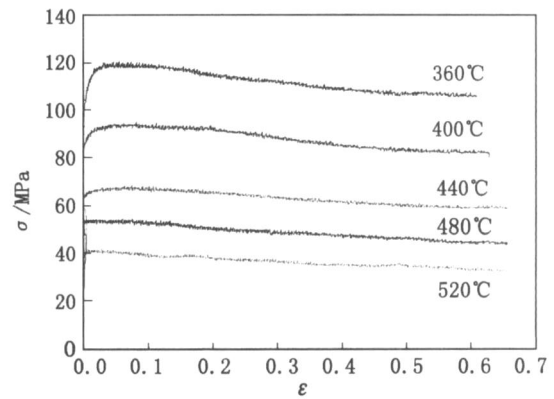
通用型铝锂合金在一定变形条件下的实测真应力—真应变曲线如图 1 所示。由图 1 可见,在应变速率为 0.001、0.01、0.1/s 变形温度为 360 ~ 520 以及变形温度为 480 ~ 520 ,应变速率为 1.0 和 10/s,通用型铝锂合金热压缩变形出现了明显的峰值应力,表现为动态再结晶特征,表明在上述热变形条件下通用型铝锂合金可能发生动态再结晶。



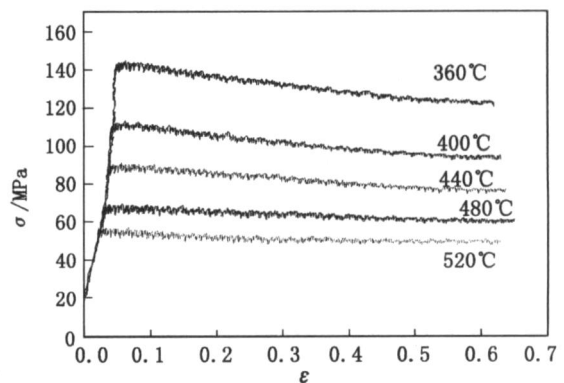
(a) $\dot{\epsilon} = 0.001/s$



(b) $\dot{\epsilon} = 0.01/s$



(c) $\dot{\epsilon} = 0.1/s$



(d) $\dot{\epsilon} = 1.0/s$

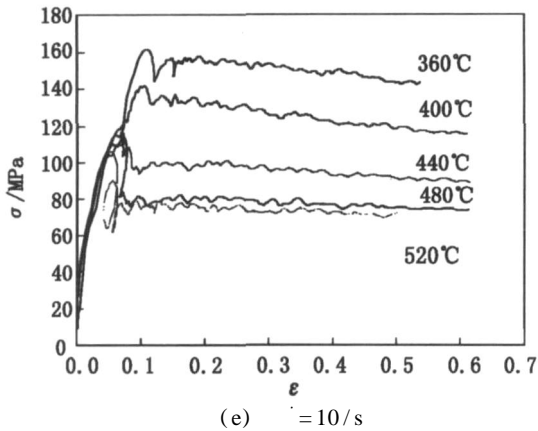


图 1 通用型铝锂合金热压缩变形的真应力—真应变曲线

Fig 1 True stress vs true strain curves of Al-Li alloy during thermal deformation at various compression strain rate

表 1 所示为不同热变形条件下通用型铝锂合金的峰值流变应力。在等应变速率下,真应力随温度的升高而降低;在相同的变形温度下,随应变速率的增加,流变应力水平升高。

表 1 不同变形条件下通用型铝锂合金的峰值应力
Tab 1 Peak-stress of Al-Li alloy during thermal deformation at various compression strain rate

$\dot{\epsilon}/s$	/MPa				
	360	400	440	480	520
0.001	83	59	43	32	27
0.01	98	79	57	41	32
0.1	121	95	68	55	42
1.0	145	112	91	69	57
10.0	162	142	110	114	106

3.2 热变形流变应力方程

热变形过程中,材料在任何应变或稳态下的高温流变应力 强烈的取决于变形温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 。对不同热加工数据的研究表明, $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 之间的数学关系表达式主要有以下 3 种情况^[7-9]。

(1) 低应力水平时:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \quad (1)$$

(2) 高应力水平时:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\sigma) \quad (2)$$

(3) 整个应力范围:

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

式中, A_1 、 A_2 、 A 、 n_1 、 n 、 σ_0 均为与温度无关的常数, A 为结构因子; n 为应力指数; σ_0 为应力水平参数; R 为气体常数; T 为变形温度; Q 为变形激活能; σ_0 和 n 之间满足 $\sigma_0 = \dot{\epsilon} / n$; σ_0 为峰值应力或稳态流变应力,或

相应于某指定应变率时对应的流变应力。

式 (3) 是一种包括 Q 和温度的双曲正弦形式修正的 Arrhenius 关系式,用于描述热激活稳态变形行为。大量的研究表明,式 (3) 能较好的描述常规热加工变形,并且该式还广泛应用于估算各种金属及合金的变形激活能 Q 。

1944 年 Zener 和 Hollomon 提出并验证了应变速率和温度的关系可用一项参数 Z 表示:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (4)$$

式中, Z 为 Zener-Hollomon 参数,是温度补偿的变形速率因子。 Q 反映了材料热变形的难易程度,也是材料在热变形过程中重要的力学性能参数,其值通常与激活焓 H 相等。 Z 和 $\dot{\epsilon}$ 之间符合以下关系式:

$$Z = A [\sinh(\sigma)]^n \quad (5)$$

在研究材料热变形行为时,还应了解与应变速率和温度有关的流变应力的变化规律。从式 (5) 可以得到:

$$\sinh(\sigma) = (Z/A)^{1/n} \quad (6)$$

根据双曲正弦函数的定义,有:

$$\sinh^{-1}(x) = \ln [x + (x^2 + 1)^{1/2}] \quad (7)$$

由此可将流变应力表达为含应变速率和温度的函数,也可表达为 Zener-Hollomon 参数 Z 值的函数:

$$\sigma = 1/n \ln \{ (Z/A)^{1/n} + [(Z/A)^{2/n} + 1]^{1/2} \} \quad (8)$$

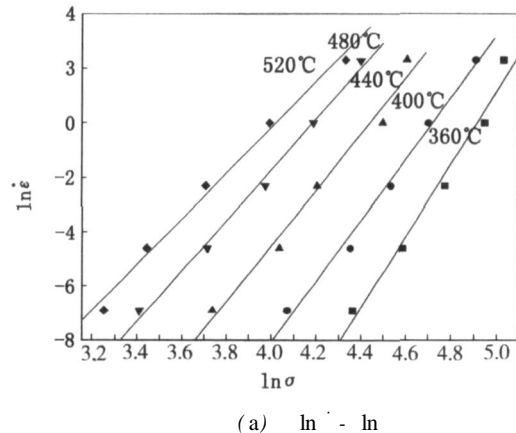
实际应用上,只要已知 A 、 Q (H)、 n 和 σ_0 等材料常数,即可求出材料在任意变形条件下的流变应力值。

对式 (1) 和式 (2) 两边分别求对数得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma \quad (9)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \sigma \quad (10)$$

根据式 (9)、(10),取流变应力为峰值应力,分别以 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 为坐标作图,用数学软件 Origin 作线性回归,如图 2 所示。由式 (9) 和 (10) 可知, n_1 可取图 2(a) 中 5 条直线的平均值,得到 $n_1 = 10.46$ 。可取图 2(b) 中 5 条直线的平均值,得到 $\sigma_0 = 0.149$ 。则 σ_0 值为: $\sigma_0 = \dot{\epsilon} / n_1 = 0.0142$ 。



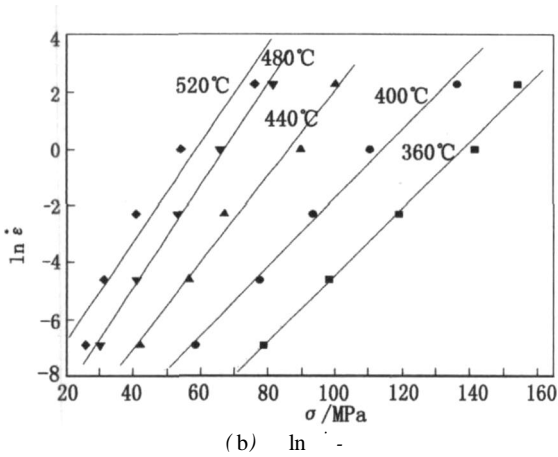


图 2 通用型铝锂合金峰值应力与应变速率之间的关系
Fig 2 Flow stress () dependence on strain rate () at various temperatures

对式 (3) 两边取对数, 并假定变形激活能与温度无关, 可以得到:

$$\ln \dot{\sigma} = \ln A - Q/RT + n \ln [\sinh(\dot{\sigma})] \\ = A' + n \ln [\sinh(\dot{\sigma})] \quad (11)$$

将不同变形温度下通用型合金变形时峰值应力与应变速率代入式 (11), 以 $\ln \dot{\sigma}$ 和 $\ln [\sinh(\dot{\sigma})]$ 为坐标作图, 用 Origin 做线性回归, 如图 3 所示。由图 3 可知, 通用型高温变形流变应力和应变速率的双曲对数较好地满足了线性关系。由此可认为, 通用型合金高温压缩变形时的应力—应变速率关系满足双曲正弦的形式, 这种双曲正弦函数关系可用于描述合金整个应力水平下的流变应力和应变速率之间的关系, 为通过控制应变速率来控制热加工的应力水平和力学性能参数提供了理论依据。

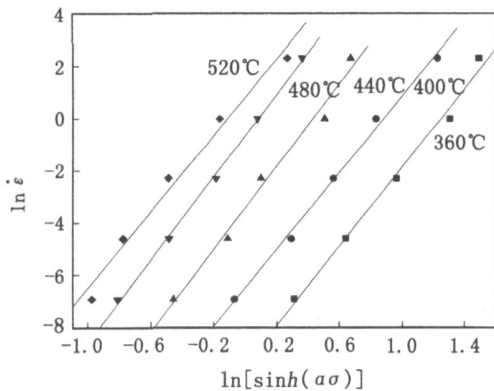


图 3 通用型铝锂合金峰值应力与应变速率线性关系
Fig 3 Peak flow stress dependence on strain rate

把式 (4) 代入到式 (5), 再对其两边取自然对数可以得到:

$$\ln [\sinh(\dot{\sigma})] = A_3 + B \times 1000/T \quad (12)$$

将不同的变形条件下的峰值应力值代入上式, 以 $1000/T$ 和 $\ln [\sinh(\dot{\sigma})]$ 为坐标作图, 进行线性回

归, 得到图 4。由图 4 可知, $\ln \dot{\sigma}$ 与 $1/T$ 较好的符合了式 (12) 的线性关系, 从而证实了通用型合金高温变形时 $\ln \dot{\sigma}$ 与变形温度 T 之间的关系属于 Arrhenius 关系, 即可用包含 Arrhenius 项的 Z 参数描述通用型合金在高温压缩变形时的流变应力行为。这种关系同时说明通用型合金热变形是受热激活控制的。

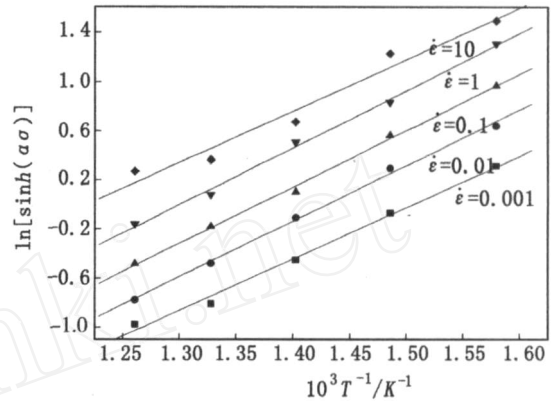


图 4 通用型铝锂合金峰值应力与温度关系
Fig 4 Peak flow stress dependence on deformation temperature

根据式 (3), 求偏导得:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\sigma}}{\partial \ln [\sinh(\dot{\sigma})]} \right\}_T \times \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\dot{\sigma})]}{\partial (1/T)} \right\} \quad (13)$$

上式右边大括号中的两项分别为一定温度下 $\ln [\sinh(\dot{\sigma})] - \ln \dot{\sigma}$ 关系的斜率和应变速率一定的条件下 $(1/T) - \ln [\sinh(\dot{\sigma})]$ 关系的斜率。取图 3 和图 4 中的直线斜率平均值分别是 7.59 和 4.429, 代入式 (13) 中可以求出 Q 值为 279.41 kJ/mol。

对式 (5) 两边求对数得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\dot{\sigma})] \quad (14)$$

将 Q 值和变形条件代入式 (4) 后求出 Z 值, 以 $\ln [\sinh(\dot{\sigma})]$ 和 $\ln Z$ 为坐标作图, 并进行线性回归, 得到图 5。由式 (14) 可知, 图 5 中回归直线的斜率即为应力指数 n , 其截距为 $\ln A$ 。从图 5 中可以得到 $n = 7.57$, 可见两者在实验应变速率和变形温度范围内的线性关系吻合的很好, 进一步说明通用型铝锂合金高温塑性变形时流变应力、应变速率和温度 T 之间的关系可用 (3) 式来描述。

求得通用型铝锂合金的材料常数分别为:

变形激活能: $Q = 279.41 \text{ kJ/mol}$

应力指数: $n = 7.57$

应力水平参数: $\sigma_0 = 0.0142 \text{ mm}^2/\text{N}$

结构因子: $A = 8.59 \times 10^{18} / \text{s}$

将求得的 A 、 Q 、 n 等材料参数代入 (3) 式, 得到通用型铝合金热压缩时的流变应力方程为:

$$\dot{\sigma} = 8.59 \times 10^{18} [\sinh(0.0142 \dot{\sigma})]^{1/7.59} \exp(-279.407/RT)$$

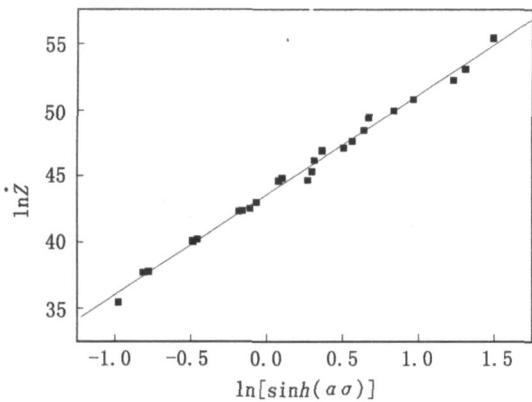


图 5 流变应力与 Z 参数的关系曲线

Fig 5 Relationship between flow stress and Zener-Hollomon parameter

其 Z 参数可表述为, $Z = \dot{\epsilon} \exp(279.407/RT)$

流变应力方程亦可用 Z 参数表述为:

$$= 71.43 \ln \left\{ \left[Z / (8.59 \times 10^{18}) \right]^{1/7.59} + \left\{ \left[Z / (8.59 \times 10^{18}) \right]^{2/7.59} + 1 \right\}^{1/2} \right\}$$

3.3 不同变形条件对通用型铝锂合金显微组织的影响

图 6 所示为通用型铝锂合金不同条件下热变形的 TEM 照片。当应变速率较低 ($\dot{\epsilon} = 0.001/s$), 360 热压缩时, 合金中主要存在大量位错及位错胞 [图 6 (a)], 表明在这种变形条件下, 合金主要发生动态回复; 而且此时还可观察到一些明锐的晶界, 说明已经发生了部分动态再结晶 [图 6 (b)]。在相同的热变形速率条件下, 当变形温度提高至 520 时, 虽然合金仍有较多位错 [图 6 (c)], 但合金已产生较完全动态再结晶, 并可观察到晶界平直、呈平衡状态的完整的再结晶晶粒 [图 6 (d)]。

当应变速率提高至 $\dot{\epsilon} = 1.0/s$ 时, 360 热压缩时, 合金中位错较少, 其组织类似变形剪切带 [图 6 (e)], 同时合金中已观察到位错多边化形成 [图 6 (f)], 表明合金在这种变形条件下主要发生动态回复。在相同应变速率 ($\dot{\epsilon} = 1.0/s$), 当变形温度提高至 440 时, 合金中存在位错及大量亚晶 [图 6 (g)], 并有动态再结晶发生 [图 6 (h)]。当变形温度提高至 520 时, 一方面合金中的亚晶减少 [图 6 (i)], 同时有明显的动态再结晶发生, 可观察到动态再结晶时晶界的迁移过程 [图 6 (j)]。

当应变速率提高至 $\dot{\epsilon} = 10/s$ 时, 360 热压缩时, 与 360、1.0/s 条件下热压缩的组织类似, 合金组织类似变形剪切带特征 [图 6 (k)], 同时合金中存在大量位错胞 [图 6 (l)], 表明合金此时主要产生动态回复。在相同应变速率 ($\dot{\epsilon} = 10/s$), 当变形温度提高至 520 时, 一方面合金中仍存在许多亚晶 [图 6 (m)], 同时合金中也已经观察到动态再结晶的产生。

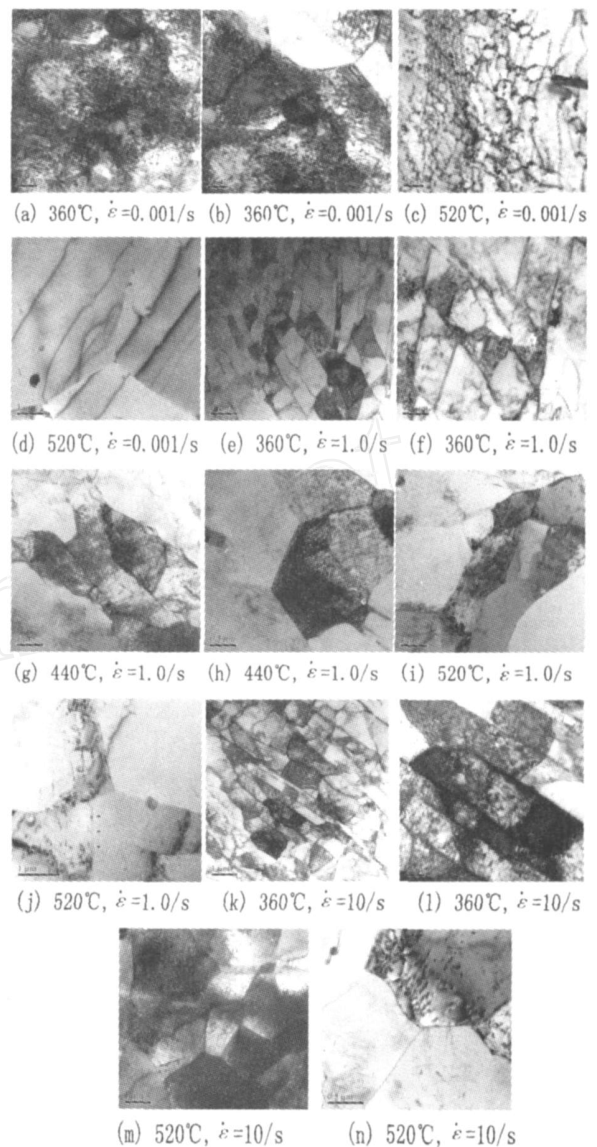


图 6 通用型铝锂合金不同条件下热变形的 TEM 照片

Fig 6 TEM of alloy deformed under various conditions

综合上述可知, 在较低的变形速率及较高的变形温度条件下热变形时, 通用型铝锂合金容易发生动态再结晶。而变形速率较高, 变形温度较低时, 通用型铝锂合金可能发生剪切变形, 热变形过程中则主要发生动态回复。

4 分析与讨论

上述分析表明, 通用型铝锂合金高温压缩变形时的流变应力强烈地取决于应变速率和变形温度, 可用 Zener-Hollomon 参数来描述其流变应力。金属在较高温度下塑性变形时, 同时存在着加工硬化和动态软化两个过程。加工硬化是由于在外加应力下使位错密度增加, 位错之间互相交割, 以致许多位错被钉扎住而难以运动。动态软化则使位错密度降低和位错重新排列成低能量状态的组织。在热形变过程中, 主要的软化过程为动态回复和动态再结晶。

通用型铝锂合金的塑性变形的流变行为是与变形体内的位错组态密切相关的,变形初期,需要较高的能量来启动位错;流变应力达到峰值以后,进入稳态变形,流变应力基本保持不变。此时,合金变形的实质是位错的增殖和位错间由于相互作用而引起的相互销毁和重组之间达到动态平衡,合金变形组织中的亚晶平均大小、亚晶间平均取向差以及平衡位错密度基本保持不变,合金中发生“重复多边形化”,表现出强烈的动态回复行为^[10~11]。当应变速率较低时出现了峰值应力,而且流变应力随着变形的进行而平缓地下降,这些现象明显地表现为动态再结晶行为。由于通用型铝锂合金含有大量的合金化元素 Mn、Mg、Zn、Zr等,使得层错能大大降低,热变形时较易发生动态再结晶。并且通用型铝锂合金经均匀化退火后,由于 τ_1 相及 β 相粒子等的析出,降低了位错的可动性。第二相粒子难以被位错切割时,它会使材料内部形成丰富的位错亚结构并使其稳定。同时,第二相还阻碍亚晶界或晶界迁移,提高发生动态回复所需的临界应变值,使材料中积蓄足够高的位错储能并诱发动态再结晶。由此可见,2195铝锂合金高温变形时的组织特征也可用流变应力或 Zener-Hollomon 参数进行表征,即变形组织和 Z 参数间存在某种对应关系,这种关系可为合金变形组织的预测、控制和优化提供依据^[12]。

此外,通用型铝锂合金高温塑性变形激活能 ($Q = 279.41 \text{ kJ/mol}$)明显比其他大多数铝合金的变形激活能要大一些。这是由于通用型铝锂合金中的 Mn、Mg、Zn、Zr等合金化元素都能降低铝基体层错能,因此,合金的层错能降低,层错宽化,动态回复变得困难,由此提高了激活动态回复所需的能量。同时,通用型铝锂合金在均匀化后冷却过程中析出的大量细小第二相在变形前的加热和保温过程中及在变形过程中可能发生部分重溶,而沉淀相的重溶会提高变形激活能。因此,激活能的升高归因于合金元素的加入。

5 结论

(1)通用型铝锂合金的峰值流变应力在等应变速率下,随温度的升高而降低;在相同的变形温度下,随应变速率的增加,其流变应力水平则升高。

(2)通用型铝锂合金在应变速率为 0.001、0.01、0.1/s 变形温度为 360~520 以及应变速率为 1.0 和 10/s,变形温度为 480~520 ,通用型铝锂合金热

压缩变形出现了明显的峰值应力,表现为动态再结晶特征。

(3)通用型铝锂合金高温变形时的流变应力行为可用 Zener-Hollomon 参数的双曲正弦函数 $\dot{\epsilon} = A [\sinh(\sigma)]^n \exp(-Q/RT)$ 来描述,流变应力解析表达式中 A 、 n 和 Q 值分别为 $8.59 \times 10^{18} / \text{s}$ 、0.014 2 mm^2/N 和 7.57,其热变形激活能 Q 为 279.41 kJ/mol。

(4)在较低的变形速率及较高的变形温度条件下热变形时,通用型铝锂合金容易发生动态再结晶。而变形速率较高、变形温度较低时,通用型铝锂合金可能发生剪切变形,热变形过程中则主要发生动态回复。

参考文献

- 1 Williams J C, Starke J E A. Progress in structural materials for aerospace system. Acta Materialia, 2003; 51: 5 775 ~ 5 799
- 2 熊焕. 低温贮箱及铝锂合金的应用. 导弹与航天运载技术, 2001; (6): 33 ~ 41
- 3 赵祖虎. 航空航天用铝锂合金近况. 航天应用与遥感, 1998; 19: 40 ~ 42
- 4 霍红庆, 郝维新, 耿桂宏等. 航天轻型结构材料——铝锂合金的发展. 真空与低温, 2005; 11: 63 ~ 69
- 5 韩冬峰, 郑子樵, 蒋响等. 高强可焊 2195 铝锂合金热压缩变形的流变应力. 中国有色金属学报, 2004; 14(12): 2 090 ~ 2 095
- 6 李慧中, 张新明, 陈明安等. 2519 铝合金热变形流变行为. 中国有色金属学报, 2005; 15(4): 621 ~ 625
- 7 Poirier J P. 关德林译. 晶体的高温塑性变形. 大连: 大连理工大学出版社, 1989
- 8 沈健. 热压缩 2091A1-Li 合金的流变应力行为. 稀有金属, 1998; 22(1): 47 ~ 50
- 9 Sheppard T, Parson N C, Zaidi M A. Dynamic recrystallization in Al-Mg Met Sci, 1983; 17(10): 481 ~ 487
- 10 林高用, 张辉, 郭武超. 7075 铝合金热压缩变形流变应力. 中国有色金属学报, 2001; 11(3): 412 ~ 415
- 11 张愈祖, 张辉, 彭大暑. 6201 铝合金热连轧的实验模拟. 中国有色金属学报, 2000; 10(4): 525 ~ 528
- 12 Raybould D, Sheppard T. Axisymmetric extrusion: the effect of temperature rise and strain rate on the activation enthalpy and material constants of some aluminium alloys and their relation to recrystallization, substructure, and subsequent mechanical properties. Inst Metals, 1973; 101: 65 ~ 72

(编辑 任涛)