

文章编号: 1004-0609(2004)12-2090-06

高强可焊 2195 铝-锂合金热压缩变形的流变应力^①

韩冬峰¹, 郑子樵¹, 蒋 呐², 李劲风¹

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 西南铝业(集团)有限责任公司, 重庆 401326)

摘 要: 在 Gleeble-1500 热模拟实验机上, 采用高温等温压缩, $0.001 \sim 10 \text{ s}^{-1}$, 变形温度为 $360 \sim 520 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 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。结果表明: 在应变速率为 1 s^{-1} (变形温度为 $520 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 和应变速率为 0.1 、 0.01 、 0.001 s^{-1} (变形温度为 $360 \sim 520 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 时, 2195 铝-锂合金热压缩变形流变应力出现了明显的峰值应力, 表现为连续动态再结晶特征; 在其它变形条件下存在较为明显的稳态流变特征; 可采用 Zener-Hollomon 参数的双曲正弦函数来描述 2195 铝-锂合金高温变形时的流变应力行为; 在获得的流变应力 σ 解析表达式中, A 、 α 和 n 值分别为 $2.569 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$ 、 0.01248 MPa^{-1} 和 5.94 ; 热变形激活能 Q 为 250.45 kJ/mol 。

关键词: 2195 铝-锂合金; 热压缩变形; 流变应力; Zener-Hollomon 参数

中图分类号: TG 146

文献标识码: A

Flow stress of high-strength weldable 2195 aluminium-lithium alloy during hot compression deformation

HAN Dong-feng¹, ZHENG Zi-qiao¹, JIANG Na², LI Jing-feng¹

(1. School of Materials Science and Engineering,

Central South University, Changsha 410083, China;

2. Southwest Aluminium (Group) Co. Ltd, Chongqing 401326, China)

Abstract: By isothermal compression test at Gleeble-1500 thermal-mechanical simulator, the flow stress behavior of 2195 aluminium-lithium alloy during hot compression deformation was studied with the strain rate rang from 0.001 s^{-1} to 10 s^{-1} and the temperature range from $360 \text{ }^{\circ}\text{C}$ to $520 \text{ }^{\circ}\text{C}$. The physical essence of hot deformation for 2195 alloy was also studied. The results show that when the strain rate is 1 s^{-1} (the deformation temperature is $520 \text{ }^{\circ}\text{C}$) and 0.001 , 0.01 and 0.1 s^{-1} ($360 \sim 520 \text{ }^{\circ}\text{C}$), the flow stress decreases after a peak value, showing continuous dynamic recrystallization. The steady-state flow characteristics exist on the other deformation conditions. The flow stress of 2195 alloy during high temperature deformation can be expressed by a Zener-Hollomon parameter in the hyperbolic sine function. The values of A , α and n in the analytical expressions of flow stress (σ) are fitted to be $2.569 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$, 0.01248 MPa^{-1} and 5.94 . The hot deformation activation energy of 2195 alloy during hot deformation is 250.45 kJ/mol .

Key words: 2195 aluminum-lithium alloy; hot compression deformation; flow stress; Zener-Hollomon parameter

美国雷诺公司于 1989 年开发了适于低温推进剂贮箱的先进选材—WeldaliteTM 049^[1] 系列合金, 用于取代原来的 2219 和 2014 合金。在该系合金的基础上, 通过调整 Cu 和 Li 的含量而衍生出一种新

型铝-锂合金—2195 合金。该合金具有超高强度、优良的可锻性、可焊性及低温性能, 应用于大型运载火箭的低温推进剂贮箱、导弹壳体油箱等结构中, 在航空飞行结构体中也有广泛的应用前景^[2]。

① 基金项目: 国家十五重点攻关项目 (MKPT-01-130(2D))

收稿日期: 2004-05-08; 修订日期: 2004-09-05

作者简介: 韩冬峰 (1979-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 郑子樵, 教授; 电话: 0731-8830249; E-mail: dongfenghan@126.com

和其它常规铝合金一样, 2195 铝-锂合金一般需经高温塑性加工成形, 国内外对其高温变形时流变应力的研究未见报道。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。在现代塑性加工力学中, 精确的流变应力值或表达式是提高理论计算精度的关键, 多年来国内外在这方面的研究十分活跃^[3~5]。本文作者在 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 2195 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, 为制定合理的热加工工艺, 有效地控制产品的组织性能, 提高产品质量提供了理论和实践依据。

1 实验

研究采用国产 2195 铝-锂合金铸锭, 其化学成分为 Al-1.0Li-4.0Cu-0.4Mg-0.4Ag-0.14Zr (质量分数, %)。将经 455 °C、6 h+ 495 °C、20 h 双级均匀化处理的 2195 合金铸锭加工成尺寸为 10 mm × 15 mm 的 Rastegaev 压缩样品^[6], 在 Gleeble-1500 热模拟机上进行恒应变速率高温等温压缩实验。压缩过程中, 在圆柱试样两端的槽内填充 75% 石墨+ 20% 机油+ 5% 硝酸三甲苯脂, 以减小摩擦对应力状态的影响。实验温度为 360~ 520 °C, 应变速率为 0.001~ 10 s⁻¹, 总应变量为 0.7 (50%), 利用自身电阻进行加热, 加热速度为 1 °C/s, 变形前保温 5 min。由 Gleeble-1500 热模拟机的计算机系统自动控制温度、位移、位移速度等变形条件, 并采集真应力、真应变等数据, 利用这些数据绘制真应力—真应变曲线。

2 结果与讨论

2.1 真应力—真应变曲线

2195 铝-锂合金变形温度为 360~ 520 °C 和应变速率为 0.001~ 10 s⁻¹ 热压缩变形时实测真应力—真应变曲线如图 1 所示。由图可见, 在应变速率为 1 s⁻¹, 变形温度为 520 °C 以及应变速率分别为 0.1、0.01、0.001 s⁻¹, 变形温度为 360~ 520 °C 时,

2195 铝-锂合金热压缩变形流变应力出现了明显的峰值应力, 表现为连续动态再结晶特征; 而在其它变形条件下存在较为明显的稳态流变特征, 即在一定的温度和应变速率下, 当真应变 ϵ 超过一定值后, 真应力 σ 并不随着真应变的继续增大而发生明显的变化, 表现为动态回复特征; 在等应变速率下, 真应力随着温度升高而降低, 在同样的变形温度下, 随着应变速率的增加, 真应力水平升高。

2.2 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 σ 强烈地取决于变形温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 。对不同热加工数据的研究表明, σ 和 $\dot{\epsilon}$ 之间的数学关系表达式主要有以下 3 种情况^[8~10]:

1) 低应力水平时:

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

2) 高应力水平时:

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

3) 整个应力范围:

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

式中 A_1 、 A_2 、 A 、 n_1 、 n 、 α 、 β 均为与温度无关的常数, A 为结构因子 (s⁻¹), n 为应力指数, α 为应力水平参数 (MPa⁻¹); R 为气体常数; T 为变形温度; Q 为变形激活能; α 、 β 和 n 之间满足 $\alpha = \beta/n$; σ 可表示峰值应力或稳态流变应力, 或相应于某指定应变量时对应的流变应力。

式(3)是由 Sellars 和 Tegart 于 1966 年提出的一种包括变形激活能 Q 和温度的双曲正弦形式修正的 Arrhenius 关系, 用于描述热激活稳态变形行为。大量的研究表明, 式(3)能较好地描述常规的热加工变形, 并且该式还广泛用于估算各种金属及合金的激活能 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 即为 Zener-Hollomon 参数, 是温度补偿的变形速率因子。变形激活能 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 ΔH 相等。 Z 和 σ 之间符合以下关系式:

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

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^[11]:

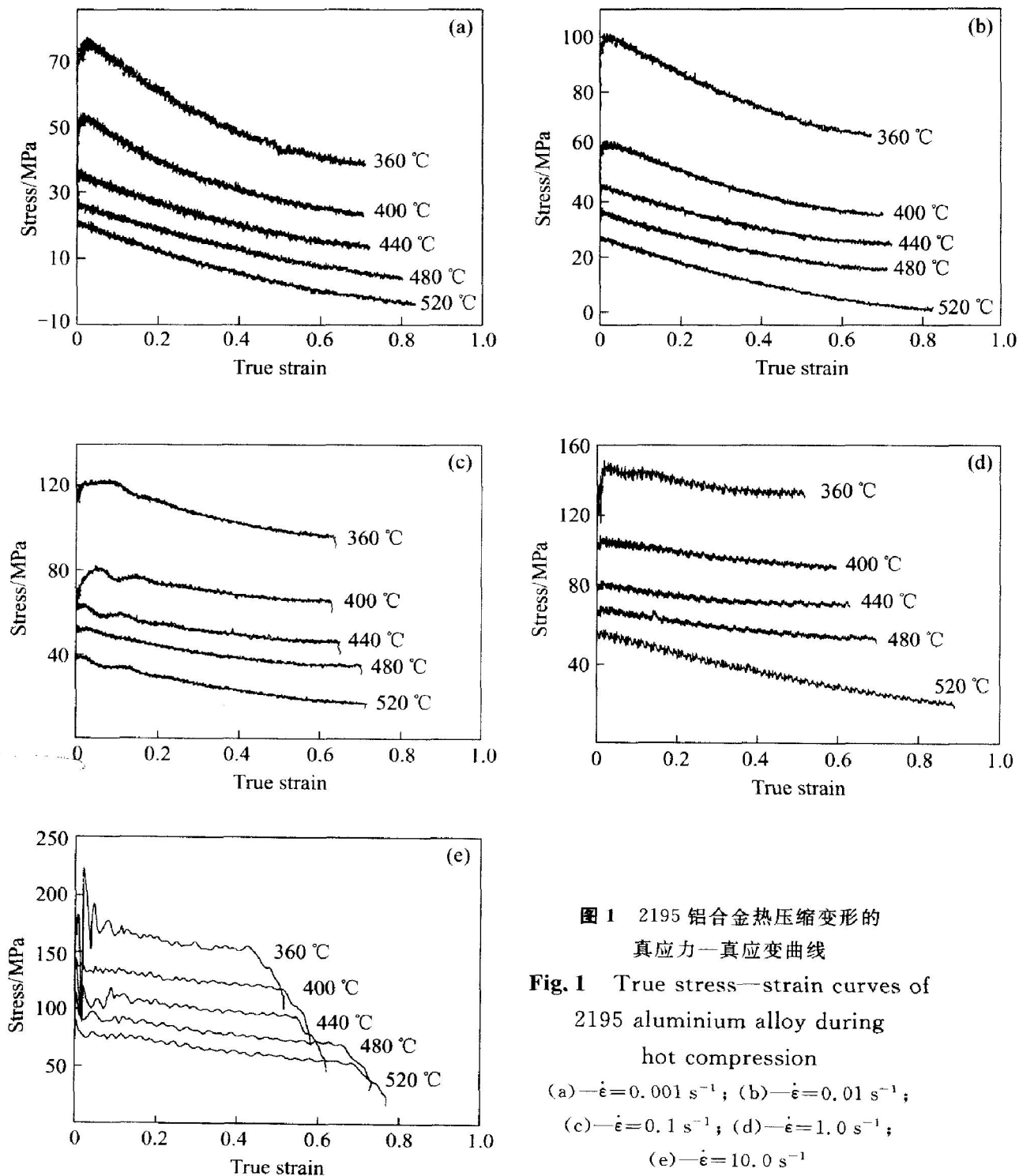


图 1 2195 铝合金热压缩变形的
真应力—真应变曲线

Fig. 1 True stress—strain curves of
2195 aluminium alloy during
hot compression

(a)— $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$; (b)— $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$;
(c)— $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$; (d)— $\dot{\epsilon}=1.0 \text{ s}^{-1}$;
(e)— $\dot{\epsilon}=10.0 \text{ s}^{-1}$

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

根据双曲正弦函数的定义, 有:

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

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

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

实际应用上, 只要已知 A 、 Q 、 n 和 α 等材料常数, 即可求出材料在任意变形条件下的流变应力大小。该方程已被广泛地应用于挤压、轧制、压缩和扭转等常规的热加工变形的研究之中。下面先计算 A 、 Q 、 n 和 α 等材料常数值。

对式(1)和式(2)两边分别求对数得:

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

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

根据式(9)、(10), 取流变应力为峰值应力, 分别以 $\ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 、 σ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 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 条直线斜率的平均值, 得 $n_1 = 7.8341$ 。图 2(b) 中, 取 360~440 °C 3 条直线斜率的平均值, 得 $\beta = 0.09779$, 则 α 值为:

$$\alpha = \beta/n_1 = 0.01248$$

对式(3)两边取对数, 并假定变形激活能与温度

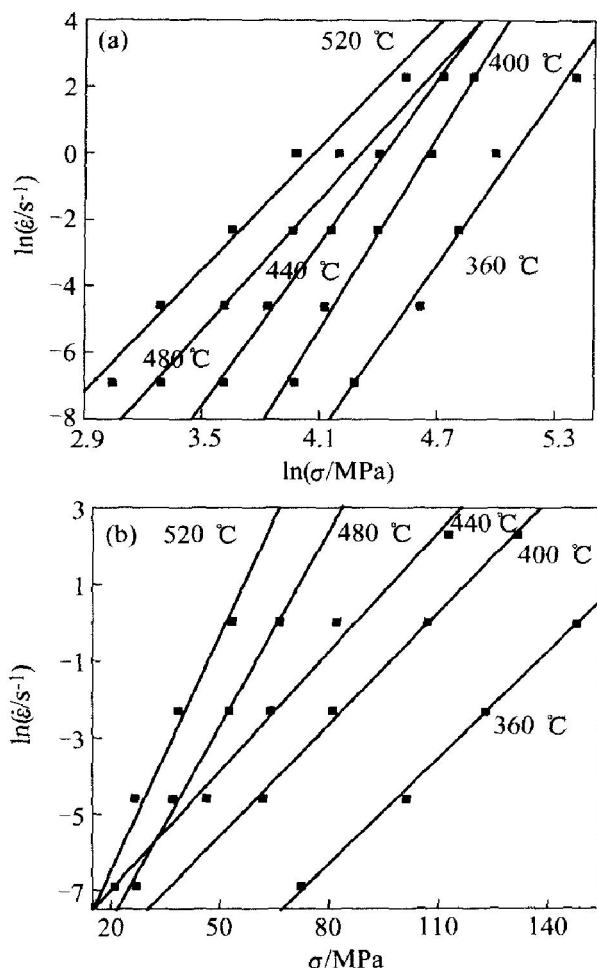


图 2 峰值应力与应变速率之间的关系

Fig. 2 Relationship between peak stress and strain rate

无关, 可以得到:

$$\begin{aligned} \ln \dot{\epsilon} &= \ln A - Q/RT + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] \\ &= A' + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] \end{aligned} \quad (11)$$

将不同变形温度下 2195 合金变形时峰值流变应力和应变速率值代入式(11), 以 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 为坐标作图, 用 Origin 作线性回归, 如图 3 所示。由图可知, 2195 合金高温变形流变应力和应变速率的双对数较好地满足线性关系。由此可以认为, 2195 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。

把式(4)代入式(5), 再对其两边取自然对数可以得到:

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

将不同变形条件下的峰值应力值代入上式, 以 $1000/T$ 和 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 为坐标作图, 进行线性回归, 如图 4 所示。由图可知, σ 与 T 较好地符

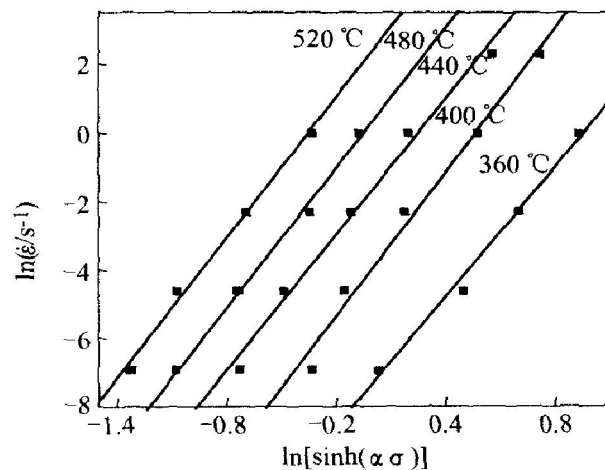


图 3 峰值应力与应变速率的关系

Fig. 3 Relationship between peak stress and strain rate

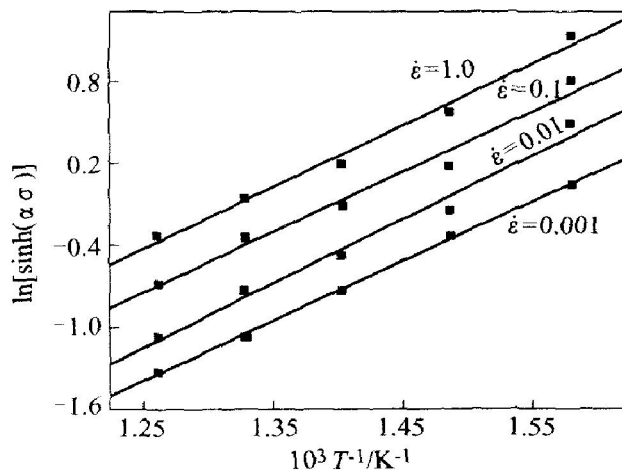


图 4 峰值应力与温度的关系

Fig. 4 Relationship between peak stress and temperature

合式(12)的线性关系, 从而证实 2195 合金高温变形时流变应力 σ 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 2195 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 2195 合金热压缩塑性变形是受热激活控制的。

根据式(3), 求偏导得:

$$\begin{aligned} Q &= R \{ \partial \ln \dot{\epsilon} / \partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)] \}_T \times \\ &\quad \{ \ln [\sinh(\alpha \sigma)] / \partial (1/T) \}_\dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (13)$$

上式右边大括号中的两项分别为一定温度下 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\epsilon}$ 关系的斜率和应变速率一定的条件下 $(1/T) - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 关系的斜率。取图 3 和 4 中 2 组直线斜率的平均值分别为 6.708 8 和 4.490 4, 代入式(13)中可以求出变形激活能 Q 值为 250.45 kJ/mol。

对式(5)两边求对数得:

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

将 Q 值和变形条件代入式(5)后求出 Z 值, 以 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 和 $\ln Z$ 为坐标作图, 并进行线性回归, 如图 5 所示。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 $\ln A$ 。从图中可得到 $n = 5.94$, $A = 2.569 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$ 。

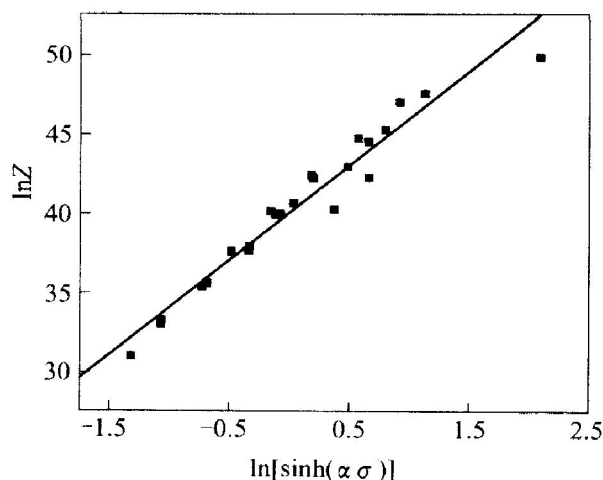


图 5 流变应力与 Z 参数的关系曲线

Fig. 5 Relationship between flow stress and Zener-Hollomon parameter

将求得的各材料参数值代入式(3), 得到 2195 铝合金热压缩时的流变应力方程为:

$$\dot{\epsilon} = 2.569 \times 10^{17} \ln [\sinh(0.01248 \sigma)]^{5.94} \exp(250.45/RT)$$

其 Z 参数可表示为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(250.45/RT)$$

流变应力方程也可用 Z 参数表述为:

$$\sigma = 80.128 \ln \left\{ \left[Z / (2.569 \times 10^{17}) \right]^{1/5.94} + \left\{ \left[Z / (2.569 \times 10^{17}) \right]^{2/5.94} + 1 \right\}^{1/2} \right\}$$

2.3 合金高温变形的物理本质

上述分析表明, 2195 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, 可采用 Zener-Hollomon 参数的双曲正弦形式来描述其流变应力行为。

稳态变形过程中, 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^[12, 13]。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 2195 铝合金中 Ag、Mg 等微量合金元素的添加, 使层错能大大降低, 热变形时较易发生动态再结晶, 而且 2195 铝合金经均匀化退火后, 由于 T_1 相及 Al_3Zr 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^[7]。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^[15]。

此外, 2195 铝-锂合金高温塑性变形激活能($Q = 250.45 \text{ kJ/mol}$)明显比其它大多数铝合金的变形激活能要大一些。这是由于 2195 合金中的 Li、Mg、Ag 等溶质元素都是降低铝基体层错能的合金化元素。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, 2195 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^[16]。因此, 激活能的升高归因于合金元素的加入。

3 结论

1) 在应变速率为 1 s^{-1} , 变形温度为 $520 \text{ }^\circ\text{C}$ 以及应变速率为 0.1 、 0.01 、 0.001 s^{-1} , 温度为 $360 \sim 520 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 2195 铝-锂合金热压缩变形流变应力出现了明显的峰值应力, 表现为连续动态再结晶特征, 而在其它变形条件下存在较为明显的稳态流变特征。

2) 可采用 Zener-Hollomon 参数的双曲正弦函数 $\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp(-Q/RT)$ 来描述 2195 铝-锂合金高温变形时的流变应力行为, 获得的流变应力 σ 解析表达式中 A 、 α 和 n 值分别为 $2.569 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$ 、 0.01248 MPa^{-1} 和 5.94 , 其热变形激活能 Q 为 250.45 kJ/mol 。

3) 合金元素的添加降低了层错能, 提高了变形激活能, 使 2195 铝合金容易发生动态再结晶行为。

REFERENCES

- [1] 向曙光, 蒋 呐, 王 彬, 等. 2195 铝-锂合金热处理工艺与性能[J]. 铝加工, 2002, 25(2): 51-53.
XIANG Shu-guang, JIANG Na, WANG Bin, et al. The heat-treatment and properties for 2195 Al-Li alloy[J]. Aluminium Processing, 2002, 25(2): 51-53.
- [2] 熊 焕. 低温贮箱及铝-锂合金的应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2001(6): 33-41.
XIONG Huan. Cryogenic tank and application of Al-Li alloy[J]. Missiles and Space Vehicles, 2001(6): 33-41.
- [3] 刘雪峰, 汪凌云. 铝-锂合金高温变形流变应力的人工神经网络模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2001, 24(2): 68-71.
LIU Xue-feng, WANG Ling-yun. Artificial neural networks models for flow stress during high temperature plastic deformation of Al-Li alloy[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2001, 24(2): 68-71.
- [4] Sheppard T, Jackson A. Constitutive equations for use in prediction of flow stress during extrusion of aluminium alloys[J]. Mater Sci Technol, 1997, 13: 203-206.
- [5] Shen G, Semiatin S L, Altan T. Investigation of flow stress and microstructure development in non-isothermal forging of Ti-6242[J]. J Mater Process Technol, 1993, 36: 303-307.
- [6] 沈 健, 李德峰. 铝-锂合金高温塑性变形流变应力研究[J]. 稀有金属材料与工程, 1997, 26(5): 26-29.
SHEN Jian, LI De-feng. The flow stress of an Al-Li alloy during plastic deformation at elevated temperatures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1997, 26(5): 26-29.
- [7] 沈 健. 2091 铝合金高温塑性变形的研究[D]. 长沙: 中南工业大学, 1996.
SHEN Jian. Study of 2091 Al-Li Alloy during High Temperature Plastic Deformation[D]. Changsha: Central South University of Technology, 1996.
- [8] Poirier J P. 晶体的高温塑性变形[M]. 关德林, 译. 大连: 大连理工大学出版社, 1989.
Poirier J P. High Temperature Plastic Deformation of Crystals[M]. GUAN De-lin, tran. Dalian: Dalian University of Science and Technology Press, 1989.
- [9] 沈 健. 热压缩 2091 Al-Li 合金的流变应力行为[J]. 稀有金属, 1998, 22(1): 47-50.
SHEN Jian. Behavior of flow stress of 2091 Al-Li alloy during hot compression[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 1998, 22(1): 47-50.
- [10] Sheppard T, Parson N C, Zaidi M A. Dynamic recrystallization in Al-Mg[J]. Met Sci, 1983, 17(10): 481-487.
- [11] 林启权, 张 辉, 彭大暑, 等. 5182 铝合金热压缩变形流变应力[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2002, 24(3): 84-88.
LIN Qi-quan, ZHANG Hui, PENG Da-shu, et al. Flow stress behavior of 5182 aluminium alloy under hot compression deformation[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2002, 24(3): 84-88.
- [12] 林高用, 张 辉, 郭武超, 等. 7075 铝合金热压缩变形流变应力[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(3): 412-415.
LIN Gao-yong, ZHANG Hui, GUO Wu-chao, et al. Flow stress of 7075 aluminium alloy during hot compression deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(3): 412-415.
- [13] 张愈祖, 张 辉, 彭大暑, 等. 6201 铝合金热连轧的实验模拟[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(4): 525-528.
ZHANG Yu-zu, ZHANG Hui, PENG Da-shu, et al. Experimental simulation on continuous hot rolling of 6201 aluminium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(4): 525-528.
- [14] Vernon-Parry K D, Furu T, Jensen D J, et al. Deformation microstructure and texture in hot worked aluminium alloy[J]. Mater Sci Technol, 1996, 12: 889-895.
- [15] 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[J]. Inst Metals, 1973, 101: 65-72.

(编辑 李向群)