

文章编号:1673-9981(2010)04-0577-05

5A30 铝合金热变形的流变应力及材料常数*

朱振华¹, 袁鸽成¹, 李仲华¹, 吴其光¹, 吴锡坤²

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 广东兴发铝业有限公司, 广东 佛山 528061)

摘 要:在 Gleeble-1500 热模拟试验机上,采用高温等温压缩试验,研究了 5A30 铝合金在 300~500℃ 温度范围及应变速率在 0.001~1 s⁻¹ 内压缩变形的流变应力变化规律,采用数学回归及最小偏差法求出了该合金的材料常数,建立了该合金流变应力与 Zener-Hollomon 参数的线性关系式.结果表明,该合金为正应变速率敏感材料,流变应力随变形温度升高而降低,随应变速率升高而增大;该合金的材料常数包括变形激活能 Q 为 160.94 kJ/mol,应力水平参数 α 为 0.0184 mm²/N,应力指数 n 为 3.314,结构因子 A 为 3.058×10^9 s⁻¹;合金流变应力模型可表达为 $\sigma = 54.311 \ln \{ (Z/3.058 \times 10^9)^{1/3.314} + [(Z/3.058 \times 10^9)^{2/3.314} + 1]^{1/2} \}$.

关键词:5A30 铝合金; 等温压缩; 应变速率; 流变应力

中图分类号: TG111.7; TG301

文献标识码: A

5A30 铝合金属于 Al-Mg 系铝合金,是 5xxx 系铝合金中镁含量(4.7%~5.5%)较高的热处理不可强化铝合金,主要用于装甲板、高强度焊接结构、储槽、压力容器以及船舶用材.作为一种很重要的结构材料,其室温的力学性能数据可以从相关资料和手册中查到,但其高温塑性变形时的流变应力、变形特征和成形性指标等至今还未见有人报道^[1].金属的热变形流变应力是材料在高温下的重要的基本性能之一,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,也是变形体内部显微组织演变的综合反映.所以,本文通过研究 5A30 铝合金高温塑性变形时的流变应力行为,建立流变应力本构方程,从而为 5A30 铝合金的挤压、轧制等热加工组织与性能控制、工艺制定、模具设计、设备选型及加工过程仿真等提供理论依据和实验基础.

1 热变形流变应力描述

金属的热加工变形和高温蠕变一样存在热激活过程,其热变形行为可用稳态变形阶段的应变速率

$\dot{\epsilon}$ 、温度 T 和流变应力 σ 之间的关系来进行描述^[2].金属材料大量的热变形行为研究表明,低应力水平及高应力水平下稳态流变应力 σ 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 之间的关系可以分别用以下函数描述^[3-5]:

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

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

式(1)和(2)中 A_1, n_1, A_2, β 均为与变形温度无关的常数. Zener 和 Hollomon 提出了温度补偿应变速率 Zener-Hollomon 参数 Z ,通过参数 Z 可更为准确地描述变形温度、变形速率及流变应力的关系:

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

式(3)中, A 为结构因子, α 为应力水平参数, n 为应力指数,均是与温度无关的材料常数; Q 为平均变形激活能, R 为气体常数, T 为绝对温度.从式(1)、(2)、(3)可看出,在低应力水平下 ($\alpha \sigma < 0.8$), (3)式接近(1)式的指数关系,高应力水平下 ($\alpha \sigma > 1.2$) 时则接近(2)式的幂指数关系,常数 α, β 和 n 满足 $\alpha = \beta/n$.

收稿日期:2010-10-27

* 基金项目:广东省重大科技专项(2008A090300004)

作者简介:朱振华(1985—),男,硕士研究生

2 材料常数求解原理

求解材料高温塑性变形激活能的方法很多,如等温法、补偿时间法、变温法和 Zener-Hollomon 参数法等^[6].前三种适用于蠕变变形,而 Zener-Hollomon 参数法则主要用于控制速率的变形.

对式(1)和(2)两边分别取自然对数,得到:

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

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

将不同变形温度条件下 5A30 铝合金的随不同应变速率的变化的稳态流变应力值分别代入式(4)和(5),得出 n_1 和 β ,常数 n 满足 $\alpha = \beta/n_1$,把所得 α 代入式(3),采用最小偏差法可以得到更为精确的材料常数.

对于铝合金来说,由于热压缩变形时流变应力-应变速率-温度相关性更接近于双曲正弦关系,所以将式(3)经过变换可得到计算 5A30 铝合金变形激活能 Q 的修正关系式:

$$Q = R \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]} \right]_T \left[\frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1/T)} \right]; \quad (6)$$

式(6)右边括号中的两项分别为一定温度下,应变速率 $\dot{\epsilon}$ 与流变应力 σ 的线性关系以及一定应变速率条件下流变应力 σ 与温度倒数之间的线性关系.根据以上求出的材料常数仍然只是一组近似值,需要通过最小偏差法,求出他们的精确值.

一般说来,材料的流变应力与主要与变形温度、变形程度和应变速率有关,在本论文中可以用材料常数较为方便的求出热变形时的流变应力.从(3)式可知流变应力 σ 可表达成 Zener-Hollomon 参数 Z 的函数:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (7)$$

可见,只要已知 A, α, n 和 Q 等材料常数,便可由式(7)求得材料在不同变形温度-速率条件下的流变应力值.

3 实验方法

实验原材料为 $\Phi 120$ mm 的 5A30 铝合金铝锭,沿铸锭的轴向加工成 $\Phi 10$ mm \times 15 mm 圆柱,两端带有深 0.2 mm 凹槽的压缩样品,压缩实验在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行.压缩过程中,在圆柱试

样两端的凹槽内填充润滑剂(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.实验变形温度分别为 300,350,400,450,500 $^{\circ}\text{C}$,应变速率为 0.001,0.01,0.1,1 s^{-1} .利用电阻加热至变形温度然后保温.由 Gleeble-1500 热模拟试验机的计算机系统自动采集真应力、真应变等数据,利用这些绘制流变应力曲线.

4 实验结果及分析

4.1 流变应力曲线

图 1 为 5A30 铝合金在不同温度及不同应变速率的流变应力曲线(即真应力-真应力曲线).由图可见,高温压缩变形时,流变应力的变化规律为:在过渡变形阶段,流变应力随应变的增加迅速升高后趋于稳态流变应力值,出现近稳态流变特征.随着温度的升高,流变应力显著下降;随着应变速率的增加,流变应力水平升高,表明 5A30 铝合金在试验过程中表现出正应变速率敏感性.在过渡变形阶段,材料内部组织变化为位错增殖,位错密度增加.变形量增大时位错发生交滑移,但由于交滑移引起的软化不足以补偿位错密度增加带来的硬化,因此,流变应力值逐渐增大.随着变形量的继续增大,流变应力曲线趋近于水平,进入稳态变形阶段.在稳态变形阶段,位错增殖引起的应变硬化与位错交滑移、攀移以及位错的脱钉等引起的软化达到动态平衡.

4.2 材料常数

根据实验结果以线性回归分析得出的流变应力与变形速率、变形温度之间的关系曲线如图 2 所示.从图 2 可看出,稳态流变应力和应变速率的双对数关系、流变应力的双曲线正弦对数项和温度的倒数之间皆较好地满足线性关系.由此可认为,5A30 铝合金高温塑性变形时流变应力 σ 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 以及温度 T 之间满足双曲线正弦形式 Arrhenius 关系,说明其高温塑性变形过程是一种类似高温蠕变的热激活过程.

n 值和 β 值可以通过式(4)和式(5)分别利用图 2(a)和(b)求 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 的斜率,常数 n, β 和 α 满足 $\alpha = \beta/n$,再代入式(6)求出应变激活能 Q 值.计算过程中采用最小标准偏差法,由此求得的材料常数 A, n, α 和 Q 更为真实可靠.材料常数结构因子 A 、应力水平参数 α 、应力指数 n 值及变形激活能

Q 分别为 $3.058 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, $0.0184 \text{ mm}^2/\text{N}$, 3.314 , 160.94 kJ/mol , 5A30 铝合金高温变形时的流变应力、应变速率与温度的关系可采用 Z 参数描述为 $\sigma = 54.31 \ln \{ (Z/3.058 \times 10^9)^{1/3.314} + [(Z/3.058 \times 10^9)^{2/3.314} + 1]^{1/2} \}$, 其中 $Z = \dot{\epsilon} \exp(160.94/RT)$.

图 3 绘出了由最小偏差法求得的 5A30 铝合金

材料常数计算的 $\ln Z$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 值的关系. 从图中可知, 两者在实验应变速率和温度条件内的线性关系吻合的相当好, 表明 5A30 铝合金在压缩时是有热激活速率机制控制, 由此可以通过控制包含 Z 参数 Arrhenius 方程中的参数从而有效预测、控制以及优化合金的压缩组织及性能.

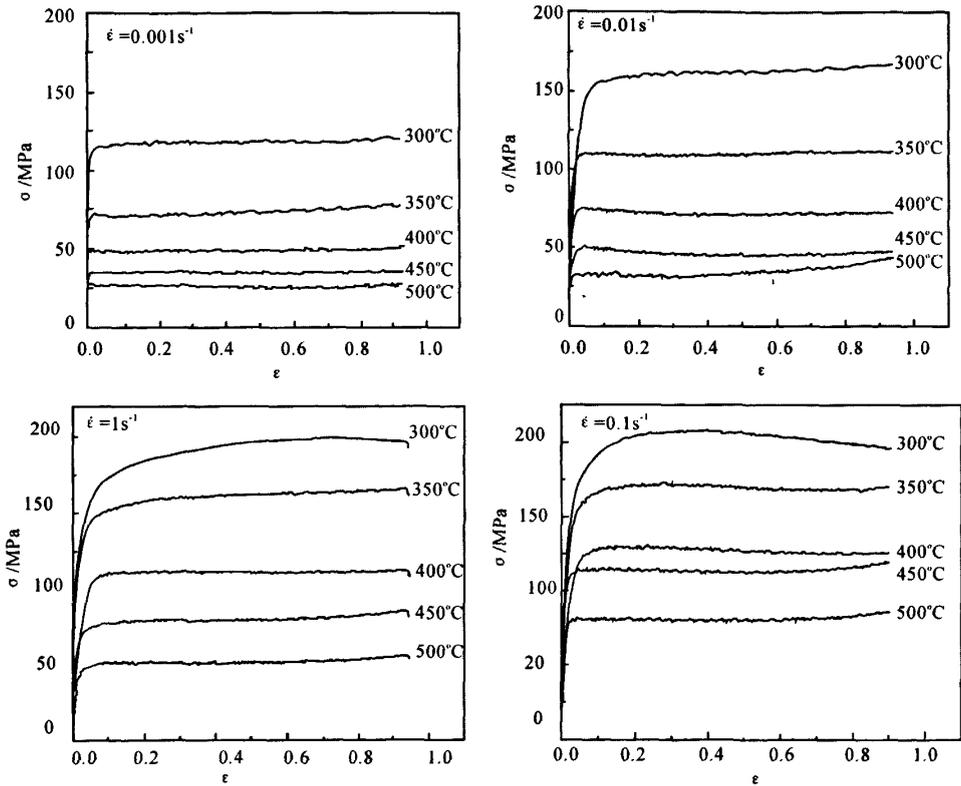
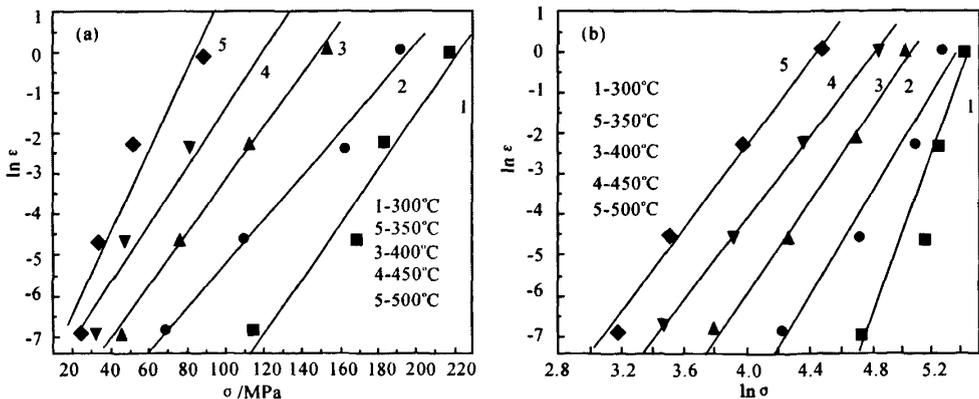


图 1 5A30 铝合金压缩变形时的流变应力曲线



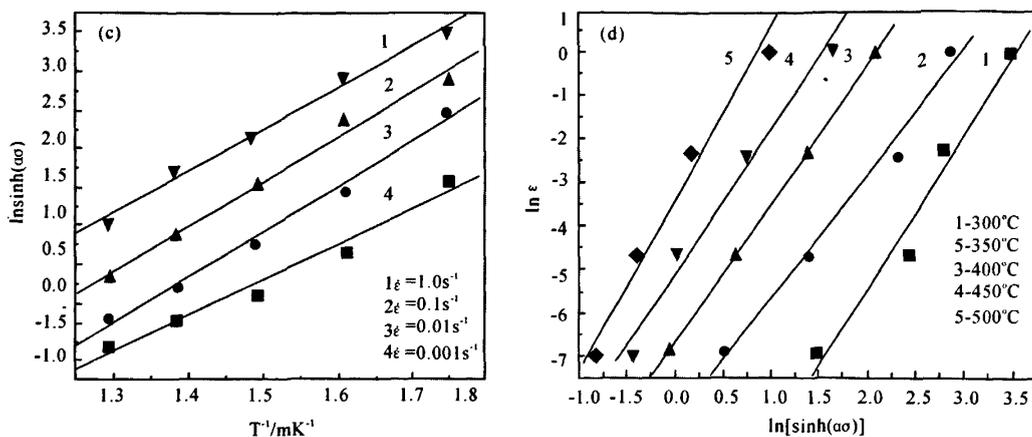


图2 5A30 铝合金流变应力与温度和应变速率关系

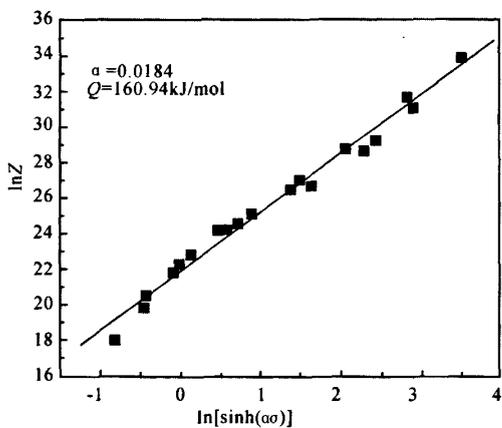


图3 $\ln Z$ 和 $\ln[\sinh(\dot{\epsilon})]$ 的线性关系

从 $Q=160.94 \text{ kJ/mol}$ 的数值来看,5A30 铝合

金高温塑性变形激活能不仅比多晶纯铝的自扩散能 142 kJ/mol ^[7] 要大,而且比其他大多数铝合金的变形激活能都要稍大一些. 主要是因为 5A30 铝合金中, Mg 为主要的合金化元素, 它的加入除产生固溶作用外, 还可与基体金属形成各种弥散第二相, 如 $\beta(\text{Mg}_2\text{Al}_3)$ ^[8], 如图 4 所示. 图 4(a) 为 5A30 铝合金在 350°C , 0.1 s^{-1} 的热变形 TEM 形貌, 在第二相粒子 β 相处, 由于位错相互销毁而使位错密度大大减小, 导致铝合金的变形激活能减少, 但在图 4(b) 所示 5A30 铝合金在 450°C , 0.01 s^{-1} 变形时, 显示了位错缠结, 说明第二相会对位错运动产生阻碍作用, 使位错发生交滑移和攀移所需的能量提高, 使平均激活能有所增加, 由此提高激活动态回复及再结晶所需的能量^[9].

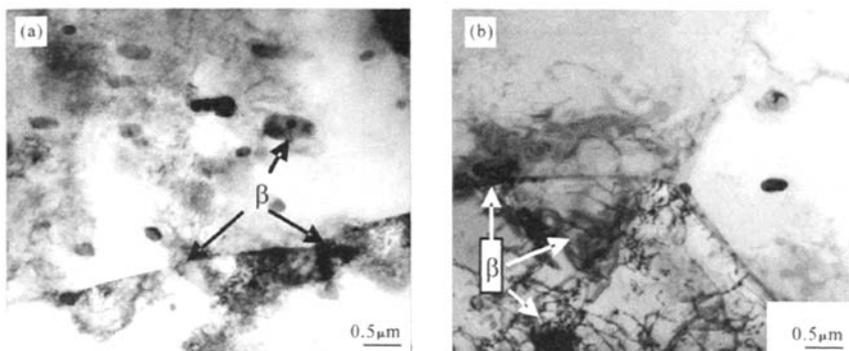


图4 5A30 铝合金 TEM 形貌
(a) 350°C , 0.1 s^{-1} ; (b) 450°C , 0.01 s^{-1}

5 结 论

(1) 变形温度和应变速率是影响 5A30 铝合金的流变应力的重要影响因素,同一应变速率下变形温度越高流变应力越低,同一变形温度下应变速率越高,流变应力越高。5A30 铝合金表现出正应变速率敏感性。

(2) 5A30 铝合金材料常数结构因子 A 、应力水平参数 α 、应力指数 n 值及变形激活能 Q 分别为 $3.058 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, $0.0184 \text{ mm}^2/\text{N}$, 3.314 , 160.94 kJ/mol , 流变应力、应变速率与温度的关系可采用 Z 参数描述为 $\sigma = 54.31 \ln\{(Z/3.058 \times 10^9)^{1/3.314} + [(Z/3.058 \times 10^9)^{2/3.314} + 1]^{1/2}\}$, 其中 $Z = \dot{\epsilon} \exp(160.94/RT)$ 。

(3) 5A30 铝合金高温塑性变形激活能比多晶纯铝的自扩散能以及其他大多数铝合金的变形激活能都要大一些,主要是因为合金元素 Mg 除产生固溶作用外,还可与基体金属形成各种弥散第二相,从而提高激活动态回复及再结晶所需的能量。

参考文献:

[1] 王祝堂,田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 湖南:中南工业大学出版社,2006.

- [2] ZHANG H, ZHANG H G, LI L X. Hot deformation behavior of Cu-Fe-P alloys during compression at elevated temperature[J]. *Materials Processing Technology*, 2009, 209: 2892-2896.
- [3] 单毅敏, 罗兵辉, 柏振海. 5083 铝合金高温变形的流变应力[J]. *铝加工*, 2006, 172(6): 1-6.
- [4] MCQUEEN H J. Constitutive analysis in hot working [J]. *Materials Science and Engineering*, 2002, A322: 43-63.
- [5] LIU X Y, HE Y B, YUN B H, et al. Flow behavior and microstructural evolution of Al-Cu-Mg alloy during hot compression deformation[J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, 500: 150-154.
- [6] SHEN Jian. Material constants of an Al-Li-Cu-Mg-Zr alloy during deformation at elevated temperatures[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1998, 8(1): 78-82.
- [7] 李慧中, 梁霄鹏, 张新明. 2519 铝合金热变形组织演化[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 118(2): 226-230.
- [8] SELLARS C M. Modelling micro-structural development during hot rolling [J]. *Material Science and Technology*, 1990, 16(11): 1072-1078.
- [9] MCQUEEN H J, POSCHMANN I. Subgrain development in hot working of Al and Al-5Mg[J]. *Materials Science and Engineering*, 1997, 234(236): 830-833.

The flow stress and material constants of thermal deformation for 5A30 aluminum alloy

ZHU Zhen-hua¹, YUAN Ge-cheng¹, LI Zhong-hua¹, WU Qi-guang¹, WU Xi-kun²

(1. Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Xingfa Corporation Limited, Foshan 528061, China)

Abstract: The flow stress characteristics of 5A30 aluminum alloy were investigated by isothermal compression testing method with Gleeble-1500 thermal simulator under the temperature and strain rate range from 300 to 500 °C and 0.001 to 1 s⁻¹ respectively. The material constants of alloy were derived by regression method and minimized deviation criterion, the linear relationship of the flow stress to Zener-Hollomon parameter was established. The results show that the alloy is sensitive material to strain rate positively, and the flow stress increases with decreasing deformation temperature and increasing of strain rate. The material constants of the alloy, including deformation activation energy Q as 160.94 kJ/mol, stress-level coefficient α as 0.0184 mm²/N, stress exponential n as 3.314 and structural factor A as $3.058 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$. The model of flow stress can be described as $\sigma = 54.31 \ln\{(Z/3.058 \times 10^9)^{1/3.314} + [(Z/3.058 \times 10^9)^{2/3.314} + 1]^{1/2}\}$.

Key words: 5A30 aluminum alloy; isothermal compression; strain rate; flow stress