

7050 铝合金热压缩变形的流变应力本构方程

Flow Stress Constitutive Equation of 7050 Aluminum Alloy During Hot Compression

易幼平, 杨积慧, 蔺永诚(中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

YI You-ping, YANG Ji-hui, LIN Yong-cheng(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

摘要: 对 7050 铝合金在应变速率为 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为 $250 \sim 450^\circ\text{C}$ 条件下的流变应力行为进行了实验研究。结果表明: 7050 铝合金热压缩变形中发生了明显的动态回复与动态再结晶, 流变应力随应变速率的增加而增加, 随温度的增加而降低; 通过线性回归分析计算出 7050 材料的应变硬化指数 n 以及变形激活能 Q , 获得了 7050 铝合金高温条件下的流变应力本构方程。

关键词: 7050 铝合金; 热压缩变形; 本构方程; 流变应力

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2007)04-0020-03

Abstract: The flow stress behavior of 7050 aluminum alloy was investigated in the temperature range of $250 \sim 450^\circ\text{C}$ and strain rate of $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$. The results showed that dynamic recovery, and dynamic recrystallization occurred obviously during hot compression of 7050 aluminum alloy. The flow stress increased with increasing strain rates and decreased with increasing temperature. The strain hardening coefficient n and deformation activation energy Q were evaluated by linear regression analysis. And the flow stress constitutive equation of 7050 aluminum alloy during hot compression was obtained.

Key words: 7050 aluminum alloy; hot compression; constitutive equation; flow stress

7050 铝合金属于 Al-Zr-Mg-Cu 系超高强铝合金, 是一种具有高的室温强度和良好的综合力学性能的航空结构材料, 广泛应用于飞机重要部件的制造, 如飞机起落架的隔框、翼梁、托架等承载构件^[1]。由于超高强铝合金在常温条件下的塑性较低, 一般需经高温塑性加工成形, 目前飞机上使用的超高强铝合金结构件主要采用模锻工艺成形。因此, 超高强铝合金的高温变形特性对制订该类合金的成形工艺具有重要的工程意义。国内外学者在超高强铝合金如 7075, 7475 热变形特性方面已有研究^[2-8], 然而, 对 7050 铝合金的热变形特性的研究很少。在实际模锻生产中迫切需要 7050 铝合金的高温力学性能参数, 本工作针对这一问题, 对 7050 铝合金进行了高温压缩变形实验, 研究 7050 铝合金的高温流变应力行为, 建立能准确描述材料流动特性的本构模型, 为制订 7050 铝合金塑性成形工艺提供理论依据。

1 实验

实验所用材料为西南铝业(集团)公司提供的 7050 铝合金铸锭, 其化学成分(质量分数, %)为: Al-

0.12 Si-0.15 Fe-2.60 Cu-2.60 Mg-6.70 Zn-0.06 Ti-0.13 Zr。将材料加工成 $\phi 10 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱体试样, 然后加热到 470°C , 均匀化 48h 后水淬处理。为了减小试样与实验机压头的摩擦, 热压缩变形过程使试样变形均匀, 圆柱体两端车有 0.1mm 深的凹槽, 压缩过程中圆柱体两端的凹槽内填充润滑剂, 化学成分(体积分)为 75% 石墨+ 20% 机油+ 5% 硝酸三甲苯酯。将试样放到 Gleeble 1500 热模拟机上进行恒应变速率等温热压缩实验, 变形温度为 $250 \sim 450^\circ\text{C}$, 应变速率为 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$, 试样加热速度为 $1^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$, 加热至预定温度后保温 5min, 然后进行压缩实验, 变形量为 50%。压缩后的试样立即进行水淬处理, 以保留变形后的组织; 温度、位移、速度等变形条件由计算机系统自动控制, 并采集载荷、位移等数据, 然后通过计算得到真应力及真应变。

2 结果与讨论

2.1 真应力-真应变曲线

图 1 为 7050 铝合金热压缩变形时在不同应变速率和不同温度条件下的真应力-真应变曲线。可以看

出:流变应力主要与变形温度、应变速率及应变有关。7050 铝合金在热压缩变形中出现了明显的动态回复与动态再结晶现象(见图 1c),流变应力曲线经历了过渡变形阶段与稳态变形阶段。在过渡变形阶段,变形初期的软化机制主要为交滑移,流变应力随形变量的增加迅速上升,位错不断增殖,位错间的交互作用又增大了位错运动的阻力,交滑移引起的软化不足以克服位错密度增加带来的硬化,因此,在峰值应力之前加工硬化占主导地位。随着形变量的进一步增加,位错密

度不断提高,超过一定的形变量后变形储存能成为再结晶的驱动力,再结晶可以消除或改变原来的形变结构,发生动态再结晶软化;同时,位错的攀移在达到峰值应力前也参与软化过程,当软化速率与硬化速率平衡时流变应力达到最大值。随着动态再结晶的进行,软化速率大于硬化速率,应力逐渐下降;当发生完全动态再结晶后,其晶粒组织和流变应力不随形变量变化,变形进入稳态变形阶段。

图2为变形温度、应变速率对流变应力的影响。

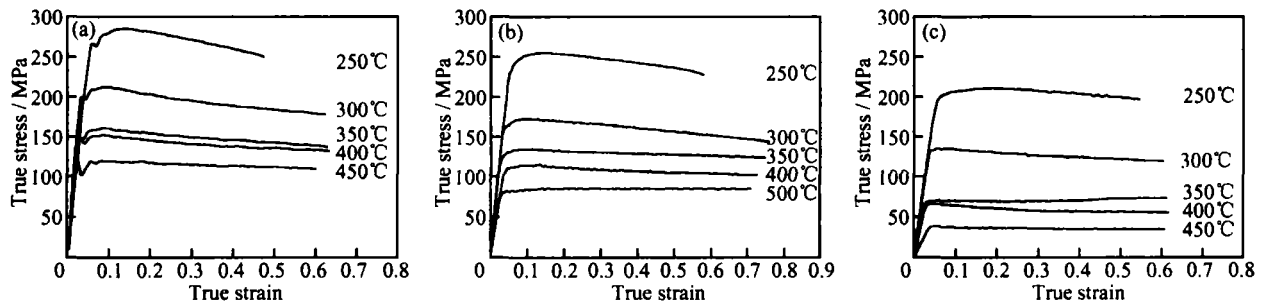


图1 7050 铝合金热压缩变形下真应力-应变曲线 (a) $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$

Fig. 1 True stress-strain curves of 7050 aluminum alloy during hot compression (a) $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$

在同一应变速率条件下,7050 铝合金的流变应力随变形温度的增加而降低,产生这一现象的物理本质是:随着温度的增加,材料热激活作用增强,金属原子平均动能增加,原子振动的振幅增大,导致位错与空位的活动性提高、滑移系增多,从而增强了金属塑性,降低了金属强度;同时,高温条件下发生的动态回复与动态再结晶对金属产生了一定的软化作用。这些因素的综合作用使金属的临界切应力下降,导致合金的流变应力减小。在同一变形温度条件下,7050 铝合金的流变应力随应变速率的增加而增加,其主要原因是由于应变速率提高了金属的形变储能,塑性变形不能在变形体内充分完成,变形更多表现为弹性变形,这样将使材料的加工硬化效果更明显,因而使材料的流变应力增大。

2.2 热变形流变应力本构方程

在高温塑性变形条件下,流变应力、应变速率和温度之间的关系可用 Sellars 和 Tegart 提出的包含变形激活能 Q 和温度 T 的双曲正弦形式表示^[9,10]:

$$\dot{\epsilon} = A F(\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中: $F(\sigma)$ 是应力的函数,有以下三种表达形式:

$$F(\sigma) = \sigma^n \quad \text{低应力水平} (\alpha\sigma < 0.8) \quad (2)$$

$$F(\sigma) = \exp(\beta\sigma) \quad \text{高应力水平} (\alpha\sigma > 1.2) \quad (3)$$

$$F(\sigma) = [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad \text{所有应力值} \quad (4)$$

式中: σ 为真应力; $\alpha = \beta/n$, n , β 和 A 为常数; R 为气体常数。根据 Zener 和 Hollomon 的研究,材料在高温塑性变形时应变速率受热激活过程控制,应变速率与温度之间的关系可用 Z 参数表示^[11]:

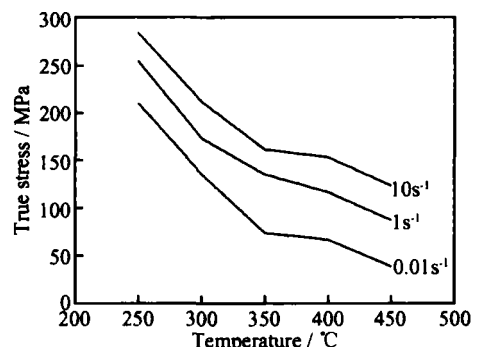


图2 变形温度、应变速率对流变应力的影响

Fig. 2 Effects of deformation temperature and strain rate on flow stress

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (5)$$

式中 Z 为温度补偿的应变速率因子。在高应力和低应力下,式(1)可分别表示为:

$$\dot{\epsilon} = B \sigma^n \quad (6)$$

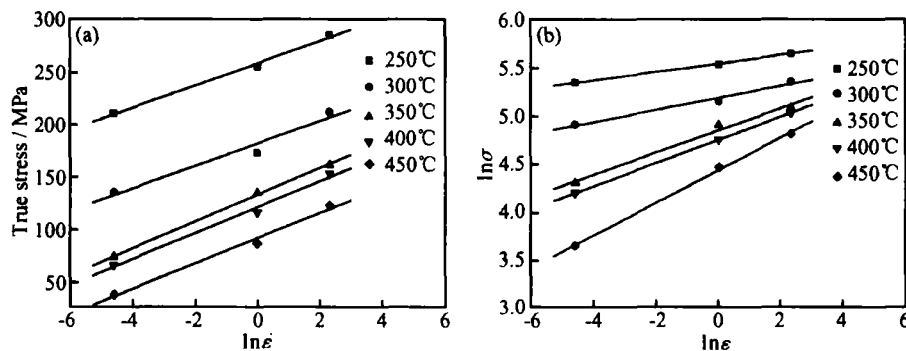
$$\dot{\epsilon} = B' \exp(\beta\sigma) \quad (7)$$

式中: B , B' 为与温度无关的常数,对式(6)和式(7)两边分别求对数得:

$$\ln(\dot{\epsilon}) = \ln(B) + n \ln(\sigma) \quad (8)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln(B') + \beta\sigma \quad (9)$$

依据式(8)和式(9),取 σ 为峰值应力,分别以 $\ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 为坐标作图,再用最小二乘法线性回归求出斜率(见图 3)。对其斜率倒数取平均值,得 $\beta = 0.09403 \text{ MPa}^{-1}$; 同样求得 $n = 7.589$, 对应的 $\alpha = 0.01239 \text{ MPa}^{-1}$ 。

图3 峰值应力 σ 与应变速率 ϵ 的关系 (a) σ - $\ln \epsilon$; (b) $\ln \sigma$ - $\ln \epsilon$ Fig. 3 Relationship between peak stress σ and strain rate ϵ (a) σ - $\ln \epsilon$; (b) $\ln \sigma$ - $\ln \epsilon$

对所有应力状态, 式(1)可表示为:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (10)$$

根据双曲正弦函数的定义以及式(5), 可将 σ 表达成 Zener-Hollomon 参数 Z 值的函数:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left[\frac{Z}{A} \right]^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (11)$$

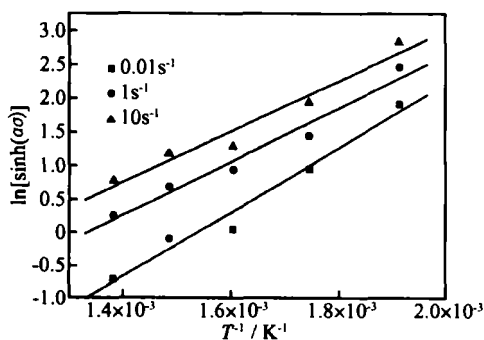
在一定应变和应变速率下, 对式(10)求导可得:

$$Q = R n d \{ \ln [\sinh(\alpha \sigma)] / d(1/T) \} \quad (12)$$

图4为 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 与温度的关系。式(12)中 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] / (1/T)$ 的斜率可通过图4求得, 斜率的平均值为 4187.14, 再将此值和前面得到的常数 n 以及气体常数 R 代入式(12)得: $Q = 264.06 \text{ kJ/mol}$, 然后将 Q 代入式(1)后对两边求对数得:

$$\ln [\sinh(\alpha \sigma)] = \ln \dot{\epsilon} / n + Q / (nRT) - \ln A / n \quad (13)$$

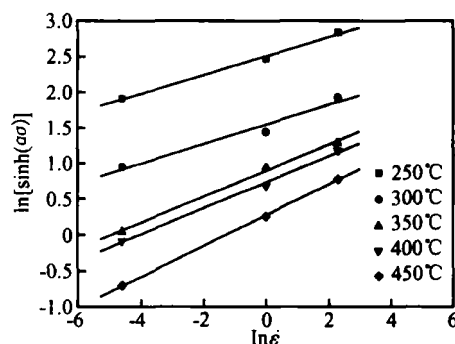
图5为 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ - $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系。式(13)中的截距 $Q / (nRT) - \ln A / n$ 可通过图5得到, 将 Q , R , T 的值代入即可得: $A = 5.83 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}$ 。

图4 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 与温度的关系Fig. 4 Relationship between $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ and temperature

将求得的系数代入式(10), 即可得到适用于所有应力状态的流变应力本构方程:

$$\dot{\epsilon} = 5.83 \times 10^{18} [\sinh(1.239 \times 10^{-2} \sigma)]^{7.589} \times \exp(-26406 \times 10^5 / RT) \quad (14)$$

亦可采用包含 Arrhenius 项的 Z 参数来描述:

图5 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ - $\ln \epsilon$ 关系Fig. 5 Relationship between $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ and ϵ

$$\sigma = 80.71 \ln \left\{ \frac{[Z/5.83 \times 10^{18}]^{1/7.589} + [Z/5.83 \times 10^{18}]^{2/7.589} + 1}{1} \right\}^{1/2} \quad (15)$$

利用式(15)可为 7050 铝合金变形组织的预测、控制以及热加工工艺的制订提供理论依据。

3 结论

(1) 7050 铝合金在高温压缩变形过程中有明显的动态回复与动态再结晶现象。流变应力经历了过渡变形与稳态变形两个阶段。在同一变形温度下流变应力随应变速率的提高而增加, 在同一应变速率下流变应力随温度的上升而减小。

(2) 7050 铝合金高温变形应变速率受热激活过程控制, 其变形激活能 Q 为 264.06 kJ/mol 。

(3) 所获得的 7050 铝合金流变应力本构方程可为 7050 铝合金变形组织的预测、控制以及热加工工艺的制订提供理论依据。

参考文献

- [1] 刘世兴, 田世兴, 陈昌麒. 7050 铝合金锻件的力学性能和断裂机制研究 [J]. 材料工程, 1996, (4): 34-37.

(下转第 26 页)

3 结论

(1) 凝固冷却速度对 AZ91 镁合金的二次枝晶间距有重要影响, 其定量数学关系式可写为: $D = 62.861V^{-0.3363}$, 该方程与理论推导的金属凝固冷却速度与枝晶间距的方程 $D = \beta V^{-1/3}$ 完全一致。

(2) 在较慢的凝固冷却速度下, 合金元素扩散较充分, 在枝晶臂间的最后凝固区由于合金元素富集较少而形成不连续的点状析出相; 反之, 在较快的冷却条件下, 在枝晶臂间最后凝固区的析出相呈连续分布。

参考文献

- [1] 张津, 章宗和, 向冬霞, 等. 镁合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 41– 42.
- [2] POLMEAR I J. Magnesium alloys and applications[J]. Materials Science and Technology, 1994, (4): 1– 16.
- [3] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium: properties applications potential[J]. Mater Sci Eng, 2001, A302: 37– 45.
- [4] 张丁非, 彭建, 丁培道, 等. 镁及镁合金的资源、应用及其发展现状[J]. 材料导报, 2004, 18(4): 72– 76.
- [5] 吕宜振, 翟春泉. 压铸镁合金的应用现状与发展趋势[J]. 铸造, 1998, (12): 50– 52.
- [6] 郝远, 阎峰云, 陈体军. 铸造镁合金及其研究进展[J]. 材料导报, 2002, 16(6): 24– 27.
- [7] YANG Z, LI J, LI G, et al. Effect of antimony and Ce rich mischmetal additions on as cast microstructure and mechanical properties of AZ91 alloys [J]. Materials Science Forum, 2005, 488–

489: 219– 222.

- [8] 刘文辉, 张新平, 熊守美, 等. 孔洞对 AZ91D 镁合金压铸件性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 36(6): 872– 875.
- [9] WANG Wuxiao, YUAN Sen, JIANG Bailong, et al. Solidification pattern and microstructures of AZ91D magnesium alloy through rheoforming[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(16): 1799– 1804.
- [10] YAN H, XIE J. Numerical study on the low pressure die casting of AZ91D wheel hub[J]. Materials Science Forum, 2005, 488– 489: 393– 396.
- [11] 龚丽勤, 李建国, 周鹏, 等. Al₃Ti₃B 中间合金对 AZ91D 镁合金组织及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(12): 2003– 2008.
- [12] 李元东, 郝远. SIMA 法制备 AZ91D 镁合金非枝晶组织锭料[J]. 甘肃工业大学学报, 2002, 28(4): 34– 38.
- [13] 孙惠林. 体视学和定量金相学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980. 31– 89.
- [14] 胡汉起. 金属凝固[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985. 207– 214.

基金项目: 重庆市自然科学基金重大资助项目(CSTC2005BA4015); 重庆市科技攻关重点资助项目(CSTC2005CF4001); 国家 863 高科技计划资助项目(2001AA331050)

收稿日期: 2006-08-03; **修订日期:** 2006-12-28

作者简介: 张丁非(1963–), 男, 教授, 博导, 主要从事轻合金材料及加工技术研究, 联系地址: 重庆大学材料科学与工程学院(400045)。

(上接第 22 页)

- [2] CAVALIERE P, SQUILLACE A. High temperature deformation of friction stir processed 7075 aluminum alloy [J]. Materials Characterization, 2005, 55: 136– 142.
- [3] ZHANG H, LIN G Y, PENG D S, et al. Dynamic and static softening behaviors of aluminum alloys during multistage hot deformation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148: 245– 249.
- [4] 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.
- [5] 杨立斌, 张辉, 彭大暑, 等. 7075 铝合金高温流变行为的研究[J]. 热加工工艺, 2002, (1): 1– 2.
- [6] KAIBYSHEV R, SITDIKOV O, GOLOBORODKO A, et al. Grain refinement in as cast 7475 aluminum alloy under hot deformation [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A344: 348– 356.
- [7] SITDIKOV O, SAKAI T, GOLOBORODKO A, et al. Grain fragmentation in a coarse grained 7475 Al alloy during hot deformation [J]. Scripta Materialia, 2004, 51: 175– 179.

- [8] 盛永华, 王新云, 夏巨谌. 7475 铝合金高温高应变速率压缩变形的流变应力[J]. 锻压装备与制造技术, 2005, (4): 98– 100.
- [9] JONAS J, SELLARS C M, MCGW J. Strength and structure under hot working conditions [J]. Tergart Int Metal Reviews, 1969, 14(130): 1– 24.
- [10] SHI H, MCLAREN A J, SELLARS C M, et al. Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1997, 13: 210– 216.
- [11] GAO Z, GRANDHIR V. Microstructure optimization in design of forging process [J]. Machine Tool & Manufacture, 2000, 40: 691– 711.

基金项目: 国家 973 计划资助项目(2005CB724105)

收稿日期: 2006-07-17; **修订日期:** 2006-10-25

作者简介: 易幼平(1966–), 男, 博士, 副研究员, 从事精密锻造成形工艺数字化仿真研究, 联系地址: 湖南省长沙市中南大学机电工程学院冶金机械研究所(410083)。