

文章编号: 1000-5013(2009)03-0248-05

AZ61 镁合金热压缩流变应力的实验

王智祥¹, 刘金明¹, 刘柏雄¹, 刘 斌²

(1. 江西理工大学 材料与化学工程学院, 江西 赣州 341000;

2. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 采用 Gleeble 1500 型热模拟机, 对 AZ61 镁合金进行高温压缩实验, 分析该合金在不同变形温度与应变速率条件下的压缩流变应力. 研究 AZ61 镁合金在热变形时, 流变应力与变形温度、应变速率之间的关系, 并建立相应的流变应力模型. 结果表明, AZ61 镁合金在高温压缩变形时, 当变形温度一定时, 流变应力随应变速率的增大而增大; 而当应变速率一定时, 流变应力随变形温度的升高而降低. AZ61 镁合金的热变形过程均表现出较明显的动态再结晶特征, 其流变应力的变化规律主要受加工硬化和再结晶软化两者机制的共同作用. 在热变形下, AZ61 镁合金峰值流变应力可以用双曲正弦模型来进行较好的描述.

关键词: 镁合金; 热变形; 流变应力; 激活能; 应变速率

中图分类号: TG 166.493

文献标识码: A

镁合金具有优良的比强度、比刚度、阻尼性、电磁屏蔽性及可回收性等特点, 在汽车、电子通讯、航空、航天等领域中有着良好的应用前景^[1-3]. 镁是密排六方结构, 因此镁合金的室温塑性较差, 大多数镁合金制品都是用铸造(多为压铸)方法成形, 较少采用锻压、轧制、挤压等塑性成形方法加工, 这就大大限制了镁合金的应用. 然而, 采用挤压、锻造、轧制等工艺生产出的镁合金产品比铸造产品具有更高的强度、更好的延展性、更多样化的力学性能, 可以满足更多结构材料的不同性能要求. 因此, 开展镁合金塑性成形的研究已成为目前国内外塑性加工领域的热点之一. 在金属塑性变形过程中, 流变应力是表征金属与合金塑性变形性能的一个重要基本量, 其值的大小决定了变形时所需施加的载荷大小和所需消耗能量的多少, 同时也综合反映了变形工艺参数的相互影响, 以及变形体内部加工组织演变的结果. 因此, 对合金变形时的流变应力进行研究, 对实际制订生产工艺及设备选型等有着重要的理论价值和实际意义. 目前, 对于 AZ31 镁合金热变形流变应力方面的研究已见报道^[4-5], 但关于 AZ61 镁合金热加工流变应力的研究相对较少. 本文研究 AZ61 镁合金在热变形时流变应力与变形温度、应变速率之间的关系, 建立相应的流变应力模型.

1 材料与方 法

1.1 实验材料

AZ61 镁合金铸锭为半连续铸造, 其直径为 95 mm. 合金的主要成分中, Al, Zn, Mn, Si, Fe, Cu, Ni 的质量分数分别为 5.24%, 0.67%, 0.16%, 0.004%, 0.001 1%, 0.003%, 0.003%, 其余为 Mg. 该铸锭经 380 °C, 10 h 均匀化退火处理后, 通过机加工制备 $\Phi 10$ mm \times 15 mm 的热压缩模拟圆柱试样.

1.2 实验方法

将加工好的圆柱试样在 Gleeble 1500 型材料热模拟试验机上进行等温压缩实验. 压缩前, 在试样两端与压头接触面上垫上石墨片以减少摩擦, 避免出现明显的腰鼓、侧翻等不均匀变形现象. 实验的变形温度分别设定为 250, 300, 350, 400, 450 °C, 应变速率($\dot{\epsilon}$)为 0.01, 0.1, 1.0, 10.0 s⁻¹, 试样加热速度为

收稿日期: 2008-07-26

通信作者: 王智祥(1972-), 男, 副教授, 主要从事金属材料成形的研究. E-mail: wzx72@126.com.

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2006H0029)

$1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, 保温时间为 5 min, 总压缩变形量为 1.0 (真应变) 左右. 实验均在空气中进行, 由 Gleeble 1500 型热模拟机自动采集应力、应变、位移、温度及时间等数据, 并绘制出真应力-真应变曲线.

2 结果与分析

2.1 AZ61 镁合金的真应力-真应变曲线

AZ61 镁合金高温热压缩变形的真应力(σ)-真应变(ε)实验曲线, 如图 1 所示. 由图 1 可以看出, AZ61 镁合金在热压缩时流变应力的总体变化规律是: 流变应力先随真应变的增加而迅速上升, 出现一应力峰值后又逐渐下降, 当达到一定真应变量时, 其流变应力基本不变.

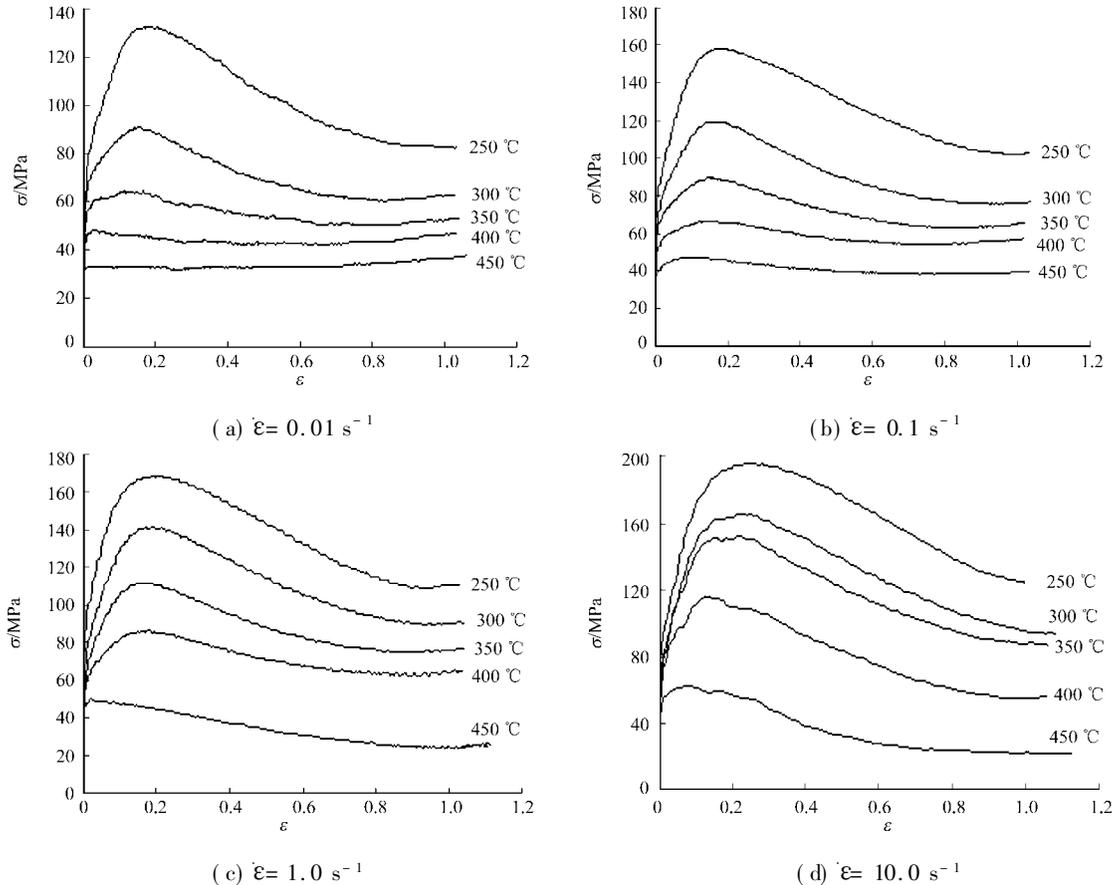


图 1 AZ61 镁合金热压缩变形真应力-真应变曲线

Fig. 1 True stress-strain curves for AZ61 magnesium alloy during hot compression deformation

以上曲线的变化特征表明, 层错能较低的镁合金在高温热变形时很容易发生动态回复和动态再结晶. 在变形初期, 由于该阶段加工硬化占主导地位, 合金只发生了部分动态回复或动态再结晶, 其硬化作用远远超过软化作用, 流变应力随应变的增长速率较大. 随着变形量的不断增大, 位错密度不断增高, 使得动态回复尤其是动态再结晶速率大为加快, 软化作用不断增强. 这就表现出流变应力的增长速度随应变的增长不断减小, 即曲线斜率逐渐减小. 当流变应力达到峰值时, 意味着动态再结晶软化速率与加工硬化速率基本相等; 随着变形进一步深入, 动态再结晶得以继续发展, 其软化作用开始占主导地位, 从而使流变应力开始持续下降. 最后, 动态再结晶软化作用与加工硬化作用趋于动态平衡时, 流变应力也趋于一稳定值^[6,7].

当变形温度一定时, 流变应力随着应变速率的增大而增大, 充分说明了该合金是正应变速率敏感材料. 应变速率越大, 动态再结晶无法充分进行, 导致流变应力随之增大; 而当应变速率一定时, 流变应力随着变形温度的升高而降低. 此时, 曲线中各峰值流变应力与其对应的稳态流变应力之间的差值也随着变形温度的升高而逐渐减小, 同时达到各峰值流变应力的临界应变量值也随之减小. 这主要是因为温度的不断升高, 热激活作用不断加强, 原子的活动能力增大, 各滑移系的临界切应力都随之下降, 从而导

致合金的变形抗力降低. 而且, 温度越高, 动态回复和动态再结晶越容易发生, 进而导致应力峰值随着温度的升高而提前.

因此, 综合以上各变化规律及影响作用, 在制定挤压工艺方案时, 必须充分考虑到变形温度和应变速率对流变应力的影响. 当变形速率较大时, 应选择在较高温度下进行挤压; 而当考虑到提高材料挤压后力学性能和减少热裂时, 应选择在低的变形温度较为适宜.

2.2 流变应力方程的建立

从以上实验结果分析可知, AZ61 镁合金在热变形时, 其流变应力的大小与应变速率、变形温度存在明显的相互影响关系. 因此, 有必要明确合金塑性行为中各因素之间的相关性, 以便在实际生产中较好地掌握和控制合金的高温塑性变形行为.

在高温条件下, 金属和合金的热变形和高温蠕变过程非常相似, 都存在热激活过程. 然而, 不同的合金和金属热变形研究结果表明, 材料在热变形过程中, 其流变应力主要取决于变形温度和应变速率, 都存在一个应变硬化和动态软化之间的动态平衡过程. 为此, Selars 和 Tegart 提出采用包含变形激活能 Q 和温度 T 的双曲正弦形式修正的 Arrhenius 关系, 来描述这种热激活变形行为^[8]. 即

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

式(1)中, σ 为流变应力, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, T 为变形温度; A , α 和 n 均为与材料有关的常数, R 为气体常数; Q 为热变形激活能, 反映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.

不同金属材料热加工数据的研究表明, 低应力和高应力状态下的流变应力和应变速率之间的关系分别可用指数和幂指数进行描述. 即在低应力状态下, 有

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1}, \tag{2}$$

而在高应力状态下, 有

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta \sigma). \tag{3}$$

式(2), (3)中, A_1 , A_2 , n_1 , β 均为常数, 且常数 α , β 和 n_1 之间满足

$$\alpha = \beta/n_1. \tag{4}$$

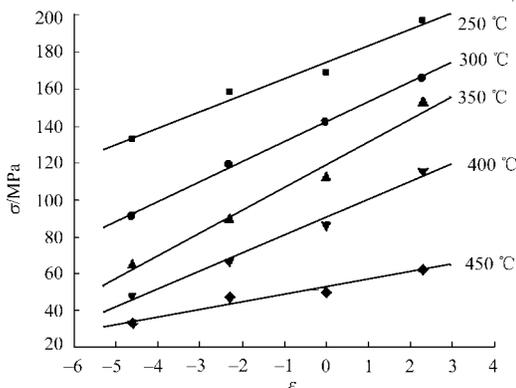
众多研究结果表明, 式(1)能较好地描述金属材料常规热变形过程^[9-11]. 因此, 采用该模型研究 AZ61 镁合金热变形时的峰值流变-应力关系.

将式(2), (3)两边分别取对数并整理, 可得

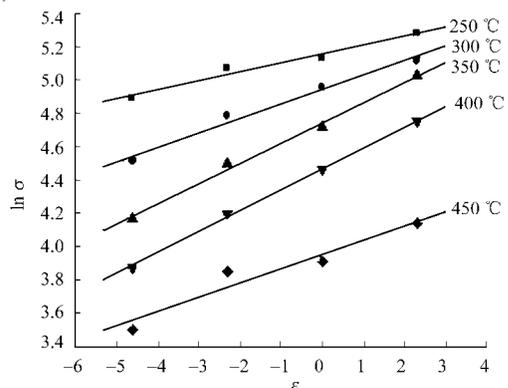
$$\ln \sigma = \frac{\ln \dot{\epsilon}}{n_1} - \frac{\ln A_1}{n_1}, \tag{5}$$

$$\sigma = \frac{\ln \dot{\epsilon}}{\beta} - \frac{\ln A_2}{\beta}. \tag{6}$$

将图 1 所示的真应力-真应变实验结果按式(5), (6)进行处理, 如图 2 所示. 从图 2 可知, $\sigma \sim \ln \dot{\epsilon}$ 和



(a) $\sigma \sim \ln \dot{\epsilon}$ 回归曲线



(b) $\ln \sigma \sim \ln \dot{\epsilon}$ 回归曲线

图 2 流变应力与应变速率的关系

Fig. 2 Relationship between flow stress and strain rate

$\ln \sigma \sim \ln \dot{\epsilon}$ 的回归曲线基本呈线性关系, 其相关系数均在 0.975~0.999 之间. 由各直线的斜率可获得常数 n_1 和 β 的平均值, 并由式(4)确定出常数 $\alpha = 11.1 \text{ GPa}^{-1}$. 现假定变形激活能 Q 和变形温度 T 无

关,对式(1)两边分别取对数,可得

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

由式(7)可知,当 $\ln[\sin h(\alpha \sigma)] \sim \ln \dot{\epsilon}$ 曲线呈线性关系时,直线的斜率即为应变速率敏感系数 $m = 1/n$. 当 $\ln[\sin h(\alpha \sigma)] \sim 1/T$ 曲线呈线性关系时,直线的斜率为 $Q/(nR)$. 因此,将图1中不同变形温度下的峰值流变应力值、应变速率值,以及所求出的 α 值代入式(7)中,采用最小二乘法进行线性回归,结果如图3所示. 图3的 $\ln[\sin h(\alpha \sigma)] \sim \ln \dot{\epsilon}$, $\ln[\sin h(\alpha \sigma)] \sim 1/T$ 回归曲线表明,这两组曲线都呈直线关系. 由此,根据实验结果回归的数据,可求得不同温度下的变形激活能 Q 为 $204.251 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 应力指数 n 为 7.965 , 材料常数 A 值为 $e^{36.706}$.

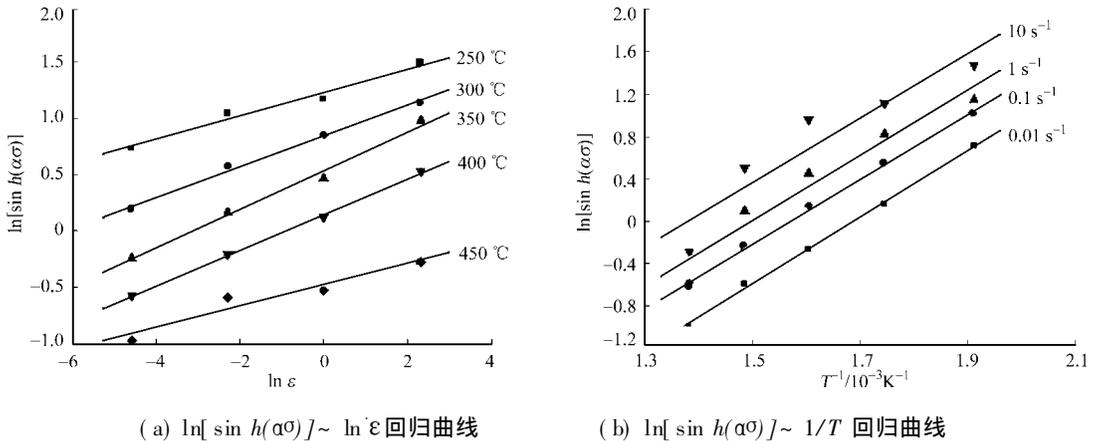


图3 热模拟实验结果

Fig.3 Experimental results of hot deformation simulation

将上述材料的常数代入式(1),可获得AZ61镁合金峰值流变应力与变形温度、应变速率的关系为

$$\dot{\epsilon} = e^{36.706} [\sin h(0.011 \sigma)]^{7.965} \exp\left(-\frac{204251.1}{RT}\right). \quad (8)$$

为了验证等式(1),(8)的正确性,引入一个温度补偿应变速率参数 Z (Zener-Hollomon 参数). 该参数综合了材料的热变形条件的的影响作用^[12],其表达式为

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp(Q/RT). \quad (9)$$

将式(9)代入式(1)并两边取对数,可得

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

将前面求得的变形激活能 Q 、温度、应变速率值代入式(9),求得不同的 Z 值. 然后,与实际对应的峰值流变应力一起代入式(10)中,由最小二乘法进行线性回归,绘制出 $\ln Z \sim \ln[\sin h(\alpha \sigma)]$ 关系曲线,如图4所示. 从图4可知,两者具有明显的线性关系,经采用回归分析得出两者之间的关系为

$$\ln Z = 36.65 + 7.59 \ln[\sin h(\alpha \sigma)].$$

所得结果与前面数据吻合. 由此可见,采用包含 Arrhenius 项的 Z 参数,可以用来描述AZ61镁合金高温热变形时的流变行为,同时式(8)也能较好地反映其峰值流变应力在热变形时的变化规律.

3 结束语

通过对AZ61镁合金热压缩变形时的流变应力与变形温度、应变速率之间关系的研究,建立相应的流变-应力模型. AZ61镁合金在热变形下的峰值流变-应力,可以用双曲正弦模型来进行较好地描述,为该合金的热塑性成形工艺的制订提供理论和实验依据.

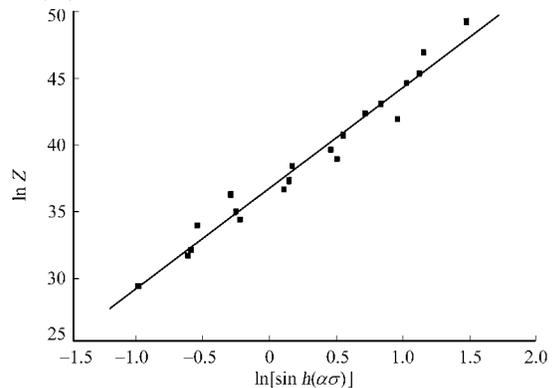


图4 $\ln Z \sim \ln[\sin h(\alpha \sigma)]$ 的关系

Fig.4 Relationship between $\ln Z$ and $\ln[\sin h(\alpha \sigma)]$

参考文献:

- [1] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium properties-application potential[J]. *Mater Sci Eng (A)*, 2001(302): 37-45.
- [2] FRIEDRICH H, SCHUMANN S. Research for a "new age of magnesium" in the automotive industry[J]. *J Mater Process Tech*, 2001(117): 276-281.
- [3] 马图哈 K H. 非铁合金的结构与性能[M]//卡恩 R W. 非铁合金的结构与性能: 第8卷. 师昌绪, 等译. 2版. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] TAKUDA H, FUJIMOTO H, HATTA N. Modelling on flow stress of Mg-Al-Zn alloys at elevated temperatures [J]. *J Mater Process Tech*, 1998(80/81): 513-516.
- [5] 范永革, 汪凌云, 黄光胜, 等. 变形镁合金高温变形流变应力分析[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2003, 26(2): 9-11.
- [6] GALIYEV A, KAIBYSHEV R, SAKAIT. Continuous dynamic recrystallization in magnesium alloys[J]. *Mater Sci Forum*, 2003(419/422): 509-514.
- [7] TAN J C, TAN M J. Dynamic continuous recrystallization characteristics in two stage deformation of Mg-3Al-1Zn alloy sheet[J]. *Mater Sci Eng (A)*, 2003(339): 124-132.
- [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.
- [9] MCQUEEN H J, RYAN N D. Constitutive analysis in hot working[J]. *Mater Sci Eng (A)*, 2002(322): 43-63.
- [10] GRONOSTAJSKI Z J. Model describing the characteristic values of flow stress and strain of brass M63 and aluminium bronze BA93[J]. *J Mater Process Tech*, 1998(78): 84-89.
- [11] IMBERT C A C, MCQUEEN H J. Peak strength, strain hardening and dynamic restoration of A2 and M2 tool steels in hot deformation[J]. *Mater Sci Eng (A)*, 2001(313): 88-103.
- [12] LIU Jiar tao, CHANG Hong bing, WU Rui heng, et al. Investigation on hot deformation behavior of AISI T1 high speed steel [J]. *Materials Characterization*, 2000, 45(3): 175-186.

Study on Flow Stress of AZ61 Magnesium Alloy in Hot Compression Deformation

WANG Zhixiang¹, LIU Jinming¹, LIU Baixiong¹, LIU Bin²

(1. School of Material and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Hot compression experiments of AZ61 magnesium alloy was performed on Gleeble 1500 thermal simulation testing machine, then the compression flow stress of the alloy was analyzed under the different deformation temperatures and strain rates. The relationship among the flow stress, the deformation temperatures and the strain rates was studied during hot deformation of AZ61 magnesium alloy, and the corresponding model of flow stress was established. The results showed that the flow stress increased with the strain rate increasing at the constant temperature, and the flow stress decreased with the deformation temperature increasing at the constant strain rate during the hot compression deformation of AZ61 magnesium alloy. The process of the hot deformation of AZ61 magnesium alloy had been characteristic of dynamic recrystallization all the time a little obviously, in which its flow stress was affected by the combination of work-hardening and dynamic recrystallization softening. It was indicated that during the hot compression, the peak value of flow stress of AZ61 magnesium alloy could be depicted by the hyperbolic sine mathematical model preferably.

Keywords: magnesium alloy; hot deformation; flow stress; activation energy; strain rate

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 郑亚青)