

文章编号: 1004-0609(1999)03-0510-05

Al-2Mg 合金的动态再结晶^①

林均品¹ 程荆卫²

(1. 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083;

2. 北京理工大学, 北京 100022)

摘 要: 单相 Al-2Mg 合金在 300~530 °C 以 0.069~1.587 s⁻¹ 形变速率扭转至真应变 5.5, 随后立即水冷。采用真应力-真应变曲线, 偏振光金相和透射电子显微镜研究该合金热扭转过程的动态复原机制。试验证实, 该合金热扭转过程中发生了动态再结晶, 但在一定的 Z 参数范围内发生, Z 参数过大或过小, 只发生动态回复。显微组织分析并没有发现层错的存在。发生动态再结晶的原因是动态回复被抑制, 即在较高形变温度下, 加大形变速率, 而在较低形变温度下, 降低形变速率。

关键词: Al-2Mg 合金; 动态再结晶; 热扭转

中图分类号: TG111.7

文献标识码: A

金属材料热形变过程中会同时发生形变硬化及形变软化两个过程。形变软化取决于形变过程中的动态复原行为。动态复原过程包括动态回复和动态再结晶。层错能较高的金属(如 Al, α -Fe, Mg, Zn 合金等)位错易交滑移, 一般认为动态回复是这类材料热形变过程中的动态复原过程^[1,2]。层错能较低的金属(如 Cu, Ni, α -Fe 及合金等), 位错难以交滑移, 在一定条件下可发生动态再结晶^[3,4]。近年来, 国内外一些研究者在 Al 合金热形变过程中发现动态再结晶^[5~10]。主要工作集中在 Al-Mg 合金上, 一种观点认为, 该合金系发生动态再结晶的原因是 Mg 元素的加入降低层错能^[11], 但无可靠证据。另一种观点认为, 在 Al-Mg 合金中形成 Mg 原子气团, 阻碍位错的运动, 从而易发生动态再结晶^[5]。当 Al-Mg 合金 Mg 含量低于 3%, 动态再结晶不能发生^[12]。

本工作选取单相 Al-2Mg 合金, 通过大幅度改变 Z 参数范围, 在 300~530 °C 恒区内研究热扭转过程的组织变化, 获得该合金热形变动态复原机理。

1 试验方法

单相 Al-2Mg 合金的化学成分(质量分数, %) 为 1.95 Mg, 0.1 Fe, 0.1 Si, 0.2 Mn, 0.007 Cu, 0.04 Zn。圆试样扭转部分的长度 L 为 30 mm, 直径为 6 mm, 加工后在 500 °C 真空退火 1.5 h。试样在扭转机上以 300~530 °C 形变温度和 0.069~1.587 s⁻¹ 形变速率热扭转至真应变 5.5, 可控硅控制温度, 无真空度。试样剪应力和剪应变以下列公式计算^[13]:

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{\sqrt{3}L} \alpha \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{3} \frac{M}{2\pi\gamma^3} (3 + k + m) \quad (2)$$

其中 ε 为等效真应变, γ 为试样半径, α 为扭转角, σ 为等效真应力, M 为扭距, k 为应变硬化系数, m 为应变速率敏感系数。

金相试样取自 4/5 半径处平行轴向的切面位置(下同)。机械抛光的试样再电解抛光, 最终进行阴极化处理, 在偏光下观察金相组织。

透射电子显微镜试样与金相观察同位置取

① 收稿日期: 1998-06-22; 修回日期: 1998-09-16

林均品(1964-), 男, 副教授

样, 线切割成薄片, 在 Jeol 2000EX(II) 电子显微镜下进行高分辨观察。

2 试验结果及讨论

2.1 热扭转过程的组织变化

图 1 为 Al-2Mg 合金 0.069 s^{-1} 下热扭转真应力-真应变曲线。可以看出 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下为典型的动态回复曲线。而 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下在真应力达到峰值后再下降, 这说明可能发生了动态再结晶过程, 当然这与低层错能材料

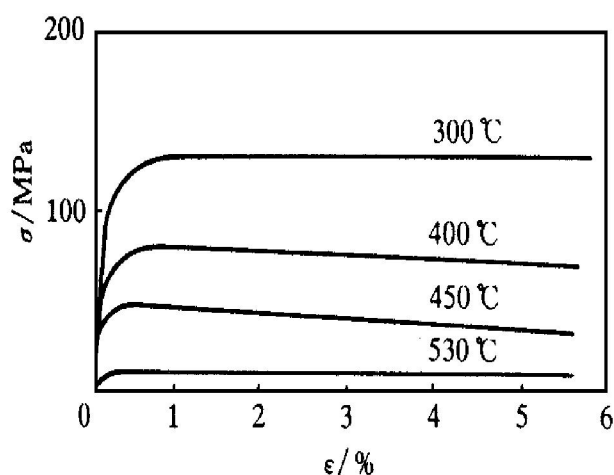


图 1 Al-2Mg 合金 0.069 s^{-1} 下热扭转真应力-真应变曲线

Fig. 1 True stress-true strain curves of Al-2Mg alloy deformed by torsion at 0.069 s^{-1}

的真应力-真应变曲线是有差别的。图 2 是与图 1 相对应的金相组织, 可以看出, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 形变晶粒被拉长, 材料只发生动态回复(图 2(b))。形变温度上升到 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 拉长晶粒内形成大量的形变带, 在形变带上产生细小的动态再结晶晶粒(图 2(c))。 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 形变后, 已发生完全动态再结晶。而当形变温度上升到 $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 出现了与原始晶粒尺寸相近但略有拉长的组织, 这并不是由于动态再结晶晶粒动态再结晶晶粒长大, 而是由动态回复造成的。本文作者对该现象作过详细研究, 并称之为低 Z 参数动态回复。低 Z 参数下, 不同形变量时的金相组织观察发现, 从开始形变到结束, 晶粒并不拉长, 但形状发生变化, 晶内有大量的亚

晶^[8]。这是由于低 Z 条件下, 位错通过交滑移和攀移释放能量, 位错塞积达不到动态再结晶形核所需能量。McQueen 等称之为几何动态再结晶^[14], 本质上也是一种动态回复过程。

2.2 形变参数对 Al-2Mg 合金动态再结晶的影响

形变状态可用 Zener-Holloman 参数, 即 Z 参数表示,

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (3)$$

其中 $\dot{\epsilon}$ 为形变速率, T 为形变温度, Q 为激活能, R 为气体常数。 Z 参数表示用形变温度修正了的形变速率, 反映了形变储存能的大小。

Z 参数与真应力-真应变曲线上的应力峰值 σ_p 有如下关系^[15]:

$$Z = A \sigma_p^n \quad (4)$$

A 和 n 为经验常数, 由(3)和(4)可得

$$A \sigma_p^n = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (5)$$

由(5)式可得

$$\frac{\partial(\ln \sigma_p)}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \Big|_{1/T} = 1/n \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\ln \sigma_p)}{\partial(1/T)} \Big|_{\ln \dot{\epsilon}} = Q/Rn \quad (7)$$

由式(6), (7)及真应力-真应变曲线上的应力峰值 σ_p 可求出

$$Q = 165\text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

该值与高 Mg 的 Al-Mg 合金比要高。由 Q 值可计算出各种形变状态下的 Z 值。图 3 是 Al-2Mg 合金热扭转动态再结晶图。该图分为 4 个区: 右下角的动态回复区, 左上角是低 Z 参数动态回复区, 中间为动态再结晶区, 该区又分完全动态再结晶区和部分动态再结晶区。可以看出, 动态再结晶是在一个 Z 参数范围内发生的, 大约为 $24.2 \leq Z \leq 29.0$ 。即在较高温度下, 只有当形变速率加大, 或在较低温度下减慢形变速率, 才可能发生动态再结晶。除此之外, 只能发生动态回复。很明显, 这与低层错能材料的动态再结晶规律不同。

2.3 Al-2Mg 合金发生动态再结晶的本质

Truskowski^[16] 认为添加 1% Mg 到 Al 中可

把层错能从 200 Jm^{-2} 降低到 50 Jm^{-2} , 与铜的相近。
图 4 为 Al-2Mg 合金动态再结晶后的显微组织。

可以看出, 动态再结晶晶粒又发生了动态回复 (图 4(a)), 但并没有层错的存在。高分辨电镜

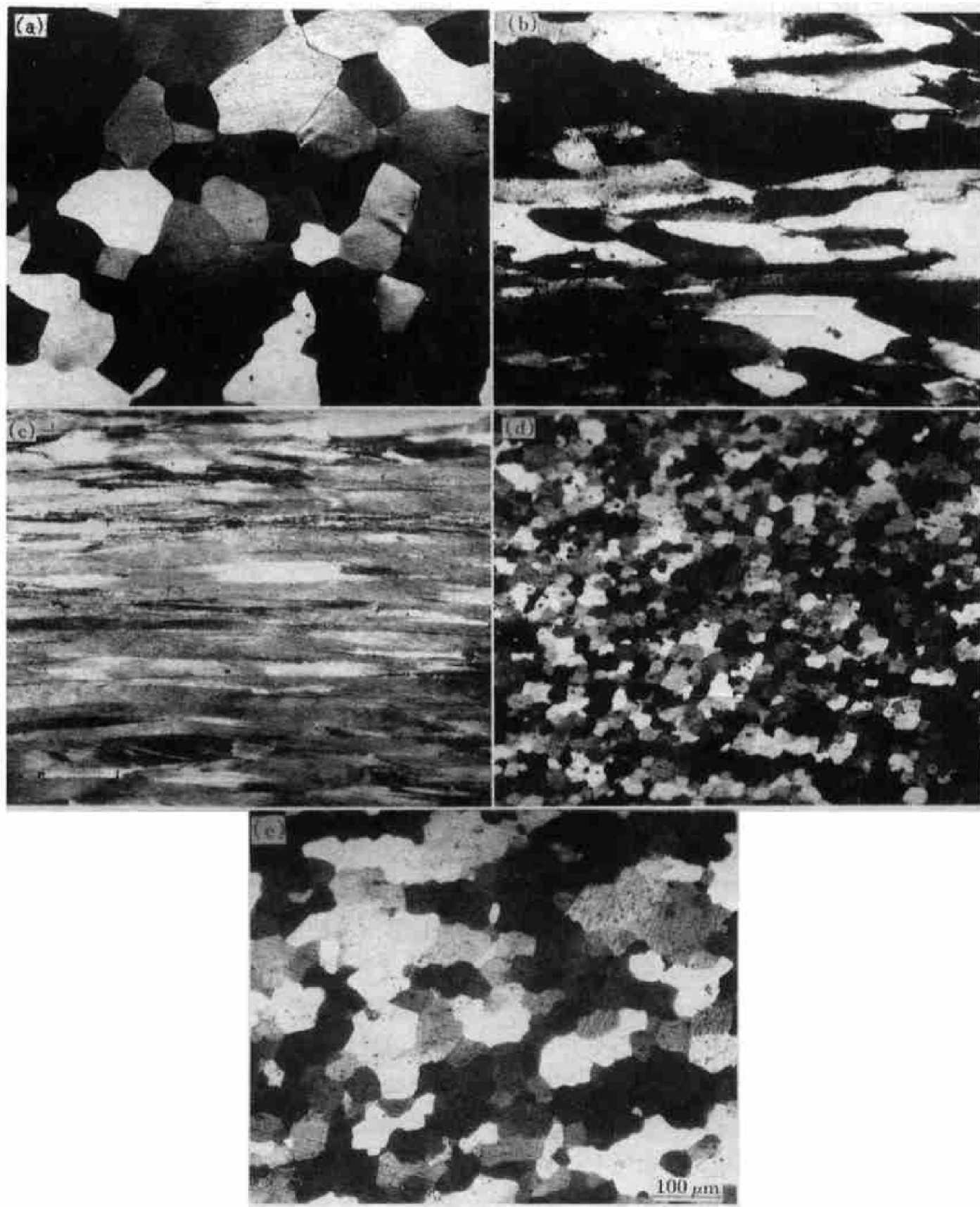
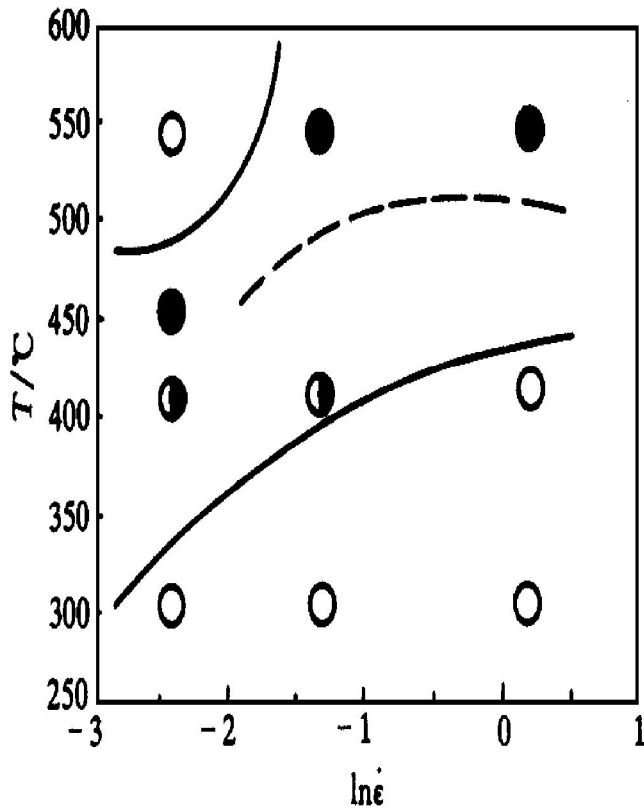


图 2 Al-2Mg 合金 0.069 s^{-1} 下热扭转至真应变为 5.5 后的金相组织

Fig. 2 Microstructures of the specimens of Al-2Mg alloy deformed by torsion at 0.069 s^{-1} to outerfiber equivalent uniaxial strain of 5.5

(a) —Undeformed; (b) —300 °C; (c) —400 °C; (d) —450 °C; (e) —530 °C



观察也没有发现层错(图4(b))。这说明上述假设并不成立。

从试验结果可看出,通过控制 Z 参数,该合金可发生动态再结晶,虽然其规律与低层错能材料不同。在热形变过程中,动态回复和动态再结晶是两个相互竞争的过程,而 Al 合金具有易发生动态回复的特征。在较高形变温度下,只有加大形变速率,抑制位错交滑移,使位错塞积量达到动态再结晶形核所需的形变储存能。而在较低形变温度下,降低形变速率,是为了有充足的时间完成动态再结晶过程,当然应有足够的塑性来保证。Al 合金线材在室温拔丝到真应变 4.5 后形成很细小的动态再结晶组织^[17],这也证明了上述分析的合理性。

3 结论

(1) Al-2Mg 合金热扭转动态复原机制是动态回复和动态再结晶。

(2) 该合金动态再结晶是在某一个 Z 参数范围内发生的, Z 参数过大或过小,只发生动

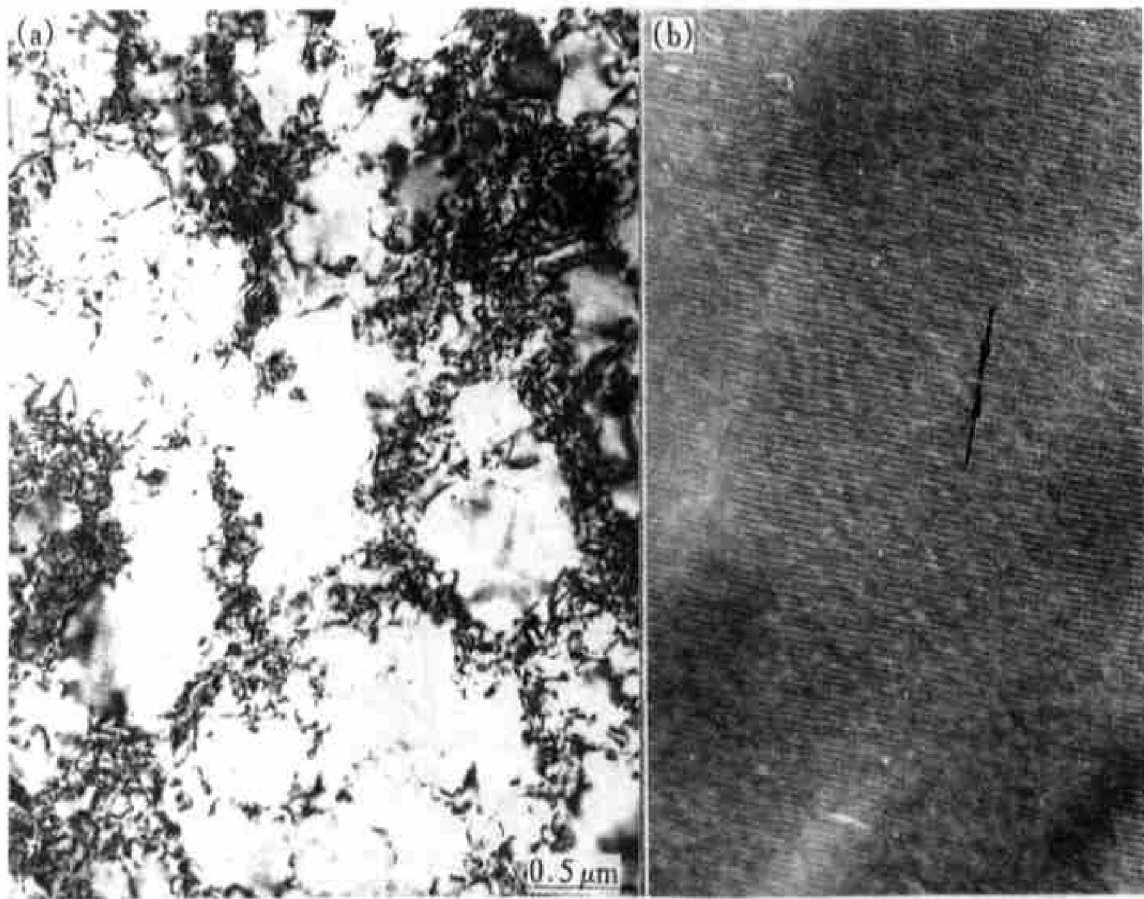


图4 Al-2Mg 合金 450 °C 及 0.069 s^{-1} 热扭转试样透射电镜组织

Fig. 4 Microstructures of the specimen of Al-2Mg alloy deformed by hot torsion at 450 °C and 0.069 s^{-1}

态回复。

(3) 该合金动态再结晶规律与低层错能材料相比有明显的差别。

REFERENCES

- 1 McQueen H J. J Metals, 1968, 20: 31.
- 2 Truckner W G and Mikkola D E. Met Trans, 1977, 8A: 45.
- 3 Rossard C. Rev Met, 1968, 64: 181.
- 4 Shapiro E and Dieter G E. Met Trans, 1970, 1: 1711.
- 5 Sheppard T and Titcher M G. Met Sci, 1980, 14: 579.
- 6 Gardner K J and Grimes R. Met Sci, 1979, 13: 216.
- 7 Zaidi M A and Sheppard T. Met Sci, 1982, 16: 229.
- 8 Lin J P, An X Y and Lei T Q. Scripta Metall Mater, 1992, 26: 1868.
- 9 An X Y, Lin J P and Lei T Q. Mater Chem Phys, 1988, 20: 275.
- 10 Lin J P, An X Y and Lei T Q. J Mater Sci Let, 1993, 12: 850.
- 11 Tensi H, Dropman P and Borchers H. Z Metalkd, 1970, 61: 518.
- 12 Zaidi M A. PhD Thesis, University of London, 1980: 34.
- 13 Fields D S and Backofen W A. Proc ASTM, 1959, 57: 1257.
- 14 McQueen H J, Anustad C, Ryum N *et al.* Scripta Met, 1986, 19: 32.
- 15 Tassa O, Testani C and Bitti R. Scripta Met, 1992, 26: 1818.
- 16 Truszkowski W, Pawlowski and Dulkiewicz. Bull Acad Pol Sci Ser Sci Tech, 1971, 19: 55.
- 17 Varmad S K and LeFevre B G. Met Trans, 1980, 110A: 935.

Dynamic recrystallization during hot torsion of Al-2Mg alloy

Lin Junpin¹, Cheng Jingwei²

1. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China
2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100022, P. R. China

Abstract: Specimens of single phase Al-2Mg alloy have been deformed by hot torsion at 300~ 530 °C and strain rates of 0.069~ 1.587 s⁻¹ to true strain of 5.5 followed by water quenched immediately. The dynamic restoration mechanisms during hot torsion were examined by the true stress-true strain curves, optical and electron microscopy. It has been shown that dynamic recrystallization occurs in certain range of parameter *Z*. If Al-2Mg alloy is deformed by torsion out of the range, only dynamic recovery occurs. The microstructural observations indicate that there are not the regions of stacking faults in the matrix. The occurrence of dynamic recrystallization results from the depression of dynamic recovery, i. e. increasing strain rate at higher temperature and reducing strain rate at lower temperature.

Key words: aluminium-magnesium alloys; dynamic recrystallization; hot torsion tests

(编辑 朱忠国)