

AZ31 镁合金棒材循环扭转过程中的力学性能和织构变化

宋广胜¹, 张健强¹, 张士宏²

(1. 沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110036)

(2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 对 AZ31 镁合金挤压棒材在循环扭转变形过程中的力学性能和织构演化进行了研究。循环扭转变形分别在 298, 373, 443, 503 和 573 K 下进行。镁合金循环变形的力学性能测试结果表明, 循环扭转变形过程的应力应变滞回线呈现严格的对称性, 意味着微观变形模式以滑移为主。变形过程的热效应使应力应变曲线中的峰值应力随着周期数的增加而降低。变形过程中柱面滑移系启动使晶粒取向发生改变, 由变形前的 $\{11\bar{2}0\} \perp ED$ 织构转变为变形后的 $\{10\bar{1}0\} \perp ED$ 织构, 变形过程中拉伸孪晶启动使晶粒取向产生两种变化。

关键词: 镁合金棒材; 循环扭转; 滞回线; 织构; 拉伸孪晶

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)01-0288-09

镁合金具有密度低、比刚度高及电磁屏蔽性好等优点, 特别是采用镁合金生产的结构件在交通工具上应用, 满足了减重的需要, 将会明显降低能耗。采用轧制或挤压工艺生产的镁合金板材, 及采用挤压工艺生产镁合金棒材是镁合金生产成形件的 2 种主要原材料, 其力学性能及变形机理的研究已有大量报道^[1-5]。镁合金板材是镁合金冲压或冲锻工艺的主要坯料, 主要用于生产壳形件^[6-8]。而镁合金棒材可采用挤压工艺生产截面形状复杂的结构件^[9,10]。

镁合金生产的结构件在服役过程中, 可能受到循环载荷的作用, 研究循环载荷作用下的镁合金力学性能及相关机理, 对于镁合金的应用具有借鉴意义。相比于镁合金的拉伸或压缩等常规变形过程的大量研究, 对于镁合金循环载荷作用下的变形过程研究, 主要集中于拉压循环载荷下变形过程的研究, 相关研究结果报道了镁合金在循环载荷作用下的滞回线特征, 峰值应力与循环周期的关系, 及孪晶和解孪晶机理等^[11-14]。

镁合金的扭转变形通常为扭转轴平行于棒材轴线的扭转变形, 关于镁合金的单向扭转变形机制已有相关研究^[15-18]。关于镁合金扭转循环变形机制, J. X. Zhang^[19,20]对薄壁镁合金管材进行了室温下的循环扭转和轴向拉压+循环扭转两种变形方式, 其中循环扭转变形研究结果表明该变形过程的滞回线呈现对称性, 在

低扭转角条件下, 峰值应力在变形初期几乎不变, 而在变形后期随着扭转次数的增加而不断增大, 而在高扭转角条件下, 峰值应力始终随着扭转次数的增加而增大; 而其中的拉压+循环扭转变形的研究表明, 由于该变形过程中拉伸孪晶的大量启动, 使滞回线呈现非对称特征。轴向载荷与扭转载荷的比例关系明显影响疲劳寿命。S. Bentachfine^[21]研究了镁合金在方向互相垂直的拉压和扭转复合载荷作用下的低周疲劳性, 发现疲劳寿命取决于 2 种复合载荷的相差, 在相差为零时疲劳寿命最长, 孪晶启动量也在相差为零时达到最大, 相差值也明显影响应力应变滞回线特征。H. Li^[22]对镁合金薄壁管施加非正比的轴向和扭向应力和应变载荷的循环扭转变形, 分析了变形过程的软硬化机制, 结果显示在轴向和扭转方向都呈现周期硬化。J. Albinmousa^[23-25]对镁合金管件施加周期性的轴向和扭转载荷, 发现孪晶是多向载荷下变形的一种主要变形机制, 纯扭转变形过程的滞回线呈现对称性, 周期性的轴向载荷导致明显周期硬化和塑性应变减少。H. Jahed^[26]通过控制轴向和扭转应变载荷之比, 分别实现镁合金管材的拉压、纯扭、固定的轴向和扭转载荷比及存在相差的非固定轴向和扭转载荷比的 4 种循环变形方式, 发现 90°的载荷相差角的非比例载荷导致最短的疲劳寿命, 比例载荷将产生最长的疲劳寿命。

收稿日期: 2019-01-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51174189)

作者简介: 宋广胜, 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110036, 电话: 024-89724198, E-mail: songgs17@163.com

本实验以挤压态 AZ31 镁合金棒材为研究对象, 进行不同温度下的循环扭转变形, 探究其变形过程中的力学性能, 孪晶的生成及变形后的组织和微观组织的变化, 以求为镁合金棒材的应用提供理论指导。

1 实 验

实验所用材料是 $\Phi 26\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$ 的商用 AZ31 (Mg-3Al-1Zn) 镁合金挤压棒材, 经 $420\text{ }^\circ\text{C}$, 6 h 退火处理后, 加工成标准扭转试样, 扭转试样的尺寸如图 1a 所示, 其中室温扭转试样的标距部分长为 100 mm, 而加热扭转试样标距部分的长度为 120 mm。图 1a 中的位置 1 和 2 分别是室温扭转变形试样的表面测温点, 它们分别位于试样标距部分轴向的端部和中点。

扭转实验在 INSTRON 循环扭转疲劳试验机上进行, 试样扭转温度分别选择 298, 373, 443, 503 和 573 K, 对于加热扭转试样在加热炉中保温 20 min 后再进行扭转实验, 变形过程中试样一直放置在加热炉中。扭转变形为往复循环扭转变形, 最大扭转角分别选择了 $+45^\circ$ (顺时针) 和 -45° (逆时针), 扭转变形的频率为 1 Hz, 则对应着扭转速度为 $1/60\text{ r/min}$ 。扭转角从 0° 开始依次经历了正的最大扭转角和负的最大扭转角并最后回到 0° 的过程为一个扭转周期, 每个扭转变形的过程中角速度保持为定值, 其在变形过程的角度变化与周期数的关系如图 2 所示。试样的两端分别固定在设备的夹头中, 试样固定后其轴线垂直于地面, 扭转变形过程中, 试样的下端夹头不动, 而上端夹头带动试样扭转变形, 变形过程中试样的上端可沿轴向自由移动, 试样的扭转变形特征可用图 1b 中的示意图来表示。扭转疲劳实验机自动记录变形过程中的角度、扭矩及最大扭矩等数据。

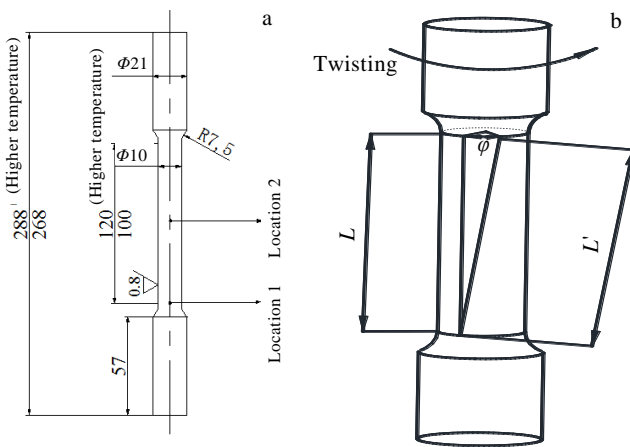


图 1 扭转试样及变形示意图

Fig.1 Schematic of twisted samples: (a) torsion sample and (b) illustration of torsion

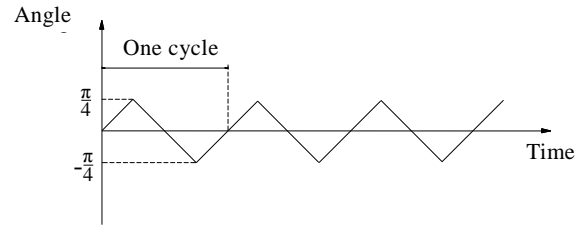


图 2 扭转周期图

Fig.2 Schematic of torsion cycles

在实验过程中, 对部分室温扭转试样的表面温度进行采集, 温度采集部位分别为图 1a 中的点 1 和点 2, 温度的采集采用镍铬-镍硅热电偶丝直接接触温度采集部位, 温度采集系统直接保存所采集的温度值, 每隔 0.1 s 保存一次温度数据。

2 结果与讨论

2.1 挤压棒材的组织与结构

图 3 为采用 EBSD 技术所测得原始挤压棒材的晶粒取向图和极图, 由图 3a 可以看出挤压棒材的微观组织由大小差别较明显的等轴晶组成, 其中小晶粒多数均匀地分布在大晶粒的晶界处, 也有少部分小晶粒分布在大晶粒内部, 上述小晶粒为镁合金棒材在热挤压过程中发生动态再结晶而形成的。

图 3b 中的极图显示挤出棒材中的晶粒取向特征为晶粒的 C 轴与棒材的径向一致, 而 $\{11\bar{2}0\}$ 柱面与棒材的轴线方向一致, 该晶粒取向的分布特征显示出该挤压棒材具有典型的镁合金丝织构。

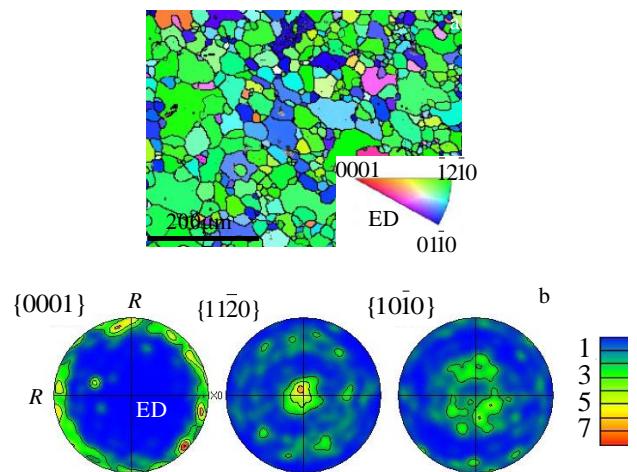


图 3 镁合金棒材的 EBSD 测试结果

Fig.3 EBSD dealing results of initial magnesium alloy rods (annealed at $420\text{ }^\circ\text{C}$ for 6 h): (a) grain micrograph and (b) pole figures

为了进一步确定镁合金挤压棒材的组织特征，采用 XRD 技术测定了棒材横截面的极图，如图 4 中的极图显示晶粒的 C 轴与棒材的径向一致，并且较均匀地分布在圆周方向上，{10 $\bar{1}$ 0} 柱面与棒材的轴线成约 30° 的夹角，这意味着 {11 $\bar{2}$ 0} 柱面与棒材的轴线方向（也是挤压方向-ED）一致。该宏观织构特征与图 3 中显示的 EBSD 测试结果一致。

2.2 扭转过程中的应力应变行为

扭转疲劳试验机所采集的反映试样变形特征的主要数据为扭转角和扭矩，采用公式（1）将扭矩转换成名义扭转切应力，采用公式（2）将扭转角转换为扭转切应变。

$$\tau = \frac{16T}{\pi d_0^3} \tag{1}$$

$$\gamma = \frac{\varphi d_0}{2Le} \tag{2}$$

式中， d_0 为试样标距部分的直径， Le 为试样标距的长度， T 为所测得扭矩， φ 为转角^[6]。

依据上述公式将不同温度下将所测得扭角和扭矩转换为应变和应力，由此得到 AZ31 镁合金棒材循环扭转变形的滞回线如图 5 所示。图示结果显示，所有的滞回线为平滑的硬化曲线，并且曲线呈现严格的对称性，这意味着扭转变形过程主要以滑移变形为主。在镁合金的拉压循环变形过程中，当应变量高于 0.01

时，滞回线通常呈现非对称性，是因为在变形过程中启动了大量拉伸孪晶^[11, 13]。图 5 也显示随着变形温度的升高，滞回线所包围的区域逐渐减小。

镁合金的力学性能实验结果表明，在室温至 573 K 温度范围拉伸变形，在应力达到抗拉强度之前，镁合金通常呈现单调的硬化特征，对于该温度范围内的压缩变形，虽然在变形初期由于拉伸孪晶的大量启动，而使曲线呈现波动，但在变形后期曲线仍呈现单调硬化特征。为了观察图 5 中的滞回线的硬化特征，分别提取上述循环扭转变形过程中第 1, 25, 100 和 150 周期内的滞回线，如图 6 所示，可以看出对应于每个周期内的滞回线都呈现单调硬化特征，峰值应力对应于最大应变，滞回线呈现严格的对称性，扭转周期从 1 增加到 25 时，滞回线的峰值应力增大，而周期从 25 增至 150 的过程中，峰值应力则降低，其中 573 K 下扭转的滞回线的峰值应力降幅最大。

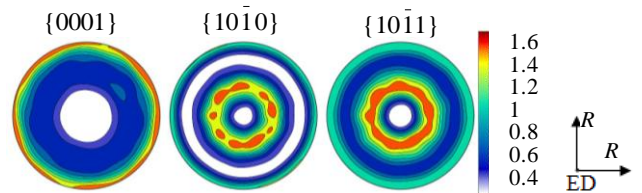


图 4 AZ31 镁合金挤压棒材的极图

Fig.4 Pole figures of AZ31 Mg alloy extruded rod

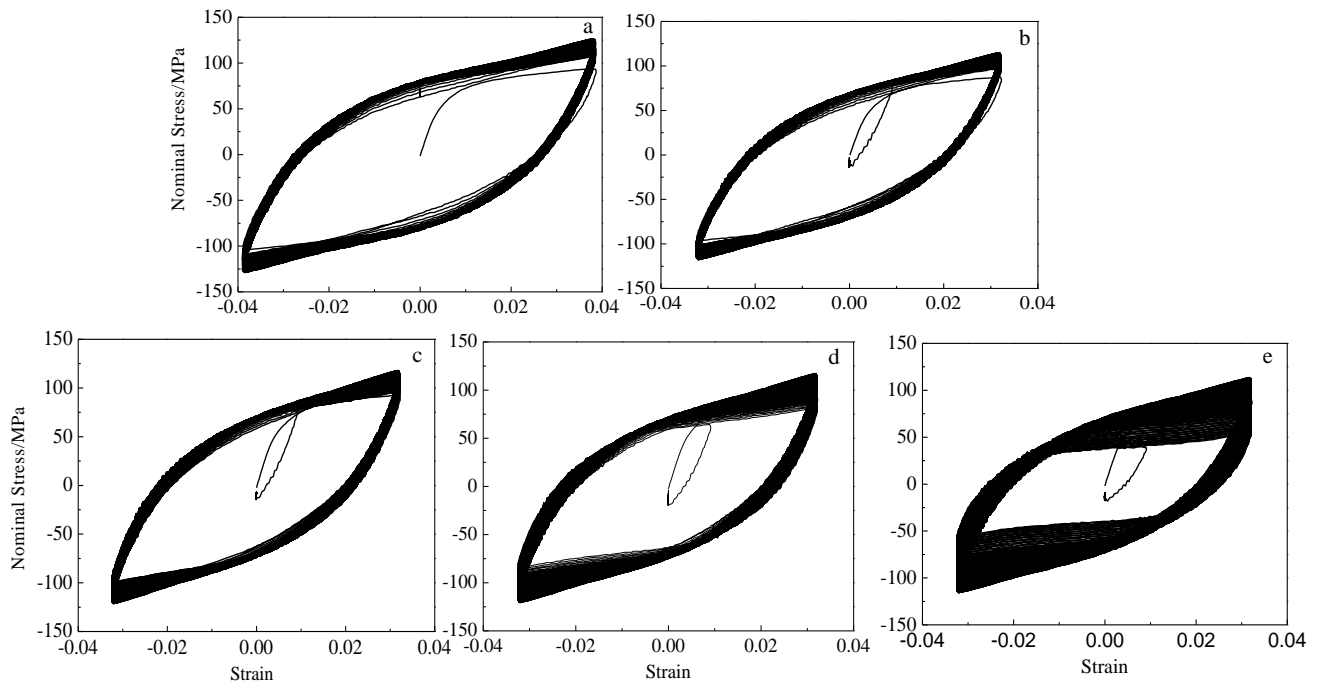


图 5 不同温度下循环扭转过程的滞回线

Fig.5 Stress-strain hysteresis loops of cyclic torsions at different temperatures: (a) 298 K, (b) 373 K, (c) 443 K, (d) 503 K, and (e) 573 K

为了观察上述滞回线峰值应力在整个扭转变形过程的变化, 提取每个周期对应的峰值应力, 考虑到滞回线的对称性, 只提取正的峰值应力。图 7 显示了每个循环扭转变形过程中峰值应力随着扭转周期增加而变化的特征, 图中显示对于不同温度下的循环扭转变形, 峰值应力在扭转周期大约为 10 时达到最大, 而后呈现线性下降趋势, 对应于变形温度分别为 503 K 和 573 K 的循环扭转过程, 在变形后期峰值应力又呈现

加速下降趋势。

图 7 中的不同温度下的峰值应力-周期曲线对比后可以看出, 在同一周期内, 峰值应力随着变形温度的升高而降低, 当变形温度从 298 K 升至 373 K 时, 峰值应力下降较明显, 同样, 变形温度从 503 K 降至 573 K 时, 峰值应力也有明显下降, 而变形温度从 373 K 升至 503 K 时, 峰值应力无明显下降, 特别是变形温度在 443 K 和 503 K 时, 峰值应力较接近。

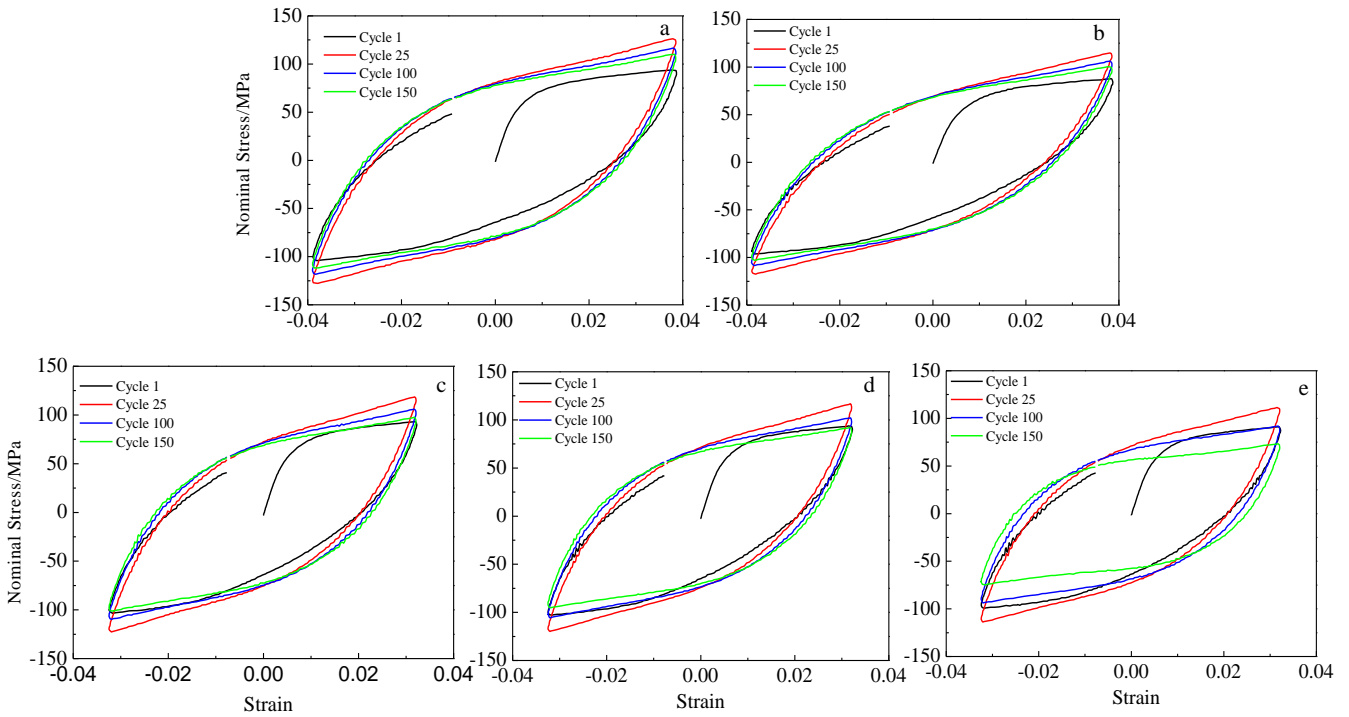


图 6 不同周期内的滞回线

Fig.6 Stress-strain hysteresis loops in different cycles of cyclic torsion at different temperatures: (a) 298 K, (b) 373 K, (c) 443 K, (d) 503 K and (e) 573 K

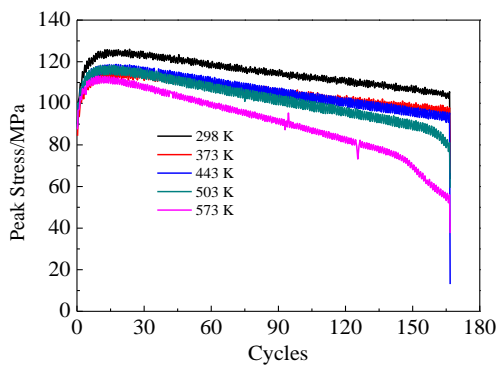


图 7 不同温度下扭转过程的峰值应力-扭转周期曲线

Fig.7 Peak stress variations with cycle numbers during cyclic torsions at different temperatures

镁合金的拉压循环变形的研究工作表明^[11, 12], 归因于变形过程中的应力-应变滞回线呈现非对称特征, 故对于峰值应力与周期数的关系的分析, 需要分别对拉伸和压缩变形的峰值应力进行分析。在低应变幅下, 拉伸变形的峰值应力随着循环周期数的增加而增大, 但压缩变形的峰值应力则保持恒定, 而当应变幅超过 1.0% 时, 拉伸和压缩变形的峰值应力都保持恒定。对于镁合金薄壁管的循环扭转变形的研究则表明^[19], 当最大应变幅超过 1.0% 时, 应力-应变曲线呈现持续的硬化特征, 峰值应力持续增加直至材料疲劳开裂。而当应变幅小于 1.0% 时, 在变形初期峰值应力保持恒定, 而后则持续增加直至疲劳断裂。

2.3 扭转变形过程中的热效应

图 7 中的峰值应力随扭转周期增加而呈现的波动性与循环扭转变形过程中试样的温度变化有关, 在室

温循环扭转变形过程中发现试样表面升温明显,图 8a, 8b, 8c 和 8d 分别为测量 4 个室温循环扭转试样的表面温度在变形过程中的变化,各试样对应的总的循环周期数分别为 146 周(扭转至断裂),130 周,90 周和 50 周。分析图 8 中的试样表面温度变化曲线,可以看出当扭转周期数超过 20 时,试样表面温度开始升高,试样中间部位(location 2)的表面温度最高升至约 120 °C,变形试样温度的升高将引起峰值应力降低。

上述循环扭转滞回线的分析结果表明,在单个周期内应力-应变曲线呈现硬化特征,而当循环周期数超过约为 10 时,峰值应力随着周期数的增加而降低,峰值应力的降低是由变形试样的温度升高引起的,图 8 中的实测结果表明随着试样扭转周期的增加试样升温明显。如同不同温度下的常规拉伸应力-应变曲线比较结果,对应于每个温度下的应力-应变曲线都呈现硬化特征,但随着变形温度的升高,应力-应变曲线将下降,即温度越高的曲线对应的应力值越低。

虽然只是测量室温扭转试样的表面温度变化,但图 7 显示不同温度下的循环扭转过程中峰值应力都呈现软化特征,则意味着即使在加热循环扭转变形过程中,试样的温度也是升高的,从而产生引起峰值应力降低的软化效应。

图 8 对于每个扭转变形试样,测温点 1 和 2 的温

度-时间曲线的峰值的出现是同步的。图 8a 显示对于扭转周期约为 146 的试样,温度的峰值在扭转结束时出现,位置 1 和 2 对应的峰值温度分别约为 60 和 120 °C,扭转结束后温度快速下降,而对于其它 3 个试样,温度峰值的出现相对于扭转结束时间出现了一定的滞后性,并且随着总的扭转周期数的减少,温度曲线峰值出现的滞后性越来越明显。图 8b~8d 显示上述试样温度-时间曲线的峰值出现的时间依次约为 140, 110 和 75 s,滞后时间分别为 10, 20 和 25 s。出现上述滞后性的原因是在扭转变形结束时,试样内部产生的热量还继续向表面传导,使表面温度继续升高。

图 8 中的温度-时间曲线显示试样轴向中部位的温度值高于端部,表明中部产生的热量高于端部,并且两处的温度差值随着周期数的增加而增加。在本实验中,试样在扭转过程中的变形如图 1b 所示,图 1b 中显示扭转角 φ 随着距离试样下端的距离增加而增加,在底端处扭转角 φ 为零,如果采用扭转角 φ 来衡量变形量,则试样中部的变形量远高于下底端。如图 1a 所示,由于测温位置 1 和 2 分别位于试样的下底端和中部,由于两处的变形量存在明显的差异从而产生温度差。

金属在塑性变形过程中的变形功将转变为热,对于应变速率较低的静态变形,变形产生的热量通过热传导和对流等形式而散失,而对于金属的高速变形,

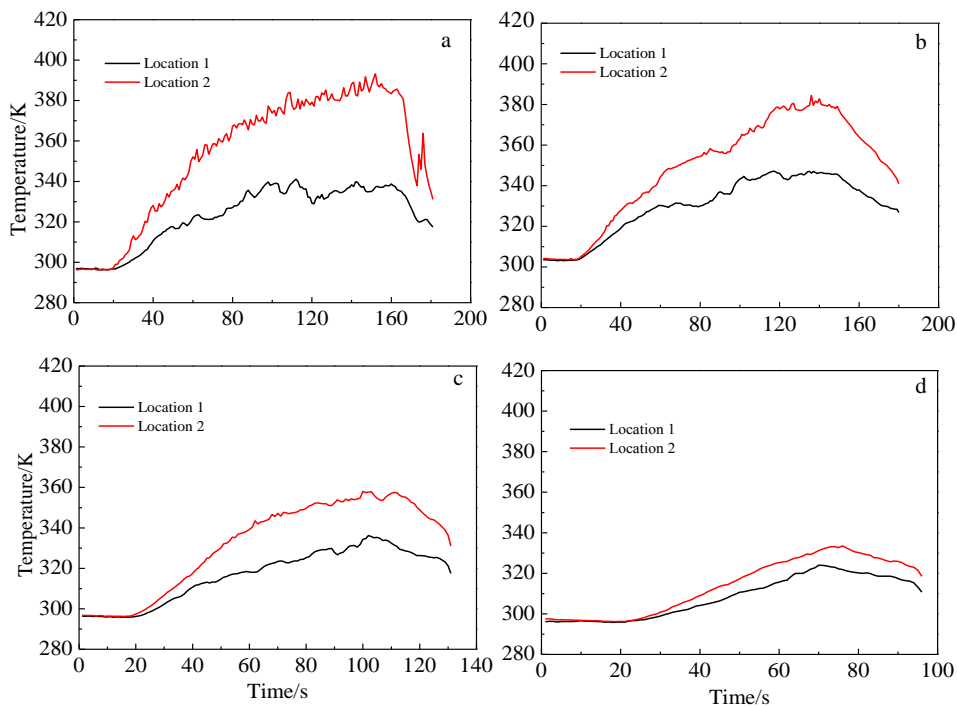


图 8 扭转试样的表面温度变化

Fig.8 Surface temperature variations of twisted samples for different total cycles: (a) 146 cycles, (b) 130 cycles, (c) 90 cycles, and (d) 50 cycles

由于变形产生的热量不能及时散失将会导致明显的升温现象^[17,18]。变形功产生的温度升高值可采用公式(3)进行计算:

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho c} \int_0^{\epsilon_p} \sigma d\epsilon_p \quad (3)$$

式中, σ 是内应力; ϵ_p 是塑性应变; ρ 是材料密度; c 是材料的比热; β 是能量转化率。

对于镁合金在 20 °C 的比热容 c 为 1148 J/kg K, 在中等应变速率下能量转化率为 0.73~0.75^[27, 28], 采用公式(3)计算镁合金在循环扭转变形过程产生的升温值, 图 9 显示了计算所得室温扭转试样在第 1 个周期内的温度变化, 可以看出温度值在整个扭转变形过程中并未单调增加, 在扭转方向改变的初期温度缓慢下降, 而后温度又单调上升。在每个扭转周期内, 当扭转角分别达到 $+\pi/4$ 和 $-\pi/4$ 时, 扭转方向开始改变, 此时对于应力来说是个卸载过程, 卸载变形要消耗一部分前期的变形能从而导致温度降低。

图 9 中显示在室温扭转的第 1 个周期内, 变形能产生的升温约为 2.5 °C, 如果用该周期内的升温结果来代替后续的每个周期内的升温值, 则累积升温值为 2.5 °C 乘以周期数, 而图 8a 的室温扭转变形的实测温度结果显示, 当扭转周期达到 146 周时, 试样表面的最高温度值约为 120 °C, 远低于理论预测值。实际上, 试样在扭转变形过程中由形变能产生的热量会通过热传导、辐射和对流等形式而散失一部分, 并且所测得的温度为试样表面温度, 试样表面直接与空气接触, 辐射和对流传热方式将会使表面温度低于试样内部温度, 上述因素使实测温度远低于理论预测值。

2.4 扭转变形过程中的组织及组织演变

不同温度条件下的扭转变形后的极图如图 10 所示, 与图 4 中的原始棒材的极图对比可以看出, 试样扭转变形后还保持为丝织构, 即晶粒的 C 轴与棒材的径向一致并沿圆周均布, 而 {10 $\bar{1}0$ } 极图则发生明显变化, 图 4 显示变形前 {10 $\bar{1}0$ } 柱面与棒材的轴向的夹角约为 30° 的夹角, 对应着 {11 $\bar{2}0$ } \perp ED 织构, 而图 10 显示试样在扭转变形后为 {10 $\bar{1}0$ } \perp ED 织构, 该柱面织构的明显变化意味着在上述扭转变形过程中有大量的柱面滑移系启动。

上述扭转过程中晶粒取向的变化的示意图如图 11 所示, 对于 hcp 晶体结构, 沿 C 轴方向的原子堆垛次序为 ABAB..., 图 11a 显示了原始挤压棒材晶粒中沿径向 (C 轴方向) 观察到的 A 层和 B 层原子的原子排列方式, 在纯剪切应力作用下, 扭转变形过程柱面滑移系启动, 则变形后的沿径方向的原子排列方式如图 11b 所示。

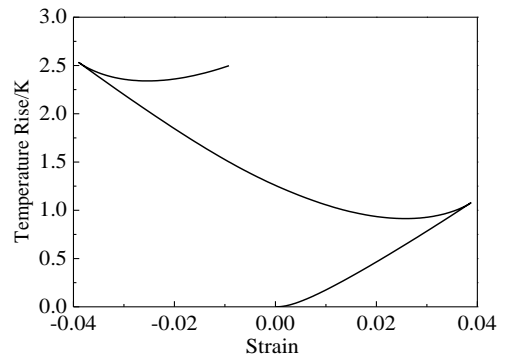


图 9 室温扭转试样在单个周期内的温升曲线
Fig.9 Temperature-strain curve during a single cycle of torsion at room temperature

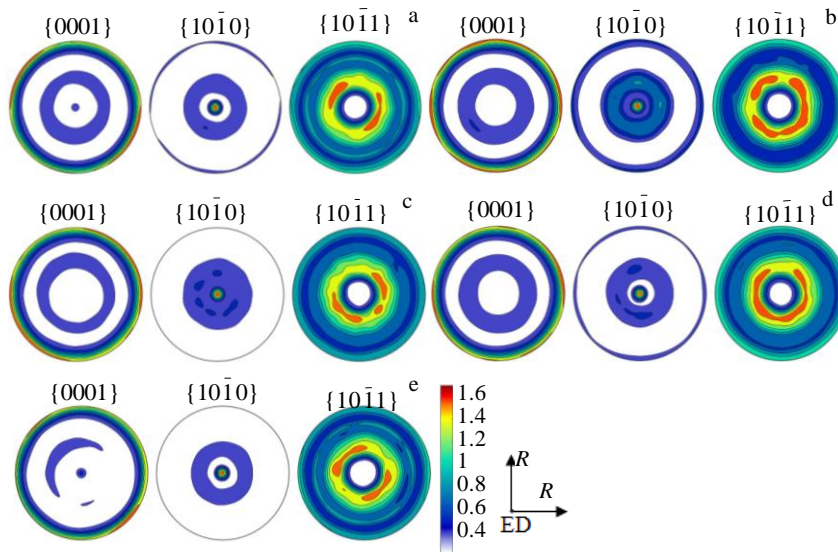


图 10 扭转变形后的极图

Fig.10 Pole figures of samples twisted at different temperatures: (a) 298 K, (b) 373 K, (c) 443 K, (d) 503 K, and (e) 573 K

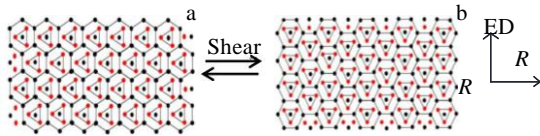


图 11 扭转过程改变晶粒取向示意图

Fig.11 Schematic of grain orientation variation during torsion: (a) initial rod and (b) after torsion (black dots represent atoms in the A layer, red dots represent atoms in the B layer)

循环扭转变形后试样的微观组织如图 12 所示,可以看出对于室温和 100 °C 下的扭转试样,晶粒中出现了一定量的拉伸孪晶带,而对于其它温度下的扭转试样,微观组织中没有出现拉伸孪晶。

室温及 373 K 扭转试样的晶粒取向的 EBSD 测试结果如图 13 所示,图 13c 和 13d 显示扭转后的晶粒内产生拉伸孪晶界,其中室温扭转试样中的孪晶界数量明显多于加热扭转试样,在图 13a 和 13b 中选取部分

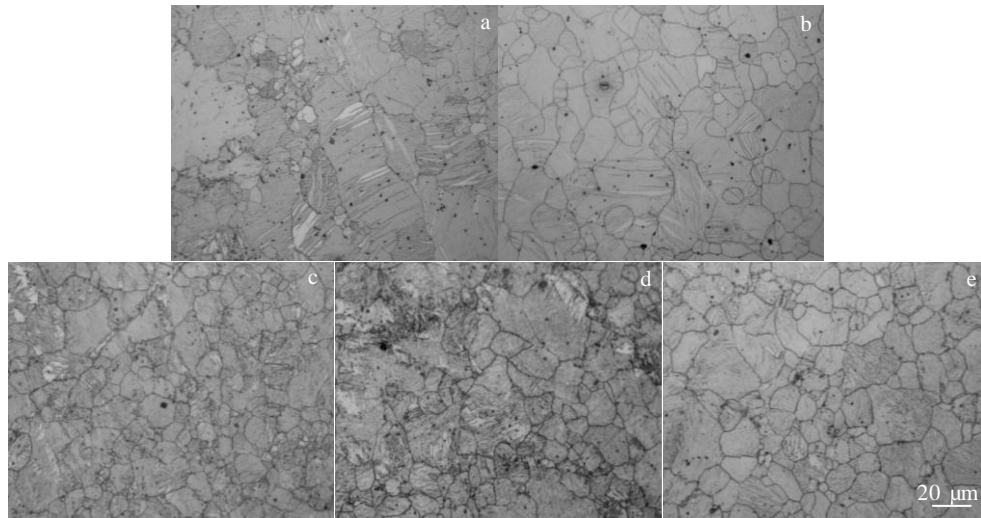


图 12 扭转试样微观组织

Fig.12 Microstructures of samples twisted at different temperatures: (a) 298 K, (b) 373 K, (c) 443 K, (d) 503 K, and (e) 573 K

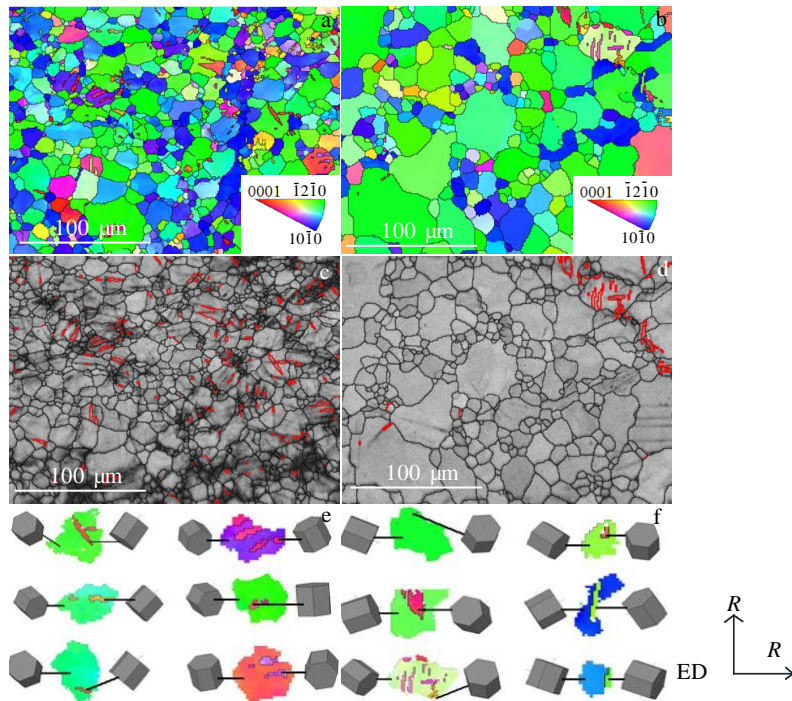


图 13 扭转试样的 EBSD 测试结果

Fig.13 EBSD dealing results of twisted samples: (a, b) grain orientation micrograph of samples twisted at room temperature and 373 K, (c, d) twin boundary distributions of samples twisted at room temperature and 373 K, (e, f) some twin bands and their parent grains orientation of samples twisted at room temperature and 373 K; (a, c, e) room temperature; (b, d, f) 373 K

含有孪晶的晶粒,分析晶粒及其内部孪晶带的取向特征,取向特征显示结果如图 13e 和 13f 所示,可以看出拉伸孪晶启动后,多数晶粒内的孪晶带的 C 轴接近平行于 ED,也有少部分晶粒内孪晶带的 C 轴接近垂直于 ED。

上述扭转变形过程中拉伸孪晶启动对晶粒取向的改变如图 14 所示,即在剪切应力状态作用下,不同孪晶变体的启动对晶粒取向产生 2 种改变,其中多数晶粒在孪晶启动后,晶粒 C 轴由垂直于 ED 改变为平行于 ED,少数晶粒在拉伸孪晶启动后晶粒 C 轴还是垂直于 ED。

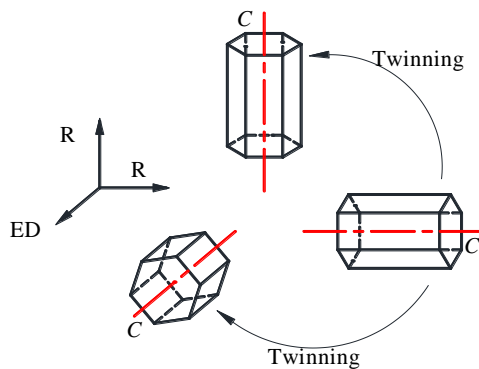


图 14 扭转过程中孪晶改变晶粒取向示意图

Fig.14 Schematic illustration of grain orientation variation by twinning during torsion

3 结 论

1) 镁合金循环扭转过程的应力应变滞回线呈对称特征,意味着滑移是变形过程中主要的微观变形模式,扭转试样的微观组织中发现有拉伸孪晶启动。

2) 循环扭转变形过程中变形功产生的热量使试样温度升高,导致滞回线上的峰值应力在循环第 10 周期后呈现线性下降的特征。

3) 循环扭转变形过程中温升值的计算结果表明,在单个周期内,温度非单调升高,但在整个循环扭转变形过程中,变形功产生的热量使试样的温度不断升高。

4) 循环扭转变形使试样由变形前的 $\{10\bar{2}0\} \perp ED$ 柱面织构转变为变形后的 $\{10\bar{1}0\} \perp ED$ 柱面织构,但基面垂直于径向的基面织构特征没有改变。循环扭转变形过程中的拉伸孪晶启动使晶粒取向产生 2 种改变。

参考文献 References

[1] Al-Samman T, Gottstein G. *Materials Science and Engineering*

A[J], 2008, 488: 406

[2] Liang Hao(梁 浩), Pan Fusheng(潘复生), Zhang Fangju(张方举) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(7): 1393

[3] Liu Qing(刘 庆). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2010, 46(11): 1458

[4] Wang W R, Huang L, Tao K H *et al. Materials and Design*[J], 2015, 87: 835

[5] Luo L, Xiao Z Y, Huo Q H *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 740: 180

[6] Ren L M, Zhang S H, Palumbo G *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 499: 40

[7] Huang G S, Zang L, Song Bo *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20: 608

[8] Ghaffari Tari D, Worswick M J, Winkler S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2013, 213: 2337

[9] Hu Y M, Lai Z Y, Zhang Y C. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 187-188: 649

[10] Zhang D Q, Chen G P. *Physics Procedia*[J], 2012, 25: 125

[11] Geng C J, Wu B L, Du X H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 560: 618

[12] Wu L, Jain A, Brown D W *et al. Acta Materialia*[J], 2008, 56: 688

[13] Wang C, Luo T J, Zhou J X *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2017, 96: 178

[14] Wang F H, Dong J, Jiang Y Y *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 561: 403

[15] Guo X Q, Wu P D, Qiao H *et al. Scripta Materialia*[J], 2013, 69: 319

[16] Biswas S, Beausir B, Tóth L S *et al. Acta Materialia*[J], 2013, 61: 5263

[17] Song B, Guo N, Xin R L *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2016, 650: 300

[18] Beausir B, Tóth L S, Neale K W *et al. Acta Materialia*[J], 2007, 55: 2695

[19] Zhang J X, Yu Q, Jiang Y Y *et al. International Journal of Plasticity*[J], 2011, 27: 768

[20] Yu Q, Zhang J X, Jiang Y Y *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2011, 33: 437

[21] Bentachfine S, Pluvinage G, Tóth L S *et al. Engineering Fracture Mechanics*[J], 1996, 54(4): 513

[22] Li H, Kang G Z, Liu Y J *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2016, 671: 70

[23] Albinmoussa J, Jahed H, Lambert S *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2011, 33: 1127

- [24] Albinmousa J, Jahed H, Lambert S *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2011, 33: 1403
- [25] Jahed H, Albinmousa J. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*[J], 2014, 73: 97
- [26] Jahed H, Albinmousa J. *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 546: 119
- [27] Feng F, Huang S Y, Meng Z H. *Materials & Design*[J], 2014, 57: 10
- [28] Ulacia I, Salisbury C P, Hurtado I *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 830

Mechanical Properties and Texture Evolution of Extruded AZ31 Magnesium Alloy Rods Under Cyclic Torsion

Song Guangsheng¹, Zhang Jianqiang¹, Zhang Shihong²

(1. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110036, China)

(2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: This paper investigated the mechanical properties and texture evolution of extruded AZ31 magnesium alloy rods under cyclic torsion. Thus, cyclic torsion tests were performed at different temperatures such as room temperature, 373, 443, 503, and 573 K. Measured mechanical properties of magnesium alloy cyclic torsion reveal that stress-strain hysteresis loops of cyclic torsions are strictly symmetric which means that the dominant deformation mechanism is sliding. Additionally, due to the thermal influence of cyclic torsion, the peak stresses in stress-strain hysteresis loops are decreased with the increase in cycle number. The grain orientations are changed due to the activation of prismatic slips. The texture of $\{11\bar{2}0\}$ prismatic planes perpendicular to ED in initial rods is transformed into the texture of $\{10\bar{1}0\}$ prismatic planes after cyclic torsion. Also, two types of grain orientation variations occur because of the activation of extension twin.

Key words: extruded AZ31 magnesium alloy rod; cyclic torsion; hysteresis loop; texture; extension twin

Corresponding author: Song Guangsheng, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110036, P. R. China, Tel: 0086-24-89724198, E-mail: songgs17@163.com