

AZ31 镁合金热压缩过程中晶粒取向和组织的演变

刘筱¹, 娄燕^{1,2}, 李落星¹, 朱必武¹, 何凤化¹

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082;

2. 深圳大学 机电与控制工程学院, 深圳 518060)

摘要: 利用电子背散射衍射(EBSD)取向成像技术分析 AZ31 铸态镁合金在不同温度和真应变下热压缩的晶粒取向和组织特点, 从晶粒取向和组织角度分析不同温度下其动态再结晶(DRX)的类型。结果表明: 在热压缩过程中, 350 °C时, AZ31 铸态镁合金表现为连续动态再结晶(CDRX)特征, 新晶粒取向与基体相似, 具有较强的{0002}基面织构, 以基面滑移为主; 500 °C时, 为旋转动态再结晶(RDRX)特征, 真应变为 0.5 时, 新晶粒取向与基体偏转成一定角度, 具有两种主要的基面织构, 由于动态再结晶的定向形核、择优核心长大和旋转动态再结晶造成这两种基面织构弱于 350 °C时的{0002}基面织构; 且随着真应变的增加, 其中一种织构由于滑移系的改变而逐渐消失。

关键词: AZ31 镁合金; 晶粒取向; 组织; 动态再结晶

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Grain orientation and texture evolution of AZ31 magnesium alloy during hot compression

LIU Xiao¹, LOU Yan^{1,2}, LI Luo-xing¹, ZHU Bi-wu¹, HE Feng-yi¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,

Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The characteristics for grain orientation and texture of AZ31 magnesium alloy were investigated by the electron back scattering diffraction (EBSD) technique at different temperatures and strains during hot compression. The types of dynamic recrystallization (DRX) for AZ31 magnesium alloy under different temperatures were researched based on the grain orientation and texture. The results show that, at 350 °C, it displays the characteristics of continue dynamic recrystallization (CDRX). The new grains are similarly orientated to the basal grain, which has strong {0002} basal texture and is mainly on the basal slip. At 500 °C, it shows the characteristics of rotation dynamic recrystallization (RDRX). At a true strain of 0.5, the orientation of new grain deviates from the orientation of basal grain. The oriented nucleation, preferred core growth and RDRX attribute to the two different main basal textures, which is weaker than that of {0002} basal texture at 350 °C. With the true strain increasing, one of the basal textures gradually disappears for altering slip systems.

Key words: AZ31 magnesium; grain orientation; texture; dynamic recrystallization

镁合金具有密度低、强度高、回收易等优点, 近年来作为轻质结构材料被逐渐用于汽车、交通、电子

及其它民用产品等领域^[1-6]。但是较差的室温塑性变形能力制约变形镁合金的发展, 如何较大程度地改善其

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075132); 中国博士后科学基金资助(2011M500124); 教育部长江学者与创新团队发展计划资助项目(531105050037); 湖南省杰出青年基金资助项目(09JJ1007)

收稿日期: 2011-07-25; 修订日期: 2011-11-12

通信作者: 娄燕, 教授, 博士; 电话/传真: 0755-26534850; E-mail: susanlou121@163.com

塑性变形能力成为目前关注的焦点。常用方法是晶粒细化、织构强化或软化和合金化等。动态再结晶是镁合金晶粒细化的重要方式,其主要类型包括 CDRX、RDRX 和非连续动态再结晶(DDRX)等^[2, 7-9];织构是由于滑移和孪生使晶粒取向转动形成的^[1],且分布和类型与再结晶类型相关,同时其存在对力学性能各向异性有巨大影响^[10]。而变形过程中,镁合金的织构、取向和动态再结晶方式都随着变形温度、真应变、应变速率、应力状态和挤压比等外部条件的变化而有所区别。因此,研究镁合金在不同的外部条件下的织构、晶粒取向及动态再结晶类型对生产过程中获得最优晶粒取向、织构和提高力学性能有很重大的意义,并为微观组织模拟提供重要依据。通过一般的金相图谱不能判断织构、取向及动态再结晶类型;传统研究织构的方法主要是采用 X 射线衍射和中子衍射,它们只能得到材料宏观的晶体择优取向的平均结果。但是采用 EBSD 技术能得到材料宏观择优取向的同时得到单个晶粒的取向以及相邻晶粒的取向差^[11]。所以,EBSD 对分析动态再结晶、取向形核、择优核心长大和变形过程中织构和取向的演变等提供了有力的手段。

本文作者以热压缩过程中 AZ31 铸态镁合金作为研究对象,通过 EBSD 技术分析在相同应变速率下不同温度和真应变的晶粒取向、取向差分布及织构的特点,从而进一步分析不同温度下镁合金的再结晶方式。

1 实验

实验材料采用经过固溶处理的 AZ31 半连续铸造镁合金,成分为 Al 2.8%~3.2%、Mn 0.2%~1%、Zn 0.8%~1.2%、 $w(\text{Si}) \leq 0.05\%$ 、 $w(\text{Cu}) \leq 0.05\%$ 、 $w(\text{Ni}) \leq 0.005\%$ 、 $w(\text{Fe}) \leq 0.005\%$ 、杂质 $\leq 0.3\%$ 、余量为 Mg(质量分数)。将固溶后的合金加工成直径为 10 mm,高为 12 mm 的圆柱体试样。压缩实验在 Gleeble-3500 热模拟机上进行,应变速率为 0.03 s^{-1} ,设定的初始温度分别为 350 和 500 °C,真应变分别为 0.5 和 1.0。

热压缩后的样品采用线切割机平行于压缩方向在顶部圆直径处进行线切割,并将得到的平行于压缩方向的面进行打磨抛光。采用德国蔡司 Axiovert 40 MAT 金相显微镜进行金相组织观察和 FEG-SEM Zeiss Super-55 及其 HKL-EBSD 系统上进行织构和取向分布的观察和分析。

2 结果与分析

2.1 取向分析

图 1 所示为经 500 °C 变形时不同真应变下的取向成像分析结果。图 1 中(a1)和(b1)为用不同颜色表示所有欧拉角的取向成像图,显示晶粒大小和分布,图中每种颜色代表一种晶体学取向,颜色相近表示晶粒取向相近。图 1(a2)、(a3)、(b2)和(b3)所示分别为对应于取向成像图中晶粒的取向分布极图。图 1(a1)和(b1)表明,随着真应变的增加,晶粒细化,在垂直于热压缩轴向的细长条晶粒两侧生长出等轴细晶的混合组织,同时具有与基体不同的晶体学取向。这与唐伟琴等^[10]研究一致,热压缩过程中,随着真应变的增加发生了 DRX,同时在变形过程中镁合金择优取向,所以再结晶形核长大的晶粒旋转成不同的晶粒取向。图 1(a2)和 1(b2)是 RD 和 ND 面的 {0002} 取向分布极图。根据热压缩变形的特点,将样品转动 90°后得到 TD 和 ND 面的 {0002} 取向分布极图(见图 1(a3)和(b3))。比较图 1(a2)、(a3)、(b2)和(b3),当真应变为 0.5 时,新生晶粒的 {0002} 晶面与 RD 平行,而基体晶粒的 {0002} 晶面与 TD 平行;当真应变为 1 时,大部分新生晶粒在长大过程中取向发生转动,其 {0002} 晶面与基体晶粒一样趋近平行于 TD。这说明随着真应变的增加,新生晶粒的 {0002} 面会由于受力的特点转动到与受力方向垂直,这与晶体变形原理一致,在外加应力场的作用下,基面滑移使变形晶粒基面转向与压应力方向垂直^[12]。

图 2 所示为在 350 °C 时真应变为 0.5 的取向成像图及其对应的再结晶分布图、晶粒取向分布图和再结晶取向差分布图。其中图 2(a)为取向成像图;图 2(b)所示为再结晶分布图,其中黄色表示的是亚结构,红色表示的是形变,蓝色表示的再结晶;图 2(c)所示为晶粒取向分布图;图 2(d)所示为取向差分布图。比较图 2(a)、(b)、(c)和(d)可知,再结晶主要是发生在形变处,同时形变的晶粒与再结晶晶粒取向相近,说明新晶粒是通过亚晶界逐渐转动而形成的,即是在晶界处形成的新晶粒是基体取向的偏转的结果(图 2(d)表明有 13%是小角度晶界),是一种典型的 CDRX^[13]。

图 3 所示为在真应变为 0.5 时不同温度下的晶粒取向分布极图,其与图 1 中的晶粒取向成像图对应。图 3(a)和(b)所示均是 TD 和 ND 面的 {0002} 晶粒取向分布极图。比较两图可知,350 °C 时,新晶粒和基体的 {0002} 面都趋近于与 TD 平行;500 °C 时,由前面

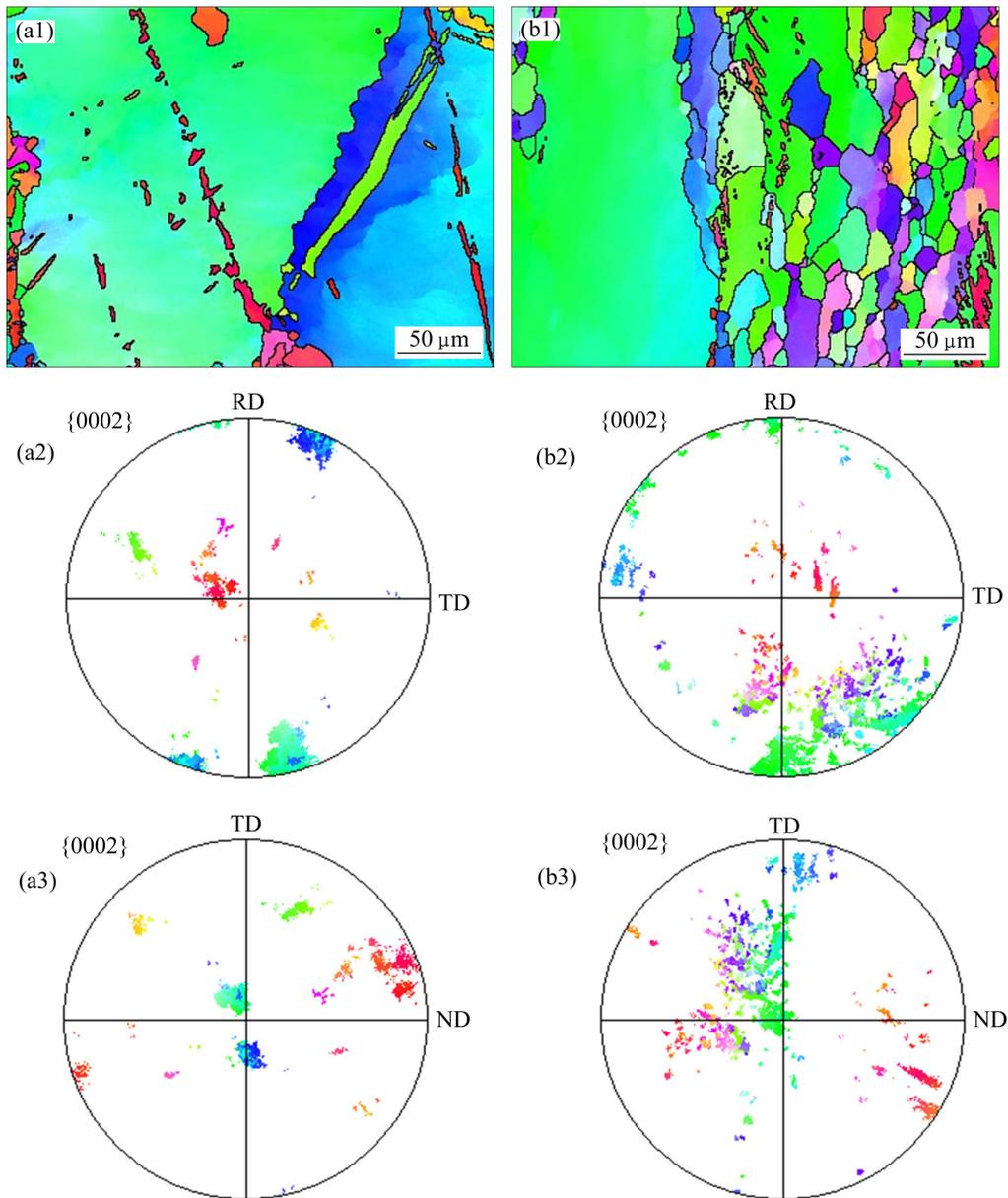


图 1 应变速率为 0.03 s^{-1} 、温度为 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时真应变对晶粒取向变化的影响

Fig. 1 Influence of true strain on orientation evolution at strain rate of 0.03 s^{-1} and temperature of $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$: (a1) Orientation map at true strain of 0.5; (b1) Orientation map at true strain of 1.0; (a2) Pole figure at true strain of 0.5; (b2) Pole figure at true strain of 1.0; (a3) Pole figure at true strain of 0.5; (b3) Pole figure at true strain of 1.0

图 1(a2) 知新晶粒的 $\{0002\}$ 趋近于与 RD 平行。这是由两种温度下不同的形核机制引起的。 $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 主要是亚晶旋转的 CDRX^[1]; $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 热压缩过程中变形使基体进一步趋向垂直于压应力方向从而处于不利的取向, 这时通过局部剪切变形可使晶粒取向发生变化而使基面滑移变得有利, 这种现象称为 RDRX^[1-2, 9]。

图 4 所示为 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同真应变的取向差分布图, 均与图 1 中的晶粒取向成像图对应。比较图 4(a) 和 (b) 可知, 随着真应变的增加, 大于 80° 的大角度晶

界由总数的 31% 逐渐减少到 9.6%, 小于 60° 的晶界增加, 且晶界角度趋于均匀分散在 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 这与图 1 分析结果相同。

图 5 所示为在真应变为 0.5 时不同温度下的取向差分布图, 其均与图 1 中的晶粒取向成像图对应。图 5(a) 和 (b) 分别是温度为 $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的取向差分布图。图 5(a) 表明, $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 含有 10% 小角度晶界和集中在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的大角度晶界。图 5(b) 表明, $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温下, 接近 31% 的晶界角度超过 80° 。这也与前

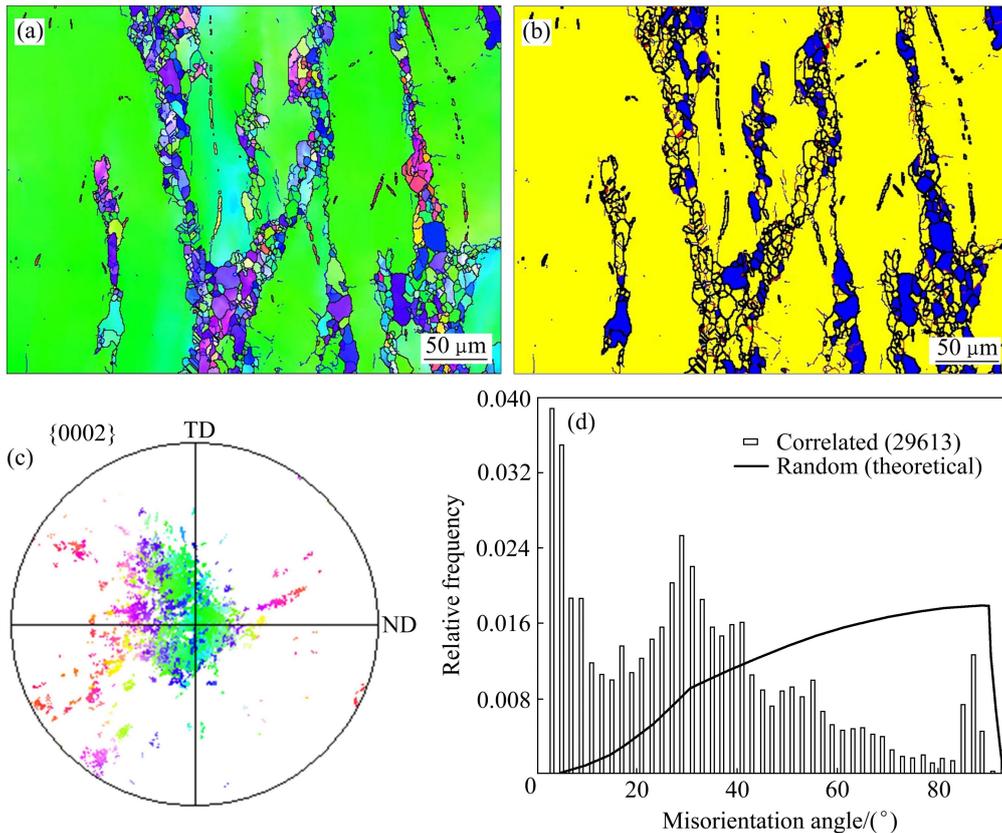


图2 温度为 350 °C，真应变为 0.5 时取向成像图、再结晶分布图、晶粒取向分布图和取向差分布图

Fig. 2 Orientation map, recrystallization distribution map, pole figure and misorientation distribution map at temperature of 350 °C and true strain of 0.5: (a) Orientation map; (b) Recrystallization distribution map; (c) Pole figure; (d) Misorientation distribution map

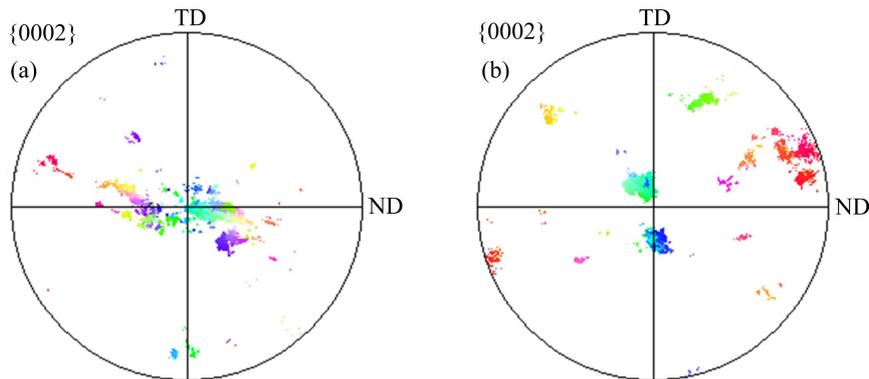


图3 应变速率为 0.03 s⁻¹、应变为 0.5 时温度对晶粒取向变化的影响

Fig. 3 Influence of temperature on orientation evolution at strain rate of 0.03 s⁻¹ and true strain of 0.5: (a) Pole figure at 350 °C; (b) Pole figure at 500 °C

面图2中分析的结果相符，由于 500 °C 的高温下，其主要是旋转动态再结晶，开始时局部剪切变形使晶粒取向发生变化来达到最佳滑移方向，使得新晶粒具有与原始晶粒不同的晶粒取向分布特点，从而形成大角度晶界，而 350 °C 时发生连续动态再结晶，新晶粒主要是由于亚晶界的逐渐转动形成的，所以以小角度晶界和 30~40 °C 的晶界为主。

2.2 织构分析

图6所示为真应变为 0.5 时不同温度的金相图和极图。图6(a)和(b)所示为金相图。图6(c)和(d)所示为极图，颜色越深的红色表示极密度越大(参见电子版)。图6(a)和(b)均表现了动态再结晶的特征，但是 500 °C 的晶粒比 350 °C 的细小，并且晶内有孪晶。根据文献[4, 10, 14]，当存在 *c* 轴方向拉应力或垂直于 *c* 轴方向

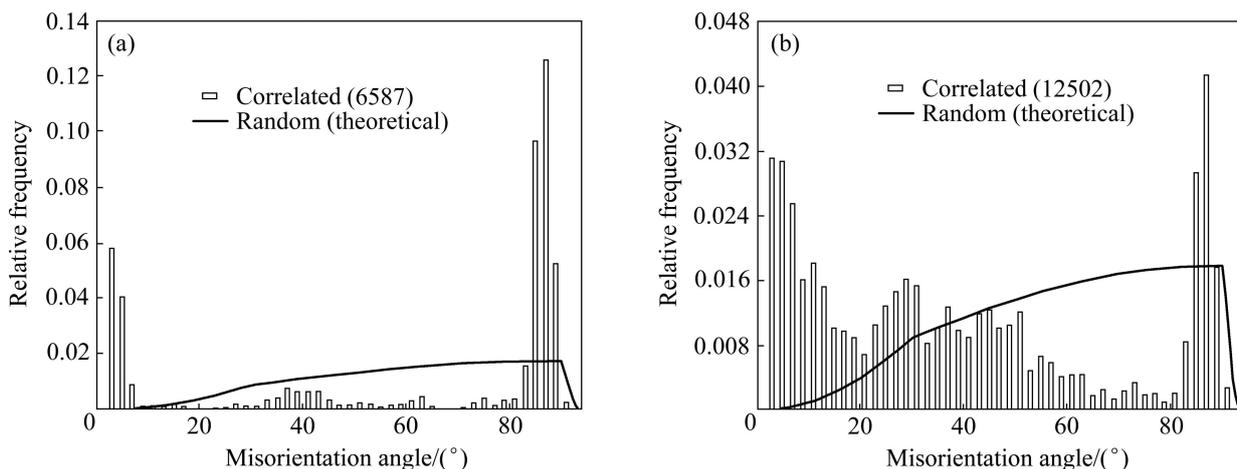


图 4 应变速率为 0.03 s^{-1} 、温度为 500 °C 时温度对取向差分布变化的影响

Fig. 4 Influence of temperature of misorientation evolution at strain rate of 0.03 s^{-1} and a temperature of 500 °C : (a) Misorientation distribution map at true strain of 0.5; (b) Misorientation distribution map at true strain of 1

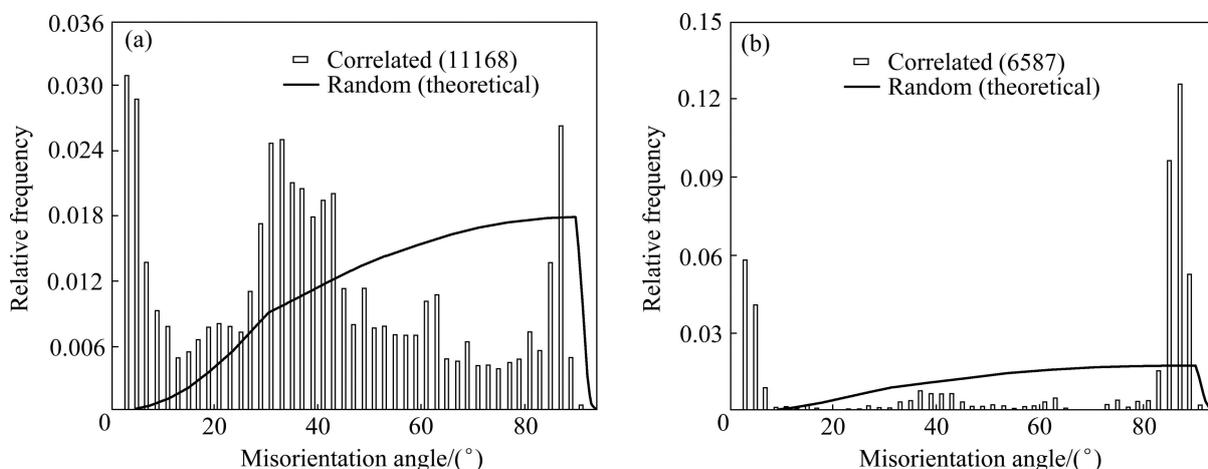


图 5 应变速率为 0.03 s^{-1} 、真应变为 0.5 时温度对取向差分布变化的影响

Fig. 5 Influence of temperature of misorientation evolution at strain rate of 0.03 s^{-1} and true strain of 0.5: (a) Misorientation distribution map at 350 °C ; (b) Misorientation distribution map at 500 °C

的压应力分量时, $\{10\bar{1}2\}$ 孪生发生。结合图 1 和图 3 分析图 6(b)表明, AZ31 镁合金开始变形时采用 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生, 重新旋转基面的取向, 同时新的小的再结晶晶粒在扭转区域形核, 这是一种 RDRX 的机制^[2, 13]。图 6(a)和(b)表明, 镁合金在热压缩过程中主要是基面织构, 温度为 350 °C 的极密度(100~120)比 500 °C 的极密度(50~60)大, 这是由于随着动态再结晶的程度的增加, 织构由于择优取向和择优核心长大等原因减弱。极图表明, 350 °C 具有很强的 $\{0002\}$ 基面织构, 但是 500 °C 时有两种较强的织构, 这是由于随着变形温度的升高, 原子的活动能力增强, 柱面和锥面等潜在的滑移系被激活, 且滑移系之间的 CRSS 差值减小, 结

果使得镁合金的组织组成变得复杂, 各种类型的织构的锋锐程度发生了变化^[1, 15]。所以 500 °C 时, 不仅发生基面滑移, 也发生了 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生、锥面滑移和柱面滑移, 最后形成了有两种较强的基面织构。

图 7 所示为 500 °C 下不同真应变的极图。图 7(a)和(b)所示分别是真应变为 0.5 和 1.0 的极图。分析图 7(a)和(b)表明, 随着真应变的增加, 织构减弱, 同时逐渐从 2 种不同的基面织构减弱到一种基面织构。原因之一是由于动态再结晶过程中定向形核和核心长大的择优生长; 原因之二是随着真应变的增加, 滑移系由 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生、柱面和锥面滑移为主转变成基面滑移为主。

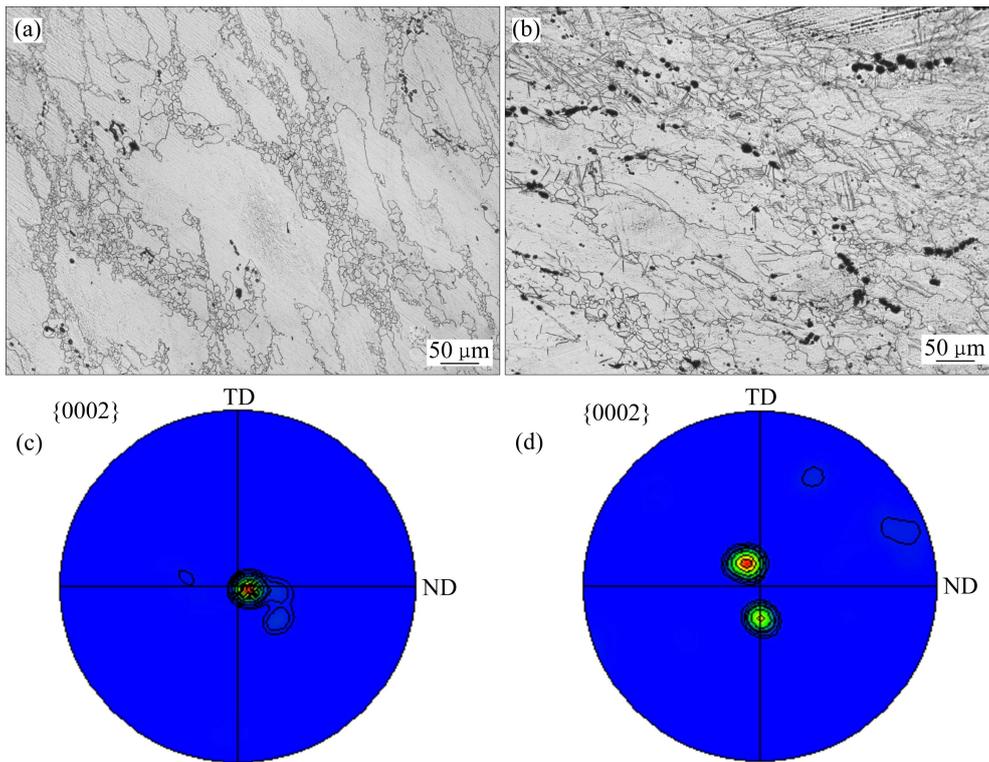


图6 应变速率为 0.03 s^{-1} 、应变为 0.5 时温度对组织和微观组织的影响

Fig. 6 Influence of temperature on texture and microstructure at strain rate of 0.03 s^{-1} and true strain of 0.5: (a) Microstructure at $350 \text{ }^\circ\text{C}$; (b) Microstructure at $500 \text{ }^\circ\text{C}$; (c) Pole figure at $350 \text{ }^\circ\text{C}$; (d) Pole figure at $500 \text{ }^\circ\text{C}$

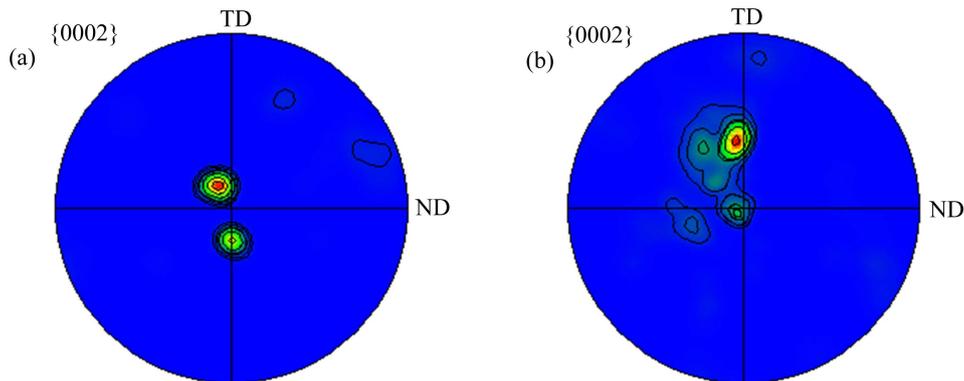


图7 应变速率为 0.03 s^{-1} 、温度为 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时真应变对组织的影响

Fig. 7 Influence of true strain on texture at strain rate of 0.03 s^{-1} and temperature of $500 \text{ }^\circ\text{C}$: (a) Pole figure at true strain of 0.5; (b) Pole figure at true strain of 1

3 结论

1) AZ31 铸态镁合金在热压缩过程中, $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 新晶粒取向与基体相似, 含有 10% 的小角度晶界和集中在 $30^\circ\sim 40^\circ$ 左右的大角度晶界; $500 \text{ }^\circ\text{C}$, 真应变为

0.5 时, 新晶粒取向与基体偏转成一定角度, 其中有 31% 是大于 80° 的大角度晶界, 随着真应变的增加新晶粒旋转长大到与基体相似。

2) AZ31 铸态镁合金在热压缩的过程中, $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 表现为典型的连续动态再结晶(CDRX)的特征; $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 表现为旋转动态再结晶(RDRX)的特征。

3) AZ31 铸态镁合金在热压缩的过程中主要是基

面织构。350 °C时, 具有很强的{0002}基面织构, 以基面滑移为主; 500 °C时, 真应变为0.5时由于发生了{10 $\bar{1}$ 2}孪生、柱面和锥面滑移形成了两种较强的基面织构。这两种基面织构由于动态再结晶的定向形核、择优核心长大和旋转动态再结晶作用较350 °C时候弱。随着真应变的增加, 两种织构都逐渐减弱, 并且其中一种织构趋于消失。其原因之一是滑移系转变为以基面滑移为主; 原因之二是动态再结晶的程度增加。

REFERENCES

- [1] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
CHEN Zhen-hua. Wrought magnesium alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [2] VALLE J A, PRADO M, RUANO O A. Texture evolution during large-strain hot rolling of the Mg AZ61 alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 355: 68–78.
- [3] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium properties-applications-potential[J]. *Material Science and Engineering A*, 2001, 302: 37–45.
- [4] YI S B, DAVIES C H J, BROKMEIE H G, BOLMARO R E. Deformation and texture evolution in AZ31 magnesium alloy during uniaxial loading[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54: 549–562.
- [5] AKHTAR S K, AMIT P, THOMAS G H, RAJA K M. Mechanical response and texture evolution of AZ31 alloy at large strains for different strain rates and temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 2011, 27: 688–706.
- [6] AGHION E, BRONFIN B, ELIEZER D. The role of the magnesium industry in protecting the environment[J]. *Materials Processing Technology*, 2001, 117: 381–385.
- [7] 刘楚明, 刘子娟, 朱秀荣, 周海涛. 镁及镁合金动态再结晶研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(1): 1–12.
LIU Chu-ming, LIU Zi-juan, ZHU Xiu-rong, ZHOU Hai-tao. Research and development progress of dynamic recrystallization in pure magnesium and its alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metal*, 2006, 16(1): 1–12.
- [8] GOURDET S, MONTHEILLET F. A model of continuous dynamic recrystallization[J]. *Acta Mater*, 2003, 51: 2685–2699.
- [9] ION S E, HUMPHREYS F J, WHITE S H. Dynamic recrystallization and the development of microstructure during the high temperature deformation of magnesium[J]. *Acta Metallurgica*, 1982, 30: 1909–1919.
- [10] 唐伟琴, 张少睿, 范晓慧, 李大永, 彭颖红. AZ31 镁合金的组织对其力学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(3): 371–377.
TANG Wei-qin, ZHANG Shao-ru, FAN Xiao-hui, LI Da-yong, PENG Ying-hong. Texture and its effect on mechanical properties of AZ31 magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(3): 271–277.
- [11] 毛卫民. 金属材料的晶体学织构与各向异性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
MAO Wei-min. Crystallograph textures and anisotropy in metals[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [12] 郭强, 严红革, 陈振华, 吴远志, 陈捷. AZ80 镁合金多向锻造变形过程中晶粒取向的演变[J]. *金属学报*, 2007, 43(6): 619–624.
GUO Qiang, YAN Hong-ge, CHEN Zhen-hua, WU Yuan-zhi, CHEN Jie. Evolution of the grain orientation of AZ80 magnesium alloy during multiple forging process[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, 43(6): 619–624.
- [13] 杨平. 电子背散射衍射技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
YANG Ping. Technology and applications of electron backscatter diffraction[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [14] 赖祖涵. 金属的晶体缺陷与力学性质[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
LAI Zu-han. Crystal defect and mechanical property of metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988.
- [15] 陈振华, 夏伟军, 程永奇, 傅定发. 镁合金织构与各向异性[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(1): 1–11.
CHEN Zhen-hua, XIA Wei-jun, CHEN Yong-qi, FU Ding-fa. Texture and anisotropy in magnesium alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(1): 1–11.

(编辑 李艳红)