文章编号: 1004-0609(2014)07-1700-07

## 初始取向对大应变轧制 AZ31 镁合金板材 显微组织和力学性能的影响

#### 董 勇,刘吉兆

(湖南工学院 机械工程学院, 衡阳 421002)

**摘 要**:采用大应变轧制技术对轧制面与挤压板材 ED-TE 面分别成 90°、45°和 0°的 AZ31 镁合金板材进行加工, 研究初始取向对板材显微组织和力学性能的影响。结果表明:孪生诱发动态再结晶是大应变轧制过程中主要的 再结晶机制,动态再结晶的发生使合金晶粒细化、力学性能大幅提高。轧制过程中孪生与板材初始取向密切相 关,通过改变初始取向可控制板材晶粒细化和强度改善效果。0°轧制试样大应变轧制过程中,大部分晶粒的 *c* 轴受压,基面滑移启动难度增加,孪生的作用增强,压缩孪晶密度增大,进而通过孪生诱发动态再结晶获得更 为细小的再结晶组织和更为优异的力学性能。压下量为 80%时,0°轧制板材的平均晶粒尺寸为 5 μm,抗拉强度、 屈服强度和伸长率分别为 311.4 MPa、202.6 MPa 和 26.9%。

关键词: AZ31 镁合金; 大应变轧制; 初始取向; 孪生; 动态再结晶; 力学性能 中图分类号: TG146.2 **文献标志码**: A

## Effects of initial orientation on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets fabricated by large strain rolling

DONG Yong, LIU Ji-zhao

(School of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, China)

Abstract: Large strain rolling was carried out on AZ31 magnesium alloy with different orientations which was machined from an extruded sheet along angles of 90°, 45° and 0° to the ED-TE plane, and the effects of initial orientation on the microstructure and mechanical properties of the sheets were investigated. The result show that twin induced dynamic recrystallization (DRX) is the main DRX mechanism during large strain rolling, which consequently results in the grain refinement and improvement of mechanical properties. Twinning is sensitive to initial orientation during rolling, therefore, the grain refinement and improvement of mechanical properties can be controlled by alternating initial orientation. The basal slip is difficult to activate during large strain rolling of 0° specimen due to the compression stress applied on the *c*-axis of most grains. Therefore, the role of twinning enhanced, especially compression twinning, consequently results in much finer DRX grains and much better mechanical properties. The average grain size of 0° specimen at rolling reduction of 80% is 5  $\mu$ m, and the ultimate tensile strength (UTS), yield strength (YS) and elongation of the sheets are 311.4 MPa, 202.6 MPa and 26.9%, respectively.

Key words: AZ31 magnesium alloy; large strain rolling; initial orientation; twinning; dynamic recrystallization; mechanical properties

镁合金作为最轻的金属结构材料之一,具有比强 度和比刚度高,导热性、切削加工性和阻尼减振性能 好,电磁屏蔽性能强,且易于回收等优点,被誉为21 世纪最具发展前景的绿色工程材料。在航天航空、汽

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2014-01-09 通信作者: 董 勇,硕士; 电话: 0734-3452089; E-mail: dongyhngxy@163.com 车、电子电器等领域具有广泛的应用价值<sup>[1]</sup>。随着能 源和环境问题的日益突出,镁合金板材作为轻量化材 料越来越多的应用于汽车、飞机等交通工具<sup>[2]</sup>。但传 统的镁合金板材制备一般采用小应变多道次轧制,使 得镁合金板材的制备过程效率低、成本高,并且道次 间反复加热容易使变形组织粗化,从而使板材性能降 低,严重制约了镁合金板材的广泛应用<sup>[3]</sup>。

近年来,大应变轧制技术由于操作流程短、生产 效率高等特点广受关注,并且有望应用于工业化生 产<sup>[4]</sup>。该技术已成功的应用于制备晶粒组织细小、力 学性能优异的 AZ31<sup>[5-6]</sup>、AZ61<sup>[7]</sup>、AZ91<sup>[8]</sup>、ZK60<sup>[3, 9]</sup> 和 AM60<sup>[10]</sup>合金板材。由于镁合金大应变轧制特殊的 成形条件,其成形机理也与镁合金传统轧制存在较大 区别。研究表明:孪生和动态再结晶分别是镁合金大 应变轧制前期和后期的主要变形机制<sup>[3,9]</sup>,而孪生诱发 动态再结晶组织与孪晶密度、孪晶类型密切相 关[11-12]。因此,探明大应变轧制过程中孪生的影响因 素和控制方法对改善大应变轧制工艺具有重要的意 义。一般而言,影响孪生的因素包括变形温度、应变 速率、晶粒大小和晶粒取向等。到目前为止,已有研 究者对变形温度[3]和应变速率[9]对大应变轧制影响进 行了相关报道,但关于晶粒取向对大应变轧制影响的 研究还鲜有报道。本文作者以 AZ31 合金为研究对象, 采用大应变轧制技术对轧制面与挤压板材 ED-TE 面 分别成 90°、45°和 0°的板材进行加工,研究初始取向 对板材显微组织和力学性能的影响。

### 1 实验

实验用材料是 AZ31 镁合金,名义成分为 Mg 95.7%、Al 3.0%、Zn 1.0%、Mn 0.3%(质量分数)。合 金的熔炼在中频感应炉中进行,熔炼温度为 760 ℃, 采用 RJ-5 溶剂作为阻燃剂和净化剂,待合金熔化后进 行除渣、精炼、静置,并在 d 160 mm 钢模中浇注冷 却。将铸锭在 390 ℃进行均匀化处理,均匀化处理时 间为 10 h,将均匀化后的坯料加工成尺寸为 d 140 mm 的挤压锭坯。挤压试验在1 250 t的卧式挤压机上进行, 挤压筒的直径为 165 mm。挤压前将挤压锭坯和挤压 简加热至 350 ℃,以 10 mm/s 的速度进行挤压,得到 横截面为 80 mm×60 mm 的板材。将挤压板材的长度、 宽度和高度方向分别标记为 ED、TE 和 ND 方向,如

图1所示。将挤压板材置于350℃的温度下退火,退 火时间为1h。从退火挤压板材中截取尺寸为70 mm×50 mm×10 mm 的长方块试样用于轧制成形,轧 制面与挤压板材 ED-TD 面的夹角分别为 90°、45°和 0°(以下相应的称为 90°、45°和 0°试样),如图 1 所示。 轧制成形在 d 400 mm×600 mm 的轧机上进行,轧辊 温度为室温,板材加热温度为300℃,对板坏采用单 道次大应变轧制,道次压下量分别为40%和80%,轧 制方向为轧制试样的长度方向。采用 Olympus 金相显 微镜对金相组织进行观察,观察前经打磨、抛光、腐 蚀,所用腐蚀剂成分为1g草酸+1mL硝酸+98mL蒸 馏水;采用 Shimadzu XRD-6100 X 射线衍射仪对其宏 观织构进行测定。室温力学性能测试在 UTM5105 电 子万能试验机上进行,片状拉伸试样标距为15mm×4 mm×2 mm, 拉伸方向为轧制方向, 拉伸速度为 0.5 mm/min; 并采用 S-3400N 扫描电镜对断口形貌进行 分析。



图1 大应变轧制坯取样方向示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample orientations used for large strain rolling

## 2 结果与分析

#### 2.1 挤压板材组织特征

图 2 所示为 AZ31 镁合金挤压板材的显微组织。 从图 2(a)可以看出,合金在挤压变形过程中发生了明 显的动态再结晶,合金组织得到了一定的细化,再结 晶晶粒尺寸约为 10 μm;但在该挤压条件下合金再结 晶并不完全,仍有大量沿挤压方向被拉长且未发生再 结晶的大晶粒。经 350 ℃退火处理后,静态再结晶的 发生使合金变形组织基本消失,并且由于退火温度较 高且保温时间较长,再结晶晶粒长大较为明显,其组 织由晶粒尺寸在 50 μm 以上且大小不均的等轴晶粒组 成,如图 2(b)所示。

图 3 所示为退火处理后 AZ31 镁合金挤压板材 (0002)极图。从图 3 中可以看出,挤压板材中大部分 晶粒的(0002)基面都平行于 ED-TD 平面。研究表明, 金属塑性变形过程中晶粒的转动和定向流动是变形织 构形成的根本原因,镁合金基面滑移系启动的临界切 应力最低,在镁合金塑性变形时容易形成强烈的基面 织构<sup>[13]</sup>。镁合金在挤压变形过程中,单元体沿 ED 和 ND 方向分别承受轴向拉应力和径向压应力,在此作 用下滑移面转到与压应力垂直的方向上,即(0002)基 面平行于 ED-TD 平面。在随后的退火过程中,由于晶 粒的选择生长,因此,平行于 ED-TE 平面的晶粒容易



图 2 挤压态和退火态 AZ31 合金的显微组织

**Fig. 2** Microstructures of extruded (a) and annealed (b) AZ31 alloy



图 3 退火处理挤压板材(0002)极图



发生长大<sup>[14]</sup>,退火板材依然保持着较强的基面织构, 其(0002)基面平行于 ED-TD 平面。

#### 2.2 轧制板材组织

图 4 所示为不同取向和不同压下量大应变轧制 AZ31 合金板材的显微组织。从图 4 中可以看出,当 压下量为 40%时,初始晶粒内分布着大量相互交错的 孪晶,并且在孪晶上出现了再结晶晶粒,在没有孪晶 的区域基本没有观察到再结晶晶粒;对比图 4(a)、(c) 和(e)还可以发现,0°和 90°试样中的孪晶密度明显高 于 45°试样的,0°试样的再结晶程度明显高于 45°和 90° 试样的。当压下量为 80%时,3 种取向的板材组织均 为均匀细小的再结晶晶粒,但不同取向的板材组织均 为均匀细小的再结晶晶粒,但不同取向的板材再结晶 晶粒大小有所区别,其中 45°试样平均晶粒尺寸最大 约为 12 μm,0°试样平均晶粒尺寸最小约为 5 μm,如 图 4(b)、(d)和(f)所示。

镁合金的晶体结构为密排六方结构,缺少足够的 独立滑移系,孪生在镁合金塑性变形过程中作为主要 补充机制发挥着重要的作用,特别是在滑移受阻<sup>[15]</sup>或 滑移来不及进行<sup>[16]</sup>的情况下,孪生的作用显得更为突 出。根据轧制成形平均应变速率计算公式可知<sup>[6]</sup>,轧 制应变速率随着压下量的增大而升高,因此,大应变 轧制成形时的应变速率高于传统的小应变轧制的应变 速率。应变速率的增大使完成变形的时间缩短,可用 于位错滑移的时间缩短,孪生在合金塑性变形过程中 的作用增强<sup>[17]</sup>。而孪晶与孪晶以及孪晶和位错之间的 相互作用可以促进再结晶晶粒的形核,这种再结晶机 制被称为孪生诱发动态再结晶<sup>[18]</sup>。结合图4分析可知, 孪生诱发动态再结晶是 AZ31 合金大应变轧制成形主 要的再结晶机制。

研究表明<sup>[15, 19-20]</sup>,初始取向也是影响镁合金塑性 变形机制的重要因素之一,当外应力方向与大部分晶 粒的 *c* 轴平行或垂直时,Schmid 因子很小,晶粒处于 硬取向,基面滑移难以启动,合金主要变形机制以孪 生为主;而当外应力方向与大部分晶粒的 *c* 轴成其他 角度时,Schmid 因子增大,基面滑移可以启动,孪生 作用削弱。本研究中,90°和 0°试样轧制成形时,外 应力方向分别垂直和平行于大部分晶粒的 *c* 轴,基面 滑移难以启动,孪生作用增强,因此,90°和 0°试样 在压下量为40%时的孪晶密度明显高于45°试样的。

值得注意的是,压下量为40%时,虽然90°和0° 试样孪晶密度都较高,但0°试样的再结晶程度明显高



图4 不同取向和压下量大应变轧制板材的显微组织

**Fig. 4** Microstructures of large strain rolled sheets with different initial orientations and reductions: (a)  $90^{\circ}$ , 40%; (b)  $90^{\circ}$ , 80%; (c)  $45^{\circ}$ , 40%; (d)  $45^{\circ}$ , 80%; (e)  $0^{\circ}$ , 40%; (f)  $0^{\circ}$ , 80%

于 90°试样的,这是由拉伸孪晶和压缩孪晶对再结晶 的影响不同所致。李萧等<sup>[21]</sup>和 LI 等<sup>[22]</sup>研究表明,拉 伸孪晶界极不稳定,容易发生扩展和迁移,难以在孪 晶界储存足够的能量进而发生再结晶形核;而压缩孪 晶界则非常稳定,在孪晶界可以积累大量的位错,极 易发生再结晶形核。本实验中,90°试样轧制时,*c*轴 受拉,容易产生拉伸孪晶;而 0°试样轧制时,*c*轴 受拉,容易产生压缩孪晶;由于压缩孪晶对再结晶的促 进作用,所以 0°试样在压下量为 40%时的再结晶程度 高于 90°试样的。由此可见,大应变轧制过程中孪晶 的类型将决定再结晶的难易,而压缩孪晶的数量将决 定再结晶的形核率,压缩孪晶数量越多,再结晶形核 率越高,压缩孪晶数量越少,再结晶形核率则越低。0° 试样大应变轧制时,*c*轴受压,可以直接获得较高的 压缩孪晶密度;而 45°和 90°试样大应变轧制时,需发 生晶粒转动才能使 c 轴受压,其中 45°试样发生晶粒 转动所需的应变大于 90°试样的<sup>[15]</sup>。因此,3 种不同取 向试样在大应变轧制过程中再结晶形核率的从大到小 的顺序依次为 0°试样、90°试样、45°试样,因此,0° 试样的再结晶晶粒最小,45°试样的再结晶晶粒最大。

#### 2.3 轧制板材的力学性能

图 5 所示为退火态 AZ31 合金挤压板材 ED 方向 的室温拉伸曲线和不同取向合金 80%大应变轧制板材 的室温拉伸曲线。表 1 所列为其室温力学性能,包括 屈服强度  $\sigma_s$ 、抗拉强度  $\sigma_b$ 和伸长率  $\delta$ 。从图 5 和表 1 可以看出,大应变轧制可大幅提高板材的强度和伸长 率,3 种不同取向大应变轧制板材的抗拉强度、屈服 强度和伸长率由高到低依次为 0°试样、90°试样、45° 试样。其中,0°试样的抗拉强度( $\sigma_b$ )、屈服强度( $\sigma_s$ )



**图 5** 退火态挤压板材和不同取向大应变(压下量为 80%)轧制板材的室温拉伸曲线

**Fig. 5** Room temperature tensile curves of annealed sheet and large strain rolled sheets with different initial orientations at reduction of 80% and

# **表1** 退火态挤压板材和不同取向大应变(压下量为80%)轧制板材的室温力学性能

 Table 1
 Room temperature mechanical properties of annealed

 sheet and large strain rolled sheets with different initial
 orientations at reduction of 80%

Sheet state	$\sigma_{\rm s}/{ m MPa}$	$\sigma_{\rm b}/{ m MPa}$	$\delta$ /%
Annealed	168.7	235.4	11.8
90°	194.2	297.7	24.2
45°	188.8	285.3	20.7
0°	202.6	311.4	26.9

和伸长率(δ)分别为 311.4 MPa、202.6 MPa 和 26.9%, 45°试样的抗拉强度、屈服强度和伸长率则分别为 285.3MPa、188.8MPa 和 20.7%。结合图 4 中不同取向 合金 80%大应变轧制板材组织可知,晶粒大小是影响 板材力学性能的关键因素。根据 Hall-Petch 公式,晶 粒细化是提高材料强度的有效途径,随着晶粒的细化, 晶界数量增多,晶界对位错滑移的阻碍作用增强,从 而使材料的变形抗力提高<sup>[17]</sup>。另一方面,晶粒细化可 以大幅降低镁合金棱柱面和锥面滑移系临界分切应 力,使非基面滑移系更容易启动,从而提高合金的塑 性。此外,晶界协调变形在镁合金塑性变形中起着重 要作用,晶粒细化可以提高晶界协调变形能力,从而 使合金塑性成形能力提高<sup>[1]</sup>。

图 6 所示为不同取向大应变轧制板材室温拉伸断 口形貌。从图 6 中可以看出,0°和 45°试样轧制板材 断口基本被分布均匀的韧窝覆盖,说明其断裂方式为 韧性断裂。值得注意的是,0°试样轧制板材拉伸断口

韧窝尺寸和深度均大于 45°试样轧制板材的,进一步 证实了拉伸试验结果。



**图 6** 不同取向大应变(压下量为 80%)轧制板材的拉伸断口 形貌

**Fig. 6** Fracture morphologies of large strain rolled sheets with different initial orientations at reduction of 80%: (a)  $0^{\circ}$ ; (b)  $45^{\circ}$ 

## 3 结论

1) AZ31 镁合金挤压板材经退火处理后,变形组 织被静态再结晶组织替代,但依然保持着较强的基面 织构,其(0002)基面平行于 ED-TD 平面。

2) 孪生诱发动态再结晶是 AZ31 镁合金大应变轧 制成形过程中主要的再结晶机制,动态再结晶的发生 使合金组织细化和力学性能大幅提高。

3) 大应变轧制过程中的孪生和孪生诱发动态再结晶与初始晶粒取向密切相关,通过改变初始晶粒取向密切相关,通过改变初始晶粒取向可以控制大应变轧制板材的晶粒尺寸和力学性能。

4) 0°试样经大应变轧制后可以获得更为细小的再结晶组织和更为优异的力学性能,压下量为 80%时, 其平均晶粒尺寸为 5 μm,抗拉强度、屈服强度和伸长 率分别为 311.4 MPa、202.6 MPa 和 26.9%。

#### REFERENCES

CHEN Zhen-hua. Wrought magnesium alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 2–10.

[2] 张青来,卢 晨,朱燕萍,丁文江,贺继泓. 轧制方式对
 AZ31 镁合金薄板组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报,
 2004, 14(3): 391-397.

ZHANG Qing-lai, LU Chen, ZHU Yan-ping, DING Wen-jiang, HE Ji-hong. Effect of rolling method on microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy thin sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(3): 391–397.

- [3] ZHU S Q, YAN H G, CHEN J H, WU Y Z, SU B, DU Y G, LIAO X Z. Feasibility of high strain-rate rolling of a magnesium alloy across a wide temperature range[J]. Scripta Materialia, 2012, 67(4): 404–407.
- [4] 詹美燕,李元元,陈宛德,陈维平.大应变轧制技术制备细晶
   AZ31 镁合金板材[J]. 华南理工大学学报,2007,35(8):16-21,
   43.

ZHAN Mei-yan, LI Yuan-yuan, CHEN Wan-de, CHEN Wei-ping. Manufacturing of fine-grained AZ31 magnesium alloy sheet by large strain hot rolling[J]. Journal of South China University of Technology, 2007, 35(8): 16–21, 43.

- [5] EDDAHBI M, del VALLE J A, PEREZ-PRADO M T, RUANO O A. Comparison of the microstructure and thermal stability of an AZ31 alloy processed by ECAP and large strain hot rolling[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 410/411: 308–311.
- [6] ZHU S Q, YAN H G, CHEN J H, WU Y Z, DU Y G, LIAO X Z. Fabrication of Mg-Al-Zn-Mn alloy sheets with homogeneous fine-grained structures using high strain-rate rolling in a wide temperature range[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 559: 765–772.
- [7] PEREZ-PRADO M T, del VALLE J A, RUANO O A. Effect of sheet thickness on the microstructural evolution of an Mg AZ61 alloy during large strain hot rolling[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(5): 667–671.
- [8] PEREZ-PRADO M T, del VALLE J A, RUANO O A. Achieving high strength in commercial Mg cast alloys through large strain rolling[J]. Materials Letters, 2005, 59(26): 3299–3303.
- [9] ZHU S Q, YAN H G, CHEN J H, WU Y Z, LIU J Z, TIAN J. Effect of twinning and dynamic recrystallization on the high strain rate rolling process[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(10): 985–988.
- [10] PEREZ-PRADO M T, DEL VALLE J A, CONTRERAS J M, RUANO O A. Microstructural evolution during large strain hot rolling of an AM60 Mg alloy[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(5): 661–665.
- [11] 杨续跃,张之岭,张 雷,吴新星,王 军.应变速率对 AZ61 镁合金动态再结晶行为的影响[J].中国有色金属学报, 2011,21(8):1801-1807.

YANG Xu-yue, ZHANG Zhi-ling, ZHANG Lei, WU Xin-xing, WANG Jun. Influence of strain rate on dynamic recrystallization behavior of AZ61 magnesium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(8): 1801–1807.

- [12] 张 雷,杨续跃,霍庆欢,田 放,张玉晶,周小杰,陈 佳. AZ31 镁合金板材低温双向反复弯曲变形及退火过程的组织 演化[J]. 金属学报,2011,47(8):990-996. ZHANG Lei, YANG Xu-yue, HUO Qing-huan, TIAN Fang, ZHANG Yu-jing, ZHOU Xiao-jie, CHEN Jia. Structure evolution of AZ31 Mg alloy sheet during bidirectional cyclic bending at low temperature and subsequent annealing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(8): 990-996.
- [13] 丁文江,靳 丽,吴文祥,董 杰.变形镁合金中的织构及其 优化设计[J].中国有色金属学报,2011,21(10):2371-2381.
  DING Wen-jiang, JIN Li, WU Wen-xiang, DONG Jie. Texture and texture optimization of wrought Mg alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2371-2381.
- [14] 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, CHENG Yong-qi, FU Din-fa. Texture and anisotropy in magnesium alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(1):1-11.
- [15] 吴新星,杨续跃,张 雷,张之岭.初始取向对 AZ31 镁合金 微观织构演化的影响[J]. 金属学报,2011,47(2):140-144.
  WU Xin-xing, YANG Xu-yue, ZHANG Lei, ZHANG Zhi-ling. Effect of original orientation on microtexture evolution of AZ31 Mg alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(2): 140-144.
- [16] WU Y Z, YAN H G, CHEN J H, ZHU S Q, SU B, ZENG P L. Hot deformation behavior and microstructure evolution of ZK21 magnesium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(16/17): 3670–3675.
- [17] 吴远志, 严红革, 陈吉华, 朱素琴, 薄红伟, 王林伟. AZ31 镁 合金高应变速率多向锻造组织演变及力学性能[J]. 中国有色 金属学报, 2012, 22(11): 3000-3005.
  WU Yuan-zhi, YAN Hong-ge, CHEN Ji-hua, ZHU Su-qin, BO Hong-wei, WANG Lin-wei. Microstructure evolution and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy fabricated by high strain rate triaxial-forging[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3000-3005.
- [18] HUO Q H, YANG X Y, MA J J, SUN H, QIN J, JIANG Y P. Microstructure and textural evolution of AZ61 magnesium alloy sheet during bidirectional cyclic bending[J]. Materials Characterization, 2013, 79: 43–51.
- [19] 黄洪涛,刘 伟, GODFREY A, 唐瑞鹤, 刘 庆. 样品取向对 AZ31 镁合金静态再结晶行为的影响[J]. 金属学报, 2012, 48
  (8): 915-921.
  HUANG Hong-tao, LIU Wei, GODFREY A, TANG Rui-he, LIU

Qing. Effect of sample orientation on static recrystallization of AZ31 magnesium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(8): 915–921.

[20] 余 琨, 芮守泰, 王日初, 彭超群, 薛新颖. AZ31 镁合金挤压 薄板织构及力学各向异性[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(12): 2127-2131.

YU Kun, RUI Shou-tai, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, XUE Xin-ying. Texture and mechanical anisotropy of AZ31 extruded sheets[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18 (12): 2127–2131.

- [21] 李 萧,杨 平,孟 利,崔凤娥. AZ31 镁合金中拉伸孪晶静态再结晶分析[J]. 金属学报, 2010, 46(2): 147-154.
  LI Xiao, YANG Ping, MENG Li, CUI Feng-e. Analysis of the static recrystallization at tension twins in AZ31 magnesium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(2): 147-154.
- [22] LI Xiao, YANG Ping, MENG Li, CUI Feng-e. Orientational analysis of static recrystallization at compression twins in magnesium alloy AZ31[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 517(1/2): 160–169.

(编辑 李艳红)