

AZ31 镁合金板材双向循环弯曲的孪晶组织及织构

王忠堂¹, 马 康¹, 梁海成¹, 张士宏²

(1. 沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110159)

(2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要:采用等温双向循环弯曲工艺(bidirectional cyclic bending technology, BCBT)改善了 AZ31 镁合金板材的微观组织、织构和力学性能。循环弯曲变形能够产生压缩变形与拉伸变形的交替变化, 使镁合金材料发生压缩变形→孪晶组织形成→发生动态再结晶→孪晶消失→晶粒细化的组织演变过程, 形成分布均匀的细小的晶粒组织, 改善了镁合金材料性能。AZ31 镁合金板材在变形温度为 483 K 时经过 3 个道次的等温双向循环弯曲变形后, 基面织构得到明显弱化, 织构强度由原始 9.59 降低到变形后 3.54, 平均晶粒尺寸为 12.2 μm 。在变形温度 443 K, 经过 1 个道次变形后, AZ31 镁合金板材的抗拉强度为 325 MPa, 屈服强度为 225 MPa。与原始坯料力学性能参数相比, 抗拉强度提高了 19%, 屈服强度提高了 28%。当变形温度 483 K 循环变形 3 道次时, 材料的伸长率为 17.1%, 比原始材料提高了 42%。

关键词: AZ31; 镁合金; 双向循环弯曲; 孪晶组织; 织构

中图分类号: TG146.2²

文献标志码: A

文章编号: 1002-185X(2016)10-2746-05

如何提高镁合金板材室温成形性能是目前镁合金研究领域亟待解决的关键技术问题之一, 而提高镁合金板材室温成形性能的方法之一就是通过对塑性变形来产生更多的孪晶组织、更多的滑移系、更多的动态再结晶组织, 有利于弱化织构和细化晶粒, 提高塑性成形性能。

镁合金板材塑性变形主要由基面滑移和锥面孪晶产生, 变形温度升高后则非基面滑移系启动, 塑性显著提高, 但孪晶比例及其作用则逐渐降低^[1]。孪晶变形对室温和低温塑性成形性能有重要贡献, 主要原因是孪晶变形能够改变晶粒取向, 有助于启动非基面滑移系, 提高塑性变形能力。由于大变形引起的孪晶可能促进二次孪晶, 二次孪晶往往引发微裂纹的产生, 因此, 在变形过程中要适当控制变形程度^[2]。在室温或低温时, 镁合金轧制板材在轧制方向和平面内形成了很高强度的基面织构, 这些织构在温度较低时阻碍了基面滑移系的启动, 因此在温度较低时镁合金板材塑性成形性能很难提高^[3]。镁合金薄板交叉轧制对板材晶粒度没有明显影响, 但可以显著降低板材织构强度, 有助于提高镁合金冲压成形性能^[4]。如果板材具有合理的晶体取向, 镁合金的极限拉深比可达到 1.4^[5,6]。

采用单向多道次弯曲方法可以有效改善 AZ31B 镁合金板材的成形性能, AZ31B 镁合金板材基面织构

明显弱化, 板材的室温塑性变形能力得到了显著提升^[7,8]。镁合金板材经过往复单向弯曲变形后, 板材在室温的杯凸实验深度值从 3.53 增加到 5.90^[9]。镁合金板材经过往复单向弯曲变形后, 其室温成形极限图 FLD (forming limit diagram) 中的极限应变增加了 79%, 在变形温度为 100 $^{\circ}\text{C}$ 时, 极限应变增加了 104%^[10]。Jiang 等^[11]发现 AZ61 镁合金经过往复弯曲变形后, 动态再结晶晶粒尺寸明显细化。Yang 等^[12]研究了双向交替扭转弯曲变形后再压平的复合工艺对 AZ31B 镁合金板材组织性能的影响规律, 经过双向交替扭转弯曲 (ABRC) 处理后的板料, 晶粒尺寸达到 3 μm 。轧制态 AZ31 镁合金板材经过交叉预压缩之后, 产生的拉伸孪晶片层可以有效地改变晶粒的取向, 削弱了基面织构, 改善了材料的再变形行为, 从而降低了镁合金板材的拉压不对称性^[13]。通过反挤压方法可以制备出平均晶粒尺寸为 1.92 μm 的高强度 Mg-8Sn-1Al-1Zn 合金, 同时, 合金中存在大量的微米和纳米级 Mg₂Sn 颗粒相。反挤压表现出典型的基面纤维织构^[14]。

本实验采用双向循环弯曲变形方法来改善镁合金成形性能, 分析双向循环弯曲变形对 AZ31 镁合金板材的微观组织演变、再结晶行为、织构分布、力学性能等方面的影响规律。在双向循环弯曲变形中, 通过不断改变受力方向 (弯曲剪应力方向), 来改变镁合金

收稿日期: 2015-10-22

基金项目: 国家自然科学基金 (51575366); 沈阳市科技计划项目 (F14-231-1-32)

作者简介: 王忠堂, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159, 电话: 024-24680841, E-mail: ztwang@imr.ac.cn

板材的孪晶组织及织构，使晶粒取向分散，达到弱化基面织构和板材的各向异性的目的，可以有效提高镁合金板材的室温成形能力及力学性能。

1 双向循环弯曲变形特点

双向循环弯曲变形的定义是：将镁合金板材经过一次弯曲→一次压平→反向弯曲(二次弯曲)→二次压平的 4 个工序为一个循环变形道次，变形工艺原理图见图 1。

经过双向循环弯曲变形时，变形区的应力状态与应变状态，见图 2 所示。在弯曲变形区外侧，沿着板材方向的应变为拉伸应变，在弯曲变形区内侧，沿着板材方向的应变为压缩应变，在二次反向弯曲时，应变状态恰好相反。这样在变形区的同一个质点将产生压缩变形与拉伸变形的交替变化，可以有效改善镁合金板材的性能。由于压缩应变是镁合金材料产生孪晶的主要因素，因此经过压缩变形和拉伸变形的交替作用，使材料发生压缩变形→孪晶组织形成→发生动态再结晶→孪晶消失→晶粒细化的组织演变过程，形成分布均匀的细小的晶粒组织，改善镁合金材料性能。

2 实验

AZ31 镁合金板材循环弯曲模具结构如图 3 所示。模具整体分为上下两部分，模具上下两部分都分别由固定模板 (1、2)、整平板 (4、5)、弯曲凸柱 (3) 3

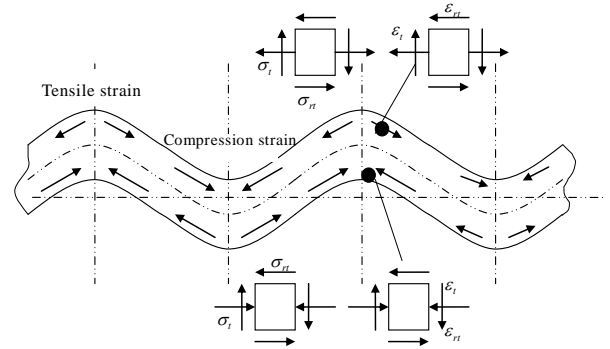
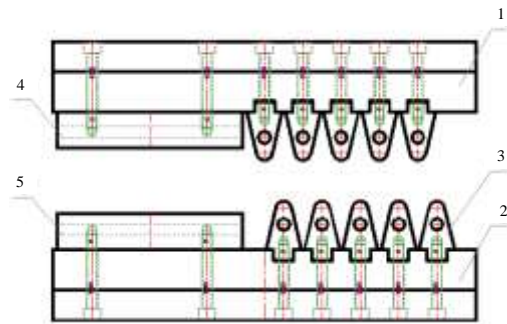


图 2 双向循环弯曲变形应力与应变状态

Fig.2 Stress and strain state of BCBT



1, 2 Fixed plate; 3 Bending tool 4, 5 Flattening tool;

图 3 循环弯曲模具结构

Fig.3 Mould of BCBT

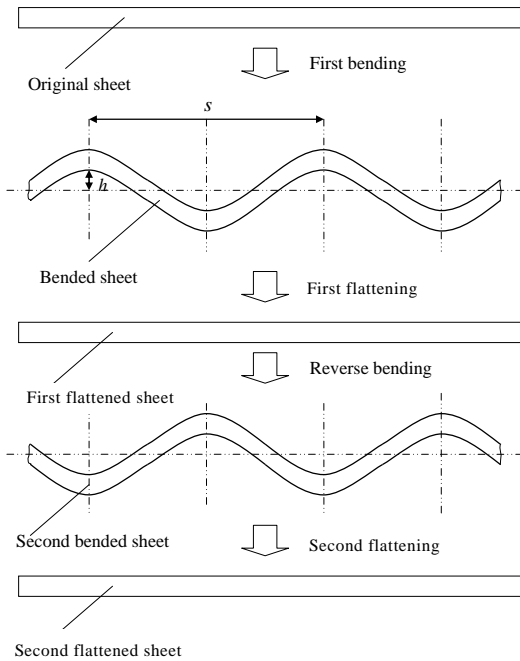


图 1 双向循环弯曲变形工艺原理图

Fig.1 Principle of BCBT

部分组成。固定模板起固定整平板、弯曲凸柱与压力设备连接的作用，并且能够固定多个弯曲凸柱。

实验步骤：(1) 用加热棒把模具工作部分凸柱与整平平台加热到相应弯曲温度保温，并且控制模具在整个实验过程中都保持该温度恒温；(2) 把 AZ31 镁合金板材在电阻炉中加热至高于实验温度 10 °C 左右，并且保温 10 min；(3) 取出板料进行一次单向弯曲，然后整平，再放回电阻炉，在相应温度下保温 2 min；(4) 再次取出板料，在板料第一次弯曲位置进行反向第二次弯曲，然后整平。正反两次弯曲属于一个道次。在不同温度下如此进行多个道次的实验操作。

循环弯曲工艺参数包括弯曲凸柱半径为 8 mm、弯曲凸柱间距(S)为 38 mm、弯曲压下量(h)为 15 mm、弯曲速度为 10 mm/s、板材厚度 3 mm。镁合金板材的变形温度分别为 443, 483, 523 K，并且保证整个变形过程在相对应的温度下恒定进行。循环变形道次分别为 1、3、5、7 等道次进行实验，不同变形温度时最大循环变形道次由变形后板材表面出现裂纹而结束，如表 1 所示。

表 1 不同变形温度下等温循环变形道次数

Table 1 Times of isothermal bidirectional cyclic bending at different temperatures

Temperature/K	443	483	483	523	523	523	523
Times of cyclic bending	1	1	3	1	3	5	7

3 微观组织特征

当变形温度为 443 K 时，板材弯曲 1 道次后，板材横截面的外侧、中心、内侧的微观组织如图 4 所示。

从图 4b 中可以看出，板材外侧微观组织变化不明显，主要是因为弯曲变形板材的外侧，只有少量孪晶。从图 4c 可以发现，在板材中心层出现部分孪晶，但是所占的比例较小。从图 4d 可以发现，在弯曲变形板材的内侧经过一次弯曲后已经出现大量孪晶，这主要是由镁合金晶粒结构的特征所决定的。在板材内侧，由于垂直于 C 轴的压应力，使拉伸孪晶容易产生，而外侧受垂直于 C 轴的拉应力，则不易产生拉伸孪晶。

图 5 所示为在不同温度下，双向循环弯曲一个道次后板材的微观组织。从图 5 可以发现，在变形温度为 443 和 483 K 条件下，双向循环弯曲 1 个道次，镁合金微观组织中产生了明显的孪晶组织，而在变形温度为 523 K 弯曲时，孪晶组织不明显。随着温度的升高，孪晶组织的所占比例也发生变化。当变形温度为 523 K 时，孪晶组织的比例最大，这主要是由于镁合金在 523 K 温度以下变形时，其柱面和锥面滑移系不容易启动，主要是由基面{0001}滑移与拉伸孪晶来协调变形过程，孪生为主要变形机制。随着温度的升高，柱面和锥面滑移系的临界剪切应力降低，从而取代孪生，位错的滑移成为主要的变形机制。

4 极图及织构分布

对试样进行 X 射线检测，AZ31 镁合金板材变形前的基面{0001}极图如图 6a 所示。从图中可以看出，没有经过变形的镁合金板材基面{0001}取向聚集在板材轧制平面上，显示出其基面织构明显，其最大相对织构强度为 9.59。经过变形温度为 443 K，双向循环变形 1 个道次后，其基面织构得到了明显弱化，如图 6b 所示，最大相对强度为 3.54，并且沿着横向和轧制方向发散。主要原因是在变形温度为 443 K 时，镁合金的柱面滑移系与锥面滑移系不容易启动，主要由基面滑移与拉伸孪晶协调变形，孪生起到改变晶粒取向的作用，使 C 轴发生转变，起到弱化织构的作用。

当变形温度为 483 K，经过多个道次的双向循环弯曲变形后，镁合金板材的基面{0001}极图如图 7 所示，其中双向循环弯曲 1 个道次后织构分布如图 7a 所示，最大相对强度为 5.03。双向循环弯曲 3 个道次后织构分别如图 7b 所示，最大相对强度为 3.50。双向循环弯曲 7 个道次后织构如图 7c 所示，最大相对强度为 9.50。由此说明，随着双向循环弯曲次数的增加，镁合金板材的基面织构也随之弱化。在变形温度为 523 K 的条件下，双向循环弯曲 7 个道次后，与原始板材相比，镁合金基面织构变化不明显。

原始板材基面织构强，主要是因为板材为热轧制板，经过多道次轧制积累而形成。密排六方结构的镁合金晶粒的 C 轴垂直于轧制方向与横向 (RD-TD)。在变形温度低于 498 K 时的双向循环弯曲过程中，弯曲凹面晶粒受垂直于 C 轴的压应力作用，在变形过程

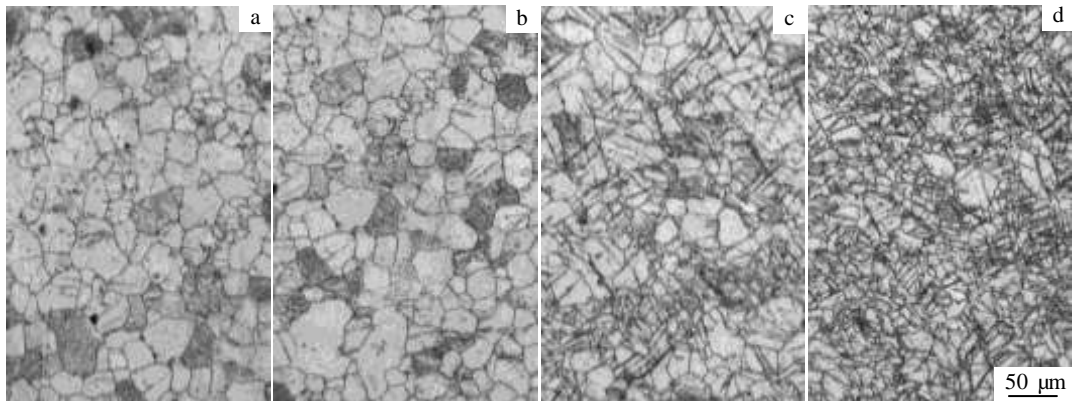


图 4 双向循环弯曲板材的不同位置微观组织

Fig.4 Microstructure of AZ31 sheet by BCBT at different positions: (a) original, (b) outside, (c) center, and (d) inside

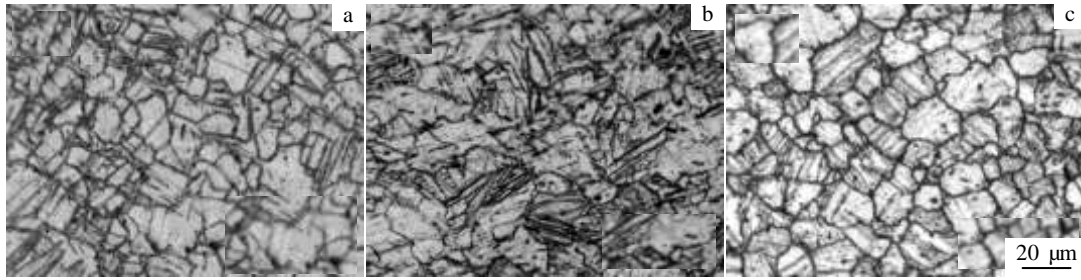


图 5 不同温度下双向循环弯曲 1 个道次 AZ31B 镁合金微观组织

Fig.5 Microstructure of AZ31 sheet by BCBT at different temperatures for 1 process: (a) 443 K, (b) 483 K, and (c) 523 K

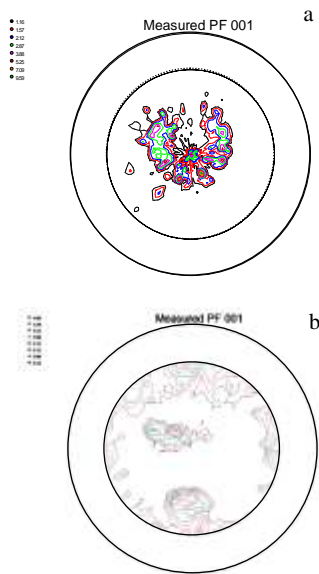


图 6 AZ31 镁合金板材{0001}极图

Fig.6 Pole figure of AZ31 magnesium Alloy sheet: (a) original sheet, and (b) deformed sheet, 1 process and 443 K

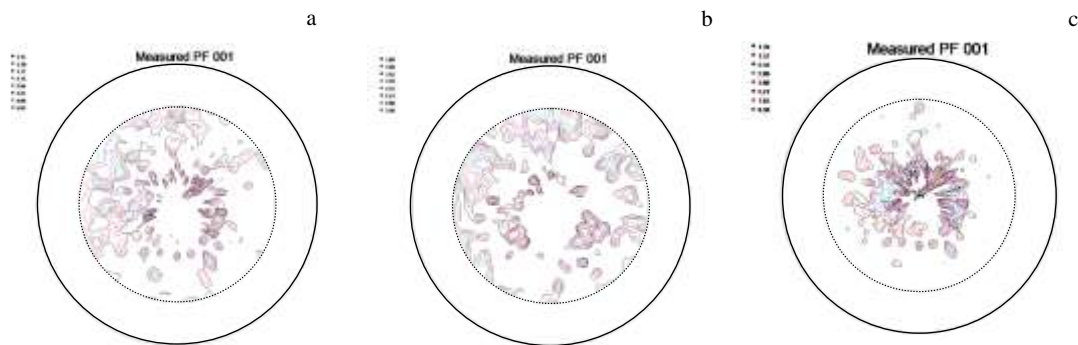


图 7 双向循环弯曲变形后{0001}极图

Fig.7 Pole figure of AZ31 sheet deformed by BCBT: (a) 483 K, 1 process; (b)483 K, 3 process; (c) 523 K, 7 process

中易于产生 $\{10\bar{1}2\}$ 拉伸孪晶。弯曲凸面晶粒受垂直于 C 轴的拉应力作用, 在一定情况下比较容易产生压缩孪晶, 如 $\{10\bar{1}1\}$ 的孪晶。在双向循环弯曲过程中, 拉伸孪晶与压缩孪晶交替产生, 在形成的交叉孪晶区内产生的动态再结晶晶粒取向随机分配。所以当变形温度为 483 K、弯曲 3 个道次后, AZ31 镁合金板材的基面织构得到明显弱化。而在变形温度为 523 K 下, 柱面滑移已经开启, 所以孪晶变形不再起主导作用, 孪生量少, 晶粒取向变化小, 所以织构降低的强度相对较弱。

5 力学性能

如图 8 所示, 给出了 4 组双向循环弯曲后的 AZ31 镁合金板材的室温拉伸性能曲线, 应变速率为 0.01 s^{-1} 。从图中可以看出, 当变形温度为 443 K 时经过 1 道次循环变形的试样的延伸率最差, 约为 8.1%, 但抗拉强度有所提高。当变形温度在 483 K 下循环变形道次为 3 次时, 试样的延伸率为 17.1%, 较原始试样提高了约 42%。当变形温度为 523 K 循环变形道次为 7 次时, 试样的延伸率为 14.5%。经过变形温度 443 K,

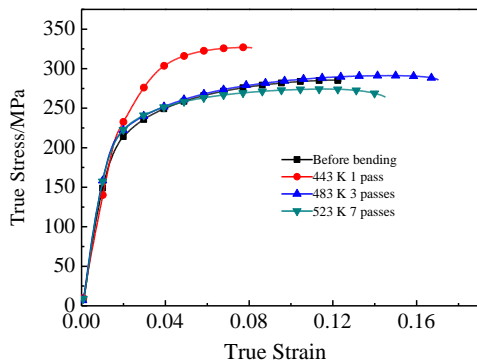


图 8 变形后的 AZ31 镁合金板材室温拉伸性能

Fig.8 Drawing property of deformed AZ31 Mg sheet at room temperature

一个道次变形后, 抗拉强度为 325 MPa, 屈服强度为 225 MPa, 与原始坯料力学参数相比, 抗拉强度提高了 19%, 屈服强度提高了 28%。

6 结 论

1) 循环弯曲变形能够产生压缩变形与拉伸变形的交替变化, 使镁合金材料发生压缩变形→孪晶组织形成→发生动态再结晶→孪晶消失→晶粒细化的组织演变过程, 形成分布均匀的细小的晶粒组织, 改善了镁合金材料性能。

2) 在变形温度为 443 和 483 K 条件下, AZ31 镁合金板材经过 1 个道次双向循环弯曲后, 镁合金微观组织中产生了明显的孪晶组织, 而在变形温度为 523 K 时孪晶组织不明显。并且随着温度的升高, 孪晶组织的体积分数随之变化。

3) AZ31 镁合金板材在变形温度为 483 K 时经过 3 个道次的等温双向循环弯曲变形后, 基面织构得到明显弱化, 织构强度由原始 9.59 降低到变形后 3.54, 平均晶粒尺寸为 12.2 μm 。

4) 经过变形温度 443 K, 一个道次变形后, 抗拉强度为 325 MPa, 屈服强度为 225 MPa, 与原始坯料力学参数相比, 抗拉强度提高了 19%, 屈服强度提高了 28%。

5) 当变形温度在 483 K 下循环变形道次为 3 次时, 试样的延伸率为 17.1%, 比原始试样提高了 42%。

参考文献 References

- [1] Chen Zhenhua(陈振华), Yang Chunhua(杨春花), Huang Changqing(黄长青). *Materials Review(材料导报)*[J], 2006, 20(8): 107
- [2] Li Zhanggang(李章刚), Zhang Shihong(张士宏), John A Wert. *Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)* [J], 2008, 15(3): 37
- [3] Yang Ping(杨平), Hu Yisong(胡轶嵩), Cui Fenge(崔凤娥). *Chinese Journal of Materials Research(材料研究学报)* [J], 2004, 18(1): 52
- [4] Chino Y, Sassa K, Kamiya A et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 441(1-2): 349
- [5] Iwanaga K, Tashiro H, Okamoto H. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 155-156: 1313
- [6] Mori T, Tsuji H. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*[J], 2007, 56(1): 285
- [7] Guangsheng Huang, Wei Xu, Guangjie Huang. *Journal of Materials Sciences & Technology*[J], 2009, 25(3): 365
- [8] Huang Guangsheng, Li Hongcheng, Song Bo. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [J], 2010, 20(1): 28
- [9] Song Bo, Huang Guangsheng, Li Hongcheng. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 489: 475
- [10] Huang Guangsheng, Song Bo, Xu Wei. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(10): 1815
- [11] Jiang Yupei, Yang Xuyue, Zhang Lei. *Materials Science Forum*[J], 2011, 667-669: 623
- [12] Yang Q, Ghosh A K. *Acta Materialia*[J], 2006, 54(19): 5147
- [13] Chen Huicong(陈慧聪), Liu Tianmo(刘天模), Xu Shun(徐舜) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2014, 43(10): 2479
- [14] Cheng Weili(程伟丽), Huo Rui(霍瑞), Lu Yangjie(陆杨婕) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2014, 43(11): 2824

Twins and Texture of AZ31 Magnesium Alloy Sheet Deformed by Bidirectional Cyclic Bending Technology

Wang Zhongtang¹, Ma Kang¹, Liang Haicheng¹, Zhang Shihong²

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

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

Abstract: Bidirectional cyclic bending technology (BCBT) was used to improve the microstructure, texture and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheet. Because of the exchange of compression deformation and tensile deformation caused by BCBT, microstructure evolution occurs, which is compressive deformation→ twins formation→ dynamic recrystallization→ twins disappearing→ grain refined. Fine grains of uniform distribution are formed and the properties of magnesium alloys are improved. When the deformation temperature is 483 K and deformation process is 3 passes, basal texture of AZ31 magnesium alloy sheet is weakened, texture intensity is reduced from 9.59 to 3.54, and the average grain size is 12.2 μm. When AZ31 magnesium alloy is deformed by BCBT of 1 pass at temperature 443 K, the tensile strength is 325 MPa, and the yield strength is 225 MPa. Compared with that of original billet, the tensile strength is increased by 19%, and the yield strength is increased by 28%. When AZ31 magnesium alloy is deformed by BCBT of 3 passes at temperature 483 K, the elongation is 17.1% at room temperature, which is increased by 42%.

Key words: AZ31; magnesium alloy; bidirectional cyclic bending; twins; texture

Corresponding author: Wang Zhongtang, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, P. R. China, Tel: 0086-24-24680841, E-mail: ztwang@imr.ac.cn