

# 初始宽度对 AZ31 轧制板材组织与性能的影响

Effects of Initial Widths on Microstructures and Properties of Rolled AZ31 Sheets

张丁非<sup>1,2</sup>, 戴庆伟<sup>1,2</sup>, 张钧萍<sup>1,2</sup>, 方霖<sup>1,2</sup>, 胡耀波<sup>1,2</sup>, 王小红<sup>1,2</sup>, 兰伟<sup>3</sup>

(1 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045;

2 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044;

3 重庆科技学院, 重庆 401331)

ZHANG Ding-fei<sup>1,2</sup>, DAI Qing-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun-ping<sup>1,2</sup>,

FANG Lin<sup>1,2</sup>, HU Yao-bo<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-hong<sup>1,2</sup>, LAN Wei<sup>3</sup>

(1 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2 National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing 400044, China;

3 Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

**摘要:** 在相同条件下轧制了不同初始宽度的 AZ31 板坯, 通过对轧后板材的组织观察、硬度测试、XRD 和 SEM 实验, 研究了初始宽度对 AZ31 板材轧制组织和性能的影响。结果表明: 初始宽度对 AZ31 镁合金轧制板材有一定影响; 随着板坯宽度增加, 轧后板材边部的硬度有所增加, 再结晶晶粒比例增大, (0002) 基面取向有所增加; 板材中间部分的动态再结晶进行得更加完全, 硬度比边部低, (0002) 基面取向显著增加。

**关键词:** 轧制; AZ31 板; 初始宽度; 显微组织

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)09-0054-04

**Abstract:** AZ31 magnesium sheets with different initial widths were rolled under the same conditions. Hardness test, XRD and SEM experiments were used to investigate the effects of initial widths on microstructures and properties of rolled AZ31 magnesium sheets. The results show that the initial width has some effects on the rolled AZ31 magnesium alloy sheet. With the initial width increasing, the hardness at the edge of the rolled sheet becomes higher, more recrystallized grains are generated, and (0002) basal plane orientation XRD peaks are enhanced. At the central part of the rolled sheet, dynamic recrystallization occurs more completely, the hardness in the center is lower than that at the edge, (0002) basal plane orientation increases dramatically.

**Key words:** rolling; AZ31 sheet; initial width; microstructure

镁合金具有低密度, 高比强度, 优良的抗震性能和阻尼性能, 且镁的储量丰富, 绿色环保, 是一种非常具有前景的结构合金。在镁合金的众多加工工艺中, 轧制以能够连续大规模生产尺寸较大用途多的中间产品而备受关注。国内外的许多专家学者对镁合金的板材轧制进行了深入广泛的研究<sup>[1-4]</sup>。ZHANG Bo-ping 等<sup>[5]</sup> 轧制得到了 0.6mm 的 AZ31 镁合金板, 并就其显微组织和硬度进行了研究。研究表明随着轧制压下量的增加, 板的硬度增加, 当压下量达到 97% 时, 硬度达到 90HV。VESPA 等<sup>[6]</sup> 研究了微观组织对 AZ31 轧制板材的高温力学性能的影响。Styczynski 等<sup>[7]</sup> 和 HYO TAE JEONG 等<sup>[8]</sup> 分别研究了 AZ31 镁合金冷变形和温轧过程中的组织转变。陈彬等<sup>[9-11]</sup> 研究了

压下量对镁合金轧制变形的影响。张文玉等<sup>[12-14]</sup> 研究了轧制路径对 AZ31 板材组织和性能的影响。但是, 关于初始宽度对镁合金甚至是其他合金轧制板材组织性能影响的报道还较少。然而, 镁合金的体积比热容较小 ( $1781\text{J} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ), 导热系数较高 ( $155\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) 约为铁的 2 倍, 轧制过程中热量变化很大以及镁合金的密排六方结构对塑性成型的影响等, 因此不能再忽略初始形状对镁合金轧制的影响。研究初始宽度对镁合金轧制板材组织和性能的影响, 对板材的轧制成型和二次加工具有重大意义。

本工作将系统地研究不同初始宽度的 AZ31 镁合金板轧制变形后的组织与性能, 以期得到初始宽度对镁合金轧制板材的影响规律。

## 1 材料准备和实验方法

实验所用 AZ31 镁合金 ( $Mg-3\% Al-1\% Zn$ , 质量分数) 及主要仪器设备由国家镁合金材料工程技术研究中心提供。试样分别被加工成 15, 30, 45mm 宽, 10mm 厚, 30mm 长。

试样在 320℃ 加热 30min, 然后轧制。轧机辊径 170mm, 辊速 21r/min, 轧辊不加热。试样轧后厚度 6mm。对铸态板坯和轧制后的样品进行了硬度测试和金相分析, 所用仪器为 HXS-1000AY 数显硬度计, 加载力 0.49N, 加载时间 20s。金相腐蚀剂配方为苦味酸 4.5g, 乙醇 75mL, 乙酸 5mL, 蒸馏水 10mL, 腐蚀 2~3s。然后用 MDS 金相显微镜观察。分别用 Rigaku D/MAX 2500 和 TESCAN 钨灯丝扫描电镜进行了晶体衍射分析和边部裂纹观察。

## 2 实验结果和分析

对三块轧制后的板坯进行了力学性能的相关测试和组织分析, 获得了宽度对镁合金轧制板材组织和性能的影响规律, 并且对轧制产生的宏观裂纹进行了分析。

### 2.1 硬度分析

在每块试样上测 20 个点的硬度, 然后取平均值, 如图 1 所示。

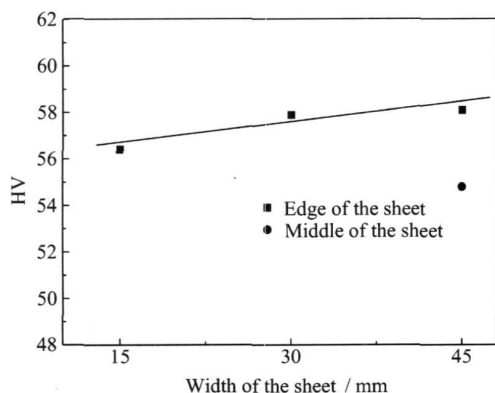


图 1 板坯轧制后的硬度分布

Fig. 1 Hardness curve of the rolled sheet

测定的铸态 AZ31 的硬度为 45HV, 轧制后板材的硬度都在 54HV 以上, 比铸态合金高 11HV 以上。这是轧制使合金加工硬化的结果。同时, 轧制使得疏松缩孔减少, 组织更加均匀, 也有利于硬度的提高。

硬度分布结果显示, 随着板坯宽度的增加, 轧后板材边缘部位的硬度增加。这表明, 随板坯宽度的增加,

塑性变形越严重, 合金的加工硬化越显著。45mm 板中间的硬度比边缘的硬度小, 这和板坯在轧制过程中的塑性变形以及温度不均匀有关。本次实验采用的是开放式轧机, 且轧辊不加热。同时镁合金的体比热容较小, 导热系数较高, 所以在轧制过程中试样的热量很容易被传导到轧辊和周围环境中, 温度骤降。实验测定结果表明, 经轧制后板材温度要降低近 100℃, 试样边缘尤为剧烈。由于塑性变形产生的热量, 板的中间部分发生了动态再结晶, 合金的组织被软化; 而边缘部分由于温度下降剧烈, 加工硬化现象严重, 再结晶软化不及加工硬化的作用大, 所以板的中间部分的硬度没有边缘部分或者是距板的边缘近的部分硬度高。

### 2.2 显微组织分析

金相分析的结果如图 2 所示, 实验所用的铸态板坯的晶粒粗大, 约 300μm, 且有较多的疏松缩孔。铸态板坯经压下量 40% 的轧制, 发生了动态再结晶。但是从图 2 除了可以看到等轴状的细小的再结晶晶粒, 还有细长的孪晶。这些孪晶相互交割, 这是镁合金在较低温度塑性变形的典型特征。图 2(b), (c), (d) 都是孪晶和再结晶晶粒共存的组织, 差别不大。但是, 图 2(b) 为再结晶和孪晶共存组织, 且其中的孪晶细长, 分布较多。图 2(c) 中的孪晶很多已经发生了再结晶, 许多等轴的再结晶晶粒串联在一起。图 2(d) 中的孪晶较少, 多是大片等轴的再结晶区域或者在原来孪晶处再结晶的细长的再结晶区域。随着板坯初始宽度的增加, 孪晶略有减少, 而再结晶也进行得更充分。由于较宽的板边部的流变更剧烈, 所以图 2(b), (c), (d) 对应的硬度值也相差不大。图 2(e) 中的组织以再结晶晶粒为主, 由于再结晶软化, 所以其硬度较低。上述现象是由在轧制过程中, 板坯的热量被传递给轧机和周围环境引起的。板坯中间的温度要比边缘的温度高, 所以再结晶进行得比边缘充分。而板坯越宽, 热量越多, 热传导引起的温度下降要比窄的板坯小。由于镁合金低的体积比热容和较高的导热系数, 使得这种现象在镁合金中尤为显著。

### 2.3 XRD 分析

为了分析不同宽度板坯轧制对其晶体学取向的影响, 进行了 XRD 分析, 结果见图 3。不同初始宽度 AZ31 板坯轧制后并没有物相的变化。合金的晶体取向以 (0002) 和 (10 $\bar{1}$ 1) 为主。初始宽度对合金的晶体学取向有一定影响。在板的边部, (0002) 基面取向变化不是很显著, 略有增加。但是, 在初始宽度为 45mm 的 AZ31 镁合金板坯轧制后的中间部分, (0002) 方向取向比 15mm 宽的板增加了近 30%。这是在较宽的板的中间发生了动态再结晶, 轧制过程中再结晶晶粒

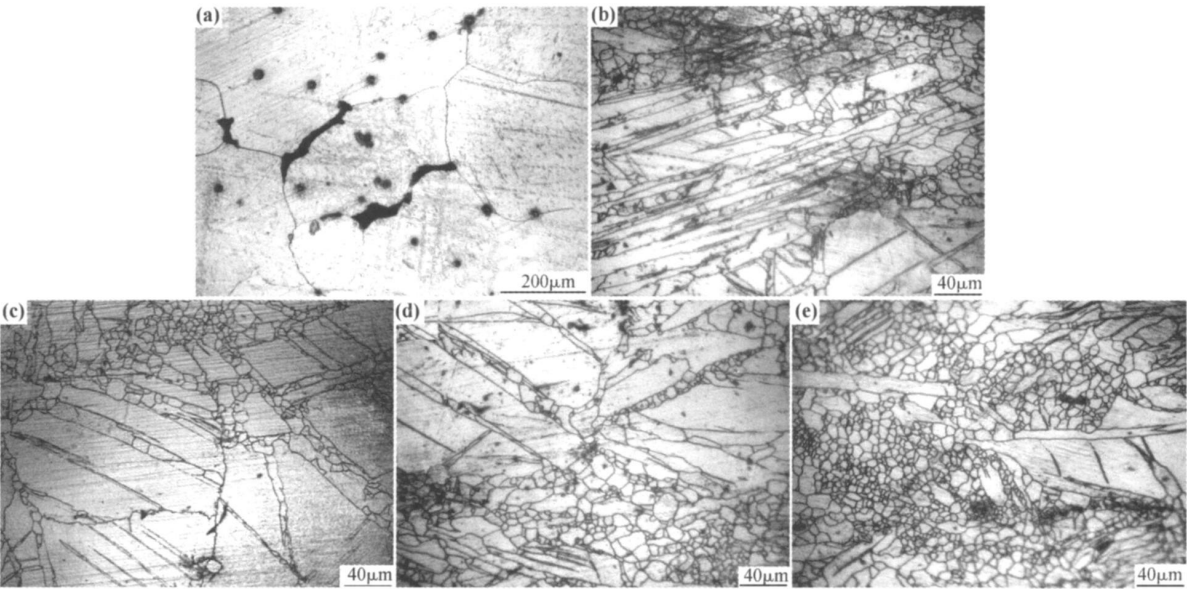


图 2 不同试样的显微组织 (a) 铸态组织; (b) 15mm 宽处组织; (c) 30mm 宽处组织; (d) 45mm 宽板边处组织; (e) 45mm 宽板中间处组织

Fig. 2 Microstructure of different samples (a) as cast; (b) 15mm width; (c) 30mm width; (d) edge of sheet with 45mm width; (e) middle of sheet with 45mm width

按照一定的取向生长和排列的结果。上述结果表明,越宽的板坯轧制后,基面织构越多,尤其是在板的中间部分。这种晶体取向分布对合金后续的二次加工有重要影响。

面的裂纹(N 线)连接到一起时,材料就发生了宏观的断裂,板坯的边裂也就产生了。

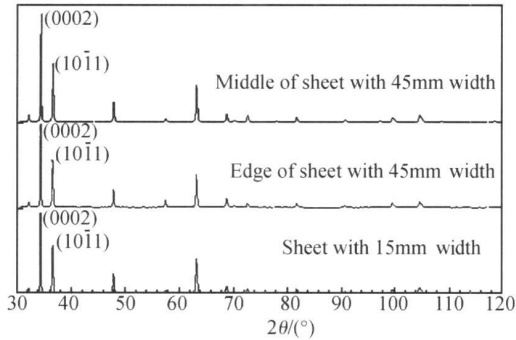


图 3 不同宽度板轧制后的 XRD 图

Fig.3 The XRD pattern of sheet with different width after rolling

2.4 裂纹分析

图 4 为板坯轧制后局部边裂处的扫描电镜照片。AZ31 镁合金在此实验条件下,40% 压下量轧制后的裂纹以层状撕裂为主。这也是合金热轧中常见的一种缺陷形式。这种延性损伤符合现代损伤力学的微空洞形核理论<sup>[15]</sup>。A 处可见明显的空洞,当空洞扩大连接到一起就形成了类似 B 处的长条状的空隙。这些材料的内部空隙不断连接扩大(M 线),当它们和合金表

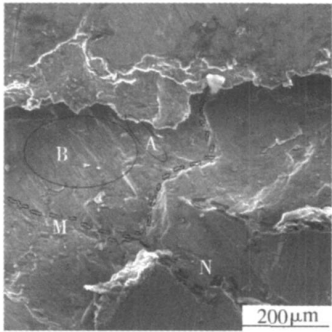


图 4 45mm 初始宽度板边部裂纹的扫描电镜照片  
Fig.4 SEM photo of the edge crack at the sheet with 45mm initial width

3 结论

- (1) 随着板坯宽度增加,轧后板材的边部硬度有所增加,再结晶晶粒比例也有所增加,(0002) 基面取向更明显。
- (2) 板材中间和边部的组织和性能有较大差异,中间部分的动态再结晶进行得更加完全,所以硬度比边部低,基面取向也更显著。

参考文献

[1] SCHUMANN S, FRIEDRICH H. Current and future use of

- magnesium in the automobile industry[J]. Materials Science Forum, 2003, 419– 422(1): 51– 56.
- [2] KOJIMA Y. Project of platform science and technology for advanced magnesium alloys[J]. Materials Transactions, 2001, 42(1): 1154– 1159.
- [3] KOJIMA YO, AIZAWA TATSUHIKO, KAMADO SHIGEHARU, et al. Progressive steps in the platform science and technology for advanced magnesium alloys[J]. Materials Science Forum, 2003, 419– 420(1): 3– 20.
- [4] M WEMBELA A, KONOPLEVA E B, MCQUEEN H J. Microstructural development in Mg alloy AZ31 during hot working[J]. Scripta Materialia, 1997, 37(11): 1789– 1795.
- [5] ZHANG Bo-ping, TU Yi-fan, CHEN Jing-yi, et al. Preparation and characterization of as-rolled AZ31 magnesium alloy sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184(1– 3): 102– 107.
- [6] VESPA G, MACKENZIE L W F, VERMA R, et al. The influence of the as-hot rolled microstructure on the elevated temperature mechanical properties of magnesium AZ31 sheet[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 487(1– 2): 243– 250.
- [7] STYCZYNSKI A, HARTIG CH, BOHLEN J, et al. Cold rolling textures in AZ31 wrought magnesium alloy[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(7): 943– 947.
- [8] HYO TAE JEONG, TAE KWON HA. Texture development in a warm rolled AZ31 magnesium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187– 188: 559– 561.
- [9] 陈彬, 林栋, 曾小勤, 等. AZ31 镁合金大压下率轧制研究[J]. 锻压技术, 2006, (3): 1– 3.
- [10] BARNETT M R, NAVEA M D, BETTLES C J. Deformation microstructures and textures of some cold rolled Mg alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 386(1– 2): 205– 211.
- [11] 李姗. AZ31 变形镁合金板材轧制工艺、组织与性能[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [12] 张文玉, 刘先兰, 陈振华. 轧制路径对 AZ31 镁合金薄板组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(9): 716– 719.
- [13] 曲家惠, 姚路明, 王福. AZ31 镁合金在不同轧制方式下的织构演变[J]. 轻合金加工技术, 2008, 36(8): 29– 32.
- [14] 张青来, 胡永学, 王粒粒, 等. 挤压后交叉轧制的镁合金薄板组织研究[J]. 热加工工艺, 2007, 36(9): 1– 5.
- [15] GU RSON A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. Part I: yield criteria and flow rules for porous ductile media[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1977, 99(1): 2– 15.
- 
- 基金项目: 国家 973 重大基础研究项目(2007CB613700); 国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2007BAG06B04); 国家杰出青年科学基金(50725413); 重庆市科技攻关项目(CSTC2009AB4008); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS10132202)
- 收稿日期: 2009-11-25; 修订日期: 2010-03-05
- 作者简介: 张丁非(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事轻合金材料及加工技术研究, 联系地址: 重庆市沙坪坝区沙正街 174 号(400030), E-mail: zhangdingfei@cqu.edu.cn
- 通讯作者: 戴庆伟(1984—), 联系地址: 重庆市沙坪坝区沙正街 174 号, 重庆大学材料学院(400030), E-mail: daiqingwei@cqu.edu.cn

(上接第 53 页)

- [4] FAN Zhi-kang, LIANG Shu-hua, XUE Xu. Bond strength of W-Cu/CuCr integrated material[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2001, 11(6): 835– 837.
- [5] XIAO Peng, FAN Zhi-kang. Vacuum breakdown behavior of Cu-WCr composites[J]. Materials Science Forum, 2008, 569: 125– 128.
- [6] 肖鹏, 范志康. 烧结温度对 CuWCr 复合材料组织和性能的影响[J]. 功能材料, 2008, (3): 403– 406.
- [7] XIAO Peng, LIANG Shu-hua, ZHAO Wei-bin, et al. Influence of Cr particle size on the microstructure and electrical properties of CuW60Cr15 composites[J]. Key Engineering Materials, 2007, 334– 335: 173– 176.
- [8] 杨晓红, 范志康, 梁淑华, 等.  $Y_2O_3$  对 CuW 触头材料显微组织与性能的影响[J]. 材料研究学报, 2007, 21(4): 414– 420.
- [9] 王玲玲, 梁淑华, 肖鹏, 等. 掺杂  $La_2O_3$  的 CuW 电触头的组织及电性能[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(12): 1358– 1361.
- [10] YANG Zhi-mao, ZHANG Qiu-li, ZHANG Cheng-yu, et al. Influence of microstructure of CuCr25 cathode on the motion of vacuum arc spots[J]. Physics Letters A, 2006, 353(1): 98– 100.
- [11] YANG Zhi-mao, ZHANG Qiu-li, WANG Qing-feng, et al. Vacuum arc characteristics on nanocrystalline CuCr alloys[J]. Vacuum, 2006, 81: 545– 549.
- [12] WANG Xian-hui, LIANG Shu-hua, YANG Ping, et al. Effect of  $Al_2O_3$  particle size on vacuum breakdown behavior of  $Al_2O_3$ /Cu composite[J]. Vacuum, 2009, 83: 1475– 1480.
- [13] 田保红, 周洪雷, 刘勇, 等. 真空热压烧结  $Al_2O_3$ /CuCr 复合材料的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(2): 166– 171.
- [14] 丁红燕, 符学龙, 戴起勋, 等. 粉末冶金法制备 Cu/ $Al_2O_3$  复合材料及其性能研究[J]. 金属热处理, 2007, 32(6): 37– 41.
- [15] 杨文杰. 电弧焊方法及设备[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业技术出版社, 2007.
- 
- 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50834003); 国家自然科学基金资助项目(50871085); 科技部 863 计划资助项目(2009AA03Z522)
- 收稿日期: 2009-11-16; 修订日期: 2010-03-01
- 作者简介: 曹伟产(1980—), 男, 博士研究生, 从事高压电触头材料研究, 联系地址: 陕西西安理工大学材料科学与工程学院(710048), E-mail: cao090213@163.com
- 通讯作者: 梁淑华, 教授, 联系地址: 陕西西安理工大学材料科学与工程学院(710048), E-mail: liangxaut@yahoo.cn