文章编号: 1004-0609(2012)12-3293-07

# 不同轧制工艺对 AZ31 镁合金薄板室温成形性能的影响

刘华强,唐 荻,胡水平,米振莉,王 哲

(北京科技大学 高效轧制国家工程研究中心,北京 100083)

摘 要:采用常规轧制(NR)、异步轧制(DSR)和交叉轧制(CR)3种不同工艺来获得AZ31 镁合金板材并进行室温 成形性能的研究。结果表明:AZ31 镁合金板材的综合力学性能不仅与晶粒尺寸有关,还与晶粒取向有关。基面 织构的减弱可明显提高板材的胀形性能。异步轧制明显降低板材基面织构强度,使板材室温冲压性能得到提高。 交叉轧制使晶粒显著细化,基面织构增强,提高了板材的力学性能,却降低其冲压成形性能;同时交叉轧制可以 减弱板材各向异性。研究结果为改善镁合金室温塑性与成形性能提供了理论依据和新思路。 关键词:AZ31 镁合金;常规轧制;异步轧制;交叉轧制;基面织构;冲压;胀形性能

中图分类号: TG111.7; TG146.2 文献标志码: A

# Effects of rolling technology on forming properties of AZ31 magnesium alloy sheets at room temperature

LIU Hua-qiang, TANG Di, HU Shui-ping, MI Zhen-li, WANG Zhe

(National Engineering Research Center of Advance Rolling Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** According to the characteristics of poor formability of AZ31 magnesium alloy sheets at room temperature, the AZ31 magnesium alloy sheets are obtained by normal rolling (NR), differential speed rolling (DSR) and cross rolling (CR), and the forming properties at room temperature were investigated. The results show that the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets depend on not only the grain size, but also the grain orientation. The weakening of the intensity of basal texture can significantly improve the bulging forming property, the asynchronism rolling significantly reduce the intensity of basal texture and improves the performance of stamping at room temperature. The cross rolling significantly refines the grain size, enhances the intensity of basal texture and improves the nechanical properties of the sheets, but reduces the performance of stamping forming. On the other hand, the cross rolling reduces the anisotropy of the sheets. The results provide a theoretical basis and new method for the improvement of the ductility and formability of magnesium alloy sheets at room temperature.

Key words: AZ31 magnesium alloy; normal rolling; differential speed rolling; cross rolling; basal texture; stamping; bulge forming property

变形镁合金是目前使用最轻的金属结构材料之 一,不仅具有较高的比强度和比刚度,而且具有优良 的电磁屏蔽性、散热性、减震性和机械加工性能。在 3C电子信息产品、汽车、家电以及航天航空等领域得 到广泛应用。由于其突出的性能优势和易回收等环保 优点,也被称为"21世纪的绿色工程新材料"<sup>[1-2]</sup>。

轧制是获得镁合金薄板的主要加工方式,但在轧 制过程中镁合金晶粒会发生择优取向而形成强烈的基 面织构<sup>[3-6]</sup>。织构的强度以及形态都会对镁合金薄板 的成形性能产生重要影响。晶粒尺寸也是影响镁合金

基金项目:国家"十二五"镁合金支撑项目(2011BAE22B00) 收稿日期:2011-12-20;修订日期:2012-05-28 通信作者:刘华强,讲师,博士;电话:13671364258; E-mail: lhuaqiang@163.com

性能的主要因素<sup>[7-10]</sup>,通过细化晶粒的方式可以提高 镁合金板材的强度以及延展性。有资料<sup>[11]</sup>表明,细晶 镁合金板材虽然具有良好的力学性能,但冲压胀形性 能却较差。有研究指出<sup>[12-14]</sup>,采用异步轧制制备镁合 金板材可以在室温条件下实现单道次20%形变量,制 备的镁合金板材晶粒细小且力学性能提高。交叉轧制 也是一种新型轧制工艺。据报道<sup>[15-19]</sup>,交叉轧制能有 效减轻材料的各向异性,提高其深冲性能,也能使材 料组织更加均匀、并使晶粒趋向等轴。目前,关于交 叉轧制镁合金板材对冲压性能影响的研究很少,关于 常规轧制、异步轧制和交叉轧制对改善和提高镁合金 板材成形性能比较的相关报道也很少。本文作者通过 采用常规轧制、异步轧制和交叉轧制工艺制得镁合金 薄板,研究不同轧制工艺对获得的板材室温成形性能 的影响。

### 1 实验

实验方案中使用的 AZ31B 变形镁合金板材的化 学成分如表 1 所列。

实验用厚度为 2.0 mm, 宽 300 mm 的 AZ31B 镁 合金挤压板材为原料,分别按如下轧制方式获得相应 的镁合金薄板:

采用常规轧制将上述挤压板坯在 300 ℃下轧至 1 mm 厚,道次压下量为 15%,道次间板材重新回炉 加热至 300 ℃,保温 10~15 min。终轧后板材在 300 ℃ 下退火,保温 1 h。

采用异步轧制将上述挤压板坯在 300 ℃下轧至 1 mm 厚,道次压下量为 15%,道次间板材重新回炉 加热至 300 ℃,保温 10~15 min。终轧后板材在 300 ℃ 下退火,保温 1 h。使用 *d* 90 mm 轧辊与 *d* 80 mm 轧 辊搭配,异径比为 1.125。异步轧制示意图如图 1(a) 所示。

采用交叉轧制将上述挤压板坯在 300 ℃下轧至 1 mm 厚,道次压下量为 15%,道次间板材重新回炉 加热至 300 ℃,保温 10~15 min。终轧后板材在 300 ℃ 下退火,保温 1 h。经 1、3、5 道次沿原始挤压板坯的 挤压方向轧制和经 2、4、6 道次旋转 90°轧制的交叉 轧制示意图如图 1(b)所示。



图1 异步轧制和交叉轧制示意图

**Fig. 1** Schematic diagrams of differential speed rolling and cross rolling: (a) Differential speed rolling; (b) Cross rolling

实验使用 Carl Zeiss 光学金相显微镜进行组织观察。使用 D<sub>max</sub>1400X 型射线衍射仪进行宏观织构测定, 衍射仪具体参数: Cu K<sub>α</sub>射线,管电压 40 kV,电流 100 mA。结合透射法和反极图法测量(0002)晶面的晶 粒取向密度,并通过计算机自动分析得到试样极图。 室温单向拉伸试验在 CMT4105 微电子万能试验机上 进行,取样方向分别与轧制方向成 0°、45°和 90°。

室温埃里克森试验在 Zwick 板料成形试验机上进行,试验示意图如图 2 所示。锥杯试验表征板材"拉 深+胀形"复合性能。锥杯试验在 Zwick 板料成形试 验机上进行,试验示意图如图 3 所示。

#### 表1 实验镁合金的化学成分

Ta	bl	e 1	0	Chemical	composition	of	tested	al	loys (	(mass	fraction,	%	)
----	----	-----	---	----------	-------------	----	--------	----	--------	-------	-----------	---	---

Al	Zn	Fe	Cu	Mn	Ni	Mg
2.80-3.10	1.04-1.17	≤0.002 5	≤0.001 7	0.221-0.321	≤0.01	Bal.



图2 埃里克森试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Erichsen test (mm)



图3 锥杯实验示意图

Fig.3 Schematic diagram of cone-cup test (mm)

# 2 结果与讨论分析

#### 2.1 不同轧制工艺获得镁合金薄板微观组织分析

图 4 所示为上述 3 种不同轧制工艺获得 AZ31 镁 合金板材的微观组织相片。从图 4 分析可知:相对于 常规轧制制备的镁合金板材,交叉轧制后的板材晶粒 (见图 4(c))明显细化,且大小均匀,平均晶粒尺寸为 9.5 μm。异步轧制的晶粒(见图 4(b))不完全均匀,为较 大晶粒和细小的等轴晶组成,平均晶粒尺寸 10.5 μm。 常规轧制的晶粒(见图 4(a))较粗大,平均晶粒尺寸 12.0 μm。

图 5 所示为常规轧制、异步轧制和交叉轧制工艺 制备的镁合金板材的(0002)极图。其晶粒都呈现择优 取向而表现出不同的基面织构。交叉轧制工艺制备的 板材,相对于常规轧制而言,基面织构明显增强,且 极图等高线形态较为圆整。异步轧制板材基面织构强 度降低。与常规轧制相似的是,极图等高线都沿轧向 方向被拉长。



图4 不同轧制工艺下镁合金板材的微观组织

**Fig. 4** Microstructures of magnesium alloy sheet obtained by different rolling technologies: (a) Normal rolling; (b) Differential speed rolling; (c) Cross rolling

分析上述结果可知,交叉轧制促进板材组织的均 匀化,一方面使晶粒尺寸细小均匀,另一方面缩小板 材平面上晶粒取向分布的差异。

异步轧制对板材微观组织的影响主要表现为细化 晶粒尺寸,减弱板材基面织构强度<sup>[15]</sup>。在不考虑宽展 的情况下,常规轧制板材在高度方向受到两向压应力 状态,其应变为高向压缩和轧向伸长;而在异步轧制 过程中,除两向压应力外,由于两轧辊速度差在轧辊 与板材之间摩擦力的作用下,使板材还受到一对切应 力的作用,其方向为在慢速辊一侧向后,快速辊一侧 向前,从而在板材厚度方向产生剪切应变。因此,在 道次压下量相同的情况下,一个道次异步轧制引起的



图 5 不同轧制工艺制备的镁合金板材(0002)极图

**Fig. 5** (0002) pole figures of magnesium alloy sheet obtained by different rolling technologies: (a) Normal rolling; (b) Differential speed rolling; (c) Cross rolling

实际变形程度较常规轧制的要大一些。对于镁合金板 材而言,在其它条件相同的情况下,应变量的增加有 利于动态再结晶的发生,所获得的组织较细小均匀。

异步轧制使基面织构减弱的根本原因在于其与常规轧制时的应力状态存在明显差异。由于异步轧制存在一个搓轧区,它改变了此区内金属的应力状态,由此使镁合金的轧制织构发生改变。常规轧制所形成的织构,其滑移面(即基面)与轧制压力方向垂直,而异步轧制滑移面法线方向会偏离轧制压力方向一定的角度,故其形成的织构取向也会随之偏离一定的角度。随着异步轧制道次的增加,会使这种偏离作用得到强化,最终可通过改变轧制过程中的基面织构取向来提高金属的塑性变形能力。

# 2.2 不同轧制工艺制备镁合金板材的基本成形性能 分析

实验通过获得沿不同取样方向的单向拉伸力学性 能及塑性应变比 r 值(如图 6 所示)来分析上述 3 种不 同轧制工艺制备的镁合金板材的基本成形性能。

从图 6 可知,交叉轧制后板材屈服强度升高,而 异步轧制后的板材屈服强度最低。具有织构的多晶镁 合金,其力学性能受晶粒尺寸与晶粒取向分布的双重 影响。由材料屈服强度与晶粒大小之间的函数关系可 知,晶粒越细小,材料的屈服强度越高。织构对镁合 金板材力学性能的影响,其实质是通过改变各滑移系, 特别是{0002}基面滑移的 Schmid 因子使织构强化或 软化而实现的。基面织构强烈时,晶粒 Schmid 因子 很小,处于硬取向,基面滑移难以进行,造成屈服强 度升高。交叉轧制后的板材晶粒细小,基面织构强度 高,都会提高板材的屈服强度。异步轧制后的板材, 虽然也有晶粒细化,但基面织构的强度相对减弱。在 同样的外力条件下,基面织构强度降低后,晶粒处于 有利于基面滑移的取向,基面滑移容易启动,屈服强 度降低。基面织构强度降低部分抵消了细晶强化对材 料强度提高的效果。

与异步轧制和常规轧制相比,交叉轧制的板材力 学性能更为均匀,在板材平面内沿不同方向力学性能 差异较小。而异步轧制及常规轧制后的板材,则表现 出较强的各向异性,即轧向的屈服强度低于横向的。 这与板材平面不同方向晶粒取向分布的差异有关。由 图 6(b)和(c)可见,(0002)极图等高线沿轧向被拉长, 即有更多的晶粒基面法向偏向于轧向。当沿轧向拉伸 时,晶粒 Schmid 因子较大,处于软取向,基面滑移 较易进行,而导致轧向屈服强度较低。

由图 6(c)可知,交叉轧制后的板材虽然具有较高的基面织构强度,但仍有较高的伸长率。与常规轧制相比,异步轧制后的板材虽然基面织构强度有所降低,但伸长率并未明显提高。由此分析可知,伸长率与基面织构的强度并无直接关系。

由图 6(d)可知,异步轧制后板材的 r 值最小,平 面不同方向 r 值差异较大。而交叉轧制后的板材 r 值 较大,且轧向、横向及 45°方向差异很小。塑性应变 比 r 值表征板材平面方向变形能力与厚向变形能力的 相对大小,交叉轧制后的镁合金板材具有强烈的基面 织构,室温下拉伸非基面滑移系难以启动,板材厚向 也即晶粒 c 轴方向的应变难以协调,板材沿厚向变形 困难,从而具有较大的 r 值。r 值在板材平面不同方向 的差异与晶粒取向分布的差异有关。



**Fig. 6** Mechanical properties of magnesium alloy sheet obtained by different rolling technologies: (a) Tensile strength; (b) Yield strength; (c) Elongation; (d) *r* value(plastic strain ratio)

# 2.3 不同轧制工艺制备镁合金板材的模拟成形性能 分析

为获得不同轧制工艺下镁合金板材的模拟成形性 能,本文作者对3种轧制工艺制备的镁合金板材进行 埃里克森试验,试验结果如图7所示。相对于常规轧 制,异步轧制板材的埃里克森值明显提高,而交叉轧 制板材的埃里克森值反而大幅降低。埃里克森值表征 板材的胀形性能,这说明通过异步轧制工艺可以明显 提高镁合金板材的胀形性能。

在埃里克森试验中,镁合金板材沿板面方向受拉 应力,按体积不变条件,板材沿厚度方向应减薄;也 即板材沿厚度方向减薄能力越强,越能获得较大的埃 里克森值。而沿厚度方向减薄能力越强,试样 r 值越 低。本试验中,埃里克森值与 r 值的关系与理论预测 完全一致,如图 8 所示。

基面织构弱化是异步轧制后的板材具有良好胀形 性能的原因。镁合金轧制板材具有强烈的基面织构, 在埃里克森试验中,试样处于双向等拉应力状态,大 多数晶粒处于硬取向,屈服应力较大,滑移难以进行, 塑性较差;当基面织构减弱后,即有一部分晶粒发生 偏转,基面不再与板面平行,这部分晶粒处于软取向, 基面滑移易于启动,从而提高塑性。









交叉轧制的板材胀形性能相比于常规轧制反而降低,这与交叉轧制后板材基面织构的增强与晶粒细化 有关系。基面织构增强不利于板材胀形性能的提高, 晶粒细化使强度提高也不利于提高板材胀形性能。粗 大晶粒更容易发生孪生,特别是压缩孪生可以使晶粒 基面偏转 56°,使孪晶内晶粒处于有利于基面滑移的 取向,孪生和滑移交替进行,使板材塑性得以提高。

本试验通过获得 3 种轧制工艺下镁合金板材的 6 组锥杯值来评价板材的拉胀复合性能。其锥杯试验结 果如图 9 所示。锥杯值表征板材的拉深胀形复合性能, 锥杯值 CCV 值越小,板材拉胀复合性能越好。可以 看出,异步轧制的板材拉深胀形复合性能较好,交叉 轧制后的板材拉深胀形复合性能反而有所降低。3 种 板材锥杯试验结果表现出来的规律与胀形性能完全相 似。





**Fig. 9** Value of cone-cup of magnesium alloy sheets obtained by different rolling technologies

## 4 结论

 1) 镁合金板材的综合力学性能不仅与晶粒尺寸 有关,还与晶粒取向有关。板材平面力学性能的差异 与板面不同方向晶粒取向的分布有关;室温下镁合金 薄板的伸长率主要取决于晶粒大小,晶粒越细小,板 材伸长率越高。

2) 室温埃里克森试验的结果表明,基面织构的减弱可明显提高板材的胀形性能;在基面织构强度相似的强况下,晶粒大小对板材的成形性能有重要影响: 晶粒较粗大,板材胀形性能越好。这是因为较粗大晶粒相比细晶更容易发生孪生,压缩孪晶可使晶粒发生偏转,有利于基面滑移,使板材塑性提高;室温锥杯的试验结果也表现出与胀形试验一致的规律。

3) 对比异步轧制、交叉轧制及常规轧制的板材, 异步轧制明显降低了板材基面织构强度,从而使板材 室温冲压性能得到提高;而交叉轧制的板材,晶粒显 著细化,基面织构增强,提高了板材的力学性能,却 降低了板材冲压成形性能;交叉轧制可以减弱板材各 向异性。

#### REFERENCES

[1] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 35-36.

CHEN Zhen-hua. Wrought magnesium alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 35–36.

- [2] 余 琨,黎文献,王日初,马正清.变形镁合金的研究、开发及应用[J].中国有色金属学报,2003,13(2):277-288.
   YU Kun, LI Wen-xian, WANG Ri-chu, MA Zheng-qing. The research, development and application on wrought magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2):277-288.
- [3] POSS R. Sheet metal production of magnesium[J]. Materials Science Forum, 2003, 419/422: 327–336.
- [4] WAGNER L, HILPERT M, WENDT J. On methods for improving the fatigue performance of the wrought magnesium alloys AZ31 and AZ80[J]. Materials Science Forum, 2003, 419/422: 93–102.
- [5] YOSHIDAY, ARAI K, ITOH S, KAMADO S, KOJIM A. Superplastic deformation of AZ61 magnesium alloy having fine grains[J]. Mater Trans, 2004, 45(8): 253722541.
- [6] TOZAWA Y. Deep drawing of magnesium alloy sheets[J]. Japan Inst Light Metals, 2001, 51(10): 492–497.
- [7] 张信钰. 金属和合金的织构[M]. 北京: 科学出版社, 1976.

ZHANG Xin-yu. Texture in metals and alloys[M]. Beijing: Science Press, 1976.

- [8] PRADO M T, VALLE J A, RUANO O A. Effect of sheet thickness on the microstructure evolution of an Mg alloy during large strain hot rolling[J]. Scripta Materialia, 2004, 50: 667–671.
- [9] WANG Y N, HUANG J C. Texture analysis in hexagonal materials[J]. Mater Chemistry Phys, 2003, 81: 11–26.
- [10] 汪凌云,黄光胜,范永革,黄光杰.变形 AZ31 镁合金的晶粒 细化[J].中国有色金属学报,2003,13(3):594-598.
  WANG Ling-yun, HUANG Guang-sheng, FAN Yong-ge, HUANG Guang-jie. Grain refinement of wrought AZ31 magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(3): 594-598.
- [11] CHINO Y, KIMURA K, MABUCHI M. Deformation characteristics at room temperature under biaxial tensile stress in textured AZ31 Mg alloy sheets[J]. Acta Materialia, 2009, 57: 1476–1485.
- [12] IWANAGA K, TASHIRO H, OKAMOTO H, SHIMIZU K. Improvement of formability from room temperature to warm temperature in AZ31 magnesium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 156: 1313–1316.
- [13] 程永奇,陈振华,夏伟军,傅定发.等径角轧制 AZ31 镁合金 板材的组织与性能[J].中国有色金属学报,2005,15(9): 1369-1375.

CHENG Yong-qi, CHEN Zhen-hua, XIA Wei-jun, FU Ding-fa. The microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy sheets rolled by equal channel angular[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(9): 1369–1375.

[14] BEN-ARTZY A, SHTECHMAN A, BEN-ARI N, DAYAN D.

Plastic deformation of wrought magnesium alloys AZ31, ZK60[C]// Proceedings of the Second Israeli International Conference on Magnesium Science & Technology. Israel: Magnesium Research Institute, 2000: 22–24.

- [15] YOSHIDA Y, CISAR L, KAMADO S, KOJIMA Y. Effect of microstructural factors on tensile properties of an ECAR processed AZ31 magnesium alloy[J]. Mater Trans, 2003, 44(4): 468–475.
- [16] LEE J B, KONNO T J, JEONG H G. Grain refinement and texture evolution in AZ31 Mg alloys sheet processed by differential speed rolling[J]. Materials Science and Engineering, 2009, 161(1/3): 166–169.
- [17] WA TANABE H, MU KAI T, ISHI KAWA K. Differential speed rolling of an AZ31 magnesium alloy and the resulting mechanical properties[J]. J Mater Sci, 2004, 39(4): 1477–1480.
- [18] KIM S H, YOU B S, YIM C D, SEO Y M. Texture and microstructure changes in asymmetrically hot rolled AZ31 magnesium alloy sheets[J]. Materials Letters, 2005, 59: 3876–3880.
- [19] WATANABE H, MUKAI T, ISHIKAWA K. Differential speed rolling of an AZ31 magnesium alloy and the resulting mechanical properties[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39: 1477–1480.
- [20] KIM W J, HONG S I, KIM Y S, MIN S H, JEONG H T, LEE J D. Texture development and its effect on mechanical properties of an AZ61 Mg alloy fabricated by equal channel angular pressing[J]. Acta Materialia, 2003, 51: 3293–3307.

(编辑 李艳红)