

## 织构和晶粒尺寸对 AZ31 镁合金薄板成形性能的影响

胡水平, 王 哲

(北京科技大学 冶金工程研究院, 北京 100083)

**摘 要:** 采用不同的轧制工艺, 制备 4 种晶粒尺寸为 7~18  $\mu\text{m}$  和不同强度基面织构的 AZ31 镁合金板材, 通过单向拉伸试验和室温 Erichsen 试验, 探讨晶粒尺寸与织构对镁合金板材室温成形性能的影响。结果表明: 晶粒细化虽然增强了板材的力学性能, 但不利于提高板材的胀形性能; 基面织构的减弱使板材沿厚度方向变形能力增强, 具有较好的胀形性能, 但另一方面使板材的屈服强度降低。

**关键词:** 镁合金; 织构; 晶粒尺寸; Erichsen 试验; 成形性能

**中图分类号:** TG142

**文献标志码:** A

## Effects of texture and grain size on press formability of AZ31 magnesium alloy sheets

HU Shui-ping, WANG Zhe

(Engineering Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Four magnesium alloy sheets which show different grain sizes from 7  $\mu\text{m}$  to 18  $\mu\text{m}$  and significant basal textures with different intensities were prepared by different rolling processes. The uniaxial tensile test and Erichsen test were carried out at room temperature to investigate the influences of grain size and texture on the press formability of magnesium alloy sheets. The results show that the grain refinement can lead to high strength, but it can not improve the stretch formability of the sheets. The weakened basal texture can induce strain in the thickness direction to obtain excellent stretch formability; however, it reduces the yield strength of the samples at the same time.

**Key words:** magnesium alloys; texture; grain size; Erichsen test; formability

镁合金具有密度低、比强度高、减震性良好、回收容易以及电磁屏蔽效果好等优点, 在汽车以及电子工业中受到越来越多的重视<sup>[1-3]</sup>。传统镁合金产品大多依靠压铸和半固态成形, 但相比之下, 冲压工艺能成形更小壁厚的零件, 产品性能更为稳定, 生产率更高<sup>[4]</sup>。但由于具有密排六方结构、室温下可开动的滑移系较少, 导致镁合金的塑性较差, 难以成形<sup>[5]</sup>。因此, 对镁合金的研究不仅仅致力于提高其力学性能, 还需要提高其塑性变形能力, 尤其是室温下的冲压成形性能。

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, 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<sup>[6-10]</sup>。晶粒尺寸也是影响镁合金性能的主要因素, 有研究指出, 通过晶粒细化可以提高镁合金板材的强度以及延展性<sup>[11-13]</sup>, 但与单向拉伸相比, 冲压成形过程中的应力状态更为复杂, CHINO 等<sup>[14]</sup>的研究表明, 细晶镁合金板材虽然具有良好的力学性能和断后伸长性能, 但胀形性能却很差, 单向拉伸条件下的断后伸长率并不足以表征材料冲压成形性能的优劣。本文作者以最常用的 AZ31 镁合金为研究对象, 制备晶粒尺寸和织构各不相同的 4 种板材, 研究其在单向拉伸以及双向拉伸条件(Erichsen 试验)下的成形特点。

**基金项目:** 北京市高成长企业自主创新科技专项

**收稿日期:** 2011-09-09; **修订日期:** 2012-03-28

**通信作者:** 胡水平, 副研究员, 博士; 电话: 13611044910; E-mail: husp@necar.ustb.edu.cn

## 1 实验

采用 2.4 mm 厚的挤压 AZ31B 板坯, 轧前在 400 °C 下退火 2 h, 然后分别在 150、250、350 和 450 °C 下轧至 1 mm, 道次压下量为 15%, 每道次间板材重新回炉保温 10~15 min。轧后板材在 300 °C 下退火 1 h。在以上 4 种温度下轧制的板材依次标记为 A、B、C 和 D。通过光学显微镜观察板材的微观组织, 并通过截线法测量晶粒尺寸; 利用 SIEMENS D5000 X 射线衍射仪测量板材中间层宏观织构, 得到  $\{0002\}$ 、 $\{00\bar{1}0\}$  和  $\{10\bar{1}1\}$  和  $\{11\bar{2}0\}$  4 个晶面的不完全极图。

单向拉伸试验在室温下进行, 取样方向分别与轧制方向成 0°、45° 和 90° 角, 拉伸速度为 2 mm/min。一组试样拉伸至试样断裂, 另一组试样拉伸到应变 10% 时停止, 测量试样的  $r$  值。

室温 Erichsen 试验在 Zwick 板料成形试验机上进行, 试验示意图如图 1 所示。在半球形凸模作用下, 凹模内板料不断凸起直至出现穿透裂纹后停止, 测量凸起高度即 Erichsen 值  $IE$ 。试样为直径  $d60$  mm 的圆片, 压边力为 10 kN, 冲头速度为 0.1 mm/s, 每种板材重复 3 次。

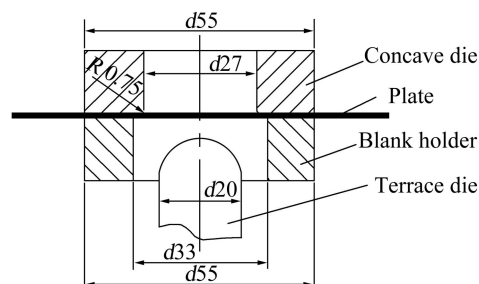


图 1 Erichsen 试验模具示意图

Fig. 1 Schematic diagram of die of Erichsen test (mm)

## 2 实验结果

### 2.1 板材的微观组织和织构

图 2 所示为不同温度下轧制板材退火后的微观组织。150 °C 下轧制的板材(试样 A)退火后组织为细小的等轴晶, 平均晶粒尺寸为 7  $\mu\text{m}$ 。随着轧制温度的升高, 晶粒尺寸逐渐增大。250、350 和 450 °C 下轧制的板材平均晶粒尺寸分别为 12  $\mu\text{m}$ (试样 B)、14  $\mu\text{m}$ (试样 C) 和 18  $\mu\text{m}$ (试样 D)。

不同轧制工艺下板材的晶粒取向也有较大差异。图 3 所示为 4 种板材的  $\{0002\}$  极图。可以看出, 轧制

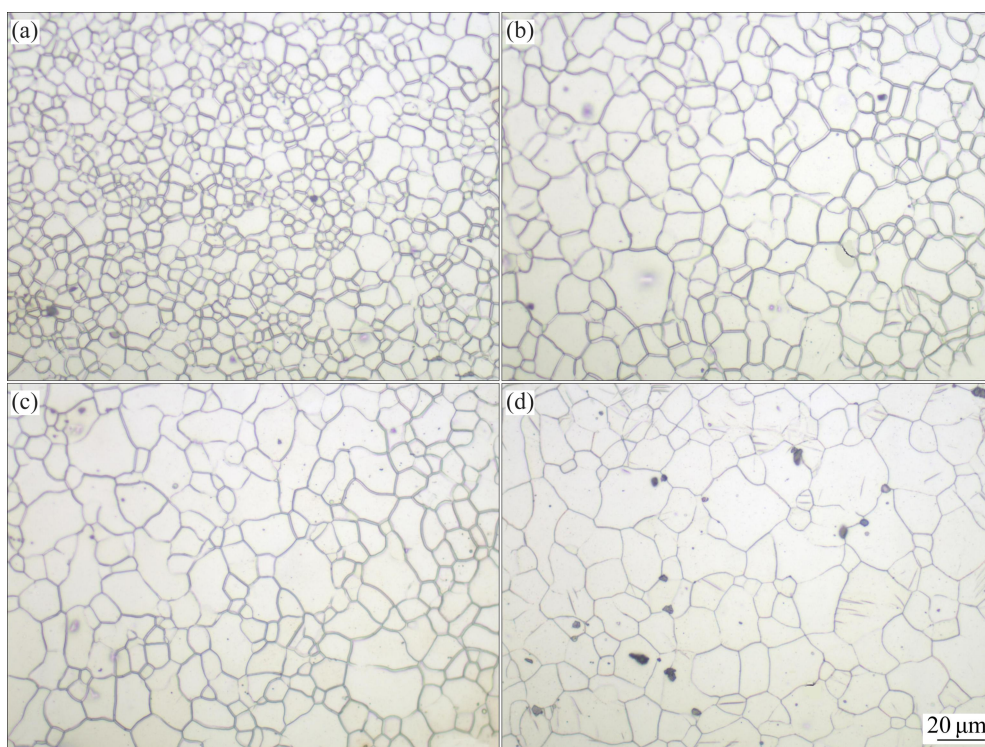


图 2 4 种板材的微观组织

Fig. 2 Microstructures of four AZ31 magnesium alloy sheets: (a) Specimen A; (b) Specimen B; (c) Specimen C; (d) Specimen D

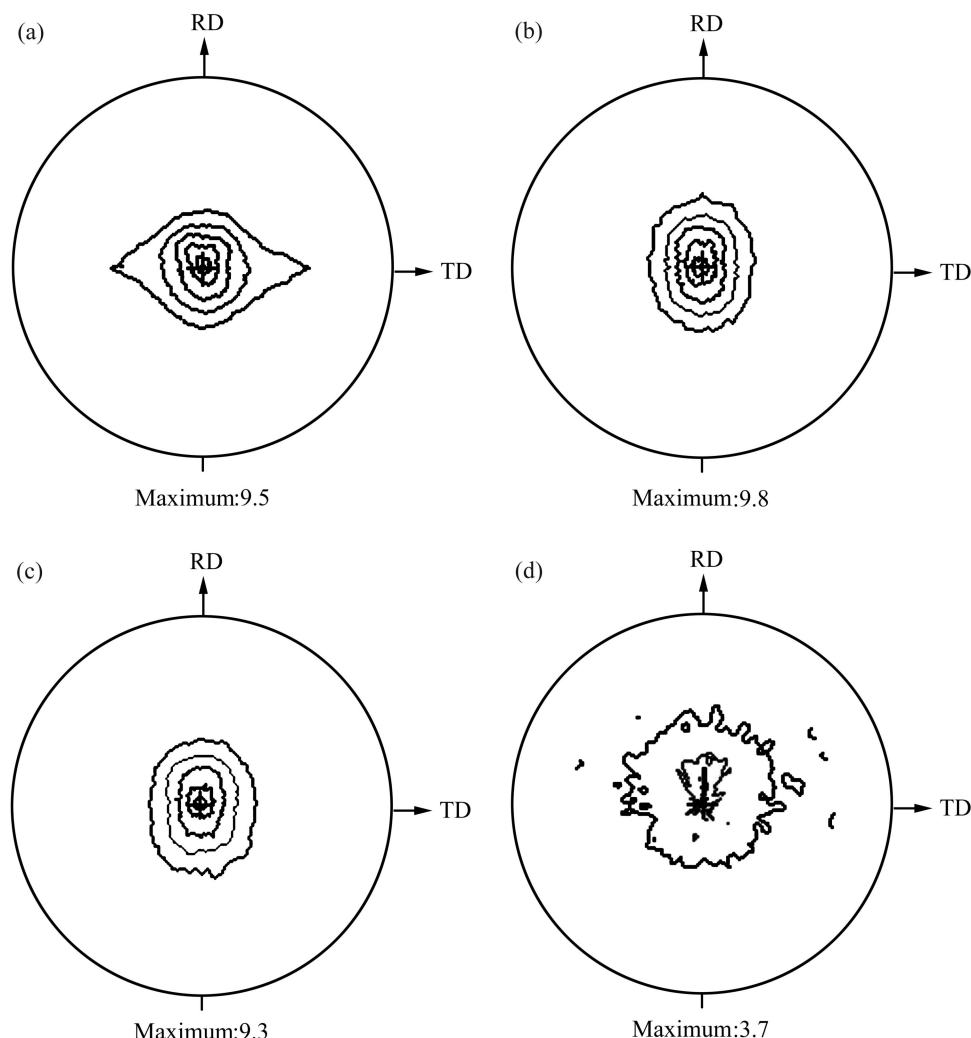


图3 4种板材的{0002}极图

Fig. 3 {0002} pole figures of four AZ31 magnesium alloy sheets: (a) Specimen A; (b) Specimen B; (c) Specimen C; (d) Specimen D

后的镁合金板材都表现出一定的基面织构,即大部分晶粒的{0002}面都平行于板材轧面。A、B和C 3种板材基面织构较强,而试样D基面织构强度明显减弱。同时,极图等高线形态也各异。试样A的极图等高线沿横向被拉长;试样B和C的极图等高线形态相似,都是沿轧向被拉长;试样D的等高线形态较为圆整。

## 2.2 成形性能

4种板材室温单向拉伸试验结果列于表1。从试样A到试样D,抗拉强度呈逐渐降低趋势,但降幅很小。屈服强度也逐渐降低,且降幅较大。断后伸长率也逐渐降低。值得注意的是,试样A轧向的屈服强度高于横向的,而试样B和C横向的屈服强度则明显高于轧向的。试样D在板材平面不同方向强度相差不大,较为均匀。 $r$ 值(塑性应变比,即材料在冲压成形时宽度方向的应变与厚度方向的应变的比)在轧向、

横向以及45°这3个方向都表现出相同的降低趋势。

室温Erichsen试验的结果见图4所示。可见,从试样A到试样D,Erichsen值逐渐增大,即板材的胀形性能逐渐提高。

## 3 分析与讨论

### 3.1 织构与晶粒尺寸对镁合金板材力学性能的影响

从试样A到试样D,4种板材的屈服强度呈有规律的下降趋势,这是晶粒尺寸与基面织构双重因素影响的结果。在A、B和C 3种板材基面织构强度相近的情况下,屈服强度随晶粒尺寸的增大而减小。这是因为粗大晶粒晶界前塞积的位错数目多于细晶的,应力集中大,易于启动相邻晶粒的位错源,有利于滑移的传递而使屈服强度降低。相对于其他3种板材,试样D的

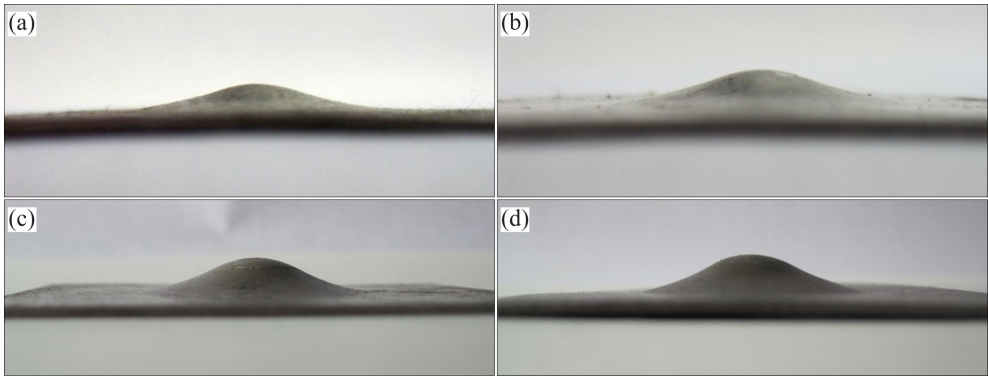


图 4 4 种板材的 Erichsen 试验结果

**Fig. 4** Results of Erichsen tests for four AZ31 magnesium alloy sheets: (a) Specimen A,  $IE=3.34$  mm; (b) Specimen B,  $IE=3.41$  mm; (c) Specimen C,  $IE=4.51$  mm; (d) Specimen D,  $IE=5.19$  mm

表 1 4 种 AZ31 镁合金板材单向拉伸试验结果

**Table 1** Results of uniaxial tensile tests for four AZ31 magnesium alloy sheets

| Specimen | $\sigma_b$ /MPa |     |     | $\sigma_s$ /MPa |     |     | $\delta$ /% |      |      | $r$  |      |      |
|----------|-----------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|-------------|------|------|------|------|------|
|          | RD              | 45° | TD  | RD              | 45° | TD  | RD          | 45°  | TD   | RD   | 45°  | TD   |
| A        | 265             | 272 | 265 | 192             | 188 | 178 | 22.9        | 25.0 | 22.7 | 1.76 | 2.45 | 1.88 |
| B        | 267             | 268 | 265 | 158             | 176 | 171 | 20.4        | 24.5 | 22.0 | 1.70 | 2.28 | 1.89 |
| C        | 262             | 257 | 261 | 151             | 155 | 163 | 20.3        | 22.8 | 19.5 | 1.38 | 1.74 | 1.68 |
| D        | 250             | 245 | 245 | 121             | 124 | 126 | 19.0        | 20.5 | 18.0 | 1.03 | 0.93 | 1.24 |

屈服强度大幅降低, 这与基面织构显著弱化有关。镁合金主要滑移模式包括  $\{0002\}\langle 11\bar{2}0\rangle$  基面滑移、 $\{10\bar{1}0\}\langle 11\bar{2}0\rangle$  棱柱面滑移和  $\{10\bar{1}1\}\langle 11\bar{2}0\rangle$  锥面滑移等。织构对镁合金力学性能的影响, 其实质是通过改变各滑移系特别是  $\{0002\}\langle 11\bar{2}0\rangle$  基面滑移的 Schmid 因子, 产生织构强化或软化而实现的<sup>[15]</sup>。室温下, 非基面滑移系的临界剪切应力远大于基面滑移系的, 难以启动。基面滑移是最重要的塑性变形模式之一, 对室温塑性变形贡献很大。当板材基面织构较强, 即大多数晶粒的  $\{0002\}$  面平行于板材轧面时, Schmid 因子很小, 晶粒处于硬取向, 基面滑移难以进行, 使合金的屈服强度增高。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。

3.2 织构与晶粒尺寸对镁合金板材胀形性能的影响

4 种板材的晶粒大小、基面织构强度、平均  $r$  值与 Erichsen 值列于表 2。其中, 平均  $r$  值按式(1)计算:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (1)$$

式中:  $r_0$ 、 $r_{45}$  和  $r_{90}$  分别表示与轧制方向成 0°、45°和

90°角取样测得的  $r$  值。

表 2 显示试样 D 的 Erichsen 值明显高于其他 3 种板材的, 这与试样 D 的基面织构强度显著降低有关。基面织构减弱, 取向因子增大, 基面滑移系容易启动。虽然基面滑移无法协调  $c$  轴方向应变, 但织构弱化使晶粒取向更加散漫, 晶粒  $c$  轴不再集中垂直于板面, 使板厚方向获得应变, 因而板材胀形性能得到提高。

晶粒细化有助于提高镁合金的塑性, 从断后伸长率看, A、B 和 C3 种板材在基面织构强度相近的情况下, 晶粒越细小, 伸长率越大。但从胀形实验结果看, 如表 2 所示, A、B 和 C3 种板材在基面织构强度相近

表 2 4 种板材的晶粒尺寸、基面织构强度、平均  $r$  值和 Erichsen 值

**Table 2** Grain size, basal texture intensity, average  $r$  and Erichsen value of four specimens

| Specimen | Grain size/<br>$\mu\text{m}$ | Basal texture<br>intensity | Average $r$ | $IE/\text{mm}$ |
|----------|------------------------------|----------------------------|-------------|----------------|
| A        | 7                            | 9.5                        | 2.03        | 3.34           |
| B        | 12                           | 9.8                        | 1.97        | 3.41           |
| C        | 14                           | 9.3                        | 1.60        | 4.51           |
| D        | 18                           | 3.7                        | 1.07        | 5.19           |

的情况下, Erichsen 值随晶粒尺寸的增大而增大。可见, 晶粒越大, 反而越有利于提高板材的胀形性能。从单向拉伸试验中得到的断后伸长率, 并不足以表征镁合金在复杂冲压过程中的塑性成形能力。

图5所示为Erichsen试验后试样的微观组织。取样部位在凸起部分最顶端。由图5可知, 变形前后试样A的组织变化较小, 仍然为细小的等轴晶。试样B有少许孪晶组织, 试样C中孪晶增多, 试样D中孪晶进一步增多。粗大的晶粒内部更容易发生孪晶, 这主要是因为粗晶内位错滑移程长, 晶界附近应力集中严重。而细晶组织不仅位错滑移程短, 还可以通过晶界滑动机制(GBS)来释放局部应力集中, 应力状态难以满足孪晶形核的要求。

AZ31 镁合金主要的孪生模式有 $\{10\bar{1}2\}\langle 10\bar{1}\bar{1}\rangle$ 拉伸孪生和 $\{10\bar{1}1\}\langle 10\bar{1}\bar{2}\rangle$ 压缩孪生。拉伸孪生只有在平行于 $c$ 轴拉伸或垂直于 $c$ 轴压缩时才会发生, 压缩孪生正好相反, 发生的条件是沿 $c$ 轴压缩或垂直于 $c$ 轴拉伸。4种板材试样都存在强烈的基面织构, Erichsen 试验时, 板材沿板面方向受拉应力, 即晶粒垂直于 $c$ 轴方向受拉应力。板材的这种晶粒取向符合压缩孪生发生的条件, 但不利于拉伸孪生的发生。但从图5可见, 试样B、C和D的变形组织中都存在凸镜状的拉伸孪晶, 这可能与材料内部复杂的应力状态

有关, 部分微区的应力状态满足拉伸孪晶发生的条件。孪生虽然可以协调 $c$ 轴方向上的应变, 但无论是拉伸孪生还是压缩孪生, 孪生切变量都远小于滑移变形量, 对材料塑性变形的贡献很小。压缩孪生 $\{10\bar{1}1\}\langle 10\bar{1}\bar{2}\rangle$ 可使晶粒基面旋转, 这种取向有利于孪晶区域的晶粒启动基面滑移, 从而使材料的塑性变形得以继续, 滑移和孪生交互进行, 塑性得到提高。

$r$ 值表征试样沿宽度方向与厚度方向的变形能力,  $r$ 值越小表示板材沿厚向变形越容易, 越容易减薄, 胀形性能也越好。这与表2中Erichsen值随 $r$ 值的降低而增大这一趋势相对应。试样D的 $r$ 值大幅降低, 这与基面织构减弱有关。

## 4 结论

1) 轧制后的镁合金薄板存在强烈的基面织构, 晶粒处于硬取向, 基面滑移难以启动, 材料具有较高的屈服强度。基面织构的弱化可显著提高板材的胀形性能。

2) 在基面织构强度相近的情况下, 晶粒细化可以提高板材的屈服强度和断后伸长率, 但会降低板材的胀形性能。粗大晶粒在双向拉伸条件下更容易发生孪

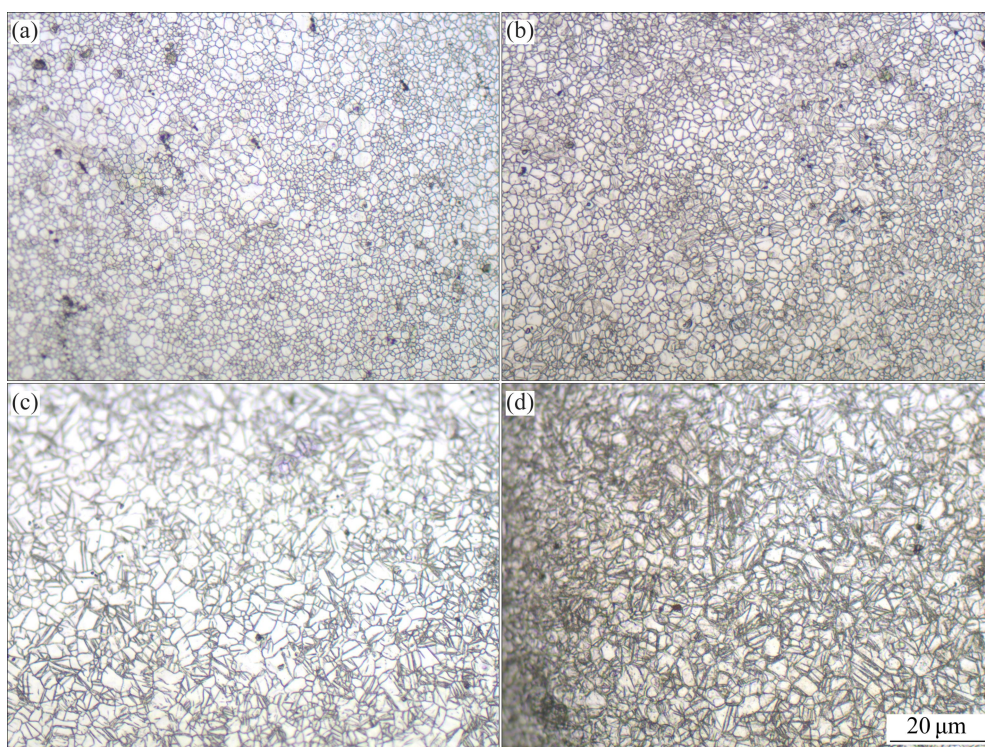


图5 Erichsen 试验后4种板材的微观组织

Fig. 5 Microstructures of four AZ31 magnesium alloy sheets after Erichsen test: (a) Specimen A; (b) Specimen B; (c) Specimen C; (d) Specimen D

晶, 特别是 $\{10\bar{1}1\}\langle 10\bar{1}2\rangle$ 压缩孪生可以使晶粒发生旋转, 使晶粒处于有利基面滑移的取向, 孪晶和滑移交互进行, 塑性成形性能得到提高。

3) 基面弱化可增强板材厚度方向的变形能力, 降低 $r$ 值,  $r$ 值越小, 板材的胀形性能越好。

## REFERENCES

- [1] 李天生, 徐 慧. 镁合金成形技术的研究和发展现状[J]. 材料研究与应用, 2007, 1(2): 91-94.  
LI Tian-sheng, XU Hui. Research into magnesium alloy forming technology and its developing status [J]. Materials Research and Application, 2007, 1(2): 91-94.
- [2] ELIEZER D, AGHION E, FROES F H. Magnesium science, technology and applications [J]. Advanced Performance Materials, 1998, 5(3): 201-212.
- [3] SCHUMANN S, FRIEDRICH H. Current and future use of magnesium in the automobile industry [J]. Materials Science Forum, 2003, 419/422: 51-56.
- [4] MORI K, TSUJI H. Cold deep drawing of commercial magnesium alloy sheets [J]. Annals of International Institution for Production Engineering Research, 2007, 56(1): 285-288.
- [5] PEREZ-PRADO M T, RUANO O A. Texture evolution during annealing of magnesium AZ31 alloy [J]. Scripta Materialia, 2002, 46: 149-155.
- [6] 唐伟琴, 张少睿, 范晓慧, 李大永, 彭颖红. AZ31镁合金织构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-rui, 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): 371-377.
- [7] CHINO Y, LEE J S, SASSA K, KAMIYA A, MABUCHI M. Press formability of a rolled AZ31 Mg alloy sheet with controlled texture [J]. Material letters, 2006, 60: 173-176.
- [8] 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.
- [9] STYCZYNSKI A, HARTIG C, BOHLEN J, LETZIG D. Cold rolling textures in AZ31 wrought magnesium alloy [J]. Scripta Materialia, 2004, 50: 943-947.
- [10] KIM W J, HONG S I, KIM Y S. 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.
- [11] CHANG T C, WANG J Y, LEE C M O S. Grain refining of magnesium alloy AZ31 by rolling [J]. Materials Processing Technology, 2003, 140: 588-591.
- [12] CHAPMAN J A, WILSON D V. The room temperature ductility of fine grain magnesium [J]. Journal of Institute of Metal, 1963, 91: 39-40.
- [13] KUBOTA K, MABUCHI M, HIGASHI K. Processing and mechanical properties of fine-grained magnesium alloy [J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(10): 2255-2262.
- [14] 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.
- [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, CHENG 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 陈卫萍)