

文章编号: 1004-0609(2004)03-0391-07

轧制方式对 AZ31 镁合金薄板组织和性能的影响^①

张青来¹, 卢晨¹, 朱燕萍¹, 丁文江¹, 贺继泓²

(1. 上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030; 2. 上海钢铁研究所, 上海 200940)

摘要: 研究轧制方式对 AZ31 镁合金薄板组织和性能的影响。交叉轧制可使材料的延伸率显著提高, $\sigma_{0.2}$ 和 σ_b 明显下降, 加强了组织的均匀性和等轴性。交叉轧制的 AZ31 镁合金薄板具有良好的深冲性能。

关键词: AZ31 镁合金; 交叉轧制; 组织性能; 热深冲

中图分类号: TG 146.22; TB 333

文献标识码: A

Effect of rolling method on microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy thin sheet

ZHANG Qing-lai¹, LU Chen¹, ZHU Yan-ping¹, DING Wen-jiang¹, HE Ji-hong²

(1. State Key Laboratory of Metal Matrix Composite, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Iron and Steel Research Institute, Shanghai 200940, China)

Abstract: The effect of rolling method on microstructure and properties of a AZ31 magnesium alloy thin sheet were investigated. The results show that the elongation can be increased apparently by cross rolling, while the ultimate tensile strength and the yield strength are decreased. The uniformity and the spheroidicity of the microstructure are improved. The heat stamping experiment proves the deep drawing property of AZ31 magnesium alloy thin sheet.

Key words: AZ31 magnesium alloy; cross rolling; microstructure and property; heat stamping

镁合金是最轻的结构金属材料, 密度大约为 1.74 g/cm^3 , 是钢的 $1/4$, 铝的 $2/3$ 。与钢和铝合金相比^[1], 镁合金不仅有较高的比强度和比刚度, 而且具有优良的散热性能、电磁屏蔽性能、减震性能和机械加工性能, 其产品易回收利用, 有望成为 21 世纪重要的商用轻质结构材料^[1]。

金属镁具有密排六方(HCP)晶体结构, 滑移系少, 致使镁合金材料比其他常见金属铝、铁等的塑性变形能力更差^[1, 2]。德国奥迪汽车公司采用热冲压法成功地生产镁合金汽车件, 如汽车内门板^[3, 4], Polo 两门车应用内镁外铝混合车门, 比用

钢板质量减少 50%, 比用铝板减少 20%。镁及镁合金板带材产品还广泛用于制造飞机、弹道导弹和其他飞行器的机舱、机翼、内外蒙皮及各种结构器件, 导弹系统的雷达反射器等军用领域。镁合金热冲压成形性能与钢板和铝板在室温下的冲压性能相近。目前, 国内外学者对镁合金轧制和热冲压的研究作了大量工作^[3-13]。

本文作者采用交叉轧制和单向轧制 2 种热轧工艺制备了具有良好组织状态的 AZ31 镁合金薄板。分别测定热轧态和退火态 AZ31 镁合金薄板的横向及纵向的力学性能, 确定轧制方式对镁合金冲压性

① 基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2003AA331120)

收稿日期: 2003-05-30; 修订日期: 2003-10-01

作者简介: 张青来(1962-), 男, 副教授, 博士。

通讯作者: 张青来, 副教授; 电话: 021-62932164; 传真: 021-62932113; E-mail: bxzhang@mail.sjtu.edu.cn

能的影响。

1 实验

实验用材料为工业连铸镁合金 AZ31 棒材, 其化学成分见表 1。镁合金棒材经高温均匀化退火后, 在 630 t 挤压机挤压出 83 mm × 6.0 mm 的板坯, 然后用四辊轧机单向轧制成 (75~80) mm × (0.2~0.8) mm 和交叉轧制成 300 mm × (0.4~0.8) mm 的镁合金薄板。用 LEICA MEF4M 光学显微镜观察热轧态和退火态镁合金显微组织。

表 1 镁合金 AZ31 的化学成分

Table 1 Chemical compositions of AZ31 alloy
(mass fraction, %)

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Mg
3.010 0	0.950 0	0.280 0	0.022 0	0.012 0	< 0.010 4	Bal.

将 AZ31 镁合金板材拉伸试样进行退火处理^[6] (250 °C, 0.5 h, 空冷)。试样拉伸力学性能在电子万能材料试验机 BTC-FR020TN. A50 上测试。用

Hitachi S-125 扫描电子显微镜观察断口形貌。

由于镁是密排六方的晶体结构, 合金元素在镁基体中扩散速率很低, 很容易在凝固过程中产生枝晶偏析和非平衡结晶相。为了提高合金组织成分的均匀性, 对 d 120 mm 的 AZ31 镁合金连铸棒材进行均匀化退火, 显微组织如图 1(a) 所示。根据文献 [1] 确定, 棒材在 673 K 温度下退火 24 h 左右。挤压镁合金板坯在 630T 挤压机上进行, 板坯规格为 83 mm × 6.0 mm, 经 673 K, 4 h 退火后, 其显微组织如图 1(b) 所示。

交叉轧制: 镁合金板坯加热至 623~673 K, 保温 0.5 h, 沿垂直与板坯挤压方向进行轧制。在轧制之前, 利用热钢板反复轧制来加热轧辊工作面。将 300 mm × 83 mm × 6.0 mm 尺寸的板坯热轧制成 300 mm × 300 mm × 1.5 mm 的薄板, 然后进行酸处理以便去除表面的氧化皮和夹杂物。第 2 轧制阶段, 镁合金板坯在 523~573 K 炉中保温 0.5 h, 进行应力退火处理, 将薄板再旋转 90°, 沿镁板坯挤压方向进行热轧, 薄板尺寸约为 600 mm × 300 mm × 0.8 mm。为了进一步提高镁合金薄板组织性能

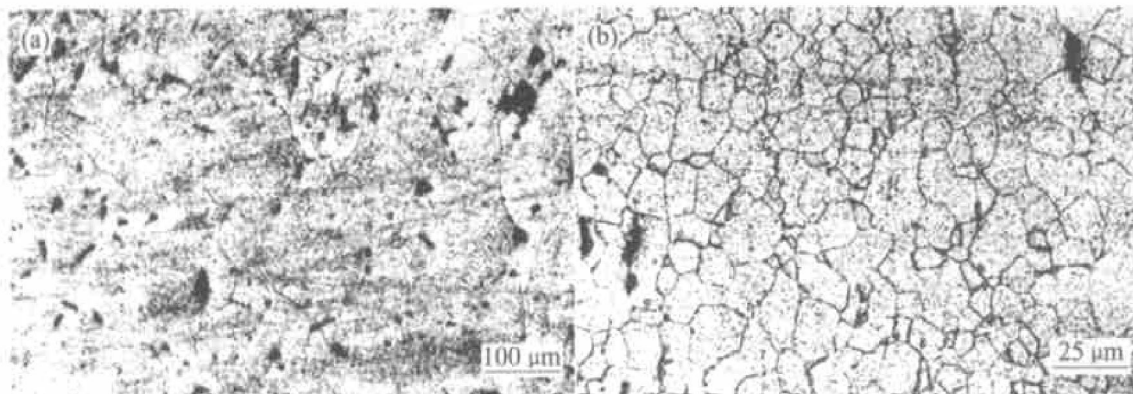


图 1 AZ31 镁合金的显微组织

Fig. 1 Microstructures of AZ31 alloy

(a) —Homogenizing annealing; (b) —Extruded

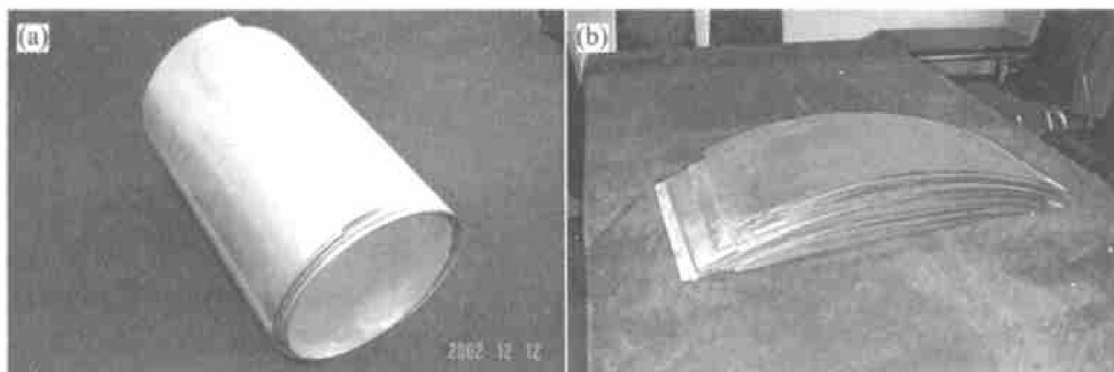


图 2 交叉轧制的镁合金薄板

Fig. 2 AZ31 magnesium alloy thin sheet by cross rolling

(a) —300 mm × (0.2~0.4) mm; (b) —300 mm × (0.5~0.8) mm

和平整度, 退火处理后, 进行冷轧制, 裁碎边之后, 镁合金薄板产品的尺寸为 $(600 \sim 800) \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times (0.4 \sim 0.8) \text{ mm}$ (图 2), 其显微组织见图 3。

单向轧制: 镁合金板坯单向轧制工艺如同交叉轧制工艺, 不同的是沿镁板坯挤压方向进行轧制, 不换向, 镁合金薄板最终尺寸为 $(75 \sim 80) \text{ mm} \times (0.2 \sim 0.8) \text{ mm}$, 其显微组织见图 3。

2 结果与讨论

2.1 AZ31 镁合金轧制工艺

为了更深入地分析热轧+ 冷轧 AZ31 镁合金的

微观组织结构, 观察了不同薄板厚度的横纵向金相组织。从图 1(a) 可看到, 工业态 AZ31 镁合金的晶粒比较粗大, 平均晶粒度为 $86 \mu\text{m}$, 晶界上有随机分布的二次相^[11], 这是铸态 AZ31 镁合金典型的金相组织。在大变形量挤压后, 铸态 AZ31 镁合金的晶粒被明显细化且呈等轴状, 其平均晶粒度为 $23 \mu\text{m}$, 大部分晶界为大角晶界, 如图 1(b) 所示。原先分布在晶界上的二次相经过挤压变形以后大部分弥散析出在晶粒内部, 且很细小, 这主要是在热挤压过程中发生了二次相弥散析出。从图 3 可看出, 在热轧+ 冷轧矫直后的合金中存在着大量孪晶或孪晶组、亚结构和位错等微观组织。一方面, 细

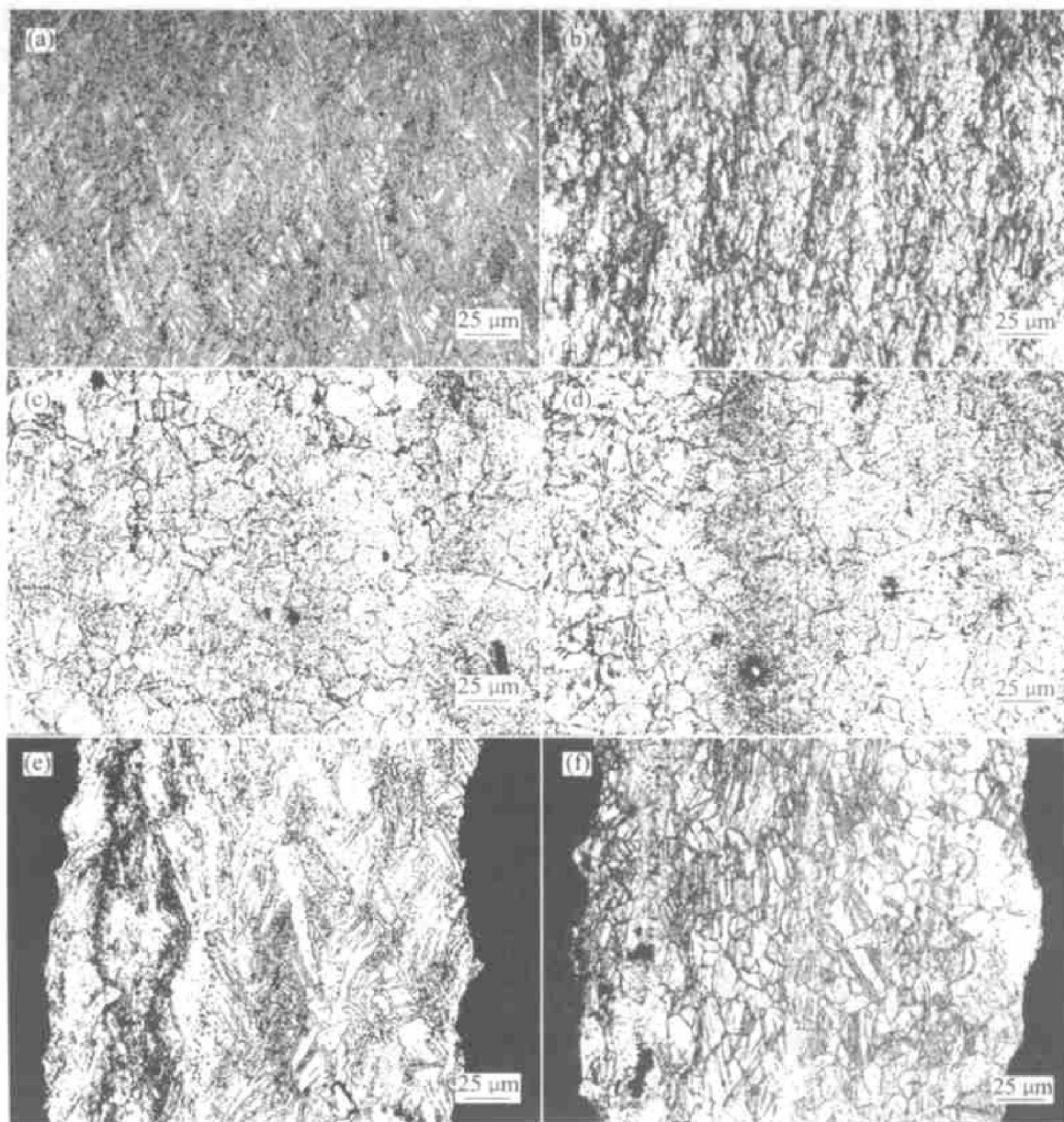


图 3 AZ31 热轧态镁合金薄板的金相组织

Fig. 3 Microstructures of AZ31 thin sheet (rolling state)

Sheet thick: (a), (b) —0.60 mm; (c), (d) —0.80 mm; (e), (f) —0.24 mm

Rolling direction: (a), (c), (e) —Transverse; (b), (d), (f) —Portrait

Rolling method: (a), (b), (c), (d) —Cross rolling; (e), (f) —Portrait rolling

小晶粒很容易使晶界滑移,同时晶界增多,提高了原子扩散速率;另一方面,孪晶和位错结构可以很好地协调晶界滑移。两方面共同作用使得轧制 AZ31 镁合金在高应变速率下获得良好的塑性变形。大晶粒组织的挤压 AZ31 镁合金在热轧制变形后,都获得了不同程度的晶粒细化和等轴化分布,这是发生动态再结晶的细化结果^[5, 11]。在精轧过程中,由于变形时间短,板材与轧辊接触后冷却速度快,特别是在冷矫直后,没发生完全动态再结晶^[6]。而退火后的合金变形组织已经完全转变为等轴晶的静态再结晶组织(图 4(a)所示)。由于动态再结晶最容易发生在具有原始纤维组织(挤压态或轧制态)的拉伸变形中,同时,动态再结晶消除了原来存在于挤压态或轧制态 AZ31 镁合金组织中的小角度晶界,使其变成大角度晶界结构,这些细化晶粒会通过晶界滑移和晶粒转动来达到等轴分布状态。交叉轧制

与单向轧制(不换向)再结晶组织的平均晶粒度虽然相差不多,但前者比后者更具有均匀性和等轴性。经冷轧后,交叉轧制薄板的横纵向显微组织强化了晶粒均匀性和等轴性,这种组织能使深冲压加工的应力和应变分布均匀,特别是成品板材的晶粒内部弥散析出二次相(大小约为 1 μm 左右),以起到固化和钉扎的作用^[11],有利于板材的塑性变形和深冲性能,提高板材的变形能力。在轧制过程中退火保温时间过长,将导致轧制后镁合金晶粒粗大(如图 3(c), 3(d)所示)。

2.2 AZ31 镁合金交叉轧制的作用

表 2 示出了轧制方法对 AZ31 镁合金薄板性能的影响。交叉轧制时,材料的延伸率显著提高, $\sigma_{0.2}$ 和 σ_b 明显下降,降至最低点;单向轧制时,则出现相反的结果。可见,交叉轧制能有效地减轻材料的

表 2 AZ31 薄板的力学性能

Table 2 Tensile properties of materials

Sample No.	Test No.	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	Remark
027R1, cross rolling, annealing state	1	175.0	259.3	17.6	Sheet thick of 0.6 mm; 250 °C, 0.5 h, air cooling; transverse sampling
	2	177.6	263.9	18.4	
	3	175.8	262.3	16.0	
027R2, cross rolling, annealing state	1	112.7	245.2	22.3	Sheet thick of 0.6 mm; 250 °C, 0.5 h, air cooling; portrait sampling
	2	109.8	239.9	16.5	
	3	116.1	252.9	25.5	
027Z1, cross rolling, hot rolling state	1	224.8	278.5	18.4	Sheet thick of 0.6 mm; transverse sampling
	2	240.7	303.1	17.6	
	3	241.2	300.4	17.3	
027Z2, cross rolling, hot rolling state	1	186.0	268.4	16.6	Sheet thick of 0.6 mm; portrait sampling
	2	186.0	268.5	19.8	
	3	186.4	269.6	15.5	
028R1, portrait rolling, annealing state	1	200.4	281.2	21.4	Sheet thick of 0.5 mm; 250 °C, 0.5 h, air cooling; transverse sampling
	2	200.4	278.2	23.7	
	3	199.9	279.2	19.8	
028R2, portrait rolling, annealing state	1	158.8	257.9	23.5	Sheet thick of 0.5 mm; 250 °C, 0.5 h, air cooling; portrait sampling
	2	152.7	249.6	23.4	
	3	161.3	261.0	27.6	
028Z1, portrait rolling, hot rolling state	1	306.3	378.3	6.8	Sheet thick of 0.5 mm; transverse sampling
	2	309.2	384.1	6.9	
	3	312.9	386.3	8.6	
028Z2, portrait rolling, hot rolling state	1	250.0	322.3	5.9	Sheet thick of 0.5 mm; portrait sampling
	2	251.4	317.2	6.2	
	3	251.3	318.8	6.0	

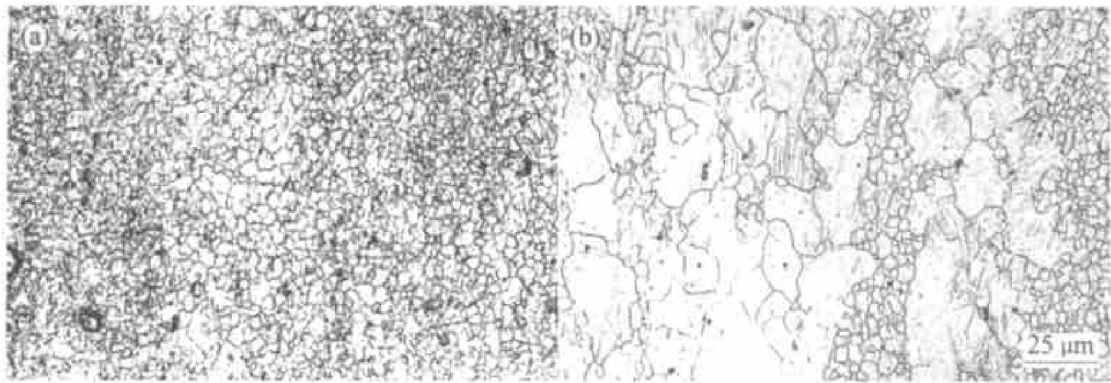


图 4 AZ31 镁合金薄板退火后金相组织

Fig. 4 Microstructures of AZ31 thin sheet after annealing
(a) $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 min; (b) $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 45 min

各向异性^[14], 提高其深冲性能; 另一方面, 交叉轧制加强了材料内部组织的均匀性和等轴化作用, 为深冲变形提供了一个良好的内部组织结构条件(图 4(a))。而退火温度及保温时间对 AZ31 镁合金薄板的组织和性能有重要的影响。从图 4(b)可知, 保温时间增加至 45 min, 其晶粒组织明显长大。

2.3 AZ31 镁合金的拉伸断口分析

从图 5 的 AZ31 镁合金拉伸曲线可观察到, 热轧态和退火态下的变形属于均匀塑性变形, 无明显的缩颈现象。

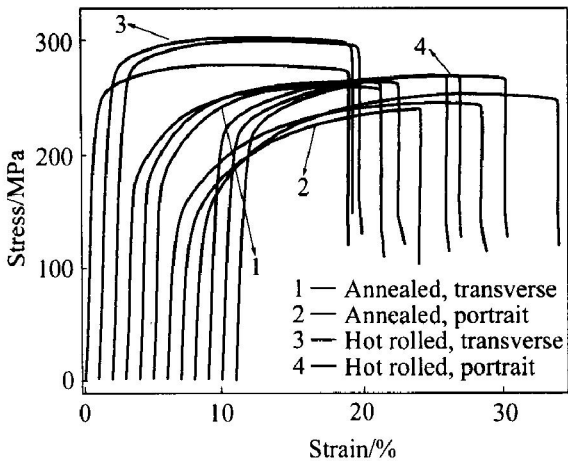


图 5 AZ31 镁合金交叉轧制薄板拉伸 σ — ε 曲线

Fig. 5 Strain—stress curves of AZ31 thin sheet by cross rolling

AZ31 镁合金变形后在其晶界上或二次相周围存在许多微小孔洞^[11]。普遍认为, 当晶界或二次相与基体界面上承受较高的正向拉应力时, 这些地方由于应力集中会产生微细孔穴, 这些孔穴通过扩散蠕变和抵消复合的双重作用, 会在局部聚集而成微小的孔洞。从图 6 断口形貌观察到, 退火状态下,

断口基本上由不均匀网格状撕裂棱和不均匀分布的孔洞组成, 这些撕裂棱网格和孔洞互相作用、互相制约, 使部分应力增加。这些集中应力在均匀塑性变形结束后得不到释放, 故导致撕裂棱与韧窝共存的形貌, 属于韧性断裂, 是密排六方晶体结构镁断裂方式。在热轧态下, 交叉轧制的 AZ31 镁合金断



图 6 AZ31 镁合金薄板退火后
室温拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture morphologies of thin sheet after annealing
(a) —Cross rolling; (b) —Portrait rolling

口属于韧性断裂; 单向轧制的合金显现韧性-脆性混合型断裂。

2.4 镁合金薄板温拉深实验

为研究轧制方式对 AZ31 薄板热冲压性能的影响, 在 100 t 液压实验机上分别进行了单向轧制和交叉轧制镁合金薄板温拉深性能实验。冲头直径和凹模直径分别为 66 mm 和 68 mm。实验所用圆形坯料的直径为 142 mm。结果表明: 在 200~250 °C 和相同冲压速度下单向轧制镁合金薄板(或挤压薄板)的冲裂主要发生在沿着轧制或挤压方向; 而交叉轧制镁合金薄板未出现断裂现象, 拉深比可达到 2.15。

在 16 t 冲床上设计一套热冲压装置, 进行镁合金薄板快速热冲压实验。采用机械冲压法热冲压出 60 mm × 60 mm 的方形件(薄板坯料加热至 250~400 °C, 保温 1~5 min; 模具预热至 200 °C), 无裂纹和冲裂现象(如图 7 所示)。实际冲压结果证实: 经交叉轧制后, 材料的冲压成功率显著提高; 单向轧制镁合金薄板(或挤压薄板)易出现冲裂现象。由于镁板温度较低和保温时间不够, 在热冲压时发生局部冲裂现象。图 8 所示为冲裂部位的断口形貌, 是由多孔网格(图 8(a))和河流(图 8(b))组成。另一方面, 由于晶粒组织的不均匀性, 深冲加工中材料的塑性和变形抗力是不同的, 在承受载荷时就会造成变形不均匀, 使材料过早开裂, 这就是不均匀的晶粒组织对材料性能的重要影响^[14]。

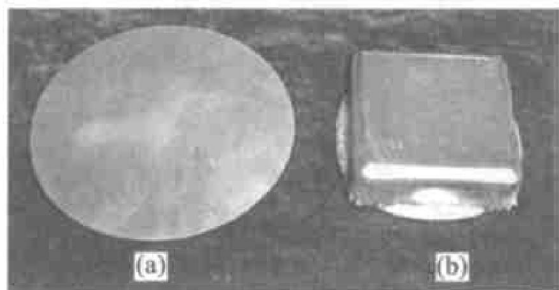


图 7 交叉轧制 AZ31 镁合金薄板温拉深实验

Fig. 7 Hot draw trial of AZ31 thin sheet
by cross rolling
(a) —Material; (b) —Drawing sample

3 结论

- 1) 交叉轧制时, 材料的延伸率明显提高, $\sigma_{0.2}$ 和 σ_b 明显下降。
- 2) 交叉轧制可加强材料内部组织的均匀性和

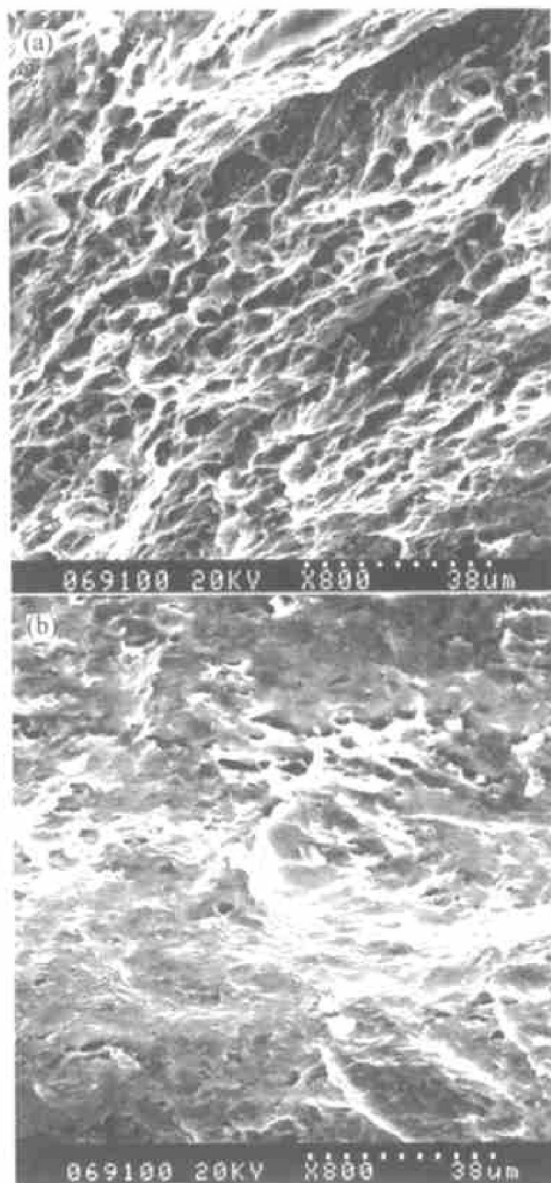


图 8 AZ31 镁合金冲压件裂口形貌

Fig. 8 Fracture surface of pressing specimen
(a) —Gridding; (b) —River

等轴性作用。

- 3) 交叉轧制的 AZ31 镁合金薄板具有良好的深冲性能。

REFERENCES

- [1] 余 琨, 黎文献, 王日初, 等. 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 Wenxian, WANG Rìchu, et al. Research, development and application of wrought magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 277~288.
- [2] Kim W J, Chung S W, Kum D. Superplasticity in thin magnesium alloy sheet and deformation mechanism maps

- for magnesium alloys at elevated temperatures[J]. *Acta Mater*, 2001, 49(16): 3337 - 3345.
- [3] Friedrich H, Schumann S. The second age of magnesium research strategies to bring the automotive industry's vision to reality[A]. *Proceedings of the Second Israeli International Conference on Magnesium Science & Technology* [C]. Israel: Magnesium Research Institute, 2000. 9 - 18.
- [4] Berr Artzy A, Shtechman A, Berr Ari N, et al. Plastic deformation of wrought magnesium alloys AZ31, ZK60 [A]. *Proceedings of the Second Israeli International Conference on Magnesium Science & Technology* [C]. Israel: Magnesium Research Institute, 2000. 22 - 24.
- [5] Mukai T, Watanabe H, Higashi K. Application of superplasticity in commercial magnesium alloy for fabrication of structural components[J]. *Material Science and Technology*, 2000, 16(11 - 12): 1314 - 1319.
- [6] 余琨, 黎文献. Mg-Al-Zn 系变形镁合金轧制及热处理后的组织和性能[J]. *金属热处理*, 2002, 27(5): 8 - 11.
- YU Kun, LI Wenxian. Microstructures and properties of Mg-Al-Zn wrought alloys in as-rolling and annealing states[J]. *Metal Heat Treatment*, 2002, 27(5): 8 - 11.
- [7] Watanabe H, Tsutsui H, Mukai T, et al. Deformation mechanism in a coarse grained Mg-Al-Zn alloy at elevated temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 2001, 17(3): 387 - 397.
- [8] Lee S, Chen Y H, Wang J Y. Isothermal sheet formability of magnesium alloy AZ31 and AZ61[J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2002, 124(1 - 2): 19 - 24.
- [9] Doege E, Droder K. Sheet metal forming of magnesium wrought alloys-formability and process technology[J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2001, 115(1): 14 - 19.
- [10] Tozawa Y. Deep drawing of magnesium alloy sheets [J]. *J Japan Inst Light Metals*, 2001, 51(10): 492 - 497.
- [11] 尉胤红, 王渠东, 周海涛, 等. 轧制 AZ91 镁合金超塑性研究[J]. *高技术通讯*, 2002, 12(9): 52 - 55.
- WEI Yin-hong, WANG Qir-dong, ZHOU Hai-tao, et al. Superplasticities of rolled AZ91 Magnesium alloys [J]. *High Technology Letters*, 2002, 12(9): 52 - 55.
- [12] 汪凌云, 黄光胜, 范永革, 等. 变形 AZ31 镁合金的晶粒细化[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(6): 594 - 598.
- WANG Ling-yun, HUANG Guang-sheng, FAN Yong-ge, et al. Grain refinement of wrought AZ31 magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(6): 594 - 598.
- [13] 于彦东, 张凯锋, 蒋大鸣, 等. 轧制镁合金超塑性和超塑胀形[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(2): 71 - 75.
- YU Yandong, ZHANG Kaifeng, JIANG Daming, et al. Superplasticity and superplastic bulging capability of rolled magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(2): 71 - 75.
- [14] 朱知寿, 顾家琳, 陈南平. 钛的组织控制方法与力学性能各向异性的研究[J]. *机械工程材料*, 1994, 18(6): 8 - 10.
- ZHU Zhishou, GU Jialin, CHEN Nanping. On the texture controlling methods and mechanical property anisotropy in commercially pure titanium sheet[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 1994, 18(6): 8 - 10.

(编辑 陈爱华)