

文章编号:1673-9981(2009)04-0264-05

# AZ31 镁合金轧制板材冲压性能的研究

张文玉<sup>1</sup>, 陈振华<sup>2</sup>

(1. 湖南工学院机械工程系, 湖南 衡阳 421002; 2. 湖南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘 要:**通过在不同温度下分别沿轧向、45°方向及横向进行了单向拉伸试验,且对 AZ31 镁合金轧制板材的冲压性能进行了研究.结果表明,随着变形温度的升高,板材抗拉强度和屈服强度下降,断裂伸长率提高,应变硬化指数和塑性应变比降低,拉深性能得到改善;变形温度高于 200℃时,板材的冲压性能得到改善,轧制方向上其屈强比为 0.876,应变硬化指数为 0.158,塑性应变比为 1.307.

**关键词:**AZ31 镁合金板材; 变形温度; 显微组织; 冲压性能

**中图分类号:** TG146.22; TG115.52 **文献标识码:** A

镁合金作为一种最轻的金属结构材料,具有独特的优点,得到越来越广泛地应用,但镁的晶体结构为密排六方型,塑性变形能力较差<sup>[1-2]</sup>,从而限制了镁合金的应用.镁合金在常温下很难成形,随着温度的升高,合金的活动滑移面增加,塑性提高,这为镁合金板料的热成形提供了可能<sup>[3-5]</sup>.所以,为了扩大镁合金板材的应用范围,对其冲压性能进行研究,是镁合金研究的重点之一.

本文在不同温度下对 AZ31 镁合金轧制板材分别沿轧向(0°)、45°及横向(90°)方向进行单向拉伸试验,并对其冲压性能进行研究,为变形镁合金塑性变形行为的研究、冲压成形工艺的开发提供试验依据.

## 1 试验部分

### 1.1 材 料

试验所用材料为 AZ31 镁合金轧制板材,其经铸造—挤压—交叉轧制工艺制得,合金的名义化学成分为 Mg-3Al-0.8Zn-0.4Mn.取初始板材挤压方向为轧制方向,分别沿与轧制方向成 0°,45°及 90°方向取拉伸试样,拉伸试样按照 GB/T4338-1995 中规定的方法截取.

### 1.2 方 法

用浸蚀剂对拉伸试样进行处理,其组成为 5 g 苦味酸+5 g 冰醋酸+10 mL 蒸馏水+80 mL 无水乙醇,用 XJL-03 型金相显微镜对轧制板材的金相组织进行分析;在 WDW-E200 微机万能试验机上进行高温拉伸试验,温度分别为 150℃,200℃,250℃,300℃,350℃及 400℃,温差控制在±5℃以内,保温时间约 20 min,试样标距部分的尺寸为 15 mm×3.5 mm,拉伸速度  $v=2$  mm/min,根据 GB5028-85 和 GB5027-85,对 AZ31 镁合金板材的拉伸应变硬化指数  $n$  及塑性应变比  $r$  进行测定计算,其中测量  $r$  时应变量为 12%.

## 2 结果与讨论

### 2.1 金相组织分析

图 1 为 AZ31 镁合金轧制板材的金相组织.从图 1 可以看出,板材的晶粒组织较细小,部分晶粒为等轴晶,平均晶粒尺寸约为 10 μm.表明轧制板材发生了动态再结晶,形成了大量的细小晶粒.

收稿日期:收稿日期:2009-09-16

作者简介:张文玉(1967—),湖南攸县人,硕士,副教授.

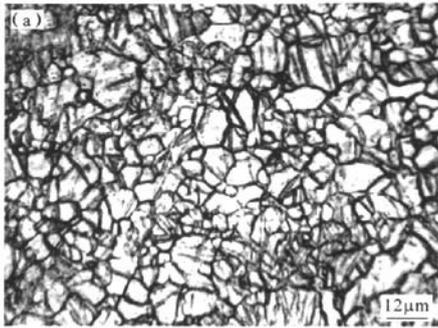


图1 AZ31 镁合金轧制板材微观组织

Fig.1 Microstructure of AZ31 Mg alloy rolling sheets

### 2.2 AZ31 镁合金轧制板材的单向拉伸曲线

图2为不同拉伸温度下镁合金轧制板材的应力-位移曲线。从图2可以看出,在不同拉伸温度下合金的拉伸曲线呈现出较宽的波动。这是因为在高温拉伸变形过程中,板材不断产生加工硬化和动态回复,两者交替进行,从而使拉伸曲线变宽,且这种趋势随温度的升高而加剧。同时从图2还可看出,当拉伸温度超过300℃时,拉伸曲线没有明显的硬化阶段,在板材达到屈服点后,随即达到最大强度。这表明在温度较高时,板材变形时的硬化能力减弱,由高温导致的动态回复引起的软化处于主导地位。

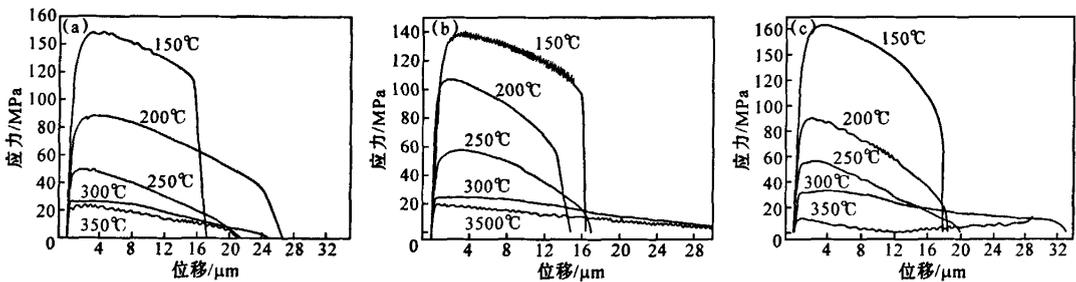


图2 沿不同方向 AZ31 镁合金板材的应力-位移曲线

Fig.2 Stress-displacement curves of AZ31 Mg alloy sheets in various directions

(a)0°; (b)45°; (c)90°

### 2.3 AZ31 镁合金的屈服强度及屈强比

在冲压过程中板材屈服强度小则材料容易屈服,成形后回弹小,贴模性及定形性较好。此外,屈服强度对零件表面质量也有影响。如果板材的拉伸曲线不连续而在屈服阶段出现台阶,且台阶长度较大,则经过屈服伸长后,板材表面就会出现明显的滑移线痕迹而导致零件外观粗糙。

图3为沿不同方向 AZ31 镁合金板的屈服强度随温度变化的曲线。从图3可见,随着温度的升高, AZ31 镁合金板材沿各方向的屈服强度均降低,其平均屈服强度由 150℃时的 127.6 MPa 降低至 400℃时的 9.3 MPa。这表明,随温度的升高,板材更容易发生塑性变形,有利于降低成形后的回弹,从而提高成形件尺寸的精度,减少后续的精整工序。

图4为镁合金板材的屈强比  $\sigma_s/\sigma_b$  随温度变化的曲线。在板材冲压过程中,屈强比  $\sigma_s/\sigma_b$  对板材冲压成形性能影响较大。从图4可以看出,沿不同方向

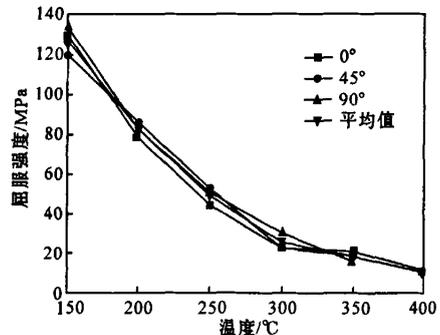


图3 AZ31 镁合金板材屈服强度与温度的关系

Fig.3 Relations between yield Strength and temperature of AZ31 Mg alloy sheets

AZ31 镁合金板材的屈强比  $\sigma_s/\sigma_b$  随温度的升高先增加后降低;轧制方向上(0°)的屈强比  $\sigma_s/\sigma_b$  由 150℃时的 0.861 增加至 200℃时的 0.876;平均屈服比  $\sigma_s/\sigma_b$  由 150℃时的 0.847 增加至 200℃时的

0.895,当温度为 300℃ 时,平均屈服比  $\sigma_s/\sigma_b$  为 0.891,随着温度的继续升高,屈服比  $\sigma_s/\sigma_b$  急剧减小.这种呈“M”形变化的趋势表明,温度对 AZ31 镁合金板材屈服比  $\sigma_s/\sigma_b$  的影响比较复杂.所以,在考虑屈服比  $\sigma_s/\sigma_b$  对拉深性能的影响时,应该合理地选择拉深成形温度区间,以得到最有利于拉深成形的屈服比  $\sigma_s/\sigma_b$ .根据屈服比  $\sigma_s/\sigma_b$  小,板材达到最大强度的塑性变形阶段长,有利于冲压成形的原则,可选择较低温度  $t < 150^\circ\text{C}$  或较高温度  $t > 300^\circ\text{C}$  下进行冲压成形,但由前面的分析又可知,温度过低或过高均不利于 AZ31 镁合金板材的成形.所以,综合上述分析,在温度为 200℃ 左右时进行拉深,比较有利于板材的拉深成形.

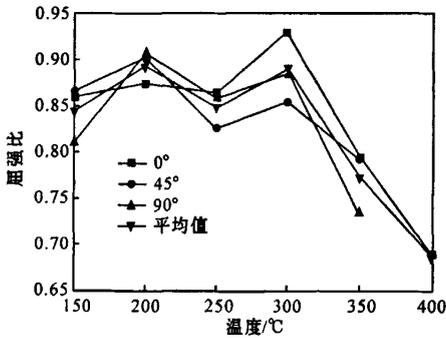


图4 AZ31 镁合金板材屈服比与温度的关系

Fig. 4 Relations between yield ratio and temperature of AZ31 Mg alloy sheets

## 2.4 AZ31 镁合金的断裂伸长率

一般来讲,板材的伸长率较大,其塑性变形稳定性较大,不易产生局部的过大变形而导致板材的破裂.图5为 AZ31 镁合金板材在不同温度下断裂伸长率  $\delta$  随温度变化的曲线.从图5可见,AZ31 镁合金板材的断裂延伸率  $\delta$  随温度的升高,基本呈线性增加,其平均断裂伸长率  $\delta$  由 150℃ 时的 43.8% 增长至 400℃ 时的 109%.这表明,温度对 AZ31 镁合金板材断裂伸长率  $\delta$  的影响显著.所以,在拉深成形过程中选择较高的拉深温度,能提高 AZ31 镁合金板材的断裂伸长率  $\delta$ ,对拉深成形有利.试验中发现,断裂伸长率  $\delta$  沿 45° 及 90° 方向在 150℃ 和 350℃ 时出现波动的现象.这是因为影响板材断裂伸长率  $\delta$  的因素较多,除了板材固有的杂质、孔洞等缺陷外,拉伸过程中试样的装夹、温度控制的精度等都会

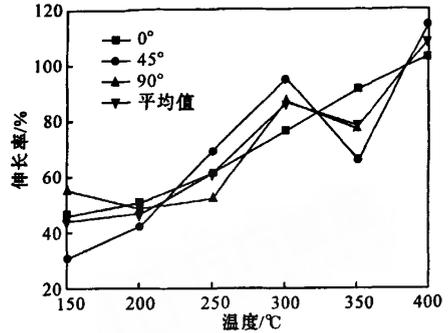


图5 AZ31 镁合金板材断裂伸长率与温度的关系

Fig. 5 Relations between break elongation and temperature of AZ31 Mg alloy sheets

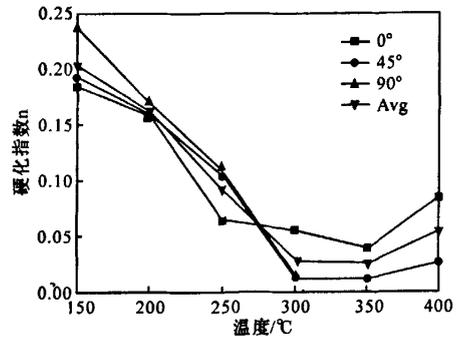


图6 AZ31 镁合金板材应变硬化指数 n 与温度的关系

Fig. 6 Relations between n and temperature of AZ31 Mg alloy sheets

对其产生一定的影响. Fuh-Kuo Chen 等人<sup>[6]</sup>的研究结果也证实,AZ31 镁合金板材的断裂伸长率  $\delta$  随温度的升高呈线性增加.

## 2.5 AZ31 镁合金应变硬化指数及塑性应变比

由于应变硬化指数  $n$  反映了板材变形过程中变形的硬化能力,即  $n$  值高的板材抵抗缩颈的能力高,均匀变形阶段长.因此,在冲压过程中为了获得优良的冲压性能,通常希望板材的  $n$  值尽可能的大.对于镁合金而言,随着温度的升高  $n$  值减小<sup>[7]</sup>.但影响镁合金板材  $n$  值的因素目前还不十分清楚,有研究表明<sup>[8]</sup>, $n$  值与板材的热处理温度有关.

图6为 AZ31 镁合金板材在不同温度下应变硬化指数  $n$  随温度变化的曲线.由图6可知,随着温度的升高,AZ31 镁合金板材的  $n$  值逐渐减小.在轧制方向(0°)上,当温度为 150℃ 时  $n$  值为 0.185,200

℃时为0.158,而在250℃时 $n$ 值已减小为0.064,至350℃时降低为0.038,其平均值也由150℃时的0.205降低至350℃时的0.025.这表明,随着温度的升高,尤其当变形温度高于200℃时,就 $n$ 值而言,不利于AZ31镁合金板材冲压性能的提高.从图6还可以看出,总体上 $n < 0.25$ ,这说明试验所用AZ31镁合金板材的 $n$ 值较小.由于 $n$ 值的测定对试验精度要求较高,在试验过程中容易出现误差,因此,在400℃左右时 $n$ 值出现一定的反弹升高,是由试验误差所致.Yoshihara<sup>[9]</sup>等人的研究结果也证实,对于AZ31镁合金板材,当温度为150~400℃时 $n$ 值随温度的升高而线性降低.

塑性应变比 $r$ 反映薄板在成形过程中抵抗变薄或变厚的能力, $r$ 值对拉深成形性能影响很大. $r$ 值大,板材在平面方向易发生变形,而径向不容易起皱且拉深力小,传力区不容易拉裂,有利于板材的拉深成形.制耳参数反映了板材在平面各方向的塑性各向异性,板材的塑性平面各向异性常会使拉深件口部出现制耳,而制耳的大小及位置与 $\Delta r$ 有关,它随角度的变化而变化,与 $r$ 值的变化是一致的.在 $r$ 值较低的方向,板材变厚,故筒壁高度较低;在 $r$ 值高的方向,板材厚度变化不大,故筒壁高度较高.当 $\Delta r > 0$ 时,制耳在0°和90°处出现;当 $\Delta r < 0$ 时,制耳在±45°处出现;若 $\Delta r$ 过大高于 $r$ 值,对LDR的有利影响便消失了<sup>[10]</sup>.所以,冲压后制品如产生制耳,必须切除,这样不仅增加了金属的损耗及切边工序,而且还会因各向异性使冲压件产生壁厚不均,影响生产效率及产品质量.

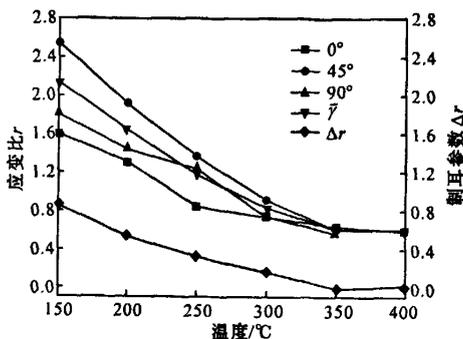


图7 AZ31镁合金板材 $r$ 值与温度的关系

Fig.7 Relations between  $r$  and sample orientation of AZ31 Mg alloy sheets

图7为镁合金板材塑性应变比 $r$ 随温度变化的曲线.从图7可见,在轧制方向(0°)上,150℃时 $r$ 值为1.598,200℃时为1.307,300℃时为0.737;随温度的升高AZ31镁合金板材的制耳参数递减,由150℃时的0.858减小至300℃时的0.170.这表明,温度升高,有利于板材朝各方向均匀地变形,从而降低拉深件的制耳高度,这有利于提高拉深件的LDR及成形质量,减少材料修边的余量,提高材料的利用率.

### 3 结论

- (1) 经轧制后板材的晶粒组织较细小,部分为等轴晶,平均晶粒尺寸在10 μm以下.
- (2) 随着变形温度的升高,板材抗拉强度和屈服强度下降,断裂延伸率提高,应变硬化指数和塑性应变比降低,拉深性能得到改善.
- (3) 变形温度高于200℃时,板材的冲压性能得到改善,轧制方向上其屈强比为0.876,应变硬化指数为0.158,塑性应变比为1.307.

#### 参考文献:

- [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.
- [2] 陈振华,严红革,陈吉华,等.镁合金[M].北京:化学工业出版社,2004:19-20.
- [3] KOIKE J, OHYAMA R, KOBAYASHI T, et al. Grain boundary sliding in AZ31 magnesium alloys at room temperature to 523K[J]. Materials Transactions, 2003, 44(4):445-451.
- [4] AGNEW S R, ÖZGÜR D. Plastic anisotropy and the role of non-basal slip in magnesium alloy AZ31B[J]. International Journal of Plasticity, 2005, 21:1161-1193.
- [5] AGNEW S R, TOMÉ C N, BROWN D W, et al. Study of slip mechanisms in a magnesium alloy by neutron diffraction and modeling [J]. Scripta Materialia, 2003, 48: 1003-1008.
- [6] CHEN F K, HUANG T B, CHANG C K. Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheets[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43:1553-1559.
- [7] 轻金属協會, マグネシウム委員会. マグネシウム合金展伸材の標準性質の測定研究[M]. 东京: 轻金属協會, 1961:657.
- [8] 田浩彬, 康达昌. 板料 $n$ 值测量方法的研究[J]. 塑性工

程学报, 2003, 110(11), 36-39.

- [9] YOSHIHARA S, YAMAMOTO H, MANABE K. Formability enhancement in magnesium alloy deep drawing by local heating and cooling technique[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 143/144: 612-615.

- [10] KAISER F, BOHLEN J. Correlation of microstructure and mechanical properties of polled magnesium sheet AZ31[C]//*Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference in Magnesium Alloy and Their Application*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004: 456-462.

## Research on the drawability of AZ31 magnesium alloy rolling sheet

ZHANG Wen-yu<sup>1</sup>, CHEN Zhen-hua<sup>2</sup>

(1. *Department of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, China;*

2. *School of Material Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China*)

**Abstract:** Drawabilities of AZ31 magnesium alloy rolling sheet were studied by using the simple tension test at different temperature along the orientation of rolls, 45° and traverse. The results showed that both the tensile strength and yield strength decreased and the break elongation ratio increased as the deformation temperature rose, and also the strain-hardening exponent and the plastic strain ratio reduced and the drawing performance was improved as well. When the temperature is higher than 200 °C, the tensile ratio, the strain hardening exponent and the plastic strain ratio are up to 0.876, 0.158 and 1.307 respectively in the rolling direction.

**Key words:** AZ31 magnesium alloy sheet; deforming temperature; microstructure; drawability

(上接第 263 页)

- [2] 赵浩峰, 池成忠. 镁合金及复合材料[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 3.
- [3] 陈彬, 林栋, 曾小勤, 等. AZ31 镁合金大压下率轧制的研究[J]. *锻压技术*, 2006(3): 1-3.
- [4] 汪凌云, 黄光杰, 陈林, 等. 镁合金板材轧制工艺及组织性能分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(5):

910-914.

- [5] 陈刚, 范培耕, 彭晓东. Sr 对 AZ91 镁合金的组织性能的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2008, 36(8): 15-18.
- [6] 王慧源, 刘生发, 徐萍. 铈在镁及其合金中的作用[J]. *铸造*, 2005, 54(11): 1221-1224.
- [7] 王俊隆. 合金化元素对弹性模量的影响[J]. *稀有金属*, 1979(4): 1-10.

## Research on the mechanical properties of magnesium-manganese-strontium alloy

ZHAO Hao-feng<sup>1,2</sup>, WANG Ling<sup>1,2</sup>, SUN Lei<sup>1</sup>, ZHANG Shuai<sup>1</sup>, YAN Kai<sup>1</sup>, LI Qing-fang<sup>2</sup>, LIU Men-yin<sup>1</sup>

(1. *Amorphous and Advanced Composite Lab, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing*

210044, China; 2. *Department of Materials, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044, China)

**Abstract:** The effect of element Sr on the mechanical properties of Mg-Mn based alloy was investigated using the tensile test. The test results showed that the grains in microstructure of Mg-Mn-Pb alloy were refined with the addition of element Sr and the tensile strength and toughness of the alloy increased as well, while the elastic modulus of the alloy decreased.

**Key words:** magnesium alloys; mechanical properties; Sr