

# AZ31B 镁合金板材折弯过程中性层偏移规律研究

王荣军<sup>1,2</sup>, 李广锋<sup>1</sup>, 张鹏翀<sup>1</sup>, 黄志权<sup>1</sup>, 马立峰<sup>1</sup>

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

(2. 山西师范大学 现代文理学院转设筹备处, 山西 临汾 041000)

**摘要:** 有效预测和评估板材变形程度对折弯成形工艺和产品精度控制有着现实的指导意义, 且中性层偏移是衡量折弯板材拉压区域不均匀变形程度的重要参数。依据塑性变形理论中微元体应力平衡条件, 基于能够体现镁合金拉压不对称性的 Yoon2014 屈服准则, 得到了 AZ31B 镁合金板材折弯过程中中性层偏移量计算模型, 并辅以有限元模拟和相应实验对中性层偏移模型进行验证。结果表明: 所建立模型能够对镁板中性层偏移现象进行可靠预测, 镁板在折弯过程中, 受拉压不对称性的影响, 中性层向拉伸侧偏移; 折弯后角度越小, 中性层偏移量越大, 在折弯角度至 90°, 压下量为 40~47 mm 之间时的中性层偏移程度最明显。

**关键词:** AZ31B 镁合金; 拉压不对称性; 折弯; 中性层偏移

**中图分类号:** TG146.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2023)03-0921-08

弯曲过程中板材内外层变形机制存在差异, 导致受压侧极易发生起皱, 受拉侧容易出现开裂<sup>[1]</sup>、畸变等缺陷。具有密排六方晶体结构的镁合金板材在折弯成形时, 由于弯曲内层压缩发生孪生变形, 弯曲外层拉伸发生滑移变形, 拉伸滑移变形所需应力大于压缩孪生变形所需应力, 表现为较强的拉压不对称性<sup>[2-3]</sup>。同时, 弯曲过程中的中性层偏移现象一定程度上与板材受拉侧和受压侧的应变区分布有关, 即中性层偏移量过大会使拉压区域不均匀变形程度增大, 从而影响到板材折弯成形极限和成形质量的好坏。因此, 弄清镁板折弯过程中中性层偏移规律至关重要。

目前, 诸多学者针对镁合金拉压不对称性及弯曲过程中中性层偏移做了相关研究, Zhou<sup>[4]</sup>通过有限元模拟验证了三点弯曲过程中, AZ31B 板材较于钢板产生较大曲率半径归因于镁板压缩时的高应变硬化率。Hartel<sup>[5]</sup>通过使用拉压加载状态下的流动曲线及材料拉压加载硬化特性进行折弯建模与试验验证, 提出一种量化拉压不对称性对加工精度影响的方法。Tari<sup>[6]</sup>将能够反映镁板拉压不对称性的屈服函数二次开发到有限元软件中, 再现了板材三点弯曲实验的应力应变分布。王利飞<sup>[2]</sup>、Baird<sup>[7]</sup>等从微观组织角度研究了中性层偏移成因, 得到 AZ31B 镁合金 V 型弯曲中性层内外呈现不同的组织差异, 外层由滑移主导变形, 内层由孪生主导变形, 内外层变形机制的不对称性导致

弯曲过程中中性层外偏; 鄂大辛<sup>[8-9]</sup>、Tang<sup>[10]</sup>等从理论角度对管材弯曲过程进行分析, 通过微单元径向应力平衡积分方法推导了中性层偏移量表达式; 王亚东<sup>[11-12]</sup>等利用弯曲截面受力平衡推导了中性层偏移公式, 通过代入板材拉压区的弹性变形量可求得偏移量。

本工作在上述研究基础上, 综合考虑 AZ31B 镁合金在折弯成形过程中的材料特性和几何参数对其中性层偏移的影响, 依据塑性变形理论中微元体应力平衡条件, 结合 Yoon-2014 拉压不对称性屈服准则建立板材弯曲成形过程中中性层偏移量的理论模型, 并通过有限元模拟和实验验证所得结果的有效性。

## 1 理论模型

镁合金具有典型的 hcp 晶体结构, 拉伸和压缩变形机制的不同导致其变形时出现拉压不对称现象<sup>[13]</sup>。AZ31B 板材室温状态下拉压不对称现象如图 1 所示, 由图 1 可知, 室温状态下 AZ31B 板材的压缩屈服强度仅为拉伸屈服强度的 1/2 左右, 拉压不对称现象表现明显。

### 1.1 基本假设和 Yoon2014 屈服准则

为方便建立模型和简化计算, 进行以下假设: (1) 板材在折弯过程中满足塑性变形体积不变原则; (2) 板材变形前后横截面仍然为平面, 即满足弯曲变形平面假设; (3) 沿着板宽方向的变形忽略不计<sup>[14]</sup>。

收稿日期: 2022-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(52075357); 太原科技大学研究生教育创新项目(SY2022043)

作者简介: 王荣军, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 太原科技大学机械工程学院, 山西 太原 030024, 电话: 0351-6998115, E-mail: 2015030@tyust.edu.cn

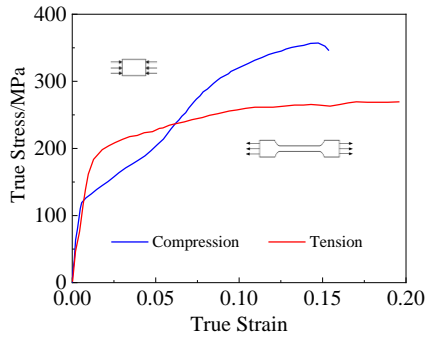


图 1 AZ31B 镁合金室温应力-应变关系

Fig.1 Stress-strain curves of AZ31B magnesium alloy at room temperature

Yoon<sup>[15]</sup>对 CaBa2004 屈服准则进行了改进，提出了基于  $I_1$ - $J_2$ - $J_3$  的屈服准则(Yoon2014 屈服准则)，该准则通过耦合第三应力不变量不仅能够充分体现镁合金的拉压不对称性，而且从理论上分析了材料表现出拉压不对称性的可能原因<sup>[16]</sup>。Yoon2014 屈服准则的函数表达式为：

$$f(\sigma_{ij}) = a \left[ bI_1 + (J_2^{\frac{3}{2}} - cJ_3)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (1)$$

式中， $I_1$  为第 1 偏应力张量、 $J_2$  为第 2 偏应力张量不变量、 $J_3$  为第 3 偏应力张量不变量， $a$ 、 $b$  和  $c$  均为材料参数，参数  $b$  反映屈服应力对屈服面的影响，当  $b=0$  时，式(1)简化为 Cazacu-Barlat 屈服准则，参数  $c$  为拉压不对称因子，可通过单轴拉伸和单轴压缩试验得到，参数  $a$  与参数  $b$ 、 $c$  有关，其表达式如式(2)，当  $a=1$ ， $b=c=0$  时，式(1)简化为 Von-Mises 屈服准则。

$$a = \frac{1}{b + (\frac{1}{3\sqrt{3}} - \frac{1}{27}c)^{\frac{1}{3}}} \quad (2)$$

1.2 折弯过程应力应变分析

图 2 为折弯状态示意图。如图 2 所示，镁板在外力矩作用下发生弯曲变形时，会以应力中性层为分界

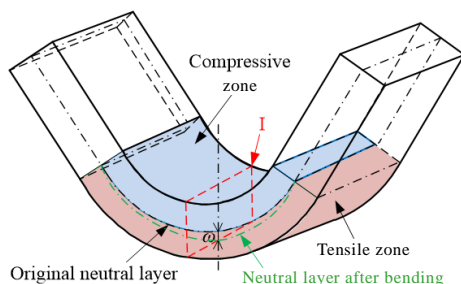


图 2 折弯状态示意图

Fig.2 Schematic diagram of bending state

线，上凹弯侧的纵向纤维受压变短，下凸弯侧的纵向纤维受拉伸长，随着外力矩的继续增大，板材上、下表面发生塑性变形且塑性变形由上、下表面向中性层扩展，直至整个横截面发生塑性变形。取图 2 板材中间横截面 I 并对其进行分析，其结果如图 3 所示。其中  $\sigma_{h1}$  为板材上表面的塑性应变区应力， $h_1$  为压缩层的弹性区高度， $\sigma_{h2}$  为镁合金板材下表面的塑性应变区应力， $h_2$  为拉伸层的弹性区高度，规定中性层偏移量为  $\omega$ ，偏移方向为向压缩层偏移记为“+”，向拉伸层偏移记为“-”。

板材折弯过程中沿板宽方向的变形忽略不计，故可以近似为平面应变问题，因此， $\sigma_3=0$ ， $\sigma_m=(\sigma_1+\sigma_2)/3$ ，根据增量理论<sup>[17]</sup>，镁板上表面点的主应力状态为： $\sigma_1=\sigma_{h1}$ ， $\sigma_2=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ ， $\sigma_3=0$ ， $\tau_{xy}=\tau_{xz}=\tau_{yz}=0$ ，其中  $\sigma_c$  为上表面的屈服应力，当产生塑性变形时，根据屈服准则公式(1)，上表面的屈服函数关系式为：

$$\sigma_c = a \left\{ \frac{3b\sigma_{h1}}{2} + \left[ \left( \frac{1}{3} \cdot \frac{3\sigma_{h1}^2}{4} \right)^{\frac{3}{2}} - \frac{c}{27} (2\sigma_{h1}^3 + \frac{\sigma_{h1}^3}{4} - 3 \cdot \frac{3\sigma_{h1}^2}{2} \cdot \frac{\sigma_{h1}}{2}) \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (3)$$

$$\sigma_{h1} = M(\sigma_c, a, b, c) \quad (4)$$

同理，镁板下表面点的主应力状态为： $\sigma_1=\sigma_{h2}$ ， $\sigma_2=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ ， $\sigma_3=0$ ， $\tau_{xy}=\tau_{xz}=\tau_{yz}=0$ ，其中  $\sigma_t$  为下表面塑性区的屈服应力，当产生塑性变形时，下表面的屈服函数关系式为：

$$\sigma_t = a \left\{ \frac{3b\sigma_{h2}}{2} + \left[ \left( \frac{1}{3} \cdot \frac{3\sigma_{h2}^2}{4} \right)^{\frac{3}{2}} - \frac{c}{27} (2\sigma_{h2}^3 + \frac{\sigma_{h2}^3}{4} - 3 \cdot \frac{3\sigma_{h2}^2}{2} \cdot \frac{\sigma_{h2}}{2}) \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (5)$$

$$\sigma_{h2} = N(\sigma_t, a, b, c) \quad (6)$$

由上、下表面屈服函数关系式(3)~式(6)可见， $b$ 、 $c$  及上、下表面屈服应力  $\sigma_c$ 、 $\sigma_t$  均为定值，故可以计算出  $\sigma_{h1}$  和  $\sigma_{h2}$ 。

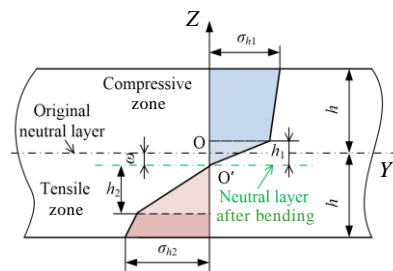


图 3 截面应力图

Fig.3 Cross section stress map

### 1.3 塑性变形微元体应力分析

利用体积不变原理在折弯圆角处取一微单元进行分析,如图4所示,假设微单元的径向应力为  $\sigma_r$ , 周向应力为  $\sigma_\theta$ 。

当图4中的微单元处于中性层上方,即压缩侧时,可设定  $\sigma_\theta$  及  $\sigma_r$  均为压应力,微单元的厚度为  $dr$ 。其平衡方程<sup>[18]</sup>为:

$$(\sigma_r - \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr)(r - dr)d\theta + 2\sigma_\theta dr \sin \frac{d\theta}{2} = \sigma_r r d\theta \quad (7)$$

由于  $d\theta$  很小,故  $\sin(d\theta/2) = d\theta/2$ ,  $\sigma_r$  只随  $r$  变化,故  $\partial \sigma_r / \partial r = d\sigma_r / dr$ 。将以上关系式代入式(7)并经整理,再略去二次无限小量可得:

$$\frac{d\sigma_r}{\sigma_r - \sigma_\theta} - \frac{dr}{r} = 0$$

即  $d\sigma_r = (\sigma_r - \sigma_\theta) \frac{dr}{r}$  (8)

在折弯成形弯曲部位,其外表层的  $y$  向应力  $\sigma_r$  为0,所以对于上表面,将  $\sigma_r - \sigma_\theta = -\sigma_\theta = -\sigma_{h1}$  代入式(8)可得:

$$d\sigma_r = -\sigma_{h1} \cdot \frac{dr}{r} \quad (9)$$

积分得:

$$\sigma_r = -\sigma_{h1} \ln r + c \quad (10)$$

将边界条件  $r = R_{min}$  时  $\sigma_r = 0$  代入式(10),可得:

$$c = \sigma_{h1} \ln R_{min} \quad (11)$$

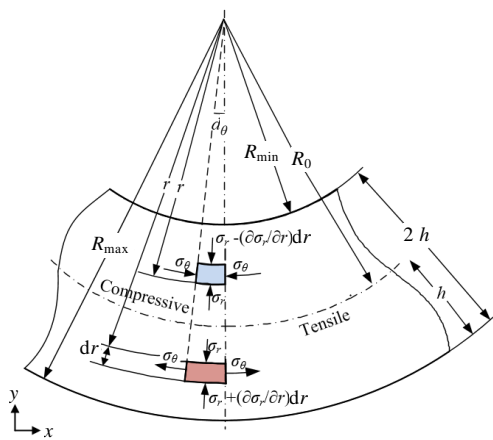


图4 弯曲处单元应力平衡关系

Fig.4 Stress balance relation of element at bending

将式(11)代入式(10),得到从中性层到如图4所示的上表面的径向力可表达为:

$$\sigma_r = \sigma_{h1} \ln \left( \frac{R_{min}}{r} \right) \quad (12)$$

同理,当微单元处于中性层下部,即拉伸侧时,可设定  $\sigma_\theta$  为拉应力,  $\sigma_r$  为压应力,微单元的厚度仍为  $dr$ 。其应力平衡关系为:

$$(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr)(r + dr)d\theta = 2\sigma_\theta dr \sin \frac{d\theta}{2} + \sigma_r r d\theta \quad (13)$$

同理可得:

$$\frac{d\sigma_r}{\sigma_r - \sigma_\theta} + \frac{dr}{r} = 0 \quad (14)$$

在成形弯曲部位,其外表层的  $y$  向应力  $\sigma_r$  为0,所以对于下表面,将  $\sigma_r - \sigma_\theta = -\sigma_\theta = -\sigma_{h2}$  代入式(14)可得:

$$d\sigma_r = \sigma_{h2} \cdot \frac{dr}{r} \quad (15)$$

积分得:

$$\sigma_r = \sigma_{h2} \ln r + c \quad (16)$$

将边界条件  $r = R_{max}$  时,  $\sigma_r = 0$  代入式(16)得:

$$c = -\sigma_{h2} \ln R_{max} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16),得到从中性层到如图4所示下表面的径向力,可表达为:

$$\sigma_r = \sigma_{h2} \ln \left( \frac{r}{R_{max}} \right) \quad (18)$$

### 1.4 中性层偏移模型

此处假设板材折弯过程沿厚度方向无尺寸变化,故上、下2个变形区的  $\sigma_r$  值在中性层处必然相等,可得:

$$\sigma_{h1} \ln \left( \frac{R_{min}}{r} \right) = \sigma_{h2} \ln \left( \frac{r}{R_{max}} \right) \quad (19)$$

令  $\sigma_{h1} / \sigma_{h2} = t$ , 故式(19)可化简为

$$r = e^{\frac{t \ln R_{min} + \ln R_{max}}{1+t}} \quad (20)$$

弯曲处的几何中性层的曲率半径用  $R_0$  表示时可写出:

$$R_0 = \frac{R_{max} + R_{min}}{2} \quad (21)$$

由于  $R_{\max}=R_{\min}+2h$ , 则  $R_0=R_{\min}+h, r=e^{\frac{\ln R_{\min}+\ln R_{\max}}{1+t}}$ , 弯曲部分内半径  $R_{\min}$  通过测量弯曲后角度进行几何运算获得<sup>[2]</sup>, 表示为:

$$R_{\min} = \left( \frac{l}{2} - \frac{H}{\tan \alpha} \right) \cot \frac{\alpha}{2} \quad (22)$$

其中,  $\alpha$  为弯曲角度,  $H$  为测量高度,  $l$  为水平长度, 因此, 所建立中性层偏移模型  $\omega$  为:

$$\begin{aligned} \omega &= R_0 - r \\ &= (R_{\min} + h) - e^{\frac{\ln R_{\min} + \ln(R_{\min} + 2h)}{1+t}} \end{aligned} \quad (23)$$

## 2 实验

### 2.1 V形折弯实验

V形折弯实验所采用的模具为V形槽折弯模具。使用线切割机将AZ31B镁合金板材沿轧制方向切割为300 mm×80 mm×6 mm的矩形件, 用砂纸对镁合金板侧面打磨至平整光滑, 并对板材侧面用金属划针划分若干2 mm×1 mm尺寸的网格(如图5a所示), AZ31B镁合金板的材料参数如表1所示, 其化学成分如表2所示。折弯试验在AG-100电子万能式试验机上进行, 板材放置时注意板材侧面中性线与压头对齐, 压头半径为15 mm, 压头下压速度为0.1 mm/s, 折弯角度至90°、100°、110°、120°, 为保证试验结果的精确, 每种折弯角度要进行多次折弯试验。

### 2.2 分析与讨论

弯曲变形区域示意图如图6所示, 取试验后板材距离压头最近区域II处网格进行分析, 使用尼康Z62相机对网格进行拍照, 并将照片导入CAXA软件放大20倍进行尺寸测量处理, 规定板材纵向纤维的拉伸为

正应变, 压缩为负应变。如图5所示, 将板材截面沿中心线划分左、右侧各2列, 中心线左边分别为Lb、La, 中心线右边分别为Ra、Rb, 对比观察折弯前后网格形状变化, 测量折弯前后对应各列纵向边线的长度, 将测量数据进行处理得到的纵向应变值如表3所示。

由表3可知, 镁合金板材在折弯过程中, 外层纵向纤维受拉为正, 内层纵向纤维受压为负, 依据变形连续性原则, 必然存在一个应变为0的纤维层, 同时, La、Lb列的值与Ra、Rb列的值关于板材截面沿中心线对称。为方便分析, 将表3中Ra、Rb列应变值导入到origin软件中, 得到应变值如图7所示。为了精确表示中性层的偏移值, 将中性层附近的偏移值(图7中区域III)放大后如图8所示。由图8可知, 折弯时板材中性层向拉伸侧方向偏移, 折弯角度至120°时,

表 1 AZ31B 镁合金材料参数

Table 1 Material parameters of AZ31B magnesium alloy

Parameter	Tensile value	Compressive value
Temperature/°C	25	25
Poisson ratio	0.35	0.35
Density/g cm <sup>-3</sup>	1.78	1.78
Elasticity modulus	44800	43900
Yield strength/MPa	188	121

表 2 AZ31B 合金板材化学成分表

Table 2 Chemical composition of AZ31B magnesium alloy sheet (ω/%)

Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Bal.
95	3.12	1.12	0.42	0.069	0.0069	0.3

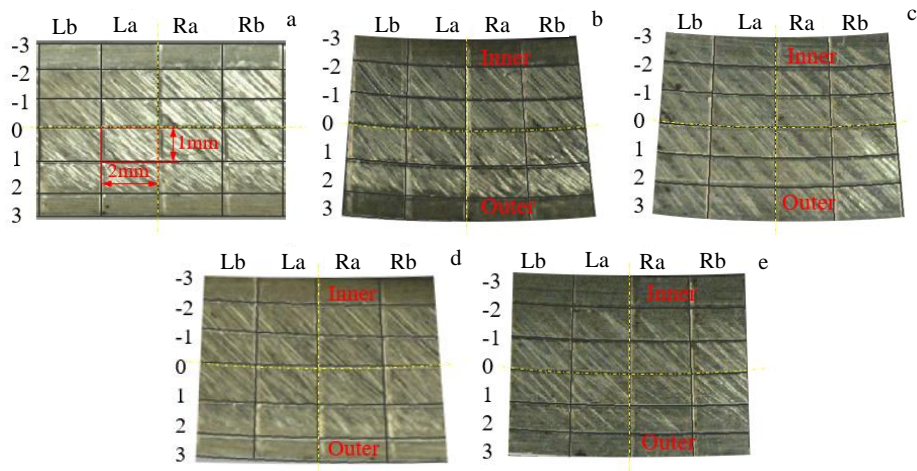


图 5 折弯前后网格

Fig.5 Grid after bending to different angles: (a) 0°, (b) 90°, (c) 100°, (d) 110°, and (e) 120°

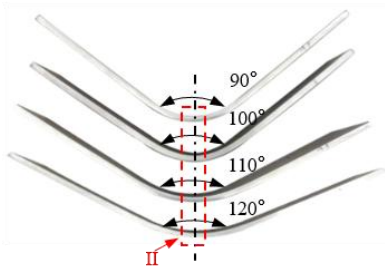


图6 弯曲变形区域示意图

Fig.6 Schematic diagram of the bending deformation region

Ra 列的中性层偏移量为 0.6511 mm, Rb 列的中性层偏移量为 0.5322 mm, 平均值为 0.5916 mm; 折弯角度至 110°时, Ra 列的中性层偏移量为 0.6994 mm, Rb 列的中性层偏移量为 0.4982 mm, 平均值为 0.5988 mm; 折弯角度至 100°时, Ra 列的中性层偏移量为 0.7268 mm, Rb 列的中性层偏移量为 0.4855 mm, 平均值为 0.6062 mm; 折弯角度至 90°时, Ra 列的中性层偏移量为 0.7765 mm, Rb 列的中性层偏移量为 0.4882 mm, 平均值为 0.6324 mm。

表3 折弯至不同角度时镁板纵向纤维应变值

Table 3 Strain value of longitudinal fiber of magnesium plate when bending to different angles

Row	Line (90°)				Line (100°)				Line (110°)				Line (120°)			
	Lb	La	Ra	Rb	Lb	La	Ra	Rb	Lb	La	Ra	Rb	Lb	La	Ra	Rb
-3	-0.1472	-0.1785	-0.1779	-0.1485	-0.1202	-0.1403	-0.1403	-0.1212	-0.1067	-0.1232	-0.123	-0.1075	-0.1023	-0.1187	-0.1187	-0.1018
-2	-0.0965	-0.1229	-0.1229	-0.0972	-0.0909	-0.1019	-0.1022	-0.0908	-0.0881	-0.0914	-0.0918	-0.0876	-0.0657	-0.0797	-0.0796	-0.0653
-1	-0.0428	-0.0611	-0.0615	-0.0432	-0.0338	-0.0517	-0.0518	-0.0337	-0.0293	-0.047	-0.0469	-0.0289	-0.0279	-0.0376	-0.0374	-0.0278
0	-0.0135	-0.0265	-0.0267	-0.0135	-0.0107	-0.0211	-0.0212	-0.0107	-0.0099	-0.0184	-0.0184	-0.0098	-0.0097	-0.0151	-0.0152	-0.0097
1	0.0144	0.0078	0.0072	0.0144	0.0116	0.0085	0.0084	0.0113	0.0102	0.0086	0.0085	0.0097	0.0084	0.0084	0.0082	0.0085
2	0.0753	0.0783	0.0796	0.0755	0.0709	0.0673	0.0682	0.0713	0.0687	0.0618	0.0625	0.0692	0.049	0.0541	0.0541	0.0488
3	0.1394	0.1585	0.1601	0.1415	0.1084	0.1223	0.1231	0.1092	0.0952	0.1108	0.1104	0.0930	0.0931	0.1054	0.1053	0.0929

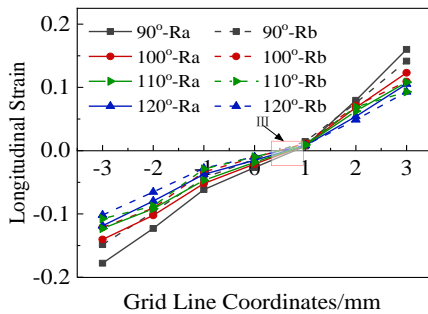


图7 镁板网格纵向边线应变

Fig.7 Longitudinal edge strain of magnesium plate grid

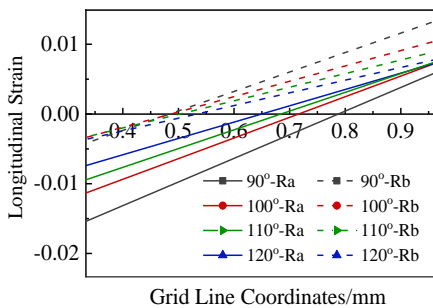


图8 图7中区域III中性层位置放大图

Fig.8 Enlarged view of neutral layer position in region III in Fig.7

### 3 有限元模拟

#### 3.1 有限元模型建立

##### 3.1.1 材料参数设置

使用 ABAQUS 对室温 AZ31B 镁合金板材不同角度折弯成形进行有限元模拟, AZ31B 镁合金板材的物理参数如表 1 所示, 化学成分如表 2 所示。

##### 3.1.2 折弯模型建立

镁合金板材折弯模型如图 9 所示, 为了减少计算时间, 压头与 V 模具设置为离散刚体。为了体现拉压不对称性, 将尺寸为 300 mm×80 mm×6 mm 的试样模型在厚度方向上均匀分为上、下 2 层, 并对上、下层材料分别在弹性阶段赋予如表 1 所示的力学性能, 塑性阶段赋予图 1 室温下应力-应变数据。在相互作用模块中定义 AZ31B 镁合金板材与压头和 V 模具接触为面接触, 摩擦系数为 0.3。设置载荷时, 参照实际板材折弯工况, 将 V 模具刚体定义为完全约束, 压头沿 Y 方向取不同压下量至板材折弯成形至不同角度。由于网格划分对模拟结果的影响显著, 过于粗大不能精准模拟成形过程, 过于细化会使网格密集导致求解时间增加。综合考虑精度和求解效率, 设置压头和 V 模具的近似全局网格尺寸为 5 mm, 板材试样与压头接触附近区域设置网格尺寸为 2 mm×1 mm×0.3 mm, 板材的其他区域设置网格尺寸为 4 mm×1 mm×0.3 mm (划分的网格



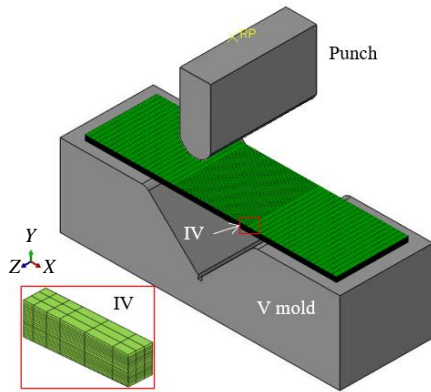


图 9 镁合金板材折弯模型

Fig.9 Magnesium alloy sheet bending model

效果如图 9 放大后的 IV 所示), 统一指派网格单元类型为沙漏控制的 8 节点线性减缩积分体单元(C3D8R)<sup>[19]</sup>, 从而保证模拟效果性能精准高效。

### 3.2 模拟结果分析与讨论

90°折弯时不同压下量下纵向边线塑性应变云图如图 10 所示。折弯过程中镁板的上、下层均发生塑性变形, 且随着压下量的增大, 塑性变形效果越来越

明显。同时, 应变中性层偏移量从压头与镁板接触处到两边逐渐减小, 即中性层偏移量最大值出现在镁板弯曲曲率最大处。

由图 10 可知, 镁板压缩层和拉伸层的塑性应变区域变化与面心或体心立方晶体材料明显不同, 压缩层的屈服应力小于拉伸层的屈服应力, 所以压缩层的塑性应变区域大于拉伸层的塑性应变区域, 这正体现了镁合金板受拉压不对称的影响。为研究中性层的具体偏移值, 同样以镁板截面沿中性线划分为左边 Lb 列、La 列和右边 Ra 列、Rb 列, 此处对右边 Ra 和 Rb 列网格单元的纵向边线应变值进行分析。开始时, 应变中性层位于板材几何中间位置, 应力中性层与应变中性层数值偏差不大, 可近似认为二者相等<sup>[1]</sup>, 随着压头压下量的增加, 中性层逐渐向受拉一侧偏移, 当镁板压下量由 0 mm 增至 20 mm 时, 镁板的最大应变值为 0.072, 当压下量为 30 mm 时, 镁板的最大应变值达到 0.105, 当压下量为 40 mm 时, 最大应变值达到 0.135, 当压下量为 47 mm 即板材紧贴下方 V 模具时, 应变值达到 0.208, 表明镁板应变中性层位置随压头压下量的增大而增大, 压头压下量为 40~47 mm 时, 镁板纵向边线应变值急剧增大, 镁板中性层偏移变化明显。

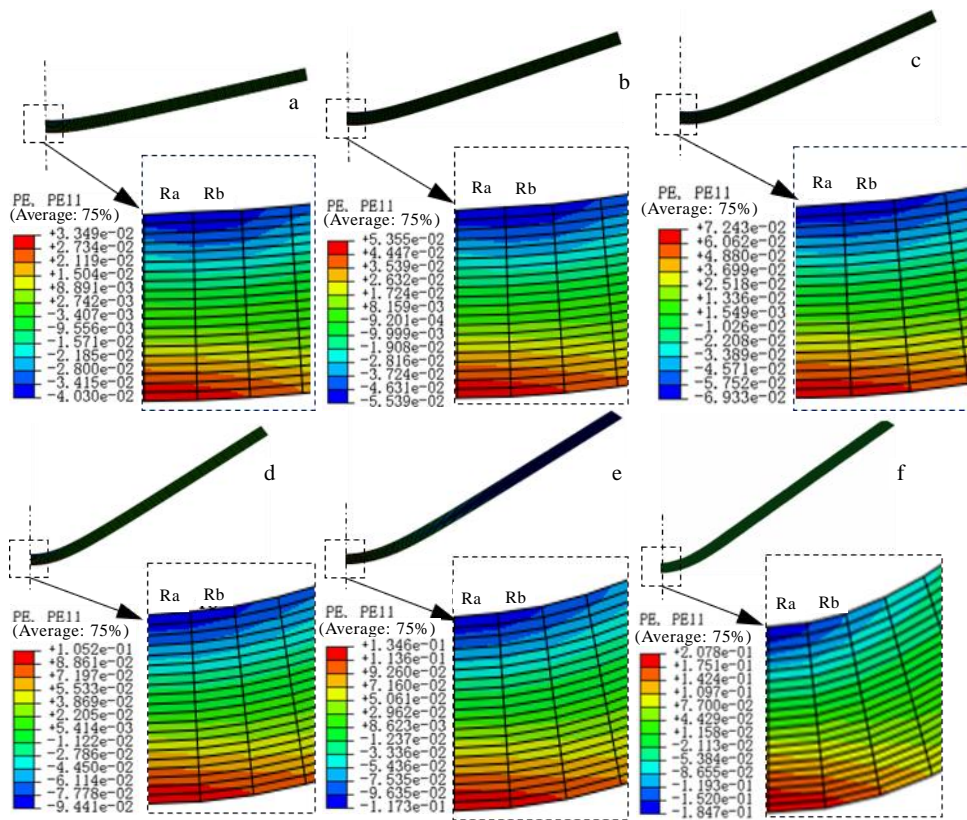


图 10 90°折弯时不同压下量下纵向边线塑性应变云图

Fig.10 Plastic strain nephogram of the longitudinal boundary line under different pressures at 90° bending:

(a) 10 mm, (b) 15 mm, (c) 20 mm, (d) 30 mm, (e) 40 mm, and (f) 47 mm

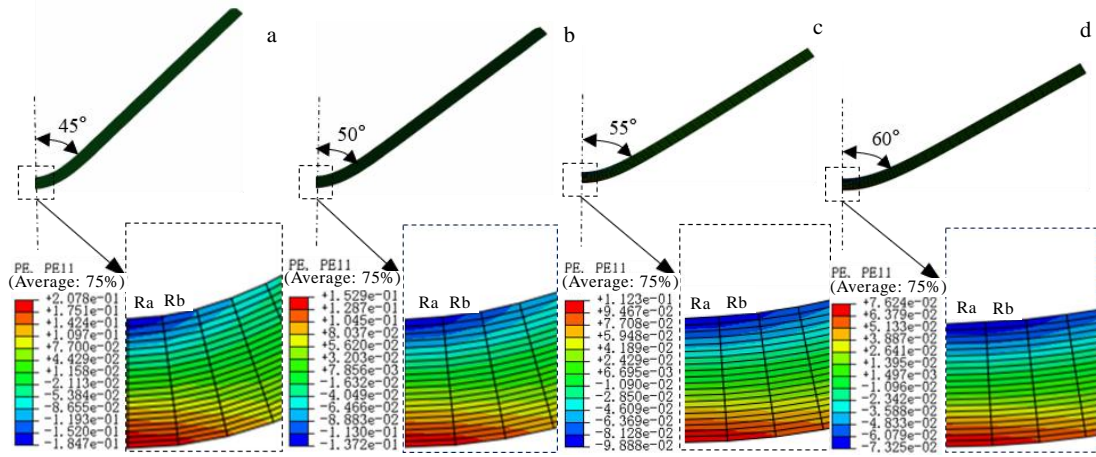


图 11 不同角度折弯后纵向边线塑性应变云图

Fig.11 Plastic strain cloud images of longitudinal edge after bending at different angles: (a) 90°, (b) 100°, (c) 110° and (d) 120°

图 11 为不同角度纵向边线塑性应变云图。由图 11 可知，室温镁合金板材折弯成形时，中性层均向拉伸侧偏移，当折弯后角度至 120° 时，镁板的最大应变值为 0.076，当折弯后角度至 110° 时，镁板的最大应变值为 0.112，当折弯后角度至 100° 时，镁板的最大应变值为 0.153，当折弯后角度至 90° 时，镁板的最大应变值为 0.208，表明在板材与压头接触处，随着折弯后角度的减小，镁板纵向边线塑性应变值增大，导致中性层偏移量增大。

图 12 为不同角度折弯后中性层偏移量最大值的对比。如图 12 所示，理论计算值与有限元模拟值相比，二者的变化趋势大致相同，在折弯后角度至 120° 时，中性层偏移的最大理论值为 0.586 mm，有限元模拟值为 0.715 mm，两者相差 0.129 mm；在折弯后角度至 110° 时，中性层偏移的最大理论值为 0.609 mm，有限元模拟值为 0.735 mm，两者相差 0.126 mm；折弯后角

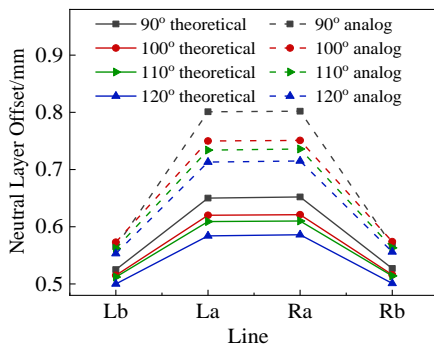


图 12 不同角度折弯后中性层偏移量最大值

Fig.12 Maximum offset of neutral layer after bending at different angles

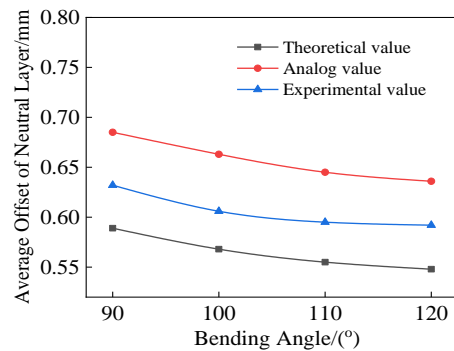


图 13 不同角度折弯后中性层偏移平均值对比

Fig.13 Comparison of average values of neutral layer migration after bending at different angles

度至 100° 时，中性层偏移的最大理论值为 0.621 mm，有限元模拟值为 0.751 mm，两者相差 0.13 mm；折弯后角度至 90° 时，中性层偏移的最大理论值为 0.652 mm，有限元模拟值为 0.802 mm，两者相差 0.15 mm。

图 13 为通过理论计算、数值模拟和试验得到的不同角度折弯后的中性层偏移平均值的对比。由图 13 可知，虽然模拟值 > 实验值 > 理论值，但从总体上说，计算值、数值模拟值与实验值变化趋势相同，可以说明建立的中性层偏移模型在一定程度上是可行的。

### 4 结论

1) 利用塑性变形理论和基于拉压不对称性的 Yoon2014 屈服准则，得到了 AZ31B 镁合金板材折弯过程中中性层偏移量计算模型。

2) 通过有限元模拟镁板折弯成形至 90°、100°、110° 和 120°，得到应变中性层均向拉伸侧偏移，且当

压下量为 40~47 mm 之间时, 中性层偏移最明显; 中性层偏移还与折弯角度有关, 折弯后角度越小, 中性层偏移值越大。

3) 通过对镁合金板材折弯过程进行实验验证, 将折弯后板材中性层偏移值与理论计算值和有限元模拟值进行比较, 证实了公式推导的合理性, 可为实际工程应用提供参考。

#### 参考文献 References

- [1] Singh J, Kim M, Choi S. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 708: 694
- [2] Wang Lifei(王利飞). *Effect of Twinning on Shift of Neutral Layer in AZ31B Magnesium Alloy Sheet during V-Bending*(孪生对 AZ31B 镁合金板材 V 型弯曲中性层偏移的影响)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015
- [3] Chen Zhenhua(陈振华). *Wrought Magnesium Alloy*(变形镁合金)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 239
- [4] Zhou P, Beeh E, Friedrich H E. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2016, 25: 853
- [5] Hartel S, Graf M, Lehmann T *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 705: 62
- [6] Tari D G, Worswick M J, Ali U *et al. International Journal of Plasticity*[J], 2014, 55: 247
- [7] Baird J C, Li B, Parast S Y *et al. Scripta Materialia*[J], 2012, 67(5): 471
- [8] E Daxin(鄂大辛), Ning Ruxin(宁汝新), Gu Tao(古涛) *et al. Acta Armamentarii*(兵工学报)[J], 2009(10): 4
- [9] E Daxin(鄂大辛), Guo Xuedong(郭学东), Ning Ruxin(宁汝新) *et al. Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2009, 45(3): 4
- [10] Tang N C. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*[J], 2000, 77(12): 751
- [11] Wang Yadong(王亚东), Liu Cuirong(刘翠荣), Ma Lifeng(马立峰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(12): 4395
- [12] Gui H L, Xing T, Li Y G *et al. Materials Research Express*[J], 2019, 6(8): 86 569
- [13] Su Hui(苏辉), Chu Zhibing(楚志兵), Xue Chun(薛春) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(10): 3446
- [14] Wang Rongjun(王荣军), Ma Ziyong(马自勇), Ma Lifeng(马立峰) *et al. Journal of Engineering Science*(工程科学学报)[J], 2015, 37(12): 8
- [15] Yoon J W, Lou Y, Yoon J *et al. International Journal of Plasticity*[J], 2014, 56: 184
- [16] Li Feifan(李非凡), Lei Liping(雷丽萍), Fang Gang(方刚). *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2020, 27(1): 13
- [17] Dong Xianghuai(董湘怀). *Principles of Metal Forming*(金属塑性成形原理)[M]. Beijing: China Machine Press, 2011
- [18] Wang Xianjin(王先进). *Cold Bending Steel Production and Application*(冷弯型钢生产及应用)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994
- [19] Ni Guowei(倪国威), Jiang Xinliang(姜忻良), Li Xiaoqing(李晓庆). *World Earthquake Engineering*(世界地震工程)[J], 2013, 29(4): 15

## Study on Neutral Layer Migration During Bending Process of AZ31B Magnesium Alloy Sheet

Wang Rongjun<sup>1,2</sup>, Li Guangfeng<sup>1</sup>, Zhang Pengchong<sup>1</sup>, Huang Zhiquan<sup>1</sup>, Ma Lifeng<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Upgrading Office of Modern College of Humanities and Sciences of Shanxi Normal University, Linfen 041000, China)

**Abstract:** Effective prediction and evaluation of sheet deformation degree has practical guiding significance for bending forming process and product precision control, and neutral layer offset is an important parameter to measure the degree of uneven deformation in the tension and compression area of bending sheet. In this paper, based on the microelement stress balance condition in the plastic deformation theory and the Yoon2014 yield criterion which can reflect the tension and compression asymmetry of magnesium alloy, the neutral layer offset calculation model in the bending process of AZ31B magnesium alloy sheet was obtained, and the neutral layer offset model was verified by finite element simulation and corresponding experiments. The results show that the model can reliably predict the neutral layer migration phenomenon of magnesium plate. During the bending process of magnesium plate, the neutral layer shifts to the tensile side due to the influence of tension and compression asymmetry. The smaller the angle after bending, the larger the neutral layer offset. The neutral layer offset is the most obvious when the bending angle is up to 90° and the pressure is between 40~47 mm.

**Key words:** AZ31B magnesium alloy; tension and compression asymmetry; bending; neutral layer migration

Corresponding author: Zhang Pengchong, Candidate for Ph. D., School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, E-mail: pengchongzhang@tyust.edu.cn