

SUS430 不锈钢自由曲面弯曲回弹的预测和试验研究

段晋昌^{1,2,3,4}, 梁卫抗^{1,2,3,4}, 马立安^{1,2,3,4}, 王乾廷^{1,2,3,4}

(1. 福建工程学院 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福建省新材料制备与成型技术重点实验室, 福建 福州 350118; 3. 福建省精确成型制造工程研究中心, 福建 福州 350118; 4. 福建省模具工程技术研究中心, 福建 福州 350118)

摘要: 金属板料弯曲中, 回弹预测与控制是产品精确成形的关键。针对厚度为 0.55 mm 的 SUS430 不锈钢自由曲面弯曲回弹问题, 采用 Hill48、Barlat89 和 YLD2000-2d 3 种典型的各向异性屈服准则对 SUS430 不锈钢板材自由曲面弯曲成形进行有限元模拟, 并结合试验验证, 研究了不同屈服准则对自由曲面弯曲成形回弹量的影响规律。结果表明: YLD2000-2d 屈服准则的模拟结果与试验结果吻合最好, 适用于 SUS430 不锈钢自由曲面弯曲成形的有限元模拟; Barlat89 屈服准则的模拟结果与试验结果存在一定的偏差; Hill48 屈服准则的模拟结果与试验结果差异最大。在选用 YLD2000-2d 屈服准则的基础上, 研究了冲压速度与摩擦因数两种工艺参数对自由曲面弯曲成形回弹量的影响规律。在合理的工艺参数范围内, 冲压速度越大, 数值模拟预测的回弹量越小。

关键词: 自由曲面; 弯曲回弹; 屈服准则; 冲压速度; 摩擦因数

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.035

中图分类号: TG386 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2022) 02-0220-09

Prediction and experimental research on bending springback for free-form surface of SUS430 stainless steel

Duan Jinchang^{1,2,3,4}, Liang Weikang^{1,2,3,4}, Ma Li'an^{1,2,3,4}, Wang Qianting^{1,2,3,4}

(1. College of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Materials Processing and Application, Fuzhou 350118, China;
3. Fujian Provincial Precision Processing Manufacturing Engineering Research Center, Fuzhou 350118, China;
4. Mould Engineering Research Center of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In sheet metal bending, springback prediction and control are the key to accurate forming of product. Therefore, for the bending springback problem of free-form surface for SUS430 stainless steel with the thickness of 0.55 mm, the finite element simulation of free-form surface bending for SUS430 stainless steel sheet was carried out by three typical anisotropic yield criteria, such as Hill48, Barlat89 and YLD2000-2d, and combined with experimental verification, the influence laws of different yield criteria on springback amount of free-form surface bending were studied. The results show that the agreement between the simulation results of YLD2000-2d yield criterion and the experimental results is the best, which is suitable for the finite element simulation of free-form surface bending for SUS430 stainless steel. Furthermore, there is a certain deviation between the simulation results of Barlat89 yield criterion and the experimental results, while the difference between the simulation results of Hill48 yield criterion and the experimental results is the biggest. Based on the selection of the YLD2000-2d yield criterion, the influence laws of the two process parameters of stamping speed and friction coefficient on the springback amount of free-form surface bending was analyzed. Within the range of reasonable process parameters, the higher the stamping speed is, the smaller the springback predicted by the numerical simulation is.

Key words: free-form surface; bending springback; yield criterion; stamping speeds; friction factor

SUS430 是一种 Cr17 型铁素体不锈钢, 具有优

异的加工性和耐腐蚀特性, 目前广泛应用于家电及汽车行业^[1-2]。因 SUS430 不锈钢板材的各向异性显著, 其成形件的回弹控制成为工业领域关注的焦点。

回弹是金属板材弯曲成形工艺中最常见的成形缺陷之一, 数值模拟技术是近些年来预测与控制回弹的有效手段之一, 其中本构关系的合理建立对回弹预测有着重要影响^[3-7]。Liao J 等^[8]采用单轴拉伸试验、正向反剪切试验和水力胀形试验确定了

收稿日期: 2020-12-11; 修订日期: 2021-03-10

基金项目: 中央引导地方科技发展专项 (2018L3001); 福建省区域发展科技重大项目 (2019H41019); 福州市科技创新平台项目 (2020-PT-145)

作者简介: 段晋昌 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 18636730765@163.com

通信作者: 王乾廷 (1977-), 男, 博士, 教授

E-mail: cocolark@163.com

DP500 钢的材料本构参数, 研究了 Hill48、YLD2000 这 2 种屈服准则、材料方向和毛坯冲孔对扭转回弹的影响。严勇等^[9]研究了 Hill48、Barlat89 和 YLD2000-2d 这 3 种典型的各向异性屈服准则对汽车铝合金油箱的拉伸成形模拟精度的影响, 结果表明, YLD2000-2d 屈服准则的模拟结果与试验结果最为接近, 数值模拟的精度最高。夏亮亮等^[10]依据 Hill48、Hill90 和 Barlat89 各向异性屈服准则及其参数计算方法, 分别建立了 QSTE 系列钢种的各向异性屈服模型, 并应用模型进行了不同方向的各向异性系数 r 值的预测, 与试验结果对比后验证了各向异性屈服模型的准确性。薛新等^[11]分别采用 Mises、Hill48 和 YLD2000-2d 这 3 种屈服准则和 Hockett-Sherby 硬化模型集成的本构模型描述了 DC05 钢板的力学行为, 并建立了三维弹塑性有限元模型, 预测了十字拉深成形的面内主应变和拉深毛坯外轮廓线。

虽然众多学者在本构模型对预测板材成形回弹的影响规律方面进行了广泛的研究, 但是, 对于不同材料和不同变形路径存在本构模型适用性的问题, 且关于 SUS430 不锈钢薄板的回弹预测研究较少。因此, 本文针对 SUS430 不锈钢自由曲面弯曲成形进行了数值模拟与试验研究, 分析了不同屈服准则对自由曲面弯曲回弹的影响结果。通过数值模拟与试验结果对比, 研究得到不同屈服准则对 SUS430 不锈钢自由曲面弯曲回弹结果的影响规律, 为不锈钢薄板的成形工艺开发提供参考依据。

1 材料本构

1.1 各向异性屈服准则

(1) Hill 屈服准则:

Hill48 屈服准则的形式简单, 应用广泛, 该准则系统地描述了正交各向异性板料的屈服行为, 奠定了连续介质力学塑性各向异性理论基础。但 Hill48 屈服准则对屈服表面的描述比较粗略, 不能精确地预测各向异性系数 $r < 1$ 时材料的变形行为。

Hill48 屈服准则的表达式为:

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23} + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

式中: σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 、 σ_{12} 、 σ_{23} 、 σ_{31} 为应力分量; F 、 G 、 H 、 L 、 M 和 N 为材料各向异性特征参数, 一般假设 $L=M=3$, 即面外各向同性。

对于平面应力状态 ($\sigma_{33} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$, $\sigma_{11} \neq 0$,

$\sigma_{22} \neq 0$, $\sigma_{12} \neq 0$), Hill48 屈服准则的表达式演变为:

$$(G + H)\sigma_{11}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + (H + F)\sigma_{22}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (2)$$

(2) Barlat89 屈服准则:

Barlat F 和 Lian K^[12] 在 1989 年提出的 Barlat89 屈服准则考虑了在平面应力条件下面内各向异性的情况, 可以较好地解决材料各向异性主轴和应力主轴不重合的问题, 它的屈服面与按晶体学为基础测得的屈服面一致。该屈服准则的表达式为:

$$\begin{cases} \Phi = a |K_1 + K_2|^m + a |K_1 - K_2|^m + \\ c |2K_2|^m = 2\bar{\sigma}^m \\ K_1 = (\sigma_{xx} + h\sigma_{yy})/2 \\ K_2 = \sqrt{(\sigma_{xx} - h\sigma_{yy})^2/4 + p^2\sigma_{xy}^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Φ 为屈服函数; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; K_1 、 K_2 为应力张量; σ_{xx} 、 σ_{xy} 、 σ_{yy} 为应力张量中相应的应力分量; m 为材料指数, 体心立方材料为 6, 面心立方材料为 8; a 、 c 、 h 、 p 为与材料相关的参数。

(3) YLD2000-2d 屈服准则:

针对 Hill48 和 Barlat89 两个屈服准则的参数少, 不能完整地描述材料塑性屈服行为的问题, Barlat F 等^[13] 在 2003 年提出了 YLD2000-2d 屈服准则, 该屈服准则包含更多的各向异性参数, 能更好地描述材料的各向异性特征, 其表达式为:

$$\begin{cases} \phi = \phi'(X') + \phi''(X'') = 2\bar{\sigma}^m \\ \phi'(X') = |X'_1 - X'_2|^m \\ \phi''(X'') = |2X''_2 + X''_1|^m + |2X''_1 + X''_2|^m \end{cases} \quad (4)$$

式中: ϕ 、 ϕ' 、 ϕ'' 为屈服函数; m 为材料指数, 体心立方材料为 6, 面心立方材料为 8; X' 和 X'' 为偏应力张量线性转换后得到的应力张量; X'_1 、 X'_2 、 X''_1 、 X''_2 分别为应力张量 X' 和 X'' 的主值。

偏应力张量的线性转换公式为:

$$\begin{cases} X' = C' \cdot S = C' \cdot T \cdot \sigma' = L' \cdot \sigma' \\ X'' = C'' \cdot S = C'' \cdot T \cdot \sigma' = L'' \cdot \sigma' \end{cases} \quad (5)$$

式中: C' 、 C'' 、 T 为线性转换矩阵; S 为柯西应力张量分量矩阵; σ' 为柯西应力张量; L' 、 L'' 为参数线性变换矩阵, 包含 $\alpha_1 \sim \alpha_8$ 的 8 个独立的屈服函数各向异性参数。

在平面应力状态下可以表示为:

$$T = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & 0 \\ -1/2 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} X'_{11} \\ X'_{22} \\ X'_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & C'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C'_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{12} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{X}'' = \begin{bmatrix} X''_{11} \\ X''_{22} \\ X''_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C''_{11} & 0 & 0 \\ 0 & C''_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C''_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{L}' = \begin{bmatrix} L'_{11} \\ L'_{12} \\ L'_{21} \\ L'_{22} \\ L'_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 & 0 \\ -1/3 & 0 & 0 \\ 0 & -1/3 & 0 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_7 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{L}'' = \begin{bmatrix} L''_{11} \\ L''_{12} \\ L''_{21} \\ L''_{22} \\ L''_{66} \end{bmatrix} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} -2 & 2 & 8 & -2 & 0 \\ 1 & -4 & -4 & 4 & 0 \\ 4 & -4 & -4 & 1 & 0 \\ -2 & 8 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_8 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: X'_{11} 、 X'_{22} 、 X'_{12} 为 \mathbf{X}' 分量; C'_{11} 、 C'_{22} 、 C'_{12} 为 \mathbf{C}' 分量; X''_{11} 、 X''_{22} 、 X''_{12} 为 \mathbf{X}'' 分量; C''_{11} 、 C''_{22} 、 C''_{12} 为 \mathbf{C}'' 分量; S_{11} 、 S_{22} 、 S_{12} 为 \mathbf{S} 分量; L'_{11} 、 L'_{12} 、 L'_{21} 、 L'_{22} 、 L'_{66} 为 \mathbf{L}' 分量; L''_{11} 、 L''_{12} 、 L''_{21} 、 L''_{22} 、 L''_{66} 为 \mathbf{L}'' 分量。

则 YLD2000-2d 屈服函数可以表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} \phi &= \phi'(\mathbf{X}') + \phi''(\mathbf{X}'') = |X'_1 - X'_2|^m + |2X''_2 + X''_1|^m + |2X''_1 + X''_2|^m \\ |X'_1 - X'_2| &= 2 \sqrt{\left[\frac{(2\alpha_1 + \alpha_2)\sigma_{11} - (2\alpha_2 + \alpha_1)\sigma_{22}}{6} \right]^2 + \alpha_7^2 \sigma_{12}^2} \\ |2X''_2 + X''_1| &= \sqrt{\left[\frac{(4\alpha_5 + 2\alpha_3 - 2\alpha_4 - \alpha_6)\sigma_{11} + (4\alpha_4 + 2\alpha_6 - 2\alpha_5 - \alpha_3)\sigma_{22}}{6} - \sqrt{\left[\frac{(4\alpha_5 - 2\alpha_3 + 2\alpha_4 - \alpha_6)\sigma_{11} + (4\alpha_4 - 2\alpha_6 + 2\alpha_5 - \alpha_3)\sigma_{22}}{6} \right]^2 + \alpha_8^2 \sigma_{12}^2} \right]^2} \\ |2X''_1 + X''_2| &= \sqrt{\left[\frac{(4\alpha_5 + 2\alpha_3 - 2\alpha_4 - \alpha_6)\sigma_{11} + (4\alpha_4 + 2\alpha_6 - 2\alpha_5 - \alpha_3)\sigma_{22}}{6} + \sqrt{\left[\frac{(4\alpha_5 - 2\alpha_3 + 2\alpha_4 - \alpha_6)\sigma_{11} + (4\alpha_4 - 2\alpha_6 + 2\alpha_5 - \alpha_3)\sigma_{22}}{6} \right]^2 + \alpha_8^2 \sigma_{12}^2} \right]^2} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

1.2 硬化模型

本文采用 Swift 硬化模型,其是幂函数形式的方程,也是由 Hollomon 硬化方程演化而来,其表达式如下:

$$\sigma = K_s(\varepsilon_0 + \varepsilon)^{n_s} \quad (12)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; ε_0 为屈服应变; K_s 为强度系数; n_s 为硬化指数。

2 本构方程参数的标定

2.1 力学性能试验

试样材料采用厚度为 0.55 mm 的 SUS430 不锈钢板,其化学成分如表 1 所示。

表 1 SUS430 不锈钢的化学成分(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of SUS430 stainless steel (% , mass fraction)

Fe	Cr	Mn	其他
81.553	17.100	0.546	0.821

2.1.1 拉伸试验

为了标定 SUS430 不锈钢材料的本构参数,依

据国家标准 GB/T 228.1—2010^[14] 完成了 SUS430 不锈钢材料的拉伸试验。在金属板料上沿着 0°、45° 和 90° 这 3 个轧制方向分别取试样,并在电子拉力试验机 (Instron, LEGEND 2382) 上以 2 mm·min⁻¹ 的拉伸速率进行准静态拉伸,得到 SUS430 不锈钢材料的工程应力-工程应变曲线。每个轧制方向重复 3 次试验,并通过网格应变仪 (ARAMIS 3D 6M) 获得板料在拉伸过程中的应变分布。将工程应力-工程应变曲线进行换算,得到 SUS430 不锈钢材料的真实应力-真实应变曲线,如图 1 所示。从图 1 可以看出,材料的真实应力-真实应变曲线存在明显的弹性变形、材料屈服和塑性变形过程。此外,材料在 45° 轧制方向上塑性变形阶段的真实应力值最大,在 0° 和 90° 轧制方向上较小。

2.1.2 剪切试验

Barlat89 屈服准则中的参数 p 需要迭代优化才能获取,计算繁琐,但通过金属板材拉伸剪切试验可以直接获取。SUS430 不锈钢材料的剪切试验是在电子拉力试验机 (Instron, LEGEND 2382) 上进行的,

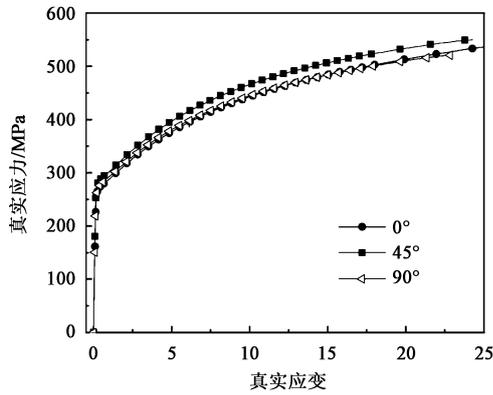


图 1 不同轧制方向的 SUS430 不锈钢的真实应力-真实应变曲线

Fig. 1 Curves of true stress-true strain for SUS430 stainless steel in different rolling directions

结合试验夹具的相关尺寸以及剪切试验标准设计了拉伸剪切试样, 如图 2 所示。

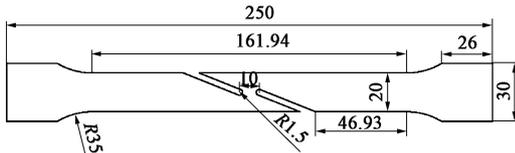


图 2 SUS430 不锈钢板材剪切试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shear sample for SUS430 stainless steel sheet

剪应力计算公式如下:

$$\tau_s = \frac{F_{\max}}{L_{\min} \cdot t} \quad (13)$$

式中: τ_s 为剪切应力; F_{\max} 为拉伸最大载荷; L_{\min} 为两个孔间的最小距离; t 为板料厚度。

2.2 SUS430 不锈钢本构及硬化模型参数拟合

通过 ARAMIS 变形分析软件计算得到该材料的弹性模量、泊松比、屈服强度和抗拉强度。获得 SUS430 不锈钢材料的物理参数如表 2 所示。

表 2 SUS430 不锈钢物理参数

Table 2 Physical parameters of SUS430 stainless steel

参数	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	剪切强度/ MPa	泊松比
数值	194370	285	438	187	0.321

本构参数通过各向异性系数 r 值标定, 详见表 3。从表 3 可以看出, 0° 、 45° 和 90° 这 3 个方向的 r 值存在较大差异, 进一步证实了冷轧 SUS430 不锈钢板材存在明显的各向异性行为。

表 3 SUS430 不锈钢各向异性参数

Table 3 Anisotropy parameters of SUS430 stainless steel

方向	0°	45°	90°
r 值	1.881	1.272	2.141

r 值的平均值 $\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4}$, 其中 r_0 、 r_{45} 、 r_{90} 分别

为 0° 、 45° 、 90° 方向的 r 值, 求得平均值 \bar{r} 为 1.65。

(1) Hill48 屈服准则参量的标定

Hill48 屈服准则含有的 G 、 F 、 H 和 N 这 4 个参量待求。具体求解如下:

$$\begin{cases} F = \frac{2r_0}{r_{90}(1+r_0)} \\ G = \frac{2}{1+r_0} \\ H = \frac{2r_0}{1+r_0} \\ N = \frac{(r_0+r_{90})(1+2r_{45})}{2r_{90}(1+r_0)} \end{cases} \quad (14)$$

将 3 个方向的 r 值 (表 3) 带入式 (14), 求解出 Hill48 屈服准则中 F 、 G 、 H 和 N 这 4 个参量, 如表 4 所示。

表 4 Hill48 屈服准则参量

Table 4 Parameters of Hill48 yield criterion

参数	F	G	H	N
数值	0.300	0.340	0.652	1.155

(2) Barlat89 屈服准则参量的标定

Barlat89 屈服准则参量可由式 (15) 和式 (16) 联立求得:

$$\begin{cases} a = 2 - c = \frac{2\left(\frac{\bar{\sigma}}{\tau_{s2}}\right)^m - 2\left(1 + \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{90}}\right)^m}{1 + \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{90}}\right)^m} \\ h = \bar{\sigma}/\sigma_{90} \\ p = \frac{\bar{\sigma}}{\tau_{s1}} \left(\frac{2}{2a + 2^m c}\right)^{1/m} \end{cases} \quad (15)$$

式中: τ_{s1} 和 τ_{s2} 为两种不同剪切试验的剪切应力; σ_{90} 为与轧制方向成 90° 的屈服应力。

$$\begin{cases} h = \sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \cdot \frac{r_{90}}{1+r_{90}}} \\ a = 2 - c = 2 \sqrt{\frac{r_0 r_{90}}{[(1+r_0)(1+r_{90})]}} \\ p = \frac{2m\sigma_{22}^m}{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{22}}\right) \sigma_{45}^m} - 1 - r_{45} \end{cases} \quad (16)$$

式中: σ_{45} 为与轧制方向成 45° 的屈服应力; f 为关

于应力值的函数。

通过式 (16) 求得参量 a 、 c 、 h ，而 p 值则由剪切强度借助式 (15) 求得。获得的 Barlat89 屈服准则的具体参量如表 5 所示。

表 5 Barlat89 屈服准则参量

Table 5 Parameters of Barlat89 yield criterion

参数	a	c	h	p
数值	0.670	1.330	0.980	0.867

(3) YLD2000-2d 屈服准则参量标定

YLD2000-2d 屈服准则含有 8 个待标定的参量，可以通过构建最小化目标函数式来进行参数标定^[15-17]。首先，引入不同取向的单向拉伸屈服强度及厚向异性系数理论预测公式：

$$\begin{cases} \sigma_{11} = \sigma_{\theta} \cdot \cos^2 \theta \\ \sigma_{22} = \sigma_{\theta} \cdot \sin^2 \theta \\ \sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_{\theta} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (17)$$

式中： σ_{θ} 为与轧制方向成 θ 角的单向拉伸试样的屈服应力。

把式 (17) 代入屈服函数，可得到如式 (18) 所示的一般表达式：

$$F(\theta) \cdot \sigma_{\theta} = Y(h') \quad (18)$$

式中： $F(\theta)$ 为一个变量为 θ 的函数，其表达式与具体的屈服函数有关； $Y(h')$ 为一个标量函数； h' 是与屈服函数有关的标量。

由此可得：

$$\sigma_{\theta} = Y(h')/F(\theta) \quad (19)$$

与轧制方向成 θ 角的单向拉伸试样的 r 值记为 r_{θ} ，可定义为：

$$r_{\theta} = F(\theta) / \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{22}} \right) - 1 \quad (20)$$

基于上述理论，可构造最小化目标函数 F_{obj} ：

$$F_{\text{obj}} = \sum_i (r^{\text{cal}}/r^{\text{exp}} - 1)^2 + \sum_j (\sigma^{\text{cal}}/\sigma^{\text{exp}} - 1)^2, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (21)$$

式中： r^{cal} 与 σ^{cal} 分别为 SUS430 不锈钢板材的各向异性系数和屈服应力的理论预测值； r^{exp} 与 σ^{exp} 分别为 SUS430 不锈钢板材的各向异性系数和屈服应力的试验数据。

YLD2000-2d 屈服函数的理论预测值公式为：

$$\sigma_{\theta}^{\text{cal}} = Y_{\text{ref}} / \bar{\sigma}_{\theta} = Y_{\text{ref}} / \left(\frac{1}{2} F_{\theta} \right)^{1/a} \quad (22)$$

$$r_{\theta}^{\text{cal}} = - \frac{\sin^2 \theta \cdot \frac{\partial F_{\theta}}{\partial \sigma_{11}} - \frac{1}{2} \cdot \sin 2\theta \cdot \frac{\partial F_{\theta}}{\partial \sigma_{12}} + \cos^2 \theta \cdot \frac{\partial F_{\theta}}{\partial \sigma_{22}}}{\frac{\partial F_{\theta}}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial F_{\theta}}{\partial \sigma_{22}}} \Bigg|_{\sigma_{\theta}} \quad (23)$$

式中： $\bar{\sigma}_{\theta}$ 为与轧制方向成 θ 角的等效应力； $\sigma_{\theta}^{\text{cal}}$ 、 r_{θ}^{cal} 分别为屈服应力 σ_{θ} 和各向异性系数 r_{θ} 的理论预测值； Y_{ref} 为参考应力； F_{θ} 为 YLD2000-2d 屈服函数。

表 6 为 YLD2000-2d 屈服准则参量的标定结果。

表 6 YLD2000-2d 屈服准则参量

Table 6 Parameters of YLD2000-2d yield criterion

参数	α_1	α_2	α_3	α_4
数值	1.065	1.023	1.004	0.932
参数	α_5	α_6	α_7	α_8
数值	0.950	1.010	0.933	0.779

(4) 硬化模型参数拟合

SUS430 不锈钢自由曲面弯曲模拟仿真时采用 0° 、 45° 和 90° 方向的应力-应变曲线作为参考应力-应变曲线，通过线性拟合 3 个方向的应力-应变数据，并对其平均化得到 Swift 硬化方程：

$$\sigma = 732.7417 \times (0.003229 + \varepsilon)^{0.20604} \quad (24)$$

3 有限元仿真模拟

利用 DYNAFORM 软件对 SUS430 不锈钢板材自由曲面弯曲成形过程进行仿真分析。分别考察 Hill48、Barlat89 和 YLD2000-2d 这 3 种屈服准则对 SUS430 不锈钢板材自由曲面弯曲成形回弹的影响。SUS430 不锈钢板材自由曲面弯曲回弹模拟参数详见表 7，其中，冲压速度与摩擦因数根据实际加工经验选择，而弯曲成形中选择无压边方式。

表 7 SUS430 板材自由弯曲模拟参数

Table 7 Simulation parameters of free bending for SUS430 stainless steel sheet

参数	数值
密度/($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)	7.7
弹性模量/MPa	194371.0
泊松比	0.321083
凸模 (虚拟) 冲压速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	500
顶杆初始压力/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	1
凸模与板料摩擦因数	0.1
凹模与板料摩擦因数	0.1
凹凸模间隙/mm	0.55

3.1 Hill48、Barlat89 和 YLD2000-2d 屈服准则对 SUS430 不锈钢板材回弹的影响

自由曲面成形凸模卸载后, 由于弹性回复, 导致零件的几何尺寸与模具表面的几何尺寸出现偏差。圆角部分类似弯曲, 圆角内、外层应力变化, 外层受到切向拉应力, 内层受到切向压应力; 圆角部分逐渐进入弹塑性变形, 由于坯料为连续体, 所以无法整体达到纯塑性状态, 故圆角部分最终的应力分布处于弹塑性状态。卸载后, 每个圆角部分的内层和外层产生与成形切向应力方向相反的残余应力, 该应力状态将导致自由曲面在圆角处的角度有增大的趋势。

仿真模拟结果显示, Hill48、Barlat89 和 YLD2000-2d 这 3 种屈服准则的回弹趋势相近 (图 3)。图 3 中, 左侧边回弹量较大, 右侧边的回弹量次之, 底部由于采用三点铰链约束回弹量最小。从等值线云图图 3 可以看出: Hill48 屈服准则 (图 3a) 的最大正回弹量为 0.469 mm, 最大负回弹量为 -0.034 mm; Barlat89 屈服准则 (图 3b) 中最大正回弹量为 0.413 mm, 最大负回弹量为 -0.033 mm; 而 YLD2000-2d 屈服准则 (图 3c) 中最大正回弹量为 0.398 mm, 最大负回弹量为 -0.032 mm。

为了进一步考察 Hill48、Barlat89 和 YLD2000-2d 这 3 种屈服准则对 SUS430 不锈钢板材自由曲面弯曲回弹的影响, 通过剖切面法来选取截面线以观察自由曲面的弯曲回弹量 (图 4), 图 5 为 3 种屈服准则截面线回弹前后的回弹量变化。为了简化, 截面线处理中取 14 个节点作为标记, 结果显示, 弯曲件左侧边各个节点的回弹量分别按照 Hill48、Barlat89 和 YLD2000-2d 屈服准则的顺序依次减小, 而右侧边各个节点的回弹量趋于相同。图 6 为不同屈服准则条件下截面线上各节点回弹量对比图。可以看出, YLD2000-2d 屈服准则下的回弹量最小, Barlat89 屈服准则下的回弹量次之, 而 Hill48 屈服准则下的回弹量最大。

3.2 工艺参数对回弹量的影响

由上述的模拟仿真和预试验可知, YLD2000-2d 屈服准则相较于 Hill48 屈服准则和 Barlat89 屈服准则更适用于 SUS430 不锈钢自由曲面弯曲回弹的计算。基于 YLD2000-2d 屈服准则, 进一步分析了冲压工艺参数 (冲压速度、摩擦因数) 对 SUS430 不锈钢板材自由曲面弯曲回弹量的影响。表 8 为考虑冲压实际工况条件选取的冲压速度与摩擦因数。

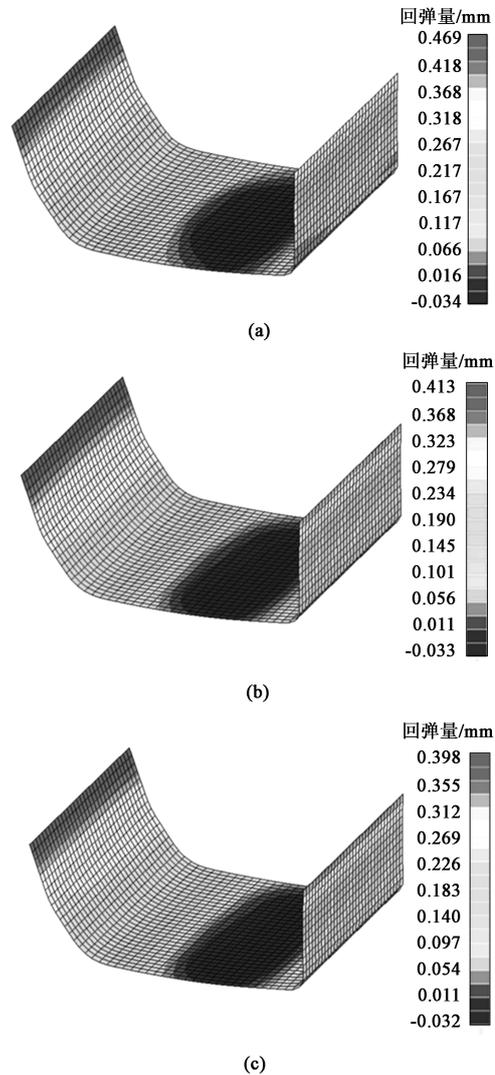


图 3 3 种屈服准则对 SUS430 不锈钢自由曲面弯曲回弹影响
(a) Hill48 屈服准则 (b) Barlat89 屈服准则
(c) YLD2000-2d 屈服准则

Fig. 3 Influences of three yield criteria on free-form surface bending springback for SUS430 stainless steel
(a) Hill48 yield criterion (b) Barlat89 yield criterion
(c) YLD2000-2d yield criterion

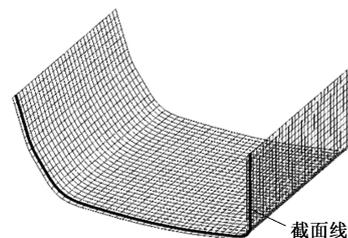


图 4 截面线选取

Fig. 4 Selection of section line

仿真模拟中保持其余参数不变, 共进行了 9 组对比实验, 确定了最优的成形工艺参数条件。

(1) 冲压速度对回弹的影响

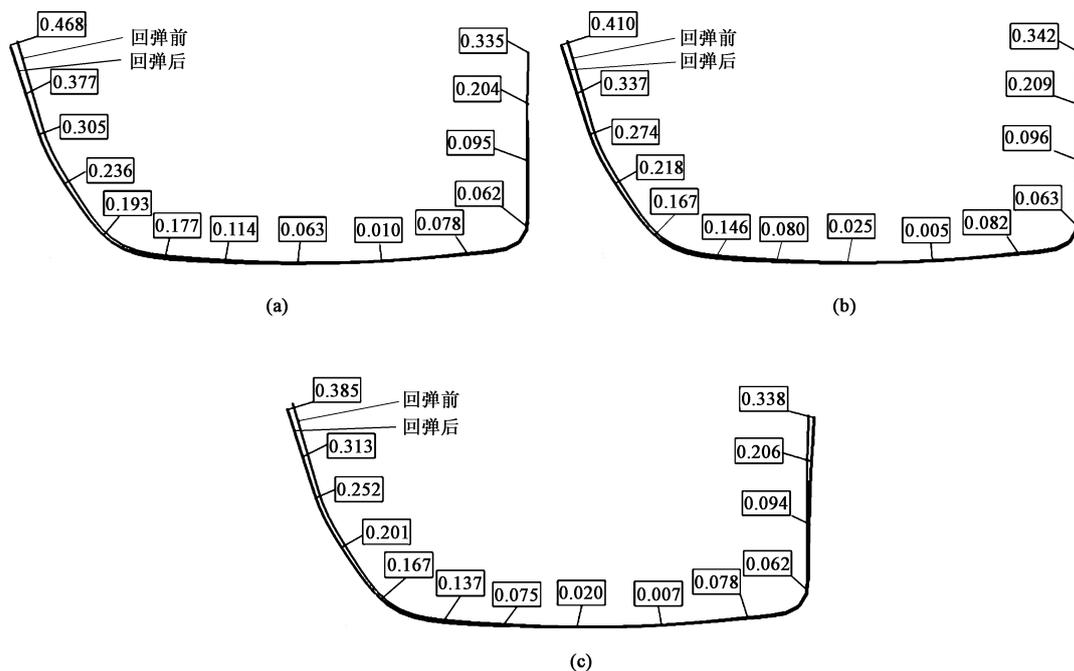


图 5 3 种屈服准则的截面线回弹量比较

(a) Hill48 屈服准则 (b) Barlat89 屈服准则 (c) YLD2000-2d 屈服准则

Fig. 5 Comparison on springback amounts of section lines for three yield criteria

(a) Hill48 yield criterion (b) Barlat89 yield criterion (c) YLD2000-2d yield criterion

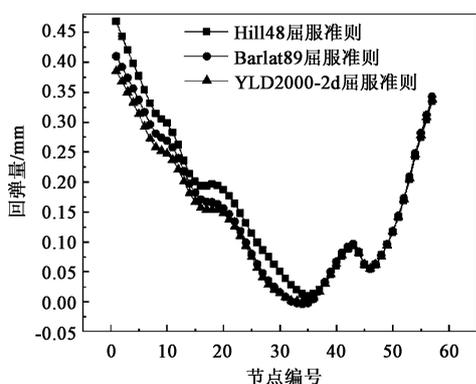


图 6 3 种屈服准则节点处回弹量对比

Fig. 6 Comparison of springback amounts at nodes for three yield criteria

表 8 冲压速度与摩擦因数取值

Table 8 Values of stamping speed and friction coefficient

水平	1	2	3
冲压速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	500	750	1000
摩擦因数	0.050	0.125	0.170

图 7 分别为在 0.050、0.125 和 0.170 这 3 种摩擦因数下、采用不同冲压速度得到的回弹量分布。从图 7 中可以看出, 当冲压速度为 $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 自由曲面左侧长边处的回弹量相对于冲压速度

为 500 与 $700 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时明显减少。当摩擦因数一定时, 冲压速度为 $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 回弹量最大; 冲压速度为 $750 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 回弹量次之; 冲压速度为 $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 回弹量最小。

(2) 摩擦因数对回弹的影响

从图 7 中也可看出, 在冲压速度一定的情况下, 不同摩擦因数的回弹量非常接近, 这表明在钢可以接受的摩擦因数范围内, 摩擦因数的微小改变对回弹量的影响不大。

4 SUS430 不锈钢板材自由曲面弯曲回弹的试验验证

图 8 为设计的 SUS430 不锈钢板材自由曲面弯曲成形冲压模具, 冲压成形试验是在 H1F1 伺服冲压机上进行, 该模具的成形件主要由弯曲凸模、弯曲凹模和弹簧顶杆构成, 弯曲成形工艺参数参照仿真模拟结果设置。

图 9 为 SUS430 不锈钢自由曲面弯曲成形件, 在长侧边选取 5 个点进行测量, 回弹统计结果如表 9 所示。可以看出, SUS430 不锈钢自由曲面弯曲成形件的回弹量在 $0.10 \sim 0.35 \text{ mm}$ 之间。

图 10 展示了 SUS430 不锈钢板材分别在 Hill48、

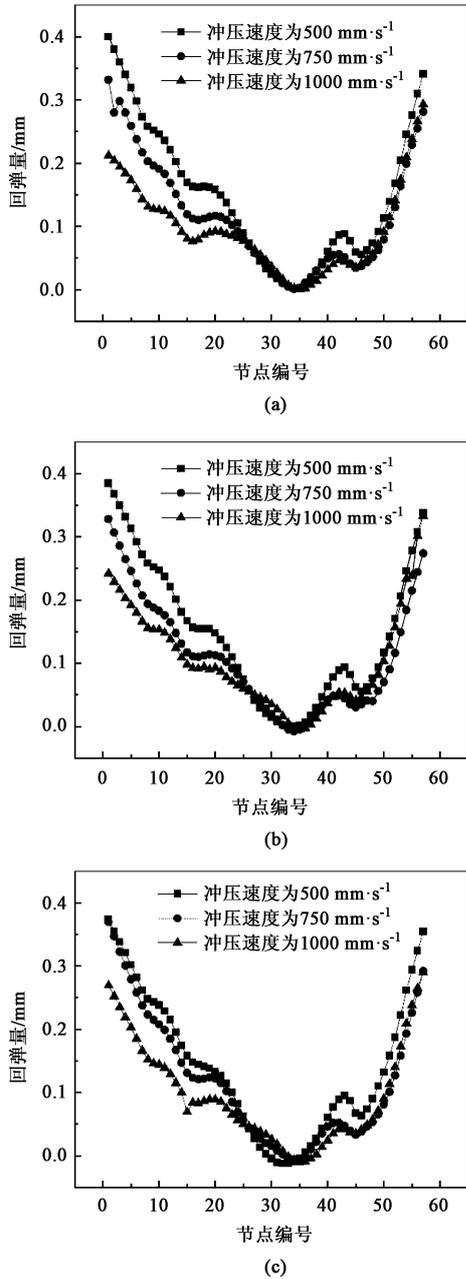


图 7 不同的摩擦因数下 SUS430 不锈钢弯曲件的回弹量对比
(a) 0.050 (b) 0.125 (c) 0.170

Fig. 7 Comparison of springback amounts for SUS430 stainless steel bending parts under different friction coefficients

Barlat89 和 YLD2000-2d 这 3 种屈服准则下模拟回弹量与实际回弹值的对比。从图 10 中可以看出，模拟仿真与实际的回弹预测趋于一致，但是还存在一定的差异，这是因为：虽然 3 种各向异性屈服准则可以较全面地描述材料的各向异性特性，但是预测精度不只受到屈服准则的影响，还受到硬化模型和其他因素（如实际卸载约束与仿真卸载约束不同）的影响。由于本文采用各向同性的硬化准则，但实际上

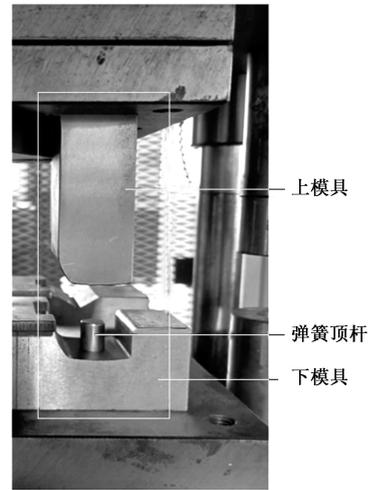


图 8 自由曲面弯曲成形模具
Fig. 8 Die of free-form surface bending



图 9 SUS430 不锈钢自由曲面弯曲成形件测量点选取
Fig. 9 Selection of measurement points for free-form surface bending part of SUS430 stainless steel

表 9 SUS430 不锈钢自由曲面弯曲成形件测量点回弹量
Table 9 Springback amounts at measurement points of free-form surface bending part for SUS430 stainless steel

测量点	1	2	3	4	5
回弹量/mm	0.31	0.27	0.23	0.19	0.14

自由曲面成形经历拉压等复杂应变路径改变、包辛格效应等在预测过程中未考虑，对预测结果有一定影响，所以仿真模拟结果与实际结果有一定偏离。但是综合来看，屈服准则的选择对 SUS430 不锈钢薄板成形回弹的预测精度是较为敏感的，而且 YLD2000-2d 屈服准则所预测的回弹量更接近于 0.35 mm 以下范围，对回弹的预测精度较高，与实测值更为接近，Barlat89 屈服准则次之，Hill48 屈服准则与实际回弹量相差最大。

5 结论

(1) 通过不同轧制方向的单向拉伸与剪切试验标定了 SUS430 不锈钢 3 种屈服准则 Hill48、Barlat89 和 YLD2000-2d 的屈服参数。

(2) 采用截面法，研究了各向异性屈服准则条

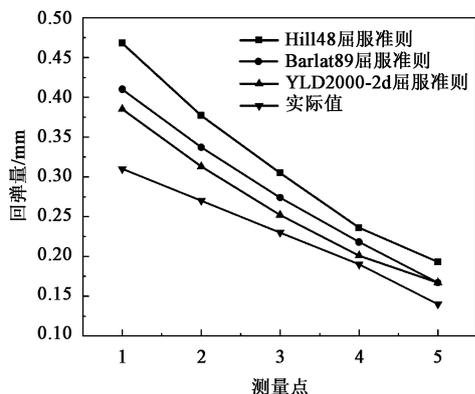


图 10 SUS430 不锈钢板材在不同的屈服准则下模拟回弹量与实际回弹量的对比

Fig. 10 Comparison between simulation springback amount and actual springback amount of SUS430 stainless steel sheet under different yield criteria

件对 SUS430 不锈钢自由曲面弯曲回弹的影响。结果发现：3 种屈服准则中 YLD2000-2d 屈服准则下的回弹量最小，Barlat89 屈服准则下的回弹量次之，而 Hill48 屈服准则下的回弹量最大；在冲压工艺参数中，冲压速度越大，预测的回弹值越小。

(3) 仿真结果与实测结果显示，屈服准则的选择对 SUS430 不锈钢自由曲面弯曲回弹的预测精度是较为敏感的，YLD2000-2d 屈服准则所预测的回弹量与实测值更为接近，Barlat89 屈服准则次之，Hill48 屈服准则相差最大。

参考文献：

- [1] 李秋鹤, 王刚, 陈礼清. 轧制方式对 SUS430 铁素体不锈钢组织和性能的影响 [J]. 钢铁, 2016, 51 (10): 41-47.
Li Q H, Wang G, Chen L Q. Effects of rolling schedules on microstructure and mechanical properties of SUS430 ferritic stainless steel [J]. Iron & Steel, 2016, 51 (10): 41-47.
- [2] 高登. 铁素体不锈钢 SUS430 与 SUS430LX 的性能特点及应用 [J]. 山西冶金, 2017, 40 (4): 10-11.
Gao D. Properties and application of SUS430 and SUS430LX ferritic stainless steel [J]. Shanxi Metallurgy, 2017, 40 (4): 10-11.
- [3] 苏胜伟, 李伟民, 顾勇飞, 等. 小曲率板材弹塑性校正弯曲回弹分析 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (3): 197-202.
Su S W, Li W M, Gu Y F, et al. Springback analysis on elastic-plastic bending of smaller curvature sheet metal [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (3): 197-202.
- [4] 孟祥瑞. 不同应力状态下金属初始屈服和硬化行为的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.
Meng X R. Study on Initial Yield and Hardening Behavior of Metal under Different Stress States [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [5] Wagoner R H, Lim H, Lee M G, et al. Advanced issues in springback [J]. International Journal of Plasticity, 2013, 45 (45): 3-20.
- [6] Yoshida F, Hamasaki H, Uemori T. Modeling of anisotropic hardening of sheet metals including description of the Bauschinger effect [J]. International Journal of Plasticity, 2015, 75: 170-188.
- [7] Sumikawa S, Ishiwatari A, Hiramoto J, et al. Improvement of springback prediction accuracy using material model considering elastoplastic anisotropy and bauschinger effect [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230 (1): 1-7.
- [8] Liao J, Xue X, Lee M G, et al. On twist springback prediction of asymmetric tube in rotary draw bending with different constitutive models [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 89: 311-322.
- [9] 严勇, 吴超, 胡志力, 等. 汽车铝合金覆盖件成形数值模拟的各向异性屈服准则研究 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (2): 92-97.
Yan Y, Wu C, Hu Z L, et al. Anisotropic yield criterion for automotive aluminum panel forming numerical simulation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (2): 92-97.
- [10] 夏亮亮, 陈维晋, 宋鸿武, 等. 不同屈服准则对热轧结构钢各向异性行为预测精度对比 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (2): 259-265.
Xia L L, Chen W J, Song H W, et al. Comparison of prediction precision of anisotropy behavior of hot-rolled structural steel used different yield criteria [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (2): 259-265.
- [11] 薛新, 廖娟. 屈服准则对 DC05 钢板十字拉深变形预测的评价 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (4): 217-224.
Xue X, Liao J. Assessment of yield criterion for deformation prediction in cross-die deep drawing of DC05 steel sheet [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (4): 217-224.
- [12] Barlat F, Lian K. Plastic behavior and stretchability of sheet metals-Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions [J]. International Journal of Plasticity, 1989, 5 (1): 51-66.
- [13] Barlat F, Brem J C, Yoon J W, et al. Plane stress yield function for aluminum alloy sheets-part I: theory [J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19 (9): 1297-1319.
- [14] GB/T 228.1—2010, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2010, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [15] 李健强, 张赛军, 龚小龙, 等. 基于优化方法的复杂各向异性屈服函数参数标定 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (1): 160-167.
Li J Q, Zhang S J, Gong X L, et al. Constitutive parameter identification of complex orthotropic yield functions based on optimization method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (1): 160-167.
- [16] Zhu J, Huang S Y, Liu W, et al. Calibration of anisotropic yield function by introducing plane strain test instead of equi-biaxial tensile test [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28 (11): 2307-2313.
- [17] Khalfallah A, Oliveira M C, Alves J L, et al. Mechanical characterization and constitutive parameter identification of anisotropic tubular materials for hydroforming applications [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 104: 91-103.