

## DP980 高强钢 U 形件板材冲压回弹预测

胡 晓<sup>1,2</sup>, 王玉升<sup>2</sup>, 刘 勇<sup>3</sup>, 靳 阳<sup>1</sup>, 王亮赞<sup>1</sup>, 余灿生<sup>1</sup>, 王飞龙<sup>1</sup>,  
徐 烨<sup>2</sup>, 曾宁富<sup>2</sup>, 蔺永诚<sup>2</sup>

(1. 攀钢集团研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000; 2. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083;  
3. 攀钢集团攀枝花钢钒有限公司, 四川 攀枝花 617000)

**摘要:** U 形件板材冲压回弹行为的精准预测是制造业中亟待解决的难题之一。通过单轴拉伸试验与循环加载试验, 建立了基于 Hill48 屈服准则、混合硬化模型和弹性模量衰减模型的 DP980 高强钢冲压回弹预测模型。采用 ABAQUS 软件建立 U 形件板材冲压回弹有限元仿真模型, 通过二次开发将建立的混合硬化-弹性模量衰减预测模型嵌入 VUMAT、UMAT 求解子程序。对比分析各向同性硬化模型、混合硬化模型与提出的预测模型对 U 形件冲压回弹仿真的预测结果。研究表明: 基于所建立的混合硬化-弹性模量衰减模型与有限元仿真模型, 可以较准确地预测 DP980 高强钢 U 形件板材冲压回弹行为, 其回弹角度的预测误差仅为 0.17%。

**关键词:** 冲压回弹; 屈服准则; DP980 高强钢; 混合硬化-弹性模量衰减模型; VUMAT; UMAT

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.009

**中图分类号:** TG430 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 12-0073-09

## Prediction on stamping springback for DP980 high strength steel U-shaped part

Hu Xiao<sup>1,2</sup>, Wang Yusheng<sup>2</sup>, Liu Yong<sup>3</sup>, Jin Yang<sup>1</sup>, Wang Liangyun<sup>1</sup>, Yu Cansheng<sup>1</sup>, Wang Feilong<sup>1</sup>, Xu Ye<sup>2</sup>,  
Zeng Ningfu<sup>2</sup>, Lin Yongcheng<sup>2</sup>

(1. Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Pangang Group Panzhihua Steel and Vanadium Co., Ltd., Panzhihua 617000, China)

**Abstract:** Accurate prediction on stamping springback behavior of U-shaped part is one of the urgent problems to be solved in the manufacturing industry. Therefore, based on Hill48 yield criterion, hybrid hardening model and elastic modulus attenuation model, the stamping springback prediction model for DP980 high-strength steel was established by uniaxial tensile test and cyclic loading test, and the finite element simulation model for stamping springback of U-shaped part was established by using software ABAQUS. Furthermore, the hybrid hardening-elastic modulus attenuation prediction model was established, which was embedded into VUMAT and UMAT solving sub-routines by secondary development, and the prediction results of isotropic hardening model, hybrid hardening model and the prediction model proposed were compared and analyzed in the springback simulation of U-shaped parts. The results show that based on the established hybrid hardening-elastic modulus attenuation model and the finite element simulation model, the stamping springback behavior of DP980 high strength steel U-shaped part can be accurately predicted, and the prediction error of springback angle is only 0.17%.

**Key words:** stamping springback; yield criterion; DP980 high strength steel; hybrid hardening-elastic modulus attenuation model; VUMAT; UMAT

板材冲压是一种效率高、成本低且精度稳定的加工方式, 被广泛应用于汽车、航空航天、航海和

电气等行业<sup>[1-3]</sup>。同时, 板材在汽车整车生产中占据了 50% 的比例, 对汽车整体发挥着极大的作用<sup>[4]</sup>, 但在汽车板材加工过程中, 起皱、回弹和破裂是主要问题<sup>[5]</sup>。随着汽车钢材强度的不断增高, 在冲压过程中的变形行为逐渐复杂, 对其变形过程中回弹的预测逐渐成为高强钢研究领域的热点<sup>[6-7]</sup>。

为解决不同加载方式下, 板材所表现的力学性能不同, Yoshida F 等<sup>[8]</sup>对高强钢 DP590 循环加载

收稿日期: 2024-10-11; 修订日期: 2024-11-16

基金项目: 四川省攀西试验区重大科技攻关项目 (第六批项目)

作者简介: 胡 晓 (1990-), 男, 博士研究生, 高级工程师

E-mail: hgdiaohu@163.com

通信作者: 蔺永诚 (1976-), 男, 博士, 教授

E-mail: yclin@csu.edu.cn

下的力学性能进行了研究,发现当塑性预应变不断增加时,弹性模量迅速衰减,在此基础上建立了 Y-U 变弹性模量数学模型,很好地描述了 DP590 钢的弹性模量衰减行为。刘子健<sup>[9]</sup>对 Ti-6Al-4V 材料沿板材的 0°、45°和 90°方向进行了拉伸卸载试验,发现当应变达到 8%时,3 个方向上的弹性模量分别衰减了 18.9%、20%和 20.39%。李潇逸等<sup>[10]</sup>对铝合金材料进行了循环拉伸-卸载-拉伸试验,建立了循环拉伸卸载模型,嵌入 ABAQUS/CAE 二次开发对 7075-T6 铝合金的回弹行为进行了很好的描述。徐虹等<sup>[11]</sup>建立了 DP780 钢卸载模量与塑性应变的数学模型,并对 DP780 钢的非弹性回复的微观机理进行了研究。

同时,为验证所建立的模型仿真结果与实际试验结果,申丹凤等<sup>[12]</sup>提出了一种弦截法回弹补偿迭代优化流程,将该流程应用于挤压铝合金防撞梁的压弯成形及回弹分析,最终通过试验和有限元仿真结合的方式对该工件进行优化,输出了合适的回弹补偿面。闫华军等<sup>[13]</sup>采用 DynaForm 有限元分析软件进行了数值模拟,并采用正交试验方法研究了压边力、冲压速度、摩擦因数和模具间隙等参数的影响,获得了最优工艺参数。Shaker W K 等<sup>[14]</sup>提出了一种离线回弹效应补偿模型,从优化刀具轨迹的角度出发,基于 ABAQUS/CAE 有限元软件进行离线数值模拟,有效降低了回弹误差。Choi H 等<sup>[15]</sup>提出了一种用于发夹成形回弹补偿的人工智能算法,利用训练好的人工智能和优化算法对冲孔成形进行优化。Marretta L 等<sup>[16]</sup>提出了一种由有限元数值模拟、响应面法和蒙特卡罗模拟法相结合的多目标优化方法,以防止铝合金 S 形和 U 形件过度变薄和控制回弹现象。

高强钢薄板在成形过程中的回弹量极大,且回弹形式多样,为了解决这一问题,本文分别从建立本构模型、建立弹性模量衰减模型和有限元模拟仿真方面,对 DP980 高强钢材料的变形机理进行深入研究,实现对试验试样和生产过程中零件的精准回弹预测。为研究 DP980 高强钢的冲压回弹规律,建立精准预测模型,分别开展了与轧制方向成不同角度的单向拉伸和循环加载试验,建立屈服模型、硬化模型和非线性弹性模型相结合的冲压回弹预测模型,通过 ABAQUS 二次开发 VUMAT 进行冲压模拟和 UMAT 进行回弹模拟相耦合的方式,验证所建立的模型的准确性。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 单轴拉伸试验

本文的研究对象为 DP980 高强钢轧制板材,厚度为 1.5 mm。本试验参考 GB/T 228.1—2021<sup>[17]</sup>对试样进行设计和试验,试样尺寸和形状设计如图 1 所示。在 0°、45°、90°方向上切割试样,取样结果如图 2 所示。试验设备为三思 UTM5605X 万能试验机,采用 VIC-3D 视觉测量系统测量试样变形,对试验所采集的应变图像和应力数据进行处理,得到高强钢的单向拉伸真应变-真应力曲线,如图 3 所示。

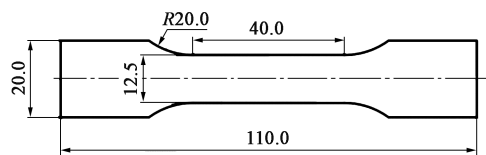


图 1 单轴拉伸试样尺寸图

Fig. 1 Size diagram of uniaxial tensile specimen

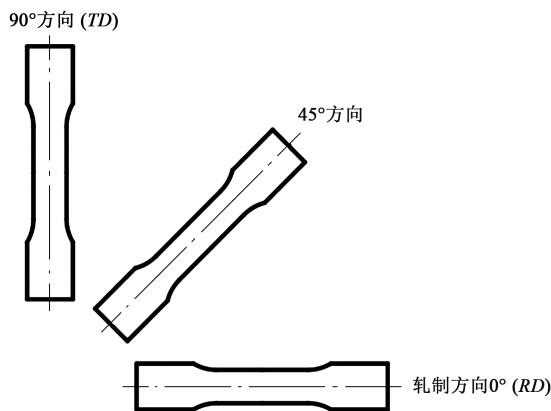


图 2 单轴拉伸试验取样图

Fig. 2 Sampling diagram of uniaxial tensile test

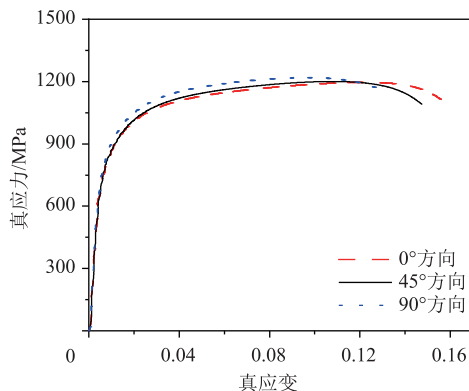


图 3 单轴拉伸的真应力-真应变曲线

Fig. 3 True stress-strain curves of uniaxial tensile

提取 DP980 高强钢的横向应变  $\varepsilon_{22}$  和纵向应变  $\varepsilon_{11}$ ，并按照式 (1) 计算各向异性系数。将真应变-真应力曲线分为弹性段和塑性段，分别对弹性和塑性力学性能参数进行提取。

$$r = - \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}} \tag{1}$$

式中： $r$  为各向异性系数。

最终，按照上述方法提取得到的基本力学性能参数见表 1。

表 1 DP980 高强钢的力学性能参数  
Table 1 Mechanical property parameters of DP980 high strength steel

轧制方向/ (°)	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	$r$ 值
0	692.3	1080.4	0.7808
45	710.6	1085.7	1.1124
90	766.6	1122.7	0.8526

1.2 循环加载试验

循环加载试验能够揭示 DP980 高强钢板材在冲压过程中所经历的复杂受力状态。冲压工步完成后，在脱模过程中，板材在变形时产生的残余应力被释放，板材达到新的力学平衡，产生冲压回弹现象。在板材加载过程中，弹性模量存在随着塑性应变增加而衰减的现象，该现象对板材冲压回弹有显著影响。故对沿板材轧制方向不同夹角的弹性模量的衰减规律进行研究。

为保证试验数据准确，在进行该加载-卸载-再加载试验时，选用试样与单轴拉伸试验一致（图 1），且每组试验重复 3 次。本试验所用设备为 MTS Landmark 高频疲劳试验机，试验完成后对引伸计所采集的应变和疲劳试验机采集到的应力数据进行处理，处理结果如图 4 所示。

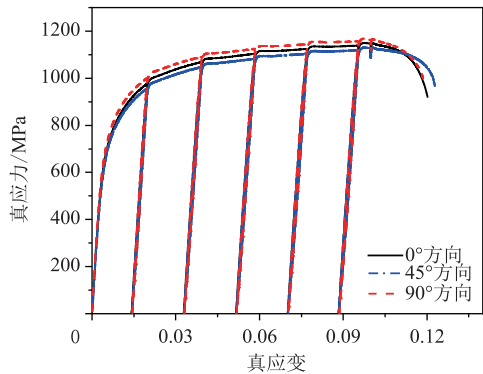


图 4 循环加载的真应力-真应变曲线  
Fig. 4 True stress-true strain curves of cyclic loading

同时，基于 Yoshida F 等<sup>[8]</sup>提出的弹性模量衰减模型，对循环加载过程中的弦模量进行计算，得到与轧制方向呈 0°、45°和 90°夹角上的弹性模量的衰减规律，如图 5 所示。

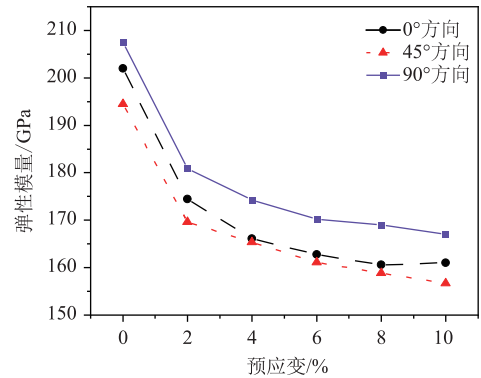


图 5 弹性模量的衰减规律  
Fig. 5 Attenuation laws of elastic modulus

1.3 U 形件冲压回弹试验

为研究 DP980 高强钢材料的冲压回弹规律，对 DP980 高强钢轧制板材进行剪切，所选用的坯料长度  $L$  为 300 mm、宽度  $W$  为 30 mm、高度  $H$  为 1.5 mm。U 形件冲压回弹试验装置由凸模、凹模和压边圈组成，选择的工艺参数为：压边圈对坯料施加压边力为 100 kN，冲头冲压速度为  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，冲头行程为 80 mm。

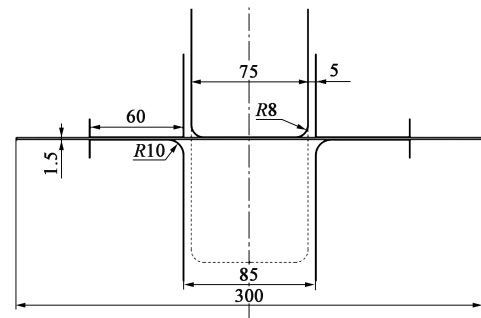


图 6 U 形件冲压结构示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of stamping structure for U-shaped part

当冲压工步完成后，对 U 形件进行脱模处理，最终冲压成形得到的零件如图 7 所示。

2 本构模型建立及弹性模量衰减模型建立

2.1 Hill48 屈服准则的描述

构建板料的本构模型时，需要考虑材料在塑性变形过程中表现出的各向异性屈服行为和加工硬化



图 7 U 形件冲压试验结果

Fig. 7 Stamping test result of U-shaped parts

$$f = \sqrt{A_1(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + A_2(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + A_3(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 2A_4\sigma_{23}^2 + 2A_5\sigma_{13}^2 + 2A_6\sigma_{12}^2} \quad (2)$$

式中:  $f$  为屈服函数;  $\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$ 、 $\sigma_{33}$ 、 $\sigma_{12}$ 、 $\sigma_{13}$ 、 $\sigma_{23}$  为笛卡尔坐标系下的应力分量;  $A_1 \sim A_6$  为需要通过试验标定的材料参数。

本文研究的主要对象为板材, 故将式 (2) 由三维应力状态简化为平面应力状态, 表达式为:

$$f = \sqrt{\frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\sigma}} = \bar{\sigma} \quad (3)$$

式中:  $\boldsymbol{\sigma}$  为笛卡尔坐标下的平面应力;  $\boldsymbol{\sigma}^T$  为  $\boldsymbol{\sigma}$  的转置,  $\boldsymbol{\sigma}^T = [\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}]$ ;  $\bar{\sigma}$  为等效应力;  $\mathbf{P}$  为三维应力刚度矩阵简化得到的二维平面应力形式, 表达式为:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & -P_{12} & 0 \\ -P_{12} & P_{22} & 0 \\ 0 & 0 & P_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式 (4) 中的各应力分量  $P_{12}$ 、 $P_{22}$ 、 $P_{66}$  可采用各向异性系数  $r$  值计算, 计算公式如下:

$$P_{12} = \frac{r_0}{1 + r_0} \quad (5)$$

$$P_{22} = \frac{r_0(1 + r_{90})}{r_{90}(1 + r_0)} \quad (6)$$

$$P_{66} = \frac{(r_0 + r_{90})(1 + 2r_{45})}{r_{90}(1 + r_0)} \quad (7)$$

式中:  $r_0$ 、 $r_{45}$ 、 $r_{90}$  分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  方向下的各向异性系数值。

各向异性系数可由单轴拉伸时的纵向应变和横向应变按式 (1) 计算得到, 其计算结果见表 1。同时, 为了满足在塑性修正过程中对 Hill48 屈服准则一次和二次偏导的计算, 得到其偏导数如下:

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\mathbf{P} \boldsymbol{\sigma}}{2\bar{\sigma}} \quad (8)$$

现象, 以及在循环加载条件下的弹性模量衰减规律。该模型还应当具备简洁的数学表达式和易于确定的参数, 以简化试验设计和模型计算过程。本节旨在利用 Hill48 屈服准则、A-F 随动硬化模型、弹性模量衰减模型和各向同性硬化模型, 建立一个能够准确描述板料各向异性和循环加载变形机制的本构关系模型, 这将有助于预测 DP980 高强钢在冲压过程中的行为。

Hill48 屈服准则适用于多种各向异性材料, 且可以较好地表征材料的各向异性, 其表达式:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \sigma_{ij}^2} = \frac{\mathbf{P}}{2\bar{\sigma}} - \frac{\mathbf{P} \boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{P}^T}{4\bar{\sigma}^3} \quad (9)$$

式中:  $\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$  为一阶导数;  $\frac{\partial^2 f}{\partial \sigma_{ij}^2}$  为二阶导数;  $\sigma_{ij}$  为笛卡尔坐标系下的应力分量,  $i, j = 1, 2, 3$ 。

## 2.2 A-F 随动硬化模型

A-F 随动硬化模型<sup>[18]</sup>是由 Armstrong C O 和 Frederick P J 提出, 通过引入一个动态恢复项和一个线性强化项构建而成, 该模型主要用来预测材料在变形过程中背应力的变化, 通过预测背应力的变化来描述材料在变形过程中的包辛格效应和瞬态行为, 其表达式为:

$$d\boldsymbol{\alpha} = \frac{2}{3}C d\boldsymbol{\varepsilon}^p - \gamma \boldsymbol{\alpha} d\bar{\varepsilon}^p \quad (10)$$

式中:  $\boldsymbol{\varepsilon}^p$  为塑性应变;  $\bar{\varepsilon}^p$  为等效塑性应变;  $C$ 、 $\gamma$  为 A-F 随动硬化模型参数;  $\boldsymbol{\alpha}$  为背应力。

对 A-F 随动硬化模型进行积分, 得到背应力和塑性应变的关系式为:

$$\boldsymbol{\alpha} = \frac{2}{3} \times \frac{C}{\gamma} [1 - \exp(-\gamma \boldsymbol{\varepsilon}^p)] \quad (11)$$

对单轴拉伸试验中真应变-真应力曲线进行处理, 将弹性阶段去除, 得到塑性应变和背应力曲线, 拟合得到 A-F 随动硬化模型参数。

## 2.3 各向同性硬化模型

各向同性硬化 (Isotropic Hardening, IH) 模型的表达式如下:

$$\sigma_e = \sigma_Y + B(1 - e^{-n\bar{\varepsilon}^p}) \quad (12)$$

式中:  $\sigma_e$  为材料各向同性强化应力;  $\sigma_Y$  为初始屈服应力;  $B$ 、 $n$  为各向同性材料参数。

该模型主要用于对 DP980 高强钢材料各向同性硬化的力学性能进行表征, 其参数求解方法与 A-F



随动硬化模型相似。

## 2.4 弹性模量衰减模型

DP980 高强度钢的非线性弹性回复行为可以用弹性模量衰减模型 (Elastic Modulus Attenuation Model, EMAM) 来表征, 其具体表达式如下:

$$E_{L-\varepsilon} = E_0 - (E_0 - E_a)[1 - \exp(-\xi\varepsilon^p)] \quad (13)$$

式中:  $E_{L-\varepsilon}$  为衰减后的弹性模量;  $E_0$  为初始弹性模量;  $\xi$  为材料参数;  $E_a$  为大塑性变形下的弹性模量。

垂直轧向的弹性模量随着塑性应变的不断增大, 卸载模量逐渐减小, 至第 3 次循环、预应变为 6% 时, 卸载模量为 168.7 GPa, 这时卸载模量趋于稳定, 相较于初始弹性模量下降了 18.59%。

弹性模量衰减模型采用 Levenberg-Marquardt 算法, 选取垂直轧向 (Transverse Direction, TD) 的弹性模量衰减值作为变量对其进行拟合, 得到的参数如表 2 所示, 其中拟合精度  $R^2$  为 0.991, 得到的 DP980 高强度钢材料弹性模量衰减曲线如图 8 所示。

表 2 DP980 高强度钢的弹性模量衰减模型参数

Table 2 Elastic modulus attenuation model parameters of DP980 high strength steel

参数	$E_0/\text{GPa}$	$E_a/\text{GPa}$	$\xi$	$R^2$
数值	207.48	168.70	68.95	0.991

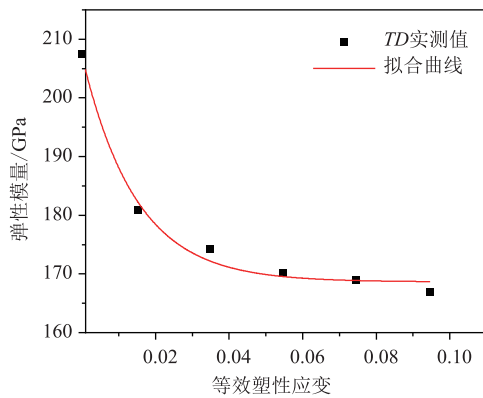


图 8 弹性模量随等效塑性应变的变化曲线

Fig. 8 Change curve of elastic modulus with equivalent plastic strain

## 2.5 混合硬化模型

混合硬化模型结合了各向同性硬化模型和随动硬化模型的特点, 以更准确地描述材料在复杂加载条件下的塑性行为。本节所建立的混合硬化-弹性模量衰减模型耦合了各向同性硬化模型、A-F 随动硬化模型。最终构建的模型公式如下:

$$\sigma_{\text{mix}} = \sigma_Y + B(1 - e^{-n\varepsilon^p}) + \frac{2}{3} \times \frac{C}{\gamma} [1 - \exp(-\gamma\varepsilon^p)] \quad (14)$$

式中:  $\sigma_{\text{mix}}$  为材料混合流动应力。

混合硬化模型采用 Levenberg-Marquardt 算法进行求解, 拟合数据选择为垂直轧制方向的拉伸数据, 拟合精度  $R^2$  为 0.9995。拟合的结果如图 9 所示, 拟合的参数见表 2。

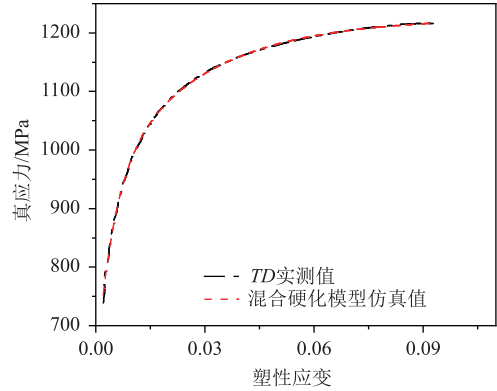


图 9 混合硬化模型拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of mixed hardening model

## 3 材料本构模型研究及数值实现

### 3.1 应力更新算法

材料本构模型包括屈服准则、流动法则和强化模型 3 部分, 通过屈服准则判断材料是否进入屈服状态, 当材料进入屈服状态后, 需要满足广义胡克定律、一致性条件和流动准则这 3 个准则才能发生塑性变形, 本节基于弹性模量衰减模型、A-F 随动硬化模型和各向同性硬化模型建立了混合硬化-弹性模量衰减模型来准确预测 DP980 高强度钢 U 形件板材回弹, 具体实现形式有以下 4 个步骤。

(1) 计算弹性模量值。计算弹性模量衰减值, 并赋给计算变量, 见式 (13)。

当材料处于弹性状态时, 弹性模量为  $E_0$ , 即弹性模量初始值。当进入塑性变形阶段后, 随着塑性应变的增加, 弹性模量逐渐衰减。

(2) 计算弹性试探应力。采用弹性理论进行计算和预测应力值:

$$\begin{cases} \sigma_{n+1} = \sigma_n + D^e \Delta \varepsilon_{n+1}, \\ \bar{\varepsilon}_{n+1}^p = \bar{\varepsilon}_n^p \\ \alpha_{n+1} = \alpha_n \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\sigma_n$ 、 $\sigma_{n+1}$  分别为第  $n$  步和第  $n+1$  步的弹性试探应力;  $\bar{\varepsilon}_n^p$ 、 $\bar{\varepsilon}_{n+1}^p$  分别为第  $n$  步和第  $n+1$  步的等效塑性应变;  $\alpha_n$ 、 $\alpha_{n+1}$  分别为第  $n$  步和第  $n+1$  步的背应力;  $\Delta \varepsilon_{n+1}$  为第  $n+1$  步的应变增量;  $D^e$  为弹性刚

度矩阵。

(3) 判断是否发生屈服。将式 (12) 中计算的弹性试探应力  $\sigma_{n+1}$  带入到屈服准则计算等效应力。同时, 计算各向同性硬化模型中的塑性流动应力, 当满足式 (13) 时, 则当前增量步为弹性状态, 否则进入步骤 (4) 进行塑性修正。

$$f(\sigma_{n+1}, \alpha_{n+1}) - \sigma_Y < Tol^e \quad (16)$$

式中:  $Tol^e$  为容差, 一般取  $10^{-6}$ 。

(4) 塑性修正。塑性修正的过程主要是满足一致性条件和流动法则。在塑性修正过程中主要采用向后欧拉算法, 使用 Newton-Raphson 迭代方法求解屈服过程中的非线性方程, 具体公式如下:

$$\bar{r}_\sigma = \sigma - \sigma_n - D^e(\Delta\epsilon_{n+1} - \Delta\epsilon^p) \quad (17)$$

$$\bar{r}_\alpha = \alpha - \alpha_n - \frac{2}{3}C\Delta\epsilon^p + \gamma\alpha \quad (18)$$

$$\bar{r}_f = f(\sigma, \alpha) - \sigma_Y \quad (19)$$

式中:  $\bar{r}_\sigma$ 、 $\bar{r}_\alpha$ 、 $\bar{r}_f$  为应力增量、背应力增量和一致性条件的理论值与实际求解值的残差值;  $\Delta\epsilon^p$  为塑性应变增量。

由流动法则和塑性功原理可得:

$$\Delta\bar{\epsilon}^p = \Delta\lambda, \quad \dot{\Delta\bar{\epsilon}}^p = \dot{\lambda} \quad (20)$$

式中:  $\dot{\Delta\bar{\epsilon}}^p$ 、 $\dot{\lambda}$  分别为  $\Delta\bar{\epsilon}^p$  和塑性乘子  $\Delta\lambda$  的增量。

在求解过程中, 分别对式 (17)、(18) 和 (19) 进行泰勒展开, 推导结果如下:

$$\bar{r}'_\sigma = \bar{r}_\sigma + \dot{\sigma} + \lambda D^e \frac{\partial a}{\partial \sigma} \dot{\sigma} - \Delta\lambda D^e \frac{\partial a}{\partial \sigma} \dot{\alpha} \quad (21)$$

$$\bar{r}'_\alpha = \bar{r}_\alpha + \dot{\alpha} + \frac{2}{3}\dot{\lambda}Ca - \Delta\lambda \frac{2}{3}C \frac{\partial a}{\partial \sigma} (\dot{\sigma} + \dot{\alpha}) \quad (22)$$

$$\bar{r}'_f = \bar{r}_f + a^T \dot{\sigma} - a^T \dot{\alpha} + A_i \quad (23)$$

式中:  $\bar{r}'_\sigma$ 、 $\bar{r}'_\alpha$ 、 $\bar{r}'_f$  分别为泰勒展开后的  $\bar{r}_\sigma$ 、 $\bar{r}_\alpha$ 、 $\bar{r}_f$  表达式;  $\dot{\sigma}$ 、 $\dot{\alpha}$  分别为  $\sigma$ 、 $\alpha$  的增量;  $a = \frac{\partial f}{\partial \sigma}$ ;  $A_i$  为硬化模型的一阶导数。

令式 (17)、(18) 和 (19) 左侧等于 0, 相互联立求解可得:

$$\dot{\alpha} = -D_1 \bar{r}_\alpha + D_2 \dot{\lambda} a + D_3 \dot{\sigma} - D_1 \gamma \alpha \dot{\lambda} \quad (24)$$

$$\dot{\sigma} = -\Theta^{-1} \bar{r} - \Theta^{-1} \Pi \dot{\lambda} a - \Theta^{-1} \Gamma \dot{\lambda} \quad (25)$$

$$\dot{\lambda} = (\bar{r}_f - \bar{q}) / [a^T \Theta^{-1} (\Pi a + \Gamma) + a^T (D_2 a - D_1 \gamma \alpha) - a^T D_3 \Theta^{-1} (\Pi a + \Gamma) + A_i] \quad (26)$$

其中:

$$D_1 = I + \frac{2}{3}C\Delta\lambda \frac{\partial a}{\partial \sigma} + \gamma\Delta\lambda I \quad (27)$$

$$D_2 = D_1 \cdot \frac{2}{3}C \quad (28)$$

$$D_3 = D_1 \cdot \frac{2}{3}C\Delta\lambda \frac{\partial a}{\partial \sigma} \quad (29)$$

$$\Theta = I + \Delta\lambda D^e \frac{\partial a}{\partial \sigma} - \Delta\lambda D^e \frac{\partial a}{\partial \sigma} D_3 \quad (30)$$

$$\Gamma = \Delta\lambda D^e \frac{\partial a}{\partial \sigma} D_1 \gamma \alpha \quad (31)$$

$$\Pi = D^e - \Delta\lambda \frac{\partial a}{\partial \sigma} D^e D_2 \quad (32)$$

$$\bar{q} = a^T \Phi^{-1} \bar{r} + a^T D_1 \bar{r}_\alpha + a^T D_3 \Phi^{-1} \bar{r} \quad (33)$$

$$\hat{r} = \bar{r}_\sigma + \Delta D^e \frac{\partial a}{\partial \sigma} D_1 \bar{r}_\alpha \quad (34)$$

当完成上述迭代过程, 对本构模型中的计算变量更新如下:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma + \dot{\sigma} \\ \alpha = \alpha + \dot{\alpha} \\ \Delta\lambda = \Delta\lambda + \dot{\lambda} \\ \Delta\bar{\epsilon}^p = \Delta\lambda \end{cases} \quad (35)$$

在塑性修正完成后, 重新代入一致性条件求解, 若满足式 (36) 则计算完成, 若不满足则重复上述计算, 直到满足精度要求或迭代次数。

$$\Phi = f(\sigma, \alpha) - \sigma_Y < Tol^e \quad (36)$$

在 VUMAT 动力学求解过程中, 不需要对一致性切线模量进行计算, 但在 UMAT 静力学计算过程中, 需要返回一致性切线模量, 保证算法的稳定性和迭代速度。

最终根据式 (17)、式 (18) 和式 (19) 计算得到一致的切线模量  $D^{ep}$  如下:

$$D^{ep} = \frac{R\Psi + \Lambda a^T R - Raa^T R}{I\Psi + \Lambda a^T D_3 - Raa^T D_3} \quad (37)$$

其中:

$$\Psi = a^T R a - a^T \Lambda + a^T D_2 a - a^T D_1 \gamma \alpha + A_i \quad (38)$$

$$\Lambda = \Sigma^{-1} \Delta\lambda D^e \frac{\partial a}{\partial \sigma} D_2 a - \Sigma^{-1} \Delta\lambda D^e \frac{\partial a}{\partial \sigma} D_1 \gamma \alpha \quad (39)$$

$$R = \Sigma^{-1} D^e \quad (40)$$

式中:  $I$  为单位矩阵。

### 3.2 VUMAT 和 UMAT 子程序设计

对 U 形件板材进行冲压和回弹仿真, 采用 VUMAT 进行冲压工步仿真, 采用 UMAT 进行回弹工步仿真。VUMAT 算法在进行回弹分析时, 存在虚拟动能的问题, 难以对回弹角度准确预测, 所以, 采用 UMAT 静力学算法对回弹工步进行仿真。

采用 VUMAT 和 UMAT 对所建立的弹性模量衰减模型进行二次开发, 开发流程图如图 10 所示。

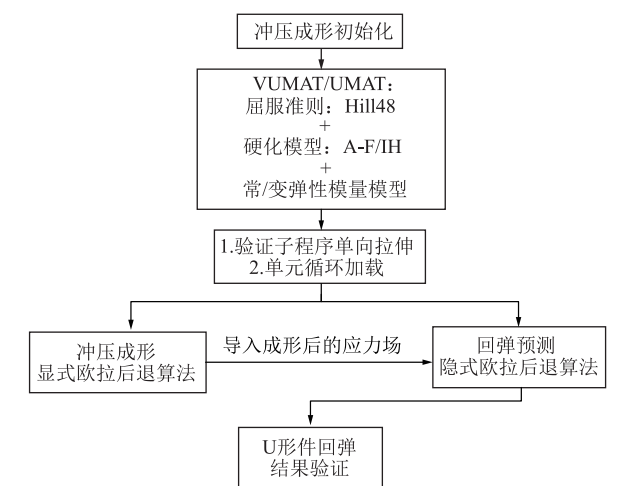


图 10 U 形件冲压成形流程图

Fig. 10 Flow chart of stamping forming for U-shaped parts

4 本构模型验证和应用

4.1 单轴拉伸验证

根据图 1 所示尺寸建立单轴拉伸有限元模型，如图 11 所示，验证开发的 VUMAT 和 UMAT 材料子程序的精度和效率。有限元模型的网格尺寸为 1 mm×1 mm，厚度为 1.5 mm，仿真选用的材料参数见表 3，单元类型选择为 S4R 壳单元。



图 11 单轴拉伸有限元仿真模型

Fig. 11 Finite element simulation model of uniaxial tensile

表 3 DP980 高强钢的有限元模拟参数

Table 3 Finite element simulation parameters of DP980 high strength steel

参数	$E/\text{GPa}$	$\sigma_Y/\text{MPa}$	$C$	$\gamma$	$B$	$n$
数值	207	622	98430	210.4	291.5	37.6

对基于 Hill48 屈服准则的各向同性硬化模型 (IH)、混合硬化模型 (AF+IH) 和混合硬化-弹性模量衰减模型 (AF+IH+EMAM) 进行计算，得到模型验证结果如图 12 所示。混合硬化-弹性模量衰减模型和试验曲线的预测结果接近，而各向同性硬化模型和混合硬化模型的预测结果偏高。

4.2 循环加载弹性模量衰减验证

将 2.4 节中所建立的混合硬化-弹性模量衰减模

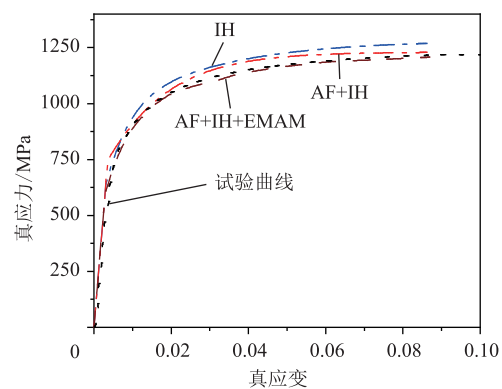


图 12 单轴拉伸有限元模拟值和试验值对比

Fig. 12 Comparison between finite element simulation values and experimental values for uniaxial tensile

型，采用 ABAQUS 平面单元进行验证，建立拉伸-卸载的有限元仿真。对变形过程中的弹性模量衰减规律进行预测，所建立的平面单元模型如图 13 所示。



图 13 平面单元循环加载模型

Fig. 13 Cyclic loading model for plane unit

平面单元仿真过程中，以 TD 方向为例，对真应力-真应变数据进行提取，如图 14 所示。其中，

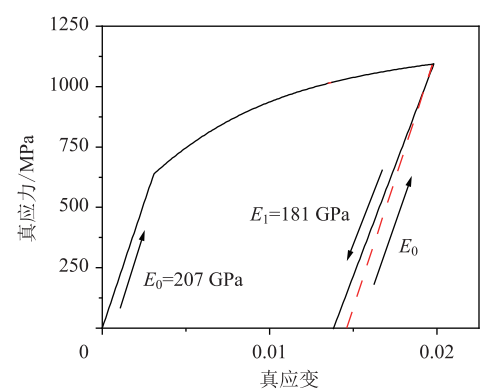


图 14 循环加载弹性模量衰减示意图

Fig. 14 Schematic diagram of elastic modulus attenuation for cyclic loading

实线为有限元仿真的曲线及弹性模量衰减规律，虚线代表初始弹性模量。与衰减弹性模量进行比较，当真应变为 0.02 时，弹性模量  $E_1$  衰减至 181 GPa，与试验结果一致。

4.3 U 形件冲压回弹预测

基于 1.3 节描述的冲压装置及冲压试验工步，建立 DP980 高强钢 U 形件板材冲压 ABAQUS 有限元模型，为了降低模型计算量，将模型简化为 1/2 对称模型，如图 15 所示。模具类型选择为离散刚体，单元类型为 R3D4，板料单元类型选择为 S4R 壳单元，板厚方向设置 9 个积分点<sup>[19]</sup>，壳单元在有限元计算时，需要计算其剪切刚度模量，否则模型不能计算，摩擦因数设为 0.1。

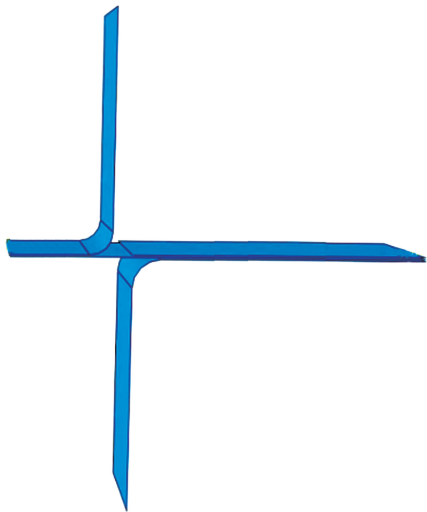


图 15 U 形件冲压有限元仿真模型

Fig. 15 Finite element simulation model of stamping for U-shaped part

对回弹工步进行有限元后处理分析，得到回弹成形结果中间面的结点位置，如图 16 所示。分析回弹结果可知，在屈服准则相同的情况下，各向同性

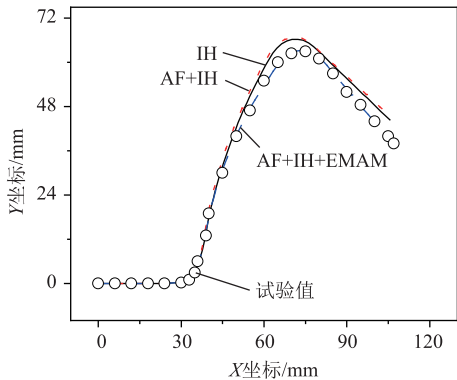


图 16 U 形件回弹中间面的结点位置

Fig. 16 Point position on springback middle surface for U-shaped part

硬化模型 (IH) 和混合硬化模型 (AF+IH) 具有相似的回弹结果，预测误差较大。混合硬化-弹性模量衰减模型 (AF+IH+EMAM) 对实际工况下零件的预测结果更准确。

在有限元仿真和试验的基础上，基于 Numishe-et2011 中提出的 U 形件板材回弹评价标准<sup>[20]</sup>，分别提取了各向同性硬化模型 (IH)、混合硬化模型 (AF+IH) 和混合硬化-弹性模量衰减模型 (AF+IH+EMAM) 中 U 形件的凸模圆角回弹角度  $\theta_1$ ，凹模圆角回弹角度  $\theta_2$ ，侧壁卷曲的曲率半径  $\rho$  这 3 个变量来准确描述不同模型对 U 形件回弹的预测结果，其具体数值如表 4 所示。

表 4 弹性模量衰减模型参数

Table 4 Elastic modulus attenuation model parameters

来源	$\theta_1 / (^\circ)$	$\theta_2 / (^\circ)$	$\rho / \text{mm}$
IH	107.97	73.4	207.52
AF+IH	107.59	72.76	205.18
AF+IH+EMAM	110.14	68.11	175.49
试验值	110.16	69.46	176.44

如图 17 所示，将仿真值与试验值对比可知，IH 和 AF+IH 模型对  $\theta_1$  和  $\theta_2$  的预测较为准确，误差为 1.90%，但两者对  $\rho$  的预测误差较大，误差分别为 17.6%和 16.28%，而 AF+IH+EMAM 模型对 3 个预测结果的误差均较小，分别为 0.011%、0.53%和 0.76%。

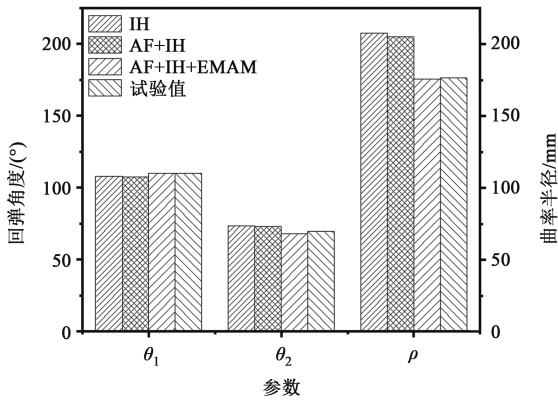


图 17 回弹参数对比图

Fig. 17 Comparison of springback parameters

5 结论

(1) DP980 高强钢材料板材存在明显的各向异性行为，对其沿轧制方向不同角度进行单轴拉伸试验时可知，垂直轧向的强度最高，韧性最小、沿轧制方向



强度最低、韧性最大。

(2) DP980 高强度材料在循环加载变形过程中, 随着塑性应变的不断增大, 弹性模量逐渐减小, 当衰减到一定程度时, 弹性模量趋于稳定。

(3) 建立混合硬化-弹性模量衰减模型, 结合 ABAQUS 二次开发技术, 分别对各向同性硬化模型 (IH)、混合硬化模型 (AF+IH) 和混合硬化-弹性模量衰减模型 (AF+IH+EMAM) 进行开发, 采用 VUMAT 动力学模拟冲压过程, 采用 UMAT 静力学模拟回弹过程, 将这些模型的回弹结果和试验结果的回弹中心节点位置进行对比。结果表明, 混合硬化-弹性模量衰减模型对 DP980 高强度 U 形件板材回弹的预测结果更加准确。

#### 参考文献:

- [1] 罗海文, 沈国慧. 超高强度高韧性钢的研究进展和展望 [J]. 金属学报, 2020, 56 (4): 494-512.  
Luo H W, Shen G H. Progress and perspective of ultra-high strength steels having high toughness [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56 (4): 494-512.
- [2] 赵春梅, 王恒, 王俊, 等. 涡轮冲压组合喷管运动机构布局研究综述 [J/OL]. 航空发动机, 1-7 [2024-11-15].  
Zhao C M, Wang H, Wang J, et al. Review on movement mechanism configuration of TBCC nozzle [J/OL]. Aeroengine, 1-7 [2024-11-15].
- [3] Han F, Cao Z B. Inelastic recovery of Q&P980 ultra high strength steel with a complicated deformation path [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58 (10): 921-928.
- [4] 李鹤飞. 高强度断裂韧性及裂纹扩展机制研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.  
Li H F. Investigation on Fracture Toughness and Crack Growth Mechanism of High-strength Steels [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [5] 潘俊杰. DP780 高强度板材成形极限及回弹研究 [D]. 襄阳: 湖北文理学院, 2023.  
Pan J J. Study on Forming Limit and Springback of DP780 High-strength Steel Sheet [D]. Xiangyang: Hubei University of Arts and Sciences, 2023.
- [6] Lu Z P, Li D, Cao L L, et al. Springback control in complex sheet-metal forming based on advanced high-strength steel [J]. Coatings, 2023, 13 (5): 930.
- [7] Chen J J, Cao J J, Zhao Q F, et al. A novel approach to springback control of high-strength steel in cold roll forming [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107: 1793-1804.
- [8] Yoshida F, Uemori T. A model of large-strain cyclic plasticity describing the baushinger effect and workhardening stagnation [J]. International Journal of Plasticity, 2002, 18 (5-6): 661-686.
- [9] 刘子健. 基于 YLD2000-2D 屈服准则和变弹性模量的 Ti-6Al-4V 材料本构模型及应用 [D]. 太原: 太原科技大学, 2021.  
Liu Z J. The Constitutive Model and Application of Ti-6Al-4V Material Based on YLD2000-2D Yield Criterion and Variable Elastic Modulus [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2021.
- [10] 李潇逸. 铝合金板塑性成形非线性弹性行为研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.  
Li X Y. Study on Nonlinear Elastic Behavior of Aluminum Alloy Sheet in Plastic Forming [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [11] 徐虹, 刘亚楠, 于婷, 等. 双相钢 DP780 在循环加载-卸载过程中的非弹性回复行为及其微观机理 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2017, 47 (1): 191-198.  
Xu H, Liu Y N, Yu T, et al. Inelastic recovery behavior and microscopic mechanism of high strength DP780 steel during cyclic loading-unloading [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47 (1): 191-198.
- [12] 申丹凤, 聂昕, 陈建. 6082-T6 挤压铝合金防撞梁压弯成形及回弹补偿 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (7): 15-22.  
Shen D F, Nie X, Chen J. Bending forming and springback compensation of 6082-T6 extruded aluminum alloy anti-collision beam [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (7): 15-22.
- [13] 闫华军, 邢博, 张双杰, 等. 基于 Dynaform 的前防撞梁回弹分析及模具补偿研究 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (8): 35-41.  
Yan H J, Xing B, Zhang S J, et al. Study on springback analysis and die compensation of front anti-collision beam based on Dynaform [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (8): 35-41.
- [14] Shaker W K, Klimchik A. Towards single point incremental forming accuracy: An approach for the springback effect compensation [A]. IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) [C]. Auckland, New Zealand: IEEE, 2023.
- [15] Choi H, Kwon Y, Cho J H, et al. Artificial intelligence-based springback compensation of EV motor component [A]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [C]. Montreal Canada: IOP Publishing, 2023.
- [16] Marretta L, Ingarao G, Di Lorenzo R. Design of sheet stamping operations to control springback and thinning: A multi-objective stochastic optimization approach [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 52 (7): 914-927.
- [17] GB/T 228.1—2021. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].  
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [18] 辛策. 适用于循环加载的弹塑性本构模型的建立及应用 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.  
Xin C. Establishment and Application of Elastic-plastic Constitutive Model for Cyclic Loading [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [19] Safaei M, Zang S, Lee M G, et al. Evaluation of anisotropic constitutive models: Mixed anisotropic hardening and non-associated flow rule approach [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 73: 53-68.
- [20] Chung K, Kuwabara T, Verma R, et al. Numisheet 2011 Benchmark 4: Pre-strain effect on spring-back of 2D draw bending [A]. Proceedings 8th NUMISHEET Conference [C]. Seoul, Korea: AIP Conference Proceedings, 2011.