

## 基于晶体塑性有限元的转向架盖板压形回弹预测

何广忠<sup>1</sup>, 张学广<sup>1</sup>, 李 明<sup>2</sup>, 崔 琪<sup>1</sup>, 王 震<sup>3</sup>, 邢丰琪<sup>3</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司 工程技术中心, 吉林 长春 130062;

2. 吉林大学 锻压工艺研究所, 吉林 长春 130025; 3. 中车长春轨道客车股份有限公司 冲压件分公司, 吉林 长春 130062)

**摘要:** 针对 S355J2W 钢板材由于具有显著的各向异性而使其在模具压形工艺中的回弹难以预测的问题。以高速动车组转向架侧梁上盖板成形为例, 对 S355J2W 钢的晶粒与织构进行了分析并对其各向异性进行了量化, 获得了材料晶体塑性本构模型的关键参数, 并使用晶体塑性有限元方法评估了其各向异性的力学性能以及 Hill48 屈服准则的模型参数。建立了转向架侧梁上盖板压形过程仿真模型, 分别采用 Von Mises 及 Hill48 屈服准则来模拟工件成形后的应力释放及回弹效应, 并开展了侧梁上盖板压形实验进行验证, 实验结果和仿真结果吻合。各向同性模型和各向异性模型预测结果的对比表明, 采用各向异性材料模型可以更准确地预测侧梁上盖板的回弹。

**关键词:** 各向异性; 回弹; 压形工艺; S355J2W 钢; 转向架盖板

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.008

**中图分类号:** TG302

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 08-0047-06

## Springback prediction on bogie cover plate pressing based on crystal plastic finite element

He Guangzhong<sup>1</sup>, Zhang Xueguang<sup>1</sup>, Li Ming<sup>2</sup>, Cui Qi<sup>1</sup>, Wang Zhen<sup>3</sup>, Xing Fengqi<sup>3</sup>

(1. Engineering Technology Center, CRRC Changchun Railway Vehicle Co., Ltd., Changchun 130062, China;

2. Roll Forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130025, China;

3. Stamping Parts Branch, CRRC Changchun Railway Vehicle Co., Ltd., Changchun 130062, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the springback of S355J2W steel plate in the die pressing process was difficult to predict due to its remarkable anisotropy, for the forming of side beam upper cover plate for high-speed EMU bogie, the grain and texture of S355J2W steel were analyzed, and the anisotropy of the material was quantified. Then, the key parameters of crystal plastic constitutive model were obtained, and the anisotropy mechanical properties and the model parameters of Hill48 yield criterion were evaluated by crystal plastic finite element method (CPFEM). Furthermore, a simulation model of the pressing process for bogie upper cover plate of side beam was established, and the stress release and springback effect of the workpiece after forming were simulated by Von Mises and Hill48 yield criterion. Meanwhile, the side beam upper cover plate pressing test was carried out to verify the results, and the test results were consistent with the simulation results. The comparison of the prediction results between the isotropic and anisotropic models shows that the anisotropic material model can predict the springback of the side beam upper cover plate more accurately.

**Key words:** anisotropy; springback; pressing process; S355J2W steel; bogie cover plate

转向架是高速动车组车辆系统中的重要部件, 其零部件的成形精度对于产品的运行安全和寿命具有重要意义。转向架侧梁上盖板主要采用的是生产效率较高的冷冲压模具压形制造工艺。然而, 受到板料厚度、冲压深度、外形尺寸以及变截面结构等多方面影响, 盖板成形后回弹受各向异性的影响严重, 难以凭

借生产经验进行预测<sup>[1-5]</sup>。有限元仿真手段已被广泛用于中厚板部件的各向异性分析及回弹预测研究中。Chung K 等<sup>[6]</sup>基于 Barlat2000 屈服准则对 DP 钢的汽车冲压件的回弹进行了模拟。Lee J Y 等<sup>[7]</sup>建立了 DP590 钢和 TRIP590 钢的各向异性硬化 (Anisotropic Hardening, HAH) 模型用于回弹的预测。Geng L M 等<sup>[8]</sup>基于 A-F 混合硬化模型对 HSLA 高强度钢的弯曲和反弯曲加载的回弹进行了模拟分析。Chatti S 和 Hermi N<sup>[9]</sup>基于 Hill48 屈服准则建立了 TRIP600 钢的各向同性硬化模型和 Chaboche 非线性硬化模型, 用

收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51735231)

作者简介: 何广忠 (1978-), 男, 博士, 教授级高级工程师

E-mail: crc\_hgzhang@126.com

于其 L 折弯的回弹模拟。Chen P 和 Koç M<sup>[10]</sup> 利用 Hill48 屈服准则和各向同性硬化模型模拟了 DP600 钢和 DP1000 钢的 U 形拉弯回弹模拟。Gau J T 和 Kinzel G L<sup>[11]</sup> 基于 Hill48 屈服准则建立了 AA6111-T4 铝板的 Mroz 多面硬化模型, 用于简单的 L 折弯的回弹模拟。Oliveira M C 等<sup>[12]</sup> 基于 Hill48 屈服准则建立了 DC06 钢和 DP600 高强钢的混合硬化模型和 Teodosiu 各向异性硬化模型, 用于回弹的模拟。

晶体塑性有限元从材料的微观结构出发, 充分地考虑了材料在变形过程中的孪生滑移, 因此被广泛用于屈服函数的校准中。刘文成等<sup>[13]</sup> 利用晶体塑性有限元模型, 有效地预测了冷轧 AA3104 铝棒的各向异性, 用于量化筒形件的凸耳高度。Esmailpour R 等<sup>[14]</sup> 使用晶体塑性有限元预测了 AA7075-O 铝合金圆棒在单点增量成形过程中的等效应变。刘纯国等<sup>[15]</sup> 使用晶体塑性有限元预测了 AA7B04 铝合金板材的织构梯度导致的各向异性, 用于冲压成形卸载过程的回弹量。上述研究表明, 晶体塑性有限元提供了一种方便准确的虚拟仿真技术, 用于预测板材的各向异性。

本文首先利用晶体塑性有限元方法获得了 S355J2W 钢的各向异性力学性能参数, 并建立了基于 Hill48 各向异性屈服准则的材料模型, 同时建立了转向架侧梁上盖板冷冲压模具压形工艺的各向同性 (Von Mises 屈服准则) 和各向异性 (Hill48 屈服准则) 的有限元模型, 进行了工件弯曲和回弹的模拟。此外, 开展了转向架侧梁上盖板冷冲压模具压形实验, 并对回弹后的工件精度进行了测量, 与模拟结果进行了对比、验证。

## 1 S355J2W 钢各向异性的量化

本文使用晶体塑性有限元<sup>[15]</sup> 来替代拉伸实验以从机理上获得 S355J2W 钢各向异性的力学性能。本文中使用的晶体塑性模型的变形梯度张量  $\mathbf{F}$  描述为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^e \mathbf{F}^p \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{F}^e$  和  $\mathbf{F}^p$  分别为弹性和塑性变形的梯度张量。宏观速度梯度张量  $\mathbf{L}^p$  可以表示为:

$$\mathbf{L}^p = \sum_{\alpha} \dot{\gamma}^{\alpha} \mathbf{s}^{\alpha} \text{sign}(\boldsymbol{\tau}^{\alpha}) \quad (2)$$

式中:  $\dot{\gamma}^{\alpha}$  为滑移系统  $\alpha$  上的剪切速率;  $\boldsymbol{\tau}^{\alpha}$  为作用在滑移系统  $\alpha$  上的剪应力;  $\mathbf{s}^{\alpha}$  为滑移系统  $\alpha$  的滑移阻力, 其张量表示形式为:

$$\mathbf{s}^{\alpha} = \mathbf{m}^{\alpha} \otimes \mathbf{n}^{\alpha} \quad (3)$$

式中: 单位向量  $\mathbf{m}^{\alpha}$  和  $\mathbf{n}^{\alpha}$  分别为变形配置中的滑移方向和滑移平面法线方向。

可以使用柯西应力张量  $\boldsymbol{\sigma}$  获得滑移系统  $\alpha$  上的解析剪应力, 计算公式如式 (4) 所示:

$$\boldsymbol{\tau}^{\alpha} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{s}^{\alpha} \quad (4)$$

在滑移系统  $\alpha$  中, 描述屈服面的无量纲函数  $f^{\alpha}$  可以定义为:

$$f^{\alpha} = |\boldsymbol{\tau}^{\alpha}| - s^{\alpha} \quad (5)$$

滑移阻力的控制方程可以定义为:

$$\dot{s}^{\alpha} = \sum_{\beta} h^k \dot{\gamma}^{\beta} \quad (6)$$

式中:  $\dot{s}^{\alpha}$  为滑移系统  $\alpha$  的滑移阻力变化率;  $h^k$  为硬化模量, 它描述了由于滑移系统  $\beta$  上的滑移速率而导致的滑移系统  $\alpha$  的滑移阻力变化;  $k$  为滑动系统  $\beta$  的材料常数, 它控制硬化模量对滑移阻力的敏感性;  $\dot{\gamma}^{\beta}$  为滑移系统  $\beta$  上的剪切速率。

考虑到加工硬化和回复的综合影响, 硬化模量  $h^k$  可以描述为幂律关系, 公式如式 (7) 所示:

$$h^k = \begin{cases} h_0^{\beta} \left[ 1 - \frac{s^{\beta}}{s_s^{\beta}} \right]^k, & \alpha = \beta \\ h_0^{\beta} q \left[ 1 - \frac{s^{\beta}}{s_s^{\beta}} \right]^k, & \alpha \neq \beta \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $q$  为潜在硬化率;  $h_0^{\beta}$  为滑移系统  $\beta$  的硬化参数;  $s^{\beta}$  为滑移系统  $\beta$  的滑移阻力;  $s_s^{\beta}$  为滑移系统  $\beta$  在硬化饱和时的滑移阻力。

本文所使用的晶体塑性有限元模型的代表性体积单元 (Representative Volume Element, RVE) 如图 1 所示, 上述晶体的塑性本构模型通过 UMAT 用户子程序植入至商业有限元软件 Abaqus/Standard 中, 模型的参数如表 1 所示。模型中的  $x$  轴对应材料的轧制方向,  $y$  轴对应垂直于轧制的方向,  $z$  轴对应厚度方向。以轧制方向拉伸模拟为例, 将  $x$  轴负方向的平面固定, 然后在  $x$  轴正方向的平面施加位移, 应变速率控制为 0.02。该模型用极图表示的织构信

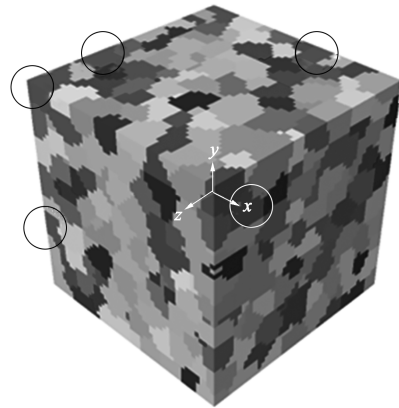


图 1 S355J2W 钢的代表性体积单元

Fig. 1 Representative volume element of S355J2W steel

表 1 晶体塑性本构模型材料参数

Table 1 Material parameters of crystal plastic constitutive model

参数	$C_{11}/$	$C_{12}/$	$C_{44}/$	$\dot{\gamma}_0/$	$h_0/$	$\tau_0/$	$\tau_s/$	$m'$	$a$	$q$
	GPa	GPa	GPa	$s^{-1}$	MPa	MPa	MPa			
数值	227	135	54	0.001	554	124	212	0.01	2.0	1.4

从 (100) 息如图 2 所示, 极图中可以明显看到几处亮白线圈区域, 这说明 S355J2W 钢的晶粒产生了较强的择优取向, 导致了极图上具有较强的峰值。使用 Python 脚本将取向赋予每个晶粒后, 分别对轧制、垂直于轧制方向以及于轧制方向呈  $45^\circ$  方向进行拉伸模拟, 所得到的力学性能如表 1 所示, 其中  $C_{11}$ 、 $C_{12}$  和  $C_{44}$  分别为沿着材料轧制、垂直于轧制方向以及于轧制方向呈  $45^\circ$  方向的弹性模量,  $\dot{\gamma}_0$  和  $h_0$  分别为初始的剪切速率和硬化模量,  $\tau_0$  为屈服应力,  $\tau_s$  为一阶剪切应力,  $m'$  为材料参数,  $a$  为滑移面强度因子。

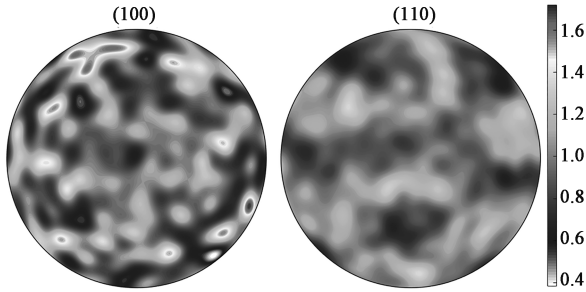


图 2 S355J2W 钢的极图

Fig. 2 Pole figure of S355J2W steel

本文使用 Hill48 屈服准则进行侧梁上盖板工艺的模拟, 其等效应力  $\bar{\sigma}$  的表达式为:

$$\bar{\sigma}^2 = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 \quad (8)$$

式中:  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的应力分量;  $\tau_{zx}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{xy}$  分别为  $zx$ 、 $yz$ 、 $xy$  平面内的剪切应力;  $F$ 、 $G$ 、 $H$ 、 $L$ 、 $M$ 、 $N$  分别为 Hill48 屈服准则模型参数。

Hill48 屈服准则模型参数可以根据沿板料各向异性指数  $r$  值计算:

$$\begin{cases} F = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_{22}^2} + \frac{1}{r_{33}^2} - \frac{1}{r_{11}^2} \right) \\ G = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_{33}^2} + \frac{1}{r_{11}^2} - \frac{1}{r_{22}^2} \right) \\ H = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_{11}^2} + \frac{1}{r_{22}^2} - \frac{1}{r_{33}^2} \right) \\ L = \frac{3}{2r_{23}^2} \\ M = \frac{3}{2r_{13}^2} \\ N = \frac{3}{2r_{12}^2} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} r_{11} = r_{13} = r_{23} = 1 \\ r_{22} = \sqrt{\frac{R_{90}(R_0 + 1)}{R_0(R_{90} + 1)}} \\ r_{33} = \sqrt{\frac{R_{90}(R_0 + 1)}{R_{90} + R_0}} \\ r_{12} = \sqrt{\frac{3R_{90}(R_0 + 1)}{2(R_{45} + 1)(R_{90} + R_0)}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $R_0$ 、 $R_{45}$ 、 $R_{90}$  为 S355J2W 钢板料的厚向异性指数;  $r_{11}$ 、 $r_{13}$ 、 $r_{23}$ 、 $r_{22}$ 、 $r_{33}$ 、 $r_{12}$  为基于厚向异性指数换算的板料各向异性指数。采用单向拉伸实验手段得到  $R_0 = 2.143$ ,  $R_{45} = 1.476$ ,  $R_{90} = 2.143$ 。

## 2 S355J2W 钢压形工艺模拟及实验研究

### 2.1 本构模型

S355J2W 钢的基础力学性能参数如表 2 所示, 基于式 (8)~式 (10) 得到的 Hill48 屈服准则模型参数的取值如表 3 所示, 不同切应力下的各向异性屈服面如图 3 所示, 其中,  $RD$  为轧制方向,  $TD$  为板料横向, 从图 3 中可以看出, 该屈服函数拥有较好的凸性, 可以用于有限元模拟。

表 2 S355J2W 钢的力学性能参数

Table 2 Mechanical property parameters of S355J2W steel

参数	厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
数值	14	367	610	22.4

表 3 Hill48 屈服准则模型参数

Table 3 Model parameters of Hill48 yield criterion

参数	$F$	$G$	$H$	$L$	$M$	$N$
数值	0.3026	0.3184	0.6816	1.5	1.5	1.3562

### 2.2 压形工艺实验研究

转向架侧梁上盖板的结构与尺寸如图 4 所示, 成形模具如图 5 所示, 由凸模、凹模、顶料板和送料装置构成。在工件成形后, 采用形状检测样板进行工件整体轮廓和局部特征的检测, 并采用工件和样板的偏离量表征工件成形后的回弹。

### 2.3 有限元模型的建立

本文采用 Abaqus/Explicit 软件对侧梁上盖板模具压形的成形过程进行模拟。模型主要由 3 部分组成, 即凸模、凹模和侧梁上盖板的坯料, 如图 6 所示。基于产品成形工艺, 模拟过程中, 凹模完全固



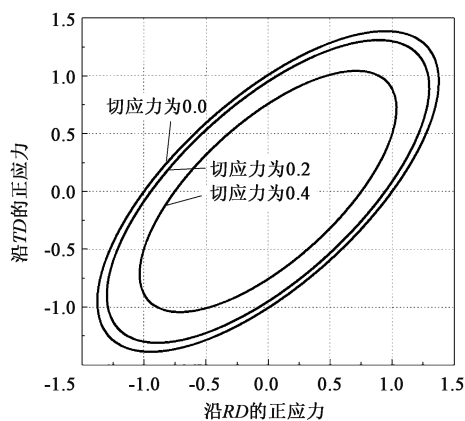


图3 S355J2W 钢在不同切应力下的各向异性屈服面  
Fig. 3 Anisotropic yield surfaces of S355J2W steel under different shear stresses

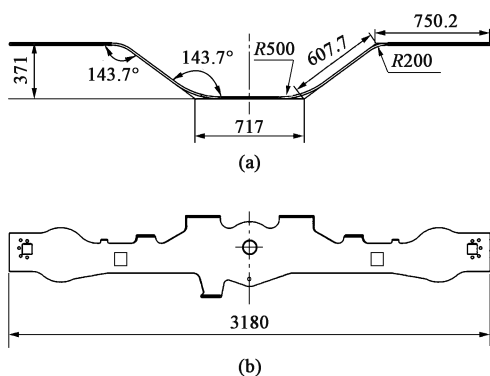


图4 侧梁上盖板零件结构  
(a) 侧视图 (b) 俯视图

Fig. 4 Structure of upper cover plate part for side beam  
(a) Side view (b) Vertical view

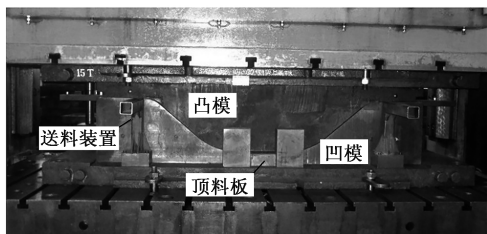


图5 侧梁上盖板成形模具

Fig. 5 Forming die for upper cover plate part of side beam

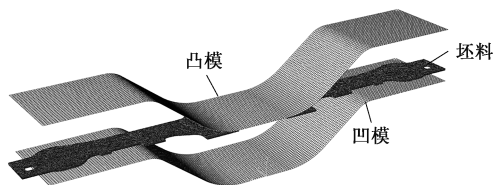


图6 模具压形有限元模型及构件坯料形状

Fig. 6 Finite element model of die pressing and shape of component blanks

定, 采用位移控制方法, 凸模逐渐下压至合模。回

弹的模拟采用 Abaqus/Standard 软件, 模型中将凸模和凹模删除, 在成形件的中间设置 3 个铰接的点, 将压形后的状态导入并设为初始状态。

### 3 结果与讨论

侧梁上盖板成形后回弹量的测量方法如图 7 所示。通过采用形状检测实时获取样板的轮廓, 并测量工件由回弹导致的误差分布情况。图 8 为侧梁上盖板压形回弹前后的等效应力分布云图。从图 8 中可以看出, 采用两种屈服准则得到的回弹前的等效应力与回弹后的残余应力的分布差异较小, 均在相同的位置产生了较大应力集中。但是, 在应力集中分布的位置上, 各向异性模型计算的等效应力大于各向同性模型, 各向同性模型的最大等效应力为 529.7 MPa, 而各向异性模型的最大等效应力为 618.9 MPa。从回弹前后的等效应力分布对比可以看出, 回弹过程释放了大量的应力, 各数值段回弹的等效应力值均高于回弹后的等效应力值。表明经过隐式计算, 应力已经释放, 构件内部的应力释放值达到 268 MPa。回弹后零件的应力分布比较均匀, 而应力值相对较小。这表明应力得到充分释放。应力变化趋势与先前报道的结果一致<sup>[9]</sup>。



图7 侧梁上盖板实验件轮廓测量

Fig. 7 Profile measurement of upper cover test piece for side beam

图 9 为侧梁上盖板压形回弹过程中的位移分布云图。从图 9 可以看出, 残余应力的作用会引起回弹, 回弹趋势的模拟结果与实际成形结果一致。与回弹前的表面形状相比, 板材产生相反的变形。说明隐式计算后发生了弹性回复, 形状发生了变化。与各向同性模型的仿真结果相比, 各向异性模型预测的回弹位移较大。两种模型的最大位移均出现在中部, 这表明在回弹过程中这个部位向上运动。最小位移出现在两侧的压边位置, 这表

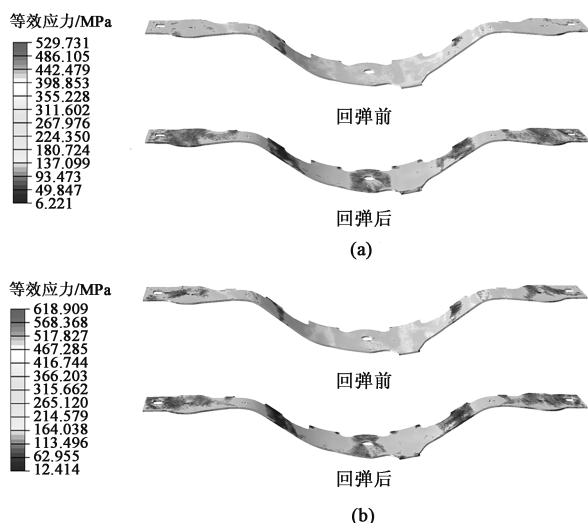


图 8 侧梁上盖板实验件回弹前后等效应力分布

(a) Von Mises 屈服准则 (b) Hill48 屈服准则

Fig. 8 Equivalent stress distributions of upper cover test piece for side beam before and after springback

(a) Von Mises yield criterion (b) Hill48 yield criterion

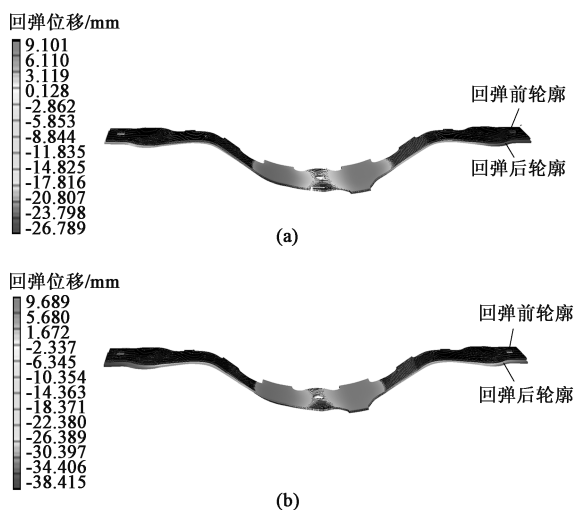


图 9 基于 Von Mises 屈服准则 (a) 和 Hill48 屈服准则 (b) 预测的侧梁上盖板实验件回弹位移分布

Fig. 9 Springback displacement distributions of upper cover test piece for side beam predicted by Von Mises yield criterion (a) and Hill48 yield criterion (b)

明回弹过程中压边位置向下运动。各向同性模型预测的回弹位移最大值为 9.101 mm，而最小值为 -26.789 mm，两者之差约为 35.890 mm。各向异性模型预测的位移最大值为 9.689 mm，最小值为 -38.415 mm，两者之差约为 48.104 mm。图 10 显示了两种模型预测的回弹后轮廓与实验轮廓对比的误差云图。从图 10 中可以看出，各向异性模型预测的结果较准确，最大误差仅为各向同性模型

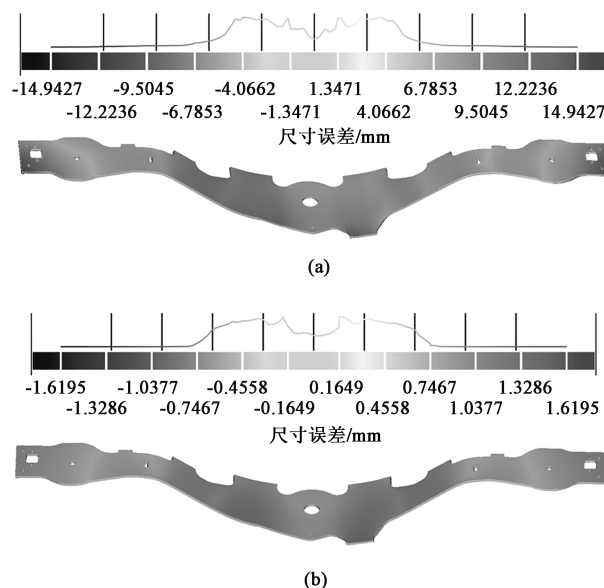


图 10 基于 Von Mises 屈服准则 (a) 和 Hill48 屈服准则 (b)

预测的侧梁上盖板回弹后轮廓与实验件误差云图

Fig. 10 Error nephograms between contour after springback of upper cover plate for side beam predicted by Von Mises yield criterion (a) and Hill48 yield criterion (b) and test piece

的 10.8%。因此可以说明在有限元模型中考虑各向异性，可以大幅提高回弹预测的精度。

## 4 结论

(1) 晶体塑性有限元作为一种虚拟仿真方法，从材料的晶体取向与性质分析，可以准确地预测 S355J2W 钢的各向异性机械性能。该方法在选择合适的参数后，还可以广泛用于其他材料的各向异性预测。

(2) 在模具压形的模拟中引入各向异性，使材料的特性被充分表达，可以使回弹预测的精度提高，其误差仅为各向同性模型的 10.8%。使用晶体塑性有限元准确地预测回弹后零件的形状，可以在生产模具之前对模具形状进行预修正以获得具有足够精度的模具，减少工艺准备周期，对提升压形生产的效率与精度具有指导意义。

## 参考文献：

- [1] 张永亮, 王强, 李凯. 高强钢板梁类零件冷冲压回弹控制方法研究 [J]. 汽车工艺与材料, 2020, (12): 5-9.  
Zhang Y L, Wang Q, Li K. Research on springback control method of cold pressed high-strength steel plate girder [J]. Automobile Technology & Material, 2020, (12): 5-9.
- [2] 廖阳. 汽车冷冲压 U 形梁卷曲的控制 [J]. 汽车实用技术,

- 2017, (24): 149–150.
- Liao Y. Automobile cold stamping U-shaped beam control [J]. Automobile Applied Technology, 2017, (24): 149–150.
- [3] 马利, 缪存坚, 朱晓波, 等. 奥氏体不锈钢冷冲压标准椭圆形封头塑性变形预测方法研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (6): 20–24.
- Ma L, Miao C J, Zhu X B, et al. Research on prediction method of plastic deformation for cold stamping formed standard elliptical head made of austenitic stainless steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (6): 20–24.
- [4] 谷净巍, 蔡中义, 徐虹, 等. 帽形截面冷冲压件的回弹分析及补偿 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50 (2): 200–203.
- Gu Z W, Cai Z Y, Xu H, et al. Springback analysis and compensation for cold stamping parts with hat cross sections [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50 (2): 200–203.
- [5] 张旭, 周杰. 超高强度钢防撞梁热成形改冷冲压工艺设计及优化 [J]. 重庆大学学报, 2011, 34 (1): 78–81.
- Zhang X, Zhou J. Optimization and springback control of ultra-high strength steel anti-collision side beam forming process [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34 (1): 78–81.
- [6] Chung K, Lee M G, Kim D, et al. Springback evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions Part I: Theory and formulation [J]. International Journal of Plasticity, 2005, 21 (5): 861–882.
- [7] Lee J Y, Lee J W, Lee M G, et al. An application of homogeneous anisotropic hardening to springback prediction in pre-strained U-draw/bending [J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49 (25): 3562–3572.
- [8] Geng L M, Shen Y, Wagoner R H. Anisotropic hardening equations derived from reverse-bend testing [J]. International Journal of Plasticity, 2002, 18 (5): 743–767.
- [9] Chatti S, Hermi N. The effect of non-linear recovery on springback prediction [J]. Computers & Structures, 2011, 89 (13): 1367–1377.
- [10] Chen P, Koç M. Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 190 (1): 189–198.
- [11] Gau J T, Kinzel G L. A new model for springback prediction in which the Bauschinger effect is considered [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43 (8): 1813–1832.
- [12] Oliveira M C, Alves J L, Chaparro B M, et al. Study on the influence of work-hardening modeling in springback prediction [J]. International Journal of Plasticity, 2007, 23 (3): 516–543.
- [13] Liu W C, Chen B K, Pang Y. Numerical investigation of evolution of earing, anisotropic yield and plastic potentials in cold rolled FCC aluminium alloy based on the crystallographic texture measurements [J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2019, 75: 41–55.
- [14] Esmailpour R, Kim H, Park T, et al. Calibration of Barlat Yld2004-18P yield function using CPFEM and 3D RVE for the simulation of single point incremental forming (SPIF) of 7075-O aluminum sheet [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 145: 24–41.
- [15] Liu C G, Li M, Yue T, et al. Thick anisotropy analysis for AA7B04 aluminum plate using CPFEM and its application for springback prediction in multi-point bending [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115: 1139–1153.

## 关于中国机械工程学会塑性工程分会发展会员的通知

中国机械工程学会塑性工程（锻压）分会成立于1963年，是全国性的锻压科学技术工作者的学术性社会团体，是依法登记的法人社团。经本会理事会研究决定：凡承认本会章程并符合条件者，可申请为本会会员。

**会员的权利与义务：**1. 颁发个人/团体会员证书及铜牌，铜牌由秘书处统一制作并颁发，可申请定制；2. 参加本学会组织的年会会议费可享受适当优惠；3. 优先参加本会组织举办的国内外有关学术活动和其他活动；4. 优先获得本会的有关学术资料，免费获赠全年学会会刊《锻压技术》杂志；5. 在学会网站主页进行企业宣传、logo链接；6. 享有本会的选举权、被选举权和表决权；7. 接受本会委托，进行论证、评议、咨询等工作；8. 享有入会、退会的自由。

**申请手续：**提交入会申请表。申请个人会员，需填写《个人会员入会申请表》，同时提交“本人身份证复印件”、“一寸免冠照片两张”。申请团体会员，需填写《团体会员入会申请表》，同时提交“法人登记证书复印件”。材料均需一式一份寄至学会秘书处，并以电子邮件方式将表格发送至我会邮箱；也可登陆学会网站，进行在线注册。经审批通过后，将及时通知申请单位或个人。会员缴纳会费后正式登记，由学会秘书处颁发会员证书。

**地 址：**北京市海淀区学清路18号707室塑性工程分会

**联系人：**李佳盈、秦思晓、周 林、金 红

**电 话：**010-62912592 **传 真：**010-62912592 **邮 箱：**duanya@cmes.org **网 址：**http://www.cstp-cmes.org.cn

中国机械工程学会塑性工程分会