

板料成形

## 中厚板 U 形冲压成形有限元模拟分析及回弹预测

孙占坤<sup>1</sup>, 李 涛<sup>2</sup>

(1. 内蒙古工业大学 力学系, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 采用有限元模拟, 针对载重汽车用大梁钢中厚板在 U 形冲压成形中的回弹缺陷进行研究。首先, 利用 Numisheet2011 给出的 U 形冲压标准考题对所建立的有限元模型进行验证, 在此基础上对汽车用中厚板进行了成形性能模拟研究, 并分析了控制回弹的措施。研究表明: 与薄板相比, 中厚板的回弹行为呈现出明显差异, 其冲压后上圆角上端区域出现局部增厚, 而且侧壁纵截面等部位的弹性应变分布特点使得板料出现负回弹, 侧壁曲线对应圆弧半径较大, 同时 U 形件内侧侧壁出现两个应力集中点; 此外, 由于板料较厚, 成形结构件的内外侧 Mises 等效应力分布表现出较大的差异。针对中厚板冲压成形可能出现的负回弹缺陷, 提出采用模具回弹角补偿和增大凹凸模间隙两种方法来减小中厚板的回弹量, 从而得到了较为良好的最终板形。

**关键词:** 中厚板; 回弹补偿; U 形冲压工艺; 负回弹; 弹性应变

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.013

**中图分类号:** TG386

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 05-0081-08

## Simulation analysis and springback prediction on U-shaped stamping of medium-thickness plate based on finite element simulation

Sun Zhankun<sup>1</sup>, Li Tao<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanics, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** The springback defect during U-shaped stamping process for medium-thickness plate used as large beam steel of heavy truck was studied by finite element simulation. First, the established finite element model was verified by the U-shaped stamping standard test examples given by Numisheet2011. On this basis, a simulation study on the formability of medium-thickness plate for automobile was carried out, and the measures to control the springback were analyzed. The results show that the springback behavior of medium-thickness plate is significant different from that of thin plate, and an obvious local thickness increase emerges around the upper area of upper corner after stamping. Moreover, the elastic strain distribution characteristics on the longitudinal section of sidewall and other parts make the plate material appear negative springback, and the curve of sidewall corresponds to a larger arc radius. At the same time, two stress concentration points appear on the inner sidewall of the U-shaped part, and due to the thicker plate material, the Mises equivalent stress distributions on the inner and outer of the formed part also show significant differences. To avoid the negative springback defect in the stamping of medium-thickness plate, two methods of die springback angle compensation and increasing the clearance between punch and die are used to reduce the springback amount of medium-thickness plate, so as to obtain a better final plate shape.

**Key words:** medium-thickness plate; springback compensation; U-shaped stamping process; negative springback; elastic strain

汽车结构件的生产中大量使用冲压成形方式。而随着高强钢的应用, 回弹对板料最终形状的影响也越来越严重, 无论对模具的设计还是对冲压工艺的制定, 准确地对回弹进行预测均至关重要。由于

回弹过程被看作成形过程中积累的弹性变形的释放过程, 所以, 回弹预测的准确性很大程度上取决于对板料成形过程的准确模拟。考虑到冲压成形过程包含了大变形、结构非线性、接触非线性、材料非线性等复杂因素, 有限元数值计算的方法被广泛应用于板料冲压分析及回弹预测。在模拟过程中, 材料模型作为材料力学行为本质特征的体现, 对保证模拟结果的准确性至关重要。针对材料的强化模型, 国内外学者做了大量的工作: Gau J T 等<sup>[1-2]</sup>讨论了包辛格效应在板料成形中的重要性, 指出包辛格效

收稿日期: 2021-03-26; 修订日期: 2021-06-28

基金项目: 内蒙古自然科学基金资助项目 (2014MS0525)

作者简介: 孙占坤 (1990-), 男, 博士, 讲师

E-mail: sunzk\_cailiao@163.com

通信作者: 李 涛 (1975-), 女, 博士, 教授

E-mail: 836450192@qq.com

应对于钢板回弹量的影响不及对铝板明显,试样的变形仅仅集中在产生弯曲的局部,而冲压成形过程中很大一部分板料均会经历反向加载过程,所以,包辛格效应的影响将被累积放大;Chaboche J L<sup>[3]</sup>提出了一种能够描述材料在循环载荷下行为的材料强化模型;Geng L M 和 Wagoner R H<sup>[4]</sup>提出了一种强化模型并将其应用于板料的弯曲回弹预测,由于该模型较好地描述了材料的包辛格效应,故得出了较高的回弹预测精度;Samuel M<sup>[5]</sup>利用实验和数值计算方法研究了诸如摩擦因数、冲头圆角半径、凹模圆角半径等参数对薄板 U 形弯曲侧壁轮廓曲线的影响;Yoshida F 等<sup>[6]</sup>提出了一种能够准确而全面地描述包辛格效应的强化模型,并对不同应变量下的拉压曲线进行了计算,取得了较好的效果;Taherizadeh A 等<sup>[7]</sup>利用非关联流动法则克服了塑性变形中板料各向异性塑性势曲面与屈服面不重合的问题,提高了各向异性板料成形的回弹预测精度;唐妍和蒋松<sup>[8]</sup>研究了翼子板内板冲压工艺的数值模拟及回弹补偿,设计压边力浮动为-10%~30%来确定制件成形裕度,分析了压边力对回弹的影响;李艳<sup>[9]</sup>基于实验研究了宽板 U 形冲压的回弹问题,分别就板材性能、板料厚度、凸模圆角半径、凸凹模间隙、凹模跨度和摩擦因数等诸多因素对板料回弹的影响进行了分析,得到了上述因素对回弹的影响规律;Zein H 等<sup>[10]</sup>利用有限元研究了冲头压力、压边力、润滑条件等工艺参数对拉深件成形的影响;Schwarze M 等<sup>[11]</sup>开发了一种新的实体-壳缩减积分单元应用于板料成形,得到的模拟结果与实验吻合较好;为了减小车辆底板冲压件的最大减薄率,王艳艳和高崇阳<sup>[12]</sup>提出了基于改进蜂群算法的工艺参数优化方法,并采用数值方法对影响冲压减薄率的因素进行了优化分析。

目前的研究多针对于薄的高强度钢板,而对汽车用中厚板的研究较少。本文利用有限元方法,深入地探讨了汽车用中厚板的冲压成形过程,对比分析了薄板与厚板在 U 形冲压及回弹过程中所表现出的不同特点,为中厚板的成形提供了有价值的参考。

## 1 单轴拉伸实验

实验材料采用汽车用高强度钢板,厚度为 6 mm。图 1 为单轴拉伸实验试样,试样尺寸依据 GB/T 228.1—2021<sup>[13]</sup>,伸长部分直径为  $\Phi 5$  mm,标距  $L_0=25$  mm。由于试样较细,所以夹持端较长

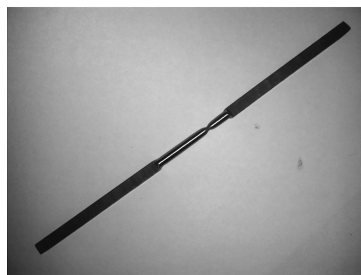


图 1 单轴拉伸试样

Fig. 1 Sample of uniaxial tension

以便于夹持。实验过程中采用引伸计夹持试样以得到材料的真应力-真应变曲线和弹性模量。

经单轴拉伸实验测得材料的力学性能如表 1 所示,屈服强度  $R_{eL}$  和抗拉强度  $R_m$  分别为 790 和 969 MPa,弹性模量  $E$  为 227 GPa。图 2 为单轴拉伸实验得到的应力-应变曲线。

表 1 材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of material

参数	$E/\text{GPa}$	断后伸长率/%	$R_{eL}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$
数值	227	20.5	790	969

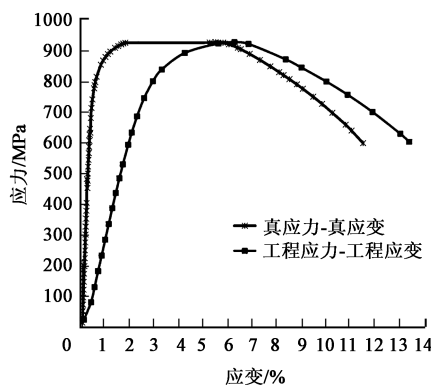


图 2 材料应力-应变曲线

Fig. 2 Curves of stress-strain for material

## 2 有限元模型及模拟参数

图 3 为隐式算法冲压模拟的有限元模型,板料尺寸为 450 mm×100 mm×6 mm,凸模圆角半径为 5 mm,凹模圆角半径为 7 mm。材料屈服准则采用 Mises 准则,模型的总单元数量约 8000 个。凸模、凹模与板料之间的摩擦因数为 0.3,凹模、凸模均定义为带控制节点的刚体。

## 3 有限元模型验证

为了验证模型的准确性,基于 Numisheet2011 U

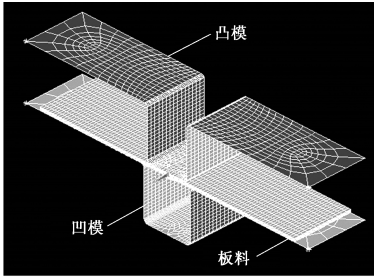


图 3 隐式算法冲压模拟的有限元模型  
Fig. 3 Finite element model of stamping simulation with implicit algorithm

形冲压标准考题，采用多线性随动强化模型对所建立的有限元模型进行了验证，对比了回弹的预测值和实验值。材料性能如表 2 所示。由于 U 形冲压结构上具有对称性，因此，冲压模拟采用 1/2 模型以缩短计算时间。图 4a 为所建立的 1/2 有限元模型及网格划分情况，板料用 ANSYS Mechanical 中的 Shell 181 单元划分网格，沿厚度方向分布 5 个积分点。在接触的定义中，冲头、压边块、凹模均为带节点的刚体，与板料之间定义为面面接触。分 3 个载荷步进行加载：第 1 个载荷步中压边块下压对板料施加 2.94 kN 的压边力；第 2 个载荷步中冲头下压，冲

表 2 模拟验证用材料性能参数

Table 2 Material properties parameters for simulation verification

参数	$E/\text{GPa}$	$R_{\text{el}}/\text{MPa}$	$R_{\text{m}}/\text{MPa}$
数值	198.8	527.0	831.5

头行程为 71.8 mm，板料宽度为 20 mm；第 3 个载荷步中去除加载和压边作用，板料回弹。图 4b 为凸模完全压入后卸载前板料的 Mises 等效应力分布，图 4c 为板料完全回弹后的 Mises 等效应力分布，可以发现：板料形状明显改变，且 Mises 等效应力降低并呈现更均匀分布。图 4d 为模拟得到的回弹后板料截面轮廓与实验结果的对比，可以看到：模拟结果可以较为准确地预测回弹后下部圆角形状和侧壁曲线，但是在上部圆角形状的预测上存在一定误差。分析其中的原因为：板料存在一定的各向异性，而此处的模拟是基于 Mises 各向同性屈服准则，加之多线性随动强化模型本身的局限性和数值计算的误差，而且上部圆角为整个成形件变形最为复杂、影响因素最多且成形条件最为恶劣的部分。综上所述，模拟所达到的精度基本可以验证所建立的有限元模型的可靠性。

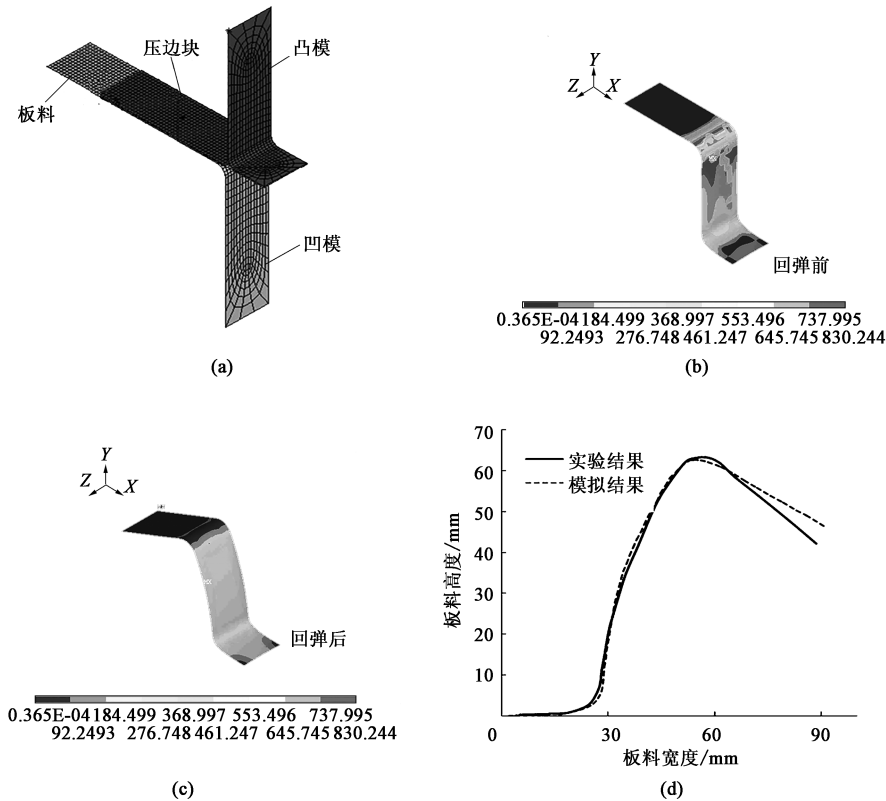


图 4 有限元模拟验证  
(a) 有限元模型 (b) 回弹前 Mises 等效应力分布 (c) 回弹后 Mises 等效应力分布 (d) 回弹轮廓对比

Fig. 4 Verification of finite element simulation

(a) Finite element model (b) Distribution of Mises equivalent stress before springback (c) Distribution of Mises equivalent stress after springback (d) Comparison of springback contour

## 4 中厚板成形模拟结果及分析

图 5 为屈服强度为 700 MPa 的大梁钢冲压终点及回弹后的 Mises 等效应力云图。由图 5a 可知：内侧较高的 Mises 等效应力主要集中在板料上部圆角的上端和下部圆角的下端，板料底部由于冲头的作用也产生了较大的应力。在图 5b 中，外侧 Mises 等效应力分布与内侧有所不同，在上部圆角的两端均很大，而上

部圆角中部的 Mises 等效应力却较小。板料卸载后发生回弹并伴随着应力的释放和重新分布，如图 5c 所示，由于侧壁的内弯，在板料侧壁内侧和下圆角上端出现了较大的应力集中，Mises 等效应力值达到 575.750 MPa，所以，可以预见这两个位置为板料成形后的危险位置，比较容易出现缺陷。如图 5d 所示，在成形件的外侧，Mises 等效应力较高区域仍然位于上部圆角的两端，只是分布的范围略有缩小。

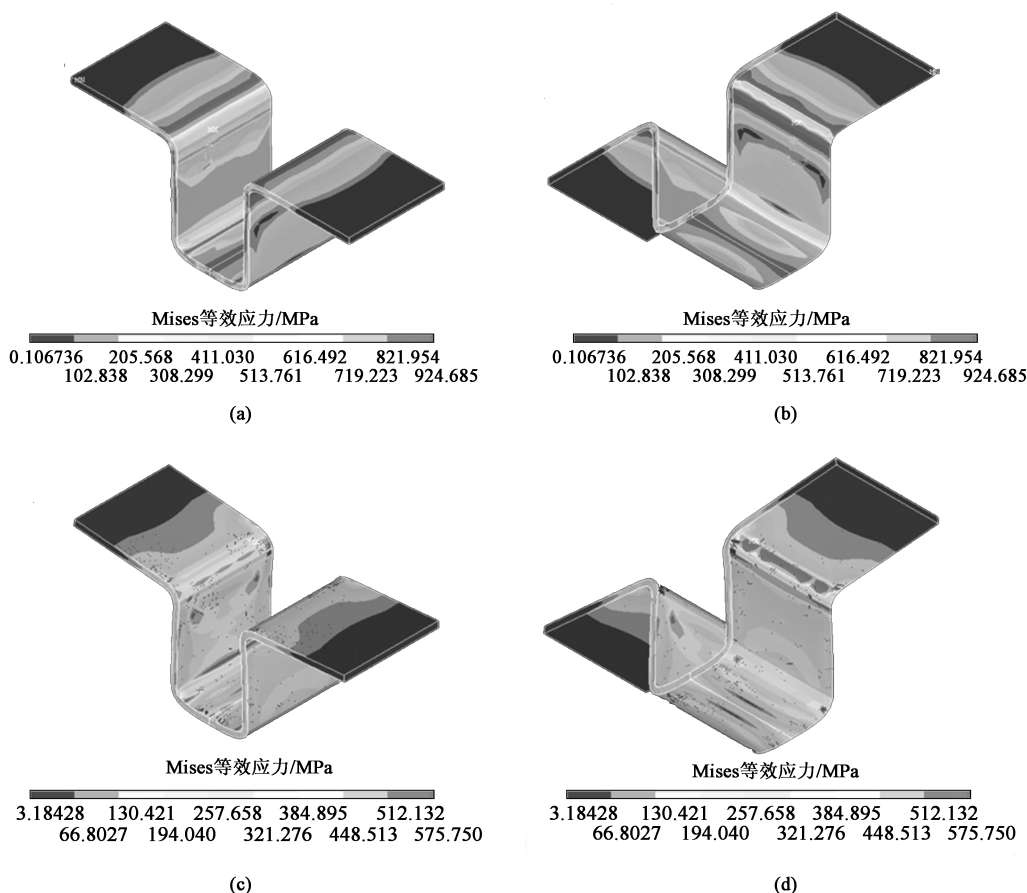


图 5 冲压件的 Mises 等效应力云图

- (a) 成形终点冲压件内侧 Mises 等效应力 (b) 成形终点冲压件外侧 Mises 等效应力 (c) 回弹后冲压件内侧 Mises 等效应力  
(d) 回弹后冲压件外侧 Mises 等效应力

Fig. 5 Cloud maps of Mises equivalent stress for stamping part

- (a) Mises equivalent stress inside of stamping part at end of forming (b) Mises equivalent stress outside of stamping part at end of forming  
(c) Mises equivalent stress inside of stamping part after springback (d) Mises equivalent stress outside of stamping part after springback

图 6 为冲压结束时（回弹前）和回弹后板料的弹性应变云图，可以看到：在冲压结束时，板料的弹性应变较大，最大值达到 0.004，而且大面积分布，在板料的上部圆角和下部圆角附近较为集中，尤其是上部圆角部位，几乎被全部覆盖；在板料回弹之后，弹性应变较大的部位大大缩小，仅集中于下部圆角附近的较小区域，而且最大值降低至 0.003。由于弹性应变为可恢复应变，在外加约束去

除以后，上部圆角部位集中弹性应变将在很大程度上恢复。随着弹性恢复过程的进行，上部圆角角度将变大，而下部圆角虽然由于弹性应变恢复同样有增大的趋势，但由于冲压结束时（图 6a）下部圆角的弹性应变不及上部圆角部位的集中，所以，在冲压结束后板料呈现出“负回弹”。

如图 7a 所示，700 MPa 高强汽车板冲压后板料两翼向上抬起、侧壁向内偏转，并可以明显地观察

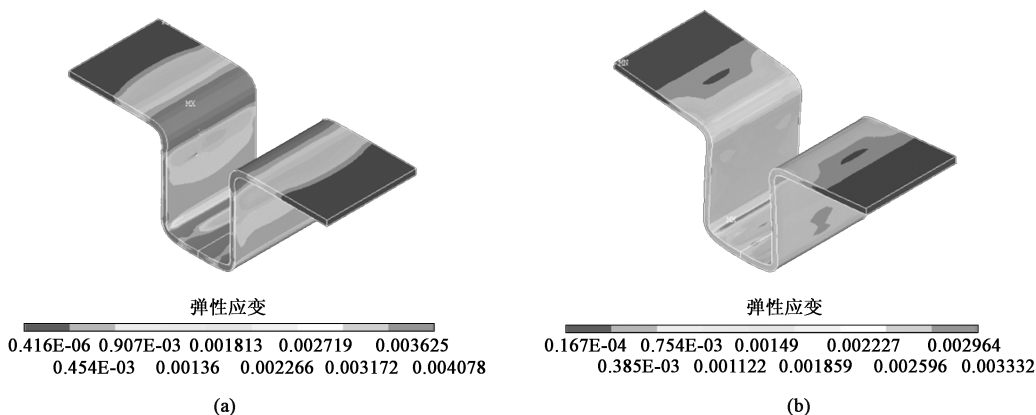


图6 板料弹性应变分布

(a) 回弹前 (b) 回弹后

Fig. 6 Elastic strain distributions of sheet

(a) Before springback (b) After springback

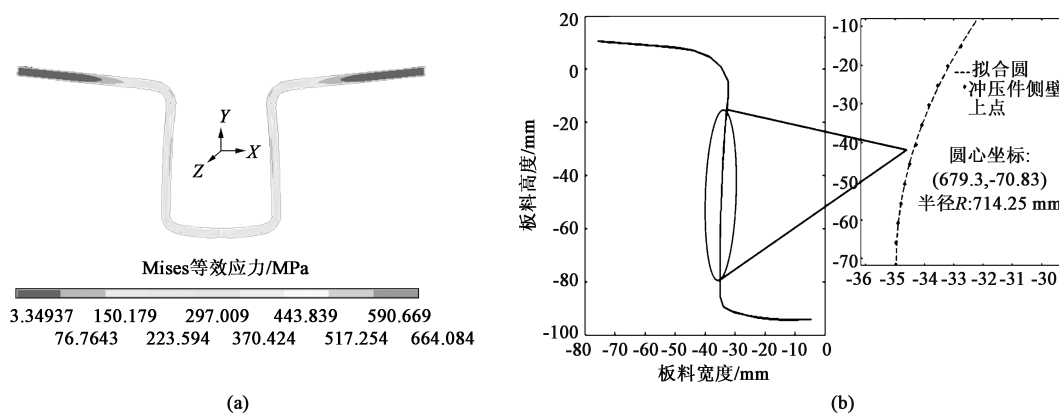


图7 板料回弹后的截面图(a)和侧壁曲线圆形拟合结果(b)

Fig. 7 Section diagram of plate material after springback (a) and circle fitting result of side-wall curve (b)

到呈向内弯曲的弧线,即发生负回弹,经过测量板料侧壁的回弹角大约为 $7^\circ$ 。由于冲压件关于 $Y-Z$ 面对称,因此,将 $Y-Z$ 面左侧部分的侧壁边缘轮廓线进行圆形拟合,得到圆半径为714.25 mm,即冲压件侧壁的曲线为一圆上的弧段,此圆的半径为714.25 mm,如图7b所示。

如图8a所示,板料较厚的情况下,板料侧壁内侧弹性应变不容易受到外侧负弹性应变的影响,板料由外侧的弹性压应变逐渐过渡至内侧的弹性拉应变,两种弹性应变的综合作用为板料的负回弹提供了动力。而薄板侧壁的弹性应变则较为均一,与中厚板弹性应变分布明显不同,如图8b所示。

为了了解板料在冲压终点的厚度分布情况,利用模拟结果计算了冲压终点板料上、下表面的节点坐标,从而得到了板料厚度的分布情况,如图9所示。冲压结束后,板料厚度情况为减薄与

增厚并存,减薄程度较增厚严重。板料增厚区域主要集中在上部圆角的上端,其原因可能为:板料在进入凹凸模间隙过程中受到来自冲头侧面的阻力,从而导致金属在上部圆角上端堆积。由图9可知,板料增厚大约0.1 mm。另一方面,由于成形过程中侧壁起到了传递冲头拉力的作用并受到凹凸模间隙的压应力,所以,板料的减薄区域分布在侧壁和下圆角部分,尤其以侧壁的上端最为严重,最大减薄达到了0.6 mm,板料厚度减小至5.4 mm。

## 5 减小回弹的措施及分析

针对上述中厚板回弹的预测结果,下面将采取回弹角补偿和增大凹凸模间隙两种方法来减小中厚板的回弹量<sup>[14]</sup>。

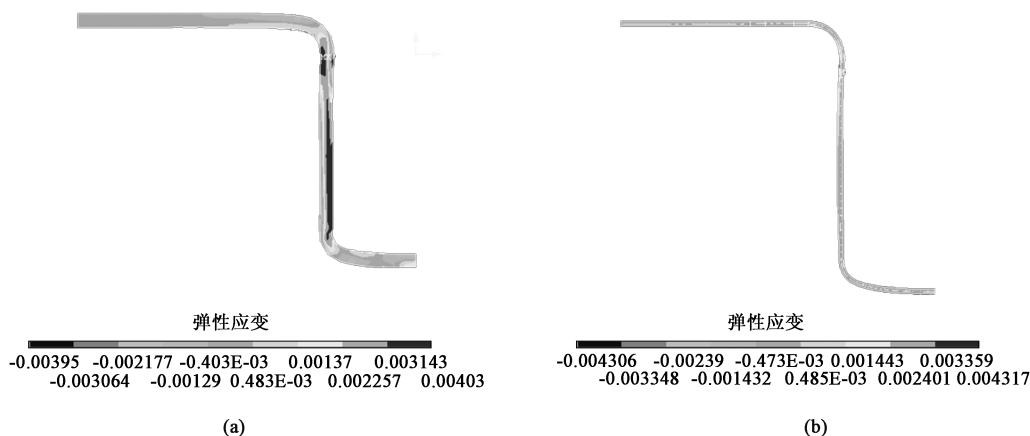


图 8 中厚板 (a) 与薄板 (b) 纵截面的弹性应变分布对比图

Fig. 8 Comparison diagrams of elastic strain distributions on longitudinal sections between medium-thickness plate (a) and thin plate (b)

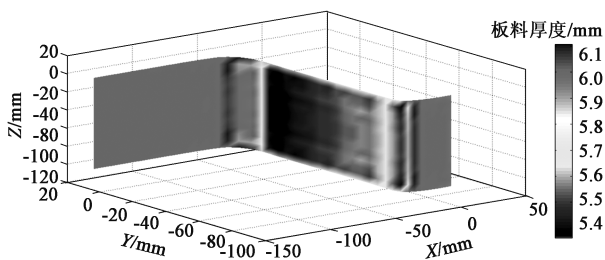


图 9 冲压终点板料厚度分布云图

Fig. 9 Cloud map of thickness distribution for plate material at end of stamping

### 5.1 回弹角补偿减小回弹量

针对中厚板冲压产生的“负回弹”现象,采用回弹角补偿的方法将凹、凸模侧壁向外(逆时针)旋转一定角度,如图 10 所示。依据上节分析的结论,补偿的回弹角  $\theta$  分别确定为回弹角的 30%、50%和 70%,即  $2.1^\circ$ 、 $3.5^\circ$ 和  $4.9^\circ$ ,模拟结果如图 11 所示。

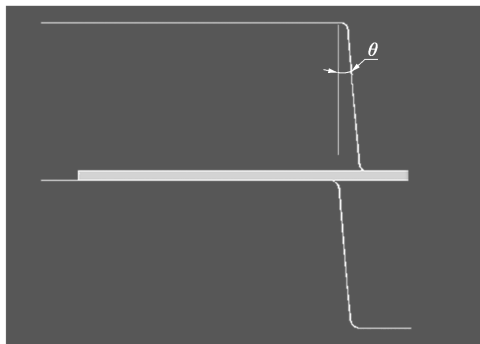


图 10 回弹角补偿示意图

Fig. 10 Schematic diagram of springback angle compensation

由图 11 可知,采用模具回弹角补偿的方法可以改变中厚板的回弹情况,但是过大的补偿角度(图

11c、图 11d)会导致板料侧壁向补偿方向倾斜,30%的回弹角补偿值设置较为合理(图 11b),板料侧壁处于接近垂直方向,板形较为理想。

### 5.2 增大凹凸模间隙减小回弹量

由上文对板料侧壁弹性应变的分析可知,如果能够将板料侧壁厚度方向两端的弹性应变差异减小,则板料回弹的动力减小。故增大凹凸模间隙以减小冲压过程中模具与板料之间的作用,凹凸模间隙分别设置为 6.5、7.5 和 8.5 mm。如图 12a 所示,提取不同凹凸模间隙下回弹前板料侧壁厚度方向相同位置节点的弹性应变,从侧壁外侧到内侧节点编号分别为 1~6。图 12b 为不同凹凸模间隙下的弹性应变,由图 12b 可知,增大凹凸模间隙使得侧壁外侧的弹性应变升高,逐渐由负值(压应变)改变为正值(拉应变),而侧壁内侧的弹性拉应变数值则有所下降,从而使得侧壁内、外侧的弹性应变差绝对值由自由弯曲时的 0.525%,分别减小至 0.389%、0.292%和 0.179%。而且,凹凸模间隙的改变使得弹性应变的分布发生了变化,弹性应变的最大值由侧壁的内侧(节点 6 处)移动至板料的中部(节点 3、4 处),从而减小了弹性应变对回弹的影响。

图 13 为不同凹凸模间隙下板料回弹后的截面形状,由图 13 可知:随着凹凸模间隙的增大,板料侧壁的形状逐渐改善,当凹凸模间隙为 8.5 mm(图 13d)时,板料侧壁近乎垂直,板形较为理想。

## 6 结论

(1) 由于弹性应变的分布,中厚板 U 形冲压表

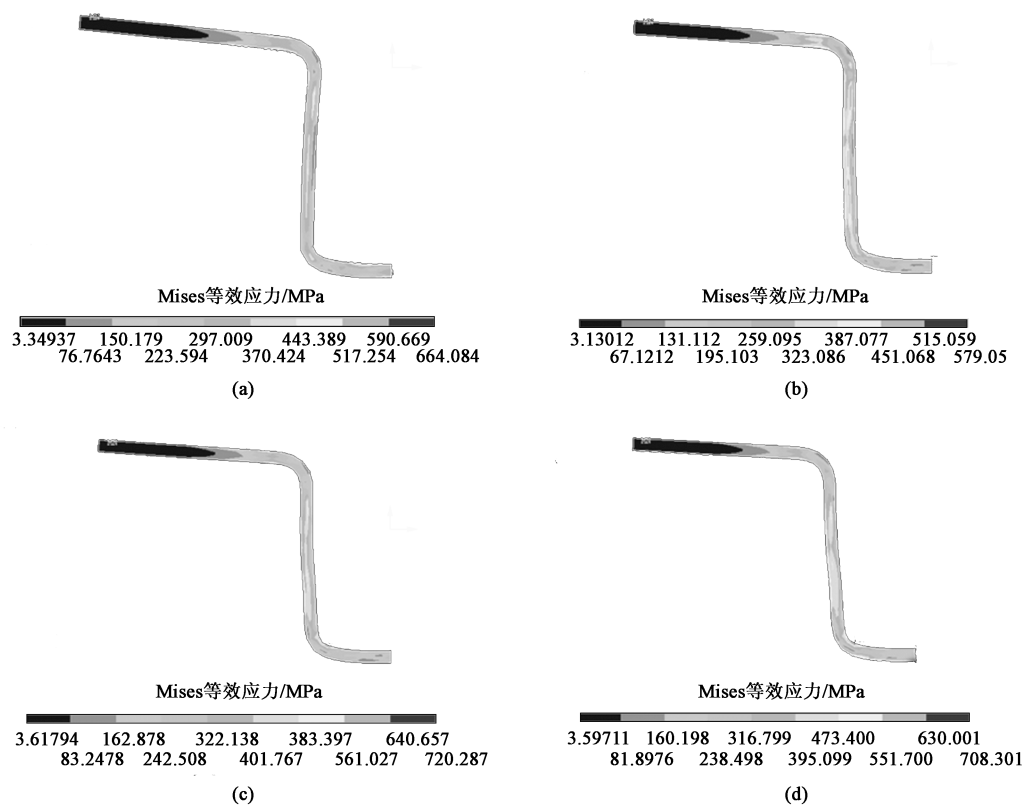


图 11 模具回弹角补偿后板料回弹后的截面形状  
(a) 自由弯曲 (b)  $\theta=2.1^\circ$  (c)  $\theta=3.5^\circ$  (d)  $\theta=4.9^\circ$   
Fig. 11 Section shapes of plates after springback with die springback angle compensation  
(a) Free bending (b)  $\theta=2.1^\circ$  (c)  $\theta=3.5^\circ$  (d)  $\theta=4.9^\circ$

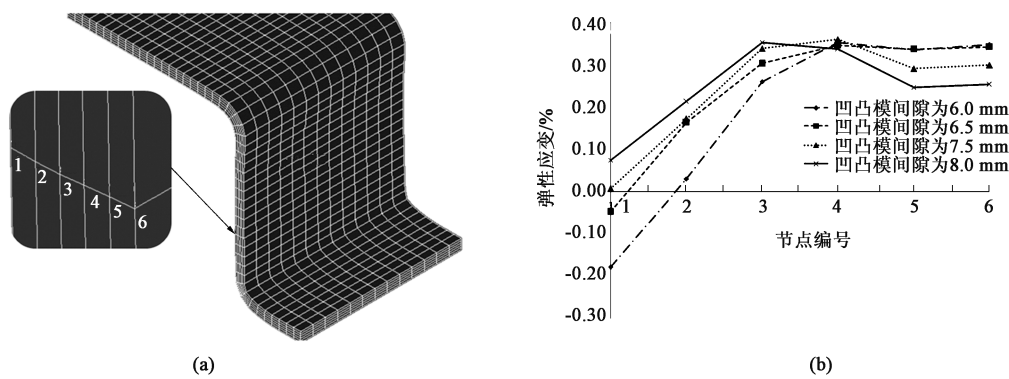


图 12 节点选取位置示意图 (a) 和不同凹凸模间隙的弹性应变曲线 (b)  
Fig. 12 Schematic diagram of selecting positions for nodes (a) and curves of elastic strain under different die and punch clearances (b)

现出“负回弹”，本研究所采用的高强度板回弹角约为  $7^\circ$ ，侧壁所在圆弧半径约为 714.25 mm。

(2) Mises 等效应力在中厚板的上、下表面表现出不同的分布，主要在圆角部位分布不同。

(3) 与薄板相比，由于厚度方向尺寸较大，中厚板在厚度方向上的弹性应变分布表现出较大的变化，侧壁的上端和下端弹性应变在板厚的两侧，这也是导致中厚板出现“负回弹”的一个原因。

(4) 通过回弹角补偿和增大凹凸模间隙的方法可以减小中厚板的负回弹，同时采用增大间隙的方法得到的板形较为理想且模具的设计制作较为简便。

参考文献：

[1] Gau J T, Kinzel G L. An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback predictions [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 108 (3): 369-375.

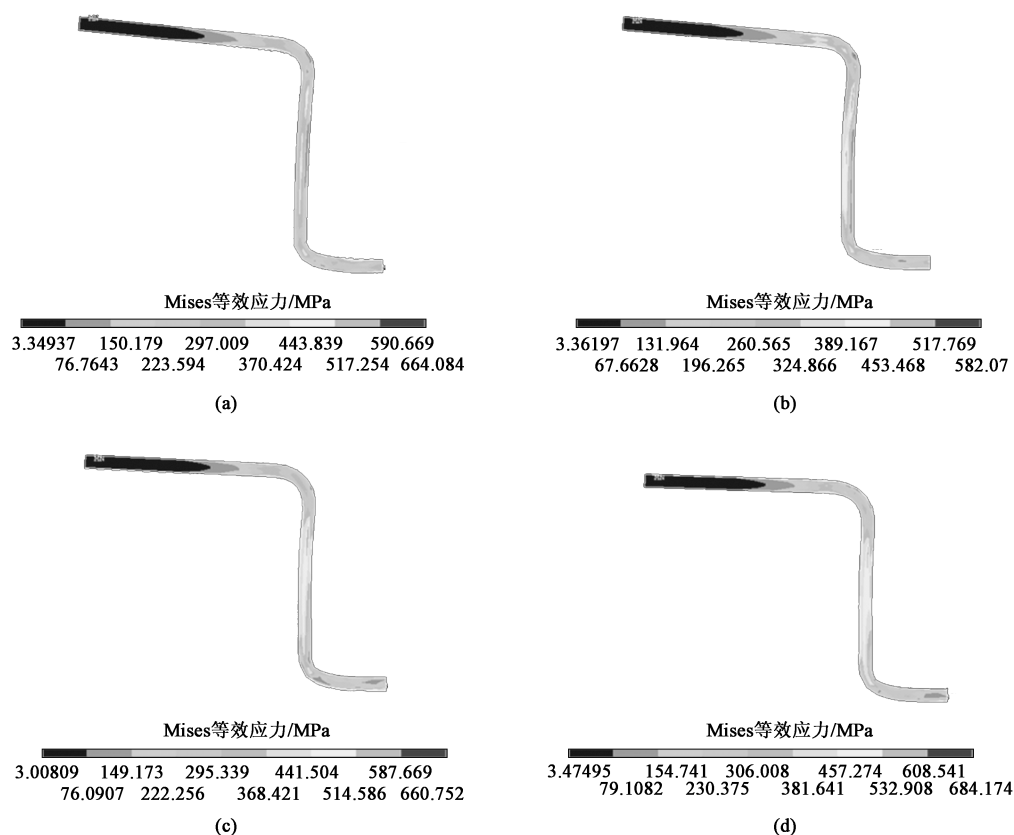


图 13 不同凹凸模间隙下板料回弹后截面形状

(a) 6.0 mm (b) 6.5 mm (c) 7.5 mm (d) 8.5 mm

Fig. 13 Section shapes of plate material after springback under different die and punch clearances

- [2] Gau J T. A study of the Influence of the Bauschinger Effect on Springback in Two-dimensional Sheet Metal Forming [D]. Columbus: The Ohio State University, 2000.
- [3] Chaboche J L. Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity [J]. International Journal of Plasticity, 1989, 5 (3): 247-302.
- [4] Geng L M, Wagoner R H. Springback analysis with a modified hardening model [J]. SAE Transactions, 2000, 109 (5): 365-375.
- [5] Samuel M. Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bendings of anisotropic sheet metals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105 (3): 382-393.
- [6] Yoshida F, Uemori T. A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation [J]. International Journal of Plasticity, 2002, 18 (5-6): 661-686.
- [7] Taherizadeh A, Green D E, Ghaei A, et al. A non-associated constitutive model with mixed iso-kinematic hardening for finite element simulation of sheet metal forming [J]. International Journal of Plasticity, 2010, 26 (2): 288-309.
- [8] 唐妍, 蒋松. 翼子板内板冲压工艺数值模拟及回弹补偿 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (12): 105-111.  
Tang Y, Jiang S. Numerical simulation and springback compensation on stamping process for fender inner plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (12): 105-111.
- [9] 李艳. 宽板 U 形弯曲的回弹试验研究 [J]. 模具技术, 2014, (6): 1-4.  
Li Y. Experimental study on the springback for wide sheet metals after U-bending process [J]. Die and Mould Technology, 2014, (6): 1-4.
- [10] Zein H, El Sherbiny M, Abd-Rabou M, et al. Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process [J]. Materials & Design, 2014, 53: 797-808.
- [11] Schwarze M, Vladimirov I N, Reese S. Sheet metal forming and springback simulation by means of a new reduced integration solid-shell finite element technology [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200 (5-8): 454-476.
- [12] 王艳艳, 高崇阳. 车辆底板冲压的响应面拟合与改进蜂群算法优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 89-95.  
Wang Y Y, Gao C Y. Response surface fitting and improved bee colony algorithm optimization for vehicle bottom plate in stamping [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 89-95.
- [13] 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].
- [14] 王秀凤, 张永春. 冷冲压模具设计与制造 [M]. 3 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.  
Wang X F, Zhang Y C. Design and Manufacture of Cold Stamping Die [M]. 3rd Edition. Beijing: Beihang University Press, 2008.