

超高强钢辊压成形中预冲孔对回弹影响的实验与数值预测

刘晓立^{1,2}, 张建邦¹, 黄素霞¹, 李河宗¹, 闫 宾³, 闻海强¹, 翟永利⁴

(1. 河北工程大学 机械与装备工程学院 河北省智能工业装备技术重点实验室, 河北 邯郸 056038; 2. 金马工业集团股份有限公司, 山东 日照 276826; 3. 安阳工学院 机械工程学院, 河南 安阳 455000; 4. 邯郸市正大制管有限公司, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为准确预测超高强钢预缺口产品在辊压成形中的回弹现象, 通过模拟和实验相结合的方法, 讨论了预中孔对辊压成形中超高强度钢板回弹的影响。建立了预开槽汽车门槛件的有限元模型, 并通过连续辊压实验验证了其精度。采用超高强钢 MS1300 的拉伸实验确定的可变弹性模量的数学模型构建了有限元模型, 发现使用可变弹性模量可以将孔区域的回弹预测精度提高 15%。设计了几种成形方案, 以研究不同特征对孔区回弹的影响。结果表明: 预伸孔的存在降低了回弹, 且在汽车门槛的不同位置, 效果不同。随着机架数量、板带厚度和孔径的增加, 机架间距和孔间距的减小, 预冲孔所在位置的回弹减小。通过研究希望能减少辊压实际生产中孔对回弹的影响, 提高预切断面的成形精度。

关键词: 超高强钢; 辊压成形; 预冲孔; 回弹; 变弹性模量

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.011

中图分类号: TG335.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 07-0071-11

Experimental and numerical prediction on influence of pre-punched hole on springback in roll forming for ultra-high strength steel

Liu Xiaoli^{1,2}, Zhang Jianbang¹, Huang Suxia¹, Li Hezong¹, Yan Bin³, Wen Haiqiang¹, Zhai Yongli⁴

(1. Hebei Province Key Laboratory of Intelligent Industrial Equipment Technology, Institute of Machinery and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Golden Horse Industry Group Co., Ltd., Rizhao 276826, China; 3. School of Mechanical Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China; 4. Han Dan City Zheng Da Steel Pipe Co., Ltd., Handan 056038, China)

Abstract: In order to accurately predict the springback phenomenon of ultra-high strength steel (UHSS) pre-notched products in roll forming, the influence of pre-punched hole on the springback of ultra-high strength steel sheet in roll forming was discussed by simulation and experiments. Then, the finite element model of pre-slotted automobile threshold was established, and its accuracy was verified by continuous roll forming experiments. Furthermore, the mathematical model of variable elastic modulus determined by the tensile test of ultra-high strength steel MS1300 was applied to establish the finite element model, and it was found that using the variable elastic modulus could improve the springback prediction accuracy in the hole area by 15%. Finally, several forming schemes were designed to study the influences of different features on the springback in the hole area. The results indicate that the presence of pre-punched hole reduces the springback, and the effect varies at different locations on the automobile threshold. With the increasing of the number of racks, the thickness of strip and the diameter of holes, and the decreasing of the spacing between racks and the spacing between holes, the springback at the position of pre-punched holes decreases. Thus, it is hoped that the impact of hole on the springback in the actual production of roll forming is reduced, and the forming accuracy of pre-cut section is improved.

Key words: ultra-high strength steel; roll forming; pre-punched hole; springback; variable elastic modulus

高效、低成本和大规模生产是辊压成形的

主要优势。在室温下, 金属带材通过多个具有特定形状的辊弯曲, 最后形成特定形状的截面^[1-2]。超高强钢 (Ultra-High Strength Steel, UHSS) 在汽车零部件制造中受到重视, 以降低生产成本并提高车辆性能。特别是马氏体钢在汽车工业领域越来越受欢迎, 主要因为其可以大大减轻车辆重量并提高乘员的安全性^[3]。然而, 在辊压成形过程中, UHSS 的回弹较大, 这严重影响了产品的精度。因此, 研究超高强度不锈钢材料在辊压成形过程中

收稿日期: 2022-09-25; 修订日期: 2022-12-30

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E2013402064); 河北省教育厅青年基金 (QN2021209); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目 (2022TSGC1231); 安阳市科技计划资助项目 (2022C01GX015)

作者简介: 刘晓立 (1986-), 男, 博士, 研究生导师

E-mail: liuxiaoli01206332@163.com

通信作者: 张建邦 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: 3414801480@qq.com

的回弹具有重要意义。

许多学者从材料、成形工艺和材料模型等方面研究了辊压成形工艺的回弹。Groche P 等^[4]对辊压成形中的高强度钢 (High Strength Steel, HSS) 和超高强度钢的回弹预测进行了研究, 并提出了在线校准方法。Abvabi A 等^[5]讨论了辊压成形中残余应力的影响, 发现在成形模拟过程中引入残余应力可以提高回弹预测的精度。Bui Q V 等^[6]研究了辊压成形的工艺参数, 并分析了机架间距、成形速度和摩擦对回弹的影响。Paralikas J 等^[7]研究了成形参数对辊压成形工艺中纵向和横向应变的影响, 发现上、下辊之间的空间起主导作用。Lim H 等^[8]通过对 UHSS 的研究发现, UHSS 产品的回弹在成形后随时间变化, 这与低碳钢和普通高速钢完全不同。同时, 变形引起的热是 UHSS 的另一个复杂因素, 对回弹也有很大影响。Wiebenga J H 等^[9]研究了轧辊间隙对 V 型零件成形质量的影响, 发现在辊压成形过程中, 回弹角和纵向弯曲随着轧辊间隙的增加而增加。通过实验和数值计算, Su C J 等^[10]证明带材厚度直接影响回弹。Almeida C O L 等^[11]分别在 0° 和 90° 方向上轧制 DP600 和 DP800 高强度钢, 并比较了回弹角的大小。结果表明, 各向异性和钢种变化是影响回弹的主要因素。Zeng G 等^[12]使用响应面法优化辊压成形工艺, 优化工艺显著提高了产品的成形精度。Liu X L 等^[13]提出了一种回弹角综合补偿方法, 可大大提高辊压产品的成形精度, 并通过实验验证了该方法的可行性。

目前, 有限元分析已广泛应用于辊压成形过程。Badr O M 等^[14]对室温下高强度钛板的成形进行了实验和数值研究, 发现辊压成形技术是一种相对优越的高强度钛板成形方法。Chen W 等^[15]对电阻焊 (Electrical Resistance Welding, ERW) 管辊压成形工艺的辊型和设计进行了数值分析和研究。Chongthairungruang B 等^[16]通过有限元模拟发现, 较高的预变形状态显著改善了带材的回弹效果。Abeyrathna B 等^[17]通过数值分析和实验验证方法研究了几何参数对纵向边缘应变的影响, 并获得了几何参数对于回弹的影响。Toros S 等^[18]应用 Hill' 48、Barat-89 和 YLD2000-2D 材料模型预测 TRIP800 先进高强钢 (Advanced High-Strength Steel, AHSS) 的回弹特性, 并发现 YLD2000-2D 材料模型对辊压成形工艺中 V 型模具的回弹具有最佳的预测能力。在 Badr O M 等^[19]的工作中, 一种新的本构模型用于分析辊压成

形中钛的回弹行为。Jung J 等^[20]建立了弹塑性材料本构模型, 以解释和描述双相钢带的各向异性弹塑性行为。Liu X L 等^[21]讨论了考虑辊压成形过程中杨氏模量变化时, 成形参数对 UHSS 回弹的影响。结果表明, 在有限元模型中引入可变弹性模量可以显著提高回弹预测精度。回弹随着翼缘宽度、侧壁高度、辊缝和间距的增加而增加, 随着带材厚度和腹板宽度的增加而减小。Park H S 等^[22]分别对 UHSS 汽车零件和铝制汽车零件的辊压成形工艺进行了有限元分析, 并通过分析结果发现, 铝制汽车零件的回弹角相对较大。Mahajan P 等^[23]使用辊压成形过程的稳态性能以减少计算量, 并发现通过借助稳态计算方法, 复杂截面有限元分析的总计算时间大大缩短。Sumikawa S 等^[24]建立了一个材料模型, 考虑了材料的行为, 如包辛格效应、平均杨氏模量、弹性各向异性和塑性各向异性等。研究表明, 使用该模型可以更好地预测回弹精度。通过有限元分析和实验验证, Naofal J 等^[25]发现, 辊压成形过程中的 Y-U 硬化模型和弦杆模量可以更准确地预测回弹。

从以上对辊压成形工艺的研究可以看出, 学者们更多地关注非预缺口金属带材的回弹问题。然而, 一些金属带需要在辊压成形^[26]之前预先开槽, 以满足实际生产中汽车零件的装配要求和加工效率。辊压成形工艺中预切金属带材的回弹问题尚未研究。本文通过 MS1300 超高强度钢单轴拉伸和循环加载拉伸实验获得了变弹性模量的数学模型, 并分析了变弹性模量对孔区回弹预测精度的影响。通过数值模拟和实验相结合的方法, 研究了预冲孔对回弹的影响以及成形参数与孔区回弹之间的变化。该研究对辊压成形工艺预冲孔的合理设计和提高 UHSS 带材的成形精度具有重要意义。

1 实验材料

1.1 材料特性

本文中厚度为 1.4 mm 的 MS1300 超高强度钢板带由金马工业集团股份有限公司提供。通过光学显微镜观察 MS1300 超高强度钢的金相组织, 如图 1 所示。其显微组织由硬马氏体和软铁素体组成, 硬马氏体为深棕色, 数量较多, 而软铁素体为亮白色, 数量较少^[27]。马氏体钢具有高硬度和高屈服强度的优点, 但其延展性较差, 因此通常采用辊压加工。MS1300 超高强度钢的化学组成如表 1 所示。

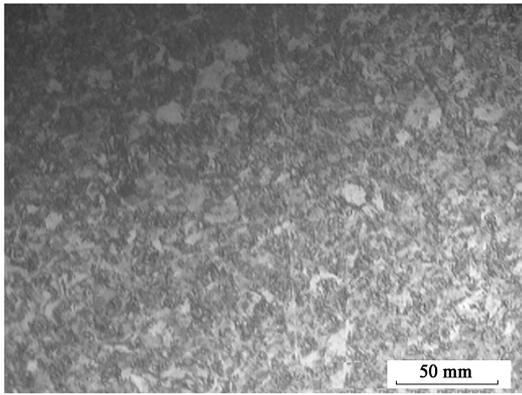


图 1 MS1300 超高强钢金相图

Fig.1 Metallographic diagram of MS1300 ultra-high strength steel

1.2 力学性能

MS1300 超高强钢的机械性能在室温下采用单轴拉伸实验测定。AMTS-810 电液伺服测试系统用于在与轧制方向夹角为 0°、45°和 90°的这 3 个方向上进行标准单轴拉伸实验，如图 2 所示，拉伸速度为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。使用接触应变传感器测量 MS1300 超高强钢的弹性模量 E 、屈服强度 R_{eL} 、抗拉强度 R_m 、总伸长率 A 、塑性应变比 r 和硬化系数 n ，结果如表 2 所示。

根据图 3 所示过程，对 MS1300 超高强钢拉伸试样进行循环加载拉伸实验，其预应变分别设置为 0、0.5%、0.8%、1.0%、2.0%、3.0%和 4.0%。

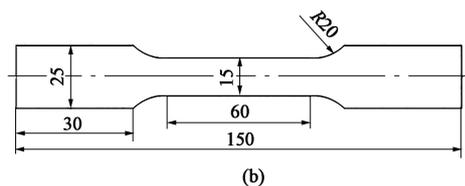
表 1 MS1300 超高强钢的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of MS1300 ultra-high strength steel（%，mass fraction）

C	Mn	Si	P	S	Al	V	Cr+Mo	Nb+Ti	B	Cu	Fe
0.12	1.60	0.40	0.025	0.010	0.015	0.20	1.00	0.10	0.005	0.20	余量



(a)



(b)



(c)

图 2 MS1300 超高强钢标准单轴拉伸实验示意图

(a) 拉伸设备 (b) 拉伸试样尺寸 (c) 拉伸试样

Fig.2 Schematic diagrams of standard uniaxial tensile experiment for MS1300 ultra-high strength steel

(a) Tensile equipment (b) Tensile specimen sizes (c) Tensile specimens

表 2 MS1300 超高强钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of MS1300 ultra-high strength steel

拉伸方向/(°)	E/MPa	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	r	n
0	211327.54	1149.73	1399.96	6.1	0.42	0.18
45	209704.84	1141.66	1398.45	6.9	0.37	0.17
90	213587.62	1158.39	1401.63	6.3	0.61	0.19

2 设计方案

本研究采用专业轧辊设计软件 COPRA 设计汽车门槛成形方案。首先，设计了连续辊压的 UHSS 汽车门槛件的基本形成方案。截面数据如图 4 所示。

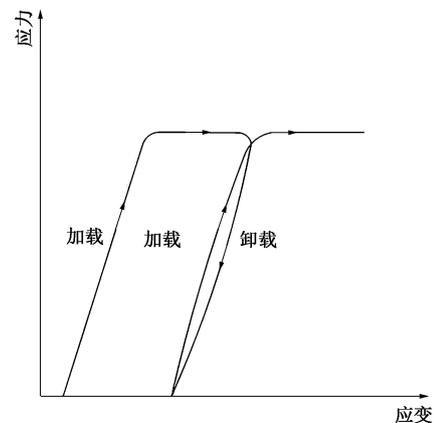


图 3 循环加载拉伸实验示意图

Fig.3 Schematic diagram of cyclic loading tensile experiment

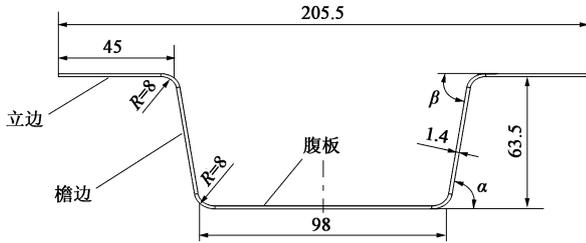


图 4 汽车门槛件截面几何图

Fig. 4 Section geometric diagram of automobile threshold

在图 4 中, 角度 α 和 β 是需要处理的成形角度, R 为辊弯成形半径。MS1300 超高强钢带材的辊压成形工艺采用定长变半径法和下山法^[28]。汽车门槛件的辊花图如图 5 所示, 弯曲角度通过伞型角度调控法 (USTB-Durable T, UDT) 分布^[29]。如图 5 所示, 从机架 1 到机架 8, 角度 α 可以通过角度 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 和 82° 弯曲, 角度 β 可以通过角度 15° 、 25° 、 35° 、 45° 、 55° 、 65° 、 75° 和 82° 形成。两个机架之间的距离为 450 mm。在 MS1300 超高强钢板带上设计了直径为 $\Phi 20$ mm 的圆孔。孔中心距带材下端 200 mm, 距带材左端 19 mm。为了研究圆孔不同位置对回弹的影响, 将距离金属带下端 200、210、220 和 240 mm 的端面分别定义为端面 1 至端面 4。预冲孔和端面的位置如图 6 所示。

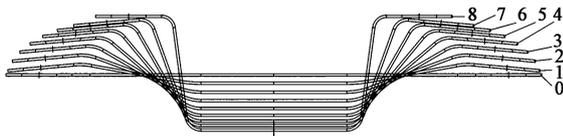


图 5 汽车门槛件辊花图

Fig. 5 Flower pattern of automobile threshold

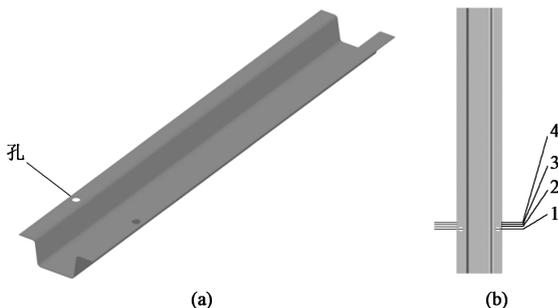


图 6 板带中预冲孔和端面预冲位置

(a) 等距视图 (b) 垂直视图

Fig. 6 Positions of pre-punched hole and end faces in strip

(a) Isometric view (b) Vertical view

为了研究机架数量、板带厚度、机架间距、孔径、孔位置和孔间距等参数对孔区回弹的影响, 在

基本成形方案的基础上设计了 6 种成形方案。每个成形方案研究 1 个参数, 所研究的参数改变, 而其他参数保持不变。第 1 种成形方案用于研究机架数量对孔区回弹的影响, 机架数量分别选择为 6、8、9 和 10。第 2 种方案用于研究板带厚度对孔区回弹的影响, 板带厚度分别为 1.0、1.4、1.6 和 1.8 mm。第 3 种方案是研究机架间距对孔区回弹的影响, 机架间距分别为 350、450 和 550 mm。第 4 种方案是研究孔径对回弹的影响, 孔径分别为 $\Phi 10$ 、 $\Phi 20$ 和 $\Phi 30$ mm。第 5 种方案用于研究孔位置对回弹的影响。孔中心位置固定在距金属带下端 200 mm 处, 距金属带左端的距离分别为 14、19、24、63、75、86、129 和 140 mm。第 6 种方法用于研究孔间距对回弹的影响。另一个直径为 $\Phi 20$ mm 的圆孔分别设计在距离现有孔中心 25、30 和 35 mm 处, 两个孔中心位于相同的纵向位置。

3 有限元仿真模型

3.1 变弹性模量数学模型

MS1300 超高强钢试样在单轴拉伸和循环加载拉伸实验中发生了颈部收缩效应。为了准确地表达 MS1300 超高强钢的力学性能, 需要表示其在负载反转开始时的线弹性行为, 在一个三维应力空间中定义了一个称为弹性退化表面的表面, 表达式为:

$$\sigma_{\text{true}} = \frac{F}{A_i} = \frac{F}{\frac{A_0 L_0}{L}} = \frac{F}{A_0} \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{true}} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) = \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (2)$$

式中: σ_{true} 为真实应力; $\varepsilon_{\text{true}}$ 为真实应变; F 为主应力; A_i 为代表应力区面积; A_0 为拉伸区初始横截面积; L_0 为试样的原始长度; L 为试样变形后的长度; ΔL 是试样的变形长度。

循环加载拉伸实验的真实应力-真实应变曲线如图 7 所示。弹性模量为应力与应变之比。从图 7 可以看出, 循环加载拉伸实验中弹性模量的变化是非线性的。在加载过程中会出现滞后现象, 随着真实应变的增加, 该现象更加明显。文献 [21] 已经证明, 非线性弹性模量理论可以显著提高辊压成形工艺中无预缺口金属带的回弹预测精度。然而, 非线性弹性模量是否能提高孔所在位置回弹的预测精

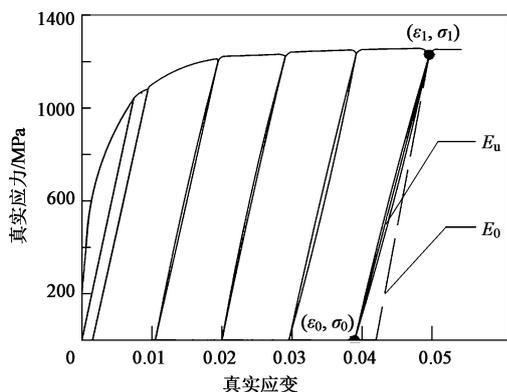


图 7 MS1300 超高强钢循环加载拉伸实验的真实应力-真实应变曲线
Fig. 7 True stress-true strain curves of cyclic loading tensile experiments for MS1300 ultra-high strength steel

度尚不清楚。根据弦模型^[30]的理论，卸载点和重新加载点之间的斜率定义为弦弹性模量 E_u ， E_u 由式 (3) 表示：

$$E_u = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_1 - \varepsilon_0} \quad (3)$$

式中： σ_1 和 ε_1 分别为卸载点的真实应力和真实应变； σ_0 和 ε_0 分别为重新加载点的真实应力和真实应变。

Yoshida F 等^[31]将式 (3) 应用于有限元分析，并获得弦弹性模量随塑性应变的变化规律：

$$E_u = E_0 - (E_0 - E_a)(1 - e^{-\xi \varepsilon_p}) \quad (4)$$

式中： E_0 为原始弹性模量； E_a 为饱和弹性模量； ξ 为材料参数； ε_p 为塑性应变。

根据图 7，可以计算 E_0 和 E_u 的值。将计算数据导入 Matlab 软件，采用矩阵最小二乘法求解式 (4) 的回归方程系数，得到 $E_a = 103.3 \text{ GPa}$ ， $\xi = 243.3$ 。通过数据拟合得到的弦弹性模量与塑性应变之间的关系曲线如图 8 所示，表达式为：

$$E_u = 211.54 - (211.54 - 103.3)(1 - e^{-243.3\varepsilon_p}) \quad (5)$$

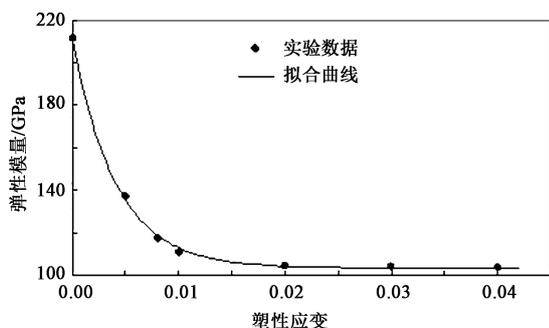


图 8 弹性模量与塑性应变的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between elastic modulus and plastic strain

3.2 辊压加工三维模型

以基本成形方案为例，建立了连续辊压成形工艺下汽车门槛件的有限元模型。在上述方案中，机架间距最大为 550 mm，因此，金属带的长度设置为 1200 mm，以确保至少两个机架同时加工带材。因为在实际辊压成形过程中轧辊的变形非常小，在有限元模型中将轧辊设置为分析刚体。带材由下辊驱动，摩擦因数设定为 0.2^[32]。下辊的直径设计为逐渐升高 2 mm，这在带材成形过程中提供了张力。由于轿厢门槛段是对称的，因此取 1/2 条带进行模拟分析，以节省模拟操作时间。3D 模型如图 9 所示。

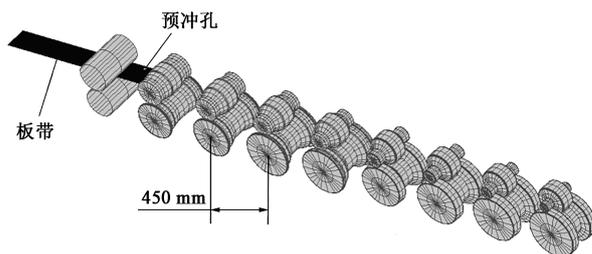


图 9 辊压成形三维模型

Fig. 9 3D model of roll forming

3.3 有限元仿真网格

回弹预测的有限元模拟模型对单元类型敏感。辊压成形模拟中采用了 3 种主要单元类型：实体、壳和实体壳单元^[33]。Sousa R J A D 等^[34]发现，壳体单元不仅保留了实体单元的力学性能，还有效避免了壳体单元的自锁，这可以更准确地预测回弹。因此，在本工作中，采用壳体 185 单元进行有限元模拟。在厚度方向上，将金属带分为两层，并选择九点积分法^[35]。对变形区域和孔附近的网格进行了细化和划分，并对剩余部分进行了粗略划分，这不仅确保了模拟精度，还减少了模拟运行时间。汽车门槛有限元模型包含 13768 个单元和 21600 个节点，划分的网格如图 10 所示。

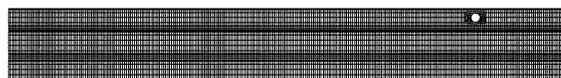


图 10 金属板带的网格划分

Fig. 10 Mesh division of metal strip

4 结果和讨论

4.1 有限元模型的实验验证

在辊压工艺开始时，MS1300 超高强钢板带在应力作用下发生弹性变形。当应力超过 MS1300 超高强钢的屈服极限时，金属带开始产生塑性变形。产

品成形后,残余应力的存在使产品再次发生弹性变形,即回弹。汽车门槛回弹图如图 11 所示。图 11 中, α_0 和 β_0 为汽车门槛件的理论成形角度, α_1 和 β_1 为成形后的实际角度, 对应回弹角 θ_α 和 θ_β 可以

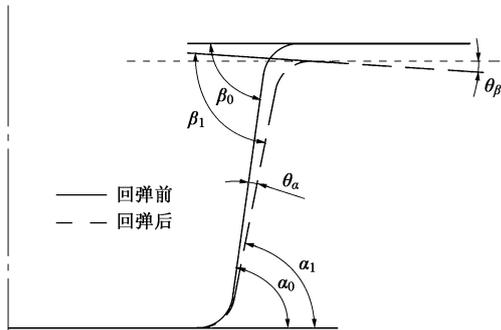


图 11 汽车门槛件示意图

Fig. 11 Schematic diagram of automobile shreshold

通过式 (6) 和式 (7) 计算:

$$\theta_\alpha = \alpha_1 - \alpha_0 \quad (6)$$

$$\theta_\beta = \beta_1 - \beta_0 \quad (7)$$

结合实际实验条件,采用孔中心位于腹板对称轴上的成形方案,验证了有限元模型精度。汽车门槛件实验的形成条件与模拟条件相同,实验成形条件如图 12 所示。当汽车门槛完全卸载时,使用精度为 0.02° 的测角仪测量端面 1 和端面 4 处的角度 α 和 β 。在多次测量之后,分别取平均值。在端面 1 处角度 α 和 β 分别为 73.03° 和 72.32° , 在端面 4 处分别为 72.28° 和 73.01° 。将端面 1 和端面 4 的模拟结果导入 CAD 软件中用于角度测量。测量结果如图 13 所示。辊压实验和汽车门槛件有限元模拟结果之间的相对误差小于 5%, 这表明理论模拟可以很好地模拟超高强预开槽钢汽车门槛件的连续辊压成形过程。

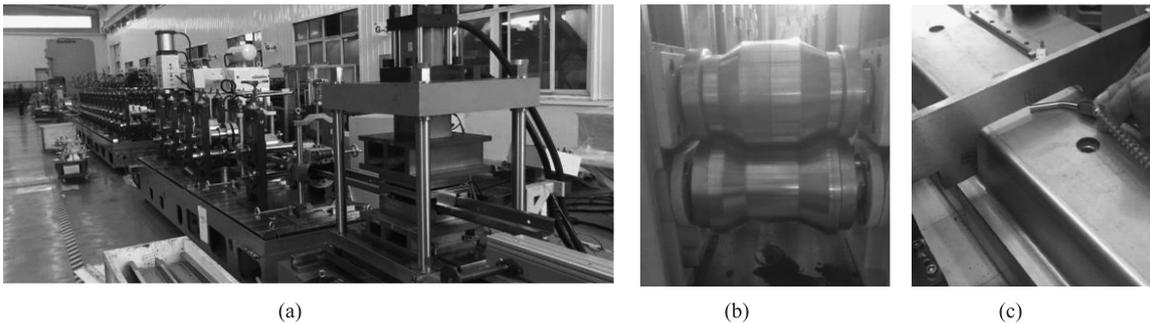


图 12 汽车门槛件辊压成形实验

(a) 辊压生产线 (b) 1 个加工道次 (c) 预冲孔段

Fig. 12 Roll forming experiment for automobile threshold

(a) Rolling forming production line (b) One processing pass (c) Pre-punching stage

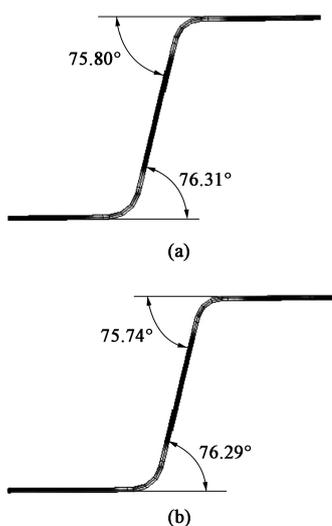


图 13 汽车门槛件仿真结果

(a) 端面 1 (b) 端面 4

Fig. 13 Simulation results of automobile threshold

(a) End face 1 (b) End face 4

4.2 不同弹性模量实验结果的比较

采用孔中心位于腹板对称轴上的成形方案,研究了不同弹性模量对孔区回弹预测精度的影响。采用恒定弹性模量和可变弹性模量对汽车门槛进行有限元模拟。测量了端面 1 处的回弹角的模拟和实验结果,数据如表 3 所示。从表 3 中可以看出,在有限元模型中采用可变弹性模量法时,回弹角度大于恒定弹性模量法,回弹角预测精度提高了 15%。

表 3 端面 1 处实验和模拟结果的回弹角对比

Table 3 Springback angle comparison between experimental and simulation results at end face 1

来源	$\theta_\alpha / (^\circ)$	$\theta_\beta / (^\circ)$
恒定弹性模量模拟	5.69	6.20
可变弹性模量模拟	7.07	7.81
实验	8.97	9.68

图 14 给出了具有不同弹性模量的端面 1 处横向路径上的顶部节点和底部节点的弹性应变分布，且轧机数量 $N=8$ ，板带厚度 $T=1.4\text{ mm}$ ，机架间距 $D=450\text{ mm}$ ，孔中心距离条带左端的距离 $H.P=19\text{ mm}$ ，孔直径大小 $H.D=\Phi 20\text{ mm}$ ，孔间距 $D.H=30\text{ cm}$ 。如图 14 所示，可变弹性模量模型的顶部和底部节点

的弹性应变大于恒定弹性模量模型。在最大值处，可变模量模型的弹性应变比恒定模量模型大约大 30%。在辊压过程中，弹性应变决定回弹角，测得的弹性应变变化与回弹角基本一致。因此，证明了在连续辊压中使用可变弹性模量模型可以显著提高预开槽板带的回弹预测精度。

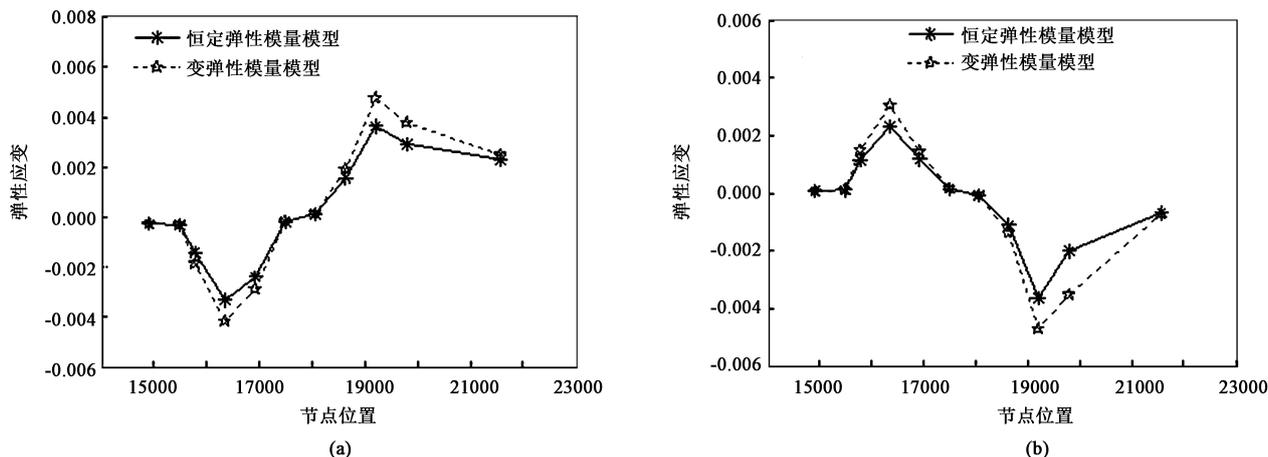


图 14 端面 1 上不同位置的弹性应变

(a) 顶部节点 (b) 底部节点

Fig. 14 Elastic strains at different positions on end face 1

(a) Top nodes (b) Bottom nodes

4.3 孔对回弹的影响

通过基本成形方案讨论了预冲孔对回弹的影响。采用有限元方法对预冲孔汽车门槛件的辊压成形过程进行了仿真，并对仿真结果进行了分析，参数设置同 4.2 节。图 15 给出了辊压加工后预冲孔汽车门槛件的等效应力分布。从图 15 中可以看出，在截面

形成后，应力累积发生在孔区域，这表明预冲孔对回弹有影响。端面 1 处节点的横向应变如图 16 所示。弯曲变形区域的顶部应变大于底部应变，表明中性层在厚度方向上略有偏移。如图 15 和图 16 所示，最大应力和应变均发生在弯曲变形区域。在辊压过程中，板带的所有变形均为横向变形。

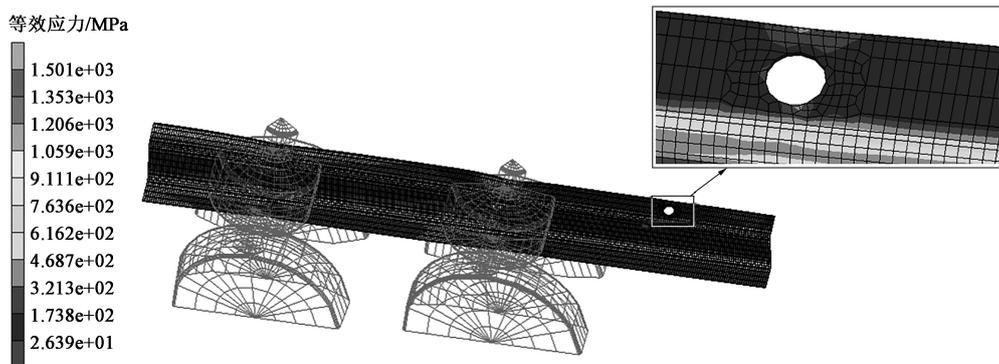


图 15 辊压后的等效应力分布

Fig. 15 Equivalent stress distribution after roll forming

测量模拟结果端面 1 至端面 4 的回弹角，测量数据如图 17a 所示。从图 17a 可以看出，从端面 1 到端面 4，角度 α 的回弹几乎无变化，预冲孔金属带中角度 β 的回弹小于非预冲孔金属带材中的回弹。图 17b

显示了两个有限元模型从端面 1 到端面 4 的顶部节点的测量弹性应变数据。如图 17b 所示，弹性应变的变化与回弹角一致。因此，可以得出结论，檐边上孔洞的存在对角度 α 的回弹几乎无影响，并减少了角度 β

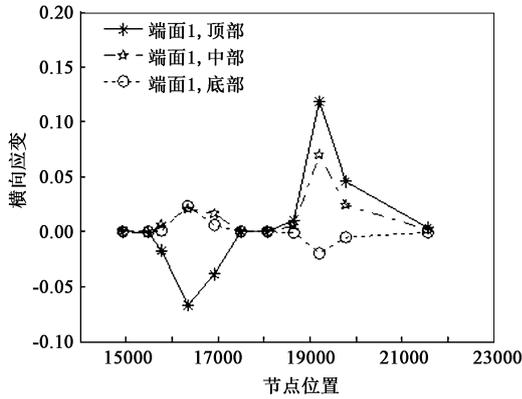


图 16 端面 1 处节点的横向应变

Fig. 16 Transverse strains of nodes at end face 1

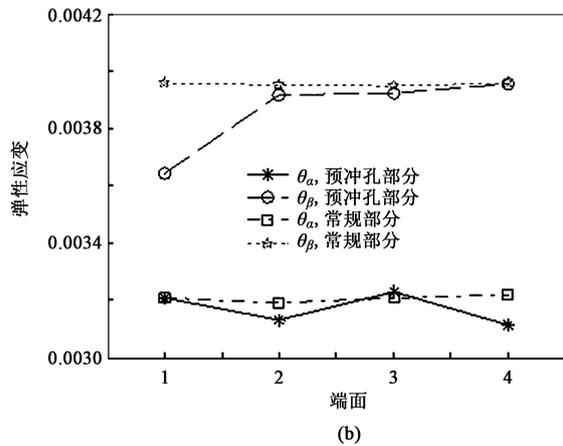
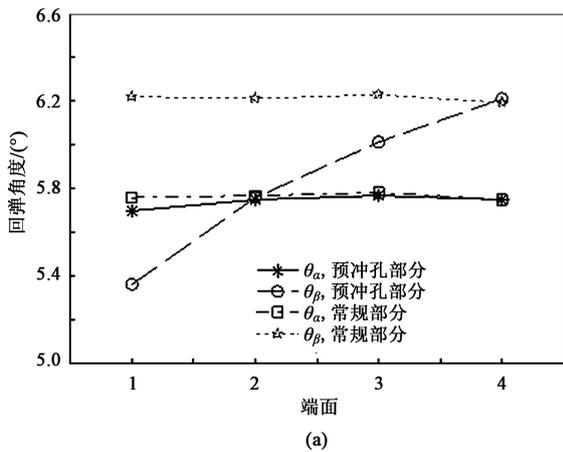


图 17 预冲孔对回弹的影响

(a) 每个端面的回弹角 (b) 每个端面顶部节点的弹性应变

Fig. 17 Effects of pre-punched holes on springback

(a) Springback angle of each end face (b) Elastic strains of top nodes for each end face

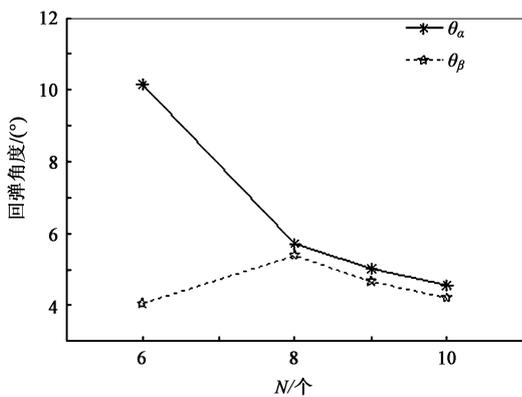


图 18 机架数量对孔区域回弹的影响

Fig. 18 Effects of rack number on springback in hole area

产品质量要求的机架数量的基础上, 机架数量减少了孔区域的回弹角。增加轧机数量减少了每道次的成形角度, 并增加了弯曲变形时的塑性变形累积, 从而降低了弹性应变峰值^[32]。

的回弹。同时, 从图 17 中回弹角和弹性应变的变化可以看出, 孔的位置对回弹的影响不同。预中孔对中心端面处的回弹影响最大, 预中孔对回弹的影响随着距离中心端面距离的增加而逐渐减小。

4.4 轧机数量对孔区回弹的影响

从 4.3 节可以看出, 预中孔对端面 1 处的回弹影响程度最大, 因此以端面 1 处回弹角的变化为例进行分析。图 18 显示了轧机数量对孔区域回弹的影响, 其他参数设置同 4.2 节。如图 18 所示, 当轧机数量为 6 时, 角度 α 较大, 而角度 β 很小。这是因为机架数量太少, 导致产品变形和产生侧波等缺陷, 产品质量不合格, 因此, 结果不被接受。在满足

4.5 板带厚度对孔区回弹的影响

板带厚度对孔区域回弹的影响如图 19 所示, 其他参数同 4.2 节。如图 19 中所示, 板厚度太小也会导致辊压成形产品质量差。在板厚满足产品质量

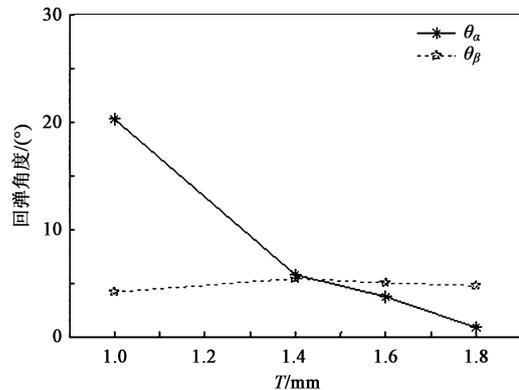


图 19 板带厚度对孔区域回弹的影响

Fig. 19 Effect of strip thickness on springback in hole area

要求的基础上，随着板带厚度的增加，孔区回弹角减小。厚度较大的板带的表面应力和应变较大，材料的塑性变形量增加^[32]，因此材料的弹性变形量减少。

4.6 机架间距对孔区域回弹的影响

图 20 显示了机架间距对孔区域回弹的影响，其他参数设置同 4.2 节。根据图 20，当机架间距增加时，孔区域的回弹角增加。随着机架间距的增加，带材的纵向应变峰值减小^[36]，带材的变形变得平缓，这直接降低了永久塑性变形量。

4.7 孔位置对回弹的影响

测量汽车门槛的檐边缘、垂直边缘和腹板尺寸，距离板带左端 0~38.01 mm 区域为檐边缘区域，距离板带左端 48.37~99.87 mm 区域为垂直边缘区域，距离板带左端 112.25~154.26 mm 区域为腹板区域。孔位置对回弹的影响如图 21 所示，其他参数设置同

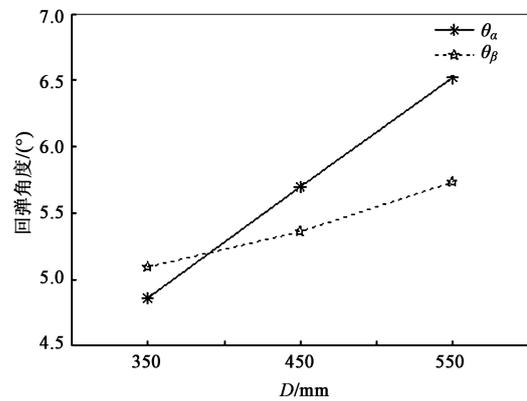
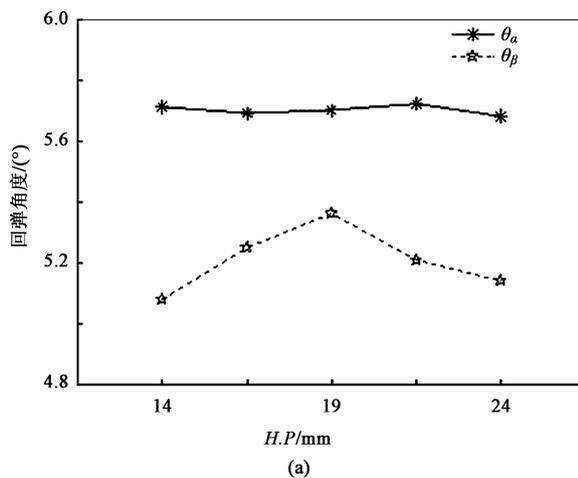


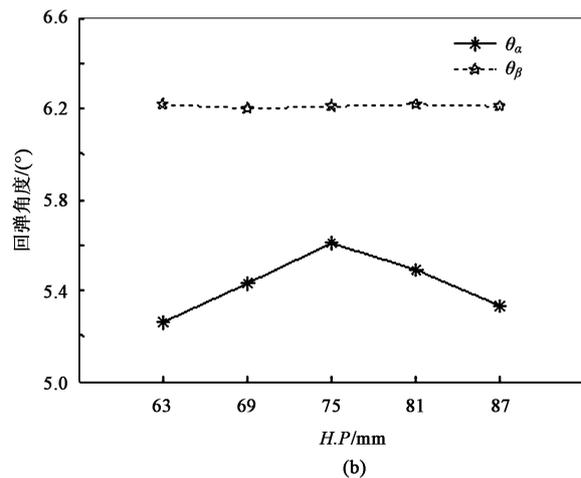
图 20 机架间距对孔区域回弹的影响

Fig. 20 Effect of spacing between racks on springback in hole area

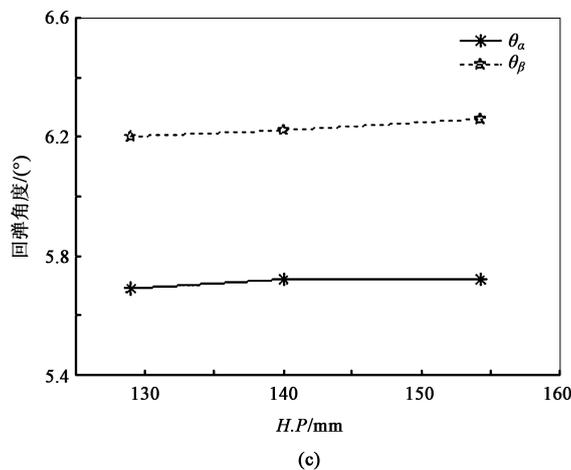
4.2 节。Bidabods B S 等^[37]通过实验发现，当辊压成形中孔与变形区域之间的距离发生变化时，孔处的横向应变发生变化。如图 21 所示，当孔位于檐边缘时，孔的存在减少了角度 β 的回弹，对角度 α 的



(a)



(b)



(c)

图 21 孔位置对回弹的影响

(a) 檐边缘区域 (b) 垂直边缘区域 (c) 腹板区域

Fig. 21 Effect of hole position on springback

(a) Edge area (b) Vertical edge area (c) Web area

回弹影响很小。此外,当孔洞位于檐边缘中部时,角度 β 的回弹最大,这表明孔洞对回弹的影响最小。当孔位于垂直边缘时,孔的存在减少了角 α 的回弹,对角 β 的回弹影响很小。类似地,当孔位于垂直边缘区域的中间时,孔对回弹的影响最小。当孔位于腹板区域时,孔的存在对角度 α 和 β 的回弹影响不大。

4.8 孔径对回弹的影响

孔径对回弹的影响如图 22 所示,其他参数设置同 4.2 节。如图 22 所示,随着孔径的增加,角度 α 的回弹在孔区域变化不大,而角度 β 的回弹减小。上述研究发现,辊压工艺中孔洞的存在降低了回弹。随着孔径的增大,孔区域的应力集中加剧,这表明孔对回弹的影响增强。同时,孔径的增加减小了从孔到变形区域和带材边缘的距离。上文对孔位置的分析表明,这种现象减少了孔区域的回弹。

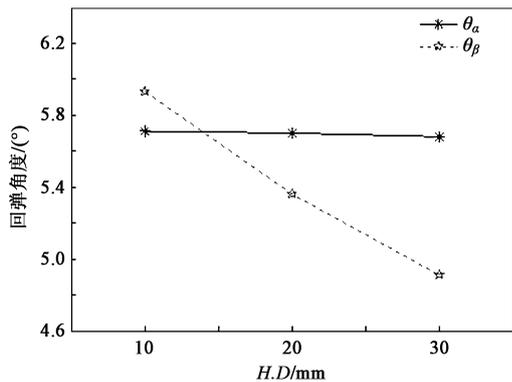


图 22 孔径对回弹的影响

Fig. 22 Effect of hole diameter on springback

4.9 孔间距对回弹的影响

图 23 显示了孔间距对回弹的影响,其他参数设置同 4.2 节。当另一个孔靠近现有孔时,两个孔之间的横向应变^[37]增加,孔区域的应力集中更加明

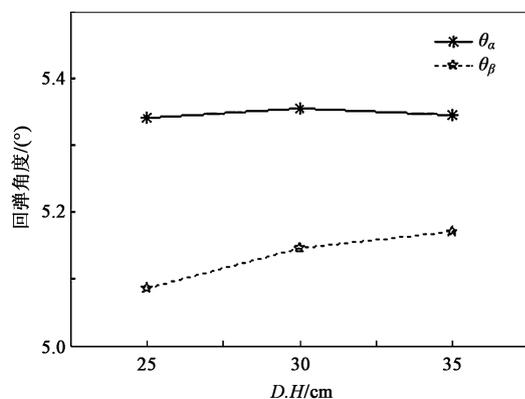


图 23 孔间距对回弹的影响

Fig. 23 Effect of spacing between holes on springback

显,这使得现有孔对回弹的影响程度逐渐增加。从图 23 可以看出,随着孔间距的减小,孔区域的回弹角减小,表明孔对回弹的影响程度增大。

5 结论

(1) 孔的存在减少了回弹,孔的不同位置对回弹的影响不同。回弹在孔的中心端面处受影响的程度最大,从中心端面到两侧,影响程度逐渐减小。

(2) 与使用恒定弹性模量的模型相比,可变弹性模量的有限元模型可以更准确地预测回弹。因此,有必要考虑可变弹性模量,以提高辊压成形中预切口截面回弹预测的精度。

(3) 随着机架数量、板带厚度和孔径的增加,机架间距和孔间距的减小,孔区回弹减小。

(4) 当孔位于汽车门槛件的不同位置时,孔对回弹的影响不同。仅从减少孔洞对回弹影响的角度来看,腹板是最佳冲压位置,其次是檐边缘和垂直边缘的中间位置。

参考文献:

- [1] Halmos G T. Halmos GT Roll Forming Handbook [M]. 1st. New York: Crc Press, 2006.
- [2] Chryssolouris G. Manufacturing Systems-theory and Practice [M]. 2nd. New York: Springer, 2005.
- [3] Taylor T. Novel cold-rolled martensitic ultra-high-strength steels for roll forming technologies [J]. Mater. Sci. Technol., 2016, 32 (16): 1730-1741.
- [4] Groche P, Beiter P, Henkelmann M. Prediction and inline compensation of springback in roll forming of high and ultra-high strength steels [J]. Production Engineering: Research and Development, 2008, 2 (4): 401-407.
- [5] Abvabi A, Rolfe B, Hodgson P D, et al. The influence of residual stress on a roll forming process [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 101-102: 124-136.
- [6] Bui Q V, Ponthot J P. Numerical simulation of cold roll-forming processes [J]. Journal of Materials Processing Tech., 2008, 202 (1): 275-282.
- [7] Paralikas J, Salonitis K, Chryssolouris G. Investigation of the effects of main roll-forming process parameters on quality for a V-section profile from AHSS [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 44 (3-4): 223-237.
- [8] Lim H, Lee M G, Sung J H, et al. Time-dependent springback of advanced high strength steels [J]. International Journal of Plasticity, 2012, 29: 42-59.

- [9] Wiebenga J H, Weiss M, Rolfe B, et al. Product defect compensation by robust optimization of a cold roll forming process [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2013, 213 (6): 978–986.
- [10] Su C J, Yang L Y, Lou S M, et al. Research on roll forming process based on five-boundary condition forming angle distribution function [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102 (9–12): 3767–3779.
- [11] Almeida C O L, Lima L H L, dos Santos Pereira M. Springback comparison between DP600 and DP800 steel grades [J]. *Materials Research Express*, 2020, 7 (1): 016598.
- [12] Zeng G, Li S H, Yu Z Q, et al. Optimization design of roll profiles for cold roll forming based on response surface method [J]. *Materials & Design*, 2009, 30 (6): 1930–1938.
- [13] Liu X L, Cao J G, Huang S X, et al. Experimental and numerical prediction and comprehensive compensation of springback in cold roll forming of UHSS [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111 (3): 657–671.
- [14] Badr O M, Rolfe B, Hodgson P, et al. Forming of high strength titanium strip at room temperature [J]. *Materials & Design*, 2015, 66: 618–626.
- [15] Chen W, Jiang J, Li D, et al. Flower pattern and roll positioning design for the cage roll forming process of ERW pipes [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2019, 264: 295–312.
- [16] Chongthairungruang B, Úthaisangsuk V, Suranunthai S, et al. Experimental and numerical investigation of springback effect for advanced high strength dual phase steel [J]. *Materials & Design*, 2012, 39: 318–328.
- [17] Abeyrathna B, Rolfe B, Weiss M. The effect of process and geometric parameters on longitudinal edge strain and product defects in cold roll forming [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92 (1–4): 743–754.
- [18] Toros S, Polat A, Ozturk F. Formability and springback characterization of TRIP800 advanced high strength steel [J]. *Materials & Design*, 2012, 41: 298–305.
- [19] Badr O M, Rolfe B, Zhang P, et al. Applying a new constitutive model to analyse the springback behaviour of titanium in bending and roll forming [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 128–129: 389–400.
- [20] Jung J, Jun S, Lee H S, et al. Anisotropic hardening behaviour and springback of advanced high-strength steels [J]. *Metals*, 2017, 7 (11): 480–494.
- [21] Liu X L, Cao J G, Chai X T, et al. Investigation of forming parameters on springback for ultra high strength steel considering Young's modulus variation in cold roll forming [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 29: 289–297.
- [22] Park H S, Anh T V. Finite element analysis of roll forming process of aluminum automotive component [A]. *International Forum on Strategic Technology* [C]. Singapore: IEEE, 2010.
- [23] Mahajan P, Abrass A, Groche P. FE simulation of roll forming of a complex profile with the aid of steady state properties [J]. *Steel Research International*, 2018, 89 (5): 1700350.
- [24] 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 Tech.*, 2016, 230: 1–7.
- [25] Naofal J, Naeini H M, Mazdak S. Effects of hardening model and variation of elastic modulus on springback prediction in roll forming [J]. *Metals*, 2019, 9 (9): 1005.
- [26] Bhattacharyya D, Smith P D. The development of longitudinal strain in cold roll forming and its influence on product straightness [J]. *Adv. Technol. Plast.*, 1984, 1: 422–427.
- [27] Chen Z, Bong H J, Li D, et al. The elastic-plastic transition of metals [J]. *International Journal of Plasticity*, 2016, 83: 178–201.
- [28] Paralikas J, Salonitis K, Chryssoulouris G. Investigation of the effect of roll forming pass design on main redundant deformations on profiles from AHSS [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 56 (5–8): 475–491.
- [29] 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 Tech.*, 2016, 230: 1–7.
- [30] Abvabi A, Mendiguren J, Kupke A, et al. Evolution of elastic modulus in roll forming [J]. *International Journal of Material Forming*, 2017, 10 (3): 463–471.
- [31] Yoshida F, Uemori T, Fujiwara K. Elastic-plastic behavior of steel strips under in-plane cyclic tension-compression at large strain [J]. *International Journal of Plasticity*, 2002, 18 (5–6): 633–659.
- [32] Bui Q V, Ponthot J P. Numerical simulation of cold roll-forming processes [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2008, 202 (1–3): 275–282.
- [33] Hellborg S. *Finite Element Simulation of Roll Forming* [D]. Sweden: Linköping University, 2007.
- [34] Sousa R J A D, Yoon J W, Cardoso R P R, et al. On the use of a reduced enhanced solid-shell (RESS) element for strip forming simulations [J]. *International Journal of Plasticity*, 2007, 23 (3): 490–515.
- [35] Xu H J, Liu Y Q, Zhong W. Three-dimensional finite element simulation of medium thick plate metal forming and springback [J]. *Finite Elements in Analysis & Design*, 2002, 51: 49–58.
- [36] Han Z W, Liu C, Lu W P, et al. Spline finite strip analysis of forming parameters in roll forming a channel section [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2005, 159 (3): 383–388.
- [37] Bidabadi B S, Naeini H M, Tafti R A, et al. Experimental investigation of the ovality of holes on pre-notched channel products in the cold roll forming process [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2015, 225: 213–220.