

包辛格效应对 DP590 钢零件回弹计算精度的影响

郭岳明¹, 董智超², 闫巍², 王刚², 张健²

(1. 吉林大学汽车工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 一汽模具制造有限公司, 吉林 长春 130011)

摘要: 针对 DP590 高强钢零件在冷冲压过程中出现的有限元分析回弹结果与实际结果差异的问题, 以某汽车中通道零件为研究对象, 开发拉延、修边、整形模具, 并通过开展材料力学性能试验, 构建材料本构模型, 利用有限元分析技术和光学检测技术开展研究。研究表明, DP590 高强钢在循环加载过程中陆续表现出非线性弹性、瞬态软化与加工硬化停滞现象, 即包辛格效应较为明显。此外, 包辛格效应对塑性应变路径多变的 DP590 高强钢零件回弹影响明显, 有限元模拟技术准确地预测了实际零件的回弹, 为回弹修改方案的制定提供了模拟验证手段。

关键词: 包辛格效应; DP590 高强钢; 回弹; 冲压; 计算精度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.006

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 03-0040-08

Influence of Bauschinger effect on springback analysis accuracy for DP590 steel part

Guo Yueming¹, Dong Zhichao², Yan Wei², Wang Gang², Zhang Jian²

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. FAW Tooling Die Co., Ltd., Changchun 130011, China)

Abstract: For the problem of springback difference between finite element analysis and actual results for DP590 high-strength steel parts in the cold stamping. A medium channel part of automotive was selected as the research object, and the drawing, trimming and flanging dies were developed. Meanwhile, the constitutive model of material was established by carrying out the mechanical property tests of material, and the research was carried out by using the finite element analysis technology and optical inspection technology. The research results show that DP590 high-strength steel gradually exhibits non-linear elasticity, transient softening and work hardening stagnation phenomenon during the cyclic loading process, that is, the Bauschinger effect is more obvious. Furthermore, Bauschinger effect has a significant impact on the springback of DP590 high-strength steel part with variable plastic strain paths, and the finite element simulation technology predicts the actual springback of part accurately, which provides a simulation verification method for the formulation of springback modification scheme.

Key words: Bauschinger effect; DP590 high-strength steel; springback; stamping; analysis accuracy

近年来, 随着对汽车轻量化、安全性要求的日益提高, 高强钢、铝合金、镁合金、复合材料等轻质、高强材料广泛应用于车身开发。其中, 高强钢材料以其高性价比、高强度级别、种类相对丰富、完备的生产制造体系以及成形工艺成熟等特点, 在车身结构中的应用最为广泛且比例逐渐增加。但是, 高强钢与普通低碳钢相比, 屈服强度高, 冲压成形卸载后回弹大, 直接影响零件的尺寸精度和形状稳

定性, 需要进行回弹矫正^[1-3]。

目前, 板材成形有限元分析技术历经 50 年的发展, 已经全面应用于冲压成形领域, 实现了起皱、破裂、回弹、面品缺陷的模拟预测, 并通过设计优化和补偿的方式进行成形性和尺寸精度控制, 解决了以往传统试错方式导致的成本、周期不可控的问题^[4]。但受限于如接触算法、单元类型、摩擦模型、材料本构模型等因素, 有限元分析精度仍需提高^[5]。特别是如何获得能够准确表述不同材料在复杂变形过程中的本构模型, 提升回弹分析精度, 成为研究热点之一。

材料本构模型包括流动法则、屈服准则和强化模型 3 部分^[6-7]。在金属板材成形有限元模拟中, 需要定义合适的塑性流动曲线来描述材料的应力、应变关系, 流动曲线的获取方式一种为通过试验获

收稿日期: 2023-08-08; 修订日期: 2023-11-06

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFB2010300);
吉林省科技重大专项项目 (20220301023GX)

作者简介: 郭岳明 (2002-), 男, 本科生

E-mail: 1076683215@qq.com

通信作者: 闫巍 (1982-), 男, 硕士, 正高级工程师

E-mail: yanwei_td@faw.com.cn

得流变曲线数据,一种为应用有限的试验数据对理论模型进行拟合,进而获得大应变范围的流动曲线。常用的理论模型包括 Ludwik 模型、Swift 模型、Ghosh 模型、Hockett-Sherby 模型等^[8]。屈服准则主要包括 Hill 系列,如 Hill48 和 Hill90 等;BBC 系列,如 BBC-2000 和 BBC-2003 等;Barlat 系列,如 Barlat89、Yld2000 和 Yld2004 等,其中,Barlat 屈服准则更适用于 DP 钢零件的模拟分析^[9-10]。强化模型主要包括 Chaboche、NSK Swift 和 Y-U 随动强化模型,且被认为是回弹预测精度较高的材料模型^[11-15],特别是在拉延筋圆角、凹模口圆角等位置,包辛格效应的影响更为显著。板材流经这些特征位置时,通常会发生反复的正反弯曲,使板材经历正向加载—卸载—反向加载的过程,正向加载使板材发生应变强化,随后的反向加载又使板材陆续出现早期再塑性化、瞬态软化以及加工硬化停滞等过程,是否考虑包辛格效应将直接影响力场的计算精度,进而影响回弹。在同等成形工艺条件下,高强钢的包辛格效应大于低碳钢,材料厚度越大,包辛格效应也越明显^[16-17]。由于获取包辛格效应参数的试验设备和过程复杂,一般情况下,在实际工程应用中未进行考虑。

基于上述原因,本文针对汽车高强钢零件,采用目前冲压成形工程领域普遍采用的 AutoForm 有限元分析软件和光学测量设备,同时结合材料试验手

段,重点研究包辛格效应对高强钢零件冲压回弹的影响,提升高强钢零件的回弹计算精度。

1 材料与工艺

图 1 为某汽车的中通道零件,材料为 DP590 高强钢,厚度为 1.6 mm。

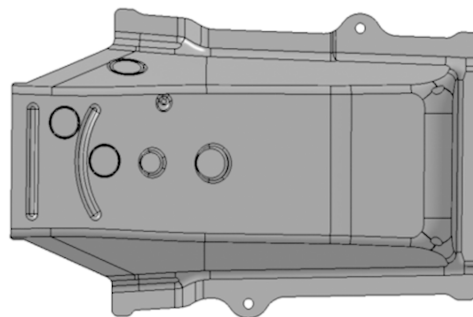


图 1 汽车中通道零件

Fig. 1 Medium channel part of automotive

基于该中通道零件设计冲压工艺方案(图 2),工艺流程依次包括:拉延工序,成形出产品形状;1 次修边工序,切出平直面外轮廓;整形工序,对侧壁及法兰面进行回弹修正;2 次修边工序,切出斜面外轮廓,并冲孔,获得最终产品。

基于上述工艺方案,进行冲压工艺有限元分析前,需要获取 DP590 高强钢材料的本构模型。通过

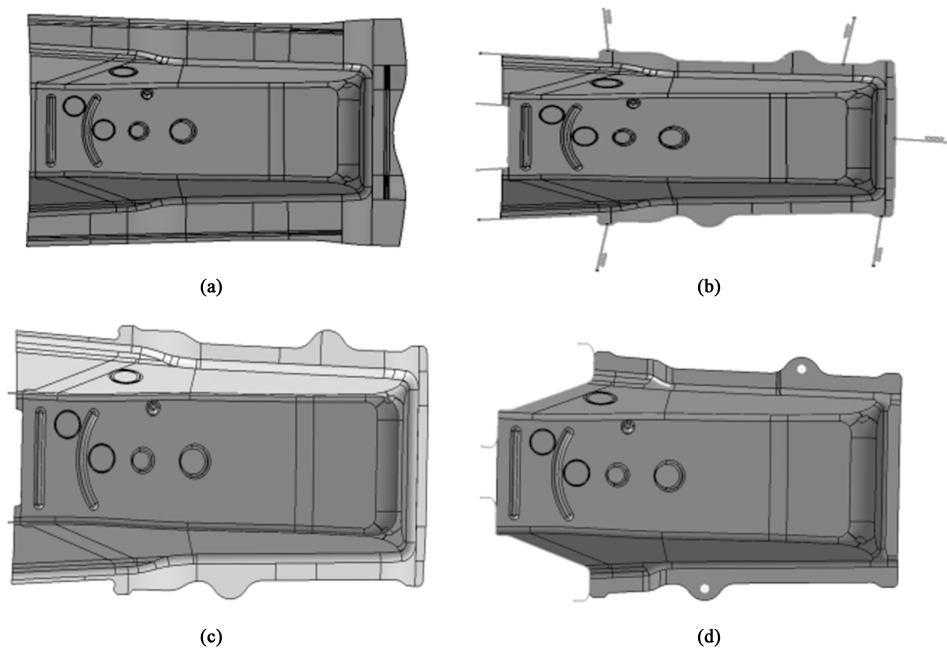


图 2 冲压工艺方案

(a) 拉延工序 (b) 1 次修边工序 (c) 整形工序 (d) 2 次修边与冲孔工序

Fig. 2 Scheme of stamping process

(a) Drawing process (b) The first trimming process (c) Restriking process (d) The second trimming and piercing process

单轴拉伸试验获得拉伸曲线数据, 拉伸试验依照 GB/T 228.1—2021^[18] 进行, 获得的屈服强度 R_{eL} 、抗拉强度 R_m 、各向异性指数 r (r_0 、 r_{45} 、 r_{90})、均匀伸长率 A_g 、硬化指数 n 等参数如表 1 所示。并利用 AutoForm 软件中的 Approximation 方法将试验拉伸曲线数据导入材料模型中, 获得小应变段 (应变 $\varepsilon < 0.2$) 的流变曲线, 对于大应变段 (应变 $\varepsilon > 0.2$) 的流变曲线利用 Swift/Hockett-Sherby 模型拟合获得, 公式如下:

$$\sigma = (1 - \alpha) [C(\varepsilon_{pl} + \varepsilon_0)^m] + \alpha [\sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_i) \exp(\varepsilon_{pl}^p)] \quad (1)$$

式中: σ 为流动应力; α 为加权系数, $0 < \alpha < 1$; C 为强化系数; ε_{pl} 为塑性应变; ε_0 为初始应变; σ_{sat} 为饱和应力; σ_i 为初始应力; m 为 Swift 模型强化指数; p 为 Hockett-Sherby 模型强化指数。

针对高强钢, 加权系数 α 取 0.5, 整体流变曲线如图 3 所示。

表 1 DP590 高强钢的拉伸力学性能

Table 1 Tension mechanical properties of DP590 high-strength steel

参数	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	n	$A_g/\%$	r_0	r_{45}	r_{90}
数值	386	640	0.174	15	0.93	0.89	0.99

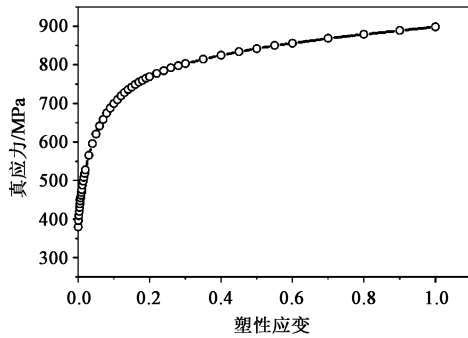


图 3 DP590 高强钢的流变曲线

Fig. 3 Flow curve of DP590 high-strength steel

采用 Barlat 屈服准则定义屈服面, 公式如式 (2) 所示, 屈服面结果如图 4 所示。本文中, 参考应力 $\sigma_{ref} = \sigma_{11}$, 其中 σ_{11} 为沿板材轧制方向的屈服应力。

$$a | K_1 + K_2 |^M + a | K_1 - K_2 |^M + (2 - a) | 2K_2 |^M = 2\bar{\sigma}^M \quad (2)$$

其中:

$$K_1 = \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2} \quad (3)$$

$$K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - h\sigma_{22}}{2}\right)^2 + \rho^2 \sigma_{12}^2} \quad (4)$$

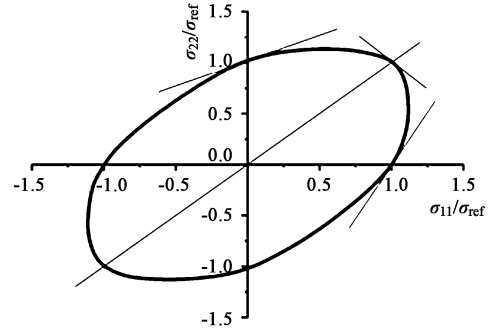


图 4 DP590 高强钢的屈服面

Fig. 4 Yield surface of DP590 high-strength steel

$$a = 2 - \sqrt{\frac{r_0}{1 + r_0} \times \frac{r_{90}}{1 + r_{90}}} \quad (5)$$

$$h = \sqrt{\frac{r_0}{1 + r_0} \times \frac{1 + r_{90}}{r_{90}}} \quad (6)$$

式中: a 、 h 为材料常数; M 为非二次屈服函数指数, 对于钢板材料取 $M = 6$; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{12} 分别为各项异性沿主轴方向的应力分量、垂直于轧制方向的应力分量、与轧制方向成 45° 方向的应力分量; ρ 为参数, 通过对函数 $g(\rho)$ 求最小值获得, 如式 (7) 所示。

$$g(\rho) = \frac{2M\sigma_{11}^M}{\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{22}}\right) \sigma_{12}^{M-1}} - 1 - r_{45} \quad (7)$$

DP590 高强钢材料的成形极限曲线通过杯突胀形试验获得, 试验按照 GB/T 24171.2—2009^[19] 执行, 获得的成形极限曲线如图 5 所示。

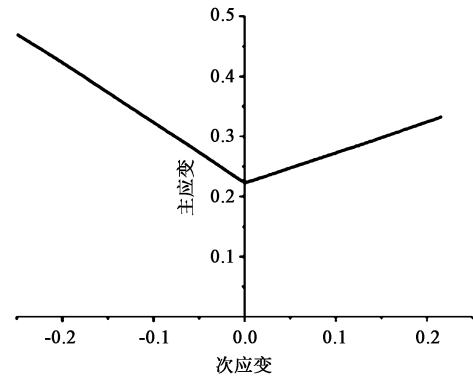


图 5 DP590 高强钢的成形极限曲线

Fig. 5 Forming limit curve of DP590 high-strength steel

在 AutoForm 软件中, 由式 (8) 与式 (9) 所定义的随动强化模型能够很好地表达高强钢板材的包辛格效应。

$$E_L = E_0 \{1 - \gamma[1 - \exp(-\chi\varepsilon_p)]\} \quad (8)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_L} + \text{Karctanh}^2\left(\frac{\sigma_r}{2\sigma_h}\right) \quad (9)$$

式中： E_L 为卸载模量； E_0 为 $\varepsilon_p=0$ 时的杨氏模量； ε_p 为累积塑性应变； ε_r 为压缩加载应变； σ_r 为压缩加载应力； σ_h 为拉伸加载应力； γ 为弹性模量减小系数； χ 为弹性模量减小率； K 为短暂软化比。

式 (8) 定义的弹性模量的演化规则会显著影响板材的早期再塑性化行为，对于高强钢板材的卸载行为捕捉也起着至关重要的作用。其中，参数 γ 与 χ 通过循环加载-卸载试验获取，试样尺寸如图 6 所示，参数拟合结果详见图 7，数值列于表 2 中。循环加载-卸载试验根据 GB/T 26077—2021^[20] 以及 GB/T 3075—2021^[21] 执行。式 (9) 用于表达板材的反向加载行为，其中，针对高强钢通常设置 $K=$

0.014 (表 2)。同时，为了描述加工硬化停滞现象，AutoForm 软件中引入了加工硬化停滞比 ξ ($0 \leq \xi \leq 1$)， $\xi=0.9$ 为软件默认设置，经测试该数值能够有效保证高强钢的模拟精度。

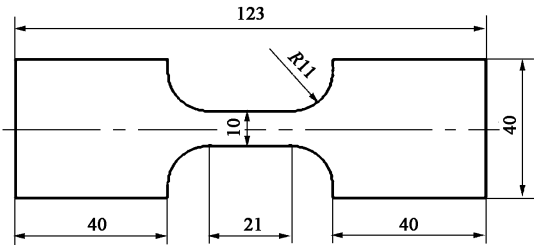


图 6 试样尺寸
Fig. 6 Specimen dimensions

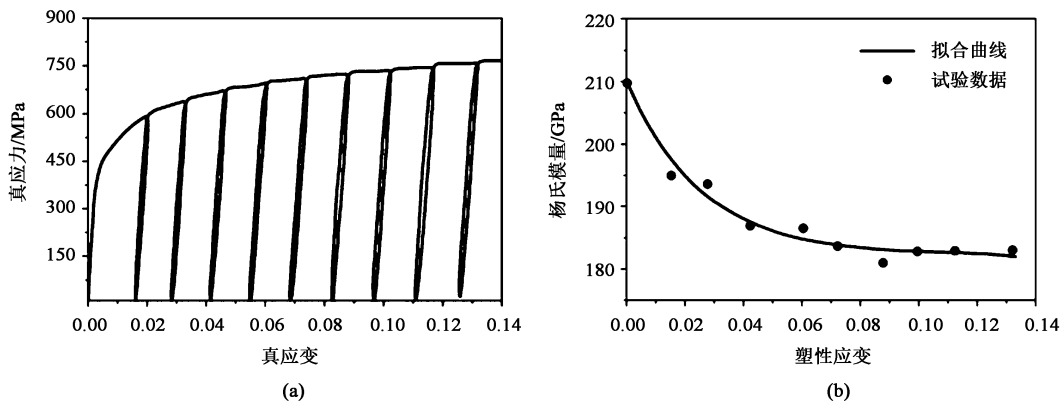


图 7 DP590 高强钢的循环加载-卸载试验结果
(a) 真应力-真应变曲线 (b) 杨氏模量随塑性应变衰减曲线
Fig. 7 Test results of cycling loading-unloading for DP590 high-strength steel
(a) True stress-true strain curves (b) Degradation curve of Young's modulus with plastic strain

表 2 AutoForm 中表述包辛格效应的参数
Table 2 Parameters for expressing Bauschinger effect in Autoform

参数	K	ξ	γ	χ
数值	0.014	0.9	0.132	40

基于表 2 所列数据对强化模型进行修正，结果如图 8 所示。

采用以上材料本构模型进行有限元分析并优化冲压工艺方案后，进行中通道零件模具 3D 结构设计，如图 9 所示。

2 分析与讨论

2.1 回弹分析

为了对比 AutoForm 软件中随动强化模型对回弹结果的影响，设计初期，首先关闭随动强化模型选

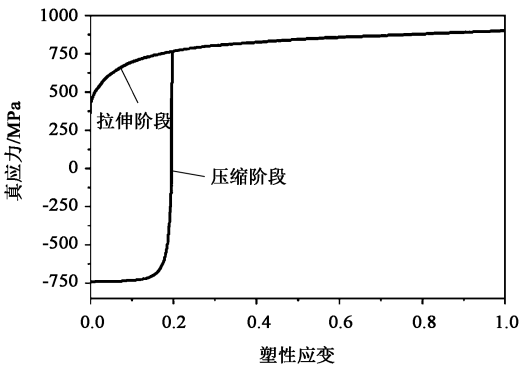


图 8 考虑包辛格效应的 DP590 高强钢硬化曲线
Fig. 8 Hardening curves of DP590 high-strength steel considering Bauschinger effect

项，即不考虑包辛格效应。基于不考虑包辛格效应的本构模型对冲压工艺方案进行分析，获得初始回弹结果，如图 10a 所示。从分析结果看，侧壁及法兰面整体向外回弹，量值最大为 +5.777 mm，且部

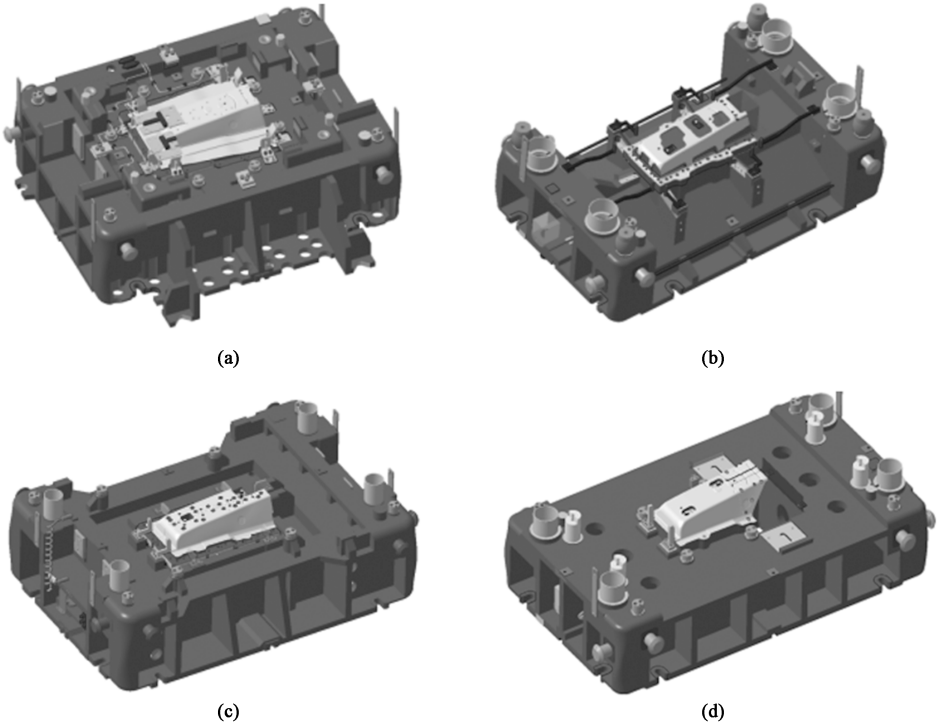


图 9 模具结构
(a) 拉伸模具 (b) 1 次修边模具 (c) 整形模具 (d) 2 次修边与冲孔模具

Fig. 9 Die structures
(a) Drawing die (b) The first trimming die (c) Restriking die (d) The second trimming and piercing die

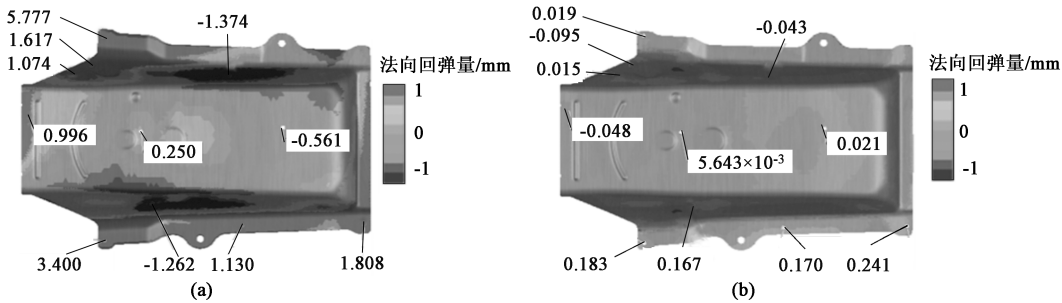


图 10 回弹结果
(a) 回弹补偿前 (b) 回弹补偿后
Fig. 10 Springback results
(a) Before springback compensation (b) After springback compensation

分侧壁出现最大的-1.374 mm 的内凹，超过尺寸精度±0.5 mm 的要求，因此，需要进行回弹补偿。采用 AutoForm 软件的回弹补偿模块，通过多轮次的迭代补偿，实现了回弹的有效控制，如图 10b 所示，并依据此结果更新冲压工艺，进行模具加工制造。

2.2 结果验证

图 11 为中通道实际冲压成形零件。从结果看，实际拉伸件材料流入量与有限元分析结果一致，且无起皱、破裂缺陷，但两侧壁存在回弹翘曲，与前期有限元分析结果不一致。为进一步分析实际零件

的回弹分布和量值，采用光学检测设备 Atos 对实际零件进行数据采集，并与理论产品数据进行对比，获得实际零件回弹结果，如图 12 所示，侧壁和法兰面回弹量为+5.52 mm，不满足尺寸精度要求，前期回弹补偿无效。

2.3 问题分析

通过观察实际零件侧壁发现，存在材料流经凹模口圆角后的痕迹，工程上称为冲击痕。实际零件的冲击痕长度与有限元分析的冲击痕长度基本一致，如图 13 所示，说明有限元分析的材料流入量与实际

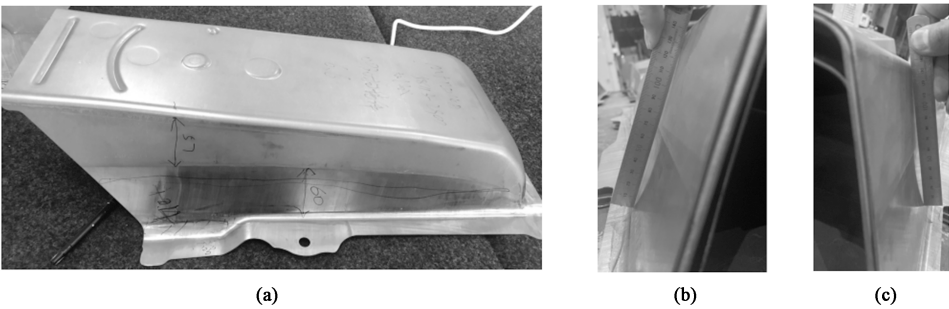


图 11 中通道实际冲压成形零件
(a) 最终零件 (b) 侧壁 1 回弹 (c) 侧壁 2 回弹

Fig. 11 Actual stamping forming part of medium channel

(a) Final part (b) Springback of side wall 1 (c) Springback of side wall 2

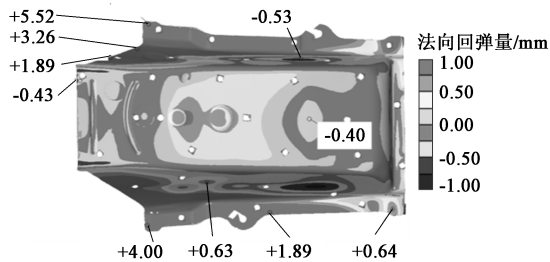


图 12 实际零件回弹结果

Fig. 12 Springback result of actual part

无差别。同时，对比零件材料厚向应变，厚度减薄率也基本一致，如图 14 所示。基于上述分析，证明有限元分析的成形性结果与实际结果一致。

2.4 结果对比

将包辛格效应参数代入有限元分析软件 Auto-Form 中再次进行分析，获得回弹分析结果，如图 15 所示，回弹量较大位置的截面对比如图 16 所示。从分析对比结果得知，考虑包辛格效应后，与实际零件回弹数值接近。

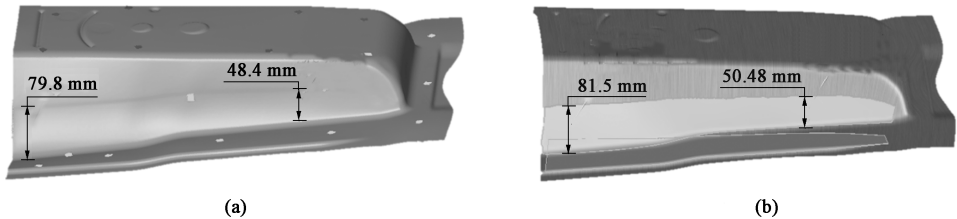


图 13 拉伸件冲击痕分析结果
(a) 实际冲击痕 (b) 有限元分析冲击痕
Fig. 13 Analysis results for skid line of drawing part
(a) Actual skid line (b) Skid line of finite element analysis

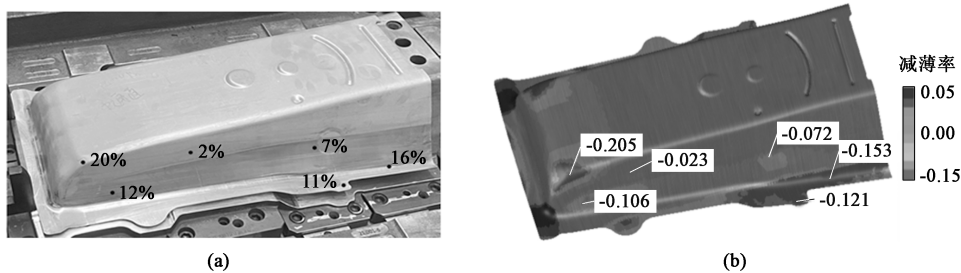


图 14 厚度减薄率分析结果
(a) 实际减薄率 (b) 分析减薄率
Fig. 14 Analysis results for thickness thinning rate
(a) Actual thinning rate (b) Thinning rate of finite element analysis

3 结论

(1) DP590 高强钢的包辛格效应较为明显，在

卸载阶段弹性模量由 209.7 MPa 衰减至 183.1 MPa，反向加载阶段也表现出明显的瞬态软化与加工硬化停滞现象。

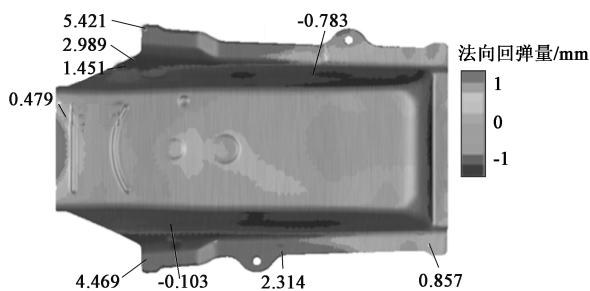


图 15 考虑包辛格效应的回弹分析结果

Fig. 15 Springback analysis result considering Bauschinger effect

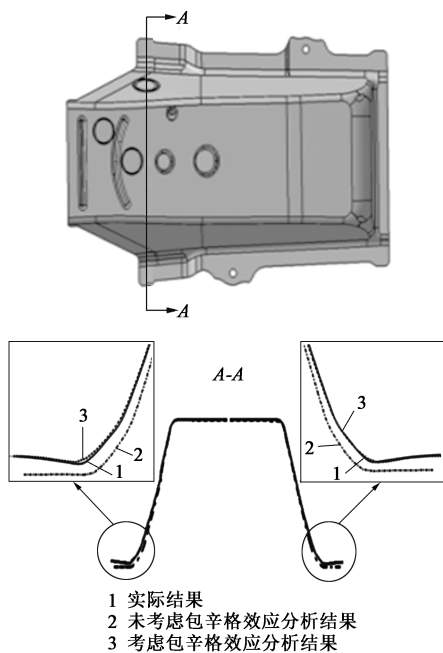


图 16 零件截面回弹对比图

Fig. 16 Springback comparison diagram of part cross-section

(2) 包辛格效应对塑性应变路径多变的 DP590 高强钢零件回弹影响明显, 因此, 需要在进行回弹预测分析时考虑包辛格效应。

参考文献:

- [1] 陈鹏, 段磊, 马舟, 等. 汽车左右侧边梁加强板冲压工艺优化及回弹控制研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (12): 72-80.
Chen P, Duan L, Ma Z, et al. Research on stamping process optimization and springback control for automobile left and right side beam reinforcement plates [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (12): 72-80.
- [2] 李小强, 董红瑞, 于长旺, 等. 不同屈服准则与硬化模型对 DP780 双相高强钢拉延弯曲回弹预测影响规律研究 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (12): 42-55.
Li X Q, Dong H R, Yu C W, et al. Influence of yield criteria and hardening model on draw-bending springback prediction of DP780 [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (12): 42-55.

- [3] 牛超, 陈新平, 陈军. 不同材料强化模型对 QP 钢回弹预测精度的理论及应用研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (1): 221-226.
Niu C, Chen X P, Chen J. Theory and application study on springback prediction accuracy for QP steel with different material hardening models [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (1): 221-226.
- [4] 宋炳毅, 孟宝, 万敏. 金属薄板循环塑性强化模型及实验研究进展 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (3): 28-41.
Song B Y, Meng B, Wan M. Research progress of cyclic plastic hardening model and experiment for metal sheets [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11 (3): 28-41.
- [5] 庄京彪. 车身成形中的包辛格效应及其对回弹的影响 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
Zhuang J B. The Bauschinger Effect in Auto-body Forming and Its Influence on Springback [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [6] 张健, 闫巍, 王刚, 等. 铝合金车门外板冷冲压成形工艺及数值模拟 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (5): 45-52.
Zhang J, Yan W, Wang G, et al. Cold stamping process and numerical simulation of aluminum alloy auto outer door panel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (5): 45-52.
- [7] 孙占坤. 汽车用高强度板成形性能的模拟研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古科技大学, 2015.
Sun Z K. Simulation Study of the Formability of a High Strength Steel for Automobile [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2015.
- [8] 赵清江, 郭怡晖, 梁宾, 等. 22MnB5 高强度钢板材的断裂失效准则研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 132-137.
Zhao Q J, Guo Y H, Liang B, et al. Research on fracture criterion of 22MnB5 high-strength steel plate [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 132-137.
- [9] 史刚, 王武荣, 羊军, 等. 1000 MPa 级双相钢板板极限成形性能 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45 (11): 1653-1656.
Shi G, Wang W R, Yang J, et al. Study on limit formability of 1000 MPa dual phase steel [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45 (11): 1653-1656.
- [10] 赵辉, 彭艳, 石宝东. 金属材料各向异性本构模型研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (10): 32-42.
Zhao H, Peng Y, Shi B D. Research progress on anisotropic constitutive model of metal materials [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (10): 32-42.
- [11] 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.
- [12] Wagoner R H, Lim H, Lee M G. Advanced issues in springback [J]. International Journal of Plasticity, 2013, 45: 3-20.
- [13] 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: 288-309.

(下转第 65 页)