

先进高强钢汽车前地板左右边梁冲压工艺参数优化及回弹补偿

占贝贝, 张元好, 李 兵, 徐飞越

(湖北汽车工业学院 汽车材料学院, 湖北 十堰 442000)

摘要: 为了解决某车型前地板左右边梁开裂和回弹的缺陷, 提高效率, 降低模具改模次数, 采用有限元软件 Autoform 进行全工序冲压过程模拟, 以最大减薄率和最大回弹量为评价指标, 对压边力、模具间隙、冲压速度、摩擦因数进行优化。通过单因素控制变量法, 得到工艺参数的合理取值范围。通过正交试验得到最优工艺参数组合为: 压边力为 1000 kN、模具间隙为 1.5 mm、冲压速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.13, 其中, 冲压速度对目标影响最小。工艺参数优化以及对模具型面进行迭代补偿后模拟结果显示: 最大减薄率降低至 20.6%, 消除了开裂风险; 左边梁的最大回弹量为 0.534 mm、右边梁为 0.867 mm。通过试模验证, 制件无开裂且回弹量基本满足 $\pm 1.0 \text{ mm}$ 的尺寸偏差。通过工艺参数优化和模具型面部分迭代补偿的方式, 避免了零件开裂风险, 提高了零件尺寸精度, 减少了模具改模次数。

关键词: 板料成形; 冲压工艺; 减薄率; 回弹量; 回弹补偿

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.017

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 05-0136-11

Optimization on stamping process parameters and springback compensation for left and right side rails of automobile front floor for advanced high-strength steel

Zhan Beibei, Zhang Yuanhao, Li Bing, Xu Feiyue

(School of Automotive Materials, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442000, China)

Abstract: In order to solve the cracking and springback defects of left and right side rails for the front floor of a certain vehicle model and improve the efficiency and reduce the number of die modifications, the stamping process of the entire process was simulated by finite element software Autoform. Then, taking the maximum thinning rate and maximum springback amount as evaluation indicators, the blanking holding force, die clearance, stamping speed and friction coefficient were optimized, and the reasonable value ranges of process parameters were obtained by the single factor control variable method. Furthermore, the optimal process parameters combination was obtained as the blanking holding force of 1000 kN, the die clearance of 1.5 mm, the stamping speed of $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, and the friction coefficient of 0.13 by the orthogonal experiment, and among them, the stamping speed has the least impact on the target. The simulation results after process parameter optimization and iterative compensation of die surface show that the maximum thinning rate is decreased to 20.6%, eliminating the risk of cracking, and the maximum springback amounts of left and right side rails are 0.534 mm and 0.867 mm, respectively. The die verification shows that the parts have no cracking and the springback amount basically meets the size deviation of $\pm 1.0 \text{ mm}$. Thus, through process parameter optimization and partial iterative compensation of die surface, the risk of part cracking is avoided, the dimensional accuracy of part is improved, and the number of die modifications is reduced.

Key words: sheet forming; stamping process; thinning ratio; springback amount; springback compensation

为了满足当前汽车发展的趋势, 提高汽车轻量

化程度, 高强钢与先进高强钢等材料在汽车的车身和零件中的应用越来越广泛^[1]。高强钢与先进高强钢等材料在汽车制造中主要用于制造汽车的结构件、加强件和覆盖件等, 由于其优良的冲压成形性能和加工性能, 能够提高汽车的强度和刚度, 同时保证生产的效率和精度。此外, 这种材料还具有良好的耐久性和抗腐蚀性能, 能够保证汽车在使用过程中的安全性和可靠性。据不完全统计, 一些车型的车

收稿日期: 2024-09-25; 修订日期: 2025-01-10

基金项目: 湖北省科技重大专项 (2022AAA001); 湖北省重点研发项目 (2021BAB019)

作者简介: 占贝贝 (1988-), 男, 硕士研究生

E-mail: 402286165@qq.com

通信作者: 张元好 (1971-), 男, 硕士, 教授

E-mail: 1020646746@qq.com

身框架的高强度钢应用占比已高达 90%^[2]。相比于传统钢材的成形，高强钢因其强度高、塑性差的特点在冲压完成后的回弹趋势更加明显^[3]。

双相钢是一种具有铁素体基体和马氏体增强相的汽车零部件材料，其力学性能调控区间较宽，由双相组织的组合占比所决定的，可以在不同的工况下进行调整，以满足不同的需求。同时，双相钢还具有良好的强塑性平衡，即在保持高强度的同时，还具有较高的韧性和延展性。这种材料在汽车制造中得到了广泛应用，可以提高汽车的安全性和经济性。根据研究^[4-5]，双相钢的抗拉强度与马氏体的体积分数呈近似线性关系，随着马氏体含量的增加，成形性能下降，同时由于成形后残余应力增加而导致回弹量增加^[6]。在板材冲压成形过程中的塑性变形阶段，会在制件内留有一部分残余应力。在冲压完成后外力卸载的情况下，内部残余应力会引起弹性变形能的释放和重新分布，最终，导致制件与原本所需求的零件尺寸发生偏差^[7]。在冲压制件过程中，弯曲、拉伸、翻边等成形工序后会引起不同程度的回弹，其中还有一部分因为模具结构和设计的原因，在制件成形工序完成后还要进行分离工序（切断），也会造成回弹量急剧增加，即切边回弹^[8-11]。

在汽车车身零件的制造过程中，除了起皱、开

裂等主要问题外，回弹的控制是最具挑战性的^[12]，且 HC420/780DP 冷轧先进高强钢材料的强度高、塑性差，冲压过程中往往会出现减薄、开裂等缺陷。本文以 HC420/780DP 冷轧先进高强钢汽车前地板左右边梁为研究对象，使用 Autoform 有限元分析软件，通过控制单一变量和正交试验的方法，探讨出最优的冲压工艺参数。然后，在保证拉延件最大减薄率为 20%的前提下，通过冲压工艺参数优化和部分补偿模具型面的方式减小回弹量。根据 Autoform 模拟的数据结果将补偿后的型面导出，对模具型面进行加工，通过初次试模冲压的制件验证了模拟结果的准确性以及参数优化和回弹补偿策略的有效性，为类似制件提供了理论指导和参考依据^[13]。

1 汽车前地板左右边梁工艺分析

汽车前地板左右边梁是汽车前地板系统的重要组成部分，而汽车前地板系统、后地板系统和前机系统组成汽车下车体是整车的基础，其主要作用为支撑上车体、开闭件总成以及乘员的重量，在工作状态下还要承受汽车运动中产生的载荷、振动、冲击和扭矩。左右边梁的三维数模如图 1 所示。

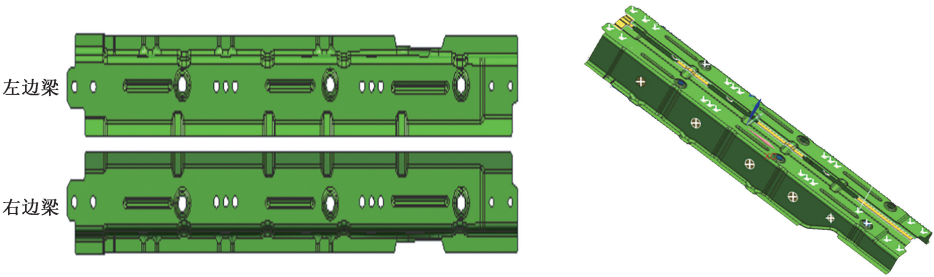


图 1 汽车前地板左右边梁的三维数模
Fig. 1 3D digital model of left and right side rails for automobile front floor

本文研究的零件材料为 HC420/780DP 冷轧先进高强钢，属于双相（Dual-Phase，DP）钢的一种，其屈服强度和抗拉强度分别可以达到 493.6 和 853.5 MPa。材料厚度为 1.5 mm，尺寸精度要求为

± 1.0 mm，材料的力学性能如表 1 所示。其中， r_0 、 r_{45} 和 r_{90} 分别为钢板 0°方向（轧制方向）、45°方向（与轧制方向成 45°方向）和 90°方向（垂直于轧制方向）的各向异性系数。

表 1 HC420/DP780 高强钢板材料力学性能
Table 1 Mechanical properties of HC420/DP780 high-strength steel sheet

参数	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/%	泊松比	硬化指数	各项异性系数		
							r_0	r_{45}	r_{90}
数值	189	853.5	493.6	19	0.3	0.19	0.74	0.82	0.98

由图 1 可知,汽车前地板左右边梁的拉延深度较深、冲孔数量多、修边线较长、两侧面为了保证零件精度还需要进行整形。同时为了提高生产效率,保证左右件的一致性,故将左右边梁采用“一模双件”的冲压方式成形。板料成形完成后,最后一道

工序通过中间切断的方式将零件分离。

结合零件本身固有的结构和特点,左右边梁采用 4 工序完成零件的生产。即 OP10 拉延工序、OP20 修边-冲孔工序、OP30 侧面整形-修边工序以及 OP40 修边冲孔-侧冲孔-切断工序,具体如图 2 所示。

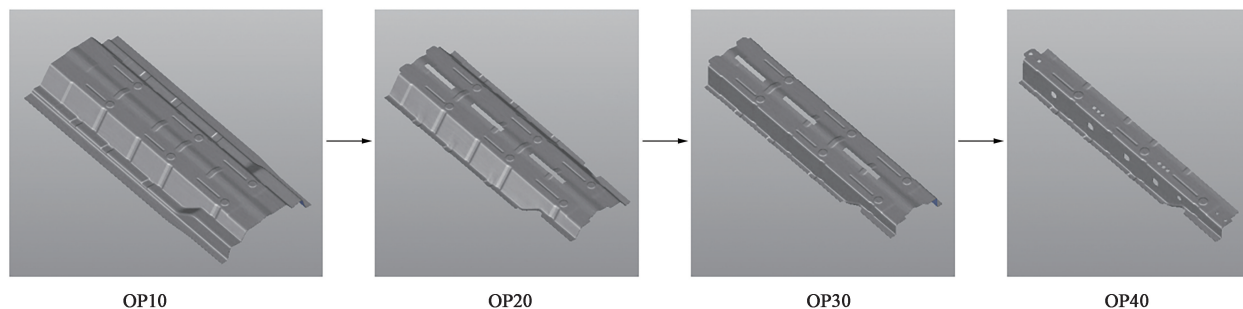


图 2 前地板左右边梁冲压全工序图

Fig. 2 Whole process diagram of stamping left and right side rails for front floor

2 成形仿真模拟

2.1 成形仿真建模及冲压工艺参数讨论

拉延件的最大减薄率决定了后工序成形是否还有余量,直接影响零件开裂情况;同时,拉延件回弹量大小决定了后工序的回弹补偿是否有效,因此,在模具设计前获得最优工艺参数对模具开发非常重要^[14]。使用 Autoform 软件进行模拟,以最大减薄率和最大回弹量为评价标准来评估拉延件的成形质量。对模拟结果进行了分析,讨论了压边力、摩擦因数、模具间隙和冲压速度这 4 个主要因素对成形质量的影响规律。

将汽车前地板左右边梁的拉延工艺数模导入至 Autoform 软件中,进行网格划分。利用软件自带的板料展开功能来计算板料的轮廓线,即板料尺寸为 1150 mm×580 mm×1.5 mm。轮廓线尺寸向外各延伸 20 mm 生成压料面,压料面上的拉延筋可以采用 Autoform 软件自带的等效拉延筋进行分段来代替。故拉延成形的有限元模型如图 3 所示,压力 F 的计算公式如式 (1) 所示:

$$F = qA \quad (1)$$

式中: A 为毛坯投影面积; q 为单位面积上的压边力。

高强钢的 q 取值为 3~4.5 MPa,压料面生成后再导入至 UG 软件中计算压料面的面积,得到 $A = 427059.7040 \text{ mm}^2$ 。代入式 (1),得到 F 取值范围为 1300~1950 kN,为保证零件的适应范围,多数厂

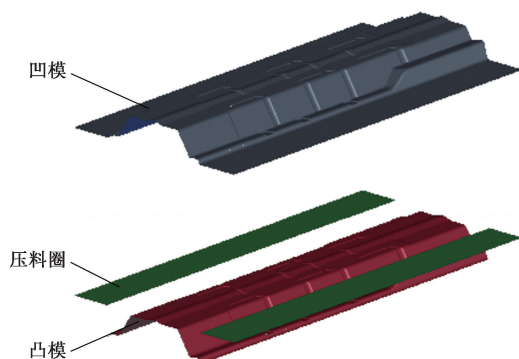


图 3 拉延成形有限元模型

Fig. 3 Finite element model of drawing

家要求压边力范围要满足在基础压力的 $\pm 30\%$ 来进行零件成形领域的测试。故压边力范围为 500~3000 kN。

根据板料厚度为 1.5 mm,故设置模具间隙为 0.5~2.5 mm。冲压速度结合实际生产的节拍,一般是在每分钟 8~25 次的范围,根据软件换算为 $100 \sim 700 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

根据摩擦理论,按接触界面的状态可能出现干摩擦、流体润滑摩擦和边界摩擦 3 种摩擦类型^[15]。根据文献 [16] 仿真结果可知,当摩擦因数为 0.15 时,摩擦区域的占比和不同节点摩擦力在成形过程中的变化规律更贴近高强钢实际冲压成形过程中的摩擦条件。故高强钢初次模拟时摩擦因数选择 Autoform 软件的默认值为 0.15。

2.2 成形模拟结果及分析

以压边力为 1500 kN、模具间隙为 1.5 mm、摩擦因数为 0.15、冲压速度为 $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (每分钟

12次)的工艺参数在 Autoform 中提交汽车前地板左右侧边梁拉伸成形有限元模型, 计算求解后得到的结果如图4所示。由图4a可知拉伸件的最大减薄率为24.4%, 由图4b可知拉伸件的最大回弹量为

3.823 mm, 由图4c的拉伸成形极限图可知拉伸件存在开裂风险。以上模拟结果说明最初拟定的成形工艺参数不合理, 需要对冲压工艺参数进行优化。

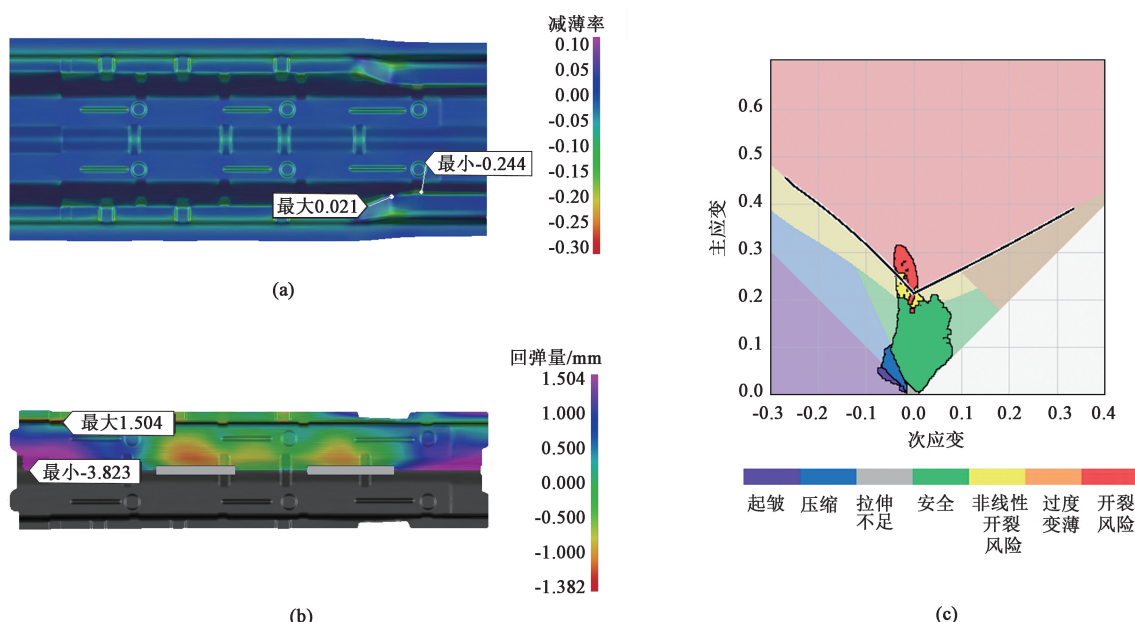


图4 成形仿真模拟图

(a) 零件的减薄率分布 (b) 零件的回弹量分布 (c) 拉伸成形极限图

Fig. 4 Forming simulation diagrams

(a) Thinning rate distribution of part (b) Springback amount distribution of part (c) Forming limit diagram of drawing

3 工艺参数优化

3.1 单一变量法模拟及结果分析

3.1.1 压边力变化模拟及分析

选择模具间隙为 1.5 mm, 摩擦因数为 0.15, 冲压速度采用模具调试时的速度 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (每分钟 8 次), 压边力为 500 ~ 3000 kN, 间隔为 500 kN。采用 Autoform 模拟了 6 组压边力的数据, 如图 5a 所示。由压边力为 3000 kN 时的拉伸成形极限图 (图 5b) 可知, 拉伸件已存在开裂风险, 此时最大减薄率为 24.9%, 最大回弹量为 3.587 mm。根据图 5a 可知, 当压边力为 500 ~ 2000 kN 时最大减薄率和最大回弹量没有变化; 当压边力为 2500 kN 时最大减薄率上升至 23.5%, 最大回弹量变化不明显; 当压边力为 3000 kN 时, 最大减薄率变化不明显, 而此时的回弹量却直线上升至 3.486 mm。说明拉伸时的弹性塑性阶段压边力越大, 留在制件内部的残余应力越大, 在外力卸载后引起弹性形变能的释放和重新分布的效果也越明显, 导致回弹量也越

大^[17]。压边力为 2500 kN 时, 超过计算的压边力上限 1950 kN, 最大减薄率明显增大; 压边力为 3000 kN 时, 回弹量急剧增大, 不利于后续回弹迭代补偿, 故压边力取值范围应为 500 ~ 2000 kN。

3.1.2 摩擦因数变化模拟及分析

摩擦因数的范围一般为 0.12 ~ 0.2, 压边力根据上文模拟结果取中间值 1500 kN, 模具间隙为 1.5 mm, 冲压速度为 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据图 6 所示模拟结果可知: 摩擦因数为 0.12 时, 板料流入较多, 拉伸件发生弹性变形的区域多于塑性变形的区域^[18], 在外力卸载后, 零件最大回弹量为 3.568 mm; 摩擦因数为 0.13 时, 最大回弹量下降, 说明材料此时发生的塑性变形区域多于弹性变形区域; 随着摩擦因数的进一步增加, 减薄率和回弹量均上升, 由于摩擦因数的增大, 导致制件内残余应力增加, 在制件切断后回弹量也增加。故摩擦因数的合理取值范围为 0.13 ~ 0.16。

3.1.3 模具间隙变化模拟及分析

压边力为 1500 kN、摩擦因数为 0.15、冲压速度为 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、模具间隙为 0.5 ~ 3.0 mm 时的模

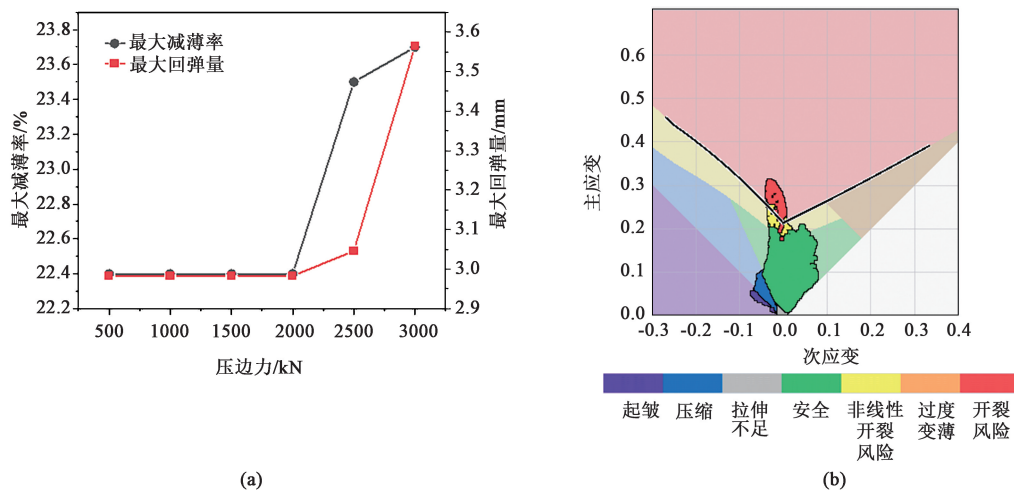


图 5 不同压边力下的模拟结果

(a) 压边力对最大减薄率和最大回弹量的影响 (b) 压边力为 3000 kN 时拉伸成形极限图

Fig. 5 Simulation results with different blank holder forces

(a) Effect of blank holder force on maximum thinning rate and maximum springback amount (b) Forming limit diagram of drawing at blank holder force of 3000 kN

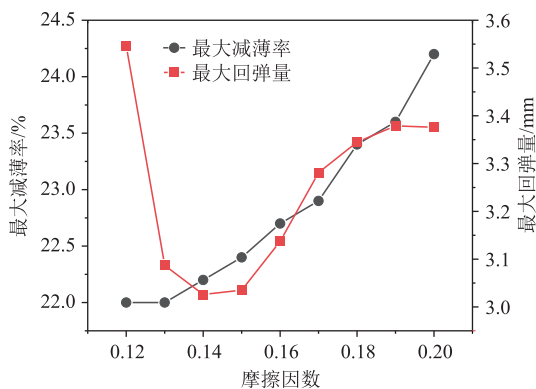


图 6 摩擦因数对最大减薄率和最大回弹量的影响

Fig. 6 Effect of friction coefficient on maximum thinning rate and maximum springback amount

拟结果如图 7 所示。模具间隙为 0.5 mm 时, 最大减薄率为 24%; 随模具间隙增大, 最大减薄率下降; 当模具间隙为 3.0 mm 时, 由于起皱位置板料厚度增加, 导致材料难以从此处顺畅流入, 继续拉伸过程中不能及时补充材料, 造成开裂。故最佳模具间隙为 1~2.5 mm。

3.1.4 冲压速度变化模拟及分析

压边力为 1500 kN、摩擦因数为 0.15、模具间隙为 1 mm、冲压速度为 $100 \sim 700 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的模拟结果如图 8 所示。由图 8 可知, 冲压速度的变化对最大减薄率没有影响, 而最大回弹量在 3.025 ~ 3.054 mm 之间, 最大回弹量相差仅为 0.029 mm, 说明冲压速度对减薄率和回弹量的影响均不显著。结合实际生产情况 SPM3~15 (每分钟 3~15 次) 对

应的冲压速度为 $100 \sim 500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 故选择冲压速度为 $100 \sim 500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 进行模拟。

3.2 模拟结果正交试验

根据以上分析, 确定了影响汽车前地板左右边梁的冲压成形质量的具体工艺参数取值范围, 如表 2 所示。为了评价其冲压成形质量, 选择以最大减薄率和最大回弹量作为评价指标。根据指标, 设计了一个 4 因素 4 水平的正交试验, 其结果如表 3 所示, 其中 E 和 F 分别为最大减薄率和最大回弹量。

在正交试验设计中, 极差分析具有试验次数少、效果好、方法简单、使用方便、效率高等优点^[19]。根据表 4 和表 5 所示的极差分析结果, $K1 \sim K4$ 和 $k1 \sim k4$ 分别为各工艺参数下不同水平所对应的目标值的和以及平均值^[20]。极差值 R 反应了该因素对目标结果的影响程度。

由表 4 可知, 各工艺参数对制件最大减薄率的影响程度为: 压边力 A > 模具间隙 D > 摩擦因数 B > 冲压速度 C 。为了降低制件开裂风险, 其最优工艺参数组合为: $A2B1C1D2$ 。由表 5 可知, 各冲压工艺参数对制件最大回弹量的影响程度为: 压边力 A > 摩擦因数 B > 模具间隙 D > 冲压速度 C 。为了在回弹补偿前尽可能减小最大回弹量, 其最优工艺参数组合为: $A3B4C1D2$ 。

为了满足零件无开裂风险的条件优先采用减小最大减薄率的工艺参数, 即 $A2B1C1D2$ 的工艺参数组合 (压边力为 1000 kN、摩擦因数为 0.13、冲压速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、模具间隙为 1.5 mm), 且冲压速度对评价目标影响不明显。

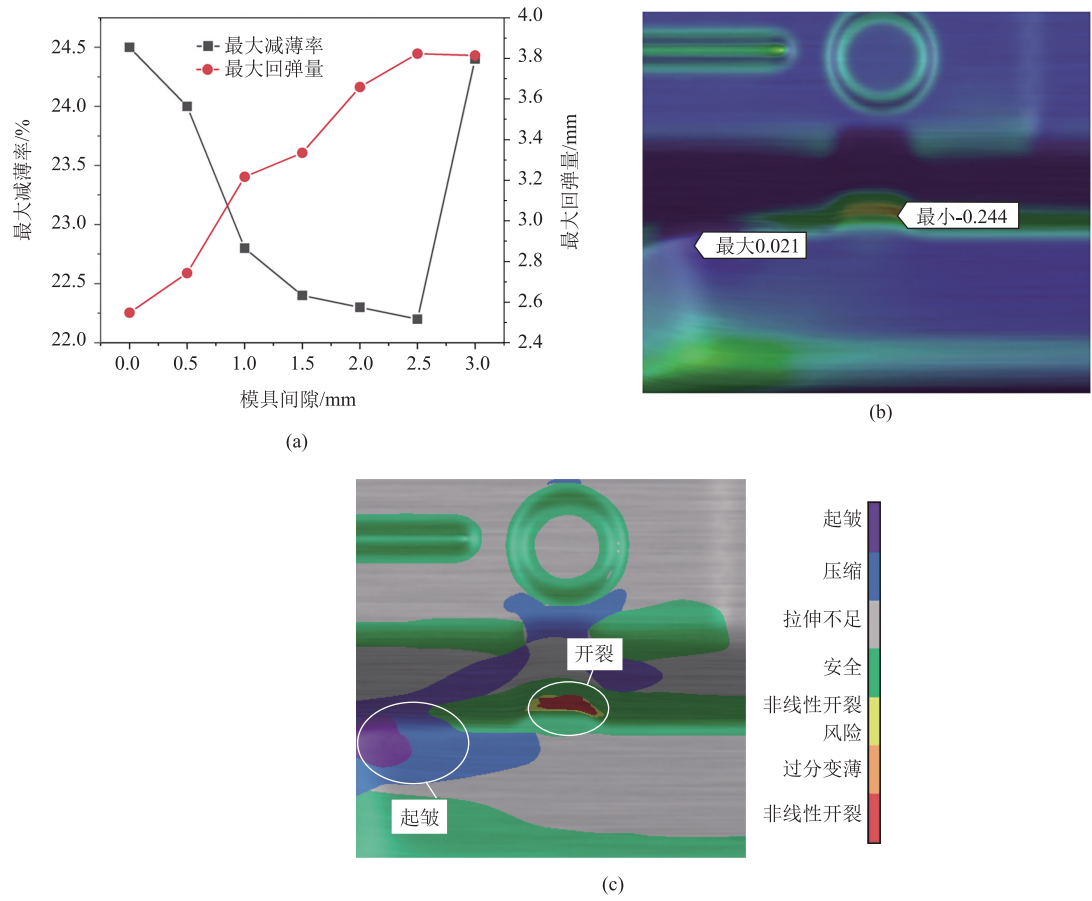


图 7 不同模具间隙下的模拟结果

(a) 模具间隙对最大减薄和最大回弹量的影响 (b) 模具间隙为 3.0mm 时的减薄率 (c) 模具间隙为 3.0 mm 时的成形性分布图

Fig. 7 Simulation results with different die clearances

(a) Effect of die clearance on maximum thinning rate and maximum springback amount

(b) Thinning rate at die clearance of 3.0 mm (c) Formability distribution diagram at die clearance of 3.0 mm

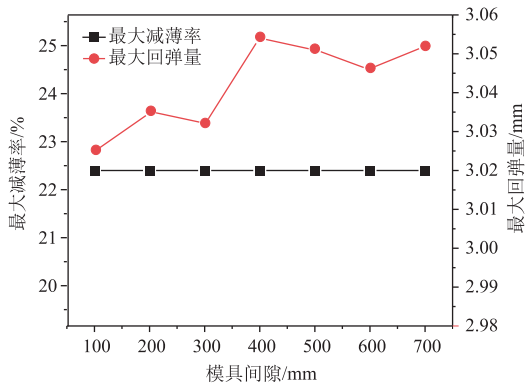


图 8 冲压速度对最大减薄率和最大回弹量的影响

Fig. 8 Effect of stamping speed on maximum thinning rate and maximum springback amount

4 优化后工艺参数模拟

由图 9a 可知，采用优化后的工艺参数模拟，前

表 2 正交试验的因素及水平				
Table 2 Factors and levels of orthogonal test				
水平	压边力 A/ kN	摩擦因数 B	冲压速度 C/ (mm · s ⁻¹)	模具间隙 D/ mm
1	500	0.13	100	1.0
2	1000	0.14	200	1.5
3	1500	0.15	300	2.0
4	2000	0.16	500	2.5

地板左右边梁拉延件的最大减薄率由优化前的 24.4% 下降至 20.6%，降低了 3.8%。由图 9b 可知回弹量由 3.823 mm 减小至 2.862 mm，回弹量仍然不能满足 ±1.0 mm 的尺寸偏差。由图 9c 和图 9d 的成形极限图和板料成形性分布图可知，零件没有开裂风险，在安全裕度范围内。故需继续对零件的回弹进行优化。

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal test

编号	<i>A</i> /kN	<i>B</i>	<i>C</i> / (mm·s ⁻¹)	<i>D</i> / mm	<i>E</i> /%	<i>F</i> /mm
1	500	0.13	100	1.0	22.8	3.976
2	500	0.14	200	1.5	22.5	3.890
3	500	0.15	300	2.0	22.4	3.780
4	500	0.16	500	2.5	22.2	3.620
5	1000	0.13	300	1.5	23.4	3.123
6	1000	0.14	500	1.0	24.2	3.190
7	1000	0.15	100	2.5	23.3	3.500
8	1000	0.16	200	2.0	23.1	3.250
9	1500	0.13	500	2.0	24.4	2.773
10	1500	0.14	300	2.5	24.1	2.892
11	1500	0.15	200	1.0	25.6	2.924
12	1500	0.16	100	1.5	24.6	2.017
13	2000	0.13	200	2.5	25.4	4.965
14	2000	0.14	100	2.0	25.9	4.832
15	2000	0.15	500	1.5	26.1	4.765
16	2000	0.16	300	1.0	26.8	4.565

表 4 工艺参数对最大减薄率的影响

Table 4 Effect of process parameters on maximum thinning rate

因素	压边力 <i>A</i>	摩擦因数 <i>B</i>	冲压速度 <i>C</i>	模具间隙 <i>D</i>
<i>K</i> 1	89.9	96.0	96.6	99.4
<i>K</i> 2	94.0	96.7	96.6	96.6
<i>K</i> 3	98.7	97.4	96.7	95.8
<i>K</i> 4	104.2	96.7	96.9	95.0
<i>k</i> 1	23.50	24.00	24.15	24.85
<i>k</i> 2	22.47	24.18	24.16	23.73
<i>k</i> 3	24.67	24.35	24.18	23.95
<i>k</i> 4	26.05	24.19	24.23	23.75
极差 <i>R</i>	3.58	0.35	0.08	1.10
最优工艺 参数组合	<i>A</i> 2 <i>B</i> 1 <i>C</i> 1 <i>D</i> 2			

5 回弹控制

由于零件两侧拉伸深度较深，后续还有侧面整形，所以，此处采用拉延部分补偿+侧面整形序部分补偿的方案较为合适。对于回弹量最大的地方，需要保证前一序与型面贴合程度高，其目的是减少

表 5 工艺参数对最大回弹量的影响

Table 5 Effect of process parameters on maximum springback amount

因素	压边力 <i>A</i>	摩擦因数 <i>B</i>	冲压速度 <i>C</i>	模具间隙 <i>D</i>
<i>K</i> 1	15.27	14.84	14.32	14.66
<i>K</i> 2	13.06	14.80	15.03	13.79
<i>K</i> 3	10.61	14.97	14.36	14.63
<i>K</i> 4	19.13	13.45	14.35	14.98
<i>k</i> 1	3.82	3.71	3.58	3.66
<i>k</i> 2	3.27	3.70	3.76	3.45
<i>k</i> 3	2.65	3.74	3.59	3.66
<i>k</i> 4	4.78	3.36	3.59	3.74
极差 <i>R</i>	2.13	0.38	0.18	0.30
最优工艺 参数组合	<i>A</i> 3 <i>B</i> 4 <i>C</i> 1 <i>D</i> 2			

后序切断时对回弹量增大的不利影响。前地板左边梁采用一模双件，难点在于切断后的内应力释放造成切断处的回弹量增大。如图 10 所示，最开始采用 OP30 侧面整形-修边工序产品模具型面全补偿方案，回弹量为 1.555 mm，减小了对后序回弹的影响；但经如图 10b 所示的 OP40 修边冲孔-侧冲孔-切断工序后，回弹量反而增大至 3.196 mm。回弹量仍然超出±1 mm 的公差范围。

所以，调整方案继续对模具型面进行部分补偿的方案，回弹补偿方案如图 11 所示，零件正面除外侧法兰面外做直接补偿（区域 I 和区域 II），零件侧面及外侧法兰面做过渡补偿。确定反向补偿系数为 1，光顺系数为 0.4。

因材料为高强钢 HC420/780DP，板料厚度为 1.5 mm，不存在零件刚性不足的情况，故可以采用自由回弹的方式。最终，经过 3 次迭代补偿后，如图 12 所示，左边梁的最大回弹量为 0.534 mm、右边梁的最大回弹量为 0.867 mm。说明采用优化工艺参数和部分型面回弹补偿的方式可以有效减少最大回弹量，使产品符合±1 mm 的尺寸偏差要求。

6 制件试制

根据优化后的工艺参数和通过 Autoform 的回弹补偿型面数据加工的模具型面，试冲的零件如图 13 所示，在检具上主要检查了外侧法兰面与其他零件装配时需保证的面差间隙，测量部位如图 14 所示，按照±1.0 mm 以下的公差要求进行测量，测量结果

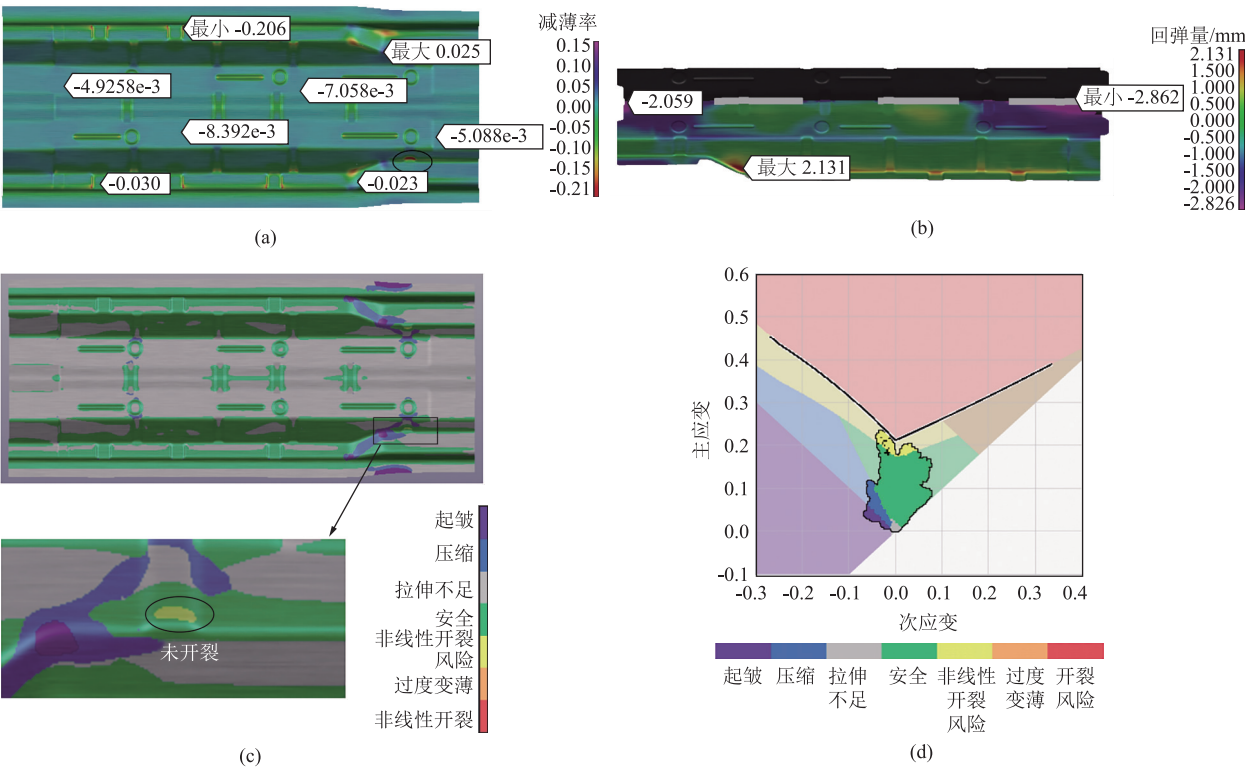


图 9 工艺参数优化后的模拟结果

(a) 零件的减薄率分布 (b) 零件的回弹量分布 (c) 成形性分布图 (d) 拉伸成形极限图

Fig. 9 Simulation results after optimization of process parameters

(a) Thinning rate distribution of part (b) Springback amount distribution of part (c) Formability distribution diagram
(d) Forming limit diagram of drawing

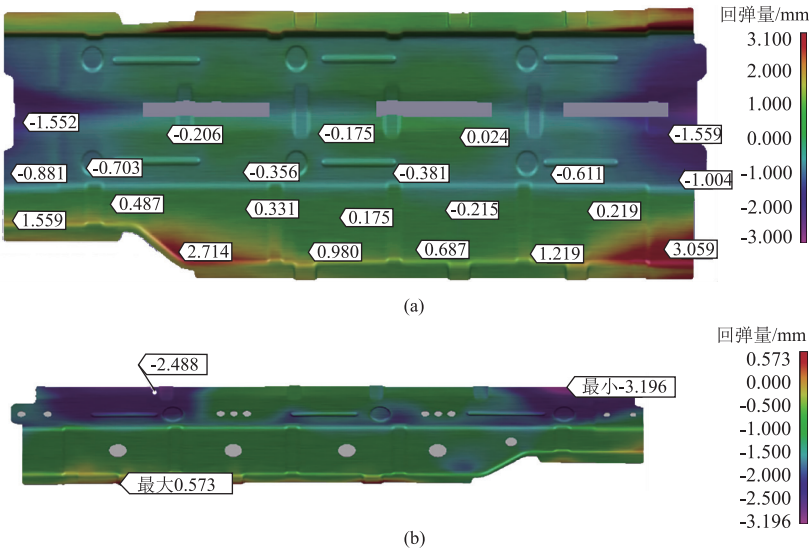


图 10 切断前后回弹对比

(a) OP30 工序后，切断前 (b) OP40 工序后，切断后

Fig. 10 Comparison of springback before and after cutting

(a) After OP30 process, before cutting (b) After OP40 process, after cutting

如图 15 回弹检测数据统计所示。零件无开裂，且前地板左边梁的产品回弹尺寸合格率为 94.33%，右边梁为 96.23%，与模拟结果基本一致，有效地提

高了产品的合格率并减少了改模次数，证明工艺参数优化和模具部分型面迭代补偿方法的有效性和可行性。

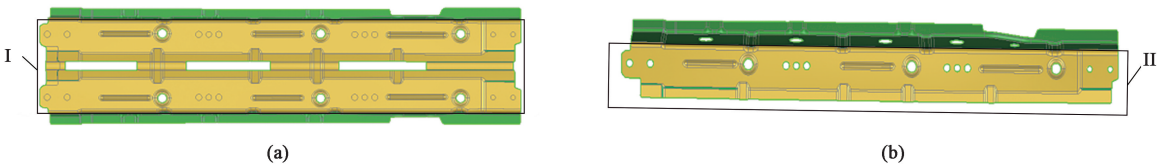


图 11 回弹补偿方案

(a) OP30 (b) OP40

Fig. 11 Springback compensation scheme

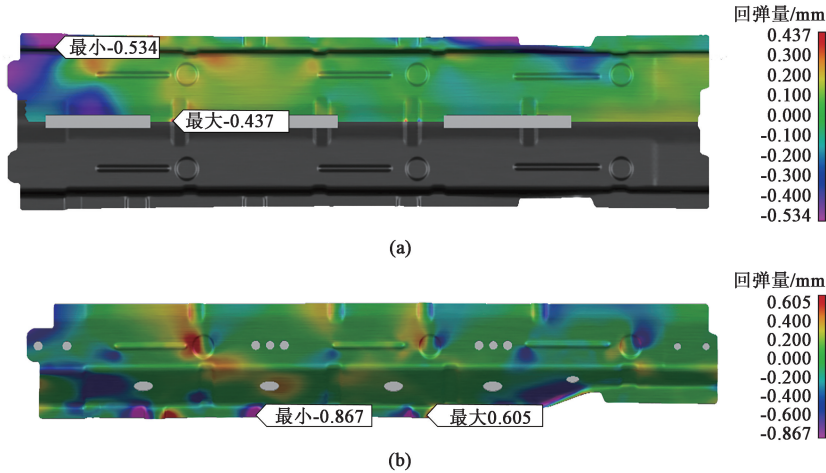


图 12 补偿迭代后左边梁 (a) 和右边梁 (b) 的最大回弹量

Fig. 12 Maximum springback amounts of left rail (a) and right rail (b) after compensation iteration

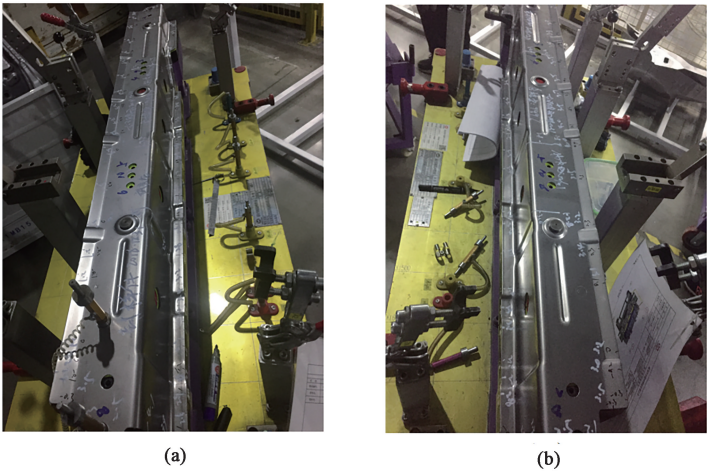


图 13 左边梁 (a) 和右边梁 (b) 在检具上检测尺寸

Fig. 13 Inspection of left rail (a) and right rail (b) dimensions on checking fixture

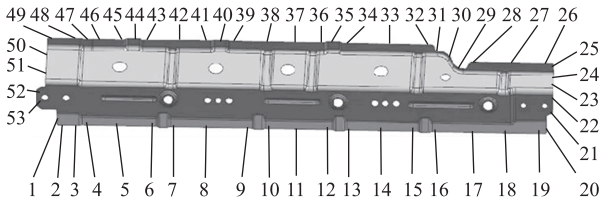


图 14 测量部位示意图

Fig. 14 Schematic diagram of measurement positions

7 结论

(1) 根据汽车前地板左右边梁冲压成形及回弹模拟结果可知，制件存在开裂风险，且最后一序切断处法兰面的回弹量超差最大。由 Autoform 进行模拟，通过控制单一变量法得到了 4 个工艺参数的合理取值范围：压边力为 500~2000 kN、摩擦因数为

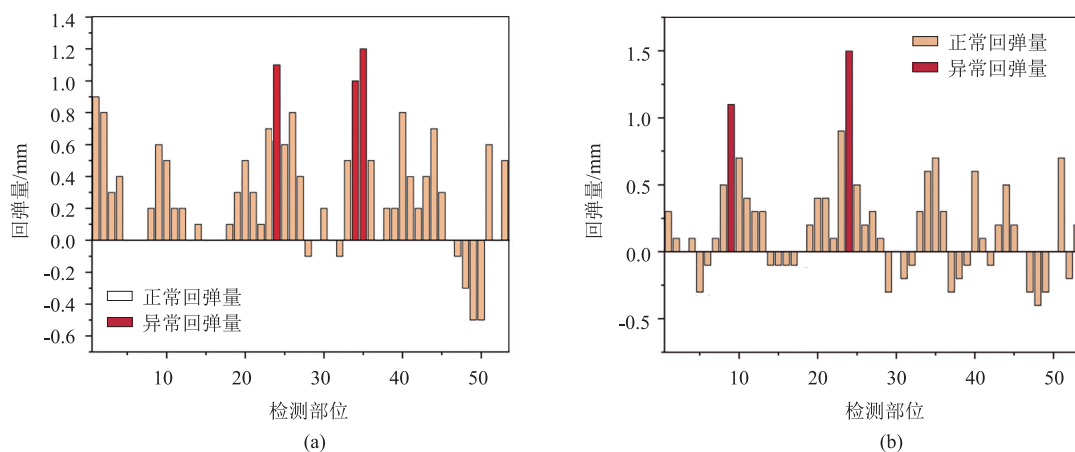


图15 前地板左边梁(a)和右边梁(b)的回弹检测数据统计

Fig. 15 Statistics of rebound detection data of left rail (a) and right rail (b) for front floor

0.13~0.16、模具间隙为1~2.5 mm、冲压速度为100~500 mm·s⁻¹。

(2) 根据各工艺参数的合理取值范围,设计正交试验,得到优化后的冲压工艺参数:压边力为1000 kN、摩擦因数为0.13、冲压速度为100 mm·s⁻¹、模具间隙为1.5 mm。使用优化后的工艺参数进行模拟,结果显示制件最大减薄率由24.4%降低至20.6%,通过成形极限图可知,消除了拉延件的潜在开裂风险,也使OP40中间切断处的最大回弹量有了明显的下降趋势。同时,也排除了冲压速度对成形质量目标的不显著影响。

(3) 通过工艺参数的优化和部分模具型面回弹补偿方法,在对模具部分型面进行3次迭代补偿后,使最大回弹量从最开始的3.823 mm降低至左边梁0.534 mm、右边梁0.867 mm,满足了尺寸精度要求。通过首轮试模得到制件产品无开裂风险,产品回弹尺寸的合格率为:前地板左边梁为94.33%,前地板右边梁为96.23%。验证了优化工艺参数和模具型面部分补偿法的正确性和有效性,对解决先进高强钢材料应用到汽车前地板左右边梁解决同类问题提供了指导和借鉴。

参考文献:

- [1] 王存宇, 杨洁, 常颖, 等. 先进高强度汽车钢的发展趋势与挑战[J]. 钢铁, 2019, 54(2): 1-6.
Wang C Y, Yang J, Chang Y, et al. Development trend and challenge of advanced high strength automobile steels [J]. Iron and Steel, 2019, 54(2): 1-6.
- [2] 吝章国. 先进高强度汽车用钢板研究进展与技术应用现状[J]. 河北冶金, 2016(1): 1-7.
Lin Z G. Research progress and present technique application situ-

ation of advanced high-strength automobile steel sheet [J]. Hebei Metallurgy, 2016(1): 1-7.

- [3] 晏佳伟. QP钢冲压回弹预测模型研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
Yan J W. Research on Prediction Model of QP Steel Stamping Rebound [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [4] Erdogan M, Tekeli S. The effect of martensite volume fraction and particle size on the tensile properties of a surface-carburized AISI 8620 steel with a dual-phase core microstructure [J]. Materials Characterization, 2002, 49(5): 445-454.
- [5] 冯阳阳. 先进高强度双相钢弯扭复合回弹评价与补偿控制研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2023.
Feng Y Y. Research on Evaluation and Compensation Control of Bending-torsion Composite Elastic-plastic Behavior of Advanced High-strength Duplex Steel [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2023.
- [6] Min K C, Huh H. Effect of punch speed on amount of springback in U-bending process of auto-body steel sheets [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 963-968.
- [7] 郑学斌, 韩龙帅, 李学涛, 等. DP780双相钢U弯回弹预测影响因素研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(6): 197-206.
Zheng X B, Han L S, Li X T, et al. Study on influencing factors of U-bending springback prediction of DP780 dual-phase steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(6): 197-206.
- [8] 阳德森. 基于有限元法的盒形件拉深回弹分析及其控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
Yang D S. Analysis and Control of Drawing Springback of Box Part Based on FEM [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [9] Du C Q, Zhang L, Wang N M. Springback prediction in sheet forming simulation [J]. SAE transactions, 1994, 103: 707-717.
- [10] 罗征志. 基于数值模拟的板料翻边成型回弹研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
Luo Z Z. The Study of Flanging Springback Based on the FEM

[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.

[11] 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.

[12] 戴洪. 前纵梁高强激光拼焊板全工序成形及回弹控制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

Dai H. Research on the Full Process Forming and Backward Deformation Control of High-strength Laser-struck Welded Plate for Front Cross Beam [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[13] 乐起,王玮珉,胡志力,等. 某高强钢汽车控制臂冲压成形工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (12): 47-54.

Yue Q, Wang W M, Hu Z L, et al. Research on stamping process of a high strength steel automobile spring arm [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (12): 47-54.

[14] 余天明,李颂,兰巍,等. 激光拼焊板制车门内板冲压成形数值仿真 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (15): 46-53.

Yu T M, Li S, Lan W, et al. Numerical simulation of formability of tailor welded blanks for auto door inner panel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (15): 46-53.

[15] 郑燕萍,王列亮,沈思琳. 板料冲压成形过程摩擦特性数值仿真 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (23): 79-85.

Zheng Y P, Wang L L, Shen S L. Simulation of friction characteristics in sheet metal stamping forming [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (23): 79-85.

[16] 韦韡,姚佐平,李开文,等. 基于 Autoform 的汽车侧围回弹补偿分析 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (3): 172-178.

Wei W, Yao Z P, Li K W, et al. Analysis on compensation for spring back of auto-body side based on autoform [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (3): 172-178.

[17] 冯毅,万鑫铭,周佳,等. 汽车用先进高强钢板材断裂性能研究进展 [J]. 汽车工程学报, 2023, 13 (3): 273-297.

Feng Y, Wan X M, Zhou J, et al. Research progress on fracture properties of advanced high-strength steel sheet for automobiles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2023, 13 (3): 273-297.

[18] 蒋磊,张雄飞,王龙,等. 基于变压边力的侧围外板成形研究 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (6): 157-163.

Jiang L, Zhang X F, Wang L, et al. Forming of side outer panel based on variable blank holder force [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12 (6): 157-163.

[19] 伍鹏宇,唐福农,裴劲. 正交试验设计方法在工艺方案设计中的应用 [J]. 兵工自动化, 2024, 43 (5): 17-20.

Wu P Y, Tang F N, Pei J. Application of orthogonal experimental design method in process scheme design [J]. Ordnance Industry Automation, 2024, 43 (5): 17-20.

[20] 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.

《汽车前轴锻件 工艺规范》等 3 项行业标准发布信息

2025 年由全国锻压标准化技术委员会组织制定的《汽车前轴锻件 工艺规范》、《轨道交通装备 钢质模锻件 通用技术规范》、《汽车变速器变档齿轮复合精密锻件 工艺规范》3 项行业标准正式发布, 相关信息见表 1。

请各相关企业积极执行新的行业标准。欲购买标准文本者, 可与全国锻压标准化技术委员会秘书处联系。

表 1 《汽车前轴锻件 工艺规范》等 3 项行业标准发布信息

序号	标准号	标准名称	发布日期	实施日期
1	JB/T 14896—2025	汽车前轴锻件 工艺规范	2025-04-10	2025-11-01
2	JB/T 14894—2025	轨道交通装备 钢质模锻件 通用技术规范	2025-04-10	2025-11-01
3	JB/T 14895—2025	汽车变速器变档齿轮复合精密锻件 工艺规范	2025-04-10	2025-11-01

通信地址: 北京市海淀区学清路 18 号全国锻压标准化技术委员会秘书处 邮 编: 100083
电话: 010-62920652、010-82415085 E-mail: duanya2005@126.com 联系人: 魏 巍
全国锻压标准化技术委员会秘书处