

大长宽比零件尺寸回弹分析及控制方法

颜丹丹¹, 赵晶石², 潘远安¹

(1. 长春汽车职业技术大学 电气工程学院, 吉林 长春 130013;
2. 中国第一汽车集团有限公司解放汽车分公司, 吉林 长春 130011)

摘要: 为解决商用车风窗外板造型长宽比悬殊、回弹大, 且尺寸精度对白车身总成精度影响大的问题, 以某商用车风窗外板实际生产回弹问题为例, 通过 Autoform 对冲压零件产品工艺过程进行回弹分析, 确定工序件的回弹趋势, 在拉延工序的相关区域进行最大值 2.22 mm 的回弹补偿, 并通过模拟分析验证补偿结果。结果表明: 补偿后产品在检具夹持的状态下零件全部达到理论公差值以内。现场调试控制拉延的研配着色和板料流入量等因素条件与 CAE 仿真一致, 实际生产零件的回弹与模拟仿真结果也一致。生产实践证明, 通过 CAE 模拟仿真可以有效控制和调整长宽比较大的冲压风窗外板零件的回弹问题。

关键词: 冲压; 风窗外板; 回弹; 长宽比; 拉延

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.07.011

中图分类号: TG386.3⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 07-0082-06

Dimensional springback analysis and control method for large aspect ratio parts

Yan Dandan¹, Zhao Jingshi², Pan Yuan'an¹

(1. School of Electrical Engineering, Changchun Automobile Industry University, Changchun 130013, China;
2. FAW JieFang Automotive Co., Ltd., Changchun 130011, China)

Abstract: In order to solve the problem that the windshield outer panel of a commercial vehicle has a large aspect ratio, large springback, and the dimensional accuracy has a great impact on the accuracy of body-in-white assembly, for the springback problem in actual production of a commercial vehicle windshield outer panel, the springback analysis on the stamping process of part was conducted by Autoform, and the springback trend of process parts was determined. Then, the springback compensation with a maximum value of 2.22 mm was given in the relevant area of the drawing process, and the compensation results were verified by simulation analysis. The results show that after compensation, all parts are within theoretical tolerance value in the fixture-clamped state. The on-site debugging ensures that the drawbead contact pattern, sheet metal inflow and other factors of drawing are consistent with the CAE simulation, and the springback of actual produced parts is also consistent with the simulation result. Thus, the production practice proves that CAE simulation can effectively control and adjust the springback problem of stamping windshield outer panel parts with a large aspect ratio.

Key words: stamping; windshield outer panel; springback; aspect ratio; drawing

随着我国商用车的不断发展, 各车企竞争日益激烈, 人们对商用车的质量和尺寸精度的要求也随之提高, 福田、东风、江淮、长安、一汽等车企开展了一系列研究, 其中板料的起皱、开裂、缩颈、回弹等问

题是冲压工艺急需解决的问题, 也是重点攻克的问题^[1-3]。起皱、开裂、缩颈缺陷往往可通过材料、工艺等消除^[4-6], 而尺寸回弹问题则由于影响因素过多而无法彻底解决^[7-9]。冉奥阳等^[10]基于 Autoform 对发动机罩内板进行了工艺优化和回弹补偿, 有效减少了调试时间与次数。郭涛^[11]以翼子板为例开展了全型面回弹补偿技术的研究, 实现高效产出合格件。杜武昌和唐远柱^[12]借助 Autoform 软件实现了全工序模拟实际生产, 从而确定各影响因素, 控制了回弹问题。这些研究的载体尺寸较小或长宽比较小, 回弹控制较为容易, 而研究大尺寸冲压件——商用车风窗外板的回弹问题并不常见, 其回弹控制的难度较大。

收稿日期: 2024-07-10; **修订日期:** 2024-10-15

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目 (JKH20251907KJ); 中国汽车工业协会职业技术课题 (2024QX370121); 长春汽车职业技术大学校级科研课题 (XJKY202412)

作者简介: 颜丹丹 (1982-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: 49364102@qq.com

通信作者: 潘远安 (1983-), 男, 硕士, 正高级工程师

E-mail: 116521719@qq.com

风窗板在商用车整车的质量评审中属于外覆盖件，是驾驶室总成外观一级可见区域，其结构相对简单，但从冲压工艺角度来讲，该零件设计的长宽比高达 9.04，且两侧缺少造型约束，导致产品刚性不足，如何控制其回弹、保证尺寸精度是一大难题。本文通过展示该零件控制尺寸精度的解决方案、过程和验证结果，证实了利用 CAE 模拟分析可以解决长宽比较大的零件的回弹问题，保证零件的顺利装配和整车生产。

1 产品信息描述

用于模拟分析的材料性能参数为屈服强度、抗拉强度、硬化指数、塑性应变比等，某车型风窗外板的各项参数如表 1 所示。产品造型如图 1 所示，可直观看出零件的两侧无任何凹凸造型设计，型面较为平滑。

表 1 某车型风窗外板零件产品信息
Table 1 Product information of a vehicle windshield outer panel part

材料	料厚/mm	型面公差/ mm	长度/mm	宽度/mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	硬化指数	塑性应变比
H180 冷轧钢板	1.00	±0.70	2116	234	228	356	0.19	1.60

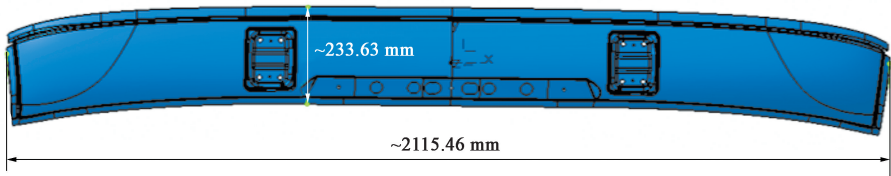


图 1 某车型内窗外板零件实体造型图
Fig. 1 3D solid model drawing of a vehicle windshield outer panel part

2 工艺排布及缺陷分析

该零件的成形工艺共 4 工序：拉伸→冲孔→修边→整形，从经验上分析，该零件回弹较为严重，并且该零件为外观件，尺寸精度差会导致焊接后的褶皱等问题，影响漆后整车外观。零件的回弹主要产生在拉伸工序上，零件拉伸造型设计决定了零件整体的回弹趋势和大小，故针对本零件的回弹，可以从拉伸回弹稳定性、拉伸及整形工序回弹补偿量 3 个方面进行分析和整改。

2.1 拉伸回弹稳定性设计

根据钢板的材料性能，钢板充分拉伸变形后才会具备较好的回弹稳定性，对本零件来说，减薄率必须达到 4% 以上。拉伸工序设计中要求在拉伸过程中零件须充分胀型，减薄率达标。CAE 模拟分析发现，由于产品造型的限制，要达到上述减薄率，零件局部 R 角会出现开裂现象，需在零件相应区域（图 2 所示三角框内）制作“过拉伸”以保证安全裕度。然而，“过拉伸”量越大，整形后回弹量越大，因此，需通过多轮 CAE 模拟确定最合适的“过拉伸”造型。

通过对零件数轮“过拉伸”造型优化及模拟验

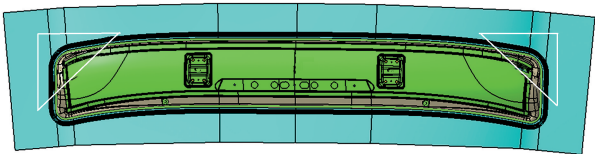


图 2 拉伸工艺造型
Fig. 2 Modeling for drawing process

证，将“过拉伸”造型量最大值设置为 3.20 mm，可以保证 A 面减薄率达到 4% 以上且安全裕度达标，从而保证拉伸回弹的稳定性。

2.2 拉伸回弹补偿分析

确定拉伸工艺造型后，利用 AF 软件进行全工序回弹模拟分析。在分析及确定回弹补偿量数值的过程中，一般会根据工序件的自由回弹来判断回弹方向和趋势，再根据实际检具 RPS 点夹持后的回弹数据来确定最终回弹补偿量数值，进行回弹补偿。由于修边及冲孔工序不会产生回弹，所以，只关注拉伸及整形工序的回弹值及趋势。从模拟结果中可以看出：自由状态下拉延主要是零件中部及两侧下部有下沉趋势（图 3）；经过整形后，自由回弹变化为零件两侧上部有上扬趋势（图 4）；虚拟实际检具 RPS 点在夹持状态下零件回弹最大值为 3.55 mm，与整形后数据相比略有变化，但基本方向一致（图 5）。

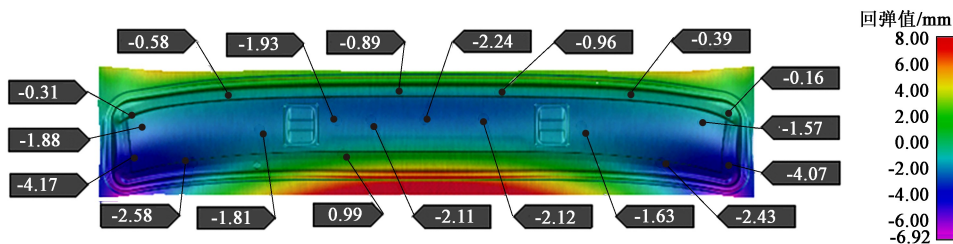


图 3 拉延工序零件自由回弹值

Fig. 3 Free springback amounts of part in drawing process

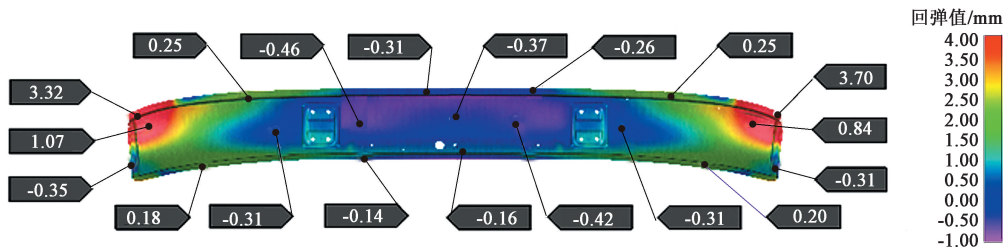


图 4 整形工序零件自由回弹值

Fig. 4 Free springback amounts of part in restriking process

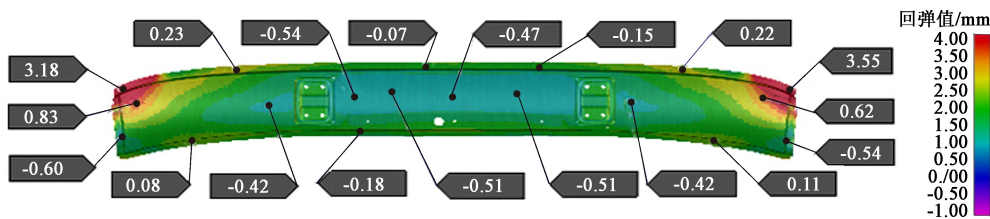


图 5 检具夹持状态下零件回弹值

Fig. 5 Springback amounts of part under inspection fixture clamping

2.3 回弹补偿方案

过往冲压件回弹补偿案例中,在拉延工序上进行回弹补偿效果最佳,因此,根据上述模拟结果并结合过往工程经验,确定拉延工序两侧上角 A 区域为回弹补偿区域(图 6),对其进行 A 面重构,经过反复迭代确定最终补偿值,得到设计布局(Design Layout, DL)图。其中,截面 A 区域的最大回弹补偿值较原型面降低 2.22 mm,逐渐过渡至 A 区域边界,边界补偿值为零。

2.4 A 面重构质量检查

对产品 A 面重构需保证不能破坏原产品的面品质量,产品 A 面均为为曲率二阶连续的高要求型面,回弹补偿后面型面依然需要满足曲率二阶连续。重构前型面曲率检查结果如图 7a 和图 7b 所示。可以看出,曲率均匀变化,斑马线检测无断点,二阶连续。回弹补偿重构后面型面曲率检查结果如图 7c 和图 7d 所示,曲率依然二阶连续,斑马线检测无断点,满

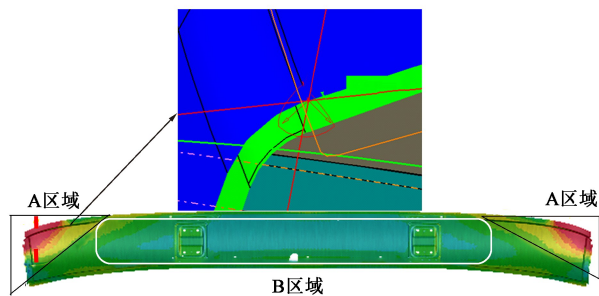


图 6 回弹补偿区域及 DL 图

Fig. 6 Springback compensation zones and DL drawing

足面品质量需求。

2.5 回弹补偿效果校核

将整形补偿后的零件重构型面再次使用 CAE 软件进行校核,如图 8、图 9 和图 10 所示。从结果中可以看出:拉延工序和整形工序的回弹情况均有改善,且在检具夹持状态下,整形后零件检测部分均已全部恢复至理论公差值以内。

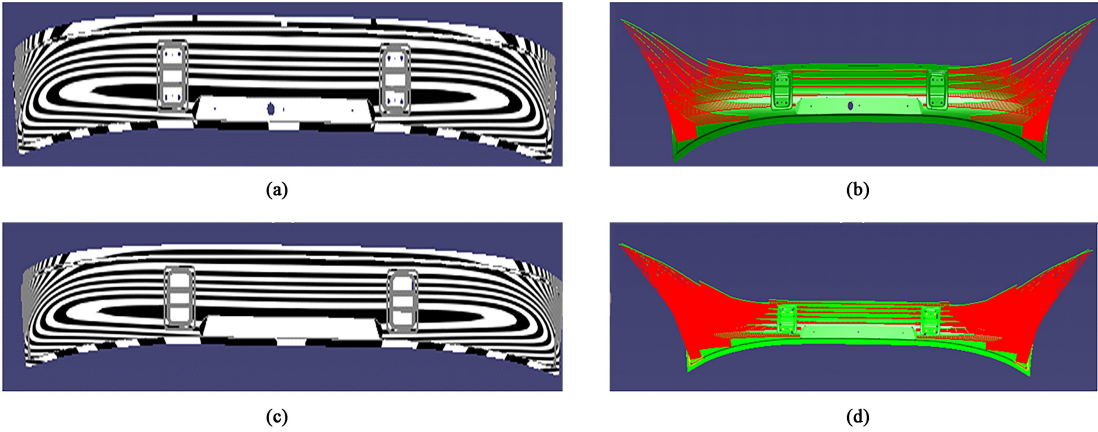


图 7 回弹补偿前后数模斑马线检测 results 和截面曲率检测结果

(a) 回弹补偿前, 斑马线检测 (b) 回弹补偿前, 曲率检测 (c) 回弹补偿后, 斑马线检测 (d) 回弹补偿后, 曲率检测

Fig. 7 Zebra-stripe inspection results and cross-section curvature inspection results of CAD model before and after springback compensation

(a) Before springback compensation, zebra-stripe inspection (b) Before springback compensation, curvature inspection
(c) After springback compensation, zebra-stripe inspection (d) After springback compensation, curvature inspection

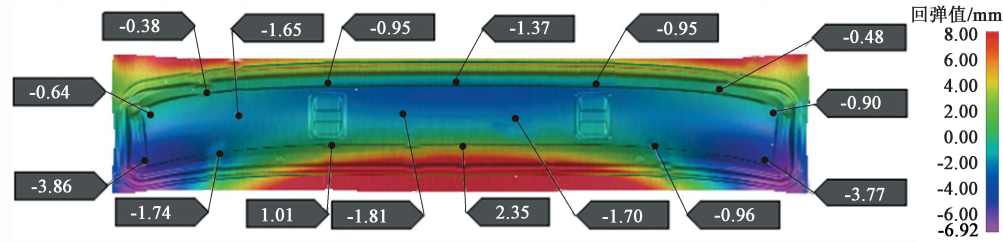


图 8 整形补偿后拉伸工序零件自由回弹值

Fig. 8 Free springback amounts of part in drawing process after restrike compensation

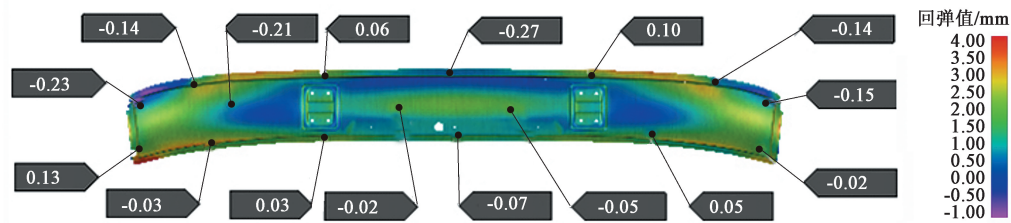


图 9 整形补偿后整形工序零件自由回弹值

Fig. 9 Free springback amounts of part in restriking process after restrike compensation

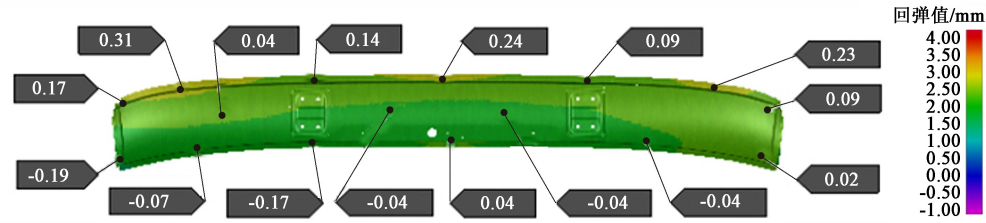


图 10 整形补偿后检具夹持状态下零件回弹值

Fig. 10 Springback amounts of part under inspection fixture clamping after restrike compensation

2.6 现场调试

CAE 模拟理论分析、方案制定和方案校核完毕

后, 生产现场的调试工作同样重要。实际工装参数与理论整改保持严格的一致性, 是保证达成理论设

计结果的关键。首先, 拉延着色必须按照外板件研配标准来研配, 着色率达到 95% 以上, 虚实着色必须严格分区域实施, 以保证每次成形的稳定性, 如图 11 所示。

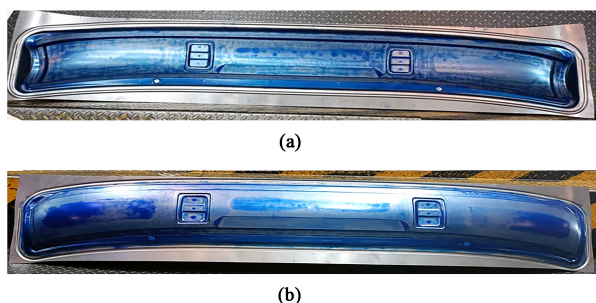


图 11 凸模 (a) 与凹模 (b) 的着色图

Fig. 11 Colored diagrams of punch (a) and die (b)

其次, 拉延板料流入量是现场调试的重要控制部分。制件破裂起皱、回弹、滑移线与冲击线等缺陷对流入量均十分敏感, 需要实际现场中尽量调整板料流入量与模拟分析数值一致, 保证板料达成理论状态的回弹值。图 12 显示出板料理论进料与实际进料的测量值, 从测量值的对比结果看, 实际值略大于理论值, 但总体趋势基本一致, 唯一相差较大的位置是在制件左上角, 其理论流入量为 19.17 mm, 而实际流入量为 22.80 mm, 两者相差 3.63 mm, 相对偏差超过 15.9%。但这并不影响整体控制板料的流入量的趋势, 恰好与右上角的流入量的相对偏差值

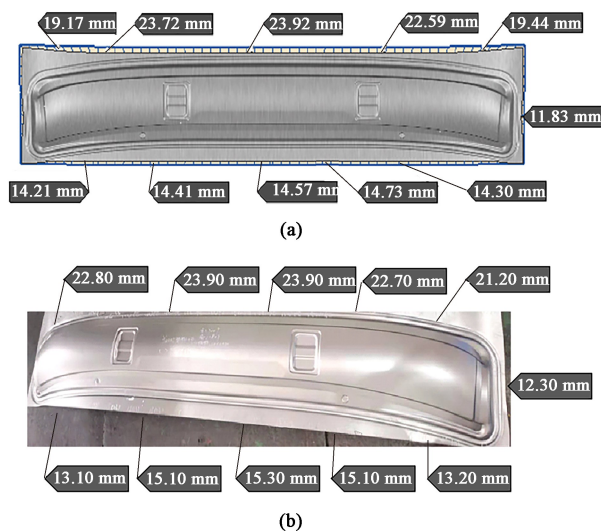


图 12 理论 (a) 和实际 (b) 板料流入量对比

Fig. 12 Comparison of theoretical (a) and actual (b) sheet metal inflow

形成一个对比, 以便后期微量修正和实际经验存储。

3 实际出件尺寸确认

采用上述方案对大长宽比的前风窗外板进行整改, 首轮出件送质检部检测: A 型面尺寸基本达成公差范围, 产品零件两侧上角补偿目的达成, 初步完成零件回弹尺寸整改。个别位置如左下角及左上侧中部分别出现下沉 1.30 mm 及上浮 1.30 mm 的超差区域, 如图 13 所示, 其中 D 为偏差值。

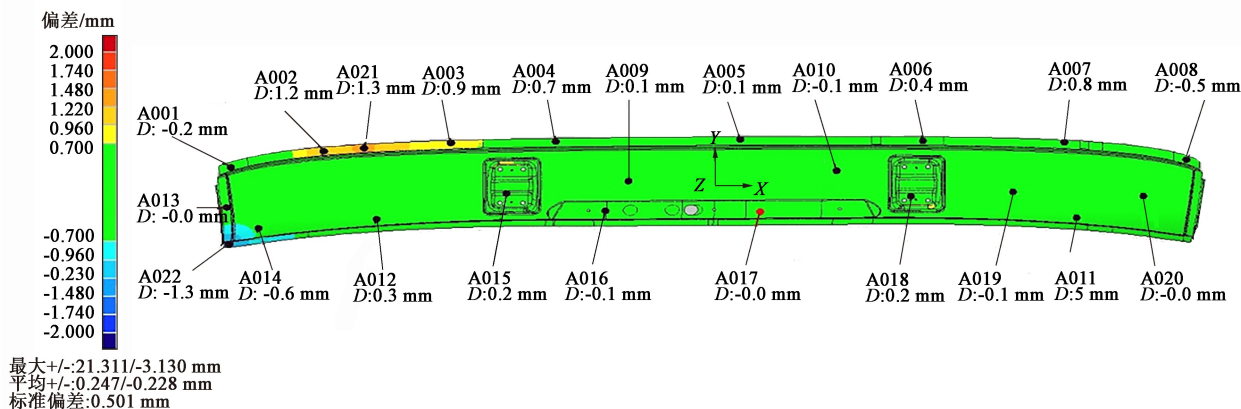


图 13 首轮调试零件尺寸精度

Fig. 13 Dimensional accuracy of part debugged in the first round

针对零件左右不对称问题进行分析, 认为零件在实际生产调试过程中两侧进料不均会引起尺寸和形变的不一, 尤其是左上角的实际流入量大于理论流入量。故而对问题区域拉延进料流入量进行再

次调整, 相对偏差在 8% 以内, 使制件左右对称。调整方法是将对角处的拉延筋 R 角缩小来控制走料。整改完成后再次对零件进行测量, 尺寸检测数据达到公差要求的范围以内, 如图 14 所示, 至此完

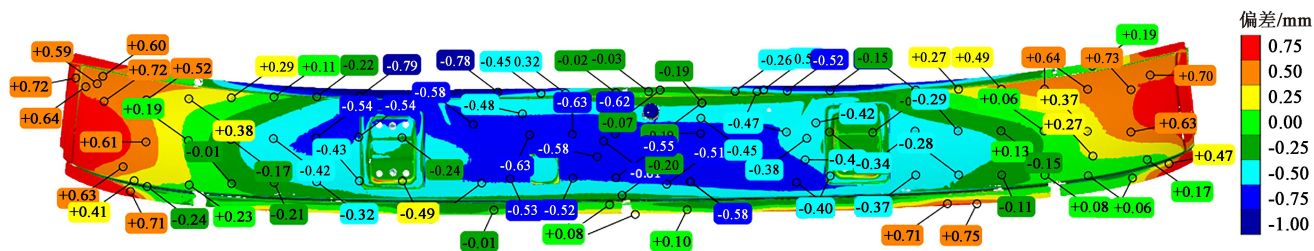


图14 再次整改后零件尺寸精度

Fig. 14 Dimensional accuracy of part after re-rectification

成该件尺寸精度育成。

4 结论

(1) 以前风窗外板件为例说明了长宽比高达9的制件可以通过模拟仿真对其进行较精确的回弹补偿, 从而达成控制尺寸在公差以内的目标。

(2) 案例中前风窗外板件可以通过控制拉延工序的板料流入量与模拟仿真流入量的相对偏差在8%以内, 保证模拟仿真结果与实际测量相一致。

(3) 采用CAE分析长宽比高的零件, 多次造型重构和回弹补偿分析, 可以给出拉延工序回弹补偿的建议值, 并且通过调试可以达到消除回弹的目的。

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 of automobile left and right side beam stiffeners [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (12): 72-80.
- [2] 黎冰华. 汽车轮罩冲压成形质量控制方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
Li B H. Research on Forming Quality Control Method of Automobile Wheel Cover [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [3] 郝浩然. 汽车支架冲压成形优化及回弹补偿研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2024.
Hao H R. Research on Stamping Forming Optimization and Springback Compensation of Automobile Bracket [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2024.
- [4] 宁海涛. 汽车覆盖件拉延缩颈开裂改善中的典型误区 [J]. 汽车工艺师, 2024 (4): 34-39.
Ning H T. Typical misunderstanding in improving the cracking of drawing neck of automobile cladding [J]. Auto Manufacturing Engineer, 2024 (4): 34-39.
- [5] 曾平川, 杨运良, 杜敏. 汽车冲压件缩颈、开裂原因分析及解决方案研究 [J]. 锻造与冲压, 2023 (24): 57-60.
Zeng P C, Yang Y L, Du M. Research on the causes of necking and cracking of automobile stamping parts and its solutions [J]. Forging & Metalforming, 2023 (24): 57-60.
- [6] 姬伟, 杜开伟. 汽车冲压外覆盖件缺陷及过程质量控制 [J]. 锻造与冲压, 2022 (14): 48-51.
Ji W, Du K W. Defects and process quality control of automobile stamping outer covering [J]. Forging & Metalforming, 2022 (14): 48-51.
- [7] 王强, 周卫国, 伍二, 等. 铝合金全框门外板的回弹分析与补偿 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (5): 67-75.
Wang Q, Zhou W G, Wu R, et al. Springback analysis and compensation of aluminum alloy full frame exterior plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (5): 67-75.
- [8] 陈文锋, 凌建兵, 周雪峰. 翼子板A柱型面回弹调试整改方法 [J]. 模具工业, 2024, 50 (2): 25-31.
Chen W F, Ling J B, Zhou X F. Method for adjustment and rectification of springback of A pillar profile of fender plate [J]. Die & Mould Industry, 2024, 50 (2): 25-31.
- [9] 张胜利, 丁顺风, 刘庆, 等. 发动机盖外板非典型回弹补偿方案研究 [J]. 模具工业, 2025, 51 (1): 14-21.
Zhang S L, Ding S F, Liu Q, et al. Research on atypical springback compensation scheme of engine hood outer plate [J]. Die & Mould Industry, 2025, 51 (1): 14-21.
- [10] 冉奥阳, 龚熙, 王大鹏, 等. 基于Autoform的机罩内板稳健性工艺优化与回弹补偿 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (6): 61-68.
Ran A Y, Gong X, Wang D P, et al. Robustness process optimization and springback compensation for hood inner panel based on Autoform [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (6): 61-68.
- [11] 郭涛. 全型面回弹补偿技术研究及应用 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (4): 82-89.
Guo T. Study and application on full surface springback compensation technology [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (4): 82-89.
- [12] 杜武昌, 唐远柱. 汽车车门外板全工序回弹分析与补偿的应用 [J]. 模具制造, 2020, 20 (5): 31-34.
Du W C, Tang Y Z. Application of springback analysis and compensation for the whole process of automobile exterior plate [J]. Die & Mould Manufacture, 2020, 20 (5): 31-34.