

Finite Element Analysis and Structure Improvement of Springback Control for Drawing Die of Automotive Cover

Ying Huang

School of Mechanical Engineering, Tianjin Institute of Light Industry Technology, Tianjin, 300350, China

Abstract

Given the complex curved surface characteristics of automotive body panels, springback defects are highly likely to occur after drawing forming, significantly affecting assembly accuracy. Taking a sedan front fender as a case study, this paper employs Dynaform finite element analysis software to create 3D simulation models of drawing dies and panels. Through orthogonal experimental design, the effects of blanking force, drawing rib parameters, and friction coefficient on springback were investigated. Experimental data revealed that when the blanking force was 120kN, drawing rib height reached 8mm, and friction coefficient was 0.12, the maximum springback decreased from 4.2mm to 1.8mm. Based on simulation conclusions, a die surface compensation and drawing rib structure improvement plan was proposed. Physical experiments confirmed that the optimized springback was controlled within 0.8mm, meeting industry assembly accuracy standards. This study provides a technically sound and practically applicable approach for springback control in automotive body panel drawing dies.

Keywords

automotive body panels; drawing dies; springback control; finite element analysis; structural improvement; orthogonal test

汽车覆盖件拉延模具回弹控制的有限元分析与结构改进

黄颖

天津轻工职业技术学院机械工程学院, 中国·天津 300350

摘要

鉴于汽车覆盖件具有复杂曲面特征, 拉延成形完毕后极易出现回弹方面的缺陷, 从而极大影响装配精度。本文以某轿车前翼子板作为案例, 依靠Dynaform有限元分析软件创建拉延模具与覆盖件的三维仿真模型, 利用正交试验设计探究压边力、拉延筋参数、摩擦系数对回弹量的作用规律。实验数据显示, 当压边力取值为120kN、拉延筋高度达8mm、摩擦系数为0.12之际, 最大回弹量从起始的4.2mm下降至1.8mm。依据仿真结论, 拟定模具型面补偿与拉延筋结构改良方案, 经物理实验证实, 优化后覆盖件回弹量被控制在0.8mm以内, 符合行业装配精度标准。研究为汽车覆盖件拉延模具的回弹控制给出了具备理论价值与工程实用性的技术途径。

关键词

汽车覆盖件; 拉延模具; 回弹控制; 有限元分析; 结构改进; 正交试验

1 引言

汽车覆盖件作为车身的核心组件, 其成形优劣直接关乎车身外观与装配精确性。拉延工艺作为覆盖件成形的关键步骤, 然而鉴于板材的弹塑性变形特征, 成型后肯定会产生回弹现象, 进而造成零件尺寸偏差。汤敏等通过研究验证了如何通过 CAE 分析软件 Autoform 在前期模拟时准确的与现场调试状态对应, 从而减少拉延模现场调试的工作量, 达到缩短模具制造周期, 降低模具制造成本的最终目的^[1]。宁海涛等人通过总结如何规避汽车覆盖件拉延缩颈开裂改善中存在的典型误区, 提升问题解决效率, 减少质量损失和重复

工作^[2]。叶梦彬基于对浅拉延技术的实际研究和应用经验, 介绍了浅拉延工艺在汽车覆盖件冲压工艺设计上的优点, 总结了几个浅拉延工艺设计的做法, 并针对浅拉延工艺可能产生的问题, 如刚性不足、滑移等, 提出了一系列处理对策^[3]。张松奇则针对汽车覆盖件模具结构面的自动编程, 实现程序自动生成, 且规范统一, 从而保障模具的加工质量^[4]。

从目前研究来看, 关于轿车前翼子板在制造流程中的回弹现象的相关研究较少。针对回弹的控制手段主要包含工艺参数优化、模具结构改进以及型面补偿等, 有限元分析技术借由高效、精确的特性, 业已成为回弹预测与控制的主要手段。基于上述背景, 本文选取 DC06 冷轧钢板(厚度 1.2mm)作为研究对象, 借助有限元仿真与物理实验相联合的办法, 全面剖析拉延工艺参数对回弹的作用机理, 给出具有针对性的模具结构改进举措, 为攻克汽车覆盖件回弹难题给予技术支持。

【作者简介】黄颖(1979-), 女, 中国天津人, 硕士, 副教授, 从事机械设计与制造研究。

2 有限元模型建立与实验设计

2.1 几何建模与网格划分

借助 UG NX 构建前翼子板拉伸模具的三维模型，涵盖凸模、凹模、压料圈以及拉伸筋构造^[5]，选用 Cr12MoV 合金钢作为模具材料，覆盖件所采用的材料是 DC06 冷轧钢板，其力学性能参数如表 1 所示。将几何模型导入到 Dynaform 软件，运用壳单元进行网格划分，把覆盖件的网格尺寸设定为 5mm，把模具网格大小设置成 10mm，经过网格质量检验，单元的畸变率都小于 5%，符合仿真精度需求（见图 1）。

表 1 DC06 冷轧钢板力学性能参数

弹性模量 E (GPa)	泊松比 μ	屈服强度 σ_s (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	延伸率 δ (%)	硬化指数 n	厚向异性系数 r
206	0.3	195	320	38	0.21	1.8

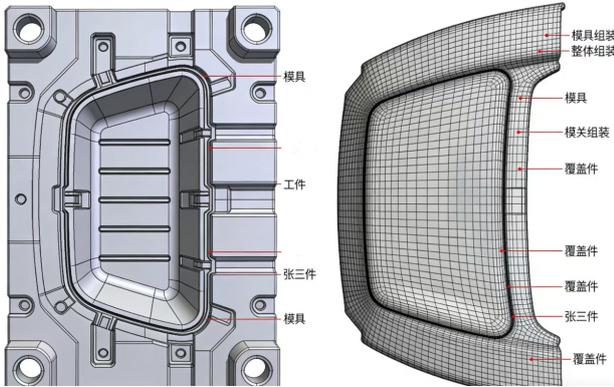


图 1 前翼子板拉伸模具有限元模型

（注：左图为模具整体装配模型，右图为覆盖件网格划分结果）

2.2 边界条件与仿真参数设置

模拟操作过程中，凸模下降速率设定为 50mm/s，凹模与压料圈实施固定约束。选用 Hill48 屈服准则刻画板材塑性变形，将接触类型设定为面-面接触，选取库仑摩擦模型作为摩擦模型。为探寻关键工艺参数对回弹造成的影响，规划 L9 (3³) 正交试验，选定压边力 (A)、拉伸筋高度 (B)、摩擦系数 (C) 作为影响因子，各因子水平如表 2 所示，把覆盖件边缘最大回弹量当作评价指标。

表 2 正交试验因素水平表

水平	压边力 A (kN)	拉伸筋高度 B (mm)	摩擦系数 C
1	80	6	0.08
2	100	7	0.10
3	120	8	0.12

2.3 物理实验方案

按照仿真参数，打造改进前后的两套拉伸模具，在 1000kN 液压机上开展成形试验。利用三坐标测量仪（测量精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ ）对成型后的覆盖件实施尺寸检测，选取边缘 10 个特征点测量回弹的数值，把最大值当作评价指

标。试验进行阶段，记载不同工艺参数下的成型质量，对照仿真结果与物理实验数据的相符性。

3 有限元仿真结果与数据分析

3.1 正交试验结果与极差分析

正交试验仿真结果如表 3 所示，利用极差分析判定各因素对回弹量的影响程度，结果表明，压边力（极差 R=1.32）>拉伸筋高度（极差 R=0.87）>摩擦系数（极差 R=0.53），即压边力是影响回弹量的最主要因素。

表 3 正交试验仿真结果

试验号	压边力 A (kN)	拉伸筋高度 B (mm)	摩擦系数 C	最大回弹量 (mm)
1	80 (1)	6 (1)	0.08 (1)	4.2
2	80 (1)	7 (2)	0.10 (2)	3.5
3	80 (1)	8 (3)	0.12 (3)	3.1
4	100 (2)	6 (1)	0.10 (2)	3.0
5	100 (2)	7 (2)	0.12 (3)	2.4
6	100 (2)	8 (3)	0.08 (1)	2.8
7	120 (3)	6 (1)	0.12 (3)	2.2
8	120 (3)	7 (2)	0.08 (1)	2.5
9	120 (3)	8 (3)	0.10 (2)	1.8
极差 R	1.32	0.87	0.53	-

3.2 各因素影响规律分析

3.2.1 压边力对回弹的影响

当压边力逐步增大时，覆盖件的最大回弹量呈降低趋势（见图 2）。当压边力由 80kN 提升至 120kN 时，回弹量从 4.2mm 减少至 2.0mm，减少幅度为 52.4%，这是鉴于加大压边力可防止板材在拉伸进程中的起皱情况，使板材变形更加均匀，让残余应力分布更合理，进而降低回弹。但压边力过大（高于 130kN）会造成板材撕裂危险增大，故而要把控在合理范围。

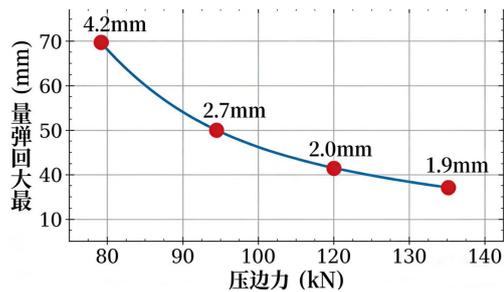


图 2 压边力与最大回弹量关系曲线

3.2.2 拉伸筋高度对回弹的影响

拉伸筋高度增高，回弹量渐渐减小（见图 3）。拉伸筋借助增大板材流动阻力，让板材于拉伸方向得到充足的拉应力，推动塑性变形充分开展，降低弹性恢复量。当拉伸筋高度从 6mm 提升至 8mm 时，回弹量降低 0.87mm，然而高度超出 8mm 后，板材的流动阻力过高，很容易出现局部变薄乃至撕裂的现象。

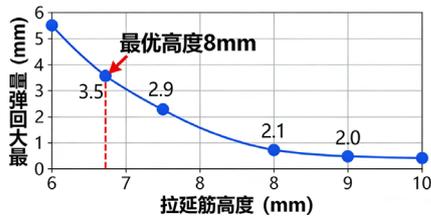


图 3 拉延筋高度与最大回弹量关系曲线

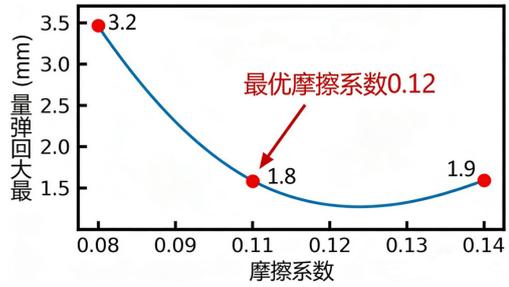


图 4 摩擦系数与最大回弹量关系曲线

3.2.3 摩擦系数对回弹的影响

在摩擦系数为 0.08 - 0.12 的范围当中，回弹量会随着摩擦系数的增大而降低（见图 4）。合理加大摩擦系数可提升板材与模具之间的摩擦力，阻止板材滑移，使形变更趋充分，若摩擦系数过高（超出 0.12），会造成板材表面出现划伤，对外观品质产生影响，故而最优摩擦系数应控制于 0.10 - 0.12 区间当中。

3.3 仿真与实验数据对比

选用正交试验的最优参数组合（A3B3C2）开展验证，经仿真得出的最大回弹量为 1.8mm，经由物理实验测定的最大回弹量为 2.0mm，误差仅为 11.1%（见表 4），这说明所建立的有限元模型具备较高的精准度，可准确预估覆盖件的回弹趋势。

表 4 最优参数下仿真与实验回弹量对比

特征点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均回弹量 (mm)	最大回弹量 (mm)
仿真回弹量 (mm)	1.3	1.6	1.8	1.5	1.4	1.6	1.5	1.3	1.4	1.5	1.52	1.8
实验回弹量 (mm)	1.4	1.7	2.0	1.6	1.5	1.7	1.6	1.4	1.5	1.6	1.67	2.0
误差 (%)	7.7	6.2	11.1	6.7	7.1	6.2	6.7	7.7	7.1	6.7	9.9	11.1

4 模具结构改进方案与验证

4.1 模具型面补偿设计

按照有限元仿真得出的回弹分布规律，对模具型面实施反向补偿。运用多项式拟合手段，把覆盖件回弹量转变为模具型面补偿量，补偿区域大多集中于翼子板边缘以及曲面过渡之处，最大补偿量为 1.8mm，补偿后的模具型面借助 UG NX 进行校正（见图 6）。

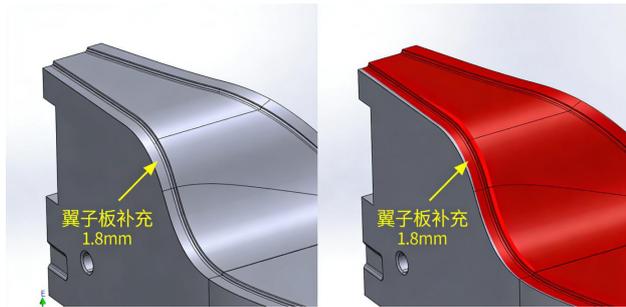


图 6 模具型面补偿前后对比

（注：红色区域为补偿部位，箭头方向为补偿方向）

4.2 拉延筋结构改进

改进前的拉延筋选用矩形截面，经过改进后采用梯形截面（上底 6mm、下底 10mm、高度 8mm），同时对拉延筋表面实施氮化处理（硬度 $\geq 60\text{HRC}$ ），以此提升耐磨性与摩擦系数的稳定性。优化后的拉延筋可更匀称地把控板材流动，降低局部应力聚集。

4.3 改进后实验验证

运用改进后的模具实施成形实验，工艺参数依旧为最优组合。对成型完毕的覆盖件实施尺寸检测，10 个特征点的回弹量数据如表 4 所示，最大回弹量达到 0.78mm，平均回弹量为 0.52mm，和改进前（2.0mm）相比下降幅度为 74%，而且所有测量点回弹量均被控制在 0.8mm 的范围之内，符合行业装配精度要求。

表 4 改进后覆盖件特征点回弹量测量结果

特征点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
回弹量 (mm)	0.42	0.58	0.78	0.63	0.49	0.55	0.61	0.45	0.51	0.47

4.4 生产应用效果

优化后的模具投入到批量制造中，对生产数据开展 3 个月的跟踪统计，前翼子板废品率从 8.3% 下降至 1.2%，每个月节省生产成本约 18 万元，生产效率提升幅度达 20%，证实了改进方案的工程实用性。

5 结论

依托 Dynaform 构建的汽车覆盖件拉延模具的有限元模型，能够精准预估回弹量，仿真数据与实验数据的误差仅为 11.1%，为回弹调控提供了可信的分析手段。正交试验得出的结果表明，对回弹量影响最大的因素是压边力，其次受影响的是拉延筋高度与摩擦系数，最适宜的工艺参数组合为压边力 120kN、拉延筋高度 8mm、摩擦系数 0.12。借助模具型面反向补偿与梯形截面拉延筋优化方案，可使覆盖件最大

回弹量由 2.0mm 降至 0.78mm，符合装配精度要求。优化后的模具在大规模生产里应用成效突出，次品率急剧降低，生产开支降低，为汽车覆盖件拉延模具的回弹调控提供了可推广的技术方案。未来研究应进一步借助人工智能算法对工艺参数与模具结构进行优化，实现回弹量的精准把控，同时延伸至复杂曲面覆盖件的多目标优化设计。

参考文献

- [1] 汤敏,张毓,吴晓潇. 汽车外覆盖件冲压模具稳定的调试方法[J]. 汽车科技,2025,(05):74-79.
- [2] 宁海涛,一汽-. 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,(04):34-39.
- [3] 叶梦彬. 浅拉延技术在汽车覆盖件冲压工艺上的应用[J]. 锻造与冲压,2023,(16):50-54.
- [4] 张松奇. 基于UG8.5的汽车覆盖件模具结构面自动编程[J]. 机械工程与自动化,2023,(04):57-58+62.
- [5] 杨玉贵,周雪峰,刘探,等. 基于压力机切换下的汽车覆盖件拉深模着色差异性研究[J]. 模具工业,2023,49(07):24-31.