

Research on Numerical Simulation of Automotive Panel Stamping and Spring-Back

DUAN Lei¹, LI Zhen¹, MIAO De-hua¹, ZHANG Yang², YU Qiang¹, XUE Yan-long³

1. Tianjin Key Laboratory of High Speed Cutting & Precision Machining, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin, China, 300222

2. Academic Division, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin, China, 300222

3. Tianjin Motor Dies Company Limited Liability, Tianjin, China, 300308

1. dlrock213@163.com

Abstract: Spring-back is an inevitable problem in sheet metal stamping forming, and is the research hot spot and difficulty in this field. Taking the sheet stamping forming finite element theory and the simulation method as foundation, the numerical simulation of stamping and spring-back for roof of automotive was carried out by using the Dynaform software. Based on the simulation results, the forming and displacement distribution of spring-back were analyzed. The result showed that no crackle and wrinkle happened during the course of sheet metal forming, there were some regions sinking on the panel, other rising, and sinking tendency greater than rising. In order to reduce the spring-back, the measure of controlling spring-back was concluded and proposed, and it provided a judgment of process-optimization for forming of automotive panels.

Keywords: automotive panels; stamping; spring-back; simulation; Dynaform

汽车覆盖件冲压成形及回弹数值模拟研究

段磊¹, 黎振¹, 苗德华¹, 张洋², 于强¹, 薛燕龙³

1. 天津职业技术师范大学高速切削与精密加工重点实验室, 天津, 中国, 300222

2. 天津职业技术师范大学教务处, 天津, 中国, 300222

3. 天津汽车模具股份有限公司, 天津, 中国, 300308

1. dlrock213@163.com

【摘要】回弹是汽车覆盖件冲压成形中不可避免的问题,也是该领域研究的热点和难点问题。本文以板料冲压成形有限元理论和仿真方法为基础,利用 Dynaform 软件对某汽车顶盖的拉伸成形和回弹过程进行了有限元数值模拟研究,根据模拟结果对其成形及回弹的位移分布作了分析。结果显示,顶盖在成形过程中没有产生裂纹和起皱,回弹后存在一部分区域向下凹陷,一部分区域向上翘起,其中下陷趋势较上翘明显。为了减小回弹,总结提出了回弹控制措施,为汽车覆盖件冲压成形加工工艺优化提供基本依据。

【关键词】汽车覆盖件; 冲压成形; 回弹; 模拟; Dynaform

1 引言

在汽车覆盖件冲压成形过程中,主要存在3种缺陷:破裂、起皱和回弹。其中,回弹问题是板料冲压成形领域到目前为止还未得到解决的世界难题,特别是在弯曲和浅拉伸成形过程中,回弹问题更为突出。由于零件的

最终形状取决于成形后的回弹量,当回弹量超过允许容差后,必然会使零件的尺寸精度降低,达不到装配的要求^[1]。传统的回弹解决方法往往需要花费大量的时间进行试错逼近,反复修正模具型面来补偿回弹,这就造成了模具调试时间长,加工品质低,制模成本高,且耗费大量的人力和物力。随着汽车工业的不断发展,对覆盖件零件的成形精度提出更高要求。因此,回弹控制是覆盖件成形研究中极其重要的问题。

基金项目: 天津市科技创新专项资金项目(08FDZDZX01900)
天津高校双五科技计划资助项目(SWPY200803)
天津职业技术师范大学科研发展基金资助项目(项目编号 KJ09-001, KYOD08017)

要达到控制冲压件回弹的目的，保证其成形质量和精度，必须准确预测回弹量。目前，应用最广的板料有限元数值模拟技术是研究回弹问题的最有效方法。本文以某汽车顶盖为研究对象，讨论该零件的成形工艺性，利用板料成形仿真软件 DYNIFORM 模拟冲压成形及回弹过程，预测零件实际生产过程中可能出现的回弹量，为模具型面的定量化修正及回弹控制提供参考和依据。

2 有限元数学基础

2.1 冲压成形有限元基本理论

板料冲压成形是一种复杂的力学过程，从数值计算上分析是一个大位移、大转动、大应变、高度非线性问题，涉及几何非线性、材料非线性和复杂的接触非线性^[2]。一般而言，几何非线性有限元方程的建立多从虚功原理出发，直接使用应力与其共轭应变得到，并采用增量法求解。对于变形体本构关系的描述主要有 3 种描述方法：Euler 描述、Lagrange 描述和 Arbitrary Lagrange-Euler (ALE) 有限元法^[3]。在实际数值计算中则一般采用更新拉格朗日法和速率型的本构关系去处理成形过程中的大应变、大转动问题。采用逐级更新 Lagrange 法是弹性有限元基础，在 x_i 坐标下以 t 时刻构形为参考构形的虚功原理为

$$\tau_{ij} \int \delta v_{ji} dV = P_i \int \delta v_i dV + \bar{P}_i \int \delta v_i dA \quad (1)$$

式中： V 、 A 分别为参考构形的体积和表面积； P_i 、 \bar{P}_i 分别为参考构形的体积力率和面积力率； τ_{ij} 为第一类 Kirchhoff 应力率。

假定塑性变形体积不可压缩，可得 τ_{ij} 与 Cauchy 应力 σ_{ij} 的关系为

$$\tau_{ij} = \sigma_{ij}^J - \sigma_{ik} \epsilon_{kj} - \sigma_{kj} \epsilon_{ki} + \sigma_{ik} \nu_{jk} \quad (2)$$

将式(2)和本构关系方程代入式(1)得到单元平衡方程并按常规方法组装成总体刚度方程

$$KD = F \quad (3)$$

板料成形过程是大位移大变形过程，一般采用速率型的本构方程。经典的基于流动理论正交各项异性希尔二次屈服函数的速率型本构方程可表示为

$$\sigma_{ij}^J = D_{ijkl}^{ep} \epsilon_{kl} \quad (4)$$

$$D_{ijkl}^{ep} = D_{ijkl}^e - \frac{D_{ijmn}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{uv}} D_{uvkl}^e}{\frac{\partial f}{\partial \sigma}} \quad (5)$$

$$H \frac{\partial \sigma_{uv}}{\sigma} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{uv}} D_{mnuv}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}}$$

式中： σ_{ij}^J 为 Kirchhoff 应力的 Jaumann 导数； ϵ_{kl} 为应变率； D_{ijkl}^e 为弹性体本构矩阵； H 为硬化参数； $\bar{\sigma}$ 为屈服函数确定的等效应力。

屈服函数为

$$f(\sigma) = \sqrt{\frac{P\sigma_{11}^2 + R\sigma_{22}^2 + PR(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (2Q+1)(P+R)\sigma_{12}^2}{P(R+1)}} \quad (6)$$

其中： P 、 Q 、 R 分别代表材料在 90° 、 45° 、 0° 方向上的各向异性指数。

2.2 回弹计算基本理论

板料成形后的回弹主要表现为整体卸载回弹、切边回弹和局部卸载回弹^[4]。在工件卸载时，有些部位还伴有局部的加载过程，故回弹的模拟比成形过程的模拟更难。回弹模拟的精确度不仅与成形过程的模拟精确度有关，而且还与回弹的模拟方法、有限元算法的选择等有关。

整体卸载回弹计算，传统上有两种，即无模法和有模法。由于无模法的计算效率较高，故选择无模法计算回弹。

无模法即一般的无接触的算法。该方法将回弹当作弹性变形过程，采用增量法求解。在计算开始之前，先将模具与零件分离，代之以与成形终了状态接触条件相对应的反向力学边界条件： $\Delta f = -f$ （其中 f 为成形最后一步相对应的节点接触力），计算至所有等效节点外力趋于零时，即得回弹的结果。由于回弹属于非线性问题，必须反复进行迭代运算，才能得到合理的结果。

3 汽车顶盖成形回弹数值模拟

板料的成形和回弹是两个既相关联又各自独立的过程，通常所说的成形过程一般不包括回弹在内，而完整的冲压成形及回弹仿真过程应包含两个过程：冲压成形（加载）过程的仿真和回弹（卸载）过程仿真。前一步计算是回弹过程模拟的基础，为其提供应力、应变等数据。对于汽车顶盖零件，采用 DYNIFORM

软件作为前后处理工具，用显式算法模拟动态成形过程，然后用隐式算法模拟回弹变形^[5]。

3.1 零件工艺性分析

顶盖零件结构如图 1 所示，为双曲率扁壳形状，尺寸较大，厚度较小，拉延深度较浅，圆角半径较小，其成形缺陷主要以拉延、切边后回弹引起的零件尺寸变化，达不到零件装配精度的要求。根据零件的特点，制定其冲压工艺方案为 3 道工序，即拉延、修边冲孔侧冲孔和翻边整形。在 Unigraphics(UG)中设计该零件的拉延模型如图 2 所示。

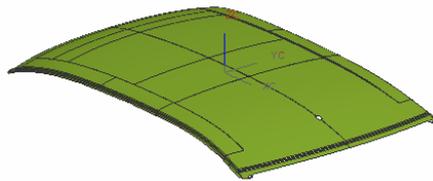


Figure 1. Roof panel part
图 1. 顶盖零件图

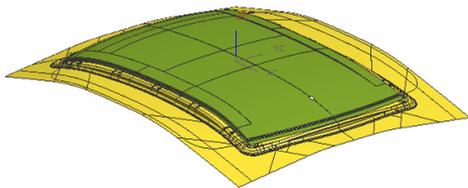


Figure 2. Drawing model
图 2. 拉延模型

3.2 有限元建模和参数设置

将 UG 中建立好的板料、拉延模型以 IGES 的文件格式导出，作为与 DYNIFORM 软件交互的中间文件。采用四边形 Belytschko-Tsay(BT)薄壳单元对板料及模具进行网格划分并局部细化^[6]。板料划分初始网格后，在成形仿真时板料网格还须采用自适应网格划分方法。将划分有限元网格后的凹模复制或者偏移获得凸模和压边圈的网格。经过板料重力、压合模拟后最终建立的有限元仿真模型如图 3 所示，凸模、凹模、压边圈均视为刚体，板料视为变形体。

板料材质为 CR-SK，其性能参数如下：弹性模量 $E=207\text{GPa}$ ；泊松比 $\mu=0.30$ ；屈服应力 $\sigma_s=174\text{MPa}$ ；抗拉强度 $\sigma_T=300\text{MPa}$ ；硬化系数 $K=518\text{MPa}$ ；应变硬化指数 $n=0.242$ ；厚向异性系数 $r_0=1.91, r_{45}=1.65, r_{90}=2.2$ ；

厚度 $t=0.7\text{mm}$ 。采用幂次硬化法则 $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ ， $\bar{\epsilon}$ 为等效应变。模具与板料之间的接触类型为面单向接触，接触算法为罚函数法。

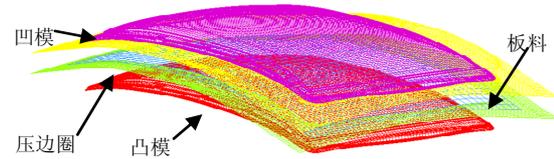


Figure 3. Finite element model
图 3. 有限元模型

模拟参数设置如下：拉延类型设置为单动拉延；凸凹模间隙设置为 $1.1t=0.77\text{mm}$ (t 为板料厚度)；压边力设置为 120T；摩擦系数为 0.13；定义凹模的运动曲线及压边圈的力曲线；冲压速度设置为 5000mm/s (凹模和上压边圈运动到下压边圈处时的压合速度)和 2000mm/s (凹模、上压边圈和下压边圈同时运动完成拉延的成型速度)。

3.3 成形模拟结果与分析

将有限元模型生成的 dyn 文件提交给 LS-Dyna 求解，采用动力显式算法进行计算，得到顶盖的成形模拟结果和成形极限图如图 4 和图 5 所示，主、副应变结果如图 6 和图 7 所示。由图 4 和图 5 可以看出，零件塑性变形充分，中间大部分区域减薄量较小，在成形过程中不会产生裂纹和起皱。周边区域减薄量较大，但未超出破裂极限，在成形过程中也不会产生破裂。法兰面上有轻微皱纹形成，在后续的切边工序会将这部分板料切去，不会影响制件的表面质量。由图 6 和图 7 的色标可以看出，零件上主、副应变值非常接近，均在 0.02 左右，表明零件的塑性变形均匀，保证了零件的刚性要求。因此，成形模拟结果证实顶盖成形过程中不会出现质量缺陷。



Figure 4. Simulation result
图 4. 模拟结果

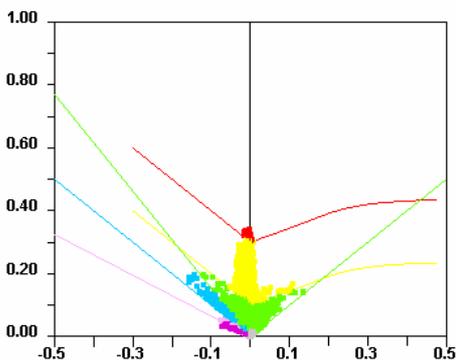


Figure 5. Forming limited diagram
图 5. 成形极限图

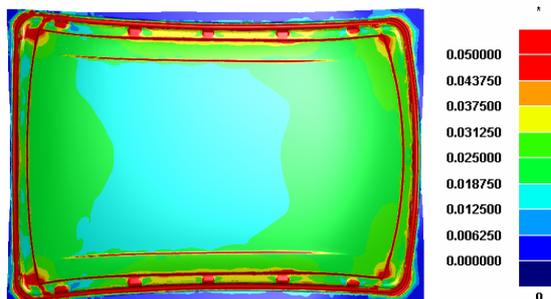


Figure 6. Major strain
图 6. 主应变

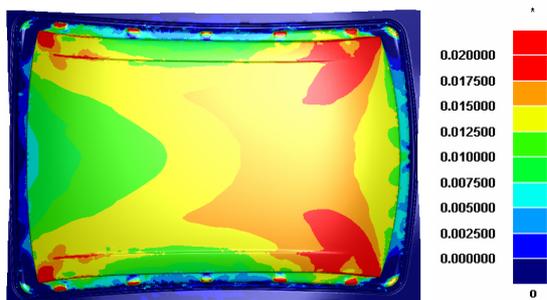


Figure 7. Minor strain
图 7. 副应变

3.4 回弹模拟结果与分析

将成形模拟后板料的 dynain 文件和修边线的 IGES 文件导入到 DYNAFORM 中，先进行修边数值模拟。然后，再重新导入修边模拟后的 dynain 文件，定义板料属性，修改分析类型为回弹（Spring back），设置隐式参数（Implicit Parameter），施加约束以排除回弹计算时的刚性位移。约束施加的部位对模拟结果的影响较大，必须满足一定的要求，即约束点不能在一条直线上，不能靠近零件的边缘，也不应当选择变

形较大的区域，而且相互之间要隔开一定的距离，约束点施加的部位应当与零件在检具上被夹持的部位一致，如图 8 所示，在顶盖的法兰边上适当的位置施加 3 个约束点。

激活网格粗化功能，将设置好的回弹模拟模型提交给 LS-DYNA 求解，采用静力隐式算法进行求解，得到零件的回弹位移分布如图 9 所示。由回弹位移色标可以看出零件的回弹趋势，A 区和 C 区回弹位移为正，表明 A 区和 C 区向上翘起，而 B 区回弹位移为负，表明 B 区向下凹陷。虽然回弹量的变化在 $\pm 1.25\text{mm}$ 之间，但由于零件属于外板类汽车覆盖件，且较平坦，变形较小，因此， $\pm 1.25\text{mm}$ 的回弹量对覆盖件的表面质量及装配精度均有较大影响，必须采取补救措施来控制零件的回弹。

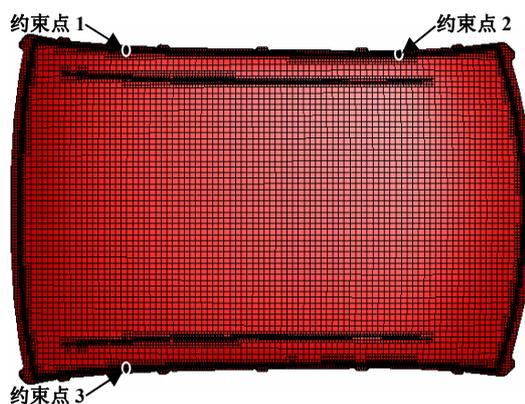


Figure 8. Constraints added
图 8. 施加约束点位置

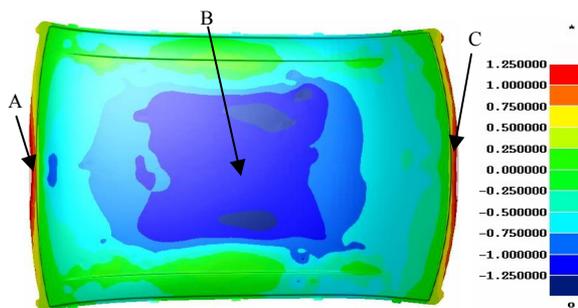


Figure 9. Results in diagram of spring-back
图 9. 回弹位移分布图

3.5 回弹控制措施

汽车覆盖件拉伸成形的回弹控制一般有两种方法：一种是工艺控制法，即通过改变成形过程的边界条件，如板料形状、压边力、模具圆角、摩擦状态等因素来减少回弹；另一种是几何补偿法，即通过预测

或实测回弹量的大小, 逐步修正模具型面使回弹后的零件形状恰好符合设计要求^[7,8]。实际生产中, 两种方法配合使用, 以达到最佳效果。

针对顶盖拉延成形后的回弹计算, 可以采取以下回弹控制措施:

(1) 在模具设计时选择合适的模具圆角;

(2) 在冲压成形过程中适当增加压边力, 在一定程度上可以抑制回弹;

(3) 调整摩擦状态, 改善实际拉延过程中的润滑条件;

(4) 根据图 9 回弹仿真预测的回弹量, 将零件模型 B 区沿 Z 轴正方向反变形做鼓起设计, 鼓起量应略大于回弹量的 20%, 将 A、C 区沿 Z 轴负方向反变形设计, 设计量略大于回弹量的 20%。回弹控制后得到的冲压件如图 10 所示。



Figure 10. Stamping part of spring-back controlled
图 10. 回弹控制后的冲压件

4 结论

采用板料成形分析软件 Dynaform, 结合相关理论和方法, 对汽车顶盖的冲压成形及回弹过程在计算机上进行了仿真研究, 直观地了解了其冲压成形过程和回弹情况。可以证实, 汽车顶盖在成形过程中不存在质量问题, 而在回弹过程中存在质量问题。针对回弹计算结果, 提出具体的控制回弹措施用于指导生产, 从而可以在模具制造过程中大大地减少试模和修模的

时间和经费, 提高汽车覆盖件的成形质量。

致谢

感谢天津职业技术师范大学高速切削与精密加工重点实验室以及天津汽车模具股份有限公司对本文研究工作的支持。

References (参考文献)

- [1] LIN Zhongqin. Simulation of stamping for automobile panels[M]. Beijing: mechanical Industry Press, 2005.35-60.
- [2] Ren Zhiguo, Sun Zhenzhong, Numerical Simulation of Forming and Spring-back Process on Engine-hood[J], *Journal of Harbin University of Science & Technology*, 2006, 11(1), P135-138 (Ch).
任志国, 孙振忠, 汽车发动机罩板冲压成形及回弹过程的数值模拟[J], 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11(1), P135-138.
- [3] Li Qihan, Zhang Qingfang, Research on Numerical simulation of Spring-back in Stamping Truck Frame Longitudinal Beam[J], *Machine Building & Automation*, 2009, 38(4), P39-41.
李奇涵, 张庆芳, 汽车纵梁冲压回弹的数值模拟研究[J], 机械制造与自动化, 2009, 38(4), P39-41.
- [4] Tang Shaohua, Chen Guorong, Simulation Research on Automotive Body Panels Stamping and Spring-back[J], *Manufacturing Technology and Machine*, 2008, (9), P25-28.
唐绍华, 陈国荣, 汽车覆盖件冲压回弹仿真的研究[J], 制造技术与机床, 2008, (9), P25-28.
- [5] Zhou Jie, Mo Anjun, Li Hui, Xu Yang, Yang Ming, The Prediction and Control on the Front Inner Panel of Automobile at Multi-steps Stamping[J], *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16(6), P64-67.
周杰, 莫安军, 李慧, 徐阳, 杨明, 汽车前车门内板多步冲压成形回弹预测及控制[J], 塑性工程学报, 2009, 16(6), P64-67.
- [6] Zhu Maotao, Zhong Yongjian, Zhang Lili, Simulation on Forming of Car Engine Hood Inner Panel[J], *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(6), P189-192.
朱茂桃, 张永建, 张黎黎, 汽车发动机罩内板冲压成形仿真[J], 农业机械学报, 2008, 39(6), P189-192.
- [7] Yang Zhengyu, Chang Siqin, Study on Numerical Simulation of Spring-back in Automobile Panels Forming[J], *Tractor & Farm Transporter*, 2007, 34(6), P18-20.
杨征宇, 常思勤, 车辆覆盖件冲压成形的回弹模拟研究[J], 拖拉机与农用运输车, 2007, 34(6), P18-20.
- [8] Fu Jian, Zhao Xia, Li Jinyan, Numerical Simulation about Spring-back Drawn Engine Hood Panel[J], *Journal of Plasticity Engineering*, 2007, 14(5), P5-9.
傅建, 赵侠, 李金艳, 发动机罩外板拉深回弹的数值模拟分析[J], 塑性工程学报, 2007, 14(5), P5-9.