

板料成形

基于曲率差的回弹评价方法及其应用

张赛军¹, 宋世光¹, 王一帆¹, 刘进军²

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641; 2. 祥鑫科技股份有限公司 技术中心, 广东 东莞 523000)

摘要: 针对板料在常温下冲压成形时回弹较大, 且现有的评价方法无法判断回弹发生的具体位置而难以准确指导修模的问题, 提出一种基于曲率差的回弹评价方法来表征冲压零件回弹, 可以准确地显示零件回弹发生的具体位置。首先, 采用 GOM ATOS Core 光学三维扫描仪获取冲压件回弹后的型面, 以凸模型面作为冲压件回弹前的型面, 再通过 MeshLab 软件将连续曲面离散为点云。然后, 通过多层次 B 样条插值算法 (MBA) 将离散的点云拟合曲面, 计算每一点的平均曲率, 并以回弹前后的曲率差值来表征回弹大小。最后, 将该方法用于某汽车铝合金制成的前风窗下横梁和前防撞梁冲压件的整形阶段, 根据冲压件回弹前后的曲率差修正模具型面, 并采用位移法对比模具修正前后的零件回弹量。结果表明: 前风窗下横梁的正负最大位移分别从 +1.415 和 -2.508 mm 减小为 +0.707 和 -1.263 mm; 前防撞梁的最大负位移从 -3.574 mm 减小为 -0.801 mm, 回弹量明显减小, 满足其尺寸偏差要求。说明基于曲率差的回弹评价方法, 可以准确地找到回弹发生的部位, 并有效地指导回弹补偿工作。

关键词: 板材成形; 回弹评价; 点云; 曲率差; 修模

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.010

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 04-0078-07

Springback evaluation method based on curvature difference and its application

Zhang Saijun¹, Song Shiguang¹, Wang Yifan¹, Liu Jinjun²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Technology Center, Xiangxin Technology Co., Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: The springback of sheet metal is larger during the stamping process at room temperature, the existing evaluation methods cannot determine the specific location of the springback, and it is difficult to accurately guide the die modification. Therefore, in order to solve the above problems, a springback evaluation method based on curvature difference was proposed to characterize the springback of stamping parts, which accurately displayed the specific location of the springback for the part. First, the profile of stamping part after springback was obtained by optical three-dimensional scanner GOM ATOS Core, the punch profile was used as the profile of stamping part before springback, and the continuous surface was discretized into the point cloud by software MeshLab. Then, the discrete point cloud was fitted into a surface by a multi-level B-spline interpolation algorithm (MBA) to calculate the average curvature of each point, and the springback value was characterized by the curvature difference before and after springback. Finally, the method was used in the shaping stage of stamping parts for front windshield lower beam and front anti-collision beam made of aluminum alloy for an automobile, the die profile was corrected according to the curvature difference of stamping part before and after springback, and the springback amount of the part before and after die modification was compared by the displacement method. The results show that the maximum positive and negative displacements of the front windshield lower beam are reduced from +1.415 and -2.408 mm to +0.707 and -1.263 mm, respectively, and the maximum negative displacement of the front anti-collision beam is reduced from -3.574 mm to -0.801 mm, which significantly reduces the springback amount and meets the requirements of its size deviation. Thus, the springback evaluation method based on curvature difference can accurately find the location of the springback and effectively guide the springback compensation work.

Key words: sheet metal forming; springback evaluation; point cloud; curvature difference; die modification

汽车轻量化是实现节能减排的重要手段, 铝合

金的使用是实现这一目标的有效途径^[1]。但铝合金板材的成形性能差, 在板料冲压成形过程中往往会伴随着起皱、破裂或回弹等成形缺陷问题, 其中, 起皱和破裂问题已经通过冲压工艺的调整和 CAE 仿真分析得到了基本解决^[2], 而铝合金的冲压回弹问题至今仍未得到一个好的解决方法, 这严重阻碍了生产效率的提高和产品质量的提升。为了解决这一

收稿日期: 2021-03-25; 修订日期: 2021-06-19

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2020B010184002)

作者简介: 张赛军 (1978-), 男, 工学博士, 副教授

E-mail: mesjzhang@scut.edu.cn

通信作者: 刘进军 (1974-), 男, 工学学士, 工程师

E-mail: c20@luckyxiangxin.com

问题,国内外众多学者做了大量研究,如 Karafillis A P 等^[3]提出截面法,即在零件的关键部位截取剖面,在二维截面上表征回弹。Lee H S 等^[4]、Wang Z Z 等^[5]和李贵等^[6]均使用过该方法来度量三维零件的回弹,但该方法既无法在整体上反映零件的回弹分布,也无法指导下一步的补偿工作。Gan W 等^[7]提出了通过在模面上增加与回弹相反的位移来进行位移调整的方法,即位移调整法。Li G 等^[8]提出了一种新的、改进的、基于位移调整法的回弹补偿算法和系统。姜天亮等^[9]针对由回弹引起的 U 形件弯曲成形尺寸超差问题,通过将响应面法与有限元仿真相结合的方法,研究不同工艺参数对回弹量的影响,建立了以回弹位移作为优化目标的二次非线性回归方程来预测回弹量的大小。王辉等^[10]提出了一种采用三维全型面扫描检测零件的方法,将扫描数模与设计模型进行对比,得到成形零件的偏差量。张辉等^[11]基于蓝光扫描逆向工程技术对零件进行建模,并将其与设计模型进行对比来获得零件的回弹量。这些方法本质上均为位移法,需要选取参考点,其评价结果不仅受参考点选择的影响较大,而且只能显示零件回弹造成的最终偏差,不能指出回弹发生的具体位置。此外,朱东波等^[12]在三维复杂零件的回弹评价中引入“回弹能”和“回弹能密度”等概念,但由于计算较为繁琐,因此不适用于工程实践。Zhang D J 等^[13]和孙伟等^[14]通过角度及曲率的变化来描述二维简单零件的回弹量。周驰等^[15]根据塑性弯曲理论提出了一种基于测量数据、以曲率的改变来表征冲压件局部回弹的方法,将回弹现象和其力学原理较好地联系起来。但这些方法均无法反映零件整体的回弹情况。

针对当前各种评价回弹方法依然存在不足的问题,王一帆^[16]提出了一种基于曲率差的回弹评价方法,通过冲压件回弹前后的平均曲率差来表征回弹,可以直观地展示回弹发生的具体部位,有利于指导并准确修模。本文将用于某汽车铝合金冲压件的回弹评价中,根据曲率差云图来指导模具型面的修正,修正后的冲压零件回弹量明显减小。

1 基于曲率差的回弹评价方法

1.1 曲率计算的实现

采用 GOM ATOS Core 光学三维扫描仪获取冲压件回弹后的型面,以凸模型面作为冲压件回弹前的

型面,然后通过 MeshLab 软件将连续曲面离散为点云。获得点云以后,再基于多层次 B 样条插值方法^[17]拟合为曲面,根据曲面表达式即可实现拟合曲面上任意点的曲率计算。多层次 B 样条算法在定义域 $\Omega = \{(x, y)\}$ 上由粗到细定义了控制网格序列 $\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_h$, 其中 h 为序列号,然后分别在其上求得插值函数 $f_k (k=0, 1, \dots, h)$, 并求和来逐步逼近满足误差阈值 ε 的最终插值函数 F , 即 $F = \sum_{k=0}^h f_k$ 。当控制网格分布密度足够高时, F 基本上可插值于数据点而不产生误差,拟合出 C^2 连续曲面,其中 C^2 表示插值函数 F 在定义域 Ω 上二阶连续可微,且各个二阶偏导函数均连续^[18]。为了保证拟合的精度和计算效率,本文取误差阈值 ε 为 0.02 mm (详细算法可以参考文献 [17] 与文献 [18])。设该拟合曲面表达式为 $z = F(x, y)$, $x, y \in \Omega$, 其一阶偏导及二阶偏导表示如下:

$$p = \frac{\partial F}{\partial x}; q = \frac{\partial F}{\partial y}; r = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}; s = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}; t = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \quad (1)$$

式中: p, q, r, s, t 为代替符号; x, y 为自变量。

据此可以计算曲面的第 1 类基本量和第 2 类基本量,并计算曲面上任意点的高斯曲率 K 和平均曲率 H , 其中高斯曲率 K 和平均曲率 H 有如下表达方式:

$$\begin{cases} A = 1 + p^2 \\ B = pq \\ C = 1 + q^2 \\ D = \frac{r}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \\ E = \frac{s}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \\ G = \frac{t}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K = \frac{DG - E^2}{AC - B^2} \\ H = \frac{CD - 2BE + AG}{2(AC - B^2)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: A, B, C, D, E, G 仅为代替符号。

根据式 (2) 可求得曲面上任意点的高斯曲率和平均曲率,准确的曲率计算是本回弹评价方法的基础。

1.2 基于曲率差回弹评价方法的实施

基于曲率差的回弹评价方法主要包括:型面点云获取、曲率值计算及曲率灰度图生成、曲率灰度图匹配及曲率差云图生成等几部分,其实现流程图 1 所示。

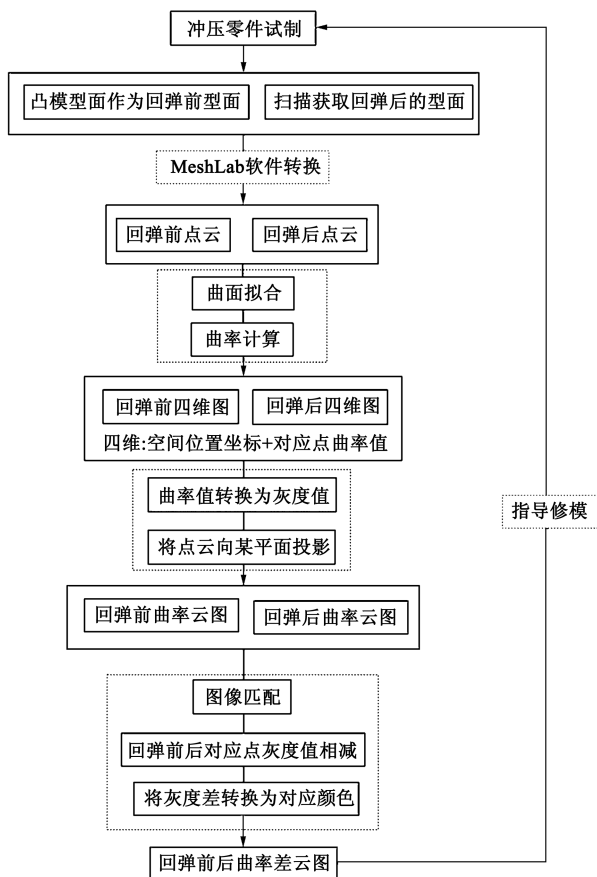


图 1 基于曲率差回弹评价方法的实现流程

Fig. 1 Implementation flow of springback evaluation method based on curvature difference

1.2.1 型面点云获取

冲压件回弹后的型面采用 GOM ATOS Core 光学三维扫描仪来获取, 其扫描原理是通过左右的高分辨率工业相机与光栅投影光源相结合, 通过相机把图案拍摄下来, 然后基于相机芯片的正弦曲线强度分布的不同形成相移, ATOS 软件自动将各相面像

素转换为独立的三维坐标密集点云, 再通过 GOM 软件将 ATOS Core 扫描的数据输出为 STEP 格式的三维模型。其中, GOM ATOS Core 光学三维扫描仪在单次扫描中可以一次性获取工件在 3 个不同方向的数据, 从 3 个不同的光束部分来计算三维坐标点, 并且检测过程中传感器检测并补偿运行期间不断变化的环境条件, 其扫描精度高达 0.0025 mm。冲压件回弹前的型面可用凸模型面代替, 通过 MeshLab 软件将型面转换为离散的点云, 如图 2 所示。

1.2.2 曲率值计算及曲率灰度图生成

通过 CMake 软件调用 MBA 算法库和 Boost 库, 将点云数据拟合为曲面, 在拟合曲面上按固定间距取出若干点, 并通过式 (2) 计算其高斯曲率或平均曲率。为表述方便, 将回弹前后各点的曲率值分别命名为第 1 曲率值和第 2 曲率值, 且本文选取平均曲率进行计算。

在完成曲率计算后, 需要对各空间点的曲率进行可视化。曲率的可视化可以通过合并空间坐标与曲率值为四维数据的方式实现, 即将曲率值转换为对应点的灰度值进行云图绘制。但这种三维云图并不能直观地展示型面上所有位置的曲率情况, 因此, 将三维云图投影于冲压时模具所在的平面, 并将曲率值转换为对应二维坐标点的灰度值, 即可得到二维曲率灰度图, 如图 3 所示。同样, 将回弹前后的曲率灰度图分别命名为第 1 灰度图和第 2 灰度图。其中, 曲率值与灰度值的转换通过以下流程实现: 设 ρ_i 为第 1 曲率值中编号为 i 的点对应的曲率值, ρ_j 为第 2 曲率值中编号为 j 的点对应的曲率值, 将第 1 曲率云图与第 2 曲率云图中曲率最大处的灰度设置为 0, 曲率最小处的灰度设置为 255, 其余曲率值可以按式 (3) 转换为对应灰度值 Gray Value:

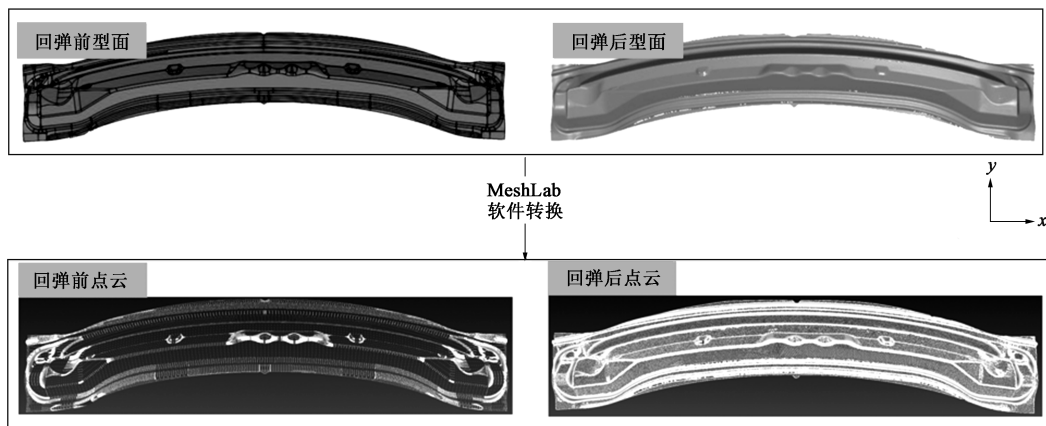


图 2 通过 MeshLab 软件将型面转换为点云

Fig. 2 Converting profile to point cloud by software MeshLab

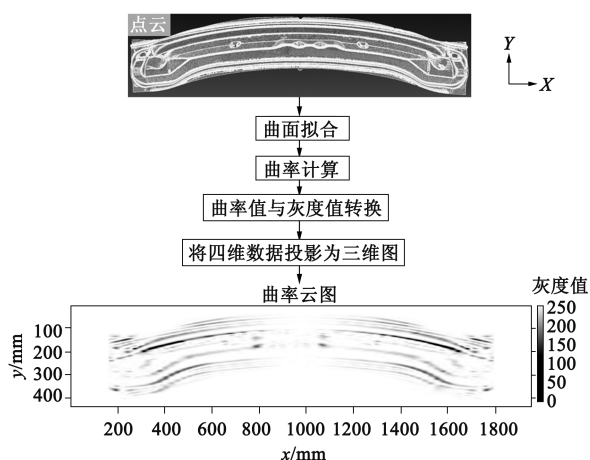


图3 二维曲率灰度图的生成

Fig. 3 Generation of two-dimensional curvature gray image

$$Gray\ Value = 255 - \rho_{i(j)} \frac{\max(\rho_i, \rho_j) - \min(\rho_i, \rho_j)}{255} \quad (3)$$

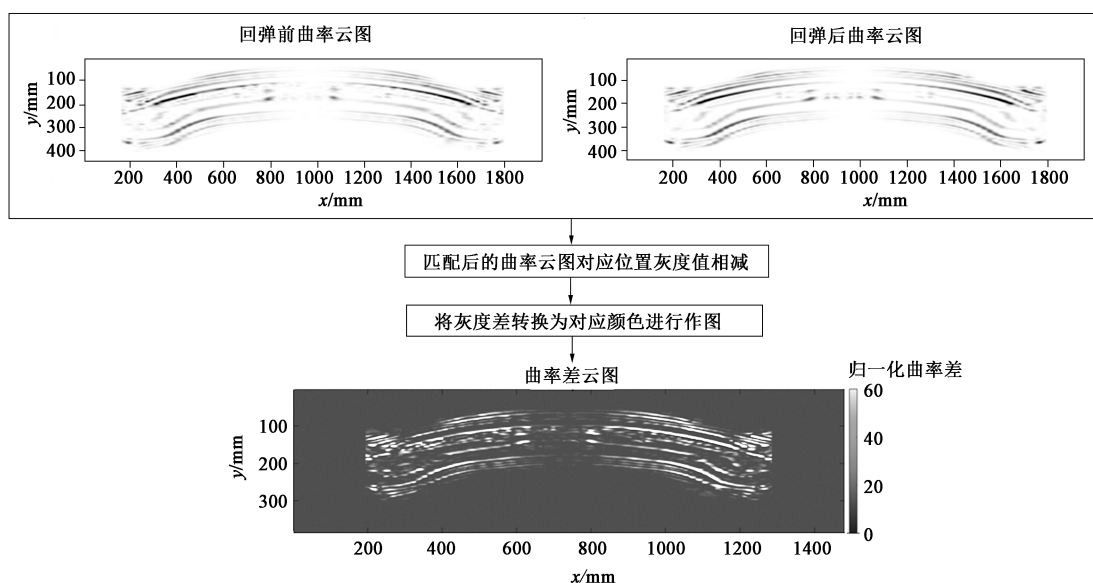


图4 曲率差云图的生成

Fig. 4 Generation of curvature difference cloud image

2 基于曲率差回弹评价方法的应用

根据上面提出的方法，分别对某汽车铝合金前风窗下横梁和前防撞梁结构件在整形工序阶段的回弹进行表征，并根据曲率差云图修正模面。

2.1 在某汽车前风窗下横梁中的应用

该前风窗下横梁为铝合金结构件，其三维构型如图5所示，尺寸为1500 mm×137 mm×42 mm，质

1.2.3 曲率灰度图匹配及曲率差云图生成

为减小后续计算曲率差时的误差，在生成第1灰度图与第2灰度图后，需要对第1灰度图与第2灰度图进行匹配，以获得第1灰度图中各点在第2灰度图中的相应点。本方法通过MATLAB软件基于最小二乘法来实现第1灰度图与第2灰度图的匹配，即比较灰度图在不同相对位置下曲率差的平方和，取曲率差平方和最小时的相对位置作为计算曲率差时的相对位置。

在灰度图匹配完成后，将第1灰度图与第2灰度图作差求得各点的灰度差。由式(3)可知，灰度差与曲率差之间存在确定的关系，因此，可以把灰度差作为指标来绘制曲率差云图，如图4所示。通过曲率差云图可以直观地看到冲压零件整体的回弹情况，云图中亮度较高的区域为回弹前后型面上曲率变化较大的区域，从而可以根据云图中不同区域亮度的大小来指导修模。

量为1.4 kg，由厚度为1.4 mm的AA5754-O铝合金板材经多次冲压工序制成，其成形工序依次为拉伸—修边—翻边—整形。该零件整形工序时回弹前后的型面如图6所示，比较其回弹前后平均曲率的变化。

为了进行对比分析，分别使用曲率差法和位移法来表征该结构件整形工序前后的回弹，其中位移法采用最佳拟合对齐方式测量回弹，曲率差法和位移法的评价结果如图7所示。从图7中可以看出，

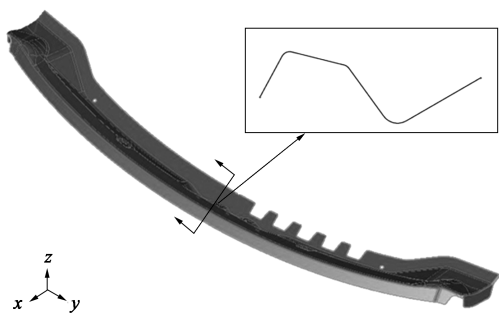


图5 铝合金结构件三维构型

Fig. 5 Three-dimensional configuration of aluminum alloy structural part

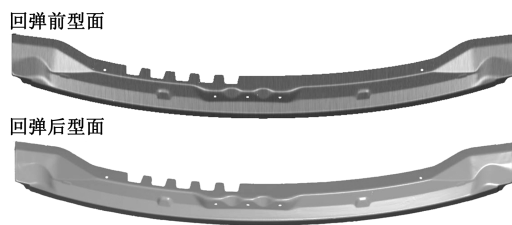


图6 前风窗下横梁实际冲压时回弹前后的型面

Fig. 6 Profiles before and after springback in actual stamping of front windshield lower beam

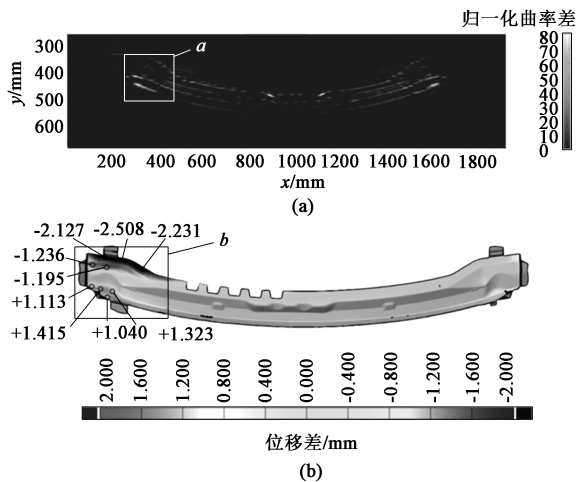


图7 前风窗下横梁曲率差法 (a) 和位移法 (b) 的评价结果

Fig. 7 Evaluation results of curvature difference method (a) and displacement method (b) for front windshield lower beam

位置 a 与位置 b 是零件相同的位置, 其分别对应曲率云图与位移云图。从位移云图可以看出, 位置 b 处的型面发生较大改变, 其正负最大位移分别为 $+1.415$ 和 -2.508 mm。但曲率差云图显示该位置部分圆角曲率发生较大变化, 因此, 断定其位移由圆角曲率变化引起, 所以对模具圆角区域的曲率进行修正来进行回弹补偿, 如图 8 所示。

修正后, 再次使用位移法测量零件相同区域的位移量, 其位移云图如图 9 所示, 正负最大位移分

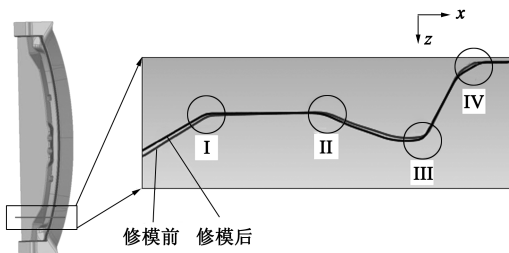


图8 对整形模的圆角位置 I、II、III、IV 的曲率进行修正

Fig. 8 Modification of curvature at round corner positions I、II、III、IV for shaping mold

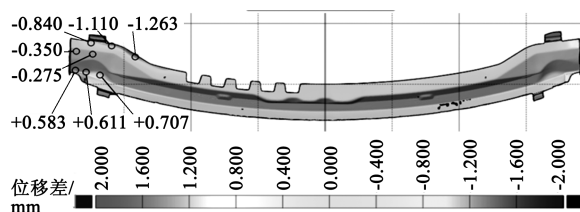


图9 修模后的前风窗冲压件位移云图

Fig. 9 Displacement cloud diagram of stamping parts for front windshield after mold modification

别减小为 $+0.707$ 和 -1.263 mm, 回弹得到有效控制, 满足该冲压件的尺寸偏差要求。

2.2 在某汽车前防撞梁中的应用

该前防撞梁仍为铝合金结构件, 其三维构型如图 10 所示, 成形工序依次为拉延、修边、整形、翻边, 执行整形工序时回弹前后的型面如图 11 所示。

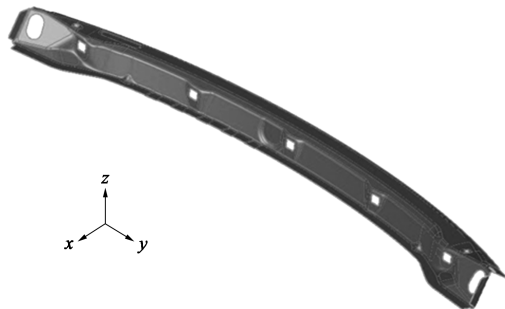


图10 零件三维构型图

Fig. 10 Three-dimensional configuration of part

同样, 分别使用曲率法和位移法对该结构件整形工序时的回弹进行评价, 其结果如图 12 所示。从图 12 中可以看出, 位移云图中发生较大偏差的位置 B 与曲率差云图中的位置 A 相对应, 其最大负位移为 -3.574 mm, 且曲率差云图中位置 A 处的圆角部位在回弹前后发生较大的曲率变化, 所以, 断定位置 B 处发生的位移是由圆角处曲率的变化引起的, 因此, 对模具圆角区域的曲率进行修正来进行回弹补偿, 其补偿情况如图 13 所示。

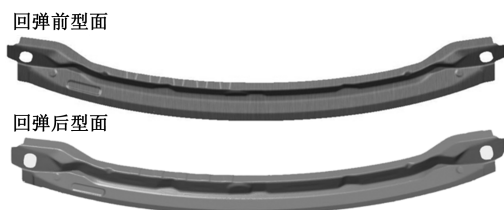


图 11 前防撞梁实际冲压时回弹前后的型面

Fig. 11 Profiles before and after springback in actual stamping of front anti-collision beam

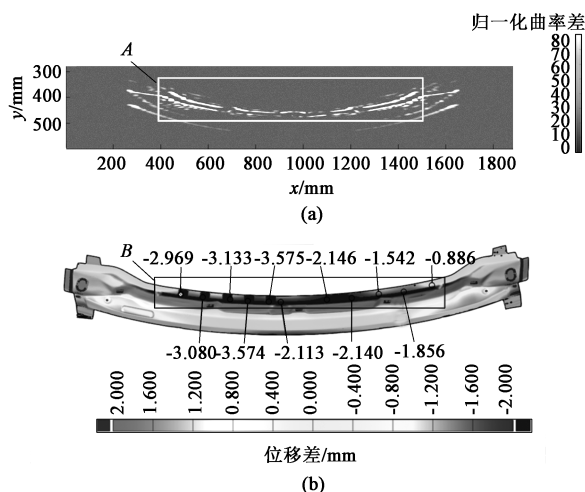


图 12 前防撞梁曲率差法 (a) 和位移法 (b) 的评价结果

Fig. 12 Evaluation results of curvature difference method (a) and displacement method (b) of front anti-collision beam

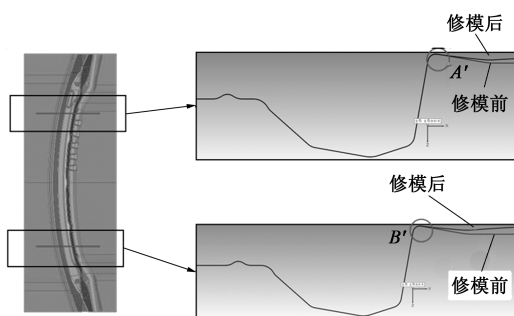


图 13 通过改变整形模中圆角 A'、B' 位置处的曲率进行回弹补偿

Fig. 13 Springback compensation performed by changing curvature of fillet A' and B' in shaping die

修正过该位置的模具圆角后, 使用位移法测量零件相同区域的位移量, 其位移云图如图 14 所示, 最大负位移减小为 -0.801 mm, 位移差明显减小, 满足该冲压件的尺寸偏差要求。

综合上述, 对某汽车铝合金制成的前风窗下横梁和前防撞梁结构件的回弹评价及补偿工作来看, 曲率差云图可以直观地展示冲压件回弹发生的位置从而指导工人师傅修模, 通过对曲率变化较大的位

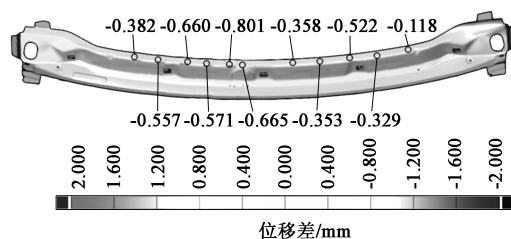


图 14 修模后的前防撞梁冲压件位移云图

Fig. 14 Displacement cloud diagram of stamping part for front anti-collision beam after die modification

置进行修正即可达到回弹补偿的目的。

3 结论

(1) 通过对冲压件的回弹情况进行分析可知, 冲压件任意一处的回弹位移是由零件上各位置的曲率变化所引起的。

(2) 基于曲率差的回弹评价方法可以直观准确地展示冲压零件的整体回弹情况及回弹部位, 从而方便指导修模工作。

(3) 将该方法应用于两个铝合金冲压件整形工序的回弹评价及补偿中, 结果显示, 前风窗下横梁冲压件的正负最大位移分别从 $+1.415$ 和 -2.508 mm 减小为 $+0.707$ 和 -1.263 mm, 前防撞梁冲压件的最大负位移从 -3.574 mm 减小为 -0.801 mm, 均满足其尺寸偏差要求, 表明基于曲率差的回弹评价方法可以有效地指导回弹补偿工作。

参考文献:

- [1] 刘勇, 耿会程, 朱彬, 等. 高强铝合金高效热冲压工艺研究进展 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (7): 1-12.
Liu Y, Geng H C, Zhu B, et al. Research progress of high-strength aluminum alloys with high-efficiency hot stamping process [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (7): 1-12.
- [2] 谢晖, 唐长民, 程威, 等. 多弯角零件冲压回弹控制方法的研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (1): 22-27.
Xie H, Tang C M, Cheng W, et al. Research on the control method of stamping springback of multi-bend parts [J]. Chinese Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (1): 22-27.
- [3] Karafilis A P, Boyce M C. Tooling and binder design for sheet metal forming processes compensating springback error [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1996, 36 (4): 503-526.
- [4] Lee H S, Kim J H, Kang G S, et al. Development of seat side frame by sheet forming of DP980 with die compensation [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2017, 18 (1): 115-120.

(下转第 149 页)