

## 外防护板成形工艺

王妍琴<sup>1</sup>, 王东<sup>1</sup>, 李继光<sup>1</sup>, 谷春杰<sup>1</sup>, 王振<sup>1</sup>, 梁立冬<sup>1</sup>, 王悦<sup>1</sup>, 刘聪<sup>2</sup>

(1. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462; 2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**摘要:** 以外防护板为研究对象, 针对冲压成形过程中产生的不规则流料、严重起皱和弧度回弹问题, 应用 Dynaform 软件进行冲压成形过程的有限元分析。通过对比坯料直接冲压、滚弯后冲压和折弯后冲压的数据, 得出了优化的成形工序和模具回弹量, 完成了外防护板冲压工艺设计。结合有限元分析结果进行试验验证, 得出以下结论: 零件预折弯后再进行冲压成形, 可以减少成形中不规则流料和严重起皱现象的发生; 成形模具弧度考虑 15% 的回弹率可以减少零件的弧度回弹, 提高成形精度。最后, 通过生产经验及试验验证, 发现在成形过程中增加退火工艺可以提高零件的成形精度, 减少零件的起皱现象。

**关键词:** 外防护板; 冲压; 不规则流料; 起皱; 回弹

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.012

**中图分类号:** TG386.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 03-0079-04

### Forming process of outer protection plate

Wang Yanqin<sup>1</sup>, Wang Dong<sup>1</sup>, Li Jiguang<sup>1</sup>, Gu Chunjie<sup>1</sup>, Wang Zhen<sup>1</sup>, Liang Lidong<sup>1</sup>, Wang Yue<sup>1</sup>, Liu Cong<sup>2</sup>

(1. Tianjin Aerospace Long March Rocket Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** For the outer protection plate, in view of the problems of irregular flow, serious wrinkling and arc springback generated in the stamping process, the finite element analysis of the stamping process was conducted by Dynaform software, and through comparing the data of direct stamping, stamping after roll bending and stamping after bending for billet, the optimized forming process and die springback amount were obtained to complete the stamping process design of the outer protection plate. Then, combined the analysis results of finite element, the experimental verification was carried out. The results show that stamping after bending for parts can reduce the occurrence of irregular flow and serious wrinkling phenomenon in the forming process. The arc springback of part is reduced and the forming accuracy is improved if 15% springback rate is considered for the arc of forming die. In addition, through production experience and experimental verification, it is found that adding annealing in the forming process can improve the forming accuracy and reduce the wrinkling phenomenon of parts.

**Key words:** outer protection plate; stamping; irregular flow; wrinkling; springback

金属薄板成形技术被广泛应用于汽车、钢铁、电器、船舶、航空航天、兵器等行业中。钣金件冲压成形是一个极其复杂的多重非线性过程<sup>[1]</sup>。如何迅速、准确地预测整个薄板成形过程中可能出现的起皱、破裂、回弹等缺陷并确定其中一些重要的工艺参数, 已成为薄板成形技术发展的关键<sup>[2]</sup>。在传统的制造模式中, 通常采用多次试模来摸索零件成形参数及模具回弹量, 耗费大量的周期和经费。随着有限元模拟技术的发展, 应用数值模拟可以分析

零件成形过程中的各种缺陷、计算模具回弹量等, 根据分析结果进行生产, 可以减少甚至取消试模过程, 缩短产品生产周期, 降低生产成本<sup>[3]</sup>。

本文针对某运载火箭站箭解锁装置中的外防护板的成形过程进行研究, 对冲压成形过程中产生的不规则流料、严重起皱和弧度回弹现象, 应用 Dynaform 软件完成了外防护板冲压工艺设计, 并进行了试验验证。

### 1 产品简介

外防护板在某运载火箭站箭解锁装置中起到保护分离装置的作用。零件采用厚度为 1 mm 的 5A06

收稿日期: 2020-12-03; 修订日期: 2021-03-12

作者简介: 王妍琴 (1987-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 1124337718@qq.com

铝板材料, 截面不对称, 呈勺状结构, 弯曲半径为 2047.5 mm, 总弧长为 804 mm, 如图 1 所示。5A06 铝板属于 Al-Mg 系防锈铝, 其密度较小, 具有较高的强度和抗腐蚀性, 但 5A06 铝合金在室温下的成形性能差, 很难成形形状复杂的零件<sup>[4]</sup>。外防护板在生产中出现的不规则流料现象会导致零件截面尺寸不一致; 严重的起皱现象会导致零件表面质量超差; 弧度回弹现象会导致大量的手工修整。

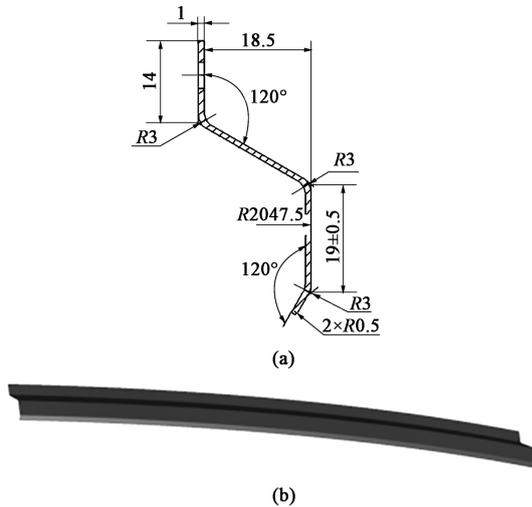


图 1 零件尺寸 (a) 和形状 (b)  
Fig. 1 Size (a) and shape (b) of parts

## 2 几何模型建立与有限元分析

### 2.1 几何模型建立

外防护板的几何型面较为复杂, 采用三维软件建立几何模型, 然后将模型以 IGES 的格式导入到 Dynaform 软件中。在前处理的过程中需要对毛坯、凸模、凹模进行网格划分, 并进行网格的检查和修补<sup>[5]</sup>。外防护板的初始几何模型如图 2 所示。

### 2.2 零件成形有限元分析

#### 2.2.1 材料力学性能参数

根据董浩<sup>[6]</sup>对 5A06 铝合金板料所做的单向拉伸试验, 获得的材料力学性能参数如表 1 所示。

本次成形模拟采用的是无压边成形方式。设定模具和板料自动定位后, 定义凸模加载曲线, 虚拟冲压速度为  $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

#### 2.2.2 坯料预弯对成形的影响

零件最终的弯曲半径为 2047.5 mm, 为了考察坯料的预成形对成形精度的影响, 进行 3 组模型的对比分析, 分别为坯料直接冲压、滚弯后冲压和折弯后冲压。

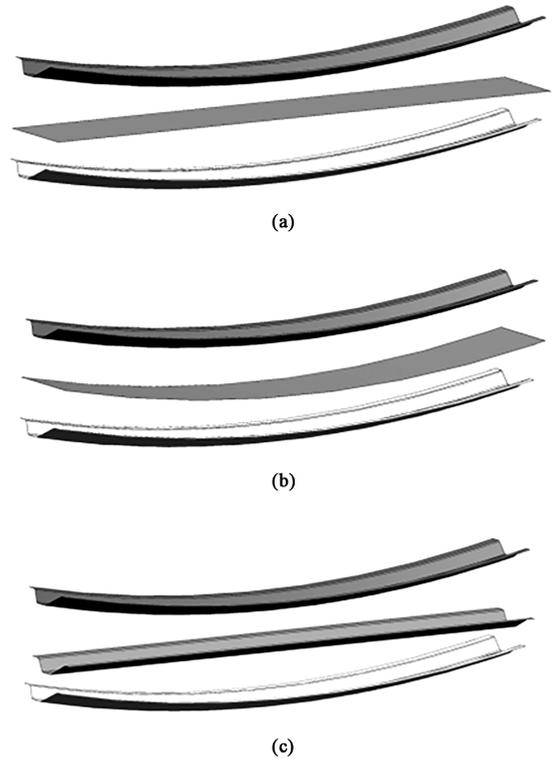


图 2 外防护板的初始几何模型  
(a) 平板直接冲压模型 (b) 滚弯后冲压模型  
(c) 折弯后冲压模型

Fig. 2 Initial geometric models of outer protection plate

(a) Model of direct stamping for plate (b) Model of stamping after roll bending (c) Model of stamping after bending

表 1 5A06 铝合金板料力学性能参数

Table 1 Mechanical performance parameters of 5A06 aluminum alloy sheet

参数	屈服强度	抗拉强度	弹性模量	伸长率	硬化模量	硬化指数
	$R_{eL}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$E/\text{MPa}$	$A/\%$	$K/\text{MPa}$	$n$
数值	155	347	63703	28.6	682	0.3

(1) 坯料直接冲压。通过理论计算方式得到的零件的展开尺寸为  $808 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ , 采用此坯料进行初步定位后进行直接冲压成形, 零件产生了严重的不规则流料现象: 零件两侧端头边缘的流料尺寸达到 16 mm, 整个加强筋的位置发生偏移; 零件存在大范围起皱现象, 局部有较为严重的起皱现象, 如图 3 所示。

(2) 坯料滚弯后冲压。将坯料预先滚制弧度至 2028 mm, 可以直接贴合凹模, 初步定位后再进行冲压成形, 零件仍然有严重的不规则流料现象, 两侧端头边缘的流料尺寸为 11 mm, 零件局部有较为严重的起皱现象, 如图 4 所示。

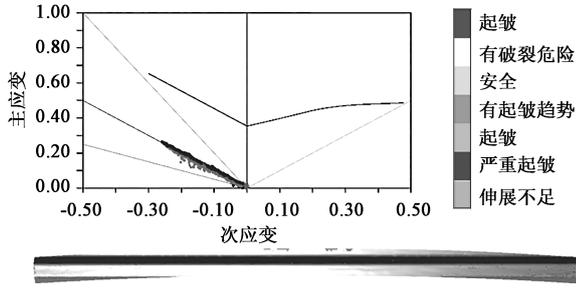


图 3 坯料直接冲压的成形极限图

Fig. 3 Forming limit diagram of direct stamping for billet

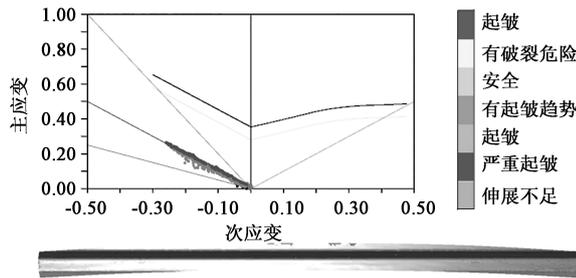


图 4 坯料滚弯后冲压的成形极限图

Fig. 4 Forming limit diagram of stamping after roll bending for billet

(3) 坯料折弯后冲压。将坯料预先折弯至勺形，再进行冲压成形，零件出现轻微的不规则流料现象，两侧端头边缘流料尺寸为 2 mm，起皱的范围减小，极少范围内仍有较为严重的起皱现象，如图 5 所示。

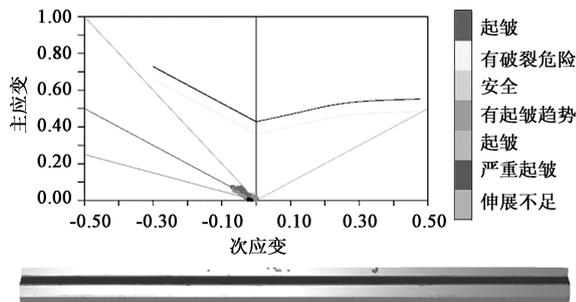


图 5 坯料折弯后冲压的成形极限图

Fig. 5 Forming limit diagram of stamping after bending for billet

### 2.2.3 模具弧度回弹对成形的影响

回弹是卸载后板料内部的应力再次分布导致的，是板料冲压成形过程中不可避免的现象<sup>[7-8]</sup>。由于冲压件在成形过程中既存在塑性变形，也存在弹性变形，卸载后会产生弹性变形的恢复，即产生回弹现象。要使零件的形状及尺寸均达到设计要求，就必须使冲压模具工作部分的形状和尺寸与零件要求

的尺寸和形状产生一定的偏离，这个偏离程度就取决于回弹量的大小及分布情况<sup>[9]</sup>。

使用 Dynaform 的 Eta/Post 后处理器来查看结果，其读取的结果文件为后缀名为 .d3plot 的结果文件<sup>[10]</sup>。由于在回弹计算中采用的是单步回隐式算法，所以，在 .d3plot 结果文件中只有两帧可以对比。为了更加清楚地表现回弹，从零件上截取零件弧度截面进行回弹前后的半径  $R$  值（凸筋处）的对比分析，如图 6 所示。经过计算，3 种冲压成形方式的回弹数据对比见表 2。

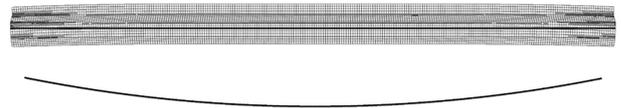


图 6 零件回弹截面图

Fig. 6 Sectional view of springback for part

表 2 3 种冲压成形方式的回弹数据对比

Table 2 Comparison of springback data for three forming methods

成形方式	回弹前半径/ mm	回弹后半径/ mm	回弹率/%
直接冲压	2047.5	非圆弧	-
滚弯后冲压	2047.5	2655.8	29.7
折弯后冲压	2047.5	2455.0	19.9

本文采用通过修正模具型面或模具结构使冲压件校正成形，利用回弹规律，通过使其卸载后的形状与期望形状相符或相近的方式来控制回弹<sup>[11]</sup>。考虑回弹率为 15%，将模具半径设置为 1800 mm，再次进行回弹计算，回弹后零件半径为 2070 mm，可参考此参数对模具进行设计。

### 2.2.4 有限元结果分析

对比分析 3 种冲压成形效果，零件预先折弯后再进行冲压的总体成形效果比较理想，零件不规则流料的现象减轻，起皱范围大大缩小，弧度回弹程度也比其他两种方式小。

## 2.3 零件成形试验

### 2.3.1 模具返修后成形效果

根据有限元模拟结果，对成形模具弧度进行返修，将模具成形半径返修至 1800 mm。模具返修后，对采用折弯后的坯料进行冲压成形，零件成品如图 7 所示，零件弧度基本合格，但零件表面还存在轻微起皱现象。



图 7 零件成品图

Fig. 7 Finished product drawing of part

### 2.3.2 热处理工序对成形的影响

塑性变形对金属性能的主要影响是产生加工硬化。金属产生加工硬化后，塑性大大降低，继续变形会导致开裂。退火工艺的主要目的是消除铝合金因冷变形造成的组织与性质的亚稳定状态，恢复与提高金属塑性，以保证后续工作的顺利进行<sup>[12]</sup>。

在零件折弯后，进行 390 °C 保温 40 min 并空冷的退火处理，再进行冲压成形，零件的起皱现象基本消除，如图 8 所示。

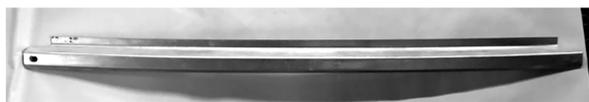


图 8 合格零件

Fig. 8 Qualified parts

## 3 结论

(1) 3 种冲压成形方法成形的零件都会起皱，但预折弯后冲压成形的零件的不规则流料现象较轻，起皱的范围大大减小，并且折弯后冲压成形的零件的弧度回弹程度较其他两种冲压成形方法均有所减小。

(2) 外防护板成形模具的弧度应至少考虑 15% 的回弹率。

(3) 5A06 铝合金材料零件在成形过程中适当增加退火工艺有助于零件成形。

### 参考文献:

- [1] 徐浩. 汽车后纵延伸梁冲压成形工艺优化设计 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.  
Xu H. Optimized Design of Stamping Process for Automobile Rear Longitudinal Extension Beam [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [2] 杨立军, 孙荣创. 金属薄板成形的有限元仿真技术 [J]. 机床与液压, 2010, 38 (6): 104-106.  
Yang L J, Sun R C. Finite element simulation technology of sheet

metal forming [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38 (6): 104-106.

- [3] 孙杰, 袁国定, 陈炜. 薄板多工步冲压成形仿真的关键技术及有待解决的问题 [J]. 新技术新工艺, 2003, (5): 2-5.  
Sun J, Yuan G D, Chen W. Key technologies and problems in simulation of multiple-step stamping of sheet metal [J]. New Technology & New Process, 2003, (5): 2-5.
- [4] 毕宝鹏, 王勇, 孙梦莹. 5A06 铝合金超塑性变形力学特性 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (2): 62-67.  
Bi B P, Wang Y, Sun M Y. Mechanical behavior of aluminum alloy 5A06 under superplastic deformation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (2): 62-67.
- [5] 肖永杰, 季田, 高根震. AA5754 铝合金板冲压成形仿真及试验研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (1): 122-125.  
Xiao Y J, Ji T, Gao G Z. Simulation of stamping forming and experimental research of aluminum alloy plate [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (1): 122-125.
- [6] 董浩. 5A06 铝合金双层板充液拉深变形规律研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Dong H. Investigation on Hydro-forming of 5A06 Aluminum Alloy Double-layer Sheets [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [7] 文杰. U 截面侧弧棱条形件的冲压回弹分析机控制 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019.  
Wen J. Analysis and Control of Stamping Springback of U-section Side Arc Strip Part [D]. Chongqing: Master's Dissertation of Chongqing University of Technology, 2019.
- [8] 徐丙坤, 施法中, 陈中奎. 板料冲压成形数值模拟中的几个关键问题 [J]. 塑性工程学报, 2001, (2): 32-35.  
Xu B K, Shi F Z, Chen Z K. Several key problems in sheet metal-forming numerical simulation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2001, (2): 32-35.
- [9] 刘克进. 薄板冲压回弹试验研究及数值模拟对比分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2004.  
Liu K J. Experimental Study on Springback and Its FEM Simulation Contrast in Sheet Metal Forming Process [D]. Changsha: Hunan University, 2004.
- [10] 左佳. 基于 Dynaform 的小车前门外板冲压工艺参数的优化 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.  
Zuo J. The Parameters Optimization of Stamping Forming for the Front Door Plate Based in Dynaform Software [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2017.
- [11] 何春光. 基于数值模拟的类 U 形件回弹预测研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
He C G. Study on Similar U-shape Spring Back Forecast Based on Numerical Simulation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [12] 李念奎, 凌泉, 聂波, 等. 铝合金材料及其热处理技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2017.  
Li N K, Ling Q, Nie B, et al. Aluminum Alloy Material and Its Heat Treatment Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017.