

U形槽板多工步折弯方法及回弹预测

李世明¹, 彭成允^{1,2}, 陈敬³, 关婧¹

(1. 重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054;

2. 重庆理工大学 汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室, 重庆 400054;

3. 大江工业集团专用车分公司, 重庆 401321)

摘要: 分析对比了大型 U 形槽板的 2 种折弯成形方式, 取 U 形槽板的小件进行多工步折弯回弹的有限元模拟并进行了相应的物理实验, 得出了回弹角度预测值, 提出在多工步折弯回弹有限元模拟中要注意的问题, 为大型 U 形槽板的折弯成形生产提供了参考。

关键词: U 形槽板; 多工步折弯方法; 有限元模拟; 回弹预测

中图分类号: TG386.3⁺1 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2012)03-0034-05

Bending Method and Springback Prediction in Multi-step Bending for U-shaped Trough Plates

LI Shi-ming¹, PENG Cheng-yun^{1,2}, CHEN Jing³, GUAN Jing¹

(1. School of Material Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Key Laboratory of Manufacture and Test Techniques for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

3. Chongqing Dajiang Industrial Co., Ltd., Special Purpose Vehicle Branch Company, Chongqing 401321, China)

Abstract: Two bending styles of huge U-shaped trough plates were analysed. After the FEM simulation of multi-step bending springback was did and corresponding experiments were conducted through the small U-shaped trough plates, the predictive value of springback angle was obtained and some issues that should be payed attention to were put forward in the FEM simulation of multi-step bending springback, which provides references for huge U-shaped trough plates production

Key words: U-shaped trough plates; method of multi-step bending; FEM simulation; springback prediction

金属板料在进行弯曲成形时,回弹难以避免。回弹现象会大大影响产品质量,预测板料的回弹量至关重要。由于大型汽车结构件承受较大的载荷,往往选用强度较高的厚板,回弹量较大。如果采用整体折弯成形的方式生产大型 U 形件,对折弯机的压力要求较高,并且由于要同时折弯多个角度,难以准确预测每个角度的回弹量,修模的难度也比较大。另外,整体成形的模具通用性较差,在小批量生产时,经济效益较低。采用多工步折弯的方式成形 U

形槽板,回弹量容易预测及控制,同时模具的通用性较好。文中就 U 形槽板多工步折弯顺序及回弹问题进行了探讨。

1 板料弯曲回弹的理论

1.1 板料弯曲应力应变的理论计算^[1]

金属板料的弯曲可以分为纯弯矩弯曲理论和有

收稿日期: 2011-12-19

作者简介: 李世明(1987-),男,重庆人,在读研究生,主要研究方向为板料成形及其模具技术。

加载情况下的弯曲理论。研究表明当弯曲半径和板料厚度的比值 r_i/t 大于 4 时为纯弯矩弯曲。在弹塑性弯曲中,弹性部分的应力和应变应该服从 Hooke 定律:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} \xi_x$$

式中: σ_x 为在切向方向上的应力; E 为弹性模量; ν 为泊松比; ξ_x 为切向方向上的应变。

再应用 Swift 硬化准则及塑性屈服准则可以得到塑性条件下的应力关系式:

$$\sigma_x = KR^{n+1} \left(\frac{\xi_0 - \xi_1}{R} + \ln \left(1 \pm \frac{y}{r} \right) \right)^n$$

式中: K 为材料常数; R 为一重要指数,用来探究各项异性和应力/应变状态对板料纤维流动的影响; n 为硬化指数; ξ_0 为切向方向最大应变; ξ_1 为弹性应变极限; y 为纤维层至中性层的距离; r 为板料中性层半径。

一个的任意层的真实应变和工程应变分别为:

$$\xi_x = \ln \left(1 + \frac{y}{r} \right), e_x = \frac{y}{r}$$

1.2 弯曲角回弹量的理论计算^[1]

假设弯曲后的卸载过程是在塑性弯曲相反方向施加一个假想的弹性弯矩,可以得出弯曲角的回弹量计算公式: $\Delta\alpha = \frac{B}{E} \frac{3}{n+2} \left(\frac{t}{2\rho_0} \right)^{n-1} \alpha_0$ 。影响回弹的主要因素有:材料的力学性能、相对弯曲半径 r/t 、弯曲角 α 、弯曲方式、弯曲件形状。

2 折弯顺序的确定

U形槽板产品的截面如图 1 所示。该产品可采用 4 次折弯,折弯角度分别为 $120^\circ, 150^\circ, 150^\circ, 120^\circ$ 。由于产品的截面左右对称,每次只折一个弯,可以排列出 12 种不同的折弯顺序。

对于大型的 U 形槽板,由于折弯线较长难于定位。为了能够保证定位准确,采用 2 种定位相结合的方式:在板料上画线定位和调节后挡料块定位。在折最后一个弯时,凸模可能会受到折弯后板料的干涉,折最后一个弯只有 2 种 (120° 或 150°),并且在折弯过程中还有调转板料方向的情况。列举 3 种折弯顺序进行分析,见表 1。

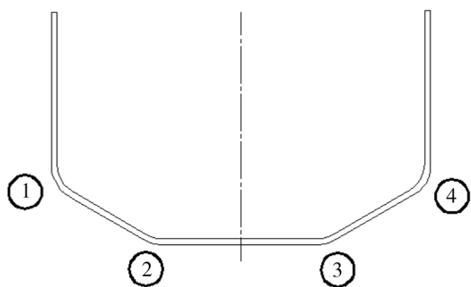


图 1 U 形槽板截面

Fig. 1 Cross-section of U-shaped trough plate

表 1 折弯顺序分析

Table 1 Analysis of bending order

折弯次数	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
1234				
2134				
1243				

方案 1(1234):该方案不需要调转板料的方向,每折弯一次需要调节后挡料块的位置,定位比较麻烦,但产品精度较高。在第 4 次折弯结束时板料离凸模较近约为 12 mm,如图 2 所示。

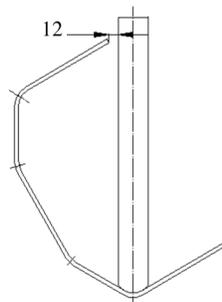


图 2 凸模与板料边缘的距离

Fig. 2 The distance between punch and the edge of blank

方案 2(2134):该方案每折弯一次需要调节挡料块的位置,产品精度较高,但在折弯 2 和 1 结束后需要调转板料的方向,生产效率较低。在第 4 次折弯结束时板料离凸模较近约为 12 mm。

方案 3(1243):该方案不需要调转板料的方向,在折第 1,2,4 弯时需要调节挡料块的位置,同时折第 3 个弯时难以用后挡料块定位。

从提高产品精度和生产效率角度考虑,方案1较为合理。

3 多工步折弯成形回弹的有限元模拟

3.1 有限元模拟的基本条件

文中选用板料有限元模拟常用软件 Dynaform 5.7。板料的尺寸为 604 mm×200 mm×5 mm。材料为国产焊接钢 HG60,采用台肩式弯曲,如图3所示。

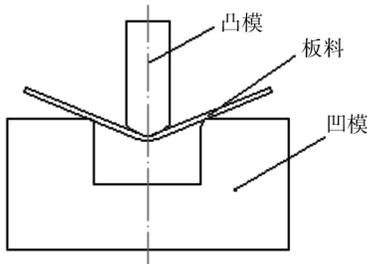


图3 台肩式弯曲
Fig.3 Shoulder bending

有限元模拟板料折弯成形时,需要考虑材料非线性、几何非线性以及接触非线性对模拟精度的影响。折弯回弹的模拟主要分为2个过程:加载过程的模拟(成形)和卸载过程的模拟(回弹)。对于成形阶段的模拟,采用动态显示算法选用BT单元,回弹采用静态隐式算法,选用16号全积分单元。对于回弹模拟,成形过程中弯曲应力场的模拟至关重要。研究表明^[2]当厚向积分点数少于7时,回弹模拟结果波动很大,当积分点数大于9时弯曲模拟精度提高不明显,因此沿板料厚向取7个积分点。实验选用3参数Barlat材料模型,因为该模型在平面应力状态下,既考虑了材料的厚向异性对屈服面的影响,又考虑了板料平面内各向异性对屈服面的影响。

3.2 有限元模拟过程

在Dynaform中模拟多工步折弯成形回弹时,每折弯1次都需要设定计算回弹的约束点。在将上一步回弹计算的结果导入下一步进行成形模拟时,就会影响其成形效果,需要删除回弹约束对成形的影响。这里是通过修改前一步的后处理Dynaform文件^[3]去掉回弹约束的影响。回弹角度确定的流程如图4所示。

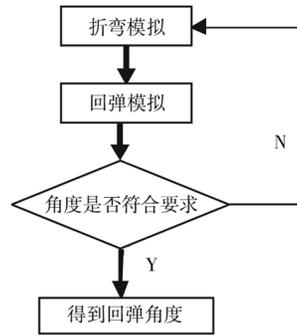


图4 回弹角度的确定流程

Fig.4 Flow chart for obtaining the value of springback angle

第1次折弯成形,折第1个弯120°。第1次折弯成形的模型、回弹后板料厚度以及主应变如图5所示。

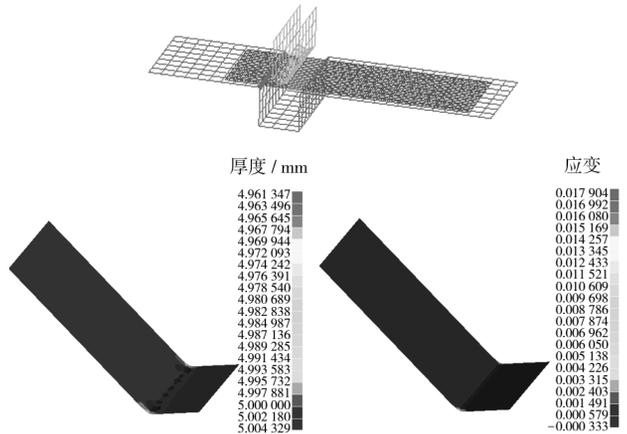


图5 第1次折弯模型、回弹后板料厚度以及主应变
Fig.5 The frist bending model,thickness and main strain after springback

将回弹计算后的Dynaform文件,去约束后导入到第2次的成形模型中,折第2个弯150°,第2次折弯成形的模型、回弹后板料厚度以及主应变如图6所示。

将第2步回弹计算得到的Dynaform文件,去约束后导入到第3次折弯成形的模型中,折第3个弯150°,第3次折弯成形的模型、回弹后板料厚度以及主应变如图7所示。

将回弹计算得到的Dynaform文件,去约束后导入到第4次折弯成形的模型中,折第4个弯120°。第4次折弯成形的模型、回弹后板料厚度以及主应变如图8所示。4次折弯回弹模拟结束后,满足其角度的要求。

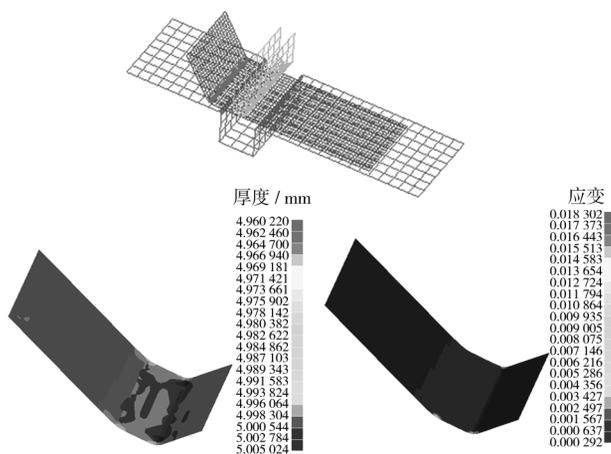


图 6 第 2 次折弯模型、回弹后板料厚度以及主应变

Fig. 6 The second bending model, thickness and main strain after springback

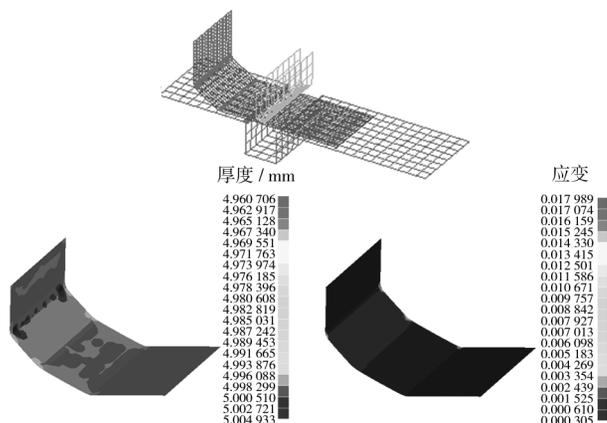


图 7 第 3 次折弯模型、回弹后板料厚度以及主应变

Fig. 7 The third bending model, thickness and main strain after springback

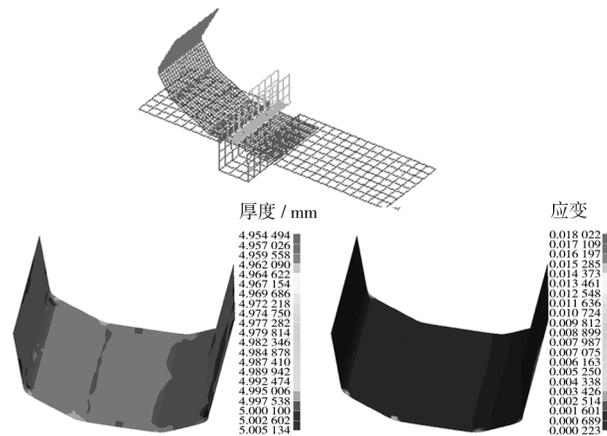


图 8 第 4 次折弯模型、回弹后厚度以及主应变

Fig. 8 The fourth bending model, thickness and main strain after springback

4 多工步折弯回弹的物理试验

多工步折弯回弹的研究,采用 1 600 t 大型数控折弯机,使用游标万能角度尺测量角度(精确到 2′)。由于是小件,折弯线较短,仅通过板料画线定位即可。不断加大凸模的行程,直到回弹后的角度满足要求。在凸模下行到最大成形时,在未移开凸模的情况下测量回弹前的角度,移开凸模后测量回弹后的角度。回弹前的角度测量如图 9 所示,回弹后的角度测量如图 10 所示。试验测量结果见表 2,回弹后的尺寸在 $120^\circ \pm 15'$, $150^\circ \pm 15'$ 以内,满足精度要求。最后得到相应的产品如图 11 所示。

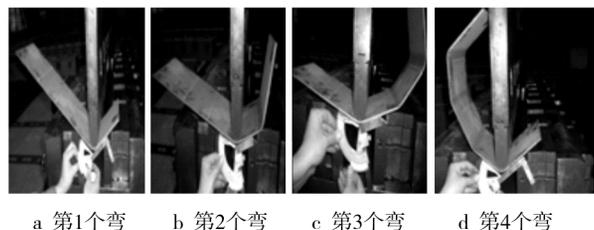


图 9 回弹前角度测量

Fig. 9 Angle measurement before springback

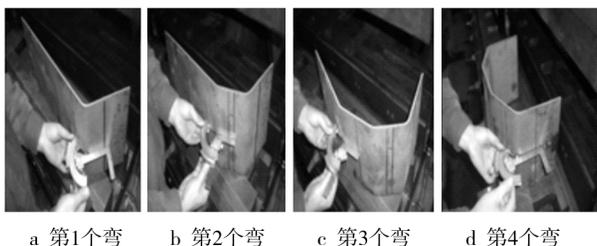


图 10 回弹后角度测量

Fig. 10 Angle measurement after springback

表 2 试验结果

Table 2 Experimental results

折弯位置	回弹前的角度	回弹后的角度	回弹角度
1	$113^\circ 46'$	$120^\circ 6'$	$6^\circ 20'$
2	$145^\circ 44'$	$150^\circ 10'$	$4^\circ 26'$
3	$145^\circ 28'$	$149^\circ 54'$	$4^\circ 26'$
4	$113^\circ 28'$	$119^\circ 50'$	$6^\circ 22'$

将模拟得出的回弹量与实际测量得到的回弹量进行对比,见表 3。可以看出折弯 120° 时的回弹量大于折弯 150° 时的回弹量,折弯相同角度的回弹量



图 11 产品

Fig. 11 Product

5 结语

多工步折弯成形便于预测和控制回弹量,对压机的压力要求相对较低,同时模具的通用性好,经济效益高。笔者确定了折弯顺序,并通过对板料多工步折弯回弹的有限元模拟,对折弯角度的回弹量进行预测。通过相应的物理试验测量了每个角度的回弹量。有限元模拟与物理试验的结果基本一致,为企业的实际生产提供了参考。

参考文献:

- [1] 夏琴香. 冲压成形工艺及模具设计[M]. 广州:华南理工大学出版社,2004.
- [2] 万敏. 板料成形计算机分析技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [3] 邓兆虎. 板料多次弯曲成形回弹的数值模拟研究[J]. 模具工业,2009,35(9):36-40.

径孔型系统,经过理论计算和有限元分析,得到了理想的成品,为大棒材减定径生产及工艺研究提供了新的思路。

2) 采用 VC++ 对 Pro/E 二次开发,设计出减定径孔型参数化设计系统,实现减定径孔型系统的快速设计。

3) 通过有限元模拟,发现新孔型系统咬入情况比较稳定,轧制结果规圆效果良好,应力分布均匀。

参考文献:

- [1] 李民,张安平. 三辊棒材减定径机组孔型设计及力能参数计算[J]. 轧钢,2007(5):27-31.
- [2] 徐春,王全胜,张弛. 型钢孔型设计[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [3] 艾妮,艾自勤. 用 VC++ 开发 Pro/E 三维标准件库[J]. 机械与电子,2005(1):70-73.
- [4] 张小勇,陈果,周家林. 热连轧圆钢成品孔型的有限元分析[J]. 武汉科技大学学报,2010(4):37-41.

基本一样。有限元模拟与实测的结果基本一致。通过试验可以指导大型 U 形槽板的生产,提供回弹量的预测值。

表 3 模拟的回弹角与试验回弹角对比

Table 3 Contrast of springback angle between FEM and experiment

折弯位置	模拟的回弹角	实测的回弹角
1	6.28°	6.33°
2	4.24°	4.43°
3	4.24°	4.43°
4	6.31°	6.37°

(上接第 21 页)

2) 轧制阶段。在轧制过程中,上一道次往辊缝处挤压凸起的轧件,在下一道次中首先接触轧辊,轧制时轧辊圆弧段对轧件进行规圆。末道次轧件横截面上的等效应力和等效应变分布如图 8 所示。

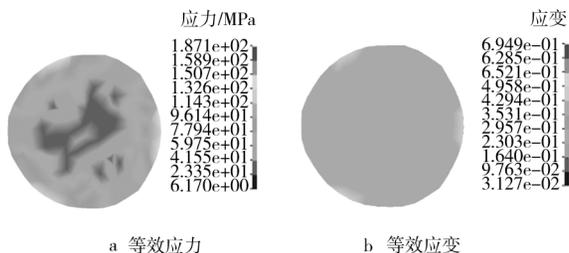


图 8 孔型轧后轧件断面的等效应力和等效应变

Fig. 8 The stress and strain diagram in the cross-section of workpiece after the last rolling pass

4 结语

1) 通过切线孔型设计得到的三辊大棒材减定