

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.06.012

铝型材拉弯成形数值模拟及工艺优化

郭浩宇^{1,2}, 闫晓磊^{1,2}, 陈昌荣¹, 练国富¹, 黄旭¹, 冯美艳¹

(1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;
2. 福建省汽车电子与电驱动重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 针对汽车行李架铝型材拉弯成型问题, 运用 ABAQUS 有限元分析软件, 建立型材拉弯成形过程的有限元模型, 通过对 A6043 铝型材结构件进行拉弯成形正交数值试验, 研究预拉量、包覆拉伸量、补拉量和摩擦系数等拉弯成形关键工艺参数对型材回弹量的影响规律。结果表明: 在一定拉伸范围内, 回弹量随预拉量、包覆拉伸量、补拉量的增大而减少, 随摩擦系数的增大先减小后增大; 工艺参数中包覆拉伸量对回弹结果的影响最大, 达到 3%, 回弹量趋于稳定; 当预拉量为 1%、包覆拉伸量为 3%、补拉量为 1%、摩擦系数为 0.1 的工艺参数下, 不规则铝型材汽车行李架拉弯成形后的回弹量最小。

关键词: 铝型材; 拉弯成形; 数值模拟; 工艺参数; 回弹

中图分类号: TG386.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-4348(2020)06-0576-07

Numerical simulation and process optimization of aluminum profile stretch-bending forming

GUO Haoyu^{1,2}, YAN Xiaolei^{1,2}, CHEN Changrong¹, LIAN Guofu¹, HUANG Xu¹, FENG Meiyang¹

(1. School of Mechanical and Automobile Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Fujian Key Laboratory of Automotive Electrics and Electric Drive, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Aiming at the problem of stretch-bending forming of automotive luggage rack aluminum profiles, ABAQUS finite element analysis software was used to establish a finite element model of the stretch-bending process. Through the orthogonal numerical experiment of stretch-bending forming of A6043 aluminum profile structural parts, the influence of key process parameters of stretch-bending forming such as pre-stretching amount, coating stretch amount, supplementary stretch amount and friction coefficient on the springback of the profile was studied. Results show that within a certain stretching range, the amount of springback decreases with the increase of the pre-stretch, the amount of coating stretch, and the amount of supplementary stretch, and it first decreases and then increases with the increase of the friction coefficient. In the process parameters, cladding stretch amount has the greatest influence on the springback results. When the maximum coating stretch reaches 3%, the springback tends to be stable; when the pre-stretch amount is 1%, the coating stretch is 3%, the supplementary stretch is 1%, and the friction coefficient is 0.1, the elasticity of the irregular aluminum car roof rack after bending is the smallest.

Keywords: aluminum profile; stretch-bending; numerical simulation; process parameters; springback

铝型材具有密度低、强度高、抗冲击性能好、式车身的制造^[1]。拉弯成形是铝型材的一种重要回收等优点, 广泛应用于汽车安全部件和框架要加工形式。铝型材在拉弯过程中容易产生起

收稿日期: 2020-11-03
基金项目: 福建省中青年教师教育科研项目(JAT170376); 福建省高校杰出青年科研人才培育项目(GY-Z160148); 福建工程学院校科研启动基金(GY-Z17003)
第一作者简介: 郭浩宇(1993—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向: 材料成形工艺。
通信作者: 陈昌荣(1986—), 男, 福建泉州人, 副教授, 博士, 研究方向: 材料成形工艺、金属增材制造。

皱、破裂、回弹等缺陷,使得最终成型的拉弯件在尺寸和形状精度都很难达到设计的要求,如何确保型材成型质量的稳定可靠是弯曲成型件的主要问题。

一般可以通过仿真与实验相结合的手段进行工艺优化来提高型材拉弯后的成型质量^[2]。Finn 等^[3]研究了车身零件弯曲成形回弹数值模拟方法,提出在仿真的不同阶段采用不同的算法可以更加接近实际的生产情况;Arid H. Clausen 等^[4]利用有限元软件,分析了不同型材截面大小对铝型材回弹和畸变的影响规律。Joungsik Suh 等^[5]通过研究拉伸方法和拉伸长度对回弹进行有限元模拟,结果表明在弯曲前进行预拉和弯曲后进行补拉可以有效地改善型材的成型质量;Gu 等^[6]研究了不同成形曲率下的铝型材回弹情况;杜建宁等^[7]针对常用铝合金型材零件进行研究,预测了型材在成形过程中容易出现问题的区域,验证了数值模拟回弹过程的准确性。卜晓珍等^[8]利用有限元软件对 π 截面铝型材进行了拉弯仿真,分析了预拉和补拉对铝型材回弹的影响规律。

目前,针对铝型材拉弯成形工艺数值模拟的分析研究还不够完善,少有考虑包覆拉伸对型材回弹后的影响。本文基于有限元方法,对 A6043 系的汽车行李架结构件进行拉弯成形仿真模拟,研究其位移控制拉弯成形的工艺,分析了不同条件下的预拉、包覆拉、补拉和摩擦系数对汽车行李架成型件回弹的影响规律。根据影响成型质量的规律优化工艺参数,有效减少试验的次数,降低企业生产成本,为此类零件生产的工艺参数优化提供参考。

1 拉弯成形工艺

1.1 基本原理

拉弯成形工艺与其他成形工艺相比成本低,适合加工变曲率大的型材。型材拉弯是将型材在一定的弯曲条件下压入模具成型的弯曲过程^[9],如图 1 所示。通常采用的拉弯加载方式有 3 种:分别为预拉-弯曲(P-M)、弯曲-补拉(M-P)、预拉-弯曲-补拉(P-M-P),根据现有研究表明,P-M-P 的拉弯成型方式成型质量最好,因为弯曲前施加一定的预拉力可以使型材进入塑性阶段,适当的拉伸量能有效改善成型的应力分布状态,减少成形后的缺陷^[10]。

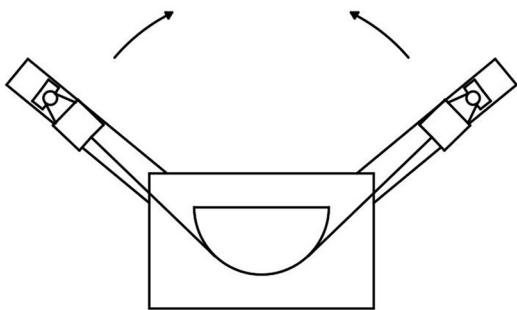


图 1 拉弯加工原理图

Fig.1 Schematic diagram of stretch bending processing

1.2 回弹

拉弯成形过程相对比较复杂,影响因素较多,比如型材的材料属性,零件的形状和大小,成型的温度及工艺参数等^[9]。对于汽车行李架结构件而言,拉弯卸载后回弹量大小是评价一款行李架最终成型效果的重要评价指标之一。本文研究的回弹是指拉弯卸载前后型材的形状发生变化所引起的现象,回弹量以卸载前后型材两端的间距 d_0 来描述,如图 2 所示。

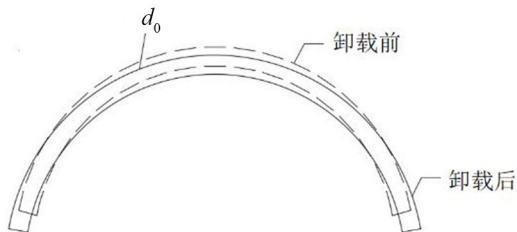


图 2 回弹卸载前后变化图

Fig.2 Changes before and after springback unloading

2 拉弯成形有限元模型的建立

2.1 材料模型

汽车行李架采用 A6043 系铝型材,金属材料拉伸测试依据室温测试的国家标准(GB/T 228.1-2012),在电子拉力试验机(Instron, LEGEND 2382)上以 2 mm/min 的拉伸速率进行准静态拉伸,得到如图 3 所示的真应力-应变曲线图。根据 Krupkowsky 方程:

$$\sigma = K (\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (1)$$

其中, K 为强度系数; n 为应变强化指数。建立塑性变形中的应力 σ_p 与应变 ε_p 之间的本构关系和非线性拟合,获得 A6043 铝型材力学性能参数如

表 1 所示。

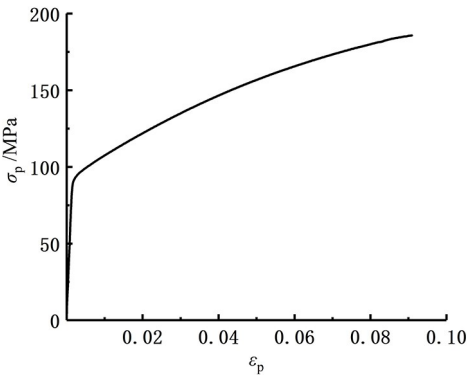


图 3 A6043 真应力-应变曲线

Fig.3 A6043 true stress-strain curve

表 1 A6043 铝型材力学性能参数

Tab.1 Mechanical properties of A6043

参数	数值
密度/(g · cm ⁻³)	2.7
弹性模量/MPa	57 181
泊松比	0.369
屈服应力/MPa	96.188
抗拉强度/MPa	181.286
应变强化指数	0.260
各向异性系数	0.424

2.2 数值模拟建模

利用 ABAQUS 软件数值模拟汽车行李架的加工过程,汽车行李架与其他拉弯成形件相比形状和截面都不规则,以不规则回形截面铝型材为研究对象,建立如图 4 所示的装配体模型,该模型由铝型材件、夹钳和模具组成。由于结构关于中心面对称,故采用 1/2 模型,减少计算时间。

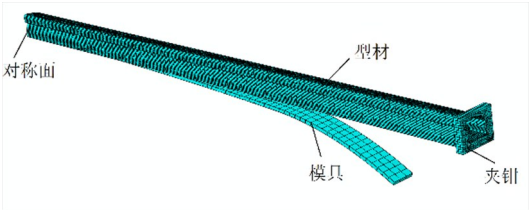


图 4 拉弯有限元模型

Fig.4 Stretch-bending finite element model

拉弯成形过程主要分成 3 个阶段:预拉、弯曲

包覆拉和补拉。为了使仿真过程与实际结果更加贴近,不同阶段算法也不同,拉弯过程为大变形阶段,采用动态显示算法,考虑其几何非线性,卸载过程用静力隐式算法。以 C3D8R 为型材实体单元网格,C3D4 为模具和夹钳的单元网格,其中铝型材的网格数为 20 210 个单元,模具和夹钳的网格数分别为 110 和 1 050 个单元。

在进行拉弯数值模拟成形的过程中,铝型材与模具一直保持接触,而模具与型材的接触摩擦又是非线性的,所以在 ABAQUS 仿真过程中模具与型材之间采用硬接触,通用接触算法和库伦摩擦模型。

2.3 夹钳的运动轨迹

在模拟拉弯过程中,型材由夹钳运动的位移轨迹控制,夹钳的运动轨迹可分解成 x 轴和 y 轴上的位移。由于型材的模具对称,所以只取一侧进行计算。计算夹钳的轨迹分为两段,先拉弯大弧段,再拉弯小弧段。

如图 5 所示,待加工件的原始长度为 L ,模具的大弧半径为 R ,弧度为 α ;小弧段半径为 r ,弧度为 β 。夹钳在 x 方向的位移量为 $f(x)$,在 y 方向的位移量为 $f(y)$ 。

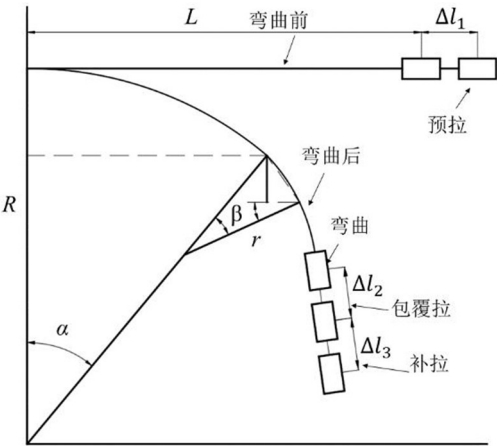


图 5 位移加载轨迹示意图

Fig.5 Schematic diagram of displacement loading trajectory

在图 5 中,假设预拉量为 Δl_1 ,包覆拉伸量为 Δl_2 ,补拉量为 Δl_3 ,预拉结束后夹钳的坐标位置是:

$$f(x) = L + \Delta l_1 \tag{2}$$

$$f(y) = 0 \tag{3}$$

预拉结束后型材的长度为 $L + \Delta l_1$, 弯曲包覆拉伸结束后夹钳的坐标位置是:

$$\begin{aligned} f(x) &= R\sin\alpha + r\sin(\alpha + \beta) - r\sin\alpha + \\ & (L + \Delta l_1 + \Delta l_2 - R\alpha - r\beta)\cos(\alpha + \beta) \quad (4) \\ f(y) &= R(1 - \cos\alpha) + r[\cos\alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \\ & (L + \Delta l_1 + \Delta l_2 - R\alpha - r\beta)\sin(\alpha + \beta) \quad (5) \end{aligned}$$

补拉结束后夹钳的坐标位置是:

$$\begin{aligned} f(x) &= R\sin\alpha + r\sin(\alpha + \beta) - r\sin\alpha + \\ & (L + \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 - R\alpha - r\beta)\cos(\alpha + \beta) \quad (6) \\ f(y) &= R(1 - \cos\alpha) + r[\cos\alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \\ & (L + \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 - R\alpha - r\beta)\sin(\alpha + \beta) \quad (7) \end{aligned}$$

3 试验方案

3.1 拉弯工艺参数的选择

根据汽车行李架铝型材零件的成形特点,预拉量、包覆拉伸量、补拉量和摩擦力的大小都会影响型材的最终成型质量,目前研究拉弯成形工艺参数优化一般不考虑它们之间的交互影响^[11-12]。预拉和补拉可以有效改善型材内部的应力分布情况,一般限定在 0.2%~1%之间,型材弯曲的包覆拉伸阶段是其主要变形阶段,造成成形材料起皱和断裂现象的主要原因是拉伸量过大,一般拉伸量限定在 1%~3%之间,摩擦系数在生产过程中也会有所波动。拉弯成形水平因素如表 2 所示。

表 2 拉弯成形水平因素取值表				
Tab.2 Factor levels for stretch forming				
水平	预拉量/ %	包覆拉伸量/ %	补拉量/ %	摩擦 系数
1	0.2	1	0.2	0.05
2	0.6	2	0.6	0.10
3	1.0	3	1.0	0.15

3.2 正交试验设计

正交试验是一种研究多因素多水平的试验方法,有助于减少试验数量并通过正交矩阵寻找最佳工艺参数组合,改善型材的成型质量,从而减少试验的成本和时间^[13]。根据因素和水平的数目,本次所选用的正交试验设计表为四因素三水平表

格 $L_9(3^4)$, 共计 9 组试验,各试验水平如表 3 所示。

表 3 正交试验表				
Tab.3 Orthogonal experiment table				
序号	预拉量	包覆拉伸量	补拉量	摩擦系数
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

4 结果与分析

4.1 试验结果

通过数值模拟分析研究不同工艺参数对不规则截面汽车行李架零件成形质量的影响规律,正交试验数据及结果如表 4 所示。

表 4 正交试验结果					
Tab.4 Results of orthogonal experiments					
序号	预拉量/ mm	包覆拉伸量/ mm	补拉量/ mm	摩擦 系数	回弹量/ mm
1	1.89	9.43	1.89	0.05	9.40
2	1.89	18.86	5.66	0.10	3.86
3	1.89	28.29	9.43	0.15	4.47
4	5.66	9.43	5.66	0.15	8.89
5	5.66	18.86	9.43	0.05	3.85
6	5.66	28.29	1.89	0.10	3.74
7	9.43	9.43	9.43	0.10	5.12
8	9.43	18.86	1.89	0.15	4.58
9	9.43	28.29	5.66	0.05	3.82

4.2 极差分析

根据极差的计算公式对正交数据进行处理,得到 4 个工艺参数极差值如表 5 所示。

通过对极差结果的分析,包覆拉伸量是影响

回弹的主要因素,摩擦系数、补拉量和预拉量影响较为显著。

表 5 极差分析结果
Tab.5 Range analysis results

范围	预拉量	包覆拉伸量	补拉量	摩擦系数
k_1	5.91	7.80	5.90	5.69
k_2	5.49	4.09	5.52	4.24
k_3	4.50	4.01	4.48	5.98
极差 R	1.41	3.79	1.42	1.74

4.3 工艺参数影响分析

预拉量对回弹量的影响趋势如图 6 所示,回弹量与预拉量呈现初负相关,预拉量越大,回弹量越小。预拉量从 0.2%增大到 1%的过程中,回弹量减少较为显著。主要是因为预拉量越大,型材越容易进入塑性状态,在拉弯卸载后弹性变形区域减少从而减少回弹量^[2]。

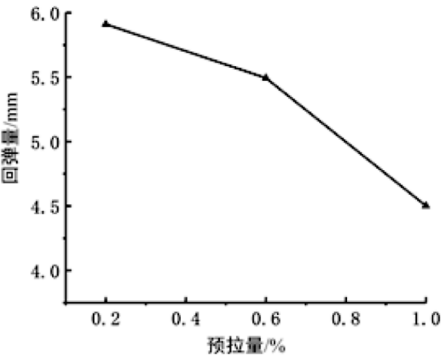


图 6 回弹量随预拉量的变化

Fig.6 Variance of the amount of springback varies with the amount of pretension

图 7 是型材回弹大小随包覆拉伸量变化的趋势图,当包覆拉伸量从 1%增大到 3%时,回弹量减少明显。由于包覆拉伸阶段是型材弯曲的贴模阶段,型材的主要变形就在包覆阶段,改善包覆拉伸量可以有效改善铝型材内部的应力状态,使塑性变形部分减少,降低回弹量^[14]。

随着补拉量增大,型材回弹大小随补拉量的变化如图 8 所示,当补拉量从 0.2%增大到 1%时,回弹量一直是下降的趋势。通过控制补拉量的大小可以改善型材中的应力分布情况,加大补拉量

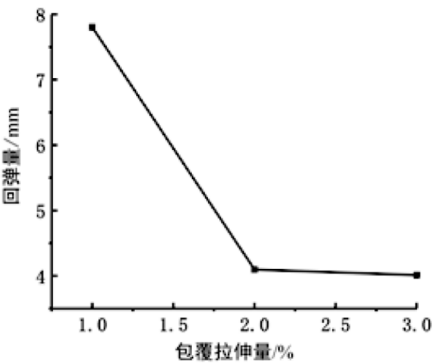


图 7 回弹量随包覆拉伸量的变化

Fig.7 Variance of springback with the amount of coating stretch

可以使型材的应力分布情况变得更均匀^[2]。

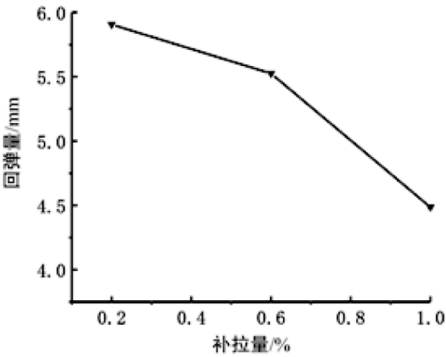


图 8 回弹量随补拉量的变化

Fig.8 Variance of the amount of springback with the amount of supplementary stretch

摩擦系数对回弹量的影响如图 9 所示。摩擦系数为 0.1 时,型材的回弹量最小。摩擦系数的增大对回弹量的影响较为明显,且与摩擦系数呈正相关性。摩擦系数越大,相同的拉伸量需要克服的摩擦力越大,以至于型材在塑性变形区域较小,且摩擦力会对型材拉伸有一定的抑制作用,使得型材表面受力分布不均匀。所以在拉弯过程中减少不必要的摩擦因素可以改善型材成型后的回弹量^[8]。

从正交试验结果可得出拉弯的最佳工艺参数为:摩擦系数 0.1,预拉量和补拉量 1%,包覆拉伸量 3%。针对最佳工艺参数进行了验证试验,试验表明,最佳工艺参数情况下的拉弯成型件回弹量为 3.47 mm,回弹量最小。如图 10 标注位置所示。

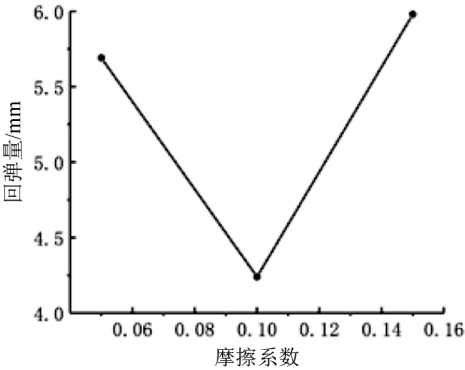


图 9 回弹量随摩擦系数的变化

Fig.9 Variance of the amount of springback with the coefficient of friction

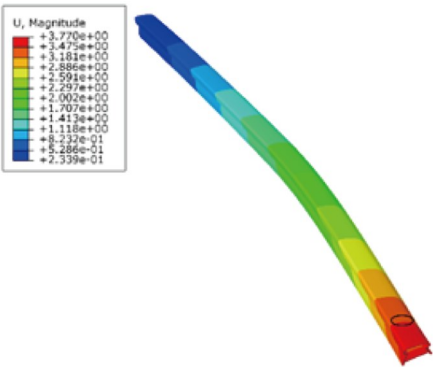


图 10 回弹量云图(预拉量 1%,补拉量 1%,
包覆拉伸量 3%,摩擦系数 0.1)

Fig.10 Nephogram of springback amount (pre-stretching amount 1%, supplementary stretch amount 1%, coating stretch amount 3%, friction coefficient 0.1)

4.4 包覆拉伸量单因素分析

通过正交试验分析可知,在拉弯过程中,包覆拉伸量对型材的成型质量影响最大,在保证其他几个因素都是最优的情况下,对包覆拉伸量做单因素分析,分析包覆拉伸量分别为 1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%的回弹量,得到关于包覆拉伸量与回弹量的一元非线性方程:

$$y = 9.58 \times \exp(-x/0.56) + 3.45\Delta \quad (8)$$

函数关系、方程(8)与试验结果散点的结果拟合度 R^2 达 0.999,符合实际的变化规律。如图 11 所示,当包覆拉伸量达到 3%以后,超过了材料的屈服应力,进入塑性变形阶段,回弹量趋于稳定,再增加包覆拉伸量对改善回弹作用不大。在其他工艺参数相同,分别为预拉量 1%、补拉量

1%、摩擦系数 0.1 时,对 1%和 7%包覆拉伸量的型材进行仿真模拟,得到应力云图如图 12 所示。从应力云图可以看出,改变包覆拉伸量可以有效改善铝型材内部的应力状态,使塑性变形和卸载后弹性变形部分减少,降低成形后的回弹量。

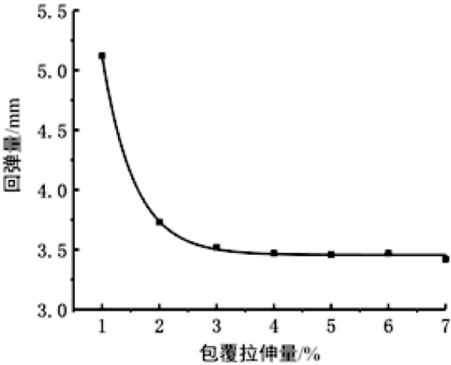
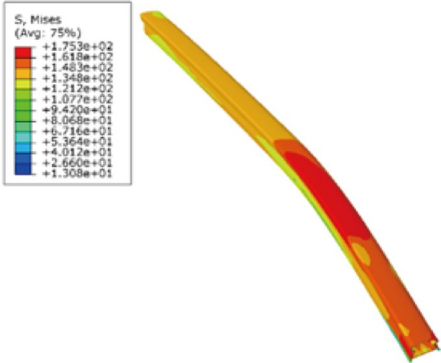
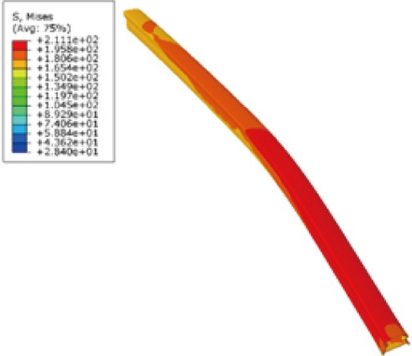


图 11 回弹量随包覆拉伸量的变化(预拉量 1%,补拉量 1%)
Fig.11 Change of springback with the coating stretch amount (pre-stretching 1%, supplementary stretch 1%)



(a) 1%包覆拉伸量



(b) 7%包覆拉伸量

图 12 不同包覆拉伸量的应力云图

Fig.12 Stress nephogram of different coating stretches

5 结论

1) 回弹量与预拉量、包覆拉伸量、补拉量呈负相关性,与摩擦系数成先减小后增大的趋势。

2) 通过正交实验得到最佳工艺参数:预拉量为 1%、包覆拉伸量为 3%、补拉量为 1%、摩擦系

数为 0.1。在最佳工艺参数下,汽车不规则铝型材行李架的拉弯成形回弹量最小。

3) 包覆拉伸量对回弹量的影响最为显著,且回弹量随包覆拉伸量的增大而降低;通过包覆拉伸量单因素分析,发现包覆拉伸量超过 3%后,回弹量趋于稳定。

参考文献:

- [1] CORONA E. A simple analysis for bend-stretch forming of aluminum extrusions[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(3): 433-448.
- [2] 郝涛涛. 非对称截面型材拉弯成形数值模拟研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [3] FINN M, GALBRAITH P, WU L, et al. Use of a coupled explicit—implicit solver for calculating spring-back in automotive body panels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 50(1/2/3/4): 395-409.
- [4] 梁继才, 李义, 高嵩, 等. 型材多点柔性拉弯成形回弹预测[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 185-190.
- [5] SCHILP H, SUH J, HOFFMANN H. Reduction of springback using simultaneous stretch-bending processes[J]. International Journal of Material Forming, 2012, 5(2): 175-180.
- [6] GU Z, JIA L, LI X, et al. Stretch bending defect control of L-section SUS301L stainless-steel components with variable contour curvatures[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26(12): 1376-1384.
- [7] 杜建宁, 李小强, 高岩. 典型铝合金型材零件拉弯成形工艺的数值模拟与实验研究[J]. 锻压技术, 2015, 40(4): 148-151.
- [8] 卜晓珍, 翟华, 周丽华, 等. π 截面铝合金型材拉弯成形工艺数值模拟研究[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(2): 151-161.
- [9] VOLLERTSEN F, SPRENGER A, KRAUS J, et al. Extrusion, channel, and profile bending: a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 87(1/2/3): 1-27.
- [10] 周贤宾, 刁可山, 李晓星, 等. 闭截面型材的拉弯成形性[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10): 1168-1173.
- [11] 王贺, 黄霞, 孙莹, 等. 铝型材拉弯成形工艺稳健性优化[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(3): 65-72.
- [12] 王雪. 铝型材三维多点拉弯成形回弹相关问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [13] 滕克磊, 金朝海. 基于 LS-DYNA 的不锈钢车顶弯梁拉弯仿真[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(2): 24-29, 83.
- [14] 王敏. 不锈钢车顶弯梁拉弯成形数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

(责任编辑: 陈雯)