

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2021.03.008

2024 铝合金挤压型材拉弯回弹分析

高恩志^{1,2}, 李作成¹, 王 杰¹, 刘春忠¹

(1. 沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110136;

2. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016)

摘 要: 2024 铝合金 L 截面挤压型材拉弯结构件是飞机壁板、地板及连接接头等部位的关键零部件, 针对此类结构件拉弯成形回弹问题, 基于位移控制的夹钳轨迹建模方法, 建立了拉弯及回弹有限元模型, 模拟分析了预拉量、补拉量及摩擦系数对回弹量的影响规律。结果表明: 预拉量、补拉量及摩擦系数对回弹量有较大影响。随着预拉量、补拉量的增加, 半径回弹率减小。挤压型材与模具之间使用有效的润滑剂, 半径回弹率减小。采用正交试验方法模拟研究了预拉量、补拉量及摩擦系数对回弹量的影响程度。方差分析表明补拉量及摩擦系数在 $F_{0.25}(2, 2)$ 水平下对试验指标影响显著。

关键词: 2024 铝合金; 拉弯; 回弹; 数值模拟

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2021)03-0050-07

Springback Analysis of 2024 Aluminum Alloy Extrusion Profile in Stretch Bending

GAO Enzhi^{1,2}, LI Zuocheng¹, WANG Jie¹, LIU Chunzhong¹

(1. College of Material Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Shenyang 110016, China)

Abstract: 2024 aluminum alloy L-section extrusion profile stretch bending structure parts are key components in aircraft panel, floor and joint. Aiming at the stretch bending springback problems of this kind of structure part, a stretch bending and springback finite element model was established based on the displacement controlled clamp trajectory modeling method, and the influences of pre-stretching, post-stretching and friction coefficient on springback were analyzed. The significance of pre-stretching, post-stretching and friction coefficient to springback was studied by orthogonal experiments. The results show that increasing pre-stretching or post-stretching can reduce the radius springback ratio, the lubricant between extrusions with die reduces the radius springback ratio. The variance analysis of the orthogonal experiment shows that the post-stretching and friction coefficient have significant influence on the experimental indexes at the levels of $F_{0.25}(2, 2)$.

Key words: AA2024; stretch bending; springback; numerical simulation

收稿日期: 2020-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405310); 辽宁省科技厅重大专项资助(2019JH1/10100012); 辽宁省教育厅一般资助项目(JYT19064)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51405310); Department of Science and Technology of Liaoning Province(2019JH1/10100012); Educational Department of Liaoning Province(JYT19064)

作者简介: 高恩志(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事金属精密塑性成形及其仿真研究。

引用格式: 高恩志, 李作成, 王 杰, 等. 2024 铝合金挤压型材拉弯回弹分析[J]. 有色金属工程, 2021, 11(3): 50-56.

GAO Enzhi, LI Zuocheng, WANG Jie, et al. Springback Analysis of 2024 Aluminum Alloy Extrusion Profile in Stretch Bending[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(3): 50-56.

轻量化结构设计需求使得大型铝合金挤压型材零件在飞行器应用中日益增多,波音、空客和中国商飞主力单通道飞机上多采用 L 截面弯曲类结构零件,研究此类型材弯曲工艺,对提高弯曲零件质量、尺寸精度意义重大。

拉弯工艺具有弯曲精度高、回弹小等优点,是汽车、轨道交通及航空航天用型材弯曲制件的主要成形方法,多用于成形各类截面型材零件^[1-2]。拉弯成形加载方式一般包括以下几个阶段,首先是预拉阶段,通过施加预拉力或预拉位移,使材料达到屈服状态,接下来施加弯矩或位移转角实现贴模,最后施加轴向补拉量^[3-4]。回弹是型材拉弯过程不可避免的主要缺陷。影响拉弯回弹量的因素众多,既包括材料本身性能、型材截面尺寸及弯曲形状等内在因素,还需考虑加载过程的设备参数、模具参数等外在因素,准确预测回弹量困难。近年来,国内外诸多学者采用理论解析、试验研究和数值模拟等手段对型材拉弯过程及回弹进行了分析研究^[5-6],理论解析法包括以平截面假定和单向应力假定为基础的工程理论模型以及考虑径向应力及中性层内移影响的理论模型。由于型材拉弯成形过程涉及到几何非线性、边界非线性以及材料非线性等问题,特别是针对复杂截面形状,理论分析比较困难。有限元数值模拟技术的快速发展使其越来越多的应用于型材拉弯过程。利用由试验和理论分析所得到的材料本构关系、接触关系,根据相关力学原理和一定的简化假设,建立成形过程的有限元模型,从而可以计算出不同工艺参数对型材拉弯位移、应力和应变的影响规律,预测工件成形的最终形状及回弹量^[7-9]。研究表明,对于特定截面的挤压型材,拉弯过程预拉量、补拉量以及润滑条件是决定拉弯件质量和回弹量的关键因素。LIU 等^[10]通过数值模拟方法研究了 Z 形和 T 形截面高强铝合金拉弯回弹过程,发现由于高的杨氏模量和强度,拉弯卸载后出现显著回弹,并且增加预拉量或补拉量可降低材料的半径回弹。

2024 铝合金 L 截面型材拉弯制件在飞机框肋缘条、机身中段等部位应用广泛,然而 2024 高强铝合金室温变形抗力大、成形极限低,导致冷拉弯回弹大,成形质量不稳定,其工艺控制方法有待研究^[11]。本文针对此类型材拉弯回弹预测难题,研究预拉量、补拉量及摩擦条件对回弹量的影响规律,建立了 2024 铝合金 L 截面型材拉弯回弹力学基础模型、加载过程有限元仿真模型,利用该模型准确预测不同工艺参数对拉弯回弹量的影响规律,进而为工艺参

数的选择和模具合理形状的设计提供依据。

1 实验材料及方法

1.1 试件与材料

以航空用铝合金挤压件为研究对象,型材截面为 L 形,图 1 所示为型材几何示意图。以任意一个横截面上的几何形心作为原点 O,并以该横截面所在的平面和拉弯平面作为坐标平面建立笛卡儿坐标系 $Oxyz$ 。此坐标系下, z 轴穿过所有横截面的几何形心且与横截面垂直,型材的纵截面 Oxy 为拉弯平面。型材横截面高度为 h ,宽度 b ,厚度为 t ,型材总长度为 l ,单位均为 mm。拉弯试验件所用材料为 2024 铝合金挤压型材,成形时挤压型材为固溶处理后自然时效状态。挤压型材的抗拉强度为 422 MPa,屈服强度 345 MPa,延伸率 13%。

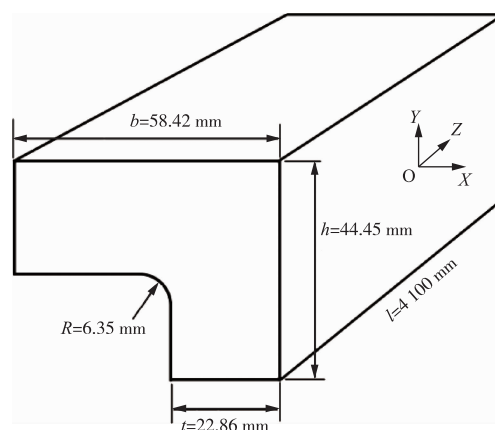


图 1 型材几何形状示意图

Fig. 1 Geometry diagram of extrusion profile

1.2 有限元模型及方案

基于固体力学弹塑性理论建立 2024 铝合金挤压型材拉弯及回弹过程三维有限元模型,如图 2 所示,拉弯方式采用张臂式拉弯,加载方式为先预拉,再弯曲,最后补拉。L 截面挤压型材采用八节点实体单元来描述,对拉弯模、夹钳定义为刚性壳体单元,拉弯模与挤压型材之间的接触界面行为采用库伦摩擦定律描述。摩擦系数取值为 0~0.25。为避免迭代计算和材料、几何及接触非线性引起的收敛问题,拉弯过程采用动态显式算法,卸载回弹过程采用静态隐式算法,将拉弯成形结束后的力学边界条件代入,然后进行迭代计算直至接触力为零。仿真型材材料参数采用实际测得力学性能数据,材料力学性能遵循 Mises 屈服准则,在弹塑性本构行为中表现为各向同性。型材截面尺寸如图 1 所示,型材长度为 4100 mm,由于对称性,模型取型材二分之

一建模。型材拉弯角度为 63° , 拉弯速度 $1.8^\circ/\text{s}$ 。拉力和弯矩卸载后, 回弹产生, 可采用半径回弹率表示回弹量的大小。

$$S = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \quad (1)$$

式中 R_1 为回弹前半径, mm; R_2 为回弹后半径, mm。

根据拉弯成形工艺的基本原理, 拉弯过程是拉力、弯矩、摩擦力耦合作用的复杂工艺过程。为了实现成形件的精确控形, 拉弯成形过程采用位移控制方式, 以精确控制夹钳的位置来控制整个成形过程。拉弯有限元模型如图 2 所示。模型中将夹钳简化为与截面形状相同的刚体, 与型材捆绑连接, 通过控制夹钳位移轨迹实现夹钳带动型材的弯曲成形。位移控制方式能够直接控制型材的伸长量, 相当于直接控制材料变形, 有利于提高工件的成形精度。

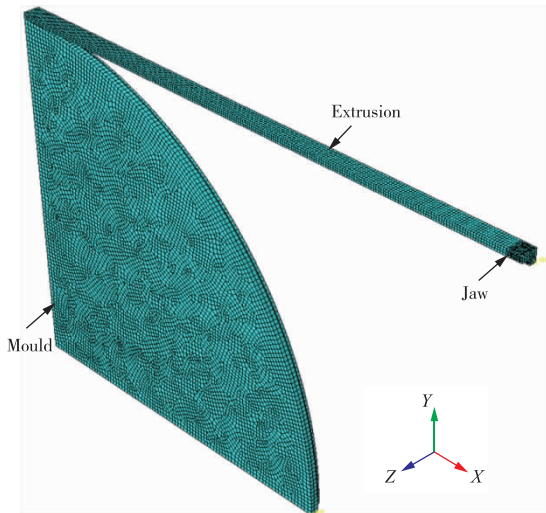


图 2 拉弯有限元模型

Fig. 2 Finite element model of stretch bending

通过几何关系计算出夹钳运动轨迹坐标 (X_j , Y_j) 如图 3 所示:

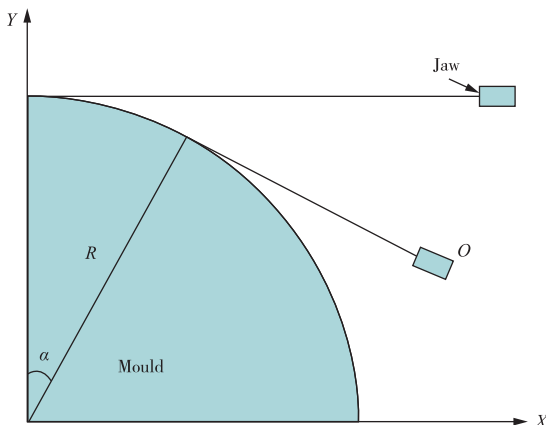


图 3 夹钳轨迹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of clamp trajectory

$$X_j = R \sin \alpha + (l_0 + u_{\text{pre}} - R \alpha) \cos \alpha \quad (2)$$

$$Y_j = R(1 - \cos \alpha) + (l_0 + u_{\text{pre}} - R \alpha) \sin \alpha \quad (3)$$

式中: R 为模具半径, mm; l_0 为型材原始长度一半, mm; α 为型材贴靠模具角度, mm。

2 结果与分析

2.1 工艺参数对回弹量的影响规律

图 4 为拉弯过程不同阶段及回弹后型材 Mises 应力分布云图, 可以看出, 在预拉阶段, 整体应力不断增大且分布均匀, 最大应力为 226 MPa, 尚未达到材料屈服点, 型材受到轴向拉伸载荷发生弹性变形, 如图 4(a) 所示。对于本文非对称 L 截面型材, 轴向长度较大, 网格数量多, 如果夹钳轨迹坐标不合理, 拉弯模拟中极易发生扭转变形, 导致型材贴靠模具错位, 影响模拟精度。

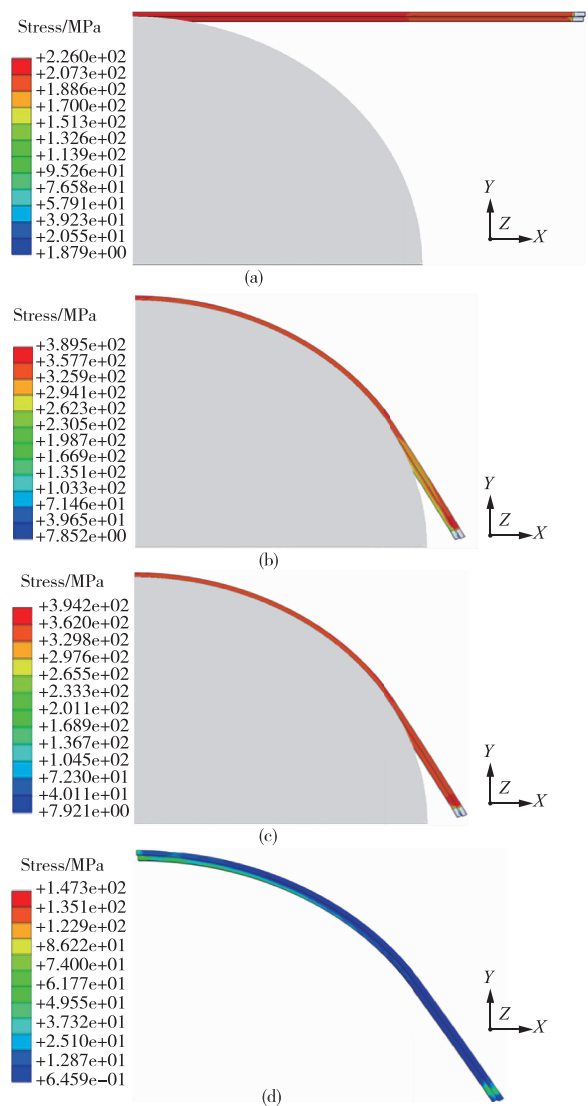


图 4 拉弯后应力分布云图

Fig. 4 Stress distribution after stretch bending

本文通过计算夹钳轨迹位移坐标控制夹钳运动边界条件。从图 4(b)可以看出,拉弯结束后,型材与模具贴合完好,证明了夹钳轨迹计算的合理性,贴模结束后,最大应力为 389.5 MPa。图 4(c)为贴模后进一步施加补拉量,可使贴模效果更好,并改善应力分布的均匀性。图 4(d)为卸载回弹后 Mises 应力分布云图,卸载后最大应力减小至 147.3 MPa。为准确测量回弹半径,采用曲率半径变化来衡量回弹大小。测量时选取弯曲角内路径网格点坐标,取起点、中点及尾点三个节点,根据三点确定曲率半径,如图 5 所示。

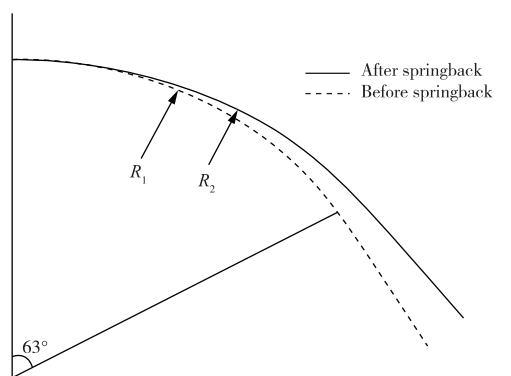


图 5 回弹前后形变图

Fig. 5 Schematic diagram of before and after springback

图 6 为不加载补拉量时不同预拉量下半径回弹率及预拉后型材最大 Mises 应力变化曲线。由图 6 可见,在没有加载预拉量时,半径回弹率为 0.188,预拉量加载至初始型材长度的 0.6% 时,半径回弹率达到最小的 0.143 左右。从 Mises 应力的变化可以看出,在弹性变形阶段,即预拉量没有使型材达到屈服时,随着预拉量的增加,回弹量减小明显。当预拉量增加到 0.5% 时,型材应力达到 345.7 MPa,超过了屈服应力,型材发生塑性变形,进一步增加预拉

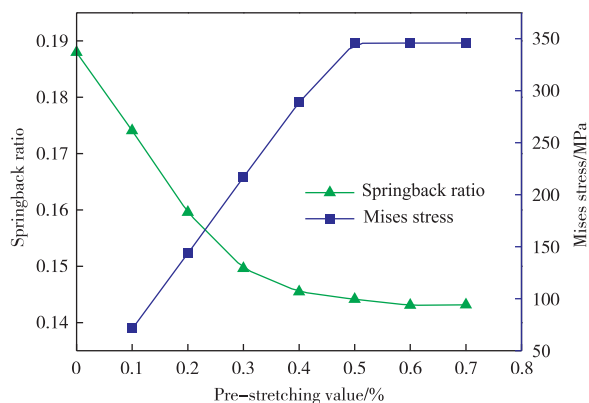


图 6 不同预拉量下的半径回弹率及应力

Fig. 6 Springback ratio and stress with different pre-stretching

量对回弹量影响不大。预拉量影响回弹量的原因是预拉改变了型材截面应力分布。随着预拉量增加,截面高度方向应力梯度减小,应力分布更均匀,保证弯曲过程达到塑性变形,从而有效减小回弹。

图 7 为加载预拉量 0.4%、不同补拉量下半径回弹率及最大 Mises 应力变化曲线。预拉量为 0.4%,不加载补拉量时,半径回弹率为 0.145(图 6),随着补拉量的增加,半径回弹率减小,当补拉量增至 0.7% 时,半径回弹率减至 0.037。最大 Mises 应力小幅度增加,由 393.4 MPa 增至 401.1 MPa,没有达到抗拉强度。初步分析可知,由补拉量变化引起的回弹减小量与预拉量变化引起的回弹减小量相比较较大。

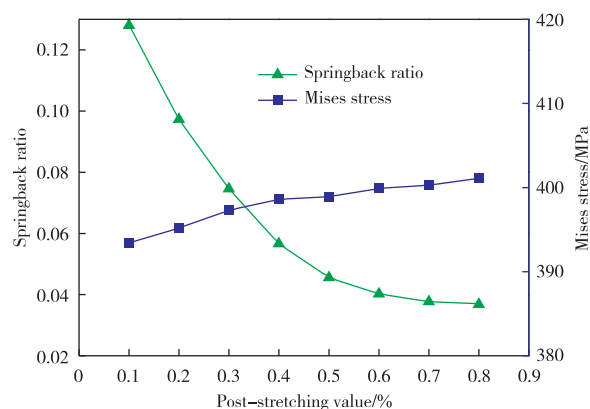


图 7 不同补拉量下的半径回弹率及应力

Fig. 7 Springback ratio and stress with different post-stretching

综上所述,随着预拉量的增大,拉弯件的半径回弹率减小,回弹减小的原因在于,随着预拉伸量的增加,截面应变等量增加,在预拉量较小时,轴向应力水平较低,截面内层的应力弹性增长,外层的应力塑性增长,等量应变增长的同时,内侧的应力增长较快,导致截面的内外层应力差减小,因此改变了型材整体应力分布情况,使之趋于均匀一致,从而回弹量减小。当轴向应力水平较高时,截面内层和外层都是塑性增长,等量应变增长的同时,内层与外层的轴向应力增长速度相当,最终最外层与最内层的应力差变化不大,从而回弹变化不明显。这一点与图中曲线一致。通过对比图 6、7 可以看出,预拉量的改变对回弹率影响小于补拉量的影响,随着预拉量的增加回弹量缓慢减小,而当预拉量不变时,随着补拉量的增大,回弹量减小幅度增大,当补拉量增加大到一定值时,继续增大补拉量对回弹量的影响不明显,曲线趋于平缓。

这是由于当补拉量达到一定值时,型材进入了塑性阶段,应力速率明显下降的缘故。此外,补拉量可使型材进一步充分贴模,以便工件更好地保持弯曲中所获得的角度。

图 8 加载预拉量为 0.4%、加载补拉量为 0.5% 时,不同摩擦条件下半径回弹率及最大 Mises 应力变化曲线。由图 8 可见,摩擦系数取 0 时,半径回弹率为 0.166,随着摩擦系数的增加,回弹量增大,摩擦系数增至 0.25 时,半径回弹率增至 0.218。最大 Mises 应力小幅度增加,由 365.3 MPa 增至 374.9 MPa,没有达到抗拉强度。摩擦系数影响回弹量的原因在于摩擦条件的改变直接影响截面力的大小,在相同的弯曲角度及拉力条件下,摩擦系数越大,截面力越小。相当于减弱了轴向的拉伸作用,从而增大了回弹。因此,在拉弯过程中应施加润滑剂,减小摩擦系数,从而减小回弹量。

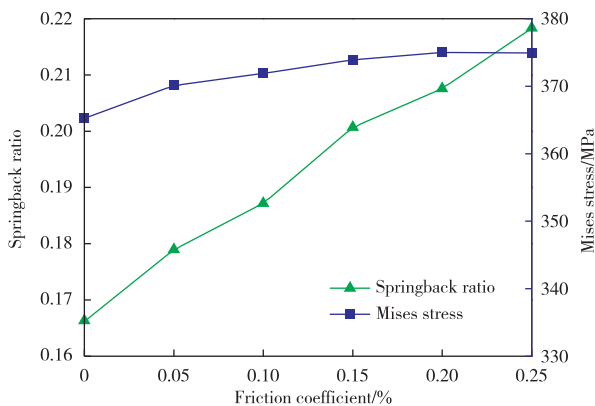


图 8 不同摩擦系数下的半径回弹率及应力

Fig. 8 Springback ratio and stress with different friction coefficient

2.2 正交分析

在实际型材拉弯成形过程当中预拉量、补拉量及摩擦条件是同时起作用的,对这些参数进行单个独立研究不可避免的会带来较大的误差。正交试验设计是利用一种规格化的正交表来合理地安排试验,利用数理统计原理科学地分析试验结果、处理多因素试验的方法^[12]。通过正交试验法设计方案并进行方差分析,可以观察因素及因素之间的交互作用对试验结果的影响。根据因素对结果的影响程度,可对显著影响因素优先控制,该方法具有较好的工程使用价值,因此,这里采用正交试验分析方法进行综合研究。结合数值模拟及试验研究结果,这里确定了各工艺参数的水平,见表 1。评判指标取半径回弹率,按照 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验。

表 1 因素水平表

Table 1 Orthogonal table

Process parameter	Factor level		
	1	2	3
$u_{pre} / \%$	0.1	0.3	0.5
$u_{post} / \%$	0.1	0.3	0.5
μ	0.1	0.15	0.2

表 2 为正交试验计算结果,通过正交试验数据的简单计算,能找出最佳的条件,也能估计出各因素影响的重要程度。 K_{1A} 、 K_{2A} 、 K_{3A} 分别表示因素 A 取 1、2、3 水平相应的试验结果之和,为了比较因素不同水平的好坏,特别是在因素水平数不相等的试验中,而引入值 $\bar{K}$:

$$\bar{K}_{1A} = \frac{K_{1A}}{3}$$

表 2 试验结果及计算

Table 2 Test results and calculation

No.	A(u_{pre})	B(u_{post})	C(μ)	Simulation result Springback ratio
1	1	1	1	0.135 8
2	1	2	2	0.093 0
3	1	3	3	0.122 2
4	2	1	2	0.149 0
5	2	2	3	0.138 0
6	2	3	1	0.044 8
7	3	1	3	0.147 9
8	3	2	1	0.071 4
9	3	3	2	0.087 0
K_1	0.351	0.432 7	0.252	
K_2	0.331 8	0.302 4	0.329	
K_3	0.306 3	0.254	0.408 1	
$K_1/3$	0.117	0.144 2	0.084	
$K_2/3$	0.110 6	0.100 8	0.109 7	$T = \sum_{i=1}^n x_i = 0.989 1$
$K_3/3$	0.102 1	0.084 7	0.136 0	
R	0.014 9	0.059 5	0.052	
				$CT = \frac{T^2}{n} = 0.108 7$
K_{12}	0.123 2	0.187 2	0.063 5	
K_{22}	0.110 1	0.091 4	0.108 2	
K_{32}	0.093 8	0.064 5	0.166 5	
S_j	0.000 3	0.005 7	0.004	

Note: $S_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^m K_{ij}^2 CT$.

为了直观起见,用因素的水平作横坐标,指标的平均值作纵坐标,画出因素与水平的关系,如图 9 所示。从表 2 的计算结果和图 9 的趋势可以看出,指标上升和下降的幅度大,该因素就是影响半径回弹率指标的主要因素。为了数量化,可以用极差 R 来描述分散程度的大小。

极差 R 由各列的值中最大者减最小者求得。极差 R 的大小反映了试验中各因素作用的大小,极

差大表明该因素对指标的影响大,通常为主要元素;反之为主要元素。因此主次顺序为(主一次): u_{post} ,

μ, u_{pre} 。

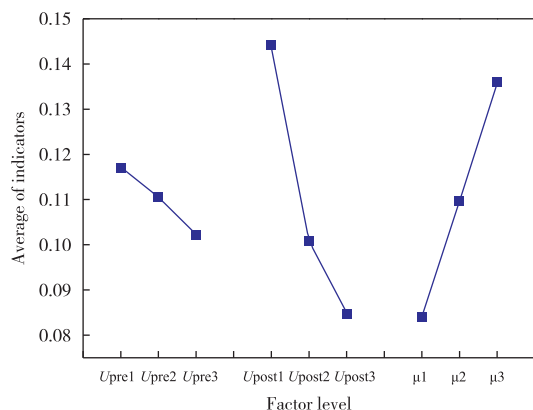


图9 因素与指标趋势图

Fig. 9 Trend chart of factors and indicators

直观分析虽然简单明了,计算工作量少,但它不能把试验过程中试验条件改变所引起的数据波动,与试验误差引起的数据波动区分开,同时对影响实验结果的各因素的重要程度,不能给以精确的数量估计,而方差分析能够为分析提供一个标准,判断各因素的作用是否显著,从而弥补了直观分析的不足。表3所示为偏差平方和及自由度计算结果。

表3 方差分析表

Table 3 Analysis of variance

Factor	S	DOF	Variance	F
A	0.000 3	2	0.000 15	0.27
B	0.005 7	2	0.002 85	5.18
C	0.004	2	0.002	3.75
e	0.001 1	2	0.000 55	
T	0.011 1	8		

$F_{0.25}(2,2)=3, F_{0.1}(2,2)=9, F_{0.05}(2,2)=19, F_{0.01}(2,2)=99$

由表3可知,因素补拉量及摩擦系数的 F 值均大于 $F_{0.25}(2,2)$ 。所以补拉量及摩擦系数对试验指标回弹量的影响在 $\alpha=0.25$ 水平上显著。预拉量在 $\alpha=0.25$ 水平上不显著的原因可能是本例试验误差大且误差自由度小,使检验的灵敏度低,从而掩盖了考察因素的显著性。

3 实验验证

为了验证上述数值仿真的可靠性,选取仿真模拟中对回弹量影响较大的补拉量进行实验研究,因此选取补拉量为0.1%、0.3%、0.5%和0.7%,预拉量固定为0.4%,型材尺寸与模拟仿真设计一致,图10为部分实验试件。为了比较实验结果与数值模

拟结果的差异,采用与模拟相同的曲率半径变化来衡量回弹大小。



图10 实验结果照片

Fig. 10 Photographs of the final product

图11为不同补拉量下实验与仿真中回弹量对比情况。由图11可知,不同补拉情况下的回弹规律与数值模拟的回弹规律呈现出较为相同的趋势,两者相同补拉量下测量相对误差最大为7.91%,而平均相对误差为6.42%。实验与数值模拟结果基本吻合,这也证明了有限元模型和模拟结果分析的可靠性。

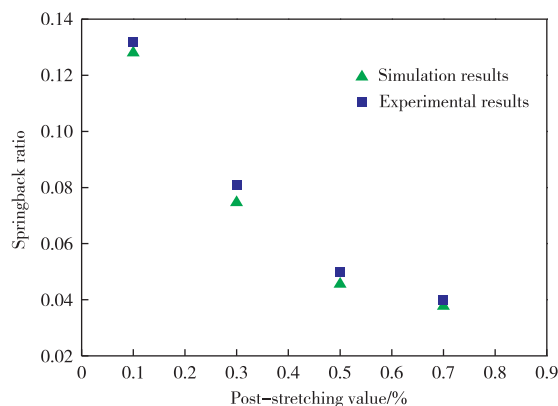


图11 实验与仿真回弹量对比

Fig. 11 Comparison of experimental and simulated springback

4 结论

1)基于位移控制,建立了2024铝合金拉弯及回弹过程有限元模型。模拟结果表明,随着预拉量及补拉量的增大,回弹量减小。有效地使用润滑剂,减小摩擦系数可减小回弹量。

2)正交试验直观分析表明三因素影响回弹率的主次顺序为补拉量、摩擦系数及预拉量,方差分析表明补拉量及摩擦系数在 $\alpha=0.25$ 水平上对试验指标影响显著。研究结果对航空型材拉弯模具设计和拉弯工艺均具有极强的指导意义和参考价值。

参考文献:

- [1] TEKKAYA A E, KHALIFA N B, GRZANCIC G, et al. Forming of lightweight metal components; Need for new technologies[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 81: 28-37.
- [2] ZHAI R X, DING X H, YU S M, et al. Stretch bending and springback of profile in the loading method of prebending and tension[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 144: 746-764.
- [3] EL-DOMIATY A, ELSHARKAWY A. Stretch-bending analysis of u-section beams[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998(38): 75-95.
- [4] CORONA E. A simple analysis for bend-stretch forming of aluminum extrusions[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46: 433-448.
- [5] YU C L, LI X Q. Theoretical analysis on springback of l-section extrusion in rotary stretch bending process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(12): 2705-2710.
- [6] LIU L, WANG Y, LIU R, et al. Springback analysis of stretch-bending forming of complex section profile[J]. *Steel Research International*, 2010, 81(9): 761-764.
- [7] CLAUSEN A H, HOPPERSTAD O S, LANGSETH M. Sensitivity of model parameters in stretch bending of aluminium extrusions[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43(2): 427-453.
- [8] HOPPERSTAD O, LEIRA B, REMSETH S, et al. Reliability-based analysis of a stretch-bending process for aluminium extrusions[J]. *Computer and Structures*, 1999, 71(1): 63-75.
- [9] ZHAO J, ZHAI R X, QIAN Z P, et al. A study on springback of profile plane stretch bending in the loading method of pretension and moment[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 75: 45-54.
- [10] LIU T J, WANG Y J, WU J J, et al. Springback analysis of Z&T-section 2196-T8511 and 2099-T83 Al-Li alloys extrusions in displacement controlled cold stretch bending[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 295-309.
- [11] 陈亚军, 黄彦, 薛程丹, 等. 航空 2024 铝合金 VIC-3D 静载分析和疲劳试验[J]. *有色金属工程*, 2016, 6(3): 35-39.
- CHEN Yajun, HUANG Yan, XUE Chengdan, et al. VIC-3D static analysis and fatigue test of aeronautical aluminum alloy 2024 [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2016, 6(3): 35-39.
- [12] 吕帅帅, 倪威, 倪红军, 等. 基于正交实验及非线性回归分析的铝灰渣水解研究[J]. *有色金属工程*, 2019, 9(10): 52-56.
- LYV Shuaishuai, NI Wei, NI Hongjun, et al. Study on hydrolysis of aluminum ash slag based on orthogonal experiment and nonlinear regression analysis [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2019, 9(10): 52-56.