

基于等效中性层模型的辊弯回弹量 预测及补偿控制研究

赵嘉媛¹, 陈 昉¹, 刘纯国²

(1. 湖北三峡职业技术学院 机电工程学院, 湖北 宜昌 443000;

2. 吉林大学 材料学院, 长春 130025)

摘要: 以 6005A 铝合金型材为研究对象, 提出了一种考虑中性层偏移的铝合金型材辊弯回弹预测及补偿控制方法; 分别采用考虑中性层偏移的等效中性层预测模型和忽略中性层偏移以及型材截面形状的经验模型对铝合金型材辊弯回弹进行理论分析, 提出基于预测回弹量的铝合金型材补偿控制策略, 实现对铝合金型材辊弯的精准控制; 将回弹理论分析结果与有限元模拟结果以及实测结果进行对比分析; 结果表明, 相对于忽略中性层偏移和截面形状影响的经验模型, 考虑中性层偏移的预测模型能更准确地预测型材的回弹量, 在相同的成形半径下, 回弹预测的最大误差可以由 10.37% 减小到 3.96%。

关键词: 型材辊弯; 回弹预测; 等效中性层; 6005A 铝合金; 补偿控制

Research on Prediction and Compensation Control of Roll Bending Springback Based on Equivalent Neutral Layer Model

ZHAO Jiayuan¹, CHEN Fang¹, LIU Chunguo²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hubei Three Gorges Vocational and Technical College,
Yichang 443000, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Taking 6005A aluminum alloy profiles as the research object, an aluminum alloy profile roll bending springback prediction and compensation control method considering the neutral layer offset is proposed. An equivalent neutral layer prediction model considering the neutral layer offset and an empirical model ignoring the neutral layer offset as well as the profile cross-section shape are respectively used to theoretically analyze the roll bending springback of the aluminum alloy profile, and an aluminum alloy profile compensation control strategy based on the predicted springback is proposed, which achieves accurate control of aluminum alloy profile roll bending. Compared with finite element simulation and measured results, theoretical analysis results of springback show that for the empirical model that ignores the effects of neutral layer offset and cross-section shape, the prediction model that considers the neutral layer offset can more accurately predict the springback of profile, and the maximum error of springback prediction can be reduced from 10.37% to 3.96% under the same forming radius.

Keywords: profile roll bending; springback prediction; equivalent neutral layer; 6005A aluminum alloy; compensating control

收稿日期:2025-01-03; 修回日期:2025-01-13。

基金项目:2022 年度湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B20222565)。

作者简介:赵嘉媛(1986-),女,硕士,讲师。

刘纯国(1970-),男,博士,教授。

通讯作者:陈 昉(1982-),男,大学本科,副教授。

引用格式:赵嘉媛,陈 昉,刘纯国. 基于等效中性层模型的辊弯回弹量预测及补偿控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(3):124-130.

0 引言

6005A 铝合金型材由于其高比强度、轻质和优良的成形性^[1],因此越来越多地用于高速列车组的车体制造。在实际生产中,对于种类较多的小批量复杂轮廓铝合金型材,拉弯生产工艺需要大量的专用模具,生产成本较高,生产周期长,模具复用率低。而辊弯工艺无需专用模具,通过调整工艺可以实现不同曲率型材的加工,满足轨道车辆弯曲型材部件小批量,多种类生产需求^[2-3]。然而型材在辊弯过程中内外两侧均存在弹性变形区域,卸载后回弹现象比较明显,会影响型材弯曲件的最终成形精度^[4-5]。准确掌握铝合金型材辊弯加工后的弯曲回弹量,指导针对型材辊弯回弹的补偿控制,实现6005A铝合金型材的精确成形,是提升材料加工能力,保障型材工业生产质量的必然要求。

近年来针对型材辊弯回弹量预测困难的问题,众多学者综合考虑材料类型、截面等因素,结合先进理论模型与工程试验经验,开展了型材弯曲回弹分析。文献[6]以L型材为分析对象,重点分析了应力分布对截面回弹量的影响,提出了拉伸补偿回弹角度的理论计算模型,实现对回弹量的计算分析。文献[7]对型材材料与横截面尺寸影响进行分析,定量分析了辊弯过程型材的受力,完成型材辊弯回弹经验模型的构建。文献[8]基于包辛格效应,提出方钢管成形半径与回弹角度映射关系,由于未考虑中性层偏移对回弹效果的影响,导致回弹预测结果偏差较大,难以直接应用于工业生产。

文献[9]与文献[10]综合考虑中性层偏移理论与截面平衡条件,构建了涵盖材料属性与几何尺寸的回弹解析模型,验证了中性层偏移对回弹效果的影响。文献[11]考虑了应变中性层对两类典型型材拉弯成形回弹的影响,构建了回弹计算模型,取得了相对较好的计算精度。文献[12]以中性层偏移理论与静态平衡条件为分析基础,建立了薄壁管回弹求解模型,进一步提高了预测准确率。文献[13]对中性层内移的影响进行了分析,考虑中性层对回弹量的影响,构建了回弹角预测模型。文献[14]以铝合金Z型材为分析对象,研究了中性层偏移对大截面型材的完全精度影响,对回弹量进行了预测。

上述研究虽取得了一定的效果,但均存在未涉及通过确定型材辊弯过程中等效中性层的方法来考虑中性层的偏移,且研究对象均为管材和截面形状较为简单的型材,对于复杂截面形状型材的研究还很少的不足。本文基于中性层偏移理论,通过对简化后的型材进行回弹的理论分析,基于型材弯曲过程中横截面上正应力的合力

为零的假设,确定了等效中性层的位置,建立了等效中性层回弹预测模型,将其应用到复杂截面型材的回弹预测中,将得出的预测结果与已有经验模型和模拟结果进行对比,验证所建立预测模型的有效性。

1 弹性形变分析

1.1 基本假设

型材辊弯成形本质上为力学问题,具体涉及连续弹塑性变形方面^[15-17],为实现该理论的工程影响,需对型材进行简化分析,作如下假设:

1) 定义材料的类型为弹塑性硬化材料,材料所产生的弹性变形以及塑性变形均呈现出面内各向同性的特点,即在材料平面内的各个方向上,弹性变形和塑性变形的性质相同。同时为了简化分析和突出主要因素,更加集中地研究材料在特定条件下的行为和特性,不考虑包辛格效应所带来的影响;

2) 假设在型材弯曲变形过程中,型材的体积保持不变,在实际情况中,尽管可能存在微小的误差,但在一定程度上可以为分析型材的弯曲变形提供基础,有助于更好地理解型材在变形过程中的力学行为和尺寸变化;

3) 假设不考虑型材弯曲前后的型材壁厚变化的影响,这一假设是为了简化对型材弯曲过程的分析。在实际情况中,虽然可能会有一些微小的壁厚变化,但在特定的研究情境下,忽略型材壁厚变化可以更集中地关注重要因素对型材弯曲的影响;

4) 平截面假设,型材的任意截面在弯曲前后都保持初始平面结构状态,始终与纵向上的轴线垂直。同时,截面内正应力的合力为零,这一假设为分析型材弯曲提供了便利,有助于简化计算和理解型材在弯曲过程中的力学特性。

5) 单向应力假设,当型材发生塑性弯曲变形时,型材内层纤维在受到拉或压的单向应力作用下产生纯弯曲变形。在此假设中,不考虑剪切力的影响,以便更专注地分析单向应力对型材弯曲变形的作用,简化分析过程和计算难度。

6) 假设在弯曲过程中沿型材宽度方向的应力应变为零,这一假设主要是为了简化对型材弯曲情况的分析。在实际弯曲过程中,虽然可能存在一定的宽度方向应力应变,但在特定研究情境下,忽略上述应力可使分析更集中于主要影响因素,提高分析效率。

1.2 型材截面简化分析

由于型材截面较为复杂,难以进行回弹理论分析,故在原截面的基础上对型材进行适当简化,省略了圆角和一些细节,虽然会导致理论分析产生少量误差,但在

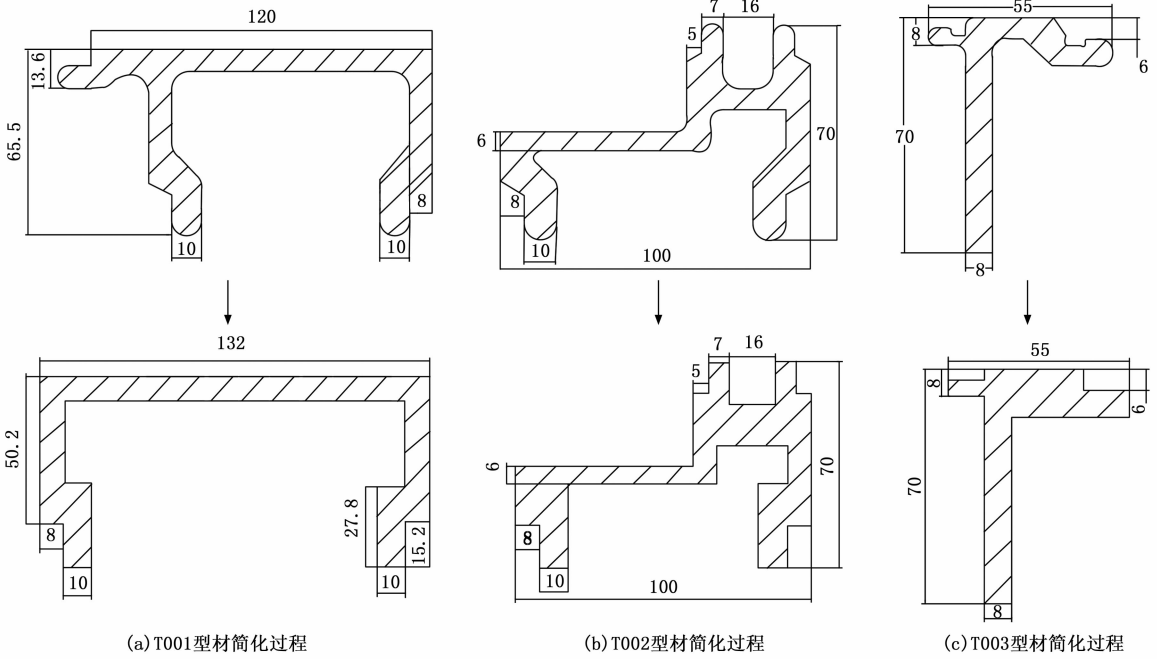


图 1 型材截面简化

一定程度上可以简化理论解析过程，且误差处于可控的范围之内。

2 辊弯回弹量预测模型构建

以简化分析后的型材截面为基础，构建型材辊弯回弹量预测模型，包括弯曲过程中应力应变分析、型材中性层分析以及型材回弹计算，具体过程如下。

2.1 弯曲过程中应力应变分析

如图 2 所示，以 T001 型材为例，基于截面中性层建立坐标系，沿中性表面的轴设为 z 轴，垂直于中性表面的轴设为 y 轴；当 y 值为正时，该层纤维处于拉伸应力状态；当 y 值为负时，该层纤维处于压缩应力状态。型材弯曲过程中的切向应变为：

$$\epsilon_x = \pm \ln\left(1 + \frac{y}{R}\right) \quad (1)$$

幂强化模型下应力应变关系为：

$$\sigma_x = \begin{cases} E\epsilon_x & |\sigma| \leq \sigma_s \\ \pm \sigma_s + K\epsilon_u^n & |\sigma| > \sigma_s \end{cases} \quad (2)$$

其中： σ 是等效应力， K 是强化系数， n 是应变硬化指数， ϵ_u 是等效塑性应变；

截面上弹塑性边界的应力连续性条件为：

$$E\epsilon = \frac{Ed}{R} = \sigma_s \quad (3)$$

2.2 型材中性层分析

型材弯曲过程中，中性层内侧发生压缩变形，外侧发生拉伸变形，设 A 为型材的横截面面积，结合假设 5) 和 6) 和弯曲成形力学原理，截面的静力整体平衡

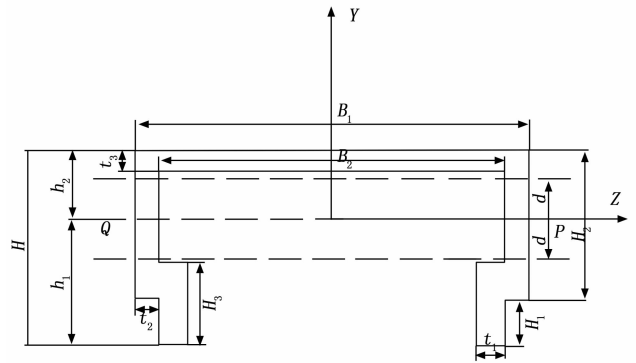


图 2 型材截面示意图

条件为^[18]：

$$F_N = \iint_A \sigma dA = 0 \quad (4)$$

$$M_z = \iint_A \sigma z dA = 0 \quad (5)$$

$$M_y = \iint_A \sigma y dA = -M \quad (6)$$

根据横截面上轴向合力为零的假设：

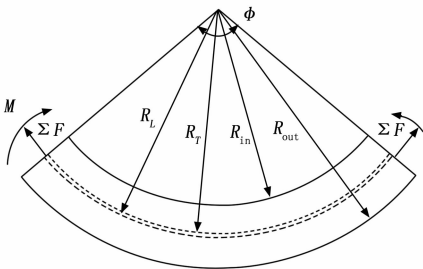
$$\begin{aligned} F_N = & 2 \int_{-h_1}^{H_1-h_1} t_1 \left[\sigma_s + K \left(\epsilon - \frac{\sigma_s}{E} \right)^n \right] dy + \\ & 2 \int_{H_1-h_1}^{H_3-h_1} (t_1 + t_2) \left[\sigma_s + K \left(\epsilon - \frac{\sigma_s}{E} \right)^n \right] dy + \\ & 2 \int_{H_3-h_1}^{-d} t_2 \left[\sigma_s + K \left(\epsilon - \frac{\sigma_s}{E} \right)^n \right] dy + \\ & 2 \int_{-d}^0 t_2 E \epsilon dy - 2 \int_0^d t_2 E \epsilon dy - \end{aligned}$$

$$2 \int_d^{H-h_1-t_3} t_2 \left[\sigma_s + K \left(\epsilon - \frac{\sigma_s}{E} \right)^n \right] dy - \int_{H-h_1-t_3}^{H-h_1} B_1 \left[\sigma_s + K \left(\epsilon - \frac{\sigma_s}{E} \right)^n \right] dy = 0 \quad (7)$$

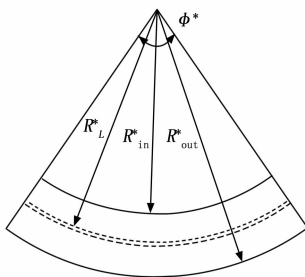
由此可以得出型材筋条到等效中性层距离 h_1 , 此时满足条件, $d \leq h_1 - H_3$ 且 $d \leq H - h_1 - t_3$, 若 d 取值不在此范围, 求解方法同理。

2.3 型材回弹过程计算

在型材的辊弯加工过程中, 型材内部将出现结构变化, 表现为中性层将由其初始位置逐渐向内弧面所在的局部区域发生偏移。此时, 中性层弯曲半径 R_T 与横截面的几何中性层弯曲半径 R_L 之间存在较大差异。当外力卸载后, 型材由于自身的弹性特性, 会产生弹性形变。这种弹性形变使得型材的弯曲状态发生变化, 回弹转变为 R_T^* 。通过观察图 3 所示中型材回弹前后的外形, 可以更加直观地了解型材在辊弯加工过程中的变化情况。



(a) 型材回弹前外形尺寸及应力状态



(b) 型材回弹后外形尺寸

图 3 型材回弹前后外形

当外部载荷释放后, 中性层内外两侧的弹性部分应力得以释放, 在这个过程中, 将产生弹性卸载弯矩 M^* , 其大小与加载弯矩等值但方向相反, 这种力学变化将直接影响型材辊弯成形。回弹现象的出现, 使得型材的弯曲角度减小, 在卸载前后分别用 φ 和 φ^* 表示弯曲角度, 此时呈现出 $\varphi > \varphi^*$ 的关系。同时, 成形半径呈现增大趋势, 以 R_{out} 和 R_{out}^* 分别表示型材卸载前后外弧面的弯曲半径, 则有 $R_{out}^* > R_{out}$ 。上述一系列的变化是型材在加工过程中的重要特性, 对于准确把握型材的成形状态和质量至关重要^[19-20]。

在辊弯成形过程中, 中性层将产生一定程度的偏移, 因此弹塑性区域局部的材料性能将发生一定改变。此时, 回弹弯矩并非单一来源, 由施加于塑性区域的弯矩和施加于弹性区域的弯矩组成, 因此分析回弹弯矩是准确分析辊弯成形过程的关键。根据型材截面应力分布和型材截面的几何关系, 得出弹性部分的弯矩 M_e 和塑性部分的弯矩 M_p :

$$M_e = 2 \int_{-d}^d t_2 E \frac{y^2}{R} dy \quad (8)$$

$$M_p = 2 \int_{-h_1}^{H-h_1} t_1 \left[\sigma_s + K \left(\epsilon - \frac{\sigma_s}{E} \right)^n \right] y dy + 2 \int_{H_1-h_1}^{-d} t_2 \left[\sigma_s + K \left(\epsilon - \frac{\sigma_s}{E} \right)^n \right] y dy + 2 \int_d^{h_2-t_3} t_2 \left[\sigma_s + K \left(\epsilon - \frac{\sigma_s}{E} \right)^n \right] y dy + \int_{h_2-t_3}^{h_2} B_1 \left[\sigma_s + K \left(\epsilon - \frac{\sigma_s}{E} \right)^n \right] y dy \quad (9)$$

弯曲过程总弯矩:

$$M = M_e + M_p \quad (10)$$

外部载荷卸载后, 中性层曲率变化为:

$$\Delta K = \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_T^*} = \frac{M}{EI} \quad (11)$$

其中: R_T 表示回弹前中性层曲率半径, R_T^* 表示回弹后中性层曲率半径, I 是坐标系中型材截面的惯性矩, 其数值由型材横截面几何参数计算而得。

可得到考虑中性层偏移的回弹后弯曲半径的解析表达式:

$$R_{out}^* = \frac{EI}{EI - MR_T} R_T + h_2 \quad (12)$$

依据弹塑性理论, 在忽略型材弯曲中性层偏移和截面几何特征的前提下, 等曲率型材回弹后弯曲成形半径可由经验模型^[5]分析:

$$R_{in}^* = \frac{R_{in}}{1 - \frac{R_{in}}{EH} \left(2\sigma_s + \frac{DH}{R_{in} + h_1^*} - 2D\epsilon_s \right)} \quad (13)$$

式中, H 为型材截面高度; h_1^* 为经验模型中性层到立筋的距离; D 是塑性模量。

根据假设 4), 型材弯曲后截面高度不变, 通过经验模型得出型材回弹后弯曲半径为:

$$R_{out}^* = R_{in}^* + H \quad (14)$$

3 基于预测回弹量的补充控制

以预测回弹量为控制计算输入, 提出基于预测回弹量的铝合金型材补偿控制策略, 通过对辊子的动态调控, 实现对铝合金型材辊弯的精准控制, 调控过程如图 4 所示。

依据预测回弹量对辊子位置进行调整后, 对预测回

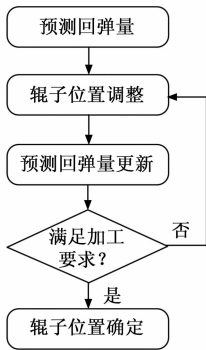


图 4 回弹补充控制策略流程

弹量进行更新，至辊弯尺寸满足加工需求后完成辊子位置调整，实现对回弹量的补充控制。

4 试验验证

设计搭建可实现型材弯曲的辊弯试验台，并依据该试验台开展有限元分析，综合比较实测结果与有限元模拟结果，对提出方法进行验证。

4.1 有限元模拟

采用 5 种不同目标成形半径 ($R_T=1\ 600、1\ 400、1\ 200、1\ 000、800\text{ mm}$)，使用 ABAQUS 分别对 T001、T002 和 T003 三种型材进行辊弯成形有限元模拟，以获得 6005A 铝合金型材回弹后的最终成形半径。6005A 铝合金的材料属性见表 1。型材有限元模型如图 5 所示。在辊弯模型中，辊轮直径为 200 mm，辊轮设置为刚体，型材设置为可变形的实体，屈服准则为 Mises 准则；摩擦模型选取罚函数模型，摩擦因数设置为 0.2。辊弯过程中，在上下辊轮相互作用下型材与各辊轮间将产生一定的摩擦力，使得型材沿特定方向以特定速度完成弯曲成形，通过调整各辊轮的相对位置可实现对前进方向的控制，进而获得不同曲率的型材。

表 1 6005A 铝合金材料属性

材料	密度 $\rho/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比	屈服强度 σ_s/MPa	强度系数 K/MPa	硬化指数 n
6005A	2.70	68.32	0.3	150.2	415.1	0.54

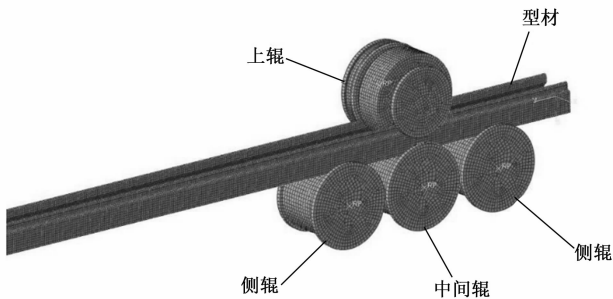


图 5 型材有限元模型

4.2 辊弯回弹实测实验

利用 R-CNC-8030 滚弯机对三种型材的上部弯梁型材进行了滚弯实验，对模拟结果进行验证，辊弯工艺过程如图 6 所示。

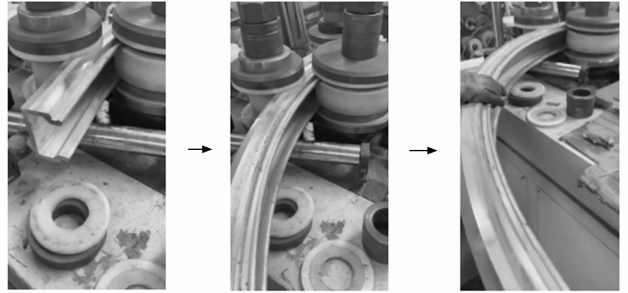


图 6 辊弯工艺过程

采用线激光测量装置对型材辊弯成形的回弹量进行测量，线激光测量装置工作距离 1 600 mm，测量范围 500 mm，测量精度 0.1 mm，如图 7 所示。线激光测量装置使用两道测量线分别完成型材卸载前后形面的几何测量，准确计算出型材的回弹量。

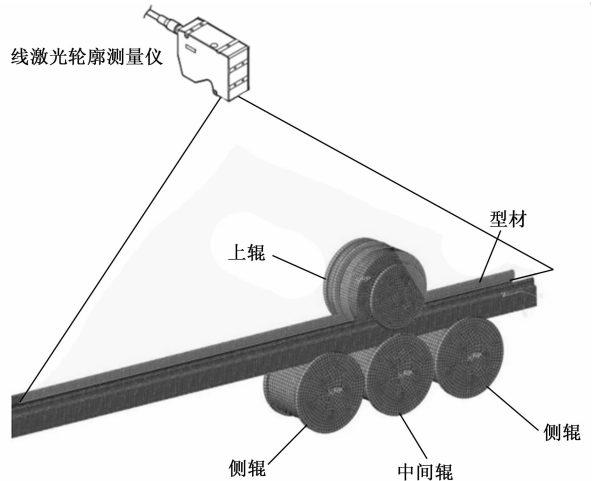


图 7 基于线激光测量装置的辊弯成型型材测量示意图

辊弯成形过程中，型材线型的数值由辊弯装置设计值给出；辊弯成形后，辊弯装置移出，测量型材的最终线型状态并得到回弹量。

4.3 辊弯回弹量预测对比分析

分别使用等效中性层模型和经验模型对上述三种型材进行回弹分析，将分析结果与有限元模拟以及实测结果进行对比研究，型材卸载回弹后等效应力分布如图 8，三种型材在几种不同目标成形半径下的回弹量如图 9，通过分析发现，随着成形半径的增加，两种模型预测的回弹量均增大，且等效中性层模型预测的回弹量均小于经验模型。不同成形半径分析结果表明，基于提出模型的预测结果相比经验模型与数值模拟更为接近，且

变化趋势更为平缓。理论模型以理想条件为基础, 因此回弹预测的理论计算结果相比数值模拟较大。

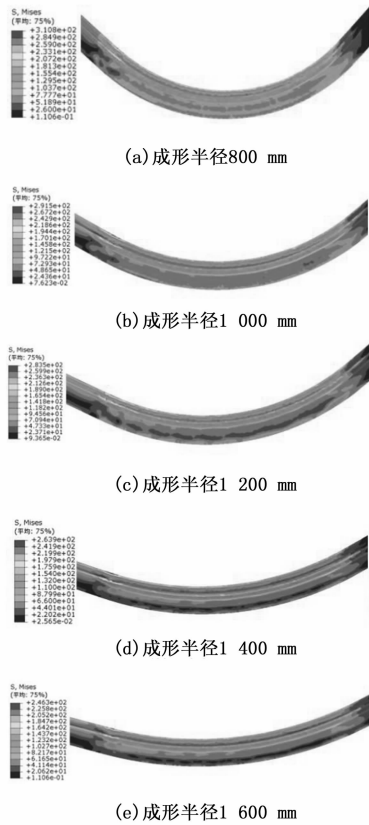


图 8 型材卸载回弹后等效应力分布

图 10 为三种型材在等效中性层模型和经验模型分析下回弹量的预测误差。对于 6005A 铝合金, 随着成形半径的增加, 两种模型预测误差均增大, 且等效中性层模型预测的误差总是小于经验模型。对于 T001 型材, 卸载前半径为 800 mm 时, 等效中性层模型预测误差为 2.34%, 经验模型预测误差为 5.68%; 而对于 T002 型材, 卸载前半径为 1 600 mm 时, 等效中性层模

型预测误差最大仅为 3.96%。

以上结果表明, 在模型对比方面, 本文提出的等效中性层模型取得了较高的精准度, 其预测误差最大值仅为 3.96%, 而同等条件下的经验模型, 预测误差却高达 10.37%, 二者差距较为明显。通过对比分析不难看出, 本文所构建的解析模型在预测精度上相较于经验模型实现了较大提升。进一步分析, 当成形半径一致时, T001 型材的预测精准度高于 T002 与 T003 型材。深入分析同一种型材在不同成形半径下的规律发现: 成形半径越小, 本文提出的回弹预测模型的精度越高。其原理在于, 成形半径较小时, 中性层附近的弹性区域范围随之缩小, 回弹时所产生的反向弯曲力矩也随之变小, 最终使得回弹的预测误差降低, 模型预测精准提高, 为后续的型材加工工艺优化提供了有力依, 反之同理。

从平均计算误差、平均计算时长两方面, 综合分析预测模型、经验模型与实测结果的误差, 其对比如表 2 所示。

表 2 模型计算误差与计算时长对比表

类型	平均计算误差	平均计算时长
预测模型	1.20%	23.95 ms
经验模型	7.78%	19.46 ms

由上表对比结果不难看出, 提出的预测模型相比经验模型具有 6.58% 的优势, 具有更小的平均计算误差, 且二者计算时长相差较小, 因此提出的预测模型具有良好的工程应用前景。基于预测模型计算所得结果对各辊轮位置进行调整, 监测结果表明可实现对辊弯回弹量的实时补偿控制, 相比未进行补偿控制的加工方式, 具有明显改善。

5 结束语

本文开展了针对铝合金型材的等效中性层求取及辊弯回弹预测研究, 建立了考虑中性层偏移的型材回

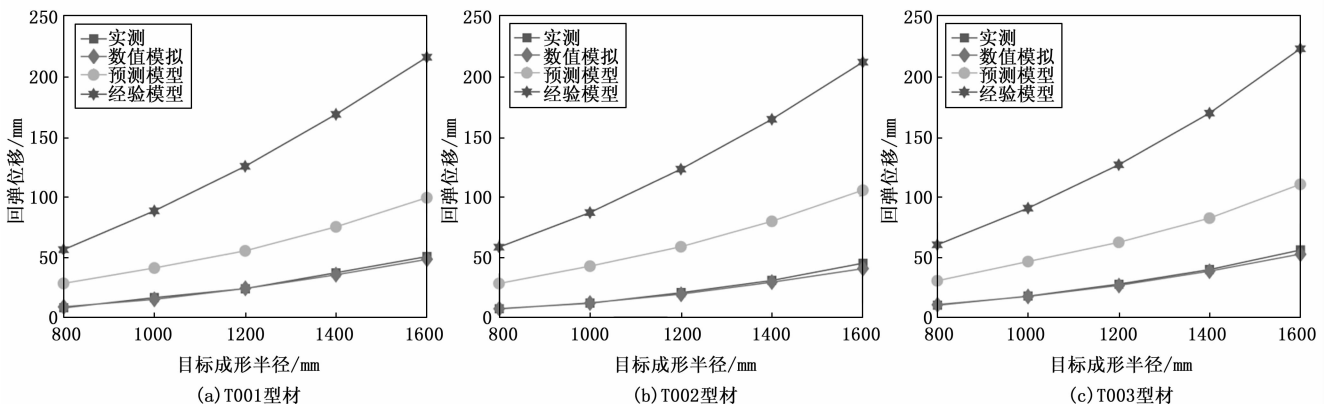


图 9 三种型材在两种预测模型下回弹量随成形半径的变化

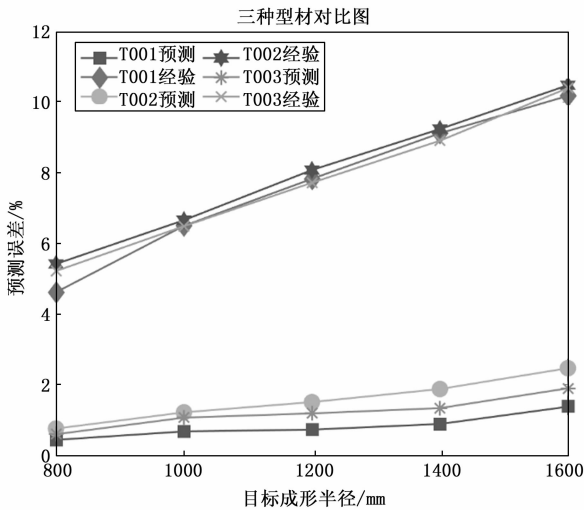


图 10 三种型材在两种预测模型下回弹量的预测误差

弹预测模型,提出了复杂型材截面简化方法,三种不同界面的 6005A 铝合金型材辊弯回弹试验验证了所提辊弯回弹预测模型的准确性。分析结果表明,提出的回弹预测方法能够为其他材料、其它结构的辊弯回弹预测提供方法借鉴,提出的补偿控制策略能够减小辊弯回弹量,对于其他类型材的回弹预测效果仍需进一步研究验证。

参考文献:

- [1] SHI L, WEN J B, REN C. The prediction of microstructure evolution of 6005A aluminum alloy in a P-ECAP extrusion study [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27 (5): 2566 - 75.
- [2] BAKE G, SHIM D. FE simulation-based process design for manufacturing structural members of commercial vehicle using pipes with rectangular cross-sections [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16 (4): 723 - 733.
- [3] 杨旭东,戴鹏,何平,等. 货车转向架交叉杆弯曲故障辨识算法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2010, 18 (9): 2002 - 2004.
- [4] 孙吉红,张文杰,杨清文,等. 火炮身管弯曲度检测仪的研制 [J]. *计算机测量与控制*, 2006, 14 (6): 814 - 820.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 陈毓勋. 板材与型材弯曲回弹控制原理与方法 [M]. 北

京:国防工业出版社,1990.

- [8] ZHU Y X, CHEN W, LI N P, et al. Springback study of RDB of rectangular H96 tube [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 138: 282 - 294.
- [9] LI H, YANG H, SONG F F, et al. Springback characterization and behaviors of high-strength Ti-3Al-2.5 V tube in cold rotary draw bending [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212 (9): 1973 - 1987.
- [10] LI H, MA J, LIU B Y, et al. An insight into neutral layer shifting in tube bending [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 126: 51 - 70.
- [11] LIU T J, WANG Y J, WANG J B, 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.
- [12] ZHAN M, WANG Y, YANG H, et al. An analytic model for tube bending springback considering different parameter variations of Ti-alloy tubes [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 236: 123 - 137.
- [13] 官英平,张庆,赵军. 中性层内移对弯曲回弹的影响 [J]. *锻压技术*, 2007, 32 (2): 26 - 28.
- [14] WANG A H, XUE H Q, YANG Y L, et al. Improvement of springback prediction accuracy for Z-section profiles in four-roll bending process considering neutral layer shift [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 48: 218 - 227.
- [15] SING G, TIWARI A, AGARWAL V, et al. Tensile and fracture behaviour of Zr-4 alloy processed through swaging [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2020, 73 (4): 955 - 965.
- [16] JING G, GONGCHANG L, SHU C, et al. Record-High superconductivity in niobium-titanium alloy [J]. *Advanced materials*, 2020, 31 (11): 1807240.
- [17] KUMAR S, CHATTOPADHYAY K, SINGH V. Optimization of the duration of ultrasonic shot peening for enhancement of fatigue life of the alloy Ti-6Al-4V [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29 (2): 1214 - 1224.
- [18] SCHIJVE JAAP. Fatigue damage in aircraft structures, not wanted, but tolerate [J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31 (6): 998 - 1011.
- [19] SCHNEIDER M. A review of nonlinear FFT-based computational homogenization methods [J]. *Acta Mechanica*, 2021, 232 (6): 2051 - 2100.
- [20] PERRY J I, WALLEY S M. Vibration-Induced heating of energetic materials: a review [J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2022, 8 (2): 162 - 177.