

线材折弯回弹的分析与补偿

王萌萌¹, 姚斌¹, 沈志煌¹, 欧阳醜¹, 卢杰¹, 冯伟¹, 张东生²

(1. 厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005; 2. 陕西理工学院机械工程学院, 陕西 汉中 723003)

摘要: 回弹对于线材折弯加工的精度影响非常明显, 为探索线材回弹规律, 建立了线材折弯过程的数学模型, 以材质 45 钢的线材为研究对象, 进行有限元分析与试验研究。验证了有限元分析与试验方法获得回弹角度数据的一致性, 考虑折弯角度和线材直径两个主要参数对回弹的影响, 建立了线材折弯回弹角度的双参数数学模型。将回弹角度双参数数学模型应用于弯丝机的补偿模块, 进行线材折弯试验, 取得明显的折弯补偿效果, 使线材折弯加工精度达到了 1°, 实现了对任意折弯角度和线材直径的线材折弯回弹补偿。

关键词: 线材; 折弯加工; 有限元; 回弹补偿

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2014.12.014

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2014) 12-0065-06

Analysis and compensation of the springback of metal wire bending

Wang Mengmeng¹, Yao Bin¹, Shen Zhihuang¹, Ouyang Kun¹, Lu Jie¹, Feng Wei¹, Zhang Dongsheng²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanxi University of Technology, Hanzhong 723003, China)

Abstract: It is evidently shown that the springback has an influence on the accuracy of wire bending process. In order to explain the law of springback, a mathematical model of wire bending process was built for 45 steel wire, and finite element analysis and experimental research were carried out. The consistence of springback angle was attained through the finite element simulation and experiments. Considering the influence of the two main parameters of bending angle and wire diameter, a double-parameter mathematical model of springback angle was established. When the double-parameter mathematical model was applied to the compensation module of wire-bending machine for the test of wire bending, a prominent compensation effect was achieved, the processing precision was up to 1° with the springback compensation of arbitrary bending angle and wire diameter realized.

Key words: wire; bending processing; finite element; springback compensation

金属线材已经广泛应用于汽车、家装以及轻工

行业等各种领域, 金属成形线材质量的好坏, 直接影响到这些行业产品的结构合理性、安全性和可靠性。线材弯曲回弹现象表现为弯曲过程结束, 中性层附近的纯弹性变形以及内、外区塑性变形中的弹性变形部分将发生弹性恢复, 其实质是卸载后的内应力重新分布过程^[1]。线材折弯回弹对加工精度的影响是很大的, 这种影响对于小角度(小于 20°)

收稿日期: 2014-04-09; 修订日期: 2014-05-30

基金项目: 厦门市产业技术攻关资助项目 (3502Z20131007)

作者简介: 王萌萌 (1988-), 女, 硕士研究生

E-mail: xxzf.0523@gmail.com

通讯作者: 姚斌 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师

E-mail: yaobin@xmu.edu.cn

Chen M H. Superplastic drawing bulging technology research [J]. Aerospace Technology, 1994, (1): 7-8.

[19] 高霖, 童国权. 恒应变速率超塑气胀成形试验系统的测控原理及实现 [J]. 数据采集与处理, 2000, 5 (2): 153-156.

Gao L, Tong G Q. Constant strain rate superplastic gas bulging forming and control principle of test system and implementation [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2000, 5 (2): 153-156.

[20] 王永军. 微机控制盒形件超塑胀形控制系统的研究 [J]. 机

械科学与技术, 2003, 22 (1): 6-9.

Wang Y J. Microcomputer control superplastic bulging of the control system of box workpiece [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2003, 22 (1): 6-9.

[21] 唐黎明. 超塑性气压胀形测控系统的设计与实现 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

Tang L M. Superplastic Bulging Air Pressure Measurement and Control System Design and Implementation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.

折弯尤为明显^[2]。本文在折弯试验中发现，线材材质为 45 号钢，当线材折弯角度为 10° 时，线材回弹角为 4.51°，回弹率达到 4.51%，严重影响到线材的加工精度，无法达到加工要求。目前，国内外学者对金属塑性弯曲成形回弹技术难题进行了大量的研究，研究方法包括理论解析法、数值模拟法、实验研究方法等，研究内容涵盖了不同坯料（板材、管材和型材等）、不同弯曲方式（纯弯、折弯、拉弯和推弯等）的塑性弯曲成形回弹。Roger N Wright^[3]总结了回弹造成线材形成的弯曲半径变化的理论公式。刘金武等^[4]将理论弹塑性材料弯曲回弹分两个阶段进行应力应变分析，根据静力平衡条件和变形协调条件推出了回弹曲率、回弹弯矩等一系列计算公式。Lia K P 等^[5]认为 3D 有限元仿真的回弹结果与试验值基本吻合，主要误差来自于稳定的鞍形面曲率和材料模型的误差；张宪等^[6]采用正交试验法和有限元分析，得出了弯曲力臂长度是影响回弹角的一个重要因素，基于弯曲力臂长度这一因素推导出了回弹角数学模型。但是目前更多的研究集中在管材和板材的折弯^[7-9]，对于圆形截面线材的折弯回弹分析研究较少，而管材和板材的折弯

回弹公式不能适用于线材，因此有必要探索线材的折弯回弹规律。

鉴于金属线材回弹对成形精度的影响，必须对线材折弯加工进行补偿。目前针对线材折弯回弹问题，其补偿方法依然是大量的反复试弯方法^[10]，耗费了大量的人力物力，且取得的回弹值与进行试验机有很大的相关性，通用性欠缺。本文对线材的折弯回弹规律进行研究，目的是将这种规律应用于实际的折弯补偿。

1 线材折弯过程的数学建模

弯丝机设备折弯结构简图如图 1 所示，线材直径为 d ，固定模头直径 d_1 ，折弯头直径 d_2 ，折弯头轴心所在圆直径 D 。固定模头包含不同直径的圆柱和一个等腰直角三角柱体，可根据折弯半径的需要进行模头切换，而线材折弯是通过绕 o 点旋转的折弯头实现。弯丝机设备的折弯结构确定后，就可以对折弯过程进行工艺计算，即确定线材折弯角度与折弯头旋转角度之间的数学关系。

图 2 所示的是线材折弯示意图。为简化推导过

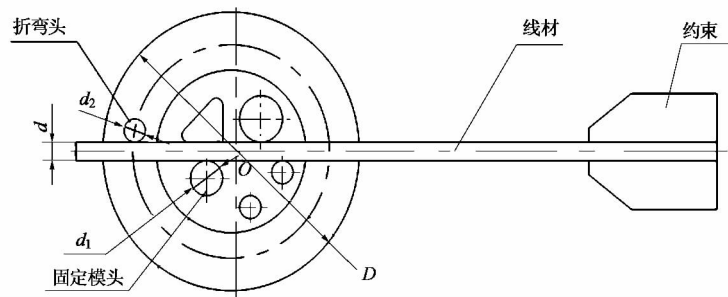


图 1 线材折弯结构简图

(a) Fig. 1 Structural diagram of wire bending

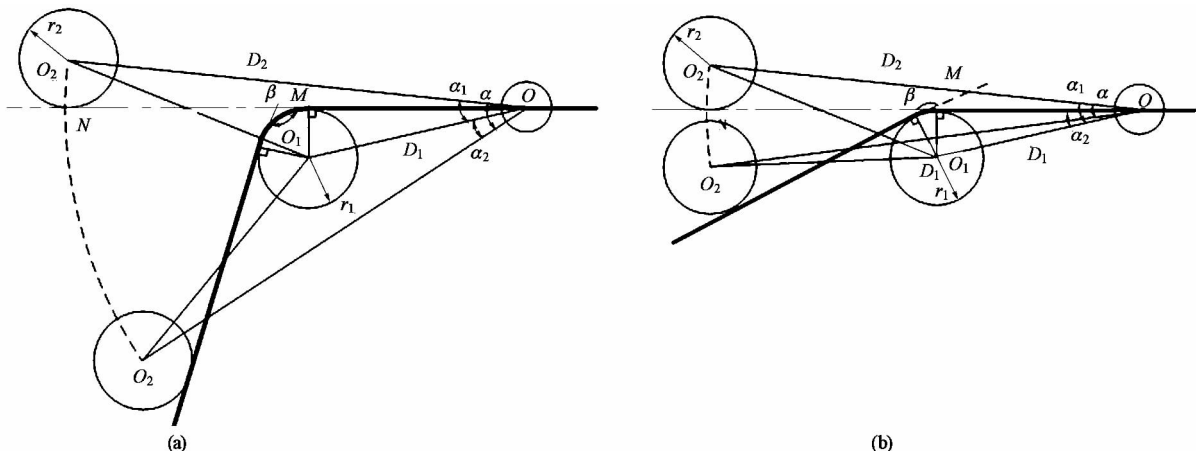


图 2 线材折弯示意图

(a) $a \geq d_1$ (b) $a \leq d_1$

Fig. 2 Schematic diagram of wire bending

特种成形栏目是由北京机电研究所塑性工程技术中心赞助刊出

程, 将线材理想化为均匀线材中心轴线, 忽略变形过程中中性层细微的变化。分别在固定模头半径和折弯头半径加线材半径作为简化的几何模型中的固定模头半径 r_1 和折弯头半径 r_2 为:

$$r_1 = \frac{1}{2}d_1 + \frac{1}{2}d \quad r_2 = \frac{1}{2}d_2 + \frac{1}{2}d \quad (1)$$

图 2 为线材折弯示意图, 图中的线材由虚线位置折弯到实线位置, 线材夹角理论值为 β ; β 的补角称为线材折弯角度理论值 γ , 即 $\gamma = 180^\circ - \beta$; 折弯头旋转角度为 α 。折弯头卸载, 线材回弹, 实际线材夹角称 β' , 此时线材夹角的补角为实际折弯角度 γ' 。对于给定的折弯角度 γ , 计算折弯头旋转角度 α , 有以下两种情形。

(1) 当 $\alpha \geq \alpha_1$ 时:

$$\gamma = 180 - \beta = 360 -$$

$$\arccos \frac{r_1 + r_2}{\sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1D_2\cos\alpha_2}} -$$

$$\arccos \frac{r_1}{D_1} - \arcsin \frac{D_2\sin\alpha_2}{\sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1D_2\cos\alpha_2}} \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 =$$

$$\arccos \frac{OM \sqrt{D_2^2 - r_2^2} - (r_1r^2 + r_2^2)}{D_1D_2} + \alpha_2 \quad (3)$$

(2) 当 $\alpha \leq \alpha_1$ 时:

$$\gamma = 180 - \beta = \arcsin \frac{D_2\sin\alpha_1}{\sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1D_2\cos\alpha_2}} -$$

$$\arccos \frac{r_1 + r_2}{\sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1D_2\cos\alpha_2}} - \arccos \frac{r_1}{D_1} \quad (4)$$

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 =$$

$$\arccos \frac{OM \sqrt{D_2^2 - r_2^2} - (r_1r^2 + r_2^2)}{D_1D_2} - \alpha_2 \quad (5)$$

折弯头旋转角度 α 确定后, 就可以进一步确定有限元分析过程的步长值:

$$\alpha = \omega \times t \times s \quad (6)$$

式中: α 为折弯头旋转角度; ω 为折弯头旋转速度; t 为单步时间; s 为步数。有限元仿真设置中, 折弯头旋转速度 ω 设定为 $1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 根据 α 大小分配步数和单步时间。

2 线材折弯加工的有限元分析及试验

2.1 有限元分析

将折弯部件和约束都定义为刚体、线材定义为

弹塑性, 材质为 45 钢。根据线材折弯的特点, 采用绝对模式将线材划分为四面体网格, 对线材折弯部位进行网格密化, 设置线材与约束、固定模头间的摩擦系数, 线材和折弯头的摩擦系数^[11], 折弯角度以 10° 为间隔, 对 $10^\circ \sim 130^\circ$ 共 13 种情况进行模拟仿真。图 3 是折弯角度为 90° 时、线材折弯为 0° , 45° 和 90° 这 3 个时刻下的等效应力图。

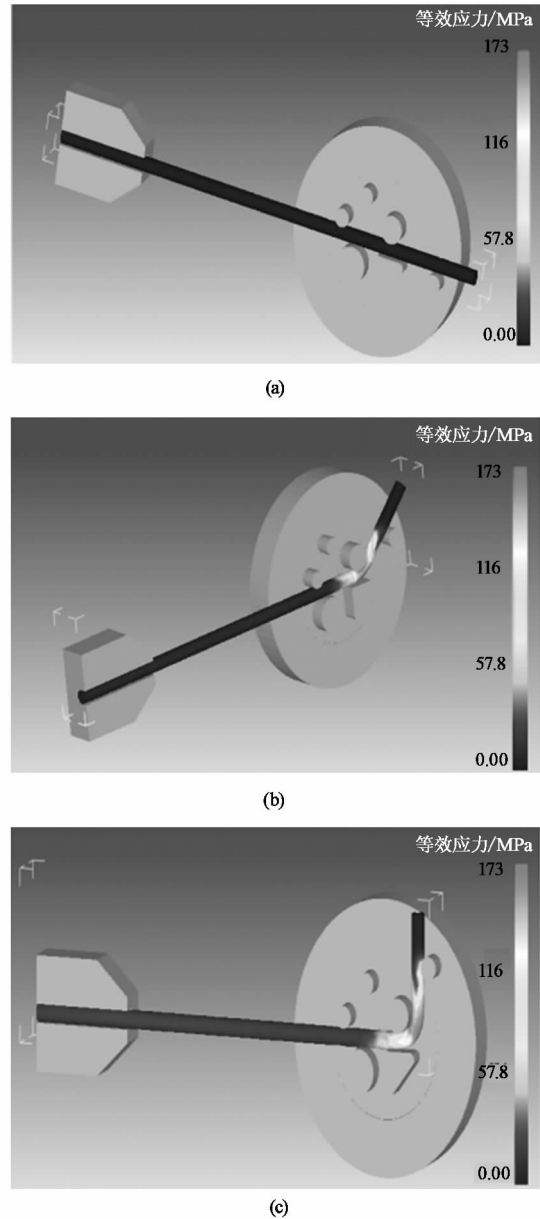


图 3 回弹前线材折弯等效应力图

(a) 0° (b) 45° (c) 90°

Fig. 3 Effective stress figure of wire bending before springback

线材到达折弯角度后, 折弯头进行卸载, 给线材留出回弹的空间, 图 4 显示线材回弹后的应力分布, 可以看出折弯头卸载后与线材脱离接触, 观察到线材回弹, 应力明显减小。最后利用有限元软件

的后处理辅助功能获得 13 组回弹后的线材夹角，计算回弹角度 y 。

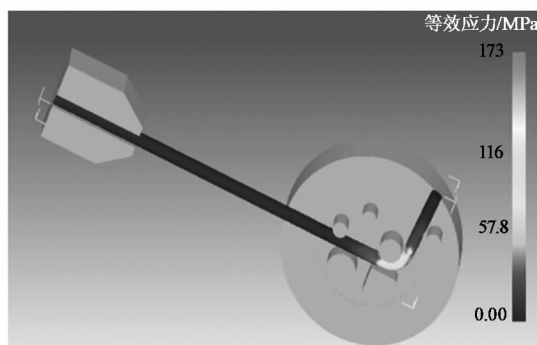


图 4 回弹后等效应力图

Fig. 4 Effective stress figure of wire bending after springback

2.2 线材折弯试验

试验采用的弯丝机，其折弯模块的所有尺寸参数与仿真模型相同，通过数控系统控制线材折弯，每组试验 3 套样本。使用万能角度尺（精确度 2'）测量实际线材夹角 β' 。计算实际折弯角度 γ' ，计算 3 组样本实际折弯角度的平均值 $\bar{\gamma}'$ ，从而得到线材回弹角度 y ，试验数据如表 1 所示。将仿真与试验结果制成散点图，如图 5 所示，发现仿真与试验回弹角随折弯角度变化保持同样的趋势。

表 1 试验数据表 (°)

Table 1 Table of experimental statistics (°)

折弯角 γ	1 组		2 组		3 组		平均折弯角度 $\bar{\gamma}'$	回弹角度 y
	β'_1	γ'_1	β'_2	γ'_2	β'_3	γ'_3		
10	174.53	5.47	174.8	5.2	174.2	5.8	5.49	4.51
20	164.13	15.87	164.23	15.77	164.1	15.9	15.85	4.15
30	154.4	25.6	154.37	25.63	154.47	25.53	25.59	4.41
40	144.13	35.87	144.17	35.83	144.27	35.73	35.81	4.19
50	133.72	46.28	133.80	46.20	133.82	46.18	46.22	3.78
60	123.87	56.13	124.03	55.97	123.89	56.11	56.07	3.93
70	114.53	65.47	114.33	65.67	113.83	66.17	65.77	4.23
80	104.67	75.33	104.53	75.47	104.17	75.83	75.54	4.46
90	94.4	85.6	94.83	85.17	95.17	84.83	85.20	4.80
100	85.13	94.87	85	95	84.97	95.03	94.97	5.03
110	75.17	104.83	75.5	104.5	75.73	104.27	104.53	5.47
120	66.17	113.83	66.13	113.87	65.97	114.03	113.91	6.09
130	56.5	123.5	56.53	123.47	56.67	123.33	123.43	6.57

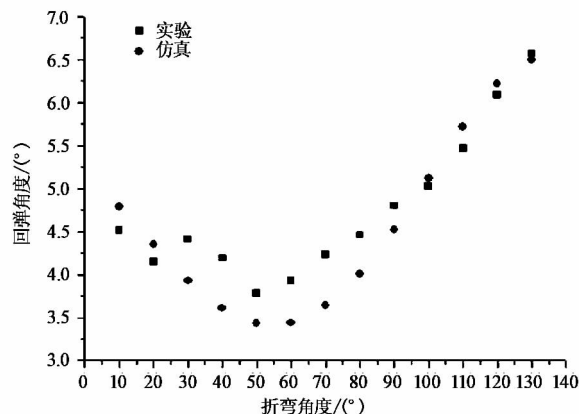


图 5 对比仿真与试验回弹角度散点图

Fig. 5 Scatter diagram of comparison between simulation and experiment

3 补偿理论

3.1 基于回归分析双参数数学模型的建立

影响线材回弹有的因素较多，主要有折弯角度、弯曲速度、线材直径、弯曲半径、弯曲力臂长度、固定力臂长度等。由于折弯角度与线材直径这两个因素对弯丝机结构特点及控制系统的参数设置，弯曲速度、弯曲半径、弯曲力臂长度、固定力臂长度均相同，本文选取折弯角度与线材直径两个因素，采用有限元仿真分析两者对线材折弯回弹的影响。选取 10 个折弯角度 15°，30°，45°，60°，75°，90°，105°，120°，135°和 150°，而线材直径选取较常用的 6 组 $\Phi 4$ ， $\Phi 5$ ， $\Phi 6$ ， $\Phi 7.5$ ， $\Phi 8$ 和 $\Phi 9.5$ mm。将这两种因素分别组合形成 60 种情况，并对每种情况进行仿真，计算每种情况的回弹角度，将这些数据采用最小二乘法进行多元线性回归分析，得到回弹角估计值 \hat{y} 的数学模型：

$$\hat{y} = -1.1044 + 0.0282x_1 + 0.2507x_2 \quad (7)$$

式中： x_1 为折弯角度估计值； x_2 为线材直径。

为验证数学模型，对回弹角的数学模型进行 3 个方面的显著性检验。

(1) F 检验。因回归模型各系数均不为 0，则 y 与 x_1 ， x_2 存在线性回归关系。通过方差分析，取显著性水平 1，得到 y 与 x_1 ， x_2 存在高度显著的线性回归关系。

(2) 相关系数检验。相关系数 $R = 0.9058$ 接近 1，说明回归的效果很好。

(3) 偏回归系数的检验。偏回归系数的显著性能判断它们对应因素的重要程度^[12]，其中偏回归

方和是用来衡量每个自变量在回归方程中作用大小的一个指标。经检验, 两个因素都高度显著, 且折弯角度的影响大于线材直径。

综合以上结论, 该回弹角的数学模型能够满足折弯角度和线材直径对于回弹角影响的表达, 可以用于机床的回弹补偿。图 6 是折弯角度和线材直径共同作用下回弹角的数学模型的三维视图。

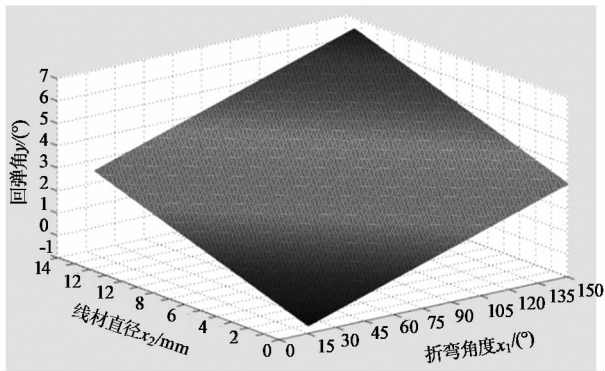


图 6 折弯角度 - 线材直径共同作用下回弹角数学模型
Fig. 6 Mathematical model of springback angle under combined influence of bending angle and wire diameter

3.2 加工补偿

研究线材折弯回弹目的是减小线材回弹对加工的影响, 提高数控弯丝机的加工精度, 具体实施方法就是加入补偿模块。但是传统补偿方法是建立补偿经验值数据库, 如果需要的数据点不在数据库, 还要进行插补法来计算数据, 方法较为繁琐^[13]。而本文的补偿模块是基于回弹角数学模型建立的, 对于给定的任意点都可以获得补偿值, 简化了补偿计算, 大大降低了建立补偿经验值数据库所需的成本。图 7 为线材回弹补偿流程图。

3.3 补偿结果

将补偿模块加入系统后, 其他试验条件不变, 再次进行折弯试验, 获得补偿后加工精度, 将之与补偿前的加工精度对比, 如图 8 所示。

由图 8 可知, 根据公式 (7) 生成的补偿模块在很大程度上减弱了线材回弹对于折弯加工的影响, 使线材折弯加工精度达到了 1° , 提高了线材折弯的加工精度。

4 结论

(1) 结合有限元方法和试验对线材折弯过程研究, 验证了两种方法获得的回弹角度数据变化规律一致。

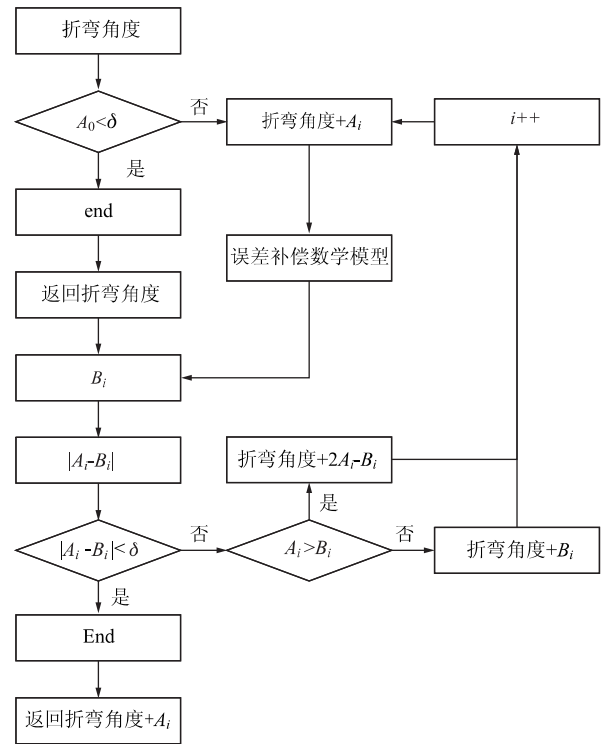


图 7 补偿模块流程图

Fig. 7 Flow diagram of compensation module

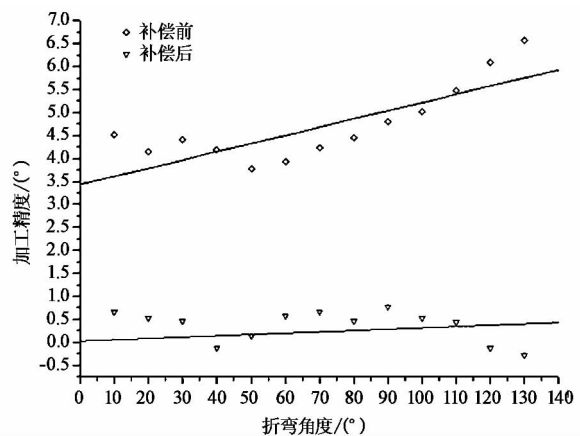


图 8 未加补偿与补偿之后的回弹角对比图

Fig. 8 Comparison diagram of springback angle with and without compensation

(2) 考虑折弯角度和线材直径两个主要参数对回弹的影响, 采用多元线性回归建立的线材折弯回弹角度的双参数数学模型具有良好的回归效果, 相关系数高于 0.9。

(3) 将回弹角度双参数数学模型应用于弯丝机的补偿模块, 取得明显的折弯补偿效果, 使线材折弯加工精度达到了 1° 。

(4) 可以实现对任意折弯角度和线材直径的线材折弯回弹补偿。

参考文献:

- [1] Manel Rodríguez Ripolla, Sabine M Weygandb, Hermann Riedela. Reduction of tensile residual stresses during the drawing process of tungsten wires [J]. *Materials Science and Engineering*, 2010, 13 - 14 (527): 3064 - 3072.
- [2] 郭飞鹏, 姚斌, 纪志阳, 等. 线材弯曲回弹研究 [J]. *锻压技术*, 2012, 37 (3): 136 - 139.
Guo F P, Yao B, Ji Z Y, et al. Study of wire rolled springback [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2012, 37 (3): 136 - 139.
- [3] Roger N Wright. *Wire Technology-Process Engineering and Metallurgy* [M]. London: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [4] 刘金武, 文彬, 贺永祥. 圆形截面杆纯弯曲回弹弯矩的计算 [J]. *湖南工程学院学报*, 2001, 11 (2): 30 - 33.
Liu J W, Wen B, He Y X. Calculation of re-spring bending moment for beams of circular section [J]. *Journal of Hunan Institute of Engineering*, 2001, 11 (2): 30 - 33.
- [5] Lia K P, Cardenb W P, Wagonera R H. Simulation of springback [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, (44): 103 - 122.
- [6] 张宪, 卢楚才, 赵章风, 等. 线材滚弯过程的回弹量数学模型的建立与研究 [J]. *轻工机械*, 2010, 28 (6): 60 - 65.
Zhang X, Lu C C, Zhao Z F, et al. Establishment and research on Springback mathematical model of wire roll bending process [J]. *Light Industry Machinery*, 2010, 28 (6): 60 - 65.
- [7] 谷瑞杰, 杨合, 詹梅, 等. 弯曲成形回弹研究进展 [J]. *机械科学与技术*, 2005, 24 (6): 653 - 658.
Gu R J, Yang H, Zhan M, et al. A review of the research on springback in bending [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2005, 24 (6): 653 - 658.
- [8] Cleveland R, Ghosh A. Inelastic effects on springback in metals [J]. *International Journal of Plasticity*, 2002, 5 - 6 (18): 769 - 785.
- [9] Firat M. U-channel forming analysis with an emphasis on spring-back deformation [J]. *Materials & Design*, 2007, 28 (1): 147 - 154.
- [10] 卢楚才. 基于 ANSYS 的线材滚弯过程的数值分析及优化设计 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
Lu C C. The Numerical Analysis and Optimization of the Roll Bending Process of Wire Based on Ansys [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010.
- [11] 李传民, 王向丽, 闫华军. Deform 5.03 金属成形有限元分析实例指导教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
Li C M, Wang X L, Yan H J. Deform 5.03 Tutorial of Metal Forming Finite Element Analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [12] 王岩, 隋思涟. 试验设计与 MATLAB 数据分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
Wang Y, Sui S L. Experimental Design and Data Analysis in Matlab [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [13] Robert H Wagoner, Hojun Lim, Myoung-Gyu Lee. Advanced issues in springback [J]. *International Journal of Plasticity*, 2013, 45 (1): 3 - 20.

[书讯]

新书介绍 《屈服准则与塑性应力-应变关系理论及应用》 (王仲仁 胡卫龙 胡蓝 著)

《屈服准则与塑性应力-应变关系理论及应用》一书于 2014 年 7 月由高等教育出版社正式出版发行。该书由具有工程应用背景的教授及专家共同撰写的关于屈服准则与塑性应力-应变关系的专著。该书不侧重于方程的推导和公理的论证,而是在作者们多年来对塑性力学的理论与应用研究基础上,从物理概念的角度阐明数学公式的本质,该书既重视提供定性解决实际问题的思路,又系统的给出用不同方法定量计算结果。

该书共分八章,第一章重点介绍了 Mises 屈服准则、Tresca 屈服准则、双剪应力屈服准则及统一屈服准则;第二章列举了航天、航空及汽车领域新近研发的众多材料的单向拉伸力学特性;第三章介绍了验证屈服准则与塑性应力-应变关系的薄壁管 P-p 试验、P-M 实验、薄板双拉实验研究;第四章~第六章阐述了各向异性材料的屈服特性、塑性应变增量梯度理论的一般性定理和后续塑性变形的几种强化特性;第七章阐述了由 Levy-Mises 应力-应变关系增量理论导出的应力-应变顺序对应规律及其实验验证;第八章给出了多种塑性加工工序应力-应变分析实例,不仅给出了具体问题的应力-应变分析结果,也为读者提供了广阔视野。

该书可供从事材料科学、力学及机械科学研究的大学教师、研究生以及科研院所和企业研发部门的研究人员阅读。