

装备与成套技术

## 立式棒料校直机自动校直工艺

张东伟, 陈柏金, 刘玉蒙, 杨 筱

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 经自由锻造生产成形的大型棒料极易产生各种弯曲变形。针对手工校直中存在的校直效率低、校直效果差以及校直行程依赖于经验法等问题, 首先提出一种立式棒料全自动校直机。该校直机能够自动扫描棒料轮廓, 根据测量数据自动判断校直位置并计算校直工艺参数及实施校直。其次, 基于理想弹塑性材料模型, 得出校直行程与初始弯曲量的数学模型。最后, 通过 ANSYS 有限元软件对校直过程进行模拟, 结果表明, 由此模型得到的校直行程可以作为棒料的自动校直计算依据。

**关键词:** 立式校直机; 自动校直; 弹塑性; 校直行程; ANSYS

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2019.08.016

**中图分类号:** TH162

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2019) 08-0100-06

## Automatic straightening process for vertical bar straightening machine

Zhang Dongwei, Chen Baijin, Liu Yumeng, Yang Xiao

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The large bar formed by free forging can easily produce various bending deformation. For the problems existing in manual straightening, such as low straightening efficiency, poor straightening result and straightening stroke relying on empirical method, a kind of fully automatic vertical bar straightening machine was proposed firstly, which could obtain the profile by scanning the bar automatically, determine the straightening position, calculate processing parameters and implement the straighten process according to the measured data. In addition, a math model calculating straightening stroke and initial bending amount was obtained based on the ideal elastic-plastic material model. Finally, the straightening process was simulated by finite element (FE) software ANSYS. The results show that the straightening stroke obtained by this model can be used as the basis for automatic straightening calculation of bar.

**Key words:** vertical bar straightening machine; automatic straightening; elastic-plastic; straightening stroke; ANSYS

冶炼钢锭在锻造成棒料坯料时, 常常因锻造尺寸控制、变形量和温度不均匀等因素发生局部的弯曲甚至扭曲现象, 在棒料出厂前需对其进行矫正, 提高棒料的直线度, 保证后续的加工精度。

目前, 国外知名度较高的校直机制造厂商, 如德国 MAE 公司、意大利 GALDABINI 公司、美国的 TAA TRANDING 公司、日本的东和精机株式会社和国际计测器株式会社等<sup>[1]</sup>, 其生产的校直机自动化程度高、生产节奏快、测量精度高。国内市

场校直机多为半自动或手动控制, 主要用于锻造毛坯的粗校, 比较有代表的是长春试验机械研究所和长春汇凯科技有限公司联合研制的 16 MN 四柱型全自动精校机与合肥锻压机床股份有限公司和合肥工业大学合作研制的 YH40-25 四柱型全自动精校直压机。

校直工艺方面, 主要包括两个方面, 即支点压点组合研究和校直行程研究<sup>[2]</sup>。压点一般选择在棒料弯曲曲率最大处, 支点则对称于压点位置置于压点两侧<sup>[3]</sup>。因此, 校直工艺重点研究对象即校直行程问题, Talukder N K D 等<sup>[4]</sup>利用弹塑性力学得出了被校轴类零件的校直曲率方程, 利用各种材料制成的规则零件均可以通过该方法计算, 但由于其理论进行了简化处理, 因而计算精度较低; 李骏等<sup>[5]</sup>基于 ANSYS 软件的材料非线性分

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-06-22

基金项目: 湖北省重大科技创业基金项目 (2013AEA003)

作者简介: 张东伟 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1085366268@qq.com

通讯作者: 陈柏金 (1965-), 男, 博士, 教授

E-mail: chenbaijin@sina.com

析,研究了轴类零件校直行程的计算,该方法计算结果与实验数据吻合,但必须使用专门的有限元软件求解,而且不利于自动校直机的控制策略;于晓平<sup>[6]</sup>、单淑梅<sup>[7]</sup>分别介绍了校直行程经验公式,但需通过大量的实际数据建立公式,获得方式较困难。

本文结合实际情况并借鉴国内外校直设备的优点,提出一种立式全自动棒料校直机。其自动化程度高、校直方便快捷。另外,针对校直过程中校直行程的计算,提出一种简单快捷的计算方法,并通过有限元分析软件进行模拟,以此验证了此方法的可靠性和可行性。此外,针对空间弯曲形式棒料的校直,提出一种校直压点支点组合的优化算法,以此作为空间弯曲形式棒料的校直工艺决策依据。

1 立式全自动棒料校直机

立式全自动棒材校直机,是专门针对长轴类棒料的校直而设计的手自一体校直设备。其结构及组成部分如图 1 所示,校直机主机可沿棒料长度方向移动。机床框架为钢结构,贯穿在机床全长上,在棒料上下料时,校直机主机可以移动到侧面以免妨碍上下料操作。校直力通过液压油缸产生,校直压头的移动通过液压伺服控制系统控制。机床框架上的连续直线导轨使得托辊架能够横向调整。左、右托辊架上的工件夹具的轴向位置可以自动调整。校直机主机的工作台上装有校直砧,他们的位置可自动调整。通过控制托辊架的旋转可以控制棒料的旋转,使棒料实现自由旋转、检测及自动校直。校直机工艺参数如表 1 所示。

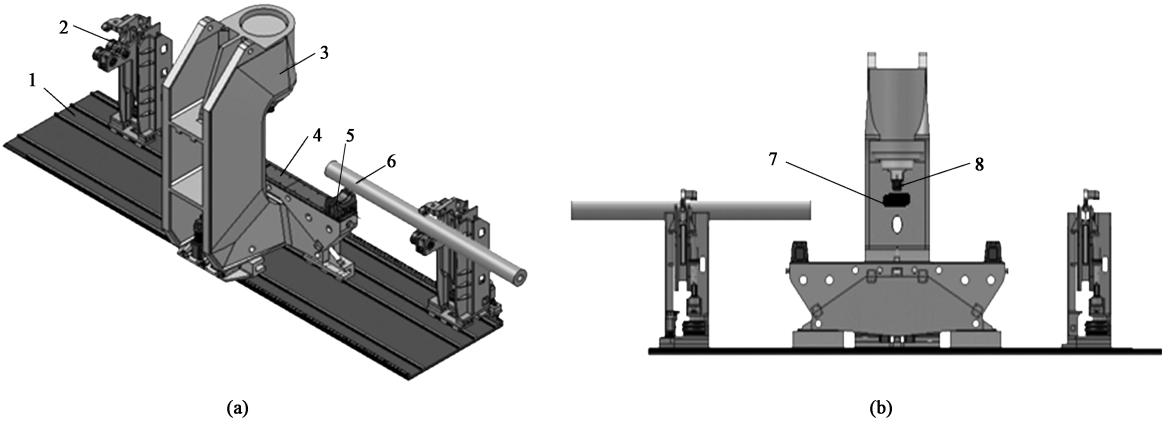


图 1 立式自动校直机  
(a) 立体图 (b) 侧面图  
1. 导轨 2. 托辊架 3. 校直机主机 4. 工作台 5. 校直砧 6. 棒料 7. 传感器 8. 校直压头  
Fig. 1 Vertical automatic straightening machine  
(a) Stereogram (b) Side view

表 1 校直机工艺参数	
Table 1 Process parameters of straightening machine	
参数	数值
主机结构型式	C 型框架
校直工件直径范围/mm	$\Phi 200 \sim \Phi 500$
工件长度范围/mm	3000 ~ 10000
校直最大重量/kg	16000
最大校直压力/N	$2 \times 10^7$
工作压力形式	连续加压
主机行走速度/(mm · s <sup>-1</sup> )	120
压头工作行程/mm	1300
20 MN 下的加压速度/(mm · s <sup>-1</sup> )	4 ~ 14
压头快下和回程速度/(mm · s <sup>-1</sup> )	110

校直时,将棒料置于工作台上两个支撑砧上,通过压头施加载荷,对棒料待校部位进行加载,从而使棒料弯曲部位产生不可恢复的变形,最终使棒料得以校直。其工作流程如下:

(1) 通过吊装设备将棒料固定在左、右托辊架上,其中托辊架位置可以调整,因此,可用于处理不同长度的棒料;

(2) 传感器固定在校直主机上,通过沿棒料长度方向移动主机可扫描整个棒料,得到棒料的截面轮廓数据;

(3) 根据步骤(2)所得数据,程序自动确定待校部位,确定支点、压点位置及压头下压量(即校直总行程);

(4) 根据步骤 (3) 计算所得校直工艺参数, 通过控制左、右托辊架控制棒料位置, 将棒料截面偏移量最大部位位于压头正下方, 并控制校直砧分别位于左、右支点处;

(5) 精确控制校直压头, 使之下压计算所得的校直行程, 依次对其余各个弯曲段进行校直;

(6) 对每个弯曲段校直结束后, 再次对整个棒料进行扫描, 检测是否符合直线度要求, 并对不符合要求的棒料再次确定所需校直位置及校直行程并校直。

## 2 立式棒料校直机工艺理论

立式校直机工艺主要是指校直压点、支点选择以及校直行程计算<sup>[2]</sup>。对于单弧度弯曲段的校直, 其压点选择在弯曲曲率最大位置, 支点对称分布于压点两侧曲率为零处。对于多弧度弯曲以及空间弯曲形状的棒料的校直, 压点、支点的位置及校直次序的不同将对校直结果造成不同的结果。校直行程方面, 依据弹塑性理论对需要校直的弯曲段采用校直行程计算方法, 在线计算出实际的压头下压量即可。

### 2.1 校直行程计算数学模型

校直行程 (即校直压下量) 与棒料初始弯曲变形的数学模型如下。

设校直时, 对棒料施加载荷使其向初始弯曲方向相反的方向弯曲, 产生反弯曲率  $A_w$ ; 卸载后, 由于材料发生弹性回复, 产生弹复曲率  $A_f$ 。最终棒料的弯曲状态可用其残留曲率  $A_c$  表示, 当  $A_c$  为 0 时表示棒料已经校直。

$$A_w - A_f = A_c \quad (1)$$

记弹性极限曲率为  $A_l$ , 弹性极限应变为  $\varepsilon_l$ , 材料的厚度为  $H$ 。  $A_l$  和工件表层纤维达到弹性极限变形时的曲率值相当, 即:

$$A_l = \frac{2\varepsilon_l}{H} \quad (2)$$

式 (1) 左、右两端分别除以  $A_l$ , 得到相对反弯曲率  $C_w$ 、相对弹复曲率  $C_f$ 、相对残留曲率  $C_c$  的关系:

$$C_w - C_f = C_c \quad (3)$$

若  $C_c = 0$ , 则棒料得以校直, 即:

$$C_w - C_f = 0 \quad (4)$$

棒料弯曲后的弹复曲率可以由弯矩  $M$ 、弹性模量  $E$  及棒料截面惯性矩  $I$  求得:

$$A_f = \frac{M}{EI} = \bar{M} \frac{M_l}{EI} = \bar{M} A_l \quad (5)$$

$$C_f = \frac{A_f}{A_l} = \bar{M} \quad (6)$$

式中:  $M_l$  为弹性极限弯矩;  $A_l$  为弹性极限曲率;  $\bar{M}$  为弯矩比,  $\bar{M} = M/M_l$ 。

对于圆形棒料而言<sup>[8]</sup>, 有:

$$\bar{M} = C_w = \frac{4}{\pi} \left[ \left( \frac{5}{6} - \frac{\xi^2}{3} \right) (1 - \xi^2)^{1/2} + \frac{1}{2\xi} \sin^{-1} \xi \right] \quad (7)$$

其中:

$$\xi = \frac{1}{C_\Sigma} = \frac{1}{C_0 + C_w} \quad (8)$$

式中:  $\xi$  为弹屈比;  $C_\Sigma$  为总弯曲曲率;  $C_0$  为棒料的初始弯曲曲率。

用测量所得棒料校直前初始弯曲曲率  $A_0$  算出  $C_0$ , 带入式 (7)、式 (8), 解出  $C_w$ , 进而求出  $\bar{M}$ 。

圆形棒料的弹性极限弯矩<sup>[9]</sup>为:

$$M_l = \frac{\pi R^3 R_{eL}}{4} \quad (9)$$

式中:  $R_{eL}$  为屈服强度;  $R$  为圆形棒料的半径。

再根据式 (10), 可以得出  $M$ :

$$M = \bar{M} M_l \quad (10)$$

校直时, 弯矩  $M$  与载荷  $F$  的关系式<sup>[10]</sup>为:

$$M = F \frac{l}{2} \quad (11)$$

校直时支点距  $l$  是确定的, 即  $l$  已知, 则可以得出校直载荷  $F$ 。以上关系式不便于自动校直机进行校直工作, 需引入与初始弯曲挠度有关的校直行程式。

通过推导出反弯挠度  $\delta_w$ , 加上棒料初始弯曲量  $\delta_0$  便可得出校直行程, 即总的压下量为  $\delta_\Sigma = \delta_0 + \delta_w$ 。

由反弯校直原理可知, 要想在卸载后棒料回复并达到平直状态, 则反弯挠度  $\delta_w$  应该与棒料的弹性回复挠度  $\delta_f$  相等<sup>[11]</sup>。

弹性极限挠度  $\delta_l$  为:

$$\delta_i = \frac{l^2 M_i}{3EI} \quad (12)$$

$$\delta_f = \frac{l^2 M}{3EI} = \frac{l^2 M_i}{3EI} \bar{M} \quad (13)$$

由此可计算出总的压下量  $\delta_\Sigma$ 。

## 2.2 单弧度平面弯曲棒料的校直

对于单弧度弯曲棒料的校直, 只需确定其压点、支点位置, 并依据计算出的校直行程, 加载后即可使棒料的弯曲度达到一定的要求。其校直流程如图2所示, 具体步骤为:

(1) 遍历整个截面中心偏移量数组  $\text{Displ\_val}[n]$ , 找到截面中心偏移量最大值  $\text{Displ\_val}[j]$ , 若  $\text{Displ\_val}[j] < d_{\min}$  ( $d_{\min}$  为参考标准量), 校直结束; 否则, 将  $\text{Displ\_val}[j]$  所在位置确定为压点位置;

(2) 对位置索引  $j$  做自增1操作, 直到  $\text{Displ\_val}[j] \leq d_{\min}$ , 保存此时的位置索引值  $a_2$ ;

(3) 对位置索引  $j$  做自减1操作, 直到  $\text{Displ\_val}[j] \leq d_{\min}$ , 保存此时的位置索引值  $a_1$ ;

(4) 对步骤(2)、(3)所得  $a_1$  和  $a_2$ , 比较  $|a_2 - j|$  与  $|j - a_1|$  的大小, 以绝对值较大对应的位置确定为本次校直支点跨距的一半  $L$ , 并调节绝对值较小一侧的支点位置, 使两支点对称分布在压点两侧;

(5) 根据支点跨距  $2L$ 、截面偏移量  $\text{Displ\_val}[j]$  等数据计算出本次校直压头下压量  $\delta_\Sigma$ , 并驱动压头完成本次操作后卸载, 进入下一个校直步骤;

(6) 上述矫直工步完成并卸载, 再次扫描整个棒料获取其截面偏移量数组, 并转步骤(1)。

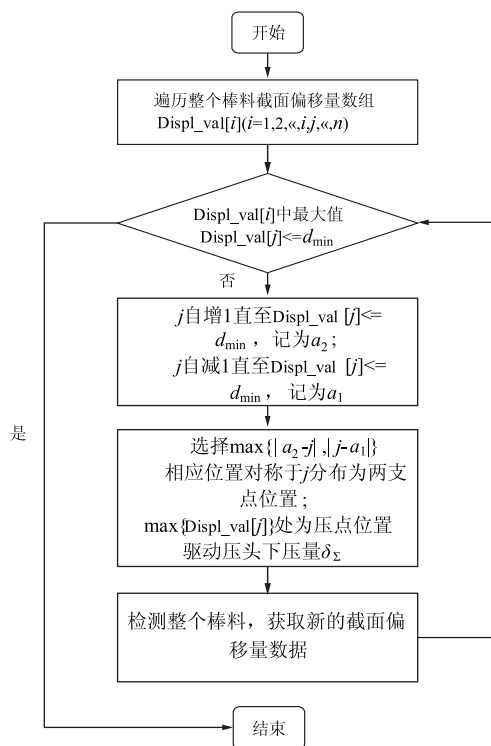


图2 单弧度平面弯曲棒料校直流程图

Fig. 2 Flow chart of straightening for planar bending bar with single arc

从校直流程可以看出, 单弧度平面弯曲棒料的校直是一个扫描检测、加载校直、卸载并再检测的循环过程, 通过数次对弯曲部位的加载卸载最终使棒料趋近平直。

## 2.3 多弧度弯曲棒料的校直

多弧度弯曲棒料的弯曲形态各异, 其弯曲形式有如下几种: S型, 双峰型以及空间弯曲型, 如图3所示。

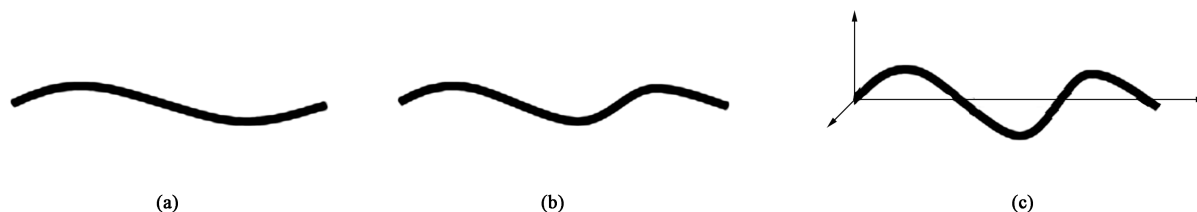


图3 多弧度弯曲形式示意图

(a) S型 (b) 双峰型 (c) 空间弯曲型

Fig. 3 Diagrams of bending form with multiple arcs

(a) S type (b) Bimodal Type (c) Space bending type

### 2.3.1 S型、双峰型弯曲棒料的校直

S型和双峰型弯曲均属于平面弯曲形式, 针对这两种弯曲形式棒料的校直, 首先将其分解成数个单弧度弯曲形式的组合, 依次对每个单弧度弯曲段加载相应的校直行程进行矫正。对于S型弯曲校直,

依次对每个弯曲方向相同的弯曲段矫正, 使每个弯曲段截面偏移量分别达到直线度要求, 对每个弯曲段矫正后再检测整个棒料的截面偏移情况是否达到要求。双峰型弯曲形态的校直, 依次对每个校直段进行矫正。此两种弯曲模式的校直流程可参考单弧

度弯曲的校直方法。

### 2.3.2 空间弯曲棒料的校直

对于呈空间弯曲形态的棒料,在选择压点、支点组合时必须综合考虑截面偏移量  $\delta_i$  ( $i$  为截面号,  $i=1, 2, \dots, m$ , 假设有  $m$  个截面。)和弯曲角度  $\theta_i$ , 其中, 截面弯曲角度大小范围为  $[-\pi, \pi]$ , 正、负号表示在竖直面两侧。模拟退火算法是一种优化算法, 主要是参考金属物体的退火过程<sup>[12]</sup>。结合模拟退火算法, 呈空间弯曲形态棒料的校直决策步骤为:

(1) 首先, 根据截面偏移量的变化规律确定校直压点位置, 具体依据为: 若截面中心偏移量从第  $i$  个截面开始非零, 且呈现递增趋势, 然后在某截面开始递减, 则将此截面作为 1 个压点位置, 并依此对其编号为  $\{1, 2, 3, 4, \dots, i, \dots, m\}$  (假设总共有  $m$  个压点位置);

(2) 设置控制参数: 初始温度  $T_s$ 、结束温度  $T_e$  以及降温速率  $v$ ;

(3) 初始解: 考虑到需要对最大截面偏移量的弯曲段校直, 因此, 初始解序列中的第 1 个是固定的, 为  $\delta_0 = \max\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m\}$ , 其他位置随机产生, 得初始解  $X_1$ ;

(4) 生产新解: 对除  $\delta_0$  之外的编号重新排序, 即为新的可行解  $X_2$ ;

(5) Metropolis 准则: 如果可行解序列中相邻两个压点处弯曲角度差的平方之和为  $f(X)$ , 其中  $f(X) = (\sum_{i=1}^{m-1} \Delta\theta_i^2)/\pi^2$ ,  $\Delta\theta_i$  为相邻两个压点位置与竖直面夹角之差, 则当前为  $f(X_1)$ , 新的弯曲角度差平方和为  $f(X_2)$ ,  $\Delta f = f(X_2) - f(X_1)$ , 那么 Metropolis 准则为:

$$P = \begin{cases} 1 & \Delta f < 0 \\ \exp\left(-\frac{\Delta f}{T}\right) & \Delta f \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $T$  为当前温度值。如果  $\Delta f < 0$ , 则以概率 1 接受新的压点路径解; 否则以概率  $\exp(-\Delta f/T)$  接受新的路径解;

(6) 降温: 根据  $v$  进行降温,  $k$  为迭代次数 ( $k=1, 2, 3, \dots$ ), 即  $T = v^k T_s$ , 若  $T < T_e$ , 则结束迭代输出当前的路径序列, 即为最优解, 否则继续迭代;

(7) 针对以上迭代效率问题, 可再引入压点位置的访问路径函数  $g(Y)$ , 编号  $i$  到  $l$  的路径权值可定义为  $\omega_b = |i - l|$ ,  $g(Y) = \sum_{b=1}^{m-1} (\omega_b)^2$ , 其中,  $b$  为相邻两压点位置之间的路径编号,  $b=1, 2, 3, \dots, m-$

1。综合考量  $g(Y)$  和  $f(X)$  的结果, 得出校直效率和质量的综合最优解。

## 3 校直过程的有限元模拟

### 3.1 模型建立

用 UG 建立 1 个长 3000 mm、直径  $\Phi 300$  mm 的棒料。对称于最大弯曲位置两侧且曲率为零处建立两个模块, 代表两个支点, 最大弯曲位置处建立 1 个模块代表压头。棒料材料选用 45 钢, 密度为  $7.87 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 弹性模量  $E$  为 210 GPa, 泊松比为 0.269, 屈服强度  $R_{eL}$  为 355 MPa, 塑性行为通过输入应力、应变数据, 软件自动拟合应力-应变曲线。通过有限元软件 ANSYS Workbench 的静力分析模块<sup>[13]</sup>对棒料校直过程模拟。

图 4 中从上到下依次为压头、棒料、左右支撑件, 其中, 压头和支撑件设置为刚体, 不可变形。对棒料部分划分网格, 并设置为弹塑性可变形体。

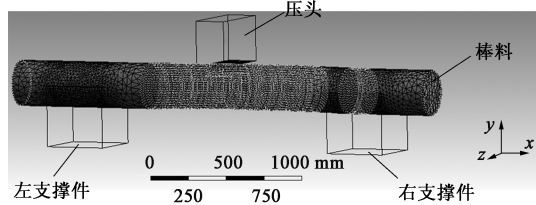


图 4 棒料有限元模型

Fig. 4 Finite element model of bar

如图 4 所示, 棒料的轴线方向为  $x$  方向, 初始状态下在  $y$  方向上有部分弯曲, 其中  $x$  坐标为  $[950, 2520]$  区间内棒料有  $y$  方向上不同程度的弯曲, 最大偏移量位置在  $x = 1500$  mm 处, 偏移量为 10 mm。压点布置在最大偏移量处, 两个支点对称于压点分布在曲率为零处, 由 2.1 节校直行程计算方法计算出相应的压头下压力为 16 mm, 从而确定压头模型的位移约束条件。此外, 还须设置压头和支撑件与棒料接触面的接触行为, 如摩擦等。

加载过程包括加载、保压和卸载。左、右支撑件的约束设置为全固定约束, 通过设置压头的  $y$  方向位移约束实现对棒料的加载 (固定位移), 加载后保压一定时间再卸载。

### 3.2 有限元模拟结果

加载卸载过程结束后, 为了对求解结果做分析, 分别选取棒料几何中性轴上初始时刻和加载结束的结点, 绘制两个时刻棒料几何中性轴的  $xy$  平面 ( $z$  为 0) 曲线, 如图 5 所示。

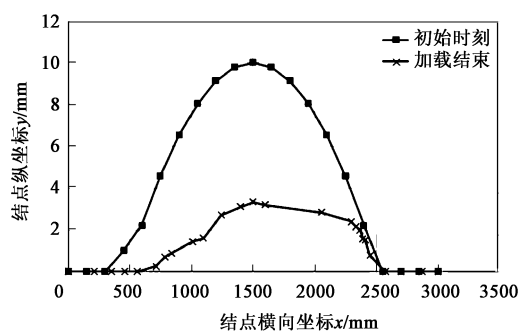


图5 初始时刻和加载结束的棒料几何中性轴 $xy$ 平面曲线

Fig. 5 Curves of geometric neutral axis for bar in  $xy$  plane at the initial and last loading times

由图5中两个时刻棒料的几何中性轴位置曲线可以看出,加载前棒料最大弯曲量为10 mm, $x$ 坐标在[450, 2500]区间内的截面有不同程度的偏移量;经过加载给定的校直行程校直完成后,棒料的最大弯曲量为3.2 mm,弯曲段内其余截面均有不同程度的偏移量。

根据上述模拟结果可以看出,依据第2章计算所得的校直行程,首次对棒料加载校直后,棒料的最大弯曲位置得到了70%的校直,在对首次校直后棒料弯曲程度检测并经多个校直工步后,棒料可逐渐达到平直要求,表明该计算方法可以用于棒料的校直行程计算依据。由于棒料自身特点的影响,如重量大、长径比大,造成该校直行程计算方法会有较大的误差,该误差可以通过多次循环校直得以减小。

## 4 结语

本文对所提出的立式全自动棒料校直设备进行了校直工艺研究。首先就棒材的校直行程提出一种简单快捷的计算方法,然后针对各种弯曲变形情况的棒料,提出校直决策工艺,最后通过有限元分析软件模拟棒料的校直过程。结果表明,弯曲棒料经加载、卸载后可以在较大程度上得到校直,从而验证了校直行程计算公式的可行性,并分析了该理论与实际的误差来源以及减小误差的途径。

### 参考文献:

- [1] 于晓平. 轴类自动校直机的开发与研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2005.  
Yu X P. Development and Research of Axis Automatic Straightening Machine [D]. Jilin: Jilin University, 2005.
- [2] 翟华. 轴类零件校直工艺理论研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [3] 翟华, 韩春明, 蒋守仁, 等. 轴类零件精密校直行程算法研究 [J]. 重型机械, 2001, (5): 35-38.  
Zhai H, Han C M, Jiang S R, et al. Research on precise straightening stroke algorithm of shaft parts [J]. Heavy Machinery, 2001, (5): 35-38.
- [4] Talukder N K D, Singh A N. Mechanics of bar straightening, Part 1: General analysis of straightening process [J]. Journal of Engineering for Industry, 1991, 113 (2): 224-227.
- [5] 李骏, 熊国良, 邹慧君. 轴类零件压力矫直过程的数学模型与行程计算 [J]. 重型机械, 2004, (6): 41-44.  
Li J, Xiong G L, Zou H J. Mathematical model and stroke calculation of shaft parts in pressure straightening process [J]. Heavy Machinery, 2004, (6): 41-44.
- [6] 于晓平. 轴类全自动校直机 [J]. 金属热处理, 2002, 27 (9): 45-46.  
Yu X P. Fully automatic straightening machine of shaft parts [J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27 (9): 45-46.
- [7] 单淑梅. 液压自动校直机的应用与研究 [J]. 汽车技术, 1998, (11): 27-29.  
Shan S M. Application and research of hydraulic automatic straightening machine [J]. Automobile Technology, 1998, (11): 27-29.
- [8] 崔甫. 校直原理与校直机械 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.  
Cui F. Straightening Principle and Straightening Machine [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
- [9] 崔甫. 矫直理论与参数计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.  
Cui F. Straightening Theory and Parameter Calculation [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994.
- [10] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.  
Sun X F, Fang X S, Guan L T. Mechanics of Materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [11] 庞敏. 钢管压力校直过程中在线检测和矫直数学模型建立 [D]. 太原: 太原科技大学, 2013.  
Pang M. Establishment of Online Detection and Straightening Mathematical Model in Steel Pipe Pressure Straightening Process [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.
- [12] 苟辉, 周玉婷, 汪忠林. 基于模拟退火算法的PCB孔群加工路径优化 [J]. 电脑知识与技术, 2018, 14 (27): 247-248.  
Xun H, Zhou Y T, Wang Z L. Optimization of PCB hole group processing path based on simulated annealing algorithm [J]. Computer Knowledge and Technology, 2018, 14 (27): 247-248.
- [13] 郝艳娥, 兰永强. 基于ANSYS软件的结构非线性有限元分析及应用实例 [J]. 电子测试, 2014, (21): 166-167.  
Hao Y E, Lan Y Q. Structural nonlinear finite element analysis based on ANSYS software and its application [J]. Electronic Test, 2014, (21): 166-167.