

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180089

棒材二辊矫直机变曲率辊型优化

马立东^{1,2}, 黄庆学^{1,2}, 陈 硕¹, 麻浩曦¹

(1. 太原科技大学太原重型机械装备协同创新中心, 山西 太原 030024; 2. 太原科技大学山西省冶金设备设计理论与技术重点实验室, 山西 太原 030024)

摘 要: 基于目前棒材矫直生产现场出现的高直线度精度与优质棒材表面质量要求不能同时满足的问题, 提出了一种变曲率辊型设计方法, 矫直辊辊型由多段曲率均匀变化的弧线相切连接而成, 且曲率从两端到中间按照给定的值均匀增大, 从而达到改善表面质量的目的; 基于空间几何与弹塑性弯曲弹复力学理论, 建立棒材二辊矫直过程的全流程曲率分析模型, 应用该理论对现场的辊型与工艺参数进行了验证, 矫直精度一致; 通过对给定不同曲率范围的辊型矫直过程进行连续弯曲弹复分析, 获得了优化变曲率辊型设计的原则, 即变曲率范围能够矫直产品大纲中所有规格棒材并且弯曲曲率余量合理, 既能实现矫直又能考虑到矫直辊磨损等带来的弯曲曲率减小的实际情况; 对该辊型矫直棒材的过程进行了数值方法验证, 可得棒材的矫后直线度为 0.54 mm/m, 满足生产现场 1 mm/m 的要求。结果表明, 该辊型设计方法可以适应棒材矫直的需要。

关键词: 棒材; 矫直; 二辊; 辊型; 优化设计

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)09-0045-08

Optimization of varying curvature profile of two-roll bar straightener

MA Li-dong^{1,2}, HUANG Qing-xue^{1,2}, CHEN Shuo¹, MA Hao-xi¹

(1. Coordinative Innovation Center of Taiyuan Heavy Machinery Equipment, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. Key Laboratory of Metallurgical Equipment Design Theory and Technology of Shanxi Province, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: Based on the problem that requirements of the high straightness accuracy and the surface quality of the high quality bar cannot be satisfied at the same time, a variable curvature roll design method was proposed. The straightening roller was composed of multi parts, and the curvature was increased uniformly from two ends to the center of the straightening roller according to a given value. This method can improve the contact unevenness caused by the curvature mutation during the contact between the straightening roller and the bar, so as to achieve the goal of improving the surface quality. Further, the curvature analysis model of the whole process of the two-roll bar straightening process was established. The theory was verified by the field roll profile and process parameters, and the accuracy of straightening was consistent. Through the continuous bending and the springback analysis of the roller straightening process with different curvature ranges, the principle of optimizing the variable curvature roll profile was obtained as following: The variable curvature range can straighten various specifications of the bar in the product outline and has a reasonable curvature margin for the straightening demand, considering the fact that the bending curvature decreases due to the wear of the straightening roller. Numerical method was adopted to verify the roll shape design method, and numerical results showed that the straightening accuracy of the bar was 0.54 mm/m, which satisfied the requirement of 1 mm/m in the production site. The results showed that the roller design method can meet the need of the straightening bar.

Key words: bar; straightening; two-roll; roll shape; optimizing design

目前,二辊矫直机辊型设计方法主要集中在辊型曲线弯曲曲率的选择上。前苏联学者马斯吉列逊^[1]提出单曲率辊型设计方法,辊型设计时辊型曲线为等半径圆弧,在棒材轴线所在的平断面上,矫

直辊型呈现变曲率特征,但该曲率变化特征固定。中国东北大学学者崔甫教授^[2]提出3段曲率辊型设计方法,即在棒材轴线平断面内,辊型曲线入口侧曲率由从小到大的3段圆弧构成,辊型曲线出

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404160); 山西省基础研究资助项目(2014021025-1); 山西省高等学校科技创新资助项目(2016163); 山西省重点研发计划资助项目(201603D111004, 201603D121010)

作者简介: 马立东(1980—),男,博士,副教授; **E-mail:** mald@tyust.edu.cn; **收稿日期:** 2018-03-09

由封闭的矢量关系可得出:

$$\begin{aligned} \mathbf{h} + \mathbf{b}_i + \mathbf{r}_i + \mathbf{c}_i &= \mathbf{e}_i \\ \mathbf{h} + \mathbf{b}_i + \mathbf{r}_i &= \mathbf{f}_i \end{aligned}$$

在 OXYZ 坐标系下各矢量的分量形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_i &= [r \cos \varphi_i \cos \beta_i, r(\sin \varphi_i \cos \alpha + \cos \varphi_i \sin \beta_i \sin \alpha), \\ &\quad r(\sin \varphi_i \sin \alpha - \cos \varphi_i \sin \beta_i \cos \alpha)] \\ \mathbf{b}_i &= [Q_i - L_i \cos \beta_i, -L_i \sin \beta_i \sin \alpha, L_i \sin \beta_i \cos \alpha] \\ \mathbf{c}_i &= [c_i \cos \varphi_i \cos \beta_i, c_i(\sin \varphi_i \cos \alpha + \cos \varphi_i \sin \beta_i \sin \alpha), \\ &\quad c_i(\sin \varphi_i \sin \alpha - \cos \varphi_i \sin \beta_i \cos \alpha)] \\ \mathbf{e}_i &= [0, 0, e_i] \\ \mathbf{f}_i &= [X_i, Y_i, Z_i] \end{aligned}$$

式中: α 为棒材与矫直辊中心线在水平面上投影的夹角; β_i 为 ρ_i 与辊腰位置竖直中心线的夹角; φ_i 为 ρ_i 与 $q_i p_i$ 的夹角; X_i, Y_i, Z_i 分别为接触点 m_i 的坐标值。

由 \mathbf{e}_i 知 $\mathbf{e}_{ix} = \mathbf{0}$, 其封闭矢量式为

$$\mathbf{h}_x + \mathbf{b}_{ix} + \mathbf{r}_{ix} + \mathbf{c}_{ix} = \mathbf{0}$$

即

$$-h + Q_i - L_i \cos \beta_i + (c_i + r) \cos \varphi_i \cos \beta_i = 0 \quad (1)$$

由 \mathbf{e}_i 知 $\mathbf{e}_{iy} = \mathbf{0}$, 其封闭矢量式为

$$\mathbf{h}_y + \mathbf{b}_{iy} + \mathbf{r}_{iy} + \mathbf{c}_{iy} = \mathbf{0}$$

即

$$-L_i \sin \beta_i \sin \alpha + (C_i + r)(\sin \varphi_i \cos \alpha + \cos \varphi_i \sin \beta_i \sin \alpha) = 0 \quad (2)$$

由 $f_{ix} = X_i$ 可得

$$\mathbf{h}_x + \mathbf{b}_{ix} + \mathbf{r}_{ix} = \mathbf{x}_i$$

即

$$X_i = -h + Q_i - L_i \cos \beta_i + r \cos \varphi_i \cos \beta_i \quad (3)$$

由 $f_{iy} = Y_i$ 可得

$$Y_i = -L_i \sin \beta_i \sin \alpha + r(\sin \varphi_i \cos \alpha + \cos \varphi_i \sin \beta_i \sin \alpha) \quad (4)$$

由 $f_{iz} = Z_i$ 可得

$$Z_i = -L_i \sin \beta_i \cos \alpha + r(\sin \varphi_i \cos \alpha - \cos \varphi_i \sin \beta_i \sin \alpha) \quad (5)$$

由式(1)、式(2)可得

$$\begin{aligned} \tan \varphi_i &= \frac{(Q_i - h) \sin \beta_i \tan \alpha}{h - Q_i + L_i \cos \beta_i} \\ \varphi_i &= \arctan \frac{(Q_i - h) \sin \beta_i \tan \alpha}{h - Q_i + L_i \cos \beta_i} \end{aligned} \quad (6)$$

即

由图中棒材所处位置及平面几何关系可知

$$\begin{aligned} \beta_i &= \arctan \left(\frac{w_i + z_i}{\rho_i} \right) \\ Q_i &= L_i = \rho_i \\ w_i &= (\rho_i - L_{i-1}) \sin \beta_{i-1} \end{aligned}$$

$$l_i = w_i / \sin \beta_{i-1}$$

$$Q_i = Q_{i-1} + \frac{w_i}{\tan \beta_{i-1}} - \frac{w_i}{\tan \beta_i}$$

$$L_i = \rho_i - l_i$$

于是按设定的 ρ_i, α 及 h 可得出

$$\beta_i = \arctan \frac{(\rho_i - L_{i-1}) \sin \beta_{i-1} + z_i}{\rho_i} \quad (7)$$

$$Q_i = Q_{i-1} + (\rho_i - L_{i-1}) \left(\cos \beta_{i-1} - \frac{\sin \beta_{i-1}}{\tan \beta_i} \right) \quad (8)$$

$$L_i = \rho_i - (\rho_i - L_{i-1}) \frac{\sin \beta_{i-1}}{\tan \beta_i} \quad (9)$$

计算时初始值用 $i=1$ 代入, 且已知 $\beta_0=0, L_0=0$ 及 $Q_0=0$, 可算出各点的 β_i, Q_i, L_i 及 φ_i , 进而求出坐标值 X_i, Y_i, Z_i , 并求出辊轴坐标 Z_i 处的辊型半径 R_i 为

$$R_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (10)$$

单向反弯矫直辊的凹辊为压靠在工件外弧侧的辊子, 工件和辊面的接触点 m_i 由内弧侧转到外弧侧, 各空间矢量也由内弧侧变为外弧侧。矢量的正方向与 X, Y, Z 的正方向一致; 角度以俯角为正, 仰角为负; 各段的曲率半径 ρ_i 及与其相关的各条线段 (L_i, l_i, Q_i) 以在棒材轴线 O_z 之上为正, 之下为负, 即 $L_i, Q_i, \sin \beta_i$ 及 ρ_i 为负值, 将其代入式(3)~式(10)便可得出一套凹辊辊型计算公式。

变曲率辊型计算流程如图2所示。可以看出, 在计算辊型曲线时, 间距 Δz 越小, 即辊型曲线上取的点数越多, 绘出的辊型曲线连续性越好, 矫直辊辊面越光滑。

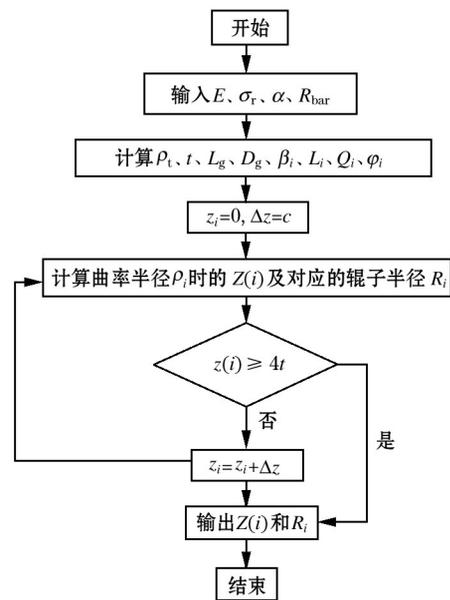


图2 辊型计算流程图

Fig. 2 Roller calculation flow chart

图3所示为基本结构参数计算软件界面。右下

形对应轮廓线为凸辊辊型部分曲线。辊型圆角未绘制在界面里,辊型间距参数暂时未应用。

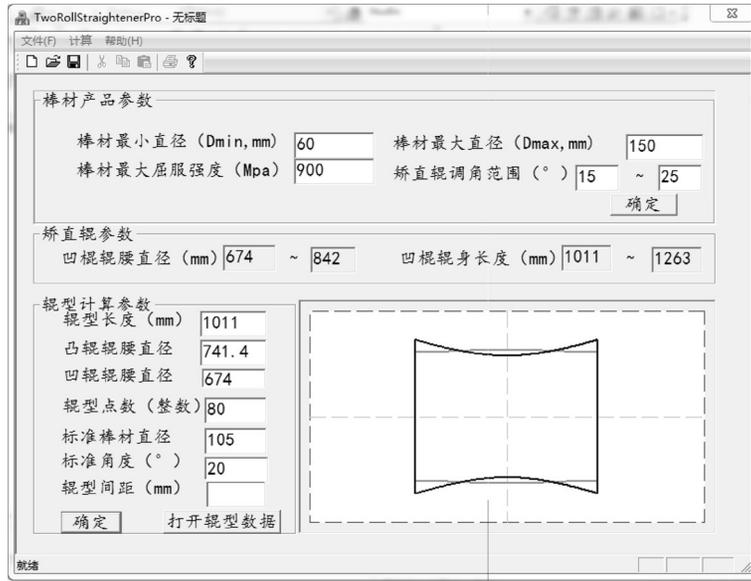


图3 基本结构参数计算软件界面

Fig. 3 Calculation software interface with basic structure parameters

2 矫直过程全流程弯曲弹复理论及其现场验证

棒材弯曲弹复过程满足曲率方程式,即

$$K_p = K - K_f$$

$$K_f = \frac{M}{EI}$$

式中: K_p 为残余曲率; K 为反弯曲率; K_f 为弹复曲率; E 为棒材弹性模量; I 为棒材断面的惯性矩; M 为弯矩,可由弯曲状态内力矩平衡积分得到。

设棒材直径为 R ,当微梁段从原始曲率 K_0 弯曲到曲率 K 时应变为 ε ,应力为 σ ,在几何中心层坐标系下棒材截面上任一点纵坐标为 z ,弹塑性分界点到中性层的距离为 z_E ,有

$$\varepsilon = z(K - K_0) \quad (11)$$

$$z_E = \frac{\sigma_s}{E|K - K_0|} \quad (12)$$

$$\theta_E = \arcsin \frac{z_E}{R} = \arcsin \frac{\sigma_s}{E|K - K_0|R} \quad (13)$$

如图4所示,对于对称截面纯弯曲的情况,求棒材弯矩只需对截面坐标 1/4 的部分进行积分,然后

乘以4即可,在该前提下,棒材纯弯曲时的弯矩分为以下两种情况。

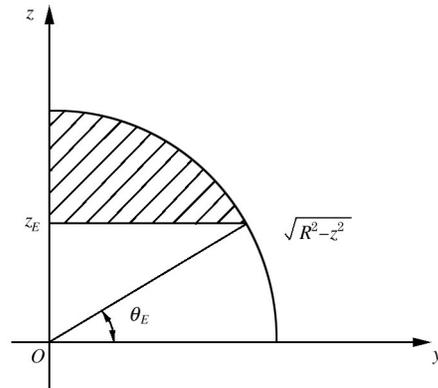


图4 棒材截面积分示意图

Fig. 4 Diagram of bar cross section integration

当 $z_E \geq R$ 时,棒材截面为纯弹性变形,有

$$M = \int_A \sigma z dA = \int_A E z^2 (K - K_0) dA = E(K - K_0) \iint_A z^2 dy dz = \frac{\pi E (K - K_0) R^4}{4} \quad (14)$$

当 $0 < z_E < R$ 时,棒材发生弹塑性变形,分界点在 z_E 处,有

$$\begin{aligned} M &= 4 \int_A \sigma z dA = 4 \int_0^{z_E} E z^2 (K - K_0) dA + 4 \int_{z_E}^R (D\varepsilon + \sigma_0) z dA = \\ &= 4 \int_0^{z_E} E z^2 (K - K_0) dA + 4 \int_{z_E}^R \left[Dz(K - K_0) + 4\sigma_s \left(1 - \frac{D}{E}\right) \right] z dA = \\ &= 4E(K - K_0) \int_0^{z_E} z^2 dz + 4D(K - K_0) \int_{z_E}^R z^2 dz + 4\sigma_s \left(1 - \frac{D}{E}\right) \int_{z_E}^R z dz = \\ &= 4E(K - K_0)L1 + 4D(K - K_0)L2 + 4\sigma_s \left(1 - \frac{D}{E}\right)L3 \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$L1 = \int_0^{Z_E} z^2 \sqrt{R^2 - z^2} dz = \int_0^{\arcsin \frac{Z_E}{R}} R^2 \sin^2 \theta R^2 \cos^2 \theta d\theta = \frac{R^4}{8} \left[\arcsin \frac{Z_E}{R} - \frac{\sin \left(4 \arcsin \frac{Z_E}{R} \right)}{4} \right]$$

$$L2 = \int_0^R z^2 \sqrt{R^2 - z^2} dz = \int_{\arcsin \frac{Z_E}{R}}^{\frac{\pi}{2}} R^2 \sin^2 \theta R^2 \cos^2 \theta d\theta = \frac{R^4}{8} \left[\frac{\pi}{2} - \left(\arcsin \frac{Z_E}{R} - \frac{\sin \left(4 \arcsin \frac{Z_E}{R} \right)}{4} \right) \right]$$

$$L3 = \int_{Z_E}^R z \sqrt{R^2 - z^2} dz = -\frac{1}{2} \int_{Z_E}^R (R^2 - z^2)^{\frac{1}{2}} d(R^2 - z^2) = \frac{1}{3} (R^2 - Z_E^2)^{\frac{3}{2}}$$

当 K 和 K_0 已知时,即可根据式(15)计算弯矩,再代入曲率方程式 $K_p = K - K_f$ 计算当次反弯后的残余曲率。

根据棒材矫直过程既旋转又前进的特征,棒材每旋转半圈,对应棒材上的微梁段就将反弯一次,给定一初始曲率 K_0 ,经过一次反弯后可计算得到残余曲率 K_p ,将该 K_p 设定为下一次反弯的 K_0 ,再计算得到下一次的 K_p ,以此类推,即可获得最终的残余曲率,进而计算最终矫直精度。

为验证该理论的正确性,获取了某棒材生产厂家二辊矫直机的辊型以及现场工艺设定参数(表1),应用该辊型和倾斜角可计算经过棒材轴心的平断面与凹辊的交线,即反弯曲率作用曲线。图5所示为依据现场辊型与倾角进行有限元分析获得的矫直状态棒材与辊系关系。可以看出,棒材弯曲状态与凹辊有效辊型近似完全接触,即反弯曲率作用线为棒材弯曲约束线。

许差异,认为是由于理论分析本身的假设条件导致的,但总体差异较小,均实现了矫直的目的。

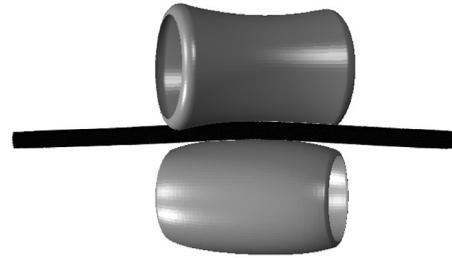


图5 辊系与棒材三维状态

Fig. 5 Three-dimensional state of roller and bar

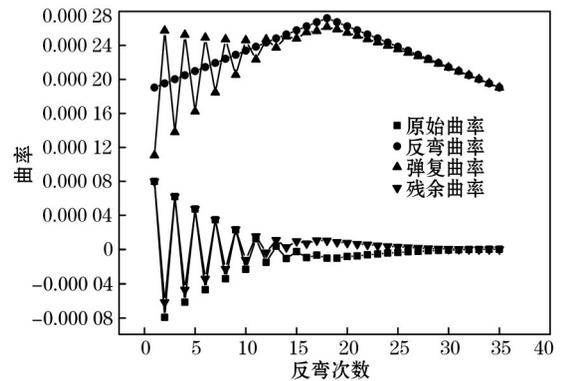


图6 曲率变化过程

Fig. 6 Curvature changing process

从各曲率变化过程可以看出,一定反弯曲率作用下原始曲率、残余曲率均呈现正反方向变化,弹复曲率由于弯矩计算的特殊规定在该结果中一直呈现正值,残余曲率随着反弯次数增加逐渐减小,达到矫直的目的。

3 曲率范围对矫直精度的影响分析

根据辊型计算方案,辊型计算最重要的部分就是给定变曲率范围,采用不同的曲率范围对表2所示矫直条件进行矫直。

表1 现场矫直参数
Table 1 Factory straightening parameters

矫直参数	给定值
棒材直径/mm	40
棒材屈服强度/MPa	1 000
材料弹性模量/MPa	206 000
材料硬化模量/MPa	50 000
矫直凹辊角度/(°)	18.1
原始挠度/(mm·m ⁻¹)	10
辊型长度/mm	400

解析计算得到整个矫直过程各曲率变化过程如图6所示。最终残余曲率为0.000 003 166 7,对应挠度为0.4 mm/m,而现场用该组参数生产的棒材直线度精度为0.7 mm/m,计算结果与现场矫直存在少

表 2 矫直相关参数

直径/ mm	屈服强 度/MPa	弹性模 量/GPa	硬化模 量/GPa	原始挠度/ (mm·m ⁻¹)	角度/ (°)	辊型长 度/mm
40	800	210	50	10	10	400

为了便于理解,本文以曲率半径形式给出曲率范围,棒材弹性极限曲率半径为 ρ_i ,给定曲率半径变化范围为 $\rho_i \sim 0.3\rho_i$ 、 $\rho_i \sim 0.5\rho_i$ 、 $\rho_i \sim 0.7\rho_i$ 、 $0.7\rho_i \sim 0.2\rho_i$ 几种情况,其中

$$\rho_i = \frac{Ed}{2\sigma_i}$$

图 7~图 10 所示分别为上述几种变曲率范围情况各次反弯弹复过程原始曲率、反弯曲率、弹复曲率及残余曲率演变过程。

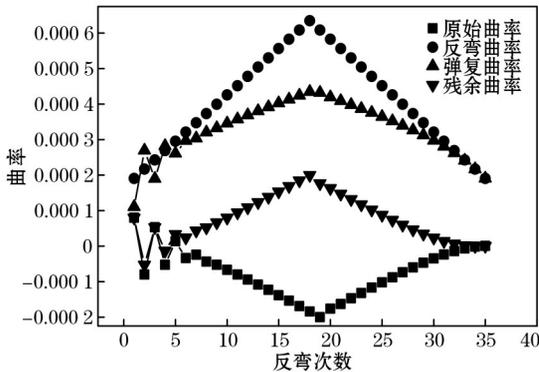


图 7 曲率半径为 $\rho_i \sim 0.3\rho_i$
Fig. 7 Curvature radius is $\rho_i \sim 0.3\rho_i$

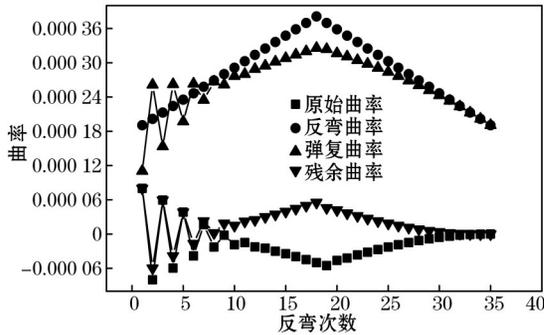


图 8 曲率半径为 $\rho_i \sim 0.5\rho_i$
Fig. 8 Curvature radius is $\rho_i \sim 0.5\rho_i$

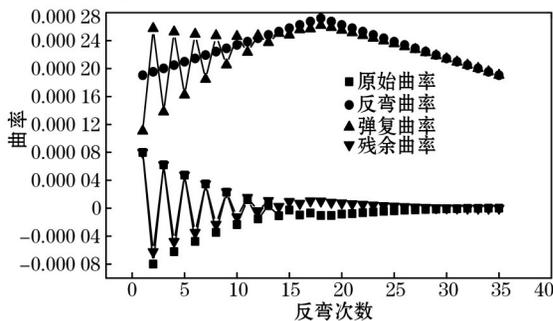


图 9 曲率半径为 $\rho_i \sim 0.7\rho_i$
Fig. 9 Curvature radius is $\rho_i \sim 0.7\rho_i$

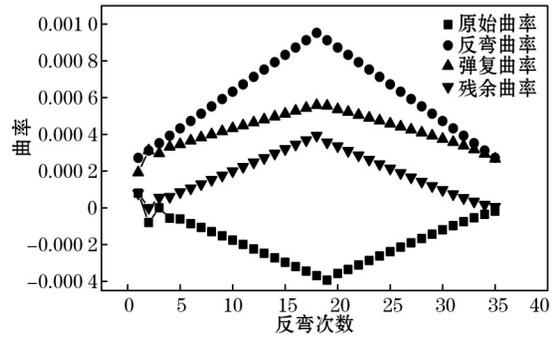


图 10 曲率半径为 $0.7\rho_i \sim 0.2\rho_i$
Fig. 10 Curvature radius is $0.7\rho_i \sim 0.2\rho_i$

不同曲率半径范围情况下的残余曲率情况见表 3。可以看到,曲率半径对应 $\rho_i \sim 0.5\rho_i$ 和 $\rho_i \sim 0.7\rho_i$ 情况下残余曲率最小,即矫直精度最高。

表 3 不同曲率半径范围残余曲率

$\rho_i \sim 0.3\rho_i$	$\rho_i \sim 0.5\rho_i$	$\rho_i \sim 0.7\rho_i$	$0.7\rho_i \sim 0.2\rho_i$
2×10^{-7}	2×10^{-8}	2×10^{-8}	5.9×10^{-6}

由图 7~图 10 可得如下结论:

(1) 不同的曲率变化范围都能将同一根棒材矫直,所不同的是弯曲弹复过程中各种曲率不一样,相同原始曲率情况下,反弯曲率越大则弹复曲率相对越大,残余曲率经历先变小然后随着反弯曲率变化到最大,接着再随反弯曲率变小而变化到相对较小的值,最后几次反弯统一残余曲率,直到矫直。

(2) 反弯曲率越大,原始曲率统一的速度越快;反之,反弯曲率越小,原始曲率统一需要的反弯次数越多。

(3) 反弯曲率越大,棒材整体变形越大,每次弯曲需要的变形力、变形能都将变大,大的反弯曲率会带来矫直后棒材上的残余应力水平较高。同时,较大的反弯曲率会增大矫直力,同时也会产生更多的能量消耗。

综合考虑以上因素,在选取辊型设计需要的变曲率范围时,应该从能够矫直产品大纲中所有规格的曲率范围中选取一个曲率值尽量小的变曲率范围。结合本文中的算例,考虑到矫直辊磨损会导致实际弯曲曲率减小,故选择曲率半径范围为 $\rho_i \sim 0.5\rho_i$ 。

4 数值模拟验证

有限元分析已经成为金属变形过程验证的重

要手段,棒材二辊矫直过程的数值模拟可以较准确地模拟现场实际过程^[9],本部分应用文献[8]的建模方法以及上述描述的变曲率辊型设计方法对棒材矫直过程进行了数值模拟。矫直辊型曲线的变曲率范围为 $\rho_i \sim 0.5\rho_i$,应用该辊型对 $\phi 40$ mm 的棒材进行了矫直过程的有限元分析。有限元分析的几何模型如图 11 所示。

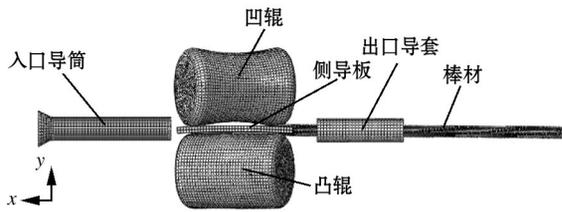


图 11 有限元分析模型示意图

Fig. 11 Schematic diagram of finite element analysis model

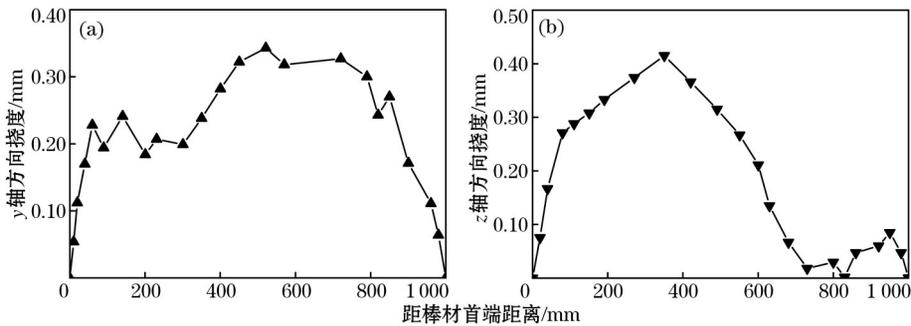
通过计算程序获得的辊型见表 4。表中列出了 15 个数据点,其中 z 表示沿辊轴中心线的轴向位置坐标,辊腰位置为坐标原点; R 表示各轴向坐标位置矫直辊所对应的半径,在实际模拟与具体矫直辊加工中需要取尽量多的点,这样可使得辊型曲率变化更圆滑。

图 12 所示为矫直后棒材中心节点沿 y 轴、 z 轴方向的坐标值变化曲线。通过对两条曲线的分析,可以得到矫直后棒材的最大残余挠度,以此来衡量棒材的矫直质量。

表 4 矫直辊型数据

Table 4 Data of the straightening roll type

凹辊		凸辊	
z/mm	R/mm	z/mm	R/mm
-185.00	130.17	-185.00	144.72
-172.60	129.93	-172.60	141.56
-160.30	129.75	-160.30	138.56
-148.00	129.62	-148.00	135.71
-135.60	129.54	-135.60	133.03
-123.30	129.50	-123.30	130.53
-111.00	129.49	-111.00	128.20
-98.67	129.52	-98.67	126.08
-86.33	129.57	-86.33	124.16
-74.00	129.64	-74.00	122.46
-61.67	129.71	-61.67	120.99
-49.33	129.79	-49.33	119.77
-37.00	129.87	-37.00	118.79
-24.67	129.94	-24.67	118.08
-12.33	129.98	-12.33	117.65



(a) y 轴方向挠度; (b) z 轴方向挠度。

图 12 不同方向上各点的挠度值曲线

Fig. 12 Curve of deflection in y and z directions

由图 12 可知,长度为 1 m 的棒材在矫直后 y 方向最大挠度为 0.35 mm; z 方向最大挠度为 0.41 mm。由最大挠度公式 $\delta = \sqrt{\delta_y^2 + \delta_z^2}$ 可得棒材的矫后直线度为 0.54 mm/m。根据用户的要求,生产企业对应 $\phi 40$ mm 棒材要求的精度为 1 mm/m,可以满足生产的需要。

5 结论

(1) 基于均匀变曲率的辊型设计方法能够适应棒材二辊矫直机矫直辊的辊型计算,应用该辊型设

计的矫直辊能够实现棒材的高精度矫直。

(2) 通过棒材二辊矫直的全流程反弯弹复计算,可以获得不同变曲率范围情况下原始曲率、反弯曲率、弹复曲率以及残余曲率的演变过程,通过该方法可以得到不同变曲率范围对棒材最终矫直精度的影响规律。

(3) 当变曲率范围达到一定程度即可实现棒材的矫直,当所取变曲率范围大于该临界变曲率范围一定程度时也能够实现棒材矫直,为了弥补现实中矫直机辊系及机架存在的弹性变形以及矫直辊的

磨损,实际辊型计算时,需要在最小变曲率范围基础上将辊腰位置的曲率适当增大,以满足实际矫直过程中对反弯曲率的要求。

参考文献:

- [1] 马斯吉列逊 A M. 管材矫直机[M]. 西安重型机械研究所一室,译. 北京:机械工业出版社,1979.(M A M. Pipe Straightener[M]. The First Section of Heavy Research Institute, Trans. Beijing: Mechanical Industry Press, 1979.)
- [2] 崔甫. 矫直原理与矫直机械[M]. 第二版. 北京:冶金工业出版社,2005.(CUI Fu. Straightening Principle and Straightening Machine[M]. The Second Edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.)
- [3] 马立峰,马自勇,马立东,等. 利用塑性 $5\epsilon_0$ 与中性层偏移的二辊矫直辊型设计方法[J]. 西安交通大学学报,2015,49(7):72.(MA Li-feng, MA Zi-yong, MA Li-dong, et al. Design method of shape for bar two-roll straightener based on plastic $5\epsilon_0$ and neutral layer offset[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2015, 49(7): 72.)
- [4] 王云,刘才,马立东,等. 二辊矫直机凹辊辊形设计[J]. 钢铁,2013,48(4):45.(WANG Yun, LIU Cai, MA Li-dong, et al. Design of concave roller shape for two-roll straightener[J]. Iron and Steel, 2013, 48(4): 45.)
- [5] 刘志亮,刘丰,王英杰. 棒材二辊矫直机辊型曲线与矫直精度分析[J]. 钢铁,2012,47(7):40.(LIU Zhi-liang, LIU Feng, WANG Ying-jie. Roller curvature and straightening precision on two-roll bar straightener[J]. Iron and Steel, 2012, 47(7): 40.)
- [6] 孟启星,孙登月,许石民. 大直径厚壁管二辊矫直机凹辊辊型有限元研究[J]. 钢铁,2012,47(7):49.(MENG Qi-xing, SUN Deng-yue, XU Shi-min. FEM research on concave roller in two-roll large-diameter and thick-walled tubes straightener[J]. Iron and Steel, 2012, 47(7): 49.)
- [7] LI Ke-yang, CHEN Chao-kuang, YANG Shu-cheng. Profile determination of a tube-straightening roller by envelope theory[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 94(2/3): 157.
- [8] 马立东,刘才,王云,等. 棒材二辊矫直过程有限元分析及实验[J]. 塑性工程学报,2012,19(3):154.(MA Li-dong, LIU Cai, WANG Yun, et al. FEM analysis and experimental study for two-roll straightening process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(3): 154.)
- [9] ZHAO Jun, YIN Jing, MA Rui, et al. Springback equation of small curvature plane bending[J]. Science China: Technology Science, 2011, 54(9):2386.
- [10] YIN Jing, ZHAO Jun, WANG Shi-yan, et al. Principle of multi-roller straightening process and quantitative resolutions of straightening strategies[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2014, 21(9): 823.
- [11] WANG Yong-qin, LIU Zhi-fang, LUO Yuan-xin, et al. Curvature and residual stress analysis in rotational leveling of bars[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2016, 23(7): 669.
- [12] ZHANG Zi-qian, YAN Yun-hui, YANG Hui-lin. The straightening curvature-radius model for the thin-walled tube and it's validation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(21): 160.
- [13] ZHANG Zi-qian. Prediction of maximum section flattening of thin-walled circular steel tube in continuous rotary straightening process[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2016, 23(8): 745.
- [14] ZHANG Zi-qian, YAN Yun-hui, YANG Hui-lin. A simplified model of maximum cross-section flattening in continuous rotary straightening process of thin-walled circular steel tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 305.
- [15] MA Li-feng, MA Zi-yong, JIA Wei-tao, et al. Research and verification on neutral layer offset of bar in two-roll straightening process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(9/10/11/12): 1519.