

文章编号:1000-582X(2010)03-036-05

## 冷矫直机矫直工艺参数数值模拟与试验

唐倩<sup>1</sup>, 杜雪松<sup>1</sup>, 高瞻<sup>2</sup>, 徐杰<sup>2</sup>, 张元勋<sup>1</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点试验室, 重庆 400044; 2. 重庆中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆 400013)

**摘要:**以 11 辊矫直机为研究对象, 研究其理论设计方法。针对矫直机设计过程中难以预估矫直性能的问题, 在设计阶段, 引入弹塑性有限元法, 建立 11 辊冷矫直机辊子三维有限元模型, 对矫直机矫直过程进行数值仿真, 获得了矫直过程中矫直力、应力、应变、弹塑性比及各辊的压下量和矫直后板材每米不平度的关系, 并进行样机压下量和每米不平度的现场测量。通过对比, 有限元分析与试验结果一致性良好, 验证了分析计算的准确性, 为矫直机优化设计提供必要的参考依据。

**关键词:**有限元; 弹区比; 矫直工艺参数; 矫直力

中图分类号: TG331.17

文献标志码: A

### Numerical simulation and experimental analysis for process parameters of cold straightener

TANG Qian<sup>1</sup>, DU Xue-song<sup>1</sup>, GAO Zhan<sup>2</sup>, XU Jie<sup>2</sup>, ZHANG Yuan-xun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. CISDI Engineering Co. LTD, Chongqing 400013, P. R. China)

**Abstract:** This paper focuses on the design of eleven rollers straightener. An elastic-plastic FEM model is introduced to cope with the difficulty of pre-estimating the performance of straightening during the design process. To obtain straightening force, stress, strain, elastic-plastic ratio, relations between reduction amount of roller and roughness of plate per square meter, a three-dimensional element model is established and straightening process is simulated. In addition, an experiment is conducted to measure the reduction amount of roller and the roughness of plate per square meter. It is shown that the results of numerical simulation are consistent with the experimental results. The developed computing model can provide essential references for the optimization of straightener.

**Key words:** finite element; elastic-plastic ratio; power parameters of straightening process; straightening force

在矫直机的设计中, 矫直机的力能参数是结构参数的重要设计依据, 且力能参数又与工艺参数密切相关。因此, 要设计出合理的结构参数, 必须根据不同工艺参数准确计算力能参数。长期以来传统设计方法难以考虑不同矫直工艺的矫直性能, 矫直工

艺的实施通常采用加工样机后的反复测量和试矫的方式, 这样不仅效率低, 劳动强度高, 且不易保证精度。近年来, 许多研究者将有限元法引入到矫直机工艺参数设计阶段, 用以模拟不同工艺参数下的矫直过程, 可获得矫直过程板材变化曲率和力能参数

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875268); 教育部重点项目(108107)

作者简介: 唐倩(1969-), 女, 重庆大学教授, 博士, 主要从事机械结构设计、计算机辅助设计、工业工程等方向的研究, (E-mail) tqcqu@cqu.edu.cn.

等矫直性能,模拟分析不仅可以降低试轧消耗的费用,还能在设计阶段确定最优的矫直机工艺参数,大大缩短矫直机开发周期,提高经济效益<sup>[1-4]</sup>。笔者在某11辊矫直机设计过程中,基于弹塑性有限元法,建立了中薄板矫直过程计算模型并进行仿真,得到了板材在矫直过程中各场变量分布规律、矫直力大小和最终矫直后的板材不平度,确定了矫直机在不同板材下的最优工艺参数,并通过试验加以验证<sup>[5-8]</sup>。

## 1 11辊矫直机设计要求及主要参数

### 1.1 设计要求

- 矫直带钢厚度: 1.5~12.0 mm
- 矫直带钢宽度: ≤800 mm
- 矫直带钢最大屈服极限:  $\sigma_s \leq 500$  MPa
- 带钢矫直后每米不平度: ≤3 mm/m
- 机组速度见表1。

表1 机组速度

带钢厚度/mm	矫直速度/(m·min <sup>-1</sup> )
≤3	≤100
3.1~6.0	≤60
6.1~12.0	≤40

### 1.2 矫直机主要结构参数

对于板材矫直机构,其主要结构参数是辊径  $D$  和辊距  $t$ 。受结构条件、咬入条件、强度条件及矫直可能性的约束,其取值范围及其之间的比例关系受到了一定限制<sup>[9-10]</sup>。

确定辊距  $t$  时,既要考虑满足最小厚度轧件的矫直质量要求,又需考虑满足矫直最大端面轧件时矫正辊的强度要求。初步设计时可通过式(1)、(2)确定其取值范围。

$$t_{\max} = 0.35 \frac{h_{\min} E}{\sigma_s}, \quad (1)$$

$$t_{\min} = 0.836 \sqrt{\frac{W e E}{b \beta \sigma_s}}, \quad (2)$$

式中:板材矫直机弹性变形区抗弯截面模量  $W = bh_{\max}^2/6$ ;常数  $e=1.5$ ;  $\beta=0.95$ ;  $h_{\min}$  为板材最小厚度;  $E$  为工作辊弹性模量;  $\sigma_s$  为轧件屈服极限;  $b$  为轧件宽度。

辊径  $D$  与辊距  $t$  有一定的比例关系,对于中薄板矫直机,一般按式(3)、(4)初步估算<sup>[11]</sup>。

$$D_{\max} = 0.9t_{\max}, \quad (3)$$

$$D_{\min} = 0.9t_{\min}。 \quad (4)$$

对于本文的11辊矫直机,通过式(1)-(4)的计算,初取辊子直径为130 mm,辊距为140 mm。

### 1.3 矫直工艺参数的确定

矫直工艺参数主要包括各辊压下量、弯辊凸度、轴向调节量和矫直速度等<sup>[12-16]</sup>。笔者所设计的11辊矫直机,矫直速度的要求已知,根据轧件原料的情况不考虑弯辊凸度,轴向调节量由轴向调节装置实现,因此本文矫直机主要的工艺参数是各辊压下量及其矫直后每米不平度的确定(图1)。对于理想弹塑性板材,各矫直辊的压下量和各曲率的关系式为

$$\delta_i = \delta_{wi} + \frac{1}{2}(\delta_{w(i-1)} + \delta_{w(i+1)}), \quad (5)$$

式中: $\delta_i$  为第  $i$  辊压下量;  $\delta_{w(i-1)}$ 、 $\delta_{wi}$ 、 $\delta_{w(i+1)}$  分别为第  $i-1, i, i+1$  辊压弯挠度。

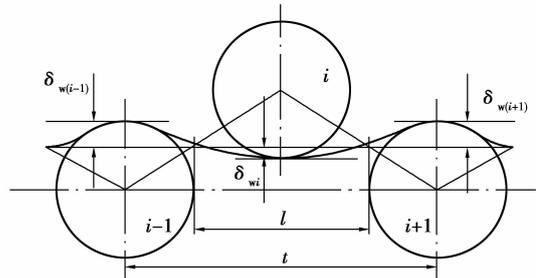


图1 压弯挠度与压下量的关系图

在用式(5)计算时,准确确定零弯矩点间的距离(即图2中  $l$  的长度)是计算的关键。但实际工程中  $l$  的长度往往难于准确确定,因此常按式(6)简化计算。

$$l = 0.5 \times \left[ t - \frac{tR}{\sqrt{4R^2 + \left(\frac{t}{2}\right)^2}} \right], \quad (6)$$

式中: $R$  为辊子半径。

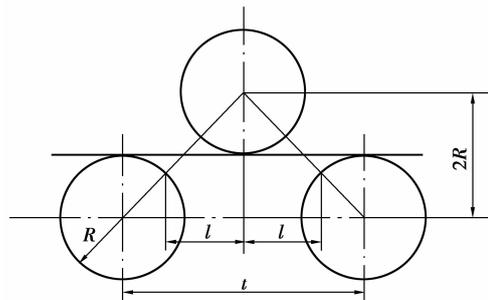


图2 零弯矩点计算简图

当按式(5)计算出各辊的压弯挠度后,按式(7)可计算出残余挠度,然后换算成每米不平度,从而对矫直效果进行评价。

$$\delta_c = \delta_w - \delta_f, \quad (7)$$

式中： $\delta_c$  为残余挠度； $\delta_w$  为压弯挠度； $\delta_f$  为弹复挠度。

在用式(7)计算时，涉及到各辊弹区比(弹塑性交界处的厚度与板厚的比值)的计算，实际工程中，弹区比难于精确确定，故计算时，根据经验进行假定。

从上述分析中可以看出，采用经典解析法进行计算，尽管概念明确，公式简洁，但计算过程中采用了若干假定或简化，故计算结果精度不高。因此，笔者将通过弹塑性有限元法对矫直机的矫直性能进行仿真。

## 2 矫直性能有限元仿真分析

### 2.1 有限元模型及分析方法

该冷矫直机辊子布置方式及辊子编号如图 3 所示，在有限元分析时采用平面应变单元<sup>[8]</sup>，钢带简化为纵截面矩形，尺寸根据钢带的厚度而变，辊子直径为 130 mm，辊距为 140 mm，上辊不动，在其中心节点固定约束，下面各辊可单独调整辊缝值，即可施加 Y 向位移。辊子简化为刚性面，材料采用双线性随动强化弹塑性模型，应用弹塑性接触法进行数值模拟。

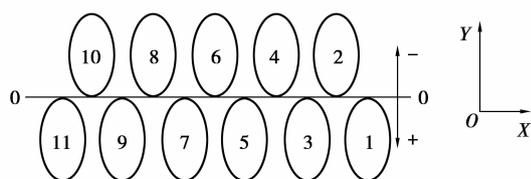


图 3 11 辊冷矫直机辊子布置方式

基于有限元分析软件 Ansys，利用其二次开发工具 APDL 编写命令流代码，以压下量为变量，通过计算，提取其残余挠度，并转化为每米不平度，对矫直效果进行评价，最后选取一组压下量作为最优工艺参数。同时，通过后处理还可以得到在该组工艺参数下的应力、变形、矫直力及矫直力矩等参数。

### 2.2 计算结果及分析

以 4 mm 厚度的板材为分析对象，对其矫直性能进行仿真分析。表 2 为板材的材料参数，表 3 为不同工艺参数下的各辊压下量值。

表 2 材料参数

材料 牌号	屈服极限 $\sigma_s$ /MPa	弹性模量 $E$ /MPa	弹性极限 应变 $\epsilon_t$ / %	强化弹性 模量 $E'$ /MPa
40Cr	500	$2.06 \times 10^5$	0.24	1 424

表 3 各辊压下量 mm

辊号	不同方案下各辊压下量					
	1	2	3	4	5	6
1	0.6	0.5	0.7	0.4	0.5	0.3
3	-0.1	-0.2	0.1	-0.3	0	-0.2
5	2.5	2.7	2.3	2.6	2.5	2.4
7	2.6	2.4	2.5	2.7	2.6	2.6
9	2.8	3.0	3.1	3.2	2.9	2.8
11	2.9	3.2	3.2	3.3	3.1	3.1

6 种方案下板材矫直后的每米不平度度见表 4，可知取方案 1，可获得最好的矫直效果。

表 4 不同工艺方案下板矫直后每米不平度 mm

方案	平直度	方案	平直度
1	2.7	4	3.2
2	4.8	5	4.1
3	3.4	6	3.8

提取方案 1 各辊的等效变形(图 4)和应力(图 5)，可知等效应力最大为 537.296 MPa，出现在 3 号辊位置。

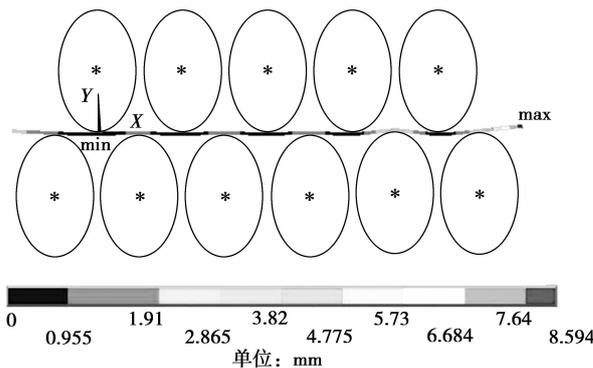


图 4 等效位移

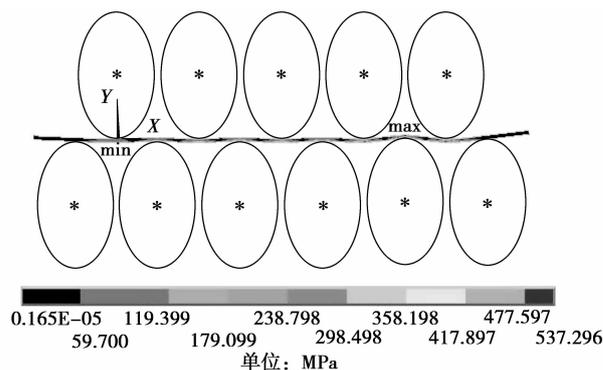


图 5 等效应力

提取各辊作用下板材的塑性应变值,图6-8所示。

板材的塑性变形和弹性变形分布区域,可计算出较为精确的各辊弹区比(表5)。

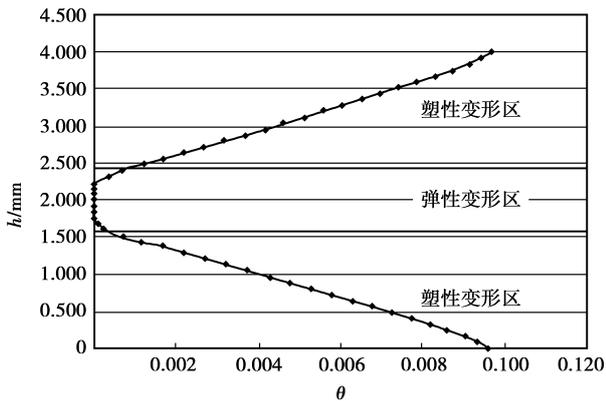


图6 2号辊塑性应变值

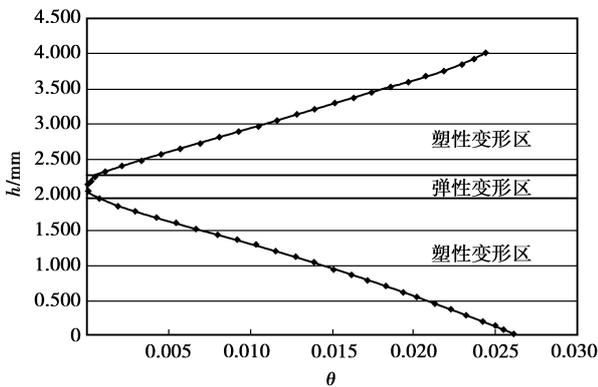


图7 3号辊塑性应变值

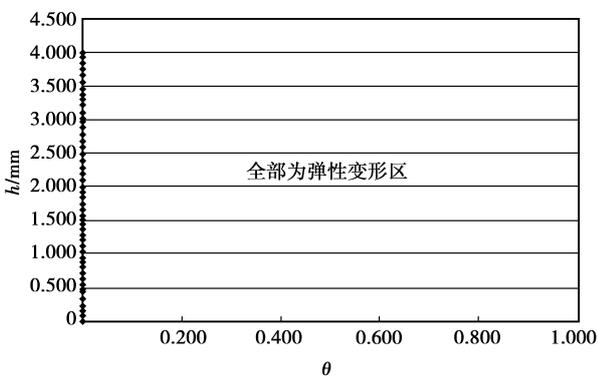


图8 9、10、11号辊塑性应变值

由图6-8可知2-8号辊作用下的板材属于弹性变形(限于篇幅4-8辊的数据从略),变形区的分布规律为板材的上下部分为塑性变形区,中间为弹性变形区,弹性变形区的范围根据压下量不同而不同,3号辊弹性变形区最小,9-11号辊板材则全为弹性变形,以上结果与理论预测一致。通过各辊下

表5 各辊弹区比

辊号	2	3	4	5	6
弹区比	33	25	36	83	91
辊号	7	8	9	10	
弹区比	92	100	100	100	

### 3 试验

为了验证上述有限元法的计算结果,笔者在11号矫直机的样机(图9)上进行了试验。试验取厚4 mm、宽600 mm的40Cr板材,考虑到矫直过程中应力、应变或弹区比难以测量,试验时仅对各辊在矫直过程中的矫直力进行测量,然后对矫直完成后板材的每米不平度进行测量。表6为有限元分析得到的矫直力与试验结果的对比。



图9 11号矫直机样机

表6 矫直力比较 kN

辊号	有限元值	实测值	有限元值与实测值误差/%
1	67.38	70.26	4.1
2	209.42	213.83	2.1
3	282.66	293.74	3.8
4	262.46	272.91	3.8
5	224.79	236.02	4.8
6	220.36	213.67	-3.1
7	211.09	219.51	3.8
8	201.48	194.97	-3.3
9	172.73	165.84	-4.2
10	119.41	116.18	-2.2
11	40.61	38.93	-4.3

试验方法测得每米不平度为2.9 mm,与有限元分析结果2.7 mm误差为7.4%。从结果中可以看

出,有限元法比较准确地预测了矫直机的矫直性能。

#### 4 结 语

笔者运用弹塑性有限元法对冷矫直机的矫直性能进行仿真,并将该方法运用于11辊矫直机的设计过程中。通过仿真获得了矫直过程中的板材应力、应变、弹区比等力能参数的变化规律,以及板材矫直后的每米不平度,从而确定出某种板材的最优矫直工艺参数。通过试验数据与有限元分析结果的对比,验证了该方法的可靠性与实用性。

#### 参考文献:

- [1] 苏岚,王先进,唐获,等. 有限元法处理金属塑性成型过程的接触问题[J]. 塑性工程学报, 2002, 7(4): 12-15.  
SU LAN, WANG XIAN-JIN, TANG DI, et al. A study on contact problem of plastic metal forming with finite element method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2002, 7(4): 12-15.
- [2] 崔丽红,臧勇,章博,等. H型钢精确矫直技术的研究分析[J]. 机械设计与制造, 2008(4): 176-178.  
CUI LI-HONG, ZANG YONG, ZHANG BO, et al. The investigation in h-beam precision straightening technology [J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(4): 176-178.
- [3] 张清东,刘天浩,王文广,等. 宽带钢拉弯矫直工艺参数关系模型研究[J]. 钢铁, 2007, 42(2): 44-46.  
ZHANG QING-DONG, LIU TIAN-HAO, WANG WEN-GUANG, et al. Technical parameter relation models of tension leveling of wide steel strip [J]. Iron & Steel, 2007, 42(2): 44-46.
- [4] 黄晓娟,黄晓云. 矫直机矫直辊设计分析[J]. 沈阳工业学院学报, 2001, 20(2): 9-12.  
HUANG XIAO-JUAN, HUANG XIAO-YUN. Design and annlysis of straightening roller for strightening mechine [J]. Journal of Shenyang Institute of Technology, 2001, 20(2): 9-12.
- [5] 徐建忠,张凤琴,龚殿尧,等. 四辊轧机轧辊弹性变形解析模块的开发[J]. 轧钢, 2003, 20(2): 8-11.  
XU JIAN-ZHONG, ZHANG FENG-QIN, GONG DIAN-YAO, et al. Development of calculation module of rolls elasticity deformation in 4-h mill [J]. Steel Rolling, 2003, 20(2): 8-11.
- [6] JIANG Z Y, TIEU A K, LU C. A FEM model of the elastic deformation zones in flat rolling [J]. Journal of Material Processing Technology, 2004, 146(2): 167-174.
- [7] 刘志亮. 二辊矫直机力能参数研究[J]. 机械工程师, 2005(5): 77-78.  
LIU ZHI-LIANG. Research of the power parameters design in two roll straightener [J]. Mechanical Engineer, 2005(5): 77-78.
- [8] 崔甫. 矫直原理与矫直机械[M]. 北京:冶金工业出版社, 2005.
- [9] WU B J, CHAN L C, LEE T C, et al. A study on the precision modeling of the bars produced in two cross-roll straightening [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99(1/3): 202-206.
- [10] YANAGIMOTO J. Strategic FEM simulator for innovation of rolling mill and process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130/131: 224-228.
- [11] 崔甫. 矫直理论与参数计算[M]. 北京:机械工业出版社, 1994.
- [12] LI K Y, CHEN C K, YANG S C. Profile determination of a tube-straightening roller by envelope theory [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 94(2): 157-166.
- [13] HUH H, HEO J H, LEE H W. Optimization of a roller levelling process for Al7001T9 pipes with finite element analysis and Taguchi method [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(4): 345-350.
- [14] HAMADA R, ASAKAWA M, NAGAHIRA M, et al. Improvement of straightness in coiled bar with roller leveler straightener [J]. Wire Journal International, 2008, 41(9): 81-87.
- [15] NASTRAN M, KUZMAN K. Stabilizing the forming properties of wire by using a roller-straightening process [J]. Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2003, 49(6): 298-312.
- [16] HAMRAOUI M. Thermal behaviour of rollers during the rolling process [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(11/12): 2386-2390.

(编辑 张 革)