

DOI: 10.3901/JME.2019.12.083

六辊轧机工作辊辊形边降调控能力分析*

冯夏维 王晓晨 杨 荃 孙蓟泉

(北京科技大学国家板带生产先进装备工程技术研究中心 北京 100083)

摘要: 使用带有辊形的工作辊是六辊轧机减小带刚边降的有效手段之一,然而目前对于辊形设计规律的研究仍显不足。首先在分析各种轧机辊系弹性变形计算算法优缺点的基础上,提出分割矩阵求解方法:针对六辊轧机建立影响函数线性方程组,将方程组系数矩阵分割后,把矩阵条件数最小的系数矩阵作为最终迭代环节,同有限元法对比显示其精度合格、速度更快,适用于承担大规模辊系弹性变形预设分析时的高强度计算任务。其次利用分割矩阵影响函数法,针对工作辊辊形曲线段高度、锥度段斜率对边降调控能力的影响进行研究。结果表明,工作辊辊形高度越大,边降调控能力越强,同凸度控制耦合作用越强;斜线段斜率对边降调控能力影响不大,斜率越小,越有利于同平坦度控制解耦。最后根据以上规律,为工业现场设计了新式辊形曲线,进一步提高 $5\text{ }\mu\text{m}$ 边降合格率。研究结果表明,通过分割矩阵迭代法,辊系弹性变形计算更为精确,同时大的曲线段高度与小的直线段斜率是提高工作辊辊形边降控制能力的有效方案。

关键词: 板带轧制;影响函数法;UCMW轧机;辊形设计;弹性变形

中图分类号: TG333

Analysis of Edge Drop Control Performance of Work Roll Contour on Six-high Cold Rolling Mill

FENG Xiawei WANG Xiaochen YANG Quan SUN Jiquan

(National Engineering Research Center for Advanced Rolling,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: Tapered work roll is an effective measure of six-high roll mill to reduce edge drop but its design criterion is not adequately investigated. Firstly, Based on analysis of previous roll stack's elastic deformation theories, the influence function method based on the partitioned matrix iteration scheme is proposed: Influence Function matrix solution for the six-high roll stack is founded, and by partitioning the matrix solution, the coefficient matrix with the smallest condition number is proposed as the outermost iteration. By this iteration scheme, the results are in better agreement with Finite Element Method, which makes it an optimal tool for intensive presetting analysis. Secondly, the proposed method is used to analyze the differences in control properties between different curve heights and tapered slopes of work roll contour. Results show that a higher curve height is beneficial for the edge drop control ability, but strongly coupled with crown control. The tapered slope has limited influence on the edge drop control effect, but a smaller slope is beneficial to decouple edge drop control and crown control. Finally, based on these laws, a new contour is designed and utilized into industrial line, and percentage of edge drop smaller than $5\text{ }\mu\text{m}$ is further improved. The results show that through partitioned matrix iteration scheme, elastic deformation of rolls stack can be accurately calculated. The results also suggest that a large curve height and a small tangent slope is effective to improve the edge drop control performance of work roll contour.

Key words: flat sheet rolling; influence function method; UCMW cold mill; roll contours; elastic deformation

0 前言

薄带轧制过程,是两个相对转动的工作辊将薄带厚度减小的过程,过大的横向厚差会增大薄带的

切边回炉量,不利于实现绿色、可持续制造。为了补偿工作辊弹性变形所产生的薄带横向厚差,进行毛边轧制,工作辊均带有辊形,且由辊系支撑。中间辊可窜动的六辊轧机(简称 UCM)^[1],与工作辊、中间辊都可横向窜动的六辊轧机(UCMW)为冷轧薄带较为常见的辊系结构。现代 UCMW 冷连轧机组控制系统已经进化成为最复杂、智能、先进的制造控制系统之一。其针对边降的自动控制系统如图

* 北京市自然科学基金(3182026)、国家自然科学基金(51604024)和中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-17-002A2)资助项目。20180928 收到初稿,20181206 收到修改稿

1 所示,其由预设控制 and 在线反馈控制组成^[2]。利用带有轱形的工作轱窜动,补偿带钢边部区域厚度的急剧减小(简称边降),同时调整弯轱力、中间轱窜量抵消工作轱窜动造成的整体横向厚差变化(简称凸度)。在边降自动控制系统中,工作轱的轱形决定了预设控制中差值表的基础数值^[3],因此亟需研究工作轱轱形参数对边降控制能力的影响。

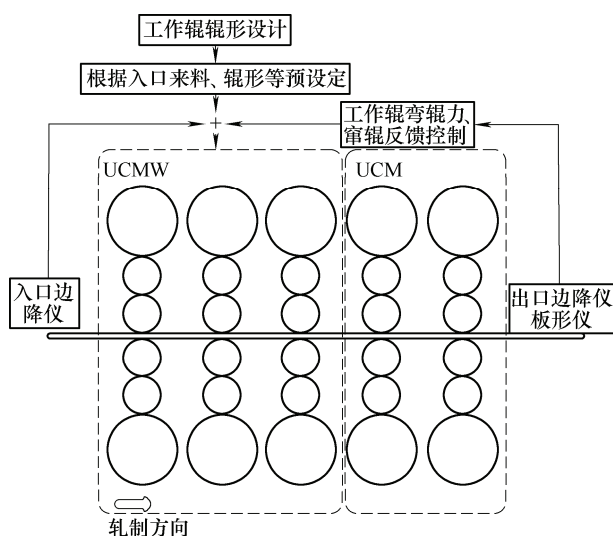


图1 UCMW 冷连轧机边降控制系统

工作轱轱形均由多段线组成,曹建国等^[4]提出了由曲线段(L_1),外切直线段(L_2),锥度段(L_3)三段式组成的 EDW 工作轱轱形,轱形由 L_1 段高度、 L_2 段斜率确定, L_2 、 L_3 为磨轱保护段。对于 6 轱 UCMW 工作轱轱形,其由最初的单锥度轱 K-WRS^[5],演变为宝钢武钢使用的弧度轱^[6-7]。然而,目前对六轱轧机工作轱轱形设计标准的研究均为试验性质,并未对如何提高工作轱轱形边降控制能力提供指导意见。

数学模型可以低成本的模拟计算轱系弹性变形,寻找轱形设计的一般规律。当网格足够细密时,有限元可以精确的计算轱系变形^[8-10]。LIU 等^[11-12]研究了体积变化、潜热对热轧带钢板形的影响,NAKHOUL 等^[13]与 ABDELKHALEK 等^[14]研究了平坦度与断面的相互影响。虽然有限元法具有通用性,但是其计算时间长。由于计算速度相比有限元更快,影响函数法是另外一种常见的计算方法^[15]。由于轱身是类似阶梯轴的结构,在轱身边缘存在轱径的急剧变化,因而是平面应力问题^[16]。员征文等^[17-18]指出,由于影响函数法假定为平面应变,因而计算结果有一定偏差,HACQUIN 等^[19]对该平面应变假定进行了修正,然而研究仅限于四轱轱系弹性变形问题。孔繁甫等^[20]针对工作轱可窜动的四轱轧机建立

了快速影响函数法模型,然而精度较差。

目前亟需提高影响函数法的计算精度,以适用于针对 UCMW 轱系弹性变形的大规模预设计算。进一步研究不同工作轱轱形几何参数(高度、斜率)对带钢边降、凸度控制能力的影响,从而对工业实践提供指导。

1 分割矩阵影响函数法

1.1 影响函数计算

影响函数是利用弹性力学原理计算所得的弯曲与压扁函数表达式,根据 TIMOSHENKO 梁理论^[15],轧轱弯曲可由式(1)计算

$$\frac{d^4 K^b}{dy^4} = \frac{f}{EI} - \frac{7+6\nu-2\nu^2}{3(1+\nu)} \frac{d^2 f}{dy^2} \quad (1)$$

式中 K^b ——轧轱弯曲影响函数矩阵;

f ——未知力矢量;

y ——宽度坐标;

ν ——泊松比;

A ——轧轱截面积;

E ——弹性模量;

I ——弯曲模量。

由于轱身受弯矩影响,轱身产生泊松比效应可由式(2)计算^[21]

$$K^p = -2\nu \frac{M_f}{EA} \quad (2)$$

式中 K^p ——泊松比影响函数矩阵;

M_f ——力矩矢量。

对于任意应力分布为 $p(x',y')$ 影响下轧轱压扁变形可以由 BOUSSINESQ 解求出^[15],由式(3)所示

$$K^f(x,y) = \frac{1+\nu}{2\pi E} \iint p(x,y) \left[\frac{z^2}{r^3} + 2(1-\nu) \frac{1}{r} \right] dx dy \quad (3)$$

式中 K^f ——无限体弹性压扁函数矩阵;

r ——受力点距离。

由于轧轱在传动侧(DS)、操作侧(OS)两端存在轱径突变,与无限体假设相背。HACQUIN 等^[19]通过大量的有限元仿真计算,发现可以假定在轧轱两端存在一个虚拟力分布,同实际力分布镜像,可以克服无限体假定造成的误差, K^f 更正为式(4)

$$K^f = K^f(y, f) + FEC_{OS} \cdot K^f(L-y, FEC_{OS} \cdot f) + FEC_{DS} \cdot K^f(-L-y, FEC_{DS} \cdot f) \quad (4)$$

式中 L ——轧轱轱身长度;

FEC ——虚拟力影响系数。

$$FEC = (1 - R_a/R) \quad (5)$$

式中 R_a ——轧辊辊颈处半径;

R ——辊身半径。

当轧辊受上下非对称力时,需要将 FEC 增大 30%。由于轧辊辊颈处还受到弯辊力作用,在辊身端部造成额外弯矩,所造成的辊身弯曲由式(6)计算^[20]

$$K^e = 0.608w^n / R^2 E \left[1 - (R_a/R)^2 \right] \cdot \exp \left[- (0.5L - |y|) / (0.418R - 0.179R_a) \right] \cdot \cos \left\{ \left[- (0.5L - |y|) / (0.26R - 0.167R_a) \right]^{0.75} \right\} \quad (6)$$

式中 w^n ——为弯辊力作用点同辊身端部的距离;

K^e ——弯辊力在辊颈处造成的弯矩系数。

1.2 分割矩阵迭代法

通过辊系变形协调方程、力与力矩平衡方程构建矩阵形式如式(7)所示

$$Y = A \cdot X + B = 0 \quad (7)$$

式中, X 为未知矢量,由式(8)计算

$$X = \begin{pmatrix} f_2 \\ f_3 \\ c_2 \\ c_3 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中 f_2, f_3 ——工作辊与中间辊、中间辊与支撑辊辊间力;

c_2, c_3 ——工作辊与中间辊、中间辊与支撑辊辊身中心压扁;

θ_1, θ_2 ——工作辊、中间辊倾角。系数矩阵 A 可写为式(9)的形式。

$$A = \begin{pmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & -1 & 0 & y & y \\ K_{2,1} & K_{2,2} & 0 & 1 & 0 & y \\ -l & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -l \cdot y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l & -l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l \cdot y & -l \cdot y & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

l 为辊间力 f 分布长度,子系数矩阵 K 由式(10)计算

$$\begin{aligned} K_{1,1} &= K_1^b + K_1^p + K_1^b - K_2^p + K_{1,2}^f + K_{2,2}^f \\ K_{1,2} &= -K_2^b + K_2^p \\ K_{2,2} &= K_2^b + K_2^p + K_3^b - K_3^p + K_{2,3}^f + K_{3,3}^f \\ K_{2,1} &= -K_2^b - K_2^p \end{aligned} \quad (10)$$

式中 K_1^b, K_2^b, K_3^b ——工作辊、中间辊及支撑辊的

弯曲影响函数矩阵;

$K_{1,2}^f, K_{2,2}^f$ —— f_2 对工作辊、中间辊的压扁影响函数矩阵;

$K_{2,3}^f, K_{3,3}^f$ —— f_3 对中间辊、支撑辊的压扁影响函数矩阵。

可将系数矩阵 A 分割为式(11)所示两个矩阵

$$A_1 = \begin{pmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} \\ K_{2,1} & K_{2,2} \end{pmatrix}, \quad A_2 = \begin{pmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & -1 & 0 \\ K_{2,1} & K_{2,2} & 0 & -1 \\ -l & 0 & 0 & 0 \\ l & -l & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

分别分析 A_1, A_2, A 的矩阵条件数得出 A_1 的条件数为 $10^5, A_2$ 的条件数为 $10^{12}, A$ 的条件数为 10^{13} 。显然 A_1 的条件数最小,利用小的矩阵条件数系数矩阵计算式(7)可以获得更高的精度^[22]。因此设计分割矩阵迭代的计算方式,计算流程图如图 2 所示。利用 A_1 作为最终的迭代系数矩阵来保证总体的计算精度,忽略力、力矩平衡方程,并将工作辊与中间辊辊身倾角 θ_1, θ_2 , 辊间接触中心压扁 c_2, c_3 视为已知,求解方程式(12)

$$Y = A_1 \begin{pmatrix} f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} + B + \begin{pmatrix} y & y & -1 & 0 \\ 0 & y & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} \quad (12)$$

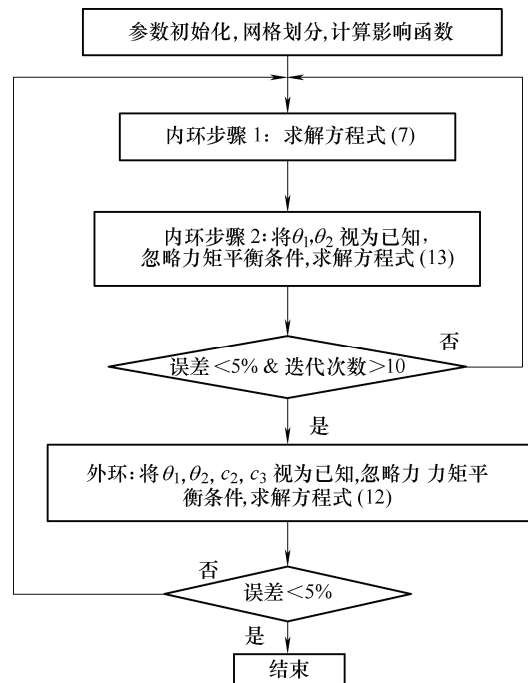


图 2 基于分割矩阵法的辊系弹性变形计算流程图

利用 A_2 作为内环第二步迭代系数矩阵, 求解方程式(13), 忽略力矩平衡方程, 来兼顾计算速度与精度

$$Y = A_2 \begin{pmatrix} f_2 \\ f_3 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} + B + \begin{pmatrix} y & y \\ 0 & y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

常数矩阵 B 的计算方法如式(14)所示

$$B = B_1 \cdot f_1 + B_2 \quad (14)$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} -K_1^b - K_1^p \\ 0 \\ l \\ l \cdot y \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} -(K_1^b - K_1^e)F_{WRB} + (K_2^b + K_2^e)F_{IRB} \\ -(K_2^b - K_2^e)F_{IRB} - 0.5(K_3^b - K_3^e)F_{Total} \\ \sum F_{WRB} \\ \sum M_{WRB} \\ \sum F_{IRB} \\ \sum M_{IRB} \end{pmatrix}$$

式中 F_{WRB} , F_{IRB} , F_{Total} ——工作辊弯辊力、中间辊弯辊力、总轧制力。

针对每一步的求解, 利用牛顿法求解雅可比方程式(15)

$$Y + \text{Jaco} \cdot dX = 0 \quad (15)$$

$$\text{Jaco} = \begin{pmatrix} \text{Jaco}_{1,1} & \text{Jaco}_{1,2} & -1 & 0 & y & y \\ \text{Jaco}_{2,1} & \text{Jaco}_{2,2} & 0 & -1 & 0 & y \\ -l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -l \cdot y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l & -l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l \cdot y & -l \cdot y & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Jaco}_{1,1} = K_{1,1} + dK_{1,2}^f \cdot f_2 + dK_{2,2}^f \cdot f_2$$

$$\text{Jaco}_{2,2} = K_{1,2}$$

$$\text{Jaco}_{2,2} = K_{2,2} + dK_{2,3}^f \cdot f_3 + dK_{3,3}^f \cdot f_3$$

$$\text{Jaco}_{2,1} = K_{2,1}$$

则第 $n+1$ 次迭代的计算结果为式(16)所得

$$X_{n+1} = X_n + dX \quad (16)$$

2 分割矩阵影响函数法同有限元对比

UCMW 轧机辊系结构如图 3 所示, 其几何参数见表 1。利用 Abaqus® 软件建立 UCMW 有限元模型进行分析, 如图 4 所示, 网格类型采用 C3D8R 单元,

并在辊间接触、工作辊受轧制力作用位置进行网格加密, 辊间接触由罚函数法进行求解。随后构建本文所述影响函数法模型, 宽度方向采用 150 个单元。

表 1 轧机几何尺寸表

mm

参数	数值
工作辊辊身与轴颈直径	425, 220
工作辊辊身与轴颈长度	1 605, 440
弯辊力、轧制力作用点位置	1 195
中间辊辊身与轴颈直径	490, 280
中间辊辊身与轴颈长度	1 510, 440
中间辊横移长度	90
支承辊辊身与轴颈直径	1 300, 800
支撑辊辊身长度	1 500

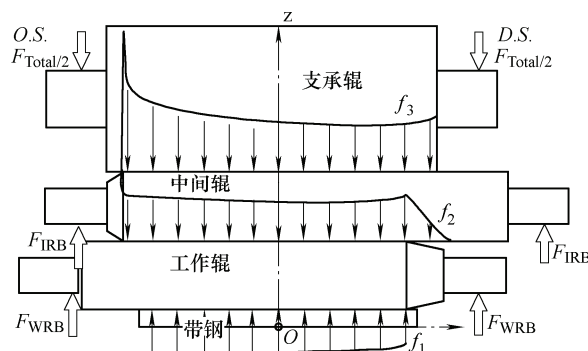


图 3 UCMW 轧机辊系结构示意图

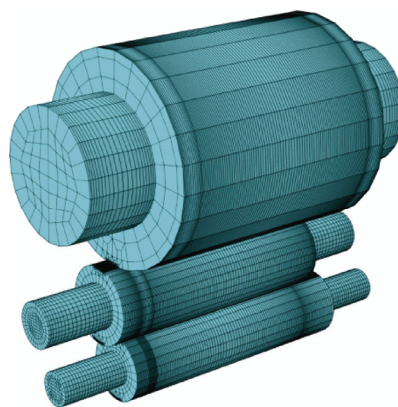


图 4 有限元模型网格划分情况

8 kN/mm 轧制力均匀施加与工作辊底面宽为 1 250 mm, 长为 12 mm 的面积上。中间辊带有长为 30 mm, 高为 1.25 mm 倒角, 工作辊带有长 155 mm, 高为 0.2 mm 辊形, 工作辊窜动后锥形段插入带钢 65 mm。工作辊两端辊颈受 46 kN 弯辊力, 中间辊两端辊颈各受 200 kN 弯辊力, 辊系弹性模量取 210 GPa, 泊松比为 0.3。UCMW 轧机整体与边部断面计算结果如图 5、6 所示, 辊间力计算结果如图 7 所示。分割矩阵法同有限元计算结果误差小于 5%。

UCMW 轧机辊间力计算结果如图 7 所示, 分割矩阵影响函数法同有限元方法结果一致。由于工作辊锥度与中间辊倒角, 辊身两端出现接触力双峰。

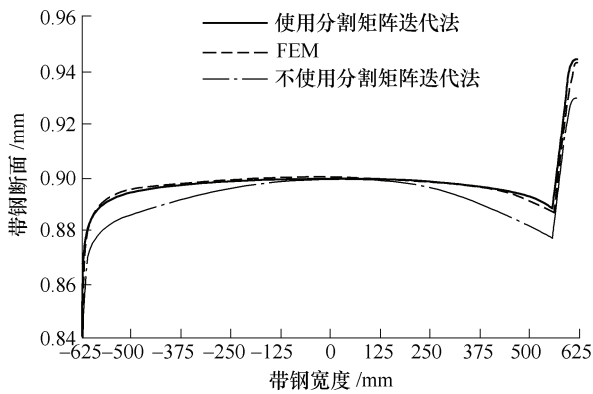


图5 带钢断面计算结果

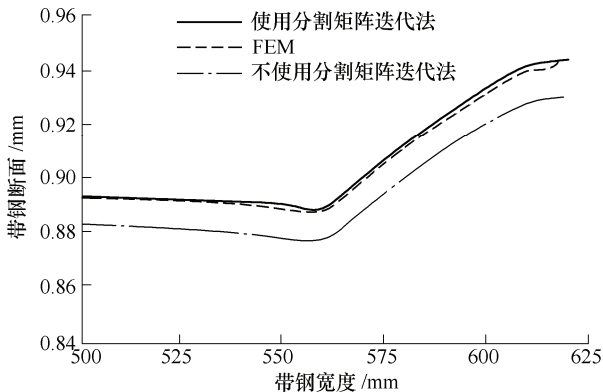


图6 带钢边部断面局部放大图

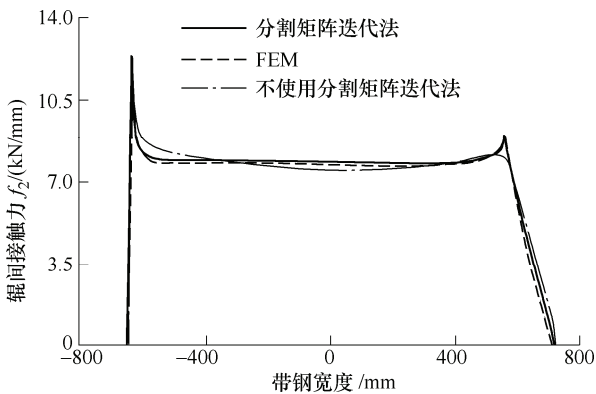


图7 UCMW 辊间力计算结果

在 Scilab[®]环境下使用 4 GHz Intel Core i7 计算需耗时 3 min, 共需 10 次内环迭代与 2 次外环迭代过程。不使用分割矩阵迭代方式时, 计算过早判定收敛, 辊端接触力结果偏大, 而辊身中心处结果偏小, 工作辊发生了更大弯曲, 造成凸度计算结果偏大。

3 UCMW 工作辊辊形设计

工作辊辊形设计参考曹建国等^[5]所用多段式辊形, 如图 8 所示, 因磨辊保护段不影响辊系变形, 因而可以将研究限定于曲线段 L_1 与外切直线段 L_2 参数。定义工作辊辊形中曲线段 L_1 的曲线形式如式 (17) 所示

$$H(y) = H_1 \sin(2\pi y/4L) \quad (17)$$

式中 L ——工作辊辊形区全长;

H_1 ——待定辊形高度, 其几何意义为正弦函数在工作辊辊形区的总幅值。 L_2 直线段与 L_1 正弦曲线相切, 定义 L_2 直线段形式如式 (18) 所示

$$H(y) = ay + H(L_1) \quad (18)$$

式中 a ——待定常数, 其几何意义为曲线段在 L_1 点辊形斜率。

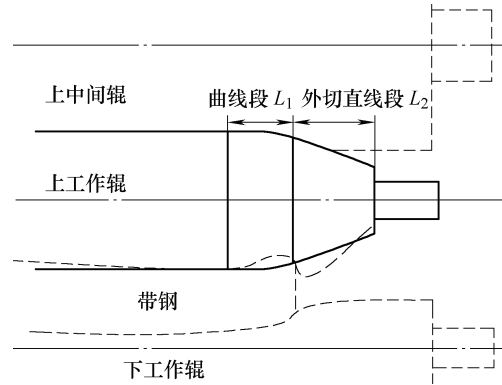
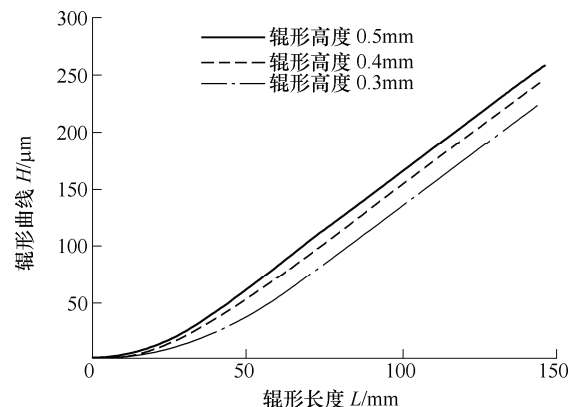


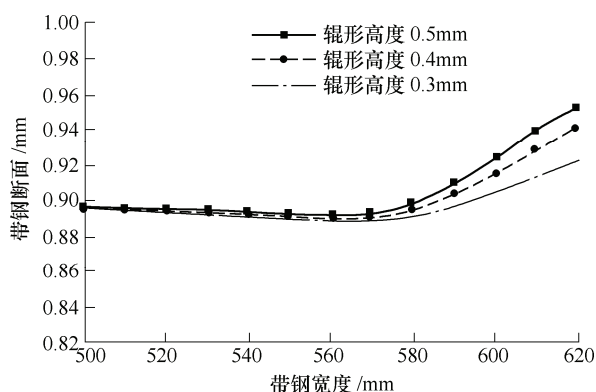
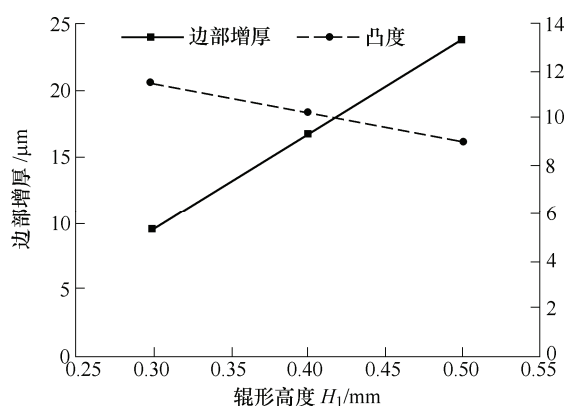
图8 工作辊辊形示意图

工作辊辊形设计需要确定两个参数: 辊形高度 H_1 与外切直线段斜率 a , 因此利用已论证的分割矩阵影响函数法计算分析两参数对边降调控特性的影响。同时沿薄带宽度方向利用 LE 与 SUTCLIFFE 薄带轧制力模型^[23], 建立辊系-薄带一体化模型, 体现辊系弹性变形与轧件塑性变形的相互影响。

3.1 辊形高度对边降调控特性影响

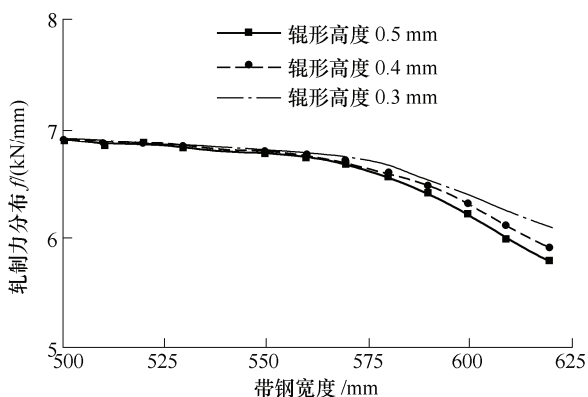
首先研究当斜率 a 为相同值 2.01 时, 不同工作辊辊形高度 0.3 mm、0.4 mm 以及 0.5 mm 时的调控特性, 辊形曲线如图 9 所示, 带钢断面计算结果如图 10 所示, 所造成边部厚度的变化与整体断面凸度的变化如图 11 所示。根据边降仪测量点位置与网格划分情况, 取距离边部 25 mm 与 55 mm 为边降特征点, 带钢中心与距边部 125 mm 点为凸度特征点。

图9 曲辊形高度 H_1 变化时工作辊辊形

图10 辊形高度 H_1 变化时带钢边部断面图11 辊形高度 H_1 变化时对应带钢边部增厚与凸度

由图10可以看到,由于工作辊带有辊形,工作辊在带钢边部区域的弹性变形得到了补偿,带钢边降得到了显著降低,出现了边部增厚。由图11可以看到,随着辊形高度的增加,边部增厚变大,同时整体凸度随辊形高度而减小。说明当辊形斜率一定时,增大辊形高度有助于提高辊形对边降的控制能力,但是需要进行凸度补偿控制,补偿由于工作辊辊形所造成的凸度减小。

由图12可以看到随着辊形高度的增加,边部区域轧制力变小,这是由于薄带在边部区域变形变小。同时,边部区域轧制力的减小也会减小工作辊的弹性变形,造成边部增厚与凸度减小。

图12 辊形高度 H_1 变化时带钢边部区域轧制力分布

3.2 直线段斜率对边降调控特性影响

当辊形高度($H_1=0.4$ mm)一定时,研究不同外切直线段斜率($a=1.58、2.1、2.778$)对边降的调控特性,辊形曲线如图13所示。带钢断面计算结果如图14所示,所造成边部厚度的变化与整体断面凸度的变化如图15所示。

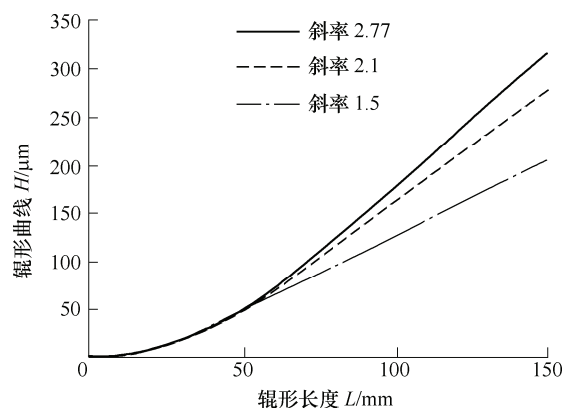
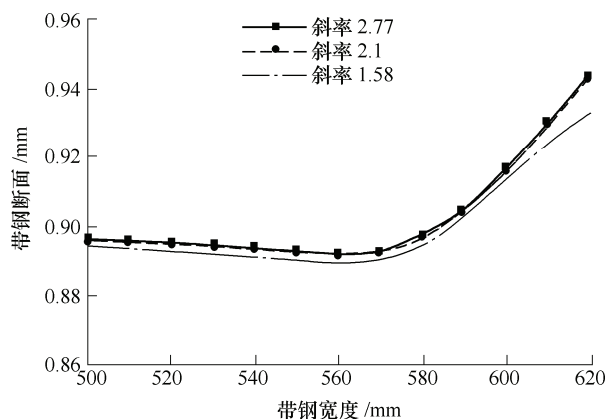
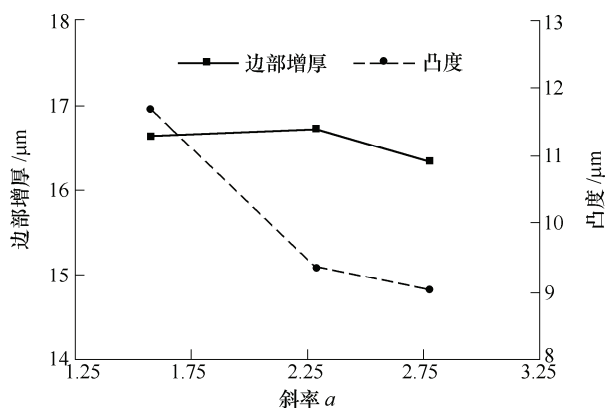
图13 直线段斜率 a 变化时工作辊辊形

图14 直线段斜率变化时对应带钢边部断面

图15 直线段斜率 a 变化时对应带钢边部增厚与凸度

可以看到,辊形斜率的变化对边部增厚的影响很小,边部增厚值均为 $16\ \mu\text{m}$ 左右,而带钢整体凸度则随着斜率增大而减小,斜率为 2.77 时,凸度为 $9\ \mu\text{m}$,当斜率减小至 1.58 时,凸度可以增大至 $12\ \mu\text{m}$ 。这是因为工作辊与中间辊接触长度变短。说明增加辊形斜率不能提高边降的控制能力,却需要凸

度控制系统(弯辊力、中间辊窜辊)进行更大的补偿。

由图 16 可以看到,当斜率减小至 1.58 时,整体轧制力增大 0.1 kN/mm,这是因为带钢的凸度增大。直线段斜率为 2.1 与 2.7 时,两者轧制力分布几乎一致,说明外切直线段斜率变化对轧制力分布影响不大。

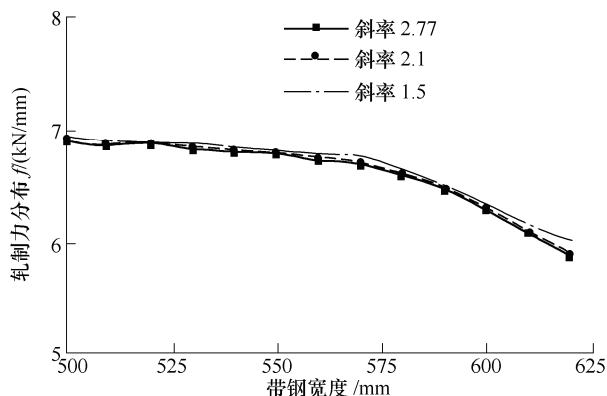


图 16 直线段斜率 a 变化时带钢边部区域轧制力分布

经过以上分析,得出工作辊辊形设计时应尽可能大的增大曲线段辊形高度,而同时减小直线段斜率,才能达到边降控制与凸度控制之间的平衡。然而两变量又不互相独立,因为增大辊形高度 H_1 时需同时将曲线段 L_1 的长度减小来保证小锥度,而 L_1 的长度过小则会减小曲线段辊形高度,反过来减小了工作辊辊形的边降控制能力。

3.3 工业现场试验验证

在工业现场试验中,辊形参数仍决定于轧辊磨削工艺与工业试验结果。国内某厂原采用全长为正弦曲线的工作辊辊形,辊形高度为 0.4 mm。现场生产过程中,在距边部 50~100 mm 范围内仍然存在同板差,且易出现边部拉断与带钢跑偏问题。为了提高对距边部 50~100 mm 范围边降控制能力,抑制跑偏、断带。工作辊辊形重新设计后提高辊形高度至 0.5 mm,减小外切直线段斜率至 1.87,如图 17 所示。在提高磨床工艺水平的前提下,无需采用磨辊保护段 L_3 。

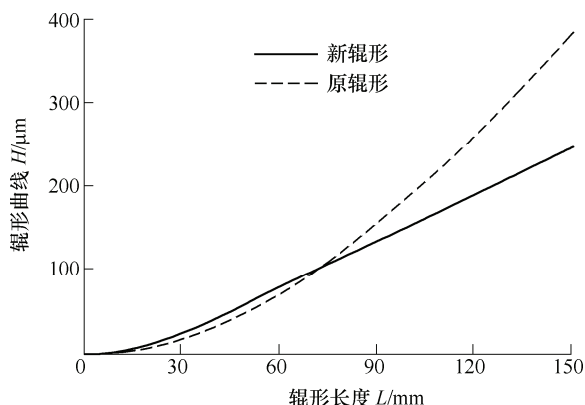


图 17 新旧辊形对比

投入新辊形后,工作辊窜辊预设位置向内推进 5 mm,曲线段增大辊形高度,增大了对边部 50~100 mm 范围边降控制能力,辊形锥度段采用小斜率,降低了边降与凸度耦合。工业试验结果显示,边降合格率有一定提高,冷连轧机组运行稳定,边降合格率统计如表 2 所示。

表 2 辊形改进后生产数据对比

生产数据	改造前	改造后
第 1 机架插入量 / mm	90	95
第 2 机架插入量 / mm	70	75
第 3 机架插入量 / mm	0	10
边降合格率($<5 \mu\text{m}$)(%)	19.54	34.84

4 结论

(1) 针对六辊轧机工作辊辊形的边降调控能力问题,提出了分割矩阵迭代法,提高了影响函数法计算辊系弹性变形的计算精度。

(2) 边降调控能力同工作辊辊形高度呈现强烈相关性,减小外切直线段斜率有利于边降和板形控制的解耦控制。

(3) 对设计结果进行了工业生产试验验证,证实了分割矩阵影响函数法的有效性。

(4) 研究结果对设计和使用工作辊辊形控制薄带边部减薄具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] 刘洋,王晓晨,杨荃,等. 万能凸度轧机中间辊偏移板形调控能力分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(4): 82-89. LIU Yang, WANG Xiaochen, YANG Quan, et al. Analysis of shape control performance for intermediate roll shifting of universal crown mill[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(4): 82-89.
- [2] 胡强,王晓晨,杨荃. 六辊冷连轧机边降自动控制系统设计及应用[J]. 冶金自动化, 2016, 40(1): 34-39. HU Qiang, WANG Xiaochen, YANG Quan. Design and application of automatic edge drop control system for 6-high tandem cold rolling mill[J]. Metallurgical Industry Automation, 2016, 40(1): 34-39.
- [3] 张岩,高健,吴鲲鹏,等. 单锥度辊冷轧机边部减薄控制应用研究[J]. 冶金自动化, 2016, 40(1): 45-49. ZHANG Yan, GAO Jian, WU Kunkui, et al. Application research for edge drop control on cold mill of single taper roll[J]. Metallurgical Industry Automation, 2016, 40(1): 45-49.
- [4] CAO Jianguo, CHAI Xueting, LI Yanlin, et al. Integrated design of roll contours for strip edge drop and crown

- control in tandem cold rolling mills[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 432-439.
- [5] KITAMURA K, NAKANISHI T, YARITA I, et al. Edge-drop control of hot and cold rolled strip by tapered-crown work roll shifting mill[J]. Iron & Steel Engineer, 1995, 72(2): 27-32.
- [6] 张赞, 杨荃, 邵健, 等. UCMW 轧机正弦函数形单锥度工作辊边降控制[J]. 工程科学学报, 2009, 31(12): 1611-1615.
- ZHANG Yun, YANG Quan, SHAO Jian, et al. Edge drop control using sinusoidal tapered work roll on a UCMW mill[J]. Chinese Journal of Engineering, 2009, 31(12): 1611-1615.
- [7] 张清东, 白剑, 徐乐江, 等. 宝钢 1550UCMW 冷连轧机组机型研究与改善[J]. 钢铁, 2009, 44(11): 67-70.
- ZHANG Qingdong, BAI Jian, XU Lejiang, et al. Study and improvement of mill type of 1550 tandem cold roll mill in Baosteel[J]. Iron and Steel, 2009, 44(11): 67-70.
- [8] WANG Qinglong, SUN Jie, LIU Yuanming, et al. Analysis of symmetrical flatness actuator efficiencies for UCM cold rolling mill by 3D elastic-plastic FEM[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(10): 1-19.
- [9] PARK H, HWANG S. 3-D Coupled analysis of deformation of the strip and rolls in flat rolling by FEM[J]. Steel Research International, 2017, 88(12): 1700227-1700240.
- [10] LINGHU Kezhi, JIANG Zhengyi, ZHAO Jingwei, et al. 3D FEM analysis of strip shape during multi-pass rolling in a 6-high CVC cold rolling mill[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(9-12): 1733-1745.
- [11] LIU Chao, HE Anrui, QIANG Yi, et al. Effect of volume changes on hot rolling deformation behavior of non-oriented electrical steel[J]. ISIJ International, 2017, 57(9): 1595-1602.
- [12] LIU Chao, HE Anrui, QIANG Yi, et al. Effect of phase transformation and latent heat on hot rolling deformation behavior of non-oriented electrical steel[J]. ISIJ International, 2017, 57(5): 857-865.
- [13] NAKHOUL R, MONTMITONNET P, LEGRAND N. Manifested flatness defect prediction in cold rolling of thin strips[J]. International Journal of Material Forming, 2015, 8(2): 283-292.
- [14] ABDELKHALEK S, MONTMITONNET P, LEGRAND N, et al. Coupled approach for flatness prediction in cold rolling of thin strip[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53(9): 661-675.
- [15] MONTMITONNET P. Hot and cold strip rolling processes[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(48): 6604-6625.
- [16] WANG Tao, HUANG Qingxue, XIAO Hong, et al. Modification of roll flattening analytical model based on the plane assumption[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 46-53.
- [17] 员征文, 肖宏, 谢红飙. 基于边界积分方程法的六辊轧机辊系变形分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 125-131.
- YUAN Zhengwen, XIAO Hong, XIE Hongbiao. 6-Hi mill deformation analysis based on boundary integral equation method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(18): 125-131.
- [18] YUAN Zhengwen, XIAO Hong, XIE Hongbiao, et al. Practice of improving roll deformation theory in strip rolling process based on boundary integral equation method[J]. Metallurgical and Materials Transactions A-physical Metallurgy and Materials Science, 2014, 45(2): 1019-1026.
- [19] HACQUIN A, MONTMITONNET P, GUILLERAULT J. A three-dimensional semi-analytical model of rolling stand deformation with finite element validation[J]. European Journal of Mechanics A-solids, 1998, 17(1): 79-106.
- [20] 孔繁甫, 何安瑞, 邵健. 快速辊系变形在线计算方法研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 121-126.
- KONG Fanfu, HE Anrui, SHAO Jian. Research on rapid online calculation methods of roll stack deformation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 121-126.
- [21] BERGER B, PAWELSKI O, FUNKE P. Die elastische verformung der walzen von vierwalzengerüsten[J]. Archiv Für Dassenhüttenwesen, 1976, 47(6): 351-356.
- BERGER B, PAWELSKI O, FUNKE P. Elastic deformation of rolls in four-high rolling stands[J]. Archiv Für Dassenhüttenwesen, 1976, 47(6): 351-356.
- [22] GOLUB G, VAN LOAN C. Matrix computations[M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1996.
- [23] LE H, SUTCLIFFE M. A robust model for rolling of thin strip and foil[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(6): 1405-1419.
-
- 作者简介: 冯夏维, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为板带轧制。
E-mail: fengxiawei@qq.com
- 王晓晨(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为冷热轧板带质量控制。
E-mail: wangxiaochen@ustb.edu.cn
- 杨荃, 男, 1964 年出生, 博士, 博士研究生导师。主要研究方向为板带轧机质量控制系统。
E-mail: yangquan@necar.ustb.edu.cn
- 孙蓟泉, 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为材料加工与控制工程。
E-mail: sunjq@ustb.edu.cn