

## 首钢3500 mm 中板轧机辊型研究与应用

常 安<sup>1</sup>, 白金兰<sup>1</sup>, 邱洪双<sup>1</sup>, 阳代军<sup>2</sup>, 刘光明<sup>2</sup>

(1. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004; 2. 首钢技术研究院, 北京 100041)

**摘要:** 采用影响函数法建立轧辊的弹性变形解析模型, 针对首钢3500 mm 中板轧机在轧制过程中, 支承辊端部出现剥落或掉肉现象, 根据首钢中板厂的轧制工艺, 分析了不同板宽、不同轧辊辊型、不同轧辊端部倒角以及直倒角参数对辊间压力分布的影响规律。研究结果表明, 在轧制能力范围内, 轧件越宽, 轧辊采用凹辊型可以使辊身部的辊间压力分布更为均匀; 倒角的选择和改变直倒角的参数都会相应地改变端部的应力集中现象。研究结果为该轧机的辊型的改造和配置以及提高轧辊寿命提供了理论依据。

**关键词:** 中厚板; 辊型; 辊间压力; 影响函数法; 轧辊弹性变形

中图分类号: TG333.7 文献标识码: A 文章编号: 0449-749X(2006)08-0041-05

## Analysis and Application of Roll Contour in View of 3500 mm Medium Plate Mill of Shougang Group

CHANG An<sup>1</sup>, BAI Jin-lan<sup>1</sup>, DI Hong-shuang<sup>1</sup>, YANG Dai-jun<sup>2</sup>, LIU Guang-ming<sup>2</sup>

(1. The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China;  
2. Shougang Institute of Technology, Beijing 100041, China)

**Abstract:** The inactivation and scaling of backup rolls in 3500 mm plate mill at Shougang Group are caused by non-uniform contact pressure distribution as well as stress concentration at the edges of rolls. An analytic model of roll elasticity deformation based on the influence function method was developed to simulate the rolling process. The effects of rolling parameters such as plate width, roll contours, chamfer and straight chamfer parameters on the contact pressure distribution were studied. The results show, that for wide plate and roll with concave contour, the contact pressure distribution tends to be uniform, the stress concentration at the edges of rolls is influenced by chamfer parameters. This analysis can be used as the basis for optimizing design of the roll contour, and enhancing the roll service life.

**Key words:** plate; roll contour; contact pressure; influence function method; elastic deformation of rolls

首钢中厚板轧机于2003年1月改造完成后, 整机装备水平上了一个新的台阶, 产品质量得到极大的提高。投入使用后, 由于工作辊和支承辊均采用平辊, 支承辊端部出现了掉肉或剥落现象。后经技术人员努力, 通过在支承辊边部增加倒角改善了辊间压力分布, 并取得一定成效, 但仍然存在轧辊失效情况。由于辊间接触压力沿辊身长度方向的不均匀分布导致工作辊和支承辊的弹性弯曲变形、辊间的弹性压扁变形以及轧辊磨损沿辊身长度方向的不均匀分布<sup>[1~5]</sup>, 特别是在轧辊的端部出现应力集中的现象, 加速了轧辊磨损, 导致轧辊的失效, 严重的还导致轧辊边部剥落或掉肉, 因此如何优化辊型设计, 合理配置辊型以提高轧辊使用寿命是中板厂面临的重要课题之一。本文针对首钢3500 mm 中板轧机, 采用影响函数法建立了辊系弹性变形解析模型, 研

究了板宽和辊型对辊间压力分布的影响规律, 为该轧机的辊型优化提供了有力理论支持。

### 1 理论计算方法

#### 1.1 基本原理

影响函数法是一种离散化方法, 其基本思想是将轧辊离散成若干个单元, 同时将轧辊所承受的载荷及变形也按相同单元离散化。依据物理中影响函数的概念, 确定单元施加单位力时在辊身其它单元引起的变形, 再把全部载荷引起的各单元的变形叠加, 得到各单元的总变形。最后通过辊间变形的协调方程及两圆柱体弹性接触压扁的费普尔公式迭代求出辊间压力。

#### 1.2 离散化过程

轧辊和轧件单元采用2种编号方法, 简支梁式

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50474015)

作者简介: 常 安(1979-), 女, 博士生; E-mail: ca7911@126.com; 修订日期: 2005-11-02

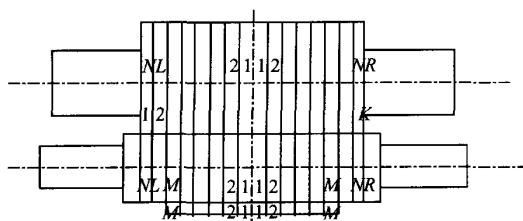


图 1 单元划分及序号编排

Fig. 1 Element division and serials numbers

和悬臂梁式,如图 1 所示。所谓简支梁式,是将支承辊从左到右分为  $k$  个单元,轧件分为  $2M$  个单元。主要是用于整个辊系辊间压力和变形的分布计算。所谓悬臂梁式,是以轧制中心线为基准,将支承辊分为  $NL$  和  $NR$  个单元,轧件分为  $M$  个单元。主要用于轧制力和断面厚度等对称量的分布计算。

### 1.3 影响函数法计算弹性变形方程

用影响函数矩阵方法计算轧机弹性变形共 7 个方程,其中 4 个力-变形关系方程,1 个力平衡方程,2 个变形协调关系方程<sup>[6]</sup>。

(1) 力-变形关系方程

1) 工作辊弹性弯曲方程

$$\vec{Y}_w = \vec{G}_w(\vec{Q} - \vec{P}) - \vec{G}_f F_w$$

2) 支承辊弹性弯曲方程

$$\vec{Y}_b = \vec{G}_b \vec{Q}$$

3) 轧制力引起的工作辊压扁方程

$$\vec{Y}_{ws} = \vec{G}_{ws} \vec{P}$$

4) 辊间压扁方程

$$\vec{Y}_{wb} = \vec{G}_{wb} \vec{Q}$$

(2) 力平衡关系方程

$$\vec{P}^T \vec{I} + F_w = \vec{Q}^T \vec{I}$$

(3) 变形协调关系方程

1) 工作辊和支承辊之间的变形协调关系方程

$$\vec{Y}_{wb} = \vec{Y}_{wbo} + \vec{Y}_b - \vec{Y}_w - \vec{M}_b - \vec{M}_w$$

2) 轧件和工作辊之间的变形协调关系方程

$$\vec{H} = \vec{H}_o + (\vec{Y}_{ws} - \vec{Y}_{wso}) + 2(\vec{M}_w - \vec{Y}_w)$$

式中,  $\vec{P}, \vec{Q}$  为轧制力向量, 辊间压力向量;  $\vec{Y}_w, \vec{Y}_b$  为工作辊挠度向量, 支承辊挠度向量;  $\vec{M}_w, \vec{M}_b$  为工作辊的凸度向量, 支承辊凸度向量;  $\vec{G}_w, \vec{G}_b$  为工作辊弯曲影响函数矩阵, 支承辊弯曲影响函数矩阵;  $\vec{G}_f, F_w$  为弯辊力影响函数矩阵, 工作辊弯辊力;  $\vec{G}_{ws}, \vec{Y}_{ws}$  为工作辊压扁影响函数矩阵, 工作辊压扁变形向量;  $\vec{G}_{wb}, \vec{Y}_{wb}$  为辊间压扁影响函数矩阵, 辊间

压扁向量;  $\vec{Y}_{wbo}, \vec{I}$  为工作辊辊面中心处压扁量, 单位列向量;  $\vec{Y}_{wso}$  为板中心处压扁量;  $\vec{H}, \vec{H}_o$  为轧件轧后厚度向量, 板中心处轧后厚度。

流程图如图 2 所示。

### 1.4 计算方法验证

为验证所用计算方法的正确性,根据实际生产中的采样数据模拟计算了首钢 3500 mm 中厚板轧机的各道次的轧制力并与现场实测数据进行比较。首钢 3500 mm 中厚板轧机为普通平辊的 4 辊轧机, 工作辊和支承辊的直径分别为 1050 mm 和 2010 mm, 工作辊和支承辊的辊身长度分别为 3500 mm 和 3400 mm, 文中分析计算了宽度为 2800 mm 的轧件在轧制过程中所受的轧制力, 计算结果与实测值相比较见表 1。

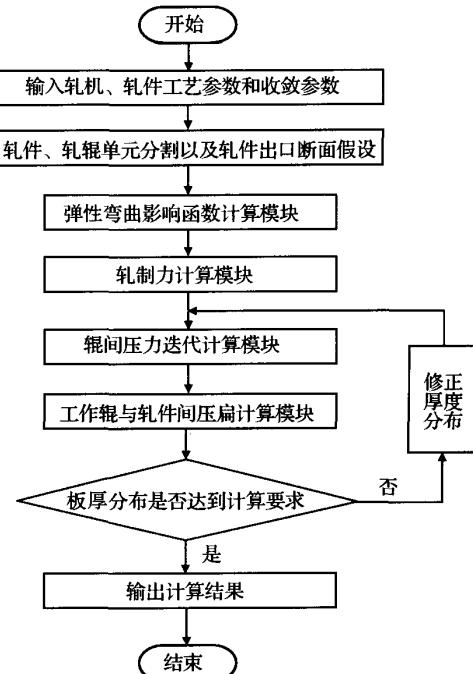


图 2 辊系变形计算程序流程图

Fig. 2 Calculation flowchart of roll deformation

表 1 理论计算与实测结果

Table 1 Calculated and measured rolling force

道次	出口厚度/mm			总轧制力/kN	
	mm	度/mm	℃	理论	实测
1	34.44	723.25	918.4	42319.4	39942.2
2	29.04	722.68	905.6	39597.3	37892.1
3	24.85	678.82	891.7	36568.7	35153.7
4	21.89	621.81	865.1	30656.8	28523.2
5	20.00	545.36	847.8	22587.8	20522.7

## 2 轧件宽度和轧辊辊型对辊间压力分布的影响

### 2.1 轧件宽度对辊间压力分布的影响

轧制力为28000 kN的条件下,2500 mm、2800 mm和2926 mm 3种板宽的辊间压力分布计算结果如图3所示。

由图3可知,随着轧件的宽度由窄变宽,辊间压力沿辊身方向的分布发生了很大变化,轧件越窄,辊身中部和边部压力差越大。这是由于轧制窄件时,轧制压力作用于辊身中部一个相对集中的区域内,因此中部区域接触压力较边部大。随着轧件宽度的增加,由“有害区”产生的工作辊边部弯曲挠度减少,导致边部辊间压力增大,接触压力分布趋于均匀。图3中还可以看到,当轧件宽度足够大时,边部压力高于中部,成为中凹形分布。

### 2.2 辊型对辊间压力分布的影响

轧件宽度为2800 mm;入口厚度为41.32 mm;出口厚度为33.2 mm;带材表面温度918 °C;轧辊凸度值如表2所示。

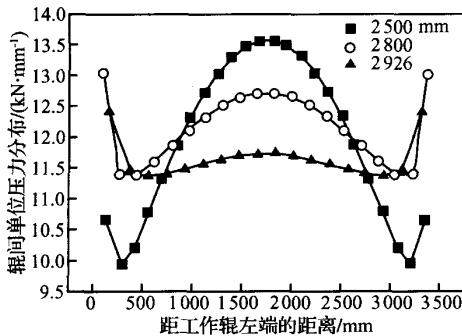


图3 不同轧件宽度时辊间压力分布

Fig. 3 Contact pressure distribution during rolling different plates

表2 辊型对辊间压力分布的影响的轧辊原始凸度

Table 2 Initial crown of rolls used to analyze the effect of the contour on contact pressure distribution mm

工况	工作辊凸度			支承辊凸度		
	1	0	0	-0.4	0	0.4
2	-0.4	0	0.4	0	0	0
3	-0.4	0.4	0.4	0.4	-0.4	0.4

工作辊辊型对辊间压力分布的影响如图4(a)所示,计算时工作辊分别采用为凸形、平辊和凹形3种辊型,而支承辊为平辊。当工作辊为凸形时,中部区域辊间压力较大而边部压力较小;工作辊为凹形时,中部区域的辊间压力分布趋于均匀,由于支承辊的辊身长度小于工作辊的辊身长度,在端部没有做任何处理的时候,会出现应力集中的现象。

图4(b)为支承辊辊型对辊间压力分布的影响,计算时支承辊分别采用为凸形、平辊和凹形三种辊型,而工作辊为平辊。支承辊的辊型对辊间压力的影响情况与工作辊辊型的影响大致相同。当支承辊为凹辊辊型的时候,中部区域的辊间压力分布较均匀,同时边部也出现应力的集中。

图4(c)为工作辊和支承辊采用不同凸度搭配对辊间应力分布的影响,计算时分别对工作辊和支撑辊的辊型采用凸和凹搭配。当支撑辊为凹形、工作辊为凸形或者支承辊为凸形、而工作辊为凹形时,两条曲线近乎相似,辊间压力分布趋势近乎相同且较为均匀。而当工作辊和支承辊同时采用凸形时,中间区域的辊间压力较大,而边部的较小。

由此可见,辊间压力的分布与轧辊的辊型以及不同辊型的搭配直接相关。因此可以通过改变轧辊的辊型或者改变辊型的搭配方式来改变辊间压力的分布。但是当轧辊选择凹辊型的时候,尽管凹辊型的选择可以改善中间区域的辊间压力分布,使其趋

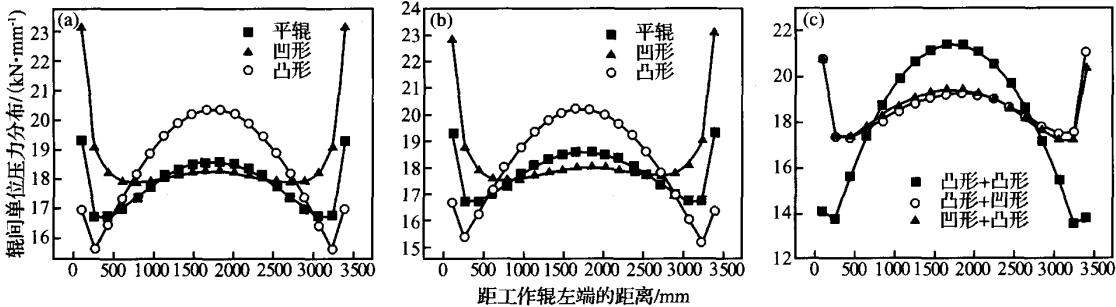


图4 辊型对辊间压力分布的影响

Fig. 4 Effect of roll contour on contact pressure distribution

于均匀,可是如果在轧辊边部不做任何处理的话,边部都会存在或多或少的应力集中的现象。因此,本文讨论了轧辊端部采用倒角的技术对辊间压力分布的影响以及对轧辊端部应力集中的改善的问题。

### 2.3 支承辊端部倒角对辊间压力的影响

在支承辊端部分别选取直倒角、台阶型倒角及圆弧型倒角,分别计算出 3 种条件下的辊间压力,并与无倒角时的辊间压力分布进行比较。

直倒角如图 5(a)所示,数学表达式描述如下:

$$A=300 \text{ mm}; B=1 \text{ mm};$$

$$y=B/Ax;$$

台阶型倒角如图 5(b)所示,数学表达式描述如下:

$$L=150 \text{ mm}; A=300 \text{ mm};$$

$$B=1 \text{ mm}; b=0.65 \text{ mm};$$

$$y_1=b/Lx; y_2=(B-b)/Lx;$$

圆弧型倒角如图 5(c)所示,数学表达式描述如下:

$$A=300 \text{ mm}; B=2.14 \text{ mm};$$

$$y=\sqrt{r^2-x^2} (r \text{ 为圆弧型倒角的半径})$$

### 2.4 辊间压力分布分析

如图 6(a)所示,带有倒角的支承辊辊型,端部都能较大程度地释放工作辊和支承辊端部的应力集中,并能良好地解决端部的局部磨损,减少轧辊端

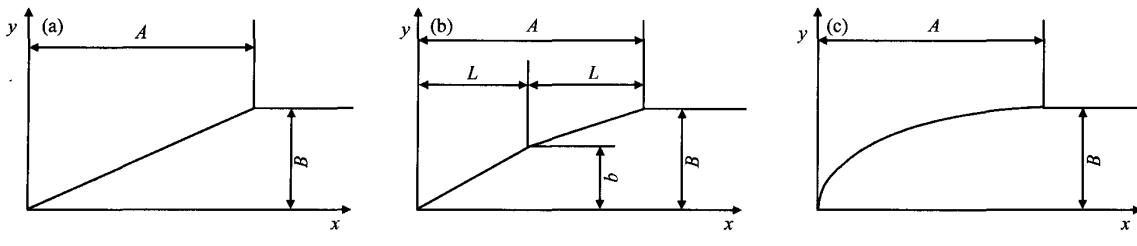
部剥落的现象。直倒角、圆弧型倒角及其台阶型倒角的辊间压力分布的趋势基本相同,辊身处压力分布均匀,圆弧型和台阶型倒角的支承辊,端部和辊身处压力差较小,效果更为良好。由于直倒角的加工相对最为简单,并且也能良好地解决端部的应力集中的问题,所以主要对直倒角的各个因素对辊间压力分布的影响进行分析。

#### 2.4.1 A 值变化对辊间压力分布的影响

固定 B 值不变,变换 A 的大小为 100、200、300、400、500、600 mm,辊间压力分布的曲线如图 6(b)所示。随着 A 值的增加,边部的应力集中点相对的靠近中间部分,同时,曲线的分布趋势从中部的中凸的压力分布形式到中凹的形式。所以,当板宽、轧制条件以及 B 值固定的情况下,必然存在一个最优的 A 值使辊间压力分布最为均匀。可以发现,在板宽为 2800 mm, A 为 1 mm, B 为 300 mm 时,辊间的压力曲线分布均匀,同时边部的最高点与辊身部分压差也为最小。

#### 2.4.2 B 值变化对辊间压力分布的影响

固定 A 值不变,变换 B 值的大小为 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 mm,辊间的压力分布曲线如图 6(c)所示。边部的应力集中点基本在同一个位置,只不过是随着 B 值的增加,应力集中点对边部的辊压



(a) 直倒角; (b) 台阶型倒角; (c) 圆弧型倒角

图 5 倒角类型

Fig. 5 Types of chamfers

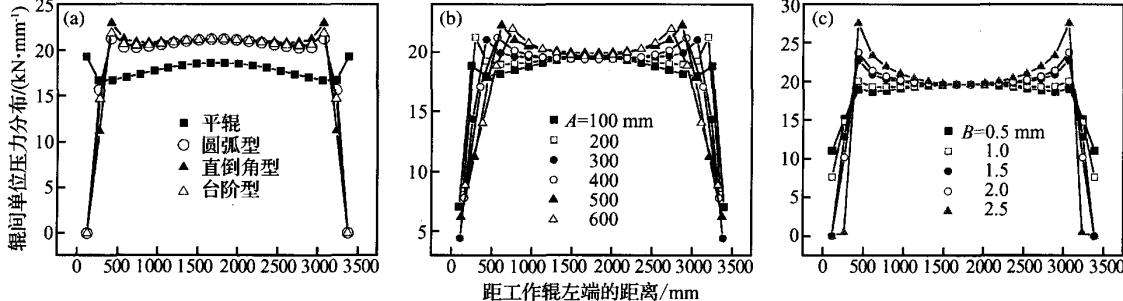


图 6 支承辊端部倒角对辊间压力的影响

Fig. 6 Effect of chamfers at edges of backup roll on contact pressure distribution

力影响更严重,同时,辊身部分的应力曲线的趋势从凸形到凹形,所以也必有一个最优B值,使辊间压力分布最为均匀。

由此可见,不同形式的倒角,对辊间压力的分布有着不同的影响。对于某一固定形式的倒角,改变其中某些因素的数值,也会产生不同的效果。倒角的使用,解决了边部的应力集中问题。但是,辊间压力普遍要高于带有凹、凸辊型的辊间压力值。

### 3 结论

(1) 轧件的宽度对于辊间压力分布影响最为敏感,导致辊间压力分布发生很大的变化,随着轧件宽度的增加,辊间压力分布趋于均匀。

(2) 工作辊凹形或者支承辊凹形都有利于改善辊间压力均匀分布,但没有处理过的轧辊端部会产生边部应力集中问题。

(3) 工作辊和支承辊为凸凹相互搭配使用的时候,辊间压力分布相似,并且比凸辊型与凸辊型的搭配更有利改善辊间压力的均匀分布。

(4) 带有倒角的支承辊辊型的辊间压力分布均匀,端部应力值明显下降。

(5) 在一定板宽的条件下,改变倒角的形式或者改变某一固定形式倒角的A、B数值,都会改变辊

间的压力分布。每一种改变方式中,都会存在一个最优解,使得辊间压力的分布最为均匀。

### 参考文献:

- [1] Jiang Z Y ,Zhu H T ,Tieu A K . Effect of Rolling Parameters on Cold Rolling of Thin Strip During Work Roll Edge Contact [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140: 535-541.
- [2] Schey J A. Tribology in Metal Working Friction, Lubrication and Wear[J]. American Society for Metals Park, 1983, 35(2): 131-141.
- [3] Jiang Z Y ,Zhu H T ,Tieu A K. Study of Work Roll Edge Contact in Asymmetrical Rolling by Modified Influence Function Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162-163 ,512-518.
- [4] Jiang Z Y ,Zhu H T ,Tieu A K, et al. Modelling of Work Roll Edge Contact in Thin Strip Rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156,1280-1285.
- [5] Anon. Schedule Free Rolling and Flatness from the HC-mill [J]. Steel Times International, 1989, 13(5):32-33.
- [6] 王国栋. 板形控制和板形理论[M]. 北京:冶金工业出版社, 1986. 351-361.
- [7] 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.)

### “汉高乐泰®工业应用优胜杯赛”在烟台举行

2006年8月12日,由德国汉高集团乐泰®工业工程胶粘剂部门主办,中国胶粘剂行业协会协办的“汉高乐泰®工业应用优胜杯赛”的中国区总决赛在乐泰®烟台生产基地举行。来自武汉钢铁集团公司、鞍钢集团有限公司、酒泉钢铁集团有限责任公司、太原钢铁集团有限公司、唐山钢铁股份有限公司以及电力、石化等行业的20名维修技术能手,经过为期3个月的层层选拔,成功闯过厂区赛笔试和地区赛操作竞技,来到烟台争夺中国胶粘剂行业的“维修大师”称号。整个比赛吸引了全国包括钢铁冶金、铁路地铁、石油石化、机械、煤矿、电力等行业的200多家企业,近千名选手参加。

本次比赛由汉高乐泰®发起。汉高乐泰®是目前全球著

名的粘合剂生产商,产品涉及高品质螺纹锁固胶、各类密封胶、各种粘接胶、圆柱型固特胶、金属修补剂、耐磨防护剂、抗咬合剂、地面防滑和修补剂等,而这些产品已经成功地广泛应用于工业生产制造、航空航天、汽车制造、电子工业等领域。

从德国汉高集团有关负责人处得知,汉高举办这次“维修大师”的比赛初衷之一,就是想通过这个比赛推广先进的维修技术和理念,促进维修人员操作技能的提高,了解乐泰®维修产品的解决方案。

汉高负责人同时表示,明年汉高将继续举行类似的比赛,力求利用比赛这种形式培养更多技术人才,使更多生产企业能够受益。

(本刊讯)