

3D Photoelasticity Analysis on Contact Force in 1400mm 12-h Mill

Li-qun WEI, Zhi-fang DAI, Dong-hua LU

School of Materials Science and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

#Email: weiliquan@sit.edu.cn

Abstract

In order to accurately describe the contact force distribution between rolls of 1400mm 12-h mill, and improve the plate shape and transverse thickness difference of work piece, a photoelasticity model of 1400mm 12-h mill was designed in this paper based on the principle of similarity. 3D photoelasticity analysis was applied to determine the contact stress and force distribution between the rolls of 1400mm 12-h mill, and the actual contact force distribution between rolls was calculated in accordance with the similarity principle. It was an important experimental guidance for further theoretical calculation of rolling force distribution of 1400mm 12-h mill, roller shape optimization, plate shape and transverse thickness control.

Key Word: 12-h Mill; Roll; Distribution of Contact Force; 3D Photoelasticity Analysis

1400mm 十二辊轧机辊间的接触 压力三维光弹分析*

魏立群, 戴志方, 卢冬华

上海应用技术学院材料科学与工程学院, 中国上海, 201418

摘 要: 为了准确描述 1400mm 十二辊轧机轧辊间的接触压力分布规律, 以有效改善其轧件的横向厚度差和板形, 本文应用应力相似准则设计了 1400mm 十二辊轧机光弹模型, 并用三维光弹性应力分析原理, 实验确定 1400mm 十二辊轧机光弹模型的辊间接触压力的分布规律, 并依据应力相似转换准则, 计算出其实际轧机辊间接触压力分布, 对 1400mm 十二辊轧机压力分布的进一步理论计算、辊型设计的优化以及轧件横向厚度差和板形质量的控制有着重要的实验指导意义。

关键词: 十二辊轧机; 轧辊; 辊间接触压力分布; 三维光弹分析

引言

为了进一步提高 1400mm 十二辊轧机轧制产品的横向厚度差和板形控制能力, 需要正确了解实际轧制过程中, 轧辊之间的接触压力分布和轧辊的弹性变形情况。但由于十二辊轧机轧辊间接触面上的压力分布不均匀, 目前还没有有效的理论解, 且靠单一的数值计算不足以精确解决这样的问题^[1-4]。近年来, 研究人员发现通过三维光弹性实验能够得出轧机轧辊间的应力分布, 郁建伟、瞿志豪应用三维光弹性分析讨论宝钢的六辊轧机, 得到接触面上理想的三向接触应力值, 为厂方的板型控制工艺改进提供了有效的控制参数^[1-2]。焦续伟等人采用光弹实验应力分析得出轧机机架的应力分布^[3-4]。魏立群等人计算出了六辊轧机的辊间压力随中间辊的抽动时的变化规律, 并且用三维光弹性应力分析法进行了实验论证^[5-10]。而目前对十二辊轧机辊间的压力分布实验研究尚未见报道。本文采用三维光弹分析方法分析, 对 1400mm 十二辊轧机的

*基金项目: 上海市冶金工艺和设备检测专业技术服务平台资助 (编号: 上海市科委 11DZ2291200)

辊间的压力分布等进行实验研究，从而了解其辊间压力分布和中间辊抽动对辊间压力分布的影响等，为有效控制 1400mm 十二辊轧机轧制产品的横向厚度差和板形提供理论基础。

1 1400mm 十二辊轧机轧辊接触应力解的理论解析

1.1 1400mm 十二辊轧机简介

1400mm 十二辊轧机属于多辊轧机，与以往的森吉米尔轧机和森德威四立柱式轧机均有不同，该轧机采用上下分开式机架，辊系为塔形辊系布置，上下机架分别与上下辊系组成相对独立的上辊箱和下辊箱，由立柱将上下辊箱连接成一体；轧制力从工作辊通过传动辊传到支承辊，再传递给上下机架，最终由四根立柱承受轧制力。压下装置采用全液压压下；具有板凸度调整和传动辊轴向抽动功能^[11-15]，其结构示意图如图 1 所示。1400mm 十二辊轧机生产的产品规格和主要技术参数如表 1 所示。

表 1 1400mm 十二辊轧机生产的产品规格和主要技术参数

坯料厚度	成品厚度	宽度	成品厚度精度
3mm	0.2~0.8mm	900mm~1250mm	稳速段 $0.20\pm0.005\text{mm}$
带卷内径	最大卷径	最大轧制力	轧制速度
$\phi 510\text{mm}$	$\phi 1800\text{mm}$	10000kN	$\leq 600\text{m/min}$
支承辊（背衬轴承外径）	支承辊（背衬轴承外径）	工作辊尺寸	中间辊尺寸
$\phi 300\text{mm}\times 6\text{组}$ (材质：9Cr2Mo)	$\phi 520\text{mm}\times 7\text{组}$ (材质：9Cr2Mo)	$\phi 110\sim\phi 120\times 1400\text{mm}$ (材质：9Cr2Mo)	$\phi 210\times 1400\text{mm}$ (材质：9Cr2Mo)
主轧机电机功率	开卷张力	开卷速度	
$2\times 1500\text{kW}$	50kN	300m/min	

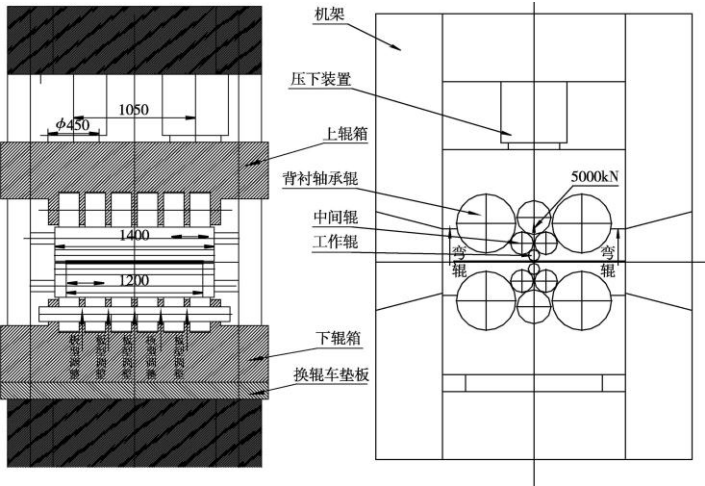


图 1 1400mm 十二辊轧机示意图

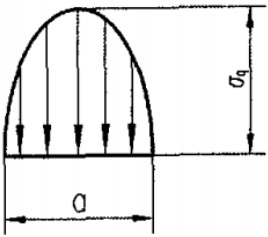


图 2 接触应力横向分布

1.2 轧辊接触应力的理论解析

对二平行无限长辊状物的接触问题的弹性力学解，赫芝给出的解可陈述为：当力为 P 作用在无限长的二圆柱体上，且沿长度方向作用力为均布，则二辊状物接触区域上的接触应力横向为呈抛物线分布。如图 2 所示，纵向为均匀，其最大接触应力 σ_q 及压扁宽度 a 计算式有^[16]：

$$a = \left[\frac{4P(K_1 + K_2)R_1R_2}{(R_1 + R_2)L} \right]^{1/2} \tag{1}$$

$$\sigma_q = \left[\frac{P(R_1 + R_2)}{\pi^2 (K_1 + K_2) R_1 R_2 L} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: $K_i = \frac{1 - \gamma_i^2}{\pi E_i} (i = 1, 2)$

R_1 、 R_2 、 L 、 E 、 γ 分别为二圆柱体半径、接触长度、材料弹性模量、材料泊桑系数。

但是, 对于本文研究的 1400mm 十二辊轧机, 其轧辊的辊径与辊长之比 10 左右, 因此, 对于这类有限长轧辊, 很显然其辊间接触应力的纵向均布假设不存在了。于是轧辊的辊间接触应力问题解就不能直接用赫芝解析式(1)和(2)求解。

根据文献[1]的研究结论, 轧辊辊间纵向接触应力分布呈不均匀的连续曲线, 对应的辊间压扁宽度也是连续曲线。轧辊辊间接触应力沿纵向任一横向切面是一个如图 2 所示的半椭圆抛物线。因此, 为了得到 1400mm 十二辊轧机辊间的接触纵向应力分布曲线, 必须借用三维光弹性应力分析方法进行实验求解。

2 1400mm 十二辊轧机辊间压力三维光弹性应力分析

2.1 光弹性应力分析原理和应力相似转换准则

光弹性应力分析实验是一种光学的应力测量方法, 用具有双折射性能的材料(环氧树脂)制成模型, 将受力后的模型置于偏振光中, 产生双折射, 使光沿着两个主应力方向分解为两个折射率不同的平面偏振光, 并产生光程差, 光程差的数值与两个主应力之差成正比。可获得干涉条纹图。这些条纹指示了模型各点应力情况。依照光弹性应力分析原理, 即可算出各点应力的方向, 其实际轧辊上的接触应力可根据应力相似准则计算出。

由于光弹性应力分析所得的接触应力都是模型值, 因此折算到轧辊的实型上, 要应用相似转换准则^[17], 即: 辊间接触应力和辊间压扁宽度相似准则:

$$K_a = \left[\frac{K_P K_R}{K_L K_E} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$K_\sigma = \left[\frac{K_P K_E}{K_L K_R} \right]^{1/2} \quad (4)$$

其中, $K_a = \frac{a^M}{a}$, $K_\sigma = \frac{\sigma^M}{\sigma}$, $K_L = \frac{L^M}{L}$, $K_R = \frac{R^M}{R}$, $K_P = \frac{P^M}{P}$, $K_E = \frac{E^M}{E}$ 分别称为压扁宽度 a , 轧辊接触应力 σ , 轧辊长度 L , 轧辊半径几何尺寸 R , 外载荷 P , 弹模模量 E 的比, 上标 M 表示模型值。

2.2 1400mm 十二辊轧机光弹性模型建立

1400mm 十二辊轧机是上下对称的轧机(如考虑中间辊的抽动, 则是呈中心反对称), 所以, 光弹性应力分析时, 只要取了下面六个轧辊即可。表 2 显示了实型与光弹模型的一些分析参数, 1400mm 十二辊轧机光弹性模型如图 3 所示。

表 2 1400mm 十二辊轧机模拟分析的物理参数

	E /N/m ²	$D_{\text{上}}$ /mm	$D_{\text{中}}$ /mm	$D_{\text{支左}}$ /mm	$D_{\text{支中}}$ /mm	$L_{\text{上}}$ /mm	$L_{\text{中}}$ /mm	$L_{\text{支左}}$ /mm	$L_{\text{支中}}$ /mm	P /N	f /N/mm条
实型	210×10^9	125	215	520	300	1400	1400	1400	1425	1×10^7	
模型	25×10^6	12.5	21.5	52	30	140	140	140	142.5	100	1.31
相似系数 K	1.19×10^{-4}					0.1				1×10^{-5}	

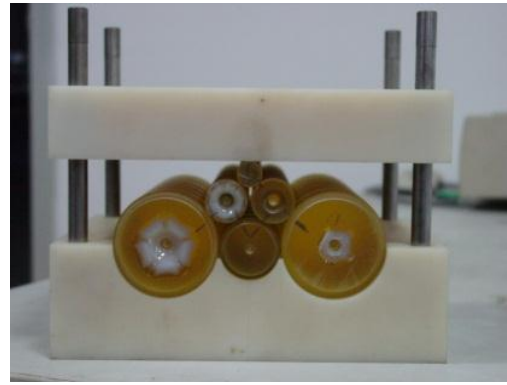
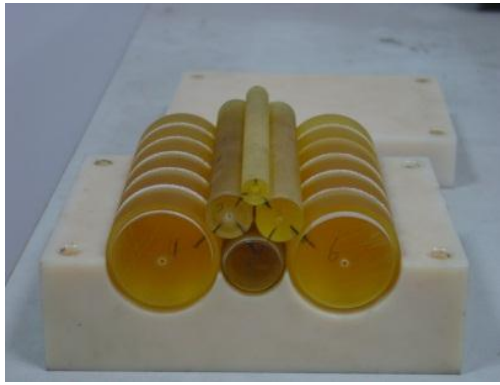


图 3 1400mm 十二辊轧机轧辊模型

2.3 1400mm 十二辊轧机辊间压力三维光弹实验求解

根据三维光弹性应力分析原理，对 1400mm 十二辊轧机轧辊模型进行加载、应力冻结后，沿辊间接触点（如图 4 所示的七个点）法线方向，按轧辊模型压扁宽度进行切片，切片厚度为 t ，切片的法线方向深至轧辊轴心，此时能获得如图 5 所示的轧辊辊间接触应力等差线条纹。由于轧辊在冻结时是静态接触，没有切向摩擦力，则在接触面上任一点应力均处在主应力状态。记为 σ_q （接触正应力）， σ_y （横向正应力）， σ_z （纵向正应力），具体见图 6 所示。

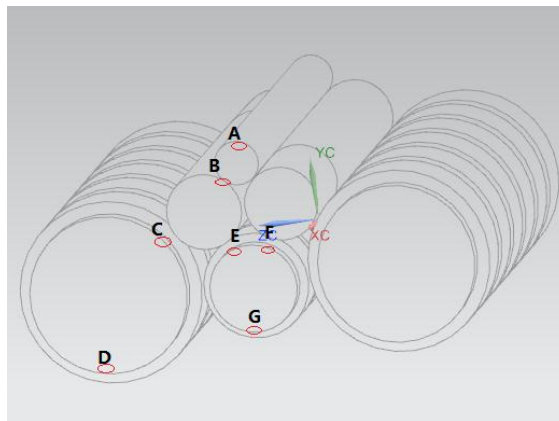
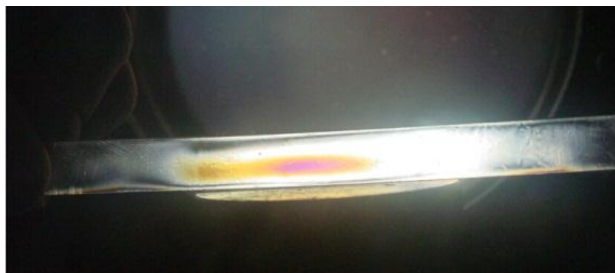
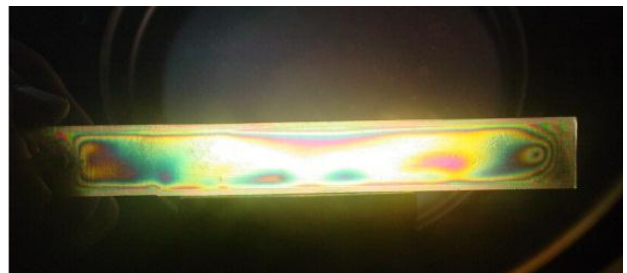


图 4 1400mm 十二辊轧机轧辊七个点的切片位置



A. 工作辊与轧件接触的切片图



B. 左中间辊与工作辊接触的切片图



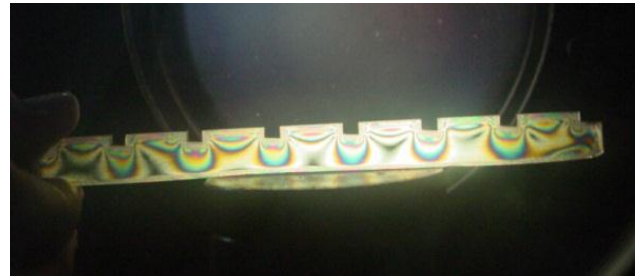
C. 左支承辊与左中间辊接触切片图



D. 左支承辊与底座接触的切片图



E.中支承辊与左中间辊接触的切片图



F.中支承辊与右中间辊接触的切片图



G.中支承辊与底座接触的切片图



辊间的压痕宽度 a 的示意图

图 5 1400mm 十二辊轧机轧辊模型光弹应力等差线图

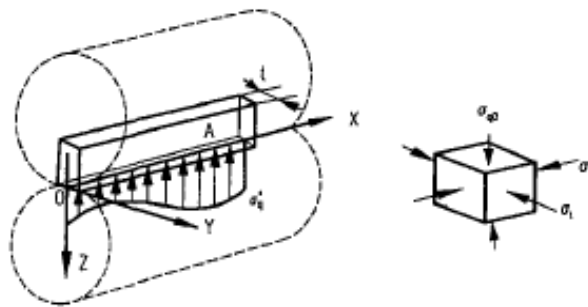


图 6 沿接触轴线方向的光弹性切片示意图

根据如图 6 所示的等差线条纹，在坐标面(X,0,Z)上表示为^[2]:

$$\bar{\sigma}_x - \bar{\sigma}_q = n \frac{f}{t} \quad (5)$$

式中: $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_q$ 分别表示主应力为切片厚度 t 上的平均值。

n, f 分别表示为等差线条纹级数、模型材料的应力条纹值 (由模型标定确定)。

为了分离这个主应力差值,把轧辊看着在横截面和过轧辊轴线平面看作为平面应变,引入广义虎克定律,经整理后有以下关系:

$$\frac{\bar{\sigma}_q}{\bar{\sigma}_x} = C_1 (\text{常数}) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5), 整理后

$$\bar{\sigma}_q = C_2 n \frac{f}{t} \quad (7)$$

式(7) 反映了在切片厚度 t 上的平均应力 $\bar{\sigma}_q$ 与等差线条纹级数之间的关系,但式(7) 还不能用于定量计算辊间接触宽度 a 上的接触正应力 σ_q 。但可以假定每个横截面上平均压应力 $\bar{\sigma}_q$ 与 σ_q 一定存在一个比例关系^[7], 即:

$$\frac{\sigma_q}{\bar{\sigma}_q} = C_3 (\text{常数}) \quad (8)$$

将式(7)代人(8)式，并令 $C = C_2 C_3$ ，则有：

$$\sigma_q = Cn \frac{f}{t} \quad (9)$$

C 为接触正压应力的修正系数，其值由轧辊间法向接触压力的边界条件确定。其边界条件为：在接触面上接触应力分布体积(即分布合力)应等于总的外加压靠作用力 P 在辊间接触点法线方向分解合力 $F_m (m = A, B, C, D, E, F, G)$ 。

设轧辊沿接触长度划分 n 个单元，每一个单元长度为 $l_i (i = 1, 2 \dots n)$ ，相应的接触平均宽度为 $\bar{a}_i (i = 1, 2 \dots n)$ ，其单元上的接触正应力为 $\sigma_{qi} (i = 1, 2 \dots n)$ ，则有：

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{qi} l_i \bar{a}_i = F_m \quad (10)$$

由此可以确定接触正压应力的修正系数 C 。

3 400mm 十二辊轧机辊间压力三维光弹实验分析结果

根据上述分析，分别实验分析中间辊无单边锥度和有单边锥度（如图 7 所示）时，辊间接触正压应力 σ_q 的分布情况。

在 1400mm 十二辊轧机辊光弹模拟中，轧辊模型中相应单元 n 的中心位置为 x_i 及接触压扁实测平均宽度 $\bar{a}_i (i = 1, 2 \dots n)$ ，依据上述分析，可以计算出相应的接触正应力 σ_{qi} 以及各单元段单位长度上所受的力 $P_i = \sigma_{qi} \bar{a}_i$ (N/mm)。

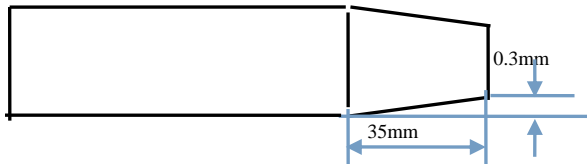


图 7 中间辊单边锥度示意图

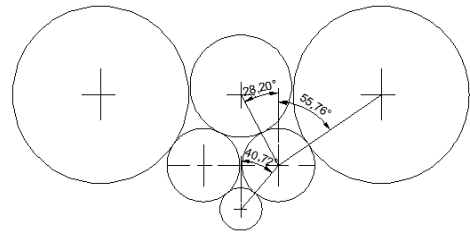


图 8 辊间的几何关系

以图 5 所示的内侧面作为起始点，单元划分长度分别为：工作辊单元长度 20mm，中间辊单元长度 12mm，左支承辊单元长度 16.5mm，中支承辊单元长度 15.5mm。

根据轧辊之间的位置关系，如图 8 所示，由力平衡关系计算出辊间接触点法线方向分解合力 $F_m (m = A, B, C, D, E, F, G)$ 。

即： $F_A = 100\text{N}$ （外加作用力）则各接触点法线方向分解合力为：

$$2F_B \cos 40.72 = F_A \quad F_C \cdot \cos 25.51 + F_E \cos 55.76 = F_B \cos 40.72$$

$$F_C \sin 25.51 = F_B \sin 40.72 + F_E \sin 55.76 \quad F_F = F_E \quad F_D = F_C \cos (90 - 55.76)$$

$$F_G = F_E \cos 25.51 + F_F \cos 25.51 = 2F_E \cos 25.51$$

$$F_B = 65.97\text{N} \quad F_C = 64.63\text{N} \quad F_D = 36.725\text{N} \quad F_E = F_F = 14.71\text{N} \quad F_G = 26.55\text{N}$$

根据上述分析，结合 1400mm 十二辊轧机三维光弹性模型实验的应力等差线，可以计算出轧辊之间的接触正应力 σ_{qi} 以及各单元段单位长度上所受的力 $P_i (i = 1, 2 \dots n)$ 。

图 9、图 11 分别为中间辊有单边锥度和无单边锥度时，三维光弹模型实验计算的辊间接触单元长度上的压力分布。

图 10、图 12 分别为应用应力相似转换准则的转换关系，转换计算出 1400mm 十二辊轧机的辊间实际接

触单元长度上实际压力的分布规律图示。

图 13、图 14 分别为中间辊有单边锥度和无单边锥度时，相应的轧件与工作辊之间接触单元长度上的压力分布图。其分布规律与文献[18]基本一致。

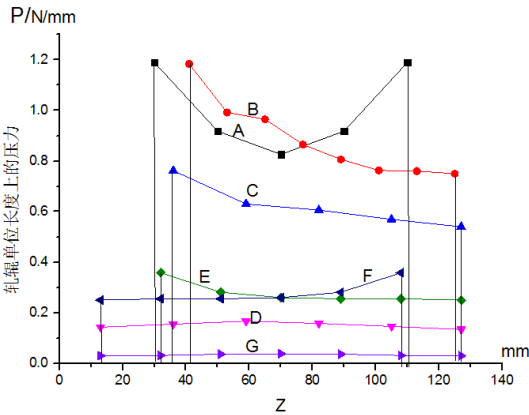


图9 1400mm十二辊轧机辊间模型实验计算的接触压力分布（中间辊有单侧锥度）

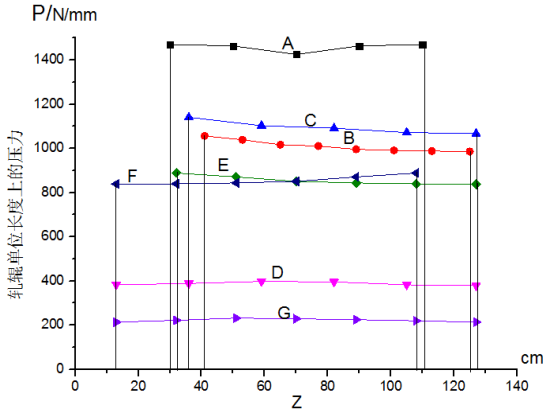


图10 1400mm十二辊轧机辊间的实际接触压力分布（中间辊有单侧锥度）

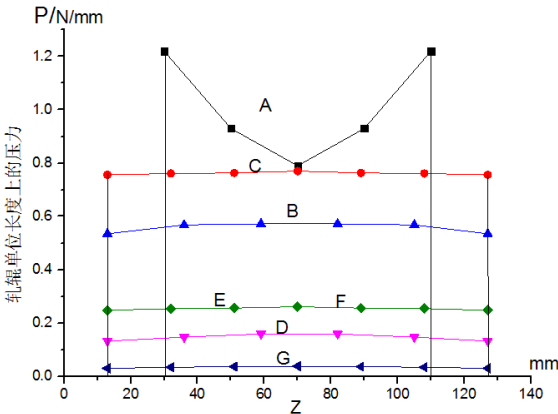


图 11 1400mm 十二辊轧机辊间模型实验计算的接触压力分布（中间辊无单侧锥度）

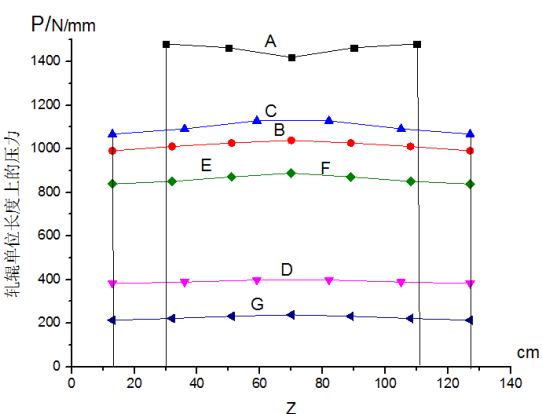


图 12 1400mm 十二辊轧机辊间的实际接触压力分布（中间辊无单侧锥度）

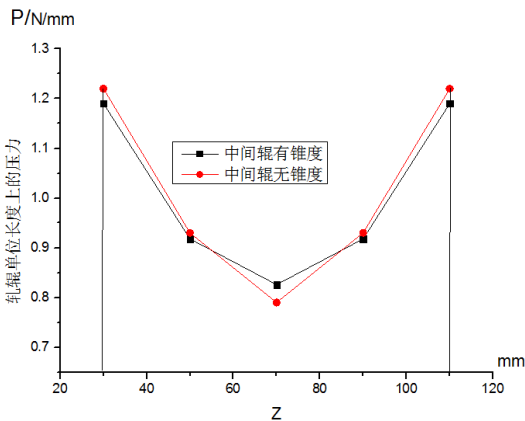


图 13 工作辊与轧件之间模型实验计算的接触压力分布图

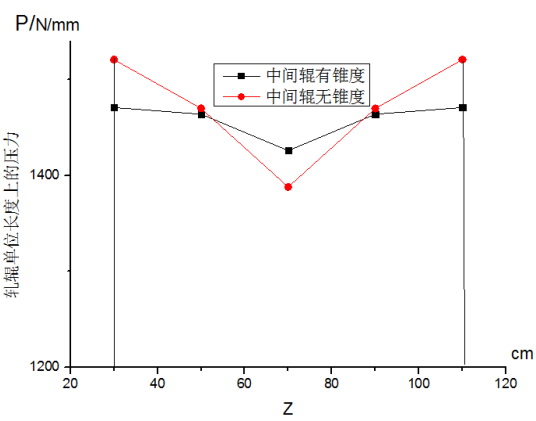


图 14 工作辊与轧件之间的实际接触压力分布图

由于 1400mm 十二辊轧机辊系是塔形辊系布置，轧辊数量多，呈层叠状，与传统的四六辊轧机辊系基本为纵向单列轧辊布置不同，轧辊之间存在着一定的几何关系，同一根轧辊与其它多个轧辊接触，轧辊之间的接触压力和变形显得比较复杂。本文运用三维光弹性实验应力分析法，可以有效计算出其辊间压力分布规律。在 1400mm 十二辊轧机模型的三维光弹性实验应力计算中，中间辊有单边锥度设计（即边部锥度

长 370mm, 高 0.03mm), 其辊间接触压力分布规律 (与中间辊没有设置锥度比较) 是: 中间辊和支撑辊、中间辊与工作辊之间的接触压力都呈现出锥度侧大, 非锥度侧小的分布特点, 但锥度侧边部的接触压力没有形成比较大突变 (见图 9、图 10 的 B、C、E 的压力分布曲线), 这有利于防止轧辊辊身边部剥裂和提高轧辊的使用寿命。同时, 中间辊有单边锥度设计, 可有效减轻工作辊与中间辊两侧的有害弯矩和减小工作辊的边部弯曲变形, 使得工作辊与轧件接触压力分布的不均匀减轻 (见图 13、图 14), 这对减小轧件的横向同板差、提高轧制产品的板形质量有着重要的影响。

4 结论

(1) 本文根据 1400mm 十二辊轧机的特征, 设计了实验分析的十二辊轧机三维光弹性模型, 同时, 根据应力相似转换准则和实验应力分析关系, 建立了相关的十二辊轧机辊间接触应力和接触压力的计算式。

(2) 通过三维光弹性实验冻结的模型轧辊中的应力等差线图示, 计算出十二辊轧机模型的辊间接触压力的分布规律, 并按照应力相似转换准则计算其实际轧辊的辊间接触压力的分布, 其分布规律与文献[3]基本一致。

(3) 对比中间辊设计单边锥度的十二辊轧机模型的计算, 由于中间辊的锥度有效减小了工作辊与中间辊两侧的有害弯矩, 可有效减小了工作辊的边部弯曲变形和减轻工作辊与轧件的接触压力分布的不均匀。从而可有效降低轧件的横向同板差, 有利于提高轧制产品的板形质量。

(4) 中间辊边部锥度设计, 可以有效防止辊间边部接触压力突变, 从而可以防止轧辊辊身的边部剥裂, 提高轧辊使用寿命。

(5) 通过三维光弹性实验分析方法建立的 1400mm 十二辊轧机辊间接触应力和压力的分布计算方法, 为进一步理论计算和分析 1400mm 十二辊轧机实际轧制过程中辊间的受力和变形、辊型的优化设计和轧件横向同板差和板形的有效控制奠定了实验基础和分析依据。

REFERENCES

- [1] YU Jiang-wei, QU ZHI-hao. 3-D Photoelasticity analysis of Contact Stress on roller[J]. Chinese Quarterly of Mechanics. 2003,24(1):55.
- [2] Cernosek J. Three dimension photoelasticity by stress freezing[J]. Exp Mech.1980.20:417-426.
- [3] JIAO Xu-wei. Photoelastic Test for Stress Analysis of Rolling Mill Housings[J]. CFHI Technology 2013 ,153(3):55-57
- [4] WANG Ge-Qin, WEI Guo-cun,FENG Bao-lian. Photoelasticity analysis of four mil[J]. Journal of Taiyuan heavy machinery institute. 1984
- [5] WEI Li-qun, YU Jian-wei, JING Xiao-rong, et al. Calculation of force between rolls in 6-h mil[J]. Journal of shanghai institute of technology.2003,3(3).
- [6] WEI Li-qun, ZHANG XING-yao, LIU Mou-yuan,et al. On shape control for 1420 HC strip mill[J]. Iron and Steel. 2003.38(9):30.
- [7] WEI Li-qun, LIU Mou-yuan, JING Xiao-rong, et al. Influence of the middle roll's movement amount on the shape control in 1420 HC mill[J]. Shanghai Metals. 2003,25(6):38..
- [8] SUN Ji-quan, ZHANG Hui-xia, LINGHU Ke-zhi. Optimization of Intermediate Roll Chamfer for UCM-Type Six-Roller Mill[J]. Journal of Iron and Steel Research. 2009,21(11):24.
- [9] LIANG Xun-guo, JIAO Zhi-jie, WANG Guo-dong. Lateral Rigidity Characteristics of UCM Mill[J]. Journal of Iron and Steel Research. 2009,21(7):24.
- [10] LI Guang-lin, MA Jia-ji, WANG Lu-bing. Optimization of Control Strategy for Thickness Difference in Wide Direction of UCMW Mill. Journal of Iron and Steel Research. 2012,24(1):24.
- [11] QIAN Wen-jun. A new type of 12-high reversing cold rolling mill[J]. Metallurgical Equipment. 2006(5):41.
- [12] Kezhi Linghu, Zhengyi Jiang, Jingwei Zhao, et al. 3D FEM analysis of strip shape during multi-pass rolling in a 6-high CVC cold

rolling mill[J]. springer.2014,74:1733.

[13] LV Xiao-bing, GAO Jin-lin. Analysis of roll system characteristics of 12-h cold strip mill[J].Steel Rolling 2003,20(2):52.

[14] Sang-Ho Lee, Gil-Ho Song Sang-Ho Lee, Sung-Jin Lee, Byung-Min Kim. Study on the improved accuracy of strip profile using numerical formula model in continuous cold rolling with 6-high mill[J].springer.2011,25(8):2101.

[15] WU Ning. Introduction on shape automatic control of 12-h cold mill[J].Steel Rolling. 2002,19(2):39.

[16] XU Zhi-lun. Elasticity[M]. People's Education Press,1979.

[17] QU Zhi-hao. A study on a similarity coefficient for contact simulation analysis of roll[J]. Special Steel.2003,24(3):9.

[18] LI Wei-liang. Deformation analysis and crown controlling study of the new type of twelve high rolling strip mill[D]. master's dissertation. Yanshan University, 2012.

【作者简介】



¹ 魏立群（1962-），男，汉族，硕士，教授，金属材料加工工程（金属轧制成形技术方向），上海工业大学本科毕业、东北大学硕士毕业。

Email: weiliquan@sit.edu.cn

² 戴志方（1988-），男，汉族，硕士研究生，金属材料成形技术方向，上海应用技术学院硕士研究生。

E-mail: 949851527@qq.com

³ 卢冬华（1968-），女，汉族，硕士，高工，计算机科学与技术方向，上海科技大学本科毕业、上海交通大学硕士毕业。E-mail: 920015080@qq.com