

文章编号: 1000-4750(2006)07-0176-04

大型非均质轧辊辊间接触应力分布规律的研究

*杜凤山, 黄华贵, 许志强

(燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 针对轧辊表面剥落失效现象, 采用非线性有限元方法, 考虑轧辊表面淬硬层与其心部金属材料组织性能差别, 对四辊轧机工作辊与支撑辊间接接触应力问题进行模拟。并将模拟结果与传统强度校核方法进行了对比分析, 结果表明非均质条件下的辊间接接触应力和支撑辊辊内剪应力峰值及其作用深度均大于传统 Hertz 公式的计算结果, 对于深入分析轧辊的失效行为具有重要意义。

关键词: 轧辊; 接触应力; 非均质; 淬硬层; 剥落; 有限元法

中图分类号: O346 文献标识码: A

RESEARCH ON DISTRIBUTION LAW OF CONTACT STRESSES BETWEEN HEAVY ROLLERS MADE OF HETEROGENEOUS MATERIAL

*DU Feng-shan, HUANG Hua-gui, XU Zhi-qiang

(College of Mechanical Engineering, YanShan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: Aiming at the surface spalling failure of rollers, the distribution law of contact stresses between the working roll and the back-up roll of a four-high-mill was simulated with nonlinear finite element method considering the different material microstructure and performance between hardening layer and core of rollers. Comparison of the available simulated results with the theoretical predictions using traditional strength check method indicates that the contact stresses between rollers, maximum shear stress below the back-up roll surface and its acting depth were all greater than the theoretical predictions of Hertz's formulas, which is very important for discovering the failure mechanism of rollers.

Key words: roller; contact stress; heterogeneous material; hardening layer; spalling; finite element method

在轧制过程中, 轧辊裂纹和表面剥落是轧辊(尤其是硬面支撑辊)失效的主要形式之一。缺陷的产生除了与轧辊内部存在的缩孔、夹杂及热处理不当等因素有关^[1-5]外, 辊间接接触应力也是导致轧辊辊面剥落的主要原因。

四辊轧机支撑辊和工作辊之间承载时产生强大接触应力, 为了防止接触疲劳破坏, 目前国内外广泛采用赫兹(Hertz)接触理论来进行轧辊强度校核计算^[6]。但由于赫兹理论是在材料均匀、连续性假

设下根据弹性力学推导出来的, 未考虑轧辊表面淬硬层组织与心部金属材料组织性能的差别对辊间接接触应力分布的影响, 同时采用一般辊间光滑接触方法^[7]与实际轧制工况不完全一致。实际上, 工作辊与支撑辊间的接触摩擦副是相对运动的, 属于滚动接触。因此应用 Hertz 接触理论来分析辊间接接触应力问题属于近似处理。

文献[1]在均质条件下研究了轧辊表面剥落接触疲劳破坏形成机理, 获得了最大剪应力分布规

收稿日期: 2004-09-26; 修改日期: 2005-06-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50435010); 国家 973 前期研究项目(2004CCA066000)

作者简介: *杜凤山(1960), 男, 双城市人, 教授, 博导, 燕山大学科技处处长, 从事金属压力加工及过程仿真研究(E-mail: fsdu@ysu.edu.cn);

黄华贵(1978), 男, 福安市人, 博士生, 从事轧制设备的 CAD/CAE/CAM 及其网络化研究;

许志强(1963), 男, 大庆市人, 教授, 博士, 从事冶金机械及其生产过程的数值模拟仿真研究。

律。工业生产表明，轧辊表面损伤破坏深度与赫兹理论计算结果不完全一致。研究表明，辊面淬硬层深度对最大剪应力有较大影响。为此，本文采用非线性有限元方法，考虑轧辊表面淬硬层与心部金属材料组织性能差异和接触非线性，对四辊轧机辊间接触应力分布进行数值模拟。结果表明在考虑淬硬层与两辊滚动接触情况下，辊间接触应力和辊内剪应力峰值均大于赫兹公式的计算结果，辊内剪应力峰值作用点深度与轧辊剥落处深度相近。这对于深入了解轧辊表面剥落的形成机理具有重要意义，为轧辊强度设计提供了重要的依据。

1 赫兹(Hertz)公式

赫兹接触理论^[7]是根据完全弹性体的静态接触条件得出的，通常被采用作为点线接触副的设计依据。对于工作辊与支撑辊之间的承载接触，赫兹理论认为：在接触区内产生局部的弹性压扁，存在呈半椭圆形分布的压应力。接触区应力状态如图 1 所示，半径方向产生的法向压应力在接触面的中部达到最大值，最大压应力值：

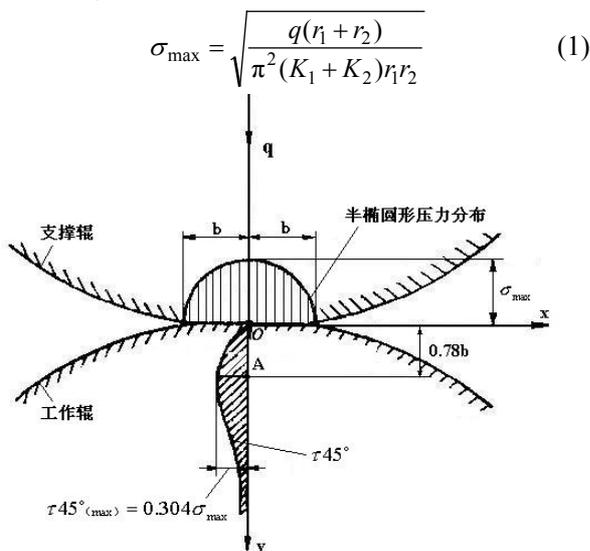


图 1 接触区轧辊接触应力分布

Fig.1 Distribution of contact stresses between rollers
接触区宽度 2b：

$$b = 2 \sqrt{\frac{q(K_1 + K_2)r_1r_2}{r_1 + r_2}} \quad (2)$$

式中： q —加在接触表面单位长度上的负荷，
 r_1, r_2 —工作辊、支撑辊的半径，
 K_1, K_2 —与轧辊材料有关的系数，
 $K_1 = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1}$ 、 $K_2 = \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2}$ ，其中， ν_1, ν_2 及 E_1, E_2

分别是两轧辊材料的泊松比和弹性模量。

轧辊内部 y 轴上各点最大剪应力满足：

$$\tau_{45^\circ} = \frac{q}{b} \left\{ y - y^2(a^2 + y^2)^{-\frac{1}{2}} \right\} \quad (3)$$

从图中可以看出支撑辊接触区剪应力 τ_{45° 沿距辊面深度的分布情况，在表面深度 $y = 0.78b$ 时达到最大值：

$$\tau_{45^\circ(\max)} = 0.304\sigma_{\max} \quad (4)$$

这个剪应力随着辊径的深入呈曲线下降，可深入到轧辊内部接触区宽度 4 倍深处。为防止在轧辊表面产生疲劳破坏，设计时通常对计算的接触应力 σ_{\max} 或剪应力 $\tau_{45^\circ(\max)}$ 进行校核，并据此来进行轧辊强度设计。

2 有限元模型建立

本文以 3500 四辊轧机为例，考虑轧辊表面淬硬层与心部材料组织性能差异，利用有限元软件 Marc 对工作辊与支撑辊间接触问题进行模拟，相关模拟参数如表 1 所示。

表 1 轧机模拟参数

Table 1 Simulation parameters of 3500 rolling mill

技术参数	支撑辊	工作辊
轧辊尺寸/mm	Φ1900×3500	Φ1050×3400
淬硬层深度/mm	120	60
表面硬度 HV	400	610
心部强度 σ_b /MPa	600	450

2.1 几何模型

将工作辊与支撑辊视为轴线平行的两圆柱弹性体相接触，辊间作用力沿轴向均匀分布，则由弹性力学可知，轧辊的接触应力计算可以简化为平面应变问题，同时考虑对称性，取一半进行分析，所建立有限元模型如图 2(a)所示。

2.2 边界条件

模型坐标系如图 2 所示，根据模型假设及实际工况施加如下边界条件：

- (1) 工作辊中心受刚体驱动旋转并带动支撑辊转动，两辊间滚动接触^[8,9]，遵从库仑摩擦定律；
- (2) 在支撑辊中心节点加上一负 y 轴方向节点载荷 $q(q$ 即接触表面单位长度上的负载，如图 1 所示)，不考虑轧件与工作辊间的作用，同时在该节点施加 $x = 0$ 位移边界条件。

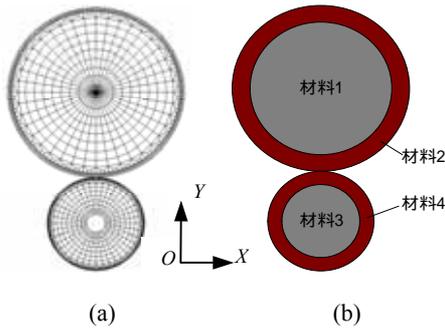


图2 非均质材料有限元模型

Fig.2 FEA model with heterogeneous material

取某中厚板轧制过程的轧制力 $P = 35 \text{ MN}$ 为模型模拟载荷工况，并假设工作辊与支撑辊间的载荷沿轴线方向均匀分布，则模型中的节点载荷 $q = \frac{P}{L_z} = 10000 \text{ N/mm}$ 。

2.3 非均质轧辊

轧辊材料为 3Cr 锻钢，锻造成形后经淬火处理，其表面金相组织多以高硬度的马氏体为主，而淬硬层以内下贝氏体、残余奥氏体含量逐渐增加，心部为原始软组织。由于过渡层距辊面相对较深，本文忽略过渡层对辊间接触应力的影响，仅考虑轧辊表面淬硬层与其心部基体组织性能的差别，将轧辊视为两个均质层，采用不同的弹性模量值来对其进行描述建模(如图 2(b)所示)，泊松比 ν 均取 0.3。

表 2 非均质轧辊材料特性参数

Table 2 Property parameters of material

	材料 1	材料 2	材料 3	材料 4
弹性模量 $E_i / (\text{N/mm}^2)$	195000	230000	195000	260000

根据文献[10]：在温度不太高的情况下，维氏硬度 HV 和弹性模量 E 之间呈线性关系。因此，按照表 1 所给出的轧辊表面硬度及心部材料强度值可为模型确定轧辊材料特性参数如表 2 所示。

3 模拟结果分析

3.1 辊间接触应力 σ_{\max}

首先对材料均匀性假设条件下有限元模拟结果与赫兹公式求解结果进行对比分析。两轧辊材料弹性模量均取 $E = 1.9 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ，泊松比 $\nu = 0.3$ 。由公式(1)可得：

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{1000 \times (950 + 525)}{2\pi^2 \frac{1-0.3^2}{195000\pi} \times 950 \times 525}} \approx 1003.8 \text{ MPa}$$

而相同条件下的有限元模拟结果如图 3 所示，从图中可以看出 $\sigma_{\max} = 1098 \text{ MPa}$ 。可见，在均质假设条件下，赫兹公式与有限元模拟的结果相差不多，这也说明了所建有限元模型的可靠性。

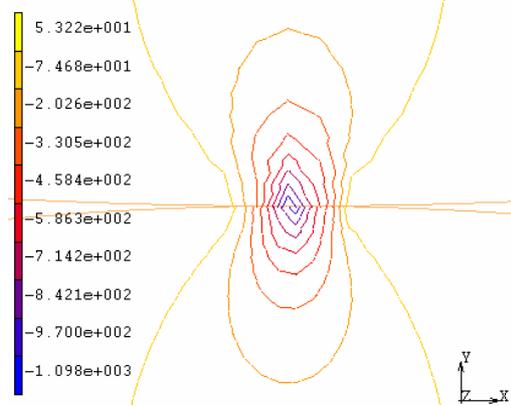


图3 均质条件下辊间接触应力 σ_y 等值线分布

Fig.3 Distribution contour of the normal contact stress σ_y within the rollers with homogeneity material

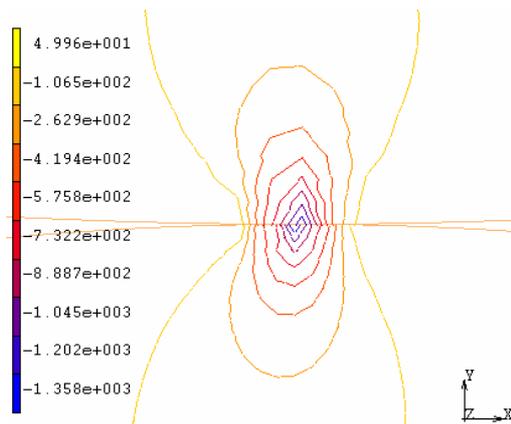


图4 淬硬层厚度为 36mm 时的接触应力 σ_y 等值线分布

Fig.4 Distribution contour of the normal contact stress σ_y between the rollers with hardening layer (The depth of hardening layer is 36mm)

考虑轧辊非均质特性，淬硬层深度为 36mm 时的辊间接触应力等值线分布如图 4 所示，此时接触区中心的最大接触应力达 1358MPa。可见，考虑淬硬层后辊间最大接触应力大大超过均质假设条件下的结果。

3.2 淬硬层深度对辊内剪应力 τ_{45° 的影响

从以上分析可以看出表面淬硬层的存在对辊间接触应力的影响是显著的，为了深入了解淬硬层深度对支撑辊内剪应力分布的影响，本文分别取淬硬层深度为 18mm、36mm、72mm、108mm 进行模拟分析，得到了不同淬硬层厚度下支撑辊内剪

应力 τ_{45° 沿轧辊径向深度的分布曲线(如图 5 所示)。

从图中可以看出,在不考虑淬硬层(轧辊为均质材料)时的结果如曲线 1 所示,此时剪应力峰值为 291MPa,与赫兹公式的求解结果非常接近(曲线 2);曲线 3,曲线 4,曲线 5 分别是淬硬层深度为 36mm、72mm、108mm 时的辊内剪应力分布,三种工况下的模拟结果较为接近,最大峰值均在 320MPa 左右;而当淬硬层较薄时(18mm,曲线 6)最大剪应力峰值高达 350MPa。

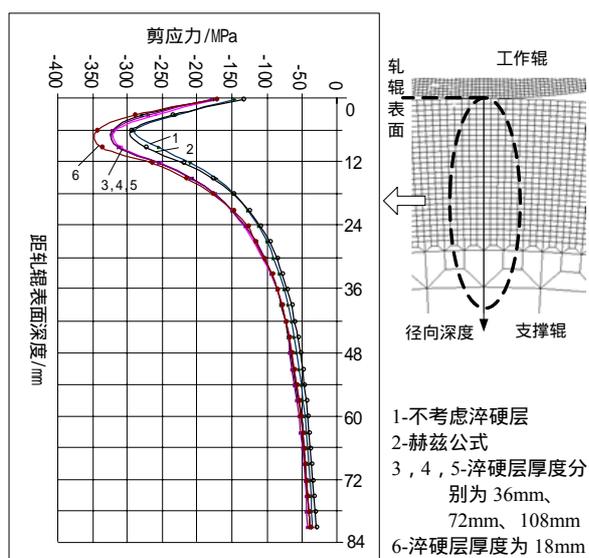


图 5 辊内剪应力 τ_{45° 分布

Fig.5 Distribution of shear stress below the surface of back-up roll

可见,在考虑淬硬层后轧辊内部最大剪应力值均大于赫兹公式(4)的计算结果。由于支撑辊接触区域内金属受三向压应力作用,根据强度理论,剪应力对支撑辊产生破坏失效作用才是最重要的。轧辊的旋转工作使得该剪应力具有循环交变特性,而轧辊的疲劳破坏微裂纹往往从最大剪应力处开始并逐步向表面扩展,最后导致轧辊表面的局部剥落。因此,从图中剪应力分布曲线峰值位置可以预测轧辊表面剥落的深度。依照赫兹公式,辊内剪应力峰值的作用点位置出现在距轧辊表面 5mm 处,而考虑淬硬层后的模拟结果出现在距轧辊表面 8mm~12mm 处,与事故现场的轧辊表面剥落深度更为贴近^[1,5],这对深入认识轧辊剥落失效行为具有重要意义。

3.3 有限元网格质量对分析结果精度的影响

工程模型的单元网格划分是前处理阶段最为复杂和最为耗时的阶段,模型分析结果的好坏均与单元划分的质量高低有关。为了保证轧辊接触传动,提高计算精度,本文利用 Marc 所具有良好的网格划分能力,对接触区轧辊表层的网格单元进行了细分(如图 2(a))。

研究发现在接触区域单元网格比较粗糙的条件下,不但支撑辊不能稳定连续转动,模拟所得到的应力分布也产生较大的波动,很难得到稳定的结果。而且轧辊内部剪应力 τ_{45° 在其峰值 $\tau_{45^\circ(\max)}$ 作用点附近的变化率很大,如果没有较好的网格质量,将无法得到其变化规律。

4 结论

采用非线性有限元方法,将轧辊视为非均质材料进行辊间接触应力分布规律的研究。由模拟结果可知:(1) 轧辊为均质弹性体时的模拟结果与 Hertz 接触理论结果相符,说明 Hertz 公式的计算结果能够作为淬透性较好的中小型轧辊的强度设计依据,并且具有较高的精度;(2) 在将轧辊视为非均质材料、两辊滚动接触情况下,辊间最大接触应力 σ_{\max} 和最大剪应力 $\tau_{45^\circ(\max)}$ 均大于赫兹公式的计算结果,最大剪应力作用点位置比 Hertz 公式的计算结果更深入辊内,与实际轧辊剥落处深度相近,说明对于大型非均质轧辊仅从均质弹性体接触分析结论来进行轧辊强度校核是不够的。

参考文献:

- [1] 董晓, 王兆毅, 隋晓红. 70Cr3Mo 精轧辊剥落原因探讨[J]. 鞍钢技术, 1998, (5): 4~9.
Dong Xiao, Wang Zhaoyi, Sui Xiaohong. Discussion on the causes of 70Cr3Mo back-up roll spalling [J]. AISC Technology, 1998, (5): 4~9. (in Chinese)
- [2] 庞兆夫, 魏明远. 大型轧机轧辊的质量寿命分析[J]. 鞍钢技术, 1999, (11): 5~8.
Pang Zhaofu, Wei Mingyuan. Analysis on quality and life time of roller in heavy section mill [J]. AISC Technology, 1999, 11: 5~8. (in Chinese)
- [3] Rafael Colas, Jorge Ramirez, Ignacio Sandoval, Julio C. Morales, Luis A. Leduc. Damage in hot rolling work rolls [J]. Wear, 1999, 230: 56~60.
- [4] Chue C H, Chung H H. Pitting formation under rolling contact [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2000, 34(1): 1~9.

参考文献:

- [1] 周士琼, 尹建. 粉煤灰高性能混凝土的性能[J]. 山东建材学院学报, 1998, 12(3): 90~93.
Zhou Shiqiong, Yin Jian. The properties of high performance concrete with fly ash [J]. Journal of Shandong Building Material University, 1998, 12(3): 90~93. (in Chinese)
- [2] 黄国兴, 惠荣炎. 混凝土的收缩[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990.
Huang Guoxing, Hui Rongyan. Concrete shrinkage [M]. Beijing: China Railway Press, 1990. (in Chinese)
- [3] 周履, 陈永春. 收缩徐变[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
Zhou Lu, Chen Yongchun. Shrinkage and creep [M]. Beijing: China Railway Press, 1994. (in Chinese)
- [4] 冯乃谦. 高强混凝土技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1992.
Feng Naiqian. High strength concrete technique [M]. Beijing: China Building Materials Press, 1992. (in Chinese)
- [5] 黄国兴, 惠荣炎. 混凝土的徐变[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
Huang Guoxing, Hui Rongyan. Concrete Creep [M]. Beijing: China Railway Press, 1988. (in Chinese)
- [6] Brooks J J, Wainwright P J. Properties of ultra high strength concrete containing super plasticizer [J]. Magazine of Concrete Research, 1983, 35(125): 205~213.
- [7] 余志武, 陈文彬. 超细粉煤灰高性能混凝土型轨枕徐变性能研究[J]. 铁道学报, 2002, 24(5): 107~111.
Yu Zhiwu, Chen Wenbin. Study on creep behavior of type sleepers of high performance concrete with ultra-pulverized fly ash [J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(5): 107~111. (in Chinese)
- [8] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Xiang Haifan. Advanced bridge structure theory [M]. Beijing: People's Transportation Press, 2001. (in Chinese)
- [9] Neville A M. Creep of Plain and Structural Concrete [M]. London: Construction Press, 1983.
- [10] Branson D E. Deformation of Concrete Structures [M]. New York: Mcgraw Hill Company, 1977.
- [11] 中华人民共和国铁道部. 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范(TB10002.3-99)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
Ministry of Railway of People's Republic of China. Specifications for Design of Reinforced Concrete And Prestressed Concrete Railway Bridges and Culverts (TB10002.3-99) [S]. Beijing: China Railway Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 孙玉璞, 郭小燕, 孙希泰. 轧辊的接触疲劳断口[J]. 金属热处理, 1997, (1): 52~54.
Sun Yupu, Guo Xiaoyan, Sun Xitai. Contact fatigue fracture of roller [J]. Heat Treatment of Metal, 1997, (1): 52~54. (in Chinese)
- [6] 邹家祥. 轧钢机械(修订版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
Zou Jiexiang. Rolling Mill Machine (Revised edition) [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [7] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
Wen Shizhu. The Theory of Tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990. (in Chinese)
- [8] 杜凤山, 朱光明, 孙登月. 六辊冷连轧机张力超调成因的有限元分析[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(1): 31~33.
Du Fengshan, Zhu Guangming, Sun Dengyue. Analyzing reasons for excess tension in six roller sheet rolling mill using FEM [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003, 15(1): 31~33. (in Chinese)
- [9] 朱光明, 杜凤山, 周坚刚. 板带轧制变形区内摩擦力分布的有限元模拟[J]. 北京: 冶金设备, 2002, (4): 1~4.
Zhu Guangming, Du Fengshan, Zhou Jiangang. FEM simulation of friction distribution along the deformation area in steel sheet rolling [J]. Metallurgy Equipment, 2002, (4): 1~4. (in Chinese)
- [10] 中国金属学会, 中国有色金属学会编. 金属材料物理性能手册(第一册): 金属物理性能及测试方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
The Chinese Society for Metal, The Nonferrous Metals Society of China. The handbook for metal physical property (Volume.1): The property and testing method for metal [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1987. (in Chinese)

(上接第 179 页)