

轧机微尺度理论的发展与展望

李明¹, 朱颖², 申光宪¹, 束学道²

(1.燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 简要阐述了轧机微尺度理论的含义, 其核心点是在轧机微尺度理论中开展考虑机构变形的轧机重载机构等效机构学分析, 是轧机设计理论的工程创新与重要补充. 同时, 介绍了轧机微尺度理论的研究历程中的主要工作, 结合行业技术发展形势对轧机微尺度理论的应用前景进行了展望.

关键词: 轧机; 机构学; 微尺度

中图分类号: TG331

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 01-0002-06

轧机微尺度理论^[1]是申光宪课题组在长期科研实践中, 针对轧制装备毫米(mm)至微米(μm)级的轧辊弹性变形、轧机运动副(轴承座与机架窗口)间隙、压下螺纹机构中径定位和大油涵间隙等辊系微尺度失控行为与各种重大设备事故的相关性而提出的创新论点, 其体系框架是以严格的机构学分析与综合理论、创新微尺度静定机构模型、边界元法数值分析及现场工业实验等科学方法建立的.

1 轧机微尺度理论的提出

20 世纪 80 年代以来, 随着国民经济的快速发展, 我国引进和自制了大量各个种类的轧机, 轧制生产行业的技术水平得到了显著提升, 钢材生产总量连续多年世界第一. 然而在实际轧制生产中, 频繁出现轧机宽系滚动轴承(主轴承)异常烧损短寿事故(图 1), 由此导致的轧机停产时间是所有零部件事故中最长的, 轴承成本损失以及连带停产

损失年均高达几十亿元. 因此, 从导致轴承损坏的承载环境来讲, 轴承损坏不仅是制约轧机装备大型化、重载化、精密化、高速化的严重障碍, 也直接暴露出传统的以强度与刚度要求为中心的轧机设计理论与现代轧制生产水平的不相适应.

对于轧机轴承短寿烧损事故, 较为典型的观点包括“恶劣辊系破坏轴承密封体系导致杂物侵入”“轴承座与轴承外环接触变形改变径向游隙”等.

申光宪课题组在解决轧机轴承短寿烧损问题的过程中, 从导致轴承损坏的承载环境, 即相对于轴承构成轴承短寿烧损矛盾另一方的辊系着手, 对轧辊的微米(μm)至 0.01 mm 量级的弹性弯曲变形引起的辊颈倾斜微尺度失控行为开展研究, 指出该微尺度行为与轴承短寿烧损密切相关, 进而提出了轧机微尺度可控(等效静定)辊系的论点. 其核心在于, 首次在轧机重载机构中引入机构学分



图 1 2050CVC 轧机及其组合轴承事故

收稿日期: 2017-11-17.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51505417).

第一作者: 李明(1976-), 男, 湖北应城人, 博士/教授, 主要研究方向: 轧机微尺度理论、轧制强变形. E-mail: liming@ysu.edu.cn

析, 并且在重载机构的机构学分析中, 充分考虑了杆件弹性变形和运动副间隙的影响, 相比于传统轧机设计理论, 反映了工程科学学术上的发现和创新.

常见的机构分析均是基于刚性构件假设的, 忽略了构件的弹性. 在中、低载荷下, 忽略构件弹性变形的结果与实际情况基本吻合. 但是在重载条件下, 机构的弹性变形远远超出机构学分析的刚性假设容许度, 直接破坏了理想机构的静定性. 以图2的辊系机构为例, 其两端分别有轴承和轴承座支承, 左端轴承座固定, 右端游动, 在轧辊中部A点承受轧制力 P . 在空载($P=0$)状态时, 轧辊没有弹性变形, 可以视为刚性杆, 辊系机构简化为由两个固定于机座的构件组成, 是超静定机构. 当处于重载($P>0$)状态时, 轧辊的弹性弯曲不可忽略, 以图2中虚线表示轧辊的变形, 明显可以看出轧辊采用刚性杆的假设已经不再适合了. 为分析此时的辊系机构特征, 在轧辊最大挠度点A设虚铰链副, 则弹性微尺度变形的辊系可以等效模拟成1杆2低副机构, 仍是超静定的. 在这种状态下, 轴承座不能跟随轧辊颈部的倾斜而摆动, 从而导致滚动轴承内部出现列间异常偏载.

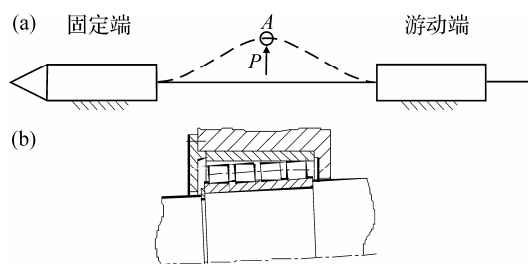


图2 辊系机构平面杆系及宽系轴承列间偏载示意

将图2中的辊系机构重新设计改为图3. 空载状态下为2杆3低副平面杆系, 是静定的. 重载时, 按微尺度等效杆系理论分析, 为3杆4低副平面杆系, 还是静定的. 改造后的轴承座低副, 重载状态下如图3中的虚线所示, 在轧辊弯曲时能随轧辊颈部的倾斜而摆动, 实现了滚动轴承的各列均载.

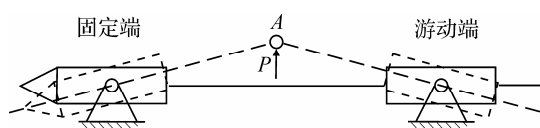


图3 辊系机构微尺度静定杆系

轧机微尺度等效辊系分析和综合原理, 阐明

了轧机宽系轴承列间异常偏载的机理, 并从实际工程出发进行了开创性的轧机微尺度可控静定辊系设计, 拓展了有效解决轧机宽系轴承事故的崭新思路和途径.

2 轧机微尺度理论的发展历程

轧机微尺度理论的提出始于1996年在唐钢高刚度轧机开展轴承延寿研究^[2], 2001年开始进行微尺度理论的推进与提炼, 先后开发多套轧机微尺度静定系统^[3-8]、微尺度可控开闭复合轴承座^[9]、轧机微尺度静定压下系统^[10], 项目的进展在2004年获得国家自然科学基金委优秀论文奖. 随后, 在国家自然科学基金资助下出版专著《轧机微尺度理论和实际》^[1], 对微尺度理论进行了总结. 近年又在轧机振动方面得到了新的发展^[11].

2.1 轧机结构的自位与轧机轴承延寿

在轧机中, 由于宽系轴承的广泛使用而提出了“自位”概念, 但一直没有做出严格定义. 轧机中的自位机构设置最常见的是在力传递的支承面上设置柱面垫(高副)或球面垫(低副). 但实践证明仅仅设置柱面垫或球面垫是不充分的, 只有严格建立在微尺度等效机构学分析基础上的静定辊系, 才能实现轧机的自位.

2.1.1 空间自位型高刚度轧机

最早开展的高刚度轧机轴承延寿研究是三铰拉杆方柱型短应力线高刚度轧机^[2], 该轧机是在方柱型高刚度轧机的基础上开发自位机构形成的. 根据轧机微尺度等效机构学理论综合, 取该轧机上轧辊杆系机构(图4)分析可知, 在空载和重载时都是可靠的静定机构, 轴承座在轧辊受轧制力弯曲变形时能跟随轧辊颈部的倾斜而倾斜, 保持同一转动, 具有自位性能. 对三铰拉杆方柱型高刚度轧机和普通方柱型短应力线高刚度轧机进行的轴承座自位摆动测定结果^[12]也证明了这一论断.

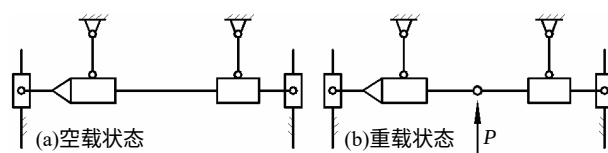


图4 三铰拉杆方柱型高刚度轧机辊系平面杆系

更进一步的研究表明, 在轧制重载时, 辊系不仅需要轧制平面自位性, 还应该让轧件运行方向

上具有自位性(用于克服咬、电钢的水平冲击力导致的微量变形),由此提出高刚度轧机的空间自位性. 530 空间自位型高刚度轧机^[4]如图 5 所示.

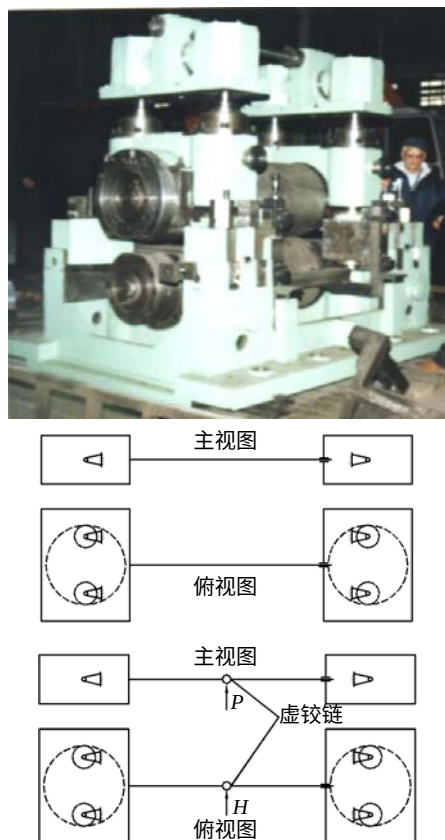


图 5 530 空间自位型高刚度轧机与微尺度静定辊系

2.1.2 2050CVC 四辊精轧机轧辊弯曲微尺度可控辊系^[5]

针对宝钢热轧板厂的 2050CVC 热轧四辊精轧机组合轴承短寿烧损问题,开展轧辊及轴承座在线弹性微尺度行为的理论和实验研究,按微尺度等效机构学理论,开发研制自适应均载装置(图 6)并投入使用至今.

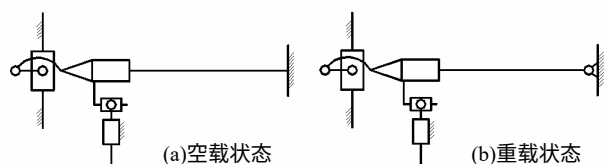


图 6 2050CVC 工作辊微尺度静定辊系

现场在线对比测试^[13]显示改进后的辊系组合轴承的偏载系数由原来的 2.67 降低至 1.06,轴承寿命由原来的不足 1 000 h 增加到 3 500 h. 该技术成果获得了 2005 年国家科技进步二等奖的认可.

空间自位型高刚度轧机的发明和 2050CVC 轧机自适应均载装置的成功使用,证明了对轧辊弹性弯曲微尺度行为的分析和机构学等效杆系理论框架的正确性.

2.2 轧机油膜轴承的微动磨损

油膜轴承在轧机中的应用已经历半个多世纪的创新. 调查发现,其损伤几乎全部发生于衬套靠近辊身侧,这一现象说明油膜轴承载荷不是理想的对称均载分布,而是受辊系微尺度行为影响的偏载. 按照轧机微尺度理论进行等效机构学,对 3500 中厚板轧机进行的分析指出,空载及轧制重载时的等效辊系均是超静定杆系,油膜轴承衬瓦无法实现随辊颈锥套倾斜的同步摆动,必然出现沿锥套宽度方向的异常偏载^[14],更深入的研究指出由于边部密封机构的存在,油膜轴承偏载峰值位于距边部一定距离的位置. 此外,通过对轧辊弹性弯曲开展的微尺度行为研究和静定辊系设计的积累,得到关于轧辊微尺度弯曲行为的一个新概念——轧辊轴向微横移^[15].

对油膜轴承的微尺度行为研究还得到另外一个结论,即旋转轧辊在轧制力作用下辊颈的弯曲变形状态,使锥套与辊颈在接触表面的局部区域对向交变微动,由此形成了微动疲劳损伤的力学机制^[16].

2.3 轧机压下螺纹副的偏载

轧机压下螺纹副用于大行程辊缝调节,通常由压下螺丝(钢)和螺母(铜合金)组成. 传统轧机设计理论中,螺纹副采用中径定位和兼顾考虑强化润滑的大间隙配合,螺纹副设计以满足静态强度、刚度、耐磨性和稳定性要求为标准. 然而,实际调研发现,满足传统设计理论、具有充分润滑的压下螺纹副,使用中会出现异常磨损而短寿报废.

围绕 3500 中厚板轧机压下螺纹副短寿问题开展的研究,通过现场测试、数值解析、模拟实验等方法研究发现,大间隙中径定位微尺度失控行为产生的螺纹副面力峰值超常(十几倍)是螺纹副异常磨损短寿的主要原因^[10,17].

2.4 轧机装配间隙的动态不确定

四辊轧机轴承座和机架窗口之间留有约 1 mm 间隙便于换辊和轴承座的热变形补偿,根据传统的轧机设计理论,只要给定合适的辊系偏移距,就

可以产生用于定位的足够水平力, 使轧辊各自紧靠机架窗口一侧, 不受咬钢和甩钢冲击, 确保轧机可靠稳定运行. 而据调查得知, 英 DAVY 制 2200 铝箔轧机工作辊止推轴承短寿烧损频繁, 连带发生废卷和停产事故, 严重制约轧机生产速度. 国内外开展多年的理论与实验研究, 从轴承结构强化、润滑等方面不断地提高轴承的工作寿命, 但一直没有根本解决问题.

对铝箔中、精轧机工作辊止推轴承的载荷(即轴向力)和轴承座振动特性开展的十多次在线工况测试研究^[18]结果发现, 中轧机工作辊(上)止推轴承异常超偏载, 偏载系数达 2.14. 根据传统轧机设计理论本应被偏移距附加水平力推到紧贴于机架窗口入口侧的支承辊轴承座, 在轧制过程中处于倾斜状态(图 7). 这一事实证明在轧机压靠运行时辊系偏移距力学约束失去了效果, 辊系轴承座处于失控状态, 在轧制运行过程中, 工作辊与支承辊之间发生的定向陀螺进动效应^[19-21](图 8)和热变形“对动交叉”, 是导致过大轴向力进而轧机止推轴承烧损的根源.

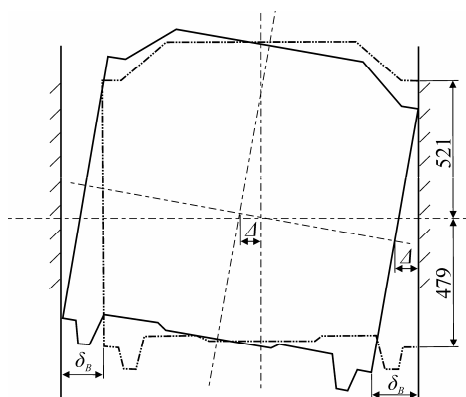


图 7 支承辊轴承座在机架窗口内倾斜

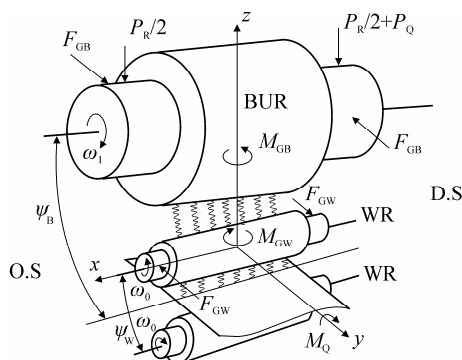


图 8 上辊系动态交叉示意

四辊轧机辊系中轴承座在机架窗口内间隙的稳定性不足, 是发生辊系微尺度行为失控的温床.

2.5 轧辊弯曲与交叉的复合控制

在以上研究的基础上, 又进一步推出了具有空间自位和防交叉功能的新轧机结构, 包括 600 半封闭式型钢二辊轧机^[22]和微尺度静定四辊轧机^[7]和六辊轧机^[8].

四辊轧机静定性辊系机构如图 9 所示. 在该辊系中, 设计了液压系统实现防交叉辊系定位, 换辊时液压系统缩回, 不干扰换辊操作, 同时经过优化的液压系统的安装位置可以避免对轧制运行过程中的轴承座热补偿空间产生影响.

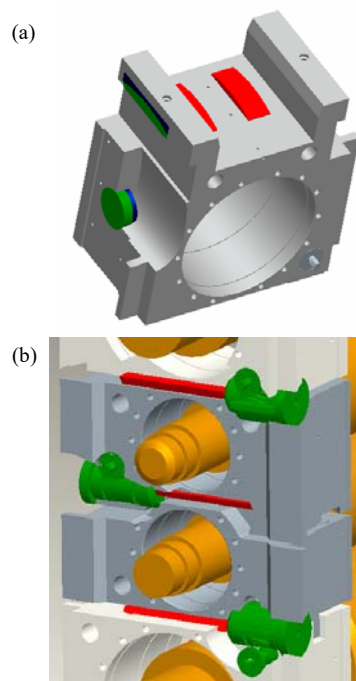


图 9 微尺度静定四辊轧机的铰链副和防交叉结构

2.6 轧机装配间隙的动态振动特性

四/六辊板带轧机共振及颤振现象在全世界范围内一直未得到有效解决. 历来轧机振动研究均以稳定轧机建立力学模型. 微尺度理论在轧机振动的研究基础上, 从区分轧机辊系的稳定性和空间振动行为的思路出发, 以不同稳定性的高刚度轧机、650 四/六辊轧机、1580 四辊热轧机(图 10)为算例进行空间振动特性数值解析和仿真, 对比其固有振动特性, 指出辊系间隙对轧机固有频率和振型的重要影响, 在改进轧机结构提高稳定性实现抑制轧机振动方面提出了新思路^[11].

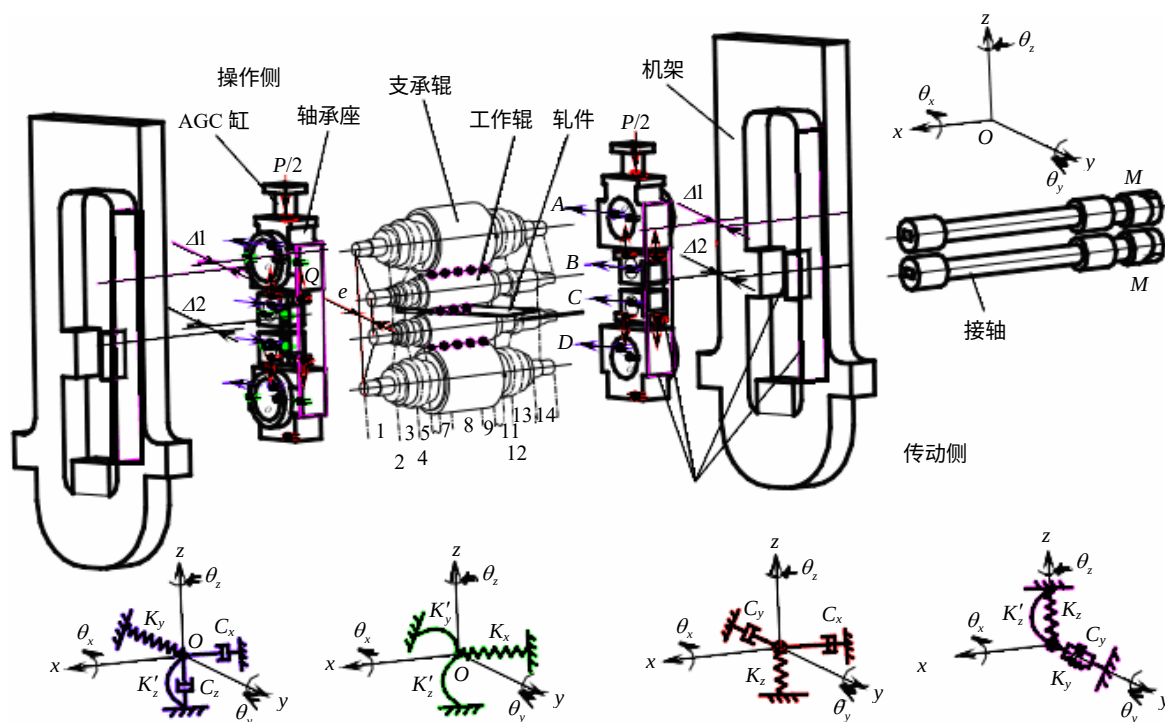


图 10 1580 mm 四辊轧机空间振动动力学模型

3 轧机微尺度理论的展望

轧制生产是国民经济中金属制品生产的重要组成部分,轧制技术高速度、高精度的要求一直是行业的主要目标。近年来,经过国家宏观政策的调整,钢铁行业低层次产能大幅压缩,行业整体技术水平提升明显,比较显著的例子是轧机自动化、高精度板形控制等技术推广大大加快。技术推广的加快必然带来技术层次提升的强烈需求,必须在轧机基础设计理论方面进行创新。轧机微尺度理论从工程问题出发,针对一直以来轧机设计理论所忽略或者简化的微尺度变形与间隙等方面,开展了大量开创性的探索研究,是轧机基础设计理论的必要补充,对轧机轴承的使用、轧机稳定性、板厚控制稳定性、板形控制稳定性等方面都有良好助益。在当前的行业发展形势下,轧机微尺度理论具有广阔的应用前景,必将对我国钢铁工业的发展起到积极作用。

参考文献:

- [1] 申光宪,束学道,李明. 轧机微尺度理论和实际[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 申光宪,安瑞臣,谢朝晖. 高刚度轧机重载滚子轴承低寿命问题的研究[J]. 机械工程学报, 1996, 32(2):95-100.
- [3] 申光宪,黄孟魁,束学道,等. 空间自位型高刚度轧机: 中国, ZL97101305. 5[P]. 1998-07-15.
- [4] 申光宪,束学道,刘德义,等. 530 空间自位型高刚度轧机[C]//中国金属学会. 中国钢铁年会论文集(下卷). 北京: 冶金工业出版社, 2001:258-261.
- [5] 申光宪,陈占福,李明,等. 2050 热轧精轧机自适应均载装置[C]//中国金属学会. 中国钢铁年会论文集(下卷). 北京: 冶金工业出版社, 2001:302-305.
- [6] 张联合. 酒钢高线粗中轧机滚动轴承偏载行为的理论和实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2001.
- [7] 申光宪,李明,丁肇棣,等. 微尺度静定性四辊轧机: 中国, ZL200810080014.3[P]. 2009-05-13.
- [8] 申光宪,肖宏,李明,等. 微尺度静定性六辊轧机: 中国, ZL201010535301.6[P]. 2011-06-29.
- [9] 申光宪,束学道,李明,等. 轧机微尺度可控开/闭复合辊系: 中国, ZL01126083.1[P]. 2002-04-17.
- [10] 陈秀敏. 轧机压下螺纹副微尺度理论与实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2005.
- [11] 郑永江. 板带轧机空间振动特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- [12] 束学道,郭景峰,申光宪,等. KZ 型高刚度轧机性能参数测试的研究[J]. 河北冶金, 1998(6):12-14.

- [13] 史荣, 申光宪, 陈占福, 等. CVC 轧机轧辊轴承载荷工况在线测试[J]. 机械工程学报, 2003(1):107-110.
- [14] 申光宪, 陈秀敏. 轧机微尺度行为和油膜轴承寿命[J]. 太原重型机械学院学报, 2004(S1):8-13.
- [15] 申光宪, 王翔, 刘德义. 现代冷带轧机偏移距和微跑偏机理[J]. 重型机械, 2003(1):1-4.
- [16] 李慧剑, 申光宪, 郝圣旺, 等. 油膜轴承锥套过盈装配的耦合变形分析[J]. 机械工程, 2003(11):915-917.
- [17] 陈秀敏, 申光宪, 刘德义, 等. 螺纹副面力场的摩擦接触多极边界元解析[J]. 燕山大学学报, 2004(2):141-145.
- [18] 束学道, 申光宪. 2350 铝箔轧机工作辊轴向力测试及止推轴承短寿分析[J]. 冶金设备, 2001(5):1-5.
- [19] 束学道, 申光宪. 高效轧机工作辊轴承座动态特性研究[J]. 冶金设备, 2003(5):1-3.
- [20] 束学道. 铝箔轧机二维微尺度可控辊系理论与实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2000.
- [21] 李明. 四辊轧机微动交叉机理及控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2004.
- [22] 申光宪, 史国明, 李明, 等. 中型型钢轧机滚动轴承化改造[J]. 轧钢, 2007, 24(1):7-9.

Theory of micro dimensional behavior on rolling mill: Development and prospect

LI Ming¹, ZHU Ying², SHEN Guang-xian¹, SHU Xue-dao²

(1.College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In the paper, we briefly describe the theory of micro dimensional behavior of rolling. The essence of the theory lies with the equivalent mechanism analysis of rolling mill by taking into consideration of heavy rolling mill deformation. In this work, the main research process of micro dimensional behavior is introduced, and the application prospect of the theory is discussed.

Key words: rolling mill; mechanism; micro dimension

(责任编辑 韩 超)