

## 中厚板轧制板形偏差机理分析与辊系补偿控制技术

陈思旭 常丽萍 李 铭

安阳钢铁建设有限责任公司, 河南 安阳 455000

[摘要]中厚板是钢材产品系列当中非常重要的一个品种,它的板型质量决定了它是否能顺利的进行下一步的加工,甚至决定了产品的后续应用性能。在中厚板的轧制过程当中,由压下量分配、轧辊弹性变形、热效应、工艺参数波动等原因造成的中厚板的板型缺陷普遍存在着,而且机制复杂、相互耦合严重,成为了阻碍中厚板产品质量进一步提高的一个重要因素。本论文针对中厚板轧制时板型缺陷产生的原因及轧辊系统的补偿控制技术进行系统的研究,探究了产生板型缺陷的因素,揭示了轧机系统机构和调节方式对板型控制的影响机制,建立了轧辊系统补偿控制模型和控制算法。为中厚板轧制时的板型精度控制提供了理论基础和技术支持。

[关键词]中厚板轧制;板形偏差;板形控制;辊系补偿技术

DOI: 10.33142/ect.v4i2.19203

中图分类号: TG334.9

文献标识码: A

### Analysis of the Mechanism of Form Deviation in Medium and Thick Plate Rolling and Roller System Compensation Control Technology

CHEN Sixu, CHANG Liping, LI Ming

Anyang Iron & Steel Construction Co., Ltd., Anyang, He'nan, 455000, China

**Abstract:** Medium thick plate is a very important variety in the steel product series. Its plate shape quality determines whether it can be smoothly processed in the next step, and even determines the subsequent application performance of the product. During the rolling process of medium thick plates, defects in the plate shape caused by factors such as reduction distribution, elastic deformation of rolling rolls, thermal effects, and fluctuations in process parameters are commonly present, and the mechanism is complex and severely coupled, becoming an important factor hindering the further improvement of the quality of medium thick plate products. This paper systematically studies the causes of plate shape defects during the rolling of medium thick plates and the compensation control technology of the rolling mill system. It explores the factors that cause plate shape defects, reveals the influence mechanism of the rolling mill system mechanism and adjustment mode on plate shape control, and establishes a compensation control model and control algorithm for the rolling mill system, which provides a theoretical basis and technical support for the precision control of plate shape during the rolling of medium and thick plates.

**Keywords:** medium thick plate rolling; plate shape deviation; shape control; roller compensation technology

### 引言

随着钢铁行业的向高质量、智能化转变,中厚板的应用范围也由传统的造船业扩大到工程机械设备制造、能源设备以及国防建设等领域,对产品的板型质量和稳定性有了更高的标准。板型是衡量中厚板几何质量水平的重要参数之一,板型的好坏对后续加工中的切割、焊接、成型等工序都有重要影响。但因中厚板材轧制的变形程度较大、温度较高且工艺过程中受到复杂的应力作用,板型偏离问题一直得不到根本解决,传统的基于经验调节的板型控制方法也无法满足复杂条件下精确化的控制要求,所以需要以轧制原理为基础全面分析板型偏移产生的根源,并结合轧机支承辊系结构特点进行支承辊列补偿控制研究,从而保证中厚板产品的板型质量水平稳步上升。

### 1 中厚板轧制板形偏差形成机理

#### 1.1 中厚板板形偏差类型及其特征

中厚板轧制过程中的常见板形缺陷主要是板宽向厚

度分布不均匀及出现翘曲、波浪状的板面形状缺陷。板形缺陷既存在于成品的终轧板形状态当中,也贯穿于整个轧制过程当中逐渐形成和发展。中厚板由于较厚,变形抗力大,所以它的板形缺陷具有一定的隐蔽性和滞后性,在刚进行轧制的时候不容易察觉出来,但是随着后期的轧制会不断的扩大。不同板形缺陷之间的形状特点和产生部位有所不同,但根本原因都是因为横向变形不一致而产生的,是一个综合因素共同影响造成的。

#### 1.2 轧制力分布不均对板形的影响机理

在中厚板轧制中,轧制力作为金属产生塑性流动的根本原因,也是保证变形协调的关键所在,在板材宽度方向上分布状况是板形质量生成的基础条件。由于轧制力宽度方向分布不均匀造成的不同部位金属所受单位压力大小不一,使得各部位压下量、延伸率、变形量大小不同,在带钢内部造成横向残余应变不平衡,从而使带钢产生板凸度差、波浪或瓢曲等板形问题。板形质量问题产生的原因

一方面是由于带坯本身厚度、成分和温度分布不均造成的,另一方面也是由于各种设备因素如轧辊弹性变形、辊缝形状变化、轧制制度设定不当等综合作用的结果。而在大压下量和高轧制力的情况下,这些影响因素相乘作用,使轧制力分布误差更加巨大,板形演变趋势更复杂,大大提升了板形精准调控难度。

### 1.3 辊系弹性变形与热膨胀耦合效应

在中厚板轧制过程中,轧机辊系除了受到周期性高速冲击的极大轧制力载荷之外,还要长期处在高温轧制环境下,其力—热响应行为非常复杂,受到轧制力的作用,工作辊以及支持辊发生显著的弹性弯曲变形,造成辊缝沿横向出现非一致变化,引起实际压下量与理论值的不同。此外,由于高温板坯与辊子表面接触传热,辊系产生非均匀热变形,进一步改变了辊系几何形状与接触状况,辊系的弹性变形与热膨胀现象彼此叠加互相干扰,从而使得整个辊缝演变具有时变与非线性的特点,进而直接影响到轧制力分布和金属塑性变形行为,如果缺乏相应的补偿及控制措施,则此种复合影响会在多个道次轧制中逐步累积,最后造成板型偏离严重,不易通过某一工序来消除。

### 1.4 工艺参数变化引起的板形偏差分析

在中厚板轧制过程中,轧制速度、压下规程、加热温度场、冷却制度等工艺技术参数的变化会对中厚板的塑性变形状况和辊系应力产生直接而又重要的影响,轧制速度的变化会引起金属材料变形速率及其流动规律发生改变,造成板带材宽度方向变形不均一;压下规程不当会引起局部超载或者欠载现象的发生,造成钢板厚度差和波浪弯;加热及冷却制度不均会导致板坯温降梯度变化不均,使得金属膨胀冷缩程度不同,进一步恶化了板形缺陷。而且在多道次连续轧制过程中,前面各道次工艺参数的误差会在后一道次不断叠加放大,使得板厚及横截面变形不一致的现象越来越严重。这些因素相互交织在一起共同作用,在一定程度上增加了控制板形难度,所以在轧制过程中要对工艺参数精确地调整以及及时观察。这是保证中厚板板形质量的一项重要手段。

## 2 中厚板轧机辊系结构与板形调控机理

### 2.1 中厚板轧机辊系结构组成及受力特点

中厚板轧机常选用多辊系结构形式来达到要求的大压下率和巨大的轧制力,而辊系不仅要承担板材带来的巨大压力,还要满足足够强度和稳定性的需求,所以辊系结构的设计合理性直接影响了轧制力传递路线以及辊缝的稳定程度,同时也是板形控制的一个物质前提,不同的辊系结构,其受力状况不一样,变形规律也不同,对于不同板形的调节能力也各不相同。

### 2.2 工作辊与支撑辊变形特性分析

在中厚板轧制过程中,工作辊是与钢板直接相接触并且承担着轧制力的主要部件,所以它的变形性能对于钢板的实际压下值以及变形的均匀程度都是至关重要的。由于受

到巨大的轧制力的作用,工作辊会产生活跃的弹性弯曲和接触变形,导致辊缝宽度上的呈曲线状分部,进而对板材横向变形协调产生影响。轴承辊尽管不直接参与到金属变形的过程当中但是通过对工作辊进行支撑来加强整个辊系的整体刚度以及避免了工作辊的弯度继续增大。但是在面对中厚板重载轧制的情况下,轴承辊也并非无动于衷,它同样会出现弹性变形的现象,轴承辊的变形状况会对工作辊产生反向的影响,从而使辊缝形状发生改变。工作辊和轴承辊间变形行为的互相作用使得辊缝的变化更为复杂化,这对板形缺陷的产生也有着相当大的关联,研究两者之间的变形规律能够加深我们理解整个辊系结构对于板形控制的作用机制。

### 2.3 辊型设计及其板形调控作用机理

辊型设计是改进板形质量的有效途径之一,通过对辊身外形的设计,在一定程度上能消除辊系变形板形的影响。不同的辊型对于补偿辊系挠度及热膨胀有着不同的作用效果,其控制机制是对轧制力分布与金属流动状况的一种调整方式,合理的辊型设计增加了对板形的主动调节能力,提高了板形控制的效果,是辊系补偿的主要内容之一。

### 2.4 弯辊、移辊对板形的补偿原理

在中厚板轧制生产中,正逆向弯辊以及串动轧辊技术是进行板形准确调控的重要手段,主要是指通过给辊系加上一定的可以人为控制的外加调节量来完成对辊缝形状以及轧制力的变化调整。其中弯辊是通过对工作辊或者是支撑辊施加一个大小可控的弯矩,来迫使工作辊或者支撑辊产生变形从而使辊缝出现沿轧制宽度方向上的合理变化,进而可以主动调节钢板宽度方向上不同的压下量,达到对钢板板形缺陷进行矫正的目的。而串动辊则是通过对上下工作辊以及支撑辊的不同位置进行横向、纵向的移动从而使得钢板与辊系产生不同的接触面从而使钢板在轧制过程中产生必要的横向流动,使得板形得到改善。这两种方法都有着快速反应、调节幅度大、可以任意组合使用等优点在多道次的中厚板的轧制过程中都可以有效的解决由于轧辊弹性变形、轧辊的热膨胀以及轧制力分布不均等因素产生的各种板形缺陷,从实质上来讲是对辊系的受力情况以及钢板的变形过程的一种主动干扰进而完成对钢板精度的动态性调整以及持续改进。

## 3 辊系补偿控制模型与方法

### 3.1 板形偏差的数学描述与建模思路

对于中厚板的轧制板形控制而言,在实现对板形缺陷调节之前,首先要建立准确有效的数学模型来表述板形缺陷。这种表述既要反映板材横断面形状如横断面厚度分布、波浪度、翘曲等几何形状缺陷的情况,也要反映板材沿轧制方向上不同位置的动态变化情况,通过对板形缺陷与轧制参数、轧机辊系状态参数、金属材料力学性能的关系给出定量的关系式,就可以把复杂的轧制变形过程转换成可以计算、可以分析的数学关系式,为轧机的控制提供具体

的目标参考及反馈信息。在构建数学模型时,要充分考虑到不同的影响因素,诸如轧制力沿板宽向上的分布差异,工作辊、支撑辊的挠曲变形情况,轧机辊系的热膨胀引起的几何尺寸变化,中厚板横截面上的温差情况等,通过合理近似和简化处理成为一些连续或离散的函数关系,用来描述板形响应相对于辊系调整量的变化情况。这种表述方式及其思路,一方面为后续的辊系补偿控制模型的建立奠定了基础,另一方面也为主动板形控制方法的选择、算法的设计及在线调节提供了重要的依据和计算基础。可以说是对中厚板轧制进行精确板形控制的前提条件。

### 3.2 辊系补偿控制模型的建立

中厚板轧制过程中的板形控制的核心就是在板形的数学表征基础上,把辊系调节变量有规律地加入到控制方程中,建立闭环形式的板形控制模型。即通过建立弯辊力、窜辊量等可调参数与板形偏差之间的函数关系,能定量表达各种调节手段对板形产生的影响,达到预估并补偿板形偏差的目的。模型的建立既要考虑到轧制力分布情况,又要考虑各种辊系弹性变形情况及其热膨胀情况和中厚板材本身的一些物理性能的差异等问题,建立起来的模型既符合实际的情况也具有可算性及可行性,为辊系补偿控制提供可靠的数据支持,完成弯辊力及窜辊量的最佳配置,提高了板形调整的精度和反应时间,在多道次的中厚板轧制中抑制了板形偏差的累积,为进一步完成优质的板形控制提供了思路和方法上帮助。

### 3.3 弯辊力与移辊量协调控制方法

在中厚板轧制的过程中,钢板厚,轧制力大并且温差较大,单凭一种调节措施,例如单纯地使用弯辊或者单靠移辊很难实现对于复杂板形的有效控制,所以必须要采取弯辊力和移辊量的协调控制法,在弯辊时加以适当的力矩,移辊时予以准确的距离修正,来对轧辊系统所受到的压力以及板材自身的变形情况进行一个全面的掌控,在横截面上使得轧制压力和压下量达到平衡的效果<sup>[1]</sup>。协调控制最关键的一点就是找到两种调节方式的最佳配合比例,在补偿了板形缺陷之后,两者互不影响,而且还能对轧钢过程中的变化情况做出反馈。建立板形反应和调节变量之间的一种函数关系,从而使得弯辊力和移辊量二者之间相互联系、同步变化,调节起来更加顺畅平稳,也增强了调节的灵敏度和稳定性。协调控制法在实际运用中,可以有效的遏制由于轧辊系统的弹性变形,热膨胀效应还有生产的波动导致产生的累积板形误差,保证中厚板在多次反复的轧制中具有理想的几何尺寸。

### 3.4 板形在线调节与控制算法原理

伴随着现代自动控制技术、传感器技术和信息技术的

发展进步,中厚板轧制板形控制也向着在线化、智能化的方向进步着。板形在线调整和控制算法就是针对实时检测到的板形数据进行迅速地捕捉、处理和分析,进而达到对钢板变形状况的实时监控和及时反馈的功能<sup>[2]</sup>。它根据当前时刻获得的数据,随时更新和求

出所需要的弯辊力、窜辊位移以及其他可调变量来精准调节辊系,达到对板形差值的瞬时校正。此类算法既可以在轧制过程中对因为轧制负荷变化、轧辊系统的弹性变形及其温度差异造成的板形动态变化做出响应,又可以通过前期数据的统计分析及预测功能,对后续轧制过程做出预先调节,增强板形控制的可靠性、实时性,并且通过不断地校核及完善控制变量,在整个轧制过程中始终维持板坯处于所设定的板形控制目标范围之内,减少板形差值的积累及变化幅度,为精确轧制作业提供了有力及科学的技术支持。在线修正与控制算法的使用提高了板形控制的速度,也是智能化、信息化轧制生产线发展的坚实基础。

### 4 辊系补偿控制技术的优化与发展方向

在现有的辊系补偿控制系统的基础上,结合不断的完善模型参数及控制方法等可进一步提升对于板形控制的准确度与适用性<sup>[3]</sup>。今后,随着对轧制生产过程数据采集以及计算的能力增强,辊系补偿的控制技术将会更加强化多种因素相互影响情况下的协同调整水平并向智能化、自学习方式转变,从而给予中厚板板材形状性能品质的不断提升以更为强有力的技术保障。

### 5 结语

中厚板轧制的板形缺陷问题是由其形成原因复杂、影响因素众多造成的,是技术难题,它严重影响着产品的质量。通过对板形缺陷产生的原因进行系统的解析,探究轧机辊系结构及其调节原理,建立辊系补偿控制模型及控制方法等手段能从源头上解决中厚板的板形控制难题;其研究结果能够为中厚板轧制造出过程中的工艺改进以及板形质量稳定控制提供理论支持及技术参考。

#### [参考文献]

- [1]徐俊骏.中厚板轧制中平直度的分析与控制研究[J].冶金与材料,2025,45(2):22-24.
- [2]杨实禹.中厚板轧制平面形状控制的条元法模型与优化设计[D].河北:燕山大学,2024.
- [3]李祥.轧机辊缝尺寸优化在中厚板轧制中的应用[J].冶金与材料,2023,43(10):25-27.

作者简介:陈思旭(1991.7—),性别:女,毕业院校:新乡学院,所学专业:机械设计制造及其自动化专业,当前就职单位:安阳钢铁建设有限责任公司,职称级别:工程师。