

· 专家论坛 ·

热轧带钢新技术的发展

刘相华 王国栋  
( 东北大学 )

摘 要 介绍了近年来热带连轧生产中的高精度轧制技术、智能化轧制技术、薄规格轧制技术、自由程序轧制技术、组织性能控制技术等新技术的发展与应用情况 , 对新世纪热带轧制技术的发展作了展望。

关键词 热轧带钢 高精度 人工智能 薄规格 自由程序轧制

DEVELOPMENT OF ADVANCED TECHNOLOGY IN  
HOT STRIP ROLLING

Liu Xianghua Wang Guodong  
( Northeastern University )

Synopsis The advanced technologies such as high precision rolling , application of AI in rolling , hot thin strip rolling , free schedule rolling and microstructure evaluation are introduced and trend of development in the hot strip rolling also discussed .

Keywords hot rolled strip high precision artificial intelligence thin strip free schedule rolling

1 前 言

热轧板带钢生产一直是轧制行业中高新技术应用最为集中、人们最为关注的领域。新世纪到来之际 , 回顾过去 , 展望未来 , 将有利于我们把握方向 , 追踪国际上的进展 , 不断提高我国热轧板带钢生产的技术水平 , 努力促使热轧板带生产成为我国从钢铁产量大国向钢铁技术强国迈进的排头兵。

本文从介绍近年来热带连轧生产中的高精度轧制技术、智能化轧制技术、薄规格轧制技术、自由程序轧制技术、热带无头轧制技术、组织性能控制技术等新技术的发展与应用情况入手 , 对新世纪热带轧制技术的发展加以展望。

2 近 20 年轧制技术的进步

伴随着近 20 年来相关技术领域的技术进步 , 热轧带钢生产和研究领域新技术层出不穷 , 推进了

工艺、设备、技术飞跃式的发展。表 1 列出了轧制过程中主要参数控制的技术进步情况。

表 1 近 20 年热轧带钢生产技术的进步

时间	20 世纪 80 年代前	20 世纪 80 年代	20 世纪 90 年代	2000 年后
厚度控制	测厚仪 AGC 监控 AGC	液压压下 绝对值 AGC	前馈 AGC 流量 AGC 机架间测厚、测速	智能厚控系统
宽度控制	立辊宽度控制	AWC(R 机组) 立辊短行程控制	AWC(F 机组) 高精度张力控制	轧件头尾曲线优化控制
板形控制	基于负荷分配的板形控制	各种板形控制 轧机(CVC、PC、HCW...)	板形板厚解耦控制	板形、板凸度、断面轮廓综合控制
其他	热装轧制 计算机设定 参数检测	自由程序轧制 直接轧制 冷却控制	薄板坯连铸连轧 热轧无头轧制 热轧超薄规格 在线磨辊、高速钢轧辊	智能轧制技术 信息处理技术 薄带钢铸轧

联系人 : 刘相华 教授 , 博导 , 沈阳市( 110006 ) 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室 105 信箱

### 3 高精度轧制技术

提高热轧带钢产品的精度,一直是轧钢技术人员不懈追求的目标,也是推动轧制技术进步的动力。提高热轧带钢尺寸精度主要可从以下两方面入手:

(1)提高轧制参数的预设精度;

(2)开发高性能的在线自动控制系统,如 AGC、AFC 等。

提高轧制参数的预设精度是一项根本性的措施,这里包括轧制力的设定、轧件温度的设定、辊缝的设定、弯辊力的设定等等。数学模型是预设计算的核心,数模结构和系数对设定计算都有重要的影响。对数模结构的调整一般都很慎重,但模型系数需要根据轧制条件的变化经常调整,以使数模能够工作在最佳状态。提高数模精度的一个非常有效的措施是利用自适应系数,根据参数的实测值以及偏差趋势来修正数模的预报值。自适应又可分为短期自适应和长期自适应,短期自适应可用于对快速变化因素影响的修正,而长期自适应可用于缓慢变化因素影响的修正。自适应技术的应用对提高轧制力、温度等关键参数的预报精度起到了很大的作用,促进了轧制过程控制精度的提高。

但是,不能过分依赖于自适应,那种忽视初始设定精度,企图全靠自适应来解决问题的想法和做法是错误的。特别是在钢材转为买方市场的今天,频繁更换品种规格不可避免,自适应不能解决更换规格后第一卷带钢的问题,特别是第一卷带钢头部的精度必须有高精度的初始设定。

另一方面,AGC 和 AFC 等自动控制系统的发展,为板厚、板形精度的提高作出了巨大的贡献。经历了测厚仪 AGC、监控 AGC、液压 AGC、绝对值 AGC、前馈 AGC、流量 AGC 等发展过程之后,热轧带钢的自动厚度控制技术已日臻完善,目前现代化热轧带钢机组厚控水平达到: $\pm 0.025 \text{ mm}$  占全长超过 95%; $\pm 0.050 \text{ mm}$  超过 99%。板形控制已由过去的平直度和凸度控制发展为包括平直度、凸度、边部减薄和局部高点的断面轮廓综合控制。

### 4 智能化轧制技术

在热轧带钢生产中采用人工智能技术始于 20 世纪 90 年代。首先是在日本,然后是德国,接着在全世界掀起了一个在轧制过程中应用人工智能的

热潮。目前在轧制过程中的各个环节,从生产计划的编排、坯料的管理、加热中的优化燃烧控制、轧制中的设定计算及厚度和板形控制、以及成品库的管理等等都有人工智能方法成功应用的例子。人工智能已经成为现代化轧机高精度控制的一个非常有效的工具。

人工智能在轧制领域中的应用意义是深远的。从某种意义上说,它引起了人们对轧制过程本质认识方法方面的一次革命。由于轧制过程多变量、非线性、强耦合的特征,利用传统方法,从几条基本假设出发,按照推理演绎的方法,导出某个或某些参数的计算公式,这条路已被实践证明不能满足现代化高精度轧制过程控制的要求。现代轧制技术的发展,呼唤着新的、更加强有力的方法出现。

应运而生的人工智能适应了这种需要。首先,它避开了过去那种对轧制过程深层规律无止境的探求,转而模拟人脑来处理那些实实在在发生了的事情。它不是从基本原理出发,而是以事实和数据作根据,来实现对过程的优化控制。过去轧机自动控制系统的缺憾和不足,是靠操作工头脑的判断、通过人工干预来弥补的。有了人工智能参与之后,这部分工作有可能通过计算机来实现。因为利用人工智能方法武装起来的计算机依靠的是数据,从生产线上所发生的过程中采集实际数据,经过处理后再用于指导生产实践。这种方法针对性强,可靠性高,更有利于轧制过程的优化控制。

当今社会是信息化的社会,现代化的轧钢厂配备有各种传感器,生产过程中随时测取大量的数据,这些数据是宝贵的无价的信息资源,可以从中提取出优化轧制过程所需要的实际知识,为数学模型的调优提供依据。目前,智能化的仪表发展迅速,高密度、多通道在线数据采集系统已经广泛应用,获取信息的手段非常先进。但是,这些仪表和系统提供的信息量是极其巨大的,可以说是“海量”,因此这些信息的处理必须采用先进的智能技术,才能以高速度和高准确度从中提取到需要的知识。所以,智能化和信息处理是一对互相支撑、互相补充的孪生兄弟。顺应轧制理论和轧制技术发展的这种新形势,东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室近年来在轧制过程的智能优化方面开展了一系列研究工作,取得了一定的成绩。

5 自由程序轧制技术

计划经济转为市场经济,卖方市场转为买方市场,迫使我们关注自由程序轧制技术的发展。按照用户订货组织生产,适应连铸—直接轧制的要求,需要打破“棺”型规程的限制,采取相应的技术措施。

(1)工作辊周期往返横移。目的是分散轧辊的磨损和热凸度,特别是避免带材边部的局部磨损峰值。横移方式有定步长和变步长两种,变步长方式会得到更好的效果。对 CVC 轧机,轧辊横移要受到辊型曲线的限制,因而最近有将 CVC 轧机的后 2 架(F6、F7)改为平辊加周期横移的趋势。

(2)热轧润滑。能够大幅度减轻轧辊磨损,降低轧制力,提高产品表面质量。起初试用边部润滑轧制,发现可大幅度增加同宽的轧制长度。全宽润滑轧制效果更佳,轧辊消耗可降低 30 % 以上。

(3)高精度精轧设定模型。自由程序轧制中频繁改变规格,短期自适应的作用受到影响,所以必须有高精度的设定计算模型,以保证变换规格时的轧制精度。要有灵活的数模管理系统,及时对轧制力模型、温度模型、磨损模型和热凸度模型等进行系数整定与优化,使之能够在频繁变换规格中保持工作在最佳状态。

(4)新材质轧辊与在线磨辊。采用高铬轧辊比传统的高碳镍铬铸铁轧辊耐磨性能可提高 50 % ,高速钢轧辊比常规轧辊寿命可提高 3 倍。在线磨辊可以大幅度延长换辊周期,采用这些措施都有利于实现自由程序轧制。

6 热带无头轧制及薄规格轧制技术

1996 年日本川崎制铁公司千叶厂 3 号机组在世界上首次实现热带钢无头轧制,在国际上引起轰动,被认为是近年来热带生产中最为引人注目的技术进步。无头轧制的通常做法是在精轧机之前把前后两块中间坯头尾焊接在一起,使精轧过程能够无头尾地连续进行。

热带钢无头轧制的关键技术有:轧件运行中的焊接技术、焊缝周围去毛刺技术、确保各环节最小等待时间的高精度轧制节奏控制技术、动态变规格

轧制技术、高速剪切、高速卷取技术等。川崎公司千叶厂无头轧制的主要参数是:板宽 800 ~ 1 900 mm,中间坯厚度 20 ~ 40 mm,已稳定生产的产品最小厚度 1.0 mm,最短轧制节奏 45 s,操作效果见表 2。

表 2 川崎公司千叶厂无头轧制的操作效果

	项 目	单卷轧制	无头轧制	收 益
质量	$\pm 30\mu$ 厚度命中率/%	96	99.5	提高 3.5
	宽度精度/mm	6	3	改善 3.0
	卷取温度精度/℃	$\pm 30$	$\pm 15$	提高 15
生产率	提高生产率/%	100	120	提高 20
	减少换辊时间/%	100	10	减少 90
成材率	减少板形封锁/%	100	20	减少 80
	减少表面缺陷/%	100	10	减少 90

开发热轧薄规格产品是近年来国际上热带钢生产的一个热点。因为热轧薄规格能够替代部分冷轧产品,具有较高的附加值。目前热带轧机已轧出 0.76 mm 的薄带钢,国外有的公司已把轧薄目标定到了 0.6 mm。

7 组织性能控制技术

热轧带钢的内部组织与性能是重要的质量指标,需要加以在线预测及控制。由于轧制过程中,影响轧后带钢力学性能的因素众多,化学成分、工艺参数对最终的性能有复杂而重要的影响。由于因素复杂,实测数据波动大,散点图离散程度严重。目前理论研究滞后于现场需求,理论预测性能仍有较大的困难。虽然传统上用数理统计(回归)方法可以在一定程度上进行预测,但是,由于函数类型和主要影响因素难以确定,所以尚无完美的方法来处理这种复杂的非线性关系。东北大学 RAL 与宝钢合作,从 1992 年开始,采用 ANN 进行组织性能的预测,取得了较好的效果。实测数据取自宝钢热轧 MS 收集的 100 组轧制 400 MPa 级别 C-Mn 钢生产数据。热轧过程控制机(PCC)记录的主要生产工艺参数为产品厚度、含碳量、含硅量、含锰量、终轧温度和卷取温度。主要力学性能检验数据为屈服强度、抗拉强度、延伸率和显微

(下转第 24 页)

硬度。训练出来的神经网络,可对样本数据以外的生产数据进行预测和分析。神经网络模型的预测精度基本在 $\pm 10\%$ 内,具有良好的推广能力。

奥钢联林茨厂开发了热轧带钢集成质量控制软件,称为“VAI-Q Strip”系统。该系统已于1997年投入在线使用,对低碳钢和低合金高强度钢进行组织性能预报。使用效果是力学试样的检验量减少 $40\% \sim 50\%$ ,仅低碳钢的检验费用节省18万欧元/年。通过优化成分减少Mn含量节省费用17万欧元/年。

## 8 结 语

热轧带钢生产技术在过去20年里取得了很

大的进展,新技术的应用在提高产品质量、降低生产成本、增强竞争能力等方面发挥了重要作用。进入新世纪后,这些新技术将会逐步得到推广应用,由于目前在世界范围内钢铁产量已供大于求,我国钢材生产也已经从追求产量规模向品种质量效益方面转变,虽然不能排除个别新建生产线出现的可能性,但是总体上的趋势是以改造原有生产线为主,用高新技术武装传统产业。我国的热轧带钢轧机要适应这种趋势,把采用新技术、改造现有工艺设备作为增强企业竞争实力的重要手段,为我国完成从钢铁生产大国向钢铁生产技术强国的转变作出贡献。

(收稿日期 2000-05-08)