

冷连轧带钢板形 控制与检测

杨光辉 张 杰 曹建国 李洪波 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

冷连轧带钢板形控制与检测

杨光辉 张 杰 曹建国 李洪波 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2015

内 容 提 要

本书共分8章。第1章主要是对冷连轧技术及板形问题的综述;第2章主要介绍了冷轧带钢先进板形控制和检测技术;第3章主要介绍了板形控制性能主要评价指标;第4章主要介绍了板带轧制有限元仿真模型;第5章主要介绍了基于遗传算法的工作辊磨损预报模型;第6章主要介绍了1700mm四辊冷连轧机组工艺改进;第7章主要介绍了2180mm六辊冷连轧机组工艺改进;第8章主要介绍了宽带钢冷连轧机选型配置研究。

本书适合轧钢工程技术人员、研发人员阅读,也可作为高等工科院校冶金、机械及自动化相关专业的本科生、研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

冷连轧带钢板形控制与检测/杨光辉等编著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-5024-6758-6

I. ①冷… II. ①杨… III. ①冷连轧—带钢—板形控制
IV. ①TG335.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第276334号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 杨帆 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6758-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2015年1月第1版, 2015年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 15.5印张; 373千字; 236页

56.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

钢铁工业是国家的基础产业，它直接体现了一个国家国力的强盛。随着科学技术的日益发展，生产力水平的不断提高，工业用户对带钢的产品质量提出了越来越苛刻的要求。

多年的研究和生产实际表明，轧机的机型、辊形、工艺和控制模型是决定宽带钢冷连轧机板形控制性能的 4 个基本要素，并且机型是第一位、基础性和长期起作用的因素。为满足工业用户日趋严苛的带钢板形质量要求，近年来国际上涌现了 CVC、HC、PC 等多种新机型和辊形，并在冷轧带钢工业生产中得到广泛应用。武钢 1700mm 冷连轧机是我国引进的第一套现代化冷连轧机，1995 年完成了计算机控制系统改造，2004 年 3 月完成了酸轧联合机组为主要内容的技术改造：对连轧机组的第一、二和五机架进行了工作辊窜辊改造；第一、二机架采用单锥度辊边降控制技术；第五机架采用 SmartCrown 连续变凸度技术。武钢这种轧机机型布置具有先进、合理和适用的特点，在国内是仅有的，在国外也不多见。特别是武钢首次引进的由奥钢联公司开发的 SmartCrown 连续变凸度技术是世界上在宽带钢冷连轧机上的首次工业应用，给冷轧带钢板形控制提出了新的研究课题。武钢 2180mm 冷连轧机是我国 2005 年引进投入使用的先进超宽冷连轧机，整套机组机械部分由德国西马克-德马克公司（SMS-DEMAG）设计制造，部分部件由中国一重生产，控制部分由西门子（Siemens）公司引进。该冷连轧机可以对带钢厚度、板形及边降进行实时控制。在板形控制方面，该轧机具有如下特点：（1）具有丰富板形控制手段。各机架均具有压下倾斜、工作辊弯辊、中间辊弯辊和中间辊窜辊四种板形控制手段，第五机架还配备有分段冷却手段。（2）具有板形闭环控制系统，特别是第一和第五机架后分别配备了接触式应力测量辊和 SIFLAT 非接触式板形仪，板形闭环控制系统能够利用板形仪的测量值进行闭环控制，自动对上述手段进行调节。SIFLAT 非接触式板形仪是世界上在超宽带钢冷连轧机上的首次工业应

用,而且2180mm冷连轧机是我国第二套超宽带钢冷连轧机,给冷轧带钢板形检测和控制提出了新的研究课题。

本书以1700mm冷连轧机和2180mm冷连轧机为研究对象,详细分析和介绍了目前世界上先进的冷连轧机板形控制和检测技术,体现了技术先进性,希望本书能对我们掌握当今世界上先进的板形控制技术有所帮助和指导。本书所分析和研究的内容既可作为设计同类轧机时选型的依据,也可作为同类轧机更新改造的样板,体现了很强的实用性。

本书共分8章。第1章主要是对冷连轧技术及板形问题的综述;第2章主要介绍冷轧带钢先进板形控制和检测技术;第3章主要介绍板形控制性能、主要评价指标;第4章主要介绍板带轧制有限元仿真模型;第5章主要介绍基于遗传算法的工作辊磨损预报模型;第6章主要介绍1700mm四辊冷连轧机组工艺改进;第7章主要介绍2180mm六辊冷连轧机组工艺改进;第8章主要介绍宽带钢冷连轧机选型配置研究。

本书参阅了大量国内外文献资料,特别是近几年的最新研究进展,结合编者本人的研究成果写成此书,在此对相关著作和文献的作者表示感谢。编者在求学和工作期间,得到了武汉钢铁集团多位领导和技术人员的大力支持,在此表示由衷的感谢。编者所在课题组的老师、博士和硕士为本书的编写付出了大量的辛勤劳动,在此一并表示感谢!

参加本书编写的有杨光辉、张杰、曹建国、李洪波。杨光辉担任主编。本书的编写得到了“北京高等学校青年英才计划(YETP0369)”和“中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-14-033A2)”的资助,在此表示衷心的感谢!

本书适合轧钢工程技术人员、研发人员阅读,也可作为大专院校有关专业的研究生、本科生的教学参考书。

限于编者的水平,不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2014年6月于北京科技大学

目 录

1 冷连轧技术及板形问题综述	1
1.1 板带材生产发展概况	1
1.2 生产工艺流程	2
1.3 计算机控制系统	3
1.4 板形的描述	4
1.4.1 横截面外形	5
1.4.2 平坦度	6
1.4.3 PCFC 控制	10
1.4.4 板形生成和板形良好条件	11
1.5 板形控制的工艺理论	13
2 冷轧带钢先进板形控制和检测技术	15
2.1 轧机机型	15
2.2 柔性和刚性辊缝	18
2.2.1 影响辊缝曲线的因素	18
2.2.2 柔性辊缝型	20
2.2.3 刚性辊缝型	23
2.2.4 刚柔辊缝兼备型	24
2.3 辊形设计原则	26
2.3.1 辊形设计方法	26
2.3.2 轧辊辊形	27
2.3.3 轴向移位变凸度技术	27
2.4 轧制工艺控制手段	31
2.4.1 液压弯辊	31
2.4.2 液压窜辊	32
2.4.3 弯辊和窜辊结构	32
2.4.4 丰富的板形控制手段	33
2.5 板形控制策略	34
2.5.1 控制模型	34
2.5.2 数学模型	37
2.6 平坦度和板廓检测技术	42
2.6.1 平坦度检测技术	42
2.6.2 板廓检测技术	52

2.7 板形控制目标曲线设定	52
2.7.1 常用板形控制目标设定方法	53
2.7.2 补偿检测	54
2.7.3 下道工序要求	54
2.7.4 轧制过程要求	55
2.7.5 现场使用的目标曲线	55
2.8 板形平坦度缺陷模式识别	56
2.8.1 最小二乘拟合法	56
2.8.2 BP 神经网络	58
3 板形控制性能主要评价指标	70
3.1 辊缝横向刚度	70
3.2 辊缝各点横向刚度系数	70
3.3 辊缝凸度调节域	71
3.4 承载辊缝形状分布特性系数	72
4 板带轧制有限元仿真模型	73
4.1 轧辊的弹性变形理论	73
4.2 轧机辊系弹性二维静态有限元模型	74
4.3 板带轧制三维有限元模型	79
4.3.1 轧件三维弹塑性动态有限元模型	80
4.3.2 轧机辊系三维静态有限元模型	84
4.3.3 轧辊与轧件一体化的 1/2 三维静态有限元模型	88
4.3.4 轧辊与轧件一体化的完整三维静态有限元模型	89
4.3.5 轧辊与轧件一体化的 1/4 三维动态有限元模型	91
4.3.6 轧辊与轧件一体化的 1/2 三维动态有限元模型	94
5 基于遗传算法的工作辊磨损预报模型	97
5.1 影响磨损的主要因素	97
5.2 磨损辊廓形成的影响因素	97
5.3 磨损预报模型	98
5.4 模型参数分析	100
5.5 参数优化	100
5.5.1 遗传算法的基本步骤	100
5.5.2 参数优化的程序设计	101
5.5.3 程序结构及流程图	105
5.6 参数优化结果分析	105
6 1700mm 四辊冷连轧机组工艺改进	108
6.1 冷连轧机辊缝凸度影响特性研究	109

6.1.1 辊缝凸度计算模型分析	109
6.1.2 计算工况和参数的确定	109
6.1.3 辊缝凸度主要影响因素分析	109
6.2 冷连轧边降控制与凸度、平坦度综合控制研究	111
6.2.1 宽展沿横向的分布	112
6.2.2 金属横向流动的影响因素分析	113
6.2.3 带钢平坦度模型	115
6.2.4 带钢边降与金属横向流动分析	116
6.2.5 冷连轧机板形综合控制策略	117
6.3 边降控制辊形配置	118
6.3.1 冷轧带钢边降构成分析	118
6.3.2 常规配套辊形的分析	119
6.3.3 单锥度辊辊形设计	119
6.3.4 单锥度的板形控制特性	121
6.3.5 边降控制窜辊模型的研究	122
6.3.6 单锥度辊的工业应用	123
6.3.7 边降控制辊形配置分析	124
6.4 连续变锥度工作辊板形控制特性分析	131
6.4.1 连续变锥度工作辊的设计	131
6.4.2 板形控制特性仿真分析	132
6.5 SmartCrown 轧机板形控制特性研究	135
6.5.1 SmartCrown 辊形设计	137
6.5.2 工作辊辊形和辊缝曲线对比	140
6.5.3 空载辊缝的凸度调节能力对比	143
6.5.4 SmartCrown 轧机板形控制性能分析	144
6.5.5 SmartCrown 辊形改进设计研究	145
6.5.6 改进后的板形调控特性对比分析	147
6.5.7 配套支持辊 FSR 的设计	149
6.5.8 仿真结果分析	151
6.6 考虑带钢压下率的冷连轧机最佳工作辊径配置	153
6.6.1 辊径对轧机刚度特性的影响	153
6.6.2 冷连轧机工作辊最大许用直径的确定	154
6.6.3 配辊方案应用	156
6.7 综合测试分析	157
6.7.1 生产轧机概况	157
6.7.2 测试仪器	158
6.7.3 轧辊辊形的加工	159
6.7.4 工作辊综合测试	161
6.7.5 支持辊综合测试	162

6.7.6 带钢横向厚度的测量	165
7 2180mm 六辊冷连轧机组工艺改进	170
7.1 酸洗-联轧机组工艺流程	170
7.2 酸洗-联轧机组的主要工艺设备对比	173
7.3 中间辊 CVC 辊形曲线	174
7.4 板形调控特性分析	175
7.4.1 不同弯辊力	175
7.4.2 不同板宽	176
7.4.3 不同窜辊量	177
7.4.4 辊间接触压力分析	177
7.5 冷连轧机非成品机架对成品板形的调控功效	178
7.5.1 单机架各板形影响因素对本机架出口板形的影响	178
7.5.2 不同机架对成品板形调控功效模型的建立	180
7.5.3 2180mm 机组不同机架板形调控功效的分析	182
7.5.4 试验分析	186
7.5.5 机架间的影响分析	186
7.6 非接触式 SI-FLAT 板形仪	187
7.6.1 轧机板形控制系统	187
7.6.2 板形计算模型解析	187
7.6.3 简单状况下带钢振动问题分析	189
7.6.4 忽略纤维条间相互作用所引起的板形误差	190
7.6.5 板形计算误差分析	192
7.6.6 板形仪选型应用情况	194
8 宽带钢冷连轧机选型配置研究	196
8.1 选型配置分析	196
8.1.1 选型配置策略	196
8.1.2 冷轧带钢产品对板形的要求	198
8.1.3 冷连轧机机型配置	198
8.2 五机架四辊冷轧机板形控制选型配置策略	199
8.2.1 门户机架	199
8.2.2 成品机架	200
8.2.3 中间机架	201
8.3 六辊冷连轧机的机型配置分析	203
8.3.1 刚性辊缝	203
8.3.2 柔性辊缝	205
8.3.3 刚柔兼备辊缝	206
8.4 宽带钢冷轧机辊系纵向刚度特性对比	209

8.4.1 辊系有限元模型	210
8.4.2 轧制力纵向刚度分析	211
8.4.3 弯辊力纵向刚度分析	214
8.5 冷连轧机不同刚度配置下的板形板厚控制	215
8.5.1 刚度设定	215
8.5.2 各扰动量的影响	216
8.5.3 各控制量的影响	217
8.6 不同机型下的辊间接触压力比较	219
8.6.1 SmartCrown 轧机的辊间压力分析	222
8.6.2 HCW 轧机的辊间压力分析	224
8.6.3 UCM 轧机的辊间压力分析	225
8.6.4 CVC6 轧机的辊间压力分析	228
参考文献	231

1 冷连轧技术及板形问题综述

1.1 板带材生产发展概况

随着我国经济的高速发展, 钢材板带比也不断提高。现代冷轧生产技术基本上以连续化、高速化、专业化为特征, 冷连轧机组是决定产品精度性能及板形的关键, 机组上采用大量的先进工艺技术装备如酸洗—轧制联合机组技术、厚度控制技术 AGC (automatic gauge control)、动态变规格技术 FGC (flying gauge change)、张力控制技术 ATC (automatic tension control)、板形控制技术 PCFC (profile, contour and flatness control) 等。此外, 全氢罩式退火技术、连续式退火技术、彩涂技术等的应用也对提高冷轧产品的性能精度起着重要的作用, 这些技术越来越多地被钢铁企业所采用。我国冷轧产品的需求逐年增长, 下游航空、电气、汽车、家电、建筑等行业的快速发展对冷轧产品的数量、质量、性能、结构和规格等提出了越来越高的要求。

冷轧是带材的主要成品工序, 其所生产的冷轧薄板属于高附加值钢材品种 (图 1-1 和图 1-2)。如果带钢断面形状不好, 出现凸度过大、楔形、镰刀弯; 或者平坦度不良, 出现浪形、翘曲、局部凸起等缺陷, 将严重影响其他各工业部门最终产品的质量和寿命。

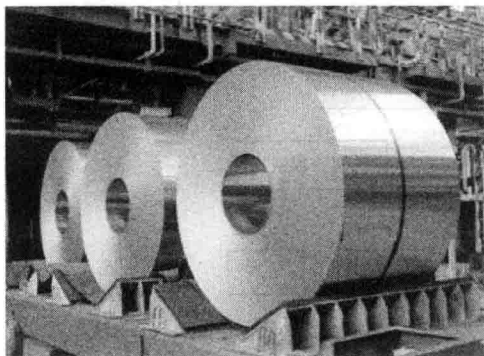


图 1-1 轧后冷轧钢卷

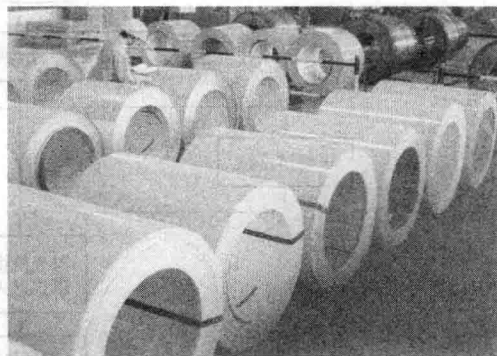


图 1-2 彩色涂层钢板

航空、电气、汽车、民用工业对带钢板形质量有很高的要求:

(1) 航空工业对其所用铝板要做严格的平坦度检验。如果飞机机翼的蒙皮铝板或钛合金板上存在着板形缺陷, 那么在高速飞行下的飞机可能会由于机翼的鼓动而造成事故。

(2) 电气工业对硅钢板的平坦度要求很高。如果制造变压器的硅钢片上存在着板形缺陷, 将使变压器的损耗增加, 容易发热, 对进一步增加电源功率造成困难。

(3) 汽车工业中广泛采用自动化流水线进行生产, 如果钢板上存在板形缺陷, 则不仅无法在自动焊接机上进行自动焊接, 而且会由于输送受到阻碍而使连续生产线中断。

(4) 民用工业生产的洗衣机、电冰箱、食品罐头等产品对它所用钢板的质量要求也很高，如果因为钢板板形不好而影响其外观质量，将会降低产品的价值。

1.2 生产工艺流程

冷轧生产的主要生产工序包括：热轧钢卷的酸洗、冷连轧机组、退火工序、带钢平整、精整处理线、镀层处理线，如图 1-3 所示。酸洗连轧机组一般包括开卷、矫直、焊接、酸洗、轧制、剪切和卷取等过程。其中，在轧制过程中，一般采用五机架连轧方式，其中每一机架采用四辊轧机（两个工作辊和两个支持辊）或六辊轧机（两个工作辊、两个中间辊和两个支持辊）结构。带钢在五个机架里连续轧制，由每个机架上部的液压压下缸调整每个机架内轧辊的负荷辊缝。调节各机架的带钢速度和张力，轧出所需成品厚度。当轧辊磨损或更换轧辊时，其直径发生变化，下支持辊下边有楔形调整装置，以调整轧制线水平，保持轧制水平恒定高度。利用液压压下快速控制的优越性，尽量将来料的厚度误差在第一机架上消除。第五机架为带钢的精轧机架，用以提高厚度精度和板形质量。各机架之间，以及第五机架之后都设有测厚仪和测张力辊，用来测量带钢在各个机架段的带钢厚度和各机架之间的张力。在第五机架后还设有板形测量仪，用于测量成品带钢的板形偏差。甚至在某些冷连轧机的第一机架后也设有板形测量仪，用于测量来料带钢的板形偏差。各机架的液压压下装置上附有压力传感器和位移传感器，测量每个机架的轧制力和

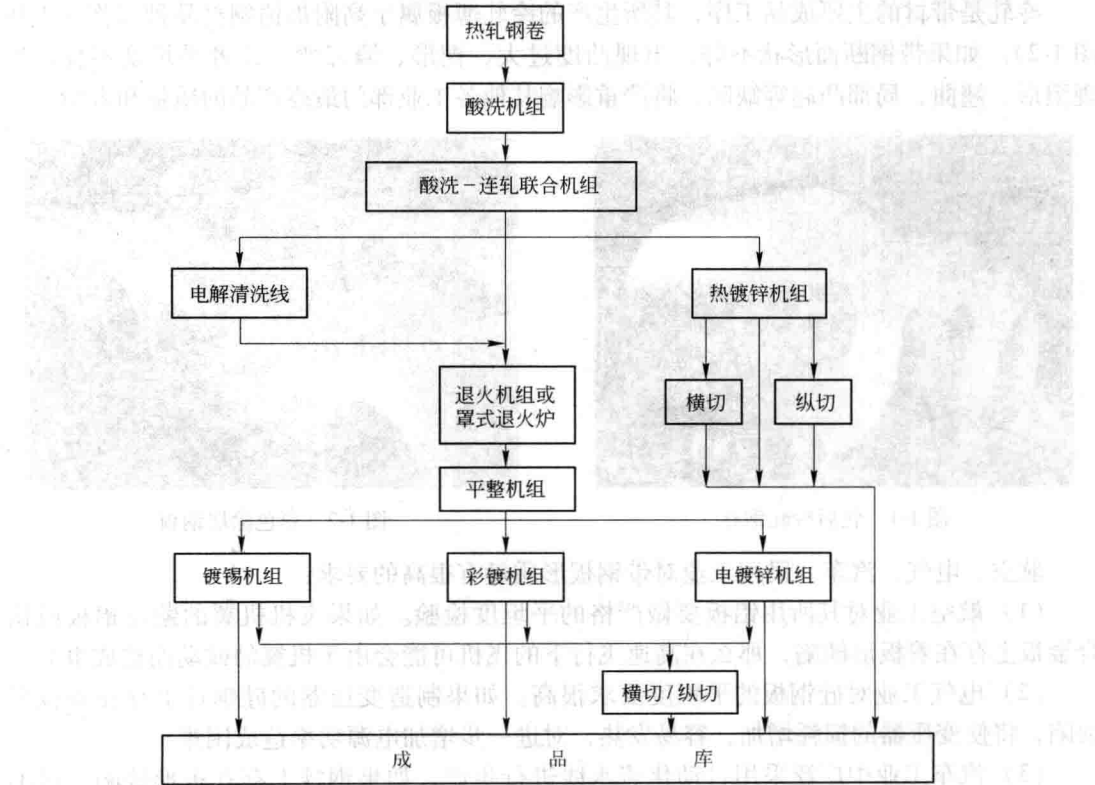


图 1-3 冷连轧生产流程

辊缝。轧制过程中的厚度自动调节,通过上述装置收集数据,并经过计算机、轧制速度调节系统、带钢张力调节系统及各机架轧制力和压下位置调节系统的综合作用完成。除了以上装置外,在每个机架内还设有工作辊正负弯辊液压缸或中间辊正负弯辊液压缸,工作辊轴向窜辊缸或中间辊轴向窜辊缸,同时还有冷却轧辊和润滑带钢用的乳化液系统。

1.3 计算机控制系统

冷连轧机的自动控制是一种复杂的机械、电力、液压的综合控制系统,控制量较多,彼此相互影响、相互制约。因此,一旦在某个机架上出现了调节量或干扰量的变化,则不仅破坏了该机架的稳定轧制,而且也会通过机架间的张力和带钢在各架的出口厚度的变化传递给其他机架,从而使整个轧机的正常轧制状态遭到破坏。为了使轧机内的带钢能够保持在良好的状态下进行轧制,以获得良好的带钢质量,采用了下列自动控制系统:带钢张力自动控制系统、带钢厚度自动控制系统、位置自动控制系统、主令速度自动控制系统、压下自动控制系统、全连续活套自动控制系统、板形自动控制系统及飞剪自动控制系统等。上述自动控制系统通过优化计算机、过程控制机、基础自动化及轧线检测仪表完成其相应的自动控制功能。冷连轧机计算机控制系统包括基础自动化级(L1)、过程控制级(L2)和生产管理级(L3)三方面的内容。

(1) 基础自动化级(L1)。基础自动化级由电气和仪表自动化系统组成,主要功能是对轧制过程进行顺序控制、监测操作、人机对话和数据通讯等;基础自动化采用多台部分联网电仪一体化的 PLC 控制系统,直接面向生产过程,完成各自生产过程的实时控制,并与二机过程计算机进行实时数据通讯,接收过程计算机的模型计算结果,对生产过程进行控制;其软件功能主要包括设定值的校正和再设定、与上位过程机交换数据、显示生产过程设定值、实际值、控制系统在线诊断、故障趋势记录、故障历史记录、事故报警监视、显示传动装置状态及工艺流程等。

实现的主要功能包括:液压压下控制(APC);液压弯辊控制(AFC);液压窜辊控制(SHIFT);流量 AGC 控制(包括各机架的 AGC 控制功能);轧机顺序控制(包括酸轧联机、自动穿带、加减速、正常停车、快速停车等控制);卷取张力和机架间张力控制;主速度级联控制等。

(2) 过程控制级(L2)。过程控制级在整个计算机控制系统中占有重要的地位,实现的主要功能有:

1) 与三级机通讯。接受三级机的生产命令和热轧钢卷数据,向三级机传送生产请求、过程信息和生产结果等。

2) 设定值计算及过程优化。设定值计算包括主令速度和各机架的速度、张力、轧制力、压下量分配等。过程优化包括以最小能耗、最大产品为目的的速度优化和以控制精度为目的轧制程序优化(速度、张力、轧制力和压下量)。

3) 向基础自动化级传送所要求的设定值。包括向各机架的基础自动化系统传送经过优化的设定值:速度、张力、轧制力、压下量等。向酸洗线 PLC 传输带钢原始数据和生产指令等。

4) 板形设定。包括板形参数(辊形、窜辊、弯辊、分段冷却)设定及将板形参数设

定值传输给板形控制计算机系统等功能。板形计算机系统通过窜辊控制、弯辊控制和分段冷却控制等完成对带钢板形的控制。

5) 资料收集。包括全机组内各种过程数据如带钢速度、张力、厚度、轧制力等信息的收集。

6) 数据库管理。包括各种历史数据和参数的管理。

7) 自学习和自适应。在轧制过程中, 计算机系统每隔 4~5s 收集到的实际数据采用自适应功能进行一次计算, 以对其控制模型进行修正, 对过程重新调整。在对每种规格的带钢轧制一段时间后, 过程机将收集到的数据采用自学习功能进行一次计算, 以求得每种规格带钢的最佳轧制程序。

8) 仿真轧制功能。在生产进行或停车时, 技术人员可使用该功能, 以测试新的轧制程序。该功能不向基础自动化系统输出数据, 计算结果和轧制结果可显示和打印。

9) 其他功能。包括各种生产报表(班报表、日报表)输出, 生产过程信息输出和故障报表输出等功能。

(3) 生产管理级(L3)。

1) 生产管理级主要完成生产计划、生产调度、全过程跟踪和质量管理等功能, 其软件功能包括发送生产命令、热轧钢卷数据、轧制数据信息。

2) 接受生产请求、过程信息、生产结果信息; 生产合同处理、生产计划生成、生产计划的动态管理、原料钢卷库、中间库及成品库存管理。

3) 轧辊及换辊计划管理。

某 2030mm 冷连轧机计算机控制系统由三级组成: 生产管理级、过程控制级和基础自动化级, 如图 1-4 所示。

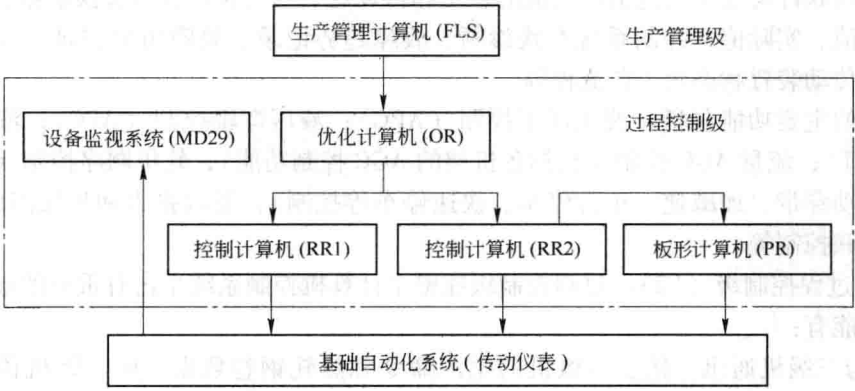


图 1-4 2030mm 冷连轧机计算机控制系统

1.4 板形的描述

带钢的产品质量主要包括性能、厚度、板形和表面等, 其中, 板形与厚度是决定带钢几何精度的两大指标。板形包含带钢平坦度(或称为平直度)、横截面凸度和边部减薄量 3 项内容。目前, 厚度控制技术已经能够将纵向厚度偏差稳定地控制在成品厚度 $\pm 1\%$ 或

$\pm 5\mu\text{m}$ 甚至 $\pm 2\mu\text{m}$ 的范围以内，而横截面凸度和边部减薄量则一般控制在 $10\sim 20\mu\text{m}$ 的水平。20 世纪 80 年代以来，随着汽车、家电等轻工业的发展，工业用户对板形平坦度的要求越来越高，原来的平坦度 20 I 就可以接受，而现在的要求则是 10 I 甚至 5 I。并且带钢边降作为板形控制三项基本内容之一，已经越来越受到工业用户的重视。当前，对于电工钢和造币钢等特殊钢种，由于用户对边降有严格要求，如电工钢板的边部控制精度明显高于其他冷轧薄板，Maueione 给出如下计算实例：设铁芯迭层厚度为 75mm，它由 120 片厚 0.625mm 的芯片叠成，如果冲压时钢板的边部减薄量为 0.0125mm，则 120 片积累误差就达 1.5mm，但其组装误差比此要小得多，显然，若边部精度不高会直接给生产带来麻烦。而对于其他普通钢种，改善边部状况，减小切边量，增加成材率也是发展的趋势，如对 DI 材已提出控制边降的要求。

关于板形问题的研究国内外已进行了 40 年之久。1965 年，以 Stone 提出弹性基础梁理论计算轧辊挠度，开创了板形研究的先河；1968 年 Shohet 提出的影响函数法也成为后来计算轧辊挠度的经典方法。1973 年，日本学者首次将有限元方法用于辊系变形分析中，在以后的发展中逐渐成为一种被广泛认可的精确的计算方法。但迄今为止，板形问题依然是板带轧制技术中的一个热点问题，仍需要大力的研究与开发。

板形问题研究的方面非常繁杂（图 1-5），从设备到工艺、从板形基础理论到板形控制技术、从冷轧到热轧，并且它涉及的学科非常多，从热学到摩擦学、从弹性力学到塑性力学、从计算机仿真到自动控制，均在板形研究的范围之内。经过多年的研究发现，解决板形问题要从“机型—辊形—工艺—控制”一体化的角度入手。

带钢板形（shape）所涵盖的内容很广泛，各文献对板形也有不同的定义方法。从外观表征来看，板形包括带钢横向和纵向整体形状以及局部缺陷；从表现形式看，有明板形和暗板形。它们从不同侧面对带钢形状特征做出了描述。

横截面外形（profile）和平坦度（flatness）是目前用以描述带钢板形的两个最重要的指标。横截面外形反映的是沿带钢宽度方向的几何外形特征，而平坦度反映的是带钢沿长度方向的几何外形特征。这两个指标相互影响，相互转化，共同决定了带钢的板形质量，是板形控制中不可或缺的两个方面。

1.4.1 横截面外形

横截面外形的主要指标有凸度（crown）、边部减薄（edge drop）和楔形（wedge）。带钢板廓如图 1-6 所示。

（1）凸度。凸度 C 是指带钢中部标志点厚度 h_c 与两侧标志点平均厚度之差，它是反映带钢横截面外形最主要的指标。

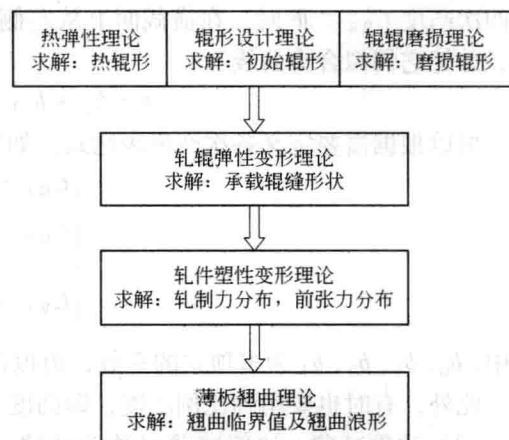


图 1-5 板形控制涉及的理论

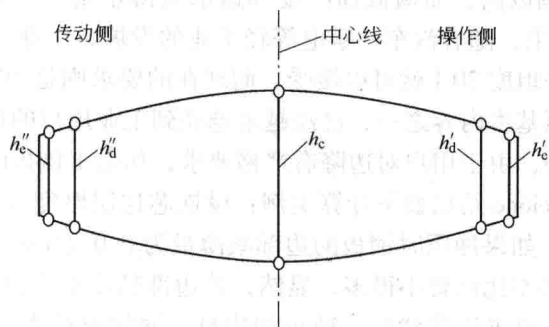


图 1-6 带钢板廓

$$C = h_c - \frac{h_d' + h_d''}{2} \quad (1-1)$$

式中, C 为带钢凸度; h_c 为带钢中点厚度; h_d' 为带钢操作侧标志点厚度; h_d'' 为带钢传动侧标志点厚度。

对于宽带钢, 有时需要进一步把带钢凸度区别定义为一次凸度 C_{w1} 、二次凸度 C_{w2} 和四次凸度 C_{w4} 。此时, 在横截面上从左侧标志点至右侧标志点的范围内测取多个厚度值, 并把它们拟合为曲线:

$$h = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_4x^4$$

可以根据需要定义各次凸度表达式。如采用车比雪夫多项式, 则有:

$$\begin{cases} C_{w1} = 2b_1 \\ C_{w2} = -(b_2 + b_4) \\ C_{w4} = -\frac{b_4}{4} \end{cases}$$

式中, b_0, b_1, b_2, b_4 为多项式的系数, 由拟合得到。

此外, 有时也要用到比例凸度, 即凸度与横截面中点厚度或平均厚度之比。

(2) 边部减薄。边部减薄又称为边降, 是指带钢边部标志点厚度与带钢边缘厚度之差。

$$\begin{cases} E_o = h_d' - h_e' \\ E_d = h_d'' - h_e'' \\ E = \frac{E_o + E_d}{2} \end{cases} \quad (1-2)$$

式中, E 为带钢整体的边部减薄; E_o 为带钢操作侧边部减薄; E_d 为带钢传动侧边部减薄; h_e' 为带钢操作侧边缘厚度; h_e'' 为带钢传动侧边缘厚度。

(3) 楔形。楔形 W 是指带钢操作侧与传动侧边部标志点厚度之差。

$$W = h_d' - h_d'' \quad (1-3)$$

1.4.2 平坦度

带钢平坦度是指带钢中部纤维长度与边部纤维长度的相对延伸之差。带钢产生平坦度

缺陷的内在原因是带钢沿宽度方向各纤维的延伸存在差异，导致这种纤维延伸差异产生的根本原因，是由于轧制过程中带钢通过轧机辊缝时，沿宽度方向各点的压下率不均所致。当这种纤维的不均匀延伸积累到一定程度，超过了某一阈值，就会产生表观可见的浪形。最常见的几种浪形及其形成过程如图 1-7 所示。

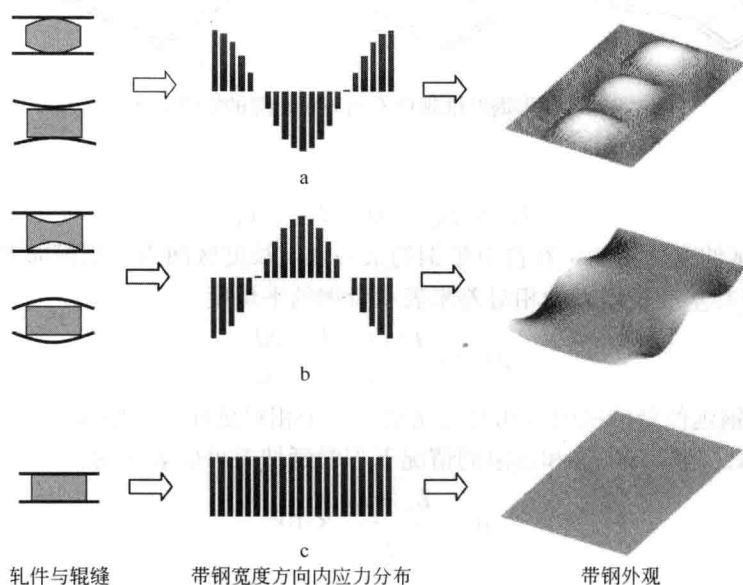


图 1-7 几种常见浪形及其形成

a—中浪；b—边浪；c—平直

现代冷连轧过程中，带钢一般会被施以一定的张力，使得这种由于纤维延伸差而产生的带钢表面翘曲程度会被削弱甚至完全消除，但这并不意味着带钢不存在板形缺陷。它会随着带钢张力在后部工序的卸载而显现出来，形成各种各样的板形缺陷。因此仅凭直观的观察是不足以对带钢的板形质量做出准确判别的。由此出现了诸多原理不同、形式各异的板形检测仪器，如凸度仪、平坦度仪等。它们被安装在轧机的适当位置，在轧制过程中对带钢进行实时的板形质量检测，以利于操作人员根据需要调节板形，或是指导板形自动调节机构进行工作。

在带钢的轧制过程中和成品检验时一直使用着多种平坦度测量手段，所以也就存在着多种平坦度描述方法。

(1) 相对延伸差法。带钢产生翘曲，实质上是带钢横向各纤维条的不均匀延伸造成的。将有平坦度缺陷的带钢裁成若干纵条并平铺在平直的检测台上，可明确地看出各纤维条的长度不同。

图 1-8 所示为最普通的 3 种带钢板形，表现了纤维延伸不均与平坦度之间的定性关系。

单边浪：

$$L_M < L_C < L_0 \quad \text{或} \quad L_M > L_C > L_0 \quad (1-4)$$

双边浪：

$$L_C < L_M \quad \text{及} \quad L_C < L_0 \quad (1-5)$$