

中国金属学会轧钢分会中厚板学术委员会 编著
轧钢信息网中厚板网

中国中厚板

轧制技术与装备

ZHONGGUO ZHONGHOUBAN
ZHAZHI JISHU YU ZHUANGBEI

中国中厚板轧制技术与装备

中国金属学会轧钢分会中厚板学术委员会
轧钢信息网中厚板网

编著

北京
冶金工业出版社
2009

内 容 简 介

本书以我国中厚板轧制技术的发展为背景,基本汇集了截止到2008年底我国(不包括台湾省)已建、在建的中厚板生产厂技术与装备情况;介绍了国际上,特别是我国近年中厚板轧制技术的最新进展,力求反映出在新的形势下,中厚板行业为了实现自身的可持续发展,同时也为了用自己的先进产品服务、引领各行各业的技术不断进步,在生产设备、生产技术、新产品开发、产品性能检测和自动控制等方面所开展的创新性工作和取得的主要进展,反映出中厚板生产技术的发展趋势。同时本书从轧制过程自动化、硬件结构、数学模型、软件开发设计等不同角度阐述了中厚板生产的核心技术。本书附录中以表格形式列举了我国主要中厚板厂的生产设备,以翔实的数据反映出我国已建和在建中厚板轧机的技术特点和先进程度。

本书内容丰富,资料翔实可靠,可供中厚板生产、设计、教学、科学研究及管理部门人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国中厚板轧制技术与装备/王国栋主编;中国金属学会轧钢分会中厚板学术委员会,轧钢信息网中厚板网编著. —北京:冶金工业出版社,2009.10
ISBN 978-7-5024-5036-6

I. 中… II. ①王… ②中… ③轧… III. ①中板轧制 ②厚板轧制
IV. TG335.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第168280号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 李培绿 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5036-6

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009年10月第1版,2009年10月第1次印刷

210mm×297mm;41.5印张;1364千字;640页;1-3000册

180.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

编辑委员会

名誉主编 张晓刚

主 编 王国栋

副主编 沙孝春 曹建宁 孙 玮 李 凡 姜尚青

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁 波	王昭东	王嘉盛	王 华	王忠科
王学智	丛津功	皮开鳌	卢和银	申利斌
田 勇	刘晶志	刘福义	朱金宝	朱红一
牟文恒	乔志明	孙决定	陈其安	陈 新
陈必武	陈凯群	余 伟	苏 洸	单春和
杨伟增	张海军	张润国	张树堂	郑万新
周积智	金永春	洪 伟	钱泽旺	钱洪建
袁建光	唐 荻	黄亮生	蒋景彬	蒋筱春
廖志刚	臧 悦			

撰写委员会

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁修堃	于 明	马连军	王国栋	王 颖
王 薇	王 超	王汝芳	丛津功	田 勇
石建荣	朱伏先	任际军	江 涛	刘延军
孙决定	孙连波	孙明伟	李纪唐	李 龙
刘久明	伏 彬	邱红雷	苏 洸	陆元宁
杜瑞法	宋铤钧	严 凯	陈利惠	张春光
张俊伟	张晓蕾	杨立生	苗英杰	范才彪
范 君	郑万新	周积智	胡贤磊	胡小卓
赵蓉仲	徐 青	徐永华	矫志杰	曹建宁
曹喜发	韩 文	熊明鲜	臧 悦	

序 言

进入 21 世纪以来，我国钢铁工业以每年 20% 以上的增长率迅速发展，目前已经达到 6 亿余吨的产能，2008 年年产量超过 5 亿 t。在此过程中，我国中厚板行业独树一帜，跨越式前进，对国民经济的发展和钢铁工业的腾飞提供了强力支撑，作出了巨大的贡献。

改革开放以来，我国中厚板行业通过自主创新和技术引进，不断提高中厚板工艺技术和装备水平。我们在自主开发 3500mm 中厚板轧机的同时，还采用自主集成和引进国外技术相结合的方式，建立了一批 4000mm 以上的大型中厚板轧机，使我国中厚板生产技术、设备和产品日新月异，发展迅猛。我国目前绝大多数轧机通过建设和改造，具有高刚度强力轧机、轧机自动控制系统、控制冷却系统以及强力矫直机等辅助设备，实现了轧机计算机自动控制。我国已经跻身于世界中厚板强国之列。

利用这些设备先进的中厚板厂，我国开发了一大批国家急需的新钢材品种，满足了国民经济的需要，增强了我国在国际上的竞争实力。例如，利用我国自己开发的 X52 ~ X80 管线钢建设了西气东输 1 线和 2 线；利用我国开发的大型储油罐用钢建设的储油基地大大增强了我国抵御能源风险的能力；利用我国开发的涡壳等水电用钢和蒸发器封头等核电用钢，建设了三峡电站等发电设施，保证了我国的电力供应；利用我国自己生产的高强造船用钢、海洋平台用钢，促进了我国造船和海洋事业的发展；利用我国自己生产的高强桥梁用钢，建设了一大批公路、铁路桥梁；利用我国自己生产的高层建筑用钢，建设了闻名世界的奥运体育场馆，等等。中厚板行业的发展和前进，支撑着我国基础设施的发展和重大工程建设，为国家的发展和人民生活水平的提高立下了汗马功劳。

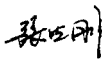
在中厚板生产技术迅速发展的过程中，我们深深认识到，对于中厚板这样的品种多、批量小、技术复杂、质量要求高的品种，我国必须不断总结、不断提高、不断前进，形成自己的技术特点和风格，让我们积累的技术和知识为更

多的人掌握，为更大的创新打好基础。这样才能不断推出具有自主知识产权的中厚板生产新技术、新工艺、新设备，源源不断地将新的高附加值中厚板产品奉献给国家和社会。正是基于这样一个思想，中国金属学会轧钢分会和中国钢铁工业协会科技环保部组织有关院校、设计研究部门的研究技术人员，与企业的工程技术人员一起，经过几年的努力，写成了《中国中厚板轧制技术与装备》这部书。

我相信，《中国中厚板轧制技术与装备》的出版定将促进我国中厚板行业相关人员技术水平的提高和我国中厚板厂生产技术的进步，将对我国中厚板行业的健康发展和国民经济的腾飞做出更大贡献。

热烈祝贺《中国中厚板轧制技术与装备》出版！

中国钢铁工业协会会长
中国金属学会副理事长、轧钢分会理事长
鞍山钢铁集团公司总经理、教授级高工



前 言

中厚板是重要的钢材品种，一般占钢材总产量的10%左右。中厚板广泛应用于基础设施建设、造船、工程机械、容器、能源、建筑等各行各业，在国民经济建设中占有重要的地位。作为一个快速发展的发展中国家，我国正在进行大规模的基础建设，对中厚板的需求一直非常强劲。2008年我国中厚板产量为5971万t，占我国当年钢材总产量的10.26%。

中厚板生产的特点是小批量、多品种、产品性能要求高、生产过程复杂。我国中厚板行业随着国民经济总体的发展而不断进步，现在已经成为中厚板生产的大国。中华人民共和国成立初期，我国只有鞍钢有一台3辊劳特式2300mm中板轧机，产品也只有最初级的碳素钢板。以后，随着我国经济建设需求的增长，在中央和地方企业建设了一批2000~2500mm的中板轧机，而且形成了相应的建设规范。但是，其技术内涵和产品的质量水平与国际先进水平有很大的差距。改革开放以来，我国钢铁工业迅速发展，通过技术引进和自主创新，我国中厚板生产技术、设备和产品也日新月异，发展迅猛。20世纪90年代，鞍钢首先引进了二手的4300mm中厚板轧机，同时酒钢、舞钢也分别引进了3000mm和3800mm中厚板轧机，我国的中厚板生产开始向国际水平靠近。到世纪之交，首钢率先利用国产化技术，建设了具有我国自主知识产权的3500mm中厚板轧机，开发的高刚度轧机、自动控制系统、控制冷却系统、矫直机等辅助设备具有鲜明的特色和优良的性能，开始了我国自主研发大型中厚板轧机的先河。最近几年，我国宝钢、鞍钢等单位采用自主集成和引进国外技术相结合的方式，建设了一批4000mm以上的大型中厚板轧机，我国中厚板的工艺、装备和产品已经逐步达到国际先进水平。据不完全统计，我国已经建成和正在建设的4m级的中厚板轧机15套，5m级的中厚板轧机8套。全部建成后，我国将具备中厚板生产能力近1亿t。

我国新近建设的这一批中厚板轧机，集成了世界上一大批先进的中厚板生产技术和装备，同时采用了我国自主创新的关键技术和共性技术，使得我国的中厚板生产技术和装备达到了国际先进水平。主轧机实现了强化化和高刚度，采用了厚度自动控制、板形控制、平面形状控制等先进、实用的计算机控制系统。我国自主开发了控制冷却系统，其中包括反映世界控冷技术最高水平的超快速冷却技术和DQ技术，与轧机配合，实现了TMCP技术的创新发展。在辅助设备方面，我国引进和自主研发的强力矫直机、滚切式剪切机、超声波探伤、热处理设备等都达到了国际先进水平。利用这些先进的设备和工艺技术，我国开发了经济建设急需的高档次中厚板产品，例如我国西气东输使用的高级别管线钢，大型储油罐用钢，高强度、高韧性、耐腐蚀、焊接性能优良的高级船板，高速铁路桥梁用高强度钢板，奥运场馆和高层建筑用高强、低屈强比、优良焊接性能的建筑用钢，等等。这些钢材已经在我国经

济、社会发展中发挥重要作用，对拉动我国经济发展，推动我国西部、北部、南部地区的社会进步提供了强力支撑。

在我国钢铁工业，特别是中厚板生产技术迅速发展的过程中，我国自己培养、造就的一大批技术人员、研究人员也随之成长起来，形成了我国自己的中厚板技术与产品开发和研究队伍。这支队伍通过不断的技术引进、消化吸收创新、集成创新和自主创新，逐步掌握了现代化中厚板轧制设备和先进的生产工艺，不断推出具有自主知识产权的新技术、新工艺、新设备，源源不断地将新的高附加值产品奉献给自己的国家和社会，同时也为企业带来了丰厚的效益。

在我国中厚板技术发展、前进的过程中，我国广大轧钢工作者深深地感到，我们需要总结我们的进步，需要总结我们的进展，这些总结将会为我国中厚板技术的发展注入新的动力，增添新的活力，促进中厚板轧制技术的进步。本书正是基于这一点，由中国金属学会轧钢分会和中国钢铁工业协会科技环保部牵头，组织相关的企业、高校、设计院的生产、设计、研究人员，组成了编辑委员会，开始了它的组织和编写工作。

这部书以我国中厚板轧制技术的发展为背景，介绍了国际上，特别是我国近年中厚板轧制技术的最新进展，力求反映出在新的形势下，中厚板行业为了实现自身的可持续发展，同时也为了用自己的先进产品引领社会的不断进步，在轧机、控冷、辅助设备等方面所开展的创新性工作和取得的主要进展，反映出中厚板轧制技术的发展趋势。所以，先进性、前沿性是这本书的一大特色。

在信息技术、自动控制技术、计算机技术的支撑下，我国中厚板轧机的自动化水平不断提高，掌握、集成、发展中厚板轧机的自动化技术，已成为我国中厚板轧机发展的关键环节。因此，本书以中厚板轧制过程自动化作为重点，从硬件结构、数学模型、软件开发设计不同角度阐释了中厚板轧机的核心技术，相信本书的出版会对我国从事中厚板轧制技术工作的科技人员掌握和发展核心轧制技术、促进中厚板轧制技术发展有重要的参考价值。

本书的组织人员和撰写人员多数是各个企业的管理、生产、技术人员和各个设计院、高校长期深入企业、与生产实际紧密联系的科研、教学人员。他们从生产实际要求出发，针对生产实际和市场上提出的实际问题，进行长期的研究和开发，研究结果又应用到生产实际中去。所以，这部书紧密联系实际，为生产实际服务，从而满足生产实际需要。

本书附录中以表格形式列举了我国主要先进中厚板厂的生产设备，以其翔实的数据反映出我国已建和在建中厚板轧机的技术特点和先进程度，相信这部书会对我国中厚板专业的科技人员进行工艺改进、设备选型、产品开发有所助益。

轧钢分会副理事长 王国栋
中国工程院院士

2009年6月

目 录

1 中厚板轧制工艺概述	1
1.1 流程概述	1
1.2 工厂平面布置	1
1.2.1 中厚板工厂平面布置概略	1
1.2.2 平面布置与区域总图的关系	7
1.2.3 主生产线布置对平面布置的影响	8
1.2.4 加热炉及板坯库的布置	13
1.2.5 热机轧制在单、双机架上的实现方式	16
1.2.6 冷床布置形式及宽度和面积的选择	19
1.2.7 磨辊间布置	24
1.2.8 成品运输方式对平面布置的影响	28
1.2.9 生产线主要设备的间距确定	32
1.3 中厚板轧机的发展、形式及选择	35
1.3.1 中厚板轧机的发展概况	35
1.3.2 轧机的主要类型及布置形式	40
1.3.3 轧机规格的选择	45
1.4 原料	55
1.4.1 原料种类	55
1.4.2 原料的接收和管理	58
1.4.3 原料的表面检查和清理	59
1.4.4 坯料的定尺切割	61
1.5 加热	62
1.5.1 加热目的	62
1.5.2 加热温度	62
1.5.3 加热速度	62
1.5.4 加热制度	62
1.5.5 加热缺陷	63
1.5.6 加热炉热工操作	63
1.5.7 加热炉生产能力	63
1.5.8 热送热装	64
1.6 除鳞	65
1.6.1 概述	65
1.6.2 高压水除鳞的机理	65
1.6.3 除鳞系统技术参数确定	66
1.7 轧制	66
1.7.1 轧制过程	66
1.7.2 轧制工艺	67

1.7.3 分阶段轧制和多块钢轧制	69
1.7.4 板形控制技术	75
1.8 冷却	76
1.8.1 控制冷却	76
1.8.2 自然冷却	80
1.8.3 强钢冷却	81
1.8.4 缓慢冷却	81
1.9 矫直	82
1.9.1 钢板变形的类型	82
1.9.2 矫直的方式	83
1.9.3 矫直工艺参数	84
1.9.4 矫直缺陷及预防措施	85
1.10 精整	85
1.10.1 剪切和切割	85
1.10.2 表面检查、修磨	89
1.10.3 超声波探伤	90
1.11 热处理	92
1.11.1 概述	92
1.11.2 热处理操作工艺	92
1.11.3 热处理设备配置	93
1.12 成品检验	97
1.12.1 检验标准	97
1.12.2 质量检验内容	98
1.12.3 检验设备	101
1.12.4 国内某厚板厂检验室	101
参考文献	104
2 中厚板的产品和原料	105
2.1 中厚板的定义和分类	105
2.1.1 定义	105
2.1.2 分类	105
2.1.3 尺寸精度	107
2.1.4 力学性能	108
2.1.5 其他性能	108
2.1.6 表面性状	108
2.2 中厚板的生产原料	109
2.2.1 原料的尺寸	109
2.2.2 铸锭	109
2.2.3 连铸坯	109
2.2.4 焊接复合坯	111
参考文献	111
3 中厚板轧机	112
3.1 中厚板轧机机组组成	112
3.2 轧机本体	113

3.2.1	机架装置	113
3.2.2	轧机辊系	118
3.2.3	电动压下装置	125
3.2.4	液压 AGC	129
3.2.5	上支撑辊平衡装置	135
3.2.6	轧机导卫	136
3.2.7	窜辊装置	137
3.2.8	工作辊平衡和弯辊装置	141
3.2.9	轧线标高调整装置	147
3.2.10	支撑辊换辊轨道	148
3.2.11	机架辊	150
3.3	轧机主动装置	158
3.3.1	主电机	158
3.3.2	万向接轴	158
3.3.3	接轴平衡装置	160
3.3.4	安全联轴器	162
3.4	换辊装置	162
3.4.1	工作辊换辊装置	162
3.4.2	支撑辊换辊装置	165
3.5	机前、机后工作辊道和推床	167
3.5.1	机前、机后工作辊道	167
3.5.2	机前、机后推床	168
3.6	立辊轧机	170
3.6.1	现代中厚板生产线立辊轧机的主要作用	171
3.6.2	立辊轧机的设备组成	171
3.6.3	轧辊更换	178
3.6.4	立辊轧机的参数	178
	参考文献	179
4	数学模型	180
4.1	轧制力模型	180
4.1.1	轧辊压扁半径的影响	180
4.1.2	应力状态影响函数的影响	181
4.1.3	变形抗力的影响	181
4.1.4	残余应变的影响	182
4.1.5	相变的影响	185
4.2	温度模型	186
4.2.1	钢材的热辐射和与周围环境之间的对流	187
4.2.2	高压水除鳞造成的温降	189
4.2.3	与轧辊接触产生的热传导	189
4.2.4	塑性变形功转变而来的热量	190
4.3	板凸度模型和平直度计算	190
4.4	弹跳模型	195
4.4.1	辊系弹性变形分析	196
4.4.2	轧机牌坊和相关机械部分的弹性变形	198

4.4.3 新型弹跳模型	198
4.5 轧辊磨损模型	199
4.6 轧制力矩模型	200
4.7 前滑模型	202
参考文献	203
5 轧制规程制定和轧机设定	205
5.1 轧制规程的制定原则	205
5.2 轧制策略的确定	205
5.3 轧机负荷分配	206
5.3.1 恒比例凸度法	207
5.3.2 联合控制凸度-板形法	207
5.3.3 带有板形控制的满负荷道次分配法	207
5.3.4 压下量逐步逼近优化法	208
5.3.5 综合等负荷算法	208
5.3.6 负荷协调分配算法	209
5.3.7 带弯辊的逼近满负荷分配法	209
5.4 轧机设定计算	210
5.4.1 设定计算的作用	210
5.4.2 设定计算的组成结构	210
5.4.3 设定计算数据流	211
5.4.4 设定计算功能的调用	212
5.5 多坯交叉轧制和轧制节奏控制	214
5.5.1 时位图	214
5.5.2 多坯交叉轧制模式的时间判断	216
5.5.3 多坯交叉轧制模式的空间限制	219
5.5.4 出炉时间控制	220
参考文献	221
6 中厚板厚度自动控制	223
6.1 概述	223
6.2 中厚板轧制时计算机厚度自动控制系统	224
6.2.1 基础自动化级计算机系统	224
6.2.2 过程控制级计算机系统	224
6.2.3 中厚板厚度自动控制系统的结构	225
6.2.4 中厚板轧机检测仪表	226
6.3 中厚板轧制时厚度自动控制的基本形式及基本原理	227
6.3.1 反馈式厚度自动控制的基本原理	227
6.3.2 前馈式厚度自动控制的基本原理	229
6.3.3 监控式厚度自动控制的基本原理	230
6.3.4 轧制力 AGC (P-AGC) 控制系统的基本原理	230
6.3.5 液压式厚度自动控制的基本原理	233
6.3.6 绝对值 AGC (ABS-AGC) 控制系统的基本原理	238
6.3.7 动态设定型 AGC (D-AGC) 控制系统的基本原理	240
6.4 厚度自动控制的基础自动化系统	242

6.4.1	辊缝控制	242
6.4.2	电动压下位置自动控制系统	244
6.4.3	液压压下位置自动控制系统	249
6.4.4	具有可编程控制器的压下位置自动控制系统	251
6.4.5	辊缝倾斜控制	252
6.4.6	液压 AGC 厚度自动控制系统	253
6.4.7	近置式测厚仪的厚度自动控制系统	256
6.4.8	头部厚度控制	259
6.4.9	中厚板轧机刚度测量	259
6.4.10	油膜厚度测量	260
6.4.11	支撑辊偏心测量	261
6.5	厚度自动控制的过程自动化控制系统	262
6.6	中厚板厚度控制系统典型指标	262
6.6.1	APC 系统性能	262
6.6.2	钢板厚度控制精度	262
	参考文献	263
7	中厚板板凸度和板形控制技术	264
7.1	板凸度和板形的基本概念	264
7.1.1	板凸度	264
7.1.2	边部减薄	264
7.1.3	中厚板断面形状的表达式	264
7.1.4	板平直度	265
7.1.5	良好平直度的条件	266
7.1.6	板平直度与板凸度的关系	267
7.2	中厚板轧机板凸度和板形控制手段	267
7.2.1	中厚板轧辊辊型设计	268
7.2.2	考虑板形的最优负荷分配	270
7.2.3	液压弯辊	270
7.2.4	CVC 轧机	271
7.2.5	PC 轧机	278
7.2.6	WRS 轧机	280
7.3	中厚板板凸度的影响因素	281
7.3.1	板凸度计算	282
7.3.2	工作辊磨损计算	282
7.3.3	工作辊热膨胀计算	283
7.4	板凸度和板形控制系统	287
7.4.1	板形控制系统的组成	287
7.4.2	板形和板厚的联合控制	289
7.4.3	板形开环控制方法——板形锁定法	291
	参考文献	295
8	中厚板平面形状控制	296
8.1	中厚板平面形状控制概述	296
8.1.1	中厚板轧制平面形状变化特点	296

8.1.2	影响中厚板成材率的主要因素	297
8.2	中厚板平面形状控制方法	298
8.2.1	MAS 轧制法	299
8.2.2	DBR 轧制法	300
8.2.3	薄边展宽轧制法	300
8.2.4	立辊轧边法	300
8.2.5	无切边轧制法	301
8.3	平面形状控制数学模型	302
8.3.1	平面形状预测模型	303
8.3.2	平面形状控制模型	305
8.3.3	平面形状控制功能现场应用	306
8.4	平面形状检测	307
8.4.1	合成照相法	308
8.4.2	厚板平面形状识别装置	308
8.4.3	图像识别法	308
	参考文献	309
9	中厚板的控制轧制与控制冷却	311
9.1	中厚板的主要性能指标	311
9.1.1	强度指标	311
9.1.2	塑性指标	313
9.1.3	韧性指标	314
9.1.4	冷弯性能	315
9.1.5	焊接性能	319
9.2	金属强化的主要机制	321
9.2.1	固溶强化	322
9.2.2	位错强化	324
9.2.3	沉淀和弥散强化	325
9.2.4	晶界强化	327
9.3	钢材热变形过程中的再结晶和相变行为	329
9.3.1	钢材热变形时的应力-应变曲线及其规律	330
9.3.2	钢材热变形过程中的动态回复与动态再结晶	331
9.3.3	钢材热变形后的静态再结晶行为	332
9.3.4	静态再结晶的临界变形量	334
9.3.5	钢材热变形后的奥氏体/铁素体相变	336
9.4	控制轧制与控制冷却	338
9.4.1	控制轧制与控制冷却工艺的发展和特点	339
9.4.2	控制轧制的基本类型	339
9.4.3	控制轧制和控制冷却工艺参数的控制原则	340
9.5	直接淬火工艺	347
9.5.1	直接淬火工艺简介	347
9.5.2	直接淬火工艺的类型	348
9.5.3	直接淬火钢的组织性能特征	348
9.5.4	直接淬火工艺对淬火设备的要求	350
9.5.5	直接淬火工艺的工业应用	350

参考文献	354
10 控制冷却设备及其自动化	355
10.1 控冷设备的总体布置和基本配置	355
10.1.1 控制冷却设备的安装位置	355
10.1.2 控制冷却设备的配置	356
10.2 加速冷却装置的主要形式	358
10.2.1 U形管层流冷却装置	358
10.2.2 直管式层流冷却装置(水枕式)	359
10.2.3 水幕层流冷却装置	359
10.2.4 Mulpic 水枕式冷却装置	359
10.2.5 水-气喷雾式冷却装置	359
10.2.6 压力水倾斜喷射的超快速冷却装置	360
10.2.7 直接淬火设备	361
10.3 控制冷却策略	362
10.3.1 冷却方式	362
10.3.2 确保纵向温度均匀的控制策略	362
10.3.3 确保横向温度均匀的控制策略	363
10.3.4 确保厚度方向温度均匀的控制策略	364
10.4 控制冷却的自动化系统	364
10.4.1 控制系统	364
10.4.2 检测仪表	365
10.4.3 执行机构	366
10.4.4 控制冷却系统的功能	366
10.5 控冷数学模型	367
10.5.1 温降差分方程	367
10.5.2 空冷传热系数模型	369
10.5.3 水冷传热系数模型	370
10.5.4 比热容模型	370
10.5.5 热导率模型	370
10.5.6 横向温度控制模型	370
10.5.7 纵向温度控制模型	370
10.5.8 加速度模型	370
10.5.9 头尾低温控制模型	372
10.5.10 厚度方向温度控制模型	372
10.5.11 自学习模型	373
参考文献	375
11 辅助设备	376
11.1 高压水除鳞系统	376
11.1.1 概述	376
11.1.2 高压水除鳞	376
11.1.3 除鳞喷嘴及其选择	377
11.1.4 系统组成	379
11.1.5 泵站配置方案	379

11.1.6	高压水除鳞装置	382
11.2	矫直机	385
11.2.1	概述	385
11.2.2	中厚板矫直机的参数计算	387
11.2.3	中厚板矫直机的类型和结构	396
11.2.4	中厚板矫直机的矫直模型	403
11.3	冷床	404
11.3.1	冷床的主要形式	404
11.3.2	冷床上下料装置	412
11.4	剪切设备	413
11.4.1	剪切线设备组成	414
11.4.2	钢板剪切过程分析及剪切力参数计算	414
11.4.3	剪机的结构与特点	418
11.5	无损检测	443
11.5.1	超声波探伤的基本原理	443
11.5.2	在线自动超声波探伤装置的结构形式	444
11.5.3	应用实例	447
11.5.4	自动超声波探伤的发展趋势	448
	参考文献	448
12	中厚板的加热设备与热处理设备	449
12.1	加热炉及其辅助设备	449
12.1.1	步进梁式连续加热炉	449
12.1.2	推钢式连续加热炉	481
12.1.3	车底式加热炉	487
12.1.4	炉型比较和选择	490
12.1.5	实例	491
12.2	抛丸机	496
12.2.1	抛丸机用途	496
12.2.2	抛丸机形式	497
12.2.3	抛丸机工艺布置	497
12.2.4	抛丸机工作原理	499
12.2.5	抛丸机主要设备组成	500
12.2.6	抛丸机主要技术参数和设备结构形式及组成	501
12.3	热处理炉及其辅助设备	502
12.3.1	热处理炉的分类及比较	502
12.3.2	辊底式热处理炉	503
12.3.3	台车式热处理炉和外部机械化炉	519
12.4	淬火机	526
12.4.1	淬火处理	526
12.4.2	中厚板淬火机	526
12.4.3	辊式淬火机	527
	参考文献	529
13	计算机控制系统	531
13.1	计算机控制系统的结构	531