

冷热轧板带轧机的 模型与控制

孙一康 编著

LENGREZHA BANDAI
ZHAJI DE MOXING YU KONGZHI



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

冷热轧板带轧机的 模型与控制

孙一康 编著

北 京
冶金工业出版社
2010

内 容 提 要

本书将着重讨论冷热轧板带轧制设定模型的理论基础、建模方法、模型自学习以及基础自动化各项质量控制功能,内容包括:温度模型以及终轧及卷取温度控制,厚度模型及自动厚度控制,板形模型及自动板形控制,宽度模型及自动宽度控制等。

本书可供从事冶金自动化工作的工程技术人员、高等院校自动化专业的师生阅读,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

冷热轧板带轧机的模型与控制/孙一康编著. —北京:冶金工业出版社, 2010. 1

ISBN 978-7-5024-5102-8

I. 冷… II. 孙… III. ①冷轧机: 板材轧机—数学模型 ②热轧机: 板材轧机—数学模型 ③冷轧机: 带材轧机—数学模型 ④热轧机: 带材轧机—数学模型 IV. TG333. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 206870 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 戈 兰 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5102-8

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

2010 年 1 月第 1 版, 2010 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 21.5 印张; 516 千字; 326 页; 1-3000 册

59.00 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)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
冶金过程自动化基础	孙一康 等编著	68.00
冶金原燃料生产自动化技术	马竹梧 编著	58.00
炼铁生产自动化技术	马竹梧 编著	46.00
炼钢生产自动化技术	蒋慎言 等编著	53.00
连铸及炉外精炼自动化技术	蒋慎言 编著	52.00
热轧生产自动化技术	刘 玠 等编著	52.00
冷轧生产自动化技术	孙一康 等编著	45.00
冶金企业管理信息化技术	漆永新 编著	56.00
带钢冷连轧计算机控制	孙一康 编著	36.00
带钢热连轧的模型与控制	孙一康 编著	38.00
薄板坯连铸连轧工艺技术实践	王天义 编著	56.00
钢铁工业自动化·炼钢卷	马竹梧 等编著	98.00
电气设备的故障监测与诊断	余道松 编著	14.50
连铸过程控制理论与技术	郭 戈 等著	15.00
变频器基础及应用(第2版)	原 魁 等编著	29.00
冶金工业自动化仪表与控制装置安装通用图册	中国冶金建设协会 编	280.00
中厚板外观缺陷的种类、形态及成因	张希元 编著	78.00
中国冷轧板带大全	轧钢学会 编著	138.00
冷轧薄钢板生产(第2版)	付作宝 编著	69.00
冷轧薄钢板酸洗工艺与设备	陈龙官 编著	28.00
材料成形工艺学	齐克敏 等主编	69.00
彩色涂层钢板生产工艺与装备技术	李鸿波 等编著	69.00
薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制	康永林 等著	79.00
轧制过程自动化(第3版)	丁修堃 主编	59.00
小型连轧机的工艺与电气控制	编写组 编著	49.00
热连轧带钢生产	张景进 主编	35.00
板带冷轧生产	张景进 主编	42.00
高精度板带钢厚度控制的理论与实践	丁修堃 等编著	65.00
现代热连轧 AGC 控制系统	彭燕华 刘安平 主编	65.00
钢铁工业自动化·轧钢卷	薛兴昌 等编著	149.00

前 言

冷热轧板带在轧材产量中所占比重反映了一个国家的现代化水平。我国近二十年来不仅国有钢铁企业建立了一批高水平的中厚板轧机及带钢冷热连轧机,民营企业也建设了一批水平不低的板带轧机,使我国板带材年产量达到了一亿五千多万吨。

板带轧机是冶金工业中要求自动化程度最高的领域,几乎所有板带轧机都应用了计算机控制技术。值得庆贺的是我国 60% 以上板带轧机的计算机控制系统是由国内自主集成和自主开发的。不仅民营企业板带轧机计算机控制系统主要由国内自行开发,一批国有企业,如鞍山钢铁集团公司这样的大型国有钢铁企业亦以自己为主,依靠国内力量自主集成板带轧机计算机控制系统。与此同时,国内的科研人员对板带轧制计算机控制(模型及控制)技术进行了深入的研究,对从国外引进的设备和技术进行了学习、改造和创新。

为了适应我国经济发展的需要,为大批新建的板带轧机工程技术人员提供一些有用的参考资料,作者将多年来在工程实践和理论研究中的成果和经验以及收集的国内外技术资料进行了整理,编写成本书。

本书将着重讨论数学模型的理论基础、建模方法、模型自学习以及各项质量控制功能,包括:温度模型以及终轧及卷取温度控制,厚度模型及自动厚度控制,板形模型及自动板形控制,宽度模型及自动宽度控制。本书反映了北京科技大学自动控制研究所多年工作的成果。

本书为《带钢热连轧的模型与控制》、《带钢冷连轧计算机控制》两书的更新版,并增加了中厚板控制的内容。

编 者
2009 年 8 月

本书所用符号

(1) 厚度

- H_s ——板坯厚度, mm;
 H_{Rij} ——粗轧区 R_i 轧机 j 道次轧出厚度, mm;
 H_{RC} ——粗轧机组出口厚度, mm;
 ΔH ——粗轧机绝对压下量, mm;
 H_0 ——精轧机组来料厚度, mm;
 h_0 ——轧入厚度 (h_{0i} 为 i 机架入口厚度), mm;
 h_1 或 h ——轧出厚度 (h_i 为 i 机架出口厚度), mm;
 Δh ——精轧绝对压下量, mm;
 h_n ——成品机架轧出厚度, mm;
 h_m ——变形区 (精轧) 平均厚度 ($h_m = \frac{h_0 + h_1}{2}$), mm;
 H_m ——变形区 (粗轧) 平均厚度, mm;
 h_γ ——对应中性角 γ 处的厚度, mm;
 δH_0 ——精轧来料厚度变动量, mm;
 δh_0 ——轧机入口厚度变动量, mm;
 δh_1 ——轧机出口厚度变动量, mm。

(2) 工艺参数

- l_c ——变形区接触弧长 (水平投影), mm;
 l'_c ——压扁后接触弧长 (水平投影), mm;
 u_m ——变形区内平均变形速度, 1/s;
 ε ——相对变形程度;
 $\dot{\varepsilon}_0$ ——入口累计变形程度;
 $\dot{\varepsilon}_1$ ——出口累计变形程度;
 $\dot{\varepsilon}$ ——平均累计变形程度;
 e ——真正变形程度;
 Q ——秒流量, mm^3/s ;
 D ——轧辊直径, mm;
 R ——轧辊半径, mm;
 R' ——压扁后轧辊半径, mm;
 B ——带钢宽度, m 或 mm;
 B_s ——板坯宽度, m 或 mm;
 B_{RC} ——粗轧机组出口带坯宽度, m 或 mm;

- B_0 ——粗轧入口带坯宽度, m 或 mm;
 B_1 ——粗轧出口带坯宽度, m 或 mm;
 b_0 ——精轧入口带钢宽度, m 或 mm;
 b ——精轧出口带钢宽度, m 或 mm;
 b_n ——精轧机组出口宽度 (成品宽度), m 或 mm;
 DB ——粗轧绝对展宽量, m 或 mm;
 ΔB ——粗轧立辊侧压量;
 B_m ——粗轧变形区平均带钢宽度, m 或 mm;
 Db ——精轧绝对展宽量, m 或 mm;
 Δb ——精轧立辊侧压量;
 b_m ——精轧变形区平均带钢宽度, m 或 mm;
 L_0, l_0 ——入口带钢长度, m 或 mm;
 L_1, l ——出口带钢长度, m 或 mm;
 φ, ψ ——力臂系数;
 μ ——变形区摩擦系数;
 f ——前滑值, %;
 β ——后滑值, %;
 α ——咬入角, rad;
 γ ——中性角, rad;
 η ——压下系数;
 χ ——宽展系数;
 λ ——延伸系数;
 $\delta\mu$ ——摩擦系数变动量;
 δf ——前滑值变动量, %;
 $\delta\beta$ ——后滑值变动量, %。

(3) 速度和张力

- v ——带钢出口速度, m/s;
 v_0 ——轧辊线速度, m/s;
 v' ——带钢入口速度, m/s;
 n_0 ——对应于 v_0 的电机转速, r/min;
 n_H ——电机额定转速, r/min;
 δv ——带钢出口速度变动量, m/s;
 $\delta v'$ ——带钢入口速度变动量, m/s;
 δv_0 ——轧辊线速度变动量, m/s;
 τ_b ——后张应力, MPa;
 τ_f ——前张应力, MPa;
 τ_i —— i 机架前张应力, MPa;
 T_f ——前张力, kN;
 T_b ——后张力, kN;

- K_T —— 张力影响系数;
 $\delta\tau_i$ —— i 机架前张应力变动量, MPa;
 $\Delta\tau_i$ —— i 机架前张应力的附加张应力, MPa;
 $\delta\tau_b$ —— 后张应力变动量, MPa;
 $\delta\tau_f$ —— 前张应力变动量, MPa。

(4) 力能参数

- P_i —— i 机架轧制力, kN;
 M_i —— i 机架轧制力矩, kN · m;
 N_i —— i 机架电机功率, kW;
 p_x —— 坐标 x 处变形区单位压力, MPa;
 p_φ —— 坐标角 φ 处变形区单位压力, MPa;
 t_x —— 坐标角 x 处变形区摩擦力, MPa;
 t_y —— 坐标角 y 处变形区摩擦力, MPa;
 Q_p —— 应力状态系数;
 P_0 —— 预压靠力, kN;
 σ —— 材料变形阻力, MPa;
 K —— 平面变形时变形阻力 (又称硬度), $K = 1.15\sigma$, MPa;
 K_0 —— 材料强度基本值, MPa;
 K_E —— 材料强度增量, MPa;
 δP —— 轧制力变动量, kN;
 δK —— 材料强度变动量, MPa;
 δK_0 —— 材料强度基本值变动量, MPa。

(5) 板形参数

- CR 或 Δ —— 带钢出口凸度 (轧出凸度), μm ;
 CR_0 或 δ —— 带钢入口凸度 (轧入凸度), μm ;
 Δ_0 —— 冷连轧来料凸度 (热轧卷带钢凸度), μm ;
 ω_H —— 轧辊热辊型, μm ;
 ω_W —— 轧辊磨损辊型, μm ;
 ω_0 —— 轧辊原始辊型, μm ;
 ω_C —— 可控辊型, μm ;
 F_i —— i 机架弯辊力, kN;
 δCR —— 出口凸度变动量, μm ;
 $\delta\omega_C$ —— CVC, LVC 或 PC 辊可控辊型变动量, μm ;
 δF —— 弯辊力变动量, kN。

(6) 设备系数

- C_0 —— 轧辊压靠法所测得的轧机纵向刚度, kN/mm;
 C_P —— 带钢宽度为 B 时的轧机纵向刚度, kN/mm;
 C_F —— 弯辊力对测厚仪所在处辊缝影响的纵向刚度, kN/mm;
 K_P —— 轧制力对辊系弯曲变形影响的横向刚度, kN/mm;

- K_F ——弯辊力对辊系弯曲变形影响的横向刚度, kN/mm ;
 S ——辊缝仪显示的辊缝值, mm ;
 S_0 ——辊缝零位, mm ;
 S_p ——辊缝弹跳量, mm ;
 S_F ——弯辊力造成的辊缝变化, mm ;
 S_C ——轧辊中间点辊缝, mm ;
 S_e ——轧辊边部点辊缝, mm ;
 G_H ——轧辊热膨胀量, mm ;
 G_ω ——轧辊磨损量, mm ;
 G 或 G_0 ——轧辊辊缝零位自学习系数, mm ;
 O ——油膜轴承油膜厚度, mm ;
 δS ——辊缝变动量, mm 。

(7) 上标和下标

上标

- $*$ ——实测值;
 A ——动态变规格的前材 (A 材) 参数;
 B ——动态变规格的后材 (B 材) 参数;
 U ——上限值;
 L ——下限值。

下标

- i ——机架号;
 s ——设定值;
 m ——平均值;
 n ——成品机架参数;
 0 ——入口处值;
 H ——额定值;
 SET ——设定值;
 REF ——给定值;
 FB ——反馈控制参数;
 FF ——前馈控制参数;
 MN ——监控值;
 MR ——主令速度值;
 SR ——相对速度值;
 TH ——穿带参数;
 max ——最大值;
 min ——最小值;
 RL ——稳态轧制时参数。

注: 某些仅用于局部公式的符号请见文中各公式的说明。

目 录

第 1 章 板带轧制生产工艺	1
1.1 板带轧制综述	1
1.2 中厚板生产工艺	1
1.3 热轧带钢生产工艺	3
1.3.1 传统带钢热连轧	3
1.3.2 连铸连轧	6
1.3.3 新型炉卷轧机	9
1.4 冷轧带钢生产工艺	11
1.4.1 可逆式冷轧机	12
1.4.2 连续式冷轧机	12
1.5 薄带生产工艺的新动向	16
第 2 章 板带轧机计算机控制	18
2.1 L3/L2/L1 功能概述	18
2.1.1 生产控制级功能	18
2.1.2 过程自动化级功能	18
2.1.3 基础自动化级功能	18
2.2 热轧轧件跟踪及轧件运送	22
2.2.1 事件驱动软件	22
2.2.2 位置跟踪与数据跟踪	23
2.2.3 节奏控制及防止碰撞	24
2.3 冷轧的钢卷跟踪	25
2.3.1 物流跟踪和数据跟踪	25
2.3.2 带钢特征点跟踪	26
2.4 顺序控制和逻辑控制	27
2.5 自动位置控制	28
2.6 主速度控制	29
2.7 带钢热连轧活套控制系统	31
2.7.1 活套高度闭环控制	33
2.7.2 活套张力控制	34
2.8 热连轧微张力控制	34
2.9 带钢冷连轧机架间张力控制	36
2.10 质量控制功能	37

2.11 板带轧机计算机控制系统	38
2.12 传动及基础自动化级的系统配置	39
2.12.1 平铺型结构	39
2.12.2 区域控制器群结构	41
2.12.3 超高速网结构	42
2.13 过程自动化级的系统配置	42
2.14 板带轧机计算机控制系统配置实例	43
第3章 板带轧制塑性变形基本公式	49
3.1 概述	49
3.2 变形区应力状态及塑性方程	54
3.3 轧制力模型的理论基础	57
3.3.1 热轧外区应力状态系数	57
3.3.2 热轧外摩擦应力状态系数	59
3.3.3 冷轧外摩擦应力状态系数	62
3.3.4 张力影响系数	76
3.4 金属塑性变形阻力	77
3.4.1 热轧金属塑性变形阻力	77
3.4.2 冷轧金属塑性变形阻力	80
3.5 轧制力矩及轧制功率	82
3.5.1 根据轧制力决定轧制力矩	82
3.5.2 按能量消耗确定轧制力矩	83
3.6 前滑值	87
3.6.1 热轧前滑	87
3.6.2 冷轧前滑	89
第4章 板带轧机基本方程	92
4.1 概述	92
4.2 弹跳方程	93
4.3 辊缝形状方程	96
4.4 平坦度方程	98
4.5 流量方程	100
4.6 套量方程	102
4.7 张力方程	102
第5章 数学模型及模型自学习	107
5.1 概述	107
5.2 板带轧制的数学模型	108
5.3 数学模型的建立方法	109

5.3.1 线性回归	110
5.3.2 非线性回归	116
5.3.3 逐步回归简述	121
5.4 增量模型的建立	122
5.4.1 增量厚度方程	123
5.4.2 增量轧制力方程	124
5.4.3 增量凸度方程	125
5.4.4 增量前滑方程	126
5.4.5 增量入口速度及增量出口速度方程	126
5.4.6 增量套量方程和增量张力方程	127
5.5 模型自学习	129
5.5.1 增长记忆式递推最小二乘法	129
5.5.2 指数平滑法	132
5.5.3 模型长期及短期自学习	135
第6章 温度模型与温度控制	137
6.1 基本概念	137
6.2 温降模型的理论基础	137
6.2.1 传热学基础	139
6.2.2 传热学公式	140
6.3 热轧生产过程的温降模型	144
6.3.1 钢坯(板坯、带坯)传送时的温降	145
6.3.2 高压水除鳞的温降	146
6.3.3 低压喷水冷却的温降	147
6.3.4 轧制变形区内的热量得失	147
6.4 终轧温度控制	149
6.4.1 带钢头部终轧温度设定	150
6.4.2 带钢全长终轧温度控制	151
6.5 卷取温度控制	154
6.5.1 卷取温度控制的基本问题	155
6.5.2 卷取温度控制模型	156
6.5.3 卷取温度控制策略	160
6.6 控制轧制及控制冷却	161
第7章 厚度模型与厚度控制	163
7.1 基本概念	163
7.2 厚度设定模型	166
7.2.1 厚度分配	166
7.2.2 厚度设定计算	171
7.2.3 厚度模型的自学习	171

7.2.4 热带穿带头部拯救	175
7.3 厚度控制分析方法	177
7.3.1 图解分析法	177
7.3.2 解析分析法	182
7.4 自动厚度控制 (AGC)	183
7.4.1 厚度反馈 AGC (GM-AGC)	183
7.4.2 厚度前馈 AGC (FF-AGC)	186
7.4.3 硬度前馈 AGC (KFF-AGC)	189
7.4.4 末机架恒轧制力控制	190
7.4.5 流量 AGC (MF-AGC)	190
7.4.6 监控 AGC (MN-AGC)	191
7.4.7 AGC 补偿功能	192
7.5 板带轧机 AGC 系统	197
7.5.1 中厚板轧机的 AGC 系统	197
7.5.2 带钢热连轧的 AGC 系统	197
7.5.3 带钢冷连轧的 AGC 系统	198
7.5.4 双机架可逆冷连轧 AGC 系统	202
7.5.5 平整机恒伸长率控制系统	203
第 8 章 板形模型与板形控制	205
8.1 基本概念	205
8.1.1 板带材横断面形状表示方法	205
8.1.2 板带材的平坦度	207
8.1.3 凸度与平坦度间的关系	209
8.2 以板形为目标的最优负荷分配	212
8.2.1 负荷分配逆算法	213
8.2.2 负荷分配寻优法	217
8.3 板形控制策略	220
8.3.1 热轧板形控制的控制策略	220
8.3.2 冷轧板形控制的控制策略	223
8.4 板形设定模型及模型自学习	226
8.4.1 热轧板形设定计算	226
8.4.2 冷轧板形设定计算	228
8.4.3 板形模型自学习	231
8.5 自动板形控制系统	231
8.5.1 热轧自动板形控制系统	231
8.5.2 冷轧自动板形控制系统	234
8.6 中厚板平面形状控制	238

第 9 章 宽度模型与宽度控制	240
9.1 基本概念	240
9.2 热轧板带轧制的宽展	241
9.2.1 平辊轧制的宽展计算	241
9.2.2 立辊-平辊轧制的宽展计算	245
9.3 宽度设定计算	248
9.4 自动宽度控制 (AWC)	251
9.4.1 带坯全长宽度变动的原因	252
9.4.2 AWC 的组成	252
第 10 章 冷热带钢连轧的综合分析	257
10.1 概述	257
10.2 解析分析法在质量控制功能中应用	259
10.2.1 自动厚度控制的解析分析	260
10.2.2 AGC 对凸度及套量的影响	260
10.2.3 前馈板形控制的解析分析	261
10.2.4 终轧温度控制 FTC 对厚度及凸度的影响	262
10.3 静态综合分析——影响系数法	262
10.4 带钢热连轧静态综合分析实例	265
10.4.1 影响成品厚差的主要扰动	272
10.4.2 快速监控对后四个机架辊缝控制量的分配	273
10.4.3 精轧终轧温度设定参数的调整	273
10.5 带钢冷连轧静态综合分析实例	274
10.6 带钢热连轧动态仿真分析	275
10.7 带钢冷连轧动态仿真分析	280
10.7.1 冷连轧动态仿真用数学模型	280
10.7.2 动态仿真实例	282
10.8 实时仿真系统	293
附 录	295
附表 1 中厚板典型轧制规程设定计算表 ($H_s = 220\text{mm}$, $h_n = 18\text{mm}$, $R = 450\text{mm}$, $t_s = 1250^\circ\text{C}$)	295
附表 2 中厚板典型轧制规程设定计算表 ($H_s = 220\text{mm}$, $h_n = 12\text{mm}$, $R = 450\text{mm}$, $t_s = 1250^\circ\text{C}$)	296
附表 3 中厚板典型轧制规程设定计算表 ($H_c = 120\text{mm}$, $h_n = 8.5\text{mm}$, $R = 450\text{mm}$, $t_0 = 1120^\circ\text{C}$)	297
附表 4 中厚板增量方程 A 系数表	298
附表 5 中厚板增量方程 B 系数表	299
附表 6 中厚板增量方程 C 系数表	300

附表 7	热连轧粗轧典型轧制规程设定计算表 ($H_s = 230\text{mm}$, $h_n = 38\text{mm}$, $R = 450\text{mm}$, $t_0 = 1250^\circ\text{C}$)	301
附表 8	热连轧粗轧典型轧制规程设定计算表 ($H_s = 230\text{mm}$, $h_n = 32\text{mm}$, $R = 450\text{mm}$, $t_0 = 1250^\circ\text{C}$)	302
附表 9	热连轧粗轧增量方程系数	303
附表 10	热连轧精轧典型轧制规程设定计算表 (轧制规程: $B = 1200\text{mm}$, A3F, $R = 380\text{mm}$, $H_0 = 32\text{mm}$, $h_7 = 2.0\text{mm}$, $t_{FT0} = 1020^\circ\text{C}$, $t_{FC} = 870^\circ\text{C}$)	304
附表 11	热连轧精轧典型轧制规程设定计算表 (轧制规程: $B = 1200\text{mm}$, Q235, $R = 380\text{mm}$, $H_0 = 34\text{mm}$, $h_7 = 3.62\text{mm}$, $t_{FT0} = 1030^\circ\text{C}$, $t_{FC} = 875^\circ\text{C}$)	305
附表 12	热连轧精轧典型轧制规程设定计算表 (轧制规程: $B = 1200\text{mm}$, Q235, $R = 380\text{mm}$, $H_0 = 36\text{mm}$, $h_7 = 5.2\text{mm}$, $t_{FT0} = 1040^\circ\text{C}$, $t_{FC} = 880^\circ\text{C}$)	306
附表 13	热连轧精轧典型轧制规程设定计算表 (轧制规程: $B = 1200\text{mm}$, Q235, $R = 380\text{mm}$, $H_0 = 38\text{mm}$, $h_7 = 7.0\text{mm}$, $t_{FT0} = 1050^\circ\text{C}$, $t_{FC} = 880^\circ\text{C}$)	307
附表 14	热连轧精轧增量方程 A 系数表	308
附表 15	热连轧精轧增量方程 B 系数表	309
附表 16	热连轧精轧增量方程 C 系数表	310
附表 17	热连轧精轧增量方程 D 系数表	311
附表 18	热连轧精轧增量方程 E 系数表	312
附表 19	热连轧精轧增量方程 F 系数表	313
附表 20	冷连轧典型轧制规程设定计算表 (轧制规程: $B = 1250\text{mm}$, Q235, $R = 300\text{mm}$, $H_0 = 4.25\text{mm}$, $h_7 = 1.5\text{mm}$)	314
附表 21	冷连轧典型轧制规程设定计算表 (轧制规程: $B = 1250\text{mm}$, Q235, $R = 300\text{mm}$, $H_0 = 3.5\text{mm}$, $h_7 = 1.0\text{mm}$)	315
附表 22	冷连轧典型轧制规程设定计算表 (轧制规程: $B = 1250\text{mm}$, Q235, $R = 300\text{mm}$, $H_0 = 2.0\text{mm}$, $h_7 = 0.5\text{mm}$)	316
附表 23	冷连轧典型轧制规程设定计算表 (轧制规程: $B = 1200\text{mm}$, Q235, $R = 380\text{mm}$, $H_0 = 1.5\text{mm}$, $h_7 = 0.3\text{mm}$)	317
附表 24	冷连轧增量方程 A 系数表	318
附表 25	冷连轧增量方程 B 系数表	319
附表 26	冷连轧增量方程 C 系数表	320
附表 27	冷连轧增量方程 D 系数表	321
附表 28	冷连轧增量方程 E 系数表	322
附表 29	冷连轧增量方程 F 系数表	323
附表 30	单位换算表	324

参考文献	325
------	-----

第 1 章 板带轧制生产工艺

1.1 板带轧制综述

板带轧制为中厚板轧制、热带轧制和冷带轧制的统称。

板带轧机具有以下共同特点：

(1) 产量高，一般可达到 100 万 ~ 500 万吨/年。

(2) 轧件宽度大或宽厚比大，宽厚比一般可达到 100 ~ 10000。

(3) 轧制力大，可达到 10 万 kN（中厚板），一般为 20000 ~ 40000 kN。

(4) 由于轧制力大，轧机将产生较大的弹性变形，轧机纵向弹跳变形可达到 5 ~ 10mm，其辊系横向弯曲变形可达到 250 ~ 500 μm 。

(5) 轧机出口厚度和出口凸度不仅决定于辊缝设定值及辊缝原始形状，并且在很大程度上决定于轧机纵向变形及辊系横向变形（亦即决定于轧制力），这对厚度控制及板形控制造成了困难，因此对板带轧制的研究不仅要着眼于轧件的塑性变形，而且要注意轧机的弹性变形。

(6) 对板带轧制产品的质量不仅要关注其尺寸（厚度、宽度）及形状（凸度，平坦度及平面形状），而且要关注其轧后的力学性能。

正是这些特殊的要求，板带轧机都配有完整的计算机控制系统，不仅具有较强的基础自动化功能（特别是质量控制功能——自动温度控制（ATC），自动厚度控制（AGC），自动板形控制（ASC）及自动宽度控制（AWC）），并且应具有较强的过程自动化级功能，特别是具有完整的数学模型。

1.2 中厚板生产工艺

由于中厚板生产产品中各类特殊钢（管线钢、造船钢板、容器钢、耐蚀钢、模具钢及结构钢等）比重较大，中厚板生产工艺流程中除热轧所应具有加热—粗轧/精轧—冷却的设施外，还应设有较强的精整及调质处理能力，包括矫直、剪切（切边、切头尾）、控冷控轧、热处理以及钢板表面处理的所需设施，图 1-1 为典型的中厚板生产线布置。

中厚板轧机过去曾采用三辊劳特式轧机或二辊可逆轧机，目前已基本不再采用，现代中厚板轧机由一或两台四辊可逆轧机构成，轧机一般采用电动压下加液压微调缸，不少轧机设有液压弯辊/窜辊，并具有独立的立辊，设有必要的旁路辊道以保证“控制轧制”对多块轧件交叉轧制时“待冷”的需要，轧机后设有较强的冷却装置以实现“控制冷却”，为此需在冷却段后设置强力矫直机以便对控冷后强度较大的钢板进行矫直。

从轧机机械结构来说中厚板轧机与热带轧机类似，但轧机宽度远较热带轧机宽，因此轧机能力亦较热带轧机强，允许轧制力可达 80000 ~ 100000 kN，机座刚度往往为 8000 ~ 10000 kN/mm，主电机功率亦可达到 15000 ~ 20000 kW。表 1-1 列出了典型的中厚板轧机工艺及设备参数。为了实现厚度、板形、宽度及平面形状控制，中厚板轧机前后设有专用检测仪表。

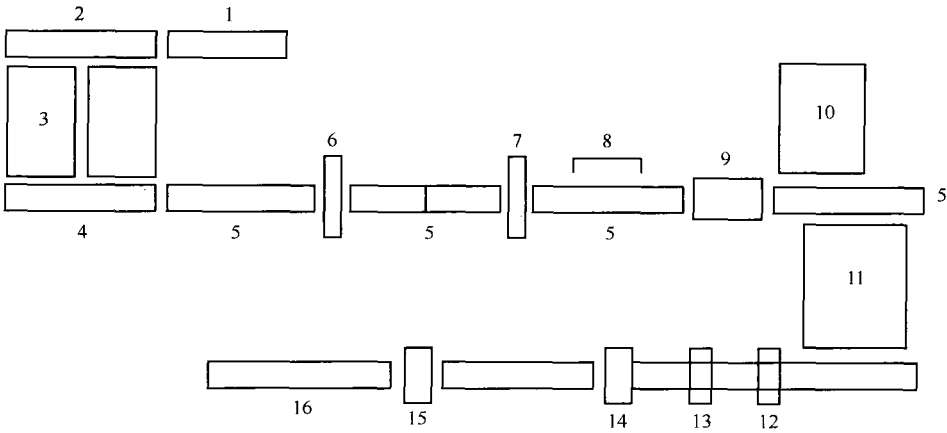


图 1-1 中厚板生产线示意图

1—上料辊道；2—装炉辊道；3—加热炉；4—出炉温度；5—辊道；6—粗轧；7—精轧；
8—冷却区；9—矫直机；10—特厚板冷床；11—冷床；12—切头剪；
13—双边剪及剖分剪；14—定尺剪；15—矫直机；16—热处理线

表 1-1 中厚板轧机工艺及设备参数

参 数		2800mm 中厚板轧机	5000mm 中厚板轧机
工艺参数	原料(厚×宽)/mm×mm	180~250×1000~1600	220~300×1300~2300
	成品(厚×宽)/mm×mm	6~60×1000~2500	6~150(400)×1500~4700
	最大轧制速度/(m/min)	350	440
	产量/万吨	70~100	140~200
设备参数	工作辊/mm×mm	φ850~900×2900	φ1110~1210×5200
	支撑辊/mm×mm	φ1750~1850×2750	φ2150~2350×4950
	最大轧制力/kN	50000	100000
	弯辊力/MN	2	4
	窜辊/mm	+/-100	+/-150
	板形控制	CVC+弯辊	CVC+弯辊
	轧机功率/kW	2×5000	2×10000

表 1-2 给出了中厚板轧机典型的轧制规程，下面各章对中厚板的有关计算将以表 1-2 轧制规程为依据。

表 1-2 中厚板轧机典型轧制规程

道 次	1	2	3	4	5	6	7
$H_0 = 220\text{mm}$	195	172	148	124	99	74	54.8
$H_0 = 220\text{mm}$	200	181	161	142	117	92	68
$H_0 = 120\text{mm}$	106	87.8	72.6	47.2	30.6	19.8	13.7