

热轧带钢板形 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

要 容 内

热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

本书主要以 2250mm 和 1700mm 热连轧机为研究对象,结合国内其他有代表性的先进热轧机,详细分析和介绍了目前世界上先进的热连轧机板形控制和检测技术。本书共分 10 章。第 1 章主要介绍热轧带钢的生产特点及生产工艺,第 2 章主要介绍板形控制和检测技术,第 3 章主要介绍 SP 定宽压力机调宽法研究,第 4 章主要介绍 2250mm 热连轧机辊形改进及板形调控特性研究,第 5 章主要介绍 1700mm 热连轧机长行程窜辊宽幅无取向硅钢板形控制技术研究,第 6 章主要介绍热轧带钢平坦度的检测与处理系统,第 7 章主要介绍 2250mm 热轧平整机的板形调控特性和窜辊策略研究,第 8 章主要介绍 2250mm 热连轧机工作辊温度场及热辊形分析,第 9 章主要介绍热轧带钢横向温度不均匀分布研究,第 10 章主要介绍 4200mm SmartCrown 中厚板轧机辊形研究。

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

热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. 7

ISBN 978-7-5024-6931-3

I. ①热… II. ①杨… III. ①热轧—带钢—钢板—
板形控制—检测 IV. ①TG335. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 149311 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 yjchs@cnmp. com. cn

责任编辑 常国平 夏小雪 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6931-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2015 年 7 月第 1 版, 2015 年 7 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 19.5 印张; 473 千字; 301 页

59.00 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 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

板形是带钢的重要质量指标，高精度板形是高级精品带钢的重要特征。热轧板形直接影响着冷轧板形的质量，并且后续工序对板形也有特殊要求。板形控制是宽带钢轧机的核心技术、前沿技术和高难度技术，板形控制系统的技术发展是代表热连轧机先进水平的标志之一。一方面板形控制相对板厚控制而言具有更大难度，另一方面目前各国对带钢板形的要求已越来越高，控制手段要求更加丰富、控制能力要求更加强大有效。例如，对汽车板的板形平坦度往往要求达到 10IU，镀锡板则需达到 5IU；对带钢的凸度要求也在 $10\mu\text{m}$ 以内。日益激烈的市场竞争以及各种高新技术的应用使得板带的横向和纵向厚度精度越来越高，也推动着板形控制技术和轧机机型的不断发展。有关板形及板形控制的研究具有重要的理论意义和实用价值。

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、SmartCrown、HC、PC 等多种新机型和辊形，并在热轧带钢工业生产中得到广泛应用。

板带在钢铁产品中比重的不断提高意味着板带的用途更加广泛，同时，对板带品种规格的要求也不断增多，一个典型的代表是产品宽度的增加，伴随而来的是生产板带的轧机尺寸（主要是轧辊的长度）的增大。过去 20 多年来国内建设的板带轧机除了宝钢的 2050mm 热连轧机和 2030mm 冷连轧机外，辊身长度都在 2m 以下，如果将这些轧机称作宽带钢轧机的话，武钢建成的国内目前辊身长度最大的 2250mm 热连轧机就可称为超宽轧机。值得注意的是，与以前的宽带钢轧机相比，尽管超宽轧机的轧辊（主要指工作辊）辊身长度增加了很多，但轧辊的直径却变化不大。此外，超宽轧机的一些其他特点，给轧机的使用带来了许多新的课题，其中板形控制面临的问题十分突出。

本书主要以 2250mm 和 1700mm 热连轧机为研究对象，结合国内其他有代



表性的先进热轧机，详细分析和介绍了目前世界上先进的热连轧机板形控制和检测技术，体现了一定的代表性和先进性。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，具有很强的实用性。

本书共分10章：第1章主要介绍热轧带钢的生产特点及生产工艺；第2章主要介绍板形控制和检测技术；第3章主要介绍SP定宽压力机调宽法研究；第4章主要介绍2250mm热连轧机辊形改进及板形调控特性研究；第5章主要介绍1700mm热连轧机长行程窜辊宽幅无取向硅钢板形控制技术研究；第6章主要介绍热轧带钢平坦度的检测与处理系统研究；第7章主要介绍2250mm热轧平整机的板形调控特性和窜辊策略研究；第8章主要介绍2250mm热连轧机工作辊温度场及热辊形分析；第9章主要介绍热轧带钢横向温度不均匀分布研究；第10章主要介绍4200mm SmartCrown中厚板轧机辊形研究。

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，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、技术人员和工人师傅的大力支持，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，杨光辉负责全书统稿工作，在此表示非常感谢。本书的编写还得到了“中央高校基本科研业务费专项资金资助（FRF-TP-14-033A2）”和“北京高等学校青年英才计划（YETP0369）”的大力资助。

由于编者水平所限，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2015年1月于北京科技大学

目 录

1 热轧带钢的生产特点及生产工艺	1
1.1 热轧带钢的技术要求	2
1.2 热轧带钢的种类和用途	3
1.3 热轧带钢的生产特点	4
1.4 热连轧机的主要机型	4
1.4.1 轧机机型分类	4
1.4.2 常规热连轧生产线的轧机配置情况	7
1.4.3 薄板坯连铸连轧生产线的轧机配置情况	9
1.5 热连轧机的工艺对比分析	15
1.5.1 常规热轧工艺	15
1.5.2 薄板坯连铸连轧工艺	15
1.5.3 中厚板坯连铸连轧工艺	18
1.5.4 三种热轧工艺的产品质量和工艺设备对比	18
1.5.5 薄板坯连铸连轧技术与传统工艺的比较	21
1.6 2150mm 热连轧机的主要工艺流程分析	23
1.7 典型热连轧机的轧制工艺参数	26
1.7.1 1700mm 热连轧机	26
1.7.2 1880mm 薄板坯连铸连轧机	30
1.7.3 2300mm 热连轧机	34
1.7.4 三个机组的产品质量控制的关键技术对比	37
1.7.5 1810mm 生产线典型轧制设备	37
1.8 先进热轧宽带钢生产技术	54
1.8.1 连铸坯热送工艺	54
1.8.2 蓄热式加热炉技术	54
1.8.3 板坯定宽侧压技术——定宽压力机	54
1.8.4 保温装置——保温罩和热卷箱	55
1.8.5 微张力有(无)套轧制	56
1.8.6 热轧工艺润滑技术	57
1.8.7 高速钢轧辊技术	59
1.8.8 在线磨辊技术	64
1.8.9 铁素体轧制技术	67
1.8.10 短流程生产方式	68
1.8.11 无头轧制	69

1.8.12 超薄带钢的轧制	69
1.8.13 自由规程轧制	69
1.8.14 智能化控制	71
2 板形控制和检测技术	72
2.1 板形的描述	72
2.1.1 横截面外形	72
2.1.2 平坦度	74
2.1.3 凸度与平坦度的转化	78
2.2 板形控制影响因素	81
2.3 板形控制和检测系统	83
2.4 凸度仪	84
2.5 平坦度仪	85
2.5.1 棒状光源法	87
2.5.2 激光三角法	88
2.5.3 光切法和截光法	93
2.5.4 直线型激光测量法	96
2.5.5 投影栅相位法	97
2.5.6 激光莫尔法	99
2.5.7 投影条纹法	101
2.5.8 棒状激光法	102
2.5.9 挡板遮光法	104
2.5.10 平坦度检测方法对比	105
2.6 板形控制主要手段	106
2.6.1 液压弯辊系统	106
2.6.2 液压窜辊系统	106
2.6.3 轧辊交叉技术	109
2.6.4 层流冷却系统	110
2.7 板形控制系统	111
2.7.1 板形预设定模型	113
2.7.2 板形闭环控制模型	115
2.8 热轧平坦度综合控制	116
3 SP 定宽压力机调宽法研究	121
3.1 带钢宽度控制概述	121
3.1.1 立辊调宽法	122
3.1.2 SP 定宽压力机调宽法	123
3.2 定宽压力机工作原理及性能	124
3.2.1 定宽压力机的作用及工作原理	124

3.2.2 定宽压力机的结构和性能特点	125
3.2.3 定宽压力机的运动学分析	127
3.3 定宽压力机的控制	130
3.3.1 定宽压力机的同步控制	130
3.3.2 定宽压力机的调宽轧制	132
3.4 调宽过程有限元模型	133
3.4.1 有限元模型的建立	133
3.4.2 板坯和模块运动简化	134
3.4.3 边界条件的确定	134
3.4.4 摩擦模型的建立	134
3.5 板坯调宽数值分析	134
3.5.1 长度方向的变形	134
3.5.2 宽度方向的变形	135
3.5.3 厚度方向的变形	135
3.5.4 等效应力	135
3.5.5 单元间正应力	136
3.5.6 单元间最大主应力	136
4 2250mm 热连轧机辊形改进及板形调控特性研究	137
4.1 精轧 CVC 工作辊辊形研究	137
4.1.1 CVC 工作辊使用情况及存在的问题	137
4.1.2 CVC 辊形的设计及改进方法	137
4.1.3 辊形改进试验及效果	140
4.2 精轧 CVR 支持辊辊形研究	143
4.2.1 CVR 支持辊辊形的设计	144
4.2.2 辊系有限元模型的建立	149
4.2.3 仿真参数的确定	151
4.2.4 CVR 辊形的工作性能分析	152
4.2.5 工业试验及效果	155
4.3 粗轧支持辊辊形研究	156
4.3.1 辊形设计方案比较	157
4.3.2 新辊形的近似加工方法	157
4.3.3 粗轧 R2 机架支持辊实验	157
4.4 五次 CVC 辊形研究	159
4.5 2250mm 热连轧机板形调控特性研究	162
4.5.1 凸度调节域	163
4.5.2 承载辊缝横向刚度	164
4.5.3 辊缝凸度	165

5	1700mm 热连轧机长行程窜辊宽幅无取向硅钢板形控制技术研究	167
5.1	无取向硅钢轧制的辊形特点分析	167
5.1.1	带钢凸度控制与宽度的关系	167
5.1.2	工作辊最大磨损量与轧制单位块数的关系	168
5.1.3	工作辊磨损辊形变化	168
5.2	ASR 窜辊策略的实现	169
5.3	工业轧制试验与应用	170
6	热轧带钢平坦度的检测与处理系统研究	172
6.1	热轧平坦度检测的复杂性	172
6.2	带钢激光平坦度仪检测原理及其系统测试	173
6.2.1	激光与 CCD 位移测量原理	173
6.2.2	平坦度仪的静态标定	174
6.2.3	平坦度仪测量误差的检测	175
6.3	最大检测厚度分析	177
6.4	平坦度检测系统的组成	179
6.4.1	摄像传感器 CCD	180
6.4.2	数字信号处理器 DSP	180
6.4.3	高速缓存器 FIFO	180
6.5	系统 CCD 信号采集与处理的工作原理	180
6.5.1	时钟及驱动电路	180
6.5.2	CCD 传感器光采样	181
6.5.3	AD 数据采集	181
6.5.4	FIFO 数据缓存	181
6.5.5	DSP 数据处理	181
6.6	数据采集与处理	182
6.6.1	数据采集	182
6.6.2	数据处理	183
6.7	激光平坦度仪总体结构和主操作界面	183
6.8	一种新的平坦度测量方法——激光角度位移法	185
6.8.1	激光角度位移法检测原理	185
6.8.2	系统设计	187
6.8.3	平坦度指标	187
7	2250mm 热轧平整机的板形调控特性和窜辊策略研究	188
7.1	2250mm 热轧平整机不均匀磨损及板形调控特性	188
7.1.1	平整机型及工艺特点分析	188
7.1.2	工作辊磨损及其辊缝凸度分析	190
7.1.3	工作辊窜辊和弯辊特性分析	190

7.1.4	平整机板形综合调控特性分析	193
7.1.5	现场试验分析	193
7.2	2250mm 热轧平整机窜辊策略的研究	194
7.2.1	热轧平整机轧辊的磨损问题	195
7.2.2	平整机窜辊策略的改进	196
7.2.3	现场试验	199
8	2250mm 热连轧机工作辊温度场及热辊形分析	201
8.1	工作辊热辊形计算的理论基础	201
8.2	2250mm 轧机的生产概况	210
8.3	2250mm 轧机的热辊形表现	211
8.4	工作辊热辊形的仿真模型	212
8.4.1	温度场的数学模型	213
8.4.2	温度场的差分计算模型	219
8.4.3	温度场及热辊形的仿真过程	226
8.4.4	仿真参数	226
8.5	不同工况下的温度场和热辊形仿真分析	228
8.5.1	不同工作辊直径的影响	228
8.5.2	不同窜辊方式时的影响	229
8.5.3	不同带钢宽度的影响	233
8.5.4	不同轧辊材质的影响	234
8.5.5	不同温度变化的影响	236
8.5.6	轧制节奏的影响	238
8.5.7	水冷换热系数的影响	239
8.5.8	一个轧制单位内温度场和热辊形的变化	240
9	热轧带钢横向温度不均匀分布研究	244
9.1	带钢温度分布对带钢性能及板形的影响	244
9.1.1	带钢纵向温度分布的影响	244
9.1.2	带钢横向温度分布的影响	246
9.2	轧制过程仿真模型的建立	249
9.2.1	主要假设	249
9.2.2	轧制过程中轧件的温度变化	249
9.2.3	有限元模型的建立及参数设定	251
9.2.4	初始及边界条件	253
9.2.5	带钢的物性参数	254
9.2.6	仿真模型的初步检验	256
9.3	热连轧带钢温度的测量	259
9.3.1	热轧温度检测装置	259



9.3.2 热连轧带钢温度的检测	261
9.3.3 1800mm 热连轧机的工艺情况	266
9.4 热连轧带钢横向温度分布的测量分析	268
9.4.1 带钢横向温度分布规律描述	269
9.4.2 带钢温度分布规律	270
9.4.3 带钢横向温度与压下率的关系	271
9.4.4 带钢横向温度与带钢宽度的关系	271
9.4.5 带钢横向温度与终轧温度的关系	271
9.5 带钢轧制过程中的温度控制方法及调节手段	273
9.5.1 纵向温度控制方法及调节手段	274
9.5.2 横向温度控制方法及调节手段	276
10 4200mm SmartCrown 中厚板轧机辊形研究	282
10.1 SmartCrown 工作辊辊形	282
10.1.1 工作辊辊形设计	282
10.1.2 工作辊辊形参数分析	285
10.2 SmartCrown 工作辊使用前后对比	287
10.3 辊系有限元模型建立	288
10.4 原辊形配置下的板形调控特性分析	288
10.5 SVR 新辊形的设计	290
10.6 新辊形配置板形调控特性分析	291
参考文献	294

热连轧机是把一定尺寸和化学成分的钢坯通过压延的方式加工成所要求的一定厚度和宽度规格带钢卷的设备。典型的常规热连轧过程包括加热、粗轧、精轧、轧后冷却和卷取等工序。全世界每年有超过2亿吨的钢经过热轧生产为厚度从小于2mm到25mm的板带材。板带材被广泛应用于工业、农业、国防以及日常生活的方方面面，在国民经济发展中起着重要的作用。随着科学技术的发展，特别是一些现代化工业部门如汽车、制罐以及家电行业等的飞速发展，不仅对板带材的需求量急剧增加，而且对其质量、尺寸精度、表面质量及性能也提出了严格的要求。

热轧卷板是以板坯（主要为连铸坯）为原料，经加热后由粗轧机组及精轧机组轧制成带钢（如图1-1所示）。热轧薄板主要是由连续式热轧机组轧制的，经连续式轧机最后轧制的热轧薄板还可再经过酸洗、退火，随后卷成卷状，称卷状的热轧薄板为热轧薄卷板（如图1-2（a）所示）。薄钢板通常以卷板和剪切成一定长度和宽度的单张板投放市场。卷板开卷后，按一定的宽度和长度剪切，即得到热轧薄板（如图1-2（b）所示）。

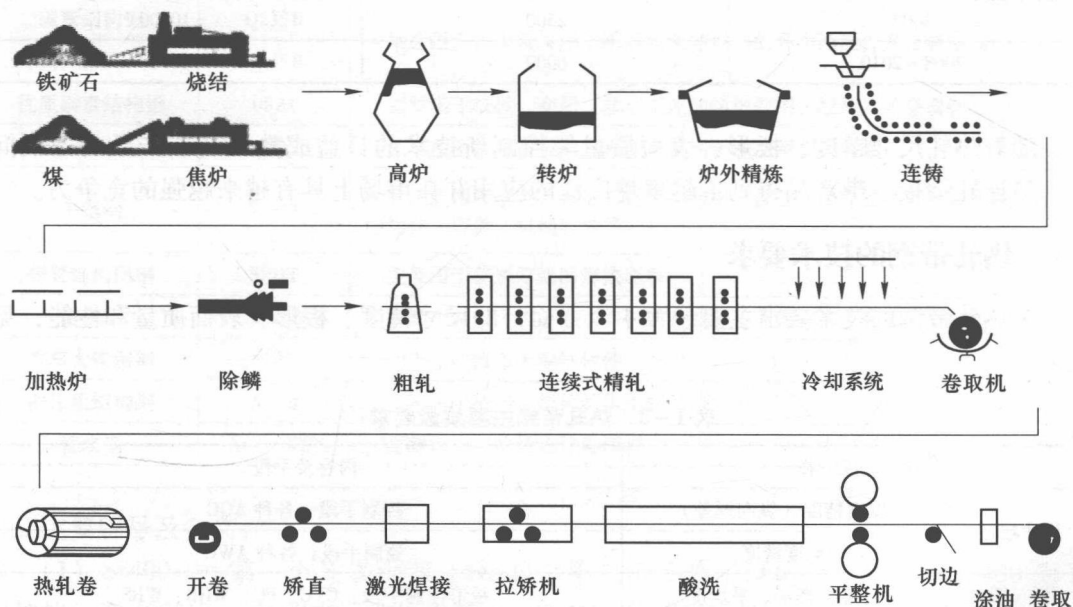
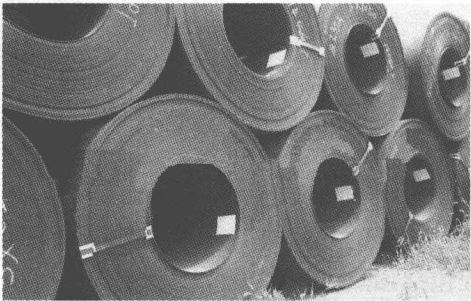
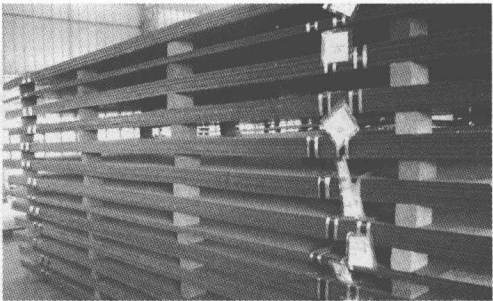


图 1-1 热轧带钢生产流程示意图

热轧带钢的生产在轧钢生产中占据重要的地位，热轧带钢产品被广泛应用于工业、农业、国防以及日常生活的方方面面。根据测算中国固定资产投资增长率，2003~2004年为27%以上，2005年为20%左右，2006年为18%左右，2007年为8%以上，旺盛的固定资产投资增长率也促进了热轧带钢的消费总量增长，进而使得热轧项目大量立项。自



(a)



(b)

图 1-2 热轧卷板

(a) 热轧薄卷板；(b) 热轧薄板

2005 年以来国内热轧新建厂家不断增加，热轧的新增产能不断扩大，见表 1-1。到 2010 年末，我国热轧的生产能力达到 1.6 亿吨左右。

表 1-1 国内热轧产能增长情况

年 份	新增产能/万吨	总产能/万吨
2005	1300	6400
2006	2500	8900
2007	2500	> 10000
2008 ~ 2010	6000	16000

随着热轧尺寸精度、板形、表面质量等控制新技术的日益成熟以及新产品的不断问世，热连轧钢板、带产品得到了越来越广泛的应用并在市场上具有越来越强的竞争力。

1.1 热轧带钢的技术要求

对热轧带钢的技术要求主要包含 4 个方面，即尺寸精度、板形、表面质量和性能，见表 1-2。

表 1-2 热轧带钢主要质量要求

质 量 要 求		内容及手段
尺寸精度	厚度精度（纵向厚差）	控制手段：各种 AGC
	宽度精度	控制手段：各种 AWC
板 形	凸度、楔形、平坦度	板形控制手段：CVC、PC、WRB、WRS
表面质量	表面缺陷	划伤、氧化铁皮轧入、印痕、裂纹、麻点
性 能	力学性能	强度、韧性、冲击性能、延展性
	电磁性能	低铁损、高磁感应强度、磁各向异性
	化学性能	耐腐蚀

(1) 尺寸精度要求高。尺寸精度主要是厚度精度，因为它不仅影响到使用性能及连续

自动冲压后步工序，而且在生产中的控制难度最大。此外，厚度偏差对节约金属影响也很大。

(2) 板形要好。板形要平坦，无浪形瓢曲才好使用。但是由于板、带钢既宽且薄，对不均匀变形的敏感性又特别大，所以要保持良好的板形就很不容易。板、带越薄，其不均匀变形的敏感性越大，保持良好板形的难度也就越大。显然，板形的不良来源于变形的不均匀，而变形的不均又往往导致厚度的不均。因此，板形的好坏往往与厚度精确度也有着直接的关系。

(3) 表面质量要好。板、带钢是单位体积的表面积最大的一种钢材，又多用作外围构件，必须保证表面的质量。表面缺陷不仅损害板制件的外观，而且往往败坏性能或成为产生破裂和锈蚀的策源地，成为应力集中的薄弱环节。

(4) 性能要好。板、带钢的性能要求主要包括力学性能、工艺性能和某些钢板的特殊物理或化学性能。一般结构钢板只要求具备较好的工艺性能，例如冷弯和焊接性能等，而对力学性能的要求不很严格。

1.2 热轧带钢的种类和用途

热轧带钢的主要种类和用途见表 1-3。

表 1-3 热轧带钢的主要种类和用途

钢 种	代表牌号	主 要 用 途
碳素结构钢	Q235B	用途很广，大量应用于不需要深冲加工的各类冲压件及金属制品
低合金结构钢	Q345B	
优质碳素结构钢	08Al	主要用于机械、交通、航空工业的结构件用一般冲压的金属制品
冷轧用钢	SPHC	主要用于冷轧薄板的原料或直接用于深冲用金属制品
不锈钢	3Cr13	广泛应用于航空、石油、化工、纺织、食品、医疗器械等要求耐腐蚀性能的构件、容器、机械零件等
焊管结构用钢	SPHT	主要用于普通管线的焊接原料
耐候钢	SPA-H	主要用于耐大气、海水等长期腐蚀环境下的构件、容器等
汽车大梁用钢	510L	用于生产汽车大梁结构件
船体用结构钢	A、B	主要用于造船业船体结构用钢
管线钢	X42 ~ X70	主要用于石油管线焊接原料

主要牌号及含义：

(1) SS400——第一个 S 表示钢 (Steel)，第二个 S 表示结构 (Structure)，400 为下限抗拉强度 400MPa，整体表示抗拉强度为 400 MPa 的普通结构钢。

(2) SPHC——首位 S 为钢 (Steel) 的缩写，P 为板 (Plate) 的缩写，H 为热 (Heat) 的缩写，C 为商业 (Commercial) 的缩写，整体表示一般用热轧钢板及钢带。

(3) Q195 ~ Q275——Q 表示普通碳素结构钢屈服点 (极限) 的代号，它是“屈”的第一个汉语拼音字母的大写；195、215、235、255、275 分别表示它们屈服点 (极限) 的数值，单位为兆帕 MPa (N/mm^2)。

1.3 热轧带钢的生产特点

板、带产品外形扁平、宽厚比大，单位体积的表面积也很大，这种外形特点带来其使用上的特点如下：

(1) 表面积大，故包容覆盖能力强，在化工、容器、建筑、金属制品、金属结构等方面都得到广泛应用。

(2) 可任意剪裁、弯曲、冲压、焊接、制成各种制品构件，使用灵活方便，在汽车、航空、造船及汽车制造等部门占有极其重要的地位。

(3) 可弯曲、焊接成各类复杂断面的型钢、钢管、大型工字钢、槽钢等结构件，故称为“万能钢材”。

板、带材的生产具有以下特点：

(1) 板、带材是用平辊轧出，故改变产品规格简单容易，调整操作方便，易于实现全面计算机控制和进行自动化生产。

(2) 带钢的形状简单，可成卷生产，且在国民经济中用量最大，故必须而且能实现高速度的连轧生产。

(3) 由于宽厚比和表面积都很大，故生产中轧制压力很大，可达数百万至数千万牛顿，因此轧机设备复杂庞大，而且对产品厚、宽尺寸精度和板形以及表面质量的控制也变得十分困难和复杂。

1.4 热连轧机的主要机型

近年我国宽带钢热连轧技术和装备能力取得巨大发展，其特点如下：一是投资规模前所未有，实现的投资延伸从铁水预处理、钢水精炼到连铸，从钢铁冶金、压力加工到精整和配送的投入；二是技术和规模上水平，不仅引进了多套当代国际最先进的机组，而且建设了多条自主集成技术、自行设计和制造的轧制线；三是热轧宽带钢产品大纲普遍涵盖了建材、汽车、家电、机械、化工和管道输送等用途，包括低合金、高强度、薄规格、深冲板，板形和厚度尺寸公差及表面质量俱佳的高端产品。

我国现有和在建的宽度在1250mm以上的带钢热连轧机组共计46套，分为4种类型：一是总体引进国外先进技术的常规热带钢轧机，共11套；二是采用引进技术建设的薄板坯连铸连轧机组，共9套；三是引进国外二手设备或国产机组，经国外承包商用现代化技术改造的常规热带钢轧机，共6套；四是总体采用国内先进成熟技术，国内企业总承包建设的薄板坯和常规板坯热连轧机组，共20套。

1.4.1 轧机机型分类

热轧精轧机组上游及下游各机架的机型选择与配置，是决定轧机板形控制性能的首要因素和基础，并将对轧机板形控制性能的优劣长期起作用。选型配置不当，将成为生产中难以解脱的制约因素。当前，可供热轧精轧机组选用的四辊轧机有以下5种常见的机型：

(1) 常规四辊轧机。

(2) 工作辊短行程窜移型（窜移行程 $-100 \sim +100\text{mm}$ ），如CVC（Continuously Variable Crown，连续变凸度）轧机；超宽轧机的窜移行程为 $-150 \sim +150\text{mm}$ ，如

2250mm CVC 轧机。

(3) 工作辊长行程窜移型 (窜移行程 $-150 \sim +150\text{mm}$ 及以上), 如 WRS (Work Roll Shifting, 工作辊窜移) 轧机。

(4) 工作辊变接触窜移型, 如 HCW (High Crown Work Roll Shifting, 高凸度工作辊窜移) 轧机。

(5) 上、下辊成对交叉型, 如 PC (Pair Cross, 成对交叉) 轧机。

根据轧机辊缝的柔性和刚性以及能否均匀磨损, 可以把轧机分为以下 4 类:

(1) 柔性辊缝型。CVC 轧机与 PC 轧机从板形控制原理看, 它们提供的是同等性能的宽调节域、低刚度的辊缝, 同属柔性辊缝型。在工程及实际应用方面, PC 轧机与 CVC 轧机比较, 其机械结构较为复杂, 其工作辊需承受由于交叉引起的较大的轴向力; 更重要的是, 为了防止交叉引起轧件跑偏, 交叉点必须严格重合在轧制宽度中心线上, 因此, 加重了对机械维修和调整工作的要求。在运行行为方面, CVC 轧机的缺点是在轧制进程中工作辊辊形不可避免的磨损和热变形, 这将影响其调控性能 (偏离初始设定的要求)。由于 CVC 工作辊与支持辊之间接触压力的分布呈 S 形, 使磨损后的支持辊辊廓也成为 S 形, 如不及时换辊, 也将使其调控性能恶化。PC 轧机由于使用常规平辊, 在运行行为方面等同于常规四辊轧机, 不存在上述 CVC 辊形带来的问题, 磨辊工作也比 CVC 辊形简易。

(2) 刚性辊缝型。工作辊变接触窜移型的轧机 (如 HCW 轧机), 其工作辊的轴向窜移机构虽与 CVC 轧机相同, 但窜移的目的则完全不同。对 CVC、PC 或常规四辊轧机而言, 工作辊与支持辊之间的接触线都存在着“有害接触区”。工作辊变接触窜移型的轧机能通过窜移改变接触长度以消除这一有害接触区, 从而有效地降低辊缝凸度, 同时增强辊缝刚度。从板形控制原理看, 它提供的是低凸度、高刚度的辊缝, 属刚性辊缝型。工作辊变接触窜移型的轧机由于消除了有害接触区, 辊间接触线长度必然缩短, 加之接触压力呈三角形分布, 致使辊端出现较大的接触压力尖峰, 从而导致辊面的剥落, 增大辊耗和换辊次数。此缺点为其工作原理所固有, 因而难以消除。

但使用常规平辊的 WRS 轧机, 对板形控制无特定作用, 但若采用一些具有特殊辊廓曲线的支持辊和工作辊, 如 VCR (Variable Contact Roll, 变接触辊) 支持辊或 DSR (Dynamic Shape Roll, 动态板形辊) 支持辊, 则兼有了“刚性辊缝”与“柔性辊缝”的双重效果。

(3) 刚柔辊缝兼备型。VCR (Varying Contact Roll) 变接触支持辊是通过特殊设计的支持辊辊廓曲线。它是基于辊系弹性变形特性, 使在受力状态下支持辊与工作辊之间的接触线长度能与轧制宽度自动适应, 以消除“有害接触区”, 增大辊缝刚度, 同时在此曲线辊廓下, 弯辊力可以发挥更大的调节作用。VCR 支持辊利用特殊的辊形曲线, 可以减少或消除辊间有害接触区, 增加承载辊缝的横向刚度, VCR 支持辊通过合理的辊形, 改变辊间接触状态, 使得工作辊换辊周期内接触压力的峰值和变化幅度都下降。所以, 在热连轧机上适合采用 VCR 变接触支持辊及根据其原理设计的支持辊。

(4) 磨损均匀型。在热轧过程中, 工作辊辊面与轧件直接接触的部分将不断发生磨损, 形成与轧件宽度对应的尖锐凹槽, 同时在轧件边缘处产生“猫耳形”局部磨损, 严重影响轧出成品的质量。上述几种机型, 对化解此种约束均无能为力。工作辊长行程窜移型的轧机 (如 WRS 轧机), 当使用常规平辊时, 能通过有节奏、有规律的窜移, 使磨损

分散化和平缓化，从而为“自由轧制”创造条件。此种机型工作辊辊身长度等于支持辊辊身长度与窜移总行程之和，在窜移过程中辊间接触长度不变，不存在变接触机型因窜移带来的缺点。由于工作辊磨损问题在上游机架较不严重，此种使磨损分散化、平缓化的功能主要用于下游机架。使用常规平辊的长行程窜移型轧机，对板形控制无特定作用，但如采用具有特殊辊廓曲线的工作辊，则能兼有板形控制的功能。

表 1-4 为各种板带轧机板形综合控制性能比较。

表 1-4 各种板带轧机板形综合控制性能比较

项 目	常规四辊	CVC	HC (UC)	PC	WRS	VCR	DSR
轧辊是否窜移	否	是	是	交叉	是	否	否
辊缝形状调控域	C	A	A	A	C	B	A
辊缝横向刚度	C	C	A	C	C	A	A
辊形自保持性	C	C	C	C	B	A	B
轧件行进稳定性	B	B	B	C	B	A	A
辊 耗	A	C	C	B	B	A	C
实现自由轧制	C	C	B	C	A	A	C
结构及维护难易	A	B	B	C	B	B	C
避免过大轴向力	A	B	B	C	B	A	A
辊形及磨辊难易	A	C	B	A	A	C	A

注：A—优，B—良，C—一般。

综上所述，根据在上游机架实现凸度控制，而在下游机架实现平坦度控制和“自由轧制”的基本要求，合理的机型选择与配置（如图 1-3 所示）的原则应是：柔性辊缝型的机型（如 CVC、PC 机型）只宜用于上游机架，而下游机架则宜选用工作辊长行程窜移型的轧机；刚性辊缝对上游凸度控制和下游平坦度控制均具有积极意义，应设法建立；弯

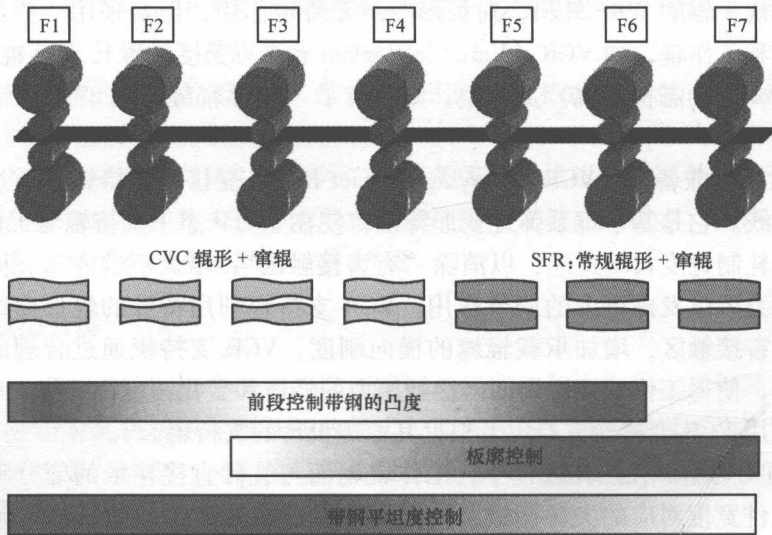


图 1-3 热连轧机理想机型配置及控制策略