

带钢热连轧数学模型基础

冶金工业出版社

带钢热连轧数学模型基础

北京钢铁学院 孙一康等 编

冶 金 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书讲述利用电子计算机控制带钢热连轧生产过程所用数学模型的建立基础。内容包括确定热连轧数学模型所必需的轧制、传热等工艺基础知识以及有关的基本公式和基本方程的介绍,各种数学模型,包括粗轧和精轧模型、自动厚控模型、终轧温度和卷取温度控制模型的确定原则以及模型的自适应校正技术,静态和动态数学模型的建立方法以及研究数学模型和控制系统所用的数学模拟方法。

本书可供从事电子计算机控制板带连轧生产过程及有关的工程技术人员参考。

带钢热连轧数学模型基础 北京钢铁学院孙一康等 编

冶金工业出版社出版
新华书店北京发行所发行
冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 14 7/8 字数 354 千字
1979年4月第一版 1979年4月第一次印刷
印数00,001~9,800册
统一书号: 15062·3415 定价(科三) 1.20元

前 言

生产过程自动化是迅速提高冶金生产产量和质量的重要途径。近代冶金自动化的一个主要特点是应用电子计算机对生产过程进行全面的综合控制，而带钢热连轧是当前钢铁工业应用计算机控制最成熟而且也是最有成效的一个部门。

为了实现计算机对生产过程的控制，必须首先建立起相应的控制用数学模型。数学模型这一名词目前应用很广泛，一般指的是应用数学（代数方程和微分方程）来表达出生产过程或控制系统的静态和动态特性；但作为控制用数学模型的含意，不仅是表达静态特性，而且还包含有控制思想的建立，生产中各种可能出现情况的全面分析和判断以及如何利用在线实时信息进行自适应校正等等内容。

本书是根据北京钢铁学院1973~1977年期间为冶金企业举办的连轧自动化进修班上所讲授的“连轧计算机控制数学模型”课程的讲义（《带钢热连轧计算机控制工艺基础》、《带钢热连轧计算机控制数学模型》和《冷连轧计算机控制数学模型及其工艺基础》）经过增删改编而写成的。

本书内容分三部分：

第一部分为第一章至第五章，主要介绍研究热连轧数学模型所涉及到的轧制、传热等工艺基础知识和所用到的基本公式和方程。第五章对轧制规程最优化作了简要介绍。

第二部分为第六章至第十一章，主要介绍热连轧机粗轧和精轧设定模型以及精轧终轧温度和卷取温度控制模型。第八章专门介绍了设定模型的自适应校正，这是近代控制用数学模型中普遍采用的新技术。第十章对自动厚控系统（AGC）所用的模型作了介绍。

第三部分为第十二和第十三章，主要介绍了静态和动态数学模型的建立方法（理论方法和实验方法），以及近年来广泛应用的研究数学模型和控制系统所用的数学模拟方法。

计算机控制用数学模型是一门随着生产过程广泛应用计算机控制而发展起来的新兴学科，是涉及到工艺理论、数学和计算机应用的综合性学科。

有关控制用数学模型的系统资料（文献）目前比较缺乏。本书是我们根据工作中的一些体会，企图将有关工艺理论和数学方法按控制模型的需要来进行整理的一次尝试，对有关控制模型仅作了一般的原理性介绍。由于我们水平所限，书中一定会有不少问题值得商榷，希望读者指正。

本书第七章以及第八章的一部分由孙民生同志编写，第二章的一部分由周纪华同志编写，其余各章由孙一康同志编写。

本书的文稿和图表的整理以及有关部分的计算得到北京钢铁学院连轧自动化科研组和计算机应用专业的原根礼、阎庆春、金星、康杨等同志的帮助；科研组和教学小组的同志以及东北工学院、天津电气传动设计研究所、鞍钢自动化研究所等兄弟单位的同志对本书内容提出了不少宝贵意见，在此一并表示感谢。

编 者

一九七八年五月于北京

目 录

前言

第一章 概述	1
1. 带钢热连轧发展概况.....	1
2. 热轧带钢生产工艺和设备概况.....	5
第二章 带钢轧制的基本公式	16
1. 轧制过程的基本参数.....	16
2. 轧制过程变形区的应力分析.....	29
3. 热轧带钢轧制压力计算公式.....	32
4. 热轧金属塑性变形阻力的确定.....	51
5. 轧制力矩和轧制功率的计算方法.....	63
6. 张力影响.....	72
第三章 带钢连轧过程的基本方程	74
1. 弹跳方程.....	74
2. $P-H$ 图.....	78
3. 板型方程.....	83
4. 流量方程.....	85
5. 连轧张力方程.....	86
第四章 带钢热连轧过程的温度计算	91
1. 概述.....	91
2. 传热学基本公式.....	92
3. 带钢温降方程.....	96
第五章 热连轧轧制规程的最优化	104
1. 热连轧轧制规程	104
2. 最优化概述	105
3. 目标函数的建立	106
4. 线性规划法	108
5. 动态规划法	109
6. 压下量叠代调整法	112
第六章 带钢热连轧计算机控制概述	116
1. 板坯(带钢)跟踪	117
2. 轧制节奏控制	118
3. 预设设定	118
4. 数字直接控制	119
第七章 精轧机组设定模型	122
1. 人工操作方法和存在的问题	122

2. 精轧机组设定模型	123
3. 钢种系数	131
4. 模型计算框图及执行时序	132
第八章 设定模型自适应校正	136
1. 概述	136
2. 增长记忆式递推最小二乘法	136
3. 模型自适应校正的实用算法	139
4. 设定模型参数的自适应校正	142
第九章 粗轧机组辊缝—转速预设定模型	147
1. 粗轧机组辊缝的计算机设定	147
2. 可逆机座辊缝—转速设定的最优化	151
3. 立辊开口度设定——宽度控制	154
4. 立辊和辊道转速的压下量补偿	157
第十章 厚度控制模型	160
1. 热轧带钢产生厚差的原因	160
2. 带钢热连轧机自动厚控系统	161
3. 计算机厚度控制系统(DDC—AGC)	164
第十一章 温度控制的数学模型	175
1. 精轧机组终轧温度控制	175
2. 卷取温度控制	177
第十二章 数学模型建立方法	187
1. 概述	187
2. 静态数学模型	189
3. 动态数学模型	192
4. 动态模型实验方法	202
第十三章 连轧过程数学模拟	206
1. 概述	206
2. 连轧过程静态分析的基本方法	209
3. 连轧过程动态模拟	220
附录：常用参数单位转换表	230
主要参考文献	231

第一章 概述

1. 带钢热连轧发展概况

薄板带钢生产比重的日益增长是现代轧钢生产发展的一个主要趋向。热轧及冷轧带钢是汽车、电机、化工、造船等工业不可缺少的原料，同时随着焊管、冷弯型钢生产的发展，板卷的需用量更是不断增加。

目前，大规模高效率地生产优质宽幅钢板，主要是在连续式和半连续式带钢热轧机上进行的。自1924年第一台带钢热连轧机投产以来，世界各国到1975年已建立了近150台带钢热连轧机，年生产能力达到了二亿三千万吨，而其中有63台（年产量约一亿三千万吨）是1960年以后建立的。1960年以后新建的现代带钢热连轧机（可称为第二代带钢热连轧机）的特点是：生产能力大，产品质量好，关键是自动化程度高。过去一台带钢热连轧机年产量为50~200万吨左右，而新建的一般约为200~400万吨，最大的达600万吨。同时产品质量亦大大提高，纵向厚差已由0.25毫米以上减小到0.05毫米，终轧温度和卷取温度的波动可控制到 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 左右，宽度均匀性可达全长内不超过5~10毫米。

现代带钢热连轧机一般有以下特点：

1) 提高轧制速度。1950年前精轧出口速度一般为6~10米/秒，目前则普遍超过20米/秒，最高的可达30米/秒。考虑到速度超过12米/秒后带钢在输出辊道上会出现“飘浮”，同时后几架轧机及卷取机咬入困难，因此为了“通板”顺利，高速连轧机都采用加速轧制方式，即开始以10米/秒左右的速度轧制，待卷取机卷上钢板后，轧机和卷取机同步加速到正常轧制速度。图1-1给出了日本近十多年来建设的连轧机的轧制速度增长情况。

2) 加大卷重。过去卷重一般为5~10吨左右，目前则超过15吨，一般为20~30吨，最大达到了45吨。如以单位宽度的卷重来说，则已由过去的3公斤/毫米加大到目前的35公斤/毫米（图1-2）。为了加大卷重，必须加大坯料尺寸（厚度和长度），因而增加了总延伸率，这就给轧机布置带来了影响。过去粗轧机组一般由1~2台可逆式轧机（半连轧）或四架跟踪式粗轧机座（全连轧）组成。目前由于钢坯厚度已由过去的120毫米左右加大到300毫米，坯料长度由2.5~5米加大到了9~13米，因此普遍增加了粗轧机架的数目，一般在可逆式轧机后面增加两架粗轧连轧机座（称为四分之三连轧）；而全连轧机则都改用5~6架粗轧机座（最后两架组成连轧）。考虑到进精轧机组时的板坯不能过长（过去一般为20~40米，现已加大到120米），过长将使温降过大。因此，为了进一步加长板卷长度（已超2000米），必须加厚进精轧机组的坯料厚度（由过去的20毫米加到30毫米以上），因而精轧机组开始由六架改为七架或八架（并预留八架或九架的基础）。

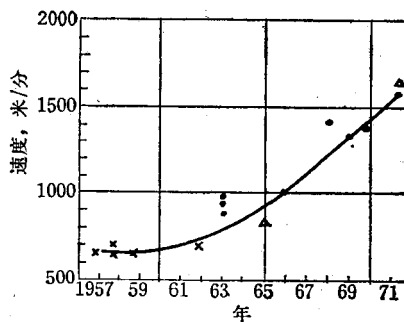


图 1-1 日本热连轧机（最后一架精轧机）轧制速度的增长

● 全连续式；△ 3/4连续式；× 半连续式

3) 扩大产品规格范围，如图1-3。过去只生产厚2~10毫米的板卷，近年来则趋向生

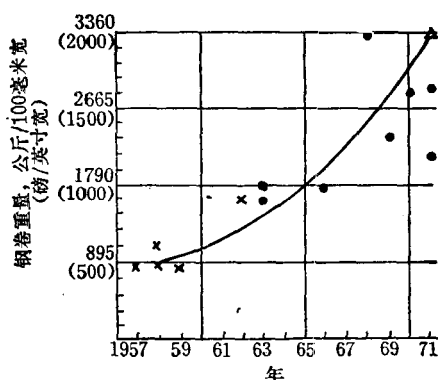


图 1-2 钢卷重量的增长

• 全连续式；△3/4连续式；×半连续式

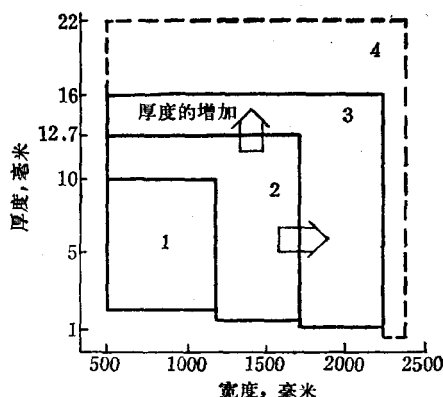


图 1-3 宽带钢产品尺寸的扩大

1—1941年；2—1963年；3—1969年；4—发展趋势

产厚1.5毫米、1.2甚至1.0毫米的热轧板卷；而厚规格由10毫米加大到16毫米。这样相当数量的中板（现代2300连轧机能生产宽2000毫米的带钢）改为板卷生产。特别是厚壁螺旋焊管生产的发展，促使了热轧带钢向大厚度、大宽度、高强度发展（目前出现了 $\sigma_s=60\sim 80$ 公斤/毫米²等级的加工用钢板）。

4) 加大主电机功率。过去一台2030带钢热连轧机主电机总功率不超过4万千瓦（精轧机每架约3000~4000千瓦），而目前则一般为10万千瓦，有的甚至达到了14万千瓦（粗轧机每架达到1万千瓦，精轧机每架则达到了8000~12000千瓦）。

主电机供电方式则由电动机—发电机机组供电改为汞弧整流器供电，1966年以后基本上全采用可控硅整流装置供电（SCR）。由于系统的时间常数减小，大大改进了控制系统的效能。

5) 改进机械设备，提高机械化程度。由于带钢热连轧机生产率高，因此尽可能减少非生产时间的比例显得尤为重要。为此对加热炉前后、卷取机前后以及废带钢的清除等工序加强了机械化程度。随着产品厚薄范围的扩大，为了克服薄带要求高速卷取、厚带要求低速强力卷取的矛盾，并为了有利于薄带顺利卷取咬入，不使温降过大，近年来，开始采用薄带近距离专用卷取机。为了克服换辊时间比重过大（每4~8小时换一次辊），在快速换辊方面，采取了新的换辊办法，即利用转台式或横移式快速自动换辊装置，使换辊时间由45分钟减少到6分钟。目前新建的带钢热连轧机的后几架粗轧机及全部精轧机每架都设有这种快速换辊装置。为了避免高速轧制带来的设备冲击负荷过大，采用了弧形刀刃飞剪来切头，以改善咬钢条件。另外，随着自动控制系统的发展，活套支撑器和压下机构（电动及液压压下在后几架并用）以及液压弯辊装置都有了很大的发展。为了解决高速带钢的轧后冷却，在输出辊道上采用了冷却效率较高的层流冷却装置。由于机械设备的改进使作业率由过去的70%左右提高到85%以上。

6) 采用新工艺。热连轧带钢生产总的工艺流程几十年来并没有很大的变化，但在流程中各个部分都采用了一系列新的工艺技术，使生产技术水平有了“质”的变化。其主要的有：

侧边轧制 充分利用大立辊及各架粗轧机座前的小立辊作用，使产品在钢坯宽度比较

固定的情况下（如连铸坯），能获得充分加工的侧面，并使宽度更为精确，同时又可以将宽度规格分挡较细；

二分材轧制 当轧制长度较短的钢卷时，为了充分发挥加热炉和粗轧机的能力，采用长坯料加热，然后在进入精轧机组前用飞剪一切为二，轧出两个短钢卷；

恒定小张力轧制 通过新型变力矩电动活套来实现恒定小张力的轧制过程，以提高成品厚度和宽度的精度。应该指出，正因为有了恒定小张力轧制的条件，稳定了精轧机组的宽展量，才使得粗轧机组的立辊系统能在计算机控制下实现带钢宽度控制；

精轧机组加速度轧制 这一技术的应用使热连轧机速度突破了长期停留在10米/秒左右的水平，因此第二代热连轧的一个重要标志即是采用了加速轧制。加速轧制并为实现带钢头尾温度均匀创造了条件；

层流冷却 由于其冷却效率的提高，使高速轧制的带钢能得到充分冷却为卷取温度控制创造了前提；

张力卷取 保证了上千米长的带钢的卷取质量。

7) 自动化程度不断提高。随着对产品质量的要求不断提高（板厚公差、带钢纵向厚差、终轧和卷取温度等要求愈来愈严格），不采取专门的自动化系统是无法达到目的的。同时，由于轧制速度的不断提高，人工操作日益困难，因此自六十年代开始，采用了电子计算机控制，使带钢热连轧机成为轧钢自动化的先驱，在一定程度上各国都以其带钢热连轧机自动化程度来作为本国轧钢自动化水平的标志。目前，新建带钢热连轧机几乎已百分之百地采用了电子计算机控制，如考虑原有的热连轧机改造，目前计算机控制的热连轧机的台数，占到总台数的70%以上。其原因是：热连轧机生产率高，因此经济效果大；热连轧自动化仪表已比较齐全；热连轧工艺过程稳定，各主要因素间的关系比较清楚，数学模型比较成熟。

带钢热连轧机自动化经历以下几个阶段，即：人工操作（五十年代以前）；人工操作加上单机自动控制系统，如活套控制、厚度调节系统（1955~1960年）；计算机控制和单机自动控制系统并存（1960~1969年）；全部计算机控制（1970年以后）。

早期的带钢热连轧机基本上没有自动控制系统，主要依靠人工操作，由于精轧连轧机组生产工艺比较复杂，带钢同时在5~7架轧机中轧制，全依靠人工操作，往往容易产生以下问题：

1) 当工人经验不足或轧制新品种时，容易发生堆钢（活套过大）或拉钢现象而造成事故。另外由于负荷分配不当，也会使前两架发生压力过大而断辊，后几架电流过大而跳闸，使生产无法顺利进行；

2) 轧制时当各块坯料的工艺参数发生变动（如来料温度不同）人工操作来不及调整，将使成品厚度公差太大，而一块坯料的头尾由于存在温降，亦将使其纵向厚差过大而影响产品质量。

随着生产率的不断提高和对产品质量的要求愈来愈严，迫使热连轧机采用了一系列自动控制系统。

最初只是采用闭环反馈系统控制生产过程的某些中间量，例如为了减少咬钢时的动态和静态速降，首先采用了主电机速度调节系统（电流反馈和速度反馈）。速度调节系统的应用给操作带来了一定的方便，但并未最终地解决堆拉钢问题。因为轧机间的张力尚和其他

许多因素有关。为了减少堆拉钢，后来发展到利用机架间的活套支撑器转角和速度信号的反馈，来调节主电机转速，以直接控制活套的大小。近年来，又发展为小张力恒定系统，使连轧机的操作大为简化，并提高了产品质量（解决了由于张力波动而产生的厚度和宽度波动）。

但这一系统还不能最终地解决带钢纵向厚差问题，因带钢头尾厚差更主要的是决定于头尾温差以及其他温度波动，因此为了满足各工业部门迫切要求供应厚度均匀的带钢，1957年起热连轧机开始设置带钢厚度自动控制系统（简称AGC）。这一技术虽首先应用于冷轧机上，但实践证明，它在热连轧机上的应用效果更为明显。因为只有解决了热轧板卷（冷轧原料）的厚度均匀问题，才能真正解决冷轧带钢的质量问题。因此1960年以后热连轧机已普遍应用了这一技术，老轧机也都先后作了技术改造，增添了这一系统。

AGC系统的实践（以及理论分析）表明，为了充分发挥其作用，必须正确设定辊缝和速度，同时AGC系统对头尾部分厚差及负荷分配等问题尚显得无能为力。因而自从1960年美国麦克劳思钢铁公司1525带钢热连轧机精轧机组上试用计算机设定控制取得成功后（这也是钢铁工业中第一台生产过程控制机），各厂都先后开始采用计算机，使热连轧机自动化进入了一个新的阶段，1965年以后新建的热连轧机基本上都已采用计算机控制。

过去用人工操作时 ± 0.05 毫米厚差的带钢只占37%，而采用AGC系统（和人工设定相配合工作）后达到了85.5%，采用计算机控制（计算机设定和AGC系统配合工作）则达到94%。

1968年以后，由于计算机可靠性的增大，特别是小型电子计算机的成批生产，使成本不断降低，开始了用计算机代替传统调节器，形成了由仪表—计算机—可控硅供电装置—轧机和轧件组成的闭环系统，称为数字直接控制系统（简称DDC系统）。这样实现了用计算机直接控制带钢厚度，使调厚系统又有了新的发展。目前带钢热连轧机一般采用多层计算机综合控制系统，最下层为DDC计算机，用于实现各自动控制系统的DDC化；其上一层设有过程控制计算机（简称SCC——监控计算机），对整个热连轧生产过程进行过程控制（通过数学模型），在最上一层尚可能设立各种生产管理计算机来协调各个车间的生产。

计算机过程控制之所以最早首先应用于精轧机组的辊缝—转速设定上，是因为板厚差是带钢产品的主要质量指标。

随着计算机控制在精轧机组上的成功应用，1964年以后，一方面在设定控制数学模型改进方面继续努力（1967年后普遍采用了自适应技术，这是一个大的转折点）；另一方面，在此基础上进一步扩大了控制项目，如温度控制的发展就是其中主要内容。终轧和卷取温度是影响带钢机械性能的主要参数，随着板厚公差的不减减小，这一质量指标的矛盾就日益突出，而温度控制由于前前后后和整个生产过程有关，也只有应用计算机采用数学模型才能进行控制，因此，1968年后，温度控制得到了迅速发展。目前温度控制技术已基本成熟。随着成品厚度的不断减薄，下一步质量矛盾将逐步转向板型和表面质量上去。目前各国都在大力研究板型控制问题。

除厚度和温度控制外，计算机控制一般还用于宽度控制、节奏控制、加热炉控制等方面，但从成熟程度和应用深度上都不及厚度和温度控制。表1-1列出了近三十多年来带钢热连轧机发展的情况（参数的分挡指的是一般情况）。

图1-4表示了现代热连轧机计算机控制的总貌。由此可知，计算机除通过相应数学模型对一些重点项目进行控制外，尚要完成一系列（大量的）简单功能的控制，这些简单功

表 1-1 带钢热连轧机的发展

年 代	40年代	50年代	60年代	70年代
年产量, 万吨	50~150	100~250	200~350	300~600
轧制速度, 米/秒	6~8	8~10	15~22	18~30
板坯重量, 吨	2.5~5	5~15	10~30	20~45
板坯尺寸, 毫米 $H \times L$	100~120 $\times 2.5 \sim 5$ 米	120~180 $\times 3.5 \sim 7.5$ 米	120~250 $\times 5 \sim 10$ 米	180~300 $\times 9 \sim 13$ 米
产品规格, 毫米 $h \times l$	2~8毫米 $\times 100 \sim 200$ 米	1.8~10毫米 $\times 200 \sim 500$ 米	1.5~12毫米 $\times 500 \sim 1000$ 米	1.2~16毫米 $\times 1000 \sim 2000$ 米
粗轧机组	二架可逆或四架串列	同前	3/4连轧或5~6架全连轧	同前
精轧机组	4~6架	6 架	6~7架	7~9架
精轧机组各架电机容量 千瓦	2500~3500	4000~5000	6000~10000	8000~12000
供电方式	机组	机组和汞弧整流	汞弧整流和可控硅	可控硅
厚度公差, 毫米	± 0.35	± 0.15	$\pm 0.08 \sim \pm 0.10$	± 0.05
宽度公差, 毫米	± 50	$\pm 20 \sim 30$	$\pm 10 \sim 15$	$\pm 5 \sim 10$
卷取温度公差, $^{\circ}\text{C}$	± 50	± 50	± 30	± 15
终轧温度公差, $^{\circ}\text{C}$	± 50	± 50	± 30	± 15
自动化程度	人工操作, 没有自动化系统	50年代初上速度调节系统; 50年代中上活套(张力)调节系统; 1957年上自动厚度控制系统 (AGC)	1960年开始至1964年大量上电子计算机, 基本上为电子计算机 + AGC, 计算机开始扩大功能	采用多层电子计算机并实行APC和AGC的DDC化, 计算机全面控制(温度、宽度等)

能控制模型虽不复杂（有些仅仅是逻辑开关量的控制），但在设计计算机控制程序时需对其全面统筹考虑。

2. 热轧带钢生产工艺和设备概况

具有代表性的热轧带钢轧机布置如图 1-5 所示，生产工艺流程是：初轧板坯或连铸板坯存放在板坯跨；遵照生产计划的要求将所需板坯通过装料辊道送至相应的加热炉前，由推钢机送入加热炉，加热到指定温度（一般普碳钢为 1250°C ，硅钢为 1350°C ）后出炉；板坯经立辊轧边和高压水除鳞后通过粗轧机组将厚120~300毫米的板坯轧成20~40毫米的连轧坯，由中间辊道送往精轧机组；精轧咬入前，经飞剪切去头部（或头尾）和高压水除鳞箱去除二次氧化铁皮，然后由精轧机组轧成1.2~16毫米的成品；带钢头部一般以10米/秒左右的速度轧出，通过输出辊道（在此辊道的一些区段设有冷却水装置）进入卷取机，然后精轧和卷取机同步加速至最大轧制速度；带卷从卷取机卸下后，经打捆、打印、称量等

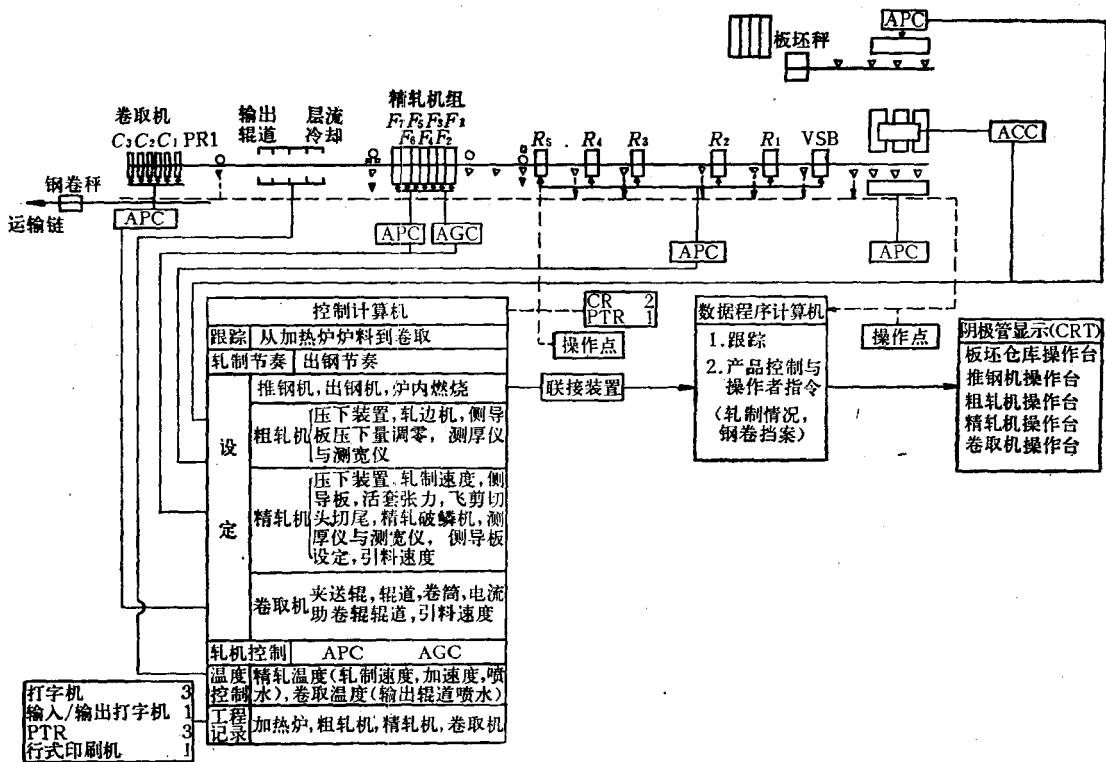


图 1-4 热连轧机计算机控制系统

ACC—加热炉自动控制系统； AGC—厚度自动控制系统； APC—预整定自动控制系统； VSB—大立辊； CR—卡片读出器； PTR—光电纸带读出器（1：推钢机； 2：板坯加热炉； 3：出钢机）； $R_2 \sim R_5$ ——一般为带立辊的机座； PR1—卷取机夹送辊

○高温计； □测厚仪； ▼测宽仪； ▽冷或热金属探测器； -----计算机输入；
——计算机输出

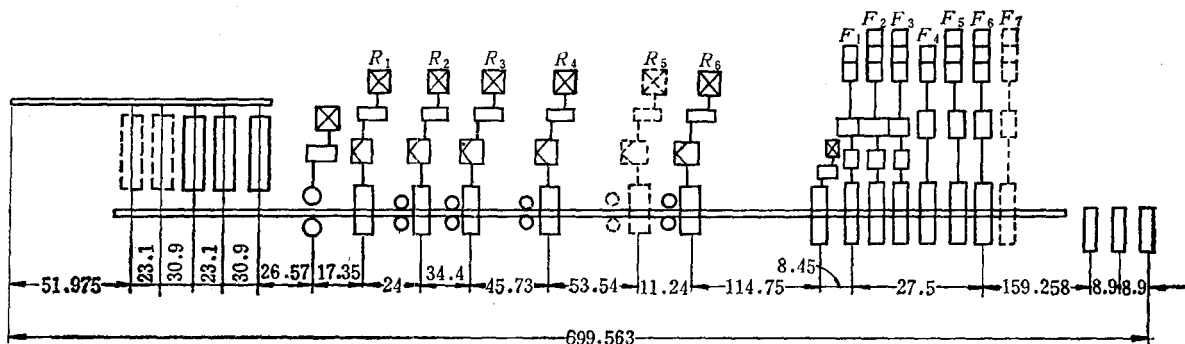


图 1-5 2235毫米全连续式带钢热轧机布置示意图

R_5 —预留粗轧机座； F_7 —预留精轧机座

一系列工序后由钢卷运输链运到成品库。一般车间都有精整工段，其中设有横切机组和纵切机组，分别将板卷横切成钢板和纵切成窄板卷，以满足用户广泛订货的需要。冷轧用钢

板卷，通常直接用运输链通过地下隧道送往冷轧车间。

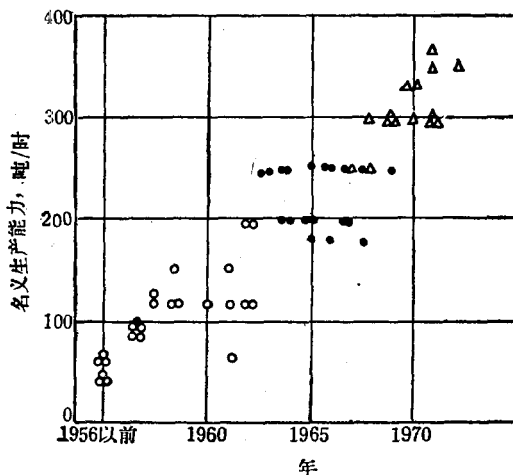


图 1-6 热轧带钢加热炉型和生产能力的发展

○三段或四段推钢式；●五段或六段推钢式；△多段步进式

热连轧工艺流程几十年来变化不大，即热轧带钢生产线由加热段、粗轧区、精轧区和卷取区四个区段组成，但由于在各区段新设备和新技术的采用，机械化自动化的程度却有了惊人的发展。

下面对各区段作进一步介绍。

一、加热段

热轧带钢的钢坯由扁坯初轧机或板坯连铸机供给。采用轧制板坯时，由于板坯尺寸容易变动，故有利于改变品种规格。而连铸坯一般尺寸比较固定，因此若需要改变板卷规格时，大立辊必须有较强的能力，以便能用同一规格的连铸坯生产几种宽度的产品；同时对粗轧机组也要求有较大的灵活性。

钢坯库一般面积为 $1\sim 2$ 万平方米，平均每 $1.5\sim 2.0$ 米²可存10吨钢坯。如钢坯需在库内冷却后进行表面处理，则存10吨钢坯需要4米²面积。

现代热带钢轧机为了提高产量，一般采用大坯重（其重量主要受车间吊车及运输设备限制），目前坯重为20~45吨。板坯宽度取决于产品规格，一般为500~2000毫米，长度受加热炉结构限制，目前最长板坯为10~13米，因此厚度采用100~300毫米。由于坯重加大，势必对车间的设备和布置有新的要求。例如，坯厚加大后，必须增加轧制道次（增加轧机数量）。轧件长度增加，必须加快轧制速度，以保证终轧温度。这样，主电机功率也必须相应加大。随着轧制速度进一步提高，必然给人工操作带来了困难，因此必须增加自动化程度，等等。

钢坯加热好坏，对产品质量影响很大，钢坯加热质量指标主要是坯料上下两面以及长度方向的温度均匀性，同时还要求氧化铁皮少和容易清除。图1-6给出了热轧带钢加热炉炉型和生产能力的发展情况。目前一般采用五段式连续加热炉，加热能力为180~360吨/时（目前有增加到400吨/时的趋势，炉底强度达到700~800公斤/米²），因此年产400万

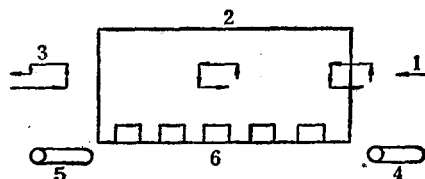


图 1-7 步进式加热炉加热板坯示意图

1—推钢机；2—加热炉；3—取出机；4—上料辊道；5—出料辊道；6—板坯

吨以上的热连轧车间设4~5座加热炉。炉子总长为26~35米，宽度为10~14米。上料一般采用辊道将板坯送到炉口处，然后用推钢机推入炉内；在推入一块板坯的同时，将已均匀加热好的板坯推出炉子。用这种方式装出料，因板坯在炉内滑动，必然造成板坯与滑轨相接触处产生“水印”（低温区），它直接影响轧制成品板厚的均匀性。近年来发展了步进式送料的加热炉。步进式加热炉是用推钢机将钢坯推到炉口，然后随着加热的延续，钢坯在炉内做步进式向前运送，加热完后，又用步进式取出机将钢坯托放到输出辊道上，如图1-7所示。

步进式送料的加热炉，能克服一般加热炉由于水冷滑轨对钢坯所造成的温度不均匀性，也就是说，可消除一般加热炉所不可避免的“水印”对产品厚度不均匀的影响。同时钢坯在炉内不相互靠紧，因此可提高热效率和加热质量，以及更换批料时不受板坯尺寸显著变化的限制。步进式加热炉的缺点是燃料消耗高，并且在炉内的步进机构必须具有足够的耐热能力，这就要求有较好的耐热材料。步进式加热炉和推钢式加热炉的性能比较列于表1-2。

表 1-2 板坯步进梁式加热炉和推钢式加热炉的比较

项 目	步 进 梁 式 炉	推 钢 式 炉
加 热 方 式	上下加热	上部加热
加 热 质 量	用步进梁托送，活动梁和固定梁交替接触钢坯，水印可以大大减少，加热质量好	用推钢机顶送，钢坯沿炉底滑轨滑动，和滑轨接触处的水印影响加热质量
加 热 条 件	板坯多面加热，缩短了加热时间	板坯单面加热
钢 坯 尺 寸	适于加热大型板坯、方坯，梁的设置受钢坯长度限制，不适合加热短坯	适于加热大、小方坯（短钢坯也可以输送）
单位燃料耗量	高	低
冷 却 水 量	多	少
炉内钢坯变形情况	钢坯只由梁支持，过热时厚度小的很易弯曲	钢坯由整个炉床支持，过热时不会弯曲
支持钢坯面的损坏	因没有相对滑动很少损坏	磨损较快
炉子基础深度	深	浅

二、粗轧区

粗轧机组的任务是把钢坯轧成宽度和厚度符合精轧要求的表面良好的带坯。粗轧机组一般先是一架大立辊机座，其作用是轧边，同时破碎钢坯表面的氧化铁皮，以利于清除。大立辊机座后面设有高压水除鳞装置，利用喷射高压水流（一般为100~150大气压以上），将氧化铁皮从轧件表面上冲刷干净。目前有加大大立辊能力的趋势，压缩量达50~120毫米，以使用相同宽度的钢坯生产几种不同宽度的产品。

粗轧机布置方案较多，早期用2~4架。目前由于坯料厚度增大，故一般采用4~6架轧机。粗轧机组的作用是将不同尺寸的板坯轧成20~40毫米厚的带坯，以供给精轧机组。送往精轧机组的带坯必须保证足够的温度。由于轧件的温降和厚度成反比，因此粗轧区的坯料（一般在40~50毫米以上）温度降低较为缓慢。然而目前由于供精轧机组用的带坯越来

越长，因此粗轧区段的温降问题仍需加以注意。

为了改善咬入条件，在粗轧头几架一般采用二辊轧机，以增大辊径，加大压下量。从刚度来看，虽然二辊较四辊差一些，但考虑到粗轧头几架轧件较厚，对轧辊刚度要求可低一些。粗轧后几架的轧制压力较大，由于轧件厚度较小，这时必须考虑板型，所以一般采用带有立辊的四辊轧机（万能轧机）。

粗轧机组一般不连轧（串联式布置：轧件不同时处于两个机架之中），因此除可逆机座采用直流电机外，一般都采用同步电机。当采用四分之三连轧方式，即粗轧机组最后两架靠近并实现连轧时，则最后第二架采用直流电机，以便调速，保证连轧关系，而最后一架则采用同步电机。

由于在粗轧阶段，轧件较厚较短，所以设备布置的方案就比较多，图1-8表示了设备布置的四种方案。

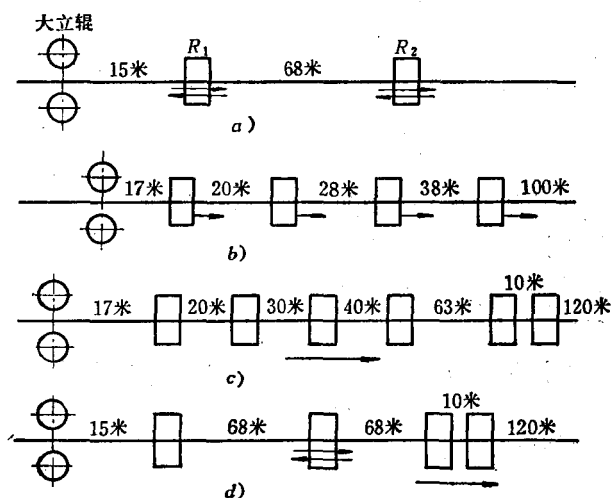


图 1-8 粗轧机组设备布置的四种方案

最简单的如图1-8 a 所示，由1~2架可逆轧机组成，这种方案与精轧机组相配，称半连轧（我国鞍钢1700机组便属于此种方案）。它的特点之一是既可生产中板，又能生产板卷，在生产中板时精轧机组停工。半连轧方案的优点是投资少一些，生产灵活性大，但其不可克服的缺点是设备作业率低，产量较低。近年来由于板卷需用量日益增加，同时热带钢连轧机产品范围扩大，厚度为1.2~16毫米，轧机宽度都采用2000~2300毫米，所以一般的中厚板都用板卷形式生产。为了提高产量，一般很少再建半连轧机。

最早的全连轧如图1-8 b 所示。粗轧机组由四架轧机组成，钢坯顺序通过四架轧机，但并不连轧。这种方案投资较半连轧大，但产量高，适用于大批量生产。板坯在这种全连轧方案的粗轧机组上只能轧制四个道次，所以要求钢坯和产品的尺寸规格变动小。为了克服上述不足，有些车间在第二个机座上考虑了轧件可空道次返回，这样在需要时可能增加一道，但将影响生产率。

随着钢坯厚度的增大（为了增加卷重），粗轧四个机座不够用了。因此近年来新建的车间，一般采用5~6个机座，如图1-8 c 所示。采用六个机座时，由于带坯较长，如果第五和第六两机座仍然采用不连轧的方式，则它们的间距将接近100米，这样长的距离不仅使整个车间拉长，增加大量厂房和辊道的投资，而且影响轧件温度，不利于下一步精轧。因此，近年来开始将粗轧机组的最后两架靠拢，采用连轧方式（甚至有人提出采用3、4架连轧和5、6架连轧的布置方案）。这种机组产量很高，可达1000吨/时，因此往往超过精轧能力（特别是轧薄规格时）。

在全连轧方案发展的同时，产生了一种新的布置形式。如图1-8 d 所示，它是在半连轧方案的基础上加一组粗轧连轧机座，这可以使可逆机座减少两个道次，而这两个道次是

粗轧机组轧件最长的道次。所以大大节省了可逆机座的轧制周期，使产量基本上可和全连轧相比，这种布置称为四分之三连轧。其优点是生产比较灵活（可逆机座可轧3道、5道或7道），厂房短，此外在可逆机座上头尾交替咬钢亦可减少头尾温差。其缺点是粗轧部分仍采用直流电机，这不仅使投资增加，抵消了减少机械设备的优点，而且不能发挥用粗轧机组的同步电机来补偿精轧机组直流传动系统可控硅装置功率因数差的作用。

目前对全连轧和四分之三连轧的看法尚不一致，新建车间两种方案都有，一般地说采用全连轧的较多，但日本在1971年新建的大分厂却采用了四分之三连轧方案（我国武钢1700粗轧机组也是四分之三连轧）。

粗轧机组的压下制度应当满足下列要求：

1) 粗轧机组的总压下量应尽可能大（因此时轧件温度较高），以便减轻精轧机组负荷，其每架压下量受最大允许咬入角及最大轧制力的限制（最大允许咬入角一般不大于 17° ）。

2) 选择轧制压力和轧制功率时，应使设备和电机不超负荷。

根据坯料尺寸和产品规格的较大变动，粗轧机的压下方案变化很大。一般粗轧机的总延伸率为7~10，最大可能的延伸率为12，其各架的压下率分配大致如表1-3所示。当机座数较少时压下率采用上限值。

表 1-3 粗轧机组压下率分配

架 次	1	2	3	4	5	6
$\varepsilon, \%$	15~23	22~30	26~35	27~40	30~50	33~35

表1-4为粗轧机组的压下方案的例子，实际轧机压下量要根据设备条件以及温度制度来定，并需进行设备强度和电机能力的检核，但表中的规律具有代表性。

表 1-4 粗轧机组的典型压下方案（毫米）

架 次			1	2	3	4	5	6
压 下 方 案	I	H	250	200	150	100	60	37
		Δh	50	50	50	40	23	12
		h	200	150	100	60	37	25
	II	H	300	250	193	133	86	54
		Δh	50	57	60	47	32	17
		h	250	193	133	86	54	37
		$v, \text{米/秒}$	1.18	1.43	2	2.5	3.3	3.9

由此可见，粗轧机组压下量的分配原则是，第一道要考虑咬入，压下量不能过大，以后各道尽量大，但最后一道要考虑控制出口厚度的精度和板型，压下量不能太大。

从提高精轧机组的终轧温度来看，粗轧轧出的带坯厚一些好（即加大精轧机组的延伸系数），但这将加重精轧机组的负荷。

轧件在粗轧机组头几架上的宽展可达18~38毫米，而后几架则为4~8毫米，因此，板宽可用各架的小立辊加以控制。小立辊的压缩量为12~25毫米，当宽厚比大时，采用小的数值。

粗轧区的轧件温降情况大致如表 1-5 所示。从表中可看出，基本上每道温降为 20°C 左右（后面几架温降稍快些），整个粗轧部分共降温 150°C 左右。另外根据试验，在中间辊道上往精轧机组运送时，对于厚38毫米的带坯，每分钟约降温 70°C ，而对于25毫米的带坯则每分钟约降温 95°C 。

表 1-5 轧件在粗轧区的温降

位 置	出 炉	大 立 辊	1 号机座	2 号机座	3 号机座	4 号机座	5 号机座	6 号机座
温度, $^{\circ}\text{C}$	1240	1220	1190	1170	1150	1100~1120	1080~1100	1050~1080

轧制温度对轧制压力和轧制功率影响很大，当轧件温度降低 50°C 时，负荷将增加25%左右，当降低 100°C 时，则负荷将增加55%左右。

主电机功率的选用，必须考虑到钢种及产品进一步扩大的可能。低合金钢的负荷比低碳钢大20~30%，合金钢则大50%以上，特别是不锈钢，它的轧制负荷约为低碳钢的1.7~1.8倍。电机功率目前除头两架采用5000~7000 马力电机外，其余各架采用10000马力的电机，轧制压力大约为2000~3000吨（当板宽为2000 毫米时）。一般二辊粗轧机允许压力为3000吨左右，而四辊粗轧机允许压力为3500吨左右。

三、精轧区

轧件由粗轧机组轧出后，其前端和后端常成“铲”形和“鱼尾”形。“铲”形及“鱼尾”形头部温度低，使精轧机组在咬钢时产生冲击，往往会使工作辊产生压痕，以后此压痕反印在轧件表面上，影响带钢表面质量，以至不得不停车换辊。另外“鱼尾”形轧件头部在运送和卷取过程中，常容易钻进设备部件的缝隙里，而“铲”形的轧件头部则不容易通过导卫装置，致使轧件卡住，造成事故。

为了防止上述现象发生，“铲”形及“鱼尾”形头部须在精轧机组的除鳞箱前，用切头切尾飞剪切除。为了减少精轧咬钢时的冲击，目前采用弧形刀刃或梯形刀刃切头，用平刀刃切尾。在飞剪机后为了设法除去二次氧化铁皮，过去往往采用一架二辊轧机，进行5~10%的小压下量轧制，达到破碎二次氧化铁皮的目的，然后用喷射高压水流冲掉轧件表面的铁皮。但实践证明这种方法并不理想，所以目前都已省去破鳞机座，而改用高压水除鳞箱（图1-9）。喷嘴与带钢之间的角度为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ，且与带钢边缘倾斜成 15° 角，喷嘴离钢板200 毫米，这样除鳞效果较好。

精轧机组一般由6~7架轧机组成，其主要任务是将带坯轧成成品带钢。过去由于用厚20毫米、长40~50米的带坯轧成厚2 毫米、长500 米的带钢

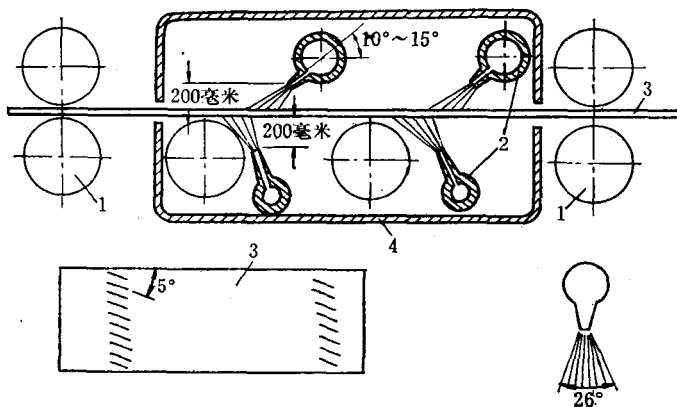


图 1-9 高压水除鳞示意图

1—压紧辊；2—高压水喷嘴；3—带钢；4—除鳞箱