

现代带钢连轧机控制

汪祥能 丁修堃 主编

东北大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代带钢连轧机控制/汪祥能,丁修堃主编. —沈阳:
东北大学出版社,1996.8
ISBN 7-81054-034-3

I. 现…

I. ①汪… ②丁…

Ⅲ. 板带轧机-控制技术

Ⅳ. TG334.9

©东北大学出版社出版

(沈阳·南湖 110006)

沈阳市新城子印刷厂印刷 东北大学出版社发行

1996年6月 第1版 1996年8月 第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:20

字数:496千字

印数:1~2000册

定价:39.00元

《现代带钢连轧机控制》编委会

主任委员	姚恩澍					
副主任委员	崔宝璐	高海航	李行健			
委员	汪祥能	丁修莖	谭泽培	刘祥		
主编	汪祥能	丁修莖				
编写人员	汪祥能	丁修莖	于长生	王文瑞	王保罗	
	华建新	许茂中	何汝迎	俞海量	张勇	
	刘明	朱泉封	吴章伟	袁建光	宋世民	
	徐耀环	翟标				

前 言

以连续化方式生产带钢已成为当今发展钢铁工业的趋势和必由之路,因此世界各国都十分重视大型、高速、连续宽带钢轧机的开发和建设。我国在八五期间继武钢 1700 工程之后,又一座大型现代化的冷、热宽带钢轧机在宝钢建成投产,这标志着我国钢铁工业进入了一个新的发展阶段。现代自动化程度高的宽带钢轧机的主要特点是这些轧机普遍装备有多项先进技术,如热带钢连轧机组上的全液压厚度自动控制、液压弯辊及连续可变凸度控制、带有强力侧压下装置的板宽自动控制、连轧机组的升速轧制及轧后的层流冷却控制;冷连轧机组上的全连续无头轧制、配备有过程计算机的板厚和板形自动控制、过程计算机执行最佳化过程自动化任务、事故信号计算机系统完成故障信号收集与报警。由于采用了上述新技术,使得这些连轧机的产品质量和尺寸精度得到极大的提高,可以预料这些先进技术必将在今后建成的带钢连轧机上获得推广应用。

编写本书的目的就是为了适应这一发展形势,满足广大科技工作者和管理人员学习和消化冷、热带钢轧机先进技术的需要,使这些新技术为我国国内轧钢领域工程技术人员所了解和掌握,并能将有关适用技术逐步推广应用到新建工程和现有轧机改造中去。

本书的指导思想是力图把轧制工艺和过程控制紧密结合起来,从实际应用出发,重点介绍宽带钢轧机过程控制中的各种技术。本书编写有以下几方面特点:

1) 本书既不同于轧制原理和工艺方面的书,也不同于计算机控制方面的书,它是企图围绕着连轧机把轧机工作原理与和控制密切相关的机械结构、液压系统、检测仪表、基础自动化及计算机控制系统等结合起来的一本轧机实用控制方面的书。

2) 选材主要着重在与带钢质量有关的生产控制问题。根据这一指导思想,把冷、热带钢轧机的控制系统分解成板厚控制、板形控制、板宽控制和温度控制四部分,这些都是连轧机控制上的关键技术。

3) 内容密切联系实际,从工程实际出发,尽量反映连轧机控制上的最新技术,故取名为“现代带钢连轧机控制”。

本书共分四篇。第一篇由丁修堃负责编写,参加该篇编写的还有吴章伟、袁建光、朱泉封、许茂中、宋世民、徐耀环、翟标。第二篇由汪祥能负责编写,参加该篇编写的还有张勇、何汝迎、俞海量、许茂中、华建新。第三篇由汪祥能负责编写,参加该篇编写的还有于长生、王文瑞、刘明、王保罗。第四篇由袁建光负责编写。最后全书由汪祥能、丁修堃统编并定稿。

本书的出版得到冶金工业部人教司、上海宝山钢铁(集团)公司和冶金部东北大学继续教育中心的大力支持,宝山钢铁(集团)公司教培中心的沈震世、谭泽培同志,冶金部东北大学继续教育中心的王允旌同志在本书出版过程中给予热情鼓励和帮助,在此作者向所有支持本书出版的同志表示衷心感谢。此外,黄宝森、王文瑞、吴晓东、邹玉贤、张卫国等同志参加本书原计算机控制系统篇编写,因该篇内容将另出专集,本书未将其包括在内。对他们所做的贡献表示诚挚的谢意。

本书第一稿和第二稿曾先后在上海宝山钢铁(集团)公司教培中心举办的全国性研修班、本溪钢铁公司冷、热轧带钢厂及鞍山钢铁公司自动化研究所讲授,之后,根据多方意见进行了较大修改。但由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

作者

1996. 4. 于沈阳.

目 录

前 言

第一篇 板带钢轧制厚度自动控制

第一章 板带钢厚度波动的原因及其厚度的变化规律

- 第一节 板带钢厚度波动的原因..... (1)
- 第二节 轧制过程中厚度变化的基本规律..... (2)
- 第三节 使用部门对板带钢厚度精度的要求..... (4)
- 第四节 厚度自动控制的发展概况..... (5)
- 第五节 当今厚度自动控制系统所能达到的厚度精度水平..... (6)

第二章 板带钢轧制时厚度控制用工艺数学模型

- 第一节 弹跳模型..... (7)
- 第二节 轧制压力模型 (13)
- 第三节 前滑模型 (32)
- 第四节 能耗模型 (37)
- 第五节 温降模型 (43)

第三章 板带钢厚度自动控制的基本原理

- 第一节 厚度自动控制的基本型式及其控制原理 (53)
- 第二节 液压式厚度自动控制系统 (60)
- 第三节 厚度自动控制系统中的补偿控制和措施 (66)

第四章 2050mm 热连轧机的厚度自动控制

- 第一节 厚度自动控制系统的组成..... (81)
- 第二节 初始辊缝的设定 (90)
- 第三节 液压 AGC 的原理及其运算 (92)
- 第四节 带钢头部厚度设定及自适应控制 (97)
- 第五节 厚度控制功能效果评价..... (103)

第五章 2030mm 冷连轧机的厚度自动控制

- 第一节 概 述..... (109)
- 第二节 2030mm 冷连轧机的设备组成及其主要特性..... (109)

第三节	2030mm 冷连轧机的厚度自动控制系统	(113)
第四节	机架间的张力控制	(126)
第五节	张力卷取机控制	(132)
第六节	厚度自动控制效果的分析	(139)

第二篇 宽带钢轧机平直度自动控制

第一章 带钢平直度概念

第一节	何谓带钢平直度	(143)
第二节	带钢板形缺陷的种类	(143)
第三节	用户对带钢平直度的要求	(144)
第四节	平直度控制方法的历史发展	(145)

第二章 平直度控制的一般理论

第一节	板形缺陷的表示方法	(147)
第二节	带钢平直条件	(150)
第三节	带钢横向厚度差的组成	(151)
第四节	支承辊与工作辊之间压力分布的讨论	(152)
第五节	工作辊与支承辊的弯曲挠度	(154)
第六节	轧辊间的压扁变形	(157)
第七节	轧辊的热凸度和磨损凸度	(158)
第八节	轧辊平移及辊缝曲线	(160)
第九节	板平直度控制基本原理	(162)

第三章 可变凸度控制方法的兴起及其工作原理

第一节	CVC 技术在国内外的应用	(166)
第二节	工作原理	(166)
第三节	CVC 轧辊的辊形曲线	(168)
第四节	影响辊缝形状的因素	(171)
第五节	弯辊和轧辊轴移调节范围	(173)

第四章 冷轧连续可变凸度平直度控制的机械结构

第一节	工作辊轴向移动的机械结构	(176)
第二节	工作辊轴向移动液压控制系统	(181)
第三节	连续可变凸度轧机正弯辊液压控制系统	(183)
第四节	需要考虑的几个问题	(185)

第五章 带钢板形测量

第一节	带钢板形检测仪的种类	(186)
第二节	ASEA QUSM200 冷轧板材板形测量系统	(193)

第六章 平直度控制的基础自动化

第一节 倾斜控制系统	(202)
第二节 CVC 控制系统	(203)
第三节 弯辊控制系统	(205)
第四节 乳化液流量控制	(206)

第七章 板形计算机控制系统

第一节 板形控制系统的组成及其功能概述	(208)
第二节 板形计算机控制系统	(210)

第八章 板形控制数学模型及程度设计

第一节 5*机架压下负荷分配	(221)
第二节 冷轧带钢板形缺陷的多项式回归分析及数学模型	(222)
第三节 板形控制设定计算数学模型	(225)
第四节 轧辊倾斜调节数学模型	(225)
第五节 工作辊弯辊调节数学模型	(226)
第六节 CVC 位置调节数学模型	(227)
第七节 轧辊分段冷却控制数学模型	(228)
第八节 带钢板形的自适应控制	(229)
第九节 板形控制系统的程序设计	(229)

第九章 平直度控制的展望

第一节 板厚和板形联合控制问题	(232)
第二节 板厚和板形分别控制问题	(233)

第三篇 热轧带钢宽度自动控制

第一章 带钢轧机板宽的控制

第一节 工艺要求和设备配置	(236)
第二节 立辊和平辊轧制后带钢的平面形状	(238)
第三节 板宽缺陷的形式和种类	(238)
第四节 板宽控制的数学模型	(239)
第五节 板宽控制的静态预设	(240)
第六节 板宽的动态控制	(242)
第七节 板宽控制及其自适应	(245)

第二章 板宽测量系统

第三章 计算机宽度控制系统

第一节	过程控制计算机的任务	(249)
第二节	轧制策略、道次计划预计算/后计算/再计算/新计算的概念	(251)
第三节	宽度控制模型的建立	(254)
第四节	宽度的自适应及其计算	(258)
第五节	宽度控制的实现	(262)

第四章 板宽控制基础自动化系统

第一节	粗轧控制系统的组成	(265)
第二节	板坯跟踪系统(BLAB)	(269)
第三节	过程控制系统(ABLA)	(273)

第五章 微张力控制在热带钢连轧机上的应用

第一节	控制原理	(284)
第二节	调试实践	(287)
第三节	实际成效	(289)
第四节	几点看法	(289)

第四篇 热轧带钢温度控制

第一章 热轧带钢终轧温度控制

第一节	终轧温度控制采用的主要设备	(292)
第二节	带钢头部终轧温度控制	(293)
第三节	使用温度加速度轧制时的终轧温度控制	(298)
第四节	使用功率加速度轧制时的终轧温度控制	(299)
第五节	终轧温度测量值的统计、回归处理及分类	(302)
第六节	终轧温度控制涉及的软件结构	(303)

第二章 热轧带钢卷取温度控制

第一节	层流冷却设备简况	(304)
第二节	卷取温度自动控制系统的的设计	(304)
第三节	卷取温度控制及策略	(306)
第四节	主要数学模型	(308)
第五节	控制系统调试及控制效果	(309)

第一篇 板带钢轧制厚度自动控制

厚度是板带钢的主要尺寸，厚度精度是考核板带钢质量的重要指标，厚度自动控制是现代化板带钢生产中实现厚度高精度轧制的重要手段。板带钢厚度控制应包括有纵向厚度控制和横向厚度控制，后者通常指的是板形控制，前者所指的是厚度自动控制系统所要解决的问题。厚度自动控制简称为 AGC (Automatic Gauge Control)。目前新建和改建的板带钢轧机都设置有厚度自动控制系统，它已经成为板带钢轧机控制系统中不可缺少的极为重要的组成部分。

第一章 板带钢厚度波动的原因及其厚度的变化规律

第一节 板带钢厚度波动的原因

凡是影响轧制压力、原始辊缝和油膜厚度等的因素都将对实际轧出厚度产生影响，概括起来有如下几方面：

(1) 温度变化的影响。温度变化对板带钢厚度波动的影响，实质就是温度差对厚度波动的影响，温度波动主要是通过对金属变形抗力和摩擦系数的影响而引起厚度差。

(2) 张力变化的影响。张力是通过影响应力状态，以改变金属变形抗力，从而引起厚度发生变化。张力的变化除对带钢头尾部厚度有影响之外，它也会影响其他部分的厚度发生变化。当张力过大时除会影响厚度，甚至会引起宽度发生改变，因此在热连轧过程中一般采用微套量的恒定小张力轧制，而冷连轧就与热连轧不同，由于是冷态进行轧制，并且随着轧制过程的进行，会产生加工硬化，故冷轧时采用较大张力进行轧制。

(3) 速度变化的影响。它主要是通过摩擦系数、变形抗力、轴承油膜厚度来改变轧制压力和压下量而起作用。

(4) 辊缝变化的影响。当进行带钢轧制时，因轧机部件的热膨胀、轧辊的磨损和轧辊偏心等会使辊缝发生变化，直接影响实际轧出厚度变化。轧辊和轴承的偏心所导致的辊缝周期性变化，在高速轧制情况下，会引起高频的周期性厚度的波动。

除上述影响因素之外，来料厚度和机械性能的波动，也是通过轧制压力的变化而引起带钢厚度产生变化。冷轧时由于带钢有焊缝，焊缝处的硬度要比其他部分高，因此也会引起厚度发生波动。

第二节 轧制过程中厚度变化的基本规律

带钢的实际轧出厚度 h 和预调辊缝值 S_0 和轧机弹跳值 ΔS 之间的关系可用弹跳方程描述:

$$h = S_0 + \Delta S = S_0 + \frac{P}{K_m} \quad (1-1-1)$$

由它所绘成的曲线称为轧机弹性曲线, 如图 1-1-1 曲线 A 所示。其斜率 K_m 称为轧机刚度, 它表征使轧机产生单位弹跳量所需的轧制压力。

带钢实际轧出厚度主要取决于 S_0 , K_m 和 P 这三个因素。因此, 无论是分析轧制过程中厚度变化的基本规律, 抑或阐明厚度自动控制在工艺方面的基本原理, 都应从深入分析这三个因素入手。

轧制时的轧制压力 P 是所轧带钢的宽度 B 、来料入口与出口厚度 H 与 h 、摩擦系数 μ 、轧辊半径 R 、温度 t 、前后张力 σ_h 与 σ_H 以及变形抗力 σ_s 等的函数。

$$P = F(B, R, H, h, f, t, \sigma_h, \sigma_H, \sigma_s) \quad (1-1-2)$$

此式为金属的压力方程, 当 B , μ , R , t , σ_h , σ_H , σ_s 及 H 等均为一定时, P 将只随轧出厚度 h 而改变, 这样便可以在图 1-1-1 的 $P-h$ 图上绘出曲线 B, 称为金属的塑性曲线, 其斜率 M 称为轧件的塑性刚度, 它表征使轧件产生单位压下量所需的轧制压力增量。在计算机控制的条件下, M 值的确定, 可以根据已知的 H , h , B , R , t , ν 和材质等测量出一个轧制压力 P , 然后再假定在其他条件不变的情况下, 增加 0.1mm 的压下量 $\Delta h'$ (即改变 h), 又可测量出一个轧制压力 P' , 则 M 便可按下式确定出来:

$$M = \frac{P' - P}{\Delta h'}$$

此外, 也可用直线斜率 $M = k \frac{\Delta P}{\Delta h}$ 近似地代替塑性曲线上工作点处的切线斜率的办法来确定, 系数 k 是为了修正此种近似计算所产生的误差, 系数 k 一般为 $k = 0.9 \sim 1.1$ 。

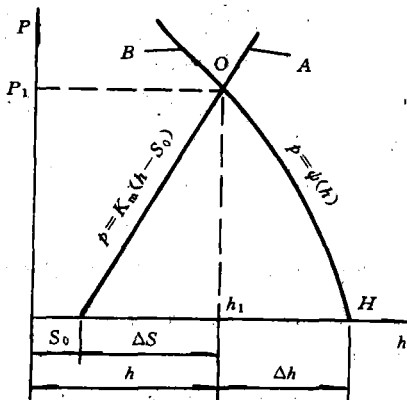


图 1-1-1 弹塑性曲线迭加的 $P-h$ 图

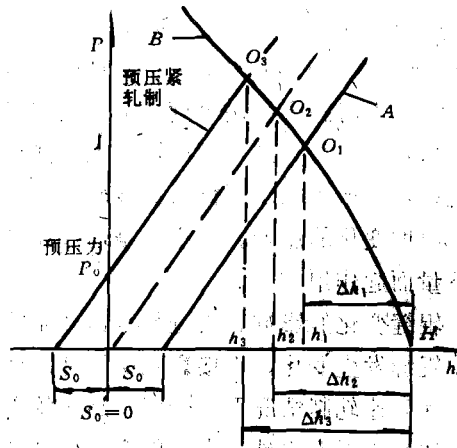


图 1-1-2 压下辊缝设定位置对轧出厚度的影响

(1) 实际轧出厚度随辊缝而变化的规律。轧机的原始预调辊缝值 S_0 决定着弹性曲线 A 的起始位置。随着压下螺丝设定位置的改变, S_0 将发生变化。在其他条件相同的情况下, 他将按如图 1-1-2 所示的方式引起带钢的实际轧出厚度 h 的改变。例如因压下调整, 辊缝变小, 则 A 曲线平移, 从而使得 A 曲线与 B 曲线的交点, 由 O_1 变为 O_2 , 此时实际轧出厚度便由 h_1 变为 h_2 , $\Delta h_2 > \Delta h_1$, 带钢便被轧得更薄。

当采取预压靠轧制时, 即在带钢进入轧辊之前, 使上下轧辊以一定的预压靠力 P_0 互相压紧, 也就相当于辊缝为负值 ($-S_0$), 这样就能使带钢轧得更薄, 此时实际轧出厚度变为 h_3 , $h_3 > h_2$, 其压下量为 Δh_3 。

除上述情况之外, 在轧制过程中, 因轧辊热膨胀、轧辊磨损或轧辊偏心而引起的辊缝变化, 也会引起 S_0 改变, 从而导致轧出厚度 h 发生变化。

(2) 实际轧出厚度随轧机刚度而变化的规律。轧机的刚度 K_m 随轧制速度、轧制压力、带钢宽度、轧辊的材质和凸度、工作辊与支持辊接触部分的状况而变化。所以, 轧机的刚度系数不是固定的常数, 而是由各种轧制条件所决定的数值。

当轧机的刚度系数由 K_{m1} 增加到 K_{m2} , 则实际轧出厚度由 h_1 减少到 h_2 , 如图 1-1-3 所示。可见, 提高轧机的刚度有利于轧出更薄的带钢。目前板带钢轧机的刚度通常大于 $4.9 \sim 5.88 \text{ MN/mm}$ 。

在实际的轧制过程中, 由于轧辊的凸度大小不同, 轧辊轴承的性质以及润滑油的性质不同, 轧辊圆周速度发生变化, 也会引起刚度系数发生变化。就使用油膜轴承的轧机而言, 当轧辊圆周速度增加时, 油膜厚度会增厚, 油膜刚性增大, 带钢可以轧得更薄。

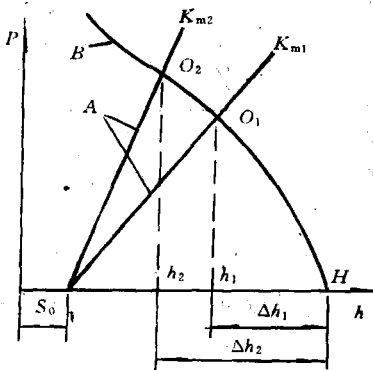


图 1-1-3 轧机刚性系数对轧出厚度的影响

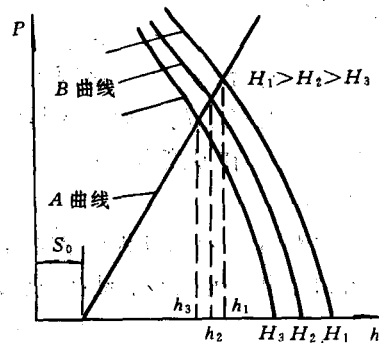


图 1-1-4 来料厚度对轧出厚度的影响

(3) 实际轧出厚度随轧制压力而变化的规律。如前所述, 所有影响轧制压力的因素都会影响金属塑性曲线 B 的相对位置和斜率, 因此, 即使在轧机弹性曲线 A 的位置和斜率不变的情况下, 所有影响轧制压力的因素都可以通过改变 A 和 B 二曲线的交点位置, 而影响带钢的实际轧出厚度。

当来料厚度 H 发生变化时, 便会使 B 曲线的相对位置和斜率都发生变化, 如图 1-1-4 所示。在 S_0 和 K_m 值一定的条件下, 来料厚度 H 增大, 则 B 曲线的起始位置右移, 并且其斜率稍有增大, 即材料的塑性刚度稍有增大, 故实际轧出厚度也增大。反之, 实际轧出厚度要减少。所以当来料厚度不均匀时, 则所轧出的带钢厚度也将出现相应的波动。

在轧制过程中，当减少摩擦系数时，轧制压力会降低，可以使得带钢轧得更薄，如图 1-1-5 所示。轧制速度对实际轧出厚度的影响，也主要是通过对摩擦系数的影响来起作用，当轧制速度增高时，摩擦系数减小，则实际轧出厚度也减少，反之则增厚。

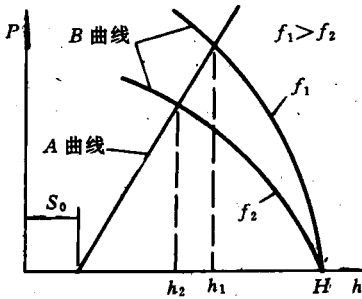


图 1-1-5 摩擦系数对轧出厚度的影响

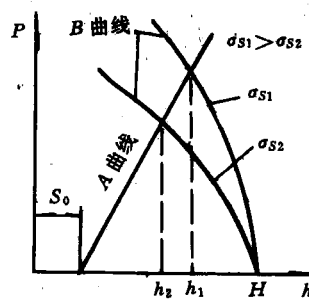


图 1-1-6 变形抗力对轧出厚度的影响

当变形抗力 σ_s 增大时，则 B 曲线斜率增大，实际轧出厚度也增厚，反之，则实际轧出厚度变薄，如图 1-1-6 所示。这就说明当来料机械性能不均或轧制温度发生波动时，金属的变形抗力也会不一样，因此，必然使轧出厚度产生相应的波动。

轧制张力对实际轧出厚度的影响，也是通过改变 B 曲线的斜率来实现的，张力增大时，会使 B 曲线的斜率减小，因而可使带钢轧得更薄，如图 1-1-7 所示。热连轧时的张力微调，冷轧时采用较大张力的轧制，也都是通过对张力的控制，使带钢轧得更薄和控制厚度精度。

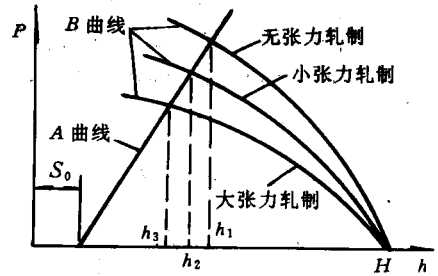


图 1-1-7 张力对轧出厚度的影响

在实际轧制过程中，以上诸因素对带钢实际轧出厚度的影响不是孤立的，而往往是同时对轧出厚度产生作用。所以，在厚度自动控制系统中应考虑各因素的综合影响。

轧机的弹性曲线 A 和轧件塑性曲线 B，实际上并不是直线，但是由于在轧制过程中实际的轧制压力和轧出厚度都在曲线的直线段部分，为了便于分析问题，常把它们当成直线来处理。

第三节 使用部门对板带钢厚度精度的要求

随着汽车制造工业自动化程度的提高，要求相应地提高制造各种汽车部件的板带材质量。现代化的汽车生产厂早已着手引用现代化传递式压力机等改进方案进行连续生产，以此来提高汽车部件的质量和降低成本，因此要求为汽车制造提供符合更严格公差的厚度均匀的钢板，使冷轧板带钢产品要符合 AISI（美国钢铁协会）厚度公差标准。希望冷轧出来的板带材厚度偏差为其厚度的 $\pm 1\%$ ，沿板卷长度方向上 98% 的中心厚度均匀。

在制罐的深冲过程中，那怕有个别的尺寸超出公差也会导致制罐生产线的停产，因此，“稳态”轧制过程中厚度的分散范围（超过目标厚度的最大正偏差减去最大负偏差）被选作轧

制过程中评定板带材厚度精度的唯一标准。例如厚度在 0.19~0.28mm 范围内的板带材厚度分散度应在 5%~8% 之间,而要求的分散度为 5.4%。因此,对板带材的厚度精度也有很高的要求。

第四节 厚度自动控制的发展概况

在板带钢轧制中,减少板带钢的厚度偏差,提高产品的质量,降低成本,是满足用户要求的重要条件。开发厚度自动控制系统就是为了减少板带钢的纵向厚度偏差,提高其厚度精度。

在实际生产中,电动压下 AGC 是最先取得成功的,然后才开发出液压 AGC。1955 年在冷轧机上开始应用 AGC,1958 年在热连轧轧机上开始应用 AGC。

实践表明,电动 AGC 就其负载和响应特性而言,它适应不了大轧制力下的大规模生产,满足不了高精度产品的要求。由于增加了对降低价格和厚度精度的要求,电动压下 AGC 系统显得很不适应形势发展的需要,特别是高速轧制时,电动压下机电系统的响应速度更是不适应。为了解决此问题,便积极开展了对改善 AGC 系统响应特性的研究。掌握了能在大轧制力和恶劣环境下可靠工作的伺服控制技术以及对液压管道的消震和高压液压密封作了改进。于是液压 AGC 在 1969 年被正式投入工业应用。

液压 AGC 与电动 AGC 相比,它具有快速响应,控制精度高,易于实现轧机刚性可变控制等一系列优点。表 1-1-1 是日本君津厂在带钢精轧机上采用的液压 AGC 与电动 AGC 的性能对比情况。从表 1-1-1 中列的数据可以清楚看出,液压 AGC 的阶跃响应特性是电动 AGC 的 10 几倍,其负荷极限为电动 AGC 的 1.75 倍。这就说明液压 AGC 具有很大的优越性。

表 1-1-1 液压 AGC 与电动 AGC 性能对比

项 目		液 压 AGC	电 动 AGC
执 行 机 构		油 缸	压 下 螺 丝
响 应	阶 跃 特 性	达 90% 响应需 0.035s	达 90% 响应需 0.36s
	频 率 特 性	-3dB 时为 15Hz	-3dB 时为 0.6Hz
压 下 螺 丝 负 荷		轻 载 (轧制时无作用)	重 载 (轧制时控制)
压 下 螺 丝 推 力 轴 承		轻 载	重 载
负 荷 极 限		68.6MN	39.2MN

1960 年美国开始在热带钢轧机上使用计算机控制,1964 年、1966 年英国和日本也分别采用了计算机控制。用计算机全面控制冷轧机是在 70 年代才开始的。由于板带钢轧机建立了各种自动控制系统,实现了计算机控制,使轧机自动化水平得到了显著的提高,于是开始采用直接数字计算机控制 AGC (称为 DDC-AGC)。现在,板带钢厚度自动控制和全盘计算机控制已成为轧制生产中必不可少的手段。

我国板带钢厚度自动控制系统的轧机,其发展情况可以分三种,第一种是自行设计和研制的;第二种是在旧轧机改造时采用的;第三种是引进的板带轧机上所采用的。我国自行设计和研制的液压厚度自动控制的轧机,一是西安重型机械研究所 1964 年设计和研制的 $\phi 110/\phi 325 \times 300$ mm 全液压四辊可逆式冷轧机,该轧机采用检测工作辊轴承座位移来进行辊缝控

制,并具有刚性可调和恒张力控制,该轧机装有液压推上和液压弯辊等装置,鉴定时轧制厚度为0.18~0.30mm带钢时,其厚度偏差可达 $\pm 5\mu\text{m}$,轧制速度只为0.8~1.0m/s。另一台是上海冶金机械总厂和北京科技大学共同设计和研制的 $\phi 110/\phi 420 \times 350\text{mm}$ 高精度四辊可逆式精密冷轧机,轧制速度为2.2~3.0m/s,要求轧制带钢厚度和偏差为 $0.1 \pm 0.004\text{mm}$ 。

在旧轧机上经改造后采用AGC的,有冶金部钢铁研究总院和上钢一厂共同研制的“上钢一厂2350mm四辊中板轧机液压微调装置”,第一重型机器厂与济南钢厂共同研制的“济南钢厂2350mm四辊中板轧机液压微调装置”,钢铁研究总院还为马鞍山钢铁公司等中板轧机研制了四辊液压微调装置。这些轧机安装了液压微调装置之后,可使辊缝调节速度加快,调整精度提高,保证轧机操作安全,能有效地控制板形,实现负公差轧制,提高钢板成材率等。

我国从60年代中期以来,先后从日本、德国、美国等引进了十几套板带钢轧机和二手设备。引进的板带钢冷轧机的技术装备都比较先进,都设置有计算机控制的液压厚度自动控制系统,还有比较完善的工艺参数检测系统。武钢1700mm热连轧机与1700mm冷连轧机,宝钢的2050mm热连轧机与2030mm冷连轧机,都采用了计算机控制的液压AGC。

第五节 当今厚度自动控制系统所能达到的厚度精度水平

就热连轧宽带而言,从公开发表的材料来看,加拿大安大略省的Stelco伊利湖厂的2050mm宽带钢轧机,自1983年开工以来一直以生产高质量钢板而闻名。表1-1-2是该厂1986年全年所有厚度品种的全部记录结果。从表1-1-2中所列的厚度精度水平来看,带卷全长能做到93.31%的厚度偏差都在 $\pm 0.025\text{mm}$ 范围之内,是世界上至今取得的最佳结果。

表 1-1-2 1986年伊利湖厂的2050mm宽带钢轧机所轧带钢厚度质量效果

	厚度偏差, mm	厚度范围,%		
		薄型<2.5mm	中型2.5~6.0mm	厚型>6.0mm
头部 (2s测量)	± 0.05	93.53	90.74	97.01
	± 0.10			
带卷全长 (采样间隔200mm)	± 0.025	93.31	92.20	
	± 0.050	98.64	98.20	93.00
	± 0.100			98.77
带卷数		2719	35662	10157

就冷轧板带钢而言,冷轧板带钢液压AGC的控制精度一般为 $\pm (5\sim 10)\mu\text{m}$ 。根据1981年日本千叶制铁所报导,六机架冷连轧机可使0.3mm的成品钢带的厚度偏差为 $\pm 2.1\mu\text{m}$,厚度偏差为其厚度的 $\pm 0.7\%$,这是到目前为止冷轧板带厚度精度的世界最高水平。

我国从1983年以来,上海钢铁研究所、陕西钢铁研究所和大连钢厂先后从美国W. F.公司(WATEREURY FARREL)引进的20辊轧机,是具有80年代国际水平的多辊轧机,它的 μ -AGC厚度自动控制系统可以将厚度为0.125mm的成品带材,使其厚度偏差控制到 $\pm 0.00127\text{mm}$,即厚度偏差为其厚度的 $\pm 1.0\%$ 左右。

第二章 板带钢轧制时厚度控制用工艺数学模型

随着工业生产不断发展,板带钢轧机的控制经历了人工操作、人工操作与单机自动控制、计算机控制和单机自动控制系统并存、全部采用电子计算机进行控制等几个阶段。

现代化的板带钢冷热连轧都采用了计算机进行控制,计算机对轧制过程进行控制要依据三大基本要素:可靠的控制用数学模型、相适应的控制系统、以及可靠性高的检测器。所以数学模型是计算机对轧制过程进行控制的基本要素。计算机进行在线最佳控制时,将依据来料的条件(如钢种、规格等)快速而准确地进行最佳计算,实现负荷的最佳分配。利用数学模型求解各架轧机各种控制参量的最佳设定值,并能随着过程的变化及时补偿动态过程中各设定值。在各自动控制系统配合下,将各个控制参量始终调正在最佳的设定值,保证被控制的对象(生产过程)在最优工况(生产条件)下进行操作。

根据被控对象的大小不同,数学模型可以是一个公式,也可以是一组公式的有机结合。如描写一个控制系统,它有一定的设定程序,有一系列方程式来表示各参数间关系,所以设定系统也可以认为是一个数学模型。此外数学模拟也可以认为是一个数学模型,因为任何一个复杂的生产过程都可以用一组方程式来表示,将一组方程放入计算机中,通过变换方程组中各参数来模拟实际生产中可能出现的各种情况,从而得出各种控制方案及参数间的变化规律,由于数学模拟研究的是与过程相似的模型,因此数学模拟本身也就是一个数学模型。

板带钢轧制时厚度控制用的工艺数学模型有:弹跳模型、轧制压力模型、前滑模型、能耗模型、温降模型等。

第一节 弹跳模型

一、弹跳模型在计算机控制连轧过程中的重要性

在计算机控制的连轧过程中,弹跳模型是辊缝设定、压力设定、板带钢厚度自动控制的基本依据。板带钢厚度自动控制是整个生产过程中保证质量的重要环节。它是以轧件出口厚度为目标量,以压力、张力、厚度这些参量之一作为限制量,以辊缝或张力作为调节量的不同形式的厚控系统。若以厚度作为目标量,以压力作为限制量,以辊缝作为调节量就构成了压力反馈式厚控系统。若以张力作为限制量,以辊缝作为调节量就构成了张力控制系统。若以厚度作为目标量的同时又作为限制量,以张力—辊缝作为调节量就构成了厚度反馈系统。所有这些厚控系统的基本依据都是弹跳方程。弹跳方程是空载辊缝精确设定的主要依据,辊缝设定得正确与否将直接影响连轧机的生产率和产品质量。

弹跳方程与另一个基本工艺方程——塑性方程联立可以解出轧机的工作点,用此二方程构成的图称为 $P-h$ 图,借助于 $P-h$ 图可以很直观地分析产生厚差的原因和轧制过程中各参数(如摩擦系数、张力等)变化对厚度差的影响,并给出消除厚差的调节方法。在自适应系统中,弹跳方程也是基本依据。

二、弹跳模型的基本概念

在板带钢轧制过程中,轧辊对轧件施加的压力使轧件产生塑性变形,使轧件从入口的厚度 H 压缩到出口厚度 h ,与此同时,轧件也给轧辊以同样大小、方向相反的反作用力,这个反作用力传到机座各部零件上,使各零件产生一定的弹性变形。这些零件弹性变形的累积后果都反映在轧辊的辊缝上,使辊缝增大,这就被称为辊跳或弹跳。由于同时产生了轧辊弯曲,也会导致辊缝沿宽度方向产生不均匀的变化,将对板形产生影响。

轧机弹跳量一般可达 $2\sim 5\text{mm}$,对开坯轧机或开坯道次来讲,由于压下量较大,坯料较厚,弹跳量相对来讲影响较小,可以忽略不计。但对热轧或冷轧薄板带材来讲,轧制时的压下量和轧机的弹跳属同一个数量等级,有时弹跳量还会超过板带材的厚度,在此种情况下,弹跳必须加以考虑,并且对弹跳要进行精确计算,只有这样才能得到符合公差的产品。

实践表明,轧机的弹跳与轧制时的压力有密切关系,通过实验可以写出轧机弹跳量和轧制时载荷间的关系式为

$$P = K_m(S - S'_0) \quad (1-2-1)$$

式中 S ——载荷为 P 时的辊缝, mm;

S'_0 ——空载下的辊缝, mm;

K_m ——轧机总刚度, N/mm。

如果忽略轧件离开轧辊后的弹性回复,可以认为轧件厚度就等于有载辊缝,即 $S=h$,将它代入式(1-2-1),整理后可写成

$$h = S = S'_0 + \frac{P}{K_m} \quad (1-2-2)$$

式(1-2-2)便是轧制力 P 和出口厚度 h 之间的关系式。

由试验可以作出机架弹性变形特性图 1-2-1,从图 1-2-1 可以看出,轧机弹性变形与轧制压力之间并非线性关系,在小轧制压力阶段,弹性变形和轧制压力呈曲线关系,当轧制压力大到一定程度时,弹性变形和轧制压力才近似呈线性关系。对于曲线段的存在可以作如下解释:当轧制压力小时,轧机各个零件之间轴承之间的间隙和不平整是逐步消除的,同时零件

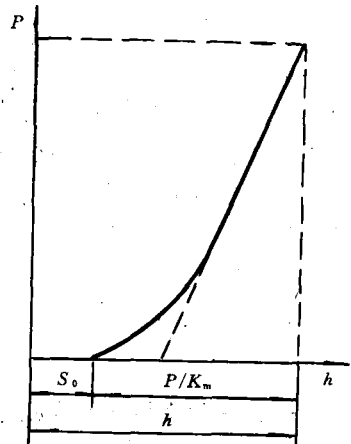


图 1-2-1 机架弹性变形曲线

之间存在着接触变形,此时各零件尚未开始弹性变形。这一非线性段并不是稳定的,每次换辊后都会有变化,特别是轧制压力接近于零时的变形(实际上是零件间的间隙变化)是很难准确测定的。所以在实践中,轧辊的实际零位很难确定,因此式(1-2-2)用于控制轧出厚度是有困难的。

三、弹跳模型的建立

弹跳特性曲线的直线部分的斜率称为轧机刚性系数或轧机模数。更确切地说,轧机刚性系数应由曲线上任意位置的斜率来定义。由于曲线的斜率受各种轧制条件影响,因此,轧机刚度系数并不是轧机固有的常数,所以在实际使用弹跳方程时要考虑对刚度系数的修正。

为了消除上述对 S 影响的不稳定因素,于是采用了人工零位的方法。即先将轧辊预压靠