

上海宝钢总厂
轧钢继续工程教育系列教材

板带材厚度自动控制

东北工学院加工系
上海宝钢总厂干部研修所
一九九一年八月

前 言

宝钢二期包括热轧带钢厂和冷轧带钢厂是我国从西德引进的大型建设项目。这项工程的特点除了设备大型化,工艺连续化和高速化之外,还采用了多项先进技术。

热轧带钢厂精轧机组设有全液压厚度自动控制,液压弯辊自动控制及“连续可变凸度”系统,还采用了地下式全液压万能卷取机等新技术和设备,全厂的生产和管理采取了四级计算机系统,达到当代世界先进水平。

冷轧带钢厂引进国内第一套全连续式无头轧制冷轧机,配备有过程计算机控制的板厚和板形自动控制系统,采用了新型的CVC系统,通过轴向移动工作辊,连续变化辊缝可获得理想的板形控制。过程计算机系统执行冷轧连轧机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分析,过程控制终端及工业电视监视器用以完成冷连轧机的智能控制,这些新技术在国际上也处于领先地位。

为了学习和消化宝钢引进冷热带钢轧机的先进技术,使这些新技术为我国国内在轧钢领域工作的广大工程技术人员所了解和掌握,并能将有关技术逐步推广应用到实际生产中去,做到一家引进,百家受益,冶金部东北工学院继续教育中心和宝山钢铁总厂教培中心联合举办“板带轧制过程自动化”研修班,计划讲授“板带材厚度自动控制”,“宽带钢轧机平直度自动控制”,“热轧板宽自动控制”和“板带轧机计算机控制系统”等四门课,本书是其中之一,“板带轧机计算机控制系统”部分的讲稿。

该教材共分五章,第一、二、三章讲述板带钢厚度波动的原因及其厚度的变化规律;板带钢轧制时厚度控制用数学模型;板带钢厚度控制的基本原理,此三章由丁修 撰稿。第四章讲述2050mm热连轧机的厚度自动控制,其中第一、二、三节由吴章维撰稿;第四、五节由袁建光撰稿;第五章讲述 2030mm冷连轧机厚度自动控制,其中,第一、二、三节由朱泉封撰稿;第四节由许茂中撰稿;第五节由宋世民撰稿;第六节由徐耀寰和瞿标撰稿;全书由丁修 教授统一编稿。

本书文稿和图表的校对和整理以及全部打字得到了雷龙同志的帮助,宝钢热轧带钢厂和冷轧带钢厂等兄弟单位的同志对本书的编写提出了不少宝贵意见,宝钢干部研修所的同志为本书的编写做了许多组织工作,在此一并表示感谢。

由于编者的业务水平所限,再加上时间短促,肯定还有一定的错误与不妥之外,诚恳希望参加短训班的同志和其它有关人员给予批评指正。

目 录

前 言

第一章 板带钢厚度波动的原因及其厚度的变化规律	(1)
一、板带钢厚度波动的原因	(1)
二、轧制过程中厚度变化的基本规律	(1)
三、使用部门对板带材厚度精度的要求	(5)
四、厚度自动控制系统的发展概况	(6)
五、当今厚度自动控制系统所能达到的厚度精度水平	(8)
第二章 板带钢轧制时厚度控制用工艺数学模型	(9)
第一节 弹跳模型	(9)
一、弹跳模型在计算机控制连轧过程中的重要性	(9)
二、弹跳模型的基本概念	(10)
三、弹跳模型的建立	(11)
四、轧机刚度的测定	(12)
五、弹跳模型精度分析及提高精度的措施	(15)
第二节 轧制压力模型	(17)
一、轧制压力模型在计算机控制中的应用	(17)
二、建立轧制压力模型的方法及主要影响因素的基本结构	(18)
三、在线使用的轧制压力模型号	(30)
第三节 前滑模型	(44)
一、前滑模型在计算机控制连轧过程中的应用处	(44)
二、前滑的理论模型	(45)
三、前滑的统计模型	(50)
第四节 能耗模型	(51)
一、能耗模型在计算机控制过程中的应用	(51)
二、能耗模型的理论基础	(51)
三、能耗模型的结构形式	(53)
四、建立能耗模型的步骤	(58)
第五节 温降模型	(59)
一、轧制过程中的温降变化的基本规律	(60)

二、热连轧过程中的温降模型.....	(64)
第三章 板带钢厚度自动控制的基本原理.....	(73)
第一节 厚度自动控制的基本型式及其控制原理.....	(73)
一、反馈式厚度自动控制系统.....	(73)
二、厚度计式厚度自动控制系统.....	(76)
三、前馈式厚度自动控制系统.....	(78)
四、张力式厚度自动控制系统.....	(80)
五、液压式厚度自动控制系统.....	(83)
第二节 液压式厚度自动控制系统.....	(83)
一、电动压下系统的局限性.....	(83)
二、现代液压压下系统的一般结构.....	(84)
三、液压 AGC 中的轧机刚性可变控制.....	(87)
第三节 厚度自动控制系统中的补偿控制和措施.....	(93)
一、支持辊偏心的补偿控制.....	(93)
1. 支持辊偏心对厚度精度的影响.....	(93)
2. 轧辊系统跳动的概率分析.....	(94)
3. 消除轧辊偏心的方法和措施.....	(96)
4. 支持辊轴承定位键引起的偏心距 对厚度精度影响及其消除方法.....	(103)
二、油膜厚度的补偿.....	(107)
三、板带钢宽度的补偿控制.....	(109)
四、速度补偿的计算和控制.....	(111)
五、带钢尾部补偿值的计算.....	(111)
第四章 2050mm热连轧机的厚度自动控制.....	(113)
第一节 厚度自动控制系统的组成.....	(113)
一、2050mm热连轧机的机械结构.....	(113)
二、液压系统的控制线路图.....	(114)
三、检测装置.....	(114)
第二节 初始辊缝的设置.....	(126)
一、液压压下工作点的由来.....	(126)
二、初始辊缝的设置.....	(126)
三、手动干预的种类.....	(127)

四.	倾斜监视	(128)
第 三 节	液压AGC的原理及其运算	(128)
一.	轧机刚性系数的确定	(128)
二.	AGC 控制原理	(130)
三.	弹跳修正量S	(131)
四.	偏心波动量SE	(132)
五.	监控AGC修正量S	(133)
六.	AGC 功能控制框图	(134)
第 四 节	带钢头部厚度设定及自适应控制	(136)
一.	轧制厚度的确定	(136)
二.	带钢头部厚度的设定	(137)
三.	带钢变形特性的预控制	(138)
四.	入口修正	(139)
五.	带钢头部厚度的自适应控制	(143)
第 五 节	厚度控制功能效果评价	(143)
一.	带钢厚度超差率	(144)
二.	带钢厚度差分档统计	(144)
三.	考核厚控系统功能的评价方法	(145)
四.	厚度控制系统各功能效果及 工艺参数对厚度影响的评价	(149)
第 五 章	2030mm 冷连轧机厚度自动控制	(151)
第 一 节	概述	(151)
第 二 节	2030冷连轧机的设备组成及其主要特性	(152)
一.	设备组成	(152)
二.	设备性能	(153)
第 三 节	2030冷连轧机的厚度自动控制系统	(154)
一.	厚度自动控制系统的功能	(154)
二.	带钢段及其划分原则	(156)
三.	带钢段长度计算	(156)
四.	AGC 功能说明	(157)
五.	AGC 方式的选择及其功能组成	(172)
第 四 节	机架间的张力控制	(174)

一、	张力实际值的检测	(174)
二、	静张力控制	(175)
三、	动张力控制	(178)
四、	4、 5 机架间动张力控制 (MODUS C)	(182)
第 五 节	张力卷取机控制	(182)
一、	张力给定	(184)
二、	硬芯控制 (Hard Core Control)	(185)
三、	张力调节 (转矩调节)	(186)
四、	加速力矩 (Mb)	(188)
五、	弯曲力矩 (MR1)	(190)
六、	摩擦力矩 (MR)	(190)
七、	转矩综合及其输出	(191)
第 六 节	厚度自动控制效果的分析	(191)
一、	第一机架各厚度控制系统的控制作用和分析	(192)
二、	机架间的恒张力控制效果及其分析	(195)
三、	第四与第五机架的厚度控制及其效果	(195)

第一章 板带钢厚度波动的原因及其厚度的变化规律

一、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，概括起来有如下几个方面：

1. 温度变化的影响 温度变化对板带钢厚度的影响，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的误差。

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如张力的变化除对带钢头尾部厚度有影响外，它也会影响其它部分的厚度发生变化，当张力过大时除会影响厚度外，甚至会引起宽度发生变化，因此在热连轧过程中一般采用微套量的恒定张力轧制，而冷连轧则不同，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的变化。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它部分高，因此也会引起厚度发生波动。

二、轧制过程中厚度变化的基本规律

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

$$h = S_0 + \Delta S = S_0 + P/K_m \quad (1-1)$$

由它所绘成的曲线为轧机弹性曲线，如图 1-1 中曲线 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。

带钢的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，还是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 、来料厚度 H 与出口厚度 h 、摩擦系数 f 、轧辊半径 R 、温度 t 、前后张力 σ_h 和 σ_H 以及变形抗力 σ_s 等的函数：

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

此式为金属的压力方程，当 B 、 f 、 R 、 t 、 σ_h 、 σ_H 、 σ_s 及 H 等一定时， P 将只随轧出厚度 h 而改变，这样便可以在图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 称为轧机的塑性刚度，它表征使轧机产生单位压下量所需的轧制压力增量。在计算机控制的情况下， M 值的确定，可以根据已知的 H 、 h 、 B 、 R 、 t 、 v 和材质等测量出一个轧制压力 P ，然后在假定其它条件不变的情况下，增加0.1毫米的压下量 $\Delta h'$ （即改变 h ），又可测量出一个轧制压力 P' ，则 M 便可以按下式确定出来：

$$M = (P' - P) / \Delta h'$$

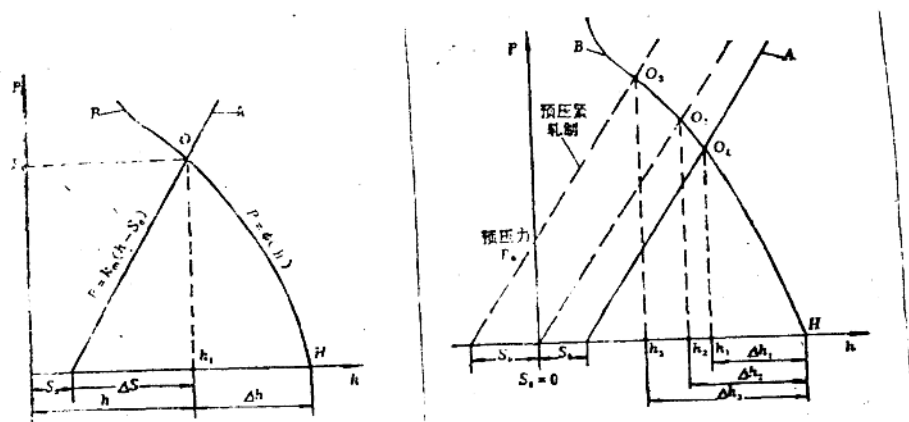


图 1-2

此外，也可以用直线斜率 $M = k \Delta P / \Delta h$ 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 是为了修正此种计算所产生的误差，系数 k 一般

为 $k=0.9\sim 1.1$ 。

1、实际轧出厚度随辊缝而改变的规律 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。在其它条件相同的情况下，它将按如图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。

当采取预压紧轧制时，即在带钢进入轧辊以前，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变化而改变的规律

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、工作辊和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} 时，则实际轧出厚度由 h_1 减小到 h_2 ，如图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500~600吨/毫米。

在实际的轧制过程中，由于轧辊的凸度大小不同，轧辊轴承的性质和润滑油的性质不同，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，油膜厚度会增加，油膜刚性会增大，带钢可以轧得更薄。

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，即使在轧机的弹性曲线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，而影响着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发生变化，如图1-4所示。在 S_0 和 K_m 值一定的情况下，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, 实际轧出厚度要减小。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。

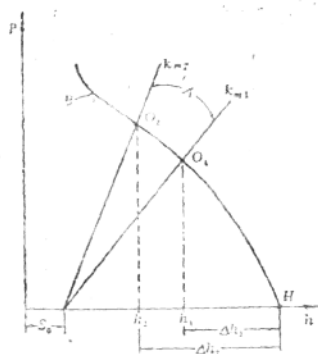


图 1-3

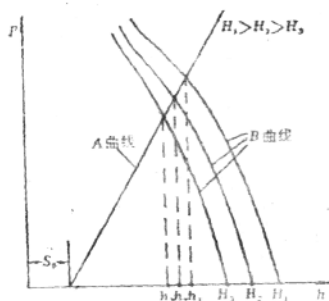


图 1-4 来料厚度对轧出厚度的影响

在轧制过程中, 当减小摩擦系数时, 轧制压力会降低, 可以使得带钢轧得更薄, 如图 1-5 所示。轧制速度对实际轧出厚度的影响, 也主要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小, 反之增厚。

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, 则实际轧出厚度薄, 如图 1-6 所示。这就说明当来料机械性能不均或轧制温度发生变化时, 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 1-7 所示。热连轧时的张力微调, 冷连轧时的较大张力轧制, 也都是通过对张力的控制, 使带钢轧得更薄和进行厚度精度控制。

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作用。

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。

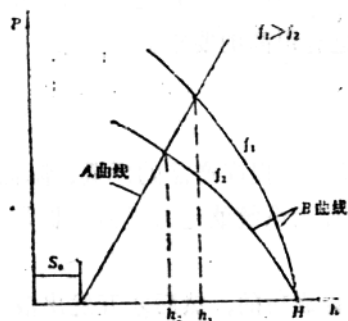


图 1-5 摩擦系数对轧出厚度的影响

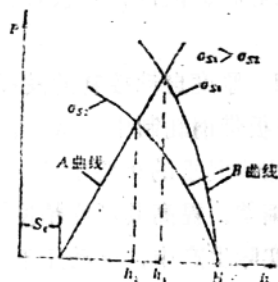


图 1-6 变形抗力对轧出厚度的影响

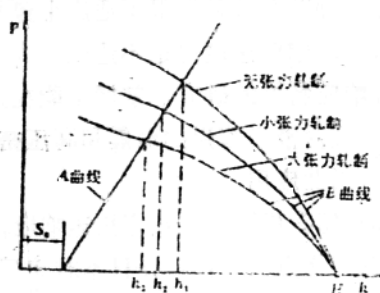


图 1-7 张力对轧出厚度的影响

三、使用部门对板带材厚度精度的要求

随着汽车制造工业自动化的提高,要求相应地提高制造汽车各种部件的板带材质量。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,哪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。

四. 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提高产品厚度精度的要求,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,便积极地开展了对改善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,易于实现轧机刚度可变控制等一系列优点。表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的十几倍,其负荷极限是电动AGC的1.75倍。这就说明了液压AGC具有很大的优越性。

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七十年代开始的。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,其发展情况可以从三个方面来看,第一种是自行设计和研制的;第二种是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

表 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 0.035 秒	达 90% 响 应 需 0.36 秒
	频 率 特 性	-3dB 时 为 15 Hz	-3dB 时 为 0.6 Hz
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		7000 t (68.6 MN)	4000 t (39.2 MN)

西安重型机械研究所 1964 年设计和研制的 $\phi 110/\phi 325 \times 300$ 全液压四辊可逆式轧机, 该轧机采用检测工作辊轴承座位移来进行辊缝控制, 并且有刚性可调 and 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 0.8~1.0 米/秒。另一台上海冶金机械总厂和北京科技大学共同设计和研制的 $\phi 110/\phi 420 \sim 350\text{mm}$ 高精度四辊可逆式精密冷轧机, 要求轧制带钢厚度公差为 $0.1 \pm 0.004\text{mm}$, 轧制速度为 2.2~3.0 米/秒。

在旧轧机上经改造后采用 AGC 的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”。第一重型机械厂和济南钢厂共同研制的“济南钢厂 2350 mm 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。安装了液压微调装置以后, 可使辊缝调节速度加快, 调整精度提高, 保证轧机操作安全, 能有效地控制板行, 实现负公差轧制, 提高钢板成材率。

我国从六十年代以来, 先后从日本、西德、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, 都具有计算机

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。五钢1700mm热连轧机与1700mm冷连轧机和宝钢的2050mm热连轧机与2030mm冷连轧机都采用了计算机控制的液压AGC。

五、当今厚度自动控制系统所能达到的厚度精度水平

就热连轧宽带钢而言，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，一直以生产高质量的钢板而闻名。表1-2是该厂1986年全年所有厚度品种的全部记录结果。

表 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

	公差 mm	厚度范围 (%)		
		薄型 <2.5mm	中型 2.5~6.0mm	厚型 >6.0mm
头部 (2秒测量)	± 0.05 ± 0.10	93.53	90.74	97.01
带卷全长 (采样间隔160)	± 0.025 ± 0.150 ± 0.100	93.31 98.64	92.20 98.20	93.00 98.77
带卷数		2719	35662	10157

从表1-2中所列的厚度精度水平来看，带钢全长能做到93.31%的厚度偏差都在 $\pm 0.025\text{mm}$ 范围以内，是世界上至今取得的最佳效果。

就冷轧板带钢而言，冷轧板带钢液压AGC的控制精度一般为 $\pm 5 \sim 10 \mu$ 。根据1981年日本钢铁研究所报导，六机架冷连轧机可使0.3mm的成品钢带的厚度偏差为 $\pm 2.1 \mu$ ，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V.F公司(VATERJURY FARREL)引进的二十辊轧机，是具有八十年代国际水平的全辊轧机，它的H-AGC厚度自动控制系统可以将厚度为0.125mm的成品带材，厚度偏差控制在 $\pm 0.00127\text{mm}$ 以内，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地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(生产过程)对象在最优工况(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组合。如描写一控制系统,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，就构成了张力厚控系统。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，就构成了厚度厚控系统。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 and 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. 弹跳方程的基本概念

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和各部零件上，使各零件产生一定的弹性变形。这些零件弹性变形的积累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 2~5mm，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。但对热轧和冷轧薄板而言，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。

实践证明，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的载荷之间的关系为：

$$P = K_m(S - S_0') \quad (2-1)$$

式中 S —— 载荷为 P 时的辊缝；

S_0' —— 空载下的辊缝；

K_m —— 轧机的总刚度，吨/毫米。

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

$$h = S = S_0' + P/K_m \quad (2-2)$$

公式 (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 2-1, 从图(2-1) 可以看出, 轧机弹性变形和轧制压力之间并不是线性关系, 在小轧制力阶段, 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、轴承座之间的间隙和不平整是逐渐消除的, 同时零件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, 公式(2-2)用于控制轧出厚度是很困难的。

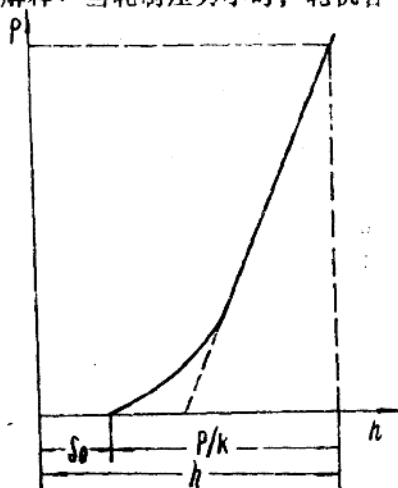


图 2-1

三、弹跳模型的建立

弹跳特性曲线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所影响, 因此, 轧机刚性系数并不是轧机的固有的常数, 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, 即先将轧辊预压靠到一定的压力 P_0 (如500吨), 此时, 将辊缝仪指示清零(作为零点), 再作弹性变形曲线, 以克服不稳定段的影响, 压靠零位和轧制时的弹性变形曲线如图 2-2 所示:

根据以上所述, 我们知道 g 点是不好确定的, 当进行预压靠时在 o 点处轧辊刚开始受力并变形, 当预压力增加到 P_0 时, 变形为 of' (为负值), 此时辊缝仪清零然后抬辊, 如抬到 g 点, 由于 $Ok'l'$ 与 gkl 是对称的, 如果 g 点能找到的话, 则 $of' = gf$, 所以, $of' = gf = So$, 此时辊缝仪人为的指零, 所示 So 为人工零位的辊缝仪指示值。此时用厚度为 h 的轧件轧入, 产生轧制压力 P , 轧出的厚度为 h 。从图 1-2 可以看出:

$$\text{由 } G_n \text{ 线得: } M(\Delta h + HG) = P$$

$$\text{由 } knl \text{ 线得: } h = So + (P - P_0) / K_m \quad (2-3)$$