

上海宝钢总厂
轧钢继续教育系列教材

热轧板宽自动控制

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轧连轧机的智能控制。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育中心联合举办“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，“热轧板宽自动控制”部分的讲稿。

本书第二章第三节由于长生、王文瑞同志编写，第三章由王文瑞同志编写，第四章由刘明同志编写，第五章由王保罗同志编写，其余各章由汪祥能同志编写并负责全书的编辑工作。

本书文稿和图表的校对和整理以及全部打字得到了马博、雷龙、李言堂同志的帮助。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处，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。

编者

一九九一年八月

目 录

概述	1
第一章 宽带钢轧机板宽的控制	4
第一节 工艺要求和设备配置	4
第二节 板宽控制的静态预设	4
第三节 板宽的动态控制	10
第四节 板宽控制及其自适应	14
第二章 板宽测量系统	15
第三章 计算机宽度控制系统	21
第一节 过程控制计算机的任务	21
第二节 轧制策略、道次计划予计算/后计算/再计算/新计算的概念	23
第三节 宽度控制模型的建立	27
第四节 宽度的自适应及其计算	33
第五节 宽度控制的实现	39
第四章 板宽基础自动化系统	44
第一节 粗轧控制系统的组成	44
第二节 板坯跟踪系统(BLAB)	48
第三节 过程控制系统(ABLA)	55
第五章 微张力控制在热带钢连轧机上的应用	70
第一节 控制原理	70
第二节 调试实践	73
第三节 实践成效	75
第四节 几点看法	76

板材轧制重点是厚度方向上的压缩和长度方向上的延伸,就连1925年以来发展起来的轧制理论中,即轧制中的应力和应变分布分析中,也是着眼于厚度方向与长度方向的应力,而忽视宽度方向上的第三应力。另外,因为开始就假设宽度方向无变形,所以未考虑轧制引起的宽展。

可是,因为实际上板带生产中也不存在着不容忽视的宽展,所以在对板材提出很高要求的今天,研制宽度自动控制系统引起人们的极大关注。

一、热轧板宽控制的目的

板坯的宽度和厚度分别用立辊和水平辊轧制后,其板坯的平面形状如图1所示。在仅存在水平轧制的情况下,前后端四角部分的金属沿宽度方向流动的约束小,与正常部分相比,则宽展变大,且前后端宽度方向中央部位的材料易沿轧制方向流动,平面形状如图1a所示的反燕尾槽。在立辊轧制的情况下,由于辊径与宽度之比很小,板坯边部两端的材料比中部的材料有更大的前滑和后滑,所以前端和后端宽度变窄,平面形状呈凹形。若板坯经立辊轧制后,再用水平辊进行压下时,由于宽度压下所产生的狗骨在靠近前后端部位处较低,所以狗骨返回量比正常部位要小,从而前后端欠宽现象很明显,前端的平面形状更呈鱼尾状。

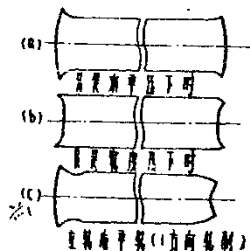


图1 主轧线平轧时的宽度变化

进行可逆轧制时,这些前后端变形就更加复杂地重合在一起。因为这种平面形状的前后端要当作切头被切去,所以随着宽度压下量 Δw 的增大,成品率大幅度降低。

图2是粗轧时发生的板宽波动情况。图中①是前后端板宽收缩,②是板坯

宽度斜稍，②是斜稍界内板宽波动。引起板宽波动的主要原因有：板坯在加热炉炉道上产生的黑印，火焰清理时在板坯边部产生的缺口，立辊的弹跳，以及精轧时张力引起的带钢宽度变化等。在同一批带钢里，沿着带钢长度的宽度不均匀性将会对合格成品产生显著的影响。若从回收金属观点，则减少带钢宽度不均匀性就是节约金属的主要潜力。若将宽度的偏差范围减少1毫米时，在现代的宽带钢轧机上就会节约金属大约1 KG/t。

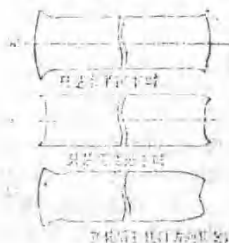


图2 粗轧时板宽波动形式

随着连铸技术的发展，在热轧坯料中连铸坯所占比例也日益增加。对带钢热轧机来说，其所需的板坯宽度是各不相同的，用连铸结晶器在线调宽技术虽然能满足热轧机对板坯宽度的要求，但连铸生产效率却大受影响。因此提出了在热带钢轧机对板坯宽度的要求。但是，立辊在宽度压下时，塑性变形只集中于板宽边缘部分，由于未变形部分使延伸受到约束，所以立轧后的板宽边缘部分会产生轧边凸起，即板宽断面呈狗骨形。而在板宽夹尾部分，塑性变形向长延伸，所以头尾部位的轧边凸起会在水平轧制时引起沿长度方向的宽度不均匀，而且促进了鱼尾的生成。这不但增大了带钢的宽度变化量，而且增大了带钢头尾的切损量。

为了减少黑印、缺口，立轧时不均匀狗骨变形所引起的带钢宽度变化和鱼尾，提高收得率，1975年以来，在热轧宽带钢轧机上开始采用宽度自动控制技术。

二、宽度控制的组成

宽度控制由以下几个部分组成：

- 粗带钢设定值的确定；
- 粗轧各立辊开口度的预设及其轧后修正；
- 精轧宽度的控制；
- 宽度控制及其自适应；
- 短行程控制；
- 宽度的前馈控制(PWC)；
- 自动宽度控制(AWC)。

三、宽度控制的功能

1. 粗带钢设定值的确定

在精轧七个机架间实现微张力、恒定张力的控制，即确保带钢在精轧机架轧制中不至由于大张力轧制产生带钢缩颈而使带钢变窄，或由于张力不稳定而使带宽度波动。这就意味着精轧成品宽度控制主要在粗轧机中实现。所以需将F7后目标宽度在考虑到精轧宽展对宽度的影响以及宽度附加值等因素后，将成品目标宽度值折算到R4出口粗带钢的目标值上。这样，控制了粗带钢宽度，实际上就达到了控制精轧带钢宽度的目的。

2. 粗轧各立辊开口度的预设及其轧后的修正

粗带宽度的控制主要靠 E1-E4立辊的侧压来实现。由R4出口的粗带钢目标值，根据宽度的负荷分配，计算最小道次数目，考虑经水平机架的宽展和狗骨宽展，计算出各立辊在各道次的侧压量，并送下级基础自动化计算机（以下简称BA）。

根据上个道次轧制的实际值，修正下个道次或以下各道次的设定值，使下个道次宽度设定值更接近实际工作点。这样，一边轧制，一边时时与目标值进行比较和修正，使得宽度在粗轧期间一直控制在设定点附近，从而达到R4出口目标宽度值上。

第一章 宽带钢轧机板宽的控制

第一节 工艺要求和设备配置

工艺要求

1. 由于宝钢热轧厂所用的板坯主要来源于连铸坯,少量来源于初轧坯,而连铸坯受调宽技术的限制,宽度规格较少,不能满足用户宽度规格变化频繁的要求。故在R1机架前采用E1加强型立辊,实现大侧压来解决这个矛盾。

2. E1立辊一个道次最大侧压量为120mm,三个道次最大有效侧压量为150mm。

3. 宽度沿长度方向允许的公差为0~+20mm。

4. E1-R1最多为三道次,E2-R2最多为九个道次,E3-R3、E4-R4为连轧,各为一道次。而E2仅单道次允许有侧压量,R2后立辊为设计预留,尚未实施,所以侧道次不允许有侧压量。

二. 设备配置

宽度控制主要在粗轧实现。直接参与宽度控制的仪表有:R1、R2后的测温计,测宽仪,R4和F7后的测温计,测宽仪,以及各水平机架、垂直机架的测压

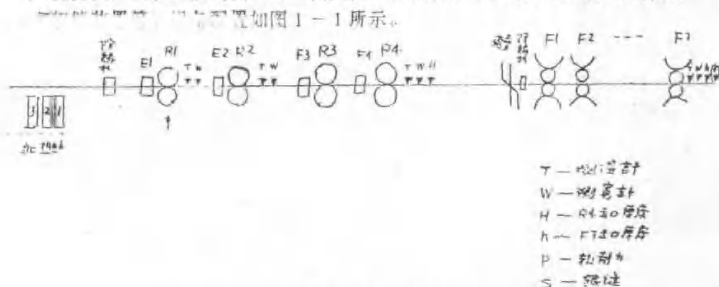


图 1-1 粗轧机架宽度控制设备配置图

第二节 板宽控制的静态预设定

首先限制立辊机入口宽度计信号,板坯温度以及初轧数学模型,在数十

秒内对该立辊轧机轧辊开度的变化量进行计算，并由电动机将立辊的开度调整在该值上。

图 1-2 所示为设定的压下量流程图。它主要由水平道次压下程序计算、各道次宽展计算、各立辊道次压下分配计算、各水平道次出口侧板宽预测计算构成。

决定水平轧机的压下量时，要考虑轧机能力和温度下降情况，应该用最少轧制道次得到规定的粗轧坯厚度。

决定立辊轧制压下量时，要考虑立辊的最大压下能力和压缩极限，原则上要满足前段强压下式立辊道次的程序。



图 1-2 立辊开度预设计算流程

在宽度控制程序中，输入成品带钢的给定宽度，然后，对精轧机组的压下量进行分配，并初步计算各水平道次可能产生的宽展量。据此确定粗轧后的精轧带坯的给定宽度。

确定精轧带坯宽度后，就可以计算出粗轧机组中轧件宽度的压缩量。在前

几个立辊机座中，试图通过对带坯的压缩获得给定的精轧带坯宽度；在后几个立辊机座中，只消除在水平辊机座中轧制时所产生的宽展量。根据计算结果确定宽度控制程序和立辊机座的初始辊缝值，并对位置控制系统输入给定信号。带钢经每道立辊轧制和随后的水平辊轧制后，重算出口宽度。若能直接测定立辊机座中的轧制压力，则控制系统的精度可显著提高。

通常，在立辊轧机和水平轧机上共同进行轧制时，其宽展用下式表示：

$$\Delta W = \Delta B + \alpha \Delta E \quad (1-1)$$

- 式中 ΔW —— 在平轧入口侧和出口侧宽度上测出的总宽展量；
 ΔB —— 仅由水平轧制产生的单纯宽展量；
 ΔE —— 立轧宽度压下量；
 α —— 轧边凸起度返回系数。

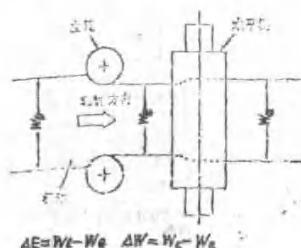


图 1-3 立辊轧制和水平轧制模式图

作为 ΔB 模型， α 模型。有各种模型报道，本程序中采用以下的模型。

$$\Delta B = W_0 \left[\left(H_0 / h \right)^k - 1 \right] \quad (1-2)$$

- 式中 $k = a_0 (H_0 / W_0) a_1 \exp(a_2 H_0 / l_d)$
 $\alpha = (C_0 + C_1 \cdot W_0) (C_2 + C_3 H_0) (C_4 + C_5 \cdot r) (C_6 + C_7 \cdot \Delta E)$
 式中 W_0 —— 入口侧宽度；
 H —— 入口侧厚度；
 h —— 出口侧厚度；
 l_d —— 接触弧长；
 r —— 压缩率；
 $a_0 \sim a_2, C_0 \sim C_7$ —— 常数。

第三节 板宽的动态控制

一、短行程控制

在大的宽度侧压下，带钢头部材料在受立辊侧压后要向中间流动，并且不是均匀延伸，而是沿 45° 角滑行，在约相当于板宽一半的距离时，此流动达到平衡，并且停止流动，见图1-4。从而造成带头呈鱼尾形。板坯尾部产生相同的现象。

另一方面，板坯受立辊侧压时，由于金属变形难于深入到板坯中部位置，在板坯边缘形成隆起，使断面呈“dog bone”形，即“狗骨”形。这种“狗骨”形在随后的水平机架轧制后产生部分宽度的恢复。由于在板坯中段部分受两侧立辊“刚端”的影响，“狗骨”形比板坯两端更为严重，平轧后的恢复量也比两端大。见图1-5。

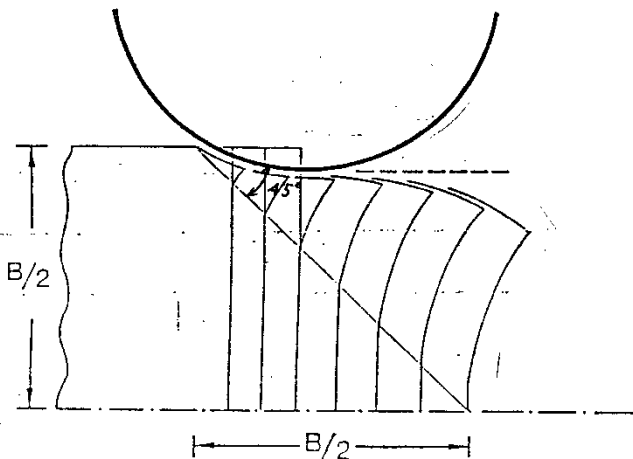


图1-4 大侧压时板坯端部的形成

还有一点要提及的是，宽厚比和立辊辊缝的几何形状对横截面和端部的变形及有效侧压量的影响。

有效侧压率由下式确定：

$$b = (\text{侧压量} - \text{宽展量}) / \text{侧压量}$$

宝钢热轧厂E1配置了带孔型辊，这种辊将材料从边缘压向中间比平辊要大得多，如图1-6所示。

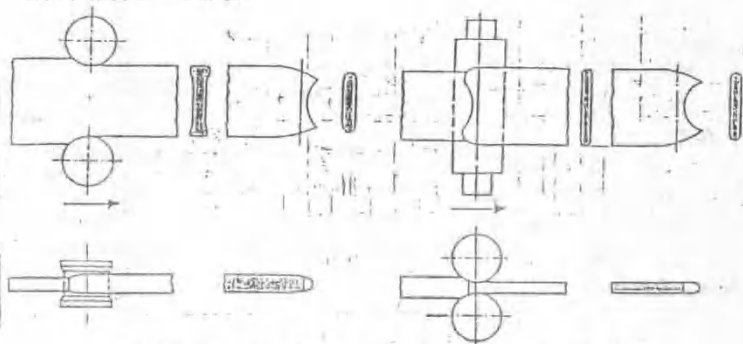


图1-5 立辊侧压下的“狗骨形”及其在平轧时的恢复

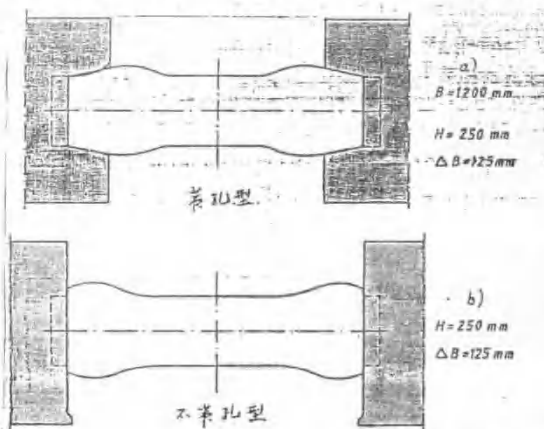


图1-6 材料在带孔型立辊与不带孔型立辊中变形比较图

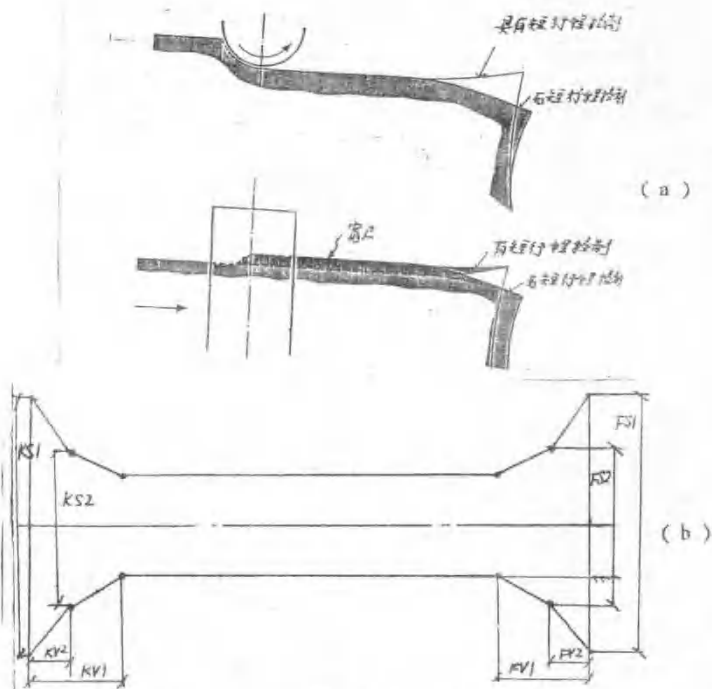


图 1-7 大侧压下带钢头(尾)部变形的修正 (a)
及对应的立辊辊缝曲线图 (b)

短行程控制就是针对在大侧压下头尾明显变窄的形状, 利用一个线性函数分段计算各立辊辊缝, 它是在动态时进行设定调整的。立辊除有电动侧压作为静态立辊辊缝设定外, 还装有液压压下, 它作为短行程的动态辊缝调节目的。液压压下根据头、尾形状, 按预先计算值设定进行动态调整, 以克服由于大侧压造成的头尾变窄现象, 如图 1-7 所示。

利用图中 8 个值的修正结果, 使侧压头尾变窄和侧压引起的“狗骨”在以后的水平机架轧制宽展量与侧压量变化大致得到补偿, 从而确保头、尾减小变

窄长度。

二. 宽度的前馈控制(PWC)

这个功能主要用于修正由于加热炉产生的水印及火焰清理等引起的宽度不均匀造成宽度公差。

板坯在连铸后由于局部火焰清理过深造成局部“缺肉”现象。图 1-8 示出采用PWC和不采用PWC控制的效果。

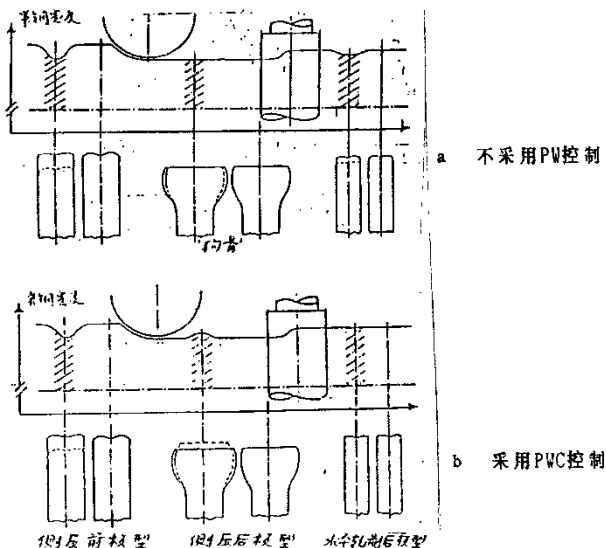


图 1-8 采用PWC和不采用PWC的控制效果比较图

三. 轧制力宽度自动控制

轧制力宽度自动控制(RF-AWC)是针对轧制力变化引起立辊轧机有载辊缝波动,而相应调节侧压位移量以补偿辊缝的波动,保持有载辊缝恒定,以确保轧出的带坯在全长上宽度均等。因此,RF-AWC对水印或黑印影响起补偿控制和对清理凹陷影响起补偿控制。

1. 板坯黑印影响引起辊缝波动的侧压位移调节量

加热板坯长度上有局部低温水印或黑印。由于温度影响变形抗力，在温度较低的局部长度的范围内，相对其它温度较高的部分，在承受同样变形量时，变形抗力较大。立辊轧机轧制板坯时的弹塑性曲线如图 1-9 所示。在设定的辊缝进行轧制时，立辊轧机的弹性曲线为 $A=f(B)$ 。板坯原始宽度为 B_0 ，板坯正常温度处轧材的塑性曲线为 $C=\Psi(T_1)$ ，轧出板坯宽度为 b_1 ；当板坯温度变化时，其塑性曲线变化，若温度降低，则变形抗力增大，其塑性曲线变为 $C'=\Psi(T_1')$ ，轧出板坯宽度变为 b'_1 ，形成了宽度偏差 δb 。因此，考虑道次侧压量仅靠设定的空载辊缝是不能获得相同侧压变化量。这是因为轧制力变化使轧机弹跳值发生变化，有载辊缝不能保持恒定的缘故。

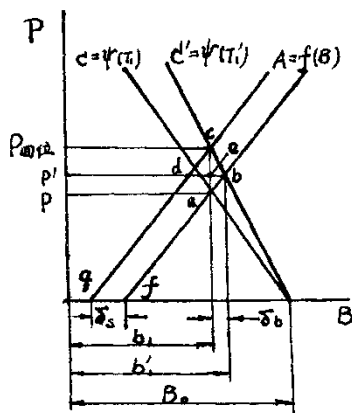


图 1-9 清除黑印影响辊缝波动调节过程

为了保持有载辊缝恒定，必须对波动的辊缝进行补偿调节，即为了消除偏差 δb 必须将轧制力增加到 $P_{0'}$ 位，方可轧出板材宽度保持在规定的宽度 b 的规格上。这里需要指出，辊缝波动的补偿调节量与轧机弹跳增量是不相等的，它必须考虑到由轧制力变化量而导致轧机新的弹跳量的消除，即要大于轧机的弹跳增量 ($\delta s > \delta b$)。

由图 1-9 可见，为了消除黑印影响轧机弹跳增量 δb ，必须作辊缝减小的调节。过 a 点作纵坐标轴平行线交塑性曲线 $C'=\Psi(T_1')$ 的 c 点上，再过 c 点作轧机弹性曲线 $A=f(B)$ 的平行线交横坐标轴于 q ，则 q 、 f 点距离就是辊缝波动

的补偿调节量。即 $qf = \delta s$ 。其值可由几何关系求出。

因为

$$\delta s = qf = de + eb$$

$$\delta b = eb$$

则

$$\delta s / \delta b = (de + eb) / eb = de / eb + 1$$

但

$$de = ce / C$$

$$eb = ce / Q$$

式中 C —— 立辊轧机刚性系数；

Q —— 板坯黑印处材料的塑性系数。

则

$$\delta s / \delta b = [(ce/C) / (ce/Q)] + 1 = Q/C + 1$$

所以

$$\delta s = (Q/C + 1) \delta b$$

又因为

$$\delta b = (P' - P) / C$$

故

$$\delta s = (Q/C + 1) (P' - P) / C \quad (1-3)$$

式中 P —— 板坯正常温度的轧制力；

P' —— 板坯低温的轧制力。

由图 1-9 分析可见，这时保持辊缝恒定的基准轧制力应是 $P_{\text{回位}}$ ，也即为再发生轧制力变化，就得以 $P_{\text{回位}}$ 作为比较的基准值，且以新的弹跳增量 ($\pm \delta b_{\text{新}}$)

$$\delta b_{\text{新}} = (P_{\text{新}} - P_{\text{回位}}) / C$$

代入 (1-3) 式，求出新的辊缝波动调回位移调节量 δs 。

关于 $P_{\text{回位}}$ 轧制力值，可以在辊缝波动调回到位时，依靠测压头检测出，也可以在计算 δb 的同时用下述推导式求出：

因为

$$\delta b = (P_{\text{回位}} - P') / Q = (P' - P) / C$$

所以

$$P_{\text{回位}} = (P' - P) Q / C + P' \quad (1-4)$$

2. 板坯凹陷影响辊缝波动的调回位移调节量

板坯缺陷清理造成的局部宽度不足或凹陷对辊缝波动的影响,是因为侧压量减小,相应轧制力也减小。而减小轧机弹跳量,便减小了有载辊缝值。为了保持有载辊缝恒定,以减小的轧机弹跳量求得相应调回辊缝的调回位移量进行压下调节,使辊缝值随即恢复到恒定的有载辊缝,以确保轧出的带坯沿全长宽度相等。调回位移调节量 δs 按立辊轧机的弹塑性曲线图1-10求出。

由图1-10可以看出,由于来料宽度不同,正常部分宽度为 B_0 ,凹陷处宽度为 B'_0 ,则侧压量不同,相应轧制力不同,轧机产生不同的弹跳量,使有载辊缝发生变化,因而凹陷处轧出的宽度 b'_1 比其它正常部分轧出的宽度 b_1 小,其差值 $\delta b = b_1 - b'_1$ 。

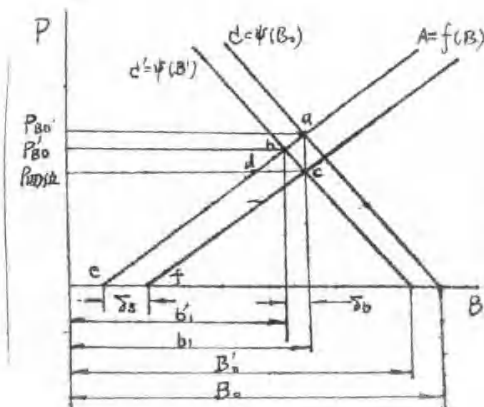


图1-10 消除凹陷影响辊缝波动调节过程

为使轧出的带坯在长度上有均等的宽度,就得通过辊缝调节消除轧机的弹跳差 δb 对轧出宽度缩小的影响。由图1-10可见,消除凹陷影响轧机弹跳增量 δb ,必须作辊缝增大的调节。过a点作横坐标轴的垂线,交板坯宽度为 B'_0 的塑性曲线 $C' = \Psi(B'_0)$ 于c点,再过c点作弹性曲线 $P = f(B)$ 的平行线cf交横坐标轴于f,则ef即是所要求的辊缝波动调回位移调节量 δs 。其计算公式类同黑印。影响辊缝波动调回位移调节量(推导过程略)。

$$\delta s = (Q/C+1)(P_{B_0} - P_{B'_0})/c \quad (1-5)$$

辊缝波动调回位移轧制力 $P_{\text{回位}}$ ，也与黑印影响类同，只是因为辊缝向大的方向调节，侧压量小，相应回位轧制力 $P_{\text{回位}}$ 相应减小。而其计算公式与黑印影响的计算公式稍有不同，推导过程如下：

因为

$$\delta b = (P_{B0} - P_{B0}') / c = (P_{B0}' - P_{\text{回位}}) / Q$$

所求

$$P_{\text{回位}} = P_{B0}' - (P_{B0} - P_{B0}') Q / C \quad (1-6)$$

RF-AVC是一种反馈控制，即根据轧制力变化的反馈信号计算出辊缝波动的补偿调节量，进而通过液压系统，迅速建立辊缝波动的补偿调节量的设定值，从而达到消除板宽偏差的目的。

第四节 宽度控制及其自适应

通过带钢在F7后所得到的宽度实际值与精轧宽度设定值之差，计算出新的全局宽度自适应系数以修正后续粗带钢宽度的目标值，它是一个加适应因子。

带钢通过F7之后所测的宽度和厚度值，利用宽度模型计算出精轧宽展，再把它与带钢通过R4与F7后所测到的宽度，从而与计算出的实际宽展进行比较，计算出精轧宽展的适应系数，它是一个乘适应因子。

全局宽度遗传系数是带钢经过R1、R2、R4轧机出口侧的宽度计，用实测的粗带钢宽度与计算出的粗带钢宽度进行比较，以修正下块粗带钢在这些点上的宽度值。