

# 板带轧制板型控制的新装置

## ——液压弯辊系统

冶金部钢铁研究院

张树堂 陆东涛

目前在板带轧制生产中,重要的新技术和研究项目之一,是控制和改善板带钢形状(平直度)和横向厚度差,并使之与纵向厚度自动控制系统(AGC)联结在一起,进行综合自动控制,以得到高质量的板带钢成品,相应地提高产量。而在板带轧机上安装的液压弯辊系统就是有效实现这种控制的新装置。

影响板带钢形状和厚度差的主要因素是:轧辊的弹性弯曲(即挠度)、轧辊压扁的不均匀分布、轧辊的不均匀热膨胀和磨损以及不均匀张力分布等。传统的控制板带形状和横向厚度差的方法是采用磨削一定形状的原始辊型和通过冷却液控制轧辊热膨胀凸度,但是由于轧制过程中品种和道次不同,轧制压力、轧辊磨损和温度也变化不同,用磨削原始辊型的方法显然不能适应要求,而控制轧辊热膨胀温度的方法则是一个较缓慢的过程,尽管可以采用强化分段冷却或煤气和红外线加热等,同样不能满足高精度控制板型的要求,因此,在板带钢轧制生产中被迫要严格安排品种规格(厚度、宽度和钢种)的程序周期,限制了一些产品(主要是薄、宽的)的生产数量或增加换辊次数。如采用辊型可调装置时,则可大大放宽品种规格安排的轧制程序周期,延长轧辊使用寿命,除提高板带产品质量外,还可提高轧机的产量。

辊型可调装置在冷轧薄带的多辊轧机上

早已采用,如森吉米尔二十辊轧机和MKW型八辊轧机等都采用机械式调整辊型系统,以及在平整机上使用,在实际生产中使用效果很好。但是对大型四辊热轧和冷轧机的辊型调整系统则是六十年代以来采用液压弯辊系统后才发展起来,由于液压弯辊系统简单、可靠、弯辊力迅速可调等优点,因此,在七十年代新设计的板带四辊轧机上几乎全部都安装了液压弯辊系统,用来调整辊型,控制板型。同时对已投产的大多数旧轧机进行改造,增设液压弯辊系统。板带轧机采用液压弯辊系统后,一般可以降低横向厚度差20~25%;改善平整度;提高轧机生产率约5~7%;增加轧辊周期使用时间15~20%;降低轧辊消耗和减少工艺换辊次数。

### 一、液压弯辊的方式及特点

液压弯辊机构的设计形式很多,各设计者对机架和轴承座形状设计不同。液压缸安装位置也不同,但液压弯辊方式概括起来可分为二种:一是工作辊弯曲方式,二是支撑辊弯曲方式。(见图1)。

工作辊弯曲方式是目前板带轧机中应用得最广泛的,它结构简单,弯辊力较小,约为轧制压力的15~20%,一般不需要对轧机机座牌坊作改变,只需在工作辊轴承座上加装液压缸,有的可利用原轧机工作辊轴承座上的平衡缸增加数目和压力,就可以达到工作

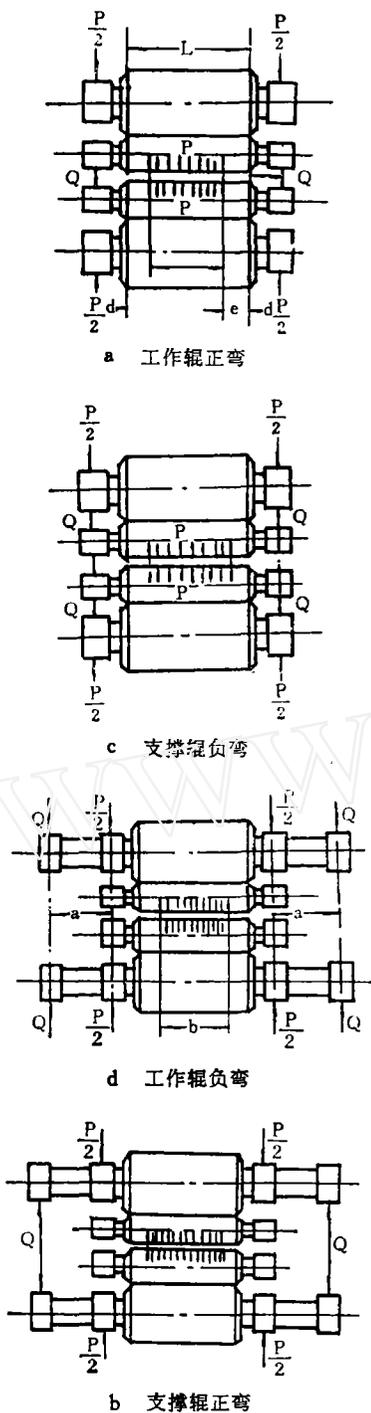


图 1 液压弯辊方式示意图

辊正弯的目的。这无论对新设计的轧机和已生产的旧轧机改造都十分简便，它的缺点是工作辊正弯曲的辊型在辊身长度宽（大于2300毫米以上）的轧机上不能很吻合地补偿

工作辊受轧制力产生的弯曲挠度，因工作辊弯曲影响的距离较小，因此它适用于中等和窄板带轧机上使用，如在2300，1700和1200毫米轧机上均得到较好的效果。大致工作辊身长度与直径之比小于3时，采用工作辊弯辊，它的另一缺点是换辊时需拆卸液压缸的高压连接管，增加了换辊的复杂性。

支撑辊弯曲方式结构较复杂，弯辊力较大，约为轧制压力的20~30%，需要延长支撑辊颈安装液压缸，它的位置影响工作辊换辊。另一种形式是机架横梁加长和延长的支撑辊颈间安装液压缸，这都使轧机结构复杂，但它弯曲辊型能较好地吻合轧辊挠度（抛物线型），因此只用于宽板和中厚板轧机上（2800毫米以上）。大致工作辊辊身长度与工作辊直径之比大于3时，采用支撑辊弯辊。

无论工作辊弯曲，还是支撑辊弯曲方式中，大多采用正弯方法来弥补轧辊受轧制力所产生的挠度，但有时为了扩大弯辊的控制范围，可采用正、负弯都有的方式，但在采用负弯曲时，当带钢咬入和离开轧辊时，负弯曲力使轧辊产生冲击，给实际操作带来困难。

必须指出，采用液压弯辊系统后，由于附加于轧辊和轴承新的接触应力，因此会导致增加轧辊表面剥落和疲劳，轧辊轴承的疲劳破坏和辊颈的疲劳破坏，经研究证明，采用工作辊弯曲时，上述因素引起的寿命降低较小，可以降低轧辊和轴承正常使用寿命周期。当使用工作辊弯曲时，支撑辊身两端可磨削成稍度（约1.3/1000），可大大降低工作辊和支撑辊之间在辊身端部的应力和工作辊颈的应力，增加轧辊表面接触和工作辊颈的疲劳寿命，同时可增加弯辊效果，减小所需的最大弯辊力。采用支撑辊弯曲时会使支撑辊颈疲劳寿命降低，而限制了它的使用，当控制在最后道次，小负荷时有限使用，轧制窄板时不使用弯辊，这样才能有足

够的疲劳寿命。因此从疲劳寿命的观点来看,使用工作辊弯曲比支撑辊弯曲有利。

## 二、合适的弯曲力和弯曲凸度计算

在设计和使用液压弯辊系统时,必须计算合适的弯曲力和弯曲凸度,简单的计算方法是由板带横断面厚度不均的基本公式出发。

$$\delta h_1^2 = \Delta S_0 + \Delta D_t + f \pm m \quad (1)$$

式中:  $\delta h_1^2$ ——板带出口横断面厚度差;

$\Delta S_0$ ——考虑到磨削的原始辊型和轧辊磨损后板带边部和中部的原始辊缝差;

$\Delta D_t$ ——由于辊身温度差造成轧辊热膨胀凸度引起的板带横断面厚度差。

$f$ ——由于轧制力造成工作辊挠度和弹性压扁不均匀分布引起的板带横断面厚度差。

$m$ ——由于液压弯辊力造成工作辊弯曲在板带边部和中部的差值。

关于 $\Delta S_0$ 和 $\Delta D_t$ 由已知条件决定, $f$ 由轧制力大小计算, $m$ 即液压弯辊力产生的凸度,根据(1)式,可确定所需的 $m$ 值,然后根据 $m$ 值,计算求出所需的弯辊力。

M·D·Stone 根据弹性基础梁理论导出支撑辊和工作辊弯曲公式如下:

$$\text{支撑辊弯曲 } m = \frac{Qab^2}{4EJb} \left\{ 1 - 4 \left( \frac{X}{b} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

当  $X = \frac{b}{2}$  时,(2)式可简化为下式(即最大弯曲凸度 $m$ )

$$m = \frac{Qab^2}{4EJb} \quad (3)$$

式中:  $Q$ ——支撑辊每端的弯曲力(吨);

$a$ —— $Q$ 力产生的力矩力臂。即力 $Q$

至支撑辊轴承中心线的距离(毫米);

$b$ ——轧制板带宽度(毫米);

$E$ ——轧辊弹性模量(公斤/毫米<sup>2</sup>);

$Jb$ ——支撑辊的惯性矩 =  $\frac{\pi}{46} D_b^4$  毫米<sup>4</sup>

$D_b$ ——支撑辊直径(毫米);

$X$ ——由轧机中心线到辊身任一点距

离,由0至 $\frac{b}{2}$ 。

$$\begin{aligned} \text{工作辊弯曲 } m = & \frac{4Q\beta}{K(\sinh\beta L + \sin\beta L)} \\ & [\{\cosh\beta X \cos\beta(L-X) + \cos\beta X \sinh\beta(L-X)\} \cos\beta X] + C\beta \{ \sinh\beta X \cos\beta(L-X) - (\cosh\beta X \sin\beta(L-X) + \sinh\beta(L-X) \cos\beta X - \cosh\beta(L-X) \sin\beta X) \} \\ & + \frac{Q(d+e)}{EJb} [X(L-X)] \quad (4) \end{aligned}$$

式中:  $Q$ ——作用于工作辊每端的弯辊力(吨);

$K$ ——弹性基础梁常数(公斤/毫米<sup>2</sup>);

$\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{EJW}}$  (毫米<sup>-1</sup>);

$JW$ ——工作辊辊身惯性矩 =  $\frac{\pi}{64} D_w^4$  (毫米<sup>4</sup>);

$D_w$ ——工作辊直径(毫米);

$C$ —— $Q$ 力产生的力矩力臂,即力 $Q$ 至辊身边缘的距离(毫米);

$L$ ——辊身长度(毫米);

$X$ ——工作辊辊上任一点至辊身边缘的距离(毫米);

$Jb$ ——支撑辊辊身惯性矩(毫米<sup>4</sup>);

$d$ ——支撑辊轴承中心线至辊身端部距离(毫米);

$e$ ——从辊身边部到 $Q$ 作用线的距离(毫米)。

$X = \frac{L}{2}$ 时,可简化为下式:

$$\text{即最大弯曲 } m = \frac{8Q\beta}{K(\sinh\beta L + \sin\beta L)} \left[ \cosh\beta \frac{L}{2} \cos\beta \frac{L}{2} + C\beta \left( \sinh\beta \frac{L}{2} \cos\beta \frac{L}{2} - \cosh\beta \frac{L}{2} \sin\beta \frac{L}{2} \right) \right] + \frac{L_2 Q(d+e)}{4EJb} \quad (5)$$

苏联 С·Е·Рокотян 根据弹性弯曲和压扁理论, 提出工作辊液压正弯力与弯曲凸度的关系式如下

$$m = \frac{2Q}{M_B^0} \quad (6)$$

式中  $M_B^0$  为对弯辊力  $Q$  辊系的刚度系数, 他可由实验求得或用下式计算求出:

$$M_B^0 = \frac{4EJW}{b^2 C - \frac{b^3}{3} + \frac{L^3}{12} - \frac{bL^3}{3} - \frac{(b-L)^4 \alpha}{12L}} \quad (7)$$

式中  $\alpha$  是辊间压力  $q(X)$  分布不均匀系数, 此系数可由计算辊间压力图得出, 对典型 1700 轧机, 当  $b/L=0.5$  时,  $2=1.4$ ,  $b/L=0.7$  时,  $2=1.3$ 。

日本本城恒则提出求最佳弯辊力和凸度的综合解析法根据轧制条件和板厚条件及最佳板厚设定, 假设轧辊弯曲力, 然后假设压力分布, 并据此计算出轧辊弯形, 再求出压

下量分布及压力分布, 看与价定的压力分布和最佳板厚分布是否一致, 不一致则进行修正, 最后求出最佳弯曲力, 此计算较复杂, 需反复进行, 因此用电子计算机计算, 这里就不详细列举计算公式及方法, 用此综合解析法, 可以较准确地计算出最佳弯辊力和凸度, 并比较容易各研究因素对所需弯辊力的影响。由其计算实例指示影响弯辊力的因素有板宽、轧制压力、轧辊凸度、轧辊磨损、入口板凸度等, 其中尤其是板宽与后几因素的综合影响最大。

### 三、液压弯辊的液压系统

液压弯辊系统组成比较简单, 典型的电液伺服液压系统示意图如图 2 所示, 它由三部分组成: 一是动力源, 即油泵和油箱; 二是调压系统; 三是安装在轴承座上的液压缸。

液压弯辊的最大弯辊力对工作辊弯辊系统一般为最大轧制压力的 15~20%, 液压系统的最大工作压力采用 120~350 公斤/厘米<sup>2</sup>, 由一台或二台容量为 18~36 升/分的高压泵和 0.5~1 米<sup>3</sup> 的油箱组成动力源部分, 此外还有供控制油压用的 64 公斤/厘米油压系统, 泵的容量约 5 升/分。

调压系统, 除通常系用的各种阀件、压

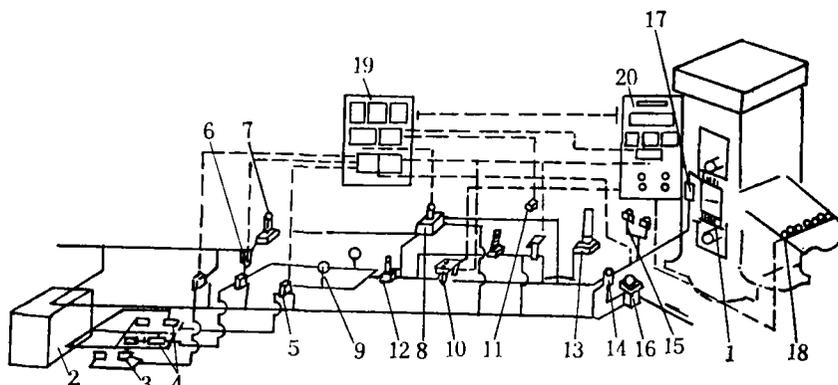


图 2 电液伺服液压弯辊系统示意图

- 1—液压缸, 2—油箱, 3—控制油路用泵, 4—高压油泵 (100~320公斤/厘米<sup>2</sup>), 5—安全阀, 6—粗过滤器, 7—精过滤器, 8—电液伺服阀, 9—压力表, 10—调整阀, 11—压力传感器, 12—压力稳定器, 13—蓄势器, 14—反向控制阀, 15—压力继电器, 16—可逆滑阀, 17—套筒式高压接头, 18—单位张力测头, 19—控制柜, 20—控制盘。

力表、过滤器、蓄势器外(见图2)对液弯辊力控制现多开始采用电液伺服阀系统,因他调节灵敏,反应快,便于与板型检测器联结在一起,实现板型自动控制。而手动控制系统则采用电动安全调整阀或减压阀。

弯辊液压缸一般安装在轴承座上,根据所需的最大弯辊力和采用的最大工作压力,对工作辊弯辊系统一般采用4~16个液压缸,每侧2~8个,液压缸直径为80~140毫米,柱塞行程20~125毫米,与液压缸相联结采用高压软管接头或特殊设计套筒式可伸缩的高压接头,以防止液压缸随轴承座在轧制中移动时破坏高压密封,并便于换辊时装卸。

#### 四、板型检测方式

液压弯辊系统中板型检测器是实现板型自动控制的关键装置,目前各国正在大力研制一种工作可靠、反应迅速的板型检测器,部分已开始在生产中试用。从板型测量原理的观点来看,板型变坏是由于沿板带宽度上压下不均而产生延伸不均所致。由压下量差与长度延伸的关系式 $\frac{\delta \Delta h}{h_1} = \frac{\Delta L}{L}$ 可知,小的压下差就导致大的延伸差,因此,从控制的观点看纠正板型采用弯辊最有效,即改变宽度上压下分布。但从检测板型的观点看,则应测量延伸差,或测量延伸差所造成的张力差,而测量沿宽度板厚分布从原理上看是不合适的。因此,板型检测装置除热轧带钢采用光束—电视摄影方法测定板型外,冷轧大多采用测定延伸或张力分布的方法。目前热轧带钢板型测量装置正在研制中,还很不成熟。冷轧板型检测装置则研制较多,因冷轧是张力轧制,由于张力的作用,带钢有弹性变形,用人工目测的方法对小的波浪度(即

不平直度 $\lambda = \frac{\delta}{l} \times 100\%$ ,  $\delta$ 波高,  $l$ 波距)看不出来,当轧制后失去张力时,就出现波浪,根据理论推算目测波浪度的界限等于 $0.54\sqrt{\sigma_m}$ ,  $\sigma_m$ —轧制出口平均张力,当 $\sigma_m$ 为3~10公斤/毫米时,  $\lambda = 0.94 \sim 1.7\%$ 以下就不能目测,因此,冷轧就更需要板型检测装置来弥补人工目测的不足。概括起来冷轧板带板型检测方式如表1所示:

板型检测方式 表 1

|      | 测量对象 | 方 法                           |                 |
|------|------|-------------------------------|-----------------|
| 接触式  | 张力分布 | 采用二、四或多段辊导辊,测沿板宽张力分布          | 测压力计            |
|      | 延 伸  | 采用多段导辊测转速差                    | 转速计             |
| 非接触式 | 板浪形  | 将线光源射于板上,用电视摄影机测定浪形<br>磁力测定浪形 | 工业电视摄影机<br>磁转换器 |
|      | 张力分布 | 磁力测定张力<br>根据气压由变形分布求张力分布      | 磁转换器<br>差动变压器   |

接触式和非接触式比较,非接触式受环境气氛和检测器与板带距离影响。接触式则有接触摩擦、磨损和导热等影响,各有优缺点。目前接触式的试用较多。

#### 五、结 语

液压弯辊系统的手动控制方式已普遍应用在热轧和冷轧板带轧机上,并取得较好效果,但与板型检测器结合起来的自动控制板型系统正在研究中。此外,弯辊系统和纵向厚度控制综合选择控制最佳的沿宽度和长度的厚度差的系统也是研究的方向,同时,要求进一步研究弯辊理论和数模,以实现上述控制。