

## · 国外钢管 ·

## 水平连铸的拉坯装置

〔奥地利〕Heinz Bramerdorier等

## 1. 前言

水平连铸必须严格按照预先确定的拉坯曲线拉坯和在浇铸过程中要求拉坯运动高度准确。因此, 尽量减小, 甚至消除齿轮传动间隙, 是结构设计中最关键的因素。为了确定由拉坯辊所决定的铸坯周期运动, 本文对钢流运动进行了实验研究, 同时还介绍了奥钢联使用的两种先进的拉坯装置(图1)。

## 2. 理论分析

2.1 在拉坯周期中与时间有关的铸坯的热粘弹塑性行为

通过仔细控制拉坯辊的转动严密控制铸坯运动的周期, 是水平连铸中的关键环节之一。然而, 由于周期运动应使初始凝固出现在铸坯的最前端, 所以就产生了铸坯始端的运动与拉坯辊施加的运动是否完全一致问题。

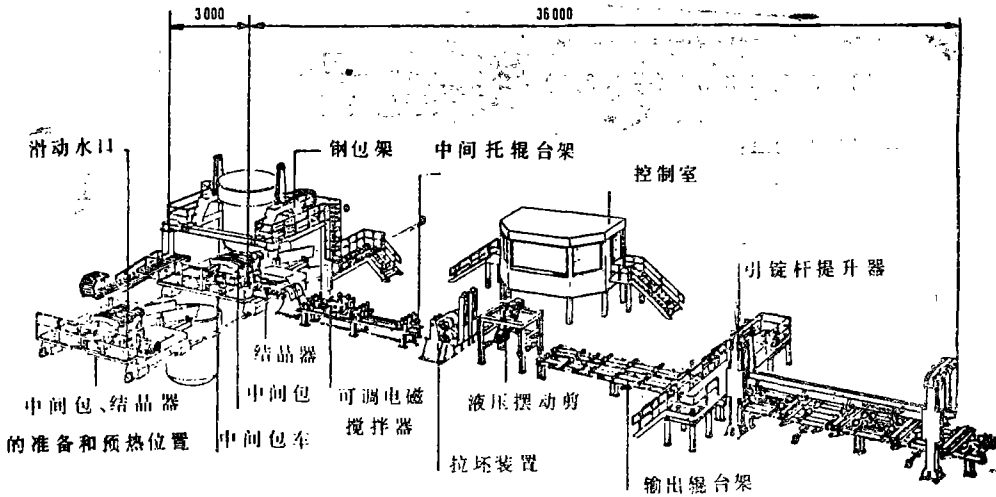


图1 水平连铸机总体布置

钢包容量: 10/40t 冶金长度: 10.8m 铸坯截面: □80, 100, φ140mm

首先, 在高温下铸坯的蠕变行为要消除上述速度周期的突然改变; 其次, 动力学的作用和结晶器中的摩擦也将改变拉坯速度曲线的形状。为定性地验证这些假设的正确性, 研究出如图2所示的有限单元模型。

## 2.2 有限单元模型

有限单元模型(图2)是用一个简单的

一元桁架单元来近似地代表铸坯的情况。桁架单元的横断面积相当于凝固坯壳的横断面积  $A_s(x)$ , 它与距结晶器的距离  $x$  有关。坯壳厚度与  $x$  值的关系可用参考文献〔1〕、〔2〕论述的热分析方法确定。由于本文对上述特性只进行近似分析, 故坯壳断面的温度场采用平均值代替。

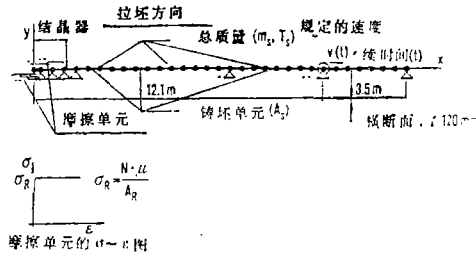


图2 分析铸坯运动热粘弹塑性-与时间关系的有限单元模型

- $m_s$ ——质量节点 (固态和液态钢)
- $T$ ——温度节点 (坯壳断面上的平均值)
- $N_s$ ——结晶器表面正压力节点
- $\mu$ ——摩擦系数
- $A_R$ ——摩擦单元的横断面积
- $A_s$ ——铸坯单元

$$T_{s_i} = \int A_{s_i} \Theta_{s_i}(y, z) \cdot dy \cdot dz / A_{s_i} \quad m_{red_j} = I_j / r_j^2 \quad (8)$$

$i \dots$  节点号。

考虑惯性作用，将总质量  $m_s(x)$  分块后分别加到各节点上。各质量组成部分， $m_{s_j}(x)$  到  $m_s(x)$  为坯壳质量，钢水质量和拉坯辊质量的有效部分，分别为：

$$m_s(x) = m_{s_1}(x) + m_{s_2}(x) + m_{s_3}(x) \quad (2)$$

其中，

$$m_{s_{1i}} = \frac{1}{2} [\Delta x_{i-1} \cdot A_{s_{i-1}} \cdot \rho(T_{i-1}) + \Delta x_i \cdot A_{s_i} \cdot \rho(T_i)] \quad (3)$$

$$m_{s_{2i}} = M_{s_{eff}} \cdot A_{di} / A \quad (4)$$

式中， $M_{s_{eff}}$  为铸坯运动时拉动钢水的有效质量。 $M_{s_{eff}}$  是按动能平衡，以等于总的液态钢质量（包括中间包中的钢水）计算的。

$$\frac{1}{2} \cdot M_{s_{eff}} \cdot V_s^2 = \frac{1}{2} \cdot \int V_L \rho \cdot V_L^2(x, y, z) dV \quad (5)$$

式中，钢水的流动速度  $V_L(x, y, z)$  是由连续条件的简化形式近似确定的，因而只与铸坯速度  $V_s$  有关。

(4) 式中的  $A_{di}$  是坯壳断面面积从  $x_{i-1}$  到  $x_i$  之间的增量。

$$A_{di} = A_{s_i} - A_{s_{i-1}} \quad (6)$$

$$A = \sum A_{di} \quad (7)$$

第三部分  $m_{s_3}$  由拉坯辊的折算质量求得：

式中， $I_j$  是半径为  $r$  的拉坯辊的惯性矩。这部分质量  $m_{red_j}$  在  $m_s$  中所占的比例根据拉坯辊  $j$  的位置相对于节点  $i$  的位置确定。

即给定的拉坯速度曲线所需的原作用力的持续时间在考虑拉坯部份时，除了电气传动设备的转子以外拉坯辊的惯性作用也要计算在内。与所要求的传动力矩的持续时间成正比。

铸坯与结晶器之间的摩擦的简单的摩擦单元，用库仑摩擦与模式。

由于结晶器中坯壳的刚性很低，可将钢水的静压力看作是坯壳与结晶器之间的正压力，因此，铸坯与结晶器之间的摩擦单元可用具有完全弹塑性材料行为的桁架单元来表示（如图2所示）。滑移—粘着行为的模型为：以塑性应变代表滑移；以很小的弹性变形近似代表粘着。这种近似的处理法要求摩擦单位的弹性行为具有很高的刚度。热粘弹塑性材料行为的主要特征及其数字处理方法参见参考文献〔3〕和〔4〕。

单轴向蠕变为

$$\dot{\epsilon}^c = 3.741 \times 10^6 (1500 - T)^{-5.328} \sigma^{3.189} t^{-0.5} \quad (9)$$

(9) 式中的单位为：

$$\dot{\epsilon}^c \text{ —— } S^{-1}$$

T—℃  
 $\sigma$ —N/mm<sup>2</sup>  
 t—S

### 2.3 蠕变行为研究

为了将由蠕变和摩擦引起的速度曲线变化与由惯性作用引起的变化区分开（实际上两者是同时发生的），进行了准静态、但与时间相关的近似分析（可忽略惯性作用）。

图3所示为用一条特殊的拉坯速度周期曲线得出的位移特性曲线。铸坯初始处位移同时间的关系与规定的拉坯速度曲线得出的位移结果稍有不同，规定的拉坯速度曲线应相对于凝固点处所要求的速度曲线稍加修正。

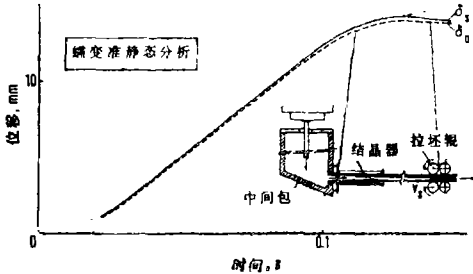


图3 原始位移曲线 ( $\delta_s$ ) 与铸坯初始处的特性曲线 ( $\delta_0$ )

### 2.4 惯性作用的影响—动力学分析

在定性近似分析时，粘性影响在动力学分析中可以忽略不计。图4~6为按此假设分析得出的某些结果。

图4所示为在典型的拉坯周期中的动力学分析结果。此分析图清楚表明了铸坯纵向振动对铸坯始端处的速度与时间关系的影响，即铸坯按基本固有频率进行振动，改变了与拉坯辊规定的拉坯周期曲线相关的位移特性曲线。应当指出的是，在初始周期中的反推运动还表示为位移特性曲线中的反推阶段。图4还说明了铸坯和结晶器之间摩擦力与时间的关系，同时，从图中可以清楚地分出粘着区和滑移区。

图5所示为三个拉坯周期的速度、摩擦力和位移与时间的关系。动力学因素对位移特性曲线的作用比对速度特性曲线的作用要

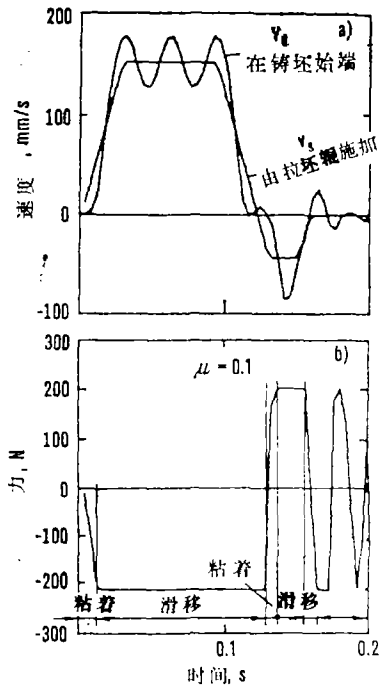


图4 典型拉坯周期中的动力学分析结果  
 a) 速度持续时间 b) 结晶器表面的切向力

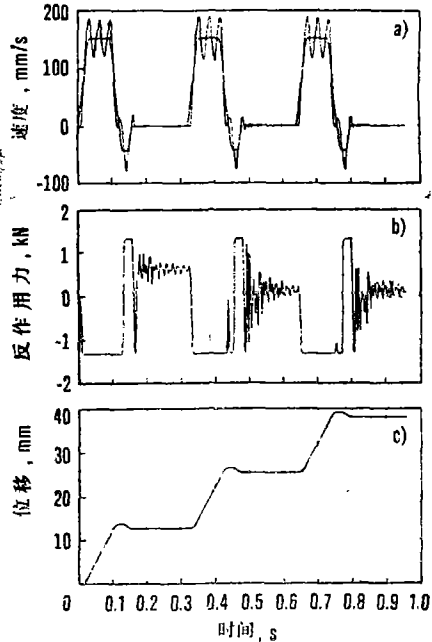


图5 速度、反作用力和位移与时间的关系  
 a) 速度 b) 反作用力 c) 位移

小得多。

图6所示为在此三个周期中拉坯辊接触点的反作用力和时间的关系。此反作用力与传动装置施加给拉坯辊上的扭矩成正比，

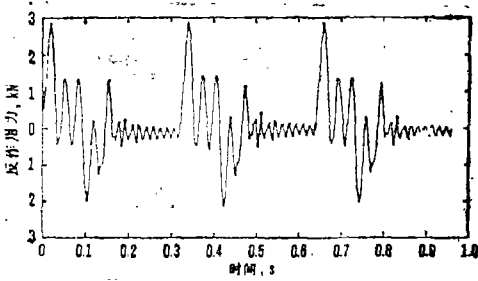
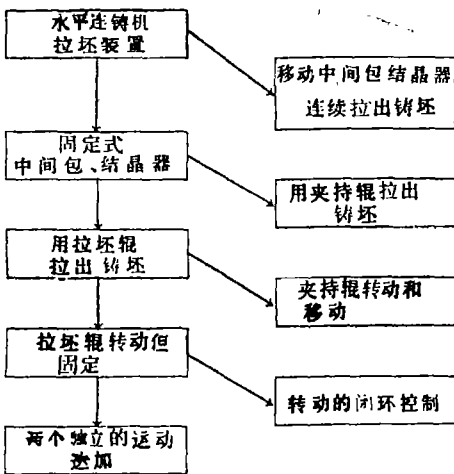


图6 拉坯辊处反作用力与时间的关系

这说明控制拉坯辊运动的困难增大了。

### 2.5 不同拉坯方法的比较



### 2.6 中间包和结晶器振动—恒速拉坯

与一般连铸机相同，结晶器振动，铸坯以恒定速度拉出。由于水平连铸机的结晶器紧连在中间包上，所以中间包也必须同样振动（图7）。

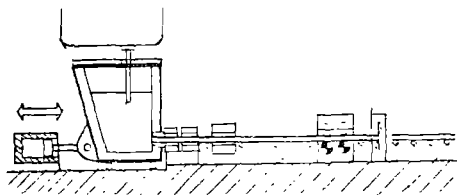


图7 中间包移动

多流铸机需使所有结晶器都以同样方式振动，因而采用这种方法不合适。

### 2.7 用夹持器拉坯

铸坯用夹钳拉出，接触面积大。一套夹持系统仅能拉出一定长度（取决于拉坯机的

长度）的铸坯，故需配备两套夹持系统。当第一套工作时，第二套处于“备用”状态；在第二套工作时，第一套“备用”，两套交替使用（见图8）。

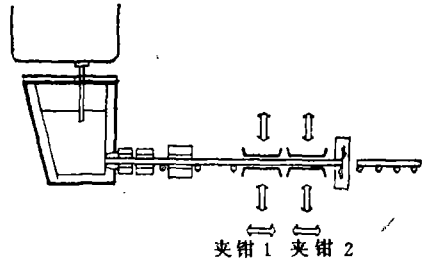


图8 1和2号夹钳交替工作（德马克系统）

### 2.8 用旋转和移动拉坯辊拉坯

将所需的拉坯运动分成两部分：恒速部分和振动部分。拉坯辊旋转时传给铸坯恒速运动，拉坯辊的支架独立进行振动（图9）。

另一种方式（如图10所示）是传动辊的支架可做摆动运动。

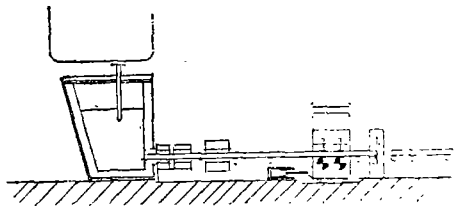


图9 直线振动的传动装置

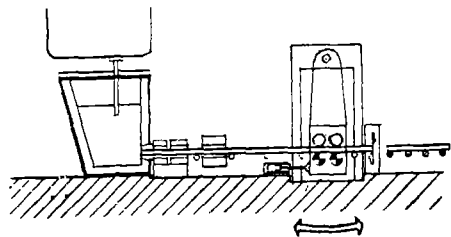


图10 旋转振动的传动装置

## 3. 奥钢联的拉坯装置

由奥钢联研制的直流转矩电机传动系统直接装在拉坯辊传动轴上，省掉了齿轮传动。在实际应用这种多功能传动系统的基础上，又研制出一种液压-机械传动系统。此系统采用了一台液压电机，也直接与拉坯辊

传动轴相联。

### 3.1 直流转矩电机传动系统

在主机架上装有两台直流转矩电机，均直接与拉坯辊传动轴直接联接。图11为拉坯装置控制电路图。两台转矩电机中有一台装有光学编码器，以检测拉坯辊的旋转情况。编码器对拉坯辊旋转的每一增量都给出一个计算脉冲，一条独立的线条便是一个旋转方向的信号。计算脉冲和旋转方向信号都输入双向计数器，由一台微型计算机对记录铸坯运动情况的计数脉冲进行扫描。

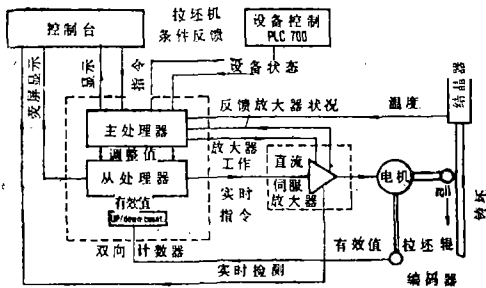


图11 拉坯装置控制回路

微型计算机为一双处理器系统。一台处理器用于扫描操作输入和计算第  $n^{th}$  次扫描时间所必需的运动。参数通过多总线（多总线是智能器的商品名称）输给控制处理器，此控制处理器用于速度控制。所采用的控制算法的主型为数字式三项控制器算法。

$$U_n = K_p \cdot e_n + \frac{K_d}{t_s} (e_n - e_{n-1}) + K_i \cdot t_s \sum_{r=1}^n e_r$$

式中：  $U_n$  —— 控制器输出

$e$  —— 错误信号

$n$  —— 第几次采样时间

$n-1$  —— 第  $n-1$  次采样时间

$t_s$  —— 采样间隔时间

$K_p, K_d, K_i$  —— 比例常数、微分常数和积分增益常数

控制器输出通过一个 D/A 转换器馈入

两个直流伺服放大器的直流指令输入。直流伺服放大器驱动直流转矩电机。借助此两台直流电机，控制环便闭合成为一体。

在计算机存储器中最多可存 160 种不同的拉坯速度曲线。

### 3.2 液压-机械拉坯装置（奥钢联专利，图12）

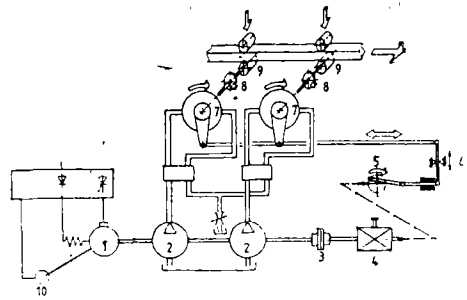


图12 水平连铸机液压传动系统示意图

- 1—电动机    2—液压泵    3—制动离合器
- 4—调整齿轮    5—振动器    6—行程调节
- 7—液压电机    8—制动器    9—传动拉坯辊
- 10—测速发电机

水平连铸机拉坯的周期性运动可分为两部分：恒速运动和振动，在一个或数个不可分的周期内的平均值为零。

液压电机和液压泵组成传动单元，由直流电机驱动，液压电机转子相对定子按要求的恒定速度转动。此外，另一种变速方式为：由同一台直流电机通过可调传动齿轮传动曲轴，由一根连杆将液压电机转矩臂与振动曲轴相连。这两种运动的迭加，由液压电机完成。拉坯辊相对于圆周的旋转运动，是拉坯辊相对定子的旋转运动和定子相对于圆周旋转运动的迭加。这种变速方式，除恒速直流电机外，不需用其他控制回路，也不必修改控制参数，省去了伺服阀，维修十分容易，也不需配备计算机专业人员。

江永进 译自《MPT》，1987, No1

曾幼宗 校