

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20190088

倒角结晶器在线热态调宽技术的应用研究

陈明昕¹, 汪洪峰², 杨晓江²

(1. 钢铁研究总院科技信息与战略研究所, 北京 100081; 2. 河钢乐亭钢铁有限公司技术创新部, 河北唐山 063606)

摘要:倒角结晶器由于边角部坯壳温度及厚度与正常直角结晶器区别较大, 在线热态调宽过程中, 相比于直角结晶器存在更大的风险。通过倒角结晶器角部夹钢的控制、加强板坯窄面的冷却和支撑及调宽模式优化等方面来解决。

关键词:连铸; 板坯; 倒角结晶器; 在线调宽

文献标志码:A **文章编号:** 1005-4006(2020)01-0018-05

Application research on hot mold width adjustment technology of the chamfered mould

CHEN Ming-xin¹, WANG Hong-feng², YANG Xiao-jiang²

(1. Science and Technology Information Department, Center Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

2. Technology Innovation Department of HBIS Laoting Steel Co., Ltd., Tangshan 063606, Hebei, China)

Abstract: Chamfered mold has greater risk than the conventional mould in the process of on hot mold width adjustment, because of the temperature and thickness of the shell at the corner are quite different from the conventional mould. This problem can be solved by controlling the inclusions, the cooling and supporting of narrow slab and optimizing the width adjustment mode etc.

Key words: continuous casting; slab; chamfered mold; hot mold width adjustment

为了满足不同宽度板坯的需要, 结晶器宽度必须随着板坯的宽度而调整, 目前主要有更换结晶器离线冷态调宽和结晶器在线冷态及热态调宽两种方法。在线热态调宽技术是在连铸机连续浇铸状态中, 自动调整结晶器宽度以更换连板坯断面尺寸。它的成功应用一是改变更换板坯断面必须停机调整的操作方式, 大大缩短断浇时间和频率, 明显提高连铸机的作业率, 增加产量; 二是减少了停浇产生的头尾坯和残钢量, 提高连铸金属收得率和中间包的消耗, 降低了生产成本; 三是保证轧钢生产中轧辊磨损需要变换板坯宽度的需求; 四是适应市场规律, 按订单生产不同规格产品的需求。因此, 它是连铸生产中的核心技术之一。

倒角结晶器将板坯倒角以后, 倒角面的冷却极大减弱, 板坯表面温度差变小, 角部温度提高, 板坯倒角面的坯壳厚度小于直角结晶器板坯的坯壳厚度, 在结晶器热态调宽过程中, 对锥度变化比较敏感, 易产生角裂漏钢, 导致倒角结晶器在线热态调宽的事故率升高, 使倒角结晶器热态在线调宽成为

倒角结晶器技术推广应用的瓶颈, 极大限制了倒角结晶器技术的推广和应用。

1 结晶器在线调宽技术的发展

结晶器在线热态调宽机械设备通常有两种结构型式; 一是电动调宽、二是液压缸及脉冲马达调宽。后一种调宽型式调节精度较高, 对设备的维修技术要求也高。电动调宽结构型式精度不如液压缸型式的好, 须消除丝杆与螺母之间的间隙。而液压型式的结晶器在线热态调宽可能是实践中使用最成熟、最稳定, 调节精度最高的结晶器在线热态调宽技术, 得到越来越多的推广和应用。结晶器窄边的移动通过联接结晶器窄边铜板水箱的液压油缸实现的, 结晶器窄边上下油缸的位置信息通过位移传感器检测及相关自动化设备检测传输。

目前, 结晶器热态调宽技术中调宽速度已向高速方向发展, 高速热态调宽技术的最大特点是窄边的锥度变更与平行移动同时进行, 大幅缩短调宽时间并减少因调宽造成的梯形板坯长度的切割浪

费。如商家A热态调宽的S模式、商家B的快速调整结晶器(NSVWM)技术等。

2 液压式结晶器在线热态调宽系统控制原理及调宽模式

2.1 液压式结晶器调宽控制系统主要控制原理

液压式结晶器在线热态调宽控制系统控制原理如图1所示。

(1) 结晶器调宽中每个窄面的移动由液压系统两个液压比例阀各控制一个液压缸完成;

(2) 为了有效地检测结晶器两个窄面的调宽距离,需要在每个液压缸上安装一个位移传感器,通

过检测液压缸的缸体与活塞间的相对位置,计算出结晶器两个窄面之间的实际距离;

(3) 将位移传感器检测到的距离信号值转变为电信号,通过特殊的SSD接口电路板传送到独立的可编程序控制器中;

(4) 经过PLC计算后,输出模拟信号,通过比例阀控制液压执行器,如图1所示,上下左右各一个比例阀。通过比例阀的控制来调节液压缸的进退,从而控制结晶器两个窄面铜板之间的距离;

(5) 专用于结晶器热态调宽控制的PLC,是独立式专用模块式控制器。

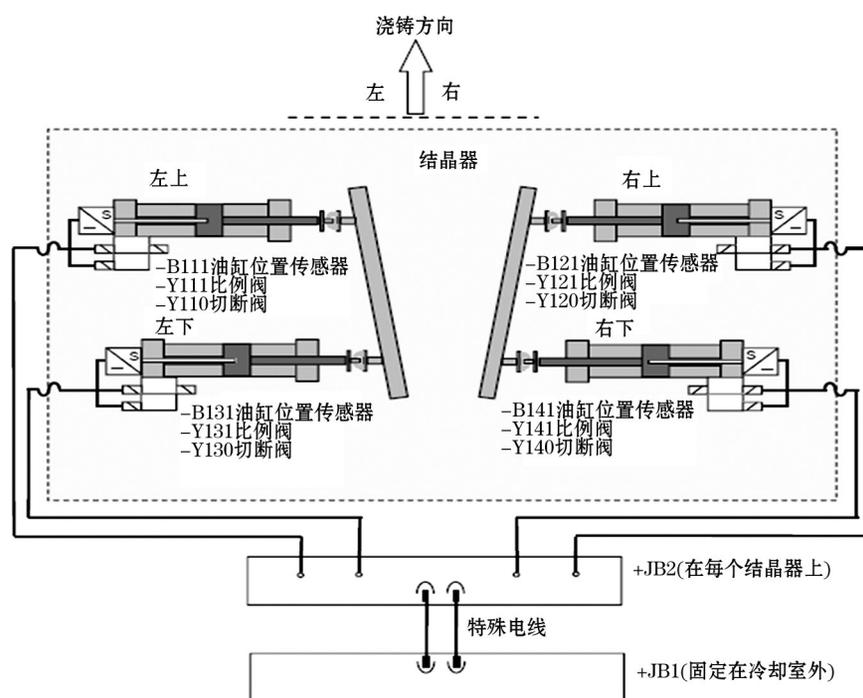


图1 液压式结晶器调宽控制系统主要控制原理

Fig.1 Main control schematic of the width adjusting control system of hydraulic mould

2.2 液压式结晶器冷热态调宽控制系统主要调宽模式

结晶器热态调宽的核心是调宽动作模型的设计与优化。调宽动作通过窄边铜板旋转运动与平移运动的组合来完成。动作方法包括变速变锥法和变锥平移法。变速变锥法是旋转运动与平移运动同时进行,调宽过程中窄边铜板始终与板坯贴合,安全性最高;变锥平移法是先进行旋转运动,再进行平移运动,旋转运动和平移运动是独立进行的。旋转运动和平移运动组合方式不同就会产生多种不同的调宽动作模型^[1]。国内使用较多的商家A联液压式结晶器热态调宽,调宽模式有平

行模式、步进模式、Z模式、S模式等多种模式,简要介绍如下。

2.2.1 平行模式

平行模式是上部、下部油缸同时运行。整个调宽距离将分成若干调节步骤。每个调节步骤之后,插入一个技术中断时间。该模式主要用于冷态调宽,基本不用热调,如图2所示。

2.2.2 步进模式

步进模式是结晶器窄边上部、下部油缸交替工作的一种模式。运行顺序:重复增加(或减少)结晶器窄边上部油缸位置——重复增加(或减少)窄边下部油缸位置——中断过程,直到油缸缸体与活塞

间相对位置的实际值与设定值相符为止。该模式动作步骤多、调宽速度慢,主要用于板坯宽度调节范围较小时的调整。如图3所示。

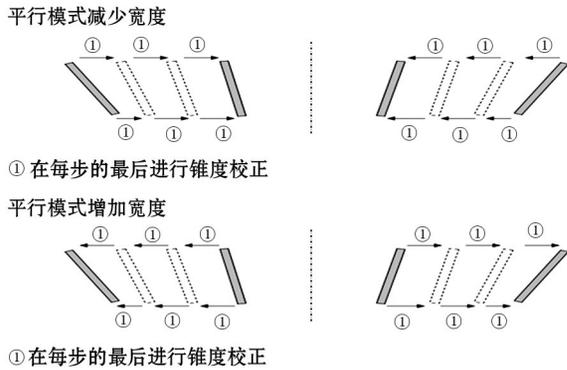


图2 平行模式冷态调宽原理
Fig.2 Principle of cold state width adjustment in parallel mode

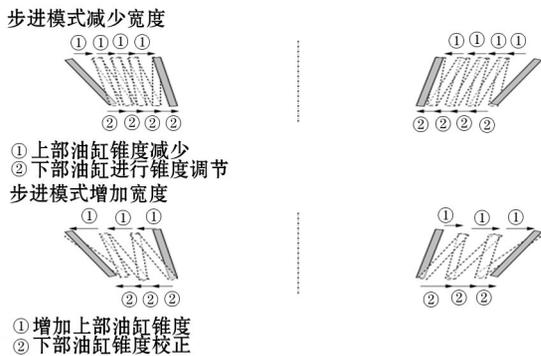


图3 步进模式热态调宽原理
Fig.3 Principle of thermal state width modulation in step mode

2.2.3 Z模式

Z模式是结晶器调宽过程中同时移动上、下部油缸到设定位置(=“平行”模式),运行顺序为:重复[“平行”步骤—中断]直到上部油缸达到设定值。该模式调节速度低,主要适应板坯宽度调节范围较小时调整。如图4所示。

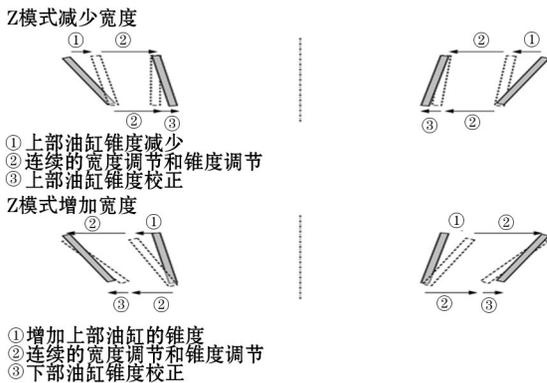


图4 Z模式热态调宽原理
Fig.4 Principle of thermal state width modulation in Z-mode

2.2.4 S模式

S模式是结晶器窄面4个调节板坯宽度的油缸按照计算的速度进行调宽。每个油缸的移动速度是独立的,改变板坯宽度移动结晶器窄面的过程中,窄面上任一点到板坯坯壳的最大距离不超过2 mm,即在具体调节过程中采用上面移一点、下面移一点;再上面移一点、下面移一点……反复循环来完成。这样才能保证窄面板坯坯壳在调宽过程中得到稳定和连续的支撑,才不会有额外的力作用到板坯坯壳上。在整个调节过程中,连续调整锥度和宽度,直至结晶器内腔达到板坯最终宽度所要求的尺寸。最后,将锥度调整到目标值。

当板坯宽度被调节速度较高时,或浇注速度较高、浇铸梯形坯较短、板坯宽度调整量较大时常采用S模式。S模式还可以使铸流坯壳上变形应力减小并减少铜板涂镀层的磨损,进而减少维护工作量。因此S模式是商家A推荐的最常用的调宽模式。

锥度增加和减少的公式

$$c^2 = a^2 + b^2 \text{ 变化成} \tag{1}$$

式中: c 为圆弧直径; $b=c - \text{SQR}(c^2 - a^2)$ a 为过渡坯的跟踪长度;平行移动公式: $b = (a - Ot) \times f + Om$ b 为窄边的相对运动值(相对起始位置); Ot 为跟踪补偿值(改变锥度时的移动); Om 为窄边在结晶器液面上的移动补偿值(改变锥度时的移动); f 为斜率。

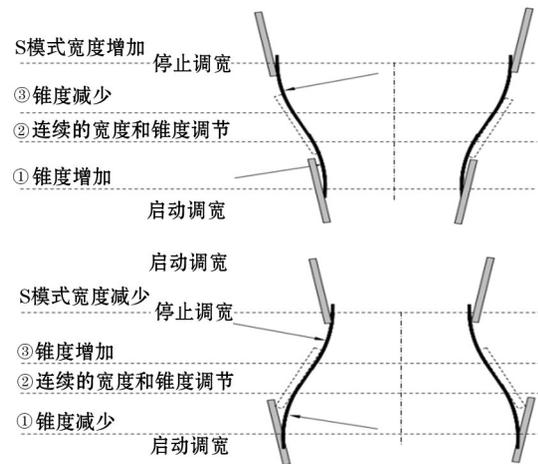


图5 S模式热态调宽原理
Fig.5 Principle of thermal state width modulation in S-mode

每种调宽模式对应的板坯宽度调节变化值范围及拉速范围如表1所示。

$$\text{宽度变化值} = |\text{起始宽度} - \text{目标宽度}|$$

表1 每种调宽模式对应的板坯宽度调节变化值范围及拉速范围

Table 1 Width change value range and speed range for each mode

调宽模式	最小宽度 变化值/mm	最大宽度 变化值	最小拉速/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	最大拉速/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	调宽速度/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
步进模式宽度增	1	20 mm	0.5	1.5	5
步进模式宽度减	1	20 mm	0.5	1.7	5
平行模式宽度增	1	1 m	0.5	1.5	6
平行模式宽度减	1	1 m	0.5 <td 1.7	6	
Z模式宽度增	5	1 m	0.5	1.5	8
Z模式宽度减	5	1 m	0.5	1.7	8
S模式	10	2 m	0.5	1.7	变化

3 倒角结晶器在线热态调宽技术

结晶器热态调宽过程中安全生产的前提条件是避免发生漏钢事故。倒角结晶器由于边角部坯壳温度及坯壳厚度与直角结晶器区别较大,在线结晶器热态调宽过程中,对锥度和宽度变化较为敏感,易产生角裂漏钢;此外倒角结晶器由于倒角面积增大,结晶器窄面角缝更容易夹钢;倒角结晶器由于板坯窄面形状变化(窄面形状由1面变3面),对窄面支撑和冷却的要求更高。因此,倒角结晶器在线调宽相比于直角结晶器存在较大风险。最典型的问题是随着调宽过程拉速降低以及窄面锥度变化,倒角边角度有一定量的变形,变形量过大会产生角部凹陷,存在着浇注安全及板坯质量的某些隐患。

因此倒角结晶器在线热态调宽技术首先考虑的因素是避免板坯表面质量缺陷(如表面裂纹、窄边鼓肚、压塌等)和保证安全稳定生产(如杜绝因角部裂纹引起的漏钢事故)。

梅山炼钢厂对倒角结晶器高速热态调宽技术中出现的板坯表面缺陷产生的原因及其防止方法作了研究,主要从倒角结晶器角部夹钢的控制和加强板坯窄面的冷却和支撑两个方面来解决。相比于直角结晶器,对倒角结晶器在线热态调宽进行了一系列的设备和工艺优化。

3.1 结晶器窄面钢水静压力合力作用点计算

如图6所示^[2],钢水静压力

$$F_z = pgh \cdot \Delta h \cdot B \quad (2)$$

式中: p 为钢水密度; Δh 为距弯月面 h 处的微小高度; B 为结晶器窄侧宽度。

对(2)式进行积分,得出结晶器窄面因钢水静压力产生的合力,

$$F_{zh} = \int_0^L pghBdh = \frac{1}{2}pgBL^2 \quad (3)$$

结晶器窄面因钢水静压力所承受的载荷线性分布,如图7所示。

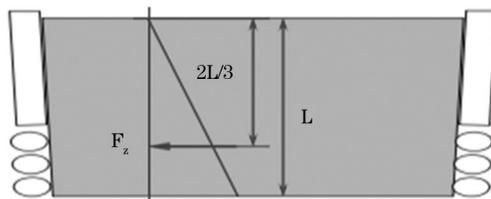
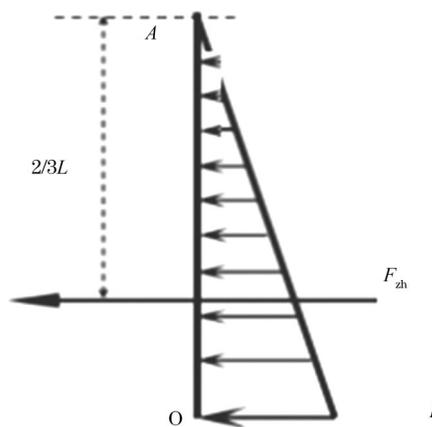
图6 结晶器窄侧钢水静压力 F_z Fig.6 Static pressure F_z of molten steel on narrow side of crystallizer

图7 结晶器窄面载荷分布

Fig.7 Distribution of narrow surface load in mold

根据力矩平衡原理:钢水静压力合力在窄边产生形成的力矩与结晶器窄边对坯壳的支撑产生的力矩相平衡。可求出钢水静压力(窄边支撑力)合力的作用点位置,即距结晶器弯月面 $2/3L$ 处

$$Fh \cdot x = F_{zh} \cdot h = \int_0^L pghBh dh = \frac{1}{3}pgBL^3 \quad (4)$$

$$x = \frac{2}{3}L$$

L 可看做结晶器有效长度 L' 的延伸长度。结晶器铜板长度900 mm,窄侧足辊总长度从窄侧铜板下沿到最后一排足辊外径距离580 mm,考虑铜板上沿

到弯月面距离 80~120 mm, 那么 $L=1\ 380$ mm, 而钢水静压力作用点 $2/3 L=920$ mm, 沿合力方向几乎穿过窄侧第一排足辊圆心。

3.2 结晶器在线调宽推力合力 F_s 作用点计算

根据理论计算得^[2],

$$F_s = \int_0^L 2AK_s(V_m/B_i)^m \sqrt{y/V_c} dy = \frac{4}{3} AK_s(V_m/B_i)^m \frac{L^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{V_c}} \quad (5)$$

整个窄边铜板对坯壳的推力的 F_s 的作用点,

$$h_s = \frac{F_s(y) \times y}{F_s} = \frac{3}{5} L \quad (6)$$

而 $\frac{2}{3} \approx \frac{3}{5}$, 可见力的作用点基本一致, 合力方向

几乎穿过窄面第一排足辊圆心。

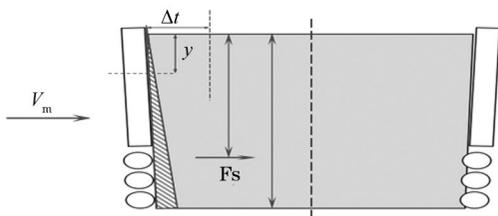


图8 结晶器在线调宽推力合力作用点

Fig.8 Sketch of thrust resultant action spot

3.3 倒角结晶器足辊的设备改进

由以上分析可知, 倒角结晶器窄面第一排足辊是倒角结晶器及其调宽时的重要部位。因此, 对倒角结晶器窄面第一排足辊作如下改进^[3-4],

(1) 结晶器由顶部向下第一对窄面足辊必须改造为倒角型足辊, 倒角形状与倒角板坯形状匹配。倒角足辊斜面边部与铜板斜面应在同一平面上, 其偏差应小于 1.5 mm。

(2) 倒角足辊在窄面宽度方向上必须保证对中, 即倒角足辊的中心线与窄面铜板的中心线在同一条直线上, 对中精度要求在 0.5 mm 以内。

(3) 倒角足辊与宽面足辊之间的缝隙应保持 2.5~3.5 mm; 倒角铜板、足辊角度偏差在 1.5 mm 以内。

(4) 倒角足辊能够轴向移动 5~8 mm, 使倒角足辊在生产中处于浮动状态, 以实现轴向自动对中。

(5) 倒角足辊和铜板之间的对弧应采用“零对零”的方式, 对弧精度要求控制在 0.2 mm 以内。

3.4 倒角结晶器工艺的设备改进

(1) 倒角结晶器在线热态调宽模式采用 S 模式, 因为 S 模式调宽是连续的变锥变宽运行, 铸流坯壳上变形应力小, 可以减少铜板磨损。

(2) 倒角结晶器窄面铜板锥度采用抛物线复合

锥度: 结晶器高度 240 mm 以上, 曲面设计, 锥度 2.4%; 结晶器高度 240 mm 以下(660 mm)结晶器锥度设定在 1.1~1.3 %/m 范围。

(3) 窄面足辊喷水量增大 15~30%; 窄面喷嘴采用两种型号, 流量上面大下面小。

(4) 每次在线停浇或下线检修时把结晶器宽面打开, 使用专用清理工具全面彻底清理配合部位的杂物。宽、窄板配合后保证角缝不大于 0.3 mm; 铜板下口角缝不大于 0.45 mm; 清理时宽面打开, 角缝值则控制在 1.3 mm 以内。

(5) 严格控制钢水过热度 and 调宽拉速, 由于倒角边坯壳的生长特点, 过高的过热度 and 调宽拉速会造成坯壳较薄增加漏钢风险, 过热度 and 调宽拉速过低又会加速坯壳表面收缩造成倒角边坯壳角度变化增大而不利于调宽操作的进行, 因此, 调宽过程过热度一般要求在 15~30 °C 以内; 调宽拉速一般在 0.8~1.2 m/min 以内;

(6) 单次调宽量不大于 100 mm, 调宽量大于 100 mm 需分多次调宽, 上一次调宽后, 需等板坯出结晶器下口 2 m 以上长度后才能进行下一次调宽。

(7) 调宽坯需进行在线质量检查, 倒角面若有裂纹或鼓肚, 需停止后续调宽, 检查结晶器;

(8) 换中间包、钢水混浇等调宽要求,

1) 如有换中间包或异钢种连浇后的调宽计划, 在换中间包或异钢种连浇前进行调宽, 调宽正常后进行换中间包或异钢种连浇;

2) 若因其他原因需在换中间包或异钢种后进行板坯宽度调节, 必须在该流换中间包后浇铸 10 m 以上板坯, 拉速不低于 0.8 m/min, 且符合在线调宽要求时才能调宽。

4 结语

倒角结晶器由于边角部坯壳温度及厚度与直角结晶器区别较大, 在线热态调宽过程中, 对锥度和宽度变化更敏感, 更易产生角裂漏钢; 此外倒角结晶器由于倒角面面积增大, 结晶器宽窄面角缝更容易夹钢; 倒角结晶器由于板坯窄面形状变化(窄面形状由 1 面变 3 面), 对窄面支撑和冷却的要求更严格。因此, 倒角结晶器在线调宽相比于直角结晶器存在一定的风险。因此倒角结晶器在线热态调宽技术首先考虑的因素是避免板坯表面质量缺陷(如表面裂纹、窄边鼓肚、压塌等)和保证安全生产(如杜绝因角部裂纹引起漏钢事故), 主要从倒角结

(下转第 35 页)