

## 电渣重熔板锭过程中温度场的动态模拟

常立忠 李正邦

(钢铁研究总院冶金工艺研究所,北京 100081)

**摘要** 根据钢的电渣重熔过程的特点,建立了板锭电渣重熔的非稳态模型,以模拟在不同重熔速度下板锭重熔过程的温度场和分析影响金属熔池深度的因素。模拟结果表明:横截面尺寸 400 mm × 2 000 mm, 20 t 板锭重熔过程中,当重熔速度 3 ~ 5 mm/min 时,重熔速度越大,熔池深度越深;当重熔锭的高度达到铸锭厚度的 2 倍左右时,系统处于准稳定状态,熔池深度不再变化。

**关键词** 电渣重熔 板锭 温度场 非稳态模型 熔池

## Dynamic Simulation on Temperature Field of Slab Ingot during Electroslag Remelting

Chang Lizhong and Li Zhengbang

(Institute of Metallurgical Technology, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** According to characteristics of electroslag remelting (ESR) of steel, the unsteady-state model for ESR slab ingot has been established to simulate the temperature field of slab ingot during ESR with different remelting speed and analyze the effect factors on metal pool depth. Simulation results showed that during remelting of 20 t slab ingot with cross-section size 400 mm × 2 000 mm and remelting speed 3 ~ 5 mm/min, with increasing remelting speed the depth of metal pool increased and as height of remelted ingot was about up to double of ingot thickness the system was in quasi-steady state then the depth of metal pool was unchanging.

**Material Index** Electroslag Remelting, Slab Ingot, Temperature Field, Quasi-Steady Model, Metal Pool

随着造船业、特种机械制造业、锅炉制造业及其他工业的迅速发展,需要大量的优质轧制厚板,用电渣重熔可获得具有高度各向同性的机械性能及特殊性能的厚板<sup>[1]</sup>。

电渣重熔后的钢锭之所以有良好的性能,一个重要原因就是它具有良好的凝固组织。如何确保在重熔过程中获得好的凝固组织,关键是选择合理的重熔速度,进而控制熔池深度、局部凝固时间,获得较小的二次枝晶间距。但是,如何选取合理的重熔速度是一个关键问题,如果采用试验的方法,对大的板锭进行解剖,成本是非常高的,也不太现实。因此,如果能通过数值模拟的方法计算出板锭重熔过程中的温度场,就具有重大的意义。

在国内,目前还没有关于板锭重熔过程中温度场模拟的相关文献。在国外,日本新日铁曾经重熔 40 t 的板锭时,进行过相关的模拟<sup>[2,3]</sup>;前苏联巴顿电焊研究所也进行过板锭的数学模拟<sup>[4]</sup>。

通过计算板锭电渣重熔的温度场分布、熔池深度,从而找出板锭的凝固规律,预测板锭的凝固特征,为工业生产提供依据。

### 1 板坯结晶器凝固传热的数学模型

#### 1.1 模型假设条件

(1)模型假设为二维传热,只在厚度方向与纵向传热;

(2)假设渣-金界面为平面;

(3)渣-金界面的温度为一定值;

(4)忽略液相内的对流,以一个适当的传热系数来等效;

(5)固态、液态钢的热物理参数为常数。

#### 1.2 凝固传热模型

电渣重熔板锭示意图如图 1。

凝固模型如下:

$$\rho c^* \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda^* \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda^* \frac{\partial t}{\partial z} \right) + L \quad (1)$$

式中: $\lambda^*$ -导热系数/[W · (m · °C)<sup>-1</sup>],金属熔池及两相区的导热系数以有效导热系数来估计; $L$ -凝固潜热/(W · m<sup>-3</sup>),只有在两相区才有此项,假设在两相区内固相率  $f_s$  与温度成线型关系,  $\frac{df_s}{dt} =$

$-\frac{1}{t_l - t_s}$ ,那么两相区内的凝固潜热以有效热容来估计,即  $c^* = c + \frac{L}{t_l - t_s}$ ,  $t \in (t_s, t_l)$ ,  $t_l$ -液相线温度/°C,  $t_s$ -固相线温度/°C,  $c$ -常数,在液相及固区仍以液、

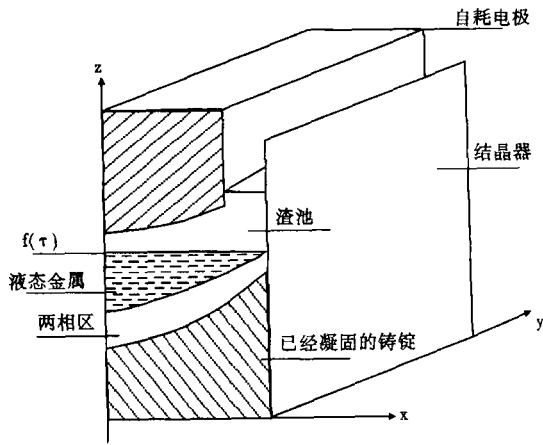


图1 板锭电渣重熔模型图

Fig.1 Scheme for model of ESR of slab ingot

固态的热容计算; $\rho$ - 密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $t$ - 温度/ $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\tau$ - 时间/s; $x$ -  $0 < x < l_x/2$  ( $l_x$  为铸锭的宽度/m); $z$ -  
 $0 < z < f(\tau)$ ,  $f(\tau)$  为金属熔池(渣-金界面)的位置,  
 随着重熔的进行不断变化。

## 2 边界条件与初始条件

(1)铸锭上面边界条件,即渣池-金属熔池界面。  
 进入金属熔池的热量由两部分组成,即:

$$q = q_{sl} + q_r \quad (2)$$

式中: $q$ - 进入金属熔池的总热量; $q_{sl}$ - 由渣传入熔池的热量; $q_r$ - 电极下部熔化形成的金属液滴进入熔池的热量。

这两项可表示如下:

$$q_r = M \cdot c [t_k - t(x, z, \tau)] \quad (3)$$

$$q_{sl} = h_{sl} [t_{sl} - t(x, z, \tau)] \quad (4)$$

式中: $M$ - 金属熔滴的质量/kg; $c$ - 质量热容/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$ ; $t_k$ - 金属熔滴的温度/ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{sl}$ - 渣温/ $^{\circ}\text{C}$ ; $h_{sl}$ - 渣金之间的传热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})]$ 。

因此,在  $z=f(\tau)$  (渣池-金属熔池界面) 位置的边界条件表示如下:

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial z} \right|_{z=f(\tau)} = h_{sl} [t_{sl} - t(x, z, \tau)] + M \cdot c [t_k - t(x, z, \tau)] \quad (5)$$

假设液滴的过热度为  $100^{\circ}\text{C}$ ,渣-金界面的温度为  $1650^{\circ}\text{C}$ ,渣-金界面的传热系数为  $2840 \text{ W}/(\text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$ 。

(2)铸锭下部边界条件:

$$-k \frac{\partial t}{\partial z} = h_b (t - t_b), z=0 \quad (6)$$

式中: $t_b$ - 冷却水的温度/ $^{\circ}\text{C}$ ; $h_b$ - 铸锭与底板的传热系数。

(3)铸锭侧面边界条件:

$$0 < z < f(\tau) \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = h_{tw} (t - t_w) \quad (7)$$

式中: $h_{tw}$ - 结晶器与铸锭间有效传热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})]$ ; $t_w$ - 冷却水温度/ $^{\circ}\text{C}$ ; $f(\tau)$ - 铸锭高度/m。公式(7)为在厚度方向上的传热。

(4)中心线为边界条件,按轴对称选取中心线为边界,在此边界上无热流。

$$0 < z < f(\tau), x=0 \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

(5)初始条件

假设在初始时间,结晶器内已经有了一层钢液,为一等温体。

## 3 计算方法

在本次计算中,采用有限差分法对传热方程离散求解,网格划分为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,每  $1 \text{ s}$  计算一次。在电渣重熔过程中,铸锭是不断增长的,因此重熔过程中的移动边界(渣-金界面)问题,采用以下方法解决:锭子的增长(电极不断的熔化)可以看作是若干时间后增加了一排新的格子。采用 Visual Basic 作为计算工具,进行模拟。

## 4 结果与讨论

所模拟板锭的横截面尺寸为  $400 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$ ,锭重为  $20 \text{ t}$ 。采用 3 个不同的重熔速度 ( $3, 4, 5 \text{ mm}/\text{min}$ ) 进行,计算不同时刻(铸锭高度)金属熔池的深度及对熔池深度的影响因素,钢种为 45 号钢。

在  $3, 4, 5 \text{ mm}/\text{min}$  的重熔速度下,当重熔锭的高度为  $500, 1000, 1500 \text{ mm}$  时,铸锭厚度为  $400 \text{ mm}$  的熔池形状如图 2 所示。

从图 2 可以看出,在重熔开始阶段,熔池深度较浅;随着重熔的进行,熔池深度逐渐增加,当重熔进行到一定程度时,熔池形状基本保持不变;并且随着重熔速度的提高,熔池深度加深,这也说明熔炼速度是影响熔池形状的主要因素。这可以从图 3 更明显的看出来。

从图 3 可以看出,当铸锭高度达到铸锭厚度的

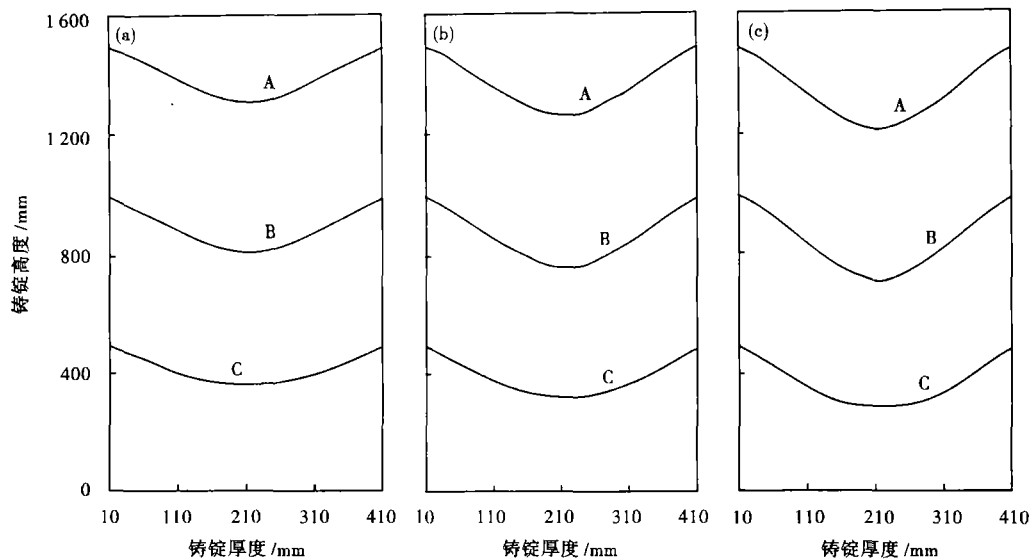


图 2 400 mm 厚板锭的熔池形状:重熔速度 3 mm/min (a), 4 mm/min (b) 和 5 mm/min (c); 铸锭高度/mm: A-1 500, B-1 000, C-500  
Fig.2 Metal pool shape for remelting 400 mm thickness slab ingot with remelting speed 3 mm/min (a), 4 mm/min (b) and 5 mm/min (c); at height of slab ingot 1 500 mm- A, 1 000 mm- B, 500 mm- C

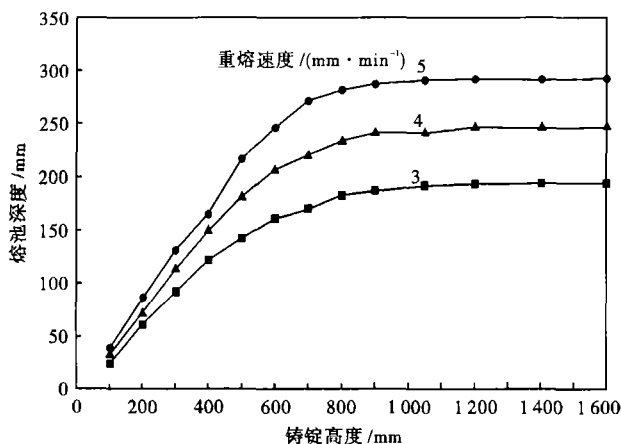


图 3 板锭不同重熔速度、高度下的熔池深度  
Fig.3 Metal pool depth at various remelting height with different remelting speed of slab ingot

2 倍左右时,熔池深度处于准稳定状态,几乎不再变化,或者变化很小;并且随着重熔速度的增加,熔池深度也增加。这说明在重熔开始阶段,可以采用较大的重熔速度,因为这时熔池深度较浅;随着重熔的进行,应该采用递减功率操作,适当的降低重熔速度,防止形成深的熔池,恶化铸锭的凝固组织。

电渣重熔锭之所以优于一般的铸锭,关键就在于它的凝固组织。而控制重熔过程中的熔池深度是获得优良凝固组织的关键。对于普通的圆锭重熔,重熔速度可以参考相关的公式,而对于板锭,一般是把板锭的横截面等价同面积的圆,从而计算重熔速度;这是很不合理的,原因在于板锭与圆锭的冷却条件不同。新日铁重熔 40 t 板锭时<sup>[2,3]</sup>,所采用的

重熔速度,是按照经验公式计算的重熔速度的 2 倍。因此,按照计算圆锭的公式来计算板锭的重熔速度是不合适的。最好的方法就是按照数值方法,模拟不同重熔速度下的熔池深度,找出板锭的凝固规律,这也是本计算的原因所在。当然,对于某一厚度的铸锭,究竟什么样的熔池深度较合适,这需要试验的配合。

## 5 结论

(1) 板锭重熔过程中,重熔速度对熔池深度的影响很大,重熔速度越大,熔池深度越深;反之,就越浅。

(2) 当重熔锭的高度达到铸锭厚度的 2 倍左右时,系统处于准稳定状态,熔池深度不再变化。

(3) 传统的按照计算圆锭重熔的方法计算板锭的重熔速度是不合适的,采用数值方法模拟不同重熔速度下的熔池深度,找出板锭的凝固规律是比较合适的。

## 参考文献

- 1 李正邦. 电渣重熔译文集. 北京:冶金工业出版社,1990
- 2 大河平和男,佐藤宣雄,清水高治,等. スラブ型 40 t ESR における精煉効果と品質について. 鉄と鋼,1977,63(13):2208
- 3 Nishiwaki M, Yamaguchi T, Koba M, et al. Operation of Large Bifilar ESR Furnace for Slab Production and Quality of Slabs and Heavy Plates Produced. Proceedings of the 5<sup>th</sup> Inter. Conference on Vacuum Metallurgy and ESR Processes. Munich, Germany, 1976:197
- 4 Medovar B I. Temperature Fields of Large Slab Ingots. Proceedings of the 5<sup>th</sup> Inter. Conference on Vacuum Metallurgy and ESR Processes. Munich, Germany, 1976:153

常立忠(1977-),男,博士研究生,从事电渣冶金的研究。

收稿日期:2007-05-08