

## 电磁搅拌对电渣重熔钢锭温度场的影响

白海军 厉英 李宝宽

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

**摘要** 建立了电磁搅拌条件下电渣重熔钢锭凝固过程数学模型。利用 Visual Basic 编程模拟分析了旋转电磁搅拌下 15Mn 钢的电渣重熔凝固过程, 结果表明: 未施加磁场时, 模拟结果与实验结果较吻合; 施加磁场时, 电磁搅拌加强了钢液内部传热, 熔池变平坦, 有利于消除电渣锭宏观偏析和缩孔等缺陷, 同时有利于晶核发展成等轴晶组织。

**关键词** 电渣重熔 电磁搅拌 凝固 温度场 数值模拟

## Effect of Electromagnetic Stirring on Temperature Field of ESR Ingot

Bai Haijun, Li Ying and Li Baokuan

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

**Abstract** A mathematical model of solidification process of electro-slag remelting (ESR) ingot under the condition with electromagnetic stirring (EMS) has been established, and the ESR solidification process of steel 15Mn with spinning EMS has been simulated and analyzed by using Visual Basic language. Results show that under the condition without EMS the simulated results are agreed with experiment results; and under the condition of applied magnetic field the heat transfer is reinforced in liquid and the metal pool shape goes to plain, which is beneficial to eliminate the defects of ESR ingot such as macro segregation and shrinkage cavity, and available to promote the crystal nucleus developing to equiaxed grain.

**Material Index** ESR, EMS, Solidification, Temperature Field, Numerical Simulation

旋转型电磁搅拌在钢的连续铸造、铸件成形与凝固、半固态浆料制备、液态金属净化等工艺过程中得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。通过实验建立电磁搅拌条件下电渣重熔钢锭凝固数学模型。

### 1 电渣重熔凝固过程数学描述

模型作如下简化: (1) 渣-金界面为水平面; (2) 金属熔池与渣池的对流作用以有效导热系数来估计; (3) 正常熔炼期及自耗电极补缩期, 以一个特征渣温代替渣池内不均匀的温度场; (4) 通过钢锭截面的电流均匀分布。

实际物理模型(图1)为轴对称型, 可简化为二维求解。在柱坐标下, 其二维非稳态传热方程为<sup>[3,5]</sup>:

$$\rho \bar{c}_p v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (1)$$

$$f_L = \frac{T - T_s}{T_L - T_s} \quad (2)$$

有效比热容:  $\bar{c}_p = c_p + \frac{1}{T_L - T_s} \cdot L$

源项:  $q = \frac{J^2}{\sigma}$

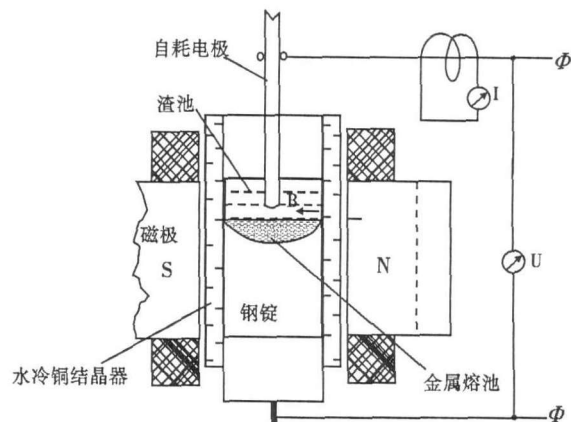


图1 电渣重熔系统示意图

Fig. 1 Schematic of electro-slag remelting system

式中:  $v$ - 钢锭上涨速度;  $\bar{c}_p$ - 等效比热容;  $L$ - 潜热;  $k_{\text{eff}}$ - 有效导热系数;  $\rho$ - 钢锭密度;  $f_L$ - 液相率;  $J$ - 电流密度;  $\sigma$ - 电导率。渣金对流有效传热系数  $k = k_0 (1 + \Lambda)$ ,  $\Lambda$  通常取 2~5。

旋转电磁搅拌力作如下假设: (1) 从固定树枝结晶糊状区到自由结晶区, 在某一个液相率值  $f_L^* = 0.9$  处, 有一个不连续的变化。(2) 在液相率  $f_L > f_L^* = 0.9$  液相区, 晶核服从单相湍流流动法则。悬浮

颗粒浓度的实际行为与纯液体相类似。(3)对于  $f_L < 0.9$  的区域,只涉及热传导,无对流现象。

在  $f_L > f_L^* = 0.9$  区域内,有效导热系数的计算基于湍流模型。湍流热扩散系数  $k_t$  为<sup>[6]</sup>:

$$k_t = \sqrt{\rho \tau_{r\varphi}} \cdot l_m c_p \quad (3)$$

$$\tau_{r\varphi} = \frac{B_r^{02} R_m G_p \left( \frac{r}{r_m} \sqrt{R_m} \right)}{\mu_0 2p Sbe_p(\sqrt{R_m})} \quad (4)$$

其中:

$$G_p(X) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(p+n)! (p+2n+1)! n!} \left( \frac{1}{2} X \right)^{4n+2p}$$

$$Sbe_p(X) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(p+n)! (p+2n)! n!} \left( \frac{1}{2} X \right)^{4n+2p}$$

$$k_{\text{eff}} = k + k_t \quad (5)$$

式中:  $k_t$ - 湍流热扩散系数;  $\tau_{r\varphi}$ - 剪切应力;  $l_m$ - 混合长度;  $B_r^0$ - 磁感应强度 ( $r = r_m$ );  $R_m$ - 磁雷诺数;  $\mu_0$ - 磁导率;  $p$ - 电极对数。

设钢锭半径、高度分别为  $r_m, z_m$ , 电极半径、熔速分别为  $r_e, M_e$ , 渣池温度  $T_{\text{slag}}$ , 熔滴热焓  $H_d$ , 钢锭侧壁、底部、渣金界面换热系数分别为  $h_w, h_b, h_{\text{sm}}$ , 有如下边界条件:

$$r = 0, 0 \leq z \leq z_m: \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

$$z = 0, 0 \leq r \leq r_m: -k \frac{\partial T}{\partial z} = h_b (T - T_w)$$

$$r = r_m, 0 \leq z \leq z_m: -k \frac{\partial T}{\partial r} = h_w (T - T_w)$$

$$z = z_m, 0 \leq r \leq r_e: -k \frac{\partial T}{\partial z} = h_{\text{sm}} (T_{\text{slag}} - T) + \frac{M_e}{\pi r_m^2} (H_d - H)$$

$$z = z_m, r_e \leq r \leq r_m: -k \frac{\partial T}{\partial z} = h_{\text{sm}} (T_{\text{slag}} - T)$$

传热控制方程采用有限容积方法的内接点法进行离散,边界条件用附加源项法<sup>[7]</sup>处理,采用交替方向隐式迭代法求解。钢锭尺寸  $\Phi 140 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ , 温度场计算空间为  $70 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ , 计算网格接点数为  $18 \times 48$ , 计算时间步长为  $1 \text{ s}$ 。结晶潜热的释放采用等效比热法计入,电磁搅拌对传热的影响以及金属熔池与渣池的对流作用以有效导热系数来计算。依文献[3]取定以  $70\% \text{ CaF}_2 + 30\% \text{ Al}_2\text{O}_3$  渣系重熔钢的有关工艺参数,有关物性参数取自文献[4,6]。表1中列出了各参数的值。

## 2 结果与讨论

利用本文所提出的数学模型模拟了电渣重熔

表 1 计算所使用参数

Table 1 Parameters used for calculations

项目	参数
钢锭直径/mm	140
成品锭高/mm	350
成品锭重/kg	38.89
电极半径/mm	40
电流/A	3 000
电压/V	39.5
熔速/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.021
钢锭质量热容/[ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	799
凝固潜热/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	260 000
钢锭密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7 200
液相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	1 517
固相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	1 467
电导率/( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$0.714 \times 10^6$
磁导率/( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$1.256 6 \times 10^{-6}$
旋转角速度/ $\text{s}^{-1}$	$2\pi \times 50$
磁极对数	1
磁感应强度/mT	20
结晶器换热系数/[ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ]	419

15Mn 钢的动态温度场分布。根据文献[8]所提供的实验结果与本模拟结果作对比,在未施加磁场搅拌下模拟结果与实验结果比较接近(图2)。

计算时给出钢锭初始母液高为  $0.01 \text{ m}$ , 开始阶段熔池深度缓慢增加,当铸锭高度与锭径之比达到  $1.5$  时,熔池深度基本不随锭高发生变化。达到成品锭高后进入自耗电电极补缩期的推移过程。从图3可见,熔铸  $800 \text{ s}$  之前熔池深度随锭高变化比较明显,此后熔池深度基本不随时间和锭高发生变化,保持在  $70 \text{ mm}$  左右。无论钢锭及操作条件如何变化,钢锭高温区始终处于电极下部的中心区域。随着钢锭高度增加,高温区逐渐拉长。图4表明剪切应力从铸坯中心沿半径方向以抛物线型逐渐递增,其最大值在铸坯边缘,铸坯中心剪切应力几乎为  $0$ 。

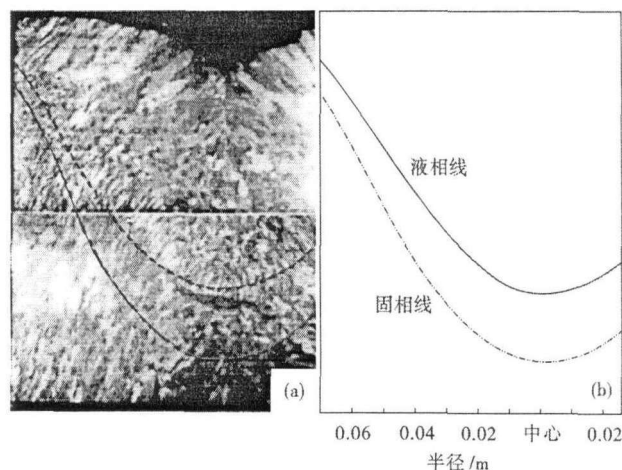


图 2 熔池形状实验结果(a)和模拟结果(b)比较

Fig. 2 Comparison between tested (a) and simulated (b) pool shape

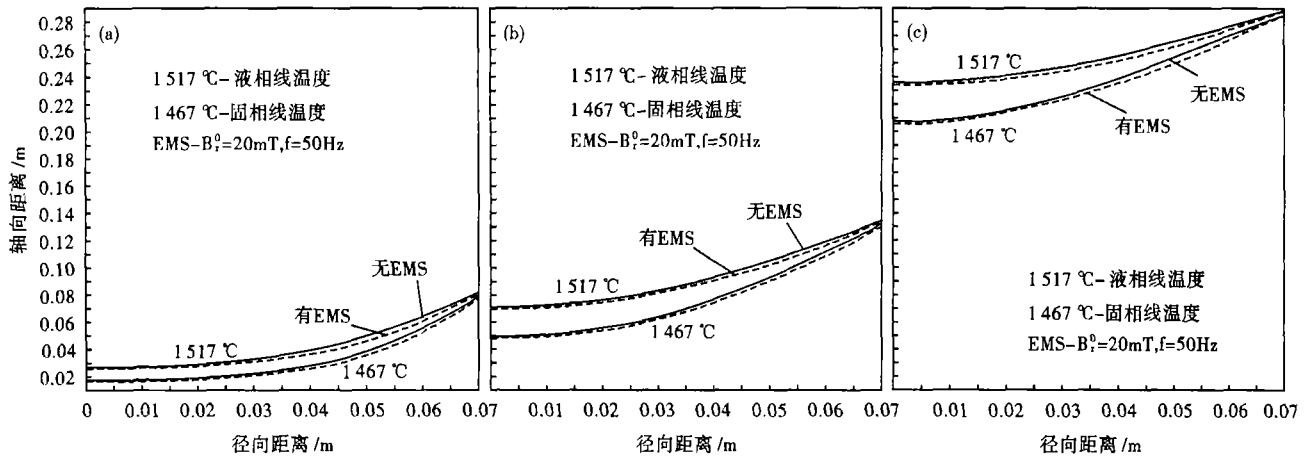


图 3 电渣熔铸 400 s (a), 800 s (b), 1 800 s (c) 液固相线分布

Fig.3 Distribution of liquidus - solidus curves with ESR 400 s (a), 800 s (b) and 1 800 s (c)

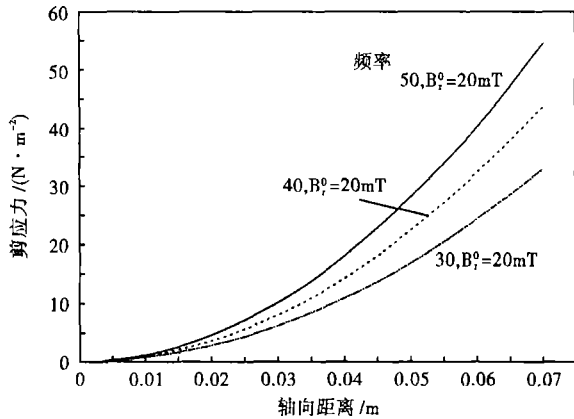


图 4 EMS 频率对重熔锭剪切应力的影响

Fig.4 Effect of EMS frequency on shear stress of remelted ingot

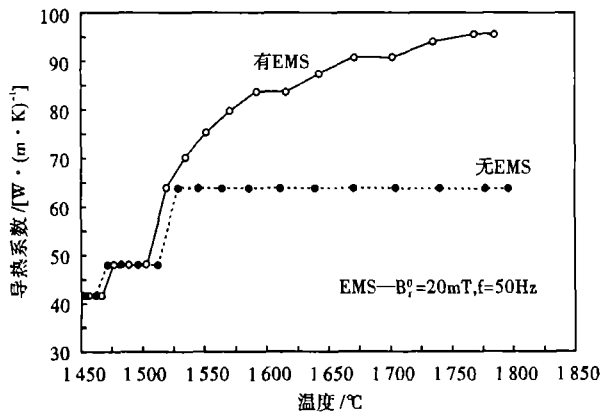


图 5 准稳态时 2/3 半径处电磁搅拌对钢液导热系数的影响  
Fig.5 Effect of EMS on heat conductivity of liquid steel at 2/3 radius in quasi-stabilized condition

图 5 则给出了有无搅拌对钢液有效导热系数的影响。在 Lorentz 力的作用下钢液旋转流动,流动改变了钢液的换热条件,将熔池中心的高温熔体与周边较冷熔体混合。从而加强了向周边的传热,使周边区域温度升高,导致金属熔池变宽。熔池变宽结

晶角增大,有利于液相穴内自由晶核形成,同时高温钢液对固液界面处的柱状晶有熔蚀作用,有利于增加钢液熔池中的晶核数量。

### 3 结论

(1)在旋转电磁场下电渣重熔时,随着钢锭高度增加,熔池缓慢拉长,当钢锭高度与直径之比达到 1.5 之后,熔池深度基本保持在 70 mm 左右,直到熔铸阶段结束。

(2)在电磁搅拌下,与无电磁搅拌的情况相比熔池明显变得平坦。熔池温度梯度减小,熔池的平坦有利于晶核发展成大量等轴晶。

国家自然科学基金钢铁联合基金资助项目(50474085)

### 参考文献

- 1 周尧和,胡壮麒,乔万奇.凝固技术.北京:机械工业出版社,1998
- 2 Marcel Garnier. Technological and Economical Challenges Facing EPM in the Next Century. The 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, 2000; 3
- 3 姜周华.电渣冶金物理化学及传输现象.沈阳:东北大学出版社,2000
- 4 陈元元,刘喜海,李宝宽.电渣重熔钢锭凝固过程数学模拟软件.钢铁研究学报,2005,17(6):30
- 5 Dilawari A H, Szekeley J. Heat Transfer and Fluid Flow Phenomena in Electro-slag Refining. Metallurgical Transactions B, 1978, 19B: 87
- 6 Karl-Hermann Tacke, Alfred Grill, et al. Macrosegregation in Strand Cast Steel; Computation of Concentration Profiles With a Diffusion Mode, Arch, Eisenhüttenwes, 1981, 52(1): 17
- 7 陶文全.数值传热学(第2版).西安:西安交通大学出版社,2001
- 8 Mitchell A. Solidification in Re-melting Processes. Materials Science and Engineering A, 2005, 413-414: 10

白海军(1981-),男,硕士,博士研究生,2001年东北大学毕业,主要从事金属精炼与铸锭工艺的模型化。