

电渣重熔过程电磁场和温度场数值模拟

王晓花, 厉英
(东北大学材料与冶金学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 建立了考虑电流集肤效应的三维电渣重熔电磁场和温度场数学模型, 并采用电磁场和金属熔池形貌测量方法分别验证了数学模型的准确性, 分析了电流频率和渣池厚度对电渣重熔过程电流密度、磁感应强度、电磁力、焦耳热、温度、熔池深度的影响规律. 结果表明: 随着电流频率增加, 电极和钢锭表面电流集肤效应明显, 渣池内部电流分布基本不变; 电渣重熔系统内最大焦耳热位于平底电极与渣池接触角部, 然而高温区位于渣池内部电极下方靠近渣金界面处. 当渣池厚度从 0.15 m 增加到 0.21 m, 渣池中心轴线上最高温度从 1 826 ℃ 降低到 1 721 ℃, 金属熔池深度从 0.22 m 降低到 0.16 m.

关 键 词: 电渣重熔; 电磁场; 温度场; 集肤效应; 数值模拟

中图分类号: TG 142.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2014)06-0813-06

Numerical Simulation of Electromagnetic Field and Temperature Field of ESR

WANG Xiao-hua, LI Ying
(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Ying, E-mail: liying@mail.neu.edu.cn)

Abstract: 3D finite element models for both the magnetic field and temperature field of electroslag remelting (ESR) system were developed and validated by the experimental measurements of magnetic flux density and melt pool profile. The effects of current frequency and slag cap thickness on the current density, magnetic flux density, electromagnetic force, joule heat, temperature field and melt pool depth were investigated, respectively. The results showed that with the increase of current frequency, the skin effect of current on the external surfaces of electrode and ingot is more significant, but the current frequency has no effect on the current density distribution in slag cap. The maximum joule heat zone is located on the corner of contact position between flat head electrode and slag. However, the high temperature zone is located in the slag cap below the electrode head and near the slag/melt interface. With the increase of slag cap thickness from 0.15 m to 0.21 m, the highest temperature in the axis of slag cap decreases from 1 826 ℃ to 1 721 ℃, and the melt pool depth decreases linearly from 0.22 m to 0.16 m.

Key words: electroslag remelting (ESR); electromagnetic field; temperature field; skin effect; numerical simulation

电渣重熔是通过外加电流(直流或交流)流经渣池产生大量的焦耳热熔化自耗电极,熔化的自耗电极以熔滴或流股(取决于熔速)形式流经渣池,在渣洗作用下金属液内夹杂物和有害气体被去除,净化后的金属液聚集在渣池下方的金属熔池内并在结晶器壁和底水箱的强制冷却作用下逐渐凝固,从而获得成分和组织均匀、夹杂物含量低和性能稳定的电渣重熔钢锭^[1-3]. 因此,电渣重熔被广泛应用于生产高附加值特殊钢和超级合金.

电渣重熔过程中电磁场相互作用为电渣重熔提供电极熔化所需的热量,并对电渣重熔过程温度变化和最终钢锭凝固组织产生重要影响. 因此,电渣重熔过程中电磁场和温度场变化研究对于详细研究电渣重熔机理、优化电渣重熔工艺、获得高

质量的钢锭至关重要. 然而由于电渣重熔试验成本高, 试验方法很难对电渣重熔进行系统的机理研究. 数值模拟能够克服物理试验所存在的缺陷, 正逐渐成为研究电渣重熔机理和建立电渣重熔工艺参数与最终钢锭质量之间内在关系的有效手段. Chouldhary 等^[4]建立了耦合 Maxwell 方程、湍流 Navier-Stokes 方程和能量守恒方程的电渣重熔数学模型, 分析了电渣重熔过程熔池形貌、速度场和温度场. 李宝宽等^[5]建立电渣重熔过程考虑集肤效应的三维谐波电磁有限元模型, 详细地分析了电渣重熔过程电磁场、Joule 热分布和温度场. 董艳伍等^[3,6]在不考虑电流集肤效应情况下分析了单电极和多电极电渣重熔过程三维电磁场、温度场和速度场. 耿茂鹏等^[7]在不考虑电流集肤效应情况下分析了电渣重熔系统内电磁场和温度场分布规律. Mitchell^[8]分析了数学模型在电渣重熔过程应用中取得的进步, 但充分了解电渣重熔过程基本原理还需要要进一步完善.

本研究建立了考虑电流集肤效应的三维电渣重熔电磁场和温度场数学模型, 并采用电磁场和金属熔池形貌测量方法分别验证了数学模型的准确性, 在此基础上, 详细分析了电渣重熔过程操作参数(电流频率和渣池厚度)对电流密度、磁感应强度、电磁力、焦耳热、温度、熔池深度的影响规律.

1 数学模型描述

1.1 电磁场模型

本研究作如下假设: 熔渣和金属热物性参数可视为常数且各向同性; 钢液和钢锭导磁率等同于真空导磁率; 结晶器与钢锭之间的渣膜具有良好的绝缘作用; 电渣重熔过程处于准稳态过程, 忽略电渣重熔液滴运动对电磁场的影响. 描述电磁场的基本方程如下.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t},$$

（1）

$$\nabla \times H = J,$$

（2）

$$\nabla \times B = 0,$$

（3）

$$B = \mu H,$$

（4）

$$J = \sigma E.$$

（5）

Lorentz 定律:

$$F = \frac{1}{2}Re(J \times B).$$

（6）

Joule 定律:

$$\omega = E \cdot J.$$

（7）

式中: E 为电场强度, V/m ; B 为磁感应强度, T ; H 为磁场强度, A/m ; J 为电流密度, A/m^2 ; t 为时

间, s ; μ 为磁导率, H/m ; σ 为电导率, S/m ; F 为电磁力, N ; ω 为发热密度, W/m^3 .

电磁场边界条件: 磁力线平行边界条件, 即在空气单元外侧没有磁场存在.

1.2 温度场模型

电渣重熔过程凝固传热受渣池和金属熔池内钢液流动、熔滴运动、凝固钢锭与结晶器间气隙等因素影响, 传热行为较为复杂. 为了简化数学模型, 本研究作如下假设: 电渣重熔钢锭达到准稳态; 渣池中电极端部为液相线温度; 熔池中流动产生的强制对流传热采用增大导热系数来考虑; 钢锭与结晶器之间产生的气隙采用减小换热系数来考虑. 电渣重熔过程凝固传热控制方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa_{\text{eff}} \nabla T) + S_q.$$

（8）

渣池自由表面为辐射边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_{\text{amb}}^4).$$

（9）

渣池/结晶器壁、钢锭/结晶器壁和钢锭/结晶器底均为对流传热边界条件:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_w).$$

（10）

式中: T 为温度, K ; ρ 为密度, kg/m^3 ; c_p 为定压比热容, $J/(kg \cdot K)$; κ_{eff} 为有效导热系数, $W/(m \cdot K)$; t 为时间, s ; S_q 为内热源, J/m^3 ; σ 为渣池表面黑度, 0.6 ; ε 为 Stefan-Boltzman 常数, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; h 为传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_{amb} 为环境温度, K ; T_w 为冷却水温度, K .

1.3 模型计算参数

本研究针对单电极电渣重熔系统, 利用 ANSYS 有限元软件模拟电渣重熔系统的电磁场和温度场. 模型具体计算参数详见表 1. 电渣重熔钢为转子钢 30Cr1Mo1V, 热物性参数采用钢凝固过程热物性参数与相组成变化之间的关系式计算所得, 具体详见文献[9].

表 1 模型参数^[4]

Table 1 The parameters of the model

名称	参数值
电极(直径/高度)/m	0.20/0.5
钢锭(直径/高度)/m	0.36/1.0
电流/A	8 000
电压/V	50
电极、钢锭电导率/ $(\Omega \cdot m^{-1})$	7.14×10^5
渣磁导率/ $(H \cdot m^{-1})$	1.26×10^{-6}
渣比热/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	837
渣层(直径/高度)/m	0.36/0.15, 0.18, 0.21
空气柱(直径/高度)/m	2/2
频率/Hz	10, 20, 30, 40, 50
电极插入深度/m	0.02
渣电导率/ $(\Omega \cdot m^{-1})$	2.5×10^2
渣密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	2 850
渣导热系数/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	10.46

2 模型验证

2.1 电磁场

为了验证电磁场模型的准确性,本研究采用 CT-3 型特斯拉计对电渣重熔过程中电流频率为 50 Hz 时,渣池等高位置距渣金界面 0.1 m 处钢锭周围空气内的磁感应强度进行了测量. 图 1 为电渣重熔系统磁感应强度计算值与实测值比较. 从图中看出,计算值和实测值吻合很好,说明模型能够较好地预测电渣重熔系统磁感应强度.

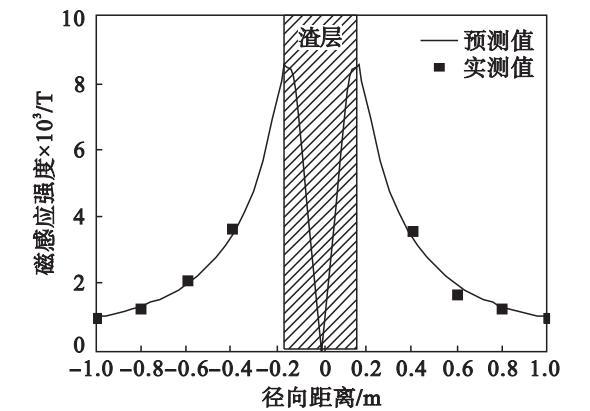


图 1 电渣重熔系统距渣金界面 0.1 m 处横截面中心线上磁感应强度计算值与实测值比较

Fig. 1 Comparison between the predicted and measured magnetic flux density along the centerline of cross section located 0.1 m above the slag/metal interface of ESR

2.2 温度场

为了验证电渣重熔温度场模型的准确性,本研究在电渣重熔过程中突然切断电源,3 min 后重新启动重熔电源,维持正常状态. 电渣重熔结束后将电渣重熔钢锭沿轴向中心截面剖开,将纵截面抛光、酸洗、拍照. 图 2 为电渣重熔金属熔池形貌实测值与计算值的比较. 图 2a 为电渣重熔钢锭纵截面,曲线标示了金属熔池形貌. 从图中可以看出模型计

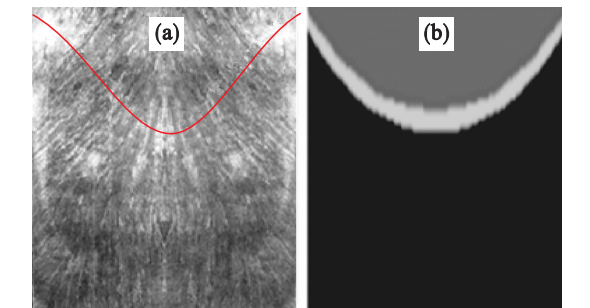


图 2 电渣重熔系统金属熔池形貌实测值与计算值比较
Fig. 2 Comparison of the experimentally observed and predicted melt pool profile of ESR ingot

(a) — 实测值; (b) — 计算值.

算值与实测值吻合较好,说明电渣重熔温度场模型能够很好地预测电渣重熔过程温度变化规律.

3 结果与讨论

3.1 电磁场

图 3 为频率 50 Hz 时,电渣重熔系统中心纵截面电流密度矢量分布图. 从图中可以看出电流从电极顶端流进,通过电极底部进入渣池,最后从钢锭底部流出. 由于电极和钢锭的电导率明显高于渣池,电极和钢锭的集肤深度 $\delta = (1/\pi f \mu \sigma)^{0.5} = 0.084$ m 远小于渣池的集肤深度 4.497 m,当交变电流通过电渣重熔系统时,电极和钢锭表面产生明显的集肤效应. 此外,当交变电流从电极进入渣池时,由于电极和渣池的电导率相差较大,电流进入渣池瞬间,电流密度分布会发生突变,渣池内电极端部处电流密度明显增加,从而为渣池发热、熔化电极提供条件.

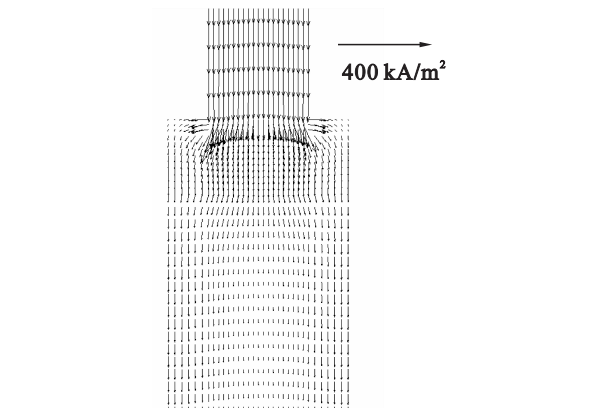


图 3 电渣重熔系统中心纵截面电流密度分布图
Fig. 3 Current density vector of the longitudinal section of ESR

图 4 为电流频率对电渣重熔系统内电极、渣池和钢锭横截面中心线电流密度的影响. 从图中可以看出随着电流频率的增加,渣池内电流密度分布基本不变,电极和钢锭外表面电流集肤效应明显增加;当电流频率从 10 Hz 增加到 50 Hz 时,电极表面处最大电流密度从 256 kA/m² 增加到 265 kA/m²,钢锭表面处最大电流密度从 80 kA/m² 增加到 102 kA/m².

图 5 为频率 50 Hz 时,电渣重熔系统内电极、渣池和钢锭磁感应强度分布图. 从图中可以看出磁感应强度沿电极、渣池和钢锭表面切向分布,与电渣重熔系统内交变电流流经方向满足右手螺旋定则. 磁感应强度随距离横截面中心增加而增加,横截面边缘处磁感应强度最大.

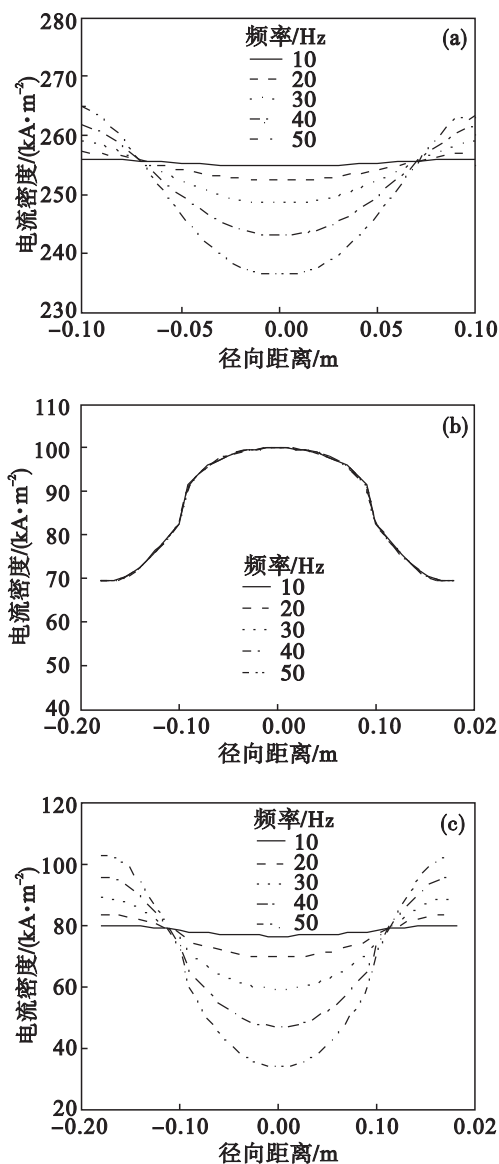


图 4 频率对电渣重熔系统电极、渣池和钢锭横截面中心线电流密度分布的影响

Fig. 4 Effect of current frequency on current density along the centerline of cross section of electrode, slag cap and ingot in the ESR system

(a)—电极;(b)—渣池;(c)—钢锭.

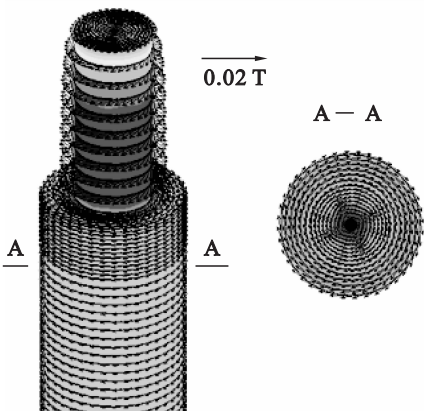


图 5 电极、渣池和钢锭磁感应强度分布

Fig. 5 Magnetic flux densities of electrode, slag cap and ingot of ESR

图 6 为电渣重熔系统中心纵截面电磁力分布图. 从图中可以看出电磁力在电极和钢锭内部沿径向分布,且在钢锭和电极表面处电磁力最大,这是由于交变电流通过电渣重熔系统在电极和钢锭表面产生明显的集肤效应,使得电极和钢锭表面电流增大(如图 4 所示),电磁力增加. 渣池内电极与渣池接触处电磁力存在轴向和径向分量,这是交变电流从电极进入渣池时,由于电极和渣池电导率相差较大,交变电流从电极进入渣池瞬间发生明显的电流重新分布所致.

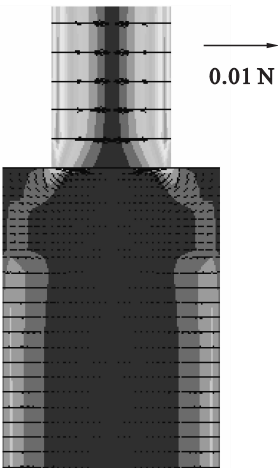


图 6 电渣重熔系统中心纵截面电磁力分布图

Fig. 6 Electromagnetic force of the longitudinal section of ESR

图 7 为电渣重熔系统中心纵截面焦耳热分布图. 从图中可以看出最大焦耳热位于平头电极角部与渣池接触处,这使得平头电极角部在渣池产生的焦耳热作用下最先熔化. 这是由于电流流经电极进入渣池时,平头电极角部与渣池接触处电流密度最大(图 3),从而使得接触位置处渣池产生大量的焦耳热.

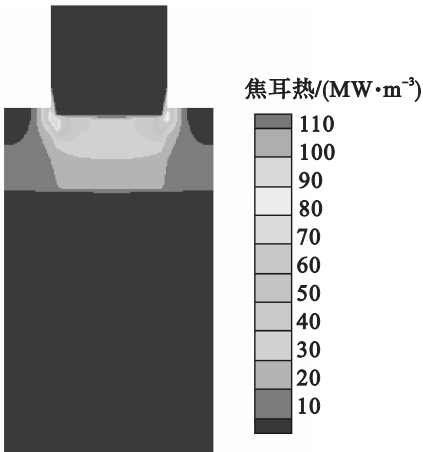


图 7 电渣重熔系统中心纵截面焦耳热分布图

Fig. 7 Joule heat field of the longitudinal section of ESR

3.2 温度场

图 8 为电流 8 kA, 频率 50 Hz 情况下, 电渣重熔系统中心纵截面温度分布图. 从图中可以看出电渣重熔系统内渣池温度最高, 这是由于电渣重熔过程中电流通过渣池产生大量的焦耳热(如图 7 所示), 使得渣池温度急剧上升, 为电极熔化提供前提条件. 电极熔化过程消耗部分渣池热量, 使得电极与渣池接触处温度相对渣池中心其他部位偏低. 最高温度区域位于电极正下方渣池内靠近渣金界面处, 这是由于该区域渣池受结晶器冷却和电极熔化吸热影响较小, 且存在大量的焦耳热提供热量.

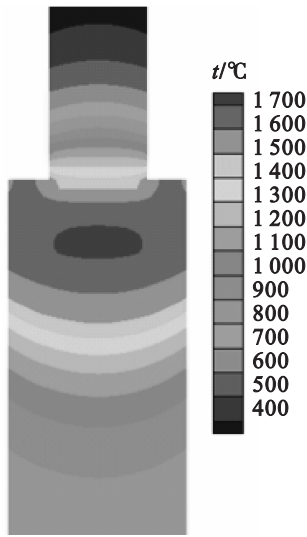


图 8 电渣重熔系统中心纵截面温度分布图
Fig. 8 Temperature field of the longitudinal section of ESR

图 9 为电流 8 kA, 频率 50 Hz 情况下, 电渣重熔系统中心轴线温度分布. 从图中可以看出随着距离渣金界面的增大, 电渣重熔系统中心轴线温度均呈减少趋势, 这是由于渣金界面以下金属熔池在结晶器冷却水的冷却作用下, 热量逐渐被冷却水带走, 钢锭内部中心轴线距离渣金界面增大,

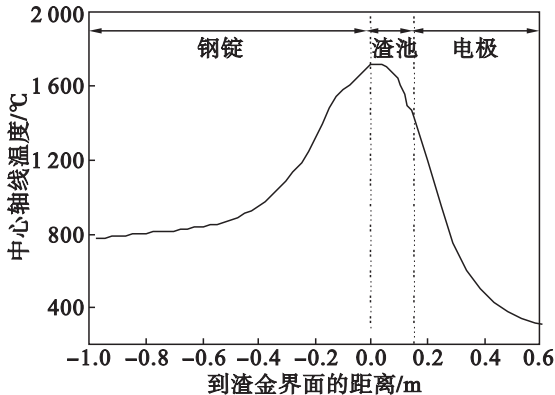


图 9 电渣重熔系统中心轴线温度分布
Fig. 9 Temperature along the axis of ESR

温度降低; 由于电极熔化和熔滴下落过程吸收渣池内部热量, 温度随渣池内部中心轴线距离渣金界面增大而降低; 由于电极的辐射传热和对流传热, 温度随电极内部中心轴线距离渣金界面增大而降低.

图 10 为相同电流强度 8 kA 情况下, 不同频率对电渣重熔系统中心轴线温度分布的影响. 从图中可以看出不同频率对电渣重熔系统中心轴线温度基本没有任何影响, 这是由于频率改变时并没有引起电渣重熔系统内焦耳热变化, 所以在电渣重熔其他工艺条件不变情况下, 中心轴线温度分布不变.

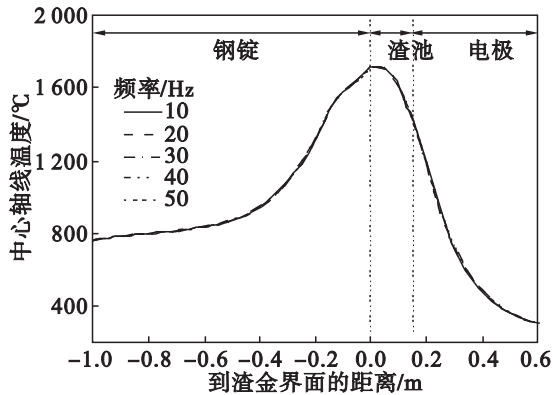


图 10 频率对电渣重熔系统中心轴线温度分布
Fig. 10 Effect of frequency on the temperature along the axis of ESR

图 11 为电流 8 kA, 频率 50 Hz 情况下, 不同渣池厚度对电渣重熔系统中心轴线温度分布的影响. 从图中可以看出随着渣池厚度的增加, 渣池内部温度明显降低. 当渣池厚度从 0.15 m 增加到 0.21 m, 渣金界面处中心温度从 1 819 °C 降低到 1 718 °C; 渣池中心线上最高温度从 1 826 °C 降低到 1 721 °C.

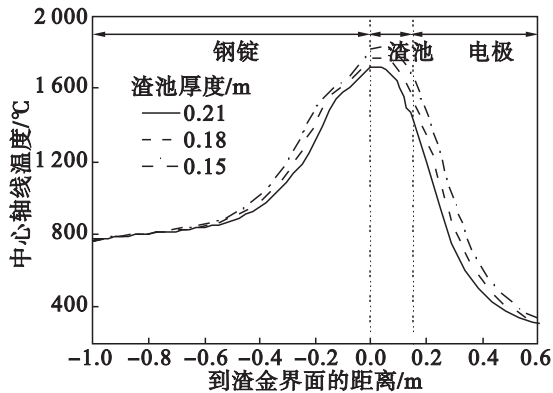


图 11 渣池厚度对电渣重熔系统中心轴线温度分布
Fig. 11 Effect of slag cap thickness on the temperature along the axis of ESR

图 12 为电流 8 kA, 频率 50 Hz 情况下, 不同

渣池厚度对电渣重熔系统金属熔池深度的影响. 从图中可以看出随着渣池厚度的增加, 电渣重熔系统金属熔池深度呈直线减小趋势. 当渣池厚度从 0.15 m 增加到 0.21 m, 金属熔池深度从 0.22 m 降低到 0.16 m.

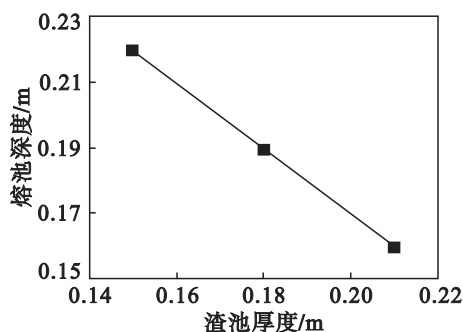


图 12 渣池厚度对电渣重熔系统金属熔池深度的影响
Fig. 12 Effect of slag cap thickness on liquid pool depth of ESR

4 结 论

1) 当交变电流通过电渣重熔系统时, 电极和钢锭表面产生明显的集肤效应. 当电流频率从 10 Hz 增加到 50 Hz 时, 渣池内部电流分布基本不变, 电极表面处最大电流密度从 256 kA/m^2 增加到 265 kA/m^2 , 钢锭表面处最大电流密度从 80 kA/m^2 增加到 102 kA/m^2 .

2) 电渣重熔系统内电磁力在电极和钢锭内部沿径向分布, 在电极与渣池接触处存在径向和轴向分布; 焦耳热主要位于渣池, 且最大焦耳热位于平底电极与渣池接触角部, 从而使得电极角部最先熔化.

3) 电渣重熔系统内高温区位于渣池内部电极下方靠近渣金界面处, 且随渣池厚度的增加, 渣池内最高温度降低. 当渣池厚度从 0.15 m 增加到 0.21 m, 渣池中心线上最高温度从 1826°C 降低到

1721°C .

4) 电渣重熔系统内金属熔池深度随渣池厚度的增加而线性减小. 当渣池厚度从 0.15 m 增加到 0.21 m, 金属熔池深度从 0.22 m 降低到 0.16 m.

参考文献:

- [1] Weber V, Jardy A, Dussoubs B, et al. A comprehensive model of the electroslag remelting process: description and validation [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2009, 40B (3): 271–280.
- [2] Hernandez-Morales B, Mitchell A. Review of mathematical models of fluid flow, heat transfer, and mass transfer in electroslag remelting process [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1999, 26(6): 423–438.
- [3] Dong Y W, Jiang Z H, Liu H, et al. Simulation of multi-electrode ESR process for manufacturing large ingot [J]. *ISIJ International*, 2012, 52(12): 2226–2234.
- [4] Choudhary M, Szekely J. The modeling of pool profiles, temperature profiles and velocity fields in ESR systems [J]. *Metallurgical Transaction B*, 1980, 11B(3): 439–452.
- [5] Li B K, Wang F, Tsukihashi F. Current, magnetic field and joule heating in electroslag remelting processes [J]. *ISIJ International*, 2012, 52(7): 1289–1295.
- [6] Dong Y W, Jiang Z H, Li Z B. Mathematical model for electroslag remelting process [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2007, 14(5): 7–12.
- [7] 耿茂鹏, 孙大昕. 电渣熔铸过程控制与模拟仿真 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 47–58.
(Geng Mao-peng, Sun Da-xin. Process control and simulation in electroslag casting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 47–58.)
- [8] Mitchell A. Solidification in remelting process [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 413/414: 10–18.
- [9] 王晓花, 厉英. 钢锭凝固过程温度场数值模拟 [J]. 铸造, 2013, 62(5): 410–419.
(Wang Xiao-hua, Li Ying. Numerical simulation of temperature field of ingot during the solidification process [J]. *Foundry*, 2013, 62(5): 410–419.)