

电渣重熔 1Mn18Cr18N 护环钢补缩过程的 温度变化规律

朱红春, 姜周华, 李花兵, 李可斌
(东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以电渣重熔准稳态过程的温度场为初始条件, 采用 ANSYS 与 CFX 商业软件相结合的方法, 研究分析了电渣重熔补缩过程中的温度分布, 考察了无补缩操作、直线降流方式和阶梯降流方式三种条件下电渣锭热节的最终位置。结果表明: 在无补缩操作条件下, 电渣锭热节附近糊状区离渣-金界面的最远距离为 162 mm, 直线降流方式距离为 130 mm, 大阶梯降流方式距离为 70 mm, 而小阶梯降流方式的热节位置几乎保持不变。因此, 阶梯降流方式更有利于 1Mn18Cr18N 护环钢电渣重熔补缩工艺的顺利进行。

关 键 词: 电渣重熔; 1Mn18Cr18N 护环钢; 补缩; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TF 142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)11-1586-05

Temperature Revolution During Feeding Process in ESR of 1Mn18Cr18N

ZHU Hong-chun, JIANG Zhou-hua, LI Hua-bing, LI Ke-bin

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: JIANG Zhou-hua, professor, professor, E-mail: jiangzh@smm.neu.edu.cn)

Abstract: The temperature field at quasi steady state of electro slag remelting (ESR) was taken as initial condition in the simulation of temperature distribution during ESR in virtue of ANSYS and CFX. Terminal positions of hot spots in the ingot under three feeding conditions (i. e. no feeding, linear current-drop and stair-step current-drop during feeding) were investigated. The results showed that the largest distance of mushy zone around the hot spot were 162 mm, 130 mm and 70 mm away from slag-metal interface, when no feeding, linear current-drop and rapid stair-step current-drop were carried out during ESR feeding process, respectively. The hot spot remained changeless under slow stair-step current-drop. Thus, stair-step current-drop is beneficial for feeding process during ESR of 1Mn18Cr18N.

Key words: ESR (electro slag remelting); 1Mn18Cr18N retaining ring steel; feeding; temperature field; numerical simulation

随着我国汽轮发电机行业的快速发展, 对具备优异力学和抗应力腐蚀等性能的汽轮发电机组用钢的需求量也逐年攀升^[1]。20 世纪 80 年代初, 德国 VSG 公司、Krupp 钢厂和美国 GM 公司先后开发出了 1Mn18Cr18N 护环钢, 并逐步取代传统的护环钢材料 50Mn18Cr4N 和 50Mn18Cr4WN, 成为新型护环用材料^[2-3]; 而国内从 80 年代中后期才逐渐引进 1Mn18Cr18N 护环钢, 研究起步晚, 且相对滞后^[4]。

作为高级别护环钢的支撑技术^[5], 电渣重熔技术在 1Mn18Cr18N 护环钢制备过程中发挥着独特的优势^[6-8]; 然而, 1Mn18Cr18N 护环钢特殊的成分特点和苛刻的性能要求也对电渣重熔冶炼过程控制提出了更高的要求^[9]。与国外相比, 我国在运用电渣重熔技术制备 1Mn18Cr18N 护环钢方面, 还存在渣系选择、补缩工艺制定等问题^[10-11], 严重影响了产品的质量控制和生产效率, 并制约着我国高品质护环钢的发展。

收稿日期: 2014-10-13

基金项目: 国家高技术研究重点发展计划项目(2012AA03A502); 国家自然科学基金资助项目(51304041)。

作者简介: 朱红春(1989-), 男, 重庆开县人, 东北大学博士研究生; 姜周华(1963-), 男, 浙江萧山人, 东北大学教授, 博士生导师。

本文针对国内电渣重熔 1Mn18Cr18N 护环钢过程中补缩工艺制定问题, 结合 ANSYS 与 CFX 软件进行数值模拟, 分析补缩过程中电渣锭温度场的变化规律, 并考察直线降流方式和阶梯降流方式对补缩效果的影响, 为制定符合 1Mn18Cr18N 护环用钢合理的电渣补缩工艺新制度提供理论参考。

1 模型的建立及计算

1.1 控制方程

模型的建立和计算过程中进行如下主要假设: ①钢液为不可压缩牛顿流体; ②渣-金界面为水平面; ③采用内热源的方式处理熔滴带入的显热和铸锭的凝固潜热; ④钢和渣的热物性参数仅与温度相关; ⑤金属熔池和渣池的对流作用以有效导热系数来表征^[11], 即 $k_{\text{eff}} = \kappa(1 + \Lambda)$, 其中 Λ 取 2 ~ 5。

电渣重熔准稳态过程和补缩过程的温度模拟包含了电磁场方程、流场方程和热量方程。

电磁场方程:

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= J, \\ \nabla \cdot B &= 0, \\ \nabla \cdot J &= 0, \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t}.\end{aligned}$$

其中: H 为磁场强度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$; B 为磁感应强度, T ; J 为电流密度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$; E 为电场强度, $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$; t 为时间, s 。

流场方程:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{v} &= 0, \\ \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} &= -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{v}) + F, \\ F &= J \times B + \rho[1 - \beta(T - T_0)]g.\end{aligned}$$

其中: \mathbf{v} 为速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为熔体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; p 为压力, Pa ; μ_{eff} 为熔体的有效黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; F 为体积力 (包括电磁力和浮力), N ; β 为体积膨胀系数, K^{-1} ; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; T 为熔体中某点的温度, K ; T_0 为参考点温度, K 。

传热方程:

$$\rho_n C_{p,n} (V_n \cdot \nabla T) = \nabla \cdot k_{\text{eff},n} \nabla T + q_{T,n}.$$

其中: $n = \text{e}$ (电极)、 l (金属熔池)、 m (两相区)、 s (铸锭); V_n 为铸锭的生长速度; $q_{T,n}$ 为内热源, $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.2 边界条件和计算过程

电渣重熔准稳态温度场的计算过程中, 采用的边界条件有

1) 流场计算中, 固/液界面为无滑移边界条件, 渣自由面采用自由滑移边界条件;

2) 电磁场计算中, 采用磁通量平行边界条件, 电极上部耦合电压自由度并加载电流;

3) 温度场计算中, 电极/熔渣界面为金属液相线温度, 轴线位置采用 Neumann 边界条件, 其他位置采用 Robin 边界条件。

选用 ANSYS 有限元分析软件中的 Solid69 热单元, 与 CFX 有限元分析软件中标准 $\kappa - \varepsilon$ 模块相耦合计算出准稳态电渣重熔过程的温度场, 并在此基础上运用 ANSYS 软件中生死单元模拟电渣补缩的瞬态过程, 具体计算流程如图 1 所示。

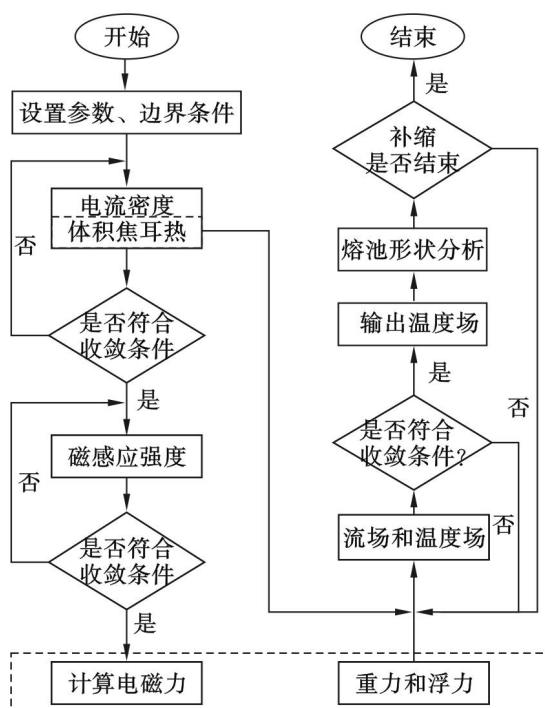


图 1 数值模拟流程图

Fig. 1 Flow diagram of numerical simulation

在实际电渣重熔生产中, 主要通过提升电极的方式减小电极的埋入深度, 降低电流来控制电极的熔化速率, 以达到补缩的目的^[12]; 在补缩模拟过程中采用直线降流和阶梯降流 (小阶梯降流和大阶梯降流) 两种电流下降方式, 如图 2 所示, 渣与电极的接触面采用 Robin 边界条件; 模拟过程中采用的主要物性参数和工艺参数 (含几何尺寸) 如表 1 ~ 表 3 所示; 计算电渣重熔的有限元模型如图 3 所示。

2 结果讨论

2.1 准稳态温度场

图 4 和图 5 分别为准稳态下整个铸锭的温度

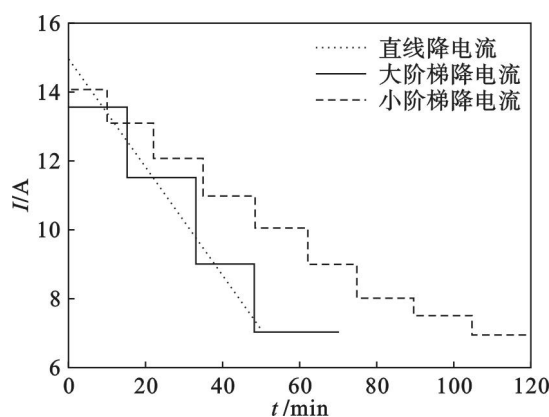


图2 补缩阶段降电流方式的示意图
Fig. 2 Schematic diagram of current dropping methods during feeding process

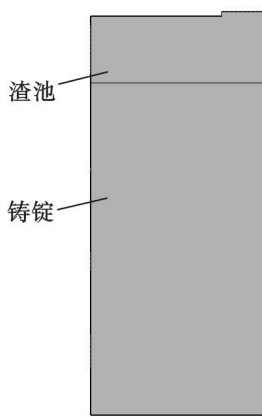


图3 有限元模型示意图
Fig. 3 Schematic sketch of finite element model

表 1 渣系的物性参数 Table 1 Physical properties of slag	
物性参数	数值
密度(1 773K)/(kg·m ⁻³)	2737
热容/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1.3
液相线温度/K	1 533
黏度/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.03
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	10.45
膨胀率/K ⁻¹	1×10 ⁻⁴
磁导率/(H·m ⁻¹)	1.26×10 ⁻⁶
电导率/(Ω ⁻¹ ·m ⁻¹)	220

表 2 电渣重熔的工艺参数 Table 2 Technical parameters of ESR process	
工艺参数	数值
渣池深度/mm	150
电极插入深度/mm	10
铸锭高度/mm	800
电极半径/mm	250
铸锭半径/mm	330
电压/kV	33
电流/kA	15

表 3 1Mn18Cr18N 钢种的物性参数 Table 3 Physical properties of 1Mn18Cr18N steel	
物性参数	数值
导热系数	473K 873K 1273K 1673K 2073K
W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	42.6 40.5 33.3 36.9 28
密度(固/液)/(kg·m ⁻³)	7800/7200
热容/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.795
固/液相线温度/K	1580/1650
凝固潜热/(kJ·kg ⁻¹)	267.1
电导率/(Ω ⁻¹ ·m ⁻¹)	7.14×10 ⁵
磁导率/(H·m ⁻¹)	1.26×10 ⁻⁶

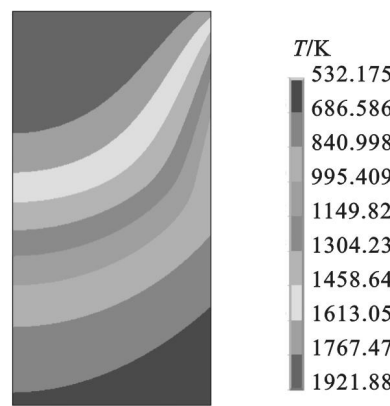


图4 准稳态条件下铸锭温度场分布
Fig. 4 The temperature distribution of steel on quasi-steady state

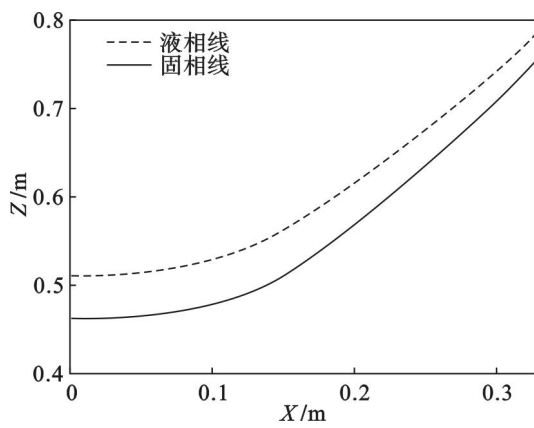


图5 铸锭中两相区大小分布
Fig. 5 Distribution of mushy zone in the ingot

分布云图和铸锭顶部的温度径向分布曲线,铸锭顶部中心温度为1 922 K,边缘温度为1 800 K;整个铸锭的温度介于505~1 922 K之间,最大过热度为272 K,与文献[13-14]报道基本一致;在水冷结晶器和底水箱的冷却作用下,熔池呈现出中心深、边缘浅的抛物面特点,中心和边缘的深度分别为291 mm和12 mm;两相区呈现出中心宽、边缘窄的特征,且最大宽度为52 mm。

2.2 补缩工艺研究

1) 无补缩工艺研究. 当加热电渣重熔 1Mn18Cr18N 护环钢铸锭至所需温度时, 立即断电冷却, 以此时的准稳态温度场为初始条件, 对熔池温度场进行模拟计算. 由于在无补缩工艺条件下, 渣池失去发热体的作用, 渣 - 金界面散热加快; 随着时间的延长, 热节沿中心轴向下移动, 逐步远离渣 - 金界面, 渣 - 金界面附近完全凝固后, 铸锭内部仍残留部分液相, 即为缩孔或者疏松形成位置, 如图 6 所示, 其中浅色区域为糊状区; 从图 7 可以看出, 在无补缩工艺条件下, 在 1Mn18Cr18N 护环钢铸锭内, 距离渣 - 金界面 162 mm 的位置会形成缩孔或者疏松, 这极大地降低了铸锭的成材率.

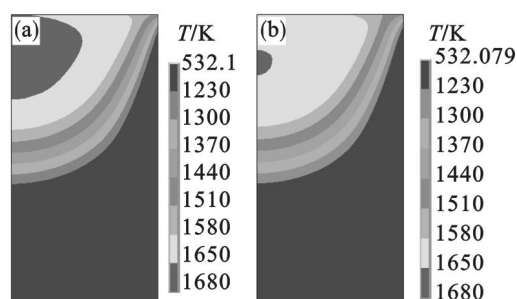


图 6 无补缩工艺时温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution without feeding

(a)—10 min; (b)—15 min.

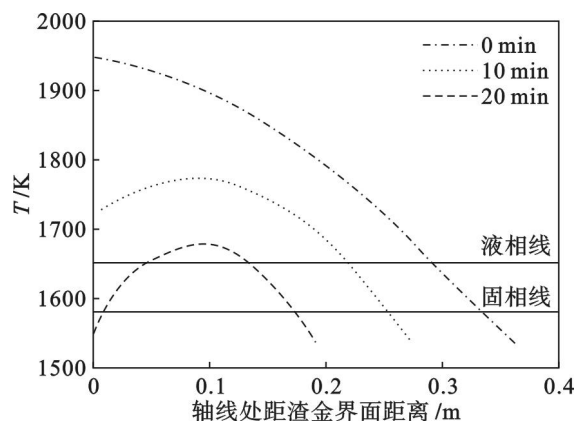


图 7 无补缩操作时熔池轴线位置温度场的变化曲线

Fig. 7 Changing curves of temperature at the axis of the pool without feeding

2) 补缩方式对缩孔形成的影响. 电渣补缩过程主要分为平台形成、凸台形成以及保温 3 个阶段; 本文主要针对平台形成阶段中直线降流和阶梯降流(小阶梯、大阶梯)两种补缩方式进行模拟计算(如图 2 所示), 得出铸锭中心轴线上温度分布曲线.

采用直线降流方式补缩时, 电流连续变化较快, 无保温过程, 电极的熔化速率始终小于凝固速

率. 如图 8a 所示, 随着补缩的进行, 渣 - 金界面区域温度梯度先变小后变大, 热节沿中心轴向下移动. 补缩 20 min 时, 渣 - 金界面附近完全凝固, 热节沿轴线下移, 糊状区离渣 - 金界面的最远距离 130 mm. 采用大阶梯降流补缩时, 电流突变, 有明显的保温过程, 电极熔化速率稍小于凝固速率, 热节移动趋势与直线降流补缩类似, 补缩 20 min 时, 渣 - 金界面附近部分凝固, 热节沿轴线下移, 糊状区离渣 - 金界面的最远距离 70 mm, 如图 8b 所示. 与直线降流相比, 位置升高了 60 mm, 补缩效果明显. 采用小阶梯降流时, 如图 8c 所示, 补缩时间较长, 随着补缩过程的进行, 电极融化速率与

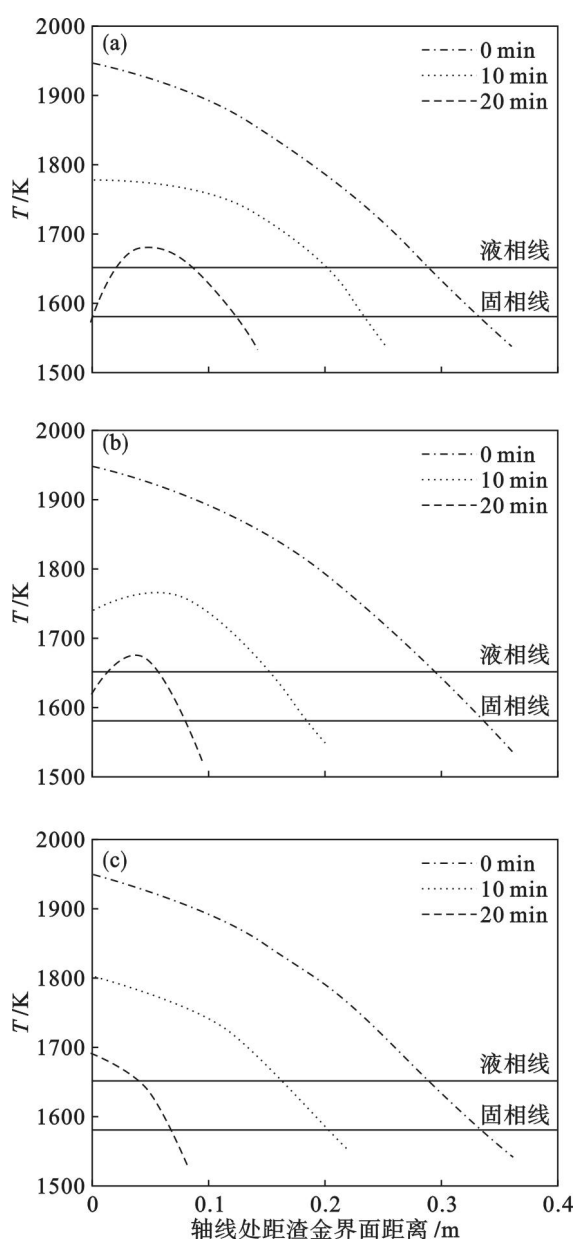


图 8 铸锭轴线上温度场变化曲线

Fig. 8 Changing curves of temperature at the axis of the pool feeding with linear current-drop

(a)—直线降流; (b)—大阶梯降流; (c)—小阶梯降流.

凝固速率趋于动态平衡,热节位置基本保持不变.实际生产过程中,采用阶梯降流补缩时,电流突变使得铸锭端头容易形成渣沟,影响表面质量,但具备易于控制和补缩效果较好等优点,使其具有广阔的应用前景.

3 结 论

1) 在电渣重熔 1Mn18Cr18N 护环钢的准稳态模拟过程中,金属熔池呈现出中间深、两边浅的抛物面特点,两相区呈现出中心宽、边缘窄的特点,电渣锭两相区最大宽度为 52 mm,铸锭的温度介于 505 ~ 1 922 K 之间,最大过热度为 272 K.

2) 在无补缩的情况下,热节沿轴线向下移动,糊状区离渣 - 金界面的最远距离为 162 mm 的位置会形成缩孔或者疏松,极大程度地降低了铸锭的成材率.

3) 直线降流补缩条件下,热节附近糊状区离渣 - 金界面的最远距离为 130 mm;大阶梯降流补缩条件下为 70 mm,小阶梯降流条件下的热节位置几乎保持不变;相比之下,阶梯降流(大阶梯、小阶梯)补缩效果较好,具有较好的应用前景.

参考文献:

- [1] Stein G, Wagner M, Hucklenbroich I. P2000—a new austenitic high nitrogen steel for power generating equipment [J]. *Materials Science Forum*, 1999, 318(2): 167–174.
- [2] Viswanathan R. Material of generator retaining ring [J]. *Transactions of the ASME*, 1981, 103(3): 191–199.
- [3] Base S. Test process for manufacturing a Cr-Mo-V rotor shaft [C]//Proceeding of Six International Conference on Special Melting. San Diego: American Vacuum Society, 1979: 773–779.
- [4] 向大林,王克武,朱孝渭. Cr18Mn18N 护环用钢电渣重熔技术的开发研究[J]. *上海金属*, 1996(4): 7–11.
(Xiang Da-lin, Wang Ke-wu, Zhu Xiao-wei. Development and application of ESR process for Cr18Mn18N steel used for retaining rings[J]. *Shanghai Metals*, 1996(4): 7–11.)
- [5] Balachandran G, Bhatia M L, Ballal N B, et al. Processing nickel free high nitrogen austenitic stainless steels through conventional electroslag remelting process [J]. *ISIJ International*, 2000, 40(5): 478–483.
- [6] Tsai W T, Reynnders B, Stratmann M, et al. The effect of applied potential on the stress corrosion cracking behavior of high nitrogen steels [J]. *Corrosion Science*, 1993, 34(10): 1647–1656.
- [7] Lach E, Anderson C, Schirm V, et al. Hypervelocity impact into a high strength and ductile steel alloy [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1625–1630.
- [8] Holzgruber W. New ESR-technology for new and improved products [C]//Proceeding of the 7th International Conference on Vacuum Metallurgy. Tokyo, 1982: 1452–1458.
- [9] Katada Y. Development of high nitrogen steel in HIMS [C]//Proceeding of Second International Conference on Advanced Structural Steels. Shanghai, 2004: 768–771.
- [10] 姜周华,李花兵,董艳伍,等. 电渣重熔高氮钢技术的进展[J]. *钢铁研究学报*, 2006, 18(10): 1–6.
(Jiang Zhou-hua, Li Hua-bing, Dong Yan-wu, et al. Developments of manufacturing high nitrogen steels by electroslag remelting process [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, 18(10): 1–6.)
- [11] 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[J]. *钢铁研究学报*, 2005, 17(6): 30–42.
(Chen Yuan-yuan, Liu Xi-hai, Li Bao-kuan. Mathematical simulation software for solidification of electroslag remelting ingot [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2005, 17(6): 30–42.)
- [12] 邵青立. 直径 300mm 电渣重熔钢锭的补缩工艺[J]. *特殊钢*, 1999, 20(2): 50–51.
(Shao Li-qing. Filling technology for preventing shrinking of 300 mm round electric slag remelting ingot [J]. *Special Steel*, 1999, 20(2): 50–51.)
- [13] Dilawari A H, Szekely J. Heat transfer and fluid flow phenomena in electroslag refining [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1978, 9(1): 77–87.
- [14] Dilawari A H, Szekely J. A mathematical model of slag and metal flow in the ESR process [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1977, 8(1): 227–236.