

电极插入深度对电渣重熔过程影响的数模研究

贺铸¹, 刘艳贺², 李宝宽¹, 王芳¹

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 以电渣重熔系统电极、渣池和钢锭为研究对象, 利用有限元分析软件求得稳定电渣重熔过程电磁场和焦耳热场分布, 并通过计算流体动力学软件模拟分析了耦合电磁场和焦耳热场的三维电渣重熔过程在不同电极插入深度下温度场、速度场和电磁场的变化. 结果表明: 当电极插入深度为 15 mm 时, 渣池两侧的逆时针方向旋转涡流之间出现一个顺时针方向旋转涡流, 其尺寸随着电极插入深度的增加而增加; 电极插入深度每增加 15 mm, 湍流动能的降幅约为 21%, 而最大温度值的降幅约为 1%.

关 键 词: 电渣重熔; 三维数值模拟; 电极插入深度; 金属熔池形状; 电磁流体

中图分类号: TF 142

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)02-0218-05

Numerical Simulation on Effects of Electrode Inserting Depth on Electroslag Remelting Processes

HE Zhu¹, LIU Yan-he², LI Bao-kuan¹, WANG Fang¹

(1. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430081, China. Corresponding author: HE Zhu, associate professor, E-mail: hezhu@wust.edu.cn)

Abstract: The distribution of magnetic field and joule heating in the electroslag remelting process, including electrode, slag and ingot, were obtained by finite element software. The changes in the temperature profiles, the velocity fields and the magnetic fields with different inserting depth of electrode were analyzed in the electroslag remelting process coupling the magnetic field and joule heating. The results show that when the inserting depth is 15 mm, an intermediate region appears between the anti-clockwise circulation eddies in the bulk of the slag which is controlled by a clockwise circulation eddy. Its size increases with the increase of electrode inserting depth. The turbulent kinetic energy drops by 21% and the maximum temperature decreases about 1% for each additional 15 mm of the inserting depth.

Key words: electroslag remelting; three dimensional numerical simulation; electrode inserting depth; shape of metal pool; electro-magnetic fluid

随着电渣重熔(ESR)技术的日渐成熟,电渣重熔工艺被广泛地应用于生产超级合金和特殊钢等,电渣重熔产品在军事、航天以及日用方面的作用越来越重要^[1]. 在实际电渣重熔生产中,电渣重熔过程基本控制参数对所生产铸锭的质量起着决定性的作用^[2],若能精确了解不同控制参数对电渣重熔过程的作用,就能增强对电渣重熔过程

的控制,极大提高电渣重熔工艺的稳定性 and 高效性. Brückmann 等^[3]首先利用实验方法研究了渣层在 ESR 过程的运动变化,结果表明,ESR 渣池表面的流动主要受电磁力和自然对流作用共同影响. 然而,由于对 ESR 过程的测量十分困难,近年来很多学者通过数值模拟的方法来分析 ESR 过程^[4-9]. 这些研究建立了求解 ESR 过程速度和温

收稿日期: 2014-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51210007); 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室开放基金资助项目(FMRU200907).

作者简介: 贺铸(1979-),男,湖南长沙人,武汉科技大学副教授,东北大学博士后研究人员; 李宝宽(1963-),男,辽宁辽阳人,东北大学教授,博士生导师.

度场信息的数学模型,并考虑了 ESR 过程的两相流动问题,但模型的建立都是基于二维轴对称假设,且电磁场中未能考虑集肤效应的影响.

本文利用有限元软件 ANSYS 建立了电渣重熔系统电磁场和焦耳热场的数学模型,将得到的电磁力和焦耳热结果以源项的形式加载到钢液、渣的流动和能量守恒方程中,在计算流体动力学软件 FLUENT 中进行电磁场、流场和温度场的耦合模拟. 整个模拟过程中均采用三维建模,利用 ANSYS 软件求解电磁场时以三维谐波的电场理论为基础^[10],考虑了集肤效应对电渣重熔体系的影响. 通过该模型,本文研究了电极插入深度对电渣重熔过程电磁场、温度场和速度场的影响.

1 几何模型及物性参数

本文以电渣重熔体系电极、渣池和钢锭为研究对象,电渣重熔体系的有限元网格划分如图 1 所示,表 1 为涉及到的操作参数和物理性质.

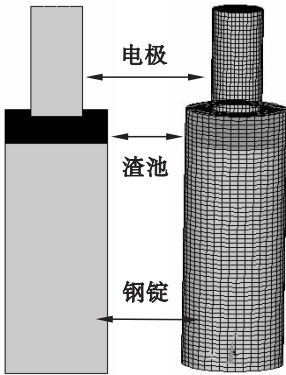


图 1 电渣重熔体系有限元网格划分
Fig. 1 Schematic of meshing of finite element in the ESR system

2 数学模型

描述 ESR 过程数值模拟的基本控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程以及 Maxwell 方程组. 自耗电极受热熔化,以熔滴

表 1 电极、渣池和钢锭的物性及几何参数
Table 1 Physical properties, geometrical and operating conditions of electrode, slag and ingot

参数	值	参数	值
渣的熔化潜热/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	590	渣的黏度/($\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$)	0. 01
渣 - 空气界面外部发射率	0. 6	液态金属的黏度/($\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$)	0. 006
液态渣和液态金属间的表面张力/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	0. 9	电极半径/m	0. 067 5, 0. 112 5, 0. 157 5
渣的密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 800	结晶器内壁直径/m	0. 225
液态金属、熔融区和钢锭密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 500	渣池高度/m	0. 15
渣的比热容/($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	1 255	钢锭区高度/m	1
液态金属、熔融区和钢锭比热容/($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	720	电极浸入渣池深度/m	0, 0. 015, 0. 03
金属固相线温度/K	1 473	电极高度/m	0. 45
金属液相线温度/K	1 623	渣的磁导率/($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)	$1. 26\times 10^{-6}$
渣液相线温度/K	1 693	交流电频率/Hz	35, 45, 50
金属的熔化潜热/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	210	交流电电流/kA	10
电极和金属的电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	$7. 14\times 10^5$	电极熔化速率/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	0. 1
渣的电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	250		

的形式穿过金属熔池,是一个典型的湍流现象,湍流模型选用标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型,钢液、电渣的两相流动行为采用多相流动体积法 (VOF) 进行求解,数学模型的详细描述参见文献[11].

3 结果与分析

图 2 为计算得到的距轴心 $r=2. 5\text{ cm}$ 处径向温度分布与文献[12]中实验值的对比,模拟值与

实验值总体吻合良好,最大误差不超过 10%. 在渣 - 金界面以上实验值稍高于模拟值,这主要是由于:实验值测量得到的是瞬时值,受熔滴滴落的影响较大,而本文得到的温度为平均值;此外,壁面冷却系数对轴向温度梯度的影响很大,但模型所需要的冷却系数值很难精确确定.

图 3 为电极插入深度为 0, 15 和 30 mm 时电渣重熔体系金属相体积分数及速度场分布. 由图可知,熔化的金属以熔滴的形式不连续地穿过渣

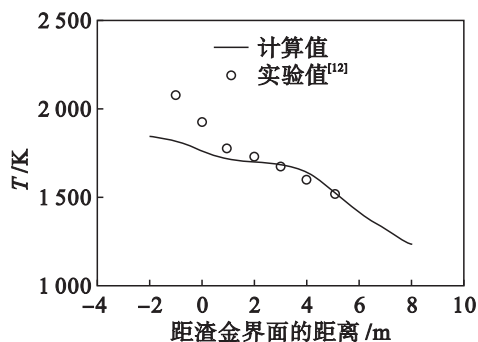


图 2 距轴心 $r=2.5\text{ cm}$ 处轴向温度分布
Fig. 2 Axial temperature profiles for ingot at $r=2.5\text{ cm}$

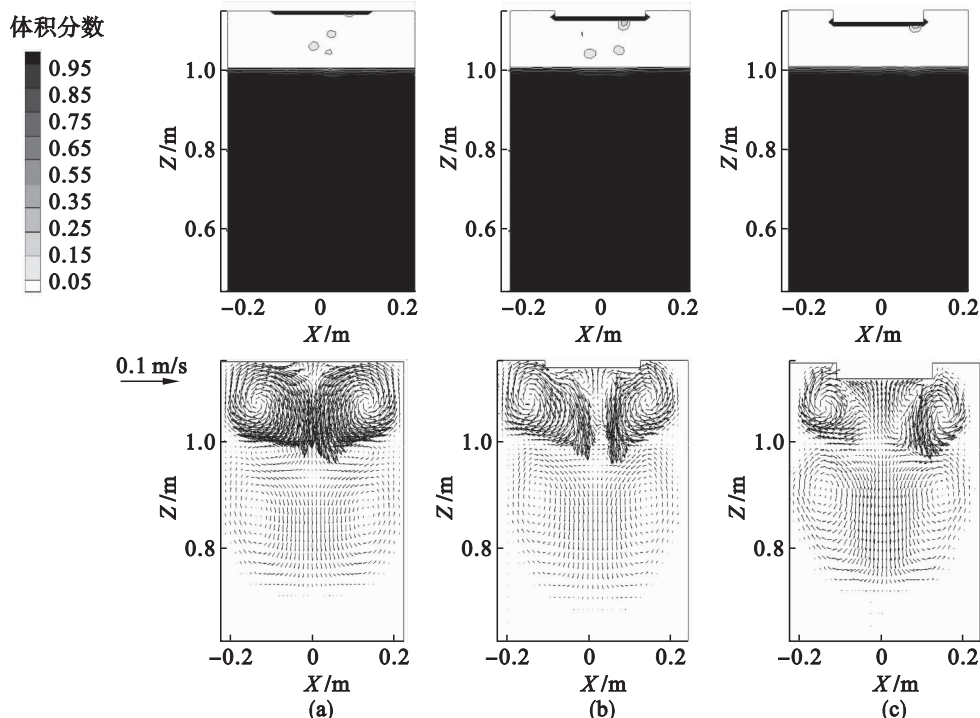


图 3 不同插入深度下电渣重熔体系金属相体积分数分布及速度场分布
Fig. 3 Distributions of the metal volume fraction and velocity vectors with different inserting depths of electrode
(a)—插入深度为 0 mm; (b)—插入深度为 15 mm; (c)—插入深度为 30 mm.

域,中间区域速度场的旋转方向为顺时针. 随着电极插入深度的增加,两个涡团间的距离逐渐增加.

图 4 给出了不同电极插入深度下截面焦耳热和电磁力的分布. 由图 4 可知,三种情况下电磁力分布趋势基本一致,电磁力最大值位于电极端部外围附近;当电流由电极流向渣池时,在电极与渣池的交界面电流会重新分布,继而导致洛伦兹力出现轴向和径向分量;随着电极插入深度的增加,逆时针方向旋转涡流对渣池的影响区域将向结晶器边界移动. 同时在轴心附近,靠近电极端部的区域存在径向温度差,在二者的影响下渣池两侧的逆时针方向旋转涡流之间会出现一个中间区域;电渣重熔过程产生的焦耳热功率由电流密度的分布和材料的电阻率共同决定,在电极和钢锭区域

池,这样可以保证熔滴与渣充分反应. 由速度场分布可知,电渣重熔体系渣池内速度场主要由电磁力引起的逆时针方向旋转涡流^[11]控制,金属熔池和熔融区的速度场则分别为位于上部区域的顺时针方向旋转涡流及下部逆时针方向旋转涡流. 随着电极插入深度的增加,电渣重熔体系速度场整体值在降低. 当电极插入深度为 0 mm 时,速度场最大值位于轴心位置,此时渣池左右两侧的涡流相接. 当电极插入深度为 15 mm 时,渣池两侧的逆时针方向旋转涡流之间出现了一个中间区

内,焦耳热功率的数值较小;在渣池区域内,焦耳热的分布与电渣重熔过程中电流密度的分布一致,电极端部外围处焦耳热功率要高于其他区域. 图 5a,5b 和 5c 分别为电极插入深度为 0,15 mm 和 30 mm 时的渣池和金属熔池的温度场分布,电渣重熔体系温度场分布受速度场和焦耳热功率分布影响;三种情况下温度场高温区均分布在渣池中间部位,靠近电极端部附近,而不是在电极的正下方中心区域;温度场最大值对应速度场涡流中心,这是由于涡流中心的渣基本不向外扩散,这样就不会通过结晶器冷却而损失热量. 从图 6 中的金属熔池轮廓发现,随着电极插入深度的增加,金属熔池顶端更加突出,而金属熔池的深度却逐渐减小.

图 7 为不同电极插入深度下渣池截面平均端

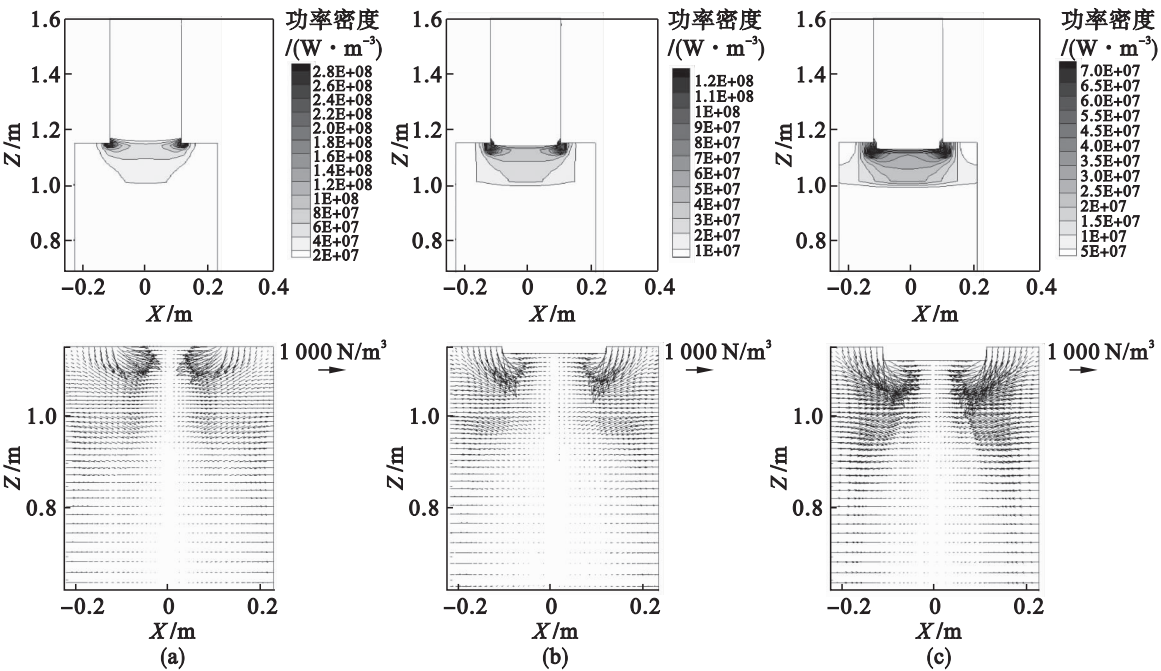


图 4 不同电极插入深度下载面焦耳热和电磁力分布
Fig. 4 Distribution of the joule heat and electromagnetic forces with different inserting depths of electrode
(a) —插入深度为 0 mm；(b) —插入深度为 15 mm；(c) —插入深度为 30 mm.

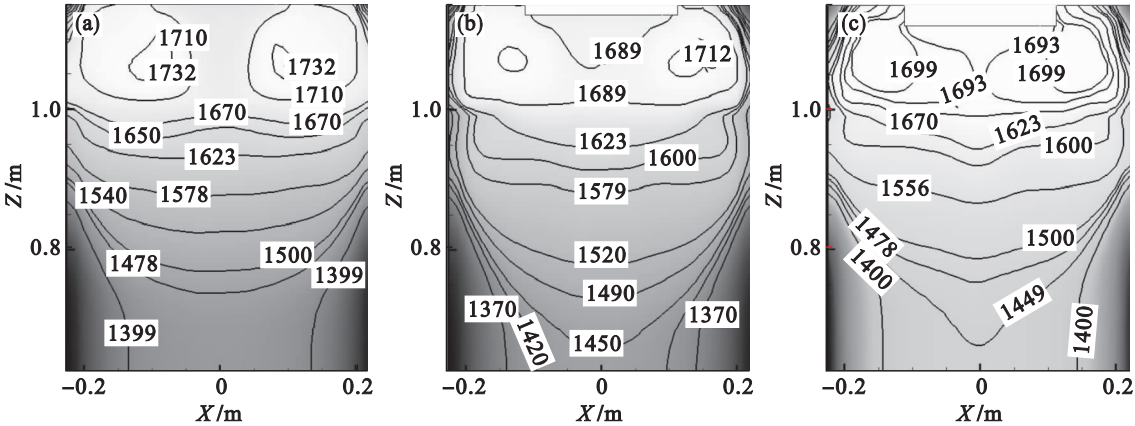


图 5 不同电极插入深度下渣池和金属熔池温度场分布
Fig. 5 Temperature distribution of slag and metal pool with different inserting depths of electrode
(a) —插入深度为 0 mm；(b) —插入深度为 15 mm；(c) —插入深度为 30 mm.

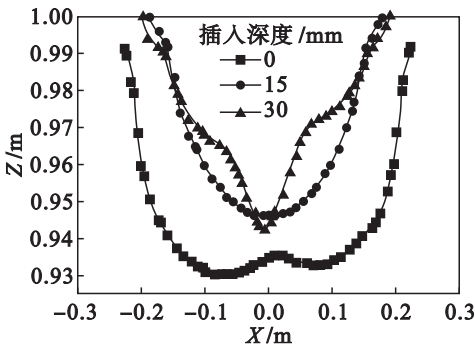


图 6 不同电极插入深度下金属熔池轮廓图
Fig. 6 Metal pool profile with different inserting depths of electrode

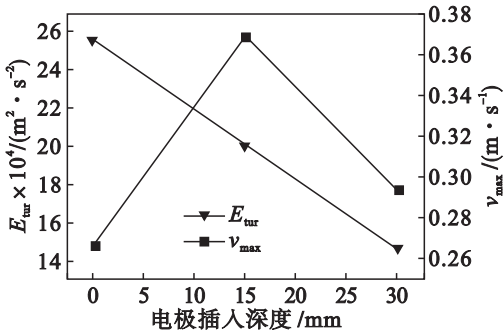


图 7 不同电极插入深度下渣池截面平均湍动能 E_{tur} 、速度场最大值 v_{max} 对比图
Fig. 7 Comparison of turbulent kinetic energy of slag and maximum velocity with different inserting depths of electrode

流动能、速度场最大值的分布图。由图可知,三种电极插入深度下速度场最大值分别为 0.266, 0.368 和 0.294 m/s,可见速度场最大值变化并不是单调的,电极插入深度每增加 15 mm,速度场最大值变化约 0.1 m/s。渣池截面平均湍流动能分别为 25.6×10^{-4} , 20.1×10^{-4} 和 $14.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$,电极插入深度每增加 15 mm,湍流动能下降约为最大湍流动能的 21%。从图 3 和图 5 可知,速度场及温度场最大值均位于渣池范围内。渣池截面平均湍流动能和速度场最大值变化趋势并不是一致的,随着电极插入深度的增加,渣池整体湍流动能在下降,而渣池局部速度场却并不是单调变化的。由图 8 可知,温度场最大值分别为 1 732, 1 712 和 1 699 K,随着电极插入深度的增加,温度场最大值是单调下降的,降幅约为 1%。

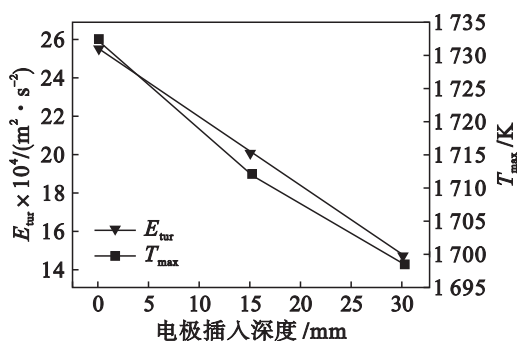


图 8 不同电极插入深度下渣池截面平均湍流动能 E_{tur} 、温度场最大值 T_{max} 对比图

Fig. 8 Comparison of turbulent kinetic energy of slag and maximum temperature with different inserting depths of electrode

4 结 论

1) 当电极插入深度为 15 mm 时,渣池两侧的逆时针方向旋转涡流之间出现了一个中间区域,中间区域表现为顺时针方向旋转涡流,随着电极插入深度的增加,两个涡团间的距离逐渐增加。

2) 在本文所研究的范围内,电极插入深度每增加 15 mm,速度最大值变化约 0.1 m/s,但速度最大值的变化不是单调的;电极插入深度每增加 15 mm,渣池截面平均湍流动能的降幅约为 21%。

3) 电极插入深度 0, 15 和 30 mm 对应的温度最大值分别为 1 732, 1 712 和 1 699 K,可见随着电极插入深度的增加,温度最大值是单调下降的,降幅约为 1%。

参考文献:

- [1] 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): 423–428.
- [2] Murgas M, Chaus A S. The electroslag remelting of high speed steel using a magnetic field [J]. *ISIJ International*, 2000, 40(10): 980–986.
- [3] Brückmann G, Sick G, Schwerdtfeger K. Slag movement in ESR of steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions: B*, 1983, 14(4): 761–764.
- [4] Choudhary M, Szekely J. The effect of temperature dependent electrical conductivity on flow and temperature fields in slags in ESR systems [J]. *Metallurgical and Materials Transactions: B*, 1981, 12(2): 418–420.
- [5] Jardy A, Ablitzer D, Wadier J F. Magneto-hydrodynamic and thermal behavior of electroslag remelting slags [J]. *Metallurgical and Materials Transactions: B*, 1991, 22(1): 111–120.
- [6] Choudhary M, Szekely J, Medovar B I, et al. The velocity field in the molten slag region of ESR systems; a comparison of measurements in a model system with theoretical predictions [J]. *Metallurgical and Materials Transactions: B*, 1982, 13(1): 35–43.
- [7] Patel A D, Kelkar K M. New insights into the electro-slag remelting process using mathematical modeling [C]// *Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes*. [S. l.]: The Minerals, Metals & Materials Society, 2009: 69–76.
- [8] 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, 40(3): 271–280.
- [9] Rückert A, Pfeifer H. Mathematical modelling of the flow field, temperature distribution, melting and solidification in the electroslag remelting process [J]. *Magneto-hydro-dynamics*, 2009, 45(4): 527–533.
- [10] 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.
- [11] 刘艳贺, 贺铸, 刘双, 等. 电渣重熔过程电磁、流动和温度场的数值模拟 [J]. *过程工程学报*, 2014, 14(1): 16–22. (Liu Yan-he, He Zhu, Liu Shuang, et al. Numerical simulation of electromagnetic, flow and temperature fields in electroslag remelting process [J]. *The Chinese Journal of Processing Engineering*, 2014, 14(1): 16–22.)
- [12] Mellberg P O. Temperature distribution in slag and metal during electroslag remelting of ball-bearing steel [C]// *Proceedings of the Fourth International Symposium on Electroslag Remelting Processes*. Tokyo, 1973: 13–25.