

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.11.012

自然循环汽化冷却系统水-水引射的行为

冯明杰, 王恩刚, 冯慧聪  
(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 以 Fluent 6.3 为计算平台,采用数值模拟的方法对一种加热炉自然循环汽化冷却启动引射新技术——水-水引射的引射行为进行了系统研究,探讨了引射管管径、出入口直径比和喷射流量等参数对冷却回路循环流速和引射管附近冷却回路局部阻损系数的影响. 研究表明,管内流场符合受限等温直流引射射流的一般规律. 当引射管管径不变时,冷却回路中的循环流速随引射流量的增加而增大,随引射管出入口直径比的增大而减小;当引射流量及引射管出入口直径比不变时,冷却回路中的循环流速随着引射管管径的增大而减小. 从引射效果和减小回路阻损的角度来看,缩口型引射管优于扩口型引射管.

**关 键 词:** 汽化冷却; 自然循环; 水-水引射; 循环流速; 阻力损失系数

**中图分类号:** TP 6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2016)11-1573-05

Water-Water Ejecting Behavior in a Natural Circulation Evaporation Cooling System

FENG Ming-jie, WANG En-gang, FENG Hui-cong  
(Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: FENG Ming-jie, E-mail: fengmj@epm.neu.edu.cn)

**Abstract:** The ejecting behavior of a new ejecting technique, named water-water ejecting technique, which is used to start up the natural circulation evaporation cooling system for a reheating furnace is numerically simulated with Fluent 6.3 software. The influences of ejecting tube diameter, diameter ratio of outlet to inlet and ejecting flowrate on circulating velocity and local resistance loss coefficient of the evaporation cooling circuit nearby ejecting tube are studied. The results indicated that the flow characteristics of water in the cooling circuit follows the general law of confined isothermal jet ejecting. The circulating velocity increases with the increasing of ejecting flowrate, but it decreases with the increasing of diameter ratio of outlet to inlet when the ejecting tube diameter is constant. At the same time, the circulating velocity decreases with the increasing of ejecting tube diameter when the ejecting flowrate and diameter ratio of outlet to inlet are both constant. The performance of necking-type ejecting tube is better than that of flared-type considering the ejecting performance and resistance loss.

**Key words:** evaporated cooling; natural circulation; water-water-ejecting; circulating velocity; resistance loss coefficient

汽化冷却具有节水、避免管内结垢、延长炉体寿命、提高钢坯加热质量等优点,因而在轧钢加热炉中得到广泛应用,并以自然循环居多<sup>[1-2]</sup>. 由于轧钢加热炉炉底管的倾斜角度不满足汽化冷却自启动的要求,因此需要采用辅助方式来强制启动. 传统的强制启动方式一般是采用蒸汽引射<sup>[3-5]</sup>. 但在实际应用中,这种启动方式存在很多弊端:需要较高压力和较大流量的备用蒸汽源;易发生“水锤”现象和噪音污染;在整个启动过程中需同时开启放散和连排,热损失严重. 近几年来,一种新的启动技术——水-水引射技术开始崭露头角<sup>[6]</sup>. 在这种技术中,引射介质不采用蒸汽而采

用汽包中的循环水,通过水泵将其升压后引入上升管内的引射管,依靠从喷口喷出的较高压力的水来推动循环冷却回路中的水定向流动,从而达到强制启动的目的. 该项技术的应用不仅可以避免蒸汽引射所带来的弊端,无需备汽,而且在加热炉待机低负荷运行时,还可以对个别循环不好的回路进行辅助循环,因此逐渐被广大科技工作者和用户所认可. 但目前有关该技术基础设计和运行参数的研究还未见公开报道,因此,有必要开展这方面的研究工作. 本研究以 Fluent 6.3 为计算平台,以某推钢式板坯加热炉的汽化冷却系统为原型,系统研究了水-水引射管管径、出入口直径比和喷射流量等参数对自然循环汽化冷却回路循环流速及上升管内喷嘴附近局部阻损系数的影响,以期为该技术的发展和应用提供参考依据.

1 数学物理模型的建立

水-水引射的自然循环汽化冷却系统如图 1 所示. 在正常生产中,来自于汽包的循环水由下降管进入加热炉的炉底冷却水管,吸热并部分汽化后,以汽水混合物的形式进入上升管,循环水就依靠下降管和上升管中流体的密度差所造成的推动力来克服循环回路中的阻力,从而完成回路的循环<sup>[7]</sup>. 在启动阶段,由于加热炉的热负荷很小,不能使上升管中的水足够汽化,因而下降管和上升管中流体的密度差很小,难以克服循环回路中的阻力而进行循环,此时便需启动安装在汽包与引射管之间的水泵进行水-水引射来进行强制循环. 某推钢式板坯加热炉的汽化冷却系统,汽包标高为 8.5 m,本模拟取其中的一个回路为研究对象,在该回路中,采用集中下降管和单独上升管,其中炉底水管和上升管内径均为 89 mm,下降管内径为 219 mm,引射管沿汽包平台进入上升管,并保持引射管与上升管同轴,且出口垂直向上. 由管道流量计算方程<sup>[3]</sup>可知,在管路进出口压差一定的情况下,其流量的平方根与管道的阻力特性系数成反比,也就是说只要保证两组管道的阻力特性系数一样,则它们的流量与管道进出口压差之间的关系就唯一确定. 基于此原理,为了降低计算成本,模拟中采用如图 1 所示的简化模型,计算区域从下降管的入口至上升管的出口,并将所有管段的内径都统一设定为 89 mm,简化模型与实际回路之间的阻力特性系数差值采用自定义函数,以动量源项的方式施加在如图 1 所示的相关区域中,以保证和实际循环管道阻力特性系数一

致. 实践证明,这种处理方式不仅可以大大减少计算网格,而且能保证获得正确的计算结果. 建模时,将坐标原点设在引射管出口的中心,并以垂直向上的方向为 y 轴的正方向,建立笛卡尔坐标系,进而创建三维流动模型.

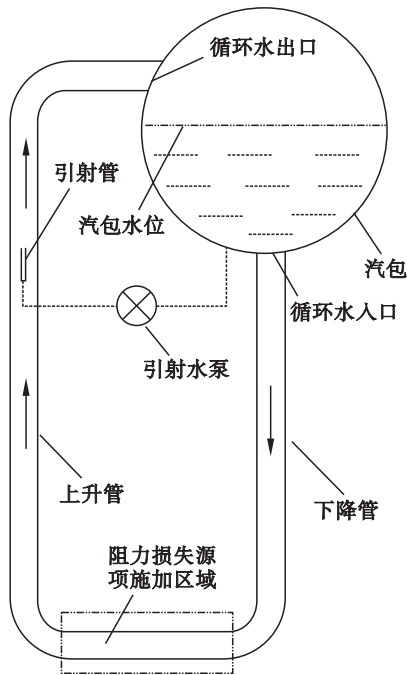


图 1 汽化冷却水-水引射循环示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of water-water circulation in a evaporation cooling system

为了能更好地对主要现象进行分析和研究,特作如下假定:①循环介质为不可压缩理想流体;②不考虑管壁与水之间的换热,水温恒定,水的汽化被忽略;③不考虑引射管引入上升管起始部分对流动的影响;④引射管管壁对流动的影响忽略不计.

1.1 流动模型

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 ; \tag{1}$$

动量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i^2} \right) + \rho g_i + S_i ; \tag{2}$$

湍动能方程:

$$\rho \frac{\partial (u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon ; \tag{3}$$

湍动能耗散方程:

$$\rho \frac{\partial (u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} . \tag{4}$$

式(1)~式(4)中: $u_i$  和  $u_j$  分别为  $x_i$  和  $x_j$  方

向上的速度分量,  $\text{m/s}$ ;  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $k$  为湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $p$  为压力,  $\text{Pa}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\varepsilon$  为湍动能耗散率,  $\text{m}^2/\text{s}^3$ ;  $\mu_{\text{eff}}$  为有效黏度系数,  $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_i$ ;  $G = \mu_i (\partial \mu_i / \partial x_j) ((\partial \mu_i / \partial x_j) + (\partial \mu_j / \partial x_i))$ ;  $\mu_i = \rho c_\mu (k^2 / \varepsilon)$ ;  $S_i$  为  $x_i$  方向上的动量源项,  $\text{N/m}^3 \cdot \text{s}$ ; 方程中的系数采用 Launder 和 Spalding 所推荐的数据<sup>[7]</sup>, 其中  $u_e = 0.09$ ,  $c_1 = 1.43$ ,  $c_2 = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.0$ .

### 1.2 边界条件

1) 入口边界. 对于汽化冷却回路, 将下降管的入口设为压力入口边界条件, 其压力由静压公式(5)算出:

$$p = \rho gh. \tag{5}$$

式中,  $h$  为汽包的水位,  $\text{m}$ .

引射管入口采用速度边界条件, 流速根据所模拟的流量条件换算后得到, 其中入口处的湍动能  $k$  和湍动能耗散率  $\varepsilon$  按式(6)和式(7)取值:

$$k = 1.5 (Iu)^2; \tag{6}$$

$$\varepsilon = k^{1.5} / (0.3d). \tag{7}$$

式中:  $I = 0.16Re^{-1/8}$  为湍流强度, 其中  $Re$  为雷诺数;  $u$  为引射管入口处的平均速度;  $d$  为引射管入口处的水力直径.

2) 出口边界. 汽化冷却回路采用压力出口边界, 将该处的压力设为 0.

3) 固体壁面. 汽化冷却回路及引射管的壁面都设为无滑移壁面条件, 并采用标准壁面函数法进行处理.

## 2 研究方案和计算方法

求解区域由前处理软件 Gambit 2.0 创建, 采用六面体网格对该区域进行剖分, 定义好边界类型后以 Mesh 文件格式导入到 Fluent 6.3 中, 然后采用自适应网格细化技术对流速变化剧烈的区域进行网格加密, 最终的网格数量为 1 038 600 个. 计算时, 汽化冷却回路下降管的入口压力保持不变, 引射管流量  $Q$  分别取 0.36, 0.72, 1.08, 1.44 和 1.80  $\text{kg/s}$ , 引射管管径  $d_0$  分别取 0.015, 0.020, 0.025 和 0.030  $\text{m}$ , 引射管出口为圆形, 出入口直径比  $d/d_0$  分别取 0.75, 1.00, 1.25 和 1.50, 3 组参数交叉配对后分别进行计算. 连续性方程、各方向上的速度方程、 $k$  和  $\varepsilon$  方程的残差限均设为  $10^{-3}$ , 当各方程的残差计算结果小于此规定值时, 认为计算结果收敛, 结束运算, 随后进行结果分析和后处理.

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 速度和湍动能分布

计算结果表明, 上升管中速度和湍动能变化剧烈的区域位于引射管附近, 为了分析的方便, 特取该区域上升管的中心截面为研究对象. 图 2 示出了当  $Q = 1.08 \text{ kg/s}$ ,  $d_0 = 0.020 \text{ m}$ ,  $d/d_0 = 1.00$  时, 引射管附近上升管内的速度分布和湍动能分布(其他参数下的情况与此相类似, 由于篇幅所限, 文中未能一一示出). 从图中可以看出, 上升管内的水-水引射属受限等温直流引射射流范畴<sup>[8-9]</sup>, 引射水流喷入上升管后, 由于微团的脉动和流体之间的摩擦, 射流与周围介质之间不断进行质量和动量的交换, 通过卷吸周围的介质, 射流的横向尺寸越来越大, 而速度不断减小<sup>[10]</sup>. 从图中还可以看出, 射流的最大速度位于引射管的出口处, 其基本段的长度约为 0.178  $\text{m}$ . 由于受出口扰动的影响, 最大湍动能位于出口上侧距出口有一段小距离的位置, 射流与周围介质在弯管外侧区域的动量交换强度大于内侧.

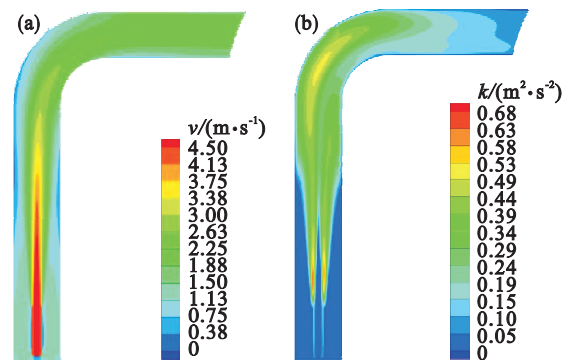


图 2 当  $Q = 1.08 \text{ kg/s}$ ,  $d_0 = 0.020 \text{ m}$ ,  $d/d_0 = 1.00$  时, 引射管附近上升管内的速度分布和湍动能分布  
Fig. 2 Velocity and turbulence kinetic energy distribution in the riser tube nearby injecting tube at  $Q = 1.08 \text{ kg/s}$ ,  $d_0 = 0.020 \text{ m}$  and  $d/d_0 = 1.00$

(a)—速度; (b)—湍动能.

### 3.2 回路的循环流速

在加热炉汽化冷却系统的设计和运行中, 回路的循环流速都是一个重要参数. 有研究表明, 循环流速存在一个临界值, 只有当循环流速大于该值时, 炉底管才能得到良好的冷却, 流体才不会出现汽水分离或分层流动. 对于启动阶段, 尽管炉底管的热负荷较小, 气化率较低, 但也应当保证足够大的循环流速, 而在上升管中安装引射管就是为了促使水定向流动和提高循环流速. 图 3 示出了当引射管管径  $d_0 = 0.015 \text{ m}$  时, 引射管出入口直径比及引射流量对冷却回路中循环流速的影响,

而在图 4 中示出了当引射管出入口直径比  $d/d_0 = 1.00$  时,引射管管径及引射流量对冷却回路中循环流速的影响.从图中可以看出,在同一引射管管径下,随着引射流量的增加,冷却回路中的循环流速逐渐增大,随着射管出入口直径比的增大,曲线逐渐下移.当引射流量由  $0.36\text{ kg/s}$  增大到  $1.80\text{ kg/s}$  时,对于  $d/d_0 = 0.75$  的喷射管,其引射的冷却回路循环流速由  $0.918\text{ 5 m/s}$  增大到  $1.545\text{ 4 m/s}$ ,而对于  $d/d_0 = 1.25$  的喷射管,该相应值则分别为  $0.878\text{ 9 m/s}$  和  $1.090\text{ 8 m/s}$ ,由此可见,在其他参数不变的情况下,缩口型引射管的引射效果优于扩口型.从图中还可以看出,当引射管出入口直径比不变时,随着引射管管径的增大,冷却回路中的循环流速逐渐减小.

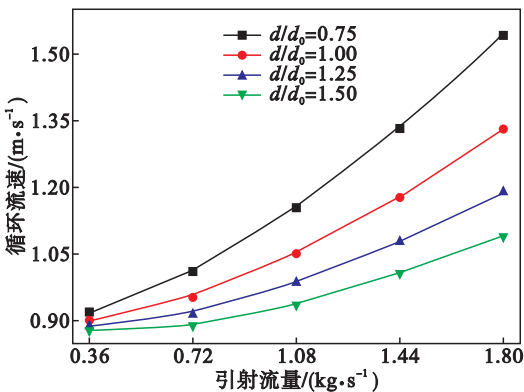


图 3 当引射管径  $d_0 = 0.015\text{ m}$ ,出入口直径比及引射流量对冷却回路中循环流速的影响  
Fig. 3 Influence of injecting flow rate and diameter ratio of injecting tube outlet to inlet on circulating velocity with  $d_0 = 0.015\text{ m}$

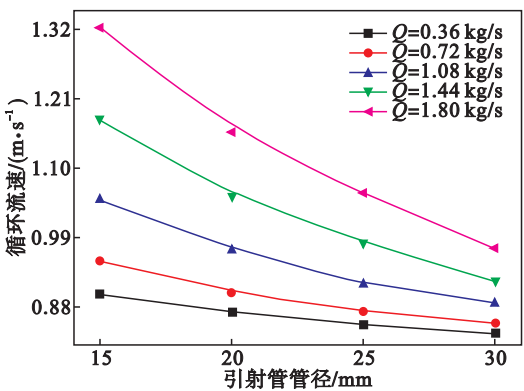


图 4 当引射管出入口直径比  $d/d_0 = 1.00$  时,引射管管径及引射流量对冷却回路中循环流速的影响  
Fig. 4 Influence of injecting tube diameter and flow rate on circulating velocity with  $d/d_0 = 1.00$

3.3 局部阻力系数

加热炉汽化冷却系统的设计原则是在保证工艺需要的前提下尽可能地减小回路中的沿程阻损和局部阻损,其原因是由于增加回路动压差所能

采取的主要手段是提高汽包的安装高度,阻损的增加就意味着高的汽包安装高度和更大的投资成本.引射管引起的局部阻损在整个冷却回路中占有一定的比重,需要谨慎考虑.图 5 示出了引射管管径及出入口直径比对引射管附近冷却回路局部阻损系数的影响.从图中可以看出,随着引射管管径及出入口直径比的增大,引射管附近冷却回路的局部阻损系数逐渐增大,其与引射管管径成近似正比关系.同时,在其他结构参数一定的条件下,扩口型引射管所带来局部阻损要大于缩口型.

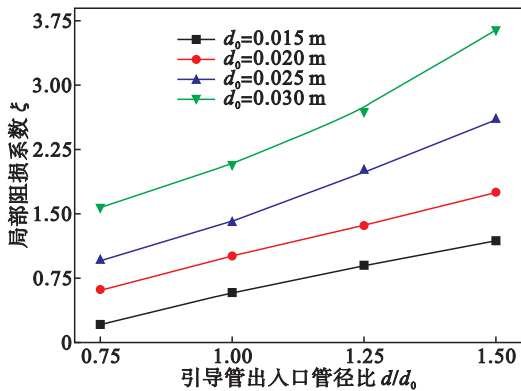


图 5 不同情况下引射管附近的局部阻损系数  
Fig. 5 Local resistance loss coefficient nearby injecting tube under different conditions

4 结 论

- 1) 上升管内的水-水引射属受限等温直流引射射流范畴,符合其一般规律.射流的最大速度位于引射管的出口,最大湍动能位于距引射管出口上侧有一段小距离的位置,射流与周围介质在弯管外侧的动量交换强度大于内侧.
- 2) 在引射管管径不变条件下,随着引射流量的增加,冷却回路中的循环流速逐渐增大,随着引射管出入口直径比的增大,曲线逐渐下移;当引射管出入口直径比保持不变时,随着引射管管径的增大,冷却回路中的循环流速逐渐减小.
- 3) 引射管附近回路的局部阻损系数随着引射管直径及引射管出入口直径比的增大而增大;从引射效果和减小管路局部阻损系数的角度来看,在其他结构参数一定的条件下,缩口型引射管优于扩口型引射管.

参考文献:

[1] Han S H, Chang D, Huh C. Efficiency analysis of radiative slab heating in a walking beam-type reheating furnace[J]. Energy, 2011, 36(2): 1265 - 1272.  
[2] Han S H, Chang D. Optimum residence time analysis for a



walking beam type reheating furnace [ J ]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2012, 55 ( 15 ) : 4079 – 4087.

[ 3 ] 董芑,徐艳英,兰日华. 自然循环锅炉水动力回路分析法 [ J ]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39 ( 3 ) : 462 – 466.

( Dong Peng, Xu Yan-ying, Lan Ri-hua. Loop analysis method for the numerical calculation of hydrodynamic characteristic of boiler with natural circulation [ J ]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39 ( 3 ) : 462 – 466. )

[ 4 ] Xu Y Y, Dong P, Zhai M. Hydrodynamic loop analysis method for hot water boiler with natural circulation [ J ]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30 ( 5 ) : 66 – 70.

[ 5 ] Liu J F, Zhao X M, Zhang J S. Operation experience of a 116 MW circulating fluidized bed hot water boiler with water cooled square cyclone [ J ]. *Power Engineering*, 2004, 24 ( 5 ) : 618 – 619.

[ 6 ] 郭九生,朱绪,李芳,等. 一种热轧加热炉汽化冷却引射装置:中国, CN203249504U [ P ]. 2013 – 10 – 23.

( Guo Jiu-sheng, Zhu Xu, Li Fang, et al. An ejecting equipment for evaporated cooling system of reheating furnace; Chinese, CN203249504U [ P ], 2013 – 10 – 23 )

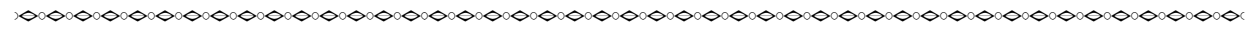
[ 7 ] Launder B E, Spalding D E. The numerical computational of turbulent flow [ J ]. *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering*, 1973 ( 3 ) : 267 – 271.

[ 8 ] 李应林,谭来仔,陈传宝. 液液引射器性能的数值模拟与实验 [ J ]. 东南大学学报 ( 自然科学版 ), 2014, 44 ( 2 ) : 289 – 294.

( Li Ying-lin, Tan Lai-zai, Chen Chuan-bao. Numerical simulation and experimental investigation on performance of liquid-liquid ejector [ J ]. *Journal of Southeast University ( Natural Science Edition )*, 2014, 44 ( 2 ) : 289 – 294. )

[ 9 ] He S, Li Y, Wang R Z. Progress of mathematical modeling on ejectors [ J ]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13 ( 8 ) : 1760 – 1780.

[ 10 ] Sarkar J. Geometric parameter optimization of ejector expansion refrigeration cycle with natural refrigerants [ J ]. *International Journal of Energy Research*, 2010, 34 ( 1 ) : 84 – 94.



( 上接第 1568 页 )

[ 6 ] 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 International*, 1999, 26 ( 6 ) : 423 – 438.

[ 7 ] 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.

[ 8 ] Kharicha A, Ludwig A, Wu M. 3D simulation of melting during an industrial scale electro-slag remelting process [ C ] // Proceedings of the 2011 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. Nancy, 2011 : 41 – 48.

[ 9 ] Kojima Y, Kato M, Toyoda T, et al. Model study on the melting phenomena of consumable electrode in electroslag remelting process [ C ] // Proceedings of the Fourth International Symposium on Electroslag Remelting Processes. Tokyo, 1973 : 35 – 44.

[ 10 ] ElGammal T, von Hagen I, Mullenberg R. Role played by the electric current on metal droplet formation in the ESR-process [ C ] // Proceedings of the Fourth International Symposium on Electroslag Remelting Processes. Tokyo, 1973 : 45 – 54.

[ 11 ] Kharicha A, Ludwig A. Influence of imposed vertical current on the droplet formation during a melting process [ C ] // The Seventh International Conference on Multiphase Flow Tampa, 2010 : 1 – 5.

[ 12 ] 梁连科,杨怀. 电渣重熔用渣的物理化学及其应用译文集 [ M ]. 沈阳: 东北大学出版社, 1989 : 120 – 131.

( Liang Lian-ke, Yang Huai. Translation anthologies of physical chemistry and application of slag used in electroslag remelting process [ M ]. Shenyang: Northeastern University Press, 1989 : 120 – 131. )

[ 13 ] 王安国,张延安,豆志河. 电渣熔铸过程渣池电场温度场的 ANSYS 有限元分析 [ J ]. 过程工程学报, 2006, 6 ( 1 ) : 105 – 109.

( Wang An-guo, Zhang Ting-an, Dou Zhi-he. ANSYS finite element analysis of the thermoelectric field of the slag basin for electro-slag casting course [ J ]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2006, 6 ( 1 ) : 105 – 109. )

[ 14 ] 谢珍勇. 填充比和熔速对 H13 钢电渣质量的影响 [ J ]. 2007, 13 ( 3 ) : 36 – 37.

( Xie Zhen-yong. Effect of filling ratio and melting speed on quality of ESR ingot of H13 hot -work die steel [ J ]. *Special Steel Technology*, 2007, 13 ( 3 ) : 36 – 37. )