

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.11.010

电渣重熔过程中熔滴滴落的影响因素

董艳伍, 陈浩禹, 李 想, 吴镇湘  
(东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 采用 VOF 方法来追踪钢渣两相界面, 磁流体力学模块(MHD)来加载电流、电压对电渣重熔过程中熔滴滴落行为进行数值模拟. 结果表明: 电渣重熔过程中自耗电极端部熔滴的数目随着充填比的增加而增多; 熔滴的尺寸随着自耗电极端部形状和界面张力的增加而增大. 然而, 熔滴的尺寸和数量随着输入电流的增大而减小. 而且一些尺寸较大的熔滴在滴落的过程中受到了电磁力、重力以及浮力等力作用被分裂成几个尺寸较小的熔滴. 从自耗电极端部滴落的熔滴不具有对称性, 从而导致了渣池的流场不对称性.

**关 键 词:** 电渣重熔; 熔滴; 数值模拟; 充填比; 界面张力

**中图分类号:** TF 142+.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2016)11-1564-06

Effect of Multiple Factors on Droplets During Electroslag Remelting Process

DONG Yan-wu, CHEN Hao-yu, LI Xiang, WU Zhen-xiang  
(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author, DONG Yan-wu, E-mail: dongyw@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** Magnet-hydr-dynamics (MHD) module loading current and voltage coupled with a VOF (volume of fluid) model for the phases (i. e., steel and slag) distribution have been employed to investigate the formation of droplet during electroslag remelting. The results indicate that the amount of droplets increase with the increasing of filling ratio and the dimension of droplets increase with the increasing of electrode tip angle and interfacial tension. However, the amount and dimension of droplets decrease with the increasing of input current. Some large droplets could be tore into pieces by various forces including electromagnetic force, gravity, buoyancy and so on. In addition, multiple unsymmetrical eddies exist due to stochastic droplet dripping and uneven thermal field distribution.

**Key words:** electroslag remelting; droplet; simulation; filling ratio; interfacial tension

去除钢中非金属夹杂物是电渣重熔过程的重要特点之一<sup>[1]</sup>. 而其去除夹杂物的能力受到电渣重熔过程中渣系、熔炼速率、输入功率以及钢种等众多因素的影响<sup>[2]</sup>. 实际上, 电渣重熔去除夹杂物主要发生在自耗电极端部熔滴的形成阶段液态熔渣对夹杂物的溶解和同化<sup>[1,3]</sup>, 而渣金间的接触面积是影响夹杂物去除的重要因素, 其受到了3个阶段的影响: 自耗电极端部熔滴的形成阶段; 熔滴从自耗电极端部滴落穿过渣池的阶段以及熔滴穿过渣池和金属熔池交界面阶段. 这3个阶段中, 熔滴的形成和滴落阶段是去除夹杂物最为重要的阶段. 近些年, 有关电渣重熔过程中熔滴滴落已做了大量的数值模拟研究, 熔滴滴落通过源项的形式加入到动量方程中, 其尺寸对模拟计算的过程具有重要的影响<sup>[4-7]</sup>.

然而, 由于电渣重熔过程是在结晶器内进行的, 熔滴的形成和滴落过程无法透过结晶器直接观察到. 因此无法通过工业实验对电渣重熔过程熔滴的形成和滴落进行研究<sup>[8]</sup>. 有人利用低熔点的伍德合金模拟自耗电电极、LiCl-KCl、NaOH 或

者 NaCl 溶液模拟液态渣池对电渣重熔过程中熔滴的形成和滴落过程的影响. 利用示波器记录电路的电流和电压波动来确定熔滴从自耗电极端部滴落, 并且据此可以计算出熔滴的滴落频率<sup>[9-11]</sup>. 虽然此物理模拟可以对熔滴的形成和滴落过程进行研究, 但是与实际的电渣重熔过程仍具有较大的差异.

数值模拟是研究电渣重熔过程中熔滴的形成和滴落的一种十分快速和省时的方法. 由于电渣重熔过程中熔滴形成和滴落鲜有报道, 本文将对此过程通过数值模拟的方法进行研究, 采用 VOF 的方法来追踪两相界面, 磁流体力学模块 (MHD) 来加载电流、电压模拟熔滴所受电磁力作用. 由于影响电渣重熔过程熔滴形成和滴落的因素较多, 为方便模型的计算, 对本文作出以下假设:

- 1) 电极插入渣池一定深度, 其端头温度达到液相线温度时转变为液态.
- 2) 液态熔渣和熔融金属均为不可压缩流体.
- 3) 此模型只考虑液态渣池和自耗电极.

## 1 数学模型和边界条件

采用 VOF 方法来追踪钢液和熔渣的两相界面, 模拟的相关方程如下.

### 1.1 控制方程

#### 1.1.1 电磁场控制方程

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \tag{1}$$

$$\nabla \times H = J, \tag{2}$$

$$\nabla \cdot B = 0, \tag{3}$$

$$\nabla \cdot J = 0. \tag{4}$$

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

#### 1.1.2 流场控制方程

$$\nabla \cdot v = 0, \tag{5}$$

$$\rho(v \cdot \nabla)v = -\nabla p + (\mu_{\text{eff}} \nabla v) + F, \tag{6}$$

$$F = J \times B = \mu_0 J \times H. \tag{7}$$

其中:  $v$  为速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $\rho$  为熔体密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $p$  为压力,  $Pa$ ;  $\mu_{\text{eff}}$  为有效黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $F$  为体积力,  $N \cdot m^{-3}$ .

#### 1.1.3 温度场控制方程

$$\rho_{p,n} C_{p,n} v_n \frac{\partial T}{\partial y} = K_{\text{eff},n} \Delta T + Q_n. \tag{8}$$

其中:  $n = e$  (电极)、 $l$  (熔渣)、 $m$  (金属熔池)、 $s$  (铸锭);  $v_e$  为自耗电极的下降速率;  $v_s$  为抽锭速率;

$K_{\text{eff}}$  为有效导热系数,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $Q_n$  为内热源  $W \cdot m^{-3}$ .

#### 1.1.4 VOF 控制方程

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q) \right] = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}). \tag{9}$$

其中:  $\rho_q$  为第  $q$  相密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\alpha_q$  为第  $q$  相体积分数;  $\dot{m}_{pq}$  为第  $p$  相向第  $q$  相转移的质量,  $kg$ .

### 1.2 边界条件

电场的边界条件为

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_0, (0 \leq r \leq R_0, z_1 < z < z_2; \\ r &= R_0, z_2 < z < z_3). \end{aligned} \tag{10}$$

$$\phi = \phi_1, (0 \leq r \leq R_0, z = z_0). \tag{11}$$

其中,  $\phi_0$  和  $\phi_1$  表示渣池的最低和最高电势.

在模拟的过程中以电极端头为速度入口, 模型底部边界为速度出口. 渣池与空气接触表面为自由滑移界面.

温度场的边界条件:

$$\begin{aligned} -\kappa \frac{\partial T}{\partial r} &= h_{\text{sw}} (T_{\text{sl}} - T_w), (r = R_1, z_0 < z < z_3); \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial r} &= h_{\text{sl}} (T_{\text{sl}} - T), (z = z_0, 0 < r < R_1). \end{aligned} \tag{12}$$

$$\tag{13}$$

其中:  $h_{\text{sw}}$  为渣池的综合对流换热系数, 其值为  $1\,296\,W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ <sup>[12]</sup>,  $T_{\text{sl}}$  为结晶器内渣池的平均渣温.  $T_w$  为冷却水的温度, 在本模拟的过程中去冷却水的温度为  $20\,^\circ C$ ,  $h_{\text{sl}}$  为渣金界面综合传热系数, 其值为  $4\,382\,W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ <sup>[13]</sup>. 此外, 渣表面的辐射系数为  $0.8$ .

### 1.3 几何模型和物性参数

模拟过程中所用到的关于钢和渣的物性参数如表 1 所示.

表 1 钢和渣的物性参数			
Table 1 Physical parameters of steel and slag			
钢的物性参数	数值	渣的物性参数	数值
导热系数	28	电导率	300
$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$		$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$	
密度	7800	密度	2 980
$kg \cdot m^{-3}$		$kg \cdot m^{-3}$	
比热	795	热容	1.3
$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$		$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	
液相线和固相线温度/ K	1757/1796	液相线温度/ K	1743
融化潜热	267.1	黏度	0.002 5
$kJ \cdot kg^{-1}$		$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$	
黏度	0.00 6	导热系数	10.45
$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$		$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	

本文结晶器的直径为 130 mm,自耗电电极的直径分别为 38,80 和 110 mm. 图 1 为本模拟过程中的几何模型示意图.

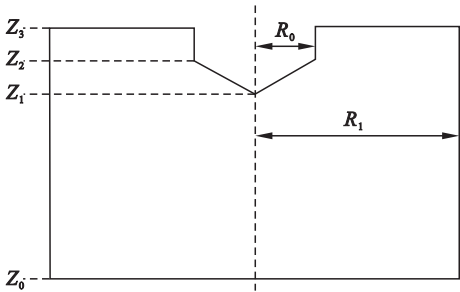


图 1 几何模型示意图  
Fig. 1 Sketch of geometry model

2 结果和分析

众所周知,电渣重熔过程中熔滴的滴落受到重力、浮力、界面张力以及电磁力等的综合作用. 在上述作用力中,重力、电磁力和界面张力是最基本的作用力. 重力和电磁力都是促使熔滴滴落的力,当重力和电磁力的合力大于熔滴所受的界面张力时,熔滴就会向下滴落. 事实上,电渣重熔熔滴在形成和滴落过程中受到了充填比、渣系、熔渣黏度、界面张力以及渣量等因素的影响.

2.1 充填比对熔滴滴落的影响

充填比指的是电极直径/结晶器的直径. 充填比的大小影响着电渣重熔过程中的熔炼速率,供电功率以及钢锭的凝固质量<sup>[14]</sup>. 图 2 为不同充填比的情况下熔滴的形貌. 从图中可以看出随着充

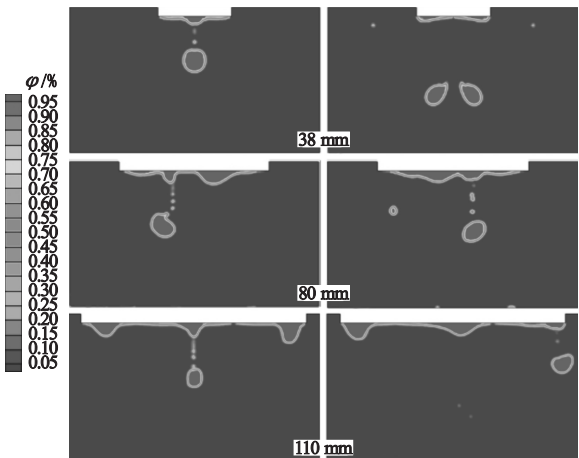


图 2 熔滴形貌随充填比的变化  
Fig. 2 Appearance of droplet varies with different filling ratio

填比的增大,自耗电极端部熔滴的数目逐渐增多. 研究表明,当自耗电电极插入渣池较浅时,自耗电极端部熔滴会同时在外多处如雨淋般滴落,自耗电电极

的端部就会变成近似平面的形状. 图 3 为实际电渣重熔时当自耗电电极的直径为 200 mm,充填比为 0.69 时,在自耗电电极的端部出现较多的熔滴,这一点与模拟结果比较相似.

此外,熔滴直径随充填比的变化如图 4 所示. 从图中可以看出,随着充填比的增大,熔滴的直径逐渐降低. 熔滴直径小于 6 mm 时,熔滴在垂直下落的过程基本上会保持着圆形,不会有太大的变形. 然而,当熔滴的直径大于 8 mm 时,熔滴的形状就会近似趋向于扁平状.

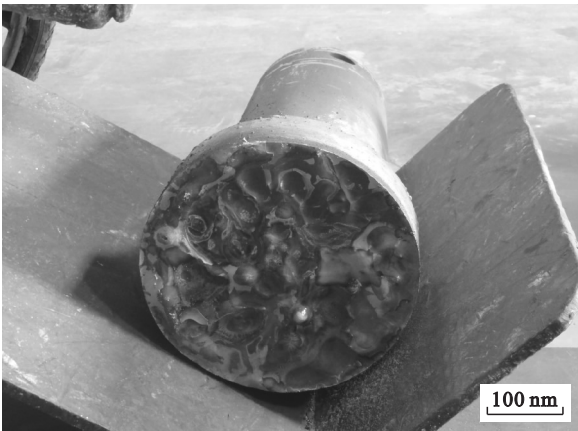


图 3 自耗电极端部熔滴形貌  
Fig. 3 Droplet appearance of electrode tip

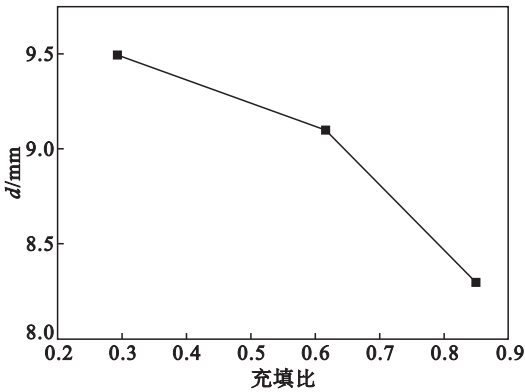


图 4 熔滴直径随充填比的变化情况  
Fig. 4 Relationship between filling ratio and average diameter of droplet

图 5 表示的是在不同充填比的情况下渣池的流场分布. 从图 5a 可以看出在较小充填比的情况下,渣池内有对称分布的漩涡. 然而,在较大充填比的情况下,渣池的流场就不再有简单对称的分布. 此外,从图 5b 和图 5c 可以看出,在较大充填比的情况下,自耗电极端部熔滴的数目会显著地增多. 这主要是由于在电极末端熔滴形成的位置是随机的,而渣池中的流动主要是由于熔滴的滴落、渣池中受热不均引起的热对流、电磁力等原因形成的,所以熔渣的速度分布不再有对称的形式.



本文的模拟结果与前人忽略熔滴滴落的研究成果有较大的差异,而二维的模拟成果差异更为明显<sup>[5-7]</sup>.因此在模拟电渣重熔的过程中,应该考虑熔滴的形成与滴落过程,否则模拟得到的结果与实际的冶炼过程会存在较大的误差.

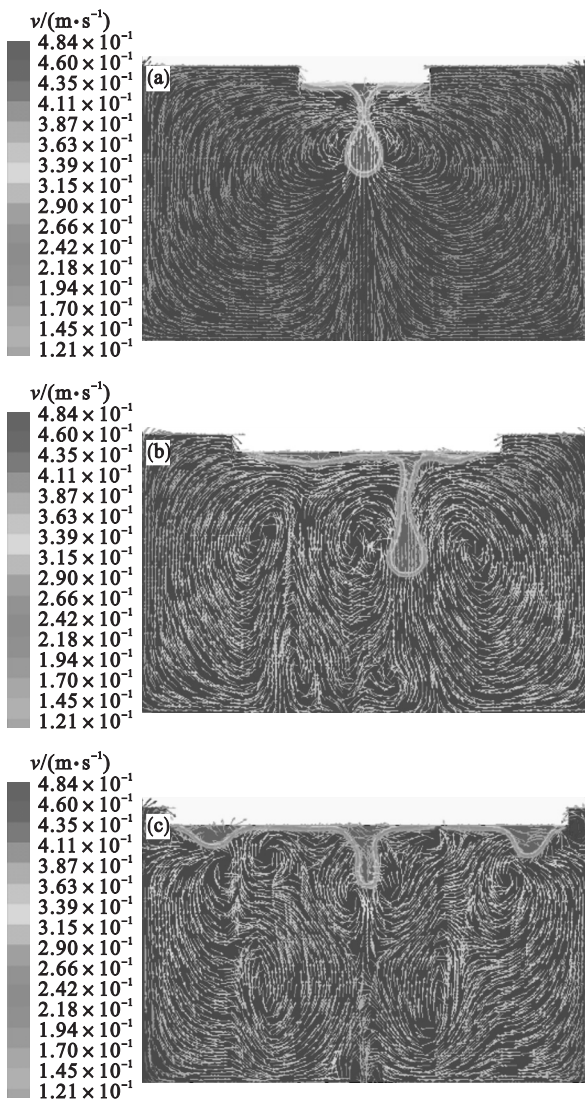


图 5 流场分布随充填比的变化

Fig. 5 Velocity distribution of slag pool with filling ratio

(a) — 充填比 = 0.292; (b) — 充填比 = 0.615;  
(c) — 充填比 = 0.846

## 2.2 自耗电极端部形状和熔滴滴落的关系

本文对自耗电极 38 mm, 结晶器直径 130 mm, 即自耗电极直径充填比为 0.292 的电渣重熔模型进行自耗电极端部形状和熔滴滴落过程关系的模拟计算. 在电渣重熔的熔炼过程中, 当充填比较小时, 自耗电极的端部成锥形. 图 6 为不同电极端部形状下, 熔滴滴落的状态图. 在重熔的过程中, 自耗电极插入至液态渣池的内部, 由于高温作用熔化成液态金属. 液态金属流经锥形电极的端部并在其尖部形成熔滴, 当熔滴达到一定质量

后将会从电极尖部滴落, 穿过液态渣池后形成金属熔池. 此过程是电渣重熔过程中去除夹杂物的关键阶段.

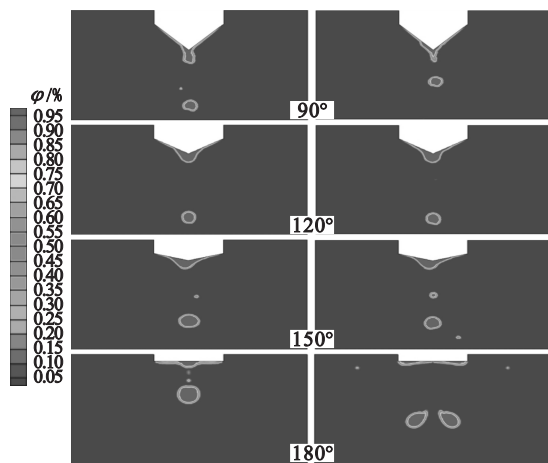


图 6 小充填比下熔滴的形成和分裂

Fig. 6 Formation and detachment of droplet for small filling ratio

从图 7 中可以看出, 随着自耗电极底部锥角的增大, 熔滴的尺寸变大, 并且熔滴的数目会增加. 当自耗电极底部锥角从 90° 增加至 180° 时, 熔滴滴落过程的时间间隔从 0.12 s 增加至 0.32 s. 这是由于当自耗电极锥角小的时候, 熔渣会沿着自耗电极的锥面向下运动, 锥角越小这种作用就越强, 熔滴受到如图 8 所示的渣池对流的冲击就会早脱落.

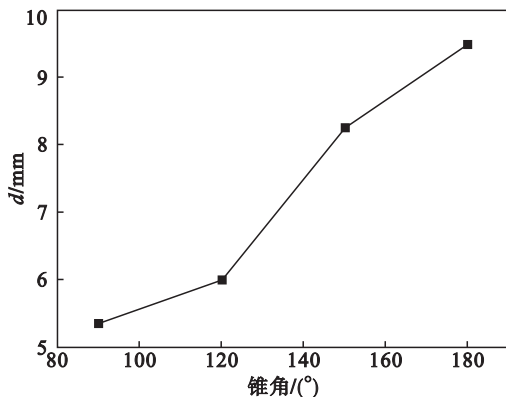


图 7 自耗电极端部形貌和熔滴直径的关系

Fig. 7 Relationship between electrode tip and droplet size

## 2.3 其他因素对熔滴滴落过程的影响

渣金界面的界面张力在电渣重熔熔滴的形成和滴落过程中有着十分重要的作用. 界面张力影响熔滴的尺寸. 如图 9 所示, 在较大的界面张力的情况下, 只有聚集出更大尺寸的液滴后熔滴才会滴落. 较大的界面张力不仅会增加滴落熔滴的尺寸, 并且还会增加两个熔滴滴落的时间间隔. 当界

面张力为 1.5 ,1.4 和 1.3 N·m<sup>-1</sup>时,相邻两个熔滴滴落的时间间隔分别为 0.11 ,0.09 和 0.07 s.

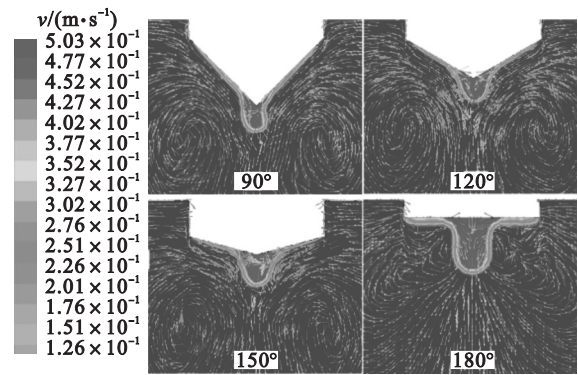


图 8 不同电极端部形状下渣池的流场分布  
Fig. 8 Velocity distribution of liquid slag for different electrode tip angle

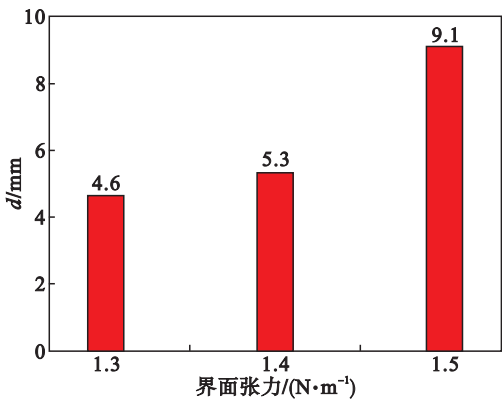


图 9 界面张力和熔滴尺寸的关系  
Fig. 9 Relationship between interface tension and droplet diameter

此外,不同输入电流对熔滴滴落大小的影响如图10所示. 从图中可以看出,随着输入电流的

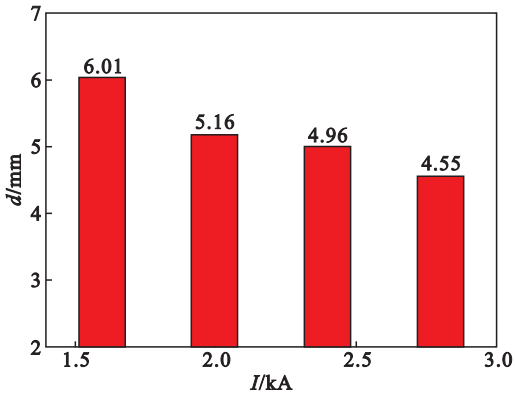


图 10 输入电流和熔滴直径的关系  
Fig. 10 Relationship between current and droplet diameter

增加,熔滴的尺寸逐渐降低. 首先,电流越大熔滴受到的电磁力也越大,会使熔滴尽早地从电极端头脱落. 输入电流从 2 800 A 减小到 1 600 A,第一滴熔滴的脱落时间也从 0.24 s 延长到 0.26 s. 其

次,较高的输入电流会使渣池的温度和电流密度升高,这就有利于电极的熔化,因此有利于熔滴的形成和滴落. 电流密度随输入电流的变化如图 11 所示. 由模拟的结果可知,当输入电流为 1 600 A 和 2 800 A 时,渣池的温度分别为 1 794 ℃ 和 1 891 ℃.

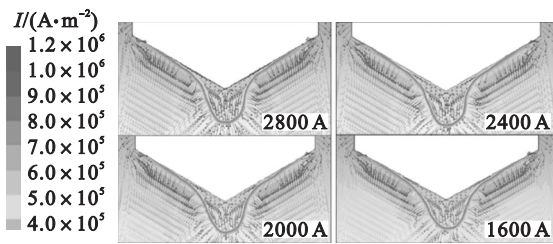


图 11 在不同的输入电流的情况下电流密度的分布  
Fig. 11 Current density distribution under different current condition

### 3 结 论

- 1) 随着充填比的增大,熔滴的直径逐渐减小,且熔滴的数目增多,同一时间滴落至渣池熔滴不具有对称性,渣池的流场分布也并不具有对称性.
- 2) 随着电极端部夹角增大,熔滴直径逐渐增大,当夹角为 180°时,较大的熔滴就会发生分裂.
- 3) 随着界面张力的增大,熔滴的尺寸逐渐增大,滴落时间间隔逐渐减小.
- 4) 随着输入功率的增加,熔滴的尺寸逐渐减小,滴落时间间隔逐渐减小.

### 参考文献:

[ 1 ] 姜周华. 电渣冶金物理化学及传输现象[ M ]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000: 1 - 14.  
( Jiang Zhou-hua. Physical chemistry and transportation phenomena during electroslag metallurgy [ M ]. Shenyang: Northeastern University Press, 2000: 1 - 14. )

[ 2 ] 董艳伍, 姜周华, 肖志新, 等. 电渣重熔工艺参数对钢锭凝固质量的影响[ J ]. 东北大学学报( 自然科学版 ), 2009, 30 ( 11 ): 1598 - 1601.  
( Dong Yan-wu, Jiang Zhou-hua, Xiao Zhi-xin, et al. Influence of ESR process parameters on solidification quality of remelting ingots [ J ]. Journal of Northeastern University ( Natural Science ), 2009, 30 ( 11 ): 1598 - 1602. )

[ 3 ] 李正邦. 电渣熔铸[ M ]. 北京: 国防工业出版社, 1979.  
( Li Zheng-bang. Electroslag casing [ M ]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979. )

[ 4 ] Kelkar K M, Mok J, Patankar S V, et al. Computational modeling of electroslag remelting processes[ J ]. Journal de Physique IV, 2004, 120: 421 - 428.

[ 5 ] Choudhary M, Szekely J. The modeling of pool profiles, temperature profiles and velocity fields in ESR systems[ J ]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1980, 11 ( 3 ): 439 - 453.