

• 实用成型技术 Practical Shaping Technology •  
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.09.019

# 固定自耗电电极充填法电渣熔铸熔池形状的研究

王 珺<sup>1,2</sup>, 常国威<sup>1</sup>, 陈 瑞<sup>3</sup>

(1. 辽宁工业大学 材料科学与工程学院, 辽宁 锦州 121001; 2. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083; 3. 沈阳铸造研究所, 辽宁 沈阳 110022)

**摘要:**利用大型有限元分析软件 ANSYS,对固定自耗电电极充填法电渣熔铸金属熔池形状进行了数值模拟与实验研究。研究发现,当铸锭尺寸为 400 mm×70 mm×200 mm 时,金属熔池形状在铸锭宽度纵截面呈半椭圆形,金属熔池空间形状呈倒置的驼峰形,移动自耗电电极中心处的金属熔池深度最大。实验结果与模拟结果基本吻合,验证了模拟程序的准确性。根据工艺参数对熔池形状的影响,发现移动自耗电电极电流与横截面积的相互匹配是固定自耗电电极充填法电渣熔铸工艺设计的关键。

**关键词:**固定自耗电电极充填法;金属熔池形状;数值模拟

中图分类号: TF744

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)09-0881-06

## Electroslag Casting by Fixed Consumable Electrode Filling Method

WANG Jun<sup>1,2</sup>, CHANG Guowei<sup>1</sup>, CHEN Rui<sup>3</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China; 2. School of New Material and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Shenyang Research Institute of Casting, Shenyang 110022, China)

**Abstract:** The shape of electroslag casting (ESC) molten pool with fixed consumable electrode filling method was numerically simulated and experimentally studied by using the finite element analysis software ANSYS. The results show that when the ingot size is 400 mm×70 mm×200 mm, the longitudinal section of the metal molten pool is half elliptic, the space shape of the molten pool is inverted hump shape, and the depth of the molten pool at the center of the moving consumable pole is maximum. The experimental results are consistent with the simulation results, and the accuracy of the simulation program is verified. According to the influence of process parameters on the shape of molten pool, it is found that the matching of moving consumable electrode current and cross-sectional area is the key to the design of electroslag fusion casting process with fixed consumable electrode filling.

**Key words:** fixed consumable electrode filling method; shape of metal pool; numerical simulation

电渣熔铸具有良好的铸造条件,使其在高品质铸件的生产中有着不可替代的优势<sup>[1-4]</sup>,但是目前的工艺方法无法铸造形状复杂的铸件,限制了电渣熔铸的发展。为解决这一难题,本课题组提出了固定自耗电电极充填法熔铸新工艺,其原理如图 1。与传统的电渣熔铸不同,它有两个自耗电电极,一个是固定自耗电电极,它的形状和所需要熔铸的铸件大致相同,将其固定在结晶器上,在熔铸的过程中它与结晶器的相对位置保持不变,其作用是充填结晶器型腔的同时确保整个铸件在电渣条件下凝固;另一个是移动自耗电电极,它与传统自耗电电极无实质性区别,它的主要作用是在熔铸过程为固定自耗电电极下

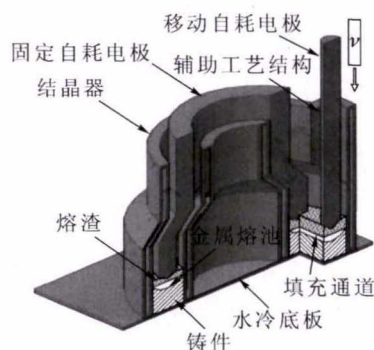


图 1 固定自耗电电极充填法电渣熔铸示意图

Fig.1 Schematic diagram of electroslag casting with fixed consumable electrode filling method

面金属熔池补充金属熔体,保证整个熔铸过程的稳定性。

由于固定自耗电电极充填法电渣熔铸方法是首次提出的,其可行性、成型性、熔铸过程的稳定性等都需要进行实验研究与探索。该方法实施前如果先进行数值模拟优化工艺参数,可以大量地节省实验次

收稿日期: 2018-11-05

作者简介: 王 珺(1991-), 辽宁抚顺人, 博士研究生. 研究方向:

材料加工成形. 电话: 18741676398,

E-mail: cailiaowangjun@sina.com

数,具有重要的意义。关于电渣重熔和电渣熔铸过程的数值模拟前人做了大量的工作,取得了丰富的经验和相当成熟的结论<sup>[5-10]</sup>。本文以前人的研究为基础,用实验和模拟的研究方法,对新工艺电渣熔铸过程稳定阶段金属熔池形状进行研究,为控制固定自耗电极充填法电渣熔铸的凝固过程以及制定熔铸工艺奠定基础。

## 1 数值模拟

为了验证固定自耗电极充填法电渣熔铸方法的可行性,用新工艺熔铸板状铸锭,并以自耗电极、渣池和铸锭为研究对象,建立几何模型,如图2。

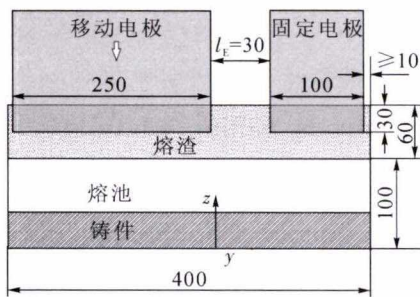


图2 简化后的固定自耗电极充填法熔铸模型意图  
Fig.2 Schematic diagram of fixed consumable electrode filling melting model after simplification

### 1.1 基本假设

- (1)熔铸开始时赋予模型特定的初始温度。
- (2)电渣冶金过程平稳,相对于结晶器,自耗电极保持不动。
- (3)熔铸过程中忽略金属熔滴的影响。
- (4)自耗电极顶部温度与室温相同。
- (5)自耗电极和渣料的物性参数只随温度变化,且具有均匀性和各向同性。
- (6)金属熔池与渣池中的对流换热以有效导热系数来代替。

### 1.2 数学模型

#### 1.2.1 熔池与铸锭内导热方程

金属熔池内部存在复杂的流动过程,传热过程也相当复杂。为了便于研究,通常将金属熔池的传热过程简化为传导传热,故稳态时熔池与铸锭内热量控制方程为:

$$\rho_i C_p \nu_z \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_i \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $C_p$ 为恒压热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $\nu_z$ 为铸锭的上涨的速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $T$ 为温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda_i$ 为导热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $x, y, z$ 为直角坐标, $\text{m}$ ;  $q_i$ 为初生的焦耳热, $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $i=l, m, s$ ,其中  $l, m, s$  分别表示金属熔池部分、为固液两相区、铸锭。

#### 1.2.2 渣池内对流传热控制方程

(1)传热方程 渣池的传热由对流传热方程来确定,即

$$\rho C_p (\nu \nabla T) = \nabla K_{\text{eff}} \nabla T + q_v \quad (2)$$

式中, $\rho$ 为熔渣的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $C_p$ 为熔渣的恒压热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $\nu$ 为熔渣的流动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $K_{\text{eff}}$ 为熔渣的导热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $q_v$ 为熔渣产生的焦耳热, $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(2)熔渣流动速度方程 熔渣的流动速度  $\nu$  由下列方程确定,即

$$\rho (\nu \nabla) \nu = -\nabla P + \nabla (\mu_{\text{eff}} \nabla \nu) + F \quad (3)$$

式中, $P$ 为压力, $\text{Pa}$ ;  $\mu_{\text{eff}}$ 为熔渣粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $F$ 为体积力。

(3)体积力方程

$$F = J \times B + \rho g [1 - \beta(T - T_0)] \quad (4)$$

式中, $J$ 为电流密度, $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ ;  $B$ 为磁感应强度, $\text{T}$ 。  $J$ 与  $B$  分别由法拉第电磁感应定律和欧姆定律确定。

### 1.3 求解方法、边界条件与物性参数

#### 1.3.1 求解方法

本文先选用 solid97 单元根据矢量磁位计算出磁感应强度和电流密度,然后转换单元为 solid90,根据焦耳定律计算出焦耳热场的分布,最后通过耦合计算求解出温度场的分布。其中电极、钢锭和渣层选择时间积分电势(VOLT)作为自由度。

#### 1.3.2 边界条件

电磁场边界条件:在自耗电极端面上施加电流,并分别耦合 volt 自由度。铸锭底部端面取电位为 0,并在空气层施加磁平行边界条件。

温度场边界条件:电极区域:自耗电极顶部的温度设置为室温;自耗电极侧壁施加自然对流传热有效系数。渣池区域:渣池顶部既存在自然对流传热也存在辐射传热,在实际传热过程中,辐射传热占主导地位,因此在渣池上表面施加辐射传热有效系数。

#### 1.3.3 物性参数

渣和钢锭的物性参数如表 1。

### 1.4 模拟结果

固定自耗电极充填法电渣熔铸过程是动态变化过程,当熔铸过程进入稳定阶段,熔池的形状基本保持不变。随着熔铸过程的进行,熔池不断上升,直至整个熔铸过程结束。对固定自耗电极充填法电渣熔铸过程熔池形状的数值模拟,就是模拟熔铸稳定阶段一个准稳态时的温度场。按照预设的解剖方案对模拟结果进行解剖,得到熔铸稳定阶段 5 个位置的金属熔池形状的模拟结果,如图 3 所示。

表1 渣和钢的物性参数

Tab.1 Physical parameters of slag and steel

物理性质	渣 <sup>[1]</sup>	钢
电导率 /Ω <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup>	lnσ=-6 769/T+8.818	7.14×10 <sup>5</sup>
磁导率 /H·m <sup>-1</sup>	1.257×10 <sup>6</sup>	1.257×10 <sup>6</sup>
热传导系数 /W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	10.46	35.1
比热 /J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	1 255	828
密度 /kg·m <sup>-3</sup>	2 800	7 800
熔点 /K	1 673	1 773

## 2 实验

为了验证模拟结果的准确性,进行开炉实验。实验用 Q235 钢坯制备移动与固定电极,实验用电渣炉为 1 000 kVA 单相电渣炉,电缆连接方式、结晶器以及自耗电电极组装方法如图 4。熔渣为 CaF:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=70:30,渣量为 20 kg,采用生渣启动电渣炉。设定电压 60 V、电流 5 000 A。电极与结晶器型腔的几何参数如表 2。

表2 电极与结晶器型腔几何参数

Tab.2 Geometric parameters of electrode and mold cavity

结晶器型腔/mm	移动电极/mm	固定电极/mm	充填比(%)
400×70×400	250×40×3 000	100×40×400	0.5

## 3 实验结果

### 3.1 板形铸锭熔池断面形状

#### 3.1.1 铸锭厚度上熔池断面形状

将铸锭进行解刨,解刨方案与模拟结果的解刨方案相同。对剖面打磨酸洗得到铸锭低倍组织,根

据铸锭低倍组织中的柱状晶生长方向可以反推出熔铸稳态时铸锭厚度上熔池断面形状和尺寸,如图 5 所示。

#### 3.1.2 铸锭宽度上熔池断面形状

根据铸锭厚度上熔池断面形状和尺寸,得到新工艺熔铸稳定阶段时铸锭宽度上熔池断面形状,如图 6 所示。熔铸过程中在移动自耗电电极端面上施加较大的熔铸电流使其快速熔化以保证熔铸过程的稳定,在单位时间内向固定自耗电电极一侧提供大量的金属熔体,移动自耗电电极中心的熔池深度最大。金属熔滴穿过渣池,净化金属熔体,同时也将热量带入金属熔池。滴入电极间距中心处的金属熔滴最少,获得的热量最少,冷却强度和其他区域相同,所以两电极间距中心熔池深度最小。

#### 3.1.3 熔池空间形状

根据铸锭厚度上熔池断面形状和尺寸,新工艺熔铸稳定阶段熔池的空间形状如图 7 所示,金属熔池空间形状呈倒置的驼峰形。

### 3.2 模拟结果与实验结果的比较

为了便于比较,将模拟结果与实验结果叠加,如图 8 所示。图中模拟结果与实验结果基本一致,验证了模拟程序的准确性。

图中两个结果存在一定的差异,产生差异的主要原因有:①对熔铸过程中存在的复杂问题进行了合理的假设;②物性参数的选取与实际情况存在差异;③实际操作中在结晶器底部铺设一块引锭板,对铸锭底部的散热系数的选取产生影响。

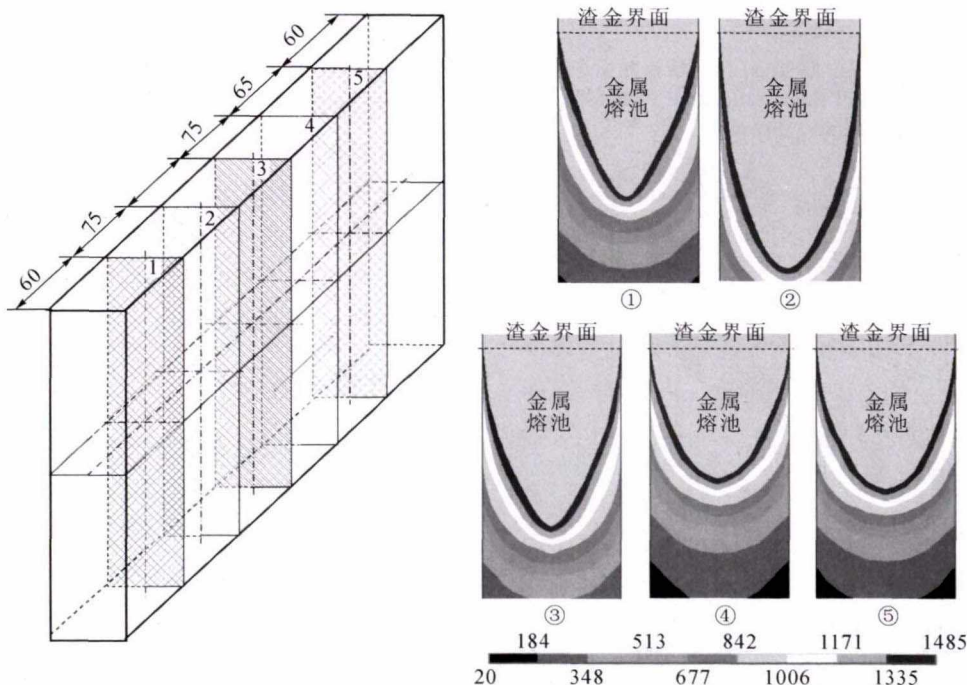


图3 模拟的沿宽度方向的熔池形状

Fig.3 Simulated metal pool shape at vertical section along width direction

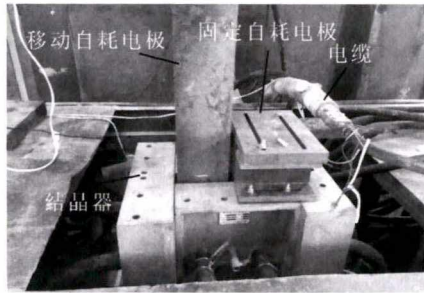


图4 电缆连接与自耗电机组装方法  
Fig.4 Cable connection and consumable electrode assembly method

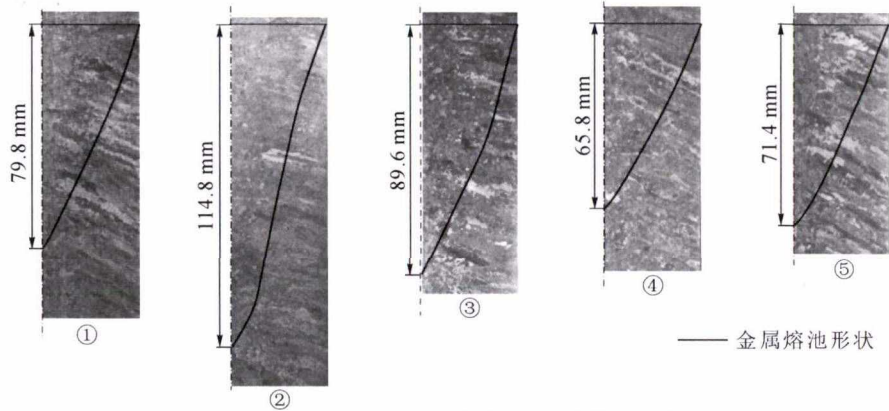


图5 试验的厚度上(沿宽度方向)的熔池形状  
Fig.5 Cross section shape of molten pool on ingot thickness

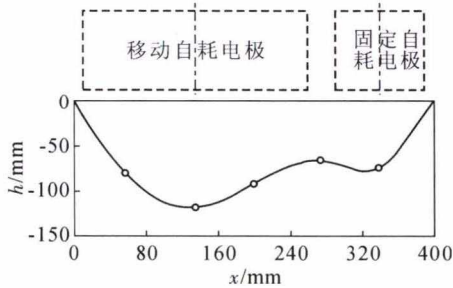


图6 试验的铸锭宽度上(沿厚度方向)的熔池断面形状  
Fig.6 Experimental metal pool shapes at central vertical section along thickness direction

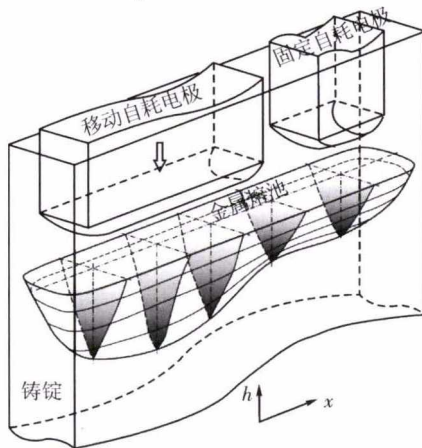


图7 熔铸稳定阶段金属熔池的空间形状  
Fig.7 Spatial shape of the molten pool in the stable stage of casting

金属熔池深度变化不大。

### 3.3 工艺参数对熔池形状的影响

#### 3.3.1 自耗电电极电流密度的影响

自耗电电极电流密度对熔池形状的影响如图9所示,图9中3条线对应着3个电流密度下铸锭宽度上的金属熔池形状。从图中看出,随着自耗电电极电流密度的增加,自耗电电极一侧和两电极间距处的金属熔池深度增加,但是为了保证铸件的凝固质量,自耗电电极的电流密度不能过大,防止熔池过深而导致的柱状晶生长方向水平化以及铸件心部形成缩松。随着自耗电电极电流密度的增加,固定自耗电电极一侧的

#### 3.3.2 电极横截面比例的影响

当移动自耗电电极电流保持不变时,电极横截面面积比例对熔池形状的影响如图10所示。图10中3条线分别对应着移动自耗电电极与固定自耗电电极横截面面积比例  $S_y/S_g$  为 2:1、1:1 和 1:2 时铸锭宽度上的金属熔池形状。

从图10中看出,随着移动自耗电电极横截面积所占的比例的减小,移动自耗电电极对应的“驼峰”变得尖锐,柱状晶的生长方向趋于水平,并且单位时间内移动自耗电电极的熔化速率减小,为固定自耗电电极提供的金属熔体体积减小。可以推断当移动自耗电电极横截面面积的比例过小时,移动自耗电电极无法完成对固定自耗电电极一侧的金属熔池填充的任务,铸锭必然存在严重的铸造缺陷。

## 4 讨论与分析

### 4.1 固定自耗电电极充填法电渣熔铸工艺设计的关键

#### 4.1.1 移动自耗电电极在铸件内

如果铸件形状允许,移动自耗电电极可能完全或部分位于铸件内,如图2所示。这时需要移动自耗电电极完成两个任务,首要任务是为固定自耗电电极一侧提供金属熔体,确保固定自耗电电极内电流稳定;其次是确保所形成铸件的凝固质量。为了能够同时完成这两个任务,移动自耗电电极的电流不能过大,防止熔

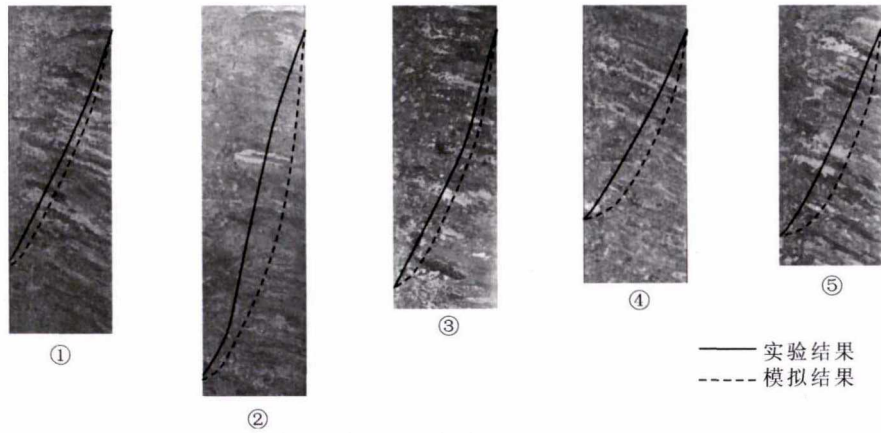


图 8 沿宽度方向熔池形状模拟和试验结果的比较

Fig.8 Comparison of simulated and experimental metal pool shapes at vertical section along width direction

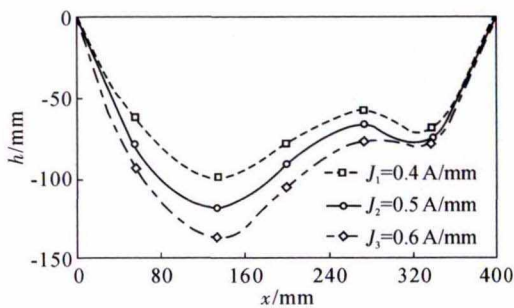


图 9 自耗电极电流密度对熔池形状的影响

Fig.9 Influence of consumable electrode current density on molten pool shape

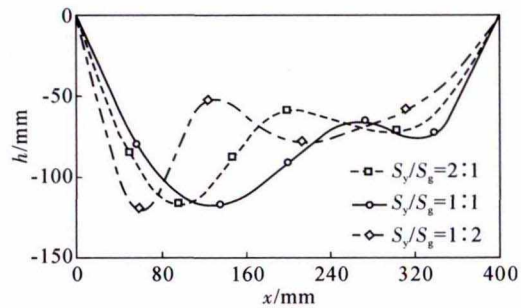


图 10 电极横截面比例对熔池形状的影响

Fig.10 Influence of electrode cross section ratio on molten pool shape

池过深而导致的柱状晶生长方向水平化以及铸件心部形成缩松。同时必须增大移动自耗电极横截面积,以保证在较小电流下能获得更多的熔体,实现对固定自耗电极下熔池的补充。故当移动自耗电极部分或完全位于铸件内部时,移动自耗电极电流与横截面积的相互匹配是固定自耗电极充填法电渣熔铸工艺设计的关键。

#### 4.1.2 移动自耗电极在辅助工艺型腔内

当铸件形状比较复杂无公共型腔时,必须设置辅助工艺型腔,移动自耗电极位于辅助工艺型腔内,如图 1 所示,这时移动自耗电极只有一个任务,即为固定自耗电极一侧提供金属熔体。这时可采用大电流、小横截面积的工艺,在保证对固定自耗电极一侧提供足够金属熔体的同时可提高工艺出品率。故当移动自耗电极完全位于辅助工艺型腔时,移动自耗电极电流与横截面积的相互匹配仍然是固定自耗电极充填法电渣熔铸工艺设计的关键。

#### 4.2 电极间距

电极间距是指两个电极之间的距离,如图 2 中  $l_E$  所示。 $l_E$  越大,两个电极之间金属熔池越浅,移动自耗电极熔化的金属熔体向固定自耗电极下金属熔池补充通道的截面积越小,严重时两个金属熔池不连通,将导致固定自耗电极断路,熔铸过程无法进

行。 $l_E$  一定的条件下,电流密度越大,两熔池越容易连通。故  $l_E$  越小越有利于获得稳定的电渣过程与高质量的铸件。

### 5 结论

(1)当铸锭尺寸为 400 mm×70 mm×200 mm 时,固定自耗电极充填法熔铸稳态时移动电极中心熔池深度最大,两电极间距中心熔池深度最小;金属熔池空间形状呈倒置的驼峰形,移动自耗电极对应的金属熔池的驼峰更高。

(2)熔池形状和尺寸的数值模拟结果与实验结果基本吻合,验证了模拟程序的准确性。

(3)移动自耗电极电流密度的增大,金属熔池深度增大;移动自耗电极横截面积所占的比例的减小,移动自耗电极对应的“驼峰”变得尖锐。移动自耗电极电流密度与横截面积的相互匹配是固定自耗电极充填法电渣熔铸工艺设计的关键。

#### 参考文献:

[1] Hoyle G. Electroslag Processes Principles and Practice [M]. London:Applied Science Publishers,1983.  
 [2] Li Z B. Electroslag Metallurgy Theory and Practice [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.  
 [3] Nafaziger R H. The Elecyslag Melting Process[M]. Bulletin:Unit-

ed States Bureau of Melting,1976.

[4] Dong Y W, Zheng L C, Jiang Z H. Mathematical modelling of producing hollow ingot by electroslag casting with liquid metal[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2013, 40(2):153-158.

[5] DONG Yan-wu, JIAN Zhou-hua, LI Zheng-bang. Mathemstical model for electroslag process[J], Journal of Iron and steel Reserch, International, 2007,14(5):07-12.

[6] 张磊, 尧军平, 陈炳坤, 等. 电渣熔铸过程渣池深度对金属熔池影响的数值模拟研究[J], 南昌航空工业学院, 2005, 19(2)23-27.

[7] 刘双, 贺铸, 蔡辉, 等. 不同工艺参数下电渣重熔过程的数值模拟[J], 钢铁研究学报, 2015, 27(10)26-33.

[8] Liu F B, Chen X, Jiang Z H, et al. Numerical simulation of solidification structure during electro slag remelting casting of ZG06Cr13Ni4Mo ingot based on CAFE and moving boundary method[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2016, 5(16): 53-62.

[9] 杨明. 固定自耗电极充填法熔铸的数值模拟[D]. 锦州: 辽宁工业大学材料科学与工程学院, 2017.

[10] 单美龙, 王芳, 李宝宽, 等. 电渣重熔过程中焦耳热与温度场的有限元分析[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(S1): 123-128.

[11] Qiang WANG, Baokuan LI. Numerical Investigation on the Effect of Slag Thickness on Metal Pool Profile in Electroslag Remelting Process[J]. ISIJ Int., 2016, 56(7): 282-287.

# 河北省冀州市华北铸钉铸造工具总厂



冀州市华北铸钉铸造工具总厂座落于河北省冀州市城南白庄工业区, 紧靠全国大动脉京九、石梅铁路, 交通十分便利。我厂是生产铸顶(泥芯撑)、羊毛掸笔、硬扫笔、圆水笔的专业厂家。建厂36多年来, 技术设备先进, 产品销往全国各地, 深受用户欢迎。本厂始终承诺: 诚信至上, 守信誉, 质高价低, 实行三包, 交货及时, 代办发运, 可供图订做。热情欢迎国内外人来电选购。

## 四同

同类产品比质量 同等质量比价格  
同样价格比服务 同等服务比速度

## 两免

免费为客户提供产品技术咨询  
免费为客户提供初期试用产品

### 一、常用修造工具规格(材质为不锈钢或弹簧钢)

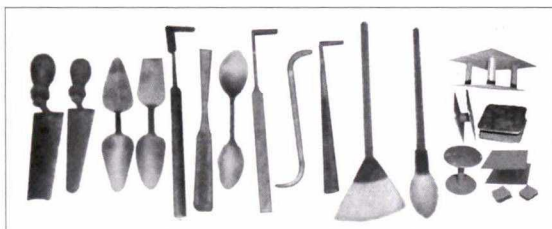
/mm

名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格
刮刀	2#	160×45	秋叶	1#	180×30	三角光子	2#	50×30	东北压钩	1#	270×50
尖刮刀	3#	140×35	单头钢批	2#	240×22	蛋圆光子	1#	75×50	圆型钩	2#	200×30
提钩	2#	350×15	单头钢批	3#	210×20	压钩	1#	270×50	长把压钩	1#	220×30
提钩	4#	300×10	法兰钩	1#	270×14	压钩	2#	240×45	柳叶钩	1#	240×40
钢批钩	1#	280×16	榔头铲	1#	240×24	单齐压钩	2#	240×45	单开提钩	2#	320×12

二、掸笔、硬扫笔: 20~120 mm 10个品种; 圆水笔: 12~17 mm 3个品种;

三、铸顶(芯撑)有圆、方、长方形, 单、双、多柱、异形铸顶等各种铸铁、铸钢用铸顶材质为A3或A3F, 表面镀锌、镀锡等;

四、过滤网、木型工具、皮风箱、铸尺、百叶轮、角磨片、树脂油、固化剂、粘结剂、木型锤等。



图中从左至右依次为: 1.刮刀 2.尖刮刀 3.压勾 4.单齐压勾  
5.提钩 6.单头钢批 7.秋叶 8.单开提钩 9.法兰钩 10.钢批钩  
11.掸笔、扫笔 12.圆水笔 13.铸顶

## 诚征各地代理商

厂址: 河北省冀州市城南白庄工业区(053200) 联系人: 白英韩 13831863803 白其水 13582484193 (中国农行金穗卡, 户名: 白英韩 卡号: 9559982130332490310)  
电话/传真: 0318-8682135 网址: www.hbzhz.com E-mail:hbbyh@hbzhz.com 银行汇款: 冀州市华北铸钉铸造工具总厂 开户行: 市中行 帐号: 100148643069

### 经销处

哈尔滨市铸材门市部 13831863803 包头市铸材经销处 13633184318  
杭州市中亚铸材有限公司 13932860882 贵阳市忠信铸材公司 13831888322  
长沙市铸材办事处 13831823340 西宁市铸材办事处 13931810511  
上海市铸材办事处 13932894585 南宁市铸材办事处 0771-8994686

本单位为一般纳税人, 增值发票税率17%。