

# 锰硅铁合金冶炼电弧炉中焦炭层电流分配行为的模拟

翟丹, 储少军, 李忠思, 贺瑞飞

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 根据锰硅铁合金冶炼电弧炉内焦炭层熔池的结构特征及相似理论, 设计了研究熔池导电行为的模拟实验装置. 以电导率为 10.08~17.97 mS/cm 的 NaCl 水溶液和冶金焦粒模拟实际锰硅铁合金冶炼电弧炉熔池内的导电相, 研究了冶炼过程熔池内电流在焦炭层与熔渣之间的分配关系. 结果表明, 焦炭层厚度  $H_c$ 、焦炭粒度  $D_c$  和导电相的电导率(固相  $\rho_c$ , 液相  $\rho_l$ )与通过熔池底部电流( $I_b$ )和总电流( $I_t$ )之比  $I_b/I_t$  的关系式为  $I_b/I_t=4.36(\rho_l/\rho_c)^{1.523}(D_c/H_c)^{0.186}$ ,  $I_b/I_t$  随熔融层操作电阻的增大而变小, 与锰硅铁合金实际生产状况一致.

**关键词:** 锰硅铁合金; 电弧炉; 焦炭层; 电流分配; 熔融层操作电阻; 模拟

**中图分类号:** TF62      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2008)03-0449-04

## 1 前言

锰硅铁合金生产中焦炭层与熔融渣的性质决定了冶炼电弧炉炉膛内星形电流和角形电流的比例, 这二种电流应根据产品的要求合理分配, 以满足电弧炉内配热系数的要求. 研究<sup>[1,2]</sup>表明, 锰硅铁合金冶炼电弧炉中由电极侧面通过焦炭层流向另外 2 支电极的角形电流和由电极下部流向炉底的星形电流之比为 70:30. 此外, 无焦炭层时埋弧电炉熔池内电流分布随电极间距扩大及电极插入深度的增加而上升, 随电极直径增大及熔池深度的增加而减小<sup>[3]</sup>. 但当焦炭层与熔渣层性质发生改变时, 涉及锰硅铁合金冶炼电弧炉炉膛内星形电流与角形电流分配规律的变化未见文献报道.

本工作采用冷态模拟方法研究了焦炭粒度、焦炭层厚度、焦炭电导率和熔渣电导率对电流在焦炭层与熔渣层之间分配的影响. 针对焦炭层与熔渣层的导电性质, 提出了“熔融层操作电阻”的概念, 确定了影响其变化的主要因素及其与模拟研究中电流分布的关系.

## 2 实验

### 2.1 材料与试剂

工业用冶金焦(石家庄钢厂), NaCl 水溶液(电导率 10.08~17.97 mS/cm), Si17Mn65 冶炼炉渣(山东良达铁合金厂 6.3 MW 锰硅铁合金冶炼电弧炉生产, 成分见表 1), 电导率为 1000 S/cm 的石墨电极(青岛持久石墨制品厂).

表 1 Si17Mn65 合金冶炼炉渣成分

Component	MnO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Others
Content (% w)	7.59	32.20	17.80	5.77	26.89	2.85	6.90

### 2.2 仪器与设备

TDGC-2 型自耦变压器(功率 2000 W, 测量范围 0~5 A, 北京调压器厂), VBO 三位半 LED 交流电流表(精度 ±0.01 A, 北京东方韦博电器有限公司), DT9203A 数字万用表(精度 ±0.01 V, 测量范围 0~750 V, 深圳市海地实业有限公司), DDB-6200 型电导仪(测量范围 0~20 mS/cm, 上海雷磁公司). 模拟实验电气线路见图 1, 实验装置见图 2.

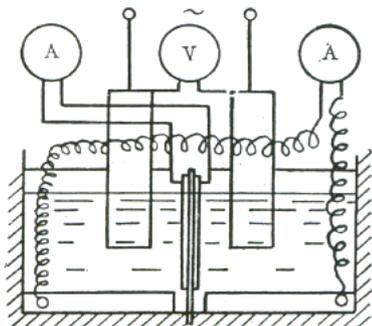


图 1 电流分布测量线路图  
Fig.1 Schematic diagram of current distribution measurement in simulated molten pool



图 2 实验装置图  
Fig.2 Experimental apparatus

收稿日期: 2008-02-29, 修回日期: 2008-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 50274013)

作者简介: 翟丹(1974-), 男, 辽宁省鞍山市人, 博士研究生, 钢铁冶金专业; 储少军, 通讯联系人, Tel: 010-62332790, E-mail: chushaojun@metall.ustb.edu.cn.

## 2.3 实验模型的设计

本实验借鉴文献[3]有渣熔池冷态模型,应用相似理论设计二相电极的熔池模拟装置.实验要求在实物和模型中所发生的现象相似,则必须使实验室模型既要满足几何尺寸相似,也要满足物理相似,即在空间上的相似点和在时间上的相似瞬间对应变量之比保持不变<sup>[4]</sup>.研究电炉短网电抗的模型与实物之间的相关参数 $IT$ 可按如下相似准则来确定<sup>[5]</sup>:

$$IT = \omega \sigma \mu^2. \quad (1)$$

若模型采用与实物相同的材料制作,要建立合理尺寸的实验室模型,则可通过提高电流频率的方法实现.但对于本工作的冷态模拟实验,由于导电材料在不同温度下的电学、磁学特性有很大差异,很难采用与实际生产相同的材料进行研究.因此在不改变电流频率的条件下,通过改变实验材料来调整材料的电导率和磁导率,对实际锰硅铁合金冶炼电弧炉进行物理模拟.根据式(1),模型与实物尺寸比例 $m$ 可写成:

$$m = l'/l'' = \sigma''\mu''/(\sigma'\mu'). \quad (2)$$

对于不同的物质,无论是顺磁质还是抗磁质,其相对磁导率 $\mu_r$ 均接近1,磁导率 $\mu = \mu_r/\mu_0$ , $\mu_0$ 表示真空磁导率,其数值为常数<sup>[6,7]</sup>.式中的 $\mu''/\mu' \approx 1$ ,计算中可忽略不计.实际生产中所用自培电极是由电极糊焙烧而成的,其电导率可参考焦炭在冶炼温度(1600℃左右)下的最大值(1 S/cm)<sup>[8]</sup>,本实验模型所采用的石墨电极在常温下的电导率为1000 S/cm左右.因此,根据式(2)确定本实验模拟设备与山东良达铁合金厂6.3 MW 锰硅铁合金冶炼电弧炉的尺寸比例为1:30.

由于本实验的主要目的是研究锰硅铁合金矿热炉内电流在焦炭层与熔渣层之间的分配关系,因此实验要满足冷态焦炭电导率与溶液电导率之比与实际生产冶炼温度下的焦炭电导率与熔渣电导率之比相近.

表1的炉渣成分的电导率为0.1~0.36 S/cm<sup>[9]</sup>,小块冶金焦在1600℃时(硅锰合金冶炼时的大致温度)电导率约为1 S/cm左右<sup>[8]</sup>.可见硅锰合金冶炼温度下焦炭的电导率远高于炉渣,二者比值约为2.78~10.冷态模拟实验中采用的焦炭电导率为98.2 mS/cm<sup>[10]</sup>,不同浓度NaCl溶液的电导率变化范围在10.08~17.97 mS/cm之间.冷态焦炭与NaCl溶液的电导率比为5.46~9.74,基本与实际硅锰合金生产中焦炭与炉渣电导率的比接近.

## 2.4 实验方案

选择焦炭层中不同的焦炭粒度、焦炭层厚度和NaCl溶液的电导率,测量角形电流、星形电流和回路中总电流的大小,然后在上述实验条件下,改变电极插

入深度测定其角形电流与星形电流,同时记录此时的输入电压,由输入电压与回路中总电流之比计算熔融层的操作电阻.

## 2.5 实验数据处理方法

本实验中所涉及的变量较多,且需依靠实验方法建立经验关联式.为此,采用因次分析法对实验数据进行处理<sup>[11]</sup>.具体步骤是,熔池深度、电极插入深度、电极直径及电极间距固定的条件下,找出焦炭层影响 $I_b/I_t$ 变化的主要因素,如焦炭粒度、焦炭层厚度、焦炭电导率及电解液的电导率,得到 $I_b/I_t$ 与上述因素的一般函数式:

$$I_b/I_t = f(\rho_L, \rho_C, D_C, H_C), \quad (3)$$

用幂函数形式可表示为

$$I_b/I_t = A \rho_L^a \rho_C^b D_C^c H_C^d, \quad (4)$$

式中,系数 $A$ 和指数 $a, b, c, d$ 待定.

将各物理量的量纲代入式(4),根据量纲一致性的原则,上式等号两侧各基本量量纲的指数必须相等,将指数相同的各物理量归并在一起,得:

$$I_b/I_t = A(\rho_L/\rho_C)^a (D_C/H_C)^c. \quad (5)$$

将所得实验数据代入上式,即可求出常数 $A$ 及指数 $a, b, c, d$ ,从而得出 $I_b/I_t$ 随各量变化的关系式.

## 3 实验结果和讨论

### 3.1 焦炭粒度与厚度比对熔池内导电行为的影响

实验模型中,保持电解液及焦炭的电导率不变,焦炭粒度( $D_C$ )改变或焦炭层厚度( $H_C$ )改变对 $I_b/I_t$ 的影响结果如图3所示.从图可以看出 $I_b/I_t$ 随 $D_C/H_C$ 的增加而减小.造成 $D_C/H_C$ 增加有2个原因,一是焦炭层中焦炭粒度增加,二是焦炭层厚度减小.当焦炭粒度增加时,焦炭的结构电阻变小,由于电极之间导电相主要是焦炭,故在总电流不变的情况下,使流经电极侧面的电流变

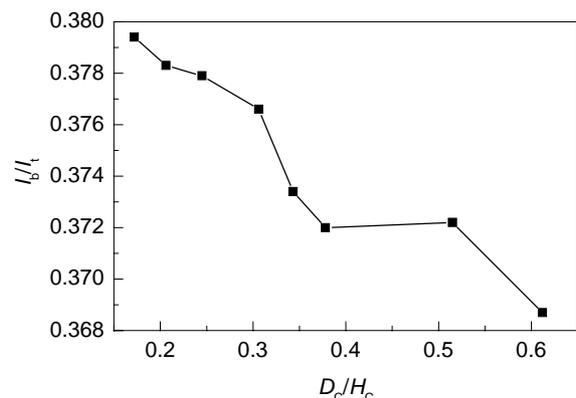


图3  $I_b/I_t$ 与 $D_C/H_C$ 的关系

Fig.3 Relationship between  $I_b/I_t$  and  $D_C/H_C$

大, 流经电极端部的电流变小. 当焦炭层厚度减小时, 由于焦炭的导电率大于溶液的导电率, 因此在不改变熔池总深度而使焦炭层厚度减小时, 电极端部与熔池底部间距离增加, 电阻变大, 故在总电流不变的情况下, 流经熔池底部的电流减小.

### 3.2 熔渣与焦炭层电导率比对熔池内导电行为的影响

当实验模型中焦炭粒度与焦炭层厚度不变时, 电解液与焦炭的电导率比对  $I_b/I_t$  的影响结果如图 4 所示. 从图可知,  $I_b/I_t$  随  $\rho_L/\rho_C$  的增加而增加. 这是由于随着溶液电导率的增加, 电极端部与溶池底之间的电阻变小, 造成流经溶池底部的电流增大; 而当焦炭层电导率变小时, 焦炭的结构电阻变大, 流经电极间的电流相对变小, 使  $I_b/I_t$  增大.

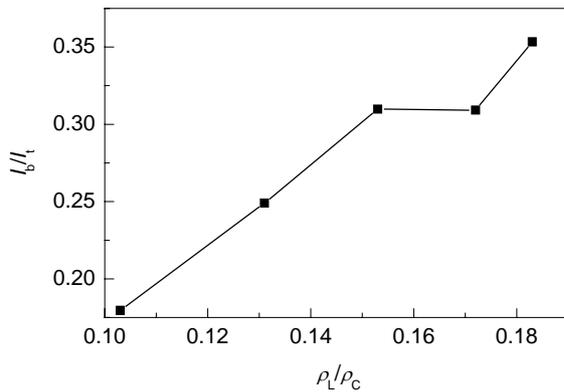


图4  $I_b/I_t$  与  $\rho_L/\rho_C$  的关系

Fig.4 Relationship between  $I_b/I_t$  and  $\rho_L/\rho_C$

### 3.3 数据回归结果及分析

将图 3, 4 的实验结果代入式(5)进行回归, 可得

$$I_b/I_t = 4.36(\rho_L/\rho_C)^{1.523}(D_C/H_C)^{0.186}. \quad (6)$$

上式明显反映出  $I_b/I_t$  随溶液电导率及焦炭层厚度的增加而增加, 随焦炭电导率及焦炭粒度的增加而减小, 此规律与实验所得数据变化规律相符. 由于式(6)中各项系数与指数均是针对本实验所用实验原料得出的结果, 不能直接应用于实际生产. 但根据相似原理, 式(6)可定性描述锰硅铁合金冶炼工艺中炉料组成及炉料级配与锰硅铁合金矿热炉炉内电流在焦炭层与熔渣层之间的分配关系.

### 3.4 “熔融层操作电阻”对熔池导电规律的影响

在铁合金生产中, 一般是通过调节“操作电阻”来对炉况进行调整. 所谓的“操作电阻”就是指每相电极有效相电压与电极电流之比, 也可认为是由炉料电阻与熔池电阻构成的并联电阻<sup>[8]</sup>. 炉内“操作电阻”的大小直接影响矿热炉内的热分配系数, 对矿热炉的顺行有直接影响. 实际生产中, 可通过改变电极插入深度或调整

炉料配比对“操作电阻”进行调整. 同理, 可以定义锰硅铁合金冶炼中由固态焦炭层电阻及液态熔渣层电阻组成“熔融层操作电阻”, 对锰硅铁合金矿热炉内角形电流与星形电流的分配有着同样重要的影响. 本实验通过改变电极插入深度或熔池内溶液电导率, 测量不同输入电压对应的 2 种电流值, 由此计算出“熔融层操作电阻”, 其与  $I_b/I_t$  的关系如图 5 所示. 由图可知, 当电极没有插透焦炭层,  $I_b/I_t$  总的变化趋势是随着“熔融层操作电阻”的增大而减小. 实验证明, 改变熔渣电导率调整“熔融层操作电阻”的方式比改变电极插入深度调整“熔融层操作电阻”的方式对  $I_b/I_t$  的影响更明显.

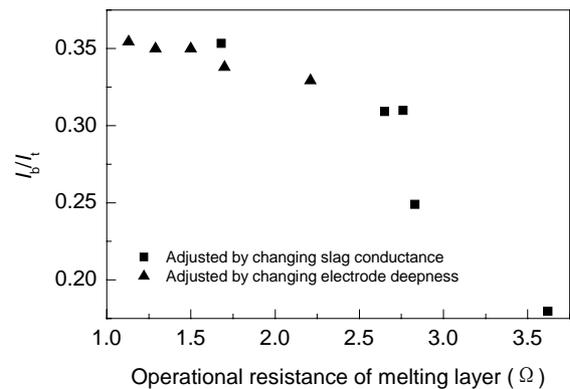


图5  $I_b/I_t$  随熔融层操作电阻的变化

Fig.5 Variation of  $I_b/I_t$  with operational resistance of melt layer

## 4 模拟结果与实际过程比较

实际生产中, 电极插入的深度是有限的. 因此对于矿热炉操作电阻的控制大多是通过调整炉料结构来实现. 实际生产中, 渣中的  $Al_2O_3$  含量在 7% 左右时, 产品电耗、矿耗最低, 金属回收率最高<sup>[12,13]</sup>. 由于熔渣的导电性质主要是由  $Al_2O_3$  含量决定的, 流经矿热炉炉底的星形电流随熔渣电导率的增加而增大, 如图 4 所示. 在锰硅铁合金生产中, 当  $Al_2O_3$  含量较多时, 熔渣导电能力较差, 即熔池的电阻较大. 在二次电压一定时, 通过熔池底部的电流较少, 产生的热量不足. 此时虽然电极易深插, 但由于熔渣温度过低, 熔渣粘度大, 使渣中  $SiO_2$  和  $MnO$  传质速度减慢, 降低了 Mn 和 Si 的还原速率<sup>[14]</sup>, 而且出炉不顺畅, 渣铁分离不好. 随着  $Al_2O_3$  含量的下降, 熔渣导电能力提高, 熔渣获得的热量增加, 温度升高, 粘度降低, 使熔渣与焦炭层的接触与反应良好, 提高了金属的收率. 当  $Al_2O_3$  的含量进一步下降, 熔渣导电能力进一步升高, 会使底部电流比例过大, 金属液与熔渣过热, 造成出铁过程锰的挥发, 而焦炭层反应需要的热量不够, 炉料还原性差. 上述 2 个原因均会造成金属收率下降, 单位产品能耗上升. 因此将渣中

$\text{Al}_2\text{O}_3$  含量调整在一定范围内, 使熔渣导电能力合适, 才能达到降低电耗、提高金属收率的生产效果. 此外, 从图 5 可以看出, 在电极插入深度不越过焦炭层的操作条件下, 通过调整熔池内溶液电导率对  $I_b/I_t$  的调节能力远大于通过调整电极插入深度对熔池内电流分配的调节能力. 因而, 调节熔渣的电导率, 主要应考虑调整渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量, 这对于正常炉况的调节更为重要.

## 5 结论

(1) 经对锰硅铁合金冶炼电弧炉模拟研究, 得到通过锰硅铁合金冶炼电弧炉底部电流  $I_b$ 、输入的总电流  $I_t$  与焦炭层中焦炭粒度  $D_C$ 、焦炭层厚度  $H_C$ 、焦炭电导率  $\rho_C$  及熔渣电导率  $\rho_L$  的变化规律可表示为  $I_b/I_t = 4.36(\rho_L/\rho_C)^{1.523}(D_C/H_C)^{0.186}$ .

(2) 锰硅铁合金冶炼, 熔渣的电导率应有最佳值, 对应渣中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量也有最佳值, 使生产产量最高, 电耗、矿耗最低.

(3)  $I_b/I_t$  随着“熔融层操作电阻”的增大而减小, 即  $I_b/I_t$  随炉膛内软熔层的上移而减小. 改变熔渣电导率比改变电极插入深度对  $I_b/I_t$  的影响大得多.

符号表:

$D_C$	焦炭的直径 (mm)
$H_C$	焦炭层的厚度 (mm)
$I_b$	由电极端部流向熔池底部的电流 (A)
$I_t$	输入的总电流 (A)
$l$	特征几何尺寸 (mm)
$m$	模型与实物尺寸比例
$\Pi$	模型与实物的相关系数
$\mu$	介质的磁导率 (H/m)
$\rho_C$	焦炭的电导率 (mS/cm)

$\rho_L$	溶液的电导率 (mS/cm)
$\sigma$	材料的电导率 (S/m)
$\omega$	角频率 (Hz)
上标	
'	实物
"	模型

参考文献:

- [1] 《铁合金》编辑部. 硅锰合金电炉熔炼区的结构及其工艺特点 [J]. 铁合金, 1976, 7(4): 58–62.
- [2] Izawa T, Nakamura T. 新泻厂硅锰合金冶炼的进展 [J]. 李岩, 译. 铁合金, 1983, 14(2): 44–54.
- [3] 斯特隆斯基 B M. 矿热熔炼炉 [M]. 《矿热熔炼炉》翻译组, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1980. 69–107.
- [4] 张先焯. 冶金传输原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 181.
- [5] 花皓, 梁正敏. 炼钢电弧炉的电气设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 84–85.
- [6] 胡盘新. 大学物理手册 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2001. 562.
- [7] 吴王杰, 王晓, 蒋敏. 大学物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 309.
- [8] 林仪媛, 庄厚生, 徐忠厚. 提高炭质还原剂质量的途径 [J]. 铁合金, 1983, 14(1): 21.
- [9] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984. 196.
- [10] 储少军, 翟丹, 杨巍, 等. 粒状焦炭结构电阻的初步研究 [J]. 铁合金, 2005, 36(1): 3–4.
- [11] 谭天恩, 麦本熙, 丁惠华. 化工原理(上册) [M]. 北京: 化学工业出版社, 1984. 45–47.
- [12] 王健, 朱志伟. 硅锰渣中(CaO+MgO)/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  比值的控制与渣型的选择 [J]. 铁合金, 1990, 21(2): 17.
- [13] 张玉驰, 王悦华. 低渣比冶炼锰硅铁合金的条件与操作要点 [J]. 铁合金, 2004, 35(6): 15–17.
- [14] 雷斯 M A. 铁合金冶炼 [M]. 周进华, 于忠, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1981. 146.

## Simulation of Current Distribution in Manganese–Silicon Ferroalloy Smelting Arc Furnace with Coke Layer

ZHAI Dan, CHU Shao-jun, LI Zhong-si, HE Rui-fei

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A simulation device for investigating the behavior of current distribution was designed according to the structure characteristic of coke layer molten pool in manganese–silicon ferroalloy smelting arc furnace and similarity theory. NaCl solution with the specific conductance of 10.08–17.97 mS/cm and coke were used as the electric conduction phase to simulate the behavior of electric conduction in manganese–silicon submerged arc furnace. The current distribution relationship of the total current between coke layer and molten slag layer was measured in the molten pool. The results indicated that the relationships among the depth of coke layer,  $H_C$ , the granularity of coke,  $D_C$ , the conductivities of electric conduction phases (both in solid and liquid phases,  $\rho_C$  and  $\rho_L$ ), the ratio of current through the bottom of molten pool  $I_b$  to total current  $I_t$  followed the following equation, i.e.,  $I_b/I_t = 4.36(\rho_L/\rho_C)^{1.523}(D_C/H_C)^{0.186}$ . When operational resistance of melting layer increased,  $I_b/I_t$  would decrease, which was in accordance with the actual process of manganese–silicon ferroalloy production.

**Key words:** manganese–silicon ferroalloy; arc furnace; coke layer; current distribution; operational resistance of molten layer; simulation