

# 等离子炉精炼硅铁

邱波

(吉林铁合金厂)

叙述了在一台1000kW直流转移弧等离子炉中精炼硅铁的情况。通过该炉精炼后硅铁中Al、Ca、C等杂质有很大程度的降低,探讨了杂质去除的机理。

## REFINING OF FERROSILICON IN A PLASMA FURNACE

Qiu Bo

(Jilin Ferroalloy Works)

Experiments of ferrosilicon refining in a 1000kW D.C.transfer arc plasma furnace is described in this paper. After refining, impurities of Al, Ca and C in metal was lowered considerably. The mechanism of impurity removal are also discussed.

### 一、绪言

等离子体是一种能量密度很高的热源,其本身的电离状态,对周围反应物具有很强的激活能力。利用等离子炉精炼铁合金,国外已作了很多工作。从有关资料上看,等离子体应用于铁合金生产中确实得到了令人鼓舞的结果。等离子弧技术提供了一种新的处理合金的方法,它改善了传统的冶金过程,提高了冶金效率。

我们应用等离子炉进行了硅铁精炼的初步研究。在这一半工业实验中,是通过钻有中心孔的石墨电极引入需要的工作气体,以获得稳定性和定向性都优于传统炭素电极的高温等离子弧。这种等离子弧可以拉得很长,功率可以控制得很高。在等离子炉中进行的硅铁精炼试验取得了令人满意的结果。

### 二、直流转移弧等离子装置

#### 1. 等离子炉

精炼硅铁的试验是在我们自己设计制造的1000kW直流等离子炉中进行的。阴极

用石墨电极或水冷钨极。阳极也可是石墨或钢质非水冷的,熔炼时它被金属熔体所覆盖。等离子弧功率大部分集中于阳极熔体中,所以,此炉我们称之为直流转移弧等离子炉。

等离子炉由交直流两用电源供给直流电。炉体直径为1500mm,炉壳内衬有耐火材料。空心电极即喷枪,位于炉膛中心上方,穿过水冷炉盖作用于熔池物料。等离子载体(氩气或氮气)的流量取决于操作功率,一般控制在0.6—2.0Nm<sup>3</sup>/h。Φ250mm石墨底阳极穿过炉底中心耐火材料与熔池直接接触。炉顶有四个孔,中心孔为电极或喷枪插入孔,一个窥视孔,两个下料孔。炉料可通过炉门一次加料,也可通过振动给料器由下料管连续或间断给料。

熔炼硅铁时,操作弧电流1000—2800A,弧电压150—200V,弧长控制在100—200mm。连续冶炼时,一小时左右出一次炉,每炉可熔炼75%硅铁300—400kg。等离子炉设有可控制炉内气氛和压力的烟气调控系统。试验中证实了采用残留铁水的操作,可

避免因使用石墨底阳极而使合金增碳。

## 2. 石墨等离子枪

用空心石墨电极作等离子枪。由于它不具有压缩载体的作用，所产生的等离子弧的功率密度相对较低，因而适合熔炼熔点不十分高的合金和金属。其主要特点是不需要水冷和无须考虑枪的使用寿命。

空心石墨电极形成等离子弧的特性是：在炉内处于冷态或阴极本身是冷态时，即使加入载体也不会产生等离子体。因为这时阴极放电斑点呈收缩型在端头表面紊流移动，呈现不稳定电弧束，此时不具备充分电离和热分解气体的条件。随着阴极温度的提高和电场的增强，通入载体后，就可使电弧平静而且稳定；即使流量很低，电弧的表观特性也会得到显著的改善，明显的阴极斑点收缩现象就会消失，形成扩散电弧等离子体，弧光也可拉得很长。

## 三、硅铁重熔精炼结果

75%硅铁杂质元素较多，其中主要杂质为Al、Ca。对于特殊电工用途的高牌号硅钢所需要的硅铁，除要求Al、Ca低外，还必须使碳杂质达到有限的微量。为了满足这种要求，铁合金行业普遍采取两种手段，一是在冶炼原料上解决，二是炉外精炼法解决。

第一种方法对原材料要求严格，工艺不好控制，而且产品也需要二次处理。第二种

方法又包括吹氧法、冲渣法。吹氧法脱铝降碳效果较好，但合金氧化多。冲渣法需要合理的渣型配比、合适的反应条件，但脱铝率波动范围大，降碳不理想。这两种方法虽然简单、经济，但成品率和合金回收率偏低，成分不稳定。

利用普通硅铁粉料或块料在等离子炉中进行的精炼获得了令人兴奋的结果。实验中，即使没有加入任何渣料，也没有采取氧化手段，同样收到了精炼效果，硅铁中Al、Ca、C等杂质有很大程度的降低。

为了证实等离子体对硅铁具有良好的精炼作用，我们首先进行了不加载体的直流弧重熔硅铁的精炼试验，试验结果见表1。

表1 直流弧重熔硅铁效果

项 目	加入合金量, kg	合金成分, %				脱铝率 %	脱钙率 %
		Si	Al	Ca	C		
重熔前		76.0	1.0	1.0	0.24		
重熔后 1	180	75.57	0.57	0.09	—	43	91
重熔后 2	150	74.62	0.67	0.09	—	33	91

表中结果可以说明，直流弧重熔具有部分精炼作用。有人提出直流弧有利于合金的精炼这一点，是说直流粒子的均匀和均向性可以使熔池产生均匀而稳定的温度场；此外，由于电弧磁场的动力学影响，炉底阳极温度高于阴极等特点，使合金中的杂质传质加快，保证了合金中杂质一定的去除率。这

表2

氩等离子弧重熔精炼硅铁试验结果

炉 号	气体流量 Nm <sup>3</sup> /h	重熔前合金成分, %				重熔后合金成分, %				装入量, kg
		Si	Al	Ca	C	Si	Al	Ca	C	
D-1	0.6—1.25	78.0	1.5	1.0	0.20	76.06	0.40	0.06	0.06	250
D-2	0.8—1.5	"	"	"	"	76.26	0.34	0.05	0.03	200
D-3	0.8—1.25	"	"	"	"	77.39	0.40	0.055	0.03	200
D-4	0.8—1.5	"	"	"	"	73.03	0.24	0.03	0.02	100
D-5	0.8—1.5	"	"	"	"	74.64	0.30	0.02	0.02	200

一结果与利用其他冶金设备或其他方法精炼硅铁一样,与系统中的平衡浓度有关。

应用等离子炉精炼硅铁的实验结果见表

2。这一组试验为5炉次。炉料破碎至80mm以下,并一次性装入炉内。氩气为载体,气体流量控制为0.6—1.5 Nm<sup>3</sup>/h。

表3 等离子体精炼硅铁的另一组试验数据

炉号	载体种类	气体流量 Nm <sup>3</sup> /h	原合金成分, %				重熔后合金成分, %			
			Si	Al	Ca	C	Si	Al	Ca	C
D-8	N <sub>2</sub>	0.6—1.5	75.4	1.10	1.0	0.18	72.65	0.195	0.03	0.03
D-9	N <sub>2</sub>	"	"	"	"	"	73.76	0.265	0.03	0.03
D-10	Ar	"	"	"	"	"	73.35	0.295	0.03	0.02
D-11	Ar	"	"	"	"	"	72.70	0.335	0.03	0.02
D-12	Ar	"	"	"	"	"	72.69	0.225	0.03	0.015

从试验数据中可以看出,经过精炼硅铁中Al、Ca、C显著降低。与表1比较,这种良好的精炼条件,证实了等离子体具有较强的脱碳能力。

表3是另一组硅铁精炼结果的数据。这组试验调整了载气流量范围,其中两炉使用氮气为载体,其他条件未变。

这组试验中,炉号8、12达到最大的降铝降碳效果,碳的去除率不仅显著,而且稳定,合金中硅的平均收得率为97%左右。同时还发现,精炼效果与通入工作载体的流量有关,气体流量控制在一定的值,其精炼结果波动也很小。

#### 四、分析与讨论

在直流等离子炉中熔炼与精炼的重要特点是没有炉料造成的困难,使用空心石墨电极熔炼导电磁较差的金属接触引弧也很容易。

在埋弧炉中,料层可使升温时产生的易挥发物质冷凝及在炉中循环而形成二次杂质;而等离子炉中存在的超高温及强化学活性的等离子体,加之设有可调控炉气的排烟系统,非常有利于精炼过程中通过气相反应去除杂质。

硅铁精炼中,等离子炉的降碳效果与吹氩精炼合金工艺极为相似<sup>[1]</sup>。但由于等离

子气氛中的原子态、离子态、分子态的不同气体的“激活作用”,其携带杂质和脱气的能力要比吹气精炼强得多。氩等离子体的复盖及在界面上的复合,使熔池区气相压力降低,保证了碳氧亲和力随着气相压力的降低而增强,形成气态CO去除的条件。所以说,等离子冶金中的主要特点之一就是具有强脱碳能力。同样,某些其他杂质的气相去除也有着相似的过程。

用等离子炉精炼与经典方法不同之处是等离子体有较强的动力学条件。尽管用石墨枪作用于出口等离子体上的外力和压力的合力不明显,但等离子体整体运动在熔池表面出现的“阳坑”表明,等离子弧具有十分理想的动力学条件,当然这还取决于其他因素。不仅如此,等离子体从阴极向阳极的“流动”除具有重力、压力降和离心力及电机械力外,它所产生的电磁场与周围介质进行的能量交换结果对冶金过程中的“传质”是有影响的<sup>[2]</sup>,这无疑有利于精炼过程杂质的去除。

精炼中熔体受到等离子弧诸多力的影响而引起熔化池的搅拌作用见图1。熔体在等离子弧下沿着炉底向下运动并返回熔体表面,增大了熔体精炼的表面积和速度。

在相同时间、相同电气制度下,有等离子体和无等离子体参与的精炼反应情况见图

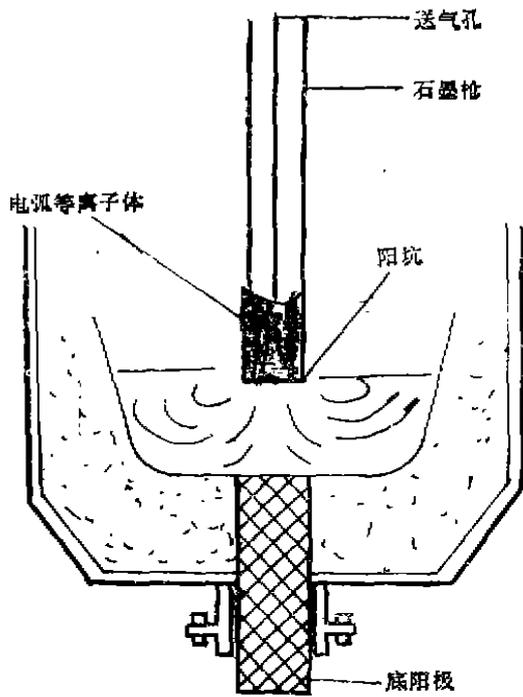


图1 电弧等离子体搅拌熔池示意图

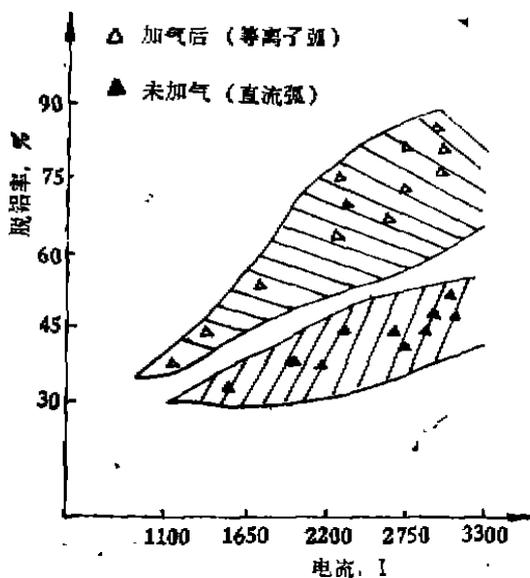


图2 等离子体精炼硅铁的效果

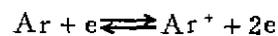
2. 结果表明, 等离子体参与的硅铁精炼效率比单纯电弧(直流)平均高30%以上, 说明等离子体参与了冶金物化过程。

在等离子炉中, 提供的温度可比一般的冶金温度高几千度至一个数量级。这样高的

温度范围可满足难于进行的各种化学反应过程, 同时又可广泛地用于等离子化学中, 即“在等离子体有激发的分子、原子、离子和基团参与冶金化学反应”(3)。

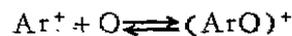
用氩气作载体, 在温度小于气体电离、激发温度时, 可认为是不参与任何反应的惰性气体。而一旦氩气变成带电荷的离子  $Ar^+$ 、并与电子或离子团以等离子体出现在冶金过程, 它便以很高的能量和极活泼的气氛成为冶金反应的化学动力(3)。

氩气受电离的型式为(4)



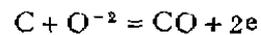
这些电离的粒子具有很高的活化能和组元结合能。这是等离子冶金的另一重要特点。

在有氧存在时, 氧同样得到分解、电离。即:  $O_2 \rightarrow 2O \rightarrow 2O^+$  (也有负氧离子)。所以, 离子  $Ar^+$  与原子氧  $O$  或离子氧  $O^+$  按下式反应形成  $(ArO)^+$  离子团是不难理解的(3)。



在等离子冶金过程中, 或多或少均有一定数量的氧参与反应。在等离子体周围, 氧主要以原子氧或离子形式存在。对使用“金属枪”及某些冶金反应则要求控制氧的含量, 而对于某些精炼反应, 提高氧的浓度则可提高其活性。

总之, 在等离子炉中进行的硅铁精炼结果, 除上述已谈到的等离子体可提高冶金速率的物理作用外, 等离子体参加化学反应而导致下列金属元素相互提供反应所需的电子而被氧化的精炼过程更激烈(5)。即:



(下转28页)

$\delta \geq 0.5-1 \text{ kg/cm}^2$  就不会打弧。

3. 计算拉杆的拉力  $T(\text{kg})$

$$T = Ntg(\alpha + \rho) + Q$$

式中,  $\alpha$  为锥压环的斜角, 一般为  $8-15^\circ$ ;

$\rho$  为锥压环与导电瓦的摩擦角, 一般为  $8-11.5^\circ$ ;

$Q$  为拉杆承吊的重量 (公斤), 包括拉杆及锥压环的重量及水重。

4. 按弹簧最大工作负荷  $P_s = 2T$  选择弹簧参数。

5. 按  $P_s$  选气缸。为使气缸小些, 可将进气压力调至  $6-6.5 \text{ kg/cm}^2$ 。

### 三、小电炉气压电极把持器的优点

小电炉气压电极把持器与人工放电极装置相比, 大大减轻了劳动强度; 与油压把持器比较, 具有结构简单、故障少、安全、干净、投资及运行费用低等优点。

它与我厂近年设计的矮烟罩加气压把持器有如下不同:

1. 用高烟罩 (敞口炉) 代替矮烟罩 (半封闭炉), 更适用于小电炉。

对于  $3000 \text{ kVA}$  以下的小电炉, 高烟罩比矮烟罩的优点是: 造价低; 易制作; 炉况处理、电极事故处理及捣炉等作业操作方便; 电损较低。

2. 省去了气囊抱闸, 由于不需要支承上气囊抱闸的平台, 故厂房高度可适当降低。

3. 省去了电磁换向阀及贮气罐。用手动气阀代替电磁阀, 电路和电磁阀带来的麻烦没有了, 手动阀故障少, 易操作, 易更换, 价格低。对小厂或较大厂的单台电炉都是可行的。

综上所述, 小电炉特别是乡镇企业的小电炉, 采用本文设计的气压电极把持器, 可节省投资, 易维修, 故障少, 上得快, 这一结构对技术要求不高, 不致因缺件或故障而影响生产。

(1988年9月收稿)

(上接26页)

### 五、结 语

通过应用等离子体进行铁合金熔炼或精炼的初步尝试, 证明了等离子技术在冶金中有很多优点和很大潜力。在反应系统中有活化粒子的等离子体将比无等离子体参与冶金的反应进行得更快、更完全。

应用石墨等离子枪熔炼合金, 不仅冶炼速度快, 合金元素烧损小, 质量稳定和提, 而且具有操作简单、安全可靠等特点。

对工作载体, 我们只作了氩和氮气的试验。氮等离子体的精炼效果也很理想, 但是氮易使合金氮化, 这就使氮载体的应用受到限制。

总之, 在现代先进的生产合金或生产金属材料的方法中, 等离子冶金是补充电渣和电子束重熔炉及合金过程最有前途的方法之一。

### 参 考 文 献

- (1) 曲英主编, 《炼钢学原理》, 冶金工业出版社, 1983年8月第二次印刷
- (2) B. Gross 等著, 《等离子技术》, 科学出版社, 1980年4月
- (3) 《МЕТАЛЛУРГИЯ》, 1981, 毕传泰译, “等离子冶金”, 吉林铁合金厂情报室, 1983.
- (4) 清华大学, 《电弧等离子技术基础》, 1976.4.
- (5) (美) H. Y. Sohn M. E. Wadsworth 等著, 《提取冶金速率过程》, 郑蒂基译, 冶金工业出版社, 1984, 12.

(1989年1月收稿)