

# 等离子体科学技术应用专题系列介绍

## 第六讲 低温等离子体在冶金工业中的应用

张秉有 李耀天 陈小林 徐丽娜

(北京冶金研究所)

等离子技术在金属切割、焊接、喷涂等方面有着广泛的应用。利用等离子弧高能量,高温的特点进行金属熔炼也是等离子技术应用的重要领域,它不仅可熔融、精炼和重熔金属材料,也可以熔炼非金属材料。等离子弧冶炼是一种新型的冶炼方法。

早在1962年,美国联合碳化物公司林德研究所首先设计制造出与普通炼钢电弧炉相似的等离子电弧炉,公称容量为11公斤,进行小规模冶炼试验获得了成功。随后日本、苏联、东德也先后研制出等离子炉并不断向大型化发展。1976年,东德Freital特殊钢厂制造出容量为30吨的等离子炉。1979年,奥地利联合钢铁公司建成45吨的等离子炉,此炉于1983年10月投入生产,年产钢13—18万吨<sup>[1,2]</sup>。

我国六十年代末期开始进行等离子弧炉研究工作。1969年铁道部所属戚墅堰机车车辆厂工艺研究所研制出10公斤、20公斤、50公斤的等离子电弧炉;1971年北京二七机车车辆厂制造出功率为400千瓦、容量为500公斤的等离子电弧炉,熔炼铸铁;昆明工学院对等离子喷枪进行了大量的研究工作,他们于1979年研制的石墨等离子喷枪,解决了钨钨极转移弧型等离子枪加工复杂、成本高、寿命短以及污染等问题;北京冶金研究所1979年开始研制等离子感应炉,此感应炉所炼的合金材料,对某些牌号取得了成功。

### 一、等离子炉的特性

1. 由于等离子弧的温度高,能量高度集中,

所以熔炼速度快,生产效率高,与同吨位的普通电炉相比生产效率高30~40%。另外,等离子弧的超高温,可冶炼难熔金属及其合金,碳的去除速度快,对熔炼超低碳钢种很有意义。

2. 可根据冶炼需要,造成炉内不同气氛。如在大气压下,在惰性气氛中进行熔炼,合金元素的收得率高(见表1),重熔时合金的化学成分变化小,为准确控制化学成分提供了可能性。

表 1

元 素	C	Si	Mn	Cr	Al	Ti	V	B	Nb	Ni	Mo
收得率(%)	100	99	98	100	96.5	95.5	100	95	97	98 100	98 100

3. 等离子炉的造渣能力强,钢液可以获得良好的脱硫效果,硫从0.007%脱到0.004%。

4. 等离子炉冶炼的产品质量高,气体及非金属夹杂物少,化学成分均匀,钢锭表面质量好。

5. 等离子炉的电耗低,比同吨位的三相电弧炉低25%。

6. 直流等离子弧比较稳定,炉子运行时功率容易控制、调节,操作方便。

## 二、等离子炉的分类

### 1. 等离子电弧炉

等离子电弧炉是由喷枪和炉体两大部分组成,炉底埋有一根石墨电极。当喷枪内的阴极与炉底阳极之间加上直流电压时,等离子弧即在炉膛内形成,熔池中的炉料得到加热、熔化和精炼。另外炉体下部周围的耐火材料内埋有水

冷铜管线圈,串接在直流回路中,目的在于产生磁场,使熔池中的熔体得到搅拌,达到成分均匀。

等离子电弧炉能熔炼难熔和活泼金属及其合金,电热合金,高温合金,有色金属等,并都得到满意的结果。

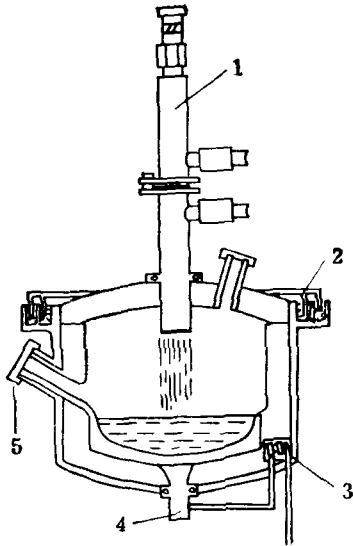


图1 等离子电弧炉简图  
1.等离子喷枪; 2.沙封; 3.搅拌线圈;  
4.炉底电极; 5.出钢口

## 2. 等离子电弧重熔炉

等离子电弧重熔炉是在惰性气氛或可控气氛中利用超高温的等离子弧熔融金属和炉渣,被熔化的金属集聚在水冷铜结晶器中,再拉引成锭。这是最新出现的二次重熔工艺。重熔金属具有良好的铸态组织。目前这一熔炼技术已被成功地应用于精密合金、耐热合金、含氮钢、特种滚珠轴承钢、结构钢、活泼金属及其合金的生产。

## 3. 等离子电子束重熔炉

这种设备的核心是钽(Ta)制的中空阴极,其工作原理是,在低真空( $10^{-2}$ mmHg)下,用氩等离子弧加热钽阴极,使其发射热电子,这些热电子在电场作用下高速飞向阳极,即飞向水冷结晶器的金属炉料。由阴极发射的热电子在高速飞向阳极的途中,又激发气体分子和原子,

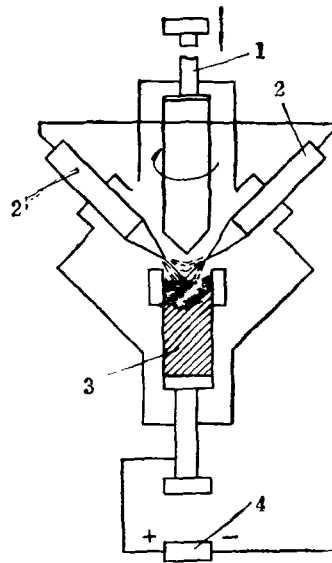


图2 等离子电弧重熔炉简图  
1.消耗性电极; 2.等离子喷枪; 3.锭子; 4.电源

使它们不断电离,放出高能量的热电子,形成热电子流,轰击金属使其熔化,达到熔炼目的。

此种炉子可熔炼海绵钛、钛屑和各种难熔金属,还可以作为热处理及制造合金粉用的热源。

## 4. 等离子感应炉

等离子感应炉是等离子电弧炉和感应炉的

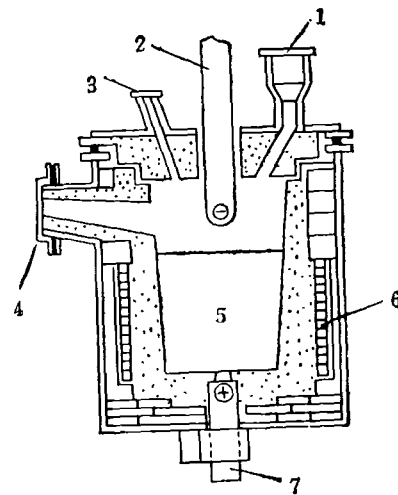


图3 等离子感应炉简图  
1.合金料添加口; 2.等离子喷枪; 3.观察口; 4.出钢口;  
5.熔融金属; 6.感应加热搅拌线圈; 7.炉底电极

叠加,具有双热源——等离子电弧加热和感应加热,并且互相补充,克服了各自的一些不足。等离子弧的存在使金属料熔化,感应磁场可使等离子电弧弯曲、旋转,从而使加热能力提高。此炉具有热效率高、单位电耗低、耗水量少等特点。载气一般选用 Ar 气,使得熔池口产生相当于  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  mmHg 的等值真空,气相中  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  分压低,有利于钢中气体的去除,易氧化元素的收得率较高。

### 三、等离子感应炉与真空炉的比较

北京冶金研究所 1979 年开始研究等离子感应炉,用于冶炼精密合金和无磁不锈钢。通过研究,认为等离子感应炉具有很多优点,是目前冶炼精密合金的一种理想的炉型。它与真空炉冶炼比较如下:

(1) 化学成分: 等离子感应炉冶炼金属损耗小,收得率高,成分稳定, Mn 的回收率为

表 2

炉 型	O <sub>2</sub> (%)			H <sub>2</sub> (%)		
	min	max	平均值	min	max	平均值
等离子感应炉	0.0009	0.0023	0.0015	0.000143	0.000415	0.000298
真空感应炉	0.001	0.004	0.0019	0.00003	0.0001	0.00004

表 3

炉 别	热 处 理	$\mu_0$ (Gs/Oe)	$\mu_m$ (Gs/Oe)	$H_c$ (Oe)	$B_s$ (Gs)
等离子感应炉	氢气保护 1150℃ 保温	20000~38000	217000~411000	0.0091~0.013	7600~7900
		28600	302000	0.0101	7766
真空感应炉	3小时 100℃/时 降温, 520℃ 快冷	15000~40000	279000~405000	0.0062~0.0087	7700~7906
		28000	374000	0.0072	7800
标 准		≤24000	≤200000	≤0.015	≤7500

100%, 而真空感应炉为 85%。

(2) 气体含量(见表 2): 表 2 中数据是根据在不同炉子中冶炼得到的统计数字。由此可看出, 等离子感应炉冶炼的钢比在真空感应炉冶炼的钢具有较低的含氧量。而在等离子感应炉中冶炼的钢中虽然含氢量高于真空感应炉冶炼的含氢量, 但仍在合金允许的范围之内, 故认为用等离子感应炉冶炼脱气效果更佳。

(3) 夹杂物: 由于等离子体温度高, 有利于氧化物的分解和去除。用真空感应炉和等离子感应炉冶炼精密合金, 其氧化物夹杂级别分别是 1.0 和 1.0~1.5 级, 说明两者是相近的。

(4) 磁性能: 等离子感应炉冶炼的精密合

物理

表 4

项 目		真空感应炉		等离子体感应炉	
		数量 (公斤)	金额 (元)	数量 (公斤)	金额 (元)
金 属 料	镍	495	10741.50	165	3580.5
	钼	25	1250	8.5	425
	锰	7	24.5	2	7
	铁	104	88.4	30	25.5
	返回料	430	2494	820	4756
共 计		1061	14598.4	1030	8794
氩 气		1m <sup>3</sup>	10	50m <sup>3</sup>	500
电 耗		3126 度	312.60	1100 度	110
耐火材料		(略)			
合计金额		14921 元		9404 元	

金磁性能完全符合冶金工业部颁布标准要求,基本上达到真空炉的冶炼水平,主要性能指标见表3。

(5) 经济性能对比: 从表4中可以看出,等离子感应炉的冶炼成本只是真空炉的60%左右,若考虑到设备费用的折旧(真空感应炉造价35万元,等离子感应炉造价12万元)费,等离子感应炉冶炼成本还会降低。

#### 四、等离子体在冶金工业中的应用与发展前景

##### 1. 冶炼精密合金和钢

精密合金中的软磁合金、半硬磁合金、膨胀合金和电阻合金,均已在等离子炉内熔炼成功。

用 Ar-H 等离子弧对 1J50 合金重熔,重熔后含氧量显著下降,不存在氧化物和硅酸盐夹杂,点状夹杂减少一半。等离子感应炉熔炼的 1J79 合金,采用 80% 的返回料,经氩等离子精炼后碳、硫、氧含量变化如表 5 所示。

表 5

项目 \ 元素	C(%)	S(%)	O(%)
熔化后	0.025	0.010	0.020
精炼后	0.002	0.003	0.001

由表 5 可见,精炼效果良好。

此外,文献介绍用氩等离子体弧加炉渣精炼 1J79 合金,若将炉内气氛的露点保持在  $-30^{\circ}\text{C}$  (炉气内水分低于 0.05%,相当于真空度  $5 \times 10^{-1} \text{mmHg}$ ) 可使合金中的氢含量减少到  $1 \text{ml}/100\text{g}$ ,添加硅并用  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  渣系,收到良好的脱氧、脱硫效果。

另外,生产  $\text{NiMn}_3\text{V}$  合金 ( $\rho = 1.85 \sim 2.00 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ),该合金的成品形状是微米级带材和线材,要求有良好的塑性。利用真空感应炉、真空电弧炉、电渣法冶炼的锭子,加工时容易产生断裂,而用等离子炉熔炼,效果就很好。等离子弧重熔不但能制取各种锰基合金,还可以制取与锰基合金物理性能类似(例如导热率低,结晶时收缩大,熔点下蒸气压高)的合

金。日本在等离子炉技术方面发展也非常迅速。大同株式会社发明,用等离子熔炼高级马氏体时效钢的双联法。此法是先用电弧熔炼铸成自耗电板,再用真空自耗、电子束重熔或采用再次等离子重熔的二次冶炼法,获得超低硫、氮、碳的高韧性优质钢。美国和日本还应用等离子技术冶炼含钛的钢种和低碳不锈钢。实践证明,等离子冶炼耗能少,成本低,钢中氧化物夹杂低,合金收得率高,有较大的工业价值<sup>[3,4]</sup>。

##### 2. 等离子体制取超细粉末

超微粉是近年来才发展起来的新型材料。据报道,日本科学技术厅金属材料技术研究所已研制出制造超细粉末的新方法。在电弧等离子的高温下, $\text{H}_2$  或  $\text{N}_2$  气体分解成活性很高的原子 H 或 N,使熔融状态的金属强制蒸发变成原子状态气体,数万个原子形成粒度在  $0.1 \mu\text{m}$  以下的超细粉末<sup>[5]</sup>。日本大同特殊钢株式会社也研制出超细粉末制造装置,这种设备采用具有回转磁场线圈的等离子炉熔化金属,制取 Ni, Cr, Co, Al, Si, Mn, Ti, B 等金属的超细粉末及合金粉末,生产能力为每小时 100g。目前高效率、低成本的大量生产还很困难,有待于进一步研究<sup>[6]</sup>。

##### 3. 用等离子法还原金属

瑞典轴承钢公司 (SKF) 成功地研究了多种等离子还原法。Plasmared 法是其中之一。瑞典轴承钢公司 1980 年将 1952 年投产的 Wilberg 还原法装置改为 Plasmared 装置,把原来焦炭气化炉改为等离子气化炉,生产还原气体,供铁矿石还原用。1981 年投产,直接还原铁的产量由 2.5 万吨增至 5 万吨。生产出的直接还原铁用于炼钢。

瑞典轴承钢公司 (SKF) 还应用等离子技术回收特殊钢厂电炉烟尘金属氧化物中的铬、镍、钼等贵重金属。1982 年,瑞典在 Lands krona 建成年处理烟尘七万吨的装置来回收锌,该装置于 1984 年投产。这不但节约能源,而且对保护环境也有利,取得很好的效果。

(下转第 740 页)