·文献综述·

等离子技术在炼铁中的应用

何其松

（攀枝花钢铁研究院）

三十多年前，人们就认识到应用等离子技术改进化学和冶金过程的巨大潜力。几十年来，国外在这方面进行了大量的试验研究和开发工作。实践表明，热等离子体冶金能强化反应过程，革新和简化传统的工艺流程。近年来，由于大功率等离子发生器的研制，以及等离子发生器本身的不断改进和完善（例如电极寿命不断延长，效率不断提高），使这项技术开始广泛地应用于冶金过程。特别是发生能源危机以来，由于在一些核电发达或水电资源丰富的国家和地区，电能和化石燃料之间比价的降低，更刺激了等离子技术在冶金领域里的应用。等离子技术迄今已用于炼铁、炼钢、熔化废钢、化铁炉和铁合金生产等方面。

本文简要介绍等离子技术在炼铁领域的应用和研究概况。

（一）等离子体和等离子发生器

当气体被加热到2000℃左右时，气体分子开始离解成原子状态。当温度升高到3000—3500℃时，这些原子就会失去一部分电子，形成自由电子和正离子。这种被充分电离的高温气体就叫做热等离子体。

用来产生热等离子体的装置叫等离子发生器（或等离子加热器、等离子枪），它们是将电能转变成气体热能的一种装置。当气体通过两个电极之间的电弧而被电离时，要吸收大量的热量。气体在离开等离子发生器时具有极高的热焓，比通常燃烧化石燃料时产生的热焓高得多。例如瑞典SKF公司开发的几种等离子炼铁方法，气体的热焓已达到4～5kwh/Nm³。气体的热焓有可能进一步提高到8 kwh/Nm³。用于冶金的单体等离子发生器的功率已达6 MW。图1～5是几种等离子发生器的原理和结构示意图[1,2,3]。

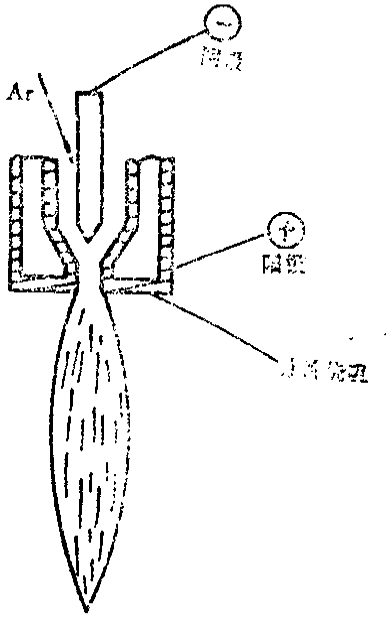

图1 直流等离子电弧加热器示意图

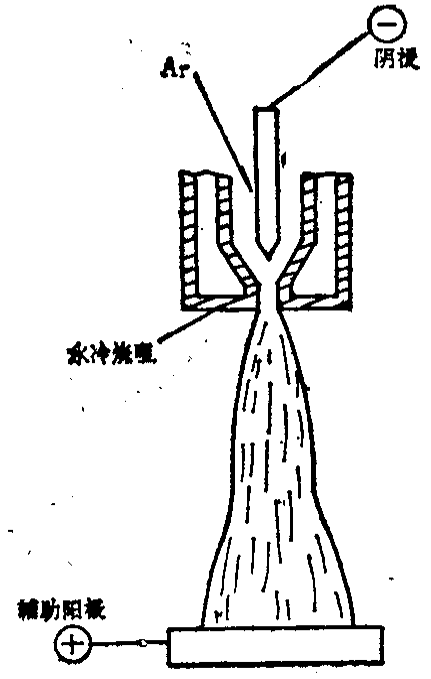

图2　具有转移型电弧的等离子加热器示意图

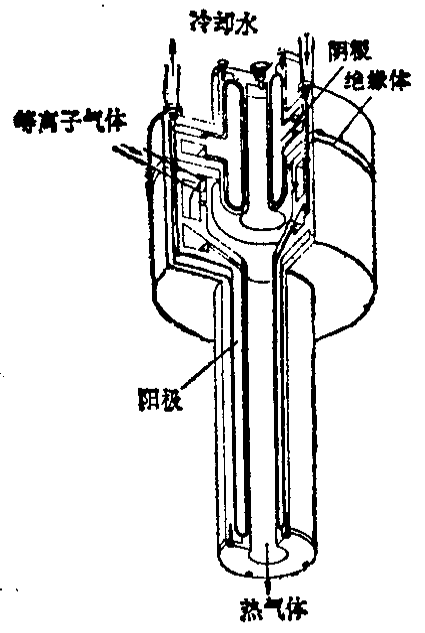

图4　具有非转移型电弧的大功率直流等离子发生器的斜视剖面图（Aerospafiale）

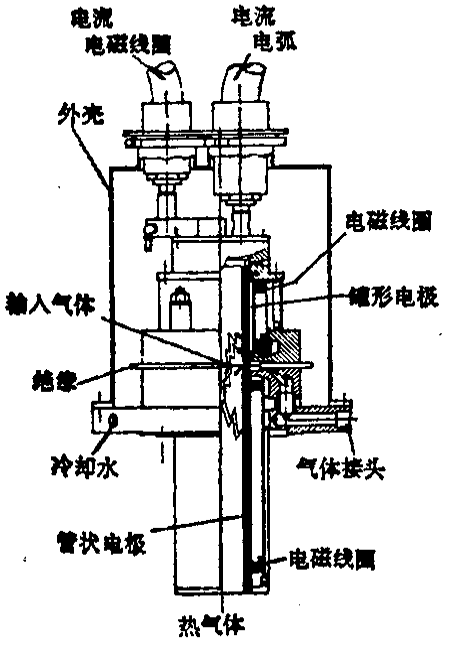

图3　具有非转移型电弧的大功率直流或交流等离子发生器示意图（Westinghouse）

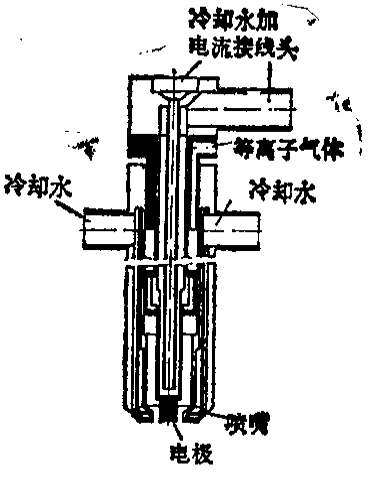

图5　一种大功率直流或交流等离子发生器的示意图（Krupp）

根据用途的不同，已经开发了包含一个或几个等离子发生器的各式各样的等离子反应器或等离子炉。采用等离子发生器的冶金炉可以是竖炉、回转炉、流化床、电弧炉、闪烁熔炼炉等。

等离子发生器的效率是工艺过程经济

性的一个重要因素，它被定义为气体热焓与输入电能之比。目前瑞典SKF公司所用的等离子发生器的效率达到82～87%。随着技术的进步，其效率有可能提高到90%以上。

等离子发生器的电极在操作过程中要逐渐损耗，因此，到一定时间必须更换。据报道，SKF公司在工业生产条件下的电极寿命已达300h，比利时在高炉喷吹时采用的等离子发生器的电极寿命已达400h，法国在一座生产锰铁的高炉风口上安装的等离子枪，其电极寿命超过1000h。更换电极是比较方便的事。

实践表明，热等离子体具有以下特点：

（1）导电性好，能通过很大的电流密度。

（2）能量密度高（气体热焓最高可达10kwh/Nm^3以上），热效率高（最高可超过90%）。

（3）温度高，热惰性小。等离子体中心温度可达10000℃以上，出口温度可达3000～5000℃。

（4）控制简单、精确。例如，可以通过弧电流、电压和喷口直径等进行调节。

（5）可以在任何气氛（氧化、中性或还原气氛）和任何气体压力下工作。

近年来，瑞典、美国、法国、比利时、英国、日本等国在等离子炼铁方面进行了许多试验研究工作，迄今已在直接还原、熔融还原和高炉喷吹等方面取得了很大的进展。

（二）等离子竖炉直接还原法(Plasmared法)〔1,3〕

该法是瑞典SKF公司在Wiberg法的基础上发展起来的一种海绵铁生产方法，工艺流程见图6。

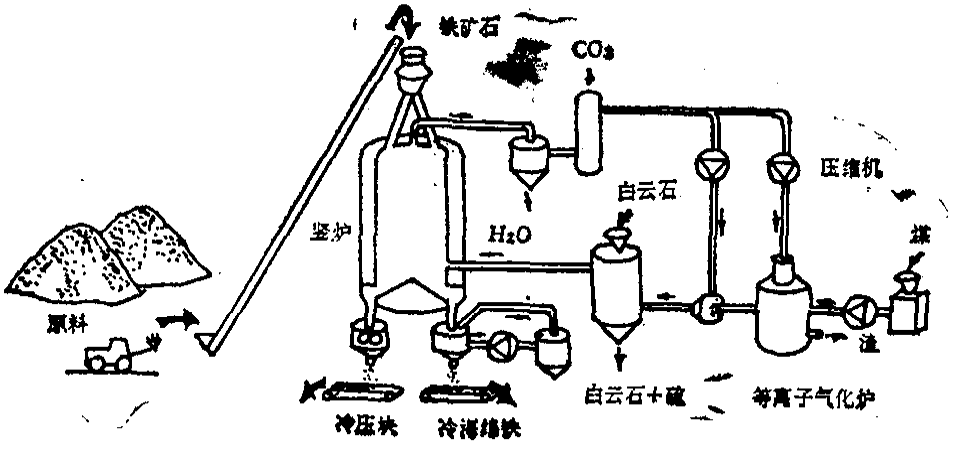

图6 Plasmared法流程图

Plasmared法与Wiberg法流程上的主要区别在于制气炉采用等离子加热代替原来的电阻加热。Wiberg法的制气依靠循环炉顶气与冶金焦反应，气化反应所需的热量由电阻加热提供，这就限制了它的生产能力。因此，SKF公司1980年着手将一座年产2.5万吨海绵铁的Wiberg装置改造成Plasmared装置，它的气化炉安装了6MW等离子发生器，使其制气能力成倍增长，并可顺利进行液体排渣。这套装置于1981年投产，年生产能力达5万吨以上。图7为等离子制气示意图。

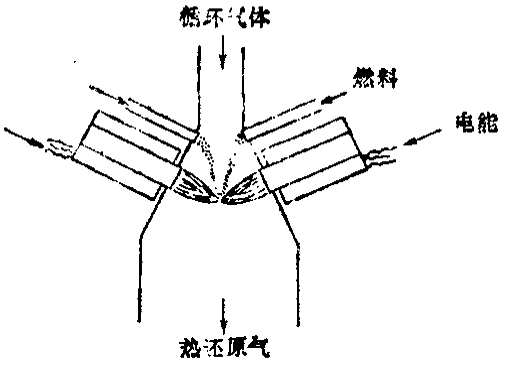

图7　Plasmared法等离子制气示意图

在最初的Plasmared方案中，气化炉只用水蒸汽作为煤的氧化剂，这要消耗较多的电能。新近发展了一种两级气化炉方案，即首先在1400℃温度下用氧气和水蒸气使煤粉气化，生成温度和氧化度较高的煤气（CO_2+H_2O为10～15%），然后使这种粗煤气通过热焦炭或木炭进一步转化，以求降低和稳定CO_2+H_2O的含量，并把煤气温度调整到要求的数值。这种新的制气方案不仅大大降低电耗（耗电量只占气化炉总输入能量的20%，焦炭耗量只占总煤耗的7～10%），而且可以制造出低氧化度、高热值的还原气（$CO_2<3\%$），也不生成碳黑，煤气离开气化炉时温度为950℃。

Plasmared法用100%球团矿和100%块矿均可顺利操作。海绵铁的金属化率为91～93%，含碳1.5%。总能耗为9.2 GJ/t铁。

Plasmared法保留了Wiberg法的所有优点，较好地克服了Wiberg法的缺点，被认为是一种很有前途的直接还原法。该法具有投资少、能耗和操作费用低、产品质量高、环境污染小等优点。据称，该法的单炉产量有可能达到15～20万吨/年。

此外，煤的等离子气化技术也有可能应用于Midrex法和HYL法，把它们从对天然气的依赖中解脱出来。如果这一设想能在工业上得以实现，则将把成熟的竖炉直接还原法推到一个新的发展阶段。

（三）等离子熔融还原法

应用等离子加热器生产铁水的熔融还原法有Plasmasmelt法、Plasmadust法和EPP法等。

1. Plasmasmelt法（等离子熔炼法）[1,4,5]。

七十年代初，SKF公司开始研究Plas-masmelt法，1980年在瑞典Hofers进行中间试验，并改造了当地一座小高炉，所用等离子发生器的功率为1.5MW。在此基础上，着手建设装备有15MW等离子发生器的工业试验装置，生产能力为年产6～7万吨铁水。工艺流程见图8。

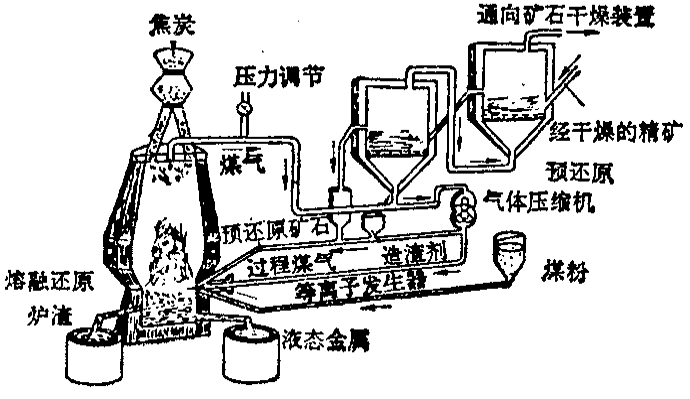

图8　Plasmasmelt法工艺流程图

plasmasmelt法属于二步熔融还原法，铁精矿首先在两级流化床中预还原，还原温度700～800℃，预还原度为50～60%。然后预还原料与煤粉和脱硫剂一起用高压过程煤气作载气，从竖炉下部喷入炉内，竖炉下部安装的等离子电弧加热器提供终还原需要的热量。经过等离子加热器时，被离子化的高温气体的温度高达3000～5000℃，在竖炉内由于激烈进行还原和其他吸热反应，使温度迅速降至1700～2000℃。这时，喷吹的预还原料迅速熔化和还原，最终生成类似高炉生铁的铁水。出铁出渣的方式与高炉类似。终还原过程中生成的气体主要由CO和H_2组成，其中含有的少量CO_2和H_2O在上升过程中很快被炉身上部的焦炭还原，所以从竖炉顶部排出的煤气几乎是纯的CO和H_2。炉顶气经除尘和冷却到800℃左右，被送到两级流化床中进行预还原。有少量竖炉炉顶气经冷却和加压后，用作等离子发生器的工作气体和喷吹预还原料的载气。

Plasmasmelt法用等离子发生器提供热量，不仅具有很高的热效率，而且还把供热和还原气的产生分开，有可能使终还原产生的还原气和预还原所需要的还原气量平衡，使煤气的热能和化学能得到充分利用，而不必进行大量的煤气循环。由于预还原度较低，所以流化床所用的还原气量只相当于海绵铁竖炉的1/6。此外，由于终还原反应速度非常迅速，避免了高炉内950～1500℃温度区间内出现的软熔带。

Plasmasmelt法的主要优点是直接用铁精矿或矿粉炼铁，取消了传统的造块工序，基建投资和生铁成本比高炉法低，环境污染小。

2. Plasmadust法（等离子粉尘熔炼法）[1]

该法是Plasmasmelt法的变种，它主要用于从各种氧化物废料（例如冶金厂粉尘）中回收金属。其流程见图9。金属氧化物粉料与煤粉、造渣剂一起，用加压的过程煤气作载气，直接喷入装满焦炭的竖炉下部，在那里迅速熔化和还原，熔炼

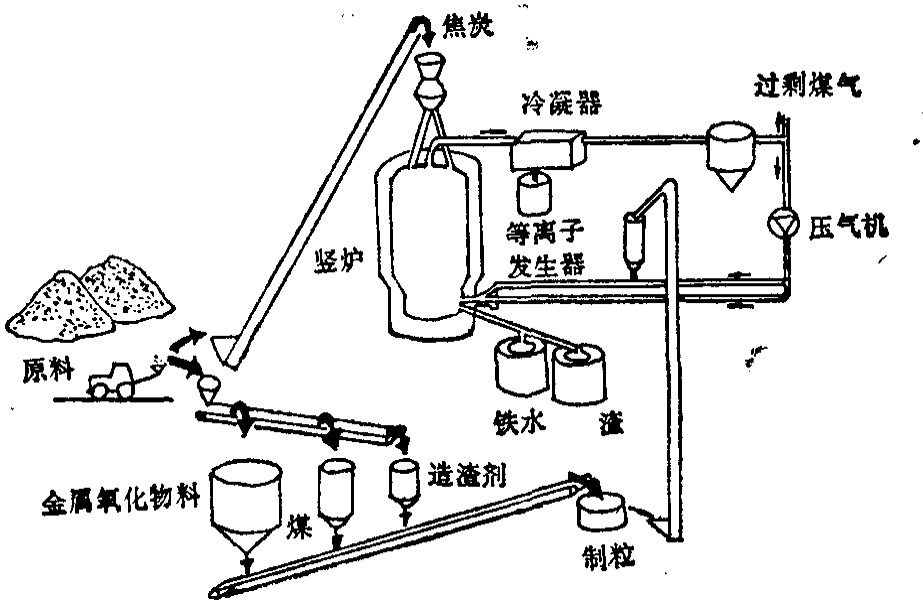

图9 Plasmadust法流程图

过程所需要的热量由等离子加热器提供。该法在处理电炉炉尘和冶炼不锈钢的炉尘时，生产的合金铁水几乎全部回收炉尘中的铬、镍和铜，而铅锌等可用炉外的冷凝器收集起来。

1982年5月，SKF公司与瑞典Scandust公司签订了承包一个Plasmadust工厂的合同，年处理粉尘7万吨，计划1984年夏投产。该装置配备三套6 MW等离子加热器。

此外，Plasmasmelt法还演变出一种叫做Plasmachrome法的熔融还原法，其工艺流程与Plamasdust法相似。该法直接用铬铁矿的精矿或矿粉生产高碳铬铁。它的优点是取消了造块，以煤粉代替焦炭作还原剂，生产成本低，铬的回收率高，产品含硫低。

3. EPP法[6,7]

该法是英国Foster-Wheeler公司开发的一种熔融还原法，如图10所示。它采用功率为1.4MW的直流收缩电弧等离子发生器，可以在偏离垂直方向5～15°范围内旋转，产生转移弧型等离子焰。等离子发生器以一定速度旋转时，在炉内形成稳定的锥形等离子焰，因而实际上增大了等离子焰的体积。正常操作时，等离子发生器的旋转速度为1000～1500r/min，偏角10°，等离子焰长500～700mm。等离子发生器作为阴极，而金属熔池作为阳极，可用氩气作工作气体。

经过干燥的铁精矿、煤和石灰直接喷入炉内后发生快速熔化和还原。炉料粒度不大于0.5mm。操作中加入足量的石灰，造成碱度为1的炉渣。这种操作方式炼出的铁水含硫高（>0.15%S）。因此，必须采取炉外脱硫措施。

（四）等离子高炉喷吹系统[8～10]

在常规的高炉冶炼中，焦炭起着物理和化学的双重作用。由于焦炭是一种昂贵的燃料，很久以来，人们一直致力于扩大高炉风口喷吹辅助燃料的数量，置换焦炭的数量已达20%以上。尽管如此，要想使现有高炉风口的燃料喷吹率超过50%，使焦比降低到300kg/t以下，已经是十分困难的事情。主要原因是燃料不经过转化就直接吹入炉内，会给高炉冶炼带来许多问题。

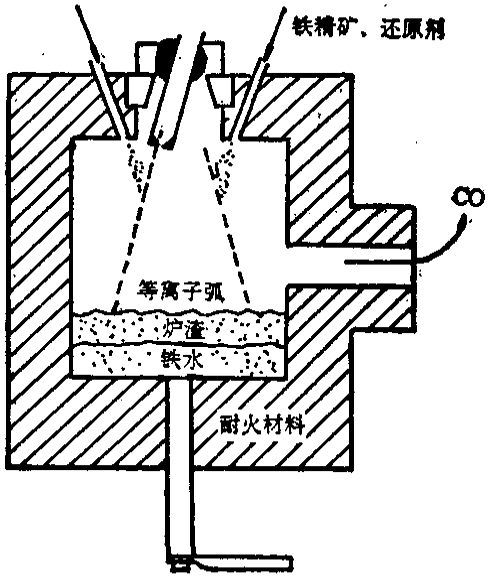

图10　EPP法示意图

于是提出这样的问题，是否能在高炉以外生产出跟现有高炉炉缸煤气成分和温度相同的煤气，再将其吹入高炉，而不改变传统高炉的工艺模式。另一方面，如果喷吹的热煤气具有更强的还原能力（即一部分N_2被CO和H_2代替），那么煤气的还原能力实际上足以还原全部铁氧化物，并且可以完全抑制溶损反应。借助数学模型，可以计算出在这种情况下所需要的最低焦比应低于100kg/t，即只需供给合金元素（例如硅）的直接还原和生铁渗碳之用。

根据这些考虑，比利时冶金研究中心

提出了一种独创性的想法，即通过高炉风口喷入2000℃以上的过热还原气，以实现大幅度降低焦比。由于传统的加热方法不可能达到这样高的温度（目前工业上使用的热风炉只能使鼓风温度达到1300℃左右），所以专家们转向采用等离子加热器，提出Pirogas法（过热还原气等离子喷吹系统）。

1. 等离子制气试验

制备过热还原气所用的等离子炉如图11所示。在试验炉下部沿圆周安有三个等离子枪，每支枪的有效功率为20KW，由有效功率280KW的三相交流电源整流供电。原料气从底部导入，经过等离子焰后，转化成为热还原气。在这套装置上考查了温度、氧/碳比和停留时间的影响。此外，考虑到炉顶气用天然气或焦炉煤气转化后再循环利用，所以也试验了天然气用CO_2转化的情况。结果表明，等离子制气的效率很高，完全可以得到质量好、温度高的还原气。表1是天然气分别用空气和CO_2转化，在等离子炉内停留15ms的结果。

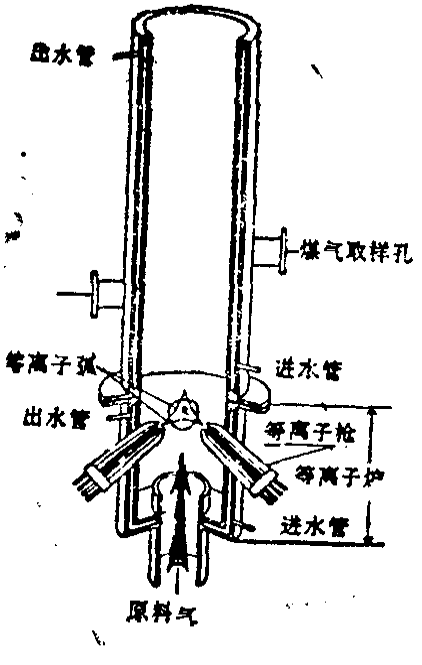

图11 等离子法制还原气试验装置

天然气与空气和CO_2转化制得的等离子过热还原气 表1

项目	天然气/空气	天然气/CO_2
温度，℃	2020	2180
CO，%	18.1	41.2
CO_2，%	0.1	1.7
CH_4，%	0.1	0.5
H_2，%	35.7	36.5
H_2O，%	1.3	2.8
N_2+Ar，%	余量	余量

图12示出温度对甲烷转化率的影响。由图可见，用空气转化比用CO_2转化的反应速度快一些。用空气转化时，当温度≥2250℃以后，还原气的成分实际上接近于平衡成分。

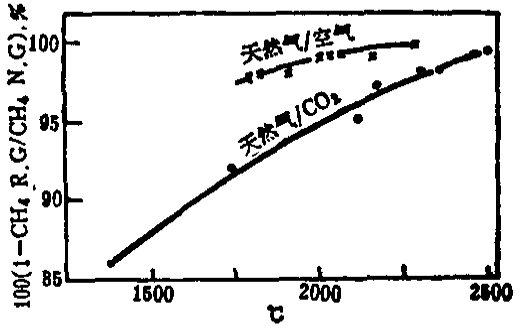

图12 温度对甲烷转化率的影响

图13表明，在高炉操作所要求的范围内，O/C比实际上对转化率没有影响，这就有可能制造出<0.1%CH_4，<0.1%CO_2和<1.5%H_2O的优质还原气，不致生成碳黑。

等离子制气装置不仅可以使用气体原料，而且也可用固体和液体原料制造高温

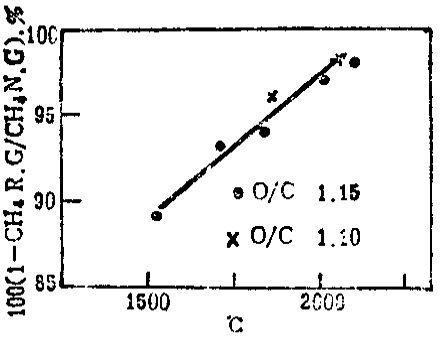

图13　两种氧/碳比情况下甲烷转化率与温度的关系

还原气。这种制气方法的优点有：

（1）还原气温度高，一般可达2000℃以上。

（2）还原气的氧化度低，气体成分和温度可根据需要分别调节。

（3）热流强度大，约为传统热交换器的100倍，因此设备小，操作方便。

（4）化学反应非常快。

2. 高炉喷吹过热还原气试验

这项试验在试验小高炉上进行，其炉缸直径0.3m，有效高度2.5m。试验高炉通常有三个风口，但因为只有一个现成的等离子炉，所以只得用一个风口操作，见图14。炉子配备有自动上料和称量系统，并设有炉顶煤气自动连续分析器和微机控制。

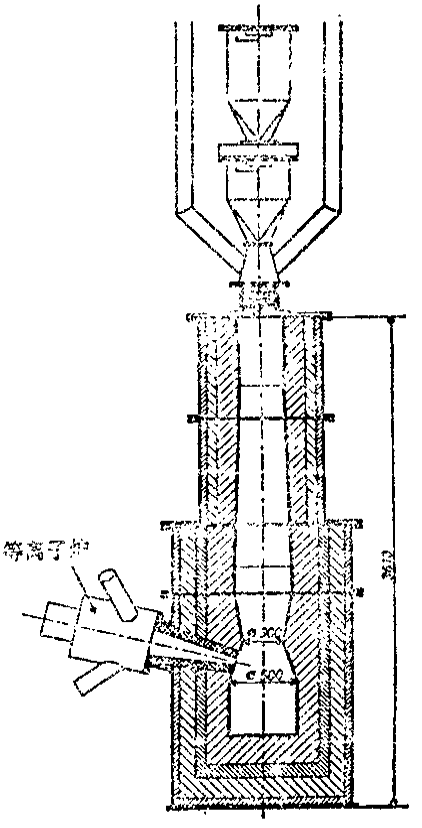

图14　试验小高炉

在试验高炉上进行了若干次试验，每次8～15天，考查工艺的可行性和可以置换多少焦炭。炉料是100%的烧结矿，其成分为：TFe 56%，CaO 10%，SiO_2 6.3%，Al_2O_3 1.8%，MgO 2%。烧结矿粒度5～15mm。焦炭粒度10～20mm，含C 88.9%。在喷吹还原气期间，当焦比很低时曾加入一些酸性熔剂（卵石和氧化铝），以调整炉渣成分。

试验基准期鼓入的热风是用等离子炉加热的，温度750℃，高炉日产铁1.1t，铁水含Si±0.5%，焦比717kg/t。基准期以后，逐渐过渡到喷吹还原气。

第一阶段试验，最低焦比达到179kg/t，与基准期相比降低了75%。然而高炉操作远未达到最佳化。在以后的试验期中，焦比最低达到105kg/t，主要试验结果见表2。

试验表明，喷吹过热还原气基本上不改变高炉过程，高炉操作很平稳，焦炭置换率最高可达80%。Pirogas法有可能使化石燃料消耗和电耗之间达到一个最佳的比例，以求取得最好的经济效果。值得注意的是，生铁含硅量很容易通过调节还原气的温度和成分加以控制，从而使高炉过程的控制变得更迅速、容易。

3. Pirogas法在现代高炉上的应用

试验小高炉取得的良好结果，促使比

Pirogas 中试装置试验结果 表 2

项目	单位	基准期	试验期		
			I	II	III
焦比	kg/t铁	717	248	175	105
风温	℃	748	—	—	—
还原气喷吹量	Nm^3/t铁	—	2990	2050	2020
还原气温度	℃	—	2160	2050	2020
$CO+H_2$		—	33.7	43.2	49.4
铁水含硅	%	0.71	0.28	0.64	0.78
产量	t铁/d	1.08	1.12	1.09	1.17
炉渣碱度		1.06	1.12	1.09	1.17

利时冶金研究中心及其合作者们在更大的高炉上进行工业试验。为此，曾在Cockerill-Seraing E厂3号高炉上进行试验。该高炉炉缸直径4.6m，共有八个风口。第一阶段试验只在其中一个风口上安装了功率为3.5MW的Westinghouse等离子加热器（见图15）。试验结果表明，采用等离子喷吹法不仅未破坏高炉的正常操作，相反还有利于高炉操作；吹管和喷吹系统设备正常；等离子炉的操作对电网无干挠，即实际上不存在谐波，功率因素≥0.95；电极寿命大于400h，当功率水平为2 MW时，效率大于80%。迄今得到的结果表明，有可能进一步提高电极寿命和等离子炉的功率。

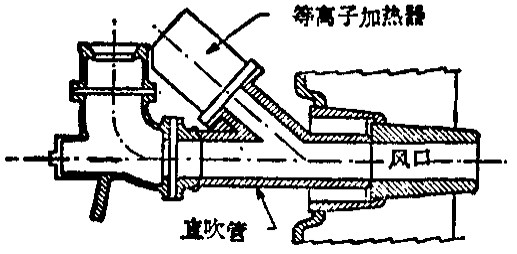

图15 高炉风口上安装的等离子加热器

但是，由于能源和经济条件的变化，比利时的钢厂目前更感兴趣的是等离子与喷煤相结合的Pirogas法。表3列出等离子喷煤方案的模型计算的结果。

1984年，法国HFRSU公司和法国钢铁研究院与比利时冶金研究中心一起，共同拟定了一个证明在高风温支持下大量喷吹煤粉的可行性试验计划，吸引了法国许多部门及单位参加和投资。1984年，法国布洛涅-许赫-梅尔的SFPO厂7号高炉（共九个风口，炉缸直径4.5m，生产锰铁）有三个风口装上等离子枪，单枪功率1500kw。这三个风口的风温达到了1750℃，全炉平均风温提高120℃，焦比降低6—7%。计划全部风口都装上2000kw的等离子枪。7号高炉的等离子喷吹表明：风口平台的安全没有问题；等离子枪的应用不会给工厂电网带来严重干挠；系统的管理简单，不要求额外的操作工人；在额定功率下运行，等离子枪的电极寿命超过1000h。目前，正计划在法国HFRSU公司的Uckage厂1号高炉（有效容积1000m^3，炉缸直径7 m）进行等离子喷煤试验，将有六个风口安装等离子喷枪，总功率达10MW，使这些风口的风温达到1750℃。同时在这些风口上喷吹相当于200kg/t铁的煤粉，其余八个风口按

高炉用常规喷煤和用Pirogas法(模型计算)操作结果　　表 3

项　　目	单　位	常规喷煤	Pirogas 法
焦　　比	kg/t铁	404	248
煤（干基，11%灰，25%挥发份）	kg/t铁	60	200
风　　温	℃	1250	1800*
鼓风含氧	%	22.5	26
总　电　耗	kwh/t铁	64	335
炉顶煤气热值	MJ/Nm^3	3.19	3.63
输出煤气**	GJ/Nm^3	2.59	3.09
铁水含Si	%	0.6	0.6

* 热风与等离子过热空气的平均温度

* * 扣除烧热风炉的煤气

通常风温和喷煤量（80kg/t铁）进行操作。经过预试验后，预计于1987年4月投入使用。为这之前，对于在高风温中喷吹煤粉的特别重要的工艺也要进行试验。

等离子技术与大喷煤量相结合，可能成为大幅度降低高炉焦比的一种很有前途的方法。对于有充足的电力供应的地区，这种方法具有更大的现实意义。

参　考　文　献

〔1〕 Herlitz, H.G.etal, Iron and Steel Engineer, 3 (1984), 39—44

〔2〕 Wilhelmi, H., Stahl und Eisen, No.22, 105 (1985), 50—56

〔3〕 Mathisson, G., Iron and Steel Engineer, 5 (1982), 549—550

〔4〕 Industrial Heating, 10 (1980), 29—31

〔5〕 Labee, C.J.etal, Iron and Steel Engineer, 10(1983), 67—68

〔6〕 Thielmann, R.etal, Stahl und Eisen, No.13—14, 101(1981), 71—81

〔7〕 Davis, C.G.atal, Ironmaking and Steelmaking, 3(1982), 93—129

〔8〕 Poos, A.etal, Paper presented at the 1st inter, Symposium on ironmaking in Wushan, China, Sept.1985

〔9〕 Ponghis, N.etal, Ironmaking Proceedings, Vol.38, Detroit, 1979, 224—229

〔10〕 Ponghis, N.etal, High Temperature Technology, Vol.1, 5(1983), 275—281