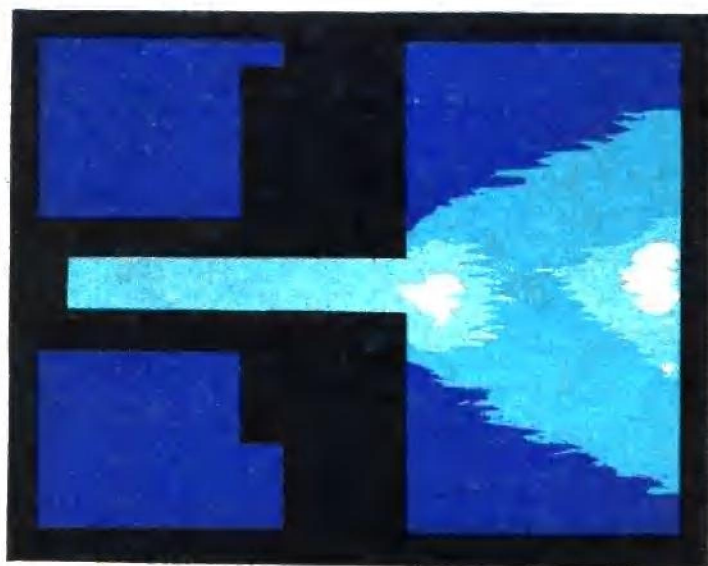


电弧和热等离子体

DIANHUPEREDENGLIZITIDIANHUPEREDENGLIZITI

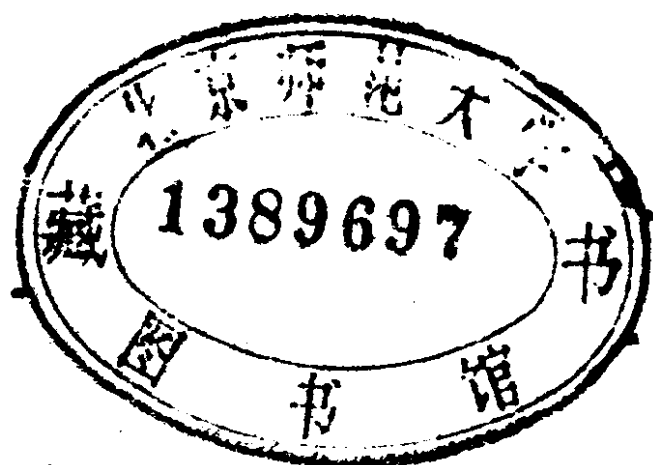


过增元 赵文华 著 科学出版社

电弧和热等离子体

过增元 赵文华 著

7911/00/30



科学出版社

1986

内 容 简 介

热等离子体是一门边缘学科。本书着重从热物理过程与电物理过程相结合的角度去叙述电弧和热等离子体的性质、特点及其工程应用。

本书共八章。前五章用来阐明弧柱物理、电弧等离子体与气流或磁场的相互作用、等离子发生器中物理过程等宏观性质。后三章讨论粒子碰撞、热力学平衡、热等离子体辐射等微观过程以及热等离子体的光谱诊断。

本书可供从事等离子机械加工(切割、焊接、喷镀)、等离子化冶、等离子动力转换和开关电弧等方面工作的科技人员阅读,还可作为热物理、力学和电器等有关专业的研究生或高年级大学生的参考书。

电弧和热等离子体

过增元 赵文华 著

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986年12月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1986年12月第一次印刷 印张: 10 3/4

精 1—1,100 插页: 精 2

印数: 平 1—1,350 字数: 278,000

统一书号: 15031·755

本社书号: 4808·15—10

定价: 布脊精装 3.85 元
平 装 3.05 元

前 言

因为电弧和热等离子体具有温度高、能量集中及气氛可控等特点,所以它们在机械、化工、冶金和电器等各种领域中都获得了愈来愈广泛的应用。七十年代初出现的世界性能源危机给予电弧等离子技术的发展以新的推动力,使其在节能、动力转换等能源技术方面找到了新的应用领域。

广泛的工业应用背景必然要求对电弧和热等离子体的物理过程有较深入的理解。由于电弧和热等离子体一般都是通过气体放电并消耗一定数量的电能而形成的,因此传统上偏重于研究它们的电物理性质。但是,近年来很多实验和理论研究表明,电弧现象本质上是电物理和热物理的综合过程。而且,在很多情况下,热物理过程甚至起着决定性的作用。本书特点之一是着重从热物理过程与电物理过程相结合的角度去阐明电弧和热等离子体的特点、性质以及工程应用。

本书是在作者多年从事电弧和热等离子体方面科学研究工作的基础上,以及在为清华大学热物理专业研究生、高年级大学生讲课和先后受北京等离子体学会、辽宁省物理学会、武汉市人民政府邀请而作系统讲座的基础上写成的。因此,书中既有基础知识和基本方法的内容,也包括了这个领域有关的最近的科学研究成果。

第一章主要是介绍电弧和热等离子体的定义、概念、基本特点及其在各工业领域中应用的概况。第二章阐述了电弧弧柱的基本物理过程以及弧参数的分析求解方法。第三章和第四章分别讨论了存在气流和磁场条件下的电弧物理过程及其应用背景。第五章介绍了各种类型热等离子体发生器的概况并重点描述了电弧等离子体发生器中的物理过程和电极现象。第六章讨论了为进一步理

解电弧和热等离子体宏观性质所需的最基本的微观过程——粒子碰撞过程。第七章阐述了热力学平衡的定义、热力学非平衡程度的分类及其判据。第八章描述了热等离子体辐射的基本性质，并在此基础上详细地介绍了热等离子体光谱诊断的各种方法及其应用实例。

各章内容的安排既注意了系统性，又力图保持一定的相对独立性，以适应读者不同的需要。例如，对于那些主要对电弧和热等离子体宏观性质及其应用技术感兴趣的读者，建议他们阅读前五章。如果读者希望深入了解它们的微观机制，则可增读第六章和第七章。对于从事用光谱方法测量热等离子体参数的读者，可重点阅读第八章。

本书第五章由赵文华撰写，其余均由过增元撰写。在编写过程中曾得到许多同事和同行们的鼓励和支持，在此向他们表示衷心的感谢。编写这样一本内容较广，又包含近期科学研究成果的书，缺点和错误在所难免，恳求读者批评指正。

符 号 表

α 吸收系数,原子半径,加速度, 导温系数	E_I 电离能
$\mathbf{a}$ 矢量	E_D 分解能
A 迎风面积,自发发射跃迁几率	E_i i 能级的能量
B 常数,感应发射和吸收跃迁几 率,磁感应强度	E_γ 光子能量
B 黑体辐射强度	f 静电力
B_ν 辐射谱强度	f 弧旋转频率,振子强度
c 光速	F 洛伦茨力,当量阻力
C_0 常数	F_D 气动阻力
c_v 定容比热	g 重力加速度,粒子相对速度
c_p 定压比热	g_i i 能级统计权重
C_D 形状阻力系数	G 质量流量
C_f 摩擦阻力系数	G 粒子系质心速度
C_t 热阻力系数	$G_{\sim}$ 交流电导
C_{total} 总阻力系数	h 普朗克常数
c 粒子绝对速度	h 焓
C 粒子无规运动速度	$\bar{h}$ 无因次焓
D 扩散系数	$\bar{h}$ 平均焓值
D_T 热扩散系数	h_0 滞止焓
d 直径	H 辐射通量,无因次焓
d_0 弧柱直径	H 磁场强度
e 电子电荷,发射能量	$I_{\sim}$ 电流的交流部分
$\bullet$ 单位矢量	I 电流强度,辐射强度
c_{tr} 透明辐射能量	I_{12} 微分散射截面
c_{net} 辐射能量平衡	j 电流密度
E 电场强度	i_m 交流电流密度幅值
	J 成分电流密度
	J_0 零阶贝塞尔函数

J_1	一阶贝塞尔函数	u	辐射能量密度
J	平均谱强度	U	来流速度,弧电压,发射能量
k	玻耳兹曼常数	U	扩散速度
K	绝对温度	$\bar{v}$	粒子平均速度
l	弧柱长度	v	粒子速度
l	粒子自由程,弧柱平均长度	v	复参数
L	长度,电感	v'	气体脉动速度
m	质量	V	宏观速度
m_{12}	折合质量	w	分子平均动能,线圈匝数,半宽度
$\dot{m}$	质量流量密度	W	靶粒子速度
$\dot{M}$	质量流	X	无因次坐标,参量
n	粒子数密度,常数	Y	无因次坐标
N	无因次功率,跃迁数	x, y, z	空间直角坐标系
P	气体压力,弧功率	x_D	无因次距离
ΔP_{12}	动量损失	Z	正电荷数
P_{12}	弹性散射几率	Z	配分函数
P_r	辐射热损失		
q	热流密度	α	复合系数,对流换热系数,热扩散系数
q_0	电荷量	β	热膨胀系数
Q	热流量	γ	密度,比热比
Q_{12}	粒子碰撞截面	Γ	粒子通量密度
r	径向坐标	δ	边界层厚度,参量
r	径向矢量,位置矢量	ϵ_0	介电常数
r_*	弧柱半径	ϵ	发射系数
R	半径,气体常数	ϵ_m	交流场强幅值
R_{12}	反应速率	$\Delta \epsilon_{12}$	能量损失
s	气体成分,曲线长度	η	无因次坐标
s_m	热势波动幅值	η_i	热效率
S	热势,电极距离,比例系数	θ	面积特征量
S_0	热源强度	θ_m	温度波动幅值
$\dot{S}$	速度变形张量	λ	导热系数,波长
t	时间		
T	温度		

目 录

符号表	vii
第一章 电弧和热等离子体概述	1
1.1 历史发展	1
1.2 等离子体的定义及其某些基本特点	9
1.3 等离子体的分类	10
1.4 电弧及热等离子体的概念和有关基本性质	12
(1) 热等离子体	12
(2) 气体放电及其分类	12
(3) 弧区划分	13
(4) 电场中电子的优先加速	14
(5) 空间电荷与准中性	16
1.5 电弧稳定工作对电源伏安特性的要求	18
第二章 弧柱物理	22
2.1 Elenbaas-Heller 方程	23
2.2 弧压最小值原理 (steenbeck 最小值原理)	25
2.3 通道模型	26
(1) 基本思想	26
(2) 能量方程的求解	27
(3) 弧参数之间关系的讨论	33
2.4 弧特性近似计算的其它方法及其与通道模型方法的比较	35
(1) Maecker 线性化方法	35
(2) 积分方法	40
(3) 各种弧参数近似计算方法的比较	41
2.5 热等离子体输运系数和某些热力学函数的特点	46
(1) 导热系数	46
(2) 电导率和粘性系数	51
(3) 等离子体的焓和比热	54

(4) 常用气体介质等离子体输运系数的数据·····	55
2.6 辐射对弧柱特性的影响·····	64
(1) 辐射对弧柱温度、温度分布影响的定性分析 ·····	64
(2) 带有辐射项能量方程的数值计算结果·····	67
(3) 辐射对伏安特性的影响·····	70
(4) 辐射影响不能忽略的参数范围·····	71
2.7 弧压缩的物理概念和阴极射流·····	73
(1) 弧压缩的物理概念·····	73
(2) 阴极射流·····	77
(3) 阴极射流的应用·····	82
2.8 交流电弧的主要特点·····	84
(1) 调制电弧·····	84
(2) 交流电弧·····	93
第三章 电弧与气流的相互作用·····	97
3.1 电弧运动的概念与定义·····	97
3.2 电弧运动的不同型式·····	102
3.3 纵吹弧及其基本方程·····	110
3.4 纵吹弧方程组的解及其主要结果·····	116
(1) 完全发展的电弧模型·····	117
(2) 正在发展的电弧模型·····	123
(3) 工程应用的纵吹弧一维近似·····	139
3.5 纵吹弧通道中的堵塞现象·····	141
(1) 一维问题中的热堵塞的物理机制·····	142
(2) 热堵塞对流动的影响·····	143
(3) 热阻力系数·····	145
(4) 变截面通道中的热阻力系数·····	150
(5) 通道中的电弧堵塞现象·····	153
第四章 电弧和磁场的相互作用·····	158
4.1 磁驱动弧·····	158
(1) 同轴电极间的平面磁旋弧·····	158
(2) 具有轴向气流时的磁旋弧·····	161
(3) 影响弧运动速度的其它因素·····	166
4.2 磁偏弧·····	167

(1) 磁偏壁稳弧·····	168
(2) 磁偏自由弧·····	171
(3) 磁偏旋转弧·····	175
4.3 磁稳弧·····	177
(1) 磁稳气吹弧·····	177
(2) 磁稳自由弧·····	180
4.4 磁匀弧及其应用·····	184
4.5 磁场中电弧的后退运动·····	188
4.6 磁场作用下电弧的稳定性问题·····	190
(1) 弧放电的稳定性问题·····	190
(2) 扭曲不稳定性对弧发生器性能的影响·····	194
4.7 纵向磁场对电弧特性的影响·····	194
第五章 热等离子体发生器·····	196
5.1 概述·····	196
5.2 直流电弧等离子体发生器·····	196
(1) 分类及其结构特点·····	196
(2) 发生器中电弧的某些物理过程·····	199
5.3 高频等离子体发生器·····	212
(1) 高频等离子体的温度分布·····	212
(2) 高频等离子体中的电参数·····	214
(3) 高频等离子体发生器在工业应用中的主要特点·····	216
5.4 燃烧等离子体发生器·····	217
5.5 发汗冷却等离子体发生器·····	219
第六章 粒子碰撞过程·····	221
6.1 粒子和粒子碰撞的类型·····	221
6.2 碰撞截面·····	224
6.3 反应速率·····	233
6.4 弹性碰撞中的能量交换和动量交换·····	237
(1) 速度分布函数与平均值·····	237
(2) 弹性碰撞中的能量与动量交换·····	244
6.5 等离子体的输运性质·····	250
第七章 热力学平衡和热力学非平衡·····	260
7.1 完全热力学平衡 (CTE) ·····	261

• v •

(1) 定义.....	261
(2) 麦克斯韦定律.....	261
(3) 玻耳兹曼分布.....	262
(4) 沙哈定律.....	263
(5) 普朗克定律.....	264
(6) 微观可逆性.....	264
7.2 局域热力学平衡 (LTE)	265
7.3 部分局域热力学平衡 (PLTE)	267
7.4 局域和部分局域热力学平衡的判据.....	269
7.5 处理非热力学平衡问题的某些实例.....	273
第八章 热等离子体辐射与热等离子体的光谱诊断	281
8.1 辐射强度.....	281
8.2 辐射能量密度和辐射通量.....	283
8.3 谱线的发射与吸收过程.....	285
8.4 连续谱的发射与吸收.....	290
8.5 热等离子体辐射的传递方程.....	294
8.6 热等离子体的光谱诊断.....	296
(1) 谱线绝对强度法.....	296
(2) 标准温度法.....	298
(3) 谱线相对强度法.....	301
(4) 谱线和连续谱的相对强度法.....	303
(5) 谱线轮廓法.....	305
(6) 吸收谱线法.....	308
(7) 谱线反转法.....	310
8.7 转换方法.....	312
(1) Abel 转换	312
(2) Maldonado-Olsen 转换	319
参考文献.....	322
索引.....	328

第一章 电弧和热等离子体概述

1.1 历史发展

1808 年 Davy 和 Ritter 历史上第一次在两个水平碳电极之间炽燃了电弧并进行了观察。由于自然对流的作用,热气体向上运动,使碳电极间的电弧向上弯曲而成为拱形,如图 1.1 所示。“拱形物”在德文中是“Bogen”,在英文中是“Arc”,故把它起名为“Elektrischer Bogen”(德文)即“Electric Arc”(英文),意思是电的拱形物,这就是电弧名字的由来。

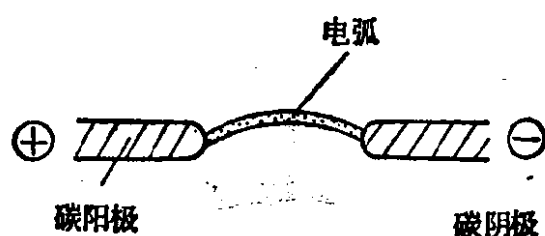


图 1.1 水平自由弧形状示意图

1821 年 Davy 描述了磁场对电弧的作用,到十九世纪中叶,Foucault 和 Fizeau 对金属电弧、真空电弧进行了系统的光测量。十九世纪末,Luggin 和 Lecher 首先用探针测量的方法,确定了电弧电压是由阳极电位降、弧柱电压和阴极电位降三部分所组成的。1892 年 Arons 第一个成功地运行了水银电极真空电弧。1909 年 Schönberg^[1] 最先以旋转气流稳定电弧。1921 年 Beck^[2] 首创了大电流碳弧(以后把这种电弧命名为 Beck 弧),从而开创了电弧技术应用的可能性。到了三十年代,Elenbaas 发展了高压水银灯,与此同时,Elenbaas^[3] 和 Heller^[4] 发表了电弧弧柱理论,它为弧柱物理和电弧技术的发展奠定了理论基础。

第二次世界大战后,化学、食品工业和电力工业迅速增长。由

于电弧等离子体的温度高、能量集中和反应气氛可变等特点，所以电弧和热等离子体技术的应用发展得很快。其过程可概括如下：

(一) 五十年代

开始广泛应用于机械工业中的热加工，如

(a) 等离子切割^[5]。用于不锈钢、铝、铜和钨等高导热系数或高熔点的金属及其合金的高速、高质量的切削；

(b) 等离子焊接^[6]。用于难熔金属的焊接。由于能量集中，所以焊接工件变形小，热影响区小，从而保证了焊缝质量；

(c) 等离子喷涂^[7]。熔化高熔点、高硬度金属或其氧化物粉末进行表面涂层。使用保护性气氛以提高涂层与工件的结合强度。

(二) 六十年代

由于发展了大功率、长寿命的等离子体发生器，使用热等离子

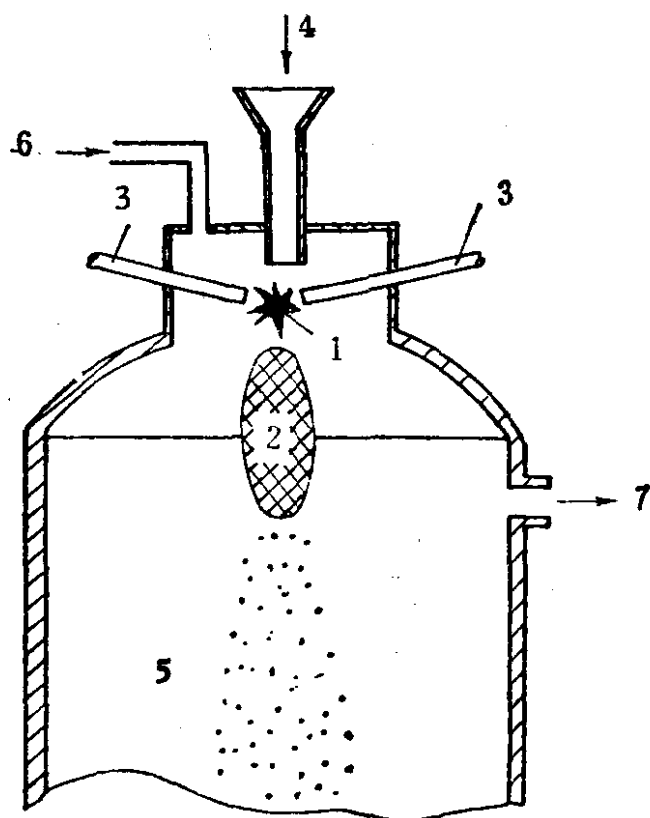


图 1.2 锆英砂在等离子体中一步裂解制二氧化锆流程示意图

- | | |
|---------|----------|
| 1. 电弧 | 2. 等离子体焰 |
| 3. 电极 | 4. 锆英石料口 |
| 5. 二氧化锆 | 6. 气体进口 |
| 7. 气体出口 | |

体工艺直接制备各种难熔金属、金属陶瓷（氧化物、氮化物和碳化物等）的粉末和超细粉末取得了很大成功，从而对材料科学的发展作出了贡献。如美国离子弧公司，用锆英砂（ $ZrO_2 \cdot SiO_2$ ）为原料，在直流电弧等离子中一步裂解制备耐火材料二氧化锆（ ZrO_2 ）。六十年代建成发生器功率为 300 kW，二氧化锆年产量 454 t 的装置。七十年代已扩大为年产 5000 t 的规模^[8]，其示意性流程见图 1.2。又如西德海尔曼公司，以六氯化钨（ WCl_6 ）为原料，在直流电弧等离子体中（ $H_2 + CH_4$ ）制备碳化钨超细粉^[9]获得了很大成功。

（三）七十年代

自七十年代初世界性能源危机以来，极大地推动了热等离子体技术在能源科学中的应用，主要有：

（a）工程加热。由于电能价格比一次燃料昂贵，所以一般认为消耗电能进行普通加热工艺，在经济上是不合算的。由于等离子发生器（或弧加热器）必须用电，因此过去对等离子加热工艺大都采取否定态度。其实，在各种工艺过程加热中如果提高热源温度，即提高热源温度和工艺温度之差，就能提高加热效率^[10]。图 1.3 为天然气加空气的燃烧产物与空气电弧加热器，在不同的工作温度条件下加热效率的比较。天然气理论燃烧温度约为 2250 K，燃

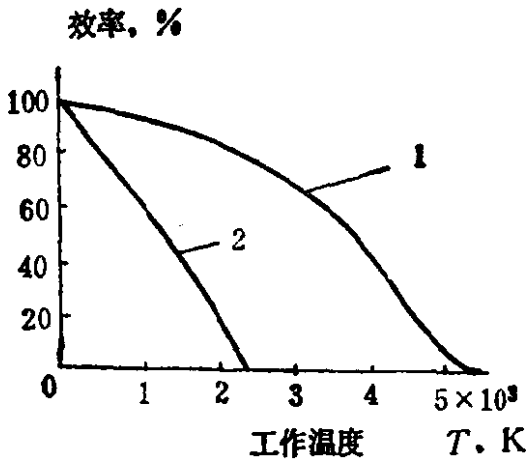


图 1.3 加热效率比较

1——经电弧加热器加热后的空气（ $9.3 \times 10^6 J/kg$ ），
2——天然气火焰（ $3 \times 10^6 J/kg$ ）

烧产物的比焓为 $3 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ，而经电弧加热器的空气比焓设为 $9.3 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 。从图 1.3 中可以清楚地看到，当工作温度比较高时，用电弧加热器的加热效率可几倍于用天然气的加热效率，它就可以弥补电能与一次能源的差价。在陶瓷工业炉、铸造用的预热和固化炉、钢坯加热和铝熔化炉中工艺温度均在 1400 K 以上，因此可以期望用等离子加热工艺将比用一次能源加热更为经济。

(b) 冶炼。在钢铁企业，长期以来一直在寻找和研究各种各样的直接炼铁的方法，但成功的极少。今天，等离子体直接炼铁工艺已表明为既节省能源又降低成本的新炼铁工艺。图 1.4 是高炉炼铁工艺与等离子体炼铁工艺流程比较示意图。新工艺省去了焦

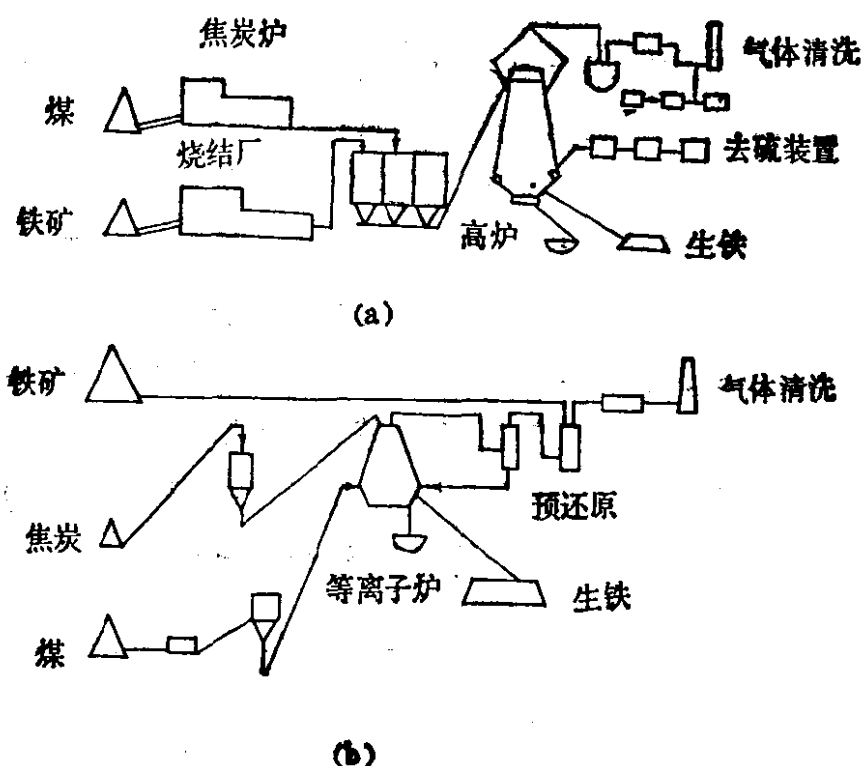


图 1.4 等离子体工艺 (a) 与高炉炼铁工艺 (b) 流程比较示意图

化厂、烧结厂、高炉和去硫装置，所以减少了能耗和环境污染而降低了成本。瑞典的 SKF 钢铁公司声称将用等离子工艺替代高炉炼铁，因为 (i) 熔化过程所消耗的矿物燃料只为高炉的 $1/3$ ；(ii) 废气排量仅为高炉、焦化和烧结工艺排气量的 5% ；(iii) 生铁成本可降低 20% ；(iv) 初投资只为高炉炼铁工艺的 $1/3$ 。另一好处是，

等离子工艺可在原有高炉上改造而实现，从而进一步降低了初投资。SKF 公司还发展了生产海绵铁的等离子体工艺。1978 年一家海绵铁生产厂因成本太高而关闭，1979 年经采用等离子工艺后，由于能耗大幅度减少，且产量大幅度增加^[11]而重新营业。表 1.1 给出了海绵铁传统的 Wiberg-Söderfors 方法与等离子工艺的

表 1.1 生产每吨海绵铁 Wiberg-Söderfors 方法与等离子工艺经济性比较

工艺方法 能耗	Wiberg-Söderfors 方 法	等离子体工艺			
		LPG	重燃油	蒸汽+煤	天然气
电 (kwh)	960	630	830	825	550
焦炭 (kg)	210	—	—	—	—
重燃油 (kg)	—	—	130	—	—
LPG (kg)	—	120	—	—	—
煤 (kg)	—	—	—	180	—
天然气 (Nm³)	—	—	—	—	100
总能量 (GJ)	9.6	8.4	8.8	9.2	8.0
(Gcal	2.3	2.0	2.1	2.2	1.9)

能耗比较。图 1.5 所示的用等离子体工艺熔炼合金钢（耐热钢、耐腐蚀钢、高速钢和工具钢等）的优越性则更为明显。它与普通电弧炉相比，省电 $\frac{1}{4} - \frac{1}{3}$ ；添加合金回收率高；熔炼质量高。目前由东德与苏联合作研究的等离子炼钢工艺已进入西欧市场，日本、美国也与之签订了合同^[12]。清华大学^[13]采用了等离子体工艺制备高纯氮化硼粉末，与传统的化学工艺流程相比具有纯度高、成本低、工艺流程简单等优点。

(c) 煤粉锅炉等离子体点火。随着油、天然气储量的快速消耗，煤成为所使用的主要燃料。由于燃煤技术比燃油复杂，所以当各种大型蒸气发生器以煤粉作为燃料时，仍然需要油或天然气作为辅助燃料。当煤粉锅炉起动点火时必须用油或天然气，例如对于 $12.5 \times 10^4 \text{ kW}$ 机组（400 t/h 锅炉）每次起动约需用 100—200t 轻柴油。据估计，美国 $2 \times 10^8 \text{ kW}$ 烧煤电厂每年消耗于点