

# 高频感应等离子体动力学及其应用

中国科学院力学研究所 朱清文

## 引 言

高频感应等离子体技术是近十多年发展起来的一门新技术,由于它具有无电极污染,弧区大,温度均匀,能提供纯净热源,工质不受限制等特点,在化工、冶金等工业和各个科学技术领域中有着潜在的应用前景.因为过去对能够稳定并控制热等离子体流的某些方法和装置,以及对高频放电理论、等离子体动力学进行了卓有成效的研究,所以促使这个新方向得到了蓬勃的发展.

高频感应等离子体不同于直流或交流等离子体的一个特点是,当等离子体电导率小时,它们的电流-电压特性是相同的,具有负特性,当电流和电导率增加到某一程度,由于趋肤效应而使高频等离子体电流-电压特性呈正特性,所以这种等离子体自然是稳定的.目前感应等离子体的温度介于 8000—11000°K 之间.

## 一 高频等离子体技术

1. 高频等离子体的基本概念:高频等离子体是高压气体放电的一种特殊型式,其放电是靠变化电磁场来维持的,频率范围一般在射频(RF)段.目前产生高频等离子体有下列几种型式<sup>[1]</sup>:

a)高频感应(HFI)式等离子炬:这种型式的等离子炬(如图 1—1 所示)发展得最多,所产生的高频感应电弧(或称为无电极电弧)或热感应等离子体的放电是靠变化磁场来维持的,近似地可以把它看成是一个高频变压器,原边包括圆柱形或板形的多匝线圈,副边是放电管中的等离子体,相当于只有一匝的线圈.目前功率,在工业中已达 200—300 千瓦,在实验室已达 500—1000 千瓦.感应放电最小维持功率是一个重要的特性参数,它决定于气体、压力和电磁场频率.当频率从兆赫级减到零点几兆赫时,最小维持功率至少从 10 千瓦增加到数百千瓦,当频率进一步减小,所需功率急剧增大.在等离子体中感应的环电压:

$$|V| = \pi R^2 \mu \omega H \quad (1)$$

式中  $R$  为放电半径,  $\mu$  为气体导磁率,  $\omega$  为磁场角频率,  $H$  为磁场强度.维持放电必须有一定大小的环电压或电场强度.减少维持感应放电最小功率,必须增加等离子体电导率,这可靠降低气体压力或增加离子化混合物达到.

高频感应放电是由导电材料的感应加热定律所控制,然而在等离子体感应放电中气体动力学现象是非常复杂的.只能定性地计算,这就是为什么计算气体流动高频感应放电的工程方法尚没有发展的原因.在感应等离子体中最有兴趣的是化学活性强的等离子体如  $O_2$ ,  $Cl_2$ ,  $H_2$  和反应物质蒸汽等.

b)高频电容(HFC)式等离子炬:这种型式如图 1—2 所示.高频电场借电容同等离子体

耦合。由于耦合电容导致放电电流与电极电压发生相移，降低了放电效率，应用受到一定限制。维持高频电容放电需要的功率非常小，在10—20兆赫范围中对空气为0.2千瓦，对氢气为1千瓦。若功率为10千瓦，效率可达40%，增加功率到100和1000千瓦没有任何困难。可用任何气体形成等离子体。

c) 高频火焰 (HFF) 式等离子炬：这种型式如图1—3所示。将高频电场加于电极，放电电流经分布电容接地，效率接近50%。需要维持功率也很小。由于存在电极腐蚀，形成等离子体工质受到限制。

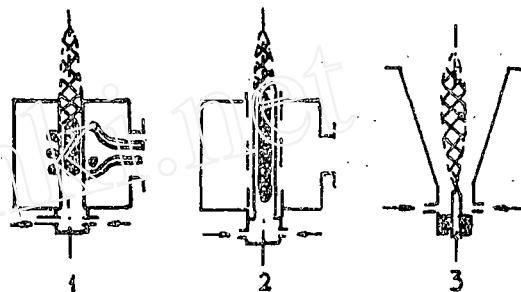


图1 高频等离子炬基本型式  
1—HFI式, 2—HFC式, 3—HFF式

d) 混合式等离子炬：这可由高频 (HF) + 直流 (DC)，高频 (HF) + 交流 (AC)，高频 (HF) + 低频 (LC) 混合而成。目前这种型式发展得还不够，但据认为很有发展前途。

2. 等离子体和高温等离子体的特点：等离子体用于化学反应过程，由于下述特性<sup>[2]</sup>非常引人重视：

a) 反应平衡在高温中进行。

b) 反应速度随温度迅速增加(反应时间  $10^{-3}$ — $10^{-5}$  秒)。由于反应速度增加，即可革新设备，如在长65厘米，直径15厘米的等离子体化学反应器中，甲烷热分解能力25000吨/年：

表1 高频感应和直流等离子体经济性比较

名义功率 1000kW	空气 10000BTU/lb			氩 8000 BTU/lb		氮	空气
	感应等离子体	直流等离子体	炭电弧	直流等离子体	感应等离子体	直流等离子体	电弧感应等离子体
分出气体功率 kW	650	650	650	650	650	650	650
输入直流功率 kW	1,180	1,000	1,000	1,445	1,180	1,000	1,000
离开等离子炬等离子体功率 kW	55	65	65	45	55	65	65
系统折旧费 \$/hr	12.50	2.75	3.73	3.30	12.50	2.75	10.59
维护 等离子炬 \$/hr	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
电极更换	—	100.00	—	5.00	—	20.00	—
槽路电容 \$/hr	3.20	—	—	—	3.20	—	3.20
整流器 \$/hr	1.47	1.47	1.47	1.47	14.7	1.47	1.47
振荡管 \$/hr	9.40	—	—	—	9.40	—	9.40
炭极消耗 \$/hr	—	—	4.75	—	—	—	—
气体价格 \$/hr	0	0	0	30.00	30.00	10.00	—
小计 \$/hr	27.07	104.72	10.45	40.27	57.07	34.72	25.16
电价 \$/hr	7.07	6.00	6.00	8.08	7.07	6.00	6.00
空时 \$/hr	—	40.00	—	2.00	—	8.00	—
总计 \$/hr	34.14	150.72	16.45	50.95	64.14	48.72	31.16

c) 反应在非平衡状态下完成, 可获得高的产量。

d) 可以处理低品位原料。

此外, 大多数等离子化学过程是一级反应, 低温等离子体可用气动电动力学方法进行反应过程最佳控制。因之等离子体气氛易控, 易于骤冷, 同时可降低投资、减少成本、节约能源、改善劳动条件和环境状态等。

高频等离子体反应过程除上述特点外, 特别是无电极等离子体还具有无电极消耗, 无污染, 等离子炬寿命长(高频机寿命主要由电真空管寿命所决定, 一般为2—3千小时), 不受气体限制, 弧区大, 温度均匀等特点。一般认为产生高频等离子体效率低, 用于工业生产经济效果差, 但效率可以提高, 已经提出了把阳极损失减少到5—8%的两个方法, 一是使机器运转在过压状态, 一是用具有磁聚焦的特殊电真空管。高频发生器效率可提高到70—85%。若改善工作频率, 效率还可进一步提高。高频等离子体同直流电弧等离子体的经济性比较如表1所示<sup>[3]</sup>。需要说明的是要进行科学的比较也是困难的, 只能作一参考。

## 二 国内外高频等离子体发展概况

1. 等离子体装置水平: 工业应用的等离子体发生设备主要指标为功率、效率和寿命。目前发展水平<sup>[4]</sup>, 电极电弧等离子炬已能达到3—5兆瓦(Westinghouse, USA; Institute of Thermal Physics, USSR), 效率60—90%, 寿命受电极腐蚀所限制, 对活性气体(O<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, Air)不超过100—200小时。高频(0.5—15兆赫)等离子炬功率可达1兆瓦(TAFF, USA; USSR), 效率50—75%, 寿命可达2000小时, 估计近期可实现10—20兆瓦电弧等离子炬, 寿命在活性气体中数百小时, 同时发展5—10兆瓦高频等离子炬, 频率降到1—10千赫, 效率可达80—90%。

2. 应用情况: 高频等离子体已广泛研究<sup>[1—10]</sup>用于金属的球化, 蒸发, 熔融, 超细氧化物、碳化物、氮化物的制取(如TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiC, TiN, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>等), 高纯和超细金属粉末的制取, 矿石的热分解(如ZrSiO<sub>4</sub>, MoS<sub>2</sub>), 钛铁矿的还原(用H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>或C), 氢还原二氧化钛制取钛, 等离子法熔炼和精炼等, 同时, 等离子体用于化工合成, 光导纤维, 超纯玻璃, 半导体材料和线路工艺, 薄膜材料, 超导材料, 低气压沉积等。现在较详细地介绍下面几个问题。

a) 钛白(TiO<sub>2</sub>)粉: 钛白粉由于具有优良的物理、光学性能, 在现代工业中应用愈来愈广泛, 如涂料、造纸、合成纤维、橡胶、塑料、搪瓷、油墨等工业部门都需用大量不同类型的钛白。由于经典的硫酸法不仅消耗大量的硫酸, 而且要生产出大量的废酸而受到限制, 因此用气相氧化法生产钛白是目前发展方向, 反应为:



根据热力学和动力学的研究以及质量的要求, 反应温度最好是在1200°C以上, 这就需要外部提供热量, 这可用CO燃烧来提供, 但使净化和循环复杂化, 而用直流或交流电弧等离子体也有污染问题, 因之用高频感应等离子体可有效地克服上述缺点。据报道<sup>[10]</sup>, 目前世界钛白的总生产能力约300万吨/年, 最高达230万吨/年。美国约占世界总产量的1/3多, 而美国的钛白有60%是由气相氧化法生产的。从65年至80年6月关于等离子体法生产钛白的专利文献有97篇, 但其中有些是相同的(同一专利在几个国家申请), 故净数为35

篇<sup>[20]</sup>。1970年美国TAFF<sup>[11]</sup>发表了用感应等离子体法生产钛白的方案,公布了1兆瓦水冷等离子炬的结构示意图以及感应加热的部分数据。生产钛白能量消耗可降到0.2千瓦小时/磅。以后没见到进一步的报道。据SRI PFP材料报道,美国生产9万吨/年钛白技术方案是用5台1000千瓦感应等离子设备,其中一台为备用。

苏联<sup>[12,13]</sup>从64年开始,先后开展了40千瓦实验室规模,100千瓦半工业规模与300千瓦工业规模的高频感应等离子体制取钛白的研究。达到的指标为电耗1.93度/公斤,加入 $TiCl_4$ 处 $O_2$ 平均温度为1600—1800°C,钛白的弥散度97.3%,白度91%,着色力1800,尾气含氯80—90%,年生产率可达5000吨。

b)超微细粉末:直径为 $10^{-7}$ — $10^{-9}$ 米的超微粒子在磁性、内部压力、光吸收、热阻和熔点等方面具有独特的性质,这给电子、催化剂化学、冶金和医学等产业技术带来革新的可能性<sup>[19,17]</sup>。已搞清楚的特性有:表面积特别大,表面张力大(因表面张力在内部产生极高的压力),铁系合金超微细粉末磁性比金属块强得多。铬系合金粉末充分吸收光,熔点较金属块低得多,活性强,能进行多种反应,在低温条件下几乎没有热阻,热极易通过。由于超微粒子的这些特性,各种用途的研究正在积极开展,现在研究最多的是作为磁性材料的利用。日本富士、松下、日立以及一些大学都开始试制磁带,预想能否制成为现在的十倍记录密度的磁带。三井东压化学公司着眼于光吸收性,着手研究红外线的吸收材料,期待着应用到太阳能利用装置等。超微粒子可以产生划时代的催化剂。在固体火箭里利用金属镍粉作为催化剂,有人预想若用超微粒子就可能制造燃烧效率是现在一百倍的火箭燃料。在国外使用热阻小的超微粉在世界上首次制出接近绝对零度的极低温。目前这种超微粒子可用真空蒸发法制成,高频等离子体无疑地会在这些方面发挥独特的作用。此外在陶瓷粉末制取如 $Si_3N_4$ 、 $SiC$ 等方面也大有用处,美国已成功用 $Si_3N_4$ 粉末制造涡轮盘,发动机叶片,这可大大提高发动机工作温度,从而提高效率,减轻重量。

c)光导纤维:近年来有不少关于用感应等离子体制取光纤的报道和专利<sup>[18,19]</sup>。利用这种方法可生产出在850nm时,损失4.4dB/km和在1100nm时损失2.8dB/km的光纤。由于采用感应等离子体,可大大提高纯度,减少光传损失。

d)模拟和输运性质研究:由于感应等离子体与电弧相比,有较大的直径和长度,高度纯洁,且温度梯度较小,因此对于在其中确定原子、分子、离子等谱线的跃迁几率,对于确定输运系数以及其他物理参数等平衡问题的研究,对于核火箭工作性质的模拟都创造了良好的条件<sup>[21]</sup>。

3. 试验研究:1884年Hitdorf<sup>[22]</sup>及其后的Tomson<sup>[23]</sup>曾假设这种形式(高频感应)的放电不是由感应线圈电场而是由磁场激发,并具有在气体中感应出电流的特性,Tomson的工作使高频感应无电极放电的理论得到了进一步的发展。随着大功率电子管振荡器的出现和放电功率的提高,高频放电的研究又开始了一个新时期。1947年Babat<sup>[24]</sup>首先成功地获得大气压下的感应无电极放电( $f=3$ 兆赫, $D=100$ — $400$ mm, $P=10^{-1}$ — $700$ mmHg),但真令人感兴趣的是还是Reed<sup>[25]</sup>1961年用开管和流动气体产生了等离子体,这给工业应用带来了可能性。此后不久,美国、英国、法国、苏联的科学工作者开始了实验。Reed用炭棒放入感应场起动感应电弧。对小等离子炬更方便的起动是用Tesla线圈,对于大尺寸等离子炬可用钨丝或难熔金属放到靠近感应线圈的放电管端,由于在线圈和钨丝之间的电容电流而起动,若进气旋转,有利于电弧点燃。开始实验,主要用Ar进行了一些光谱研究,

在热平衡假定下推算出放电区温度分布,不久发现,线辐射强度的最大值是在等离子体边界上,这主要是由于趋肤效应辐射冷却所致.在较小放电管中可产生较高的温度.最高温度范围一般在8000—11000°K之间.

最引人注意的一个问题是感应电弧的稳定性.高频感应电弧由于趋肤效应而自然稳定.从金属感应理论知道,当 $R/\delta=1.75$ ( $R$ 为金属导体半径, $\delta$ 是趋肤深度)时为磁能耗散的最佳点.对感应等离子体要适当修正,因为导电率 $\sigma$ 不均匀.实验结果 $R/\delta$ 变化范围1.65—1.75,尽管频率 $f$ ,压力 $P$ ,半径 $R$ ,质量流率 $m$ 在较广的范围中变化.当 $R/\delta$ 低于最小值时,稳定弧是困难的,相反当 $R/\delta>1.75$ 时弧是稳定的, $R/\delta$ 值在2—9的范围内亦是稳定的.

等离子体的存在改变了感应线圈阻抗的电阻和电感阻抗分量,在通常的槽路中,这就使谐振频率变化.同时高频振荡器的内阻是振荡幅度亦即功率水平的强非线性函数,而等离子体负载阻抗亦是随功率强非线性变化,所以振荡器的阻抗匹配是非常复杂的,尚没有严格的处理方法.Freeman和Chase<sup>[26]</sup>研究了这一问题.Walsh<sup>[27]</sup>也近似地用能量平衡法进行了分析.

Eckert<sup>[28]</sup>作了降低感应频率的实验.由式(1),降低 $\omega$ 值而提高 $\mu$ 值环电压可以不变.他用环形放电装置在频率9600赫情况下维持了低压辉光放电,进一步维持了压力为400托的等离子体放电.若感应频率能降到万赫以下,对于提高效率,降低成本,改革设备,延长装置寿命有重要意义.

高频等离子体的实验工质多用Ar,也有些是用 $N_2$ , $O_2$ .由于 $H_2$ 在冶炼金属和核火箭(GCNR)模拟方面的独特作用,对于以 $H_2$ 作工质的感应等离子体,TAFF<sup>[21]</sup>作了详细的研究,并且成功地实现了纯 $H_2$ 等离子体.从公布的资料来看,目前在国际上也只有这一家.由于氢的平均热传导系数比氧高数倍,热收缩效应大,等离子炬难以耐高温连续运用,一般石英壁的极限热负荷为90瓦/平方厘米.这就需要在等离子体与石英壁之间加隔离水笼冷却或采取别的结构,这样又带来了容易在放电线圈和水笼之间的高压放电.另一方面, $H_2$ 弧内阻远大于 $O_2$ , $N_2$ ,故等效电阻增大.由此可见,高频机不仅要功率大,而且由Ar弧转为 $H_2$ 弧,阻抗匹配范围也要宽一些.这都增加了实现纯 $H_2$ 等离子体的困难.TAFF所用装置为频率4兆周,功率60—185千瓦,等离子炬直径1.1英寸, $H_2$ 流量1—16SCFH,出口焓值非常高,达到 $10^6$ BTU/lb.同时TAFF用 $N_2$ 作工质,功率1000千瓦,频率450千赫,等离子炬用直径3—6英寸的金属水冷壁,获得出口焓值40,000BTU/lb.在没有边气情况下,在1000千瓦功率时频率可降到200千赫.该试验发展了一系列水冷式或气冷式金属等离子炬,对结构参数、气流参数、不同工质作了详尽的试验,对不同参数下的最小维持功率、等离子炬特性、气体流量对效率的影响、等离子弧的稳定和灭弧的范围、匹配特性都作了详尽的研究.

为模拟核火箭(GCNR)的工作状态,还对可渗透壁等离子炬进行了研究<sup>[30]</sup>.

当固体粉末加入到等离子区时,由于磁泵效应和气体流动特性可能把粉末推出弧区,这种现象已为实验所证实<sup>[31]</sup>.

对于等离子体的不平衡现象也作了研究<sup>[32]</sup>,得到了近似关系式:

$$\bar{n}R \sim 10^{16} \text{cm}^{-2} \quad (3)$$

试验中发现,在气体流率较大时( $\sim 20$ 升/分),在轴心处是不平衡的,电子温度随流率增加

而稍微增高,但气体温度猛烈降低.由于存在不平衡现象,这也就解释了用光谱法所测温度同用热焓测量法测出的不同的原因.从式(3)可看出当放电半径增大时,由于电子密度低,不足以进行达到平衡的热交换,有可能出现不平衡,这已为 Ar 弧试验所证实,Ar 弧直径 14 厘米,发现整个断面就不平衡.在电弧边缘由于存在大的温度梯度,致使存在电子密度梯度,因之产生电子和离子的双极扩散而造成不平衡.

对于直流磁场对感应电弧的影响也作了研究<sup>[33]</sup>.只要感应电弧呈圆柱形或椭圆形,就呈微弱的顺磁性,可以被靠近等离子体的磁场强度为 200--300 A/cm,梯度为 100A/cm<sup>2</sup>的场所吸引,在强磁场下,可使其变形而呈反磁性,这迫使弧柱回转而造成不稳定.

关于高频等离子体的诊断也是一个很引人注意的领域<sup>[67]</sup>.利用光谱确定电子温度同一般电弧没有什么差别,勿须在这里详细讨论这个问题.但需指出,一般由于温度较低,不只是辐射,吸收亦可用于诊断.

感应电弧维持电压的测量比直流电弧更困难.用嵌进石英毛细管的水冷线环可以测量出感应电压<sup>[34]</sup>.磁探针特别适合于感应电弧的诊断,并已测出宝贵的数据,它是由嵌入毛细管中的多匝微型线圈组成,并把它置于感应电弧中,在固定频率时,探针产生的信号同当地磁场值成比例,为了得到好的分辨力和使等离子体扰动小,必须使探针杆的直径同等离子体柱相比为小.也发展了有弹簧伸缩装置的无冷却探针<sup>[35]</sup>.当磁场强度  $H$  是复数时,还须测出相角,这可用一双磁针系统作到<sup>[36]</sup>,除去可移动探针测量  $|H|$  外,一个同样的固定探针放于等离子体边界上测量  $H_R$ ,通过  $H_R$  和  $|H|$  即可算出相角差.由测出的  $H$  微分可得到电流密度  $j$ ,由  $j/E$  即得到电导率  $\sigma$ .

文献[37]用 Beckman DKIA 光谱强度计测量了感应等离子体的辐射.用 HY-CAL 太阳热计(Model P-8400-B-01-120)测量了在 1 大气压下 9600 赫等离子体的总辐射.

高频感应等离子炬气动力学的研究有重要的意义.气体在放电管中的流动是非常复杂的,旋转稳定感应等离子炬的等离子体核心内部的速度分布如图 2 所示.实际上,真实流动将比这还要复杂,主要是由磁泵效应所引起,将在下面理论分析中再说明这一问题.

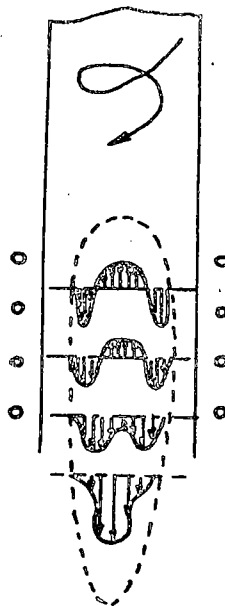


图 2 旋转稳定感应等离子炬等离子体核心内部的速度分布

关于流速和压力分布的测量方法仍多用空气动力学天平法,炭粒子的轨迹法以及水冷皮托管法.从等离子炬出口  $\rho U$  值的分布,发现放电管中边层的气体多数是穿过趋肤层而流入等离子体区,当气流量增多不能通过趋肤层流出时,弧区将被推向下游以致熄灭.文献[38]用五孔探针测量了感应等离子体弧区的压力和速度分布.文献[39]用在等离子体弧区加难熔微小颗粒用电影摄影机拍照的办法来确定气流速度.但应指出,直到现在还没有关于弧区速度、压力分布的可靠测量数据.

现在利用激光,微波进行等离子体诊断也正在进行研究.

4. 理论分析:在等离子体中由于电导率  $\sigma$  和热传导系数  $\lambda$  是温度的强非线性函数,同时在感应等离子体中,流体流动现象相当复杂,当满足 Maxwell 方程和 Ohm 定律时致使理论分析相当困难.一般采取能量平衡法,用数值解或近似的办法处理.在一大气压下感应放电电子的碰撞频率比驱动频率高得多,所以都基于热平衡的假

定(关于不平衡的问题,上面也讨论了,这一假定受到明显的限制)。此外,假定放电柱对称,无限长,在近似处理中,还往往忽略气体流动,忽略辐射,按一维处理。在数值求解中可考虑辐射,速度往往是给定的。

a)双渠道模型:把放电管分为两部分,即放电区和放热区,当 $0 \leq r \leq r_1$ 时,即在放电区域,电导率 $\sigma = \sigma(S)$ 或 $\sigma = \bar{\sigma}(S)$ ( $S$ 为热势函数),其中高频磁场感生环电压,并产生环电流,借欧姆加热维持等离子体放电。当 $r_1 \leq r \leq R_0$ 时,假定 $\sigma = 0$ ,热量经此区域传至管壁。基本方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r E = -i\omega \mu H \quad (4)$$

$$\frac{dH}{dr} = -\sigma E = -j \quad (5)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \lambda \frac{dT}{dr} - \sigma E^2 - Q = 0 \quad (6)$$

式中 $Q$ 为辐射散热。花费了很大的努力去寻求方程的解,主要是数值解。作为一个初值问题,Сошников和Трехов<sup>[40-42]</sup>, Hollister<sup>[43]</sup>从 $r=0$ 开始积分直到 $T=0$ 或任意规定值 $T_R$ 。除去得到温度分布外,还得到磁场、电场、电流密度的幅相分布。文献[44]证实了实验值与理论计算值 $T(R)$ 的一致。文献[45]进一步比较了空气和氩等离子体的实验值和计算值,通常结果是满意的。

Freeman和Chase<sup>[26]</sup>忽略了方程(6)中的辐射项 $Q$ 。取 $\sigma$ 为常数,为确定通道半径增加了一个附加关系,利用了Steebeck最小熵增原理。所得结论有的是错误的,如该文中指出当 $\delta/R < 0.6$ 时,感应电弧将不能维持。但对 $N_2$ ,  $O_2$ 和Ar弧工作特性的计算则同他本人实验结果是一致的。

Груздев等人<sup>[46-48]</sup>假定 $Q=0$ ,把 $\sigma=$ 常数作为一次近似的修正模型,对通道半径和峰值温度得到的计算数据同他们的实验相一致。

Pridmore-Brown<sup>[49]</sup>保留了辐射项,作为两点边值问题,用数值积分方程组,给出了温度 $T$ ,电场强度 $|E|$ ,磁场强度 $|H|$ 的分布。在文献[50]中将其温度分布同实验值和其他方法的计算值作了比较。

Kenji Ebihara<sup>[60]</sup>用一维能量方程同一维电磁方程求数值解,用Ar作工质,在一大气压下,计算结果指出在等离子体表面的电场强度同电功率输入之间的关系示出存在着一个场强的最小值,而随频率近乎线性的增加。此外,在等离子体表面的Poynting向量和热传导损失亦可得到。

Walsh<sup>[27]</sup>发展了一种近似方法,他把放电管中温度为 $6000^\circ\text{K}$ 处作为放电半径,取 $\frac{1}{2} \sigma_{max}$ 作为平均电导率进行求解,结果发现同实验值有较好的一致,其结论为,利用这种方法可以预示放电的稳定性。

作者<sup>[53]</sup>以双渠道模型为基础,考虑气体流动、对流传热以及热辐射修正,利用等效温度能量平衡算法,求出了Ar,  $N_2$ ,  $H_2$ 等离子体放电特性和其他参数,并同现有文献进行了比较,能给出很好的结果,而计算可大大简化。文献[54]利用拟渠道模型分析了等离子体的关键参数,放电特性曲线,高频机输出特性和阻抗匹配问题。

b)两区域模型:此模型同双渠道模型不同,将放电管中分为两个区域,在外部区域(即趋肤层附近), $\sigma E^2 \gg Q$ ,所以将 $Q$ 项忽略掉;在内部区域 $\sigma E^2$ 随 $r$ 减小而迅速减小, $Q$ 较

大, 因之可假定:

$$Q - \sigma E^2 = Q_0 \quad (7)$$

$Q_0$  是在  $r=0$  时的  $Q$  值. 引入势函数  $S = \int \lambda dT$ , 方程(6)即化为

$$\left(\frac{d^2 S}{dr^2}\right) + \frac{1}{r} \frac{dS}{dr} + \sigma E^2 - Q = 0 \quad (8)$$

在外部区域, 并假定  $\sigma = c^2 S$ ,  $c^2$  代表  $\sigma(S)$  的平均斜率. 假定  $|E| = E_0 \left(\frac{r}{R}\right)^q$ . 这样方程(8)的解

$$S = A \left\{ J_0 \left[ \lambda \left(\frac{r}{R}\right)^{q+1} \right] - [J_0(\lambda)/Y_0(\lambda)] Y_0 \left[ \lambda \left(\frac{r}{R}\right)^{q+1} \right] \right\} \quad (9)$$

式中  $\lambda$  是本征值 ( $\lambda = CE_R R / (q+1)$ ). 在内部区域, 方程(8)的解

$$S = S_0 + Q_0 (2/r)^2 \quad (10)$$

然后将上两解适当地连接起来即得方程(8)的解.

Мейерович<sup>[55]</sup>分析了当  $\delta \ll R$  时非辐射电弧加热层的情况, 这样方程(4)简化为

$$dE/dr = -i\omega\mu H \quad (11)$$

假定电导率

$$\sigma \sim \exp(-I/(2T)) \quad (12)$$

$I$  是离子温度, 较最高温度  $T_m$  大得多, 即

$$T_m \ll I \quad (13)$$

在等离子体内部,  $T \approx T_m$ , 取  $\sigma = \sigma(T_m)$ . 取表示式  $T$  和  $r$ :

$$T = T_m - \frac{2T_m^2 \theta}{I} \quad (14)$$

$$r = -\left(\frac{2}{\sigma_m \mu \omega}\right)^{\frac{1}{2}} \xi \quad (15)$$

将式(14), (15)代入式(6), 得

$$\frac{d^3}{d\xi^3} e^\theta - e^\theta \frac{d^2 \theta}{d\xi^2} - e^{-\theta} \frac{d\theta}{d\xi} = 0 \quad (16)$$

上式可用数值法求解. 随后 Мейерович<sup>[56]</sup>又去掉了  $\delta \ll R$  的限制.

对等离子体的处理, 由于放电区不是无限长, 这就使计算参量不只是依赖半径  $r$ , 还依赖于放电轴坐标  $z$ , 因之需按二维处理. Miller 和 Ayen 提出了预示感应等离子体径向和轴向温度分布的数学模型, 可计算物性参数随温度变化并包括辐射损失的等离子体参数. 能量方程为

$$\begin{aligned} & \gamma \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho C_p \left( u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial T} \gamma \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \sigma E^2 - Q = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

假定气体速度分布是一维的, 即  $u_r = 0$ , 边值条件为:

$$T(R, z) = T_{w,11}, \quad \frac{\partial T}{\partial r}(0, z) = 0, \quad T(r, 0) = T_{i,n} \quad (18)$$

式中,  $z=0$  代表放电区域上游进口处,  $T_{w,11}$  和  $T_{i,n}$  均代表常数, 速度  $u_z$  是给定的. 对三种功率进行了计算, 结果同试验值相符合. 文献[52]用二理想气体流动模型修正了上面的



气体速度分布的假定。

Райзер<sup>(57)</sup>考虑了半无限非辐射柱的空气流,  $\delta/R \ll 1$ , 实质上利用常数物性参数, 推导出加热层温度分布表示式并指出同燃烧火焰前峰间的模拟, 如考虑  $u_z$ , 则修正最高温度表示式

$$\int_{T_R}^{T_m} \sigma(T) \gamma(T) dT = \frac{H_R^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{H}{H_R} \right)^2 \right] \quad (19)$$

为下式:

$$\int_{T_R}^{T_m} \sigma(T) \gamma(T) \left[ 1 + \frac{\rho_0 u_z \int_{T_R}^{T_m} C_p dT}{\gamma \frac{dT}{dx}} \right] dT = \frac{H_R^2}{2} \quad (20)$$

计算结果指出,  $T_m$  随  $u_z$  的变化不大, 主要由气体物性参数决定。

Bouels<sup>(58)</sup>进一步从动量方程、连续方程、能量方程、电磁方程出发求数值解, 方程组为:

$$r^2 \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\Omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\Omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right) - \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ r^3 \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu \Omega}{r} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^3 \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\mu \Omega}{r} \right) \right\} \right] \right] + d = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \Omega = 0 \quad (22)$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( h \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( h \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] - \frac{1}{\text{Re} p_r} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{kr}{C_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{kr}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \right] - (P - Q_r) = 0 \quad (23)$$

$$\frac{dE_\theta}{dr} = -E_\theta/r - \xi \omega H_z \sin x \quad (24)$$

$$\frac{dH_z}{dr} = \sigma E_\theta \cos x \quad (25)$$

$$\frac{dx}{dr} = \frac{-\sigma E_\theta}{H_z} \sin x - \frac{\xi H_z}{E_\theta} \cos x \quad (26)$$

式中

$$d = -r^2 \frac{\partial F_r}{\partial z} - r^2 \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{V_r^2 + V_z^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{V_r^2 + V_z^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial z} \right] \quad (27)$$

$$P^* = \partial E_\theta^2 \quad (28)$$

$$F_r^* = -\xi \sigma E_\theta H_z \cos x \quad (29)$$

$\Omega$  为涡量,  $P = P^*/(\rho_0 h_0 u_0/R_0)$ ,  $F_r = F_r^*/\rho_0 u_0^2/R_0$ ,  $x = \phi_H - \phi_E$ .

通过数值计算, 典型的结果如图 3 所示. 有趣的是流场中有磁泵效应引起的涡流区, 当流量增大时, 对于上游的涡流有很少的影响, 对于下游涡流的影响较大, 开始变小, 靠近等离子炬壁面, 随着流量增大而直到消灭。

以前都是假定速度分布, 而 Bouels 是通过计算得到的速度分布, 这使通过数值计算研究感应等离子体前进了一步. 但应指出的是, 这同实际流动仍有很大的差别, 一般在等离子炬中气体还有旋转速度  $v_\theta$ , 而且多为湍流流动. 随后该作者又作了考虑旋转速度的计算<sup>(68)</sup>.

Кулагин<sup>(59)</sup>将等离子区弧柱分成几段进行测量和计算, 每段可作为圆柱处理, 各段圆柱直径不同, 段数分得愈多, 愈接近实际情形。

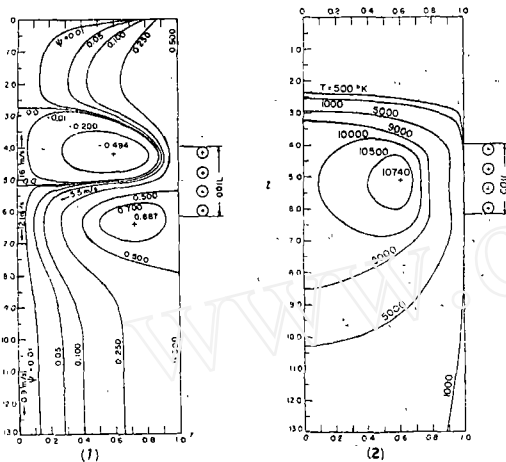


图3 等离子区的流场和温度场分布  
(1)流场分布 (2)温度分布

5. 国内高频等离子体技术发展概况: 我国基本上从1975年开始研究高频等离子体, 虽然起步较晚, 但发展较快。首先由科学院力学研究所对高频纯氧等离子体进行了研究<sup>(61)</sup>, 在此基础上同科学院化冶所合作研究用高频纯氧等离子体气相氧化法生产钛白粉, 后天津化工厂也参加了这一开发研究项目。很快地在天津化工厂建立起了实验基地, 造出了功率大的等离子体发生器, 正式生产了钛白粉。冶金部有色院, 遵义九〇六厂等单位也相继开展了这方面的研究工作。通过几年的努力, 由力学所, 化冶所和天津化工厂等单位共同研制的钛白,

已达到化工部科技局下达的四项指标, 1980年10月通过了国家技术鉴定, 为国家利用等离子体生产高档钛白填补了空白, 1982年7月26日北京日报、光明日报已作了报道。在高频等离子体应用方面还有北京光导纤维通讯会战组(力学所也是其中成员)研制光导纤维, 力学所与天津红旗化工厂研制氮化硼, 化冶所研制碳化钨, 成都科大研制氮化钛, 成都有机所研制氧化铝等。

在基础研究方面也作了不少工作。科学院力学所与冶金部有色院于1979年实现了纯氢高频等离子体<sup>(62)</sup>, 力学所于80年利用简单槽路, 在较低频率下实现了纯氢等离子体。现在我国已可成功地实现Ar, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub><sup>(69,70)</sup>等各种高频等离子体。目前我国已具有较大功率的等离子体发生设备, 对于高频放电理论, 等离子体特性分析与匹配都作了较好的研究<sup>(53,54,62)</sup>, 对于槽路Π形网络作了一定研究, 指出其具有消除尾焰接地熄弧的特点<sup>(63)</sup>, 同时对高频等离子体反应器的流动状态也作了研究<sup>(64)</sup>。

现在我国从高频等离子体技术研究的单位有科学院力学所, 化冶所, 冶金部有色院, 福建海洋所, 成都科技大学, 成都有机所, 清华大学, 天津化工厂, 遵义906厂, 天津第九玻璃厂, 北京玻璃研究所, 铁岭电子设备厂, 北京广播器材厂等单位。在这些单位中有从事基础研究的机构, 有从事应用研究的机构和工厂, 有从事制造高频设备的工厂, 这是一股配备齐全的研究和发展高频等离子体技术力量, 目前, 这一领域在我国正处在发展时期。

### 三 高频等离子体技术需解决的问题

高频等离子体技术在过去虽然得到了较大的进展, 但随着工业技术的不断进步和工艺过程要求的提高, 还必须进一步地发展。这就要求提高效率(如提高阳极回路效率到90—95%, 提高整个设备效率), 增大功率(到3—5兆瓦), 延长机器寿命, 发展结合式等离子体发生器。同时在基础研究, 理论分析方面远不能满足要求, 为此需开展下列几个方面的研究。

a) 高频振荡器: 需要开展减少阳极损耗, 提高效率, 提高寿命, 适合等离子体特点的槽

路型式和调整方法的研究,要特别研究无管式高频振荡方法.将能维持等离子体稳定放电的频率减少到万赫以下是发展方向,并具有现实性.另一方面发展结合式(RF+DC,RF+AC,RF+LF)型式.

b)高频等离子炬:在大功率等离子炬中,应发展金属水冷壁,这比气冷石英壁可提高功率密度十倍.可渗透材料,防辐射材料等离子炬壁可减少热损失,提高效率.要选择合适的等离子炬结构型式,合理的工作参数,开展工程设计方法、等离子炬的等离子体动力学和气动力学的研究.

c)高频等离子体动力学:研究高频等离子体的高频放电理论,等离子体与高频电磁场的作用规律,高频等离子体与固定磁场的作用,高频等离子体辐射和输运性质,非平衡流动特性,起弧灭弧机理,气体穿越趋肤层特性,高频等离子体热力学.同时结合高频等离子炬开展结构参数、流动参数和电磁参数对等离子炬特性的影响的研究,发展考虑气体流动特别是湍流流动的等离子炬工程设计和计算方法,研究模拟规律,等离子体放电的稳定性,高频感应低气压放电等.

d)高频等离子体过程:一般把高频等离子体作为化工、冶金过程中的热源或高频等离子体直接参与氧化、还原等反应,所以已经形成了等离子体化工、等离子体冶金的新学科、新领域.在等离子体过程中,需要研究非等温射流动力学,等离子体温度中多相系统的动力学和反应机制,迫切需要研究在湍流非等温等离子射流中,特别是在非平衡等离子体中的物理化学传输(传热,传质,传动量,化学反应).

e)诊断:目前等离子体诊断是一个非常活跃和薄弱的领域.需要进一步研究光谱、激光、微波、探针等各种非接触和接触式诊断方法,现在特别需要测量等离子体中的气动参数(速度、压力等).

f)应用探索:高频等离子体是一种纯净的热源,并能直接提供高温氧化、还原等气体,在化工冶金中有着广泛的应用前景,特别在超纯微小粒子的提取和高频低气压等离子体应用方面.目前在国际上,等离子体技术虽然是一个很活跃的领域,尤其高频等离子体技术,但大多还停留在实验室阶段,至于其工业应用所见报道还不多,也可能是由于保密.因为在工艺过程中实现一种目的的技术途径往往不是唯一的,这就需要研究高频等离子体应用最适合的领域和技术项目,探索其应用前景.

## 结 束 语

以上对于高频等离子体技术在过去的的发展(实验技术,理论,诊断和应用)作了较详细的评述,对于当前所存的问题和所需要解决的问题也作了讨论.过去在实验技术方面主要集中在高频感应等离子体放电的起动,放电的稳定性,降低驱动频率,光谱研究,磁泵和磁效应,阻抗匹配,高频等离子炬和其中流动的非平衡性.主要是用Ar作工质研究的为多,也有用O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, 空气的,TAFF用工质H<sub>2</sub>作了研究.在理论方面主要集中在一维分析,利用能量平衡法,用数值法求解,用得较多的是双渠道模拟,也有不少在更粗糙的情况下用近似解析的分析方法.有少数文献进行二维处理,但气体流动速度分布不论在一维,还是在二维处理中都是假定的,或者不考虑.只看到两篇文献是把动量、连续方程同能量和电磁方程共同求数值解,因之速度场是算出来的.有趣的是也算出了由于磁泵效应而引起的两个涡流

区,但到现在还缺乏考虑气体流动特别是湍流流动的等离子炬的工程计算和设计方法.在诊断方面,微型探针是重要的工具,光谱,激光,微波也作了用于等离子体诊断的研究.在应用方面主要集中在实验室研究阶段,也有少数工业中应用如钛白.当前所需解决的问题是等离子体发生器设备提高功率,提高效率和提高寿命,同时需要开展高频等离子体动力学,等离子体化工,等离子体冶金的基础研究.高频感应低气压等离子体也颇引人注意.同时还需开展高频等离子体应用探索的研究.目前还有部分人认为阻碍这一领域在工业中应用的是经济效果,但由于对装置和工艺过程的改善,由于能源危机,等离子体可直接应用核电能,风能,水能,太阳能等,这有助于这一领域的发展.现在普遍认为高频等离子体技术有广泛的应用前景.

### 参 考 文 献

1. Rykalin, N.N.(1976), *Pure & Appl.Chem.*, 48: 179.
2. Vurzel, F.B.and Pollak, L.S.(1970), *Ind.Eng.Chem.*,62, 6: 8.
3. Dundas, P.H.and Thorpe, M.L.(1969), *Chem.Eng.*, 6: 123.
4. Rykalin, N.N.(1980), *Pure & Appl.Chem.*, 52: 1801.
5. Рыкалин, Н.Н.(1974), *Физ.и Хим.Обраб.Материалов*, 2: 7
6. Verpek, S.(1976), *Pure & Appl.Chem.*, 48: 163.
7. Beales, K.J., Day, C.R.(1980), *Phys.Chemist.Glass*, 21, 2: 5.
8. Bronfin, B.R.(1969), *Advans.Chem.Ser.*,80: 423.
9. Phillip, H.W., (1976), *Pure & Appl.Chem.*, 48: 195.
10. 朱联锡等(1980), 成都科大译文, 1: 1.
11. Dundas, P.H.and Thorpe, M.L.(1970), *Chem.Eng.Progr.*, 66, 10: 66.
12. Рыкалин, Н.Н.(1975), *Физ.и Хим.Обраб.Материалов*, 1: 154.
13. Антипов, А.Б.(1968), *Физ.и Хим.Обраб.Материалов*, 4: 146.
14. Сахаров, Б.А.и Лукьянычев, Ю.А.(1974), *Цвет Металлургия*, 4: 43.
15. “国外等离子法制取钛白概况”,化冶所情报资料室, 1980.9.
16. Kuhn, W.E.and Ehretsmann, J.(1974), *Fine Particles*.
17. “崭露头角的超微粒子”, 日本经济新闻, 1981.1.19.
18. Irven, J.and Roeinson, A.(1980), *Phys.Chemist. Glass*, 21, 2: 47.
19. 赤松武志(1979), 特许公报(B2), 昭和 54—15765.
20. Rykalin, N.N., Kudinov, V.V.(1976), *Pure & Appl.Chem.*,48: 229.
21. Thorp, M.L.and Scammen, L.W., NASA CR-1343.
22. Hittorf, W.(1884), *Ann.Phys.*, 21: 90.
23. Thomson, J.J.(1927), *Phil.Mat.Ser.*, 74: 1128.
24. Babat, G.I.(1947), *Inst.Elec.Eng.*, 94: 27.
25. Reed, T.B.(1961), *J.Appl.Phys.*, 32: 821.
26. Freeman,M.P.and Chase, J.D.(1968), *J.Appl.Phys.*,39: 180.
27. Walsh, B.W.(1972), *Chem.Eng.Sci.*, 27: 511.
28. Eckert, H.U.(1971), *AIAA J.*, 9: 1452.
29. Eckert, H.U.(1967), U.S.Patent 3, 343, 022.
30. Charles, E.V.,NASA CR-1764.
31. Chase, J.D.(1971), *J.Appl.Phys.*, 42: 4807.
32. Eckert, H.U.(1970), *J.Appl.Phys.*, 41: 1520.

33. Митин, Р.В. и Прялкин, К.К. (1970), *Теплофиз. Бюс. Темп.*, 8 : 1142.
34. Eckert, H.U. (1970), *J. Appl. Phys.*, 41 : 3633.
35. Трехов, Е.С., Фоменко, А.Ф. и Хомер, Ю.М., (1969), *ТФВТ*, 7 : 860.
36. Eckert, H.U. (1972), *J. Appl. Phys.*, 43 : 2707.
37. Vogel, C.E., Poole, J.W. and Dundas, P.H., NASA CR-1804.
38. Дресвин, С.В. (1977), *ТФВТ*, 15 : 1158.
39. Waldie, V. (1975), IUPAC Thermal Plasma Round Table, Odeillo.
40. Сошников, В.Н. и Трехов, Е.С. (1966), *ТФВТ*, 4 : 100.
41. Сошников, В.Н. и Трехов, Е.С. (1966), *ТФВТ*, 4 : 324.
42. Сошников, В.Н. и Трехов, Е.С. (1967), *ТФВТ*, 5 : 522.
43. Hollister, D.D. (1968), *Phys. Lett.*, 27A : 672.
44. Сомников, В.Н. (1971), *ТФВТ*, 9 : 488.
45. Трехов, Е.С. (1969), *ТФВТ*, 7 : 860.
46. Груздев, В.А., Розинский, Р.Е. и Соболев, А.П. (1967), *ПМТФ*, 1 : 143.
47. Ровинский, Р.Е. и Соболев, А.П. (1968), *ТФВТ*, 6 : 216.
48. Ровинский, Р.Е. и Соболев, А.П. (1969), *ТФВТ*, 7 : 203.
49. Pridmore-Brown, D.C. (1970), *J. Appl. Phys.*, 41 : 3621.
50. Eckert, H.U. (1974), *High Temp. Science*, 6 : 99.
51. Miller, R.C. and Ayen, R.J. (1969), *J. Appl. Phys.*, 40 : 5260.
52. Toyonobn Yoshida and Kazuo Akashi, (1975), IUPAC Thermal Plasma Round Table, Odeillo.
53. 朱清文 (1981), *力学进展*, 11, 4 : 323.
54. 陈允明 (1980), 北京第一届低温等离子体学术会议报告.
55. Мейерович, Б.З. и Питаезский, Л.П. (1971), *Жур. Экспер. и Теор. Физ.*, 61 : 235.
56. Мейерович, Б.З. (1971), *ЖЭТФ*, 61 : 1891.
57. Райзер, Ю.П. (1968), *ПМТФ*, 3 : 3.
58. Bouels, M.I. (1976), *IEEE Trans on Plasma Sci.*, PS-4.1 : 28.
59. Кулагин, И.Л. и Сорокин, Л.М. (1969), *Физ. и Хим. Обработ. Материалов*, 5 : 3.
60. Kenji Ebihara (1978), *J. Appl. Phys.*, 49 : 3239.
61. 力学所六室 (1976), *力学情报*, 1 : 33.
62. 力学所与有色金属研究总院, “高频纯氢等离子体的研究阶段总结”, 北京第一届低温等离子体学术会议报告.
63. 范支鹏等 (1980), *力学与实践*, 4.
64. 朱清文 (1980), “高频等离子体二氧化钛反应器冷态模拟”, 力学所研究工作报告.
65. Дресвин, С.В. (1972), *Физика и Техника Низкотемпературной Плазмы*, М. Атомиздат.
66. ISPC-4 Conference Proceedings, 1979.
67. Benenson, D.M. and Kwok, H.S. (1982), *Pure & Appl. Chem.*, 54, 6 : 1157.
68. Boulos, M.I., Gagne, R. and Barnes, R.M. (1980), *Can. J. Chem. Eng.*, 58 : 367.
69. 朱清文 (1982), 高频感应低温氢等离子体理论分析, 北京第二届低温等离子体学术会议报告.
70. 朱清文等 (1982), 高频低温纯氢等离子体试验研究, 北京第二届低温等离子体学术会议报告.