

高频感应纯氢等离子体炉的研究

中国科学院力学研究所

朱清文

摘 要

高频感应纯氢等离子体有重要的应用前景,但实现这一技术难度较大,我们所知,国外只有美国TAFF实现了这一技术。本文详细地分析了纯氢等离子体的特点和实现纯氢等离子体的理论和技术问题,解决了放电特性,放电功率,放电半径和等离子体电阻等重要参数的计算方法和计算问题,提出了选择高频设备和等离子炬参数的依据,并导出包括各影响因素的效率表达式,正确地选择了设备和关键参数,解决了关键的技术问题,实现了纯氢等离子体,为纯氢等离子体炉的发展提供了基础。

一、前言

高频感应等离子体炉由于能提供洁净高温热源,工质不受限制等特点,在化工冶金和科学研究等领域中有重要的应用,在过去得到了很大发展并有潜在的应用前景⁽¹⁾。具有还原特性的氢等离子体由于焓值高,弧区温度均匀,反应粒子在弧区逗留时间长,有利于还原难熔的稀有金属氧化物或卤化物,很引人注意。TAFF实现氢弧主要模拟火箭,进行氢的输运性质的研究⁽²⁾。我们主要研究实现纯氢等离子体的理论和技术问题。为工业和科学应用提供基础。

在理论分析方面,同时满足Maxwell方程和Ohm定律是很困难的。一般是采用无限长放电柱轴对称,忽略流动和对流传热,有时忽略辐射的简化模型,用近似分析或数值法求解。^{(3) (4) (5)}在分析计算中双渠道模型^{(6) (7)}有较重要价值。多数情况,等离子体和气体速度是假定的,Boules^{(8) (9)}模型是通过用数值法求解动量、连续、能量和电磁诸方程计算出来的。为了使计算简化,而又考虑实际情况和给出足够精度的计算结果,文献⁽¹⁰⁾提出了考虑气体流动、对流传热和热辐射的等效温度能

量平衡计算方法。

当前为满足工程要求,应给出放电特性和重要的放电参数的计算方法和计算,提出选择高频振荡设备和等离子炬参数的依据,但很少有文献系统地涉及和分析这些问题。本文从实现纯氢等离子体出发,满意地解决了这些问题同时对氢等离子体的特点,耦合匹配,实现纯氢等离子体的技术问题作了详细地分析。本文的方法也可对其他等离子体作同样分析。

二、氢等离子体的特点和放电特性

等离子体的放电特性在很大程度上决定于气体的物理性质。表I列出了氢等离子体同其他等离子体几个重要物理性质的比较,从中看出氢具有高的导热系数、导电系数、焓值和弧电阻率。

1、基本方程:

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \partial \vec{D} / \partial t + \vec{J} \quad (2)$$

$$P = \sigma \vec{E}^2 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \lambda \nabla T + P - R = \rho C_p (DT/Dt) \quad (4)$$

式中, \vec{E} 为电场强度向量; \vec{B} 为磁感应强度向量;

\vec{j} 为电流密度向量; P 为欧姆热; σ 为导电系数; R 为辐射热量; T 为温度; ρ 为氢体密度; C_p 为定压比热。

表 I 氢、氦和氩等离子体的物理性质

项目	10000 °K			10 % 电离度		电离电位 电子伏	相同安匝数温 度 °K	热辐射	其他 性质
	导热系数 瓦/厘米·°K	导电系数 1/欧·厘米	焓值 大卡/公斤	弧电阻率 欧/厘米	温度 °K				
氢	4×10^{-2}	70	111100	10^{-1}	10000	15.4	低	低	反磁性
氮	10^{-2}	30	11971.4	2.5×10^{-2}	11000	15.8	中	高	
氩	4×10^{-3}	30	1400	10^{-2}	12000	15.63	高	略高	

假定: (1) 放电柱在轴向 (Z 向) 无限长, 轴对称, \vec{H} 只沿轴向 Z 有分量 $H_z = f(r)$, 放电区有均匀温度 T 和导电系数 σ 。(2) \vec{E} 只沿圆周向有分量 $E_r = f(r)$ 。(3) 等离子体处于局部热力学平衡 (LTE)。(4) 放电柱外围气流速度不大。

采用双渠道模型。区域 $0 \leq r \leq r_a$ 为放电区, 边界条件为 $r=0, H_z = H(0); r=r_a, H_z = H_a$ 。区域 $r_a \leq r \leq r_o$ 为放热损失区, $\sigma=0$, 边界条件为 $r=r_a, s=s_o = \int_0^T \lambda dT; r=r_o, s=0$ 。 r_a 为放电半径, r_o 为放电管半径, s 为热导势, λ 为导热系数。

放电区与放热损失区能量平衡方程:

$$P(T, r_a) = Q(T, r_a) \quad (5)$$

式中 P 为欧姆热, Q 为总损失热量 (包括辐射热量 R , 向管壁的传热量 Q_2 以及在有限长管等离子体流带走的热量 Q_1 。)

保持稳定放电, 还必须满足:

$$\partial P / \partial T < \partial Q / \partial T; \quad \partial P / \partial Z < \partial Q / \partial Z;$$

$$\partial P / \partial r_a < \partial Q / \partial r_a \quad (6)$$

从上面诸方程可导出下列诸方程⁽¹⁰⁾:

$$\int_0^T \sigma(T) \lambda(T) dT = (n I_c / 2)^2 \quad (7)$$

$$Q_1 = I(T_o) \dot{m}_p \\ = I(T_o) \dot{m} / (r_o / r_a)^2 \quad (8)$$

$$Q_2 = 2 \pi S_o \left\{ 2 / X \alpha_n \right. \\ \left. \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_o^2(\alpha_n r_o) (1 - e^{-x \alpha_n^2 z})}{J_o^2(\alpha_n r_a) - J_o^2(\alpha_n r_o)} \right. \\ \left. + \frac{Z}{\ln(r_o / r_a)} \right\} \quad (9)$$

$$R = \epsilon B 2 \pi r L T^4 \quad (10)$$

$$P = 2 \pi H_a^2 / \sigma (r_a / \Delta) F \quad (11)$$

$$F = \sqrt{2} \frac{\text{Ber}(\sqrt{2} r_a / \Delta) \text{Ber}'(\sqrt{2} r_a / \Delta)}{[\text{Ber}(\sqrt{2} r_a / \Delta)]^2} \\ + \frac{\text{Bei}(\sqrt{2} r_a / \Delta) \text{Bei}'(\sqrt{2} r_a / \Delta)}{+ [\text{Bei}(\sqrt{2} r_a / \Delta)]^2} \quad (12)$$

式中, $I(T_o)$ 为等离子体焓值, \dot{m}_p 为等离子体流量; \dot{m} 为气体总流量; I_c 为线圈峰值电流; n 为线圈匝数; ϵ 为辐射系数; B 为 Stefan-Boltzmann 常数; $S(T)$ 为热导势函数 $\int_0^T \lambda dT$; $X = \lambda / (\rho U C_p)$; α_n 为 $J_o(\alpha_n r_a) y_o(\alpha_n r_o) - J_o(\alpha_n r_o) y_o(\alpha_n r_a) = 0$ 的根; J_o 和 y_o 是零阶第一类和第二类贝塞尔函数; U 为气体速度。

2、放电特性曲线计算: 利用上述诸方程可求出放电半径 r_a 和放电特性曲线如图 1 所示。计算参数为等离子炬直径 30mm, 频率 4 MHz, 流量为 0.19M³/h 和 0.38M³/h。根据文献(2)给出的效率曲线和本计算给出的

放电直径同线圈直径之比(≈ 0.4), 可求得零流量时的最小维持板功率(MSP)为58KW, 0.19M³/h流量时为60KW, 0.38M³/h时为62KW, 如表 I 所示。

3、等离子体电阻: 在高频感应等离子体系统中, 要有效地向等离子体传输功率, 必须使槽路电阻(包括等离子体反射电阻 ρ'_c)等于或接近高频振荡器电子管内阻, 即所谓匹配问题, 所以需要计算出等离子体电阻, 从而求出槽路电阻, 满足设计选择参数的要求。

假定 $F = r_a / \Delta Q$, 并将 $H_a = (nI_c / 2)^2$, $\sigma = 2 / (\Delta^2 \mu \omega)$ 已知的关系式代入(11)式,

表 I 最小维持板功率(MSP)状态时参数值

项目	流量 M ³ /h	MSP KW	放电半径 m m	等离子体电阻 欧 姆	参 数	备 注
(2)	冷气体流速 0.5fps	60.0	9.53		等离子炬 $\phi 28$ mm 频率 4 MHz	等离子体电阻 是根据实测数 据反算。
(14)	~ 0	53.0		0.1613	等离子炬 $\phi 60$ mm 频率 3.4MHz	
	0.19	56.0		0.1613		
本 试 验	~ 0	53.3		0.1740	等离子炬 $\phi 28$ mm 频率 3.5MHz	
本 计 算	~ 0	58	9.45	0.1694	等离子炬 $\phi 30$ mm 频率 4 MHz	
	0.19	60	9.60	0.1730		
	0.38	62	9.72	0.1762		

则得:

$$P = 1 / 2 \omega \mu n^2 I_c^2 \pi r_a^2 Q \quad (13)$$

又由于 $P = 1 / 2 I_c^2 \rho'_c$, ρ'_c 为工作线圈电阻的等离子体反射部分。单位长度工作线圈的空载电感 $L'_o = \mu n^2 \pi r_c^2$, 所以,

$$\rho'_c = (r_a / r_c)^2 Q \omega L'_o \quad (14)$$

若线圈空载电阻为 ρ_o , 则工作线圈总电阻 ρ_c 为:

$$\rho_c = \rho_o + \omega L_o (r_a / r_c)^2 Q \quad (15)$$

根据上式即可求出等离子体存在时的工作线圈电阻。若槽路型式已定, 可选择槽路元件参数, 用电子学熟知关系求出槽路当量电阻, 以使达到同电子管匹配状态。表 I 列出了计算

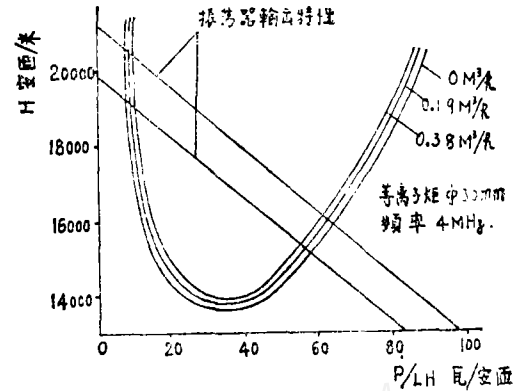


图 1 氢等离子体放电特性

的等离子体电阻值以及同试验值的比较。

4、热箍缩效应: 由于氢具有高的导热系数和焓值, 高频感应放电又是在很薄的趋肤层内进行的, 因此热箍缩效应强, 这可从下面推导的关系式看出。电流密度 J 为:

$$J = i / \Delta \quad (16)$$

式中 i 为等离子体单位长度上的环电流, Δ 为趋肤层深度。我们知道电离度 X 同电流密度 J 成正比, 同电场强度 E 成反比, 即

$$X \propto J / E \propto i / \Delta E \quad (17)$$

由环电压 $e = 2 \pi r_a E$, $\Delta \propto i / \sigma^2$, $P = ei$, 很容易得:

$$X \propto P^2 / (r_a^2 E^4) \quad (18)$$

在输入同样功率时，氢和氮电离度X的比值：

$$X_{H_2}/X_{N_2} = (E_{H_2}/E_{N_2})^{-4} \cdot (r_{aN_2}/r_{aH_2})^2 \quad (19)$$

可近似假定 $E_{H_2} = 20\text{V/cm}$, $E_{N_2} = 2\text{V/cm}$, 则：

$$X_{H_2}/X_{N_2} = 10^{-4} (r_{aN_2}/r_{aH_2})^2 \quad (20)$$

由上式示出，在输入同样功率条件下，氢等离子体的电离度比氮小得多。同样在相同电离度情况下，氢等离子体的放电半径比氮小得多，亦即热箍缩效应强得多。在实验中，观察得非常明显，开始用氩起弧，弧柱粗；当转换为氢时，弧柱明显收缩。以上都说明了要稳定维持氢等离子体放电比氩、氮、氧需要更多的能量，所以高频感应维持氢等离子体放电是很困难的。

其他影响放电半径的是气体速度和速度分布型式。放电半径对等离子体放电有很大影响，当 r_a/Δ 值较小时，等离子体对高频电磁能的吸收几乎是透明的，若增大该值，就要减小趋肤层深度 Δ ，这主要靠提高频率来达到。

5、等离子炬管壁的极限热负荷：在氢等离子炬中，由于氢的导热系数高，流向管壁的热流如此之大，以至在点燃弧运转 1~2 分钟内，石英管壁变色，脆裂和熔化。单位面积上传热量为：

$$\alpha_1 (T_w^* - T_o) = -\lambda \left. \frac{dT}{dr} \right|_r = R_o \quad (21)$$

$$\alpha_1 = \alpha (1 + \delta/R_o) / [1 + \alpha (R_o + \delta) \lambda^{-1} \ln (1 + \delta/R_o)] \quad (22)$$

$$\lambda = 1 / [T^*(R_o) - T^*(R_o + \delta)] \int_{T^*(R_o + \delta)}^{T^*(R_o)} \lambda_w dT \quad (23)$$

式中， T_w^* 为管壁外表面温度； T_o 为周围介质温度； α 为传热系数； R_o 为放电管半径； δ 为放电管壁厚。石英管损坏临界温度大约 1200°C ，极限功率 P_{lim} ：

$$P_{lim} = 2 \pi R_o \alpha_1 (T_{lim} - T_o) \quad (24)$$

将临界温度、 α_1 系数代入上式，可求出单位面积石英管壁的极限功率 P_{lim} 为 $17/\delta$ 瓦/厘

米²，通常 $\delta = 0.2$ 厘米，则 $P_{lim} = 85$ 瓦/厘米²。在本计算中，维持等离子体放电最小功率 (MSP) 需要通过管壁传出 838 瓦/厘米²，远远大于石英管的极限热负荷，所以为保护管壁不损坏，必须采取特殊冷却措施。

6、控制放电区流动的主要驱动力：在等离子炬中，部分气体切向进入放电管以造成气流在放电管中的旋转 (旋流)，在中心形成一个低压区，使部分气体回流，有利于等离子弧的起弧和维持。但由于在 100KW 设备上 进行试验，能维持纯氢等离子体稳定放电的氢气流速度很小，以 $0.4\text{m}^3/\text{h}$ 流量和放电管径 40mm 计算，平均气体速度 $V \approx 0.09\text{m/sec}$ ，这显然难于造成所需流动型式。磁压的影响可由下式表示，磁压增量 P_m ：

$$P_m = \frac{B_c^2 |r - r_a - B^2 c_{r-o}}{4 \mu} \quad (25)$$

$$B_c/B_o = [\text{Ber}^2(\sqrt{2} r/\Delta) + \text{Bei}^2(\sqrt{2} r/\Delta)]^{\frac{1}{2}} / [\text{Ber}^2(\sqrt{2} r_a/\Delta) + \text{Bei}^2(\sqrt{2} r_a/\Delta)]^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

处于最小维持板功率 (MSP) 状态，计算出 $P_m = 27.46$ 牛顿/米²，由此引起的速度 $U = 135.9\text{m/sec}$ ，因之，在放电区控制流动的主要是电力，这对于弧的稳定有重要作用。

三、关于效率的分析

为保证有高的能量转换效率，除要求等离子体发生器工作在匹配状态外，还必须正确地选择工作线圈和等离子炬参数。振荡功率表现为线圈功率 P_c (包括线圈损耗 $P_o = I_c^2 R$ ，线圈与等离子体缝隙间损耗 (一般可忽略) 以及放电功率 P ， R_o 是线圈空载电阻， I_c 是线圈电流。) ，因此 $P_c = I_c^2 R_o + P$ ，现定义线圈效率 η_c ：

$$\eta_c = P/P_c = P/(I_c^2 R_o + P) \quad (26)$$

放电功率 P 由 (11) 式表示， $R_o = r_o n / (\sigma_c \cdot a \cdot \Delta_c)$ 此处， σ_c 为线圈材料导电系数， a 为线圈管半径， Δ_c 为线圈管趋肤深度。将上

关系式代入(26)式得:

$$\eta_c = 1 / [1 + (r_c/r_a) (h_c/h_a) (\rho_c/\rho_a)^{\frac{1}{2}} (1/2\pi n F k^2)] \quad (27)$$

式中, h_c 、 h_a 各为线圈和等离子体放电高度; ρ_c 、 ρ_a 各为线圈和等离子体电阻率; k 是与线圈尺寸有关的系数, n 为线圈匝数。

在一般情况下, 线圈尺寸已定, k 值即确定, (h_c/h_a) 值可近似确定, ρ_c 、 ρ_a 由材料, 气体性质和温度确定, n 值从实际考虑小于10, (r_c/r_a) 决定于输入功率、频率、气体流量及其分配型式。频率的选择是很重要的, 当 $(\sqrt{2} r_a/\Delta)$ 值大于3时, F 才有较大值, 但当 $(\sqrt{2} r_a/\Delta)$ 值大于6时, 则 F 值变化较平坦。因之, 频率太低则等离子体吸收功率太小, 若使等离子体达到指定温度, 必须增加线圈电流, 并由此增大线圈功率, 这将引起损失增加, 致使效率 η_c 值降低; 若频率选择太高, 则放电功率增加, 放电区被强烈压向管壁, 这就增大了管壁的热损失, 同时当感应线圈高度与其直径差不多大时, 频率增加超过上限, 将加强某些不利的二维效应, 特别是放电轴中心附近变冷, 结果降低了按体积的平均温度。现一般给出的最佳频率范围为:

$$0.5 \cdot 10^9 / (\sigma d^2) < f_{opt} < 1.5 \cdot 10^9 / (\sigma d^2) \quad (28)$$

式中 d 为等离子体放电直径。进一步指出等离子体最高温度 $T_0 \propto p^{1/5}$, $\sigma \propto T^{3/2}$, 因为, $\sigma(T_0) \propto p^{0.5}$, 所以放电功率在较大的范围内变化时, σ 变化不大, 这就可认为最佳频率主要决定于放电直径。

放电管直径的选择, 对于效率也有重要的影响。选择的原则应该是能使等离子体离开放电区所带走的热量 Q_1 同放电区向壁面热损失 (包括 Q^2 与 R) 的比值为最大。在氢等离子炬中由于对流传热和热辐射不大, 在可忽略情况下, 从式(8)和式(9), 使 $\left(\frac{J(T)m}{K^2}\right) / \left(\frac{2\pi J(T)Z}{A \ln K}\right) = \max$, 可得 $K = r_0/r_a = 1.65$ 。若求出放电直径则放电管直径可确定, 当然计算过程要有一

定的迭代。

放电直径 d 同线圈直径 D 的比值对效率也有重要影响。实验指出, 其值在0.44以下对效率影响较大, 当在0.44~1范围中变化时, 效率变化不大。在氢等离子炬中, 由于需要冷却水笼置于放电管中, d/D 值一般较小, 在我们的等离子炬中, 其值为0.36, 所以一般氢等离子炬的耦合系数较小。

在匹配状态, 一般振荡管损失20~30%, 槽路损失2~3%, 工作线圈损失 $(I_c^2 R_c)$ 随放电直径减小而增加, 这是由于耦合差和在给定功率输入必须增加高频电流。当放电直径减小时, 冷却水的温度也略微增加, 这是由于较高的高频电流增加了线圈匝间的电压降。

四、试验装置选择和试验

以上分析清楚地说明了氢等离子体放电具有几个明显的特点: (1) 强烈的热箍缩效应; (2) 热流大大超过放电管壁的极限负荷, 需要特殊的冷却措施; (3) 需要比氧、氮等离子体维持放电大几倍的功率; (4) 氢的流量小, 难以造成稳弧的速度分布型式, 电磁力起主要控制作用; (5) 由于氢等离子炬的特殊结构型式, 耦合系数小, 效率低, 部件间易于放电; (6) 氢等离子体弧电阻率大。以上特点是选择试验装置和进行试验必须考虑的因素。

1. 高频振荡设备和槽路型式

决定振荡器的重要参数是功率、等离子体电阻和频率, 其他参数可根据振荡管等参数选定。计算表明, 维持氢等离子体放电的最小功率约60KW。从实际情况出发, 我们选择振荡器功率为100KW。频率的选择根据式(28), 放电直径根据计算约20mm, 估计温度约10000°K, 这样算出的最佳频率范围为 $1.7857 \times 10^9 \sim 5.357 \times 10^9$, 我们选择的频率是 4×10^9 周/秒。从电工理论得知, 要向负载传输最大功率必须作到阻抗匹配, 已计算出氢等离子体电阻约0.17欧姆, 一般采用普通C类振荡器, 电

子管内阻约1000欧姆，因之必须通过槽路型式和元件（电感、电容等）参数的选择来实现功配。有多种槽路型式满足匹配要求，用的较多的简单LC网络（即Hartly电路，TAFK实现氢弧是用这种电路，其选用电容1200Pf，工作线圈电感约1μH。我们也用过这种电路实现了氢弧。），我们目前选用的是Colpitts电路，如图2所示。这种电路的缺点是需要两组电容，优点是相移是严格的180°，有好的振荡波形，因杂散电感同电子管极间引起寄生振荡的可能性很小，同时实验表明，由于电路的对称性，抵抗等离子体尾焰接地熄弧的能力强，从而提高了等离子体放电的稳定性。网络频率由两组电容C₁、C₂和线圈电感决定，即

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$$

工作线圈端电压 $E = (C_1 / (C_1 + C_2)) U_K$ ，等效电阻 $R_E = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \frac{L}{C_2 R_P}$

$$C_2 + 1) U_K, \text{ 等效电阻 } R_E = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \frac{L}{C_2 R_P}$$

(R₀是等离子体反射电阻，现取C₁ = C₂ = 3000 Pf)，若将等离子体反射电阻值0.17 欧姆和电容值代入上式，可求得R_E ≈ 1000欧姆，因之可以作到匹配状态。

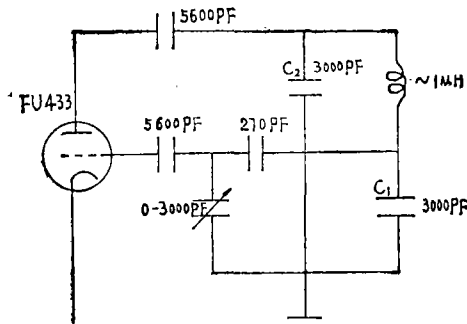
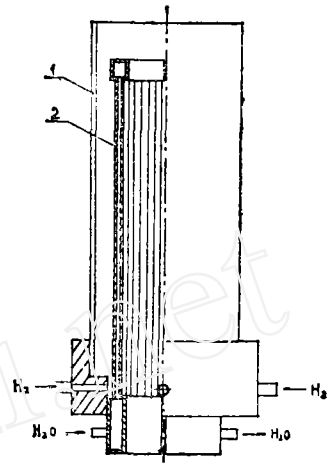


图2 高频振荡器槽路简图

2. 等离子炬参数选择和结构

等离子炬主要尺寸的选择是根据上面的分析和计算。最佳半径比R₀/r_a = 1.65, r_a = 9 mm，所以选择冷却水笼半径15mm。选择冷却水管直径5 mm，石英管壁厚2 mm，再考虑各部分间的适当间隙，确定放电管外径50 mm，

工作线圈内径56mm。由匹配要求，确定线圈匝数4.5，线圈铜管直径12mm，为使匝间不放电，选择线圈高度63mm，因之线圈直径同高度比为0.89，单位长度线圈匝数0.65。



1—石英管 2—冷却管
图3 氢等离子炬示意图

等离子炬的结构简图如图3所示。冷却水笼置于放电管中以阻止强大热流对管壁的热损伤。冷却水笼由两个半圆筒铜管组成，两半圆筒在等离子体放电区由适当间隙隔开，防止短路形成磁屏蔽，影响高频磁场向等离子体输送能量。实践证明，只要水笼铜管间的间隙足够小，就可足以防止强大热流对管壁的热损坏。氢由四个进气管进入等离子炬中，两个是径向两个是切向的。

本等离子炬的r_a/r_c ≈ 0.36，这个数值对于效率和耦合有重要影响，但在氢等离子炬中很难作到较高值，若减小水笼铜管直径可稍微改善一些，这需增加冷却水压，会带来一些其他方面的问题。

3. 参数测量和试验结果

所需测量的电参数有交流功率、功率因数、直流板压、板流、槽压、槽流（现通过计算得出）、反馈电压等。所需测量的气参数有氢流量。所需测量的水流参数有冷却振荡器电子管、槽路的流量和进出口温度，冷却等离子

炬水笼和工作线圈的流量和进出口温度，冷却焓值测量管的流量和进出口温度。测量电参数用的是校正过的电压、电流和功率因数表，测量气和水流量用的是校正过的转子流量计，测量焓值的水量是用标准水桶和秒表，测量温度用的是校正过的水银温度计和热电偶。槽路振荡波形用示波器观察，频率由频率计测出。每组测量数据都是稳定运行5分钟后，等各部分达到平衡后同时记录。

本试验结果及其同美国TAFf的比较列于

表Ⅲ。利用氢等离子炬，其他参数也不加调整，用氮作工质的试验结果列于表IV。氢等离子体放电稳定的运转范围如图4所示。也恰如文献(2)指出的，当氢的流量低于 $0.05\text{M}^3/\text{h}$ 时，等离子弧将难以维持。这可能由于空气扩散到等离子体放电区所致。功率的下限受等离子体最小维持板功率(MSP)所限制，板极功率的上限受板压所限，试验表明，当板压高于12000伏时，很容易由于线圈匝间、线圈和冷却水笼等部分之间的放电而熄弧。

表Ⅲ 试验数据与TAFf的比较

项 目	本 试 验			美 国 TAFf ⁽²⁾		
	A	B	C	A	B	C
板 压 (千伏)	11.5	11	10	11.6	10.1	9.7
板 流 (安培)	10	9.5	11	9.5	11.3	10.7
板 功 率 (瓩)	115	104.5	110	110	114	104
振 荡 功 率 (瓩)	59.2	56	52.8	68	70	64
频 率 (兆周)	3.5	3.5	3.5	4	4	4
氢 流 量 (M^3/h)	0.28	0.245	0.175	0.283	0.17	0.127
水 笼 损 耗 (瓩)	46	44.5	41	44.4	44.2	42
槽 路 损 耗 (瓩)	9	7.51	8.13	8.5	8.1	7
出 口 功 率 (瓩)	4.2	4	1.71	15.2	14.6	15
出口氢焓值 (大卡/公斤)	1.58282×10^5	1.72280×10^5	1.47419×10^5	3.3×10^5	8.8×10^5	12×10^5

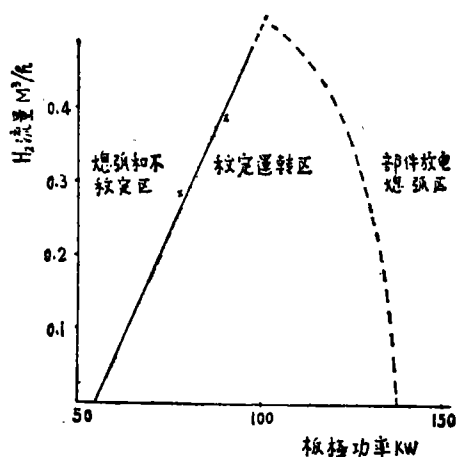


图4 等离子体系统运转范围

五、分析与讨论

由于我们的设备功率的限制(100KW)，氢等离子体流量只能达到 $0.4\text{M}^3/\text{h}$ 左右，所以效率较低。从表Ⅲ可看到，我们的试验数据同美国TAFf相比，除出口焓值一项外，其他项基本上一致。从TAFf三组数据看，A组焓值为 3.3×10^5 大卡/公斤(相当于 15000°K)，B组焓值为 8.8×10^5 大卡/公斤(大于 30000°K)，C组焓值为 12×10^5 大卡/公斤(远大于 30000°K)，这在实际上似乎不可能，从测量和计算氢等离子体温度不超过

12000°K (在T AFF的试验参数和本试验的情况下)。这可能由于他们测量误差造成,因氢等离子体流量很小,若测量热量不准确,则焓值误差就特别大。效率低主要是由于流量小而引起,用氮作工质,如表 IV 所列,在流量这

么小的情况下效率更低。但随着流量的增加,效率也相应提高,从表 IV 推算,当氢气流量增加到5.6~12.5M³/h时,效率亦可达到30~50%,但所需功率要相应增加。

表 IV 氮等离子体试验数据

项 目	流量(M ³ /h)	~0.15	1	5	10	15
板 功 率 (瓦)		48.75	81	90	100	137.5
振 荡 功 率 百 分 数		51	49	43.9	43.1	42.5
等 离 子 炬 和 线 圈 损 失 百 分 数		46.4	45.5	37.9	31.8	26.3
氮 等 离 子 体 功 率 百 分 数		2.6	5.5	18.2	25.1	31.2

从表 II 示出,本文计算出的各主要参数,最小维持板功率(MSP)、放电半径、等离子体电阻等同试验值和其他文献给出的值相当吻合。

在氢等离子体炬中,由于冷却水笼的存在,不仅 r_a/r_c 的减小降低了耦合系数和效率,而且易于在线圈和水笼之间放电,因此击穿石英管壁、水笼铜管和线圈铜管。为阻止强大热流对石英管壁的损坏和提高 r_a/r_c 值,水笼各铜管之间间隙和铜管直径都应尽可能的小。线圈匝间距离减小对效率有利,但易于放电,因之希望在不引起放电情况下,匝间距离尽量小,为避免放电,最好采取匝间绝缘的措施。另外,由于氢等离子体放电需要的磁场强度大,有很强的磁压缩,致使等离子弧直冲等离子炬头,必须采取保护措施。

在运行中,为得到较高的效率,振荡器一般工作在过压状态。氢流量对工作状态有很大影响。等离子体放电特性与振荡器输出特性的交点是工作运转点(只有右面的交点是稳定的),如图 1 所示。关于工作状态的

调整,一般提高板压,增加空载磁场强度 H_0 ,减小反馈,增大边气等是向欠压发展;若减小板压和 H_0 ,增加反馈和中气是向过压发展。

线圈第一圈相对等离子炬头的位置对起弧有较大影响。放电管垂直安放(向上或向下排气)或平放对于等离子体稳定放电无明显影响,但必须防止氢等离子体在放电管出口的集水回返到等离子体放电区,这往往会使等离子体熄弧。

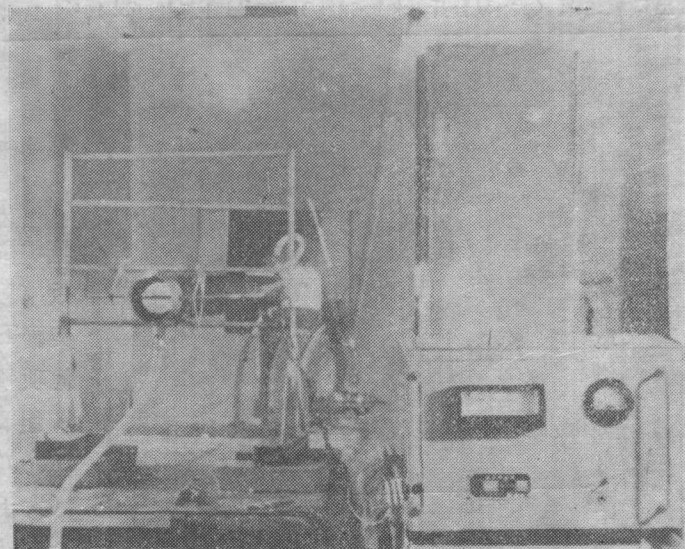


图 5 试验装置

结束语

通过对高频纯氢等离子体的理论和试验研究, 了解了其放电的特点和基本规律, 解决了实现纯氢等离子体重要参数的理论计算, 设备和等离子炬重要参数的选择, 合理地选择了设备、槽路和等离子炬型式, 并解决了试验过程中的技术问题, 实现了高频感应纯氢等离子体, 验证理论分析, 提供了经验和积累了技术资料, 为满足化工、冶金和科学试验等各个领域的实际需要创造了条件。

注: 参加试验工作的还有阎嘉坪, 黎齐修, 李嘉洪等同志。

参考文献

1. 朱清文 (1982), 力学进展, 12, 5 : 378.
2. Thorpe, M.L., NASA CR-1343, NASA-1143.
3. Pridmore-Brown, D.C. (1970), J. Appl. Phys., 41:3621.
4. Eckert, H.U. and Pridmore-Brown, D.C. (1971), J. Appl. Phys., 42:5051.
5. Eckert, H.U. (1970), J. Appl. Phys., 41:1520.

6. Freeman, M. P. and Chase, J. D. (1968), J. Appl. Phys., 39:80.
7. Райзер, Ю. П. (1969), Усп. физ. Наук, 99:688.
8. Bouels, M.I. (1976), IEEE Trans on Plasma Sci., PS-4. 1 : 28.
9. Bouels, M.I., Gagne, R. and Barnes, R. M. (1980), Can. J. Chem. Eng. 58:367.
10. 朱清文 (1981), 力学进展, 11, 4 : 323.
11. Mensing, A.E. and Boedeker, L. R., NASACR-1312.
12. 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。
13. 朱清文等 (1982), 高频低温纯氢离子体试验研究, 北京第二届低温等离子体学术会议报告。
14. 力学和有色金属研究总院 (1980), 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。
15. 陈允明 (1981), 力学学报, 2 : 165

(上接第47页)

及800℃也有改善。这个结果表明差异控制能得到非常均匀的温度。在大型电炉中, 这样的改善甚至会更大。这种技术以推广到包括其它的控制职能, 如比例控制。

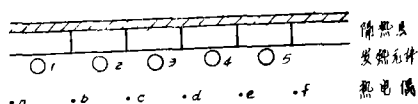


图3 试验电炉发热元件、控制热电偶及测温用热电偶的位置剖视图

杨靖译

译自: "Elektrowärme international" 40 (1982) B6 • Dezember B303-B305