

感应耦合射频等离子体 (英)

本文根据Maher I. Boulos的“感应耦合射频等离子体”一文*, 重点介绍其中的感应耦合射频等离子体的基本原理, 主要的设计特点和应用部分。

一、基本原理和设计特点

控制感应耦合等离子体工作的基本现象, 实质上类似于金属感应加热器, 如图1所示, 然而在感应等离子体中, “负载”实际上是比大多数金属导电率低得多的导电等离子体, 它对最佳频率、尺寸和功率等有直接影响, 而这些参数是维持稳定放电所需要的。按照图1所示模型, 在线圈段等离子体相当于半径为 r_n , 具有均匀温度和电导率的圆柱负载, 在这个区域外, 假定气体是非导电的, 并且在等离子体和等离子体限制管壁之间有温差存在。

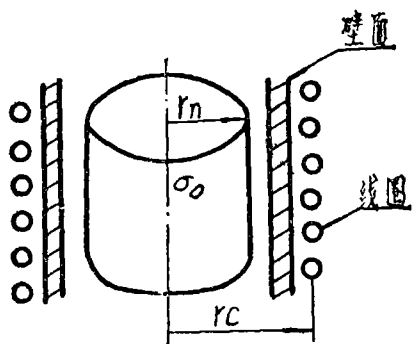


图1 感应等离子体模型简图

1.1—趋肤深度和耦合效率

根据通常的感应加热理论, 交变磁场在圆柱负载的外层产生涡流, 层的厚度被称作趋肤深度 δ , 它是振荡频率 f 和负载平均电导率 σ 的函数, 可由下式估算:

$$\delta = [1 / (\pi \xi_0 \sigma f)]^{1/2}$$

式中, ξ_0 是负载等离子体的导磁系数, 在

自由空间, $\xi_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Hy/m}$, 在大气压状态, 以氩作工质, 平均温度为8000k的感应等离子体, $\sigma = 10^3 \text{mhos/m}$, 若振荡频率为4 MHz, 其趋肤深度大约8 mm, 振荡频率减少可使趋肤深度增加和等离子体的能量耗散更加均匀。

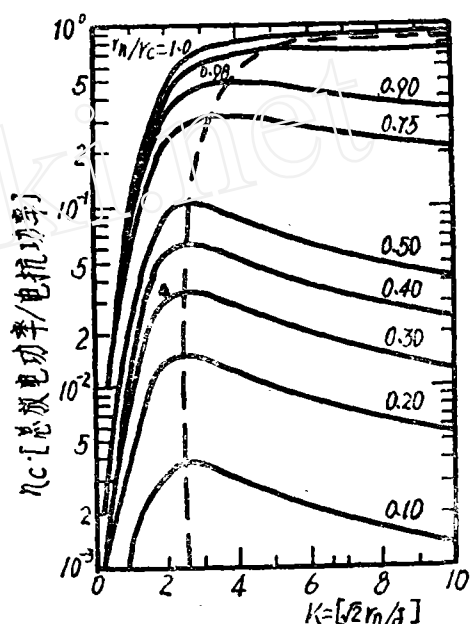


图2 耦合效率和耦合系数的函数关系

图2示出了大气压状态氩等离子体耦合效率 η_c (放电功率与电抗功率之比) 和耦合系数 k ($k = \sqrt{2} r_n / \delta$ 的函数关系, 以等离子体半径和线圈半径之比 (r_n / r_c) 作参数。当 r_n / δ 值介于1.5~4.0时, 如图2虚线所示达到最佳耦合。若 r_n / δ 值较高, 能量耗散限制在放电区外缘的薄层中, 耦合效率略有降低; 相反, 当 r_n / δ 值很低时 (小于1.0), 耦合效率剧烈下降。耦合效率在很大程度上也依赖于 (r_n / r_c) 的值, 希望它尽量接近于1, 由于机械结

* Pure & Appl.Chem.Vol.57, №9, PP1321—1352, 1985.

构的限制, 它达到0.7~0.8还是完全允许的。改善 (r_a/r_c) 值的一个方法是尺寸放大, r_a 愈大, (r_a/r_c) 值愈接近1, 但伴随着工作频率减少和功率增加。图3给出了理想耦合效率(当 $r_a/r_c = 1.0$) 与等离子体直径的函数关系, 以工作频率为参数。工作频率低于960Hz或甚至低于60Hz, 也能得到好的耦合, 不过为了维持放电, 等离子体直径和相应的功率必须要充分的大。

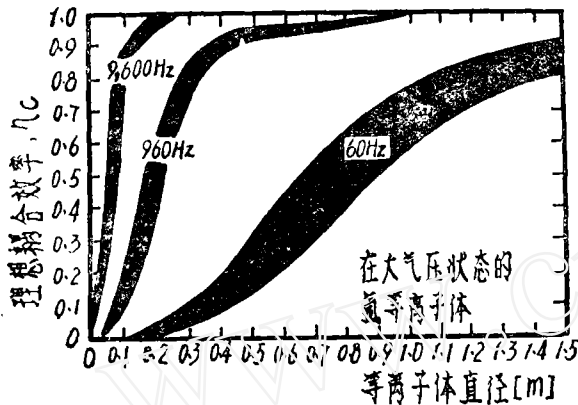


图3 理想耦合效率、工作频率和等离子体直径的函数关系

1.2—最小维持功率

在不同的工作条件下维持等离子体所需要的最小功率可从图4近似得到, 在大气压状态下用氩作工质, 感应等离子炬工作在960Hz, 需要最小维持功率接近于1MW, 若工作在60Hz就要大于10MW。图4示出, 对于给定振荡频率最小维持功率随工作压力升高而增加, 同时在很大程度上随气体成份而变化, 氩要求的功率是最低的, 所以一般是用氩起弧, 然后逐渐转换到其他气体, 同时必须增加炬功率。

1.3—炬的设计

近20年来发展了一些感应等离子炬的设计和试验, 其功率范围为0.5~1.0MW, 工作频率为9.6KH_z~40KH_z, 机械结构也有很大变化, 但设计概念同Reed最早提出来的几乎没有变化, 典型的简图如图5所示。实质上它是由两根同心圆管组成, 中间有一环缝。外管通常是石英的, 其外面由空气或水冷却, 也采用

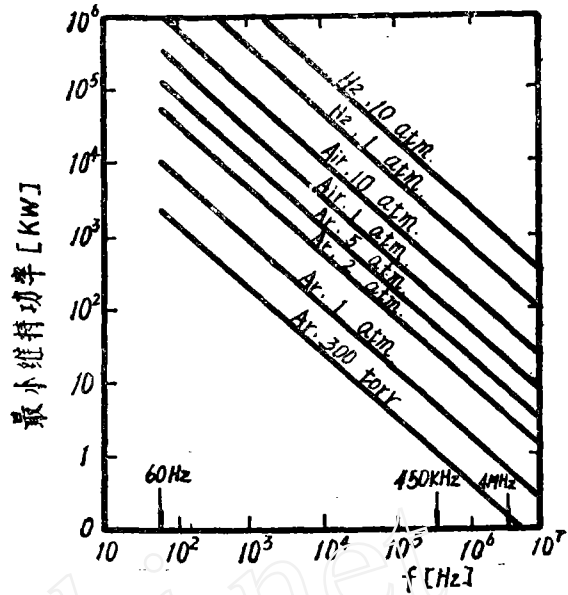


图4 不同工作气体最小维持功率、工作压力与工作频率的函数关系

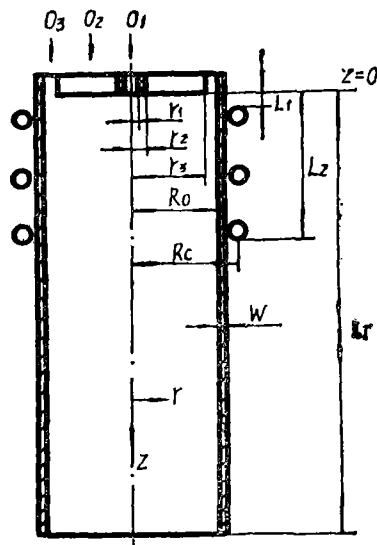


图5 感应耦合等离子炬简图

过蒸发冷却。一个水冷铜管绕成的工作线圈, 套在等离子体限制管外面, 它的圈数决定于高频电源的电特性, 内管的下端通常与工作线圈第一圈相齐, 它是用来在等离子炬中形成一种流动型式, 使环缝气体 Q_1 具有很大速度沿管壁流动, 目的是减少热损失和防止管壁过热。引入等离子炬的还有中气 Q_2 和粉末或气溶胶

载气 Q_1 。中气 Q_2 具有旋转和轴向速度分量，使等离子体离开内管一些，它是发生放电的主要气体。载气 Q_1 通常用水冷管送入放电区中心。水冷炬的机械结构略为复杂，好处是能在很高功率情况下工作。

最近发表了两种新奇的感应等离子炬的设计，一是东京大学Akashi和他的同事设计的所谓“混合式等离子炬”，它是把感应等离子炬和直流等离子炬串接起来，尽管它有使等离子体稳定和使放电功率密度增加的明显好处，因为需要两种电源，增加了电器线路的价格和复杂性，而且系统中有直流等离子炬，就存在着电极腐蚀所形成的污染源，这就限制了它的应用。新发展的另一种感应等离子炬是美国Los Alamos国家试验室为克服气冷和水冷等离子体限制管可能造成的热熔化问题而设计的，它的关键特点是在石英管内放置几块水冷铜柱，形成一个屏蔽罩，防止等离子体对石英等的强辐射，也作为变压器把等离子体耦合到工作线圈。它的缺点是降低了能量传输效率（不幸的是无能量平衡数据可利用）和只能用于非腐蚀性气氛中，它的主要好处是有效地保护了石英管，几乎是无限的延长了它的寿命，而且能够在比普通感应等离子炬低得多的气体流量下工作。

二、应用

感应耦合等离子体炬长期来被考虑作为一个基础实验室等离子体研究的优良的工具，在实验室和工业应用中的数量在逐渐增加。本节简单的评述这个领域的主要发展，提出了三个相继应用的方面，首先是用等离子体作为热源，其次是包括化学反应，第三是包括光谱化学作用。

2.1—等离子体作为热源的应用

2.1.1—等离子体喷涂和沉积

最近，Jurewicz等把与在感应等离子体中粉末飞行熔化的概念用于在大气压和软真空状态下金属和合金结构块的喷涂和沉积。用Ni、Ni—Cr、Cu、Ti和W得到的结果显示了优良的沉积性能，有些沉积已达块料表面密度的

99.6%以上。这种技术的重要优点是：

- 容易喷射和在等离子体中停留时间长。
- 容易熔化相当大的颗粒。
- 在不损失熔化效率情况下实质上有用较高质点负载的可能性。
- 对工作状态有最小的敏感性。
- 得到高密度沉积的能力。

然而，它主要的缺点是喷涂相当复杂形状靶面时，操作感应炬物理上的困难，可能操作靶面比炬要容易些。

2.1.2—等离子体烧结

陶瓷的等离子体烧结，被烧结的材料以1.0~3.0cm/min的速度轴向通过等离子体，Johnson和他的同事用 MgO 掺杂铝棒的结果，铝棒有99%以上的高密实。

2.2—包括化学反应的应用

2.2.1—高纯硅的合成

合成光纤工业的低含水量的高纯熔化硅，在反应室可以维持比其他技术高的纯度。Bell实验室发展的过程简图如图6示。硅的生成是通过 $SiCl_4$ 在氧等离子体中氧化： $SiCl_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2Cl_2$ 。生成的硅聚集在 SiO_2 圆柱台上，其形状决定于托的温度，供送 $SiCl_4$ 喷嘴的尺寸和位置，所遇的严重问题是硅生成过程中起

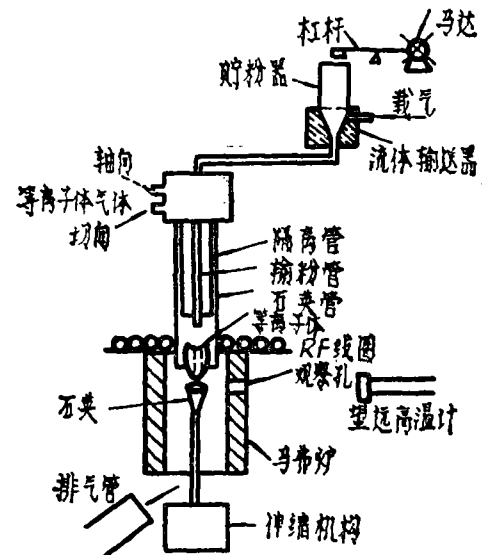


图6 熔化 SiO_2 的装置简图

泡和生成硅的OH含量，其OH含量应当保持在ppm级以下。

2.2.2—颜料二氧化钛的合成

近十年二氧化钛颜料的合成，在苏联已进入商业化生产，功率水平0.5~1 MW，用TiCl₄蒸汽同高温氧反应，并利用增加添加剂Al₂O₃改善了它的合成。据报导，160KW装置的产量每年高于5000吨，颜料的比功率消耗为1.93kwh/kg。

2.3—光谱化学元素分析

在光谱化学分析中用ICP作为一个辐射源代表了感应等离子体技术的最广泛的应用，这不是从绝对功率水平，而是从世界上商业交易的台数。光谱化学元素分析所用的系统示于图7，如图指出的，需要分析的溶液像气溶胶一样喷入非常小和低功率炬的放电区，炬的直径为18mm，1~2kw，用氩作等离子气体，同时用氩或氮作边气。当气溶胶滴通过放电区时被汽化，并形成汽化分析颗粒和相继分解，每一分析元素的辐射强度通过预先校准可同原分析溶液浓度关联起来。由于分析依赖于分解、离解和激励所需要的能量，对于等离子炬的每一工作状态，每种元素有它本身的最佳观察高度，最常用的观察区域设置在线圈上方15~20mm之间。有大量关于这方面的文献可供利用，

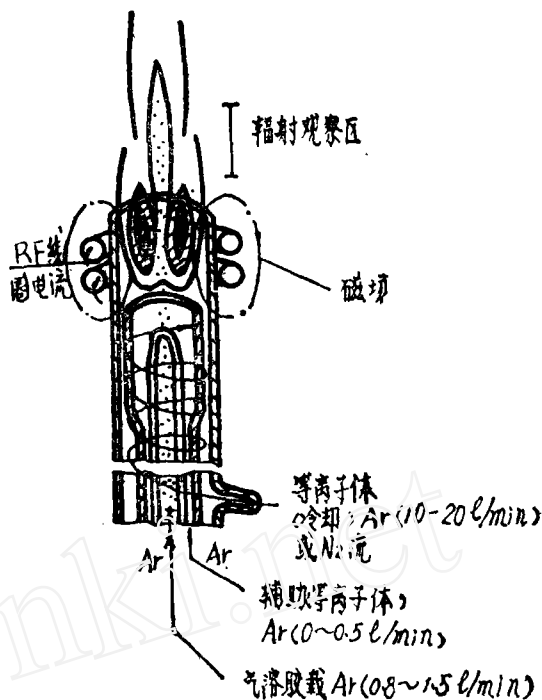


图7 用于光谱化学元素分析的ICP放电筒图

可参阅Barnes的评述，Thompson和Walsh的著作，Trassy和Mermet的著作以及Bouman对这一问题给出的极好的回顾。

中国科学院力学研究所

朱清文摘译

新书介绍

最近日本节能中心开始发行“工业电气加热”一书。该书主要介绍了工业用电加热的主要方式、使用方法、各加热方式的特点与节能构思，对从事电加热与节能研究工作的同志有一定参考价值，该书共分八个章节，其目录如下。

- 1、工业用电加热概论
- 2、电阻加热
- 3、电弧加热
- 4、感应加热

- 5、微波加热
- 6、介质加热
- 7、红外线、远红外线加热
- 8、电加热的未来

发行单位：日本节能中心

作者：堀克彦

定价：3500日元

陈留根据日《铸锻造と热处理》86年№4