

磁驱动滑动弧放电大气压非平衡等离子体

林 烈, 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 介绍了磁驱动滑动弧放电大气压非平衡等离子体产生技术的一些基本特性, 着重叙述了磁驱动滑动弧放电大气压非平衡等离子体的产生装置(GDM)、基本原理、主要特性及应用中的一些问题。

关键词: 大气压非平衡等离子体; 磁驱动滑动弧放电

中图分类号: O531

文献标识码: A

1 引言

大气压非平衡等离子体是低温等离子体领域内一个新的研究分支。近些年来, 国内外一些研究人员对于这种非平衡等离子体开展了大量的研究工作。在这类等离子体中, 电子温度很高, 但重粒子的平动温度较低, 故称为非热等离子体。但是, 不象冷等离子体必须在低气压下才能产生, 它可以在大气压或高于大气压的条件下产生, 因此它无需真空系统。另外, 它和热等离子体相比, 所需输入的能量较少, 能量的利用率可以大大提高, 在化工、材料制备及环境工程等领域有着广泛的应用前景。大气压非平衡等离子体的产生方法和传统的热等离子体及冷等离子体的产生方法不同, 现在研究得较多的方法有滑动弧放电、DBD 放电、微波及高压脉冲电晕放电等。本文就磁驱动滑动弧放电等离子体的产生方法及特点进行讨论。

2 磁驱动滑动弧放电实验装置及工作原理

滑动弧放电是一种弧根在电极上周期性滑动的脉冲放电, 但频率不是很高。我们研制了一种主要用磁场驱动的滑动弧装置(GDM), 用于产生大气压非平衡等离子体。这种方法的特点是电弧速度较高且可控, 气流和电弧的掺混比较均匀。装置由中心电极、外电极、磁场、电源及气源等部分组成, 如图 1 所示。中心电极和外电极之间的距离沿轴线方向向下游逐步扩大, 磁场强度可以用改变磁场线圈中的电流大小的方法来进行调节。当在两电极间加上 10kV 左右的电压时, 电弧就在间隙最小处点燃, 在磁场和气流的推动下, 电弧一方面快速绕中心电极旋转, 一方面向下游滑动, 同时弧也逐步被拉长。当弧被拉到极限长度时, 电弧熄

收稿日期: 1999- 07- 13; 修订日期: 1999- 10- 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19675058)

作者简介: 林烈, (1943-), 男, 研究员, 1966 年毕业于浙江大学, 从 1967 年起一直在中国科学院力学研究所从事电弧等离子体及有关方面的研究工作, 1992 年去英国 Heriot Watt 大学从事研究工作, 目前主要研究大气压非平衡等离子体的有关问题。

灭, 一个新的周期又重新开始, 这个极限长度由电极结构及电源电压等参数来决定。放电按图 1 中 1 2 3 4 5 的过程进行。1 为电弧刚形成; 在 2 4 的过程中, 电弧一边绕中心电极旋转, 一边被拉长并滑向下游; 在 5 时, 弧长达到极限长度, 电弧被拉断, 一个周期结束。在一个放电周期中, 等离子体处于不同的热力学状态。在放电的起始阶段, 弧长较短, 电弧和气流换热, 辐射引起的热损失可以从电源得到补充, 此时电弧基本上处于热平衡态。随着电弧的不断被拉长, 对流换热和辐射引起的热损失不断增大。由于电源功率的限制, 输入到电弧的能量不能无限制地增加, 因此气体的温度将迅速下降, 而此时由于电子仍能从电场获得能量, 所以电子温度仍较高, 等离子体已进入非平衡态。在整个放电周期中, 大部分时间放电都处于非平衡态。

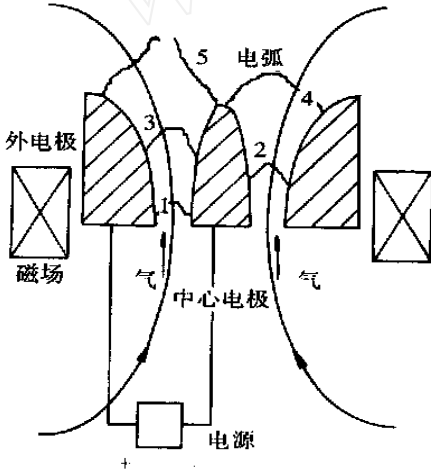


图 1 磁驱动滑动弧放电装置

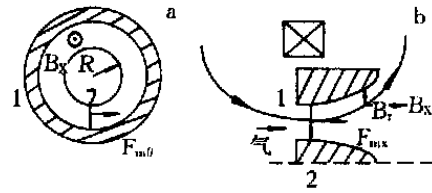


图 2 磁场对电弧的作用

1 —— 外电极; 2 —— 中心电极。a —— 电弧在环向的旋转; b —— 电弧的轴向移动。

下面讨论磁场对电弧运动的影响。图 2 表示磁场对滑动弧工作的影响, 在 GDM 中, 磁场可以分解为轴向及径向两个分量。磁场对电弧有两方面的作用: 第一是轴向磁场 B_z 对电弧的作用, 它使电弧绕中心电极旋转; 第二是径向磁场 B_r 对旋转电弧的作用, 它使电弧在轴向发生移动。电弧在磁场作用下的轴向速度为^[1]:

$$v_{ax} = \sqrt{\frac{2B_r B_z I \alpha}{c_d \rho d_0}} + v_g \tag{1}$$

式中 v_{ax} 为电弧在轴向的速度; v_g 为气流速度; I 为电弧电流; c_d 为气流对电弧的阻力系数; ρ 为气体密度; $\alpha = e / (3 \gamma m_e)$, e 为电子电荷, γ 为电子的碰撞频率, m_e 为电子质量; d_0 为电弧直径。

假设中心电极和外电极之间的间隙比较小, 电弧形状接近直线, 环向旋转频率也可从文献[1]中的关系式求得:

$$f_a = \frac{1}{\pi R} \sqrt{\frac{I B_z}{2 \rho c_d d_0}} \tag{2}$$

式中 R 为中心电极的半径。

从式(1)、(2)可以看出, 电弧的轴向速度取决于磁场强度 B_r 与 B_x 的乘积、电弧电流及气流速度。而电弧的环向速度主要与轴向磁场 B_x 等参数有关。此两关系式表明, 只要我们选择足够强的磁场, 就可以得到比气流速度大得多的电弧速度。在 GDM 中, 极性的选择影响到磁场对电弧作用力的方向。当中心电极为负, 外电极为正时, 磁场将电弧推离磁场的中心; 而极性相反时, 磁场将电弧拉向磁场的中心。因此, 在 GDM 中极性总是选择为外正内负。

对于放电频率较低的滑动弧放电, 等离子体的非平衡度可表示为^[2]:

$$\frac{T_e - T_h}{T_e} = \frac{m_h e^2 E^2}{3kT m_e^2 (\omega^2 + \nu_e^2)} \quad (3)$$

式中 T_e 为电子温度; T_h 为重粒子温度; m_h 为重粒子的质量; E 为电场强度; k 为波尔兹曼常数; ω 为等离子体的振荡频率。从上式可看出, 在气压一定的情况下, 电场强度 E 的大小是决定非平衡度的主要参数。在滑动弧放电装置中, 由于电弧和气流的强烈掺混, 电场强度 E 的值比普通电弧等离子体发生器中的 E 要大得多。电场强度 E 和气流与电弧之间相对速度的关系为^[3]:

$$E = \sqrt{\frac{\rho v c_p \Delta T_h}{\sigma \Delta z}} \quad (4)$$

上式中 v 为气流与电弧之间的相对速度; c_p 为气体的比热; σ 为等离子体的电导率; Δz 为在所讨论的小范围内轴向坐标的增量; ΔT_h 为在此小范围内重粒子温度的增量。将式(4)代入式(3), 可以得到:

$$\frac{T_e - T_h}{T_e} = \frac{m_h e^2 \rho v c_p \Delta T_h}{3kT m_e^2 \sigma \Delta z (\omega^2 + \nu_e^2)} \quad (5)$$

从上式可以看出, 增加电弧和气流之间的相对速度 v 有利于提高电场强度 E 的数值, 从而也增加了等离子体的非平衡度。

在磁驱动滑动弧放电装置中, 电弧的速度比纯气流推动的装置要快得多, 而且容易控制和调整。电弧总速度是电弧的环向速度和轴向速度的合成。从式(5)可看出, 调整磁场强度 B_r 、 B_x 的数值就可以改变气体和电弧之间的相对速度, 也就改变了等离子体的非平衡度。这比纯气流推动的滑动弧放电要优越得多, 因为在纯气流推动的滑动弧放电中, 气体和电弧之间的相对速度是无法任意改变的。

3 实验结果

磁场对滑动弧放电的作用主要表现在通过对电弧的运动速度及放电频率的影响来改变等离子体的非平衡度。下面给出一些实验结果。图 3 给出了放电频率和磁场强度的实验结果。在此图中, I_1 是流过磁场线圈的电流, N 是磁场线圈的匝数。由于在 GDM 装置中, 不同空间位置的 B_r 及 B_x 有不同的值, 因此这里用磁场线圈的安匝数来代表磁场的大小。从图中可以看出, 较强的磁场强度, 可以得到较高的放电频率。有磁场时的放电频率要比无磁场、纯气流推动时高得多。放电频率也和气体的流量有关, 从式(1)可知, 电弧的速度也和气体的速度有关。增加气体流量, 也能增加电弧的速度, 较高的电弧速度, 意味着较高的放电频率。图中 q 为气体的体积流量。

4 讨论

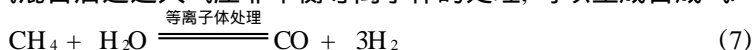
在大气压非平衡等离子体中,电子温度很高,一般在 1~3eV 范围内,但是重粒子的平动温度较低。在化学工业中,为了加快反应速度,有时需要提高整个反应物的温度,这需要消耗大量的能量。如果利用非平衡等离子体中的高能电子来激发反应物的振动温度,而重粒子的温度又处于较低的水平,就既可加快反应速度,又能减少消耗的能量。在 GDM 中,通过上述已讨论过的对等离子体非平衡度的调节,可以根据实际需要一定范围内调节重粒子的平动温度,便于适应不同的应用场合。下面

讨论振动温度对反应速率常数的影响,这在实际生产中有重要意义。有振动激发的化学反应的速率常数可以用阿累尼乌斯公式来表示:

$$k_a(E_v) = k_o(E_v) \exp\left(\frac{aE_v - E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

式中 $k_a(E_v)$ 为有振动激励时的速率常数; $k_o(E_v)$ 为指数前因子; E_v 为振动能; a 为振动能的利用系数; R 为气体常数; T 为反应物的平动温度; E_a 为活化能。

对式(6)作一些分析就可以发现,通过高能电子对分子的振动激发来提高分子振动能 E_v 比提高整个反应物的平动温度 T 来加快反应速度要有效得多,同时也大大降低了能耗。在天然气的综合利用中,用大气压非平衡等离子体来制取乙炔或合成气,要比用热等离子体的方法经济得多。将甲烷和水蒸汽混合后通过大气压非平衡等离子体的处理,可以生成合成气:



在环境工程中,它可以用于处理 H_2S 、 NO_2 及 SO_2 等废气。

GDM 是产生大气压非平衡等离子体的一种有效的方法,它比纯气流推动的方法要有效得多。在 GDM 中通过改变外磁场的强度,可以改变电弧速度,从而达到调控等离子体非平衡度的目的。在大气压非平衡等离子体中,在保持较高电子温度的同时,使重粒子处于较低的温度,有利于提高能量的利用率。

参考文献

- [1] 林烈,张秀杰,吴承康. 磁驱动滑动弧放电气压非平衡等离子体的产生原理 [J]. 中国学术期刊文摘(科技快报), 1998, 4(12): 1438.
- [2] 林烈,吴承康. 大气压非平衡等离子体中非平衡度的探讨 [J]. 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(2): 57.
- [3] 林烈,张秀杰. 滑动弧放电气压非平衡等离子体 [A]. 第九届全国等离子体科学与技术会议论文集 [C]. 大连: 大连理工大学物理系, 三束材料改性国家重点实验室主编, 1999. 202.

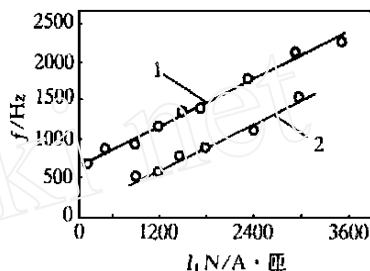


图 3 放电频率和磁场的关系

1 — $q = 4\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; 2 — $q = 2.5\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

(下转第 128 页)

ANALYTIC CALCULATION OF THE AIR-GAP ARMATURE COIL INDUCTANCE OF THE PASSIVELY COMPENSATED PULSED GENERATOR

L I Ge

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029)

Abstract: Taking into account the flux compression effects generated by the eddy current of the continuous conductive shield in the passively compensated pulsed generator (or passive compulsator), the magnetic field of the armature coils in the air-gap of the generator is analyzed by straightforward method, and the analytical solution to the inductance of air-gap armature coil is deduced. A 25MW generator is designed using this equation. The measurement on the generator verified the accuracy of the analysis equation.

Key words: Passive compulsator; Inductance of air-gap armature coil

(上接第 124 页)

CHARACTERISTICS OF NON-EQUILIBRIUM PLASMA AT ATMOSPHERIC PRESSURE WITH GLIDE ARC DRIVEN BY MAGNETIC FIELD

L N L ie, WU Cheng-kang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract: The characteristics of non-equilibrium plasma at atmospheric pressure with glide arc driven by magnetic field are presented. The set up, principle and some problems about application of non-equilibrium plasma at atmospheric pressure are described.

Key words: Non-equilibrium plasma at atmospheric pressure; Glide arc driven by magnetic field