

# 不同气压条件下空气介质阻挡放电的特性

赖饶昌, 林麒\*

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:**建立了一套放电装置, 放电室内的空气压力可调。设计并制作了单面梳状和平行双平面两种电极板, 在不同气压环境下进行空气介质阻挡放电实验。拍摄记录了放电现象, 采用电荷电压( $qV$ )法处理了放电的有关测量数据, 对实验结果进行了分析。研究结果表明, 空气介质阻挡放电的特性变化与放电环境气压有关。在各种气压条件下, 该文的介质阻挡放电均呈脉冲群间歇性; 随着放电环境气压减小, 放电由常压下的粗大流注电晕逐渐变成细而密集的细丝状微流注电晕, 直至融合为貌似辉光放电; 放电脉冲群的密度和宽度也随气压降低而增加, 但脉冲幅值减小。放电的有功功率随气压变化并非单调增减, 当放电气压约为 0.04 MPa 时, 消耗的有功功率最小, 常压下和近真空时放电的有功功率都要大得多。

**关键词:**介质阻挡放电; 气压条件; 放电特性

中图分类号: O536 文献标识码: A

## Characteristic of the Dielectric Barrier Discharge in Air at Difference Pressure

LAI Rao-chang, LIN Qi

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A setup for DBD (Dielectric Barrier Discharge) at different air pressure was built up. Two kinds of electrode, plate plate and a plate strip like comb, were designed and made. The phenomenon of the DBD was shot and the data of the DBD experiment at different air pressure were recorded and analyzed. The results presented that the characteristic of the DBD in air changed related with surrounding pressure. The DBD was excited by intermittent cluster of impulses at different pressure. As the decrease of the pressure, the corona discharge of the DBD appeared from sparse column to dense filament until it developed into homogeneous glow like discharge, and the density and the width of the impulse cluster increased, but its amplitude reduced. The power in the DBD discharge varied with the pressure non monotonously and it reached its lowest point while the pressure was about 0.04 MPa, which was far less than that at atmosphere pressure and near vacuum.

**Key words:** dielectric barrier discharge; air pressure; characteristic of discharge

介质阻挡放电(DBD)生成的低温等离子体正被日益广泛地应用于臭氧制造、材料合成、表面处理、薄膜沉积及控制污染等领域。虽然介质阻挡放电已被开发和广泛应用, 对其理论和机理的研究却相对滞后, 且大都局限于对微放电或对整个放电过程中的某个局部进行较为详尽的讨论<sup>[1-3]</sup>。迄今, 对大气压下的介质阻挡放电研究较多, 而对放电气压低于0.1 MPa时介质阻挡放电性能随气压变化的研究则很少有报道。为了更深入地理解介质阻挡放电的放电机理, 控制放电参数, 将介质阻挡放电更好地投入到实际应用中, 有必要较为系统地研究气体压强对介质阻挡放电特性的影响。

本文分别采用了单面梳状电极板和双平面平行电极板进行介质阻挡放电实验, 在其他实验条件相同的情况下, 拍摄记录了DBD的放电现象; 测量了不同放电气压下空气DBD的放电电流和电压波形; 并采用李萨如图法计算了相应的DBD放电功率。本文通过实验研究了气体压强对DBD电参量及放

电功率的影响, 研究结果对进一步研究DBD的动力学进程及应用具有重要意义。

### 1 实验装置

本文的实验装置如图1所示。实验时, 放电电极置于密闭容器内, 容器内的压强可通过真空泵抽取其内空气而改变, 其真空度可由真空计读出并用阀门加以控制。当容器内的压强达到要求时, 关闭阀门以保持密闭容器内气压不变。为去除空气中的水分, 空气在引入密闭容器前先经干燥器过滤。

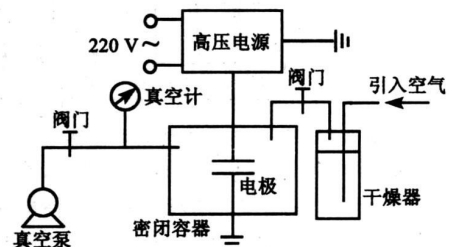


图1 放电实验装置示意图

高压电源加载在电极上使其产生放电, 加载功

收稿日期: 2006-12-25

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(A0410001)

作者简介: 赖饶昌(1972), 男, 福建人, 工程师, 主要从事低温等离子体的应用研究。\* 通信作者: 林麒, E-mail: qilin@xmu.edu.cn

率可调。放电电极分别采用双平行平板和单平面梳状电极两种结构。双平行平板电极均由两片厚1 mm的玻璃纤维环氧树脂板夹一面积为11 cm × 13 cm的金属筛网(400目)构成。两平板电极工作时上下互相平行,相隔间距为2 mm,构成一对电极,如图2所示。单平面梳状电极的基板介质材料为玻璃纤维环氧树脂,板厚1 mm,两侧均覆有厚约0.1 mm铜膜作为电极。一侧电极为片状,另一侧电极则呈梳状。梳状电极条宽1 mm,间距10 mm,共11条。电极条在介质板上均匀相间平行分布<sup>[4]</sup>。

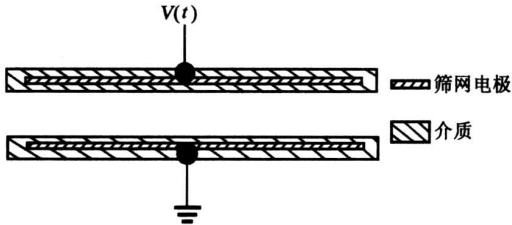


图2 介质阻挡平行板电极结构

## 2 实验测量方法

本文旨在研究空气中的DBD特性在不同气压条件下的变化规律。

高压电源加载在电极上使其产生放电。实验时测得电极板的放电频率为10~20 kHz,放电电压峰值 $V_p$ 约为20 kV。

实验中通过调节真空泵改变放电电极所处的密闭容器内的气压,气压可在约0.001~0.1 MPa间连续变化。实验中从0.1 MPa开始逐次递减约0.01 MPa进行测量,最低测量气压约0.01 MPa。

实验测量了两种放电电极在上述不同放电气压下空气DBD的电参量。实验时,在电源的输出端采用无感无容电阻分压的方法,利用数字示波器(TDS2002)对等离子体高压电源进行电压和电流波形的测量并进行储存,具体电路如图3所示。图中的 $R_1$ 、 $R_2$ 和 $R_3$ 均为无容无感电阻。

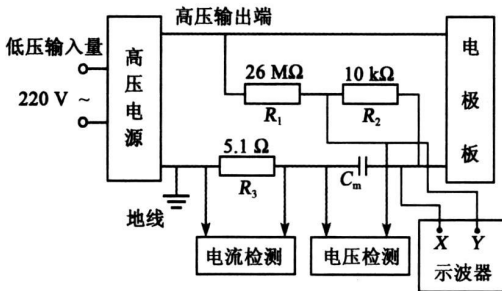


图3 DBD放电电参测量示意图

为考察不同气压环境下的放电现象,在测量电参量的同时,用数码相机拍摄记录下两种电极在各气压条件下的放电现象,以配合电参量对不同气压下DBD进行深入的分析研究。

电极的放电现象变化还与电源所加载的功率有关。本文在高压电源的输入端测量了电压和电流,可计算出电源的输入功率,但它是视在功率,不等于DBD的有功功率,其值比放电的有功功率略高。为

考察DBD放电的效率,本文在放电装置的接地侧串进测量电容 $C_m$ (见图3),采用李萨如图法来计算DBD装置的放电有功功率。

## 3 实验结果与分析

通过实验得到了诸多在不同气压条件下DBD的有意义的结果。例如放电现象中放电通道的差异、电压与电流波形的变化,放电效率(即有功功率占输入功率的百分比)的高低等。对其细加分析,可加深了解气压对DBD放电的影响,也可为实际应用提供参考依据。

### 3.1 不同气压下的DBD放电现象

图4为在几个典型气压 $p$ 条件下的DBD放电现象的照片,电源加载: $V_p \approx 20$  kV,频率 $f \approx 17$  kHz。照片由双平板电极的侧面进行拍摄,可以清楚地观察两平行电极间的放电区。

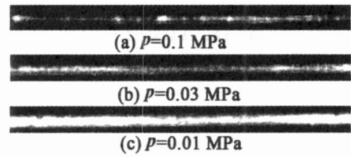


图4 双平面板在不同 $p$ 下的DBD的放电现象

在实验中可明显看出,在常压(0.1 MPa)下,两电极间呈现很多无火花的流注电晕的放电,如图4(a)所示,这些流注电晕粗大且特别明亮;随着放电区的气压降低,流注电晕逐渐变成密集的微流注电晕(或称微流注电晕),如图4(b)所示;放电区的气压继续降低,放电趋于均匀,微流注逐渐减弱减少,当将真空度提高到0.09 MPa时,微流注全都消失,融合成一片,整个放电区显得均匀和明亮,貌似辉光放电,如图4(c)所示。

虽然实验中的放电都能持续进行,但由于DBD放电为非稳定且非平衡放电,故当气压较高,或在大气压下(见图4(b)、(a)),放电区内的流注放电和微流注放电都不能稳定地停留在某处,而呈游离状,不停地在跳动中移动。仅在近真空条件下,放电现象形似真空管的直流辉光放电,显得均匀且稳定。

对于单面梳状电极,气压较高时,放电发生在梳状电极两侧,流注和微流注电晕明显。随着气压降低,放电范围增大,流注和微流注电晕减弱,直至0.01 MPa时,放电区扩展到电极板全表面,整个梳状电极包括介质底板都被相当均匀的放电电晕所包围。

### 3.2 不同气压下DBD放电电压电流波形

图5为采用图3的方法测得的双平面电极板在不同 $p$ 下放电时的电流、电压波形及其电荷电压图(李萨如图),电源加载: $V_p \approx 20$  kV, $f \approx 17$  kHz。图中各图左侧是波形,由于本实验的电源输出达万伏高压,无法直接测量,采用 $R_2$ 分压进行测量,电流

测量则是在电路中串入了一个小的  $R_3$ 。图5左侧的3个电压波形图和3个电流波形图的纵、横坐标的标尺分别对应相同。各图的右侧为相应左侧电压、电流波形的李萨如图。

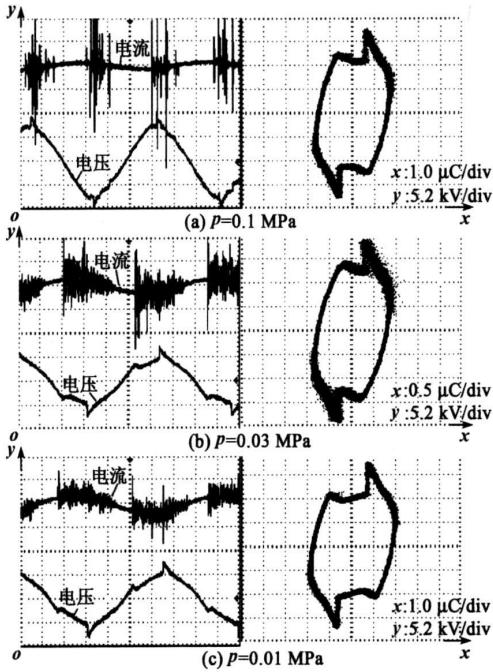


图5 双平面电极板 DBD 放电波形和李萨如图

由图可见, 放电环境的气压不同时, 电流波形有较大的变化, 而电压波形则变化不大。两者的变化都反映了 DBD 的性态受不同气压的影响。

在图中的电压、电流波形中, 近似正弦波的分量是高压电源加载在电极板上的。从电压波形看, 随着放电环境气压降低, 电源加载的频率逐渐减小, 但峰值却是在  $p = 0.04 \text{ MPa}$  时最小; 图中电流波形的正弦波分量的频率变化与电压相同, 其幅值随气压下降而增大。这些变化是电源根据放电条件不同而做出的调整, 也是不同气压下 DBD 放电消耗功率不同的体现。

叠加在正弦波电流上的密集的尖窄脉冲群即 DBD 放电电流, 它清楚地反映了 DBD 的放电过程, 提示放电呈脉冲间歇性。每一个脉冲对应一次空气被击穿形成流注或微流注电晕, 其宽度即一次流注或微流注电晕维持的时间。由图可见, 不同放电环境气压下, DBD 放电电流波形的区别主要表现在脉冲的平均幅值、脉冲群的宽度和脉冲群内的脉冲密度(密集程度)三方面。这些都反映了放电的强度和消耗能量的多寡。显然, 放电环境气压越高, 脉冲幅值越高(即放电强度越高); 但随着气压降低, 脉冲群扩大(说明每一电压加载周期内放电持续时间增长), 且愈加密集。

在  $0.1 \text{ MPa}$  下, 气体密度大、分子平均自由行

程小, 需要较高的击穿场强, 放电能量强且相对集中, 放电通道的电荷向外扩散少, 电荷密度高, 微电流在空间分布上相互独立, 所形成的放电通道表现为粗大明亮的流注电晕(如图4(a))。这种放电对应于在电流波形图上的高幅值宽脉冲。

放电环境气压降低, 气体密度减小、分子平均自由行程增大, 气体电离雪崩所需的场强也随之降低, 较易形成微放电通道, 表现为大量的微流注电晕。这反映在电流波形上即呈幅值较低的密集窄脉冲, 且在每一电流正弦波周期内放电时间增长。

另一方面, 低气压下微放电通道的电荷易向外扩散, 微流注内电荷密度变小, 抵达介质层后形成的沉积电荷层半径增大, 相邻微流注出现自组织现象; 当气压足够时, 易形成貌似辉光放电的 DBD 现象(见图4(c))。这时的放电脉冲更窄更密集, 持续时间也更长, 即脉冲群更宽<sup>[56]</sup>。对照电压、电流波形还可明显看出随着放电气压的降低, DBD 放电所需的起始电压逐渐降低。

单平面梳状电极板的 DBD 放电也具有类似图5的波形图。

### 3.3 压强对 DBD 放电功率的影响

本文采用电荷-电压( $qV$ )法, 即李萨如图法计算两种 DBD 放电的有功功率。该法原理: 在放电装置的接地端串进测量电容  $C_m$ (见图3,  $C_m$  的选取应以不影响放电正常进行和方便测量其两端电压为原则), 若  $C_m$  两端的电压为  $V_m$ , 则放电功率, 即有功功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T VI dt = \int_0^T V \frac{C_m dV_m}{dt} dt = f C_m \int_0^T V dV_m = f C_m A \quad (1)$$

式中  $T$  为一个周期的时间;  $I$  为电流;  $t$  为时间。若把  $V_m$  和分压器测得的电压  $V$ (图3中的  $X$  为  $V_m$ ,  $Y$  为  $V$ ) 分别接入示波器的 CH1( $X$ ) 和 CH2( $Y$ ) 通道, 则可得到一条闭合曲线, 即李萨如图(见图5右侧的3个图)。闭合曲线所围面积  $A$  与  $P$  成正比, 这样当  $f$  和  $A$  已知时, 可利用式(1)求得  $P$ 。

在其他实验条件不变的情况下, 实验得到了两种 DBD 装置的  $P$  与放电环境气压  $p$  的关系曲线, 如图6所示。由图可见,  $P$  与  $p$  关系并非呈单调增减趋势, 而是存在一个最低点, 该点位于  $p = 0.04 \text{ MPa}$  左右。当  $p > 0.04 \text{ MPa}$  时,  $P$  随着  $p$  降低而逐渐减小; 而当  $p < 0.04 \text{ MPa}$  时,  $P$  却随着  $p$  降低以较快的速度增加。之所以出现此规律, 本文认为可从不同气压下气体电离所耗能量大小的角度

来解释。

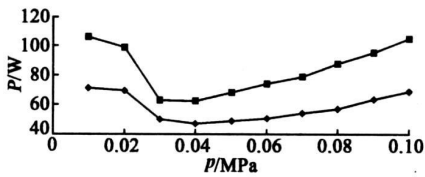


图6 DBD的 $P$ 随 $p$ 的变化规律

如图4(a)所示,当放电环境气压较高(常压)时,放电区内出现许多粗大且明亮的流注电晕,表明这些流注电晕内放电强烈,能量集中,耗费大量的能量;在图4(c)中,气压较低(达到0.01 MPa),微流注融合成一片,整个放电区显得均匀且明亮,貌似辉光放电,这说明放电区内的气体几乎都被电离了,虽然此时的空气密度较低,但实验时发现此时放电很容易启动,且空气中参与放电的分子比例很大,故而所需能量也会很高;而当 $p = 0.04$  MPa时,可从图4(b)中看到,放电区内出现的是细丝状的微流注电晕,实验表明,在此气压下,放电已较易启动,但因流注微细,流注内的能量并不显得很强烈,反而比0.1 MPa和0.01 MPa时要少消耗一些功率<sup>[7-8]</sup>。

#### 4 结论

本文实验研究了不同放电环境气压下空气介质阻挡放电的特性。研究结果表明:

(1) 空气DBD状态随气压降低而变化,即常压下的放电为粗大流注电晕,随着气压的降低,流注电晕逐渐变细而密集,最终融合成貌似辉光放电。

(2) 空气DBD波形具有脉冲群间歇性,且在放电气压从常压降至近真空时都保持该特性,但随着气压降低,脉冲群的幅值减小而密集,群宽度增大。

(3) 空气DBD的有功功率受放电气压影响较大,且不呈单调变化规律,在放电气压约为0.04 MPa时耗能最低,而常压和近真空状态时所耗功率都大。

#### 参考文献:

- [1] 孙杏凡. 等离子体及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- [2] 陈杰容. 低温等离子体化学及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] MANGOLINI L, ORLOV K, KORTSHAGEN U, et al. Radial structure of a low-frequency atmospheric pressure glow discharge in helium [J]. Appl Phys Lett, 2002(80): 1722-1724.
- [4] 林麒, 任庆磊. 常压空气辉光放电等离子体光辐射特性试验[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, 44(5): 621-624.
- [5] 张芝涛, 谷建龙, 毛程奇, 等. 电荷沉积对介质阻挡放电特性的影响[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(S1): 19-23.
- [6] 毛志国. 不同气压下氩气介质阻挡辉光放电的特性研究[J]. 河北大学学报, 2004, 24(6): 34-38.
- [7] 丘军林. 气体放电与气体激光[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995: 30-34.
- [8] 徐学基. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996: 323-327.
- [9] ZHOU X Z, MORRISH A H, LI Z W, et al. Site preference for  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Ti}^{4+}$  in  $\text{CoTi}$  substituted barium ferrite [J]. IEEE Trans Magn, 1991, 27(6): 4654-4656.
- [10] YU H F, LIN H Y. Preparation and thermal behavior of aerosol derived  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  nanoparticles [J]. J Magn Mater, 2004, 283(2-3): 190-198.
- [11] PAL M, BID S, PRADHAN S K, et al. Synthesis of nanocomposites comprising iron and barium hexaferrites [J]. J Magn Mater, 2004, 269(1): 42-47.
- [12] WALSER R M, WIN W, VALANJU P M. Shape optimized ferromagnetic particles with maximum theoretical microwave susceptibility [J]. IEEE Trans Magn, 1998, 34(4): 1390-1392.
- [13] HALLERD T, ERICSSON D, BONDESON A. Shape and material optimization using gradient methods and the adjoint problem in time and frequency domain [J]. COMPEL Int J Comput Math Electr Electron Eng, 2005, 24(3): 882-892.
- [14] HIROSHI S, KENZO H, KAZUMI A. Preparation and magnetic properties of barium ferrite fine particles by the coprecipitation salt catalysis method [J]. IEEE Trans Magn, 1992, 28(6): 3355-3362.
- [15] LI Xiang cheng, GONG Rong zhou, FENG Ze kun, et al. Effect of particle size and concentration on microwave absorbing properties of  $\text{Cu}_x\text{Co}_{2-x}\text{Y}$  ( $x = 0, 1$ ) hexaferrite composites [J]. J Am Ceram Soc, 2006, 89(4): 1450-1452.
- [16] WU L Z, DING J, JIANG H B, et al. Particle size influence to the microwave properties of iron based magnetic particulate composites [J]. J Magn Mater, 2005, 285(1-2): 233-239.
- [17] FU Xiaoling. Research into function of absorbing wave of metallic magnetic ultrafine powders [J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1999, 19(1): 92-96.
- [18] PATTON C E. Hexagonal ferrite materials for phase shifter applications at millimeter wave frequencies [J]. IEEE Trans Magn, 1988, 24(3): 2024-2028.
- [19] CHO H S, KIM S S. M-hexaferrites with planar magnetic anisotropy and their application to high frequency microwave absorbers [J]. IEEE Trans Magn, 1999, 35(5): 3151-3153.