

放电气隙对介质阻挡放电电学参量的影响

蔡忆昔, 王军, 庄凤芝, 王攀, 王静

(江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 通过建立介质阻挡放电试验系统, 采用 $Q-V$ Lissajous 图形法研究了激励电压峰值 V_{PP} 、放电气隙 l_g 对介质阻挡放电主要参量的影响。试验结果表明: 增大 V_{PP} 、 l_g 可提高介质阻挡放电的放电功率 P ; 固定 l_g 时, 电介质层等效电容 C_d 随 V_{PP} 的增大而增大, 放电间隙等效电容 C_g 随 V_{PP} 的增大而减小, V_{PP} 对等效总电容 C 的影响不大; C 、 C_d 、 C_g 均随 l_g 增大而减小; 电荷传输量 Q 、气隙等效电场强度 E_g 随 V_{PP} 的增大而升高, 随 l_g 的增大而降低。

关键词: 介质阻挡放电; $Q-V$ Lissajous 图形法; 激励电压峰值; 放电气隙

中图分类号: TM835; TM215

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)02-0080-03

Effects of Discharge Gap on Dielectric Barrier Discharge Parameters

CAI Yi-xi, WANG Jun, ZHUANG Feng-zhi, WANG Pan, WANG Jing

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Through establishing DBD (dielectric barrier discharge) experiment system and $Q-V$ Lissajous figure method, the effects of applied peak voltage (V_{PP}) and discharge gap (l_g) on the main parameters of DSP are studied. The results show that increasing V_{PP} and l_g can effectively enhance DBD power (P); the effect of V_{PP} on the total equivalent capacitance (C) is little under certain l_g , the dielectric equivalent capacitance (C_d) increases and the equivalent capacitance of the discharge gap (C_g) decreases with the increasing V_{PP} ; C , C_d , and C_g all decrease with the increasing l_g ; the charge transfer value (Q) and effective electric field of the discharge gap (E_g) increase with the increase of V_{PP} , but decrease with the increase of l_g .

Key words: dielectric barrier discharge (DBD); $Q-V$ Lissajous figure; peak voltage; discharge gap

0 引言

介质阻挡放电 (DBD) 又称无声放电, 是一种至少有一个电极被绝缘电介质层所覆盖的非平衡态气体放电。将频率为几十 kHz 到几百 kHz 的交流电加到两电极之间, 当电压超过 Paschen 击穿电压时, 放电空间的气体会被击穿而形成介质阻挡放电^[1,2]。介质阻挡放电可在大气压下或高于大气压下产生大体积、高能量密度的低温等离子体, 且操控简单, 其在臭氧合成、工业废气处理、空气净化、表面处理、材料改性等领域均获得了广泛的应用^[3,4]。

表征 DBD 集体效应的参量有: 放电功率、放电电荷量、放电气隙等效电场强度等。由于介质阻挡放电的电流、电压间的相位失调, 这些参量的测量是比较困难的。测量介质阻挡放电功率的方法主要有^[5]: 功率表法、瞬时功率法、电荷-电压 ($Q-V$ Lissajous) 图形法, 目前只认为 $Q-V$ Lissajous 图形法测量 DBD 放电功率效果较好^[6,7]。笔者利用该方法系统地研究

了激励电压峰值、放电气隙的变化对 DBD 各放电参量的影响。

1 $Q-V$ Lissajous 放电功率测量方法

1.1 介质阻挡放电试验系统

试验采用单介质阻挡放电形式, 试验系统示意图和布置图分别见图 1(a)、(b)。采用厚度为 1 mm 的石英玻璃作为放电介质层, 电极采用直径为 50 mm 的圆形铜片, 试验时放电间隙分别取 0.5、1.0、2.0 mm。放电电压波形通过电容 C_1 和 C_2 构成的电容分压器来测量, 分压比 $k=152$ 。放电空间传输的电荷通过在放电回路上串联一个 0.1 μF 的电容 C_M 间接获得。通过将泰克示波器 TDS3034B 的 CH_1 通道与 C_M 两端连接, CH_2 通道与电容分压器中较大电容两端连接, 从而获得 $Q-V$ Lissajous 图形。变压变频低温等离子体电源可在 0~25 kV、8~20 kHz 范围内工作, 试验频率 $f=14$ kHz。

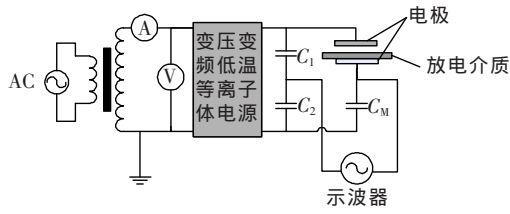
1.2 $Q-V$ Lissajous 放电功率测量方法

DBD 放电的典型 $Q-V$ Lissajous 图形见图 2。由

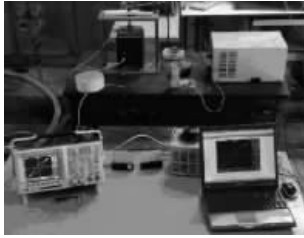
收稿日期: 2008-03-05; 修回日期: 2008-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50776041); 江苏省高校自然科学基金重大基础研究项目 (06KJA47004)。

作者简介: 蔡忆昔 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为发动机工作过程及排放控制。



(a) 示意图



(b) 现场布置图

图1 DBD 试验系统示意图和布置图

图2可见,在一个放电周期内, $A \rightarrow B$ 、 $C \rightarrow D$ 为微放电阶段, A 、 C 点为放电起始点, B 、 D 为放电终止点; $B \rightarrow C$ 、 $D \rightarrow A$ 阶段为放电熄灭后, 电源向 DBD 负载充电。

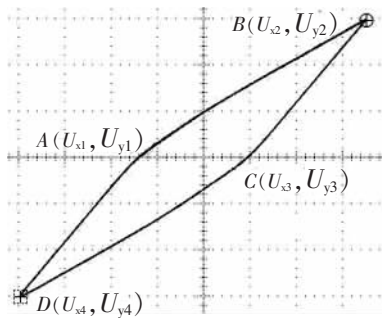


图2 DBD 放电典型 Q-V Lissajous 图形

通过求取 Q-V Lissajous 平行四边形的面积 S 及其顶点电压坐标, 可以间接测定 DBD 的多个放电参量, 如放电功率 P 、放电熄灭阶段的总电容 C 、放电阶段的介质等效电容 C_d 和气隙等效电容 C_g 、周期电荷传输量 Q 、气隙有效电场强度 E_g 、气隙折合电场强度 E/n 等。计算公式如下^[18-19]

$$P = \frac{\int_0^T V_{P-P} I dt}{T} = \frac{C_M}{T} \int_0^T V_{P-P} \frac{dV_M}{dt} dt =$$

$$f C_M \int V_{P-P} dV_M = f C_M k S$$

$$C = \frac{(U_{x3} - U_{x2})(U_{y3} - U_{y2})}{(U_{y3} - U_{y2})} C_M \quad C_d = \frac{(U_{x4} - U_{x3})(U_{y4} - U_{y3})}{(U_{y4} - U_{y3})} C_M$$

$$C_g = \frac{C \cdot C_d}{C_d - C} \quad Q = 2(U_{x2} - U_{x3}) C_M$$

$$E_g = \frac{V_{P-P} \epsilon_d}{l_d \epsilon_g + l_g \epsilon_d} = \frac{V_{P-P}}{l_d \frac{\epsilon_d}{\epsilon_g} + l_g} = \frac{V_{P-P}}{l_d \frac{C_g}{C_d} + l_g}$$

典型的单介质阻挡放电形貌见图3, 在介质靠近放电空间的一侧可以明显的看到电子沉积现象。



图3 单介质阻挡放电形貌

2 实验研究及结果分析

2.1 放电功率的变化

不同 l_g 时 P 随 V_{P-P} 的变化关系见图4。从图4可以看出: P 随着 V_{P-P} 、 l_g 的增大而增大。增大 V_{P-P} , 可增大 DBD 负载单位时间内的输入能量, 所以 P 增大。当 l_g 较小时, 容易形成均匀的、肉眼很难分辨出的微放电电流细丝, 此时从外电场获得能量的电子与放电空间中的气体原子、分子发生碰撞后很快到达阳极, 发生电子雪崩的几率较小; 当增大 l_g 时, 高能电子在放电空间中有充分的时间、空间与其中的气体原子、分子发生碰撞而发生大面积电子雪崩现象, 因此当增大 l_g 时, 功耗较大。但不宜选择太大的 l_g (一般为 1~3 mm), l_g 过大, 放电形貌将逐渐由类辉光放电转化为丝状放电, 易造成 DBD 装置热损耗增加、电介质击穿。

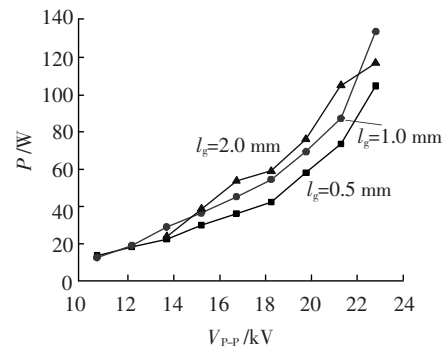
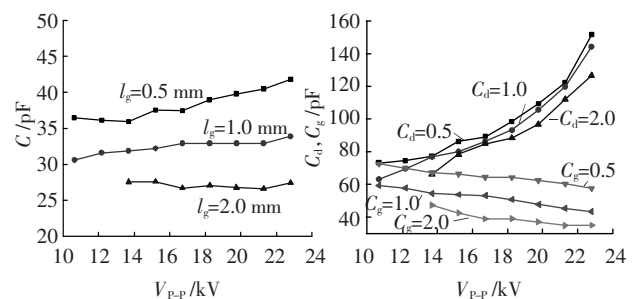


图4 放电功率随激励电压峰值的变化关系

2.2 等效电容的变化

不同 l_g 时 C 随 V_{P-P} 的变化关系见图5(a), 可以看出: 增大 l_g 将使 C 减小, 这是因为增大 l_g 将使 C_g 减小, 从而导致 C 也随之减小。 l_g 固定时 V_{P-P} 的变化对 C 的影响较小。 C_d 与 C_g 随 V_{P-P} 的变化关系见图5(b), 可以看出: C_d 随 V_{P-P} 的升高而增大, 随 l_g 的增大而略有减小; C_g 随 V_{P-P} 的升高而减小, 随 l_g 的增大而减小, 这主要是由于 C_g 与 l_g 的大小成反比造成的。



(a) C 随 V_{P-P} 的变化关系 (b) C_d 与 C_g 随 V_{P-P} 的变化关系

图5 等效电容随激励电压峰值的变化关系

2.3 单周期电荷传输量的变化

图6给出了不同 l_g 时 Q 随 V_{P-P} 的变化关系。从

图6可以看出: Q 随着 V_{P-P} 的增大而增大, 随着 l_g 的增大而减少。这是因为增加 V 将导致 E_g 的增大, 放电间隙内随之会产生更多随机分布的放电电流细丝, 宏观上即表现为整个放电空间传输的电荷总量增加; 而增大 l_g 将导致 E_g 减小, 同时也将引起放电间隙内形成的次雪崩有更多的几率向主雪崩靠拢, 这虽可增加每个电流通道的电荷传输量, 但也会造成放电形貌由伪辉光放电向丝状放电转化, 放电电流细丝急剧减少, 总体表现为 Q 随 l_g 增大而减少。

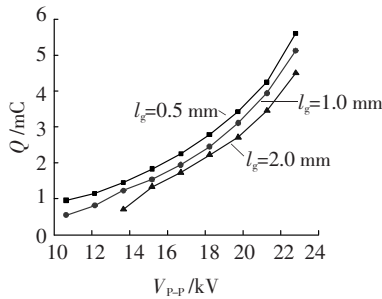


图6 单周期电荷传输量随激励电压峰值的变化关系

2.4 放电间隙等效电场强度的变化

图7给出了不同 l_g 时 E_g 随 V_{P-P} 的变化关系。从图7可以看出: 减小 l_g 、增大 V , 均可有效增大 E_g , 这也可以由放电间隙等效电场强度的计算公式得出。

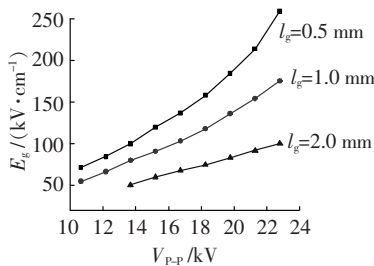


图7 气隙有效电场强度随激励电压峰值的变化关系

2.5 气隙折合电场强度的变化

通常用折合电场强度 E/n 来表征电子从电场获取的平均能量值大小, 进而表征气体放电时的平均电子能量。标准大气状况下有:

$$E/n = \frac{E_g}{6.02 \times 10^{23} \times 22.4 \times 1000} = 3.721 E_g \times 10^{-17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2 = 3.721 E_g (T_d)$$

可以看出: E/n 与 E_g 成线性关系, 可根据试验获得的 E_g 值间接估算出 E/n 的大小。频率为 14 kHz 时, 不同激励电压峰值对应的气隙折合电场强度值见表1。此折合电场强度在常压下可满足一般气体分子, 如 O_2 、 NO 、 HC 、 CO 甚至 N_2 分解、电离所需的激励能量, 可用于降解工业有害气体及生产臭氧。

3 结论

采用 $Q-V$ Lissajous 图形法可以较为真实的再现介质阻挡放电的各个过程, 通过求取其面积及各点相

表1 激励电压峰值、气隙折合电场强度对照表

$V_{P-P}/$ kV	$E/n/T_d$			$V_{P-P}/$ kV	$E/n/T_d$		
	$l_g=0.5$	$l_g=1.0$	$l_g=2.0$		$l_g=0.5$	$l_g=1.0$	$l_g=2.0$
10.64	266	204	-	18.24	589	439	278
12.16	314	247	-	19.76	686	506	309
13.68	372	298	188	21.28	797	575	343
15.20	445	338	223	22.80	964	653	373
16.72	509	385	253				

对电压坐标值, 揭示了介质阻挡放电的放电功率、等效电容、电荷传输量、等效电场强度等参数随激励电压峰值和放电间隙的变化关系, 得出如下结论:

(1) 提高激励电压峰值, 可提高介质阻挡放电的放电功率、增加周期电荷传输量、提高放电电场强度及气隙折合电场强度。

(2) 随着放电间隙的增大, 介质阻挡放电的放电功率增加, 但周期电荷传输量、放电电场强度及气隙折合电场强度均有所下降。

(3) 放电间隙固定时, 等效总电容随激励电压峰值的增大只在微小数值范围内变动, 介质层等效电容随激励电压峰值的增大而增大, 放电间隙等效电容随激励电压峰值的增大而减小; 放电间隙增大时, 等效总电容、介质层等效电容、放电间隙等效电容均有所下降, 其中介质层等效电容只略有下降。

(4) DBD 装置产生的平均电子能量可满足一般气体分子激发、离解所需的能量要求, 适用于工业废气降解及臭氧生产设备。

参考文献:

- [1] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
- [2] ELIASSON B, GELLERT B. Investigation of Resonance and Excimer Radiation from a Dielectric Barrier Discharge in Mixture of Mercury and the Rare Gas[J]. Appl. phys., 1990, 68(5): 2 026-2 037.
- [3] MONTIE T C, KELLY-WINTENBERG K, ROTH J R. An Overview of Research Using the One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (OAU GDP) for Sterilization of Surfaces and Materials [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2000, 28(1): 41-55.
- [4] HOARD J. Plasma-catalysis for Diesel Exhaust Treatment: Current State of the Art[J]. SAE, 2001, 185(1): 145-156.
- [5] 杨波, 王燕, 白希尧. 测量介质阻挡放电功率的一种新方法[J]. 大连海事大学学报, 2002, 28(1): 92-96.
- [6] 刘钟阳, 吴彦, 王宁会. DBD 等离子体发生器放电功率测量的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3): 78-80.
- [7] SUBRAHMANYAM C, RENKEN A, KIWI-MINSKER L. Novel Catalytic Dielectric Barrier Discharge Reactor for Gas-phase Abatement of Isopropanol [J]. Chem. Plasma Process, 2007(27): 13-22.
- [8] 孙岩洲, 邱毓昌, 李发富. 利用 Lissajous 图形计算介质阻挡放电参数 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2005, 24(2): 113-115.
- [9] 张芝涛, 白敏冬, 赵艳辉. 高浓度臭氧发生器放电特性实验研究[J]. 高压电学, 2003, 29(5): 33-35.
- [10] 方志, 邱毓昌, 王辉. 介质阻挡放电的电荷传输特性研究[J]. 高压电器, 2004, 40(6): 401-403.