

一般工程技术

DBD 放电产生等离子体的能效影响因素研究

刘海涛 何伟 陈志刚 刘汝兵 林麒*

(福建省等离子体和磁共振重点实验室,厦门大学物理与机电工程学院,厦门 361005)

摘要 为提高真空下介质阻挡放电(DBD)的电源效率,考察其能效特性,利用正交设计法安排实验,研究了DBD放电等离子体激励电源的工作频率、占空比、放电环境气压和电极间隙对DBD放电能效的影响,通过方差分析寻找最优组合使电源效率最大化。研究表明,占空比是影响电源效率的主要因素,放电环境气压影响其次,加载电源频率和电极间隙大小对电源效率影响不显著。

关键词 介质阻挡放电 低温等离子体 电源效率 能效特性 正交设计法

中图分类号 TB771 TM835; **文献标志码** A

介质阻挡放电(DBD: dielectric barrier discharge),也称无声放电,是一种非平衡态的、非稳定的和不均匀的放电。由于这种放电方式很容易在大气压下形成稳定的气体放电并产生等离子体,因此广泛应用于臭氧制备、紫外光源、材料改性、薄膜沉积及废气处理等领域^[1,2]。

虽然介质阻挡放电已经在很多方面得到了应用,但国内对其放电的能效特性研究还很不深入^[3]。本文以DBD放电能效特性为考察指标,采用正交试验法研究了改变等离子体激励电源的工作频率、占空比、放电环境气压和电极间隙对放电能效的影响,通过较少的实验找出最佳放电条件;利用方差分析确定了各因素作用的主次顺序,以及对能效指标影响的显著程度,找出了各因素在实验范围内放电的最优组合。为以后更好地提高DBD激励源的放电效率,有很好的指导意义和实用价值。

1 实验装置

1.1 放电装置

本文设计的DBD放电装置如图1所示。电极采用平行板形式,置于密闭的放电容器内。放电容器与真空泵相连接,使得容器内的气压在0~100 kPa范围内连续可调。

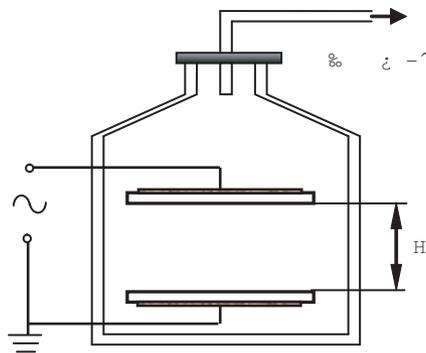


图1 放电装置结构图

实验采用双层介质阻挡放电形式,放电介质层为4 mm厚的普通玻璃;上、下电极均采用直径为12 cm、厚度约为0.1 mm、目数400的圆形不锈钢丝网;上电极接高压输入端,下电极串联一个100 nF的陶

2011年1月10日收到,3月15日修改

福建省自然科学基金
(A1010014)资助

第一作者简介:刘海涛(1985—),男,陕西渭南人,硕士研究生。研究方向:等离子体放电特性研究。

*通信作者简介:林麒。E-mail:qilin@xmu.edu.cn。

瓷电容 C_m 接地。上下玻璃介质层相距间隔 H 分别取为 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm。

1.2 实验装置

本文的实验装置系统结构如图 2 所示。实验中采用一台 CTP2000K 等离子体激励电源,输出电压在 0 ~ 30 kV 连续可调,其工作频率在 20 Hz ~ 30 kHz 之间的范围内连续可调。一台 PC-07 数字脉冲调制器与其匹配,使放电加载电源的输出波形占空比在 0% ~ 100% 范围内连续可调。电容分压器中上电容 $C_1 = 47$ pF,下电容 $C_2 = 47$ nF。示波器型号为 Tektronix TDS2002。

实验时利用真空泵将放电容器内的气压分别依次调为 20 kPa、15 kPa、10 kPa、5 kPa,加载的激励电源频率分别为 5 kHz、6 kHz、7 kHz、8 kHz,占空比分别取为 40%、55%、70%、85%。

1.3 实验方法

1.3.1 放电功率的测量

图 2 中,根据电压表和电流表读数计算可得一个功率值,但是该值为视在功率。视在功率并不是 DBD 放电实际消耗的功率。后者才是有功功率。为叙述简便,下文称放电有功功率为放电功率。目前,测量介质阻挡放电功率的方法主要有三种:功率表法、瞬时功率法、电荷-电压($Q-V$ Lissajous)图形法。功率表法和瞬时功率法测量精度较低,而 $Q-V$ Lissajous 图形法测量 DBD 放电功率效果较好^[4-5]。

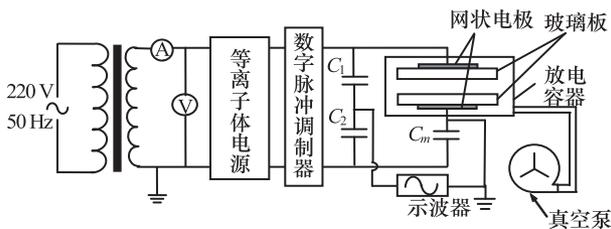


图 2 实验装置结构图

本文采用 $Q-V$ Lissajous 图形法来测量放电功率。该方法的测量原理是:在放电容器的接地端串联一个测量电容 C_m ,其两端的电压为 V_m ,激励电源

输入电压 V 通过电容 C_1 和 C_2 构成电容分压器来测量,其分压比 $k = 1000$,则

$$V = (k + 1)V_2 \quad (1)$$

若放电过程输送的电荷为 Q ,则流过放电回路的电流为:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(C_m V_m)}{dt} = C_m \frac{dV_m}{dt} \quad (2)$$

所以放电功率 P 为:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T VI dt = \frac{C_m}{T} \int_0^T V \frac{dV_m}{dt} dt = f C_m \oint V dV_m = f C_m (k + 1) \oint V_2 dV_m = f C_m (k + 1) S \quad (3)$$

将示波器的 CH1 通道与 C_m 两端连接,CH2 通道与电容分压器中的电容 C_2 两端连接,从示波器可获得如图 3 的电压电流波形图。图中上方图线为放电电流波形,下方图线为加载电压波形。

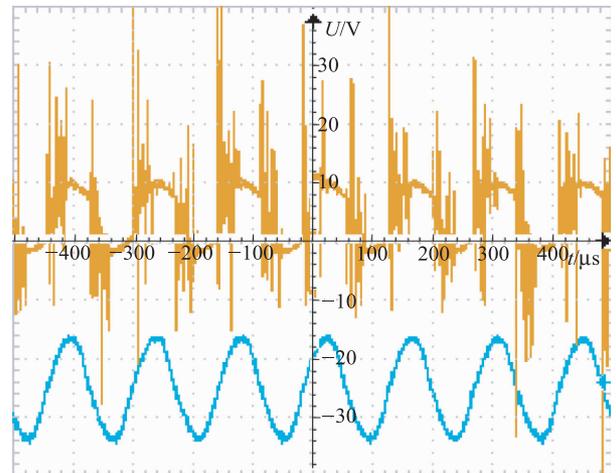


图 3 放电电压波形图

如果把示波器 CH1 通道测得的电压 V_m 和 CH2 通道测得的电压 V_1 以 $X-Y$ 模式显示,便可以得到一条闭合曲线(见图 4),通常将其称作 $Q-V$ Lissajous 图。由 Lissajous 图形的面积 S ,可得到放电功率为^[5,6]

$$P = f C_m (k + 1) S \quad (4)$$

该方法在实际使用的时候,须注意测量电容 C_m 的选取,要以不影响容器内 DBD 放电工作和方便测量 C_m 的电压为准则。通常选取 C_m 为放电电极间电容的一百倍以上。放电电极间的电容可以用静态测

量电容方法得到。同时需注意所选取 C_m 电容的耐压值要足够高,以保证测量的安全性。

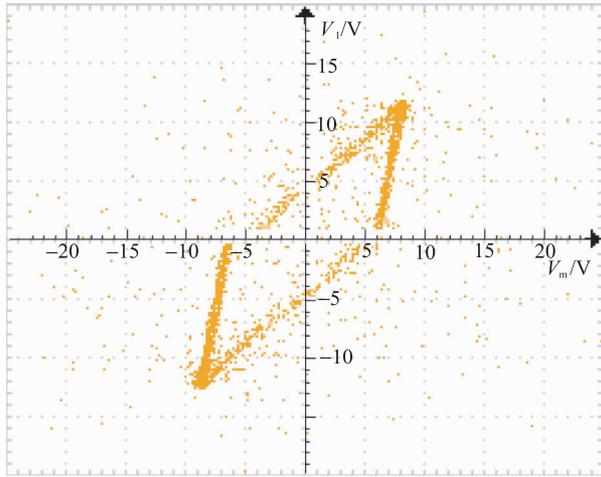


图4 Lissajous图

实际得到的 Lissajous 图形边界很不规则,若采用传统的做法,需要人工求取面积,不仅测量费时,而且增加了测量误差。在本实验中,通过将示波器采集的 Lissajous 图形输入 PC 端,利用 Image-Pro Plus 软件来自动计算面积。具体做法是:通过设定标尺之后,采用自动或手动寻迹确定 Lissajous 图形边界,便可迅速自动计算出图形面积,省时省力并且计算精度高。

1.3.2 放电效率的计算

本文对电源的效率定义为:DBD 放电的放电功率与电源输入功率的比值,即

$$\eta = \frac{P_{\text{放电}}}{P_{\text{输入}}} \quad (5)$$

其中电源输入功率 $P_{\text{输入}}$ 为由图 2 中电压、电流表读数测得的市电消耗功率,即视在功率,包括激励源内部的损耗、变压器的损耗和放电功率三部分^[7]。放电功率 $P_{\text{放电}}$ 为用(3)式计算所得到的有功功率 P 。

2 实验设计及数据分析

正交试验设计是安排多因素试验、寻求最优水平组合的一种高效率试验设计方法。它采用部分有

代表性的试验来代替全面试验,通过对部分试验结果的分析,了解全面试验的情况。以下介绍本文采用正交表安排试验的具体做法。

2.1 确定试验指标

本实验选用 DBD 等离子体激励电源的效率 η 作为检验 DBD 放电能效特性的指标,选取激励电源的工作频率、占空比、放电环境气压和电极间隙作为考察的因素,采用 $L_{16}(4^5)$ 形式的正交表安排实验。制定的可控因素水平表见表 1,其中 A、B、C、D 分别表示四个因素:加载电压的频率和占空比、放电环境气压、电极间隙 H 。

表 1 可控因素水平表

水平	A		B		C		D	
	频率 /kHz	占空比 /%	气压 /kPa	电极间隙 /cm	气压 /kPa	电极间隙 /cm	气压 /kPa	电极间隙 /cm
1	5	A1	40	B1	20	C1	1.0	D1
2	6	A2	55	B2	15	C2	1.5	D2
3	7	A3	70	B3	10	C3	2.0	D3
4	8	A4	85	B4	5	C4	2.5	D4

2.2 试验结果分析

本文采用正交试验设计方法安排实验所获得的实验数据结果如表 2 所示。

对于正交试验而言,方差分析可以将试验中由于实验条件改变引起的数据波动同实验误差引起的数据波动区分开来,对各因素的影响给以精确的数量估计,进而判断所考察因素的作用是否显著,可弥补极差分析的缺陷^[8]。

对实验数据进行方差分析,步骤如下:

2.2.1 计算矫正项 CT

$$CT = \frac{T^2}{n} = \frac{722.56^2}{16} = 32\ 630.809\ 6。$$

上式中 $T = \sum_{i=1}^n x_i = 722.56。$

2.2.2 计算偏差平方和及自由度

(1) 总的偏差平方和及自由度

$$S_T = Q_T - CT = \sum_{i=1}^n x_i^2 - CT = 36\ 301.326\ 4 - 32\ 630.809\ 6 = 3\ 670.516\ 8。$$

表 2 实验数据结果

实验号	因素					效率 x_i	试验组合
	A	B	C	D	空列		
1	1	1	1	1	1	68.79	$A_1B_1C_1D_1$
2	1	2	2	2	2	47.88	$A_1B_2C_2D_2$
3	1	3	3	3	3	36.32	$A_1B_3C_3D_3$
4	1	4	4	4	4	23.71	$A_1B_4C_4D_4$
5	2	1	2	3	4	81.75	$A_2B_1C_2D_3$
6	2	2	1	4	3	55.94	$A_2B_2C_1D_4$
7	2	3	4	1	2	31.30	$A_2B_3C_4D_1$
8	2	4	3	2	1	28.09	$A_2B_4C_3D_2$
9	3	1	3	4	2	55.77	$A_3B_1C_3D_4$
10	3	2	4	3	1	37.34	$A_3B_2C_4D_3$
11	3	3	1	2	4	41.32	$A_3B_3C_1D_2$
12	3	4	2	1	3	35.29	$A_3B_4C_2D_1$
13	4	1	4	2	3	45.16	$A_4B_1C_4D_2$
14	4	2	3	1	4	63.43	$A_4B_2C_3D_1$
15	4	3	2	4	1	37.61	$A_4B_3C_2D_4$
16	4	4	1	3	2	32.86	$A_4B_4C_1D_3$
K_{1j}	176.70	251.47	198.91	198.81	171.83	$Q_T = \sum_{i=1}^n x_i^2 =$ 36 301.326 4	
K_{2j}	197.08	204.59	202.53	162.45	167.81		
K_{3j}	169.72	146.55	183.61	188.27	172.71		
K_{4j}	179.06	119.95	137.51	173.03	210.21		

(2)因素、误差的偏差平方和

$$Q_j = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^m K_{ij}^2, \text{得}$$

$$S_j = Q_j - CT = \frac{1}{\gamma} (K_{1j}^2 + K_{2j}^2 + K_{3j}^2 + K_{4j}^2) - CT。$$

由上式计算可得 S_A, S_B, S_C, S_D 。

以上两式中 γ 为水平重复数, $\gamma = n/m$, 且 n 为实验次数, m 为因素水平数。

$$S_A = 101.885, S_B = 2\ 608.973\ 9,$$

$$S_C = 670.495\ 7, S_D = 194.288\ 5,$$

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + S_C + S_D) = 94.873\ 7。$$

(3)因素、误差的自由度

$$\text{自由度: } f_A = f_B = f_C = f_D = f_e = m - 1 = 3,$$

$$\text{总自由度: } f_T = n - 1 = 15。$$

2.2.3 方差计算

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} = 33.961\ 7, V_B = \frac{S_B}{f_B} = 869.658\ 0,$$

$$V_C = \frac{S_C}{f_C} = 223.498\ 6, V_D = \frac{S_D}{f_D} = 64.762\ 8,$$

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = 31.624\ 6。$$

2.2.4 计算统计量 F

由 $F_{\text{因素}} = \frac{V_{\text{因素}}}{V_{\text{误差}}}$, 计算得:

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} = 1.073\ 9, F_B = \frac{V_B}{V_e} = 27.499\ 4,$$

$$F_C = \frac{V_C}{V_e} = 7.067\ 2, F_D = \frac{V_D}{V_e} = 2.047\ 9。$$

2.2.5 列出方差分析表(表 3)

进行因素的显著性检验。

表 3 方差分析表

方差来源	偏差平方和 S	自由度 f	均方差 V	F 值	F α	显著性
A	101.885	3	33.961 7	1.073 9	$F_{0.01}(3,3) = 29.5$	
B	2 608.973 9	3	869.658 0	27.499 4	$F_{0.05}(3,3) = 9.28$	**
C	670.495 7	3	223.498 6	7.067 2	$F_{0.1}(3,3) = 5.39$	*
D	194.288 5	3	64.762 8	2.047 9	$F_{0.25}(3,3) = 2.36$	
e	94.873 7	3	31.624 6	1.000 0		
T	3 670.516 8	15				

方差分析结果表明:A 因素(激励电源工作频率)对电源的效率影响不显著,B 因素(占空比)对电源效率的影响高度显著,C 因素(DBD 放电环境气压)对电源效率的影响是显著的,D 因素(电极间隙 H)对电源的效率影响不显著,但有一些。各因素对电源效率的影响程度主次顺序为: $B > C > D > A$ 。

3 结论

根据以上研究结果,可以得到以下这样的结论:

激励电源的工作频率对电源效率影响很小(几乎可以忽略);占空比是影响电源效率的主要因素,占空比(在电容充电饱和之前)增大时电源效率随之增大;上下电极的间隙大小对电源效率影响较

小;等离子体发生器放电环境气压减小时电源效率变大。

电源效率在实际应用中愈大愈好,就四个水平而言,电源效率的最佳水平组合为 $A_2B_1C_2D_3$,即激励电源工作频率为 6 kHz,占空比为 40%,放电容器内气压为 15 kPa,上下电极的介质板间隙为 2.0 cm。这与极差分析的结果是一致的。

参 考 文 献

- 1 赵 青,刘述章,童洪辉. 等离子体技术及其应用. 北京: 国防工业出版社,2009
- 2 许根慧,姜恩永,盛 京,等. 等离子体技术与应用. 北京: 化学工业出版社,2006

- 3 Francke K P, Rudolph R, Miessner H. Design and operating characteristics of a simple and reliable DBD reactor for use with atmospheric air. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*,2003;23(1):47—57
- 4 Subrahmanyam C H, Renken A, KiwiMinsker L. Novel catalytic dielectric barrier discharge reactor for gas-phase abatement of Isopropanol. *Plasma Chem Plasma Process*,2007;27:13—22
- 5 刘钟阳,吴 彦,王宁会. DBD 等离子体反应器放电功率测量的研究. *仪器仪表学报*,2001;22(3):78—80
- 6 刘志楠,蔡忆昔. DBD 型低温等离子体放电功率影响因素研究. 车用发动机,2008;3:66—67
- 7 单汝翠. DBD 等离子体发生器激励电源相关问题的研究. 大连: 大连理工大学硕士论文,2009;24—33
- 8 高允彦. 正交及回归试验设计方法. 北京:冶金工业出版社,1988

Study on the Factors Influencing Efficiency of DBD Plasma

LIU Hai-tao, HE Wei, CHEN Zhi-gang, LIU Ru-bing, LIN Qi*

(Fujian Key Laboratory of Plasma and Magnetic Resonance, School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, P. R. China)

[Abstract] To improve the power efficiency used to generate the plasma by DBD (dielectric barrier discharge) technology in near vacuum condition, and to study power energy-efficiency characteristics, the influencing factors, such as the frequency and duty ratio of the plasma power, the air pressure in the DBD discharge container and the distance between electrodes, to the discharge efficiency has been researched through the orthogonal experiment method. The best combination of the factors may be found by variance analysis method to obtain maximize the power efficiency. The experiment results show that duty ratio is the primary factor affecting the power efficiency, the influence caused by air pressure is secondary, the frequency of the power and electrode distance have a little prominent effect to the power efficiency.

[Key words] dielectric barrier discharge low temperature plasma power efficiency energy-efficiency characteristics orthogonal method