

文章编号:1000-582X(2011)09-134-08

多针-同轴电极介质阻挡放电的传输电荷产生条件分析

王晓静,孙才新,李成祥,米彦

(重庆大学输配电及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:介质阻挡放电(DBD)能在常温大气压下产生均匀放电且能耗低,具有广阔的工业应用前景。针对多针-同轴电极,利用正交设计和 Lissajous 图形法试验研究了 DBD 电极阵列以及高频电源窗口参数匹配。DBD 过程也是电荷传输的过程,传输的电荷量越多,等离子体的化学反应也越充分。正交设计以周期传输电荷量为目标因素,以电源电压幅值、频率、针长度以及纵向相邻针的夹角为试验因素。方差分析结果表明:电压幅值对目标因素的影响最显著,其次为电源频率;长度 3.5 mm 和 2 mm 的针以 45° 间隔排列的电极结构与电源频率 21 kHz 的配合使得周期传输电荷量最大。进一步试验表明正交试验结果是正确的,对于提高 DBD 等离子体化学反应效率有重要意义。

关键词:介质阻挡放电;正交设计;Lissajous 图形;传输电荷;高频;多针-同轴

中图分类号:TM 85

文献标志码:A

An analysis of formation conditions for DBD transported charges of multineedle-to-cylinder

WANG Xiao-jing, SUN Cai-xin, LI Cheng-xiang, MI Yan

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Dielectric barrier discharge (DBD) can produce homogenous discharge in normal temperature and atmosphere with low energy consumption, so it has broad development prospects in industrial applications. An experimental study is carried out to optimize the needles arrangement and supply parameters aiming at the multineedle-to-cylinder reactor with orthogonal design in combination with Lissajous figures. As it is known, the process of discharge is also the process of charge transfer; hence, the more charges are transported, the higher reaction efficiency in plasma is. The orthogonal design is established with transported charges as the goal factor, and supply voltage, supply frequency, needles length (NL), interneedle rotation angles (INRA) as factors. Variance analysis results show that the largest influence factor is supply voltage, followed by supply frequency; the electrode configuration of $NL = (3.5 + 2)$ mm and $INRA = 45^\circ$ matched with $f = 21$ kHz makes transported charges per cycle biggest. The orthogonal experiment results are verified by further experiments, which is significant to improve the DBD plasma reaction efficiency.

收稿日期:2011-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50807054);输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室项目(2007DA10512709303;2007DA10512710501)

作者简介:王晓静(1972-),女,重庆大学博士研究生,讲师,主要从事高电压新技术与工程应用的研究。(E-mail)quietwx@cqu.edu.cn。

孙才新(1944-),男,中国工程院院士,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)suncx@cqu.edu.cn。

Key words: dielectric barrier discharge; orthogonal design; Lissajous figures; transported charges; high frequencies; multineedle-to-cylinder

近20年来,气体放电产生的低温等离子体得到越来越广泛的应用。介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)能够在大气压($10^4 \sim 10^6$ Pa)和很宽的频率范围($50 \sim 10^6$ Hz)内产生大体积、高能量密度的低温等离子体,可应用于材料表面改性、环境保护、医学和等离子体显示器等工业领域^[1-7]。

由于DBD无需昂贵的真空设备,具有比较广阔的应用前景,因此研究DBD放电特性是很有意义的。驱动电源和反应器的类型对DBD放电特性有大的影响,目前驱动电源有工频交流电源^[6]、高频交流电源^[8]和脉冲电源等;反应器电极结构有同轴^[4]、板-板^[8]、针-板^[9-11]、锥齿形-平板^[12]等,并可以进一步根据是否在放电间隙添加填料加以区分^[13];阻挡介质材料有石英^[14]、 Al_2O_3 ^[15]和环氧和聚四氟乙烯(PTFE)等;电极材料有铜^[14]、不锈钢^[9]、钨等。它们有各自的优缺点,适用不同的实用场合。

从等离子体化学的角度考虑,DBD放电空间所发生的等离子体化学反应的效率是由微放电通道内的电荷传输量决定的^[16-18]。在大气压条件下,DBD间隙内的气体放电由许多随机分布的微放电构成,其放电过程同时也是电荷传输的过程,一般说来放电空间的微放电通道越多,传输的电荷也越多,通道内等离子体的化学反应也越充分。因此研究使DBD传输电荷最优的电极结构与电源参数对提高工业应用中DBD等离子体化学反应效率有重要意义。

笔者对一种多针-同轴电极结构研究表明,该电极能显著降低反应器的起始放电电压,提高周期传输电荷量,且针间距越小,周期传输电荷量越大^[14]。在之前的研究基础上,笔者采用正交设计结合Lissajous图形,针对多针-同轴电极结构,以周期传输电荷量为目标因素,以高频电源的电压幅值和频率、针长度(NL)和相邻针的夹角(INRA)为正交试验因素,试验研究了传输电荷最大的电极结构与电源参数的配合,为实际应用中DBD等离子体反应器的优化提供参考。

1 试验装置与试验方法

1.1 试验装置

笔者所用DBD是在实验室敞开的空气环境下产生的,试验时温度为 28°C ,所建立的试验装置电

气接线如图1所示。电源的激励频率可以在 $16 \sim 30$ kHz内连续可调,电压幅值在 $0 \sim 20$ kV的范围内连续调节。电源电压波形由高压探头P6015A采集,衰减比1000。放电空间传输的电荷通过在放电回路串联一个 2000 pF的电容 C_m 间接获得。试验用示波器型号为Tektronix DPO4054。

DBD反应器的主体是一根圆柱形的石英玻璃管,内径 16.5 mm,外径 19.9 mm,长 300 mm。其外壁缠有长 200 mm的铜皮作为接地电极。石英玻璃管内同轴固定高压多针电极:即在直径 5 mm的光滑铜棒电极上规律排列直径 1 mm,针尖角 45° 的铜针电极,如图2所示。

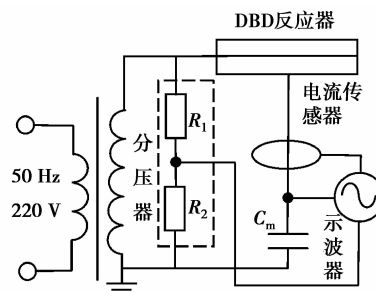


图1 DBD试验电气接线图

1.2 正交试验设计

与同轴电极相比,多针-同轴电极结构强烈畸变了原来的电场分布,使空间呈现极不均匀电场分布,具有起始放电电压和运行电压低,放电功率大,周期传输电荷量大等优点。

1)前期研究结果表明,光滑铜棒上间隔排列 3.5 mm和 2 mm的长短针,在相同的激励电压下,周期传输电荷量在针间距 5 mm时最大, 10 mm次之, 15 mm最小^[14]。本试验考察当针间距为 2.5 mm时,多针-同轴电极结构与高频电源参数的配合。

2)与光滑圆棒相比,多针-同轴电极的针能提供极不均匀电场,在较低电压时首先产生电晕放电,随着电压的逐渐升高,发展过渡为丝光放电。为明确针长度和相邻针电极的旋转角度是否有助于低温等离子体快速地充满整个反应器,笔者安排了针长度分别为 $(3.5+3.5)$ mm、 $(3.5+2)$ mm、 $(2+2)$ mm的电极阵列,以及 0° 和 45° 两种纵向相邻针电极的相对角度进行试验。电极阵列结构如图2所示。

3)试验电源频率为 $16 \sim 30$ kHz连续可调,正交

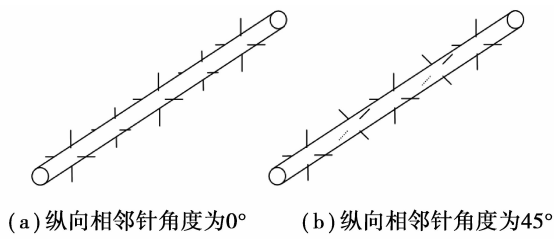


图 2 电极阵列结构示意图

试验安排的频率水平分别为:17、21、25、29 kHz。首先在 4 个频率下分别对每种电极结构试验,观察它们的起始放电电压幅值和电流过零处电压幅值。结果表明,它们当电压幅值 $U_p \geq 2 \sim 2.94$ kV 就陆续开始放电;当外加电压幅值 U_p 升高至 $5 \sim 7.56$ kV 时,分别出现电流过零特性,放电剧烈。因此,笔者将正交试验的电压水平确定为:4.5、6、7.5、9 kV。

正交试验的因素水平设计如表 1 所示。

表 1 因素水平表

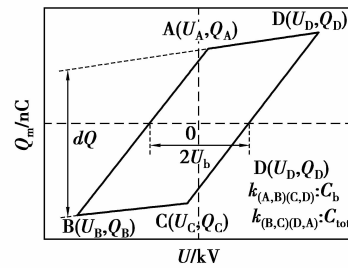
水平	试验因素			
	U_p/kV	f/kHz	NL/mm	INRA/(°)
1	4.5	17	3.5+3.5	45
2	6	21	3.5+2	0
3	7.5	25	2+2	
4	9	29		

1.3 Lissajous 图形

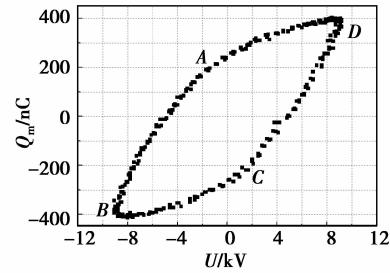
DBD 反应器的负载特性呈容性,其放电过程可以等效为电容器的充放电过程^[19]。

反应器的电极和地之间串联一个测量电容 C_m (图 1),用以测量放电传输的电荷量 Q_m 。适当地选取 C_m 的值,使得 C_m 远大于 DBD 反应器的总电容 C_{tot} (介质 C_d 和气隙 C_g 的串联电容值),则可认为 C_m 的引入对放电不产生影响。

当放电发生时, C_m 两端的电压 U_m 正比于放电空间传输的电荷量 Q_m 。将图 1 中高压探头测得的电源电压和 U_m 分别加在示波器的 $y-x$ 轴上就可以观察到闭合的平行四边形,即为 Lissajous 图形,如图 3 所示。其中 AB、CD 两边分别对应放电阶段,电源向固体介质等效电容 C_d 充电,而 BC、DA 两边分别对应放电截止阶段,电源向电极间总电容 C_{tot} (固体介质等效电容 C_d 和气隙等效电容 C_g 串联)充电,因此 AB、CD 线段的斜率为反应器放电时的等效电容 C_d ,BC、DA 线段的斜率为反应器的总电容



(a) 理想的Lissajous图形



(b) 3.5 mm和2 mm的长短针间隔2.5 mm的电极阵列在电源窗口参数为9 kV和17 kHz时放电的Lissajous图形

图 3 Lissajous 图形

C_{tot} 。图中 dQ 为半个周期内放电传输的电荷量; U_b 为起始放电电压。

DBD 周期传输电荷 Q_m 、介质等效电容 C_d 、气隙等效电容和放电功率 P 近似可按式(1)-(5)计算:

$$Q_m = 2(Q_A - Q_B), \quad (1)$$

$$C_d = \frac{Q_A - Q_B}{U_A - U_B}, \quad (2)$$

$$C_{tot} = \frac{Q_C - Q_B}{U_C - U_B}, \quad (3)$$

$$C_g = \frac{C_d \cdot C_{tot}}{C_d - C_{tot}}, \quad (4)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i_m dt = f \int_0^T u \cdot C_m \cdot \frac{du_m}{dt} \cdot dt = f \oint u \cdot dq_m = fS_L, \quad (5)$$

式中: S_L 为图 3 中 Lissajous 图形的面积; i_m 为放电回路的电流。

2 试验和试验结果

2.1 正交试验^[20]

选取正交设计表 $L_{16}(4^5)$ 正交表试验。从表 1 可以看出,电压幅值和频率因素有 4 个水平,而针长的水平为 3 个,角度的水平为 2 个,因此试验采用拟水平正交设计(表 2)。其中,针长的水平 2 又作为水平 4,角度的水平 1 和 2 又分别作为水平 3 和 4。试验结果见表 2。

2.2 方差分析

根据表2进行方差分析,找出对周期传输电荷量有显著影响的因素,筛选显著影响因素的最佳水平组合,方差分析结果见表3。

表2 $L_{16}(4^5)$ 拟水平正交设计表

No.	因素水平					Q_m /nC
	U_p	f	NL	INRA	空白	
1	1	1	1	1	1	95.32
2	1	2	2	2	2	195.50
3	1	3	3	3(1)	3	107.60
4	1	4	4(2)	4(2)	4	96.75
5	2	1	2	3(1)	4	224.70
6	2	2	1	4(2)	3	608.05
7	2	3	4(2)	1	2	383.20
8	2	4	3	2	1	231.70
9	3	1	3	4(2)	2	273.97
10	3	2	4(2)	3(1)	1	1 034.9
11	3	3	1	2	4	502.78
12	3	4	2	1	3	637.00
13	4	1	4(2)	2	3	1 013.35
14	4	2	3	1	4	899.35
15	4	3	2	4(2)	1	755.30
16	4	4	1	3(1)	2	690.20
K_1	494.7	1 607.3	1 896.35	4 072.23		
K_2	1 447.65	2 737.33	4 340.18	3 676.88		
K_3	2 448.65	1 748.88	1 512.58			
K_4	3 358.12	1 655.6				

说明:括号内的数字为拟水平。

表3 方差分析

结果	因素水平				
	U_p	f	NL	INRA	误差
S'	1 150 267	2 159 517	726 127	97 697	104 435.57
f'	3	3	2	1	6
MS	383 422	71 984	36 306	9 769	17 406
F	22.028 3	4.135 6	2.085 9	0.561 3	

说明: K_j 为该因素在 j 水平下试验结果之和; S' 为因素的

离差平方和; f' 为自由度; $MS=S'/f'$;F值为因素的MS与误差项MS的比值。 $(F_{0.01}(3,6)=9.78;F_{0.01}(2,6)=10.92;F_{0.01}(1,6)=13.75;F_{0.1}(3,6)=3.29;F_{0.1}(2,6)=3.46;F_{0.1}(1,6)=3.78)$

3 分析与讨论

3.1 各个因素的影响

根据方差分析结果,电压幅值、频率、针长和角度4个因素的F值分别为22.028 3,4.135 6,2.085 9和0.561 3。F值越大,对周期传输电荷量的影响也越显著。规定: $F>F_{0.01}$ 时该因素影响特别显著; $F_{0.01}>F>F_{0.1}$ 时该因素影响显著。通过与F分布临界值相对比发现,电压幅值 U_p 是影响特别显著的因素,其F值大于 $F_{0.01}$ 临界值。频率 f 的影响显著,其F值大于 $F_{0.1}=3.29$ 。针长与角度对目标因素的影响不显著。两者相比之下,针长的影响更显著。

3.2 最优试验方案组合

筛选因素的水平与目标因素的要求相关,若目标因素越大越好,则应选使目标因素大的水平,即 K_j 中最大的那个水平。本研究的目标因素周期传输电荷量越大,等离子体化学反应效率越高,因此由表3可知,本试验的最优方案为 $U_p=9$ kV, $f=21$ kHz,针长为3.5 mm和2 mm间隔排列,角度为45°的组合(由于针长的水平2与水平4相同,因此用 $K_2/2=4 340.18/2=2 170.09$ 与其他 K_j 值相比)。

尽管本试验结果没有证实针长和角度对周期传输电荷量有显著的影响,但考虑到针长(3.5+2) mm以及相邻针角度45°分别令 $K_2(2 170.09)$ 和 $K_1(4 072.23)$ 有最大值,因此可以认为在本试验条件下该针长和角度的电极结构是最佳试验方案。

3.3 讨论

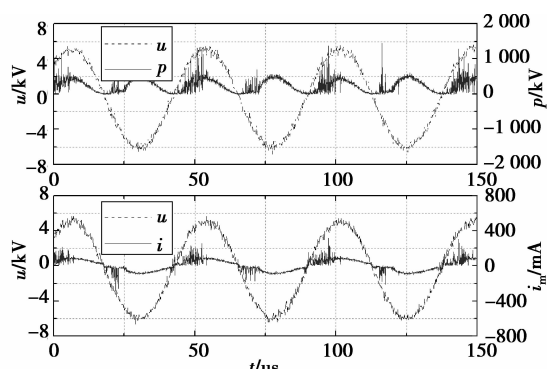
3.3.1 DBD的放电特性

笔者考察了筛选电极结构(长度3.5 mm和2 mm的针以2.5 mm间隔和45°角度阵列)的放电特性。

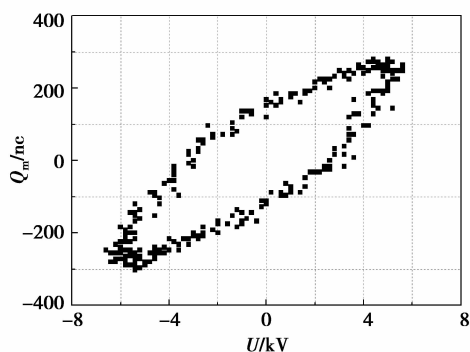
图4和图5给出了筛选电极结构在电源频率21 kHz,电压幅值分别为5.8 kV和8.2 kV时测得的Lissajous图形、电压电流波形和电压功率波形。图4和图5中功率 $p(t)$ 由下式计算:

$$p(t) = u(t) \cdot i_m(t), \quad (6)$$

图4(a)显示,在外加电压的每半个周期内,电流波形出现大量的脉冲。且放电电流呈现极性效应,当电压处于正半周期时,电流脉冲强度、次数都大于负半周期,脉冲持续的时间约为15 μ s。DBD放电电

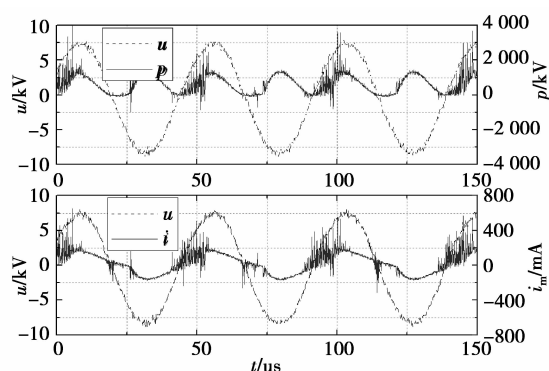


(a) 电压电流波形和电压功率波形

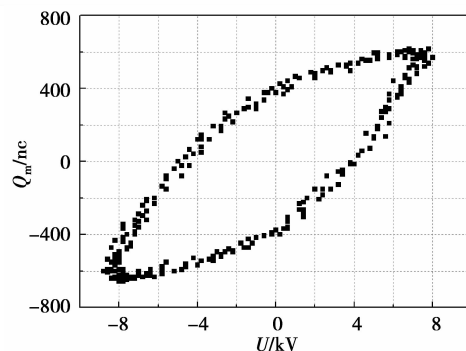


(b) Lissajous图形

图 4 5.8 kV 和 21 kHz 时的放电特性



(a) 电压电流波形和电压功率波形



(b) Lissajous图形

图 5 8.2 kV 和 21 kHz 时测得的放电特性

流波形上的脉冲对应于放电空间的微放电通道,是 DBD 微放电传输电荷量的体现,因此这些电流脉冲的变化规律体现了传输电荷的变化规律。

3.3.2 外加电压幅值的影响

比较图 5(a)与图 4(a)可知,外加电压的增加使得每半个周期内脉冲更加密集且幅值变大。8.2 kV 时由于放电的起始时刻提前,放电持续时间增加比 5.8 kV 时放电持续时间增长 $5 \mu\text{s}$ 。外加电压的增加使放电起始时刻提前可解释为:随外加电压增加,气隙内场强增大,气隙内气体的放电更加强烈,放电空间传输的电荷量增多,因此放电过程中放电通道传输到阻挡介质材料表面的壁电荷数量也增加;当外加电压方向改变后,上半周期阻挡介质表面积聚的表面电荷产生的场强与外加电场方向相同,对放电起促进作用,使得接下来半个周期再次放电时 U_b 降低,对应的放电起始时刻提前^[16],同时传输电荷也增加。

由表 3 可以看出,在本试验中,电压幅值对周期传输电荷量的影响特别显著,电压幅值越高,传输电荷量越多。这主要是因为外加电压的增加使得放电更加强烈,放电空间产生更多的随机分布的放电电流细丝(图 4 和图 5),而且单个微放电通道传输的

电荷数量也有所增大,在宏观上表现为整个放电空间传输的电荷总量增加。

3.3.3 电源频率的影响

方差分析结果表明:在正交试验因素水平取值范围内,最优试验方案为 $U_p = 9 \text{ kV}$, $f = 21 \text{ kHz}$,针长为 3.5 mm 和 2 mm 间隔排列,角度为 45° 的组合。需要注意的是 9 kV 是电压水平的最大值。而方差分析还表明电压幅值越大,周期传输电荷量越大;频率越大,目标因素不一定越大(频率水平为 17、21、25、29 kHz 时的 K_j 分别为 1 607.3、2 737.33、1 748.88 和 1 656.6)。因此,可以认为针长 (3.5+2) mm 和角度 45° 的电极结构与电源频率 21 kHz 的匹配使得 DBD 周期传输电荷量达到最优。为证明该结论,笔者针对筛选电极结构进一步试验。图 6 给出了当电源频率分别为 17、21、25 kHz 时,由式(1)–(5)计算的 DBD 放电功率、介质层等效电容、气隙等效电容和周期传输电荷量随外加电压幅值的变化曲线。

图 6(a)表明,当频率不变, P 随着 U_p 的增大而非线性增大;当 U_p 不变时, P 并不总是会随着电源频率的增大而增长,而是在 21 kHz 有最大值。

但由气体放电理论, DBD 放电功率 P 为^[19]:

$$P = 4C_d U_d f (U_p - \frac{C_d + C_g}{C_d} U_d), \quad (7)$$

式中: U_d 为平均放电电压, 当 DBD 放电作用周期内可以看成是一个常量, 其值近似等于 U_b 。式(7)表明, f 越大, P 越大, 反应器气隙内放电程度与电离程度也越大, 这与图 6(a) 结果似乎不符, 推测是由于串联谐振引起的, 即 DBD 电介质等效电容与高压电源中升压变压器初、次级漏感谐振。实际的 DBD 放电回路可近似为由电阻、电容与电感串联组成的交流电路, 如图 7 所示。该电路的谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_d}}, \quad (8)$$

当电源频率等于谐振频率时, 整个电路等效于串联谐振, 电路呈电阻性, 电路的阻抗最小, 电流最大, 放电功率有最大值。

从图 6(b) 中可以看出, 随着 f 的增大, C_d 先是非线性增加, 然后减小, 且在 $f=21$ kHz 达到最大。DBD 放电中, C_d 可由下式表示:

$$C_d = \frac{S \cdot \epsilon_d}{l_d}, \quad (9)$$

式中: S 为有效放电面积; ϵ_d 为介质层介电常数; l_d 为介质厚度。

当介质层厚度不变时, C_d 的变化主要受 S 和 ϵ_d 的变化影响。当 f 较低时, DBD 内只有局部空间内发生微放电, 因此放电空间形成的阻抗很大。随着频率的增加, 容抗逐渐减小, 感抗逐渐增大, 引起回路总电抗减小且放电电流增加。直至电源频率增加到 f_0 时, 放电回路发生谐振现象(在本实验中, $f=21$ kHz), 电路的阻抗最小, 整个电路呈电阻性, 电流最大, 放电强烈, 放电空间内形成的微放电数量大大增加, 放电有效面积明显增大, 引起 C_d 的迅速增大。当 $f=25$ kHz 时, 随着频率的增加, 引起总电抗增加, 放电电流下降很快, 放电空间内形成的微放电数量明显减少, 放电有效面积减少, 使得 C_d 值减小。

此外, 石英玻璃主要是由硅氧四面体(SiO_4) 通过共有顶角互相连接而构成三维空间网络结构, 它的极化形式主要包括电子位移极化和离子位移极化, 还有少量杂质引起的偶极转向极化。

研究表明温度和频率会影响石英玻璃的介电常数^[21]。放电电流越大, 放电越剧烈, 放电管的温度越高, 将使得 ϵ_d 增加, C_d 也增加。以上因素综合作用使得 C_d 随着 f 的增大有图 6(b) 的变化趋势。

图 6(c) 显示了 C_g 的变化规律。当 $U_p \leq 8.2$ kV

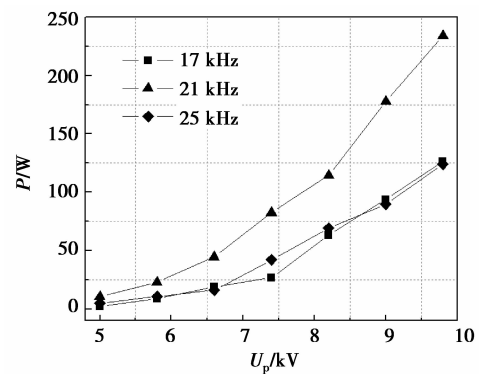
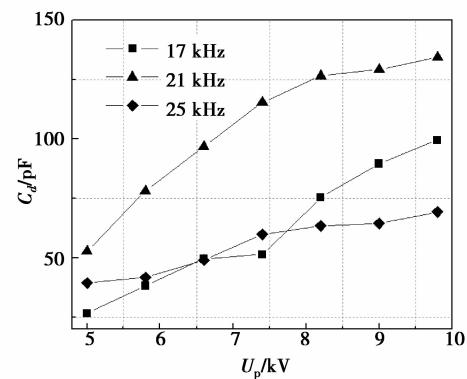
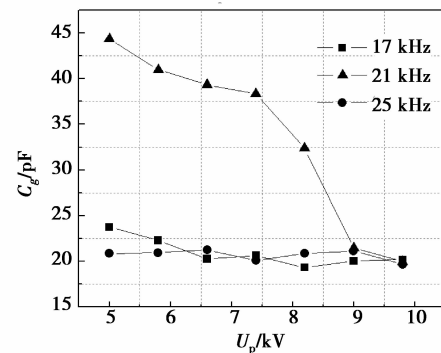
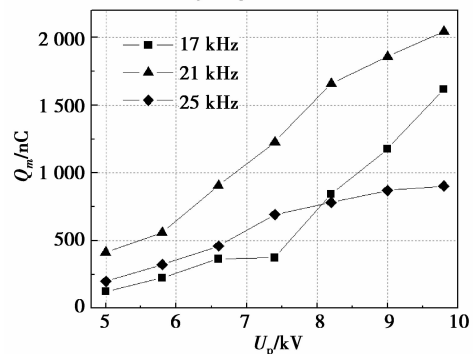
(a) P 随 U_p 的变化曲线(b) C_d 随 U_p 的变化曲线(c) C_g 随 U_p 的变化曲线(d) Q_m 随 U_p 的变化曲线

图 6 放电参数随电压峰值的变化曲线

时, C_g 随 f 的增加先增大再减小; $U_p > 8.2$ kV 时, C_g 逐渐趋于相同。DBD 放电中, C_g 可表示为:

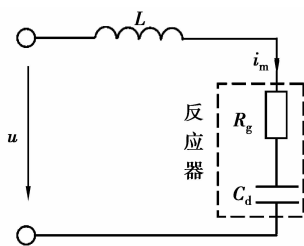


图7 DBD放电等效回路

$$C_g = \frac{S \cdot \epsilon_g}{l_g}, \quad (10)$$

由于气体内的极化属于电子式极化,其相对介电常数 ϵ_g 与 f 的变化无关,但会随温度上升有所减小;同时 S 增加会导致 C_g 增加。它们综合作用使得 C_g 随 f 的增加呈现图 6(c) 的规律。

图 6(d) 表明:当 f 不变,随着 U_p 增加, Q_m 随之非线性增加;当 U_p 不变,随着 f 增加, Q_m 并不总是增加,而是在 21 kHz 时达到最大值。这与正交试验结果吻合。同时注意到 $f=25$ kHz 时,随着 U_p 增大, Q_m 增长幅度比 P 增长幅度小。这是由于当电源频率越接近谐振频率,放电电流越大,电源具有较高的电源效率,放电负载得到较大的功率,使得 Q_m 也越大^[4,22]。由 DBD 放电理论,周期传输电荷量可由式(11)表示,其值与 U_p 、 U_d 、 C_d 和 C_g 有关,它们的变化共同影响 Q_m 。

$$Q_m = 2[C_d(U_p - U_d) - C_g U_d]U_d. \quad (11)$$

从图 6(d) 可以看出,长度 3.5 mm 和 2 mm 的针以 45° 间隔阵列的电极结构在电源频率 21 kHz 时的 DBD 周期传输电荷量,始终大于 17 kHz 和 25 kHz 时的 Q_m 。 U_p 为 9 kV 时,17、21、25 kHz 的 DBD 周期传输电荷量分别为 1 175.4、1 857.3、869.7 nC; U_p 为 9.8 kV 时,17、21、25 kHz 的 DBD 周期传输电荷量分别为 1 618、2 043.5、902 nC。其中,1 857.3 nC 是在正交试验因素水平取值范围内的最大值,证明正交试验筛选的是最优试验方案组合是正确的,表明该电极阵列在一定程度上有助于低温等离子体快速地充满整个反应器。

4 结论

以周期传输电荷量为目标因素,以电源电压幅值、频率、针长度以及纵向相邻针的夹角为正交试验因素,利用正交设计结合 Lissajous 图形法对电极结构和高频电源窗口参数进行了优化,得到了最佳的试验电极阵列和电源参数组合,得到如下结论:

1) 方差分析结果说明电压幅值是影响周期传输

电荷最显著的因素,且电压幅值越大,周期传输电荷量越大;其次为电源频率,而针长和角度的影响不显著。

2) 尽管针长和角度对目标因素影响不显著,仍然可以筛选出最优试验方案组合:长度 3.5 mm 和 2 mm 的针以纵向相邻针角度为 45° 间隔排列的电极结构和 $f=21$ kHz 的匹配;进一步的试验证实该试验方案组合是正确的。

3) 针对正交试验筛选的电极结构进一步试验显示:该多针-同轴电极阵列与电源在 21 kHz 时发生串联谐振;在此频率下,周期传输电荷、介质等效电容和放电功率均最大,说明正交试验的结果是正确的。

因此,在 DBD 的实际应用中,为提高等离子体化学反应效率,可以通过反应器结构和驱动电源的有机配合来控制放电参数,从而达到需要的反应条件。

参考文献:

- [1] 王新新. 介质阻挡放电及其应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(1):1-11.
WANG XIN-XIN. Dielectric barrier discharge and its applications [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1):1-11.
- [2] KOGELESCHATZ U. Dielectric barrier discharge: their history, discharge physics, and industrial application [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1):1-46.
- [3] GEYTERAN D, MORENTA R, VLIERBERGHEB S V, et al. Effect of electrode geometry on the uniformity of plasma-polymerized methyl methacrylate coatings [J]. Progress in Organic Coatings, 2011(70):293-299.
- [4] ZHU T, LI J, JIN Y Q, et al. Synergistic effect of catalyst for oxidation removal of toluene[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009(165):1258-1260.
- [5] HAYASHI K, YASUI H, TANAKA M, et al. Temperature dependence of toluene decomposition behavior in the discharge-catalyst hybrid reactor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5):1553-1558.
- [6] DOU B J, LI J, et al. Volatile organic compounds (VOCs) removal by using dielectric barrier discharge [C]// Bioinformatics and Biomedical Engineering, The 2nd International Conference, 2008:3945-3948.
- [7] 王晓静, 孙才新. 介质阻挡放电去除甲醛的密度泛函分析[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(11):46-52.
WANG XIAO-JING, SUN CAI-XIN. A DFT study on formaldehyde in dielectric barrier discharge[J]. Journal

- of Chongqing University, 2010, 33(11):46-52.
- [8] 代文,陈砾,王红林,等.非平衡等离子体降解两种不同VOCs的研究[J].环境科学与技术,2009,32(1):10-14.
DAI WEN, CHEN LI, WANG HONG-LIN, et al. Degradation of two kinds of VOCs by non-equilibrium plasma[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 32(1):10-14.
- [9] 齐冰,任春生,马腾才,等.多针电晕增强大气压辉光放电稳定性研究[J].物理学报,2006,55(1):331-336.
QI BING, REN CHUN-SHENG, MA TENG-CAI, et al. Stabilization of the multi-pin to multi-sphere plane negative corona discharge[J]. Acta Physica Sinic, 2006, 55(1):331-336.
- [10] DAOU F, VINCENT A, FRANCKE E, et al. Point and multipoint to plane barrier discharge process for removal of NO_x from engine exhaust gases. Understanding of the reactional mechanisms by isotopic labeling[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(2):309-325.
- [11] RONG M Z, LIU D X, WANG D, et al. A new structure optimization method for the interneedle distance of a multineedle-to-plane barrier discharge reactor[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(4):966-972.
- [12] KOICHI T, YUKI H, KANAME A, et al. Influence of electrode configuration on ozone synthesis and microdischarge property in dielectric barrier discharge reactor[J]. Vacuum, 2009, 83:128-132.
- [13] DANG X Q, HUANG J Y, CHEN L, et al. Research on removal of dilute gaseous toluene using dielectric barrier discharge with TiO₂ photocatalyst [C]//Mechanic Automation and Control Engineering, 2010 International Conference, 2010:2026-2031.
- [14] 周波,王晓静,孙才新.电极结构对介质阻挡放电参数的影响研究[J].高压电器,2010,46(4):31-34.
ZHOU BO, WANG XIAO-JING, SUN CAI-XIN. Effect of electrode structure on the parameters of dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(4):31-34.
- [15] GOLUBOVSKII Y B, MAIOROV V A, LI P, et al. Effect of the barrier material in a Townsend barrier discharge in nitrogen at atmospheric pressure [J]. Applied Physics, 2006, 39(8):1574-1583.
- [16] MARQUESA R, COSTAB S D, COSTA P D. Plasma-assisted catalytic oxidation of methane: on the influence of plasma energy deposition and feed composition [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2008, 82(1/2):50-57.
- [17] MA H, QIN Y. A study of ozone synthesis in coaxial cylinder pulse streamer corona discharge reactors [J]. Ozone Science and Technology, 2003, 25(1):127-135.
- [18] KUROKI T, HIRAI K, KAWABATA R, et al. Decomposition of adsorbed xylene on adsorbents using non-thermal plasma with gas circulation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(2):672-679.
- [19] 徐学基,诸定昌.气体放电物理[M].上海:复旦大学出版社,1996.
- [20] 赵选民.试验设计方法[M].北京:科学出版社,2006.
- [21] 王仪财,吴孟强,许峰云,等.石英玻璃的高温介电特性研究[J].四川大学学报:自然科学版,2005,42(2):387-392.
WANG YI-CAI, WU MENG-QIANG, XU FENG-YUN, et al. The dielectric properties of quartz glass at high temperature [J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2005, 42(2):387-392.
- [22] 唐雄民,孟志强,彭永进,等.串联负载谐振式DBD型臭氧发生器电源的基波分析法[J].中国电机工程学报,2007,27(21):38-42.
TANG XIONG-MIN, MENG ZHI-QIANG, PENG YONG-JIN, et al. A fundamental wave method of dielectric-barrier discharge type ozonier powered by serial load resonant inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21):38-42.

(编辑 王维朗)