

介质阻挡放电影响因素分析

罗毅, 方志, 邱毓昌, 王辉

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Analysis of Influencing Factors on Dielectric Barrier Discharge

LUO Yi, FANG Zhi, QIU Yu-chang, WANG Hui

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 对影响介质阻挡放电的因素加以研究,可以在实际应用中优化反应器设计,提高放电效率。通过在实验室建立的放电装置研究了外加电压幅值、气体间隙距离及作为阻挡层的介质材料性质对介质阻挡放电的影响。对试验结果的分析,为获得较大功率的介质阻挡放电提供了实验基础。

关键词: 介质阻挡放电; 功率; 影响因素

中图分类号: O434.2

文献标识码: A

Abstract: The laboratory study on the factors that influence DBD has made it possible to optimize the design of discharge reactors in practical use and to improve the efficiency of electric discharge. With the discharge setup used in the present paper, the influence of factors, e.g. the amplitude of applied voltages, the gap spacing, and the dielectric material, on DBD has been studied. The experimental results obtained are analyzed, which is helpful to provide experimental basis for more powerful DBD.

Key words: dielectric barrier discharge(DBD); power; influence factors

1 引言

介质阻挡放电(DBD)又称无声放电,是一种有绝缘介质插入放电空间的气体放电形式。这种放电形式能够在常压下产生具有较高能量的非平衡等离子体,因此具有十分广阔的工业应用前景,目前在臭氧合成、光源照明、材料表面改性等方面都获得了广泛应用^[1,2]。如何选择合适的放电条件,从而提高放电的效率,是当前工业应用和研究中普遍关心的问题^[3],因此必须对影响介质阻挡放电的因素加以研究。影响介质阻挡放电的因素有很多,如外加电压幅值、阻挡介质材料性质、间隙距离、电极形式、放电气体种类等。笔者研究了外加电压幅值、间隙距离以及阻挡介质材料性质等因素对介质阻挡放电的影响,

在不同的条件下进行了放电试验,给出了试验结果并加以分析。

2 实验研究

2.1 试验装置

实验室建立的放电装置见图1,试验在敞开的环境下进行,试验时的温度为18℃,气压为96kPa,采用的电极为直径25mm的黄铜平板电极,上下电极表面均覆盖有75mm×75mm平板介质,气隙宽度可在1~4mm的范围内调节,电源由50Hz工频变压器产生,其最大输出电压为50kV。电阻 R_1 (60kΩ)和 R_2 (200Ω)构成分压比为300的分压器,用于测量加在电极两端的电压。在放电回路分别串有 $r=100\Omega$ 的采样电阻和 $C=47\mu\text{F}$ 的采样电容,用于测量放电电流和放电电荷,试验时的电压、电流波形及李萨育图形由TDS220示波器记录,放电图像用置于放电空间侧面的照相机拍摄得到。

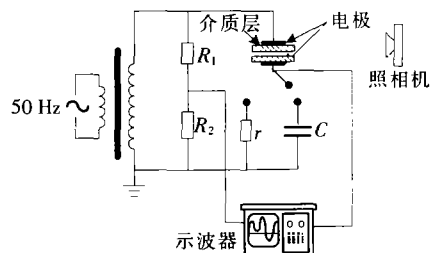


图1 介质阻挡放电试验装置

2.2 放电过程及电气参数

在电极两端施加交流电压,当气隙中的场强达到气体的击穿场强时,气体被电离,产生的电荷在外加电场的作用下迁移到介质表面并在那里积聚下来,积聚电荷产生了一个与外加电场方向相反的附加电场,随着电荷积聚量的增加,附加电场的作用随之增强,气隙中总的电场强度下降,当气隙中的场强无法维持放电时放电会熄灭,外加电压继续升高,气

隙场强增大,放电重新开始。图2是介质阻挡放电的等效电路,电荷积聚的过程相当于对介质等效电容 C_d 充电,气隙等效电容 C_g 两端电压下降,放电熄灭,接着电压上升,气隙会再度放电,因此介质阻挡放电是一个放电、熄灭、重新放电的暂态过程。放电间隙中观察到大量时间和空间随机分布的放电细丝,每一个放电细丝在介质阻挡放电的电流波形上都对应一个电流脉冲,所以在介质阻挡放电的电流波形每个周期内都包含了大量的电流脉冲。图3是间隙距离2 mm,阻挡介质为环氧时拍摄到的放电图像,在图中可以看到贯穿放电空间的放电细丝。图4为示波器上对应的电压与电流波形,在每个电流周期都有大量的电流脉冲。

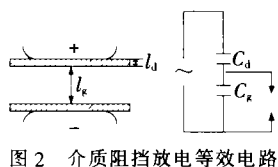


图2 介质阻挡放电等效电路



图3 介质阻挡放电图像(间隙距离2 mm,阻挡介质为环氧)

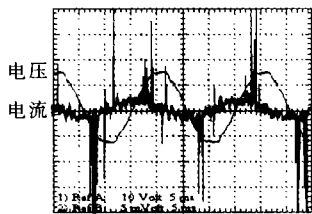


图4 对应图3的介质阻挡放电电压与电流波形

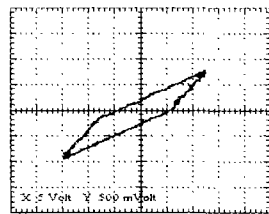


图5 对应图3的介质阻挡放电电压-电荷李萨育图形

放电功率是描述放电强弱的一个重要物理量,测量放电功率的方法较多,目前普遍采用电压-电荷轨迹法(即李萨育图法)来测量介质阻挡放电功率,该方法通过在示波器上得到的电压-电荷李萨育图形来计算放电的功率,见图5。放电功率 P 可由下式表示:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T UI dt = \frac{C}{T} \int_0^T U \frac{dU_C}{dt} dt = fC \oint U dU_C = fCS$$

其中: S 为图5中平行四边形的面积, U_C 为电容 C 两端电压。

3 实验结果

3.1 外加电压幅值的影响

保持间隙距离为1 mm,在不同的外加电压下测量介质阻挡放电功率。图6为阻挡介质为0.8 mm的环氧和0.8 mm聚四氟乙烯时外加电压与放电功率的关系曲线,可以看出,相同的外加电压下,阻挡介质为环氧时放电功率要远大于阻挡介质为聚四氟乙烯时的情况。外加电压为7 kV,环氧作为阻挡介质时放电功率为9.75 W;聚四氟乙烯作为阻挡介质时放电功率为1.55 W,这是因为环氧的介电常数 ϵ_r 比聚四氟乙烯的大,所以在前一情况下气隙中的场强高于后一情况。对于同一种介质,随着外加电压的升

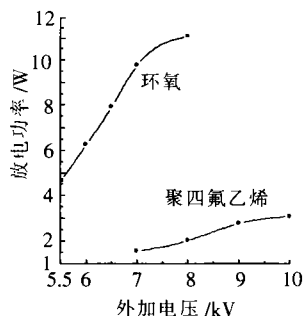


图6 放电功率随外加电压的变化曲线

高,放电功率线性增大,当电压升高到一定程度时,放电功率会趋于饱和。在图6中,环氧作为阻挡介质,外加电压大于7 kV时,以及聚四氟乙烯作为阻挡介质,外加电压大于9 kV时,放电功率都有一个饱和的趋势。

3.2 间隙距离的影响

采用0.8 mm厚的聚四氟乙烯作为阻挡介质,在间隙距离及外加电压不同的情况下测量介质阻挡放电功率,图7是不同外加电压下,放电功率与间隙距离的关系曲线。可以看出,间隙距离相同时,放电功率随着外加电压的升高而增大。同一间隙距离下,外加电压为10 kV时放电功率最大,外加电压为8 kV时次之,外加电压为6 kV时放电功率最小。外加电压一定,放电功率随间隙距离的增加而减小,这是因为气隙中的场强减小的缘故。但是这种变化是非线性的,间隙距离小于2 mm时,放电功率随间隙距离增加而减小的幅度较小,间隙距离大于2 mm时,放电功率减小的幅度加大,外加电压为8 kV,间隙距离由1 mm增加到2 mm,放电功率由9.53 W下降到8.43 W,减小了11.5%;同样的外加电压下,间隙距离由3 mm增加到4 mm,放电功率由5.32 W下降到了2.71 W,减小了49.1%。

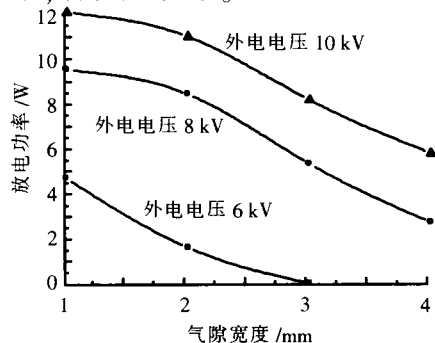


图7 间隙距离对放电功率的影响曲线

3.3 材料性质的影响

保持外加电压幅值为8 kV,气隙宽度为2 mm,改变介质材料的性质,材料的选择见表1。图8是两种不同介质作为阻挡层时,放电功率与材料厚度的关系。可以看出,相同外加电压时,相同厚度的环氧作为介质阻挡层,放电功率要大于阻挡介质为聚四氟乙

表1 试验中阻挡层材料的介电常数和尺寸

材料	相对介电常数	厚度/mm	面积/(mm×mm)
环氧	3.9	0.3,0.5,1.0,2.0	75×75
聚四氟乙烯	2.3	0.3,0.5,1.0,2.0	75×75

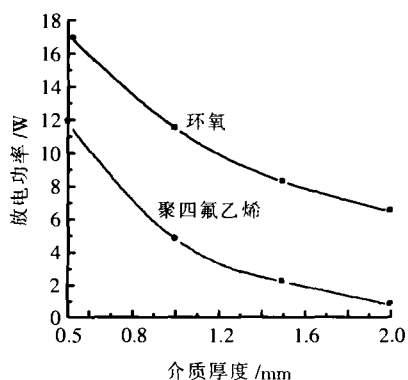


图8 介质阻挡放电介质厚度-功率图

时的情况。对于同一种材料,无论是环氧还是聚四氟乙烯,放电功率都随介质厚度的增加而减小,这是因为介质厚度增加时,气隙中场强减小。

4 讨论

在图2所示的介质阻挡放电等效电路中,介质等效电容 C_d 是一个与介质的介电常数 ϵ_r 和介质厚度 l_d 有关的量,即 $C_d \propto \frac{\epsilon_r}{l_d}$ 。气隙的等效电容 C_g 则与气隙宽度 l_g 有关, l_g 越大, C_g 越小。此时放电功率 P 为^[4]:

$$P=fS=4fC_d \frac{C_g}{C_d+C_g} U_{\min}(U_p-U_{\min}) \quad (1)$$

式中: f 为外加电压频率,在试验中为50 Hz, U_p 为外加电压的幅值, U_{\min} 为维持放电的最小电压,大小与放电起始电压基本相等。

当介质材料和间隙距离一定时, C_d 、 C_g 以及 U_{\min} 均为定值,式(1)中放电功率 P 仅和外加电压 U_p 有关,放电功率随着外加电压的升高线性增大,见图6。另一方面,当电压升高至一定程度时,环氧作为阻挡介质,外加电压为7 kV时;聚四氟乙烯作为阻挡介质,外加电压为9 kV时;在介质表面会出现沿面放电,消耗了一部分功率,实际测量结果会小于式(1)的计算结果,如3.1所述,放电功率趋于饱和。

在式(1)中, U_{\min} 和 C_g 都是与放电间隙距离有关的量。放电的起始电压值和气隙等效电容量随间隙距离的变化是非线性的。首先由巴申定律^[5]可知,在气压为96 kPa,间隙距离大于0.5 mm时,随着间隙距离的增加,放电场强会随着间隙距离的增加而提高,这里选取的气隙范围满足上述条件,因此随着间隙距离的增加放电起始电压也会提高;其次间隙距离的变化

也会影响气隙的等效电容。根据以上两点,在外加电压 U_p 和介质等效电容 C_d 一定时,放电功率可以写成以气隙宽度为自变量的函数 $P=f(l_g)$,这一函数是非线性单调递减的,因此放电功率会随着气隙宽度的增加而减小。这与图7所示的结果是一致的。

在外加电压、气隙宽度都相同的情况下,介质材料的相对介电常数越高,或介质厚度越小,介质等效电容越大,则放电功率越大。因此,对于不同的介质材料,相对介电常数越大,放电功率也越大。由于环氧的介电常数比聚四氟乙烯大,外加电压、气隙、介质厚度相同的情况下,采用环氧作为阻挡介质时,放电功率要大于采用聚四氟乙烯时。同一种介质,厚度越大,放电功率越小,图8的结果也是如此。

5 结论

(1)介质材料、放电间隙距离一定时,外加电压越高,放电越剧烈,放电功率随外加电压的升高在一定范围内线性增大。

(2)介质材料和外加电压一定时,放电功率随间隙距离的变化是非线性的,间隙距离越大,放电功率越小。

(3)外加电压幅值相同,间隙距离一定时,介质阻挡层介电常数越大,放电功率越大。同一种介质材料的厚度越大,放电功率越小。

(4)为了获得较为强烈的介质阻挡放电,试验装置应选用介电常数较大,厚度较薄的材料作为阻挡层,采用间隙距离较小的气隙,同时尽可能提高工作电压。

参考文献:

- [1] J R Roth, et al. Treatment of Metals, Polymer Films, and Fabrics with a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (OAugDP) for Increased Surface Energy and Directional Etching [J]. Acta Metallurgica Sinica (English letters), 2001, 14(6): 391-407.
- [2] N Dumitrascu. Roughness Modification of Surface Treated by a Pulsed Dielectric Barrier Discharge [J]. IOPP: Plasma Sources Science and Technology, 2002(11): 127-134.
- [3] M Abdel-salam. Characteristics of Corona and Silent Discharge as Influenced by Geometry of Discharge Reactor[J]. J Phys D: Appl. Phys, 2003, 36: 252-260.
- [4] 刘钟阳, 吴彦, 王宁会. DBD中型中高频臭氧发生器的动态负载特性[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 61-65.
- [5] 邱毓昌, 张文元, 施围. 高电压工程 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.

作者简介: 罗毅(1979-),男,硕士生,从事气体放电的应用研究。电话:029-82668626。