

文章编号:1001-1609(2006)01-0025-03

不同电极结构下介质阻挡放电的特性研究

王 辉¹, 孙岩洲², 方 志¹, 曾正中¹, 邱毓昌¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 河南理工大学电气工程学院, 河南 焦作 454100)

Study on the Characteristics of Dielectric Barrier Discharge of Different Electrode Configuration

WANG Hui¹, SUN Yan-zhou², FANG Zhi¹, ZENG Zheng-zhong¹, QIU Yu-chang¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Electrical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454100, China)

摘要: 研究了平板-平板电极、多针-平板电极和筛网电极3种电极结构 DBD 的放电特性,通过测量电压-电流波形图及放电发光图比较了它们的区别,并从放电机理角度对实验结果作了解释。结果表明:平板-平板电极 DBD 表现为稳定的细丝状放电。而多针-平板电极 DBD 融合针尖的电晕效应,使得放电空间中呈现扩散圆锥形放电。筛网电极 DBD 可以实现大气压辉光放电(APGD),放电更加均匀,放电空间内看不到放电细丝的存在。

关键词: 介质阻挡放电; 大气压辉光放电; 电子崩
中图分类号: TM213 O461 **文献标识码:** A

Abstract: The dielectric barrier discharge characteristics of three electrode configurations, plate-plate, multineedle-plate and mesh, are studied and compared and distinguished by means of measured voltage-current oscillograms and discharge photos. Based on discharge mechanism, the experiment results are analyzed. Results show that: the plate-plate DBD displays filamentary discharge mode and the the multineedle-plate DBD displays diffuse conical mode and the mesh electrodes DBD expresses homogeneous discharge mode without filament, which can be used to obtain atmospheric pressure glow discharge .

Key words: dielectric barrier discharge(DBD);
atmospheric pressure glow discharge(APGD);
electron avalanche

1 引言

介质阻挡放电(简称 DBD)能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,相对于当前工业生产中广泛应用的低气压放电具有十分广阔的应用前景,近年来受到国内外研究人员的广泛重视。目前,DBD 在臭氧合成、CO₂ 激光器、紫外光源、材料表面改性和废气处理等方面均获

得了广泛的应用^[1-3]。DBD 是指绝缘介质插入放电空间的一种气体放电形式,其放电电极可采用不同的结构。采用的电极结构不同,DBD 所表现出的放电特性也不同,在一些电极结构下,甚至可以表现为均匀、稳定的无细丝出现的放电形式,称为大气压辉光放电 (APGD)^[4]。研究和比较不同电极结构 DBD 的放电特性,对于优化 DBD 等离子体反应器设计和扩大其应用范围具有十分重要的意义。还研究了平板-平板电极、多针-平板电极和筛网电极3种电极结构 DBD 的放电特性,比较了它们的电压-电流波形图及放电发光图的区别,并从放电机理上分析了放电特性不同的原因。

2 实验装置及测量方法

笔者采用的实验装置及其电气接线见图1。电源由 50 Hz 工频变压器产生,其最大输出电压为 50 kV。实验中采用的记录仪器是 TDS3052 示波器。实验是在实验室敞开的空气环境下进行的,实验时的温度为室温(18℃),气压为 95 kPa。电极布置:平板-平板电极的上、下电极均为直径 25 mm 的圆形黄铜平板电极,介质覆盖在上、下电极表面;多针-平板电极的多针电极面积为 20 mm×20 mm,8×8 个不锈钢针均匀地分布其上,针与针之间的距离为 2.5 mm,针尖直径

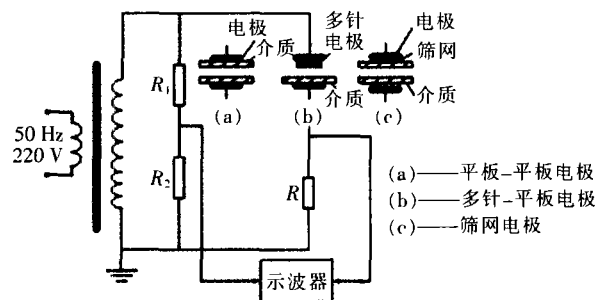


图1 试验装置及电气接线图

收稿日期:2005-08-28; 修回日期:2005-10-09

作者简介:王 辉(1980-),男,硕士生,从事气体放电等方面的研究。

约为 0.05 mm。下电极用直径为 25 mm 的圆形黄铜平板电极,介质覆盖在下电极表面;筛网电极的电极尺寸与平板-平板电极尺寸相同,只是分别在介质与电极之间加一层 325 号(网孔宽度 0.04 mm),厚为 0.08 mm 的细铁丝筛网。3 种电极采用的阻挡介质均为驻极体材料聚四氟乙烯(PTFE)。

放电电压的波形由分压器测得,其高压臂电阻 R_1 为 60 M Ω , 低压臂电阻 R_2 为 200 k Ω , 分压比为 300。放电电流由一个串接在放电回路中的 R 为 100 Ω 的无感电阻测得,由于选取电阻的阻值较小,故不会对放电产生影响。电压波形由示波器的 Ch₁ 通道输入,电流或电荷波形由 Ch₂ 通道输入。

3 放电特性比较

3.1 电气特性的比较

图 2 给出了平板-平板 DBD 的电压电流波形。试验条件为:气隙距离 3 mm,厚度 1 mm 的 PTFE 介质,电源电压 10 kV。由图 2 可以看出,平板-平板 DBD 的电流波形表现为对称分布在电压正负半周期内的许多细丝状的脉冲。当电压达到起始放电电压(7 kV)时出现丝状的脉冲放电,电压达到峰值时放电结束,半个电压周期内放电持续的时间约为 4 ms,在下半个电压周期内气隙会再度放电。这些电流脉冲与放电空间内的放电细丝是相对应的。

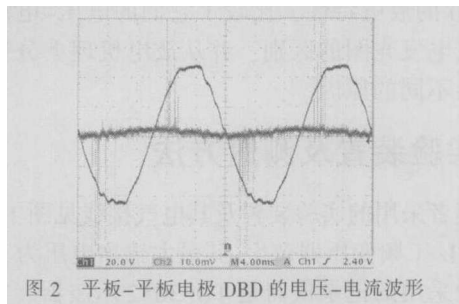


图 2 平板-平板电极 DBD 的电压-电流波形

图 3 给出了多针-平板电极 DBD 的电压-电流波形图。试验条件为:气隙距离 3 mm,厚度为 1 mm PTFE 介质,电源电压 10 kV。由图 3 可以看出,多针-平板电极 DBD 的电流波形也表现为许多细丝状的脉冲,但在电压的正负半周表现出不对称性。放电电流脉冲在电压的正半周期幅值较大,但比较稀疏。而在电压的负半周期放电电流脉冲密集,幅值长短不一,且幅值均低于正半周期。其特征表现为 DBD 和电晕放电相叠加的效果。起始放电电压要远低于平板-平板 DBD 的放电起始电压,当电压达到峰值后仍会出现一些较小的放电脉冲,在半个电压周期内放电持续时间约为 7 ms。

图 4 给出了筛网电极 DBD 的电压-电流波形图。试验条件为:气隙距离 3 mm,厚度 1 mm 的 PTFE 介质,电源电压 9 kV。由图 4 可以看出,筛网

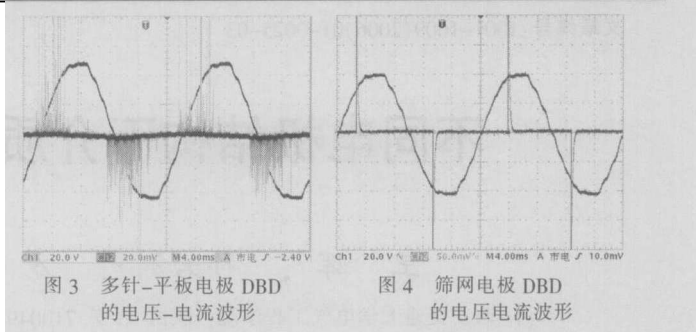


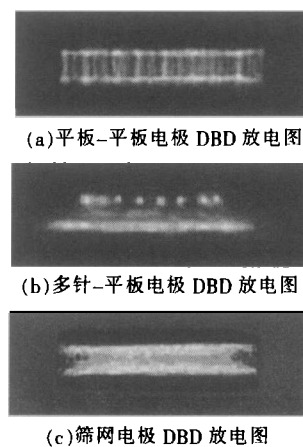
图 3 多针-平板电极 DBD 的电压-电流波形

图 4 筛网电极 DBD 的电压-电流波形

电极 DBD 的电流波形为单脉冲形式,对称地出现在外加电压的正负半周内,不同于平板-平板 DBD 和多针-平板 DBD 中每半个周期所出现的许多微小的放电电流脉冲形式。电流在每半个电压周期内的短时单脉冲特性是极板上电荷突然迸发的反映,这表明筛网电极 DBD 在电压的每半个周期内只发生 1 次均匀的击穿。筛网电极 DBD 所表现出的电压-电流波形图,被作为区分 APGD 与 DBD 的重要特征之一^[4-5],即用驻极体介质作为阻挡层的筛网电极 DBD 可以实现 APGD。

3.2 发光特性的比较

图 5 给出了用 CCD 相机拍摄的 3 种不同电极结构下放电的发光图(曝光时间为 0.5 ms)。平板-平板电极 DBD 的发光图片表现为放电空间内均匀地分布着许多细丝状的发光通道,见图 5(a),在暗室中可以看到放电空间内是随机出现的一些明亮的、跳动的细丝;多针-平板电极 DBD 的发光图片表现为每个针尖下均为一个圆锥形发光体,不同针尖下的圆锥形发光体相互融合扩散在介质表面形成一条明亮的发光层,见图 5(b)。在暗室中可以看到,放电空间内每个针尖下均为一稳定的圆锥形粒子束,细丝均匀地分布在放电体内,在介质表面附近不同针尖下的圆锥形放电体相互融合、叠加,使得用肉眼很难分辨出放电细丝的出现;筛网电极 APGD 的发光图片表现为均匀地贯穿放电空间的发光带,并且看不到细丝状的发光通道,见图 5(c)。在暗室中可以



(a) 平板-平板电极 DBD 放电图

(b) 多针-平板电极 DBD 放电图

(c) 筛网电极 DBD 放电图

图 5 不同电极结构 DBD 的放电图

观察到放电均匀地充满放电空间并发出柔和的光,分辨不出放电细丝的存在。

4 放电机理分析

平板-平板电极 DBD 可以用流注理论加以解释:在大气压下,气压 p 和放电间隙距离 d 的乘积很大,电子在外加电场的作用下与气体分子频繁碰撞,电子雪崩的发展速度很快,并向阳极快速移动。当电子雪崩发展到一定程度后,电子雪崩中的空间电荷足以使外加电场畸变,促进了二次电子崩的形成。二次电子崩和主电子崩汇合,最后产生一个贯穿放电空间的高电导率的丝状放电通道。因此在大气压下,平板-平板电极 DBD 一般表现为丝状的流注放电形式^[6]。由于介质的存在,空间电荷在介质上积聚,产生了一个与外加电场相反的电场。随着介质上集聚电荷的增加,附加电场的作用也在增强,气隙中总的电场强度就会下降,当气隙内场强下降到小于气体的击穿场强时,放电中断。因为 DBD 采用的是交流电源,所以放电中断后在电源的下半个周期还会再次出现。因此,平板-平板电极 DBD 的电流波形表现为对称的交替出现在电压正负半周期的许多脉冲。

多针-平板 DBD 属于非均匀电场放电,其放电特性从机理上分析如下:电压的正半周期(针电极为正极性),放电时电子崩中的电子迅速进入针电极,而正离子则因其向阳极运动速度较慢而暂留在针电极附近。这些正空间电荷削弱了针电极附近的场强,而加强了电荷外部空间的电场。因此空间电荷的作用抑制了针电极附近的流注形成,但已被电荷外部空间的电场,一旦形成流注将会很剧烈。在电压的负半周期(针电极为负极性)情况下放电时,电子崩先出现在针电极附近。电子崩中的电子迅速扩散并向阴极运动,从而聚集在介质上。而正离子则缓慢地向针电极移动,因而在针电极附近的正空间电荷的浓度很大。与正极性放电不同,这些正空间电荷加强了针电极附近的场强而削弱了正空间电荷的外部空间场强。这种情况下空间电荷使针电极附近容易形成流注,产生电晕,但此后流注就很难向前发展。同样,由于介质的存在,空间电荷在介质上积聚,产生了一个与外加电场相反的电场。随着介质上集聚电荷的增加,附加电场的作用也在增强,气隙中总的电场强度就会下降,当气隙内场强下降到小于气体的击穿场强时,放电中断,即阻止放电发展到电弧阶段。多针-平板 DBD 既有 DBD 的特点,又具有针-板电极电晕放电的特点^[7]。

国际上对筛网电极放电产生 APGD 方法的研究仍处在实验探索阶段。一种比较合理的假设是:聚合物驻极体材料经过筛网电极充电使得介质表面在间隙击穿前积聚大量均匀分布的电荷。驻极体材料经

过电晕放电充电后能携带电荷已得到证实。在电极布置中,筛网电极直接和驻极体阻挡介质的背面相接触,同平板电极相比,其网线交点电场不均匀,使得在外加电压作用下该处的电场要略高于其它地方,在气隙击穿前先发生电晕放电,对介质电容充电。当外加电压达到气隙击穿电压时,驻极体阻挡介质表面积聚的电荷作为放电空间电荷的传输源,从介质表面突然释放,在放电空间中引发 APGD。瞬间释放的大量空间电荷在电场下运动,最后又聚集在介质表面产生了一个与外加电场方向相反的附加电场,使放电熄灭。因此筛网电极 APGD 在电压的半个周期内表现为短暂的单脉冲形式。驻极体材料阻挡介质除了具有阻止放电电流密度的自由增长、使放电熄灭的作用外,其表面还会聚集一定的电荷,对下半个周期的放电发生有促进作用。

5 结语

笔者研究了不同电极结构大气压下空气中 DBD 的放电特性,从放电电压-电流波形图和放电发光图上比较了它们的差异。可以看出,平板-平板电极 DBD 为细丝状放电,放电空间内表现为许多明亮的、跳动的细丝放电通道;而多针-平板电极 DBD 融合针尖的电晕效应,使得放电空间呈现扩散圆锥形放电通道,在介质表面不同针尖下的放电通道相互融合、叠加,使得放电细丝更加模糊;筛网电极 DBD 可以实现 APGD,放电更加均匀,放电空间内看不到细丝的存在。还从放电机理的角度对实验结果做了解释。

参考文献:

- [1] Kogelschatz U. Dielectric-barrier Discharge: their History, Discharge Physics, and Industrial Application [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 1-46.
- [2] Ma H, Qiu Y. A Study of Ozone Synthesis in Coaxial Cylinder Pulse Streamer Corona Discharge Reactors [J]. Ozone Science and Technology, 2003, 25(1): 127-135.
- [3] 孙岩洲, 石兴民, 王 辉. 介质阻挡放电电晕灭枯草杆菌芽孢的电镜观察[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 10-11.
- [4] 方 志. 大气压辉光放电及其在材料表面改性中的应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [5] Okazaki S, Kogoma M, Uehara M, et al. Appearance of Stable Glow Discharge in Air, Argon, Oxygen and Nitrogen at Atmospheric Pressure Using 50 Hz Source [J]. J. Phys D: Appl. Physics, 1993(26): 889-892.
- [6] 邱毓昌, 张文元, 施 围. 高电压工程 [M]. 西安: 西安交通大学出版, 1995.
- [7] 王 辉, 方 志, 邱毓昌. 多针-平板电极介电阻挡放电特性研究[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 321-323.