

单针-板电极电晕-介质阻挡放电特性研究

何贤俊¹, 周志鹏¹, 倪卫洁¹, 俞希², 夏维东¹

(1. 中国科学技术大学热科学与能源工程系, 安徽合肥 230027; 2. 上海电力学院电力工程及其自动化专业, 上海 200090)

摘要: 研究以玻璃纤维为填充介质的单针-板电极的电晕-介质阻挡放电特性, 测量了放电电压、电流波形, 计算了放电功率, 比较了有、无玻璃纤维填充时放电电流的差别及放电功率随放电间隙距离、电容电流、放电电压的变化关系, 分析了填充介质对针-板电极的电晕-介质阻挡放电特性的影响. 研究表明: 大气压条件下纯空气间隙与有玻璃纤维介质填充时的针-板电极的电晕-介质阻挡放电相比: ① 后者的放电的起始电压更低, 放电功率更大; ② 后者连续放电电流显著减小, 而放电脉冲数量和脉冲电流幅值显著增加; ③ 后者负电晕放电有非常明显的放电脉冲, 而前者则主要表现为连续的放电电流.

关键词: 电晕-介质阻挡放电; 单针-平板电极; 填充介质; 放电电流

中图分类号: O461 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2010.04.007

Researches on discharge characteristics of needle-to-plate CDBD

HE Xianjun¹, ZHOU Zhipeng¹, NI Weijie¹, YU Xi², XIA Weidong¹

(1. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Electric Power Engineering and Its Automation, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The characteristics of single needle-to-plane corona-dielectric barrier discharge (needle-to-plate CDBD) with glass fiber as packing dielectric were investigated. Discharge voltage and current waveforms were measured and the discharge power was calculated. The discharge currents with and without glass fiber filled between electrodes were compared, and the relationships between discharge power and gas gap distance, capacitive current, discharge voltage were analyzed. The influence of glass fiber as packing dielectric on the characteristics of single needle-to-plane corona-dielectric barrier discharge were studied experimentally. Comparing the corona-dielectric discharges observed in air and in a medium filled with glass fiber as packing dielectric, it was found that: ① the latter has less onset discharge voltage and greater discharge power; ② continuous discharge current of the latter decreases obviously while discharge pulse number and their current amplitude increase significantly; ③ unlike the more continuous currents in the former, there is more pulse discharge during negative voltage on the needle electrode in the latter.

Key words: corona-dielectric barrier discharge; single needle-to-plane electrode; packing dielectric; discharge current

收稿日期: 2009-04-01; 修回日期: 2009-05-15

基金项目: 中国高技术研究发展(863)计划(2007AA05Z105), 国家自然科学基金(NSFC50876101)资助. reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 何贤俊, 男, 1982年生, 硕士生. 研究方向: 低温等离子体应用. E-mail: hejx@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 夏维东, 博士/教授. E-mail: xiawd@ustc.edu.cn

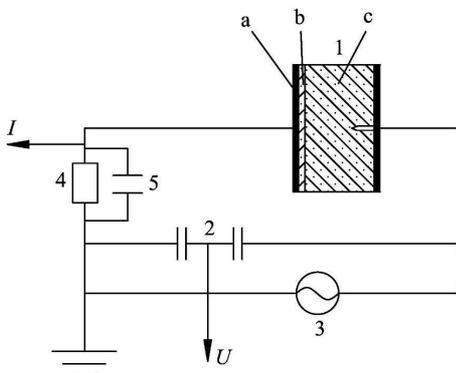
0 引言

常压低温等离子体在臭氧产生、材料处理、VOC (volatile organic compounds, 挥发性有机化合物) 气体处理等方面有着广泛的应用^[1-3], 介质阻挡放电和电晕放电是产生低温等离子体的两种有效手段. 介质阻挡放电 (DBD) 在常压下能产生大量高能活性粒子促进化学反应的进行^[4-7], 电子密度大, 但是起始放电电压较高, 或者放电空间小; 电晕放电空间大^[8-10]、放电电压低, 但放电功率小、产生的电子密度低. 如果将合适的电晕放电与 DBD 结合起来, 在电晕放电空间内插入绝缘介质而形成电晕-介质阻挡放电^[11], 可降低起始放电电压、提高电子浓度, 增加放电空间, 有更大的应用意义.

为了提高等离子体诱发化学反应的效率, 在电晕-介质阻挡放电的等离子体放电区域内填充催化剂^[12]. 当催化剂为绝缘介质时, 由于介电常数的改变和介质对电荷的捕获作用等因素, 会引起放电特性的显著变化. 本文研究了在单针-板电极放电空间填充玻璃纤维时电晕-介质阻挡放电的放电特性.

1 实验装置

实验装置及电气接线如图 1 所示. 电极为单针-板状结构, 针尖曲率半径为 0.2 mm, 针尖电极端部至板电极的距离为 8~14 mm, 平板电极为黄铜, 在板电极上覆盖厚度为 3 mm 的玻璃介质; 从针尖到玻璃介质填充玻璃纤维介质, 该介质是蓬松的, 透气性很好, 在针尖到玻璃介质表面能够形成气体通道;



1 针板电极放电装置 (a 为铜板接地电极, b 为玻璃介质, c 为玻璃纤维)

2 电容分压器, 1000 : 1 3 CTP-2000K 高频交流电源

4 取样电阻 50 Ω 5 滤波电容 $c=1\ 000\ \mu\text{F}$

图 1 实验装置及电气接线图

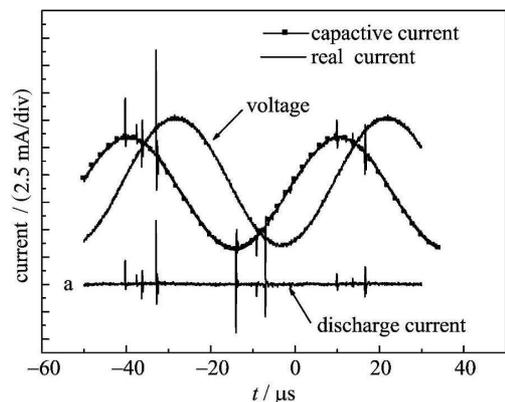
Fig. 1 Schematic of the experimental setup

针尖电极接电源高压端, 平板电极接地. 电源采用南京苏曼电子有限公司生产的 CTP-2000K 低温等离子体实验电源, 最高电压为 30 kV, 频率范围为 10~30 kHz, 使用 Tektronix TDS2014 带宽为 100 MHz 数字示波器采集电流和电压波形, 进入计算机后做进一步处理. 实验是在敞开的空气环境下进行的.

2 实验结果及讨论

2.1 放电电流波形分析

图 2 为典型的单针-板电极电晕-介质阻挡放电的电压、电流波形. 比较电流与电压波形的相位可知, 电流中的容性电流分量占主要成分. 为了更方便地分析放电电流分量, 需分离出容性电流和放电电流. 以测量电压为参考相位, 计算所得容性电流分量 (图 2 中标记 ■ 的连线) 与总电流的基波基本吻合. 因此, 可以忽略电容的非线性的影响^[13-14]. 将容性电流从总电流去除后的放电电流波形见图 2 中曲线 a.



peak voltage 10.0 kV, $d=10\ \text{mm}$, with GF (glass fiber)

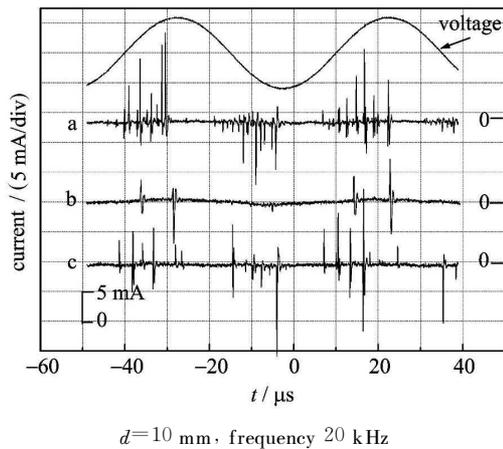
图 2 典型单针-板电极电晕-介质阻挡放电的电压电流波形

Fig. 2 Voltage and current waveforms of single needle-to-plate corona-dielectric barrier discharge

图 3 为典型电极间有、无玻璃纤维填充时单针-板电极的电晕-介质阻挡放电的放电电流波形比较. 放电间距为 10 mm, 电源频率为 20 kHz. 图中, 曲线 a、b 放电电压相同, 曲线 b、c 电容电流相同, 曲线 a、c 对应有玻璃纤维介质填充情况.

下面从放电电流的脉冲性和连续特性分析填充介质对电晕-介质阻挡放电的影响.

从曲线 b 可以看出, 没有玻璃纤维作为填充介质时, 负向放电 (针尖为负高压) 时没有明显的脉冲放电电流, 正向放电 (针尖为正高压) 有明显的放电脉冲, 这与很多文献^[6]的结果是一致的; 曲线 a、c 显

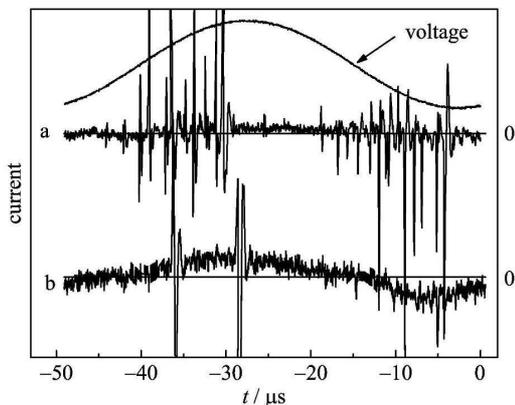


$d=10$ mm, frequency 20 kHz
 (a) peak voltage 10.0 kV, with glass fiber; (b) peak voltage 10.0 kV, capacitive current 7.36 mA, without glass fiber;
 (c) capacitive current 7.36 mA, with glass fiber

图3 电流电压波形图

Fig.3 Voltage and current waveforms

示,在有玻璃纤维作为填充介质的时候,正负双向都有非常明显的放电电流脉冲,只是放电脉冲在正、负向略呈现不对称性,正向放电脉冲电流幅值和数量都多于负向.比较图3中曲线a(或c)与b,有玻璃纤维填充时,正、负向放电的脉冲数目和幅值都远多于无玻璃纤维填充的空气间隙.将曲线a、b做进一步放大得到图4,可以看到:空气间隙的正、负向放电有明显的连续放电电流,文献[13]称之为伪连续电流;而有玻璃纤维填充时,正、负向放电都没有明显的连续电流.由于测量电流的 $50\ \Omega$ 电阻并联1个 $1\ 000\ \text{pF}$ 电容,故连续的电流部分可能包括小的正电晕脉冲(针尖附近小范围的放电)或负电晕的Trichel脉冲.



(a) with glass fiber; (b) without glass fiber

图4 有玻璃纤维与没有玻璃纤维时的放电电流

Fig.4 Discharge current pulse waveforms

在纯空气间隙,负向放电的连续电流主要为负

电晕辉光或 Trichel 脉冲,而正向放电电流的连续部分主要表现为正电晕辉光或正电晕脉冲,脉冲电流则为长流注或贯穿间隙的流注放电.实验时用肉眼能观察到从针尖到玻璃板的贯通放电通道,而此时的放电电流波形只有正向有放电脉冲,因此可以判断此流注为正向放电流注.正向放电容易形成击穿的原因是:负电晕放电产生的空间负电荷(电子)迅速向阳极针尖漂移,与上升的电源电压产生的电场叠加,使空间电场上升加快,容易产生正电晕脉冲流注,同时空间的电子也促进正向流注的发展,从而形成较长的放电流注或贯穿针-板空气间隙的击穿流注.当降低电源频率时,放电脉冲减弱可以进一步证明以上推论.由于介质阻挡层的存在,贯穿针-板空气间隙的击穿流注放电没有进一步转变成火花放电.负向放电没有随着反向电压的上升而进一步形成成长的或贯穿空气间隙的流注放电通道,而是维持在电晕辉光或 Trichel 脉冲放电状态的原因是:负向电压上升时,产生的电子迅速向阳极漂移,或与在正向放电过程中形成的空间分布的正电荷复合,或在远离针尖处分布,屏蔽了外加电压增加引起的针尖附近空间电场的增加,从而维持稳定负电晕辉光或 Trichel 脉冲放电.能够形成这种现象与电源频率、放电装置的结构尺寸都有关系.

在针-板空气间隙填充玻璃纤维介质时,一方面玻璃纤维介电常数大于空气,增强了空气中场强的分布,特别是针尖附近,另一方面玻璃纤维上捕获的电荷或对空间电荷迁移的阻挡,在电源反向时加强了针电极附近的电场,因此起始放电电压明显低于没有玻璃纤维时的起始放电电压.在本实验中,有玻璃纤维时的放电起始电压为 $5.6\ \text{kV}$,没有玻璃纤维时为 $9.8\ \text{kV}$.

为了消除填充玻璃纤维(玻璃纤维介电常数 $\epsilon_r > \epsilon_0$)引起的空间场强增加的影响,也以相同容性电流比较有、无玻璃纤维填充时的放电特性(图3曲线b、c,两者电极间隙相同).假设填充的玻璃纤维不改变场强分布形态,则可以认为电容电流相同时,对应的场强相同.从图3曲线b、c可以看出:有玻璃纤维时的放电电流脉冲的数量和幅值(曲线c)比没有玻璃纤维(曲线b)时多,并且正负向都有非常明显的放电脉冲.有玻璃纤维填充时放电脉冲增加的一个可能原因是,由于玻璃纤维本身尺寸很小(直径为 $0.1\ \text{mm}$),在其互相接触的表面形成电场畸变,从而促进放电流注的发展,易形成脉冲放电.

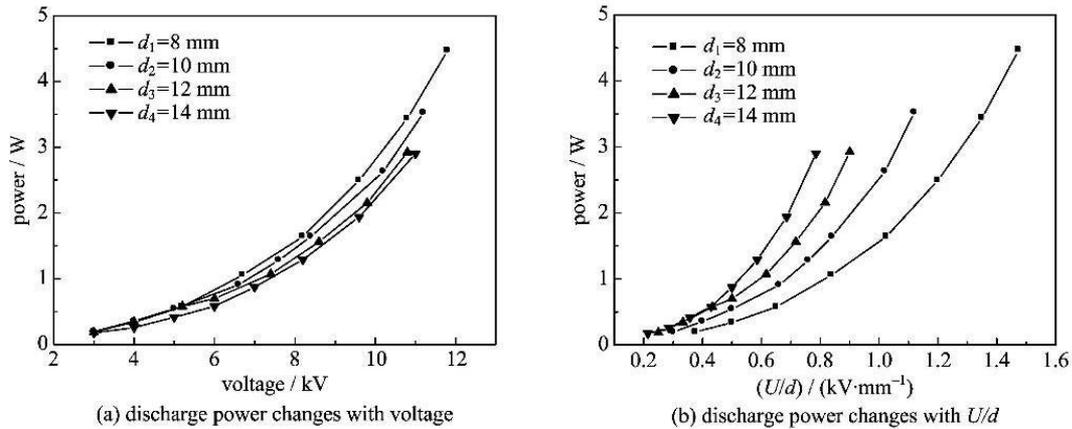


图 5 不同放电间隙距离下的放电功率

Fig. 5 Effect of gas gap distance on discharge power

2.2 放电功率

采用去除电容电流后的放电电流 $I(t)$, 用下式计算放电功率:

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} U(t) I(t) dt \quad (1)$$

图 5(a) 为玻璃纤维填充的针-板电极电晕-介质阻挡放电的功率随电压的变化曲线. 从图中可以看出, 在相同的放电距离下, 放电功率随放电电压的变化趋势是一致的; 在相同的放电电压下, 放电间隙距离越小, 放电功率越大. 在相同的放电电压下, 放电距离为 8 mm 时的放电功率最大, 放电距离为 14 mm 时放电功率最小. 这是因为在外加电场一定时, 随着放电距离的增大, 同时放电的起始电压也将提高, 因此气隙中的放电减弱, 测得的放电功率也将降低. 虽然相同电压下放电间隙距离最小时的放电功率最大, 但是反应器的空间利用效率并不是最大, 即单位空间反应器的放电功率并不是最高的. 图 5(b) 为放电功率随 U/d 的变化曲线, 可以看出, 放电间隙距离越大时, 单位空间的反应器功率越大, 在相同的 U/d 下, 放电间隙距离为 14 mm 时功率最大. 因此要提高反应器的利用效率, 必须在较大距离下放电, 才能使单位空间反应器的功率变大.

图 6 为放电距离为 10 mm 时, 有、无玻璃纤维填充时放电功率随电容电流的变化曲线, 从图中可以看出, 在相同的电容电流下, 即在相同的电场强度下, 有玻璃纤维时的放电功率比没有玻璃纤维时的放电功率要大. 这是因为当放电空间填有玻璃纤维时, 形成流注放电的起始电压会降低, 因此在相同的放电条件下, 有玻璃纤维时的放电功率要比没有玻璃纤维时的放电功率要高. 当电容电流增大的时候,

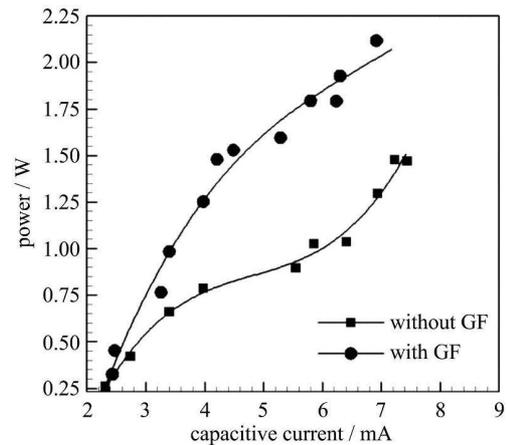


图 6 有、无玻璃纤维时放电功率随电容电流的变化曲线(放电间距为 10 mm)

Fig. 6 Effect of capacitive current on discharge power with and without glass fiber (gas gap distance is 10 mm)

气隙中的放电增强, 因此, 放电功率会随着放电电流的增大而增大.

3 结论

(I) 对于空气间隙, 针板电晕诱导的介质阻挡放电电流包含脉冲电流和连续电流; 放电电流正负周期呈现不对称性. 正半周期主要表现为流注脉冲放电, 而负半周期连续放电电流(电晕辉光)更强.

(II) 有玻璃纤维为填充介质的时候, 连续电晕电流有所减弱, 流注脉冲放电得到了加强, 放电功率明显增大. 但是要提高单位空间反应器的功率, 必须适当增加其放电间隙距离.

(III) 当以玻璃纤维作为介质时, 正负半周期都有很明显的放电脉冲, 起始流注放电电压比没有玻

玻璃纤维作为介质时要低;当反应器两端电压一定的时候,放电功率随放电距离的增大而减小;固定放电距离,放电功率随着电容电流的增加而增大.

参考文献(References)

- [1] Kunhardt E E. Generation of large-volume, atmospheric-pressure, nonequilibrium plasmas [J]. *IEEE Tans on Plasma Science*, 2000, 28(1):189-200.
- [2] Kogelschatz U, Eliasson B, Egli W. From ozone generators to flat television screens; History and future potential of dielectric-barrier discharges [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1999, 71(10):1 819-1 828.
- [3] Montie T C, Kelly K-Wintenberg, Roth J R. An overview of research using the one atmosphere uniform glow discharge plasma(OAUGDP) for sterilization of surfaces and materials [J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2000, 28(1):41-50.
- [4] Kogelschats U. Dielectric-barrier discharge: Their history, discharge physics, and industrial application [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2003, 23 (1): 1-46.
- [5] Wanger H E, Brandenburg R, Kozlov K V, et al. The barrier discharge: Basic properties and application to surface treatment [J]. *Vacuum*, 2003, 71(3):417-436.
- [6] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
- [7] Kogelschatz U. Filamentary patterned and diffuse barrier discharges [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(4):1 400-1 408.
- [8] Moon J D, Jung J S. Effective corona discharge and ozone generation from a wire-plate discharge system with a slit dielectric barrier [J]. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65:660-666.
- [9] Dascalescu L, Samuila A, Rafiroiu D, et al. Multiple-needle corona electrodes for electrostatic processes application [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1999, 35:543-548.
- [10] Adamiak K, Atten P. Simulation of corona discharge in point-plane configuration [J]. *Journal of Electrostatics*, 2004, 61:85-98.
- [11] 曾咪, 孙岩洲, 潘萍. 介质阻挡放电和介质阻挡电晕放电的特性比较[J]. *电工材料*, 2008(1):43-45.
- [12] Ogata A, Einaga H, Kabashima H, et al. Effective combination of nonthermal plasma and catalysts for decomposition of benzene in air [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2003, 46:87-95.
- [13] Petit M, Jidenko N, Goldman A, et al. Electrical characterization of gas discharges using a numerical treatment: Application to dielectric barrier discharge [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73 (7): 2 705-2 712.
- [14] Jidenko N, Petit M, Borra J P. Volatile organic compounds depollution by dielectric barrier discharge in porous media [C]//*Int Symp On High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry*. Hakone, Japan, 2002: 364-368.