

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.04.014

不同电极结构气液两相介质阻挡放电特性比较

孙晶晶¹, 徐楠¹, 熊海波², 张波¹, 方志¹

(1. 南京工业大学电气工程与控制科学学院, 南京 211816; 2. 国网江苏省电力公司丰县供电公司, 江苏 丰县 221700)

摘要: 文中以水作为工作溶液, 空气作为工作气体, 采用电压—电流波形测量、发光图像拍摄、发射光谱分析等手段诊断了网—板电极、管—板电极和刃—板电极结构气液两相介质阻挡放电(DBD)的放电特性, 研究了外加电压幅值对这3种电极结构放电产生影响, 进一步计算得到了放电功率、传输电荷、分子振动温度和分子转动温度等主要放电参量, 研究了他们随外加电压变化的变化规律, 并结合放电理论对不同电极结构下气液两相DBD的放电机制进行分析。结果表明, 相同条件下网—板电极结构气液两相DBD放电最强, 放电功率与传输电荷最大, 放电电流可达140 mA。电极布置差异导致电场不均匀系数的不同是放电特性出现差异的主要原因。随着电压幅值的增加, 3种电极结构放电增强, 放电功率和分子振动温度增加, 电子密度也增加。
关键词: 气液两相; 介质阻挡放电; 电极结构; 放电特性; 放电参量

Comparison on Discharge Characteristics of Gas-liquid Two-phase Dielectric Barrier Discharge with Different Electrode Structures

SUN Jingjing¹, XU Nan¹, XIONG Haibo², ZHANG Bo¹, FANG Zhi¹

(1. College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Fengxian Power Supply Company, Jiangsu Fengxian 221700, China)

Abstract: The discharge characteristics of dielectric barrier discharge(DBD) in gas-liquid mixture with the edge-plate, tube-plate, and mesh wire-plate electrode structures at atmospheric pressure in air were studied and compared by measuring voltage and current waveforms, taking lighting emission images, and using spectrum analysis. The changing trends of electrical parameters with the applied voltage were studied. Moreover, the discharge characteristics of DBD in gas-liquid mixture with different electrode structures were analyzed by combining gas discharge theory. The results show that the voltage and current waveforms, Lissajous figures, and optical emission spectrum of three electrode structure DBDs in gas-liquid mixture show different characteristics. At the same experimental conditions, the mesh wire-plate electrode structure DBD in gas-liquid mixture has the strongest discharge and the largest dissipated discharge power, and the discharge current can reach 140 mA. The arrangement of the electrode leads to difference non-uniform coefficient on electric field distribution, which is the main reason for the difference on discharge characteristics. With the increase in voltage amplitude, the discharge become strong, and the discharge power, molecular vibrational temperature and electron excited density all increase.

Key words: gas-liquid mixture; dielectric barrier discharge; electrode structure; discharge characteristics; discharge parameter

0 引言

介质阻挡放电(DBD)可以在常压下高效地产生

低温等离子体,其主要特点是在高压与地电极之间至少有一个被绝缘电介质层所覆盖。因其产生方式简单,因此适合在工业生产中大规模、连续化应用,在多个领域具有广泛的应用前景^[1-4]。

收稿日期:2016-11-19; 修回日期:2017-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377075)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51377075).

而气液两相介 DBD 是 DBD 的一种特殊形式,它弥补了纯气相放电不能作用于液体的缺陷,近年来受到国内研究者的广泛关注^[5-6]。当前,研究者针对不同介质种类、电极结构、电源类型和液体性质条件下的气液两相 DBD 已经做了一些研究。文[7]对气液两相 DBD 的影响因素进行了研究,发现增加放电频率与峰值电压、减小放电间距均能提高反应效率;文[8]选用柱—桶式气液两相 DBD 反应器,并在液体中通入多种气体,研究他们的特性发现,增加氧气体积分数与电极电压能明显提高放电效率。文[9]设计了多针—平板式气液两相 DBD 反应器,并研究了其放电特性。文[10]设计了水膜反应器气液两相 DBD 反应器,研究其在低功率脉冲条件下的放电特性。文[11]设计了管板式气液两相 DBD 反应器,并在管中通入氦气,研究了其放电特性。目前,尽管国内外学者对一些电极结构气液两相 DBD 放电特性进行了研究,但系统比较不同电极结构放电特性的研究较少。从气液两相 DBD 等离子体实际应用角度出发,研究不同电极结构气液两相 DBD 的放电特性,对工业应用中选择合适的反应器电极结构,进而优化反应器设计、提高放电反应效率具有重要的参考价值^[12-15]。

文中通过实验研究比较了管—板电极、刃板—电极和网—板电极结构的气液两相 DBD 放电特性,进一步研究了放电参量随外加电压的变化趋势,结合气体放电机理分析了这 3 种电极结构下放电特性不同的原因。

1 实验装置

文中气液两相 DBD 实验装置见图 1。驱动电源采用高压交流电源,其频率为 5~20 kHz、输出电压范围为 0~25 kV。实验采用的 3 种电极结构见图 2。其中,刃板气液两相 DBD 反应器高压电极采用 50 mm×60 mm×2 mm 不锈钢刀刃,管板高压电极采用长 60 mm、直径 8 mm 的圆柱,圆柱两端设计成半球型,网板高压电极采用金属丝网。放电反应器采用石英玻璃皿,其直径为 8 cm,上下底厚 1.5 mm,高 5 mm,实验时将玻璃皿放置在平板铝地电极上,倒入自来水,液面高度为 3 mm,液面与高压电极之间的距离为 6 mm,铝地电极采用直径 5 mm 圆形平板铝盘。

采用 Tek P6015A 高压探头(带宽为 75 MHz,衰减比 1 000:1)测量外施电压,通过在回路中串联的 50 Ω 的无感电阻 R 和 0.033 F 的电容 C 来测量电流和放电空间的传输电荷。将反应器两端测得的外

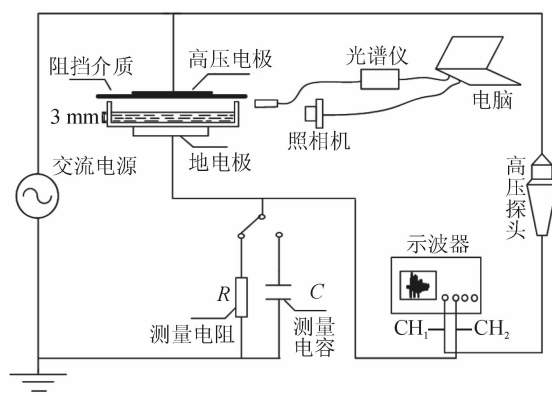


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental set-up

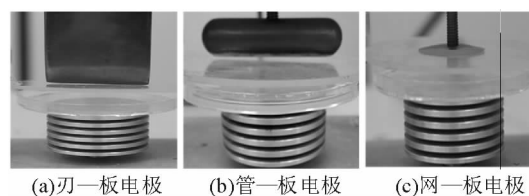


图 2 3 种电极结构

Fig. 2 Three electrode structures

加电压 U 和电容两端的电压 U_c 加在数字示波器的 X-Y 轴得到 Lissajous 图形。实验测量的电压—电流波形和 Lissajous 图形由 TDS-3054c 数字示波器采集,示波器的带宽为 500 MHz,采样频率为 5 GS/s。采用 Canon EOS 6D 单反相机拍摄放电发光图像,曝光时间设置为 1/25 s。采用海洋光学光谱仪 HR4000CG 来测量发射光谱,其波长范围在 200~1 100 nm,光学分辨率达到 0.75 nm,实验时,其光纤探头放置在反应器玻璃皿侧面距离其 3 mm 处。

2 电气特性和发光图像

图 3 给出了电源频率 9.5 kHz、电压幅值 18.5~20.5 kV、放电间距为 6 mm 时 3 种电极结构气液两相 DBD 发光图像。由图可见,3 种电极结构下放电均呈丝状放电模式,放电空间内产生大量紫色放电细丝。在电压为 18.5 kV 时,刃—板与管—板电极结构的放电区域较小,放电细丝较稀疏,发光也较暗,而网—板电极的放电发光最为均匀,随着电压幅值的增大,放电细丝增多,放电更加强烈。当电压为 20.5 kV 时,3 种电极结构放电均达最强烈,此时网—板电极发光最明亮。

图 4、5 分别为与图 3 实验条件相对应测得 3 种结构的气液两相电压电流波形和 Lissajous 图形,从图 4 中可以看出,3 种电极结构气液两相 DBD 电流波形均呈不对称性,电流脉冲都不均匀分布在每个电压周期内,这些电流脉冲是由放电空间内大量微

放电产生的,相对于其他两种电极结构,网—板电极的气液两相 DBD 的电流波形较匀称,其放电电流脉冲幅值在电压为 20.5 kV 时达到 125 mA,电流脉冲最为密集,而刃—板电极气液两相 DBD 脉冲电流幅值虽然较大,但是脉冲数最少,管—板电极的脉

冲电流幅值在电压为 20.5 kV 时为 85 mA,脉冲数量次于网板电极。从图 5 中可看出,网—板电极的 Lissajous 图形表现为类似平板电极结构的平行四边形,这是由于这种情况下放电其放电电流正负半周期对称性相对较好。

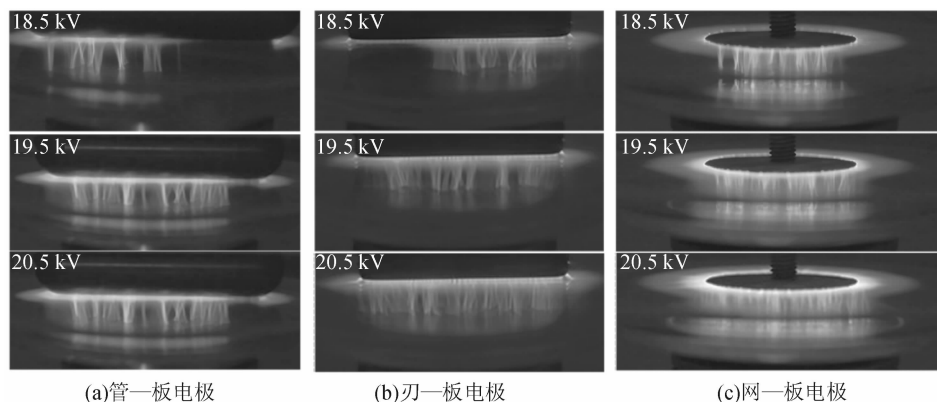


图 3 三种电极结构下的发光图像

Fig. 3 Light-emission pictures of the three electrode structures

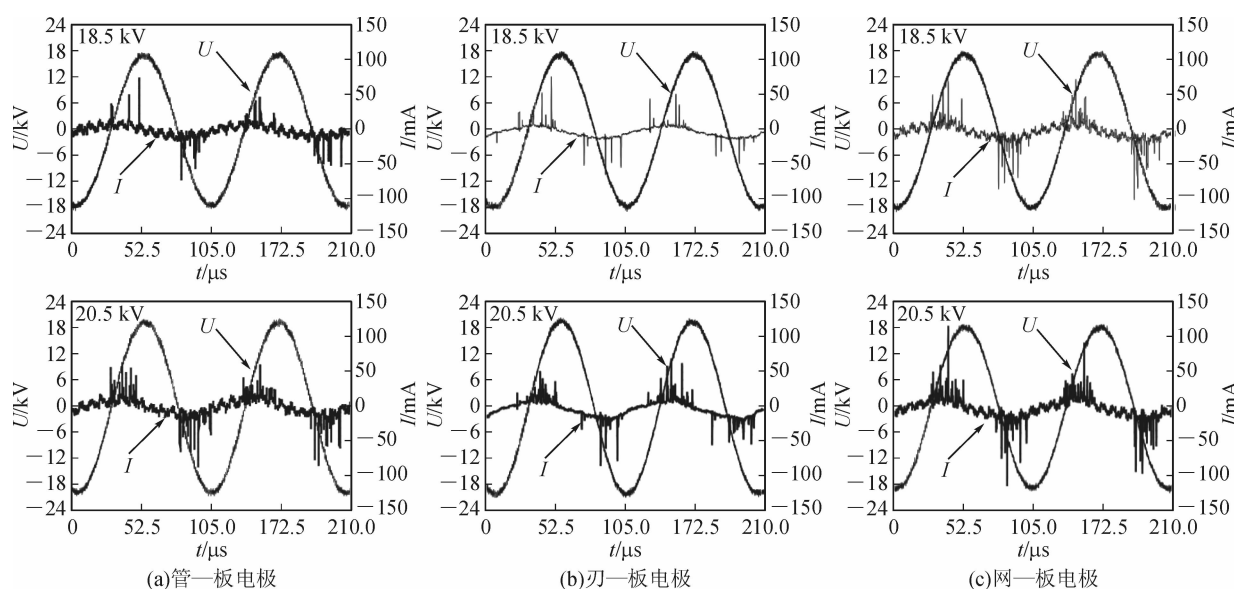


图 4 3 种电极结构下的电压电流波形

Fig. 4 Voltage-current waveforms of the three electrode structures

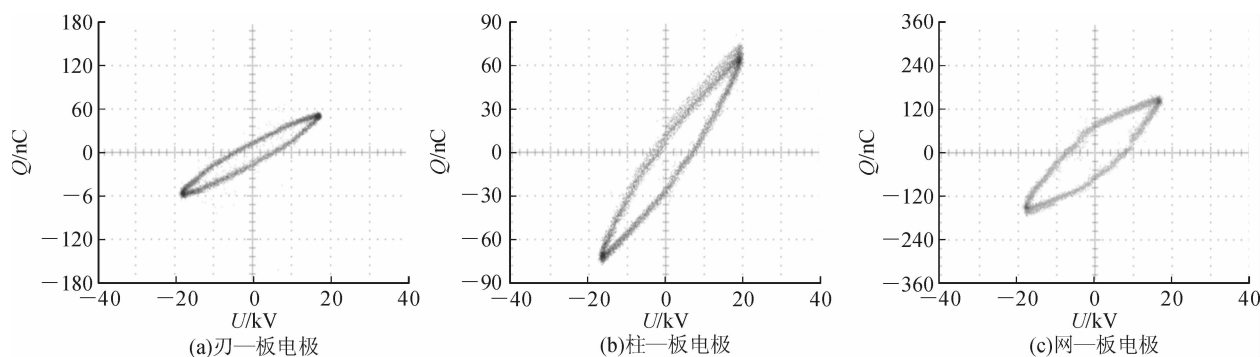


图 5 3 种电极结构下的 Lissajous 图形

Fig. 5 Lissajous figures of the three electrode structures

3 放电功率与传输电荷

放电功率和传输电荷时反映 DBD 等离子体实际应用效果的两个重要参量。放电功率主要描述放电强弱,决定放电所消耗的能量,传输电荷则直接影响着 DBD 等离子体的反应效率和应用效果。目前常用 Lissajous 图形法来计算放电功率 P 和传输电荷 Q ,其计算式为^[16]:

$$P=fA; \quad (1)$$

$$Q=\int_t^{t+T} i(t)dt。 \quad (2)$$

式(1)、(2)中: f 为电源频率; A 为测得的 Lissajous 图形面积; $i(t)$ 为示波器测得瞬时放电电流; T 为一个放电周期。

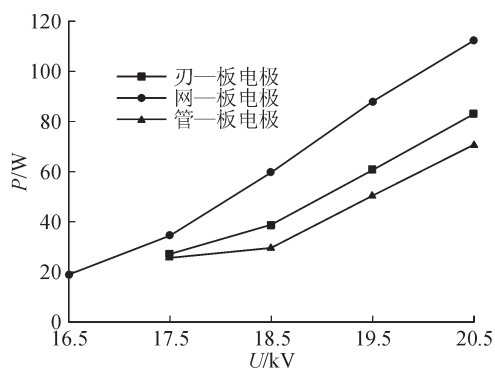
图6为3种电极结构下气液两相 DBD 的放电功率与传输电荷随电压幅值变化的曲线。可见,3种电极结构下的放电功率与传输电荷均随外加电压的增加而增大。网—板电极结构的起始放电电压为 16.5 kV,而刃—板和管—板的起始放电电压为 17.5 kV。当外加电压幅值为 17.5 kV 时,网—板电极结构的放电功率为 34.5 W,刃—板与管—板结构放电功率分别为 27.2、25.8 W,当外加电压增加到 20.5 kV 时,3种电极结构的放电功率分别为 112.3、83、72.5 W。如上结果表明,相同实验条件下,网—板电极结构的气液两相 DBD 的放电功率和传输电荷均高于其他两种电极结构下的。

4 光谱特性

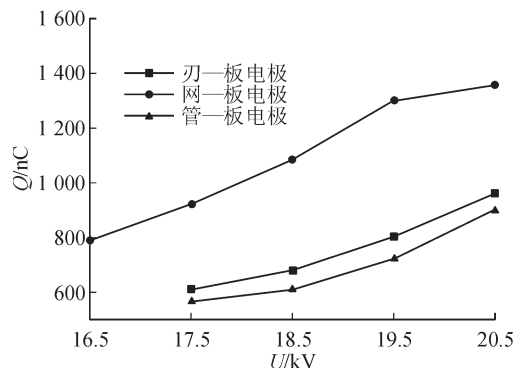
通过光谱仪测量,可以获得网板气液两相 DBD 产生的主要粒子信息^[17]。图7给出了与图3对应的实验条件下测得3种电极结构气液两相 DBD 的发射光谱图。由图7可见,3种电极结构放电气隙内电离均产生多种活性粒子,在 308 nm 处出现 OH 谱线,在 330~410 nm 之间出现 N_2 谱线,在 844.6 nm 处出现 O 谱线。这3种电极结构中,网—板电极气液两相 DBD 谱线强度最强,管—板次之,刃—板最弱,谱线的峰值强度对应产生的电子和离子的数量,这也说明相同条件下网—板结构电离最强,即放电强度最强。

根据测量得到的发射光谱数据,利用光谱软件对相应的发射谱线拟合,可得到气液两相介质阻挡放电的电子振动温度 T_v 和电子转动温度 T_r 。图8为在电源频为 9.5 kHz、放电间隙为 6 mm 时,3种电极结构 T_v 、 T_r 随外加电压的变化曲线。从图8中可见,3种电极结构 T_v 、 T_r 均随外加电压的增加而增加,网—板电极结构 T_v 、 T_r 在各电压条件下均为最大。

电子密度是反应等离子体特性的基本参数之一,在等离子体诊断和应用中起着重要作用。文中通过



(a)放电功率变化趋势



(b)传输电荷变化趋势

图6 3种电极结构下放电功率与传输电荷随外加电压变化趋势

Fig. 6 Changing of discharge power and transported charges of the three electrode structures with applied voltage

测量得到的放电电流和相关数据,利用式(3)、(4)来估算出不同电极结构气液两相 DBD 的电子密度。

$$I_{ms}=(\sum I_i^2/N)^{1/2}; \quad (3)$$

$$n_e=\frac{I_{ms}}{eS\mu_e E}=\frac{I_{ms}/S}{e\mu_e U/d_g}。 \quad (4)$$

式(3)、(4)中: I_{ms} 为一个周期内放电产生的均方根电流值; N 为每周期内放电个数; I_i 为每个周期内取样的脉冲电流数值; e 为电子的电荷量; S 为放电面积; U 为外加电压; d_g 为气隙距离; μ_e 为电子迁移率。

图9为3种电极结构气液两相 DBD 的电子密度随电压的变化曲线图。从图9中可以发现,3种电极结构的电子密度 n_e 均随电压的增加而增加,当外加电压从 17.5 kV 增加到 20.5 kV 时,3种电极结构 n_e 分别从 3.18 、 2.21 、 $2.14 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 3.58 、 3.31 、 $3.14 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 。相同外加电压下网—板电极结构 n_e 要高于其他两种电极结构。

5 结果与讨论

文中采用的3种电极结构均是不对称电极结构,因此反应在放电的电压电流特性上,表现为电流波形在电压的正负半周期内表现出不对称性,见图10。以管板电极结构为例,其放电运用气体放电机理可解释如下:当管电极上所加电压为正极性

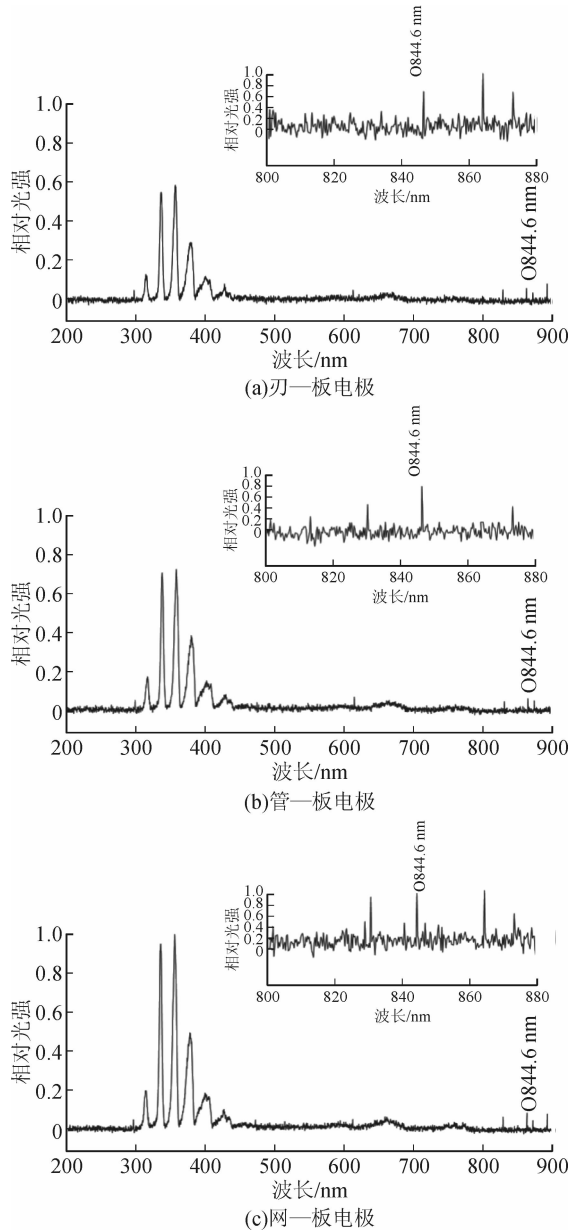


图7 3种电极结构发射光谱图

Fig. 7 Optical emission spectroscopy of the three electrode structures

时,由电晕放电产生电子并引起电子崩,这些电子迅速向管电极移动,由于介质的存在而聚集在介质表面,形成了一个与外加电场相反的电场,使放电熄灭,抑制了流注放电的产生^[18-22]。在图3中,当外加电压达到气隙击穿电压,气隙被击穿,放电空间内随机分布少量的放电细丝,随着外加电压的进一步增大,放电形成的等离子通道数量和电场强度也随之增加,因此产生电流脉冲的幅值与密度增加;与传统的气相DBD放电不同,当板电极上所加电压为正极性时,气隙中产生电子崩,电子迅速向平板电极运动,由于气液两相DBD中有液体参与放电,电子溶解于液相,电荷不能聚集在液体表面,无法形成与外加电场相反的场强,所以电流在电压的正

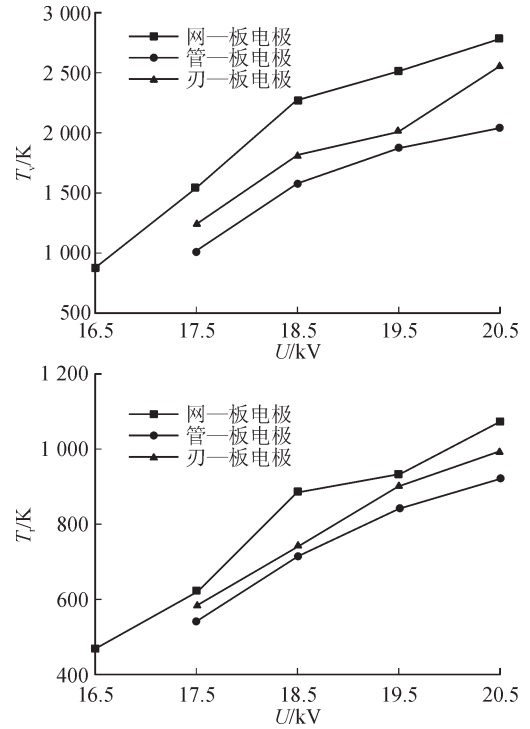
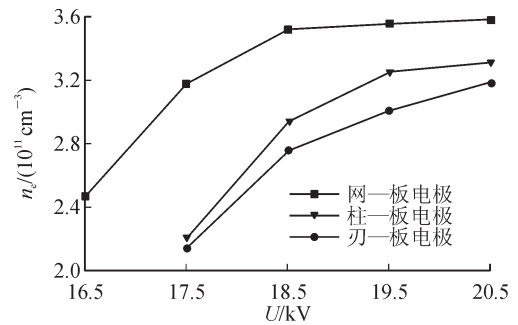
图8 3种电极结构下 T_v 、 T_r 随外加电压的变化趋势图Fig. 8 Changes of T_r and T_v of the three electrode structures with applied voltage

图9 3种电极结构下电子密度随电压变化趋势图

Fig. 9 Changing of electron excited density n_e of the three electrode structures with applied voltage

负半周期内表现出不对称性。

虽然3种电极结构施加高压后均产生不均匀电场,但是由于所采用的3种高压电极的曲率半径不同,导致放电空间电场分布不同,因此3种电极结构下放电表现出了不同的放电特征。由气体放电理论可知,电场的不均匀程度可用电极的不均匀系数反映。式(5)为柱—板电极的不均与系数 f 的计算公式。式(5)中, r 与 R 分别表示柱面与板面的半径。而管—板与刃—板均可看成曲面—平板电极结构,根据式(5),由于管—板电极 r_1 大于刃—板电极 r_2 ,而两电极 d 相等,因此 f_1 小于 f_2 ,而网—板电极是由于各丝网端点先发生电晕放电,相当于 r 很小的柱—板电极,其 f_3 远远大于 f_1 f_2 ,而 f 值越大,就代表电场越不均匀,放电起始电压越低,相同条件下放电

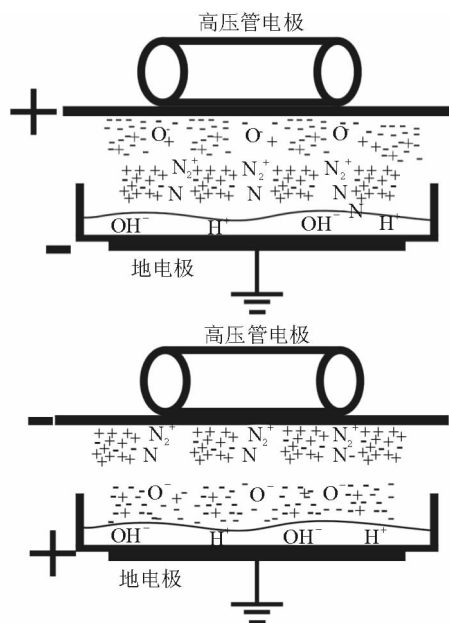


图10 气液两相 DBD 放电原理图

Fig. 10 Schematic diagram of gas-liquid two-phase DBD

越强烈,与文中实验结果相同^[23]。

$$f = \frac{0.9d}{r \ln\left(\frac{d+r}{r}\right)} \quad (5)$$

实验研究在常压下进行,发生放电后,电子在强电场的作用下与放电空间中空气含有的氮分子频繁的发生碰撞,产生能量传递,通过此过程,氮分子获得能量后从基态激发到激发态或亚稳态,而激发态或亚稳态粒子跃迁回基态的过程中会辐射出一定波长的光^[24-25]。电极结构的不同,使得施加电压后电场分布不同,这也导致电子在电场中获得的能量不同,因此放电空间中激发态与亚稳态粒子的数量也不同,反映在测量光谱数据上,表现为放电产生的谱线的强度不同,如图7所示。此外,放电电极外形的差异,也会使得电晕放电发生后对放电的进一步发展的促进效果不同。从图3中的发光图像可看出,网—板电极各放电处产生的放电细丝相互叠加、融合形成更明亮的等离子体通道;而刃—板电极放电仅向两端发展,只增大了放电长度与宽度;管—板电极面积较大,电晕层不断向上发展,因此放电通道在端部相互融合,放电较刃—板电极更明亮。此外,随着电压幅值的增加,电子在放电空间中获得更多的能量,电子与各粒子的碰撞也增多,进而放电更加强烈,因此消耗了更多的放电功率和传输了更多的电荷,分子的振动温度也随之增加。

值得注意的是,文中只是利用气体放电原理简单解释和电极结构不同导致放电特性不同的原因。3种电极结构下电场分布不同需要采用相关软件计算3种电极结构场强的分布;此外,从工业应用的

角度出发,放电输入能量和等离子体中活性自由基产生的关系决定放电的效率,对如上两方面,作者将在进一步工作中进行深入研究。

6 结论

1)刃—板电极、管—板电极和网—板电极结气液两相 DBD 的放电特性不同,在相同条件下,网—板电极结构 DBD 放电强烈,电流脉冲幅值可达 140 mA,其 Lissajous 图形表现为近似平行四边形结构,其光谱中 OH、N₂、O 等主要粒子谱线强度均高于其他两种电极结构。

2)随着电压幅值的增加,3种电极结构气液两相 DBD 放电功率、传输电荷、分子转动温度与振动温度、电子密度等均增加。电极结构不同导致电场分布不同是3种电极结构下放电特性差异的主要原因,根据电晕对放电的加强效果,选择合适的电极结构对提高工业应用中放电效率有重要意义。

参考文献:

- [1] FENG X, YAN B, WEI L, et al. Visualization of coupled mass transfer and reaction in a gas-liquid dielectric barrier discharge reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 245(6): 47-55.
- [2] 何 堃, 庞 磊, 狄东旭, 等. 气流环境中纳秒脉冲沿面介质阻挡放电的特性[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4254-4262.
HE Kun, PANG Lei, DI Dongxu, et al. Characteristics of nanosecond pulse surface dielectric barrier discharge in airflow[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 4254-4262.
- [3] 王钰恒, 汤红卫, 仲崇山. 空气介质阻挡放电固氮的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 81-85.
WANG Yuheng, TANG Hongwei, ZHONG Chongshan. Study on air dielectric barrier discharge nitrogen fixation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 81-85.
- [4] 陈思乐, 许桂敏, 穆海宝, 等. 低温等离子体处理柴油机尾气的研究进展[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 22-29.
CHEN Sile, XU Guimin, MU Haibao, et al. Research progress in treatment of diesel engine exhaust by non-thermal plasmas[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 22-29.
- [5] ZHAO Y C, CHEN G W, YE C B, et al. Gasliquid two-phase flow in microchannel at elevated pressure[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 87(2): 122-132.
- [6] KATAYAMA H, HONMA H, NAKAGAWARA N, et al. Decomposition of persistent organics in water using a gas-liquid two-phase flow plasma reactor[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(6): 897-904.
- [7] 杨长河, 余秋梅, 刘建伟, 等. 介质阻挡放电处理含喹啉废水实验[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2316-2323.
YANG Changhe, YU Qiumei, LIU Jianwei, et al. Experiment on the degradation of quinoline wastewater using di-

- electric barrier discharge[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9):2316-2323.
- [8] 王红涛,吕永康. 介质阻挡放电等离子体/微曝气协同处理苯酚废水[J]. 工业水处理, 2015(12):67-70.
WANG Hongta, LYU Yongkang. Treatment of phenol-bearing wastewater by the combination of dielectric barrier discharge plasma/micro-aeration process[J]. Industrial water treatment, 2015(12):67-70.
- [9] 方志,谈坚,杨静,等. 多针-平板电极气液两相介质阻挡的放电特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(3):731-738.
FANG Zhi, TAN Jian, YANG Jing, et al. Study on the discharge characteristic of multiple needles to plate dielectric barrier discharge in gas-liquid mixture[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3):731-738.
- [10] WANDELL R J, LOCKE B R. Low-power pulsed plasma discharge in a water film reactor[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10):2634-2635.
- [11] LIU J, PAN J, NIU J, et al. Electrical and spectral characteristics of a tube-to-plate helium plasma generated using dielectric barrier discharge in water[J]. Journal of Electrostatics, 2016(83):16-21.
- [12] 顾信鹏,方志,钱晨. NaOH 对苯胺气液两相介质阻挡放电特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(7):274-280.
GU Xinpeng, FANG Zhi, QIAN Chen, et al. Influences of NaOH on discharge characteristics of dielectric barrier discharge in aniline-gas-liquid mixtures[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(7):274-280.
- [13] 黄志明,张东东,付荣耀,等. 双路大电流源模块水中放电实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(1):72-77.
HUANG Zhiming, ZHANG Dongdong, FU Rongyao, et al. Experimental study of high-current source double module discharge system in water[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(1):72-77.
- [14] 杨长河,刘健辉,曹志荣,等. DBD 高级氧化耦合活性炭吸附处理水中碱性品红[J]. 高电压技术, 2016, 42(2):392-397.
YANG Changhe, LIU Jianhui, CAO Zhirong, et al. Treatment of fuchsin basic in water by DBD advanced oxidation coupling with activated carbon adsorption[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2):392-397.
- [15] 马云飞,章程,李传扬,等. 重频脉冲放电等离子体处理聚合物材料加快表面电荷消散的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6):1731-1738.
MA Yunfei, ZHANG Cheng, LI Chuanyang, et al. Experimental study of accelerating surface charge dissipation on polymer treated by repetitively pulsed discharge plasmas[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6):1731-1738.
- [16] 方志,吴伟杰,钱晨. 水蒸气含量对 Ar 气中介质阻挡放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(9):2895-2902.
FANG Zhi, WU Weijie, QIAN Chen. Influences of water vapor volume fraction on discharge characteristics of dielectric barrier discharge in Ar[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9):2895-2902.
- [17] 沈苑,王瑞雪,章程,等. 微秒脉冲激励的大气压氦等离子体射流放电特性[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(5):1-7.
SHEN yuan, WANG Ruixue, ZHANG Cheng, et al. Characterization of atmospheric pressure helium plasma jet driven by microsecond pulse[J]. High Power laser and Particle Beams, 2016, 28(5):1-7.
- [18] 冉俊霞,罗海云,王新新. 大气压氦气介质阻挡多脉冲放电现象研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(10):3006-3011.
RAN Junxia, LUO Haiyun, WANG Xinxin, et al. Study on multi-peak dielectric barrier discharges in neon at atmospheric pressure[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10):3006-3011.
- [19] FANG Z, YANG J, LIU Y, et al. Surface treatment of polyethylene terephthalate to improving hydrophilicity using atmospheric pressure plasma jet[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(6):1627-1634.
- [20] 何旺龄,何俊佳,张锦,等. 同轴电极的负电晕特里切尔脉冲特性分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11):211-218.
HE Wangling, HE Junjia, ZHANG Jin, et al. Characteristics of negative corona trichel pulses in a coaxial electrode system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11):211-218.
- [21] SHAO T, ZHANG C, ZHOU Y, et al. Diffuse discharges in open air sustained by microsecond and nanosecond pulses [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10):2408-2409.
- [22] ZHANG C, SHAO T, MA H, et al. Experimental study on conduction current of positive nanosecond-pulse diffuse discharge at atmospheric pressure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2013, 20(4):1304-1314.
- [23] 章程,方志,赵龙章,等. 介质阻挡放电特性的仿真与实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2008, 28(1):32-36.
ZHANG Cheng, FANG Zhi, ZHAO Longzhang, et al. Simulated and experimental studies of discharge characteristics in dielectric barrier discharge[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2008, 28(1):32-36.
- [24] 方志,钱晨,姚正秋. 大气压环电极结构射流放电模型建立及仿真[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4):218-228.
FANG Zhi, QIAN Chen, YAO Zhengqiu. The model and simulation studies for ring-ring electrode structure jet discharge at atmospheric pressure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4):218-228.
- [25] 潘俊,方志. 多脉冲均匀介质阻挡放电特性的仿真及实验研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(5):1132-1140.
PAN Jun, FANG Zhi. Simulation and experimental studies on discharge characteristics of multiple pulse homogeneous dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5):1132-1140.
- 孙晶晶(1991—),男,硕士,研究方向为介质阻挡低温等离子体特性。
- 方志(1977—),男,博士,教授,从事高电压绝缘及气体放电等离子体的基本理论及其用于材料表面改性研究工作。