

工程物理、工程力学

文章编号: 1000-8608(2007)05-0625-04

# 空气中交流针-水电极大气压辉光放电

张禹涛<sup>\*1</sup>, 徐振峰<sup>2</sup>, 马腾才<sup>1</sup>, 任春生<sup>1</sup>, 齐冰<sup>1</sup>, 苗书一<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 三束材料改性国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

2. 辽东学院 现代教育技术中心, 辽宁 丹东 118000)

**摘要:** 空气中大气压辉光放电是当前低温等离子体研究的热点, 但通常因为放电容易过渡到火花状态, 很难产生. 为此, 在大气压静态空气中采用阻容耦合负反馈方法控制针-水电极等离子体放电发展正反馈过程引起的不稳定性, 同时利用水电极良好的热传导性能增强放电的稳定性, 成功地抑制了辉光放电向火花放电的过渡, 得到了稳定的交流辉光放电.

**关键词:** 空气等离子体; 大气压; 辉光放电

**中图分类号:** O539 **文献标识码:** A

## 0 引言

大气压低温等离子体传统的产生方式主要是电晕放电和介质阻挡放电. 电晕放电是一种比较弱的放电, 而介质阻挡放电, 既可以产生被称为流注的丝状放电, 也可以产生大气压辉光和类辉光放电. 丝状放电的电流脉冲很窄, 宽度约为 10 ns; 径向尺度很小, 约为  $0.1\mu\text{m}$ ; 幅值很高, 可达 100 A 甚至更高, 等离子体温度很高, 常会损坏所处理材料. 大气压辉光放电 (APGD) 可以高效产生大量能量密度适中的活性粒子, 不会损坏所处理材料, 等离子体的空间分布是均匀的, 电子密度  $n$  为  $10^9 \sim 10^{13}\text{cm}^{-3}$ , 平均电子能量在  $1 \sim 10\text{eV}$  范围内, 具有经典低气压辉光放电的一些重要特征, 因此大气压辉光放电在材料处理和环境保护等诸多领域具有良好的应用前景, 引起了人们的极大兴趣<sup>[1,2]</sup>. 但是利用介质阻挡放电装置产生大气压辉光放电通常需要 He Ar N<sub>2</sub> 等特殊气体, 在大气压空气中是困难的, 尤其是电极间距较大时. 文献 [2] 中的空气中大气压辉光放电需要采用大电阻镇流和高速气流稳定放电, 能量利用效率低. 本文采用阻容耦合负反馈方法控制放电的发展正反馈过程引起的负载及热不稳定性, 同时利用水电极良好的热传导性能增强放电的稳定性, 在大气压静态空气中用针-水电极产生稳定

的交流辉光放电, 以拓宽非平衡等离子体的应用范围.

## 1 阻容耦合负反馈交流针-水电极大气压辉光放电机理

等离子体放电是一个正反馈过程. 放电发生后, 放电电流迅速增长, 产生大量的带电粒子和热量, 引起电极间隙电阻下降, 导致电流进一步增加, 从而形成正反馈过程, 放电变得更强烈而不稳定, 迅速完成击穿过程. 因此在高气压下很容易过渡到火花放电状态, 这就是在大气压空气中用介质阻挡放电很难产生辉光放电的主要原因. 图 1 是阻容耦合负反馈针-水电极大气压辉光放电系统简图. 该系统中每个电极都接有一个电阻  $R$  和电容  $C$ , 例如高压针电极接有电阻  $R_1$  和电容  $C_1$ , 低压水电极接有电阻  $R_2$  和电容  $C_2$ . 这些耦合电阻与电容能够提供一个有效的控制放电发展过程的负反馈, 在辉光放电过渡到火花放电之前使其熄灭, 得到稳定的大气压辉光放电. 例如在电压正半周时, 当放电发生后, 放电电流流经空气间隙后会在电容  $C_2$  上面积累, 形成反向电场. 该反向电场能够削弱促进放电的原电场. 由于耦合电阻的接入增加了放电回路的时间常数, 反向电场的建立不像介质阻挡放电那样迅速, 因此放电时

收稿日期: 2006-03-15; 修回日期: 2007-08-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50177002; 10475014).

作者简介: 张禹涛<sup>\*</sup> (1974-), 男, 博士生, E-mail: zyt95149075@126.com; 马腾才 (1937-), 男, 教授, 博士生导师.

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

间得到延长,可以达到微秒量级.反向电场能够减缓电流的上升速率,当其足够强时,就会熄灭放电.同时,水电极相对于金属电极具有良好的热传导性能,有利于增强放电的稳定性.

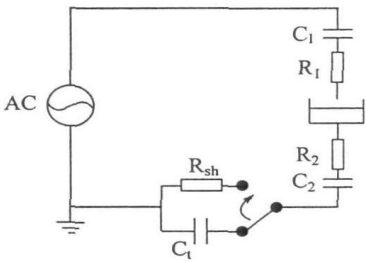


图 1 空气中交流针-水电极大气压辉光放电系统简图

Fig. 1 The schematic diagram of AC pin-to-water electrode atmospheric pressure glow discharge system

2 实 验

实验系统简图见图 1. 工作气体是大气压静态空气,交流高压电源功率 1 kW,输出电压  $U=0\sim 20\text{ kV}$ ,工作频率  $f=10\sim 20\text{ kHz}$ . 等离子体发生器由一根直径 1 mm 前端  $30^\circ$  锥角的不锈钢针-自来水电极组成,电极间距  $d=0\sim 10\text{ mm}$  可调. 耦合电容  $C_{co}=C_1C_2/(C_1+C_2)=6.9\text{ pF}$  ( $C_1=C_2$ ). 耦合电阻  $R_{co}=R_1+R_2=132\text{ k}\Omega$  ( $R_1=R_2$ ). 测量放电特性所用数字示波器型号为 Tektronix, TDS350; 高压探头型号为 Tektronix, P6015A; 电流探头型号为 Tektronix, P6319A; 电流信号是在一个  $50\text{ }\Omega$  接地无感电阻  $R_{sh}$  上测得的. 放电图像采用未过滤的 Fuji s602z 相机拍摄,曝光时间是  $1/1\ 200\text{ s}$ . 放电功率采用李萨如图形方法测得,所用电容  $C_t=1\text{ }\mu\text{ F}$ <sup>[3]</sup>.

3 结果和讨论

3.1 基本放电特性

当  $d=1\text{ mm}$ ,  $f=18.5\text{ kHz}$ ,电压达到 2.8 kV 时产生电晕放电. 此时图 2(a) 是电晕放电图像,等离子体区仅在针尖附近,发光较暗,电极中间大部分是未放电的迁移区. 这是电晕放电的典型特征<sup>[4-5]</sup>,可以听到断续的滋滋声. 当电压增加到 3 kV 时放电转化成辉光模式,明亮的等离子体充满整个电极空间. 图 2(b) 是辉光放电图像. 这是因为辉光放电时电场增强,电离区能逐渐发展到板电极<sup>[6-7]</sup>. 此时放电的声音很小,是连续的.

图 3 是其电压-电流波形图,电流波形呈现明显的单峰特征,每个周期的电流特征都是相同的,电流最大值在电压最大值之前,这是辉光放电的典型特征之一<sup>[18-9]</sup>. 此时等离子体柱的直径约为 1.2 mm,最大电流脉冲峰值为 4.8 mA,电流密度为  $0.65\text{ A/cm}^2$ ,平均场强取为  $30\text{ kV/cm}$ ,电子密度  $n$  约为  $3.2\times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$ <sup>[10]</sup>. 辉光放电无论是在低气压还是高气压都有两种模式,即扩散模式和收缩模式. 扩散模式的特征是适中的电流密度(不高于几  $\text{mA/cm}^2$ ),较低的气体温度(不高于 300~400 K),较低电子密度 ( $n<10^{10}\text{ cm}^{-3}$ ),高的折合场强. 相对于扩散模式,收缩模式的特征是高电流密度(约几  $\text{A/cm}^2$ ) 和气体温度(约 1 000 K 或更高),较高的电子密度 ( $10^{10}\sim 10^{13}\text{ cm}^{-3}$ ),较低的折合场强. 因此,在相同电流密度下扩散模式的等离子体通道横截面比收缩模式小得多. 本文的辉光放电应该属于收缩模式. 随着电压的升高,发光增强,等离子体柱变得倾斜,在水面上游动,位移电流逐渐增加,但放电电流峰值减小. 当电压达到 9.9 kV 以上时,放电进入火花放电状态,发光增强,放电的声音也是断续的,强度明显高于电晕放电.

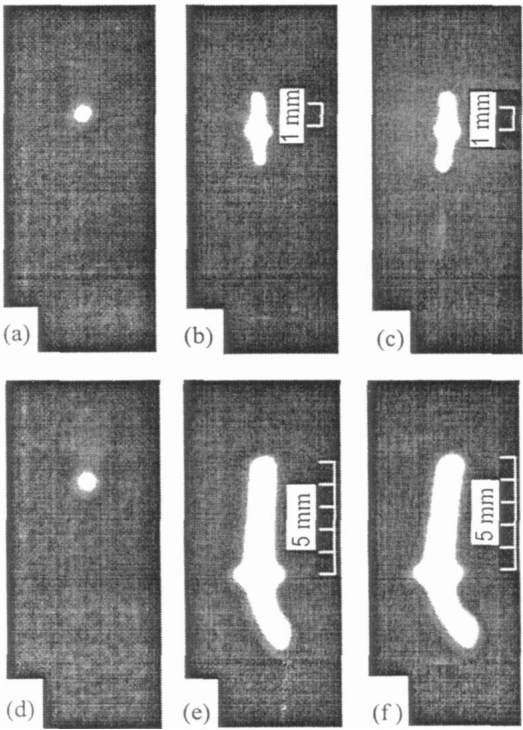


图 2 当  $d=1\text{ mm}$  和  $5\text{ mm}$  时电晕和辉光放电图像

Fig. 2 Corona and glow discharge photographs

when  $d=1\text{ mm}$  and  $5\text{ mm}$

图 2 中 (d) (e) 和 (f) 是  $d = 5\text{ mm}$  时电晕放电和辉光放电图像, 图 4 是  $U = 10.9\text{ kV}$  时辉光放电电压-电流波形. 随着电极间距的增大, 会发生更多的电离现象, 产生更多的带电粒子和热量, 导致电流增大, 放电功率迅速上升, 不稳定性增加, 放电容易过渡到火花状态. 当电极间距大于  $5\text{ mm}$  时, 因为前述的间距较大导致功率迅速增加使辉光放电难以产生<sup>[11]</sup>.

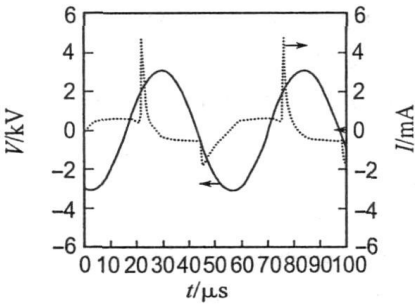


图 3 当  $d = 1\text{ mm}$ ,  $U = 3\text{ kV}$  时辉光放电电压-电流波形

Fig. 3 Glow discharge voltage-current waveform when  $d = 1\text{ mm}$ ,  $U = 3\text{ kV}$

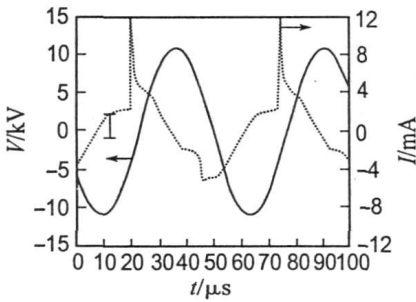


图 4 当  $d = 5\text{ mm}$ ,  $U = 10.9\text{ kV}$  时辉光放电电压-电流波形

Fig. 4 Glow discharge voltage-current waveform when  $d = 5\text{ mm}$ ,  $U = 10.9\text{ kV}$

### 3.2 耦合电容对放电的影响

当耦合电容减小时, 放电功率也随之减小, 稳定性得到增强; 反之则稳定性下降, 这是因为负反馈的功能减弱了. 在  $C_{co} = 13.8\text{ pF}$ ,  $R_{co} = 132\text{ k}\Omega$ ,  $d = 1\text{ mm}$ ,  $f = 18.5\text{ kHz}$  放电条件下, 当  $U > 7.6\text{ kV}$  时放电过渡到火花状态. 这一数值低于相同情况下  $C_{co} = 6.9\text{ pF}$  时的  $9.9\text{ kV}$ . 当  $C_{co} > 13.8\text{ pF}$  时难以产生辉光放电.

### 3.3 耦合电阻对放电的影响

耦合电阻在较大范围内变化时, 对放电稳定性影响很小, 这对提高放电效率有利. 但是耦合

电阻可以明显改变电流波形, 图 5 是当  $d = 1\text{ mm}$ ,  $C_{co} = 6.9\text{ pF}$ ,  $R_{co} = 2.1\text{ M}\Omega$ ,  $f = 18.5\text{ kHz}$ ,  $U = 10\text{ kV}$  时辉光放电电压-电流波形. 当其增加时电流波形变得越来越光滑, 最后电流脉冲几乎消失了.

耦合电阻太小时回路的放电时间常数很小, 类似于介质阻挡放电, 反向电场在短时间内迅速熄灭放电, 不能产生稳定的辉光放电; 反之, 当耦合电阻太大时反向电场在很长时间内都很弱, 不能起到有效的负反馈作用, 也不能抑制辉光放电过渡到火花放电.

当  $d = 1\text{ mm}$ ,  $C_{co} = 6.9\text{ pF}$ ,  $f = 18.5\text{ kHz}$  时耦合电阻合适的范围是  $R_{co} = 66\text{ k}\Omega \sim 2.1\text{ M}\Omega$ . 当  $R_{co} < 66\text{ k}\Omega$ , 不能产生辉光放电. 当  $R_{co} = 66\text{ k}\Omega$ , 维持辉光放电的最高电压  $U = 6\text{ kV}$ . 维持辉光放电的最大耦合电阻  $R_{co} = 2.1\text{ M}\Omega$ , 此时辉光放电的最高电压  $U = 10\text{ kV}$ , 相应放电功率为  $P = 4.7\text{ W}$ .

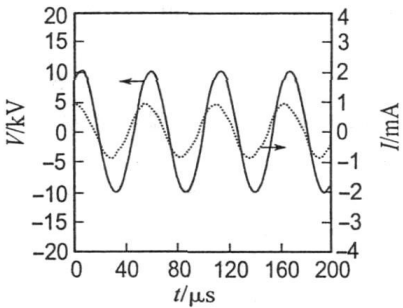


图 5 当  $d = 1\text{ mm}$ ,  $C_{co} = 6.9\text{ pF}$ ,  $R_{co} = 2.1\text{ M}\Omega$ ,  $f = 18.5\text{ kHz}$ ,  $U = 10\text{ kV}$  时辉光放电电压-电流波形

Fig. 5 Glow discharge voltage-current waveform when  $d = 1\text{ mm}$ ,  $C_{co} = 6.9\text{ pF}$ ,  $R_{co} = 2.1\text{ M}\Omega$ ,  $f = 18.5\text{ kHz}$ ,  $U = 10\text{ kV}$

### 3.4 频率对放电的影响

针-水电极情况下, 从电晕放电过渡到辉光放电依然存在着最低临界频率  $f = 6.8\text{ kHz}$ . 当  $6.8\text{ kHz} < f < 20\text{ kHz}$  时频率对放电从辉光模式过渡到火花放电模式没有明显影响, 例如  $C_{co} = 6.9\text{ pF}$ ,  $R_{co} = 132\text{ k}\Omega$ ,  $d = 1\text{ mm}$ ,  $f = 10\text{ kHz}$  和  $f = 18.5\text{ kHz}$  时, 维持辉光放电的最高电压都为  $U = 10\text{ kV}$ . 这一点不同于针-板电极情况, 频率升高会引起维持辉光放电的最高电压下降, 这是因为水电极良好的导热性能, 及时通过水分子受热汽化蒸发保证水电极温度相对恒定.

4 结 语

采用阻容耦合负反馈方法控制等离子体放电的发展过程,同时利用水电极良好的热传导性能增强放电的稳定性,得到了稳定的空气中交流针-水电极大气压辉光放电. 该方法不需要介质,针电极不必冷却,运行稳定,在材料处理、环境保护等领域具有广泛的应用前景.

致谢: 感谢黄大生同志的建议和帮助.

参考文献:

[1] MASSINES F, GOUDA G. A comparison of polypropylene-surface treatment by filamentary, homogeneous and glow discharges in helium at atmospheric pressure [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1998, **31**(24): 3411-3420

[2] AKISHEV Y, DERYUGIN A A, KOCHETOV IV, *et al.* DC glow discharge in air flow at atmospheric pressure in connection with waste gases treatment [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1993, **26**(10): 1630-1637

[3] 刘钟阳, 吴彦, 王宁会. DBD等离子体反应器放电功率测量的研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2001, **22**(3): 78-83

[4] AKISHEV Y, GOOSSENS O, CALLEBAUT T, *et al.* The influence of electrode geometry and gas flow on corona-to-glow and glow-to-spark threshold currents in air [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2001,

**34**(18): 2875-2882

[5] CALLEBAUT T, KOCHETOV I, AKISHEV Y, *et al.* Numerical simulation and experimental study of the corona and glow regime of a negative pin-to-plate discharge in flowing ambient air [J]. *Plasma Sources Sci and Tech*, 2004, **13**(2): 245-250

[6] GIAO T N, JORDAN J B. Trichel streamers and their transition into the pulseless glow discharge [J]. *Appl Phys*, 1970, **41**(10): 3991-3999

[7] GOOSSENS O, CALLEBAUT T, AKISHEV Y, *et al.* The DC glow discharge at atmospheric pressure [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2002, **30**(1): 176-177

[8] GHERARDI N, MASSINES F. Mechanisms controlling the transition from glow silent discharge to streamer discharge in nitrogen [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2001, **29**(3): 536-544

[9] NAUDE N, CAMBRONNE J P, GHERARDI N, *et al.* Electrical model and analysis of the transition from an atmospheric pressure Townsend discharge to a filamentary discharge [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2005, **38**(4): 530-538

[10] YANG Yun. Alternating-current glow and pseudoglow discharges in atmospheric pressure [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2003, **31**(1): 174-176

[11] 王新新, 芦明泽, 蒲以康. 空气中大气压下均匀辉光放电的可能性 [J]. *物理学报*, 2002, **51**(12): 2778-2785

AC pin-to-water electrode atmospheric pressure glow discharge in air

ZHANG Yu tao<sup>\* 1</sup>, XU Zhen feng<sup>2</sup>, MA Teng cai<sup>1</sup>,  
REN Chun sheng<sup>1</sup>, QI Bing<sup>1</sup>, MIAO Shu yi<sup>1</sup>

( 1.State Key Lab. for Mater. Modif., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;  
2.The Cent. of Modern Edu. and Technol., Liaodong Univ., Dandong 118000, China )

**Abstract** Atmospheric pressure glow discharge in air is the focus of non-thermal plasma study currently. But it is difficult to produce due to the transition from glow to spark. To solve this problem, a method named resistance and capacitance coupled negative feedback is used to control the instability caused by the positive feedback discharge development process of pin-to-water electrode plasma system in static atmospheric air, and the good heat conductivity characteristics of water electrode is used to enhance the stability of discharge. It is successful to prevent the transition from glow to spark and produce a stable AC glow discharge.

**Key words** air plasma; atmospheric pressure; glow discharge