

大气压气液纳秒脉冲放电电气特性研究

孙明^a, 潘文军^b, 曹旭俊^b

(上海海事大学 a. 文理学院; b. 物流工程学院, 上海 201306)

摘要:为进一步了解大气压气液纳秒脉冲放电的电气特性,自行研制喷嘴-板-筒式反应器,研究纳秒负脉冲气液两相放电中喷嘴电极与接地板-筒电极间距、鼓气流量、喷嘴直径、脉冲重复频率和放电时间等对起始放电电压、电流波形的影响。结果表明:起始放电电压的主要影响因素为两极间距;不同鼓气流量对起始放电发生的影响可能表现为抑制或促进;起始放电电压、电流绝对值随着脉冲重复频率的增加而略有上升。实验中水溶液电导率随放电持续时间延长而增大,表明活性粒子数量增加。

关键词:纳秒脉冲放电;电气特性;起始放电电压;活性粒子;气液

中图分类号: O521⁺.21

文献标志码: A

Research on electrical characteristics of gas-liquid phase nano-second pulsed discharge at atmospheric pressure

SUN Ming^a, PAN Wenjun^b, CAO Xujun^b

(a. College of Arts & Sciences; b. Logistics Engineering College,
Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to learn more about the electrical characteristics of gas-liquid nano-second pulsed discharge at the atmospheric pressure, the self-developed reactor with the nozzle-plate-cylinder electrode is adopted. The effects of the distance between the nozzle electrode and the ground plate-cylinder electrode, the gas flow, the diameter of the nozzle, the pulsed repetition frequency and the duration time of the discharge on the onset discharge voltage and current wave forms are investigated in the nano-second negative pulse gas-liquid two-phase discharge. The results show that the effect of the distance between the two electrodes on the onset discharge voltage is important, the effect of different gas flow on the occurrence of onset discharge may be inhibited or promoted, and the absolute values of the onset discharge voltage and current increase slightly with the increase of the pulse repetition frequency. In the experiment, the electrical conductivity of aqueous solution increases with the duration time of discharge, indicating that the number of active particles increases.

Key words: nano-second pulsed discharge; electrical characteristic; onset discharge voltage; active particle; gas-liquid

0 引 言

大气压纳秒脉冲放电技术具有所需设备占地面积小、不会产生二次污染等优点,在材料改性^[1]、等离子体助燃^[2]、清洁能源^[3]、废水处理^[4]等领域的应用成为研究热点。相关研究可概括为:气相脉冲放电过程的粒子模拟^[5];液相放电羟基等活性粒子的生成及影响因素^[6]、活性粒子的发射光谱诊断^[7]及放电电气特性对放电等离子体生成和水处理的影响^[8];气液两相脉冲放电等离子体的诊断及对微生物的灭活应用^[9]。而对气液纳秒脉冲放电特性的实验研究成果多侧重于单独的气相或液相的放电机理或气液两相放电等离子体的应用效率提高方面。

气液两相放电可大体分为两种形式。一种是气液分离式:在气相或气液交界面发生放电后,再向液相传质。另一种是向液体中鼓入气体或向气体中喷雾状液体。由于激发态粒子的寿命仅几百纳秒(自发辐射、与电子或其他粒子的碰撞导致其淬灭),气液混合放电的方式能够减少从气相向液相传质所需的传输时间,大大增加放电活性粒子与液相中待处理物作用的概率,从而提高处理效率。由于水的导电性,气液混合放电电压大大低于纯液相放电电压。近年来国内外气液放电应用研究多围绕如何提高对污染物的降解效率^[10]及降解过程中何种活性粒子起主要作用^[11]等展开。本课题组也对其在偶氮类染料废水处理^[12]及微生物灭活^[13]方面的应用做了相关研究。

大气压气液纳秒脉冲放电具有广阔的应用前景,但是目前对纳秒脉冲放电机理、放电模式的演变机制等尚缺少细致、深入的研究,因此本文从其电气特性角度着手,研究其发生的影响机制及规律。

1 实验系统

本文的实验系统主要包括脉冲电源、反应器和电气测量设备,见图 1。

图 1 中:双极性高压脉冲电源的设备型号为 PD-60 II 型,由大连理工大学静电与特种电源研究所提供,储能电容为 36 nF,脉冲成形电容为 2.4 nF。实验过程中,低噪声空气泵(GA-3000)输出的空气经转子流量计调节流速后进入高压喷嘴电极,放电生成的活性粒子在气流带动下到达液面并继续扩散。通过电压探头(P6015A, Tektronix)、电流探头(TCP305, Tektronix)、电源适配器(TCP300, Tektronix)、数字示波器(TDS3014C, Tektronix)监测放电电压和放电电流。所采用的反应器为自行研

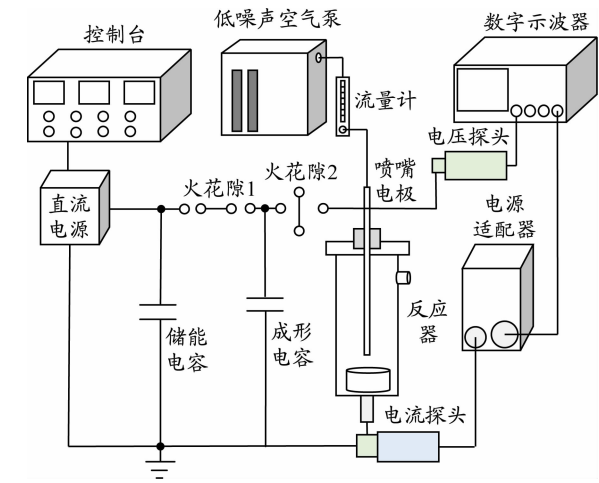


图 1 气液纳秒脉冲放电实验系统

制的喷嘴-板-筒式反应器^[14],其具体构成见图 2。

反应器是由有机玻璃材料制成的圆柱体,高 150 mm,内径为 100 mm,外径为 110 mm。不锈钢高压喷嘴电极长 200 mm,壁厚 0.10 mm,不同直径的电极可更换并可上下调节其与液面的相对位置。不锈钢接地板-筒电极内径为 97 mm,高 30 mm,同

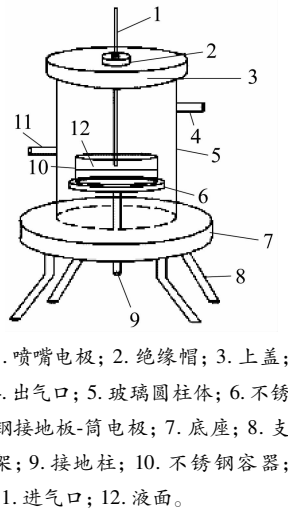


图 2 喷嘴-板-筒式反应器结构

时为盛放液体的容器。喷嘴电极连接低噪声空气泵,气体流量通过玻璃转子流量计调节。放电时,在喷嘴电极附近生成的放电等离子体直接进入液相并扩散。实验前期,与喷嘴-板式电极结构进行电气特性对照发现,改进后的这种喷嘴-板-筒式电极之间的放电电流增大,放电通道增加,放电强度增强。

本实验采用 DS-307A 型电导率仪,仪器测量范围为 $0 \sim 1 \times 10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。

2 不同条件下的放电电气特性分析

在大气压气液纳秒负脉冲放电下,比较不同电气参数对起始放电电压和起始放电电流波形的影响。如无特殊说明,本文实验条件为:喷嘴电极外径为 2 mm,鼓气流量为 50 mL/min,脉冲重复频率为 50 Hz,喷嘴电极与接地板-筒电极间距为 20 mm。板-筒接地不锈钢容器注入 180 mL 电导率为 $1.47 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的蒸馏水,液面高 25 mm,放电发生在液面下。文中曲线拟合软件为 Origin 9.0。其中,起始放

电电压是指在外加电压从零开始的升压过程中可形成脉冲放电的最低电压值。

2.1 电极间的相对距离对放电电气特性的影响

改变电极间的相对距离,起始放电电压、电流波形分别见图3和4。实验中电极间距分别为35、30、

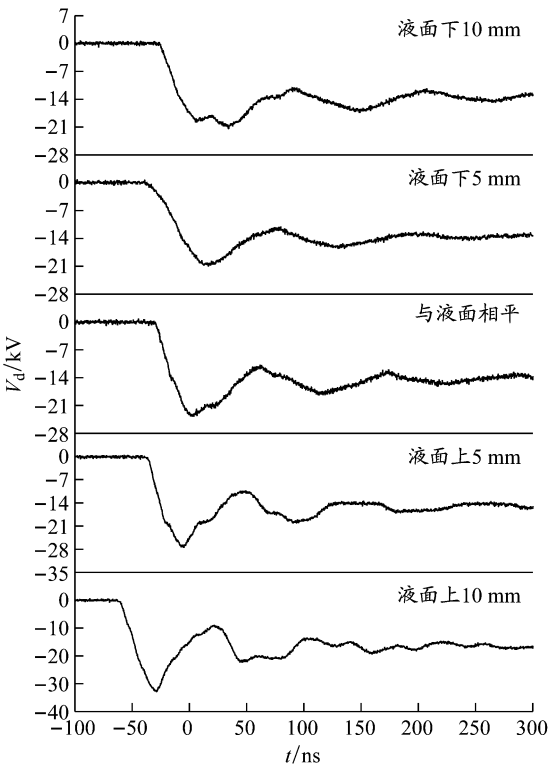


图3 喷嘴与液面不同相对距离的起始放电电压波形

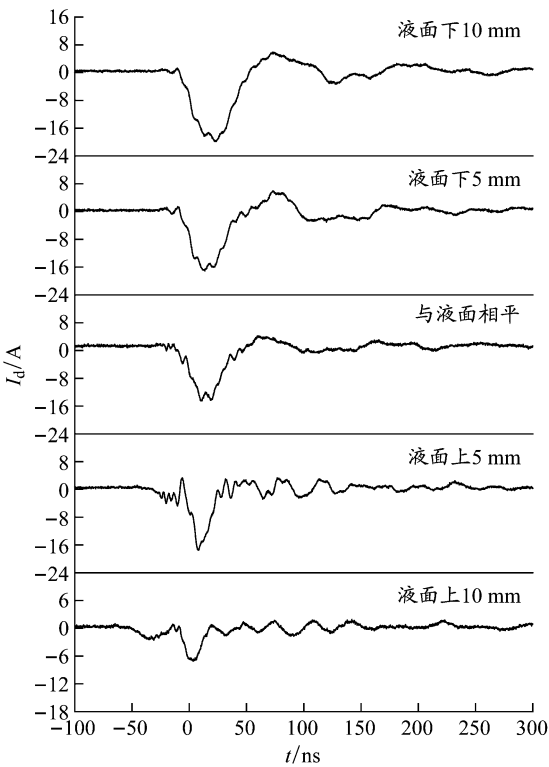


图4 喷嘴与液面不同相对距离的起始放电电流波形

25、20、15 mm,相应的放电喷嘴电极与液面的相对距离分别为10、5、0、-5、-10 mm(喷嘴在液面上其相对距离为正,喷嘴在液面下其相对距离为负)。

由图3可见:液体中或液面处放电电压最大脉冲的脉宽在50 ns左右;液体中放电电压最大脉冲的下降时间为50 ns左右;液面处放电电压最大脉冲的下降时间在25~50 ns范围内;液面上放电电压最大脉冲的脉宽小于50 ns,第一个脉冲的下降时间为25 ns左右;液面处放电和液面下放电最大脉冲的脉宽比液面上气相放电的大。

由图4可见:在液体中或液面处放电电流的最大脉冲的脉宽大于25 ns,并且之后的脉冲波峰较少,脉宽较大;在液体中放电电流最大脉冲的下降时间略大于25 ns;在液面处放电电流最大脉冲的下降时间为25 ns左右;在液面上放电电流最大脉冲的脉宽小于25 ns,并且之后的电流脉冲波峰较多,脉宽较小,其放电电流最大脉冲的下降时间小于25 ns;液面处和液面下气液两相放电电流最大脉冲的脉宽比液面上气相放电的大。另外,喷嘴在液面上放电电流产生最大脉冲波峰前还有较小的毛刺波峰。

不同电极间距下的起始放电峰值电压和电流绝对值见表1。

表1 不同电极间距下的起始放电峰值电压和电流绝对值

电极间距/mm	35	30	25	20	15
控制台电压/kV	33.0	31.0	29.0	28.5	29.0
电压绝对值/kV	32.4	27.0	23.8	22.7	23.2
电流绝对值/A	9.7	10.8	15.4	19.6	19.8

根据表1 绘制起始放电峰值电压和电流绝对值与电极间距的关系曲线,见图5。

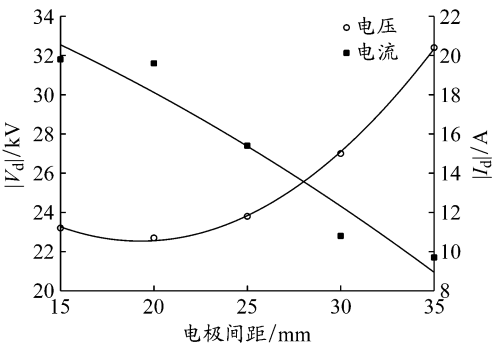


图5 起始放电峰值电压和电流绝对值与电极间距的关系

起始放电峰值电压(y)与电极间距(x)的拟合关系为

$$y = 37.305\,71 - 1.531\,71x + 0.039\,71x^2 \quad (1)$$

起始放电峰值电流(y)与电极间距(x)的拟合关系为

$$y = 25.945\,71 - 0.265\,71x - 0.006\,29x^2 \quad (2)$$

结合表 1 和图 5 可知,电极间距是起始放电电压的主要影响因素。随着电极间距的变大,起始放电电压绝对值变大,起始放电电流绝对值变小。气液两相放电的结论与气相放电的一致:由于电极间距的减小,喷嘴在鼓气的液体中比在气液交界处(液面)或在液面上更易于放电且强度更大。从图 5 中的拟合曲线可以看出,当电极间距在一定范围内时,式(1)和(2)可以很好地预测起始放电峰值电压、电流绝对值的变化趋势。由于水溶液电导率的影响,水中纳秒脉冲电晕放电电流为安培量级,放电电压与电极间距呈二次多项式关系。

2.2 液相鼓气流量对放电电气特性的影响

在鼓气流量分别为 0、30、50、70、80、90 mL/min 的情况下,起始放电电压和电流波形见图 6 和 7。由图 6 和 7 可见:液相放电的放电电压最大脉冲的脉宽在 50 ns 左右,放电电压最大脉冲的下降时间在 25~50 ns 范围内;放电电流最大脉冲的脉宽大约为 25 ns,放电电流最大脉冲的下降时间约为 25 ns;不同鼓气流量下起始放电电压和起始放电电流的波形大体相同。

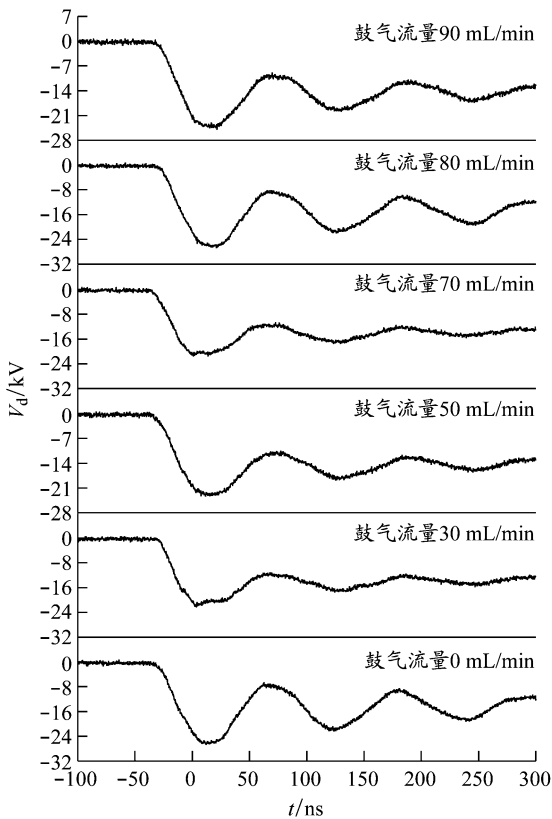


图 6 不同鼓气流量下起始放电电压波形

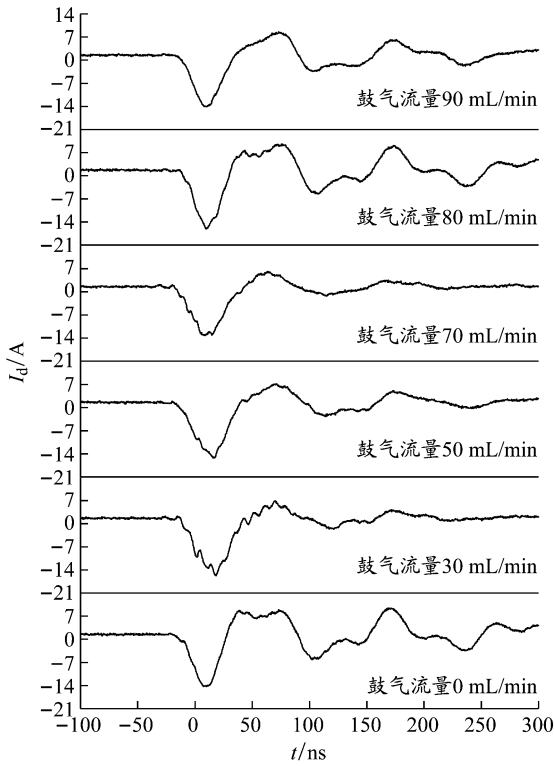


图 7 不同鼓气流量下起始放电电流波形

不同鼓气流量下起始放电峰值电压和电流绝对值见表 2。

表 2 不同鼓气流量下起始放电峰值电压和电流绝对值

鼓气流量/(mL/min)	0	30	50	70	80	90
电压绝对值/kV	27.2	28.0	28.2	25.2	26.9	27.2
电流绝对值/A	17.9	17.8	16.9	17.6	17.4	18.4

为更直观地说明问题,根据表 2 绘制起始放电峰值电压和电流绝对值与鼓气流量之间的关系曲线,见图 8。由图 8 可见:在鼓气流量从 0 增加到 50 mL/min 的过程中起始放电电压绝对值增加,在鼓气流量从 50 mL/min 增加到 70 mL/min 的过程中起始放电电压绝对值降低,随着鼓气流量的进一步增加起始放电电压绝对值又开始上升。这说明不同鼓气流量对放电的发生既可能起抑制作用又可能起促进作用。其原因可能是:当气流的存在阻碍了最初

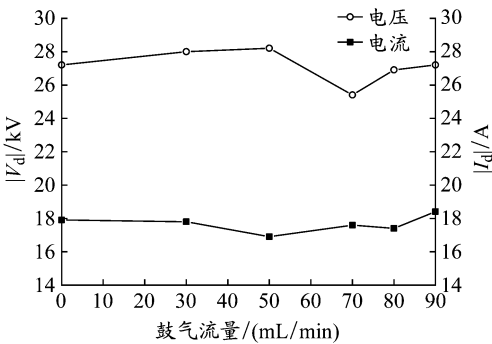


图 8 起始放电峰值电压和电流绝对值与鼓气流量的关系

的带电粒子的扩散时,放电过程受到抑制,从而使起始放电电压升高;而当气流的存在促进了最初的带电粒子的扩散时,放电更容易发生,从而使起始放电电压降低。放电电流也随气流发生相应的波动。

2.3 脉冲重复频率对放电电气特性的影响

在脉冲重复频率分别为 30、40、50、60、70 Hz 的情况下,起始脉冲放电电压和电流波形见图 9 和 10。由图 9 和 10 可知,脉冲重复频率在 30 ~ 70 Hz

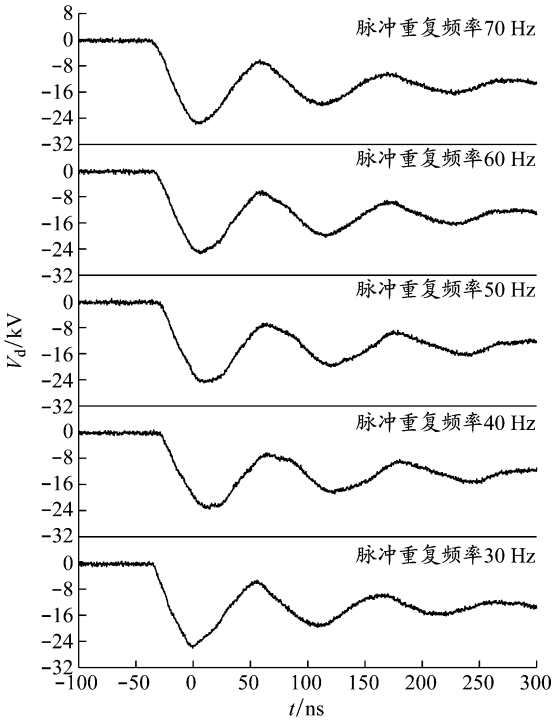


图 9 不同脉冲重复频率下的起始放电电压波形

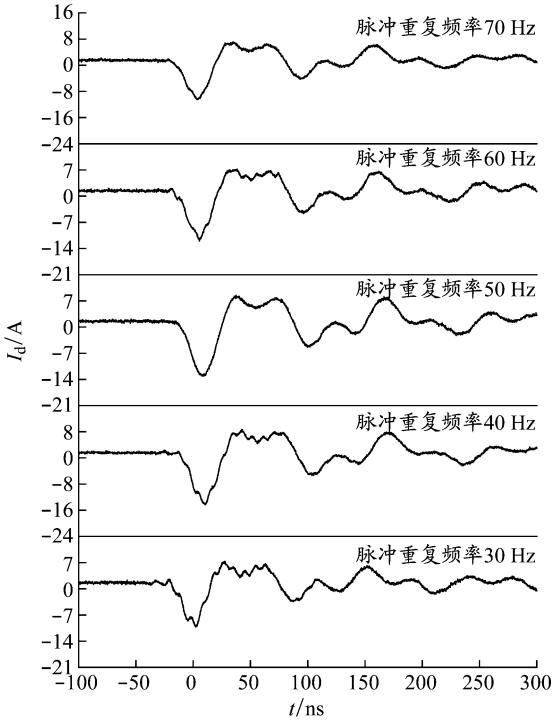


图 10 不同脉冲重复频率下的起始放电电流波形

范围内变化对放电电压和电流的波形影响不大,放电电压最大脉冲的脉宽都在 50 ns 左右,放电电压第一个脉冲下降时间在 25 ~ 50 ns 范围内;放电电流最大脉冲的脉宽都在 25 ns 左右,放电电流最大脉冲下降时间在 25 ns 左右。不同脉冲重复频率下放电电压波形与放电电流波形大体相似。

不同脉冲重复频率下的起始放电峰值电压和电流绝对值见表 3。

表 3 不同脉冲重复频率下的起始放电峰值电压和电流绝对值

脉冲重复频率/Hz	30	40	50	60	70
控制台电压/kV	26.0	25.5	26.5	26.5	27.0
电压绝对值/kV	26.3	24.8	27.0	26.6	26.9
电流绝对值/A	17.6	17.2	17.9	18.2	18.7

由表 3 可以绘出起始放电峰值电压和电流绝对值与脉冲重复频率之间的关系曲线,见图 11。

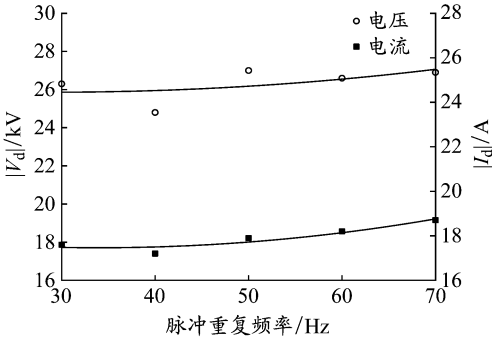


图 11 起始放电峰值电压、电流绝对值与脉冲重复频率的关系

由表 3 和图 11 可知,起始放电峰值电压和电流绝对值与脉冲重复频率的关系呈非线性特征。起始放电峰值电压绝对值(y)与脉冲重复频率(x)的拟合关系为

$$y = 26.46286 - 0.04143x + 7.14286 \times 10^{-4}x^2 \tag{3}$$

起始放电峰值电流绝对值(y)与脉冲重复频率(x)的拟合关系为

$$y = 18.62 - 0.068x - 0.001x^2 \tag{4}$$

由表 3 和图 11 可知,随着脉冲重复频率的增加,纳秒脉冲起始放电峰值电压和电流绝对值总体呈略微上升的趋势。在一定的脉冲重复频率范围内式(4)能够很好地预测起始放电峰值电流绝对值的变化趋势,而式(3)的拟合结果略有偏差。不同脉冲重复频率下起始放电电压波形和起始放电电流波形整体相似。限于本文所采用电源的频率变化范围,电源频率对放电电压的影响规律及机制有待在后续研究中进一步深入。

2.4 水溶液电导率对放电电气特性的影响

在水溶液电导率分别为 1.47、60、100.4、301、501 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的情况下,起始脉冲放电电压和电流波形分别见图 12 和 13。由图 12 可知,不同水溶液电导率下的放电电压波形整体相似,放电电压第一个

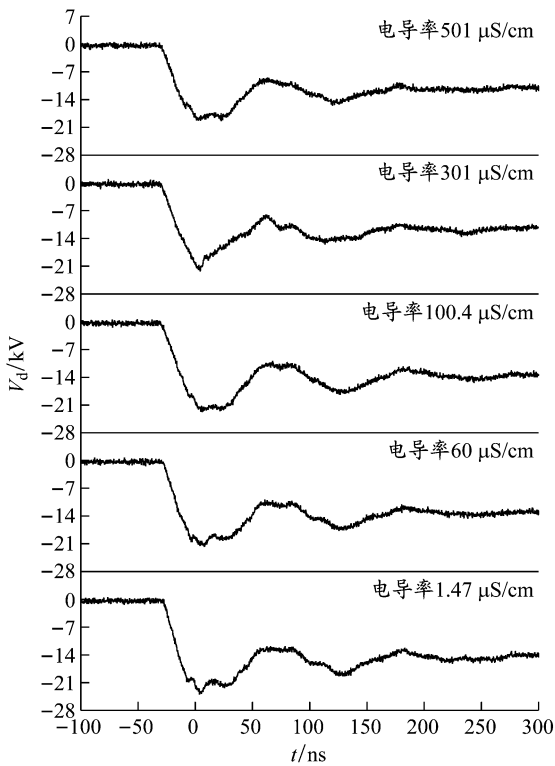


图 12 不同水溶液电导率下的起始放电电压波形

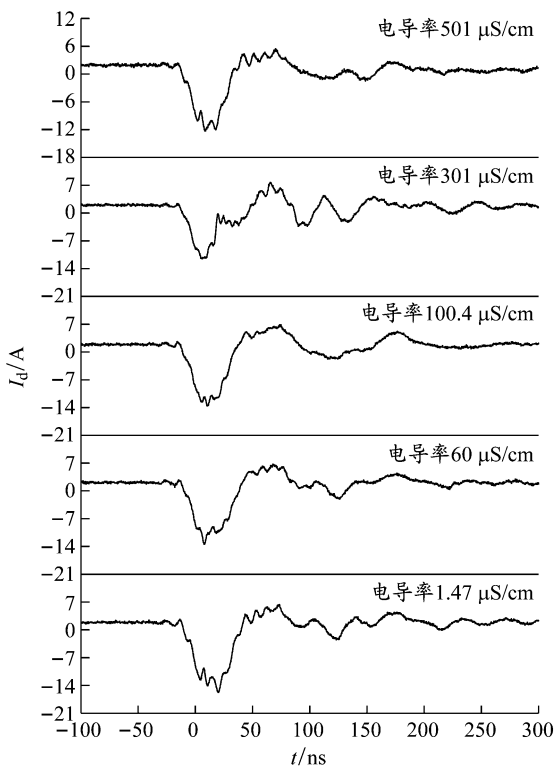


图 13 不同水溶液电导率下的起始放电电流波形

最大脉冲的脉宽都在 50 ns 左右,放电电压第一个脉冲的下降时间略大于 25 ns。由图 13 可知,水溶液电导率对纳秒脉冲放电电流波形的影响较大,放电过程中放电电流波形毛刺较多,说明不同电导率下微放电变强。放电电流第一个脉冲的脉宽及脉冲下降时间大致相同,放电电流第一个最大脉冲的脉宽都略大于 25 ns,放电电流第一个脉冲的下降时间均在 25 ns 左右。

不同水溶液电导率下的起始放电峰值电压和电流绝对值见表 4。

表 4 不同水溶液电导率下的起始放电峰值电压和电流绝对值

水溶液电导率/($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1.47	60	100.4	301	501
控制台电压/kV	30.0	27.0	26.5	24.5	23.0
电压绝对值/kV	27.8	25.0	25.1	22.4	20.6
电流绝对值/A	18.2	15.6	15.1	13.9	12.7

根据表 4,绘出起始放电峰值电压和电流绝对值与水溶液电导率的关系曲线,见图 14。

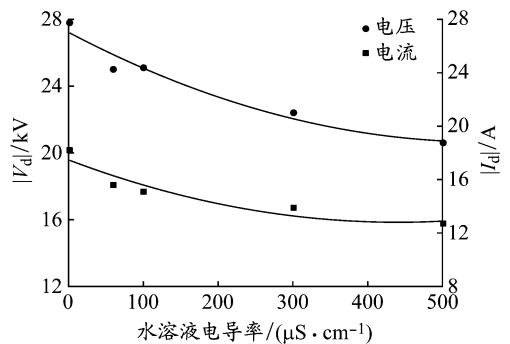


图 14 起始放电峰值电压和电流绝对值与水溶液电导率的关系

由图 14 可知,水溶液电导率与起始脉冲放电峰值电压和电流绝对值的变化关系均呈非线性特征。起始放电峰值电压绝对值(y)与水溶液电导率(x)的拟合关系为

$$y = 27.223\,75 - 0.023\,6x + 2.118\,36 \times 10^{-5}x^2 \quad (5)$$

起始放电峰值电流绝对值(y)与水溶液电导率(x)的拟合关系为

$$y = 17.476\,03 - 0.021\,18x + 2.403\,47 \times 10^{-5}x^2 \quad (6)$$

由表 4 和图 14 可知,随着水溶液电导率的增大,起始放电峰值电压和电流绝对值总体呈下降趋势,两个电极之间越来越容易发生放电。这可能是因为两个电极之间的初始带电粒子数量越多,在电场力的作用下带电粒子的定向移动越激烈就越容易

发生“电子雪崩”,从而在两极间形成放电。在一定的水溶液电导率范围内,式(5)和(6)能够很好地预测起始放电峰值电压和电流绝对值的变化趋势。不同水溶液电导率下起始放电电压波形大体相似,而起始放电电流波形毛刺较多,微放电变强。

2.5 放电时间对放电电气特性的影响

在纳秒脉冲起始放电时间分别为 2、4、6、8、10 min 的情况下,水溶液电导率见表 5 和图 15。

表 5 水溶液电导率随放电时间的变化						
放电时间/min	0	2	4	6	8	10
水溶液电导率/($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1.33	3.53	5.92	9.42	12.07	15.33

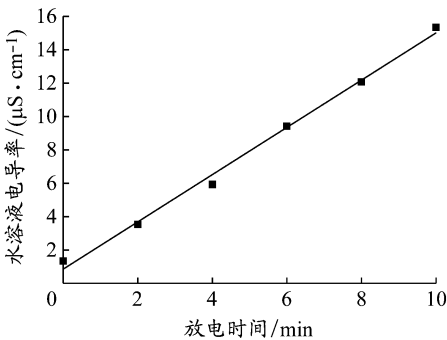


图 15 水溶液电导率随放电时间的变化

从图 15 可以看出,随着放电时间的延长,水溶液电导率呈线性上升趋势。水溶液的电导率(y)与放电时间(x)的拟合关系为

$$y = 0.853\ 33 + 1.416x \tag{7}$$

本文实验中放电过程生成的活性粒子包括高能电子、正离子、负离子、激发态的原子和分子等,会随气流进入液体中。已有理论和研究表明,溶液电导率与离子总浓度正相关。随着放电时间的延长,水溶液电导率上升,表明水溶液中带电粒子增多。在一定的放电时间内,水溶液中带电粒子数量与放电时间正相关。

分别测量放电结束 0、2、4、5 min 后的水溶液电导率,得到水溶液电导率随时间的变化情况,见图 16。从图 16 可以看出,放电结束后溶液电导率随时间的延长呈现下降趋势,且在放电结束后的最初 2 min 内下降较多,电导率大概下降 0.1~0.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$,

而在 2~4 min 内大概只下降 0.05 $\mu\text{S}/\text{cm}$,之后电导率趋于稳定。这可能是由于活性粒子之间发生了化学反应,生成了新的稳定物质,溶液中离子总浓度逐渐降低。

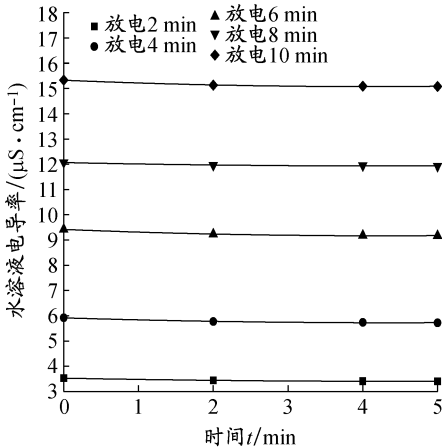


图 16 放电结束后水溶液电导率随时间的变化

3 结 论

采用自行研制的喷嘴-板-筒式电极,研究负高压气液纳秒脉冲放电规律,得到如下结论:

(1)起始放电电压的主要影响因素为电极间距:随着电极间距的增大,起始放电电压绝对值升高,起始放电电流绝对值降低;与气相放电相比,液面处和液面下的气液两相放电的放电电压和放电电流脉宽变大。

(2)不同鼓气流量对放电的发生既可能起抑制作用又可能起促进作用。当气流的存在阻碍了带电粒子的扩散时,放电过程受到抑制,起始放电电压升高;当气流的存在促进了带电粒子的扩散时,起始放电电压降低。

(3)随着脉冲重复频率的增加,起始放电电压和电流绝对值总体呈略微上升趋势。

(4)随着水溶液电导率的增大,起始放电电压绝对值呈下降趋势,起始放电电流绝对值减小,两个电极间的放电更容易发生。

(5)随着放电时间的延长,水溶液电导率呈线性上升趋势;放电结束后 2 min 内水溶液电导率下降明显,4 min 以后趋于稳定。

参考文献:

[1] 李黎,彭明洋,腾云,等. 大气压重频纳秒脉冲放电对尼龙纤维的表面改性[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 753-761. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20160308005.

[2] 聂万胜,周思引,车学科. 纳秒脉冲放电等离子体助燃技术研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1749-1758. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20170527001.

- [3] 孙昊, 张帅, 韩伟, 等. 纳秒脉冲火花放电高效转化甲烷的实验研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 880-888. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180032.
- [4] 董冰岩, 张鹏, 聂亚林, 等. 针-板式高压脉冲气液两相放电电解废水中的苯酚[J]. 化工进展, 2016, 35(1): 314-319. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2016.01.043.
- [5] LI Yongdong, HE Feng, LIU Chunliang. A volume-weighting cloud-in-cell model for particle simulation of axially symmetric plasmas[J]. Plasma Science and Technology, 2005, 7(1): 2653-2656. DOI: 10.1088/1009-0630/7/1/012.
- [6] JOSHI A A, LOCKE B R, ARCE P, *et al.* Formation of hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and aqueous electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution[J]. Journal of Hazardous Materials, 1995, 41: 3-30. DOI: 10.1016/0304-3894(94)00099-3.
- [7] SUN Bing, SATO M, CLEMENTS J S. Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water[J]. Journal of Electrostatics, 1997, 39: 189-202. DOI: 10.1016/s0304-3886(97)00002-8.
- [8] LOCKE B R, SATO M, SUNK A P, *et al.* Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45: 882-905. DOI: 10.1021/ie050981u.
- [9] WANG Sen, WANG Wenchun, YANG Dezheng, *et al.* Optical and application study of gas-liquid discharge excited by bipolar nanosecond pulse in atmospheric air[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2014, 131: 571-576. DOI: 10.1016/j.saa.2014.04.061.
- [10] LI Jie, SATO M, OHSHIMA T. Degradation of phenol in water using a gas-liquid phase pulsed discharge plasma reactor[J]. Thin Solid Films, 2007, 515: 4283-4288. DOI: 10.1007/s11270-018-3968-x.
- [11] WANG Tiecheng, QU Guangzhou, YAN Qiuhe, *et al.* Optimization of gas-liquid hybrid pulsed discharge plasma for *p*-nitrophenol contaminated dredged sediment remediation[J]. Journal of Electrostatics, 2015, 77: 166-173. DOI: 10.1016/j.elstat.2015.08.011.
- [12] 孙明, 郝夏桐, 鲁晓辉, 等. 气液两相脉冲放电反应器的设计及其对酸性橙 II 的降解效果[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 498-503. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.02.021.
- [13] 孙明, 杨颜颜, 金宏力, 等. 气液两相纳秒脉冲放电反应器放电特性及其对藻类的灭活效果[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3499-3504. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.10.043.
- [14] 王东, 孙明, 陶瞻. 一种新型单喷嘴-板-筒式高压脉冲等离子体灭菌反应器: 201910043719.6[P]. 2019-04-12.

(编辑 贾裙平)

(上接第 46 页)

参考文献:

- [1] 赵严, 何世伟, 黎浩东. 水铁联运发展模式及其运输组织研究[J]. 铁道运输与经济, 2010, 32(6): 23-26.
- [2] 张国伍. “一带一路”的多式联运服务体系研究: “交通 7+1 论坛”第四十四次会议纪实[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 1-13.
- [3] 张滨, 黄波, 樊婷. “一带一路”背景下我国海陆联运建设与发展[J]. 中国流通经济, 2015(6): 96-102.
- [4] 武慧荣, 朱晓宁. 基于 SD 的集装箱海铁联运系统发展研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 529-533.
- [5] 吴庚. 海铁联运是物流业快速发展的必由之路: 对港口物流发展方式转变的思考[J]. 港口经济, 2010(7): 33-35.
- [6] 叶泮跖. 浅谈北部湾港海铁联运对国际贸易的积极作用[J]. 特区经济, 2019(3): 104-106.
- [7] 黄起龙, 崔彦博, 刘晓雷, 等. 基于系统动力学的铁水联运港政府服务体系研究[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(4): 57-62, 75.
- [8] 郭静妮, 贺政纲. 基于集装箱运输的水铁联运体系构建[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(4): 41-49.
- [9] 邹涛. 集装箱水铁联运港口站平面布置探讨[J]. 工程建设与设计, 2019(12): 146-148.
- [10] YANG Yijia, ZHU Xiaoning, HAGHANI A. Multiple equipment integrated scheduling and storage space allocation in rail-water intermodal container terminals considering energy efficiency [J]. Transportation Research Record, 2019, 2673(3): 199-209. DOI: 10.1177/0361198118825474.

(编辑 赵勉)