



·脉冲功率技术·

## 水中针-板结构小能量脉冲火花放电特性\*

王 芝<sup>1</sup>, 韩若愚<sup>1</sup>, 李显东<sup>2</sup>, 陈鹏宇<sup>1</sup>, 李奕璋<sup>1</sup>, 缪劲松<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 物理学院, 北京 100081; 2. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 开展了 J 量级系统储能下电脉冲参数对水中火花放电特性影响研究。驱动源采用参数可调的固态重频纳秒脉冲电源, 放电负载为水中针-板结构(间距 1 mm), 在低重频条件(约 5 Hz)下进行实验。通过调节放电参数、拍摄高速阴影图像、光谱诊断以及声信号测量, 研究水中脉冲放电的物理特性, 得到不同放电参数下放电演化规律及其对声学、光谱特性影响。实验发现: 在 J 量级储能下, 放电通道连通两极后, 回路电流在几百 ns 内快速上升至 10 A 左右, 随后缓慢下降, 持续 50~60  $\mu\text{s}$ 。发现预设脉宽对放电影响较大, 短脉宽条件下放电会被电源固态开关强制截断出现反向放电, 而长脉宽条件下放电通道在后期变得不稳定甚至熄弧中断, 出现气泡中二次放电现象。辐射光谱揭示了更多等离子体信息, 推断通道电子密度在  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  量级, 随着脉宽增加, 特征谱线强度增加, 表明活性粒子数密度增加, 但粒子种类不变。短脉冲( $< 150 \mu\text{s}$ )作用下产生的脉冲声波的特征宽度在 110~150  $\mu\text{s}$ , 而当脉宽继续增大, 声波脉宽并不继续增加而是保持不变, 保持在 150  $\mu\text{s}$  左右。研究结果对水中小能量火花放电的机理研究有一定参考价值, 为水声学、液相等离子体等领域的应用提供思路。

**关键词:** 水中放电; 等离子体; 图像诊断; 光谱诊断; 声波与冲击波

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220022

## Low-energy pulsed spark discharge characteristics of pin-plate structure in water

Wang Zhi<sup>1</sup>, Han Ruoyu<sup>1</sup>, Li Xiandong<sup>2</sup>, Chen Pengyu<sup>1</sup>, Li Yizhang<sup>1</sup>, Miao Jinsong<sup>1</sup>

(1. School of Physics, Beijing University of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The influence of electric pulse parameters on spark discharge characteristics in water was studied. A solid-state repetitive nanosecond pulse power supply with adjustable parameters was adopted. The discharge load was a pin-plate structure placed in water (the distance between the pin and the plate set to 1 mm). The experiment was carried out under low repetitive frequency conditions (approximately 5 Hz). The characteristics of pulse discharge in water were obtained by monitoring discharge parameters, taking high-speed shadow images, collecting optical emission spectrum, and measuring sound pressure. The evolution of pulse discharge with different parameters and its influence on acoustic and spectral characteristics were also obtained. When the energy storage on the order of a few joules after the initial discharge channel was formed between the two electrodes, the circuit current rose to approximately 10 A within a few hundred ns, followed by a rapid and then slow decline with a duration of 50–60  $\mu\text{s}$ . It is found that the preset pulse width has a great influence on the spark discharge characteristics. Under short pulse width conditions, the discharge channel will be cut off by the solid-state switch of the power supply. Under long pulse width conditions, the discharge channel becomes unstable in the late stage and even interrupts the arc, and the secondary discharge appears in bubbles. The radiation spectra reveal more information. With the increase of pulse width, the intensity of the characteristic spectral lines increased, but no new spectral lines were observed. This indicates that the number of active particles increased, and their types remain the same. The channel electron density is estimated on the order of  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . The characteristic width of the pulse sound wave produced by a short pulse ( $< 150 \mu\text{s}$ ) is 110–150  $\mu\text{s}$ . However, when the pulse width continues to increase, the sound wave pulse width does not

\* 收稿日期: 2022-01-11; 修订日期: 2022-04-24

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (3212034); 国家自然科学基金项目 (51907007)

联系方式: 王 芝, 380810708@qq.com。

通信作者: 韩若愚, han.ruoyu@hotmail.com。

continue to increase but remains at 150  $\mu\text{s}$ . It is hoped that this research has a certain reference value for studying the mechanism of small energy spark discharge, and provides ideas for the applications of underwater acoustics, liquid phase plasma and other fields.

**Key words:** discharge in water, plasma, image diagnosis, spectral diagnosis, sound and shock waves

水中火花放电是在极短时间内水介质中电极间高压击穿引发的放电现象,随着系统储能的耗尽放电很快结束,是最常见的水中放电现象。水中放电通常伴随丰富的热、光、力、声学等物理效应,即“液电效应”<sup>[1]</sup>,在很多领域有广阔应用前景<sup>[2]</sup>。当前研究主要集中在如何利用液相放电产生的等离子体、冲击波、声波、紫外线、活性粒子等物理化学反应开展应用<sup>[3]</sup>,如:水下声源<sup>[4]</sup>、材料处理<sup>[5]</sup>、污水处理<sup>[6]</sup>、杀菌消毒<sup>[7]</sup>等。水中放电多采用脉冲功率源驱动,一般脉冲放电时间在  $\mu\text{s}/\text{ns}$  量级,放电通道在极短时间内获得较大能量沉积,水介质相变、空化形成高密度、高压力的等离子体气泡/空腔<sup>[8]</sup>。

近年来,  $\mu\text{s}$  量级/ns 量级水中放电的研究得到越来越多国内外研究者的关注。如,华中科技大学刘毅等人开展了大能量电脉冲研究,得到了 Rayleigh-Plesset 模型,可以较好地再现空腔的运动过程<sup>[9]</sup>。刘毅等人还开展了水中大电流脉冲放电的激波传播特性的研究,得到了可用于描述水中大电流脉冲放电激波的近场及远场传播特性的模型<sup>[10]</sup>。重庆大学李显东等人研究了大电流下脉冲持续时间对击穿特性的影响,得到了随脉冲持续时间从 ns 增加至 ms,击穿电压先上升后下降的结论<sup>[11]</sup>。

然而,现有研究多集中在大能量、高电压、大间距的水中脉冲电弧放电(单次),对小能量、小间距水中放电(可重频)的物理过程关注不够。在一些应用场景中,例如作为电声转换效率高水下声源<sup>[12]</sup>、声音合成<sup>[13]</sup>、声纳探测等,要求能够产生重频可控的声波脉冲序列<sup>[14]</sup>,这种情况下小能量、可重频的火花放电具有潜在技术优势;另一方面,在液相等离子体污染物处理<sup>[6]</sup>、杀菌消毒<sup>[7]</sup>、材料制备<sup>[5]</sup>等应用中,需要持续构建非热等离子体以产生活性物质辅助化学反应的进行,在这种情况下长时间大电流脉冲热电弧是不适合的,需要关注重频、小能量、小间距  $\mu\text{s}$  量级/ns 量级电脉冲作用下的水中放电,尽量避免热效应的影响。

与其他类型的水中放电相比,火花放电在等离子体产生效率上高于水中电晕放电<sup>[15]</sup>,同时避免了电弧放电带来的热等离子体,能够高效地完成电-声转换以及产生活性粒子。所需放电时的回路储能远小于电弧放电,工作时对整个放电系统以及装置的冲击小很多,工作于此模式的水中放电系统可以具有一定重复工作频率,电源也可以选用实验室常用的焦耳级纳秒脉冲电源。但当前针对这类小能量重复频率放电物理过程研究的报道并不多见,对非热等离子体以及空泡的形成与演化过程,以及伴随的声波与光辐射产生机制认识不够深入。基于此,本文开展了低能量、小间距、低重频条件下的脉冲火花放电过程研究,通过光-电-力同步联合诊断,重点研究放电、等离子体、气泡行为之间的关联性。

## 1 实验装置

水下脉冲放电综合观测平台如图 1 所示,它主要由脉冲放电装置和测量系统组成。

**实验装置:** 电源采用全固态脉冲高压电源,脉宽 0~1 ms 可调,脉冲上升沿下降沿 50~500 ns 可调,脉冲电压 0~15 kV 可调,输出频率 0~15 kHz 可调。液体容器采用可透紫外线光学玻璃槽(JGS3, 5 cm×10 cm×20 cm)。电极均为针-板结构,钨针针尖曲率半径为 70  $\mu\text{m}$ ,作为正极连接电源,金属板接地,材质为黄铜,厚度 1 mm,面积 2 cm×3 cm。电路中引入空气开关增强液电效应<sup>[1]</sup>、避免充电过程的影响。

**诊断系统:** 采用电流探头(Pearson 线圈 4100)、高压探头(Tektronix P6015A)以及数字示波器(DPO 4034B, Tektronix)测量电流、电压波形,以获得放电的电学特性。利用自发射光谱法测量放电的光学特性。将光学探头(Silicon PIN Detector)对准放电区域固定在玻璃槽边缘,随后连接到光谱仪(Ocean USB2000+)上采集放电过程的发射光谱。采用数码相机(尼康 D610)拍摄放电的时间积分图像;高速相机(Phantom VEO710)拍摄放电的时间分辨图像。采用声波探头(BSWA MPA231)测量放电的声学特性,声波探头固定在玻璃槽边缘,距放电位置 3 cm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同脉宽下等离子体典型放电图像

图 2 为电源脉宽分别为 50  $\mu\text{s}$  和 200  $\mu\text{s}$  时,放电电压、电流、沉积能量波形图。回路限流电阻  $R_x$  为 500  $\Omega$ ,放电频率约 5 Hz。由于电路电流较小、负载电感有限,感性电压分量不高( $Ldi/dt \ll iR$ ),计算沉积能量时可忽略电感作

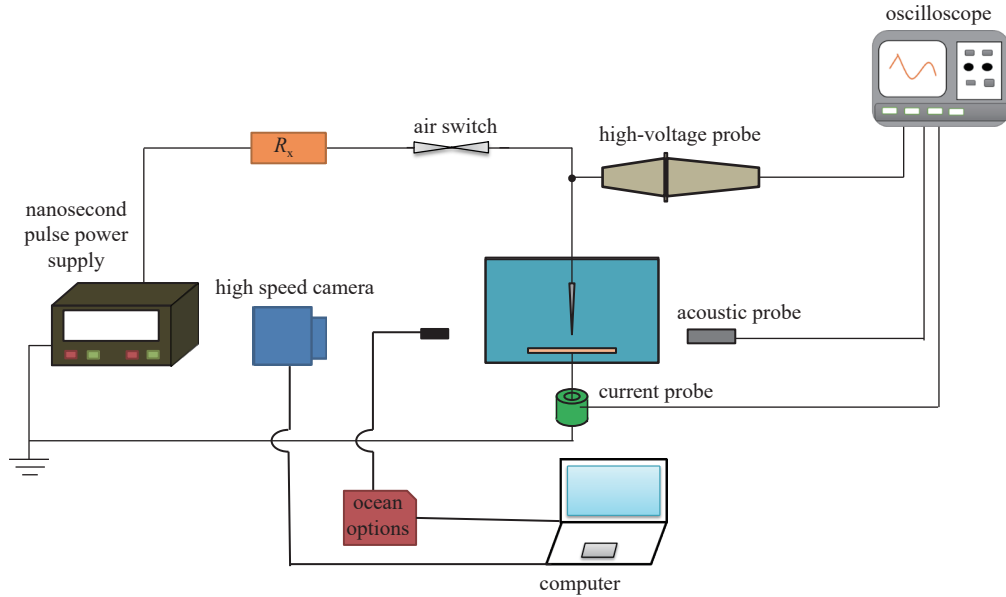


Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

图 1 实验装置图

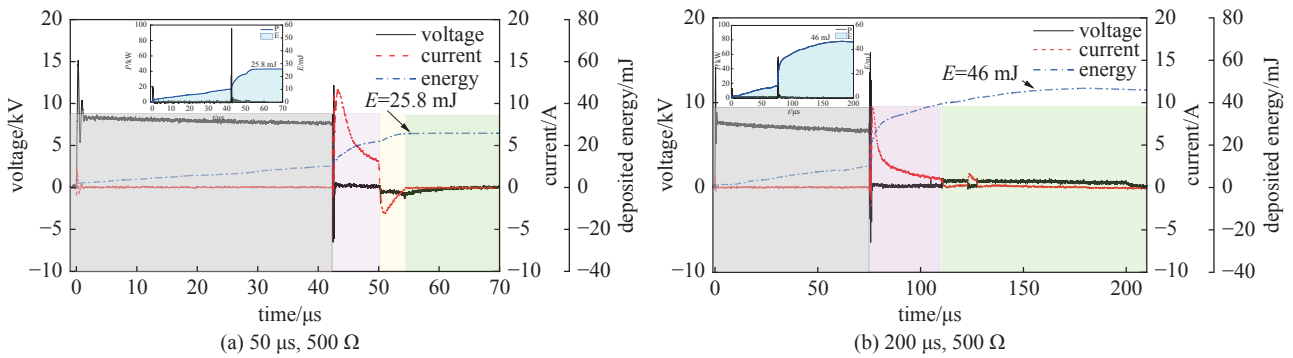


Fig. 2 Pin-plate spark discharge waveform diagram

图 2 针-板火花放电波形图

用。为了方便分析放电过程,在短脉宽模式下,放电过程分为预击穿阶段、火花放电阶段、反向放电阶段及熄弧后气泡发展及溃灭阶段<sup>[11]</sup>,而在长脉宽模式下放电过程分为预击穿阶段、火花放电阶段及熄弧后气泡发展及溃灭阶段。

(1) 预击穿阶段,如图 2(a)和图 2(b)所示的 0 时刻附近灰色部分,为前期流注发展模式<sup>[2]</sup>。文献 [11] 中李显东等人对前期流注发展进行了详细研究。

(2) 主放电(火花放电)阶段,水介质间隙被击穿,形成放电通道,针-板之间电压从 8 kV 迅速降为 0,回路电流在几百 ns 之内迅速升高至 10 A。长脉宽条件下放电的回路电流更小,这与预击穿阶段能量损耗相关,但长脉宽条件下主放电阶段持续时间 70 μs 是短脉宽条件下的 10 倍,电路中沉积能量主要在主放电阶段,因此长脉宽条件下放电总体沉积能量远远大于短脉宽条件下放电。

(3) 反向放电阶段,电流曲线出现反向脉冲,这是因为短脉宽条件下放电被电源固态开关瞬间截断,如图 2(a)中红色区域,针-板之间形成反向电场<sup>[16]</sup>。电源关断时正向电场迅速减小,反向电场主导放电,在主放电阶段留下的等离子体通道中继续放电,形成反向电流,持续时间 5 μs,因此反向放电阶段只存在于短脉宽条件下(电流被截断时发生)。

(4) 熄弧后大气泡发展及溃散阶段。在长脉宽条件下,这一阶段出现了二次电流脉冲,如图 2(b)中绿色区域电流曲线所示,放电电流在降为 0 一段时间后又升高到 2 A 左右的峰值随后回到 0。这是由于电源能量较小引起的,主放电阶段后期能量不足回路电流减小,导致放电通道熄灭、回路被截断,因此电极间电流归零电压残存;随后电源残存能量致使残存等离子体通道二次击穿,但因电路能量不足以维持放电会再次熄弧,熄弧后残存电压维

持低电压。短脉宽条件下放电则直接进入气泡发展及溃散阶段。

由上面分析发现,小能量下施加电压脉宽对放电的影响主要在于击穿发生后的能量沉积。脉冲持续时间越长,击穿发生后电源电容对负载放电时间越长、放电发展越充分,主放电过程不会被电源开关截断,沉积能量较大,气泡发展及溃灭过程时间更长。但是,放电能量不足以使放电转换为高电导率的电弧,长脉宽条件下主放电阶段后期会出现放电熄灭、重燃现象。

### 2.2 不同脉宽等离子体放电图像及气泡脉动过程

上文的结果表明,脉冲持续时间对放电过程存在影响。为明确放电发展过程,我们采用高速相机背光拍摄模式拍摄了放电及后期气泡发展过程,相机拍摄速度为20万帧/s,所得图像如图3所示,图3(a)、图3(b)中下方蓝色方波脉冲代表相机的门宽和步长,每5 μs内进行一次拍摄,单帧曝光时间1 μs。图3(c)、图3(d)各放电图像左上角的数字代表图片拍摄序号,在图像下方给出了拍摄时刻。

图3(a)和图3(c)分别为脉冲宽度30 μs时的电流波形图及对应的放电图像。可以看到,frame#(-1)针尖部分发展出微气泡,为前期流注发展,5 μs后通道被击穿。Frame#0和frame#1可明显观察到主放电,放电通道存在分叉。Frame#2和frame#3对应反向放电阶段,此时放电减弱,与电流曲线变化趋势相对应,证明存在反向放电。Frame#4

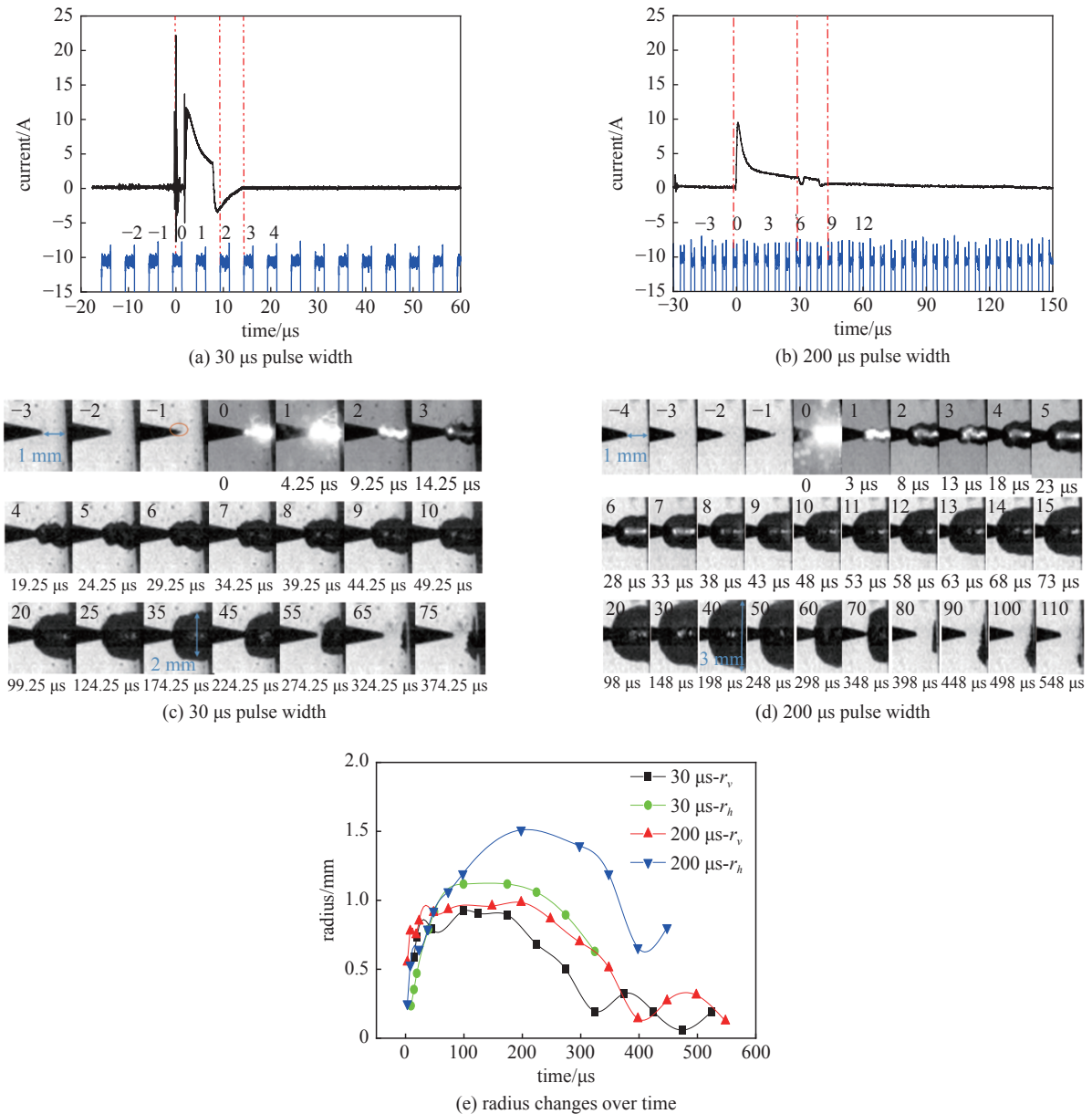


Fig. 3 Pin-plate spark discharge process

图3 针-板火花放电过程

及后续的图像给出了放电结束后气泡的发展及溃灭过程。前期气泡表面弯曲与电弧曲度一致,温度相对高的等离子体对周围液体加热汽化形成低密度区,通道内的温度和压力急剧升高,等离子体通道不断膨胀随着热量扩散加热逐渐均匀,在界面压力梯度的作用下,气泡逐渐向圆形演化<sup>[9]</sup>,在 174 μs 时气泡发展到最大,之后气泡内部能量不足以支撑气泡扩大,在静水压力等外力作用下开始缓慢收缩并逐渐溃散。气泡脉动过程可采用 Rayleigh-Plesset 模型进行分析<sup>[9]</sup>。

$$\frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho_L} = R(t) \frac{d^2 R(t)}{dt^2} + \frac{3}{2} \left[ \frac{dR(t)}{dt} \right]^2 + \frac{4\mu}{\rho_L R(t)} \frac{dR(t)}{dt} + \frac{2S}{\rho_L R(t)} \quad (1)$$

式中:  $t$  为时间;  $R(t)$  为气泡半径;  $P_B(t)$  为气泡内压力;  $p(t)$  为水在无限大时的压力;  $\rho_L$  为水的密度;  $S$  为水的表面张力;  $\mu$  为动力黏度系数。

由 frame#45 至 frame#65 可看到,气泡沿铜板电极面溃散,这说明电极板的存在影响了气泡溃灭过程。这种现象可以从 Bjeknes 力对气泡运动特征的作用来解释,流体中脉动物体之间的相互作用被称为 Bjeknes 力<sup>[17]</sup>,当气泡在刚性表面附近发生振荡时坍塌阶段会受到刚性表面的强烈吸引<sup>[18]</sup>,因此气泡向铜板电极面溃散,因为气泡中存在不溶于水气体,气泡半径在溃散过程呈现出反复振荡的趋势。

图 3(b)和图 3(d)分别给出了脉冲宽度为 200 μs 时的电流波形图及对应的放电图像。预击穿阶段的发展时间更长,观测到明显针尖前气泡长时间发展如图 frame#(-3) 至 frame#(-1), frame#0 至 frame#5 对应击穿时放电,放电十分剧烈,形成多个明显的分叉,长脉宽条件下放电持续时间更长、对周围气泡传热更为剧烈。Frame#6 至 frame#9 对应二次电流脉冲,表明存在二次放电。放电结束后,气泡缓慢发展,在放电 198 μs 时气泡直径达到最大值,为 1.5 mm,是脉宽 30 μs 时最大气泡直径的 1.5 倍。随后气泡缓慢收缩并逐渐溃散,气泡半径在溃散过程同样呈现出反复振荡的趋势,图 3(e)对应不同气泡半径发展,其中  $r_v, r_h$  分别为图中竖直与水平方向半径变化。

### 2.3 水中脉冲火花放电光学及声学特性

(1) 自辐射光谱揭示更多等离子体信息, 180~900 nm 波长范围内典型火花光谱图如图 4 所示。

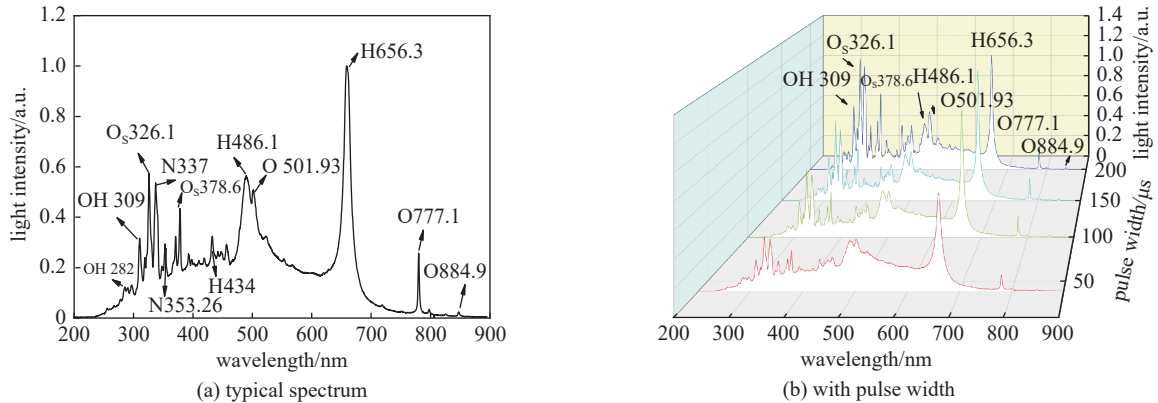


Fig. 4 Pin-plate spark discharge spectra

图 4 针-板火花放电光谱图

图 4(a)给出了脉宽 30~200 μs 范围内光谱,与文献 [1] 中单次大电流水中放电光谱图不同,原子谱线较多。特征谱线说明 N, OH, H, O 等活性粒子大量存在。波长 658 nm 左右的  $H_\alpha(n=3\sim 2)$  谱线最强,表明水中火花放电  $H_\alpha$  跃迁更易发生,  $H_\alpha$  及波长 486.1 nm, 434.0 nm 巴尔末系氢原子是放电通道的重要组成部分。O 谱线较多,说明放电产生 O( $O_S$  326.1 nm, 378.6 nm 及水中放电常见激发态 777 nm 和 844 nm 谱线)相关的自由基最多。水中 O, H 原子的主要生成反应为



电子碰撞水分子产生电离,同时形成激发态的粒子。这些反应均为电子直接碰撞解离反应<sup>[19]</sup>。

OH 自由基谱线主要是基态吸收峰 282 nm 及 309 nm,水中不通入气体时,OH 自由基反应为<sup>[20]</sup>



值得注意的是,火花放电光谱图中有 N(337 nm, 353 nm) 原子光谱有两种原因,一是水中原先存在微气泡,二是重频放电过程中产生冲击波引起水面振荡、空气浸入水中,从而出现 N 光谱谱线。

如图 4(b) 所示,随着脉宽增加光谱特征谱线强度增加但典型谱线不变,表明活性粒子数增加,粒子种类没有太多变化。可以从能量角度进行分析,随脉宽增大能量注入增加,活性粒子数量增加,但水中化学反应不变,所以自由基种类并没有改变。电子密度由 Gigosos 计算出的适用于平衡和非平衡等离子体的电子密度计算公式计算<sup>[21]</sup>

$$H_{\alpha} : \Delta\lambda_{1/2} = 0.549 \text{ mm} \times \left[ \frac{N_e}{10^{17} \text{ cm}^{-3}} \right]^{0.67965} \quad (6)$$

可以计算在实验条件下,图 4(b) 中电子密度可能在  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  数量级。

(2) 声压幅值和时域脉冲脉宽是合成中低频声技术的关键参数,黎哈东等人研究单次纳秒脉冲放电可以在空气中产生脉宽为  $\mu\text{s}$  级的脉冲声波<sup>[22]</sup>,水中火花放电导致的声学效应也十分显著,实验中将空气声波探头置于水槽壁面附近进行测量,得到初步结果如下。

图 5(a) 给出了时域中随着脉宽改变声波特性变化,发现在脉宽低于  $150 \mu\text{s}$  时,单次脉冲放电可以产生  $110 \sim 150 \mu\text{s}$  的脉冲声波,而脉宽高于  $150 \mu\text{s}$  时声波脉宽保持在  $150 \mu\text{s}$ 。图 5(b) 给出了频域范围分布,表明火花放电频率主要分布在低频区域  $1 \text{ Hz} \sim 1.5 \text{ kHz}$ ,脉冲持续时间对频率分布范围没有影响。

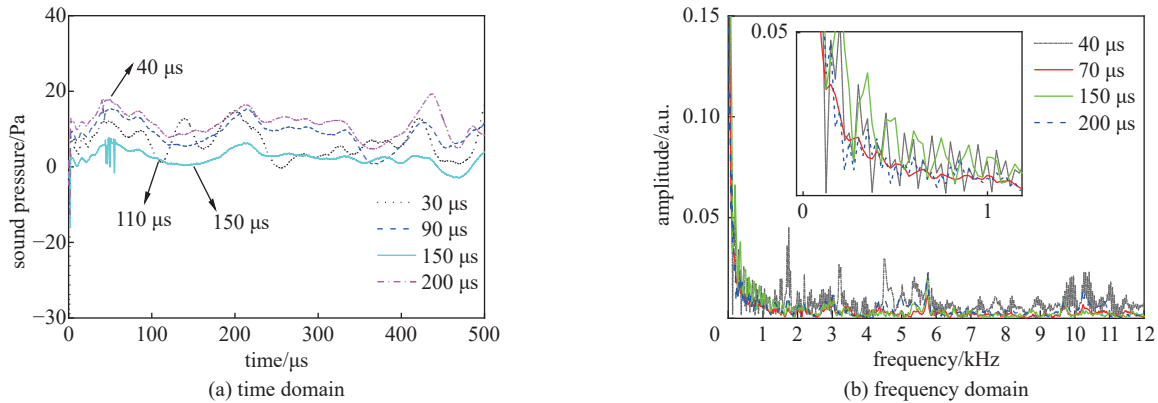


Fig. 5 Acoustic diagram of the pin-plate spark discharge

图 5 针-板火花放电声学图

### 3 结 论

本文通过针-板结构水中微秒脉冲放电平台及电光学诊断平台,研究了在实验条件下脉冲宽度对放电过程及其放电特性的影响,得出了如下结论:

在电源能量较小情况下,脉冲持续时间对放电特性影响明显。脉宽较窄时,放电过程分为 4 个阶段:预击穿阶段,主放电(火花放电)阶段,反向放电阶段及熄弧后阶段。反向放电阶段可能是由于持续放电时针-板之间形成反向电场,高速相机拍摄到此阶段有明显放电现象。长脉宽情况下系统储能得以完全释放,放电分为 3 阶段:预击穿阶段,主放电(火花放电)阶段及熄弧后阶段,其中熄弧后阶段可能会发生二次放电(重燃)现象,放电图像及电学波形图证明了存在二次放电。板电极结构对气泡后期溃灭过程影响较大,气泡并非呈现简单的收缩脉动,气泡会沿着板电极表面收缩溃灭,溃灭结束时气泡在板电极附近振荡。

研究了小能量情况下脉宽对放电光谱以及声学的影响。随着脉宽的增加,火花放电持续过程增加,等离子体呈现增强趋势,活性粒子数量明显增加,电子密度在  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  量级。低重频条件下,空气微气泡进入水中,光谱中 N 谱线明显。本实验条件下,声波来源为放电通道膨胀产生的冲击波,脉宽低于  $150 \mu\text{s}$  时单次脉冲放电可以产生低于  $150 \mu\text{s}$  的脉冲声波,当脉宽继续增大,声波脉宽并不随着脉宽的增加继续增加,而是保持  $150 \mu\text{s}$  不变。

上述结论对水中小能量脉冲火花放电的机理研究有一定参考价值,有望为相关领域的应用如小间距的水中 DBD,水下声源,声音合成等提供一定参考。此外,光学特性及声学特性方面本文主要研究了电源参数对水中火花放电的影响,更为深入细致的物理化学过程需要进一步研究。

## 参考文献：

- [1] 尤特金 Л·А·Ю. 液电效应[M]. 于家珊, 译. 北京: 科学出版社, 1962. (ткин Л·А·Ю. Электрогидравлический эффект[M]. Yu Jiashan, trans. Beijing: Science Press, 1962)
- [2] 李元, 温嘉焯, 李林波, 等. 液体介质微/纳秒脉冲放电的特性与机理: 现状及进展[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(6): 2-14. (Li Yuan, Wen Jiaye, Li Linbo, et al. Characteristics and mechanisms of streamer discharge in liquids under micro/nano-second pulsed voltages: status and advances[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(6): 2-14)
- [3] 李元, 孙滢, 刘毅, 等. 液电效应及电火花震源的研究现状与展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(3): 753-765. (Li Yuan, Sun Ying, Liu Yi, et al. Electrohydraulic effect and spark source: current situation and prospects[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(3): 753-765)
- [4] 卢新培, 潘垣, 张寒虹. 水中脉冲放电的电特性与声辐射特性研究[J]. *物理学报*, 2002, 51(7): 1549-1553. (Lu Xinpei, Pan Yuan, Zhang Hanhong. The electrical and acoustical characteristics of pulsed discharge in water[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(7): 1549-1553)
- [5] Graham W G, Stalder K R. Plasmas in liquids and some of their applications in nanoscience[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44: 174037.
- [6] Malik M A. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient?[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2010, 30(1): 21-31.
- [7] Sakiyama Y, Tomai T, Miyano M, et al. Disinfection of *E. coli* by nonthermal microplasma electrolysis in normal saline solution[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94: 161501.
- [8] 孙冰. 液相放电等离子体及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (Sun Bing. Discharge plasma in liquid and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2013)
- [9] Liu Yi, Zhao Yong, Ren Yijia, et al. Analysis of cavities characteristics of underwater pulsed current discharge[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2021, 30: 085005.
- [10] 赵勇, 刘毅, 任益佳, 等. 水中大电流脉冲放电的激波传播特性[J]. *高电压技术*, 2021, 47(3): 876-884. (Zhao Yong, Liu Yi, Ren Yijia, et al. Shock wave propagation characteristics of pulsed high-current discharge in water[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(3): 876-884)
- [11] 李显东. 不均匀电场下水中微秒脉冲放电过程及机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018. (Li Xiandong. Research on process and mechanism of underwater microsecond pulsed discharges under nonuniform electric fields[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018)
- [12] 刘小龙, 黄建国, 雷开卓. 水下等离子体声源的声效率分析与研究[J]. *高技术通讯*, 2012, 22(5): 552-557. (Liu Xiaolong, Huang Jianguo, Lei Kaizhuo. Analysis and research on acoustic efficiency of underwater plasma sound source[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2012, 22(5): 552-557)
- [13] Li Handong, Li Yutai, Wang Xinxin, et al. Effect of time interval between pulses on the synthetic sound generated by repetitive nanosecond pulse discharge[J]. *Physics of Plasmas*, 2021, 28: 073502.
- [14] 韩若愚, 欧阳吉庭, 李琛, 等. 基于金属丝阵电爆炸的水中声源与冲击波源: CN202010715479.2[P]. 2020-10-27. (Han Ruoyu, Ouyang Jiting, Li Chen, et al. Underwater sound source and impact wave source based on metal wire array electricity explosion: CN202010715479.2[P] 2020-10-27)
- [15] 陈聃. 水中等离子体声源放电机理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016. (Chen Dan. Research of discharge mechanism of underwater plasma acoustic source[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016)
- [16] Brandt S, Schütz A, Klute F D, et al. Dielectric barrier discharges applied for optical spectrometry[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2016, 123: 6-32.
- [17] Zhang Aman, Li Shuai, Cui J. Study on splitting of a toroidal bubble near a rigid boundary[J]. *Physics of Fluids*, 2015, 27: 062102.
- [18] Zhang Zhi, Wu Jian, Li Jilong, et al. Spatial restriction on properties of nanosecond pulsed laser ablation of aluminum in water[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53: 475204.
- [19] 兰生, 章婧. 基于斯塔克理论的水中电弧放电电子密度光谱诊断[J]. *电机与控制学报*, 2015, 19(3): 96-99. (Lan Sheng, Zhang Jing. The spectrum diagnosis of electron density caused by spark discharge in water based on Stark theory[J]. *Electric Machines and Control*, 2015, 19(3): 96-99)
- [20] 刘忠杰, 关根志, 厉天威, 等. 水中放电的光谱测量实验研究[J]. *高电压技术*, 2006, 32(5): 63-64,72. (Liu Zhongjie, Guan Genzhi, Li Tianwei, et al. Study of discharge inside water bubbles using spectroscopic measurements[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(5): 63-64,72)
- [21] Gigoso M A, González M Á, Cardeñoso V. Computer Simulated Balmer-alpha, -beta and -gamma Stark line profiles for non-equilibrium plasmas diagnostics[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2003, 58(8): 1489-1504.
- [22] 黎海东, 罗海云, 陈喆, 等. 纳秒脉冲空气放电的声学特性实验研究[J]. *高电压技术*, 2021, 47(3): 840-848. (Li Handong, Luo Haiyun, Chen Zhe, et al. Experimental study on the acoustic characteristics of nanosecond pulsed discharge in atmospheric air[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(3): 840-848)