# 储能电容充电电压对激波特性的影响分析

周静 李丹红<sup>\*</sup> 尚海燕 惠喆 (油气钻完井技术国家工程研究中心西安石油大学井下测控研究室 西安 710065)

# Analysis of the Effect of Charging Voltage of Energy Storage Capacitor on Impulse Wave Characteristics

ZHOU Jing, LI Danhong\*, SHANG Haiyan, HUI Zhe

(Downhole Measurement and Control Research Department of Xi'an ShiYou University, National Engineering Research Center for Oli & Gas Drilling and Completion Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract The plasma impulse source generated by the "liquid-electric effect" has great application value in the direction of rock fragmentation, geological guidance, location determination, etc. At present, there is still a lack of further understanding of the correlation between charging voltage and plasma discharge characteristics and impulse wave characteristics in the discharge circuit. Based on the experimental platform of underwater plasma discharge, a simulation model of underwater plasma impulse source is established to compare and analyze the measured and simulated results of typical voltage, current and impulse waveform of plasma impulse source discharge. Subsequently, the discharge characteristics and impulsive waveform characteristics at different charging voltages are studied by this simulation model. The results show that when the charging voltage is increased from 15 kV to 25 kV, the peak impulse strength increases by 31.9% and the impulse energy increases by 53.8%, and the conversion efficiency decreases by 28.4% because the rate of increase of external circuit energy is greater than the rate of increase of impulse energy. By varying the charging voltage to predict the impulsive waves, the intensity, energy loss and energy conversion efficiency of the impulsive waves under different charging voltages are compared and analyzed. It provides a reference basis for further research on the optimal charging voltage for different engineering applications of underwater impulsive sound sources. The charging energy storage part of the underwater plasma impulse sound source can also be designed according to the influence of the charging voltage on the impulse wave characteristics.

**Keywords** Impulse wave characteristics, Charging voltage, Impulse wave strength, Energy conversion efficiency

摘要 利用"液电效应"产生的等离子体冲激声源在岩石破碎、地质导向、确定位置等方向有巨大的应用价值,目前关于 等离子体放电回路中充电电压与放电特性、冲激波特性的关联性仍缺乏进一步深入了解。基于水下等离子体放电实验平台, 建立水下等离子体冲激声源的仿真模型,对比分析冲激声源放电典型的电压、电流及冲激波波形的实测和仿真结果,通过仿 真模型研究不同充电电压下的放电特性与冲激波特性。结果表明,当充电电压从 15 kV 提高到 25 kV 时,冲激波强度峰值增 大了 31.9%,冲激波能量增大了 53.8%,因外电路能量增加速率大于冲激波能量增加速率促使其转化效率降低了 28.4%。通过 改变充电电压来预测冲激波特性,对比分析不同充电电压下的冲激波强度、能量损耗及能量转化效率等,为水下冲激声源不 同工程应用选取最佳的充电电压提供参考依据,也可根据充电电压对冲激波特性影响来设计水下等离子体冲激声源的充电 储能部分。

**关键词** 冲激波特性 充电电压 冲激波强度 能量转化效率 中图分类号: O53 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202208009

**收稿日期:**2022-08-10 基金项目:中科院 A 类先导项目 (XDA14030103); 国家自然科学基金项目 (51874238)

<sup>\*</sup> 联系人: Tel:18229006881; E-mail: 1821798375@qq.com

液体中的高压放电使放电通道介质迅速气化、 膨胀从而产生高强度的冲激波,与传统的水下声源 相比,如爆炸声源、电声换能器和激光等<sup>[1]</sup>,基于 "液电效应"的等离子体冲激声源具有声源级高、频 谱宽、可重复激发等多种特点,使得该声源在石油 地质勘探、海洋地震勘探、油田解堵等方面有很大 的应用价值。水下等离子体放电产生除冲激波之 外的能量,还有泄露能量、通道内能、光热声辐射等 能量,因此研究水下等离子体冲激波特性及如何提 高冲激波能量转换效率是水下等离子体冲激波实 际应用需要考虑的问题。

为将等离子体冲激声源应用在各个领域中,国 内外学者对冲激波特性影响因素及能量转换效率 进行了相关研究。2020年, Aghdam<sup>[2]</sup> 通过建立水中 脉冲放电初始阶段的数值模型,研究不同电压幅值 等对等离子体起始过程的影响。华中科技大学刘 毅<sup>[3]</sup>团队利用针-针放电电极来评估液电脉冲激波 特性,通过实验表明传递到电弧通道的功率与能量 主要决定激波强度,电弧长度的增加可引起注入电 弧功率与能量的增大,能量转换效率可提高7.7%。 刘思维等人[4]通过建立的液电大电流脉冲激波实验 平台,利用高速摄像法研究正极性针-板放电模式 对激波强度的影响,结果表明放电电压由 15 kV 增 大到 30 kV,可促使亚音速流注向超音速流注转化、 激波强度增大。梁孟孟<sup>[5]</sup>基于水中微生物污染问题, 设计用于研究压力波特性实验装置,表明电压由 2.0 kV 提高到 3.5 kV, 能量注入效率下降了 7.1%。放 电回路中的充电电压对放电电流、等离子体通道沉 积能量等有较大的影响,进而会直接影响冲激波强 度与能量转化效率等,而目前关于储能电容充电电 压与放电特性、冲激波特性的关联性仍缺乏深入了 解。通过构建与实验系统相应的数值模型表征水 下冲激波的产生和传播过程,根据充电电压的不同 来预测冲激波特性,可进一步研究针对其不同的实 际工程应用选择不同特性的水下等离子体冲激声源。

为研究分析水下等离子体冲激波特性,本文基 于水下等离子体放电实验系统,建立水中脉冲放电 过程的数值模型,对比放电典型冲激波特性的实测 和仿真结果,研究储能电容充电电压对冲激波特性 (预击穿时延、泄露能量、冲激波强度及能量转换效 率)的影响,并分析注入电极间隙功率、沉积通道能 量、冲激波形及冲激波能量的对应关系,为促进水 下冲激波的广泛工程应用奠定理论基础。

## 1 水下等离子体冲激波的产生与传播

水下等离子体冲激波的产生与传播涉及复杂 的物理、化学、电学等过程,易受电极结构、等效回 路参数、介质液体环境参数等因素的影响。水下冲 激声源的产生与传播可分为以下3个阶段:预击穿 阶段、电弧击穿阶段、主放电阶段<sup>[6]</sup>。

预击穿阶段是水中放电的初始阶段,电容上高 压施加到放电电极,因场致效应电极表面产生微小 凸起引起局部电场增强,进而加热周围水介质形成 微气泡形成击穿引燃区,使附近水分子受热气化、 电离。在该放电过程中,放电电极间隙存在泄露电 流,电容电压有一定程度下降,产生泄露能量E<sub>1</sub>。过 大的预击穿时延t<sub>del</sub>导致产生较多的泄露能量,泄露 能量E<sub>1</sub>可表示为

$$E_{\rm l} = E_{\rm c} - E_{\rm b} \tag{1}$$

其中,电容初始储能 $E_c = CU_0^2/2, U_0$ 为电容初始电压; 击穿时刻储能电容能量 $E_b = CU_b^2/2, U_b$ 为击穿时刻 电容电压。

电弧击穿阶段是指等离子体通道流柱的形成、 发展,直到连通电极间隙至击穿的过程。在电场存 在时间足够长的情况下,预击穿阶段的"气化-电离" 循环过程在较弱场强下形成流柱,流柱以超音速或 亚声速向另一电极发展<sup>[7]</sup>,形成初始电弧直至电极 间隙被击穿,电极间隙间建立起等离子体通道。国 防科技大学王一博<sup>[8]</sup>通过建立放电过程的数值模型 并结合实验验证了击穿时刻需要满足以下两个条 件:边界沸腾(指边界水的温度达到某个临界值时, 水分子获得足够的动能来克服彼此之间的氢键,从 而较为容易地实现气化并进入跨接两电极的初始 电弧。)即等离子体通道温度大于 773 K;剩余电压 足够(边界沸腾时,间隙电场能够将边界水转换为电 弧。)即电极间隙场强大于 8 kV/cm。

主放电阶段是指从电弧击穿阶段形成电弧到 产生冲激波和放电电流的过程。电弧在外在电路 高场强的持续加持下,电容中能量迅速注入等离子 体通道,转换为通道沉积能量。通道沉积能量促使 电弧加速向外膨胀挤压通道的水介质,因介质难压 缩性而产生强激波,同时还伴有光、声辐射等现象, 由于光辐射能量、声辐射能量占通道沉积能量比重 较小,通常可忽略不计<sup>[9]</sup>。因此,等离子体通道能量 平衡表达式为

$$E_{ch} = E_{in} + E_{w}$$
 (2)  
其中,  $E_{ch}$ 为通道沉积能量,  $E_{in} = \frac{PV_{ch}}{\gamma - 1}$ 为通道内能<sup>[10]</sup>,

(4)

 $E_w$ 为冲激波能量;绝热系数 $\gamma = 1.3, p$ 为等离子体通 道内部压强, $V_{eb}$ 为等离子体通道体积。

水下等离子体冲激声源外部放电回路的等效 电路图如图1所示,C为储能电容,L为回路电感, R为回路电阻,则等效回路的微分方程

$$L\frac{di(t)}{dt} + (R + R_{ch})i(t) - U_C(t) = 0$$
 (3)

其中,i(t)放电电流, $U_c(t)$ 储能电容电压, $R_{ct}$ 等离子体通道电阻,R、L分别为回路电阻和电感。



图1 放电回路等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of discharge circuit.

由于等效电路为 RLC 电路, 使得整个电路欠阻 尼振荡。通过求解上述等效回路微分方程式 (3) 可 得放电电流*i*(*t*)表达式

$$i(t) = \frac{U_C}{\omega} e^{-t/\tau} \sin(\omega t)$$

$$\ddagger \psi, \ \tau = \frac{2L}{R_{\rm ch} + R}, \ \omega = \left(\frac{1}{LC} - \frac{1}{\tau^2}\right)^{1/2} \circ$$

\* \*

### 2 水下等离子体放电实验系统及结果

#### 2.1 水下等离子体放电实验系统

水下等离子体放电实验系统原理如图 2 所示, 主要由充电系统、放电系统及测量系统组成。充电 系统:采用调压器 T1 连接升压变压器 T2,由硅堆 D整流为直流高压向储能电容 C 充电。放电系统: 当充电电压达到某一设定值时,触发真空开关 TVS(Triggered Vacuum Switch)使其导通,电容 C 储 存能量瞬间施加至放电电极间隙,开始放电。测量 系统:采用高压探头(Tektronix P6015A)和电流探头 (Pearson 1330)测量电极间隙两端的放电电压和电 流波形,采用 PCB 压力传感器(型号:W138A01)测 量冲激波波形,放置于距电极间隙中心水平距离 D 为 8 cm 处,利用示波器同步记录放电过程的电压、 电流和冲激波波形。



Fig. 2 Underwater plasma impulse sound source experiment system schematic

该实验放电电极为针-板电极,电极间隙 5 mm, 放置在装有自来水的不锈钢桶中。实验充电电压U。 为 20 kV,储能电容 C 为 15 μF。

#### 2.2 水下等离子体放电实验结果

水下等离子体放电实验得到的典型电压、电流、 冲激波形如图 3 所示。由电压波形可以看出,阶段 I 为水中等离子体放电的预击穿和电弧击穿阶段 (0~190 μs),阶段 II 为主放电阶段(>190 μs)。由于 击穿过程用时较短,无法从实验结果波形图上分别 得到具体的预击穿时间和击穿时间。在击穿后 15 μs,放电电流达到首峰值 25 kA,放电电流、电压 均呈现二阶振荡衰减现象,由 PCB 压力探头实际测 量到的冲激波首峰值为 5 MPa。



图3 水中等离子体放电典型的电压、电流及冲激波波形

Fig. 3 Typical voltage, current and impulse waveforms of plasma discharge in water

#### 3 不同电压下冲激波特性的分析与讨论

根据实验系统在多物理仿真软件 Comsol Multiphysics 中进行建模和数值模拟,由于结构对称 采用二维建模。其中阳极为长 10 mm、直径 1 mm 的不锈钢针, 阴极为直径 2 mm、厚度 1 mm 的不锈 钢圆板。水下等离子体放电外回路等效为 RLC 电 路,电路输出端分别接阳极和阴极,实验所采用 15 μF 的储能电容结合实验放电电流波形,可计算 出放电电路等效电感为 8 μH,等效电阻为 100 mΩ。

在进行物理场设置时,将水中设置为电流场和 流体传热场,多物理场选择电磁加热耦合,进行瞬 态模拟计算。由于实验为集中加热,因此需要将水 箱壁设置为热绝缘,温度为参考温度 273.15 K,环境 压强 101325 Pa<sup>[11]</sup>。构建上述电极结构及放电环境, 根据柱状通道模型仿真得到温度、电势,从而分析 水下等离子体冲激波特性。

在放电过程中遵循电流场与流体传热耦合中的基本规律,主要考虑水中热传导和电流焦耳加热 所引起的改变<sup>[12]</sup>,不考虑水自身所产生动量即 u=0。

电场方程

$$\nabla \cdot J = Q_{j,v} \tag{5}$$

$$= \left(\sigma + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial}{\partial t}\right) E \tag{6}$$

$$E = -\nabla V \tag{7}$$

热力学方程

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q_{\rm rh} \tag{8}$$

$$q = -k\nabla T \tag{9}$$

$$Q_{\rm rh} = \frac{1}{2} Re(J \cdot E^*) \tag{10}$$

其中,电流密度 J,电荷密度  $Q_{j,v}$ ,电导率 $\sigma$ ,真空介电 常数  $\varepsilon_0$ ,相对介电常数  $\varepsilon_r$ ,电场强度 E,电势 V,密度 $\rho$ , 恒压热容 $C_p$ ,温度 T,热通量q,导热系数 k,电损 耗 $Q_{tho}$ 。

#### 3.1 等离子体冲激波实验与仿真对比

水下等离子体放电击穿时刻的温度和电势分 布图如图 4 所示,在 t=181 us 时温度达到 774 K、电 极间隙场强为 39.8 kV/cm,满足上文中所提到的击 穿条件:边界沸腾即通道温度大于 773 K,剩余电压 足够即电极间隙场强大于 8 kV/cm。

水下等离子体冲激波实验测量和数值仿真得 到的放电电流、冲激波形如图 5 所示,等离子体冲 激波特性实测与仿真分析结果如表1 所示。



- 图4 击穿时刻温度与电势分布图 (a) t=181 μs 时刻温度分布
   (b) t=181 μs 时刻温度分布
- Fig. 4 Temperature and potential distribution diagram:
  (a) temperature distribution at *t*=181 μs; (b) potential distribution at *t*=181 μs



图5 水中等离子体冲激波特性图 (a) 放电电流实测与仿真图 (b) 冲激波实测与仿真图



#### 表1 水下等离子体冲激波特性的仿真与实测结果分析

 Tab. 1
 Simulation of underwater plasma impulse wave characteristics and analysis of measured results

冲激波特性	<i>t</i> <sub>del</sub> /ms	Im/kA	$p_{\rm rpeak}/{\rm MPa}$
实测结果	0.190	25	5.00
仿真结果	0.181	25.18	5.08

通过对比图 5、分析表 1 可知, 仿真的预击穿时 延t<sub>det</sub>小于实测结果, 是因为实测结果将预击穿和击 穿时间总和在一起, 但不能盲目将二者结果作差得 到击穿过程用时。冲激波强度峰值*P*<sub>npeak</sub>实测结果偏 低, 是因为数值仿真过程中忽略了光、声辐射能量 等外界环境因素的影响; 且仿真计算中仅考虑了冲 激波首波, 未考虑实际放电中产生的二次波、及水 箱壁反射波叠加等现象, 造成仿真与实测冲激波形 仅在首波峰处有较好的吻合。在仿真中将等离子 体通道假设为理想柱状模型, 导致放电电流有细微 差异。预击穿时延、放电电流及冲激波峰值的仿真 结果均与实测数据高度契合, 为之后冲激波特性影 响因素的仿真计算奠定一定的理论基础。

在剧烈放电过程中,由于粒子间的库仑力和收 缩效应,采用修正的气体状态方程来描述等离子体 通道内压强 *p*<sup>[13]</sup>。

$$p = nkT - \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 R_{\rm ch}^2} - \frac{e^2}{32\pi^2 \varepsilon_0} \left(\frac{4\pi n}{3}\right)^{4/3}$$
(11)

其中,真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m,真空介电常数  $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m,单位电量 $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C, 玻尔 兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K, T 为等离子体通道温 度, n 为粒子数密度, I 为通道电流。

因此,距离放电电极间隙中心水平 D 处的冲激 波强度为

$$P_{\rm r} = \frac{p \cdot a}{D} \tag{12}$$

其中, a 为通道半径。

由质量守恒方程可知通道粒子数密度 n 如式(13)。

$$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} = \frac{2}{a} \left( \frac{f\sigma_{\mathrm{B}}T^4}{\varepsilon_{\mathrm{v}}} - n\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t} \right)$$
(13)

式中, 斯蒂藩辐射常量 $\sigma_{\rm B} = 5.6705 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ , 水分子潜热 $\varepsilon_{\rm v} = 2.54 \times 10^{-20} \text{ J}$ , 辐射系数 f=0.3。

等离子体通道内压强 p 与通道粒子数密度 n 时间特性如图 6 所示,随放电开始电容储存能量瞬间释放,通道内部压强急剧增大到峰值 51.08 MPa,

同时通道对外做功压强减小,随后使之呈指数衰减; 粒子数密度数量级可达10<sup>27</sup> m<sup>-3</sup>,预击穿阶段温度迅 速上升使周围水介质加热气化、分解和电离,粒子 数密度迅速增大,同时由于通道快速膨胀,也会导 致粒子数密度减小,因此粒子数密度会出现峰值 1.62×10<sup>27</sup> m<sup>-3</sup>,之后也会呈指数形式衰减。



- 图6 等离子体通道内压强 p 与粒子数密度 n 的时间特性图
   (a) 压强 p / MPa 时间特性 (b) 密度 n/m<sup>-3</sup>时间特性
- Fig. 6 Time characteristic diagram of pressure and density in the plasma channel: (a) pressure-time characteristic; (b) density-time characteristic

#### 3.2 不同充电电压下等离子体冲激波特性

水下等离子体放电过程中,预击穿时延影响由 泄露电流引起的泄露能量,电弧击穿阶段的放电电 流是决定通道沉积能量的关键因素之一,从冲激波 强度峰值可分析冲激声源所产生能量的大小。改 变储能电容的充电电压,预击穿时延t<sub>del</sub>、放电电流 峰值I<sub>m</sub>及冲激波强度峰值 p<sub>rpeak</sub>的仿真结果如图 7、8 所示。随着充电电压的增大,预击穿时延减小、放 电电流和冲激波强度均增大。这是因为放电电压 的增大,引起放电电极场强增大易于击穿,加热过 程加快。

放电电流*i*(*t*)与等离子体通道电阻*R*<sub>ch</sub>共同决定 通道沉积能量大小,影响冲激波特性。通道电阻时





Fig. 7 Trend of discharge current and impulse wave with charging voltage







变模型如下[14]

$$R_{\rm ch} = \frac{l}{\sigma_c \pi a^2(t)} \tag{14}$$

其中,*l*为通道长度, 电导率 $\sigma_{c}$  = 1.411×10<sup>-2</sup>×  $T^{3/2} \times e^{-5000/T}$ , a(t)为通道半径。

通道电阻随充电电压变化如图 9 所示,当放电 电流达到首峰值时,通道电阻降至很小值并趋于稳 定,且随着充电电压的增大,通道电阻减小。这是 因为在预击穿完成之后,放电电极间隙形成柱状的 等离子体通道,等离子体通道初始电阻较大,随着 剧烈放电的开始,放电电流迅速增大,通道温度与 压强的急剧增大会导致通道电导率上升、半径增大, 从而使通道电阻急剧变小。

在外电路参数不变的情况下,泄露能量E<sub>l</sub>和通 道沉积能量E<sub>ch</sub>是影响最大冲激波强度和冲激波能 量E<sub>w</sub>的重要因素,三者的表达式分别为<sup>[15]</sup>

$$E_{\rm l} = \frac{1}{2}C(U_{\rm c}^2 - U_{\rm b}^2) \tag{15}$$



Fig. 9 Trend of channel resistance with charging voltage

$$E_{\rm ch} = \int P_{\rm c} \mathrm{d}t = \int i(t)^2 R_{\rm ch} \mathrm{d}t \qquad (16)$$

$$E_{\rm w} = \frac{4\pi D^2}{\rho_0 c_{\rm s}} \int P_{\rm r}^{\ 2} {\rm d}t \qquad (17)$$

其中,  $P_c$ 间隙注入功率,  $P_r$ 冲激波, D为 PCB 压力传 感器与电极间隙中心水平距离,  $\rho_0=1000 \text{ kg/m}^3$ 为液 体密度,  $c_s = 1500 \text{ m/s}$ 为水中声速。

不同电容充电电压下的泄露能量、通道沉积能量及冲激波能量的变化趋势图如图 10 所示, *E*<sub>ch</sub>、*E*<sub>w</sub>随着充电电压的增大而增加, *E*<sub>l</sub>反之。其中, 冲激波能量*E*<sub>w</sub>以近乎稳定的斜率线性增长; 通道沉积能量 *E*<sub>ch</sub>上升斜率逐渐减小, 泄露能量*E*<sub>l</sub>下降斜率逐渐减小, 且按此趋势推测之后的通道沉积能量与泄露能量可能与充电电压大小无关。





and impulse energy with voltage

在电容充电电压 20 kV 时,外电路注入至电极 液体间隙的功率、沉积至等离子体通道的能量、冲 激波形及冲激波能量的对应关系如图 11 所示。注 入功率峰值为 7.85 MW,沉积到等离子体通道的能 量 253.4 J; 通道沉积能量主要用于 3 个方面: 通道内能、冲激波能量、对外辐射能量(光、声辐射等能量)。冲激波幅值为 5.08 MPa, 根据冲激波形可求出冲激波能量 117 J, 占通道沉积能量的 46.2%。





Fig. 11 Relationship between injection power, channel deposition energy, impulse wave and impulse wave energy

在水下等离子体放电过程中,存在一定程度的 能量损耗,能否得到较高的能量利用率也是需要进 一步考虑的问题。将外电路注入能量向冲激波能 量的转换效率定义为η,通道沉积能量向冲激波能 量的转换效率定义为η2。

$$\eta_1 = \frac{E_{\rm w}}{E_{\rm c}} \times 100\% \tag{18}$$

$$\eta_2 = \frac{E_{\rm w}}{E_{\rm ch}} \times 100\% \tag{19}$$

其中, *E*<sub>w</sub>为冲激波能量, *E*<sub>c</sub>为电容初始储能, *E*<sub>ch</sub>通道 沉积能量。

转化效率η<sub>1</sub>、η<sub>2</sub>随电容充电电压的变化趋势如 图 12 所示,电容充电电压 15 kV 时,η<sub>1</sub>为 4.43%、η<sub>2</sub>



图12 η1、η2随电容充电电压的变化趋势



为42.36%; 电容充电电压 25 kV 时, η<sub>1</sub>为 3.45%、η<sub>2</sub> 为 58.06%; 由于充电电压的增大, 外电路注入能量 增加速率大于冲激波能量增加速率, 冲激波能量增 加速率大于沉积能量增加速率, 导致η<sub>1</sub>随电压的增 大而减小, η<sub>2</sub>反之。

#### 4 结论

电容充电电压的变化会影响冲激波特性,不同 的冲激波特性导致水下冲激声源的工程应用不同。 结果表明,随电容充电电压增大,预击穿时延减小, 放电电流首峰值和冲激波强度峰值增大,通道电阻 减小,泄露能量减小,通道沉积能量及冲激波能量 均增大,外电路注入能量向冲激波能量的转化效率  $\eta_i$ 减小,通道沉积能量向冲激波能量的转化效率  $\eta_i$ 减小,通道沉积能量向冲激波能量的转化效率  $\eta_i$ 减小,通道沉积能量向冲激波能量的转换效率 $\eta_2$ 增大。当充电电压从 15 kV 提高到 25 kV,冲激波 强度峰值增大了 31.9%,激波能量增大了 53.8%,但 外电路注入能量向冲激波能量的转化效率降低了 28.4%。

通过对冲激波强度峰值、冲激波能量及能量转 换效率等各方面综合考虑,电容充电电压并非越高 越好。虽然较高的充电电压会产生较短的预击穿 时延、较低的泄露能量、较高的冲激波强度和激波 能量,但外电路注入能量向冲激波能量的转化效率 却较低。因此,从能量利用率及经济效益等方面综 合考虑,需根据不同的实际工程应用确定最佳的电 容充电电压。

#### 参考文献

- [1] Li Ning, Chen Jianfeng, Huang Jianguo, et al. Sounding mechanism and characteristics of various underwater so-und sources[J]. Applied Acoustics, 2009, 28(04): 241-248 (李宁, 陈建峰, 黄建国, 等. 各种水下声源的发声机理及其特性[J]. 应用声学, 2009, 28(04): 241-248(in chinese))
- [2] Aghdam A C, Farouk T. Multiphysics simulation of the initial stage of plasma discharge formation in liquids[J].
   Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(2): 025011
- [3] Liu Yi, Li Zhiyuan, Li Xiandong, et al. Effect factors of the characteristics of shock waves induced by underwater high current pulsed discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(09): 2741-2750 (刘毅, 李志远, 李显东, 等. 水中大电流脉冲放电激波影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(09): 2741-2750(in chinese))

- 第 2 期
- [4] Liu Siwei, Liu Yi, Li Xiandong, et al. Effect of electrical breakdown discharge modes on shock wave intensity in water[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2807-2815 (刘思维, 刘毅, 李显东, 等. 水间隙击穿放电模式对激波强度的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2807-2815(in chinese))
- [5] Liang Mengmeng. Study on pulsed arc discharge in water and its pressure wave characteristics [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017 (梁孟孟.水中脉冲电弧放电及其压力波特性研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017(in chinese))
- [6] Xing Zhengwei, Wang Zhiqiang, Cao Yunhe, et al. Direct impact pressure characteristics of pulsed arc discharge plasma channel in water[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(03): 832-838 (邢政伟, 王志强, 曹云 霄, 等. 水中脉冲电弧放电等离子体通道直接冲击压力 特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(03): 832-838(in chinese))
- [7] Tong Deen, Zhu Xinlei, Zhou Xiaobing, et al. Numerical simulation of the preheating process of pulse discharge in water[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(05): 1461-1467 (童得恩,朱鑫磊,邹晓兵,等.水中放电预加 热过程的数值模拟研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(05): 1461-1467(in chinese))
- [8] Wang Yibo. Theoretical and experimental study of the underwater plasma acoustic source [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012 (王一博. 水中等离子体声源的理论与实验研究[D]. 长沙: 国防 科学技术大学, 2012(in chinese))
- [9] Sun B, Kunitomo S, Igarashi C. Characteristics of ultraviolet light and radicals formed by pulsed discharge in water[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2006, 39(17): 3814–3820
- [10] Liu Yi, Huang Shijie, Zhao Yong, et al. Analysis of Arc

Impedance Characteristics of High Current Pulsed Discharge in Liquid[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(07): 2591-2598 (刘毅, 黄仕杰, 赵勇, 等. 液中大电 流脉冲放电电弧阻抗特性分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(07): 2591-2598(in chinese))

- [11] 朱志豪, 兰生, 冯志远, 等. 基于COMSOL的水中脉冲放 电等离子体数值模拟研究[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(04): 304-310
- [12] Qian Yang, Feng Yinqi, Huang Minshuang, et al. Formation and Growth of Plasma Channels Generated by Discharge of High Voltage Nanosecond Pulse in Water: A Simulation Study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(12): 1119–1129 (钱杨, 冯音琦, 黄民双, 等. 水中脉冲电压放电形成等离子体通道模拟分析[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(12): 1119–1129(in chinese))
- [13] Cao Liang. Research on the the pulsed discharge processes of underwater source and its related bubble dynamics
  [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010 (曹亮.水中脉冲放电及其气泡运动过程研究[D].长沙: 国防科学技术大学, 2010(in chinese))
- [14] Gurovich V T, Grinenko A, Krasik Ya E, et al. Simplified model of underwater electrical discharge[J]. Physical review E-Statistical, nonlinear, and soft matter physics, 2004, 69(32): 036402
- [15] Yu Yue, Zhu Xinlei, Huang Kun, et al. Experimental Study on Pulse Discharge Characteristics in Water Applied to Oil Plugging and Increasing Production[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(08): 2951–2959 (喻越, 朱鑫磊, 黄昆,等. 应用于石油解堵增产的水中脉冲放 电特性实验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(08): 2951–2959(in chinese))