

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0421

水下针-板放电气泡脉动及冲击特性*

张思远, 刘 征, 王志强, 王进君, 李国锋

(大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为明确水中脉冲放电能量释放过程所产生气泡的脉动和压力波冲击特性, 依据能量等效原则, 在 LS-DYNA 软件中建立针-板电极结构的水下爆轰模型, 模拟气泡形态。通过与获取的物理图像比对, 发现气泡形态和时间演化尺度高度一致。在此基础上, 对气泡的冲击特性进一步分析, 结果表明: 冲击波峰值、气泡脉动周期和半径大小随放电能量增加而加大, 随静水压力的增加而减小; 当放电电压由 14 kV 增至 20 kV, 二次压力波峰值由 2.89 MPa 升至 4.09 MPa, 提高 41.5%; 当静水压力由 202.65 kPa 增至 506.63 kPa, 二次压力波峰值从 5.15 MPa 升至 6.36 MPa, 提高 23.5%, 放电能量和水压的增加对二次压力波提升明显; 随着距离增加, 二次压力波所占冲击波的峰值压力比重, 由 12.6% 增加至 35.3%, 远场放电位置二次压力波不可忽视。

关键词: 水中脉冲放电; 气泡脉动; 冲击波释放; 静水压

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Underwater needle-plate electrical bubble pulsation and impact characteristics

ZHANG Siyuan, LIU Zheng, WANG Zhiqiang, WANG Jinjun, LI Guofeng

(School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: In order to clarify the bubble pulsation process and pressure wave shock characteristics produced in the process of pulse discharge energy release in water, based on the principle of energy equivalence, the liquid-phase pulse energy was transformed into an explosion source with the same energy, and the fluid-structure coupling model of underwater explosion with needle-plate electrode structure was established in LS-DYNA software to simulate the bubble pulsation process on the upper surface of steel substrate. By comparing with the experimental physical images obtained by high-speed photography, it was found that the numerical simulation was highly consistent with the experimental results in terms of bubble morphology and time evolution scales. On this basis, the impact characteristics of the bubbles was further analyzed, and the results show that the maximum impact pressure of the shock wave on the steel base can reach 94.9 MPa when the discharge is carried out with a 4-mm gap at a voltage of 20 kV and a capacitance of 0.8 μ F. Besides, the bubble radius, expansion, jet velocity, pulsation period and peak shock wave pressure enhance with the increase of the discharge energy and decrease with the rise of the hydrostatic pressure. Among them, the increase of water pressure has little effect on the bubble expansion rate. The peak value of secondary pressure wave rises from 2.89 MPa to 4.09 MPa with the increase of voltage (14–20 kV), which reaches 41.5%; and up from 5.15 MPa to 6.36 MPa with the rise of hydrostatic pressure (202.65–506.63 kPa), which reaches 23.5%. And the enhancement of discharge energy and water pressure improves the secondary pressure wave significantly. Meanwhile, with the improvement of transmission distance, the proportion of secondary pressure wave in the peak pressure of shock wave rises from 12.6% to 35.3%, and the secondary pressure wave at the far-field discharge location cannot be ignored.

Keywords: underwater pulse discharge; bubble pulsation; shockwave release; hydrostatic pressure

* 收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(51607023)

第一作者: 张思远(1996—), 男, 硕士, 1390853614@mail.dlut.edu.cn

通信作者: 王志强(1983—), 男, 博士, 副教授, wangzq@dlut.edu.cn

水中脉冲放电过程存在高能量的释放和转化, 在液体介质中形成高温、高热的等离子体通道。受通道内部温度和高压的影响, 通道周围液体被汽化, 形成气泡向外膨胀, 推动气泡-水界面扩张, 对周围水体产生力的作用, 以冲击波的形式向外传递^[1-3]。气泡内压强变化会导致气泡的膨胀与回缩坍塌, 称为气泡脉动^[4]。气泡脉动过程伴有压力波的释放, 受流体内压力不均的影响, 最终会生成射流, 破坏气泡完整性而溃灭, 气泡脉动及压力释放过程如图 1 所示。

由图 1 可知, 水中脉冲放电的气泡脉动包括膨胀-收缩-坍塌等运动过程, 期间受浮力影响而向上迁移。其中冲击波紧随放电过程发生, 气泡第一次脉动释放的压力位于冲击波之后, 因此被称为二次压力波。对于水下脉冲放电而言, 二次压力波峰值压力一般不超过冲击波峰压的 10%~20%^[5], 但其作用时间远超冲击波, 冲击波作用不可忽视, 国内外众多学者也对此开展了相关研究。李显东等^[6]对水下不均匀放电的电压和电流进行测量, 探究了放电特性, 并利用高速摄像机完整观察气泡形态及脉动规律。Li 等^[7]进行水下高压放电实验, 观察气泡运动过程, 其中气泡的射流回弹是冲击波产生主要原因。Zohoor 等^[8]为利用水中脉冲放电的冲击特性, 采用任意拉格朗日欧拉 (arbitrary Lagrangian Eulerian method, ALE) 和光滑粒子流体动力学 (smooth particle hydrodynamics, SPH) 的方法, 对针-针结构下的放电过程进行数值模拟, 与实验进行比对, 显著改善了材料成形性。Mamutov 等^[9]对水箱内“棒-棒”结构电极进行放电观察, 并建立 ALE 数值模型, 模拟了水箱内气泡运动及冲击波释放行为过程, 考察了压力波对水箱壁面的冲击载荷效应。Hideki 等^[10]利用球状电极进行水下放电实验, 探究气泡脉动过程与水下压力波传播行为, 并与使用 LS-DYNA 的数值模拟结果进行比较, 证实了数值模拟在工程应用方面的潜在可能性。水下脉冲放电的电极结构多样, 其放电特性会随不同电极类型变化^[11]。上述研究主要围绕针-针、棒-棒和球状等电极结构分析了气泡运动和压力传播特性。对于针-板电极而言, 其结构更为稳定, 在液电成形^[12]、油气增产^[13]、矿物破碎^[14-15]等方面已有应用。刘强等^[16]、刘振等^[17]虽通过放电实验, 探究了放电特性对气泡的影响, 但气泡脉动特性及其压力传递过程尚不够清晰, 有待进一步明确。

本文中, 利用高速摄像技术对针-板结构下的气泡脉动展开研究, 结合 LS-DYNA 软件, 建立水下爆裂模型, 通过数值模拟得到气泡运动过程, 并与实际物理图像对比, 发现两者在气泡形态以及对应时刻具有高度一致性。以此为基础, 明确不同放电能量和静水压力条件下, 气泡的脉动规律及压力波传递特性, 为相关的工程应用提供参考。

1 液相脉冲放电实验平台

实验装置由储能控制单元、放电单元和观测单元组成。储能控制单元包括调压器、高压直流电源 (high voltage power supply, HVDC)、限流电阻以及储能电容 (0.8 μF); 放电单元包括触发开关、放电反应器, 电流互感器以及高压探头等; 观测单元包括高速摄像机、示波器和计算机, 水下脉冲放电系统如图 2 所示。

调压器控制施加到针尖的电压达到峰值, 闭合触发开关, 电极之间形成放电通道。示波器检测到电压变化, 将触发信号传递给高速摄像机进行同步拍摄。为使图像清晰, 高速摄像机透过石英玻璃片拍摄记录, 添加直流 24 V 氙气灯作为背景光源。

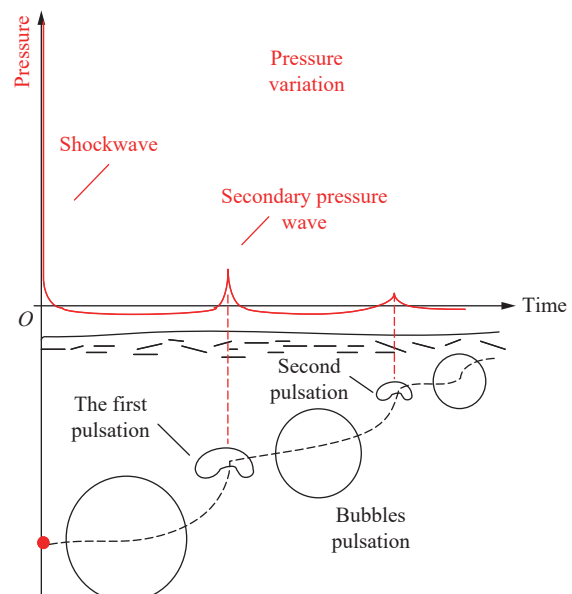
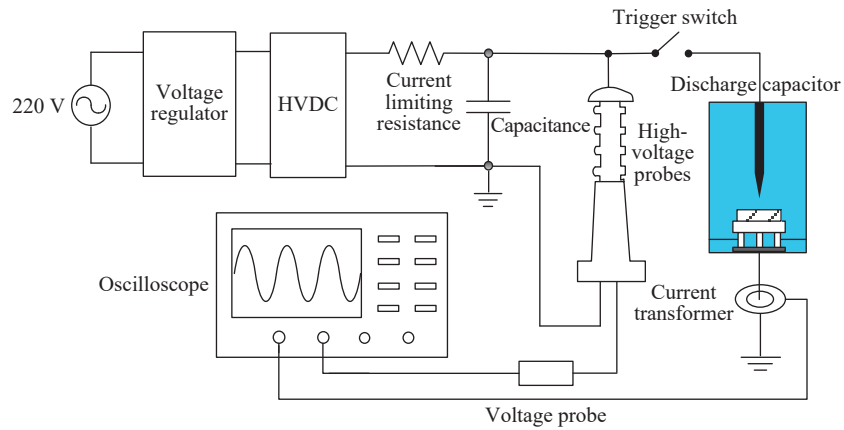
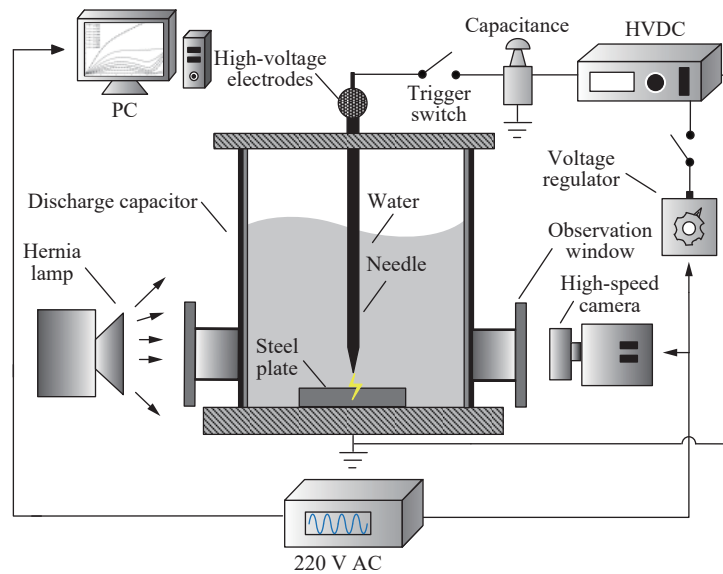


图 1 水下气泡脉动及压力释放过程

Fig. 1 Underwater bubble pulsation and pressure release process



(a) Schematic diagram of the discharge platform



(b) Image observation platform

图 2 针-板式水下脉冲放电系统

Fig. 2 Needle-plate type underwater pulse discharge system

2 有限元模拟

2.1 放电能量注入效率

水中脉冲放电与水下爆轰过程, 在冲击波的产生及作用效果上有共通点, 二者分别基于液相脉冲放电与水下爆炸所带来的冲击效应, 且与放电能量和爆轰能量有关, 并伴随能量的释放产生大尺度气泡。当能量相同时, 放电过程可用水下爆炸过程来近似模拟^[18], 其关键是计算有效放电能量, 并等效为同等能量炸药。考虑到脉冲放电瞬间的能量等效问题, 根据电容充放电原理, 不考虑能量损耗的理想充电电能计算公式如下^[5]:

$$E_{\text{stored}} = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

式中: E_{stored} 为电容储存的总能量, C 为总电容 (图 2 中储能电容), U 为充电电压。

电能释放过程, 伴随着能量传递损耗及能量的非完全释放, 设有效能量为 E_{circuit} , 其数值一定小于总能量 E_{stored} , 该有效能量通过直接测量电极两端的电压、电流波形来计算, 即对放电全过程积分求解:

$$E_{\text{circuit}} = \int_0^t u(t)i(t) dt = \int_0^t P(t) dt \quad (2)$$

式中: $u(t)$ 和 $i(t)$ 分别为电极两端瞬时测得电压和电流; t 为储能电容开始放电到结束放电所需时间。有效放电能量 E_{circuit} 占放电总能量 E_{stored} 的百分比称为注入效率 η :

$$\eta = \frac{E_{\text{circuit}}}{E_{\text{stored}}} \quad (3)$$

为明确本文实验装置的注入效率, 以 20.8 kV 电压为例, 实验中充电电容为 0.8 μF , 实际测得针-板电极两端的电压电流波形如图 3 所示。

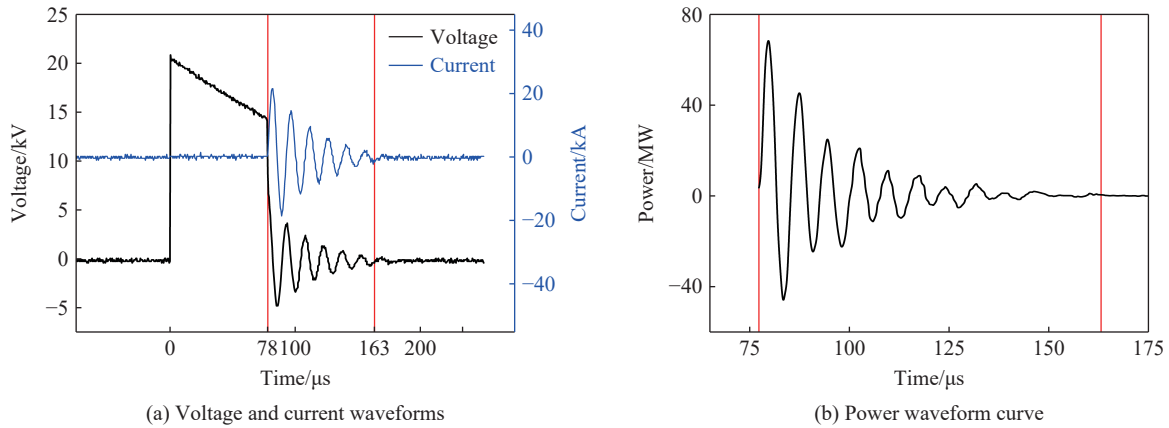


图 3 20.8 kV 电压放电波形

Fig. 3 Voltage discharge waveforms of 20.8 kV

对图 3(a) 所示的电压电流波形曲线进行乘积, 得到图 3(b) 所示功率曲线, 功率曲线进一步对时间积分得到有效放电能量 26 J; 而 20.8 kV/0.8 μF 条件下利用式 (1) 计算的放电总能量为 173 J, 则注入 (能量转换) 效率 $\eta=15\%$, 受放电随机性的影响, 不同电压等级下注入效率约为 15.6%, 如表 1 所示。

水中脉冲放电产生的电弧通道在有效能量下对外做功, 主要转化为热能、光辐射能以及通道膨胀的机械能等。研究表明, 热能和光辐射的能量耗散分别约占注入能量的 10%^[19] 和 5%^[20], 因此本文实验用于气泡生成的机械能, 即有效注入 (能量转换) 效率约为 13.3%, 与文献 [21-22] 中理论范围相符, 该能量为气泡脉动提供内能及后续冲击波的产生。

2.2 参数方程的确定

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC 运动硬化材料模型, 能够较好模拟硬化材料的大变形, 适用于本文钢性底座材料的模拟, 材料参数均取自文献 [23-24]。

2.2.1 空气

空气视为理想气体, 采用 *MAT_NULL 材料模型, 其状态方程如下:

$$p_{\text{air}} = (\gamma - 1)\rho E \quad (4)$$

式中: p_{air} 为空气压力, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 为空气密度; $\gamma = 1.4$ 为绝热指数; E 为空气内能, $E=211 \text{ kJ/kg}$ 。

2.2.2 TNT 炸药

使用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 炸药材料模拟等效放电能量; 爆源的状态方程采用标准的

表 1 不同电压等级下注入效率

Table 1 Injection efficiency at different voltage levels

电压/kV	总能量/J	有效能量/J	注入效率/%
16.3	106.3	19.5	18.3
16.9	114.2	16.2	14.2
17.9	128.2	18.0	14.0
19.1	145.9	23.1	15.8
19.9	158.4	25.4	16.1
20.8	173.1	26.0	15.0

*EOS_JWL 方程描述压力变化过程:

$$p_{\text{TNT}} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (5)$$

式中: p_{TNT} 为爆轰产物压力, E_0 为质量内能, V 为比容, 参数 A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为独立常数, 具体数值见表 2, 其中 ρ 为炸药密度, D 为爆速。

表 2 TNT 炸药状态方程参数设置

Table 2 TNT explosive equation of state parameter setting

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$E_0/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	p_{Cl}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
TNT	1.63	6930	8000	21	371.2	3.231	4.15	0.95	0.3

2.2.3 水状态方程

水采用 *MAT_NULL 材料模型, 其状态方程为标准 *EOS_GRUNEISEN 方程:

$$p_{\text{water}} = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma + \alpha \mu) E_0 \quad (6)$$

上式描述水中压力波的传递。式中: p_{water} 为水中压力, ρ 为水密度, μ 为水的压缩系数。 E_0 为水的初始内能, c 为水中声速; $\alpha=0$ 为一阶体积修正量, S_1 、 S_2 、 S_3 为流体状态方程系数, γ_0 为 Grüneisen 常数, 具体参数如表 3 所示。

表 3 水状态方程参数设置

Table 3 Water state equation parameter setting

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$E_0/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0
水	0.998	1480	205	2.56	-1.986	1.226	0.5

Cole^[4] 根据大量实验结果, 建立了描述水下气泡脉动及冲击波传递的经验公式, 对 TNT 炸药产生的气泡脉动有以下经验公式:

$$R_{\text{max}} = 3.3 \left(\frac{W}{h + 10} \right)^{1/3} \quad (7)$$

$$T = 2.08 \frac{W^{1/3}}{(h + 10)^{1/6}} \quad (8)$$

式中: R_{max} 为气泡膨胀最大半径, T 为气泡第一次脉动周期时间, W 为装药质量, h 为水深。进一步对冲击波峰压衰减变化的经验公式改进为^[25]:

$$p(t) = p_{\text{max}} e^{-t/\theta} \quad (9)$$

$$p_{\text{max}} = \begin{cases} 44.1 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{1.5} & 6 \leq r \leq 12 \\ 52.4 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{1.13} & 12 < r \leq 240 \end{cases} \quad (10)$$

$$\theta = \begin{cases} 0.45 R_0 r^{0.45} \times 10^{-3} & r \leq 30 \\ 3.5 \frac{R_0}{c_w} \sqrt{\lg r - 0.9} & r > 30 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $p(t)$ 为冲击波压力; p_{max} 为冲击波峰值压力; θ 为冲击波的指数衰减时间常数, 指冲击波峰值压力

p_{\max} 衰减到 p_{\max}/e 的时间; R 为观测点距爆心距离, R_0 为初始装药半径, 相对距离 $r=R/R_0$; c_w 为水中声速。

为获得可接受的合理精度, 数值模拟中必须考虑网格尺寸的影响。在无限水域爆轰模型中, 分别划分 0.25、0.75、2、5 和 8 cm 等 5 种网格尺寸; 设置炸药当量 $m=0.853$ kg, 根据质量等效为半径 $R_0=0.05$ m 的球形装药, 置于水下 0.5 m 处。图 4 所示为不同网格尺寸下冲击波峰值压力随相对距离变化过程, 对比 Cole^[4] 建立的水下冲击波传递经验公式, 当网格尺寸不超过 2 cm 时, 数值模拟与经验公式的误差均在 10% 以内, 满足模拟精度要求。且随着网格尺寸减小至 0.25 cm, 在相对距离 $r \geq 18$ 的范围内有更高模拟精度。将 0.25 cm 网格尺寸下的数值计算结果与经验公式对比列于表 4, 从表中的计算结果看出, 计算结果与经验公式吻合较好, 验证了气泡脉动载荷数值计算的有效性。

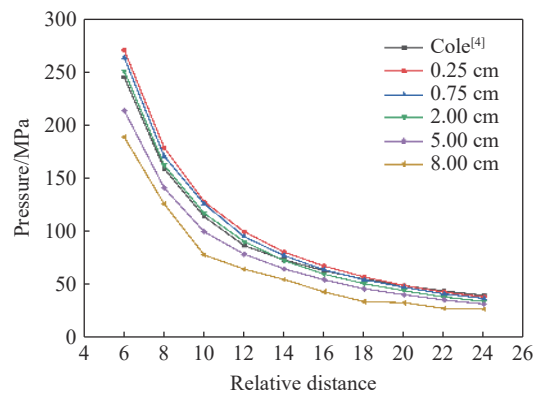


图 4 不同网格尺寸冲击波峰压随相对距离变化

Fig. 4 Variation of shock wave peak pressure with relative distance for different grid sizes

表 4 数值模拟与计算结果对比

Table 4 Comparison of numerical simulation and calculation results

网格尺寸/cm	Bubble pulse		p_{\max}/MPa				
	R_{\max}/cm	T/ms	$r=6$	$r=12$	$r=18$	$r=24$	
0.25	23.9	47.5	268.0	94.2	57.1	38.3	计算结果
0.25	25.8	50.1	244.5	86.7	55.2	39.8	理论结果
偏差	-7.3%	-5.2%	9.6%	8.7%	3.4%	-3.7%	

2.3 数值模型建立

小间隙下等离子体通道产生的冲击波视为球面波^[26], 选取底座上表面中心处为爆源位置, 实验中, 针-板式反应器结构几何尺寸如图 5 所示。

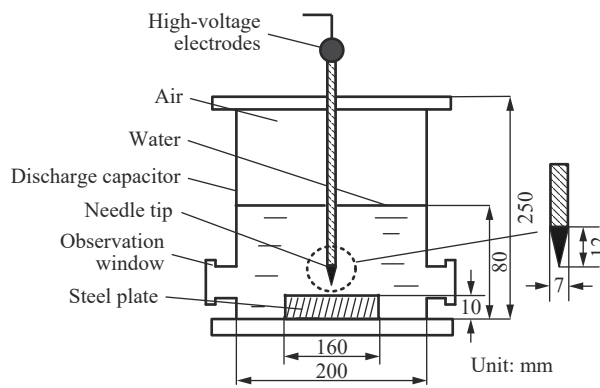


图 5 针-板式反应器结构

Fig. 5 Needle-plate reactor structure

图 6 所示为采用有限元软件 LS-DYNA 建立的三维数值模型。建立 1/4 模型节省计算时间, 对称平面创建节点对称约束。考虑到气泡尺寸相较于反应器的量级较大, 需考虑边界效应影响, 模型四周边界定义全局约束平面, 限制节点平移及压力波传递。水、空气和炸药采用 ALE 算法, 针体和底座采用

Lagrangian 方法, 分析固体结构的应力应变; 添加流固耦合关键字 (fluid-structure interaction) 实现流体和固体之间的耦合接触。等效爆源采用体积分数填充关键字 *INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 添加球形装药。模型中施加重力、采用 *INITIAL_HYDROSTATIC_ALE 关键字添加静水压力; 有限元模型尺寸为 10 cm×10 cm×11 cm 如图 6(a) 所示, 水深 8 cm, 上方有 3 cm 空气域, 模型底面为 8 cm×8 cm×1 cm 的长方体刚性底座, 忽略观察窗的影响。网格大小为 0.25 cm, 在电极间隙处划分细密网格, 边长 0.04 cm。高压脉冲放电依照能量相同原则, 等效为高能 TNT 炸药。

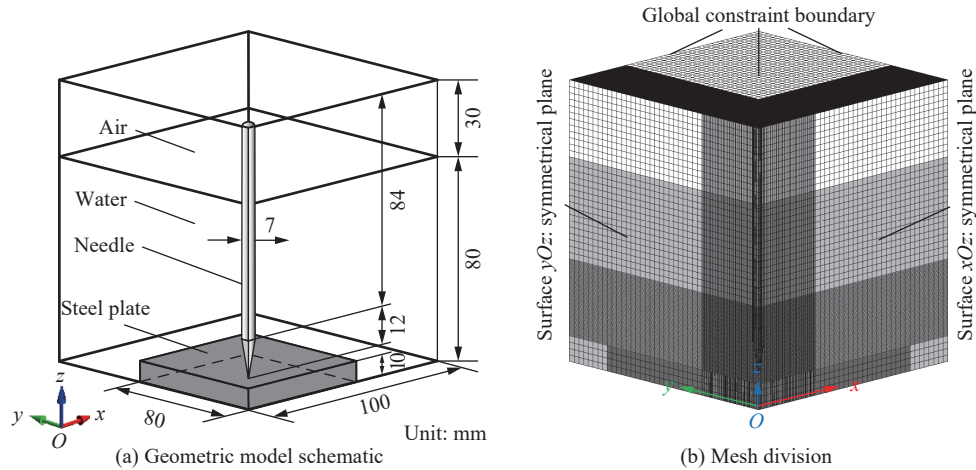


图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

3 数值模拟结果和分析

3.1 数值模拟与实验对比

图 7 为针-板电极结构, 在 20 kV 电压、0.4 cm 电极间隙, 依据 13.3% 的能量转换效率, 放电所产生的气泡计算结果与实际图像对比, 显示了气泡产生到溃灭的数值模拟结果和实验拍摄图像。

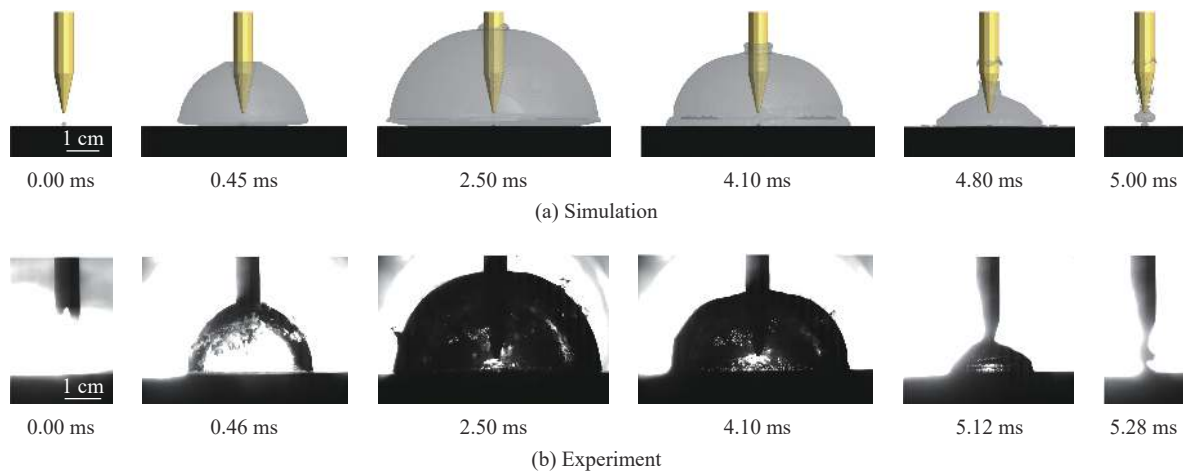


图 7 针-板式电极放电气泡脉动实验和数值模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of experimental and simulation results of bubble pulsation of needle-plate electrode discharge

摄像机分辨率为 700×450, 拍摄频率为 50 000 s⁻¹, 每帧图像时间间隔 Δt 约为 0.02 ms。脉冲放电能量转化瞬间, 以气泡的形式向外膨胀, 当气泡膨胀到一定大小后, 内部气体压力与周围水压相等, 此时由于惯性作用, 气泡继续向外膨胀, 于 $t=2.5$ ms 时膨胀至最大体积, 最大半径 2.94 cm, 对应的数值模拟半径为

2.85 cm, 误差 3.1%。此刻由于周围水压大于气泡内部压力, 气泡被压缩并产生回缩运动趋势, 体积的迅速减小; $t=5.28$ ms 气泡体积坍塌至最小, 一次气泡脉动结束, 对应的数值模拟时间 $t=5.00$ ms, 误差 5.3%。图 8 显示实验与数值模拟的气泡半径对比, 取气泡上表面至底座垂直距离为半径大小, 比较实验拍摄图像和数值模拟结果, 发现两者在气泡形态以及时间演化尺度上具有高度的一致性。所建模型可对高压脉冲放电的气泡膨胀、收缩及溃灭等复杂脉动现象进行分析。

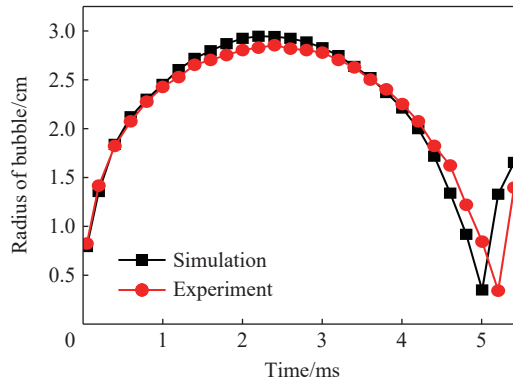


图 8 实验与数值模拟的气泡半径演化曲线

Fig. 8 Experimental and simulated bubble radius time evolution curves

3.2 气泡脉动数值结果及分析

以不同能量等级及静水压力变化, 开展水下针-板电极结构气泡脉动数值模拟, 根据 2.1 节能量传递效率计算结果, 表 5 列出多种实验参数对应的不同放电条件。

表 5 不同放电能量、静水压力对应放电条件

Table 5 Different discharge energy, the hydrostatic pressure corresponding to the discharge conditions

放电条件	电压/kV	静水压力/kPa	等效放电能量/J	放电条件	电压/kV	静水压力/kPa	等效放电能量/J
1	14	101.32	10.43	5	20	202.65	21.28
2	16	101.32	13.62	6	20	303.98	21.28
3	18	101.32	17.24	7	20	405.30	21.28
4	20	101.32	21.28	8	20	506.63	21.28

图 9(a) 为相同水压, 不同能量的气泡半径随时间变化曲线。放电能量增加, 气泡一次脉动周期、二次脉动周期及其对应最大半径均有增加, 单一气泡多次脉动, 随着时间的推移, 每周期脉动气泡最大半径、周期时间减小。表 6 给出气泡最大半径与脉动周期具体数值。

对放电条件 1, 计算得到气泡一次脉动最大半径为 2.26 cm、二次脉动最大半径为 1.87 cm, 后者较前者减小 0.39 cm, 半径的减小进一步导致气泡体积的塌缩并快速溃灭, 因此每周期脉动时间变小, 对应脉动周期时间分别为 4.08 和 3.78 ms, 后者较前者减小 0.3 ms。这是受气泡运动中, 水压阻力以及能量耗散的结果。对比条件 2 和条件 4, 一次气泡脉动完整周期时间分别为 4.45 和 5.04 ms, 时间相位差 0.59 ms; 第一、二次气泡脉动时间累计分别 8.49 和 9.55 ms, 累计时间差 1.06 ms; 脉动次数增加, 使得气泡运动在时间尺度上的相位差, 不断累加扩大, 最大半径递减。

巨大水压会抑制气泡膨胀, 在气泡收缩时提供加速回弹趋势, 诱使气泡产生高速射流, 当气泡再次膨胀时释放更大的压力^[27], 直接影响其冲击性能。图 9(b) 显示静水压力对气泡脉动的影响, 设定电压等级为 20 kV(等效能量约 21.28 J)。从图中看出, 相同能量的气泡随着水压增加, 脉动周期和最大半径快速减小; 对比放电条件 4、6 和 8, 一次气泡脉动周期分别为 5.04、2.14 和 1.44 ms, 二次气泡脉动周期为 4.51、1.97 和 1.28 ms, 依次减少 0.53、0.17 和 0.16 ms; 气泡最大半径依次减小 0.44、0.31 和 0.26 cm。水压

增加改变了气体和液体边界处压强, 当水压继续加大, 气泡体积减小、脉动趋势加快, 相同时间产生多次脉动周期, 对比图 9(b) 观察明显。

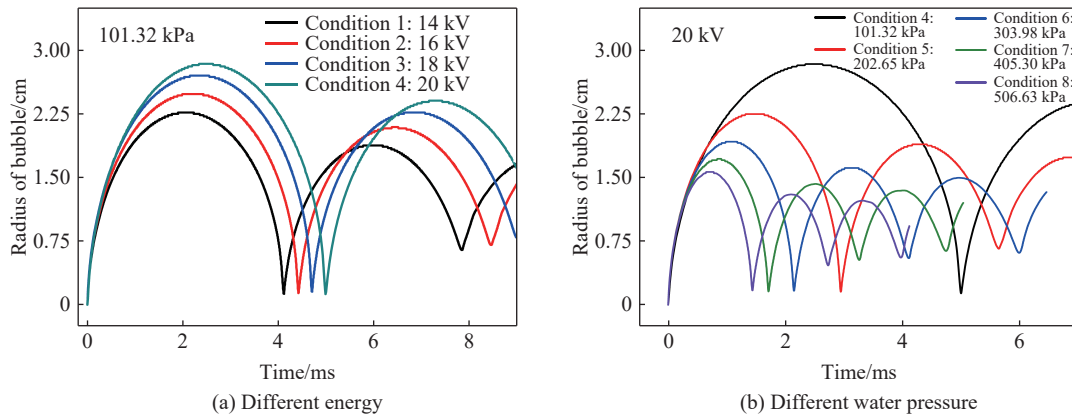


图 9 气泡半径随时间的变化

Fig. 9 Variations of bubble radius with time

表 6 不同放电条件下对应气泡半径和气泡脉动周期

Table 6 Bubble radii and pulsation periods under different discharge conditions

放电条件	放电能量变化				静水压力变化				
	脉动周期/ms		最大半径/cm		脉动周期/ms		最大半径/cm		
	一次脉动	二次脉动	一次脉动	二次脉动	一次脉动	二次脉动	一次脉动	二次脉动	
1	4.08	3.78	2.26	1.87	5	2.94	2.70	2.25	1.89
2	4.45	4.04	2.48	2.09	6	2.14	1.97	1.92	1.61
3	4.77	4.21	2.70	2.26	7	1.71	1.55	1.72	1.43
4	5.04	4.51	2.84	2.40	8	1.44	1.28	1.56	1.30

图 10 显示了气泡脉动过程中膨胀和收缩速度的变化趋势。气泡生成的初始时刻内能最大, 在条件 1~4 下, 初始膨胀速度分别为 71.2、85.3、93.2 和 98.5 m/s, 并达到速度最大值, 如图 10(a) 所示。随后受水压作用, 速度衰减为零, 该时刻气泡停止膨胀, 气泡半径达到最大值; 并在气泡内、外压力差作用下产生回缩的速度趋势, 对应纵坐标转为负值; 坍塌过程持续到气泡最小半径时刻, 此刻气泡体积最小但内部压力最大; 由于气体压力大于水压而再次膨胀并产生高速射流, 射流速度由负值瞬间变为正值。伴随

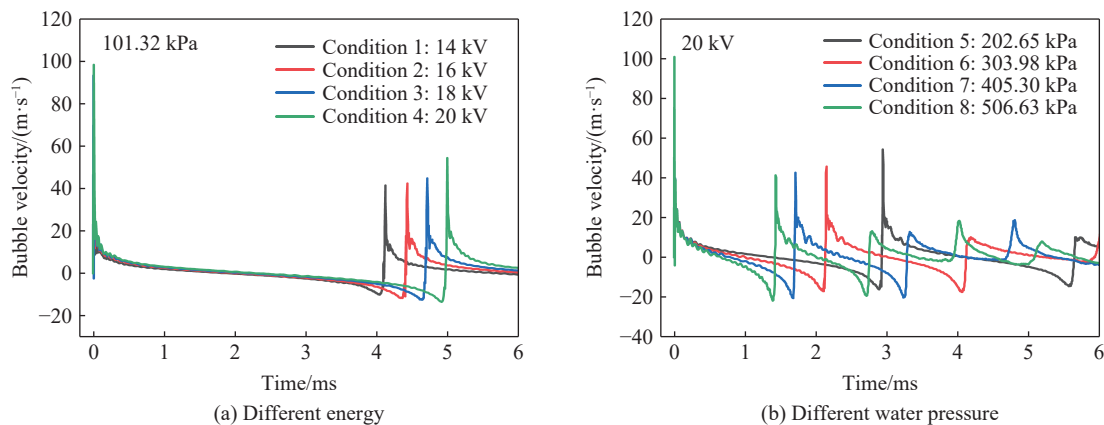


图 10 气泡脉动、收缩速度曲线

Fig. 10 Bubble pulsation, shrinkage speed curves

着放电能量的升高,射流速度加大,分别达到 41.2、42.5、44.9 和 54.5 m/s;之后,气泡再次经历收缩、坍塌过程,继续下一周期脉动。

水压增加对气泡初始膨胀速度影响不大,图 10(b) 显示条件 5~8 下的气泡初始膨胀速度趋同。而气泡一次脉动射流速度则随水压加大而减小,依次为 54.4、45.8、42.7 和 41.4 m/s。受水压增加影响,气泡的射流收缩速度在时间上产生了相位差,导致更多脉动周期的产生及压力波的释放。

3.3 压力计算结果及分析

不同时刻水中压力分布云图如图 11 所示。 $t=0.05$ ms 模拟放电初始时刻,初始冲击波以球状波向外传递如图 11(a) 所示,针尖处的水体受最大冲击压力达到 13.13 MPa; $t=2.45$ ms 气泡半径达到最大值,此时外界水压明显高于气泡内部气压,在压差作用下气泡回缩(见图 11(b)~(c));直到 $t=4.9$ ms 接近一次脉动结束,最大压强集中在气泡边界处,继续挤压气-液边界(见图 11(d));当气泡体积坍塌成最小值,内部压强激增, $t=5.05$ ms 气泡体积再次扩张释放二次压力波(见图 11(e));伴随气泡第二次脉动周期进行,水体持续冲击刚性底座,见图 11(f)。

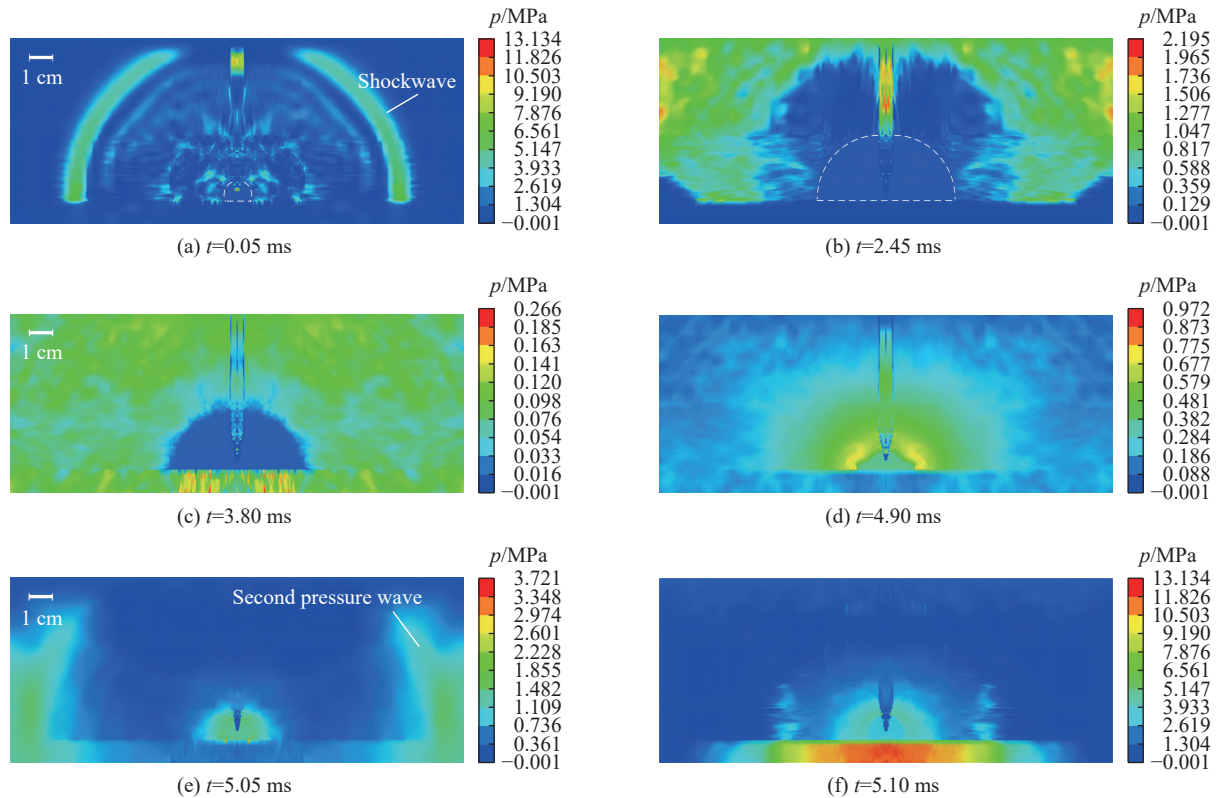


图 11 水中压力分布

Fig. 11 Pressure distributions in water

图 12 为刚性底座上表面压力曲线,放电位于底座中心处,选取距放电中心位置水平距离 0、0.75、1.50 和 3.00 cm 为测点;数值模拟显示, $t=10$ μ s 时刻刚性底座受到冲击后产生快速上升的峰压,随后压力迅速下降趋于稳定,各测点峰值压力分别为 94.9、57.1、22.6 和 17.3 MPa,最大压力 94.9 MPa 位于放电中心处。伴随压力波的向外传递,同一位置下冲击波迅速衰减趋近于二次压力波大小如图 13 所示;冲击波峰值压力由 2.25 cm 处的 33.1 MPa 减小至 8.75 cm 处的 3.2 MPa,二次压力波峰值压力则由 4.19 MPa 减小至 1.13 MPa,其所占冲击波峰压的比重由 2.25 cm 处的 12.6% 增至 8.75 cm 处的 35.3%,放电远场位置,气泡脉动产生的压力波不可忽略。

对多种放电条件下压力的变化, 沿水平方向选取气泡最大边界 (3 cm) 处为测点, 压力波数值计算结果如图 14 所示。冲击波经反应器壁面限制形成反射波, 反射波在容器内不断传递, 形成衰减杂波直至消失。条件 1 和条件 4 冲击波峰值压力分别为 21.4 和 22.7 MPa, 二次压力波峰值分别为 2.89 和 4.09 MPa; 不同水压下, 条件 5 和条件 8 冲击波峰值压力分别为 21.5 和 1.3 MPa, 二次压力波峰值分别为 5.15 和 6.36 MPa。放电能量的增加 (14~20 kV), 二次压力波峰压由 2.89 MPa 提升至 4.09 MPa, 升高 41.5%, 能量的增加对二次压力波峰值压力提升明显; 伴随静水压力由 202.65 kPa 增至 506.63 kPa, 二次压力波峰值由 5.15 MPa 升至 6.36 MPa, 提高 23.5%, 巨大的水压抑制了初始冲击波大小, 但对二次压力波峰值具有同样提升作用。

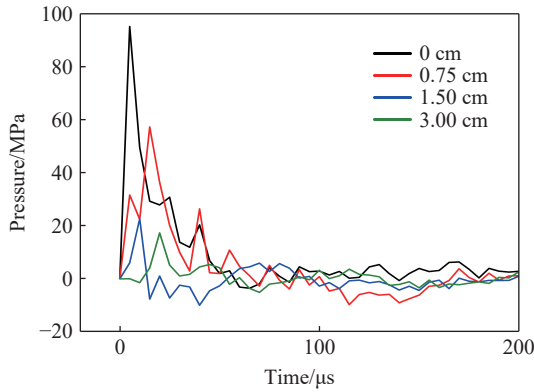


图 12 刚性底座垂向冲击波压力曲线

Fig. 12 Rigid base vertical shock wave pressure curves

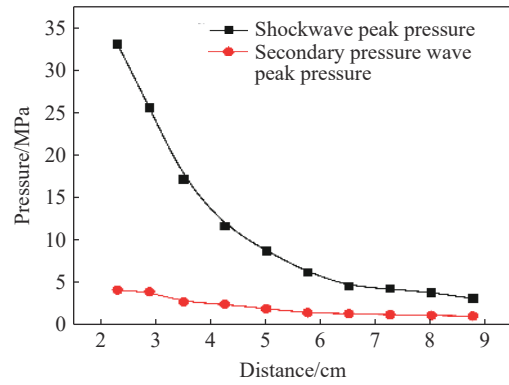
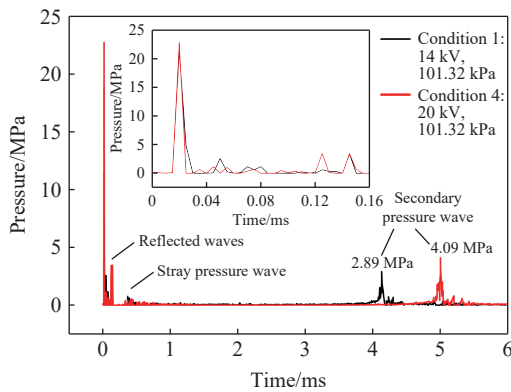
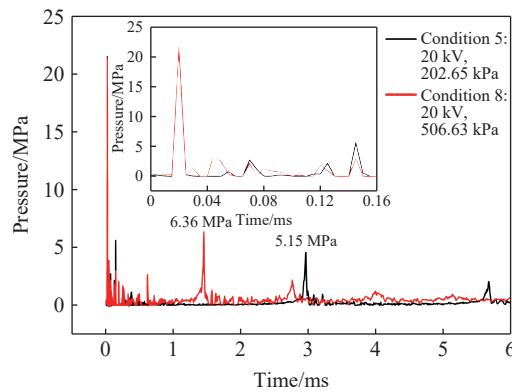


图 13 峰值压力随距离的变化

Fig. 13 Peak pressure variation with distance



(a) Different energy



(b) Different water pressure

图 14 气泡最大半径边界处压力曲线

Fig. 14 Pressure curve at the level of 3 cm from the source of the explosion

4 结 论

本文中采用 LS-DYNA 软件, 探究不同放电能量、水压条件下的“针-板”电极结构气泡运动过程和压力冲击特性, 得到以下结论。

(1) 通过与实验拍摄的气泡物理图像相对比, 基于能量等效原则的水下“针-板”爆轰模型能够较好地模拟该电极结构下的气泡膨胀、收缩及溃灭等运动过程。

(2) 水下脉冲放电生成的压力波随距离增加迅速衰减, 二次压力波峰值压力所占冲击波峰值压力的比重快速升高, 由 2.25 cm 处的 12.6% 增至 8.75 cm 处的 35.3%。远场放电位置, 气泡脉动压力波不可忽视。

(3) 放电能量增加, 冲击波峰值压力大小、气泡膨胀射流速度、半径大小和周期脉动时间均增加; 同

一能量下,静水压力的增加则抑制上述变化过程;二次压力波峰值压力随放电能量(14~20 kV)和水压(202.65~506.63 kPa)的增加由 2.89 MPa 提升至 4.09 MPa、从 5.15 MPa 升至 6.36 MPa,分别升高 41.5% 以及 23.5%,提升作用明显。

参考文献:

- [1] YAN D, BIAN D C, ZHAO J C, et al. Study of the electrical characteristics, shock-wave pressure characteristics, and attenuation law based on pulse discharge in water [J]. *Shock and Vibration*, 2016(5). DOI: 10.1155/2016/6412309.
- [2] OSHITA D, HOSSEINI S H R, OKUKA Y, et al. Characteristic of cavitation bubbles and shock waves generated by pulsed electric discharges with different voltages [C]// 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). USA: San Diego, 2012: 102–105. DOI: 10.1109/IPMHVC.2012.6518690.
- [3] HIGA O, MATSUBARA R, HIGA K, et al. Mechanism of the shock wave generation and energy efficiency by underwater discharge [J]. *The International Journal of Multiphysics*, 2012, 6(2): 89–97. DOI: 10.1260/1750-9548.6.2.89.
- [4] COLE P. 水下爆炸 [M]. 罗耀杰,译.北京:国防工业出版社,1960: 2–6.
- [5] 孙冰.液相放电等离子体及其应用 [M].北京:科学出版社,2013: 120–127.
- [6] 李显东,刘毅,李志远,等.不均匀电场下水中脉冲放电观测及沉积能量对激波的影响 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(10): 3028–3036. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.160315.
LI X D, LIU Y, LI Z Y, et al. Observation of underwater pulse discharge and influence of deposited energy on shock wave in non-uniform electric field [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(10): 3028–3036. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.160315.
- [7] LI N, HUANG J G, LEI K Z, et al. The characteristic of the bubble generated by underwater high-voltage discharge [J]. *Journal of Electrostatics*, 2011, 69(4): 291–295. DOI: 10.1016/j.elstat.2011.04.004.
- [8] ZOHOOR M, MOUSAVI S M. Experimental analysis and smoothed particle hydrodynamics modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 35(10): 16–28. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.039.
- [9] MAMUTOV A V, GOLOVASHCHENKO S F, MAMUTOV V S, et al. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts [J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2015, 219: 84–100. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.11.045.
- [10] HIDEKI H, SEISAKU I, HIRONORI M, et al. Propagation of underwater shock wave and gas bubble behavior induced by electrical discharge in water [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 566: 403–408. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.566.403.
- [11] CHANG J S, URASHIMA K, UCHIDA Y, et al. Characteristics of pulsed arc electrohydraulic discharges and their application to water treatments [J]. Tokyo Denki University Engineering Research, 2002, 50(11): 1–12.
- [12] KOSENKOV V M, BYCHKOV V M. Influence of some axially symmetric stepped forms of discharge chambers on the efficiency of electrohydraulic forming [J]. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2019, 55(1): 89–96. DOI: 10.3103/S1068375519010113.
- [13] 刘毅,李志远,李显东,等.水中脉冲激波对模拟岩层破碎试验 [J]. *电工技术学报*, 2016, 31(24): 71–78. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.24.008.
LIU Y, LI Z Y, LI X D, et al. Experiments on the fracture of simulated stratum by underwater pulsed discharge shock waves [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(24): 71–78. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.24.008.
- [14] 王志强,曹云霄,邢政伟,等.高压脉冲放电破碎菱镁矿石的实验研究 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(4): 863–870. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180109.
WANG Z Q, CAO Y X, XING Z W, et al. Experimental study on fragmentation of magnesite ores by pulsed high-voltage discharge [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(4): 863–870. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180109.
- [15] 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(9): 2741–2749. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.160417.
LIU Y, LI Z Y, LI X D, et al. Effect factors of the characteristics of shock waves induced by underwater high current pulsed discharge [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(9): 2741–2749. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.160417.
- [16] 刘强,孙鹤鸿.水中脉冲电晕放电等离子体特性及气泡运动 [J]. *高电压技术*, 2006, 32(2): 54–56. DOI: 10.13336/j.1003-

- 6520.hve.2006.02.022.
- LIU Q, SUN Y H. Plasma characteristics of pulsed corona discharge in water and moving process of the bubble [J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(2): 54–56. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2006.02.022.
- [17] 刘振, 管显涛, 张允, 等. 水下放电同相位多气泡动力学实验研究 [J]. *高电压技术*, 2021, 47(9): 3337–3345. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201146.
- LIU Z, GUAN X T, ZHANG Y, et al. Experimental study on the dynamics of multiple bubbles in the same phase of underwater discharge [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3337–3345. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201146.
- [18] 荀涛, 杨汉武, 张建德, 等. 加速器电水锤数值模拟与实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(2): 425–429. DOI: 10.3788/HPLPB20102202.0425.
- XUN T, YANG H W, ZHANG J D, et al. Numerical and experimental investigation on water shocks due to pulsed discharge in accelerators [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(2): 425–429. DOI: 10.3788/HPLPB20102202.0425.
- [19] LI X W, Chao Y C, Wu J, et al. Study of the shock waves characteristics generated by underwater electrical wire explosion [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(2): 023301. DOI: 10.1063/1.4926374.
- [20] MARTIN E A. Experimental investigation of a high-energy density, high-pressure arc plasma [J]. *Journal of Applied Physics*, 1960, 31(2): 255–267. DOI: 10.1063/1.1735555.
- [21] 刘明光, 颜怀梁, 温光一. 电水锤效应及其应用 [J]. *四川工业学院学报*, 1989, 8(3): 188–193.
- LIU M G, YAN H L, WEN G Y. Electrohydraulic effect and applications [J]. *Sichuan University of Science and Technology*, 1989, 8(3): 188–193.
- [22] BLUHN H, FREY W, GIESE H, et al. Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000, 7(5): 625–636. DOI: 10.1109/94.879358.
- [23] 王志凯, 周鹏, 孙波, 等. 气泡及其破碎兴波对浮动冲击平台影响探究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(9): 093201. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0212.
- WANG Z K, ZHOU P, SUN B, et al. Influence of bubbles and breaking waves on floating shock platform [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 093201. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0212.
- [24] 邓贵德. 离散多层爆炸容器内爆载荷和抗爆特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 35–37.
- [25] WANG J, GUO J, YAO X L, et al. Dynamic buckling of stiffened plates subjected to explosion impact loads [J]. *Shock Waves*, 2017(1): 37–52. DOI: 10.1007/s00193-016-0638-z.
- [26] SILVANO B, GIOVANNI B C. Implosion of an underwater spark-generated bubble and acoustic energy evaluation using the Rayleigh model [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 111(6): 2594–2600. DOI: 10.1121/1.1476919.
- [27] MOEZZI-RAFIE H, NASIRI M M. An investigation on the flow physics of bubble implosion using numerical techniques [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 153(4): 185–192. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.094.

(责任编辑 王易难)