

水中脉冲放电的电特性与声辐射特性研究

卢新培¹⁾† 潘 垣¹⁾ 张寒虹²⁾

¹⁾ (华中科技大学电力工程系, 武汉 430074)

²⁾ (中国科学技术大学力学与机械工程系, 合肥 230026)

(2001 年 7 月 16 日收到, 2001 年 11 月 23 日收到修改稿)

对水中脉冲放电等离子体通道电阻与放电参数之间的关系作了研究, 得到了等离子体通道电阻与电容量、初始电压、电极间距离的关系, 以及通道电阻随时间的变化规律. 还对冲击波的峰值压力与放电参数间的关系作了研究, 并对冲击波压力的功率谱作了分析, 结果表明水中脉冲放电所产生的冲击波的声辐射频率在几十赫兹到几万赫兹之间, 覆盖了所有水声设备的工作频率, 且在低频段具有很强的声功率, 是一种理想的水下声源.

关键词: 水中脉冲放电, 等离子体

PACC: 5280, 5290

1. 引 言

自从 1955 年 Yutkin 将液电效应用于工业加工以来, 人们对此做了大量的研究工作, 它已被用于特种加工^[1-3]、岩石破碎^[4-6]等领域. 近年来, 由于环境问题越来越受到人们的重视, 研究人员在水中脉冲放电用于污水处理^[7-15]方面做了大量的研究工作, 并取得了一定的进展. 另外, 水中脉冲放电所产生的声信号与水下爆炸声源所产生的声信号具有相似的特性, 水中脉冲放电是将电能极短时间内转化为声能, 而水下爆炸是将化学能转化为声能. 虽然水下爆炸声源已被广泛采用, 但它具有如下缺点: (1) 它是单脉冲声源; (2) 对水中的鱼类有威胁; (3) 对海中采矿设施及海边建筑物具有一定影响. 而水下火花声源没有上述缺点, 并具有如下特点: (1) 可以连续发送多声脉冲; (2) 具有安全性; (3) 效率高; (4) 频谱可调, 频率覆盖范围宽, 可以用来有效地模拟舰艇的声谱, 是一种有前途的噪声模拟技术. 由于水下火花声源具有上述特点, 自从 20 世纪 90 年代以来, 它被看作水下爆炸声源的一种理想的替代声源而被深入地研究^[16-23]. 由于放电时火花通道的电阻影响着输入到通道内的能量, 从而对气泡的动力学过程具有显著的影响, Cannelli^[24]认为放电通道电阻没有变化, 本文所给出的实验结果表明, 通道电阻是随着放电时间的推移而逐渐增大的, 文中将给出

通道电阻各周期的变化情况, 还将给出冲击波压力与回路参数的关系, 并对冲击波压力作频谱分析.

2. 实验装置

图 1 为实验装置简图. 它由充放电回路、电测量系统和压力测量系统所构成. 充电电容为 3 个 $4.15\mu\text{F}$ 的电容器组成, 初始电压为 5—30kV, 电极间距离为 2—90mm 可调. 两电极用 $\phi = 2\text{mm}$ 的铜棒制成. 水箱中装入自来水. 采用高压电极触发空气火花间隙开关. 每次放电时在电极间焊上直径为 0.02mm ^[25] 的铜丝以保证放电的可重复性. 电极间的电压用分压器测量, 回路电流用茹柯夫线圈测量, 由瞬态波存记录电流、电压波形信号. 冲击波的压力由压电式压力传感器测量, 压力传感器安装在放电室的壁上, 压力信号先通过 YE5857 电荷放大器放大, 然后由 XGD 瞬态波存记录压力波形.

3. 实验结果与分析

3.1. 电特性分析

分析放电回路可知, 水中高压脉冲放电的电特性由 RLC 回路的微分方程决定:

$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R(t) \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0, \quad (1)$$

†E-mail: luxinpei@hotmail.com

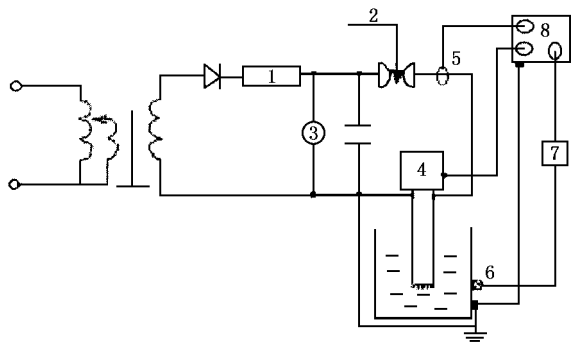


图1 实验装置简图 1为充电电阻;2为触发信号;3和4为电容器;5为罗柯线圈;6为压力传感器;7为电荷放大器;8为XGD-1010型瞬态波存

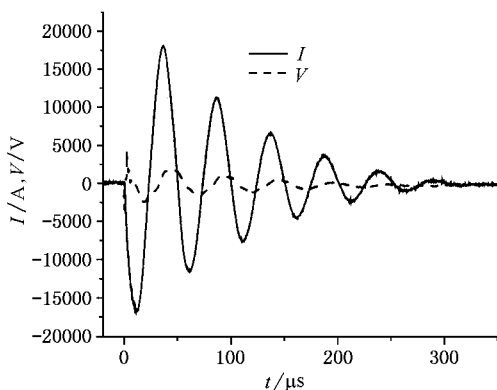


图2 当 $V_0 = 20\text{kV}$, $C = 12.45\mu\text{F}$, $L = 5.2\mu\text{H}$, $d = 2\text{mm}$ 时的电流 I 及电压 V 波形图

式中 L 是放电回路及储能电容器的电感, C 是储能电容器的电容, Q 是存储在电容器 C 上的电荷, $R(t)$ 是短路回路平均阻抗 R_{cir} 与等离子体通道平均阻抗 R_{ch} 之和. 其中 R_{cir} 是通过短路水中的电极进行放电, 并根据此时的电流电压波形计算求得, 该电阻包括球隙开关的电阻. 而根据电弧理论, 球隙开关电阻主要由阴极压降决定, 对于铜球隙开关, 该压降约为 $10\text{V}^{[26]}$. 在我们的放电参数下, 回路的峰值电流在前两个周期约为 $4 \times 10^3 - 2 \times 10^4 \text{A}$ 量级, 亦即由于放电参数不同而引起的球隙开关电阻的变化约为 $3\text{m}\Omega$, 因此在实验中就忽略了球隙开关电阻对于不同放电参数而引起的变化, 亦即将外回路电阻 R_{cir} 当作常数, 实验结果表明该电阻约为 $75\text{m}\Omega$. 当总电容为 8.3 和 $12.45\mu\text{F}$ 时, 回路电感分别为 4.8 和 $5.2\mu\text{H}$. 实验结果表明, 水中放电等离子体通道电阻随时间变化, 它不仅与电极间距离有关, 而且与电容器的电容量 C 、初始电压 V_0 有关. 当电极间距离 d 不是很大, 或初始电压足够高时, 在最初几个放电周期内通道电阻的变化对电流脉动周期的影响不明显, 即此时衰减系数 $\beta \ll \omega_0$ ($\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$). 但经过几个衰减振荡周期后, 电阻值迅速增大, 电流趋于零. 振荡周期数与电容量、初始电压及电极间距离有关. 电容量越大、初始电压越高、电极间距离越小, 则振荡周期数越多. 图2给出某次放电所测得的电流、电压波形.

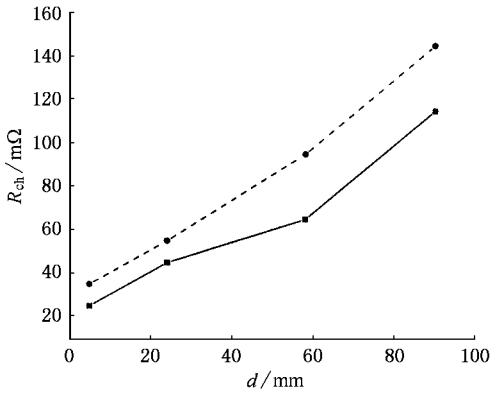
根据电流的衰减振荡波形, 可求出各周期整个回路的平均电阻, 用它减去外回路平均电阻 R_{cir} , 即可得等离子体通道平均电阻随时间的变化过程. 表1列出不同放电参数时前两个周期整个回路平均电阻的变化情况.

表1 前两个周期整个回路平均电阻与放电参数间的关系(单位 $\text{m}\Omega$)

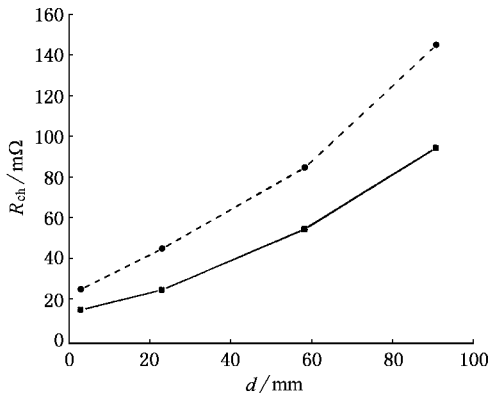
序号	$C/\mu\text{F}$	V_0/kV	d/mm	R_1	R_2
1	12.45	20	90	170	220
2	12.45	20	58	130	160
3	12.45	15	58	150	210
4	12.45	20	23	100	120
5	12.45	15	23	110	130
6	12.45	10	23	130	170
7	12.45	20	3	90	100
8	12.45	15	3	100	100
9	12.45	10	3	100	110
10	12.45	7	3	110	120
11	8.3	25	90	160	190
12	8.3	20	90	190	220
13	8.3	20	58	140	170
14	8.3	15	58	170	230
15	8.3	20	24	120	130
16	8.3	15	24	120	150
17	8.3	10	24	140	230
18	8.3	20	5	100	110
19	8.3	15	5	110	110
20	8.3	10	5	130	130

图3即为根据表1数据求出的放电最初两个周期的通道平均电阻 $R_{\text{ch},j}$ 随电极间距离的变化情况, 下标 j 表示第 j 个振荡周期. 考虑到低初始电压的数据较少, 图3只给出初始电压为 20kV 时的结果. 图3(a)和(b)分别对应电容为 8.3 和 $12.45\mu\text{F}$.

由上述的实验数据可以看出, 当电极间距离 d



(a) $C = 8.3 \mu F, V_0 = 20 kV$



(b) $C = 12.45 \mu F, V_0 = 20 kV$

图3 对应不同放电参数时的通道平均电阻 R_{ch} 随电极间距离 d 的变化曲线 ■为 R_{ch1} ●为 R_{ch2}

给定, 初始电压 V_0 越高, 等离子体通道的电阻 R_{chj} 就越小. 这是由于两方面的原因造成的. 一方面是由于电压越高, 电流就越大, 等离子体温度也就越高, 因而电离率越大, 导致电导率增大. 另一方面, 较高的电压导致更高的等离子体温度, 从而等离子体通道压力也越大, 这促使等离子体通道加速膨胀, 增大了导电截面, 最终导致通道电阻减小. 需要说明的是, 此处的磁压力 P_B 与通道压力相比小 2—4 个数量级, 因而不用考虑其对通道膨胀的影响.

R_{ch} 随着时间推移而增大, 这是由于输入通道的能量随时间的推移不再能够补偿通道膨胀及辐射所损失的能量, 从而等离子体温度开始下降, 电离率降低, 最终导致电阻增大.

由表 1 第 7—10 号数据还可看出, 对于短间隙, 电容器的初始电压对通道电阻的影响不大, 但对于长间隙则具有明显的影响.

3.2. 压力特性

图 4 (a) 和 (b) 给出第一次冲击波峰值压力与各放电参数间的关系. 从图 4 (a) 和 (b) 可以看出, 当 $d = 5 mm$ 时, 冲击波峰值压力与电容量基本没有关系, 但随着电极间距离的增大, 其依赖关系明显增大. 冲击波峰值压力与电压和电极间距离具有明显的依赖关系. 增大初始电压和电极间距离都有利于冲击波峰值压力的增大. 但是当放电间隙不用初始丝时, 增大电极间距离将导致间隙击穿延迟的随机性增大, 甚至无法击穿. 而增大初始电压总是有利的. 因此, 为了获得更高的压力值, 在可能的条件下, 尽量采用增大初始电压的办法.

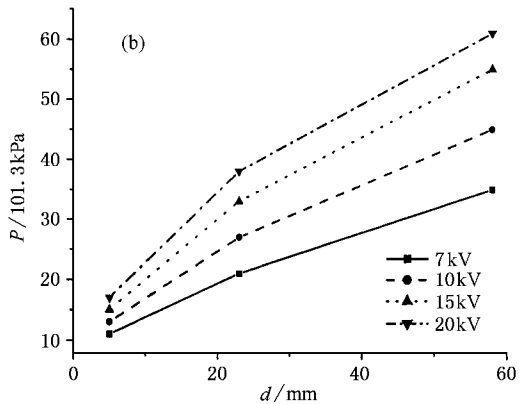
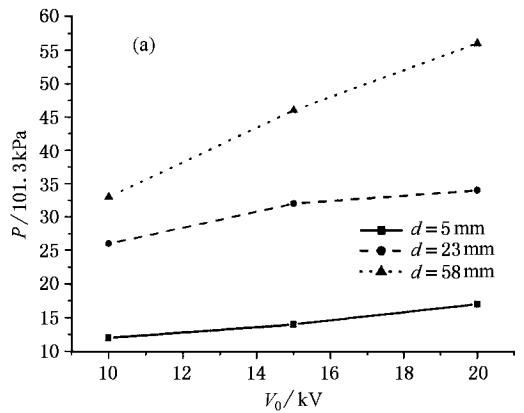


图4 冲击波峰值压力与各实验参数间的关系 (a) 为当 $C = 8.3 \mu F$ 时冲击波压力 P 随初始电压 V_0 的变化曲线; (b) 为当 $C = 12.5 \mu F$ 时冲击波压力 P 随电极间距离 d 的变化曲线

图 5 给出当 $C = 8.3 \mu F, V_0 = 20 kV, d = 5 mm$ 时, 在离通道 0.3 m 处所测得的压力波形及其功率谱. 由图 5 (a) 可以看出在 15 ms 左右气泡回涨产生了二次冲击波. 图 5 (b) 是对 (a) 进行傅里叶变换所得的

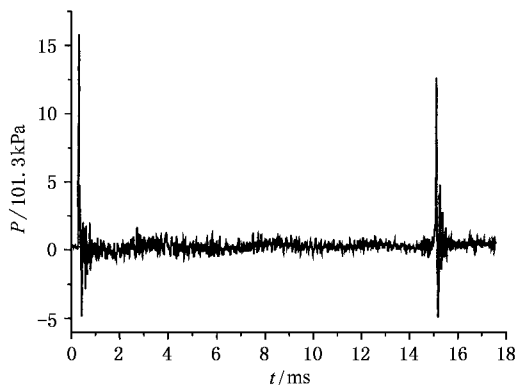
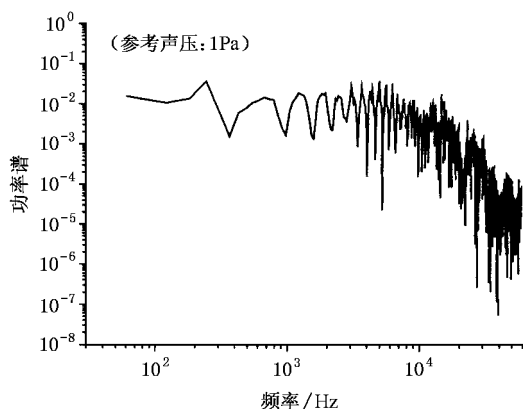
(a) 压力 P 波形图(b) 压力 P 波形功率谱图

图 5 实验所得压力波形图及其频谱图

结果.由图 5(b)可以看出,在这样的放电参数下,水中脉冲放电的声辐射频率主要覆盖了从几十赫兹到几万赫兹的范围,它完全覆盖了水中爆炸声源的频率范围^[27]和所有水声设备的工作频率^[28],并且在低频段具有很强的声辐射功率,因此是一种非常理想的水下声源.

4. 讨论与结论

本文对水中脉冲放电的回路参数与通道电阻及冲击波峰值压力之间的关系作了研究.结果表明,等离子体通道电阻随着电容量的增大和初始电压的增加而逐渐减小,并随着电极间距离的减小而逐渐减小.至于冲击波压力,当电极间距离较短时,电容量对冲击波压力的影响不大,但是当电极间距离较长时,该依赖关系明显加强.而增加初始电压对增大冲击波压力总是有利的.

文中还对冲击波压力的频谱作了分析,结果表明该冲击波压力的功率谱具有频带宽,低频部分具有很强的声辐射强度的特点.该冲击波的声谱可通过调节放电回路参数、电极间距离的方法进行调节,或通过改变电极结构,采用多脉冲等方法进行调节,这些都有待于进一步深入研究.

对刘保华研究员和丁同海硕士在实验过程中给予的帮助,以及胡希伟教授、李劲教授的理论指导表示衷心的感谢.

[1] Zhang L et al 1998 *J. Dalian Univ. Technol.* **38** 207 (in Chinese) [张雷等 1998 大连理工大学学报 **38** 207]

[2] Wang Y R 1991 *Selected Papers of International Symposium on Electric Maching ISEM-9* (Beijing: Science and Technology Press) (in Chinese) [王永荣 1991 国际电加工新技术 ISEM-9 论文选编 (北京: 科学技术出版社)]

[3] Vovchenko A I et al 1991 *The 3rd International Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials* (Japan)

[4] Boev S et al 1999 *The 12th IEEE International Pulsed Power Conf.*

[5] Rim G H et al 1999 *The 12th IEEE International Pulsed Power Conf.*

[6] Hamelin M and Kitzinger F 1993 *The 9th IEEE International Pulsed Power Conf.*

[7] Stao M, Ohgiyama T and Clements J S 1996 *IEEE Trans. Ind. Appl.* **32** 106

[8] Stao M, Tokita K, Sadakata M, Sakai T and Nakanishi K 1990 *Inter. Chem. Eng.* **30** 695

[9] Willberg D M et al 1996 *Envi. Sci. Technol.* **30** 2526

[10] Sun B, Stao M and Clements J S 1999 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32** 1908

[11] Sun B, Stao M and Clements J S 2000 *Envi. Sci. Technol.* **34** 509

[12] Xia L S et al 1999 *J. Sichuan Univ.* **36** 973 (in Chinese) [夏连胜等 1999 四川大学学报 **36** 973]

[13] Fang X D, Guan Z C, Wang L M, Liu H and Liang X D 2000 *J. High Voltage Technol.* **26** 29 (in Chinese) [方兴东、关志成、王黎明、刘虹、梁曦东 2000 高电压技术 **26** 29]

[14] Li S L et al 1996 *China Envi. Sci.* **16** 73 (in Chinese) [李胜利等 1996 中国环境科学 **16** 73]

[15] Zhang H H and Chen Z F 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 748 (in Chinese) [张寒虹、陈志福 2001 物理学报 **50** 748]

[16] Schaefer R B 1997 *Oceans '97 MTS/IEEE Proceeding*

[17] Buogo S, Cannelli G B, D'Ottavi E, Pitolli L and Pontuale G 1998 *Acoustica* **84** 1025

[18] Oison A H and Sutton S P 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **94** 2226

[19] Cook J A, Gleeson A M and Roberts R M 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **101** 1908

- [20] Fry L H , Adair P Jr and Williams R 1999 *The 12th IEEE International Pulsed Power Conf.*
- [21] Adair P , Fry L H Jr and Williams R 1999 *The 12th IEEE International Pulsed Power Conf.*
- [22] Schaefer R B and Flynn D 1999 *Oceans '99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century*
- [23] Cannelli G B , D ' Ottavi E and Prosperetti A 1990 *Oceans '90 Engineering in the Ocean Environment Proceedings*
- [24] Cannelli G B and D ' Ottavi E 1994 *Oceans '94 Engineering for Today 's Technology and Tomorrow 's Preservation Proceedings*
- [25] Robinson J W 1967 *J. Appl. Phys.* **38** 210
- [26] Holmes R 1978 *Electrode Phenomena* (New York : Wiley) chap 11 pp839—867
- [27] Pan Z W , Jiao S W and Gu X H 1999 *J. Nanjing Univ. Sci. Technol.* **23** 507 [in Chinese] 潘正伟、焦善武、顾晓辉 1999 南京理工大学学报 **23** 507]
- [28] Li Z G 2000 *J. Sci. Technol. Fleet* **3** 40 [in Chinese] 李正刚 2000 舰船科学技术 **3** 40]

The electrical and acoustical characteristics of pulsed discharge in water

Lu Xin-Pei¹⁾ Pan Yuan¹⁾ Zhang Han-Hong²⁾

¹⁾ Department of Electric Engineering , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China)

²⁾ Department of Mechanics and Mechanical Engineering , University of Science and Technology of China , Hefei 230026 , China)

(Received 16 July 2001 ; revised manuscript received 23 November 2001)

Abstract

The relations between the resistance of the plasma channel of pulsed discharge in water and the circuit parameters are discussed ; the laws of the channel resistance changed with capacitance , initial voltage and electrode gap width are presented. On the other hand , the relations between the peak pressure of shock wave and the circuit parameters are investigated , and the power spectrum of the shock wave is analysed. The results show that the frequency of the bandwidth of the acoustic radiation ranges from scores of hertz to scores of kilohertz , it covers all the frequencies of underwater sound equipment , and has high acoustic radiation power in low-frequency band. Hence it is an ideal underwater sound source.

Keywords : pulsed discharge in water , plasma

PACC : 5280 , 5290