

水下等离子体声源的声效率分析与研究^①

刘小龙^② 黄建国 雷开卓

(西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘 要 为研究水下等离子体声源放电系统的声效率问题,系统地分析了水下等离子体电晕放电和电弧放电两种放电方式的微观机理以及等离子体声源放电系统各部分之间的能量转换流程,建立了一套完整的系统声效率计算模型,同时设计了水下等离子体脉冲放电试验系统。通过比较和分析水下脉冲电晕放电和水下脉冲电弧放电的声效率发现,系统中电弧放电的声效率明显高于电晕放电。通过水下高压脉冲放电试验,详细分析了水下等离子体放电系统中关键部件对系统声效率的影响。分析结果表明:关键部件的设计和参数的优化配置对整个系统的声效率有重要影响;通过声效率的分析,能够准确评估水下等离子体声源的设计合理性。

关键词 声效率,电晕放电,电弧放电,高压脉冲,水下等离子体

0 引言

水下等离子体放电技术早在 20 世纪 50 年代就被前苏联科学家 Yutkin 等人^[1]所关注,目前已在工业、科学、医学、军事等诸多方面得到了广泛应用,如海底地质勘探^[2]、污水处理^[3]、体外冲击波碎石^[4]、管道解堵^[5]、水下目标探测^[6]、水下防御^[7,8]等。水下等离子体放电过程中加在两个电极之间的高压使水介质被电离,由于放电时间极短(微秒量级),放电电流很高(1 ~ 100kA 量级)^[9],放电通道内温度急剧升高,通道内气体受热体积膨胀。由于液体的不可压缩性和惯性,在液体介质中形成巨大的冲击波^[10],实现了电能到机械能的快速转化,同时伴随强烈的光辐射、声辐射^[11]和电磁辐射等,整个过程的瞬态物理现象非常复杂^[12]。由于放电过程极为短暂且影响因素较多,因此,如何计算并提高放电系统的声效率成为研究的焦点问题之一。

系统的声效率是衡量水下等离子体脉冲放电系统的设计和制作是否合理的一个重要参数^[13,14],以往的测量分析方法是研究声能与放电电极注入能量之比^[15],但这并不能反映整个水下脉冲放电系统的优劣。本文结合水下等离子体脉冲放电系统性能试验,详细研究了系统中关键部件对整个放电系统声

效率的影响关系,分析了系统各部分的能量转换流程,建立了一套完整的分析整个放电系统的声效率计算模型。该模型在实际分析过程中,能够明确评价并反映系统各部分的设计合理性。

1 水下等离子体放电机理

1.1 水下电弧放电机理

水下等离子体产生的电弧放电经过了先导产生、热力击穿、击穿效应和气泡脉动等几个步骤^[16]。

(1)先导产生。在高电压的作用下,放电电极的击穿过程就是先导产生和发展的过程,直到其中一个先导接通电极。放电电极尖端极性不一样时,尖端和板之间的先导发展形式也不一样。

(2)热力击穿。加在电极上的电压使液体介质中有传导电流流过,这一电流虽然不大,但能使电极附近的水受热汽化。结果在电极间隙中形成气体“小桥”,沿着这些“小桥”进一步形成放电通道,发展为间隙击穿,导致电容器储能向该放电通道释放。

(3)击穿效应。通道击穿后电容器储能向液体中放电通道释放,放电电流达几十至几百 kA,通道中形成电弧放电,温度可高达 $10 \times 10^3 \text{ K}$ 。由于通道温度的升高,使压力也升高,这样在水中产生放电脉

① 国家自然科学基金(10974145)资助项目。

② 男,1984 年生,博士生;研究方向:通信与信息工程,水下高压脉冲放电,聚焦声场特性分析;联系人,E-mail: wusiguangchang2005@126.com

(收稿日期:2011-03-08)

冲击力波。

(4) 气泡脉动。在放电过程中,放电电极处的液体与放电通道直接接触,在电弧周围产生由气体形成的“气套”。在液体中一次放电可以产生两次压力冲击波,波以 $1000 \sim 4000 \text{ m/s}$ 的速度作用在物件上,冲击波强度高达 10^3 kg/cm^2 数量级,并高速地向外膨胀,形成超声波的激波向外传播,然后衰减成声脉冲。

1.2 水下电晕放电机理

与电弧放电的几个过程相比,电晕放电有先导形成,但没有形成贯穿于两个电极的等离子通道^[16,17]。电晕放电两个电极之间的距离比较大,电容器储存的能量是有限的,气泡最终没有贯穿两个电极。随着电容器能量的减少,气泡开始收缩,最终破裂。开关导通后,电容器的能量开始注入。由于尖电极的端部电流密度很大,端部形成一个很薄的高压水蒸汽层。随后在水蒸汽层内发生类似气体放电的电子崩、二次电子崩、流注、先导过程。流注头部由于强电力和焦耳热,形成新的水蒸汽层。不断重复上述过程,直到电容器的能量减少到很小。

水下电弧放电时,放电电极的间距一般都较小

(毫米量级),周围水介质的电导率较小,一般用水作为放电介质。而水下电晕放电的电极间距较大(厘米量级),放电所需要的介质的电导率相对于电弧放电大许多,常采用盐水作为放电介质。在电晕放电时,没有形成放电通道,在曲率半径很小的一个放电电极周围,会形成“树”一样的电晕区域。电流前沿的上升陡度较大,由此产生的感应电压作为触发信号可得到较高的时间准确性。它的电阻值比电弧放电的大 $10 \sim 100$ 倍,因而电流较小,所释的功率也较小,对高压电极的烧蚀较小,低电压比高电压的能量转换效率高。

2 水下等离子体放电装置

水下等离子体脉冲放电装置由控制器、高压发生器、储能电容、触发电路、触发电极、放电电极、刚性界面水箱和椭球反射罩等部分组成^[14],如图1所示。其中,高压发生器由调压器、升压变压器及整流元件组成,它将交流低压升到所需高压,并整流成直流高压。储能电容是整个声源的储能装置,起着储存、释放能量的作用。

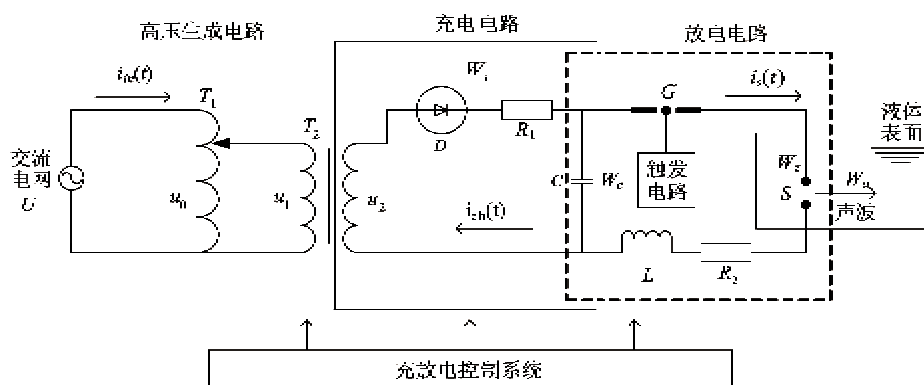


图1 水下等离子体声源工作原理

3 水下等离子体放电声效率

3.1 声效率的计算模型

如图1所示,在这里我们将系统声效率的计算分为三部分^[16]:计算充电效率 η_c 、计算放电效率 η_z 及计算电声转换效率 η_a 。

充电效率 η_c 为电容器的储能能量 W_c 与系统的输入能量 W_i 之比,表达式为

$$\eta_c = \frac{\text{储能能量 } W_c}{\text{输入能量 } W_i} = \frac{\frac{1}{2} C u_c^2}{\int_0^{T_1} u_2 \cdot I_{in}(t) dt} \quad (1)$$

式(1)中, T_1 为充电时间, $I_{in}(t)$ 为充电电流, u_2 为升压变压器输出。

放电效率 η_z 为负载消耗能量 W_z 与电容器储能能量 W_c 之比,也可称为传输效率,表达式为

$$\eta_z = \frac{\text{负载消耗能量 } W_z}{\text{储能能量 } W_c} = \frac{\int_0^{T_2} E(t) dt}{\frac{1}{2} C u_c^2} \quad (2)$$

式(2)中, T_2 为放电时间长度, $E(t)$ 为电极的电功率。

电声转换效率 η_a 为声能量 W_a 与负载消耗能量 W_z 之比,表达式为

$$\eta_a = \frac{\text{声能量 } W_a}{\text{负载消耗能量 } W_z} = \frac{\frac{4\pi r^2}{\rho c} \int_0^{T_3} p^2(t) dt}{\int_0^{T_2} E(t) dt} \quad (3)$$

式(3)中, r 为测量点到声源的距离, ρ 为水的密度, c 为声速, T_3 为压力传感器输出信号的脉宽, $P(t)$ 为声压。

根据如图 1 所示水下等离子体放电装置的等效拓扑结构及充电回路和放电回路能量的定义, 系统声效率 η_s 为

$$\eta_s = \eta_c \cdot \eta_z \cdot \eta_a \quad (4)$$

3.2 水下电晕放电与电弧放电的声效率比较

由于充电系统各部分的电路设计已经比较成

熟, 对系统总效率的影响比较稳定, 需要关注程度较低, 而且在我们设计的放电系统中, 电晕放电和电弧放电的充电系统是一样的, 即放电系统的充电效率 η_c 比较稳定一致, 这里不需要再做考虑。由于水下高压脉冲放电系统中的可变因素很多, 因此影响电声转换效率的因素也非常多, 所以这里重点研究放电回路的效率 η_z 和电极的电声转换效率 η_a 。

经过多次试验, 分别取相同储能条件下电晕放电和电弧放电的 3 组试验数据, 每组试验数据均为经过 5 次试验后的平均值, 根据式(2)、(3) 计算得到的放电效率 η_z 和电声转换效率 η_a 如表 1 所示。

表 1 水下电晕放电和电弧放电的声效率比较

放电方式	电容储能 W_c (J)	直达波声能量 W_a (J)	电极消耗能量 W_z (J)	放电效率 η_z (%)	电声效率 η_a (%)
电晕放电	250	0.586	21.600	8.64	2.712
	360	2.643	35.086	9.476	7.532
	640	7.380	78.240	12.225	9.432
电弧放电	250	5.378	15.933	6.373	33.751
	360	11.936	31.363	8.712	38.057
	640	36.141	79.200	12.375	45.632

由表 1 可知, 在我们的试验系统下, 电晕放电和电弧放电的声效率都是随着系统储能的增加而增加的, 电晕放电的系统电声转换效率偏低, 在相同储能条件下, 此试验系统电弧放电的电声转换效率约为电晕放电的电声效率的 5 倍以上。这是由于这两种放电形式的机理不同, 对于放电效率 η_z , 电晕放电电极没形成放电通道, 等效电阻大, 分压得到的能量就较高, 所以电晕放电的放电效率略高于电弧放电。但是电晕放电产生的直达波峰值压力小于电弧放电产生的直达波峰值压力, 而其脉宽只是略大于电弧放电的脉宽, 因此得到的直达波声能量小, 这使得系统总效率 η_s 低于电弧放电的系统总效率。

经过研究分析, 我们发现水下脉冲电晕放电的声效率偏低, 电弧放电虽然比电晕放电的系统声效率高, 但与相关单位的研究结果进行比较, 该系统的声效率还比较低, 存在差距的原因可能是我们系统中的储能和电压还不够高, 另外触发开关和放电电极的设计还需完善。由于系统的影响因素比较多, 如放电电极的安装形式、曲面反射罩的设计、水下放电环境等因素都会对系统的声效率产生影响, 因此要提高整个系统的声效率还需要做大量的研究工作。

4 核心部件性能对系统电声效率的影响

水下等离子体放电系统可分为高压生成系统、充电系统、放电系统和充放电控制系统 4 部分, 其中放电电极、触发电极和储能电容属于水下等离子体声源产生系统的关键部件。

4.1 放电电极对系统声效率的影响

水下等离子体放电系统将置于水中的放电电极瞬间加上高压, 将电极间的水溶液击穿, 使放电电极在极短的时间内获得大量的能量, 在水中形成巨大的冲击波。因此, 放电电极是水下等离子体强声源的电声转换核心部件。

对于水下电弧放电而言, 在设计放电电极时, 需要用熔点高、强度高、导电性能好、易于加工的放电电极材料。不同电极材料对系统声效率的影响比较明显。图 2 给出了在相同储能电容 ($0.5\mu F \times 10$)、相同放电电极间隙 (均为 2.7mm) 的情况下不同放电电极材料的系统的声效率的比较。从中看出, 不同电极材料之间的系统声效率具有较大差异。铜钨合金电极对应的效率最低, 钨电极稍高, 青铜电极的

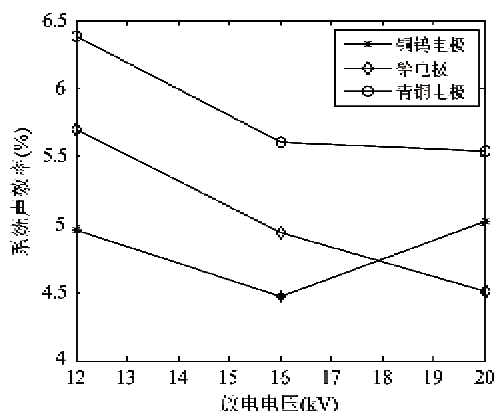


图2 不同电极材料的系统声效率比较

最高。不同材料电极对应的电声效率不同可能是由于材料的逸出功和导电率不同引起的。

放电电极间距的选择对于提高系统电声转换效率至关重要,电弧放电的电极间距为毫米量级。图3给出了在相同储能条件($0.5\mu\text{F} \times 10$)、相同电极材料(均为铜钨合金电极)的情况下,不同放电电极间距的系统的声效率的比较。从图中我们可以看到,不同放电电极间距对应的系统效率也不一样,放电电极间距越大,电声转换效率越高。但电极间距不能过大,过大会使得放电时间延长,放电场强减小,从而降低系统声效率。

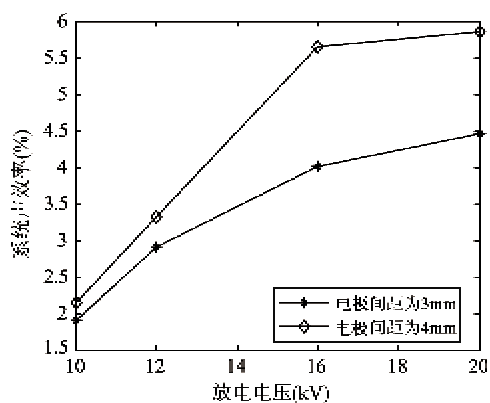


图3 不同放电电极间距的系统声效率比较

另外,放电电极的形状、放电触点的设计都会对水下等离子体声源系统的声效率产生一定的影响,这里不再赘述。

4.2 触发电极对系统声效率的影响

触发开关对系统的输出功率级、重复频率、脉冲的上升时间、幅值等产生最直接、最敏感的影响,在水下等离子体声源放电系统中占有重要的地位。触发开关的等效阻抗与触发开关的位置有关,理论上

希望开关的等效阻抗越小越好,这样负载(放电电极)就能得到更大的压降,释放更大的能量,系统的效率也会因此提高。根据系统特性,一般选用火花隙开关。常用的三电极火花隙触发开关主要有两种:同轴触发结构A和中间板触发板结构B,如图4所示。电极1,2为主电极,主电极间的间隙为主间隙,开关的电压就加在这对主电极上。电极3为触发电极,当控制电路产生触发脉冲后,开关在导通电压的作用下击穿。

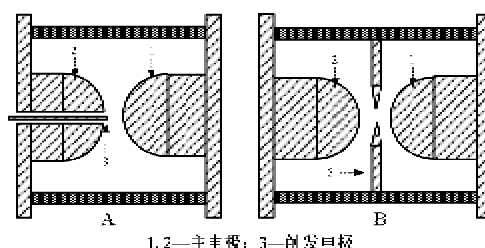


图4 两种类型的三电极火花隙开关原理示意图

A型和B型触发开关触发系统可以通用,但结构不同,工作原理也不同。按结构和原理的不同,A型称为三电极点火针触发开关,B型称为场畸变火花开关。在试验条件相同的情况下:放电电极间隙为3mm,电极材料为铜钨合金,储能电容为 $5\mu\text{F}$,两类触发开关间隙均为8mm,不同触发开关的电弧放电系统声效率比较曲线如图5所示,A型开关的系统声效率高于B型开关。这一结论也适用于电晕放电。

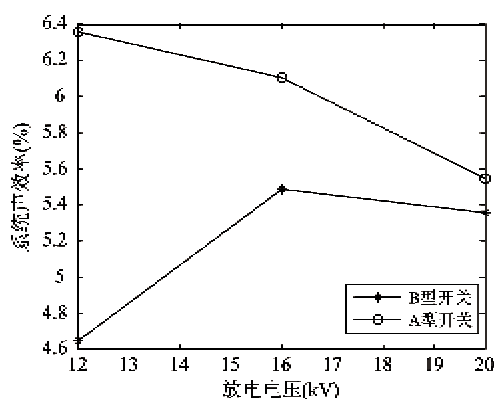


图5 不同触发开关的系统声效率比较

4.3 储能电容对系统声效率的影响

储能电容是整个系统的储能机构,起着储存、释放能量的作用。大功率脉冲电容器是充放电系统的主体部分,对它的要求为容量大、耐压高、损耗低、寄生感抗低。在放电电极均为铜钨合金电极,电极间

隙均为 4mm, 触发开关均为 B 型开关, 脉冲储能电容器均为耐压 35kV, 储能电容的材料和型号都一样, 每个电容量都是 $0.5\mu\text{F}$ 的情况下, 选取 $0.5 \times 4 = 2\mu\text{F}$, $0.5 \times 10 = 5\mu\text{F}$, $0.5 \times 20 = 10\mu\text{F}$ 三组储能电容器组进行了试验, 不同储能电容下的声效率如图 6 所示。从图中看出, 储能电容对电弧放电系统的声效率的影响很大, 当电容量增大时, 系统声效率明显增大。这一结论也适用于电晕放电。

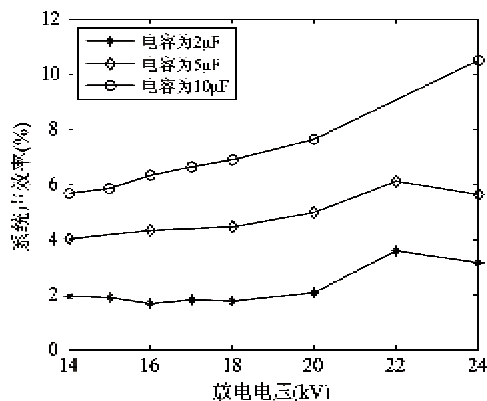


图 6 不同储能电容的系统声效率比较

通过分析放电系统的核心部件对水下等离子体声源系统的声效率的影响可知, 对于放电电极的设计, 需要选择放电效率高、耐腐蚀的电极材料; 对于电弧放电而言, 放电间距为毫米量级, 放电电极的触头可采用尖端-尖端或尖端-板放电, 而电晕放电时, 电极间距为厘米量级, 可采用单极头或多极头电极; 触发开关选用 A 型三电极点火针触发开关, 具备上升速率高、关断时间短、击穿时延小、重复频率高等优点; 储能电容则选用耐压高、寄生感抗低的脉冲电容器并联成脉冲电容器组作为放电系统的储能机构。此外, 系统中其它部件的工作特性均影响着放电系统的声效率, 需要进一步做更为详细的研究。

5 结 论

本文介绍了水下等离子体脉冲放电系统的试验装置, 详细分析了水下脉冲放电系统中关键部件对系统声效率的影响关系, 对于提高水下高压脉冲放电系统的声效率以及合理的设计和制作水下放电系统具有重要的指导意义。通过建立水下等离子体脉冲放电的声效率模型, 计算并比较了水下电晕放电和电弧放电的声效率, 结果表明, 在此试验系统下, 对于相同的系统储能条件, 电弧放电的电声转换效

率约为电晕放电的电声转换效率的 5 倍以上; 部件的设计和参数的优化配置对整个系统的声效率有重要影响。影响因素多而复杂, 这将是以后研究的重点。

参考文献

- [1] 尤特金. 液电效应. 于家珊译. 北京: 科学出版社, 1962. 4-15
- [2] 王润田. 海底声学探测与底质识别技术的新进展. 声学技术, 2002, 21(1-2): 96-98
- [3] Abou-Ghazala A, Katsuki S, Schoenbach K H, et al. Bacterial decontamination of water by means of pulsed corona discharges. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(4): 1449-1453
- [4] Fernigloh L, Traner M, Reimer D. Characteristics and performance of lithotripter electrodes. *Clinical Eng*, 1990, 15(1): 23-28
- [5] Mazzola M S, Grothaus M G, Walch M, et al. New electrical control methods to prevent power plant fouling. In: *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Pulsed Power*, Albuquerque, USA, 1995. 34-39
- [6] Yan P, Sun Y H, Zhou Y X, et. al. Underwater sound source based on pulsed corona discharge. In: *Proceedings of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2004, Boulder, USA, 2004. 596-598
- [7] 雷开卓, 黄建国, 张群飞. 定向能武器的发展现状及未来展望. 鱼雷技术, 2010, 18(3): 161-166
- [8] 孙鹏, 刘平香. 水下定位声能技术在水声对抗中的应用研究. 舰船科学技术, 2007, 29(3): 65-67
- [9] Grinenko A, Krasik Y E, Efimov S, et. al. Nanosecond time scale, high power electric-al wire explosion in water. *Physics of Plasmas*, 2006, 13, 042701:1-14
- [10] Madhavan S, Doiphode P, Kunda M, et. al. Modeling of shock wave generation in water by electrical discharges. In: *Proceedings of the 12th IEEE International Pulsed Power Conference*, Monterey, USA, 1999. 605-608
- [11] 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. 物理学报, 2002, 51(7): 1549-1553
- [12] Chang J S, Lawless P A, Yamamoto T. Corona discharge processes. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1991, 19(6): 1152-1166
- [13] 李宁, 陈建峰, 黄建国等. 各种水下声源的发声机理及其特性. 声学技术, 2009, 29(4): 1-8
- [14] 李华, 雷开卓, 冯西安等. 水下等离子体声源系统效率分析与计算. 声学技术, 2009, 28(6): 99-103
- [15] 刘强, 孙鹤鸿, 严萍等. 水下脉冲电晕放电的声学特性研究. 高电压技术, 2007, 33(2): 59-61
- [16] 李华. 水下等离子体强声脉冲特性研究: [硕士学位论文]

论文]. 西安:西北工业大学航海学院, 2010. 52-60

[17] 刘强. 水中脉冲电晕放电研究: [硕士学位论文]. 北京:中国科学院研究生院, 2006. 12-30

Analysis and research on acoustic efficiency of underwater plasma sound source

Liu Xiaolong, Huang Jianguo, Lei Kaizhuo

(School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract

To study the acoustic efficiency problem of an underwater plasma sound source discharge system, a complete set of models for computation of the acoustic efficiency of the system were established based on the analyses of the microcosmic mechanisms of corona discharge and spark discharge of underwater plasma, and the investigation of the energy transformation process of each part of the system. The experimental system for underwater pulsed discharge was proposed. The acoustic efficiency of underwater pulsed corona discharge and that of underwater pulsed spark discharge were compared and analyzed by the experiments with the self-established underwater plasma sound source experiment system. The experiments discovered that the acoustic efficiency of underwater spark discharge was evidently high in this system. On the basis of this, a series of performance experiments were carried out, and the influences of the key components of the underwater plasma discharge system on the acoustic efficiency were presented. The acoustic efficiency analysis can be used to evaluate the design of a pulsed discharge system.

Key words: acoustic efficiency, corona discharge, spark discharge, high-voltage pulsed, underwater plasma