

电火花声源的某些特性

左公宁

(中国科学院电工研究所 北京 100080)

2002 年 8 月 23 日收到

摘要 文中给出了电火花声源的压力波形及其频谱图, 着重讨论了储能与压力波峰值 P_{1m} 、和半峰值之间 $P_{1m}/2$ 的时间 t_1 之间的关系, 以及刚性圆筒内放电时边界对 P_{1m} 和 t_1 的影响。

关键词 电火花, 声源, 波形

Some properties of the spark sound source

ZUO Gongning

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The pressure waveform and its frequency spectrum of the spark sound source are given in this paper. The relation between the stored energy and the waveforms' peak values P_{1m} , the time t_1 of $P_{1m}/2$ width as well as the effect of the rigid boundary on P_{1m} and t_1 are discussed.

Key words Spark, Sound source, Waveforms

1 引言

脉冲声源可用作地质勘探的震源, 也可在海洋中用于声波传播特性的研究。脉冲声源的种类很多, 有电火花声源, 炸药声源, 气枪声源, 压电陶瓷声源等。就电火花声源而言, 美国和前苏联均制作了一些工业装备, 并针对具体产品结构对第一压力波形的影响进行了研究^[1]。我国也有某些相似的产品。本文将介绍作者多年来从事电火花声源工作的结果。

电火花声源是将储存在高压电容器中的电能瞬时在水中释放而产生脉冲压力波的一种装置。这种装置的电路框图如图 1 所示。图中高压储能电容器和水中放电电极是影响声源特性的主要部件。在放电电极处可 adopt 电弧放电和电

晕放电两种方式^[2], 后者的放电延时较稳定, 但能量转换效率较低, 国内在实用中很少采用。

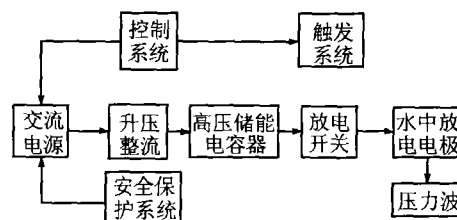


图 1 电火花声源的电路框图

本文仅针对电弧放电的压力波特性进行研究。放电可以在自由场水域中进行, 也可在边界附近进行。本文对这两种情况进行了讨论, 而边界则由刚性材料制成的圆筒形成。

2 压力波形及其频谱

2.1 在自由场水域中的压力波形^[2]

储能 260kJ 的波形如图 2 所示。当形成电弧放电, 弧道的能量使水汽化形成气泡并向外辐射压力, 随着能量的不断迅速输入气泡, 压力不断增加, 因而形成 P_1 的前沿。当电弧熄灭后, 没有能量输入气泡, 而 P_{1m} 大于静水压, 气泡继续膨胀, 使水向外运动, 气泡压力下降, 形成 P_1 的后沿。气泡压力等于静水压时, 由于惯性原因, 气泡继续膨胀而形成负压。当气泡直径膨胀到某个值后, 静水压使气泡收缩, 水向内流动, 水的动能转换为气泡内能, 气泡内压增加, 形成 P_2 前沿。当气泡收缩到最小达到 P_{2m} 后则气泡再次膨胀, P_2 下降而形成后沿。这种气泡循环直到当气泡能量辐射完后, 胀、缩循环将消失^[3,4]。

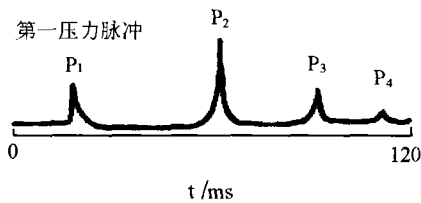


图 2 自由场水域的压力波形

由于实用中常使用第一压力脉冲 P_1 而不使用随后的几个由于气泡胀缩循环所形成的压力脉冲 $P_2, P_3 \dots$ 等, 图 3、4 给出了高压电容器储能 W_c (以下简称为储能) 为 320J 时放电所得的第一压力脉冲 P_1 及计算出的频谱图。测

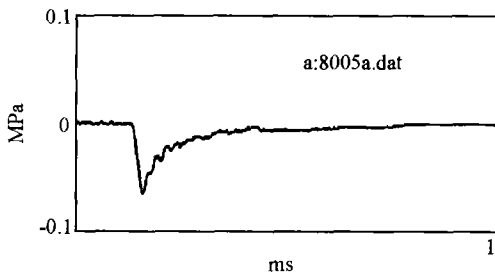


图 3 320J 时的第一压力脉冲 (实测值)

量是在中科院声学所大水池内进行的。使用 OA 型标准水听器接收, 频响 40kHz, 用数字记忆示波器记录。在距声源 1m 处测量压力。

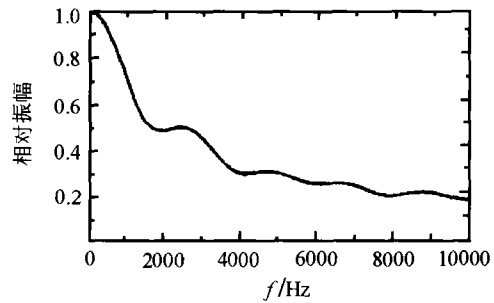


图 4 320J 时的压力脉冲频谱 (计算值)

不同储能情况下, 所得压力峰值不同, 压力频谱也不同。表 1 给出了不同储能时第一压力脉冲峰值 P_{1m} 和 t_1 的数值, t_1 是 $P_{1m}/2$ 之间的时间。测量点距声源均为 1m。表 1 表明了, 储能越大, 压力峰值也越大, t_1 也越大。

表 1 t_1 和 P_{1m} 对储能 W_c 的关系

储能 W_c	P_{1m} (MPa)	t_1 (ms)
320J	0.085	0.057
3000J	0.20	0.17
37kJ	0.97	0.25
110kJ	0.48	0.62
263kJ	2.23	0.87

* 前三组为实验室数据, 后面两组为海洋中测量值^[2]

2.2 在钢制圆筒中放电时的压力波形

储能 18kJ 在直径为 150mm 钢制圆筒内的水中水面下 1m 处放电, 用水听器在钢筒内放电点的上方 0.5m 处接收压力波。放电点和水听器均置于圆筒轴线上, 钢筒壁则成为电火花声源的刚性边界。钢筒垂直埋入地下。水听器在声源上方接收信号是为了在钢筒底部反射波到来之前接收到有效波形。图 5 中表明, $P_{1m} \gg P_{2m}$ 。在钢筒内向气泡输入能量, 刚性边界妨碍了水流的运动, 并增加水流的惯性^[3], 因而使气泡不能很快的膨胀, 使能量保持在较小的气泡空间内, 因而形成了较高的 P_{1m} 。水

流的这一惯性还使 T_B 增加^[3], 惯性的增加使水流的动能减小也使 P_{2m} 减小。试验还表明, 随着刚性边界距电火花声源越远, P_{2m} 的幅值将增加而越接近 P_{1m} , 而且 P_{1m} 也降低, 时间 T_B 也减小。图 6 则给出了 P_{1m} 和脉冲压力间隔时间 T_B 对钢筒直径 D 的关系曲线。试验使用储能为 670J, 钢筒直径变化为 75–3000mm。

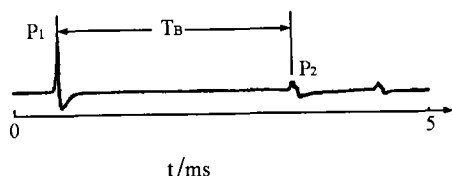


图 5 在直径 150mm 钢制圆筒中的压力波形

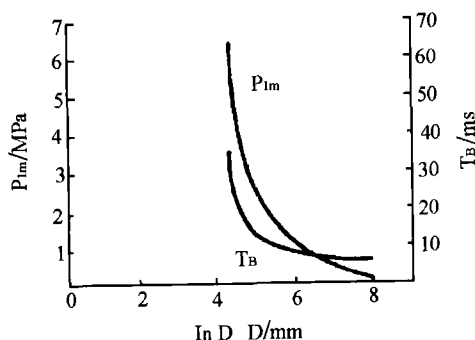


图 6 P_{1m} 和 T_B 对钢筒直径 D 的关系

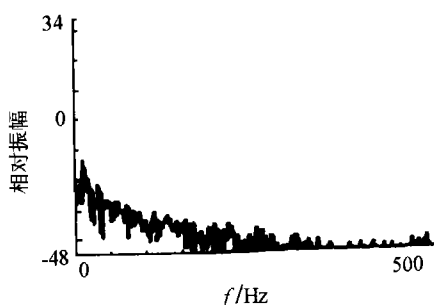


图 7 圆管中放电的压力频谱图

当储能为 160kJ, 在直径为 125mm 的钢筒内放电时, 在钢筒内距声源 20m 测量出的压力波, 则仅有第一压力波, 而没有明显的气泡胀缩循环的压力波形^[4], 压力波峰值达 2.39MPa。

和表 1 数据比较结果表明, 在钢筒内放电得到的压力峰值比在自由场水域中要大得多。图 7 给出了这一压力波形由频谱仪得出的频谱^[4], 可以看出, 压力波能量集中在 300Hz 以下。

3 影响压力波形的几个因素:

下文给出了作者在工作中得到的五种因素对压力波的影响。

3.1 储能大小和放电环境

当给定电容器的工作电压, 改变电容量, 则可改变储能。式 (1) 给出在自由场水域中^[2], 电容器工作电压为 13.5kV 时, P_{1m} 和储能的关系式:

$$P_{1M} = 0.25W_c^{0.34} \quad (1)$$

式 (1) 中 P_{1M} 的单位为 MPa, W_c 的单位为 kJ, 储能变化范围为 30kJ–260kJ。在此条件下, t_1 和储能的关系如式 (2) 所示。

$$t_1 = 0.025W_c^{0.6} \quad (2)$$

式中 t_1 的单位为 ms, W_c 的单位为 kJ。

在上两式中, 当储能 66kJ 时, $P_{1M} = 1.08\text{MPa}$, $t_1 = 0.31\text{ms}$; 而当储能为 260kJ 时, $P_{1M} = 1.6\text{MPa}$, $t_1 = 0.69\text{ms}$ 。

将放电电极放在直径 150mm 的钢筒内, 水听器距声源 0.5m, 电容器充电电压 7.5kV, 改变电容量; 则可得到 P_{1m} 对储能的关系式:

$$P_{1M} = 2.13W_c^{0.46} \quad (3)$$

式 (3) 的储能范围为 4kJ–18kJ。当 $W_c = 18\text{kJ}$ 时, $P_{1m} = 8.1\text{MPa}$, $t_1 = 0.51\text{ms}$, 均比自由场水域大得多。

3.2 改变上升沿陡度

试验表明, 在不同的储能条件下, 放电电流的持续时间和压力波峰值 P_{1m} 的出现时间基本是一致的, 也即放电电极向水介质输出能量时, 压力波出现上升前沿, 因此改变放电回路参数, 则可改变电流持续时间和输出功率, 从而改变前沿陡度。例如: 当储能为 16kJ, 电容

$C=560\mu\text{f}$ 时, 电流持续时间为 0.4ms , 同时压力 P_{1m} 出现时间为 0.37ms 。而当储能为 8kJ , 电容 $C=280\mu\text{f}$ 时, 电流持续时间为 0.34ms , 同时压力 P_{1m} 出现时间为 0.34ms 。

3.3 P_{1m} 的分散性和水的矿化度

由于电弧电阻不是一个稳定元件, 因此它会使压力波峰值产生分散性。电容器的电压越高, 电容量越大, 将有助于减小这一分散性。实验结果表明, 多次放电时, 其单次压力峰值相对于各次压力峰值的算术平均值的误差小于 10% , 标准误差 σ_n 为 $2-3$ 。

水的矿化度增高, 将使水的导电率增加, 使放电泄漏时间加长, 能量损耗增加。在同一放电条件, 将淡水换成浓度为 6% 的盐水时, 对 40 组数据的统计表明, 压力波峰值的平均值(相对值)由 99.8 下降到 81.8 , 即下降了 18% 。

3.4 试图在自由场水域中产生单脉冲压力波

在自由场水域放电时, 会产生 $P_1, P_2, \dots$ 等多个脉冲压力。但在许多情况下有用的只是第一个脉冲压力, 而其他的脉冲压力会对由第一脉冲压力产生的记录造成干扰。

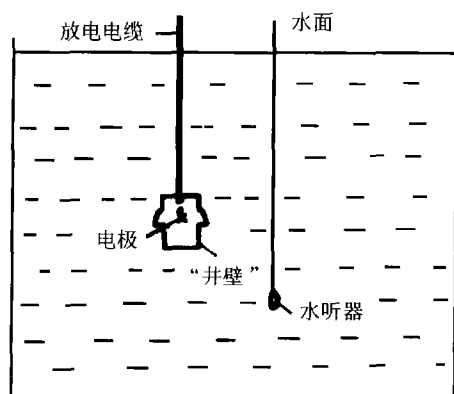


图8 “井壁”放电的试验布置示意图

前面曾提到在钢筒中放电时只有第一强脉冲压力, 而其他的脉冲压力均很弱。根据这一现象, 可以设想在自由场水域中, 为放电电极建立一个“井壁”的环境, 使之仅产生一个强脉冲压力。曾在直径为 3m , 池深 3m 的水池中进

行过试验。水池由钢筋混凝土制成, 侧壁开有窗口, 可作为灯光照明、观察和拍照之用。试验布置如图8所示。放电电极浸在水深 1.5m 处, 水听器浸在水深 2m 处, 两者水平距离 60cm 。“井壁”则约束气泡的胀缩循环。图9给出了有、无“井壁”时接收的脉冲压力波形图。上曲线是无“井壁”时的压力波形, 下曲线是有“井壁”时的压力波形。从图中可看出, 有“井壁”时仅有一个压力脉冲, 而无“井壁”时出现 4 个压力脉冲, 每个脉冲后面的乱反射为池底及侧壁的反射。当“井壁”结构适当时, 有“井壁”时压力峰值与无“井壁”时相当。

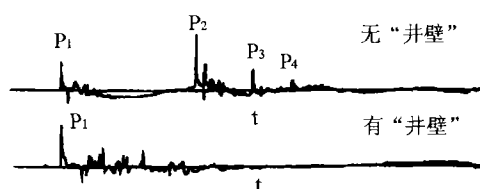


图9 有、无“井壁”时接收的脉冲压力波形图

上述试验表明, 以这一思路去消除多余的脉冲压力是可行的。问题是怎样的“井壁”结构是最佳的, 既能消除多余的脉冲压力, 又能提高能量转换效率; 以及应如何进行实用性的设计和试验。

3.5 试图在自由场水域中产生高主频的压力波

声源所产生脉冲压力的频谱是一衰减曲线。当储能超过 10kJ 时, 其大部分能量均在几百赫兹范围内, 原因是压力波没有很强的负半波。但在实际工作中, 有时需要主频超过 1kHz 的压力波。我们设法在正压力波的后面接着发射一负压力波, 共同组成一个组合压力波, 使其有设定的主频。

众所周知, 声波在传播过程中, 当从高声阻介质向低声阻介质传播时, 则在界面产生负反射波向高声阻介质传播。根据这一原理, 我们设计了一种试验装置, 使发射正压力波和反射的负压力波组合起来成为组合波。试验在面

积 7.5m×7.5m、深 5m 的水池中进行的, 试验装置的原理如图 10 所示。

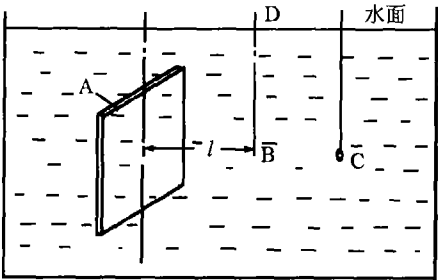


图 10 组合波装置测量示意图

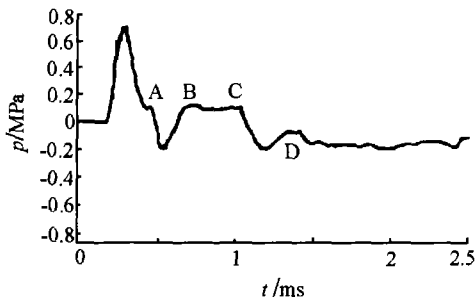


图 11 组合波的试验记录放电能量为 2kJ

图中 A 是轻质不吸水的泡沫塑料板; B 是放电电极, 浸没深度 1m; C 是水听器, 浸没深度 1m; D 是放电电缆; l 是电极距塑料板的距离, $l = 0.21\text{m}$; 电极和水听器相距 1m, 放电能量为 2kJ。当放电时, 产生的压力脉冲向右传给水听器, 同时向左传向塑料板。因塑料板的密度约 $0.3\text{g}/\text{cm}^3$, 其声阻比水低, 就产生负反射的压力波向右传给水听器。按照水中声速

为 $1.5\text{m}/\text{ms}$ 计算, 负反射波应经过 0.28ms 到达水听器处。水听器接收到的压力波记录如图 11 所示。其中 A 点时间正好符合预期结果, C 点是水面产生的负反射波。试验中塑料板与放电电极固定在铁架子上, 以保持它们之间的距离。调节 l , 可改变组合波的主频。图中正压力峰值为 0.7MPa , AB 段负压力峰值为 0.19MPa , CD 段负压力峰值为 0.15MPa 。要实际应用这种装置, 还需针对具体任务做大量工作。

4 结语

电火花声源是一种脉冲声源, 它的脉冲电功率较大, 功率峰值能达几百兆瓦, 放电时间内的平均功率也能达兆瓦级。它的压力波频谱受储能的影响很大, 当储能能几十到几百千焦时, 频带则在几千赫到几百赫范围内。只有当储能能几焦耳时, 频率才可能达到兆赫级。这种声源受边界的影响很大, 边界影响了压力波形及其 P_{1m} 和 t_1 。

常用的由压电陶瓷制成的声源, 没有储能元件, 只是能量转换元件。它与电火花声源不是同一类的声源, 在性能上难以互相代替。

参 考 文 献

- 1 Cleveland R O, Bailey M R, Naomi Fineberg, et al. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(6): 2514-2525.
- 2 秦曾衍, 左公宁, 王永荣等. 高压强脉冲放电及其应用. 北京: 北京工业大学出版社, 2000.
- 3 P. 库尔. 水下爆炸. 国防工业出版社, 1960.
- 4 孙鹂鸿, 左公宁. 应用声学, 2000, **19**(6): 40-44.