

# 海洋电火花震源的电极结构

左 公 宁

摘 要

海洋电火花震源采用两种放电形式和多种电极结构。本文对两种放电形式作了详细的论述，对四种电极结构的气泡效率作了对比，得出了一些曲线和经验公式。理论和实践都表明，平行电极放电震源比较实用，而爆炸丝放电震源效率较高。

ABSTRACT

The marine electric spark uses two kinds of discharge form and multiple electrode structures. In this paper the author details two kinds of discharge form, compares bubble efficiency of four electrode structures and offers some curves and empirical formulae. Both the theory and the practice show that the parallel electrode source is more practical, while the explosion wire source has a higher efficiency.

前 言

对海洋地震勘探来说，电火花震源是一种较好的脉冲震源。它有许多特点，例如，有较宽的频谱，其频率可从每秒几周延伸到每秒几十千周，重复激发效率高，重复性好，操作方便，对海洋污染小等等。用这种震源得到的地震资料和其它海洋勘探震源所得的资料相比，波组特征更为清楚，深层资料也有改善。因此，进一步研究电火花震源的特性是很必要的。

当储存在电容器中的电能迅速向水中的“间隙”释放时，可以在水中产生多种物理效应，如：力效应、声效应、光效应及其它综合效应。放电所产生的冲击压力，以及随后的气泡压力的衰减，形成放电的声效应，这便是电火花震源的工作原理。本文着重研究作为电火花震源的四种电极结构的放电过程及气泡过程。

试 验 装 置

为了对震源的放电过程和气泡过程进行研究，专门建立了一套试验装置。所使用的放电回路原理如图1所示。主电容器组C充电后，经由控制开关K向水间隙G作脉冲

放电，即可用作电火花震源。主电容器组是由 19 台 15 仟伏、2 微法和 2 台 5 仟伏、150 微法电容器组成。利用分流器和分压器可以拍摄放电间隙的电流和电压波形。放电间隙  $G$  置于放电室中，其结构如图 2 所示。为了用高速摄影机拍摄气泡的运动过程，在放电室壁开有一个  $\phi 300\text{mm}$  的摄影窗口，在和摄影窗垂直方向的两侧壁上还各开一个  $\phi 110\text{mm}$  的照明窗，各有一个 7.8 仟瓦的照明设备。放电室内盛有盐水用以模拟海水，含盐量为 3.5%。为了减少放电室壁对放电后所产生气泡的影响，放电室可做得大些。高压电极的下端裸露面置于水面下 450 mm 处，其余部分有绝缘被覆。

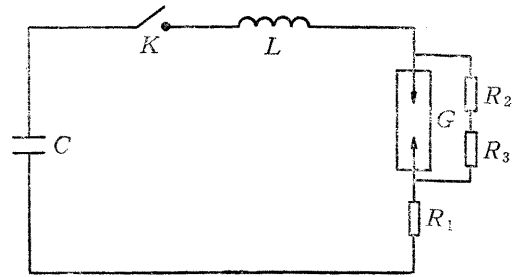


图 1 放电回路原理图

C—主电容器组；K—控制开关；  
L—回路电感；G—放电间隙；  
R—分流器；R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>—分压器

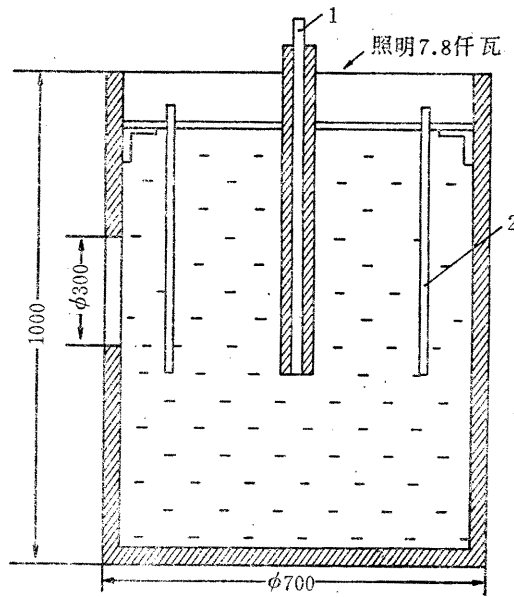


图 2 火花放电的放电室布置示意图

1、高压电极；2、低压电极，由四根裸铜棒组成，按正方形顶点分布

## 两种放电形式的分析

电容器对水中的间隙放电，一般有两种放电形式。一种是人们所熟知的电弧放电，另一种称为火花放电。

### 电弧放电

当控制开关被击穿后，电容器的电压迅速加到水间隙上，电能使水间隙的水或金属

丝加热、气化、电离而击穿，并形成具有高温等离子体通道的电弧放电。弧道可以是柱形或球形，其温度可高达几万度。弧道表面的一薄层液体被气化。此时，输入电弧的功率可高达  $10^8-10^9$  瓦，它使弧道截面和气泡都迅速向外膨胀。由于水的压缩性很小和惯性的缘故，弧道和气泡的膨胀受阻而产生高压，于是形成初始速度为每秒几十米的高压波向外传播。随后出现一个由气泡压力维持的持续时间在几毫秒的压力脉冲。在这个过程中，则向外输出机械能、光能和热能。电弧燃烧几百微秒后便熄灭，而高温、高压气泡仍继续向外膨胀，同时继续向外传输能量，气泡内的温度和压力则不断下降。当内部压力和外部压力相等时，由于惯性原因，气泡仍继续向外膨胀，于是开始形成负压。气泡直径膨胀到某一最大值后，就变为向内收缩的运动，气泡内的水分子也不断冷凝成为液体。当收缩气泡的直径接近最小值时，则开始形成第二次压力脉冲，然后又再次膨胀，压力也随之下降。在本装置的试验中，气泡的胀缩循环只进行了一次。当电容器储能较大时，这种循环可进行多次，然后才破碎，消失。输出声能振幅的频谱与胀缩周期（即胀缩一次所需时间） $T_B$  和脉冲压力持续时间  $\tau$  有关，其振幅也与脉冲压力的幅值有关。

气泡内的主要成份是过热水蒸汽、金属粒子和离子，以及由水分解的氢、氧离子。在气泡的胀缩过程中，水蒸汽和氢、氧离子不断冷凝和复合成为液态水。所以，当电极浸入水面下一定深度时，在水面上只可看到逸出的少许气泡，但看不到水冢。水间隙的电流、电压波形如图 3 所示。

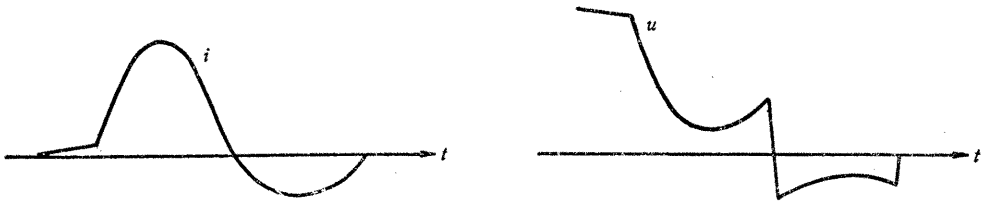


图 3 电弧放电的电流、电压示波图

由图 3 可见，其开始的斜线段是能量“泄漏”阶段（这部分能量大部分被浪费了），以后才是电弧放电阶段，曲线表现为阻尼衰减波形。电压波形则近似于马鞍形。由于电弧电阻较小（毫欧级），所以放电特性取决于放电回路的固有特性和电弧的特性。

### 火花放电

当高低压电极之间的距离增大后，则在电极间不能形成等离子体通道，仅在高压电极放电部位观察到向外喷射的半球形火花。在本装置中，当高低压电极间的距离大于

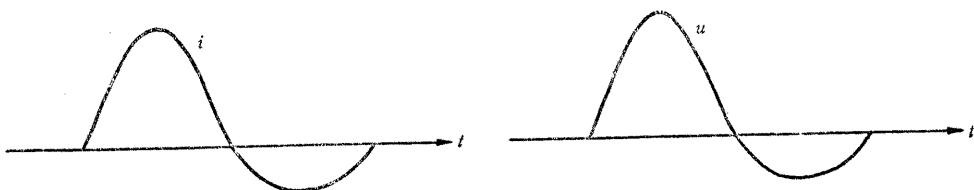


图 4 火花放电的电流、电压示波图

60mm 时即可形成火花放电。放电间隙的电流、电压典型示波图如图 4 所示。

图 4 是一种电阻性负载的波形，其阻值是几欧姆的量级，它比回路的波阻抗大得多。因此，放电的特性主要取决于负载的特性。在放电回路的固有特性相同的情况下，火花放电的电流峰值和功率峰值大约是电弧放电的一半。在高压电极附近的电场强度约为 1,200 V/cm, 这个数值只稍低于电弧放电的电场强度的数值。

在高压电极端部，存在一个“火花位降区”。当电容器储能  $W_c = 3,000\text{J}$ , 电压  $V_c = 4.2\text{KV}$  时，它的半径大约是 60mm。电容器中 90% 的电压降落在这个区内，因而其储能也大部分在此区内释放。电极间的电位分布如图 5 所示。

图 5 还表明，改变电极间的距离对这个位降区的大小影响不大。

火花放电同样也可以产生气泡。但是，它的胀缩周期较短，直径也较小。膨胀的初速度每秒只有几米到十几米。由于放电功率较小，因而气泡内压力和温度也较低。当高压电极的直径较小时，气泡呈圆形，而当直径较大时，则呈扁形。由于电能集中在高压电极附近释放，因而气泡的最大直径及其胀缩周期和电极间的距离没有密切的关系。

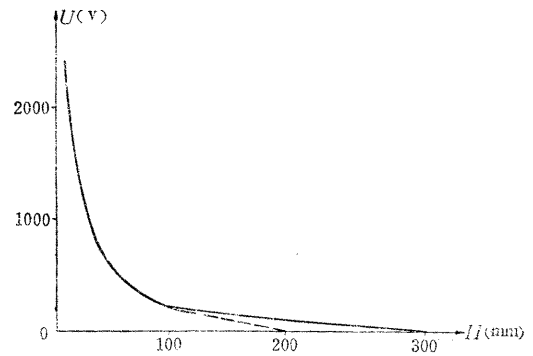


图 5 电极间的电位分布图

U: 被测点的电位  
H: 被测点与高压电极的距离  
实线: 高低压电极间距离 340mm  
虚线: 高低压电极间距离 200mm

## 四种电极结构的对比

电容器对水中间隙放电，可以做成多种电极结构。本文仅研究了四种类型：平行电极放电震源；对极放电震源；爆炸丝放电震源和火花放电震源。前三种都是电弧放电形式，后一种则是火花放电形式。

### 平行电极

平行电极即高、低压电极彼此平行布置。两个电极均只有端面裸露于盐水中，其余部分均有绝缘被覆。电极间距离  $H = 25\text{mm}$ , 电容器电压  $V_c = 4.2\text{KV}$ , 改变电容量就可改变电容器的储能。用高速照相机测量气泡的变化过程，则可求出气泡最大直径  $D_{m1}$  和气泡胀缩周期  $T_{B1}$  相对电容器储能  $W_c$  的变化关系，其曲线如图 6、7 所示。上述关系也可以用经验公式表示

$$D_{m1} = 5.6W_c^{0.40} \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

$$T_{B1} = 0.56W_c^{0.43} \quad (\text{ms}) \quad (2)$$

式中  $W_c$  的单位是焦耳。

气泡所做功  $W_g$  可由下式近似计算

$$W_g = \frac{4}{3}\pi p_0 \left(\frac{D_m}{2}\right)^3 = 5.24 \times 10^{-2} p_0 D_m^3 (\text{J}) \quad (3)$$

式中  $p_0$  是放电地点的静水压，单位是公斤/厘米<sup>2</sup>， $D_m$  的单位是厘米。 $W_g$  和  $W_c$  的比值称为气泡效率  $\eta_1$ ，当  $p_0 = 1$  公斤/厘米<sup>2</sup> 时有：

$$\eta_1 = \frac{W_g}{W_c} = 9.1 \times 10^{-3} W_c^{0.19} \quad (4)$$

$\eta_1$  曲线绘于图 8 中。由此还可以推算出  $T_{B1}$  和  $W_g^{0.36}$  成正比。

### 对极

对极即高、低压电极沿同一轴线彼此相对安置。选  $H = 10\text{mm}$ ， $C = 45\mu\text{f}$ 。改变  $W_c$  所得  $D_{m2}$ 、 $T_{B2}$ 、 $\eta_2$  的曲线如图 6、7、8 所示。这些关系也可以用经验公式表示为

$$D_{m2} = 5.6 W_c^{0.38} \quad (\text{mm}) \quad (5)$$

$$T_{B2} = 0.55 W_c^{0.40} \quad (\text{ms}) \quad (6)$$

$$\eta_2 = 9.3 \times 10^{-3} W_c^{0.15} \quad (7)$$

同时还可推算出  $T_{B2}$  和  $W_g^{0.35}$  成正比。

### 爆炸丝电极

爆炸丝放电是将高低压电极间用直径 0.6mm 的铝丝连接。高、低压电极彼此平行布置。选  $H = 60\text{mm}$ ， $C = 45\mu\text{f}$ 。改变  $W_c$  所得  $D_{m3}$ 、 $T_{B3}$ 、 $\eta_3$  的曲线如图 6、7、8 所示。这些关系也可用经验公式表示为

$$D_{m3} = 5.76 W_c^{0.43} \quad (\text{mm}) \quad (8)$$

$$T_{B3} = 1.38 W_c^{0.35} \quad (\text{ms}) \quad (9)$$

$$\eta_3 = 10^{-2} W_c^{0.30} \quad (10)$$

同时，还可推算出  $T_{B3}$  和  $W_g^{0.27}$  成正比。

### 火花放电

火花放电的试验条件是：高压电极置于放电室中心，四根裸铜棒作为低压电极按正方形顶点布置（如图 2 所示）。选  $H = 340\text{mm}$ ， $C = 45\mu\text{f}$ 。改变  $W_c$  所得  $D_{m4}$ 、 $T_{B4}$ 、 $\eta_4$  的曲线如图 6、7、8 所示。也可用经验公式表示如下：

$$D_{m4} = 24.4 W_c^{0.17} \quad (\text{mm}) \quad (11)$$

$$T_{B4} = 1.82 W_c^{0.23} \quad (\text{ms}) \quad (12)$$

$$\eta_4 = 0.76 W_c^{-0.48} \quad (13)$$

同时还可推算出  $T_{B4}$  和  $W_g^{0.45}$  成正比。

$\eta_1$  和  $\eta_2$  可达 3%—4%，而  $\eta_3$  则高达 11%， $\eta_3$  是  $\eta_1$  或  $\eta_2$  的三倍。爆炸丝放电形成电弧时所消耗的电离能要小得多，这是一个很重要的因素，同时也没有“泄漏”能量，所以它发出的冲击波能量和气泡所做的功均较大。下表给出了水、铜、铝由固态变成等离子体过程中所消耗能量的比较。而火花放电的气泡效率低达 2%，它的电极间电场强度比较低，电流密度比较小，因而等离子体的温度、压力均较低，所以使电容器的一部分储能以“泄漏”的形式转变为热能而损失了。

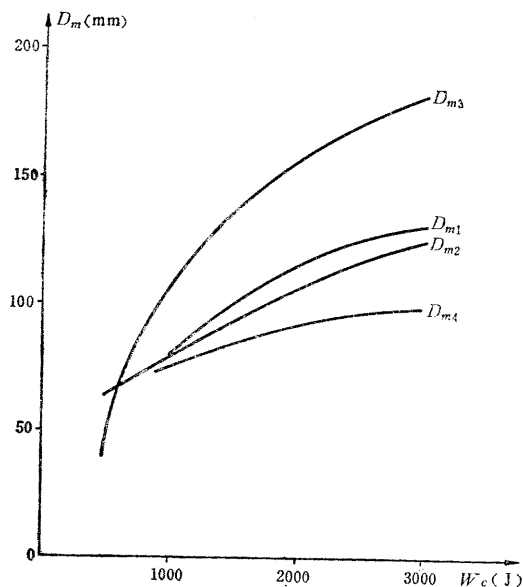


图 6 气泡最大直径  $D_m$  和电容器储能  $W_c$  的关系

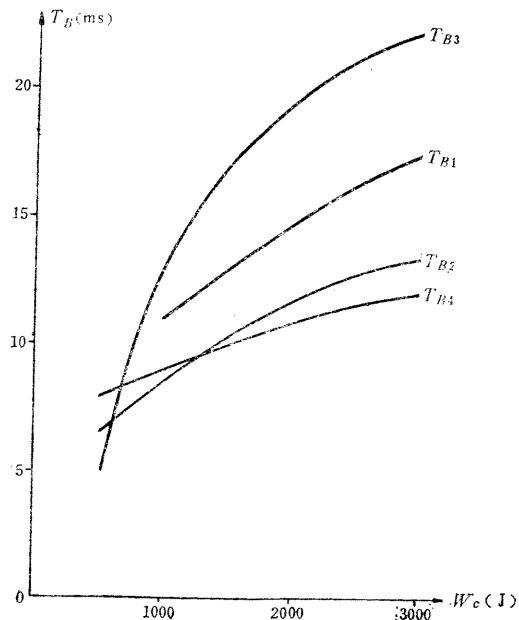


图 7 气泡胀缩周期  $T_B$  和电容器储能  $W_c$  的关系

实验结果还表明，四种震源的气泡直径和胀缩周期都随电容器储能的增加而增加，而前三种震源的气泡效率亦随储能的增加而增加。

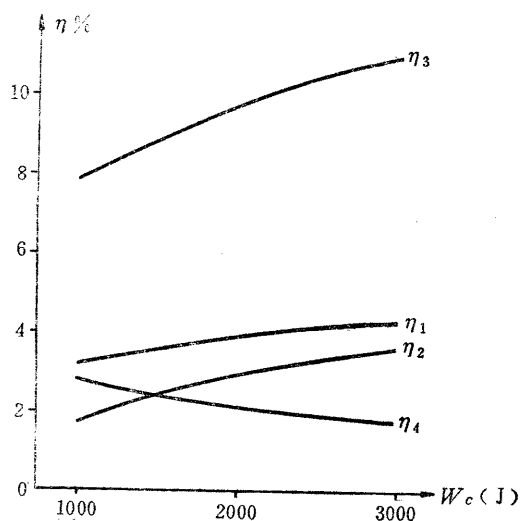


图 8 气泡效率  $\eta$  和电容器储能  $W_c$  的关系

由此看来，爆炸丝放电震源是一种效率较高的震源。当电容器储能再增加时，气泡效率还可大幅度地提高。但是船体在行驶过程中要把爆炸丝加到电极间是比较困难的。

平行电极和对极放电震源的效率不太高。但平行电极的结构简单，运行方便。实验表明，当电容器储能增加时，气泡效率可以进一步提高到30%。因此，平行电极放电震源是一种很实用的震源。

火花放电震源的结构虽然简单,但气泡效率过低,且当电容器储能增加后,效率没有增加的趋势,因此目前使用这种震源还需要研究提高效率的措施。

### 形成电弧所消耗能量的比较

	$E_1$ 卡/克·度	$E_2$ 卡/克	$E_3$ 卡/克	$E_4$ 仟卡/克
水	1	80	540	299
铜	0.093	42	1146	177
铝	0.21	92.4	2409	138

参加此项研究工作的有张禄荪、陈东兵、郭忠华、褚宗兰和谭芝仙。

### 参 考 文 献

- [1] 海洋石油勘探局地调处、中国科学院电工研究所,电火花震源,《海洋石油》,第1期,1977年
- [2] 库尔,《水下爆炸》,国防工业出版社,1960
- [3] К.А.Наугольных,Н.А.Рой,электрические Разряды В Воде,《Наука》,1971

## 石油地球物理学家学会简介

石油地球物理学家学会已经成立。它的任务是促进石油地球物理勘探技术的发展,提高会员们的专业知识水平。

石油地球物理学家学会的理事会设名誉理事长、正副理事长和正副秘书长及理事若干人,由正副理事长和正副秘书长组成常务理事会行使学会的职权。

学会每年举行一次大型学术报告会和若干次小型技术座谈会,举办各类培训班,并开展其它方面的科学技术交流工作。

学会的出版物为《石油地球物理勘探》杂志,双月刊。它主要报道中国石油地球物理勘探方面的先进技术和最新科研成果。

学会设有文献资料部。

学会的领导和主要办事机构的成员是:

名誉理事长: 顾功叙 傅承义 翁文波  
 理 事 长: 林运根  
 副 理 事 长: 潘 瑗 陆邦干 朱大授 储绍良  
 秘 书 长: 于锡胜  
 副 秘 书 长: 于占元 王敬煜  
 杂志主编兼文献资料部主任: 陈俊生  
 学会地址 : 中国河北省涿县十一信箱