

传输式大功率电火花震源在浅水中及井中的压力波形及频谱分析

孙鹤鸿 左公宁

(中国科学院电工研究所 北京 100080)

1999年8月27日收到

摘要 本文通过对传输式电火花震源在浅水中及井中所产生压力波形的分析,确定了压力波峰值与放电电极距离的关系,获得了压力波与放电能量、静水压、测量距离之间的基本关系。并对试验结果进行了分析。

关键词 大功率电火花震源, 压力波形, 浅水中, 井中

The waveforms and spectra of the pressure waves from a high-power transferring spark source in shallow water and in a well

Sun Yaohong Zuo Gongning

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

Abstract The pressure waveforms of a transferring spark source in shallow water and in well are studied in this paper. The relation between the waveforms' peak values and the discharging electrodes gap is given. The relations between the waveform and the discharge energy, the static water pressure, the measuring distance are described.

Key words High-power spark source, Pressure waveform, In shallow water, In a well

1 引言

随着油井的不断开采,许多油井的出油孔由于杂质聚集造成堵塞,使得油层渗透率降低,产量下降。利用机械振动可以清除这些堵塞物,从而增加产量。电脉冲解堵是众多振动法解堵技术中的一种^[1,2]。由于电脉冲一般设备能量小(最大储能不超过5kJ),对关键元件要求较高,未能得到广泛应用。

我们生产的电火花震源系列产品已广泛用

于石油及地矿部门的地震勘探中。近年来随着大功率电火花震源(单台震源储能最高达400kJ)的研制成功,为振动解堵技术提供了新的装备。

压力波的能量和频率是决定振动处理效果的关键因素。由于在文献中未看到有关电火花震源在井中放电所产生压力波能量及频率的论述,故本文通过对传输式电火花震源放电所产生压力波形和频谱图的分析、及相对声能的计算,以得到压力波与震源参数间的基本关系,

为实际生产提供参考,同时也为中、深井装备(传输电缆长为 2500m 左右)的研制提供一些基础参数。

2 工作原理

传输式电火花震源由地面车载电火花震源,一条近千米长的特种传输电缆和特制的放电电极组成。试验时采用 200kJ 电火花震源,传输电缆长为 666m,其工作原理示意图见图 1。高压直流电源给两组储能电容器 C1、C2 充电,充到预定电压时,触发两个放电开关 G1、G2 导通,电容器储存的电能通过传输电缆在置于井下液体介质中的放电电极 F 释放,产生强大的脉冲压力波。该压力波作用于油层,可清除油层孔道里的堵塞物,达到解堵增油的目的。

为得到震源的参数与压力波的关系,我们分别在人工湖中进行了改变放电电极距离对压力波影响的试验,和在张 19 井进行了改变放电能量、静水压、水听器测量距离对压力波影响的试验。测量压力波形时用水听器接收压力信号,用日本 CF-940 频谱分析仪、CX-338 绘图仪记录波形。测试示意图如图 2 和图 3 所示。图中, C: 储能电容, G: 放电开关, F: 放电电极, ST: 水听器。

3 试验项目及结果

一般情况下,要计算压力波声能,需在自由场水域中测量压力波。因条件所限,只能在边界近旁测量压力波,故从所测压力波计算的声能只为近似值。压力波声能的计算公式为^[3]

$$W_1 = \frac{s}{\rho c} \int_0^t P^2 dt \quad (\text{J}) \quad (1)$$

$$P = \frac{U}{M} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

式中, s 为压力波作用的面积; ρ 为水的密度; c 为水中声速,其值为 1500 m/s; M 为水听器的灵敏度,单位: V/MPa; U 为水听器的

输出信号,单位: V; P 为压力波,单位: MPa; t 为压力波的持续时间,单位: s; W_1 为压力波声能,单位: J。为计算方便,采用三角波模拟实测压力波(即 U_{1m} 和 U_{2m} 的第一个正半波)。

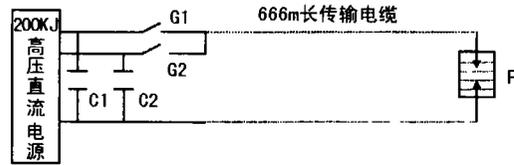


图 1 传输式大功率电火花震源工作原理示意图

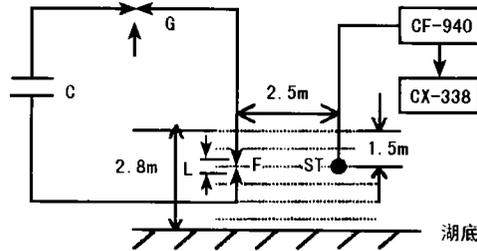


图 2 人工湖中测试示意图

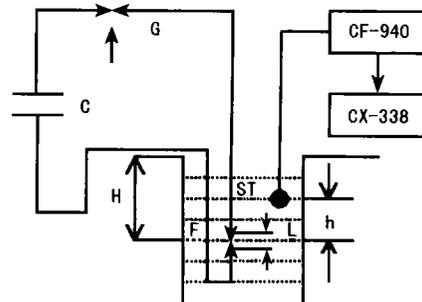


图 3 张 19 井中测试示意图

在人工湖中,压力波以球形形状向外传播,故 $s = 4\pi r^2$,放电电极与水听器的距离 $r=2.5\text{m}$,水听器的灵敏度为 $M=63\text{V/MPa}$,典型压力波波形如图 4 所示,由信号电压峰值 U_{1m} 和 U_{2m} ,根据式(2)计算出第一、第二压力波峰值 P_{1m} 和 P_{2m} ,压力波持续时间取 0.69ms。(1)式简化后为

$$W_1 = 181(P_{1m}^2 + P_{2m}^2) \quad (3)$$

在张 19 井中, 井筒半径 $r=0.0635\text{m}$, 压力波以平面波传播, 故 $s = 4\pi r^2 = 0.0127\text{m}^2$, 压力波声能为水听器所在位置的井筒截面的能量, 采用灵敏度为 $M=45\text{V/MPa}$ 的水听器, 典型压力波波形图如图 5 所示。由于 U_{2m} 远小于 U_{1m} , 我们采用 U_{1m} 计算出 P_{1m} 。(1) 式简化后为

$$W_1 = 0.0423P_{1m}^2 \cdot t \quad (4)$$

表 1 压力波峰值 P_{1m} 、 P_{2m} 及相对声能 M_1 与放电电极间距离 L 的关系

放电电极间距离 $L(\text{mm})$		5	12	16	22	26	30
压力波峰值	$P_{1m}(\text{MPa})$	0.019	0.031	0.032	0.025	0.028	0.019
	$P_{2m}(\text{MPa})$	0.027	0.071	0.09	0.087	0.1	0.07
压力波声能 $W_1(\text{J})$		0.197	0.109	0.165	1.49	1.95	0.952

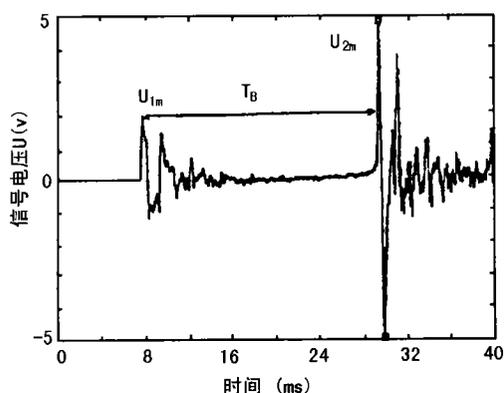


图 4 人工湖中压力波波形图

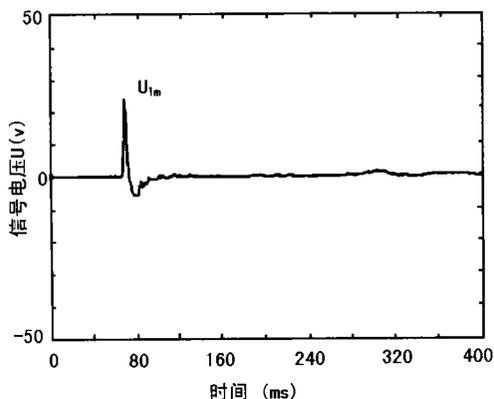


图 5 张 19 井中压力波波形图

结果表明: 在人工湖中, 当放电电极距离为 26mm 左右时压力波峰值达到最大值, 优化

持续时间 t 值见表 2 和表 3。

3.1 在河南油田人工湖内, 试验改变放电电极距离对压力波的影响

放电能量为 162kJ 时, 改变放电电极距离, 测量放电产生的压力波波形。根据式 (3) 得到计算结果见表 1。压力波峰值 P_{1m} 、 P_{2m} 与放电电极间距离 L 的关系曲线如图 6 所示。

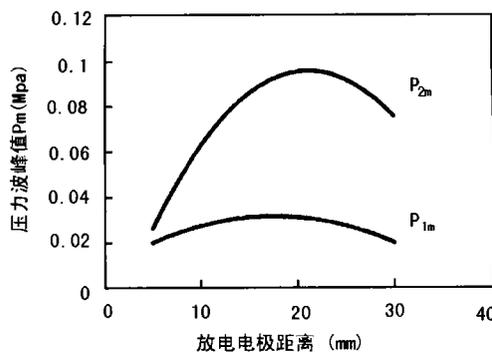


图 6 压力波峰值 P_{1m} 、 P_{2m} 与放电电极间距离 L 的关系曲线

电极距离为 16mm 至 26mm。

在图 4 中测得两个压力波。这个现象的初步解释如下:

在放电瞬间, 由于放电电弧的作用, 电弧周围的水受热汽化, 形成一个以水汽为主、夹带少量由电极所蒸发出来的金属蒸汽的气泡, 辐射出一个正压力脉冲, 称为“激波脉冲”或“第一压力脉冲”, 其峰值为 U_{1m} 。随后, 这个气泡不断膨胀, 由于惯性作用, 直到内部压力小于静水压, 气泡受外部静水压的作用, 开始收缩, 气泡内部压力随之增大, 当收缩到最小时, 气泡又从压缩恢复到膨胀过程, 这时又辐射出一个正压力脉冲, 称为“气泡脉冲”或

“第二压力脉冲”，其峰值为 U_{2m} 。如此循环过程，气泡脉冲峰值自 U_{2m} 开始逐次减小，直至气泡升出水面或由于水汽凝结成水而自行消亡。实测时没有记录足够的时间长度，只记录了两个压力波形。而在自由场水域条件下，实测波形多为两个或三个压力波形^[4-6]。图4中， U_{1m} 、 U_{2m} 的第一个正半波后出现的后续波，是由于湖面、湖底及湖中刚性物体的多次反射造成的。压力波持续时间为 0.69 ms，气泡周期即第一压力波峰与第二压力波峰之间的间隔 T_B 约为 21ms。

3.2 在河南油田张 19 井中，试验改变放电能

量、静水压和水听器测量距离对压力波的影响

(1) 水听器与放电电极中心垂直距离 h 为 20m，改变放电能量，测量放电产生的压力波形。据式 (4) 得到计算结果见表 2。结果表明：当静水压不变时，压力波峰值与能量随放电能量的增加而增大。

(2) 水听器与放电电极中心垂直距离 h 为 20m，改变放电电极深度，测量放电产生的压力波形，计算结果见表 2。

结果表明：放电能量不变时，在所试验的范围内随着静水压的增加，压力波峰值没有变化。

表 2 压力波与放电电极下井深度的关系

放电电极深度 H(m)	45			45	35	25
放电能量 E(kJ)	128	162	200	162	162	162
信号电压峰值 U_{1m} (V)	99	107.6	133.4	107.6	107.6	118.9
压力波峰值 P_{1m} (MPa)	2.2	2.36	2.96	2.39	2.39	2.64
压力波声能 W_1 (J)	1.35	1.62	2.52	1.62	2.52	3.07
压力波持续时间 t (ms)	6.6	6.7	6.8	6.7	10.4	10.4

(3) 放电电极下井深度为 45m，放电能量为 162kJ，改变水听器与放电电极中心距离，测量放电产生的压力波形，用以考查沿井筒方向振动强度随与放电电极中心距离增加时的衰减关系，并计算在测量点截面的压力波声能。据式 (4) 得到计算结果见表 3。

表 3 压力波对水听器与放电电极距离的关系

水听器与放电电极中心距离 h (m)	15	20	25
压力波峰值 P_{1m} (MPa)	3.98	2.39	1.92
压力波声能 W_1 (J)	6.91	1.62	1.25
压力波持续时间 t (ms)	10.3	6.7	8

结果表明：当静水压和放电能量不变时，沿井筒方向随着水听器与放电电极中心距离的增加，压力波峰值随之减小。

井中放电时，井壁刚性边界对压力波的影响参见文献 [3]。本次试验实测波形见图 5，第二压力波不太明显。井中压力波的频谱如图 7 所示，压力波的能量主要集中在 300Hz 以内。

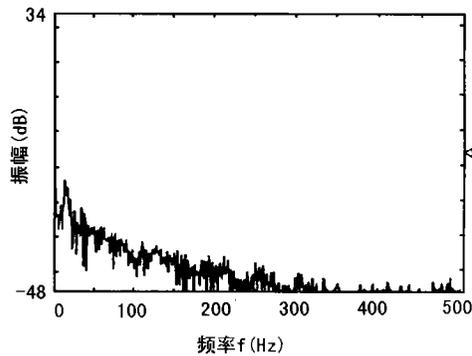


图 7 张 19 井中压力波的频谱图

4 结论

(1) 当放电能量不变，放电电极距离为 26mm 左右时，压力波峰值达到最大值，实用放电电极距离为 16mm 至 26mm。

(2) 当静水压不变时，压力波峰值与能量随放电能量的增加而增大；当放电能量不变时，在所试验的范围内随着静水压的增加，压力波

峰值没有变化;当静水压和放电能量不变时,沿井筒方向随着水听器与放电电极中心距离的增加,压力波峰值随之减小。

(3)井中所测压力波峰值最大为 3.98Mpa,远大于人工湖中所测的压力波峰值(最大为 0.1MPa),脉宽为 6-10ms,压力波能量集中在 300Hz 以内。

传输式电火花震源作为脉冲震源,能量调节范围大,具有适合于地震勘探和振动采油所需的频谱特性,是一种较好的非炸药震源。通过对其压力波波形的分析与计算,获得了压力波

与震源参数间的基本关系,为实际生产和中、深井装备的研制提供基础参数。

参 考 文 献

- 1 韩雯等. 电工电能新技术, 1998, (1).
- 2 孙鹤鸿, 左公宁. 电工电能新技术, 2000, (3).
- 3 P. 库尔. 水下爆炸. 国防工业出版社, 1960.
- 4 孙林. 电火花震源的压力波形及声能分析. 中科院电工所论文报告集, 1980, (3).
- 5 王清源等. 海洋电火花震源声信号模型及其对应频谱. 中科院电工所论文报告集, 1980, (2).
- 6 施德丰. 石油地球物理勘探, 1983, (2).

应崇福院士应邀在武汉作超声学科普报告

金秋江城的 9 月 13 日下午,华中科技大学学术交流中心宽敞的报告大厅内,在来自高等院校、科研院所、医院、公司等 20 来个单位的 230 余名大学生、研究生、医务人员、科技人员的热烈掌声中,82 岁高龄的国际著名超声专家,我国超声学研究的开创者、奠基人,中国科学院资深院士应崇福教授,向大家做了题为“我们身边的超声世界”科普报告。他从白暨豚在浑水中利用超声定位与识别目标的独特本领和蝙蝠在黑暗中穿越障碍与捕捉昆虫的高超技艺谈超,深入浅出地介绍了人类产生超声的原始试验及近代技术。接着,从医学上的超声诊断与治疗,到工业中的超声无损检测与处理;从航天、航海的尖端科技,到日常生活的家用电器等方面,列举了超声学成功应用的诸多生动事例。包括超声电子学在移动电话及声化学在增强化学反应方面的最新进展。进而自然引伸到这些重要应用的共同物理基础-超声波在固体、液体、气体及复杂介质中的传播规律及将超声波的传播变为“可见”的光弹观察技术。最后讲到超声学正在研究的课题,特别是强超声在液体中产生的奇特的空化效应。

应先生的报告足足持续了两个半钟头。中国声学

学会科普工作委员会委员沈建中研究员用手提电脑通过多媒体,配合放映了报告中的上百幅画面。所有听众,都自始至终被应先生精彩的报告所吸引。一致反映他的报告,站得高,看的远;内容充实、丰富。可以从中学到许多东西。这是一次弘扬科学精神,普及超声学知识的难得机会和很好方式。

这次科普活动由中国声学学会发起、组织并申报列入“中国科协系统 2000 年百场科普报告会计划”。报告会由湖北省科协学会部和湖北省声学学会联合签发通知主办。湖北省、武汉市医学会,湖北省、武汉仪器仪表学会,华中科技大学科协共同协办。华中科技大学无偿提供了良好的会场条件。该校科协副主席吴鸿修教授主持了会议。副校长丁烈云教授,著名超声医学专家王新房教授、张青萍教授等,会前与应先生会晤并亲切交谈。会后,应先生高兴地与各协办学会的理事长,秘书长合影,并也和华中科技大学 4 位女大学生听众愉快地合影留念。

中国声学学会对以上各方给予的大力支持,深表谢意。

(中国声学学会科普工作委员会 张德俊)