

高温声波测井压电换能器*

王 璞

(北京市崇文区无线电元件一厂)

在英明领袖华主席“抓纲治国”的伟大号召下，在工业学大庆的大好形势的鼓舞下，我们厂一年多来，在山东大学物理系、中国科学院物理研究所和石油部门参加下，先后试制成功三种新的高温声波测井压电换能器，经西安石油仪器二厂和一些油田试用，又在我国第一口超深井作了现场考验，性能良好。

一、石油战线数年来期待着高温声波测井换能器

石油战线的同志们在向地球的深处要油、要气。但是，随着油井加深，井温不断增加（往下每千米地温约上升 33℃），井下压力不断加大（往下每千米约增加 100 个大气压），这会使声波测井换能器失效。当然，测井技术必须与油井加深相适应。石油战线数年来一直在期待着试制出高温声波测井换能器。

石油声波测井分为两种。

一种是声速测井，其对象是裸眼井。这种测井的电子发射线路以每秒二、三十次的电脉冲，敲击作发射用的压电换能器。发射换能器产生机械振动，发射出换能器的固有频率的声波（约 20kC），声波射至井壁，顺着裸眼井壁滑行。当声波从地层传到距离发射换能器 1m 处和 1.5m 处的两个接收换能器时，接收换能器产生交变电讯号，记录这两道接收电讯号的时差，即可获得地层的声波传播速度。声波测井可以进行地层对比，确定含油含气层求得地层的孔隙度，与其他测井方法组合可确定地层的油气储量。

第二种是声幅测井。下井部分也同样设有相距 1m 的声波发射换能器和声波接收换能器。利用声波幅度在套管井内的衰减情况，检查油井在固井后套管外水泥与套管胶结固化好坏的程度。这是工程测井重要的一项。

声波测井的井下仪器的电子线路部分，为了避免高温对元器件的影响，往往采用真空保温瓶保护起来。但是真空不能传导声波，因此井下收发压电换能器还

是必须在高温下工作。

早年国内生产的压电换能器是一种径向极化的锆钛酸铅（PZT）或锆钛铋镁酸铅（PCM）压电多晶材料。但其温度性能不能满足深井测试的要求，因此必须制造出能在高温工作的压电换能元件。

二、新换能器的试制与新老换能器性能的比较

我们分析了原有换能器的各种参数，认为其不适于高温工作的原因有两方面，一是材质，二是电极设计。PZT-5 和 PCM 的居里点比较低。为了获得温度性能较好的换能器，去年我们试制了一种切向极化的钨镉锆钛酸铅的压电换能器，其几何尺寸为 $\phi 55 \times 40\text{mm}$ ，壁厚为 3.5mm，如图 1 所示。它和老的径向极化的 PZT 或 PCM 换能器对比具有较好的高温性能。

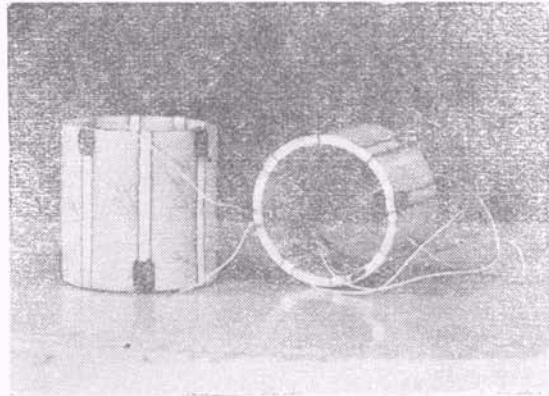


图 1 切向极化的钨镉锆钛酸铅压电换能器

我们采取的这种切向极化元件振动模式较单纯。这种振动模式是由极化和振动同一方向的纵向振动造

* 1977 年 9 月 5 日收到。

成的径向振动。

$$N_{\phi} = \phi \times f_r \quad (1)$$

式中 N_{ϕ} 为径向振动频率常数;
 f_r 为径向固有频率;
 ϕ 为平均直径。

它的纵向机电耦合系数 K_{33} 高于 K_{31} , 所以换能效率高。我们测量有效机电耦合系数作为衡量换能器的换能效果。

有效机电耦合系数

$$K_{eff} = \sqrt{\frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}} \quad (2)$$

式中, f_r 为换能器的正谐振频率;
 f_a 为换能器的反谐振频率。

切向极化电极做在换能器的外表皮, 它为一正一负间隔闭合的环形电极, 如图 2 所示。

切向钨镉换能器比径向 PZT 换能器有效机电耦合系数高, 前者平均为 0.4, 后者一般为 0.26—0.28。新的钨镉切向换能器 K_{eff} 的温度稳定性好在 20—200°C 之间, 一般 K_{eff} 的变化 < 5%, 频率温度稳定性在 20—200°C 之间, $TK_{eff} < 80 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。切向极化换能器的电容随温度变化比径向极化者小一些。

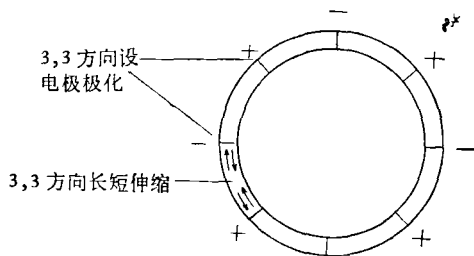


图 2 切向极化换能器的俯视图

新换能器分成发射和接收二种形式, 发射换能器设 12, 14, 16 条电极。接收换能器设 6 或 8 条电极。从理论上分析发射功率与 E^2 (电场强度) 有关。在发射电压相同时电极条数多, E 就高, 发射功率也高。但是电极又不能设得太多, 因为在工艺上不能将电极做得很窄。而且条数太多, 电极本身占有无功体积就大。电极一般以 12—16 条为宜。而接收换能器极间距离越大, 同样的声压产生的电压就高。接收元件越薄越易产生形变, 输出讯号也越高。现在我们试制的新换能器接收灵敏度是老形式的 5—10 倍以上。

为了比较两种换能器的发射效率, 应使两者线路匹配适当。切向极化的阻抗高, 径向极化的阻抗低。图 3 的线路是一般使用的直流脉冲激励线路。其中有一个脉冲电压的升压变压器 T, 初次级线圈比为 60:900, 对于径向元件是合适的, 对于切向元件就显得不合适了。如果适当提高匝数比, 使发射电路与换能元件的

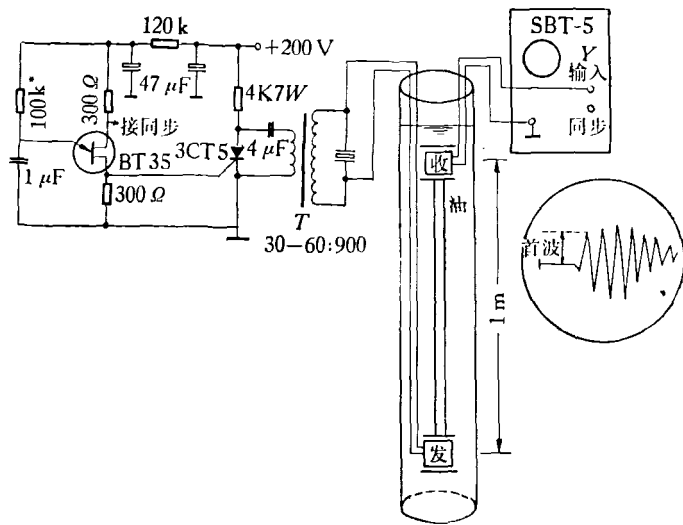


图 3 测量换能器在铝筒中的滑行波所用装置及线路

阻抗匹配就可以充分发挥新换能器的效率。

三、在我国第一口超深井的现场试验

1976 年我厂、中国科学院物理所、西安石油仪器二厂等单位及石油部门一起, 在四川我国第一口超深井 (6010m) 将我们试制的新换能器作现场考验。发射和接收都是用钨镉 8 条电极的换能器作声幅测井试验, 同时用老径向极化换能器作对照。试验中, 老 PZT 元件在 3400m 就完全失灵, 记录到的声幅曲线几乎是直线; 而新的换能器在 5250m 处仍然工作正常, 记录的声幅曲线非常清楚, 波形高低分明。在浅井部位, 这两种换能器记录的曲线全部重合, 新换能器所表示的滑行波首波幅度为老换能器表示幅度的 9.9 倍, 得到可喜的现场效果。

四、向 250°C 进军取得了初步的成效

油井越打越深, 对我们提出了更高的要求。1977 年我厂试制组的同志在石油战线捷报频传的大好形势鼓舞下, 又投入了试制在 250°C 温度下工作的换能器的会战。我们选取了具有更高居里点且又有高 K_{33} 参数的新材料试制成了铌锂压电换能器和铌锡压电换能器, 能在 250°C 工作。尤其铌锂材料发射和接收效能比钨镉材料高。这两种材料制作的换能器的 K_{eff} 在 20—250°C 的温度范围内变化小于 7%。铌锂元件换能的 K_{eff} 大约是 0.55—0.6, ϵ 值大, 发射功率高, 在与电路匹配的条件下, 对同样的发射电源, 其发射声功率

表 1 几种换能器一些性能对比

品 种	极化形式	K_{eff}	电容 (pf)	工作温度(°C)	收发式样	振动模式及频率	居里点 (°C)
PZT	径 向	0.26—0.28	20000以上	<100	收发相同	20kc 50kc	
钨 镉	切 向	0.4	1000	200	发收 8 条电极	20kc	340
铌 锂	切 向	0.55—0.6	1000—2000	250	发12条电极收 8 条电极	20kc	360
铌 锡	切 向	0.45—0.5	1000—2000	250	发12条电极收 8 条电极	20kc	380

为老径向 PZT 的 2.5—4 倍,接收灵敏度比老径向 PZT 高十几倍,收发综合效果是老的二十多倍。铌锡元件 K_{eff} 在 0.45—0.5,发射和接收效果没有铌锂的高,但比钨镉元件高,有的元件的 K_{eff} 值在 250°C 时比室温时还略有上升。一些性能如表 1 所示。

五、几种换能器的实验数据

1. 换能器的有效 K 值随温度的变化

有效 K 值很大程度上决定了换能器的工作效能,因此在烘箱中升温作换能器不同温度的 K_{eff} 变化测量,所用换能器都是 8 条电极。结果如表 2。

表 2 K_{eff} 随温度变化关系

温度 (°C)	钨 镉	铌 锂	铌 锡
室 温	0.385	0.592	0.496
100	0.373	0.599	—
150	—	0.605	0.500
200	0.365(230°C)	0.594	0.490
250	—	0.575	0.479
$\frac{\Delta K_{eff}}{K_{eff_{max}}}$	-5.21%	-2.76%	-3.44%

2. 换能器在钢槽油浴内升温测量滑行波衰减

在钢槽两端分别设置发射和接收换能器,浸泡于硅油油浴中。固定收发距离 0.8m。发射元件接上直流脉冲发生电路,接收元件接在 SBT-5 示波器上。油浴从室温升温到 200°C 或 250°C,观察接收元件在 SBT-5 上显示出的首波幅度的衰减情况。

老径向 PZT 换能器在 150°C 时接收换能器输出讯号首波幅度下降 60—70%。

而钨镉换能器在 200°C 首波下降 20—30%,

铌锂换能器在 250°C 首波下降 20—30%,

铌锡换能器在 250°C 首波下降 10—20%。

实际上这种试验是不严格的。例如硅油从室温到 250°C 粘度变小,声速变小;钢槽随温升膨胀也使声速变小,方形油槽声场不对称性产生波形叠加,这些因素都算在换能器的升温变化上是不合理的,因此只能作

为粗线条的对比。

3. 比较几种换能器的发射功率、接收灵敏度和收发综合效果的滑行波测定方法。

实验装置如图 3 所示。在一个高约 1.5m,直径 200mm 的铝筒中盛满变压器油,用一根长 1m 多直径 20mm 的黄铜花竿将收发换能器固定在相距 1m 处,两个换能器各用屏蔽线引出,发射换能器和电子路线的脉冲升压变压器的次级线圈联接。接收换能器两引线一头接 SBT-5 示波器 Y 输入,一头接示波器的地。发射线路单结晶管第二基极接 SBT-5 的触发输入。发射换能器加上脉冲激励电压以后,发射出 20kc 声波顺着筒壁滑行至接收换能器,声压转变成电讯号由示波管显示出来,再以达到时间和 SBT-5 的比较讯号测量首波幅度。表 3 至表 6 所列数据都是用此方法做出的。

表 3 固定接收换能器比较发射换能器的效率
(接收换能器为径向 PZT)

发射换能器	变压器匝数比	示波器读数(伏)	
径向 PZT	60:900	0.90	
W-Cd-8	60:900	0.66	
	40:900	0.975	
	30:900	1.15	
Nb-Li-8	60:900	0.975	
	Nb-Li-12	60:900	1.42 ²
	Nb-Li-14	60:900	1.65
Nb-Li-16	40:900	2.10	
	30:900	2.25	
	60:900	1.80	
Nb-Sn-12	60:900	0.90	
	Nb-Sn-14	60:900	0.90
	Nb-Sn-16	60:900	1.20

如以钨-镉-8(W-Cd-8)发,钨-镉-8收,变压匝数比 60:900,读数为 4.0 伏;变压比 30:900,读数则为 8.0 伏。

从表 3, 4, 5 中的数据可以清楚地看出新老换能器的发和收的综合效果。

这里需要说明的是,表 4, 5 中铌-锂-12(Nb-Li-12)、铌-锂-14(Nb-Li-14)和铌-锂-16(Nb-Li-16)作

发射元件,用径向 PZT 和铌-锂-8 (Nb-Li-8) 作接收

表 4 固定发射换能器比较接收换能器
(变压器匝数比都是 60:900)

发射换能器	接收换能器	示波器读数(伏)
径向 PZT	径向 PZT	0.90
径向 PZT	Nb-Li-8	6.0
径向 PZT	W-Cd-8	5.0
Nb-Li-14	径向 PZT	1.58
Nb-Li-14	Nb-Li-8	18.0
	Nb-Li-6	18.0
	W-Cd-8	12.0

表 5 调整阻抗匹配后的发射效果
(固定 Nb-Li-8 为接收换能器)

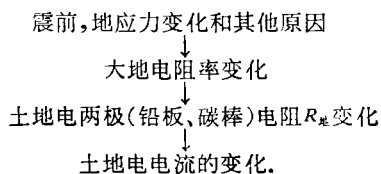
发射换能器	变压器匝数比	示波器读数(伏)
径向 PZT	60:900	6.0
Nb-Li-8	60:900	8.5
	50:900	10.0
	40:900	12.4
	30:900	15.0
Nb-Li-12	60:900	18.0
	50:900	19.5
	40:900	22.0
	30:900	24.0
Nb-Li-14	60:900	16.0
	50:900	17.0
	40:900	20.0
	30:900	22.0
Nb-Sn-12	60:900	11.5
	50:900	13.5
	40:900	16.5
	30:900	19.5

(上接 373 页)

5. 我们在埋设电极时,做过这样的实验:逐步捣实电极附近的土壤,可以看到微安表指示的电流有相应的变化。这说明,电极附近大地的电阻率与土壤的应力状态有关。

由此我们可以想到,地震前,由于土壤的应力状态的变化和其他原因,引起两电极附近大地电阻率的变化,而这一变化将引起土地电电流的变化。

最后,把以上的叙述小结一下:



元件数据有些矛盾,为此,我们作了重复实验,证明数据是对的,其中尚有发射及接收的某种因素问题尚待研究。

我们对铌锂换能器作了压力试验,外压力由 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 升到 $1500\text{kg}/\text{cm}^2$ 电容变化为 5% 左右。

环境温度由 30°C 升到 190°C 电容变化 50%。

表 6 某油田使用我厂试制的铌锂换能器作出的数据

发射换能器	接收换能器	变压器匝数比	示波器读数(伏)
径向 PZT	径向 PZT	60:900	0.70
Nb-Li-12	径向 PZT	30:900	1.70
Nb-Li-12	Nb-Li-8	30:900	8.10
Nb-Li-12	W-Cd-8	30:900	75.0

接收滑行波由常压升高到 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$, 波形和幅度无变化,可见换能元件在井下受温度的影响是主要的,压力影响较次要。

六、简短的结语

1. 从材质和电极设计两方面分析了原来径向极化的 PZT 换能器的不足之处,采用高居里点高稳定高机电耦合系数的压电材料,并用切向极化试制了三种新的声波测井换能器,按照发射、接收换能器的不同要求合理的安排发射和接收换能器的电极条数有利于提高发射及接收效能。

2. 第一种钨镉换能器提供在 200°C 工作,频率的温度稳定性好,但机电耦合系数较低。

第二种铌锂换能器供 $200-250^\circ\text{C}$ 工作,机电耦合系数高,发射及接收效率高、温度稳定性好,但频率温度稳定性较差。

第三种铌锡换能器供 $200-250^\circ\text{C}$ 工作,温度稳定性好,机电耦合系数及发射接收效率中等。

因此,异性极土地电能够从地应力和大地导电性这两个方面反映地震、预报地震。

以上是我们在利用土地电进行预报过程中想到的一些问题。这些认识很不成熟,衷心希望同志们进行指教和批评,并且希望能在今后的实践中和同志们一起探讨、研究,弄清土地电的原理,使我们的测报工作更加自觉、更加有效。

参 考 文 献

- [1] 《地震知识》,中央人民广播电台《学科学》节目。
- [2] 《地震》,天津市地震办公室《地震画册》编绘组。
- [3] 郭鹤桐,《电化学》,高等教育出版社。
- [4] 孟昭英,《物理通报》,7(1955),411。
- [5] 塔姆,И. Е.,《电学原理》,人民教育出版社。
- [6] 兰茨别尔格,《初等物理学》二卷一分册,上海教育出版社,(1961)。