

压电陶瓷材料在大功率高静压力下的性能的实验研究*

赵春山 金亨焕 陈守六

(中国科学院声学研究所)

压电陶瓷具有许多优点,因而广泛应用于换能器中。但是,这种材料的参数并非常数,而是时间、温度、应力、电场等因素的函数。特别对于水声换能器应用而言,压电陶瓷在大功率高静压力下的性能是人们十分关心的。本工作对压电陶瓷在大功率高静压力下的性能进行了实验研究,并对若干技术问题进行了讨论。

一、引 言

近年来,无论在国内还是在海外,压电陶瓷材料都被大量应用在换能器中。这主要是由于这种材料与其它类型的换能材料相比具有许多优点,例如:机电耦合系数高,功率容量大,容易做成所需要的形状,电场方式可灵活选择等。但是,压电陶瓷材料的参数并非常数,而是时间、温度、应力、电场等诸因素的函数。特别对于水声换能器应用而言,随着大功率、深水换能器的研制,压电陶瓷材料在大功率高静压力下的性能是人们十分关心的。因此,我们在前人工作^[1-3]的基础上,对几种常用压电陶瓷材料的参数随电功率及静压力的变化情况进行了实验研究。

二、原 理

根据压电换能器原理,如果不计介电损耗,则在谐振频率附近,典型压电振子的导纳随频率变化的轨迹为一圆图。

特别,对于横向模压电振子,材料的弹性柔顺常数 S_{11}^E 、机械损耗因子 $\lg \delta_M$ 、相对介电常数 $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ 、有效机电耦合系数 K_{eff} 以及压电应变常数 d_{31} 可分别表示如下:

$$S_{11}^E = \frac{1}{4\rho l^2 f_s^2};$$

$$\lg \delta_M = \frac{1}{Q_M} = \frac{\Delta f_s}{f_s}, \quad \Delta f_s = f_{+\frac{1}{2}} - f_{-\frac{1}{2}};$$

$$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = \frac{t C^T}{l b \epsilon_0};$$

* 1979 年 12 月 13 日收到。

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{C_1}{C^T}} = \sqrt{\frac{\Delta f_s}{2\pi f_s^2 R_1 C^T}};$$

$$d_{31} = \sqrt{K_{31}^2 \epsilon_{33}^T}.$$

其中, ρ 为材料密度, l 、 b 、 t 分别为横向模样品的长度、宽度和厚度, f_s 为从导纳圆图上测得的振子的串联谐振频率, $f_{+1/2}$ 和 $f_{-1/2}$ 为从导纳圆图上测得的振子的半功率频率, Q_M 为材料的机械品质因数, C^T 为振子的自由电容, C_1 为振子的动态电容, R_1 为从导纳圆图上测得的振子的动态电阻, 而 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ 法/米, K_{31} 为材料的横向机电耦合系数, 可由 K_{eff} 求出^[4].

三、方法与结果

为了测得压电陶瓷材料参数随(1)静压力、(2)电功率、(3)静压力和电功率的变化关系, 本实验使用了本所自制 YZ-1A 型导纳-阻抗轨迹图示仪和高静压容器。其中, 图示仪工作电压范围为 1—300V, 频率范围为 200Hz—200kHz, 测量误差为 $\pm 5\%$; 高静压容器工作压力范围为 1—600 大气压, 内设吸声壁, 以消除反射声的影响。整个测量系统的框图如图 1 所示。

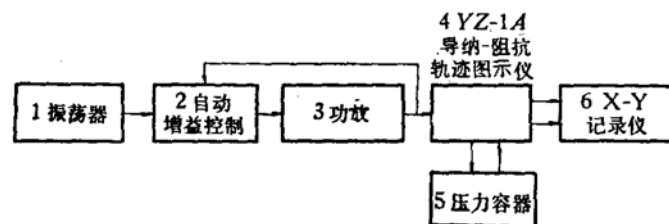
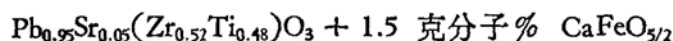


图 1 测量系统的框图

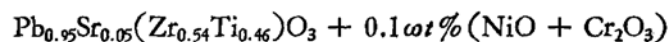
Block diagram of measurement system

1 oscillator 2 AGC 3 power amplifier 4 YZ-1A admittance-impedance trace grapher 5 pressure vessel 6 X-Y recorder

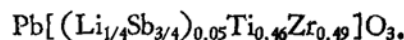
测量中使用的样品为本所生产的横向模振子, 长 3 厘米、宽 0.3 厘米、厚 0.15 厘米。其中, 发射型材料 FC 的配方为



收发型材料 NC 的配方为



接收型材料 LS 的配方为



所有样品均经过三个月的时间老化。测量时, 用点接触型支架将样品支承在其基频的节点上, 浸于高静压容器内的机油中。

测量的结果如下:

1. 在维持中等场强条件下, 发射型材料 FC、收发型材料 NC 的相对介电常数 $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ 和介电损耗因子 $\text{tg } \delta_E$ 随静压力的变化, 如图 2 所示。

2. 发射型材料 FC、收发型材料 NC 的相对介电常数 $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ 和介电损耗因子 $\text{tg } \delta_E$ 随电场的变化, 如图 3 所示。

以上介电性能用本所自制高压电桥测量。该电桥工作频率为 1 kHz, 工作电压可达

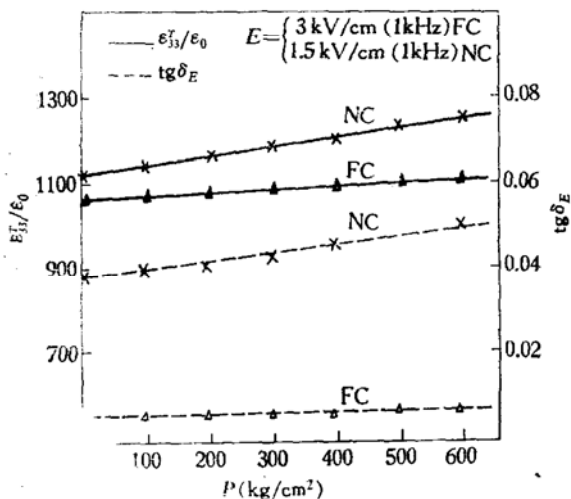


图2 介电常数和介电损耗因子随静压力的变化
Dielectric constant and dielectric loss factor vs hydrostatic pressure

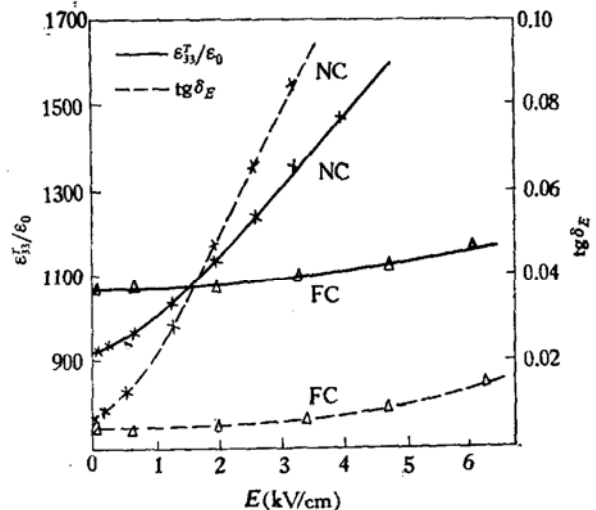


图3 介电常数和介电损耗因子随电场的变化
Dielectric constant and dielectric loss factor vs rms electric field

900V, 测量误差小于1%。

3. 发射型材料 FC、收发型材料 NC、接收型材料 LS 的弹性柔顺常数 S_{11}^E 、机械损耗因子 $\text{tg } \delta_M$ 、压电应变常数 d_{31} 以及横向机电耦合系数 K_{31} 随静压力的变化, 如图4与图5所示。

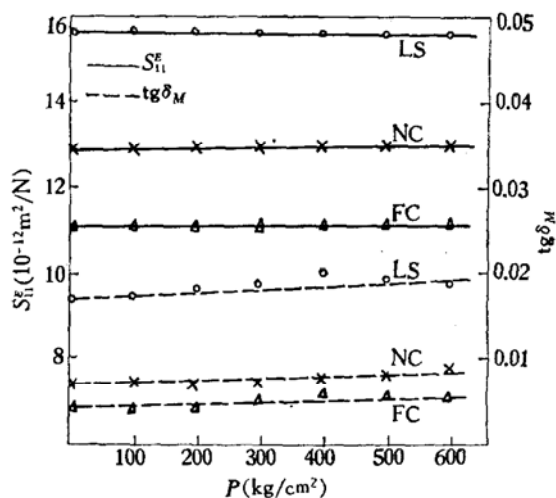


图4 弹性柔顺常数和机械损耗因子随静压力的变化
Elastic compliance constant and mechanical loss factor vs hydrostatic pressure

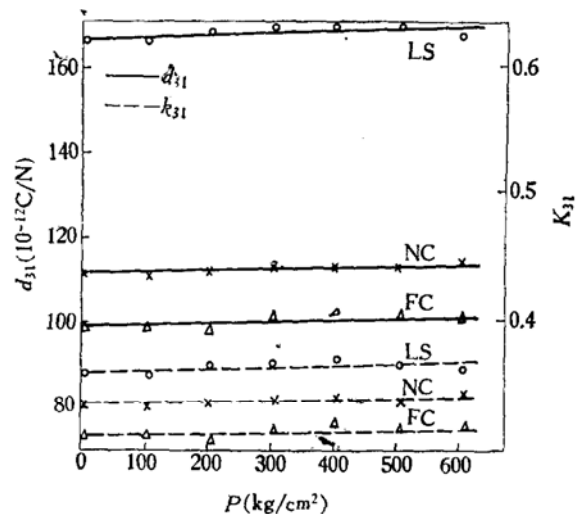


图5 压电应变常数和耦合系数随静压力的变化
Piezoelectric strain constant and coupling factor vs hydrostatic pressure

4. 发射型材料 FC、收发型材料 NC 的弹性柔顺常数 S_{11}^E 、机械损耗因子 $\text{tg } \delta_M$ 、压电应变常数 d_{31} 、横向机电耦合系数 K_{31} 随电功率密度 W_e 的变化, 如图6与图7所示。

以上所有曲线均由3—5只样品的平均值而得。

此外, 还测量了在不同静压力 (1kg/cm^2 、 200kg/cm^2 、 600kg/cm^2) 下, 发射型材料 FC、收发型材料 NC 的参数随电功率密度(或电场)的变化。结果表明, 与静压力的关系不大, 只是在高静压力作用下材料参数随电功率密度(或电场)变化的变化率稍有增大。

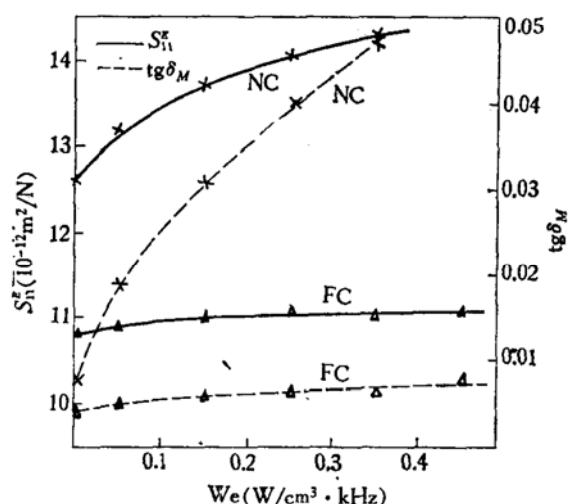


图6 弹性柔顺常数和机械损耗因子随电功率密度的变化

Elastic compliance constant and mechanical loss factor vs electric power density

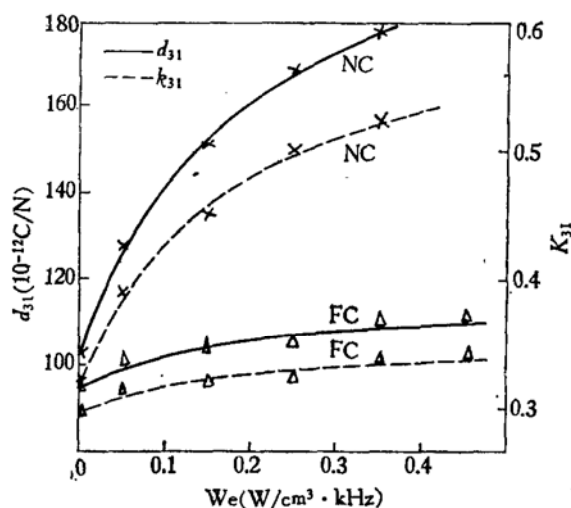


图7 压电应变常数和耦合系数随电功率密度的变化

Piezoelectric strain constant and coupling factor vs electric power density

四、讨 论

1. 关于压电陶瓷材料性能随静压力与电功率密度变化的规律。由上述实验结果可以看出:

(a) 发射型、收发型、接收型材料参数随静压力的变化不大。不过,本实验所涉及的压力范围只到 600kg/cm^2 , 更大压力下的情况还有待进一步的研究。

(b) 发射型、收发型材料参数随电功率密度的增加有明显的变化,特别是收发型材料参数变化相当剧烈。这表明,只有发射型材料方能胜任大功率工作。至于材料的压电性和柔顺性随电功率密度的增加而变大的机理,可能与压电陶瓷材料内部的电畴结构有关:在小功率工作时,材料的压电性和柔顺性主要由电畴的伸缩贡献;在大功率工作时,对材料的压电性和柔

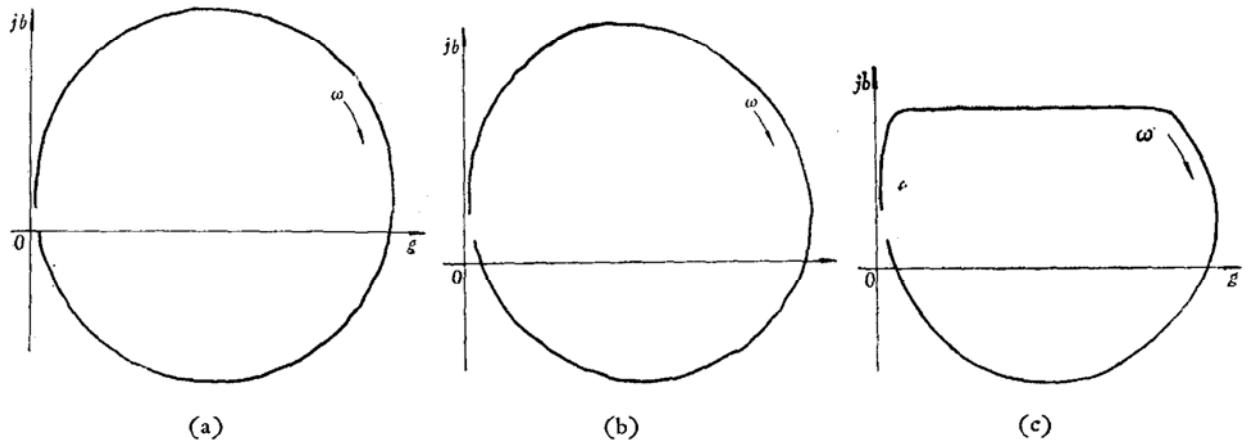


图8 自小功率到大功率的发射型样品的导纳圆图

Admittance trace from low electric power
to high electric power for FC sample

顺性有贡献的就不仅是电畴的伸缩,而且包括部分电畴的转向。

(c) 在大电功率密度与高静压力同时作用之下,发射型、收发型材料参数的变化主要取决于电功率密度的作用。

2. 有必要说明的几个问题。

(a) 在大功率条件下,当样品处于严重的非线性工作状态时,会有“跳跃”现象出现。图8显示了发射型样品自小功率到大功率的三个导纳圆图。压电陶瓷材料的这种特性相似于弹性振动问题中“软化弹簧”的非线性振动,随着振幅加大,振子的谐振频率向低漂移。根据这种特点,确定实验中频率扫描一律从高频扫向低频。

(b) 为了避免样品自身的“历史相关性”,每次测量的样品必须是“新鲜样品”,并且应当将所加电功率(或电场)及静压力的步长适当地选择大一些。

(c) 考虑到样品处于油负载中,应该说,测得的 $\lg \delta_M$ 已经不再是材料本身的机械损耗因子,而是这种特定形式的换能器的机械损耗因子了。不过,从 $\lg \delta_M$ 的相对变化情况仍然可以反映材料的机械损耗的变化规律。因为,此时机械损耗因子成为

$$\lg \delta_M = \omega_s C_1 R_1 = \omega_s C_1 R_L + \omega_s C_1 R'_1$$

这里, R'_1 是材料的机械损耗阻, R_L 是负载阻,而 R_L 在所涉及的频率区间内几乎是常量。

(d) 在本实验中, K_{eff} 的计算用到了样品的自由电容 C^T , 其值乃由国产精密电容测量仪 CCJ-1B 测得。当然,也可以根据

$$K_{\text{eff}}^2 = \frac{\Delta f_s}{2\pi f_s^2 R_1 C^T} = \frac{1}{\frac{\omega_s C_0}{1/R} Q_M + 1}$$

用圆图上的线段长度计算 K_{eff} (式中 C_0 为样品的静态电容),但那时必须考虑到由于 $\omega_s C_0$ 所对应的线段长度太小而带来的误差。

3. 关于使用发射型材料的换能器的功率容量的估算。压电换能器的机械功率容量为^[5]

$$P_M = V \omega_s E_3^2 K_{31}^2 e_{33}^T Q_M = V \omega_s \frac{1}{s_{11}^E} \frac{1}{Q_M} S_1^2 = V \omega_s s_{11}^E \frac{1}{Q_M} T_1^2$$

式中 V 为换能材料的体积。于是,可以使用本实验所得结果,在某一确定的动态应变 S_1 (或某

一确定的有效动态应力 T_1) 下, 估算具有不同机械品质因数 Q_M 的换能器的机械功率容量。

4. 本工作以研究测量方法为主。由少量横向模样品所得到的若干结果可供材料研究及换能器研究与设计参考。要确切地反映材料的性能, 须对相当多的样品的测量结果取平均。

参 考 文 献

- [1] Wilhelm, R. V., McLaren, M. G., "Effects of hydrostatic pressure and high electric field on modified PZT piezoelectric ceramics", *Am. Cer. Soc. Bull.*, 54(1975), 714.
- [2] Flinn, I., Downes, J. D., "The electromechanical properties of piezoelectric ceramics at high drive levels", *Ultrasonics International* (1977), 145.
- [3] Charles, L. LeBlanc, "Nonlinear behavior of transducer ceramics", *AD-748198* (1972).
- [4] Mattiat, O. E., *Ultrasonic transducer materials*, (1971), 80.
- [5] Mason, W. P., *Physical Acoustics*, 1, Pt. A(1964), 250.

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC CERAMICS AT HIGH POWER AND HYDROSTATIC PRESSURE

ZHAO Chun-shan JIN Heng-huan CHEN Shou-liu

(Institute of Acoustics, Academia Sinica)

Piezoelectric ceramics have been widely used in transducers because of their many advantages. But the parameters of piezoelectric ceramics are not constant, they are functions of time, temperature, stress, and electric field etc. The properties of piezoelectric ceramics at high electric power and hydrostatic pressure are concerned for the application in underwater acoustic transducers. Experimental investigations of the properties of piezoelectric ceramics at high electric power and hydrostatic pressure were carried out and some technical problems have been discussed in this paper.