

国产电气石(z轴切割)压电性能的测量

张挺 金若冰

(中国科学院力学研究所)

一、前言

电气石是一种斜角棱形压电晶体, z轴为它的电轴。它是一种天然晶体(目前已出现人造电气石晶体)。它的特点是: 压电性能稳定; 侧向灵敏度(指在x或y轴向加以单位载荷时在z平面上产生的电荷, 即 d_{31})小; 机械强度高; 对温度比较敏感。因而电气石作为流体静水压敏感元件以及特定轴向的应力或力敏感元件较为合适。它常用作空中和水中爆炸冲击波测量和固体介质中的应力波测量装置的敏感元件。在温度变化不大的场合(特别是瞬态温度变化), 对它的热电效应应采取预防措施。

本文就我国新疆地区出产的电气石(z轴切割)的单轴和三轴压电灵敏系数进行了测量, 单轴最大载荷为1吨(折算的单轴最大应力达1274公斤/厘米²), 并对100片z轴切割的 $\phi 10 \times /(\text{mm})$ 的试样的测量结果进行了统计和分析。

二、测量装置

目前, 晶体压电系数的测量一般采用两种方法: 一是机械加载(或卸载)法; 一是电场激励法。前者是直接在晶片上施加已知的机械载荷, 测量晶片上产生的电荷(或晶片两端面之间的电压), 计算得到该轴向的压电系数。后者将晶片置于一已知的电场中, 测量晶片在某一轴向的变形亦能得到晶体在该轴向的压电系数。我们采用的是第一种方法。晶片试样如图1。

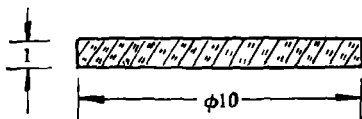


图1 晶片试样尺寸

1. 单轴压电系数测量系统

单轴压电系数测量系统有两个方案(图2和3)。

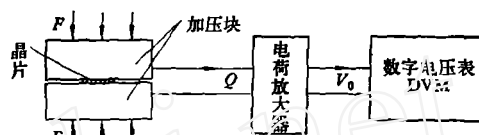


图2 电荷测量系统

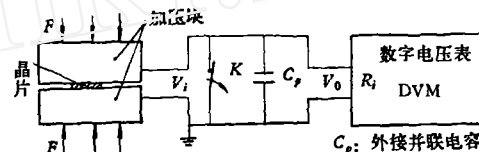


图3 电压测量系统

考虑到原有设备情况和装置的简便性, 我们采用了电压测量系统(后期亦曾采用电荷测量系统进行了对比)。所用的加载机量程为100—1000公斤, 载荷测量装置的精度为0.3%。测量原理是: 加载时, 并联开关K闭合, 晶片及并联电容 C_p 两端短路。到达预定载荷 F 时, 断开开关 K , 同时加载机构突然卸载。卸载时, 晶片上承受的是一个 $(-F)$ 值的突加载荷, 在它的两端将产生电荷 $(-Q)$ [它与 K 断开时, 加载到 F 值时晶片上产生的电荷值相等但符号相反]。利用数字电压表的峰值保持记录功能(最大值或最小值), 可直接测量端电压 V_0 , 计算得到 Q 值。 K 的断开与加载机突然卸载的同步问题, 可由操纵者手动控制, 或在加载机的加载连杆上附设微动开关进行控制。外接并联电容的目的是增大测量回路的时间常数, 保证峰值电压 V_0 的测量精度。压电晶体是个电荷发生器, 当开关 K 开路后, 测量回路的等效电路如图4。其中 R_0 , C_0 为晶片的泄漏电阻和电容, R_i 为电压测量仪表的输入电阻。一般 $R_0 \gg R_i$;

$C_p \gg C_o$, 因而回路的时间常数 $\tau = [R_o \cdot R_i / (R_o + R_i)](C_o + C_p) \approx R_i C_p$.

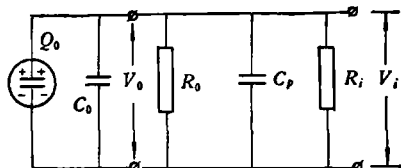


图4 测量回路的等效电路
 C_p : 外接并联电容

$$V_i = V_0 e^{-t/\tau}$$

$$= V_0 \left[1 - \frac{t}{\tau} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{\tau} \right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{t}{\tau} \right)^3 + \dots \right]$$

当 $\tau \gg t$ 时,

$$V_i \approx V_0 \left(1 - \frac{t}{\tau} \right)$$

$$Q_0 = V_0 (C_o + C_p)$$

$$d_{33} = \frac{Q_0}{F} = \frac{V_0 (C_o + C_p)}{F}$$

事实上,卸载是不能瞬时实现的,它有一定的建立时间。而数字电压表也存在一个峰值采样时间(对 pz-8 而言,采样周期为 20 ms)。当卸载建立时间小于采样时间时,该系统的测量误差主要决定于峰值采样时间 Δt 。若: $\Delta t = 20\text{ms}$; $C_p = 0.10 \mu\text{F}$; $R_i = 500 \text{M}\Omega$, 则电压测量误差

$$\delta = \frac{V_0 - V_i}{V_0} \approx \frac{\Delta t}{\tau} = 0.04\%$$

由上面的简单分析得知:采用快速采样并适当增大并联电容 C_p (即增大了时间常数 τ),能减小测量误差。但 C_p 的增大势必相应地降低 C_p 和晶片两端的电压 ($V_0 \approx Q_0/C_p$), 数字电压表的分辨率及测量误差又限制了大 C_p 值的选用。因而 C_p 值的选择要折衷考虑。

2. 三轴压电系数测量系统

如图5所示,我们将两片 $\phi 10 \times 1\text{mm}$ 的晶片粘结在一根流线型的杆件上,制成一种测量静水压的传感器。晶片粘结剂厚度尽可能地薄,并切忌在制成的传感器感受面上涂以粘

剂以免晶片承压面积发生变化。传感器安装在活塞式压力计的一个油腔内加以不同的静水压载荷。载荷由 0.25 级压力表测量,并通过电荷放大器(或静电计放大器)——数字电压表系统测量不同压力值 P_i 时的输出电荷 Q_i 。对电气

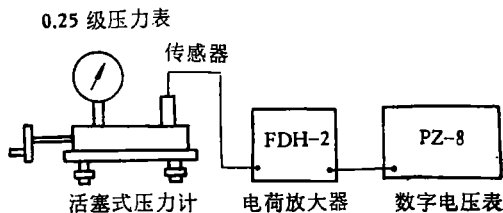


图5 三轴压电灵敏度测量系统

石来说, $d_h = d_{33} + 2d_{31}$, 则:

$$Q_i = P_i \left[\frac{\pi D_{(1)}^2}{4} d_{33(1)} + \frac{\pi D_{(2)}^2}{4} d_{33(2)} + \pi D_{(1)} h_{(1)} d_{31(1)} + \pi D_{(2)} h_{(2)} d_{31(2)} \right]$$

其中: D, h 为晶片的直径和厚度; d_{33}, d_{31} 为晶片不同轴向的压电系数; 脚标 (1), (2) 分别代表 #1 和 #2 片的参数。

若假设每对晶片的 d_{31} 相等, 则

$$\bar{d}_{31} = \frac{1}{\pi D_{(1)} h_{(1)} + \pi D_{(2)} h_{(2)}} \left[\frac{Q_i}{P_i} - \left(\frac{\pi D_{(1)}^2}{4} d_{33(1)} + \frac{\pi D_{(2)}^2}{4} d_{33(2)} \right) \right]$$

三、测量结果

1. 单轴压电系数 (d_{33}) 的测量结果

100 片 $\phi 10 \times 1\text{mm}$ 轴切割的国产电气石晶片单轴试验结果, 以压电系数的分布情况画于图6。其结果是:

1) 平均单轴压电系数 $d_{33} = 18.25 \text{pc/kgf} = 1.862 \text{pc/N}$ 。

2) d_{33} 的最大偏离为 $+7.01\%$ (19.53pc/kgf) 及 -7.28% (16.92pc/kgf)。

3) 偏离大于平均值 $\pm 5\%$ 的片数为 7% ; 偏离大于平均值 $\pm 2\%$ 的片数为 63% 。

我们抽查了其中的四片 (#1, #2, #18, #19) 计算它们在 $100-1000 \text{kgf}$ (折算压力为 $127.4-1274 \text{kgf/cm}^2$) 范围内的线性度, 计算结果列于表1。包括晶片加工的不平行度所引入

表1 z 切割电气石单轴测量性能

片号	尺寸(直径×厚度) (mm)	加载范围 (kgf)	晶片应力计算值 (kgf/cm ²)	d ₃₃ 测量值及线性度 (pc/kgf)
1	10 × 1	200—1000	254.8—1274	19.04 ^{+0.16%} -0.45%
2	10 × 1	100—1000	127.4—1274	18.78 ^{+0.69%} -0.53%
18	10 × 1	200—1000	254.8—1274	19.14 ^{+0.63%} -0.52%
19	10 × 1	100—1000	127.4—1274	18.45 ^{+0.34%} -0.19%

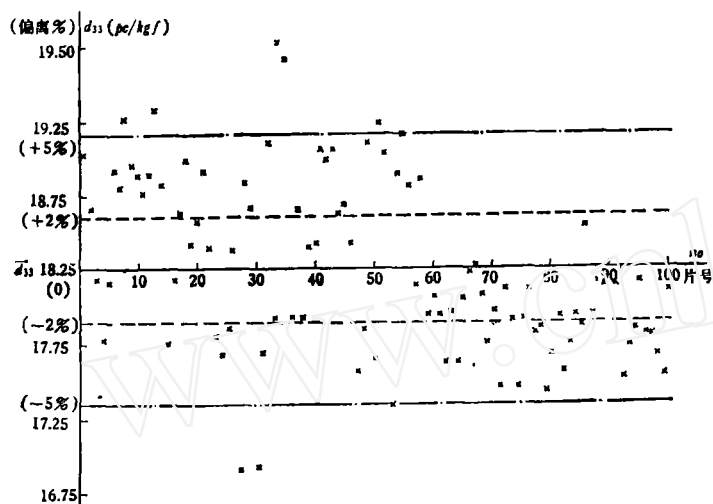


图6 z 切割电气石 d₃₃ 测量值分布情况 (100 片)

的非线性误差及测量仪表在所用量程的误差在
内的线性误差小于 0.7%。

2. 三轴及侧向压电系数的测量结果

8 片电气石晶体三轴试验的平均结果是:

1) $\bar{d}_{31} = 4.52 \text{ pc/kgf} = 0.461 \text{ pc/N}$, 最大
偏离为 -11.9%。

2) 三轴压电系数 ($d_{33} + d_{31} + d_{32}$) = 27.29
pc/kgf = 2.78 pc/N。

试验结果列于表2。

表2 z 切割电气石三轴压电系数测量结果

传感器号	晶片尺寸(直径× 厚度) (mm)	晶片 d ₃₃ 值 (pc/kgf)	d ₃₁ 测量值 (pc/kgf)	d ₃₃ + d ₃₁ + d ₃₂	
				pc/kgf	pc/N
3 ₁	10×1	17.66	3.98	25.62	2.61
	10×1	18.90	3.98	26.86	2.74
3 ₂	10.1×1	17.92	4.82	27.56	2.81
	10.1×1	19.07	4.82	28.71	2.93
3 ₃	9.8×1	18.15	4.72	27.59	2.81
	9.8×1	18.35	4.72	27.79	2.83
3 ₄	9.2×1	18.20	4.57	27.34	2.79
	9.2×1	18.30	4.57	27.44	2.80

四、几点结论

1. 本文所介绍的单轴压电系数
测量方案是切实可行的, 达到了测
量精度要求。方案的特点是: 简
单; 技术要求较低; 利用外接并联电
容和采用峰值保持记录方法保证了
必要的测量精度。侧向压电系数
(d₃₁) 也可采用此方案测量, 仅需将
电气石试样切割成正方体 (三个轴
向分别为 x, y, z 轴)。从利用原晶
片试样的角度考虑, 侧向压电系数
的测量采用了文中所叙述的方案。

2. 国产电气石正切割的正向
(z) 压电系数

$$d_{33} = 18.25 \text{ pc/kgf} + 7.01\% = 1.862 \text{ pc/N}$$

偏离值小于 ±5% 的片数达 93%

国外某些研究人员的测量结果如下:

Hearst J. R. 等^[1]:

$$d_{33} = (1.69 \pm 0.1) \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2 \cdot \text{kb} \\ = (1.69 \pm 0.1) \text{ pc/N}$$

Voight^[2] 等 $d_{33} = 1.80 \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2 \text{ kb} =$
1.80 pc/N

Neubert^[3] $d_{33} = 1.90 \text{ pc/N}$

从上述比较可以看到：国产电气石的压电测量性能是良好的。晶体的压电系数离散较小。对于精度要求较低的测量来说，可以直接引用 d_{33} 的平均值作为设计参考数据。Hearst 等的实验结果离散较大，可能和他们的测量装置的精度有关。

3. 三轴试验结果及对比如下：

$$(d_{33} + d_{31} + d_{31}) = 27.29 \text{ pc/kgf} = 2.78 \text{ pc/N}$$

$$\bar{d}_{31} = 4.52 \text{ pc/kgf} = 0.461 \text{ pc/N}$$

国外某些研究人员的测量结果是：

$$\text{Hearst 等}^{[1]} (d_{33} + d_{31} + d_{31}) = (2.53 \pm 0.2) \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2 \text{ kb} = (2.53 \pm 0.2) \text{ pc/N}$$

$$\text{Voight 等}^{[2]} (d_{33} + d_{31} + d_{31}) = 2.47 \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2 \text{ kb} = 2.47 \text{ pc/N}$$

$$\text{Neubert}^{[3]} d_{33} + 2d_{31} = 2.40 \text{ pc/N}$$

4. 由于设备及晶片加工工艺的限制，单轴应力仅做到 1274 kgf/cm^2 。今后如有可能的话，实验应继续向高应力状态延伸，测量电气石的线性运用范围。至于动态标定实验的必要性可以商榷。对于晶体而言，它对静载荷和动载荷的响应不应有所不同，但在冲击载荷作用下，可能激发晶片自身的振动，也能产生附加的输出。而这种振动和载荷的特性以及晶片的尺寸有关。这点在动态试验装置设计时应有所考虑，但它并不是晶体本身的特性。此外，由于目前动标定装置的测量精度和数据处理的精度以及标定方法引入的人为因素（如固支方式、加载方式等）等原因，还无法进行精确的静、动态测量性能的对比。作者认为，静态标定对于研究晶体的测量性能来说已完全足够。

五、应用举例

上述的电气石晶片已用来作为各种传感器的敏感元件。图7为测量自由场冲击波用的压力传感器在击波管试验中拍摄的照片（敏感元件为两片 $\phi 10 \times / \text{mm}$ 电气石）。图8为千帆931型动态压力传感器所测量的击波管端面反射压力照片（敏感元件为两片 $\phi 7 \times 0.5 \text{ mm}$ 电气石）。图9为本所研制的动态应力计（或测力计）在击波管进行动态标定拍摄的照片（敏感元

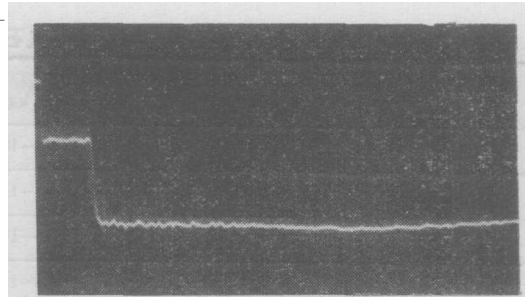


图7 自由场压力传感器击波管试验照片
超压：1.9kgf/cm² 扫描时间：全程3ms

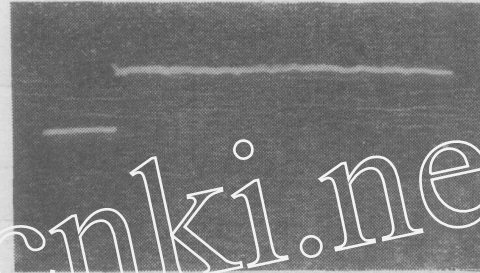


图8 千帆931动态压力传感器所测得的击波管端面反射压力。

超压：1.09 kgf/cm² 扫描时间：全程2ms

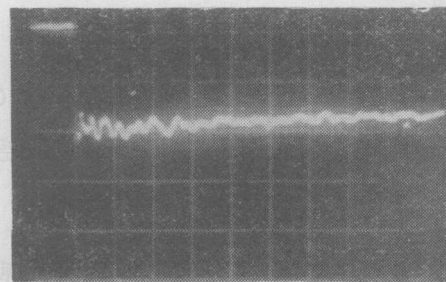


图9 动态应力计击波管动态标定记录
超压：2 kgf/cm² 扫描时间：全程2ms

件为两片 $\phi 10 \times / \text{mm}$ 电气石)。

本工作曾得到邢维复、赵蜀北同志的帮助，在此表示致谢。

参 考 文 献

- [1] Hearst, J. B., Geesaman, L. B., Power, D. V., Piezoelectric sensitivity and reproducibility of z-Cut tourmaline To 7 kbar, *Journal of Applied Physics*, 35, 7 (1964).
- [2] Meson, Warren. P., *Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics*, D. Van Nostra and Company, Inc. (1956).
- [3] Neubert; Hermann, K. P., *Instrument Transducers* (2 edition), Oxford University press (1975).

(本文于1980年7月22日收到)