

用 $V(z)$ 曲线分析压电陶瓷表面的声学特性

章 德 吴文虬

(南京大学声学研究所)

M. G. Somekh

(Department of Electronic and Electrical Engineering University College London, U.K.)

1989年6月30日收到

本文利用超声显微镜技术中的 $V(z)$ 曲线,无损伤地测量了压电陶瓷表面上不同点声表面波(瑞利波)速度,定量地分析了陶瓷的一致性。同时又根据 $V(z)$ 曲线中周期的起伏,定性地给出了表面颗粒均匀性及缺陷存在的可能性,文中给出了几种不同陶瓷材料的实验数据及分析结果,并简单地描述了 $V(z)$ 曲线的理论与声表面波(瑞利波)速度的计算公式、测试方法。

一、引 言

适合于大量生产的压电陶瓷材料及其低廉的价格,使它成为声学器件尤其是声表面波器件的重要基片材料之一。但是陶瓷材料的不一致性却是人们头痛的问题,这种声学特性的离散性不只存在于不同批量生产的陶瓷材料之间,即使同一批材料不同片子之间,甚至同一片子不同区域亦表现出明显的不一致性。因此,采用一种快速、简易、无损伤的方法检测材料表面声学参量,及早地评估材料的一致性是一个值得研究的课题。

高倍率的光学显微镜乃至电子显微镜固然是常用的检测方法,但这些方法仅局限于观察表面几何形体,如晶粒的大小及气孔的存在等等。作为声学材料的压电陶瓷,人们更重视它的声学性能的一致性。目前最普遍采用的方法是在表面上制作叉指换能器,然后用脉冲法^[1]或相位干涉法^[2]来测量表面波速度,但制作叉指换能器的工艺既麻烦又损伤了基片,只能对不同批量的片子抽测,而且得到的是大面积上宏观的平均速度。即使用激光激发、检测声波的方法^[3]以避免叉指换能器的制作工艺,仍无

法得到微区面积上的表面波速度,仍不足以精确地评价一种声学材料。

利用超声显微镜技术中的 $V(z)$ 曲线快速、简易、无损伤地测量材料表面不同点^[4]或线^[5]附近的声表面波速度是近几年发展起来的新技术。它避免了用叉指换能器来激发或接收表面波,因此对被检测的样品无任何破坏性。它既可以比较不同样品之间的声学性能,也可以分析同一样品上不同点或线附近的声学特性。同时还能利用 $V(z)$ 曲线中周期起伏的重复性,定性地分析材料的颗粒一致性及气孔存在的可能性。是一种很方便的检测方法。本文用该方法实际测试与分析了我国几种新型压电陶瓷,并对它们作出一定的评估。

二、 $V(z)$ 曲线与表面波速度的计算公式

在超声显微镜中,通过一个球面声透镜或柱面声透镜将声波能量会聚在一个点或一条线上如图1所示。当被测物体位于不同的 z 轴位置上时(如图1中 A, A', A''),被换能器接收到的反射信号的大小,随它们与焦点位置 F 的距离 z 不同而不同。理论上 $V(z)$ 曲线的公式如

下⁽⁶⁾

$$V(z) = \int P^2(\theta)R(\theta)\exp(2jkz\sin\theta) \times \sin\theta\cos\theta d\theta \quad (1)$$

其中 $V(z)$ 为位置 z 变化时, 换能器上接收到声信号的大小, $P(\theta)$ 为单元函数 (pupil Function), $R(\theta)$ 为 θ 角时的反射系数。 z 为以焦点位置为零点时 z 方向的位移, k 为声波在耦合液(通常为水)中的波矢量。图 2 为理论计算的 $V(z)$ 曲线, 纵轴为接收信号的大小, 横轴为 z 位置。从图 2, 明显地看到, $V(z)$ 曲线中有一段是周期起伏的曲线。这是由于垂直方向反射的信号与表面波(瑞利波)声信号相互干涉所形成。可以从它的重复周期 Δz 的大小来推算出材料的表面波速度。

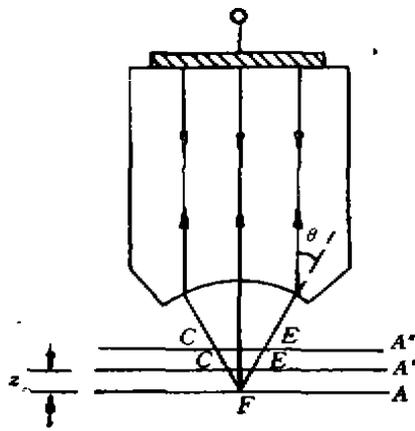


图 1 反射物位于不同位置时声聚焦透镜接收声信号的示意图

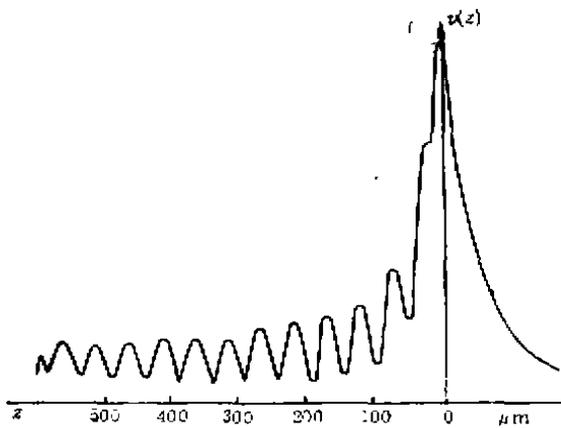


图 2 理论 $V(z)$ 曲线

为了简单说明这个问题, 我们可以用声线理论来分析, 如图 3(a)(b) 所示。当反射物体偏离焦点位置向 $+z$ 方向移动一段距离 z 后, 换能器仅能接收两个声线方向反射的声能量。一条是在垂直方向 (AD) 附近直接从物体反射的回波信号, 其它直接反射的回波信号均已偏出换能器所在的位置 (图 3(a))。另一条声线是与物体成临界角 θ 的声线 (BC) (如图 3(b)), 这条声线附近入射的声波将转换成表面波(瑞利波)并沿表面传播, 不断向耦合液中泄漏声能量, 其方向为与 BC 相反的 θ 方向, 但换能器仅能接收到与 BC 所对称的 EF 附近的声能量。由于透镜的作用, 其它声线均已偏出换能器的位置(如图 3(b)所示)。这里 BC 或 EF 两射线与样品法线方向的夹角必须满足产生表面波(瑞利波)的临界角 θ

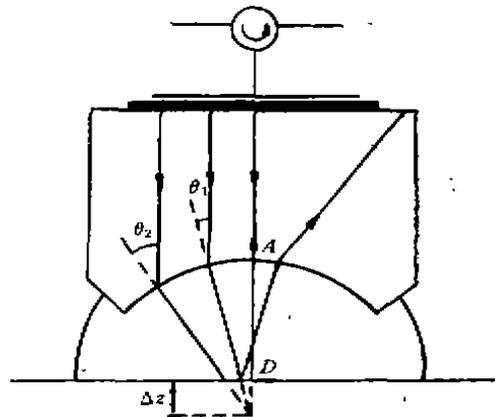


图 3(a) 声聚焦透镜接收从样品直接反射的声线图

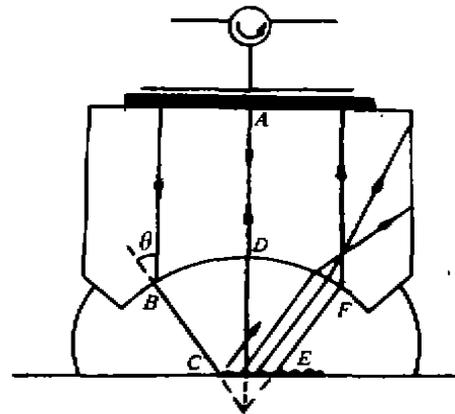


图 3(b) 声聚焦透镜接收样品上表面波信号的声线图

$$\sin \theta = \frac{V_w}{V_s} \quad (2)$$

其中 V_w 为水中的声波速度, V_s 为样品的表面波(瑞利波)速度。在声程 $BCEF$ 中, BC 与 EF 两段为水中的体波, 而沿 CE 传播的是样品表面的表面波。这样, 换能器同时接收到不同声路程传播来的声信号, $ADDA$ 与 $BCEF$ 两声程的波之间的相位差产生了声的干涉。随着透镜与样品距离的变化, $ADDA$ 与 $BCEF$ 的路程均会改变, 它们的相位差就发生周期性的变化, 相差 π 的偶数倍时信号叠加, 奇数倍时信号相消。换能器的输出跟着产生了极大、极小的周期性变化。这就是 $V(x)$ 曲线中周期性起伏的理论解释。我们可以从它谷点之间间距 Δz , 工作频率 f 及水中声波速度 V_w , 并利用图 3 所示的声线理论推算出样品表面波速度的计算公式^[5]

$$V_s = V_w / \left[1 - \left(1 - \frac{V_w}{2f\Delta z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

从公式(3)可以看出, V_s 的精度由 V_w 、 f 及 Δz 三个量来决定, 其中 Δz 的精度又是关键。通常可用两种方法从 $V(x)$ 曲线决定 Δz 的大小。一种方法是连续测量多个 Δz (如 6—10 个), 总长可达几百微米 (如 $213.5 \mu\text{m}$), 而丝杆精度为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$, 然后取平均值。一方面提高了精度, 另一方面也解决了实验上 Δz 的不均匀性。另一种方法是用 FFT 来处理 $V(x)$ 曲线, 并计算出 Δz 的大小, 在我们的系统中其精度可达几千分之一。为简单起见, 本文采用了取平均值的方法计算 Δz , 其精度仍能达千分之一左右。

三、测试方法

实验装置类似于通常的超声显微镜, 在换能器上加一个调制脉冲信号, 然后接收到多个反射脉冲如图 4(a) 所示, A 为从透镜与水交界面的反射信号, B 为从样品表面反射的信号, C 为透镜与水交界面两次反射信号, 以后的小信号是从样品表面的二次反射及其它壁面等的杂

散信号。利用时间门(图 4(b)) 来抑制不需要的信号, 仅让样品表面的一次反射信号 B 通过, 如图 4(c) 所示。与超声显微镜不同的是, 我们需要测量 $V(x)$ 曲线, x 是一个变量, 也即样品与换能器的距离是改变的。这意味着样品表面一次反射在时间轴上是移动的, 所以, 时间门的宽度要恰到好处, 它既能抑制不必要的信号, 又能包括所必要的 $V(x)$ 信息。另一个与显微镜有差异的是, 并不需要精确控制样品台沿着 X 、 Y 水平扫描, 而要注意如何精确控制垂直方向 z 的位移。

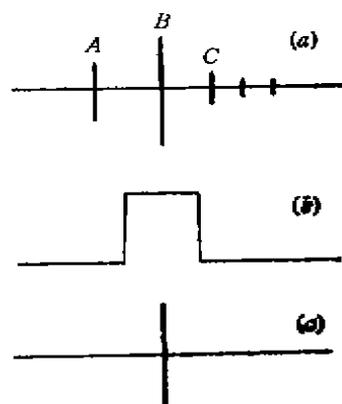


图 4(a) 换能器上接收到的全部声信号; (b) 时间门; (c) 通过时间门后, 仅留下从样品表面一次反射的信号

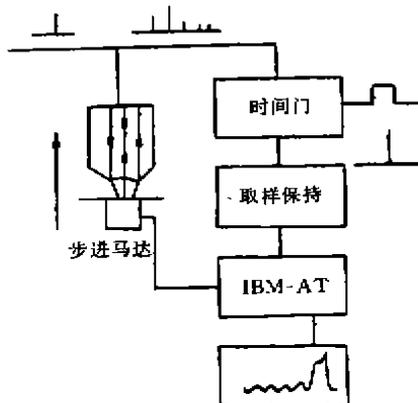


图 5 简略后的测试方框图

我们用 IBM-AT 计算机对换能器的 $V(x)$ 信号进行数据采集与处理, 作为垂直方向的大小。同时用计算机控制步进马达, 精确地移动 z 位置, 并将数据计入计算机作为横向轴的大

小。然后在荧光屏上直接显示或用 X-Y 记录仪画出 $V(x)$ 曲线。在这里所用的调制频率为 202.472MHz, 正处于压电换能器的工作频率范围。步进马达所带动的丝杆的精度可达 $0.1\mu\text{m}$, 也即每一步移动 $0.1\mu\text{m}$, 以保证公式中 Δx 有足够的精度。图 5 为简略的测试方框图。

四、表面波速度的测试结果与分析

我们的测试装置中所用的声透镜为线聚焦的柱面透镜, 换能器工作在 202.472MHz 频率上, 垂直方向移动的最小间距为 $0.1\mu\text{m}$ 。对我国二个单位试生产的铌酸钠锂陶瓷材料作了测量。一种样品 (样品 A) 的尺寸为 $20\text{mm} \times 10\text{mm}$, 样品 B 的尺寸为 $25\text{mm} \times 15\text{mm}$ 。在每块样品上抽测 5 点, 各点间隔为 $5\text{mm}-4\text{mm}$ 。虽然从原理本身可以在样品上测量大量的微区数, 这里抽测 5 个数据已基本上能看出样品声学特性的一致性, 并对材料作出评估。表 1 为样品 A 的数据, 从中可以看出单片上表面波声速的分布在 $\pm 0.5\%$ 之内, 较好的在 $\pm 0.2\%$ 以内, 不同样品之间平均表面波速度的差异在 $\pm 0.6\%$ 以内, 如能稳定在较好的样品性能上, 是一种有希望的陶瓷材料。样品 B 的数据列于表 2, 单片的速度偏差在 $\pm 1\%$ 以内, 样品间平均速度的偏差高达 1.9% 。四片样品中 2 号样品的表面波速度特别慢, 从外观上比较, 该样品的颜色明显淡于其它样品, 显然是原材料上的不同引起了如此大的速度偏差。如果使用这样的基片制作表面波器件, 其中心频率的偏差可达 2% 左右, 是不能使人满意的。

表 1 样品 A 的表面波速度数据

样品	表面各点的表面波速度 m/s					平均值
	1	2	3	4	5	
1	3447	3463	3468	3453	3454	3457(1±.3%)
2	3429	3434	3440	3432	3431	3433(1±.2%)
3	3425	3433	3438	3462	3458	3433(1±.5%)
4	3477	3473	3466	3473	3457	3469(1±.3%)
5	3442	3434	3436	3436	3443	3438(1±.3%)

这里被抽测的样品是带有偶然性的, 材料

表 2 样品 B 的表面波速度数据

样品	表面各点的表面波速度 m/s					平均值
	1	2	3	4	5	
1	3428	3409	3586	3387	3402	3402(1±.75%)
2	3311	3318	3324	3333	3337	3324(1±.4%)
3	3368	3380	3397	3436	3438	3404(1±1%)
4	3440	3431	3429	3441	3416	3431(1±.4%)

测试结果并不能说明这个单位的材料比那个单位的铌酸钠锂陶瓷好或坏, 但可以肯定的是, 通过这种测试方法, 可以无损伤地鉴别一种材料。在器件制作之前, 先对材料的声学性能有所了解, 提出一定的评估意见, 避免作不必要的虚功。另一项有意义的工作是, 用 $V(x)$ 曲线测试材料表面波速度之后, 按样品或基片的速度归类, 使同类基片的表面波速度十分接近, 然后制作相应的光刻掩膜版。也即不同速度的基片用不同的掩膜版, 从而保证器件频率的最终一致性, 这对保证产品的成品率是一项十分有意义的工作。这样可以降低对材料一致性的要求, 提高材料的适应性。

五、表面孔隙、缺陷的定性判别

在通常的镜面反射面或单晶抛光表面上所得到的实验 $V(x)$ 曲线非常接近于理论 $V(x)$ 曲线(图 2), 谷点之间的距离 Δx 应当相同, 各种偶然因素(如仪器的偶然误差)只能引起极微小的 Δx 值起伏。但是, 当材料是多晶时(如陶瓷材料), 表面上不同大小的颗粒及孔隙的存在会引起 Δx 的不规则变化。为了说明这个问题, 我们回顾图 1 中不同 x 位置上的 A, A' 及 A'' 。它们有不同的表面波传播路程 CE 。由于颗粒大小的不一致及孔隙、缺陷位置大小的杂散性, 它们在不同长度 CE 上的分布也是不规则的。这样, 表面波传播路程中引起的多次反射及其它变化也就无规律而言, 从而产生了不同的相位变化。对 $V(x)$ 曲线的形成产生了影响, 尤其是对谷点位置的影响特别大。由此, 我们可以得到一个结论, $V(x)$ 曲线中, 谷点间隔 Δx

变化越大,晶粒大小的一致性也就越差,孔隙存在的可能性也就越大。我们不但可以从 $V(x)$ 曲线得到微区上表面波速度这一声学参量,而且通过仔细分析 $V(x)$ 曲线谷点间隔大小的变化,定性地了解压电陶瓷表面晶粒及孔隙的情况。

表3是二种材料谷点位置 Δx 的实验数据。明显地看出,样品A的周期重复性比样品B好,由此可定性地断定,样品A表面的颗粒大小一致性稍好,孔隙也较少。表中也列出了 127.86°Y 旋转切割 LiNbO_3 样品 $V(x)$ 曲线的谷点分布,可以看出这种晶片材料表面 $V(x)$ 曲线的谷点分布是比较均匀的。图6为超声显



图6 超声显微镜下样品A(图6(a))和样品B(图6(b))的表面情况,横向长度为 $100\mu\text{m}$

显微镜下样品A与B的表面情况,进一步说明了我们从 $V(x)$ 曲线得到的结论是正确的。

表3 Δx 不均匀性的比较表

样品A	$V(x)$ 曲线中谷点间距离 $\Delta x(\mu\text{m})$					
	38.0	38.0	37.0	38.0	37.5	36.5
样品B	36.5	35.0	36.0	38.5	33.0	36.5
127.86°Y LiNbO_3	49.0	49.0	49.0	49.0	50.0	49.0

六、结 论

1. 可以利用 $V(x)$ 曲线中周期起伏的均匀性来定性地判断压电陶瓷材料表面状况(如晶粒大小、气孔、裂纹及声阻抗不均匀程度等等)。

2. 利用 $V(x)$ 曲线来无损地测量压电陶瓷材料的表面波速度,完全可能成为大规模生产之前,必要的表面波器件材料检测手段,以便提高器件的成品率。

本工作得到 Briggs 博士的帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Tseng C. C., *J. Appl. Phys.*, **38-11** (1967), 4281—4284.
- [2] 章 德,吴文虬,水永安,姜文华, *声学学报*, **4**(1981), 242—248.
- [3] Burov J. I., Branzalov K. P. and Ivanov D. V., *Appl. Phys. Lett.*, **40-2**(1985), 141—142.
- [4] Crean G. M. and Waintal A., *J. Appl. Cryst.*, **19** (1986), 181—187.
- [5] Kushibiki J. and Chubachi N., *IEEE Trans., on Sonics and Ultrasonics*, **SU-32-2** (1985), 189—212.
- [6] Sheppard C. J. and Wilson T., *Appl. Lett.*, **38-11** (1981), 858—859.