

# 温度场对声衰减精密测试的影响

徐晓群、李 杰、魏墨盒

(同济大学)

## 一、引 言

几乎任何物理状态的不均匀都会对固体介质的声学特性带来不同程度影响, 介质中温度场的不均匀即是其中之一<sup>[1]</sup>。目前, 对于在非均匀温度场中, 介质声学特性改变的研究正在日益引起关注。本文将主要从实测需要出发, 推导温度场对声衰减精确测试的影响, 并与实验结果比较。

声衰减是物质内耗的客观和宏观表征量, 理想测试时, 由电声换能器产生一系列幅值按指数衰减的脉冲回波, 其指数即衰减值。然而, 在许多实际情况下, 脉冲回波包络图案不呈指数形式, 从而直接影响到声衰减的精密测试。产生的因素通常有: 1. 衍射效应<sup>[2]</sup>; 2. 样品的端面不平行<sup>[1]</sup>和侧壁反射; 3. 换能器的声能转换; 4. 样品与换能器的粘合不当; 5. 测试腔体的温度不均匀; 等等。在对其他因素进行了妥善考虑或加以修正后, 则在理想晶体的非相变温区的测试中, 温度效应成为主要应考虑的因素。

## 二、一维温度场对声衰减测试结果影响的定量分析:

物质声测试时, 由于热辐射及导线热传导等的因素, 使测试腔体内不可避免地存在温度的不均匀。根据不可逆热力学可推知, 这时, 被测介质中的声速只能表征其局部特性, 而不能表征介质的整体特性。声波束在

介质中产生弯曲。而声脉冲的接收讯号相应于换能器平面声振幅平均值, 因此, 声波在接收器上相位干涉的结果, 使声脉冲回波包络图案受到调制, 影响声衰减测试值。

假定, 恒温器腔体中存在温度的不均匀, 使介质处于温度场中, 并在某一时刻  $t_0$  激发一矩形调制的弹性长脉冲波列, 其位移振幅为  $u = u_0 e^{-\alpha z + j(\omega t - kz)}$  (波列频谱较纯时, 连续波理论仍适用)。则对长度为  $l$  的测试样品, 第  $n$  次接收讯号的响应将正比于  $\bar{u}(t, 2nl)$

( $= \frac{1}{s} \int_{\sigma} u d\sigma$ ,  $s$  为换能器面积), 若换能器为半径为  $r$  的圆片, (如图1b), 则响应函数为

$$\bar{u}(t, 2nl) = (\pi r^2)^{-1} \int_{-r}^r \int_{-(r^2-y^2)^{1/2}}^{(r^2-y^2)^{1/2}} u_0 e^{-\alpha 2nl + j(\omega t - k 2nl)} dx dy \quad (1)$$

这里,  $u_0$  为  $t=t_0$  时的位移振幅,  $\alpha$  为每单位距离的声衰减,  $k$  为波数。对于一维温度场, 如图1.所示, 此时介质中不存在热应力, 介质的各个部分都能自由地膨胀, 温度的不均匀呈线性关系<sup>[3]</sup>。考虑到介质中温度改变不大, 且  $\frac{a \cdot b}{v_0} \ll 1$ , 则波数的近似表达式为  $k = k_0 \left( 1 - \frac{a \cdot b}{v_0} y \right)$ , 其中,  $a$  为介质声速的温度改变率,  $b$  为介质中的温度梯度,  $k_0, v_0$  分别为坐标原点波数、声速。代入(1)式我们

由特殊函数理论知, 接收响应为

$$\bar{u}(t, 2nl) = u_0 e^{-\alpha 2nl} \cos(\omega t - k_0 2nl) \cdot [2J_1(R_n)/R_n] \quad (2)$$

$R_n = k_0 r a b 2nl / v_0$ 。若以脉冲回波的

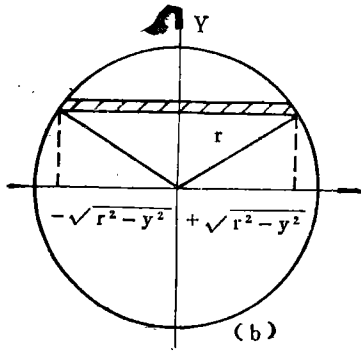
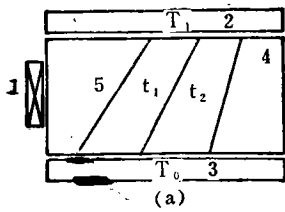


图1 一维温度场中声波传播示意图  
其中: 1. 换能器; 2. 高温; 3. 低温;  
4. 被测介质; 5. 声反射波。

第一极小所对应的反射回波数倒数  $1/N$   
( $= \frac{4\pi}{3.8} rfabl/v_0^2$ ) 作为影响因子, 不难看出,

对声测试的影响大小与频率、温度梯度、换能器半径、声速温度改变率等成正比。

实际实验中, 欲获得声衰减测试结果, 两种最常使用的方法有: 1. 任意选择两个反射脉冲回波进行对数比较; 2. 将指数曲线发生器产生的指数曲线与反射波包络图形相吻合而得到。

采用第一种声衰减测试方法, 温度梯度引起的表观衰减可表示为:

$$\alpha_n = 20 \lg |R_n / 2J_1(R_n)| \text{ db}$$

$\alpha_n$  表示第  $n$  个反射波的表观声衰减量, 修正值如图 2 所示。假定, 我们用第  $n$  个回波及第  $m$  个回波比较测定声衰减量, 则声衰减修正值为:

$$\alpha_{mn} = 20 \lg |R_m J_1(R_n) / R_n J_1(R_m)| \quad (3)$$

( $m > n$ )。在  $R_m \ll 1$  时,  $\alpha_{mn}$  可以表示为:

$$\alpha_{mn} = 8.68 \times (R_m^2 - R_n^2) / 8 \text{ (db)} \quad (4)$$

采用后一种, 我们以与脉冲回波包络的

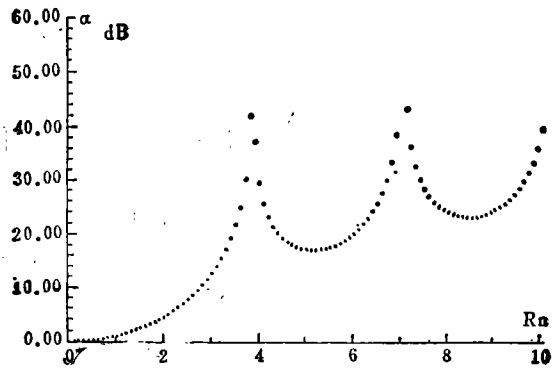


图2 温度梯度对声衰减值的修正曲线

第一、第二极大吻合的指数曲线来定义温度梯度所引起的表观衰减, 则由式(2)可得, 这两个极大值的幅度之比为  $\alpha = 20 \lg |u_{\max 1} / u_{\max 2}| = 17.7 \text{ db}$ , 又由一阶贝塞尔函数的性质, 可知两个极大之间所对应的回波数  $n = (5.1/4\pi) v_0^2 / (rfabl)$ , 因此每回波因温度横向不均匀所引起的表观衰减量为:

$$\alpha_p = (17.7 \times 4\pi / 5.1) (rfabl) / v_0^2 \text{ (db/echo)} \quad (5)$$

用每秒的表观声衰减量来表示, 则有:

$$\alpha_t = (17.7 \times 2\pi / 5.1) (rfab/v_0) \text{ (db/s)} \quad (6)$$

无论采用何种方法, 声衰减精密测试时, 都对测试结果作温度表观衰减修正, 修正值由式(3)~(6)唯一确定。

目前, 超声技术, 特别是超高频声学测试技术, 已成为固体物性基础研究等的手段之一, 固体的低温声特性无疑也是科学研究的重要课题之一。从上面的分析得到, 对声衰减测试影响的大小正比于声频、温度梯度, 因此, 欲排除低温测试中热传导、热辐射的影响, 欲获得声衰减精密测试结果, 还必须对声衰减测试腔体进行温度特性设计。假设, 每回波所允许的声衰减测试误差为  $\Delta\alpha$  (db), 则由(5)式可推知:

$$\text{温度梯度} \leq \Delta\alpha \cdot (5.1/17.7 \times 4\pi) \cdot v_0^2 / rfaI \quad (7)$$

亦即, 温度不均匀度小于规定值, 才能保证声衰减测试的精密度。

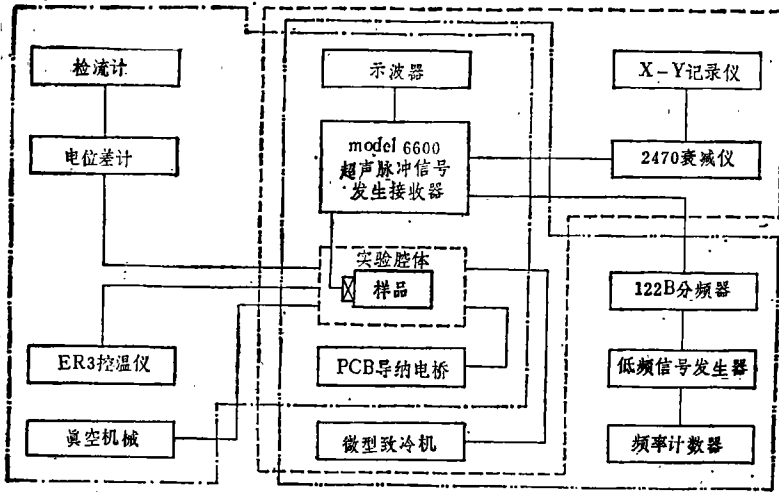
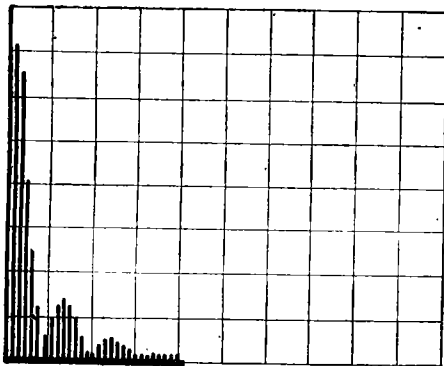
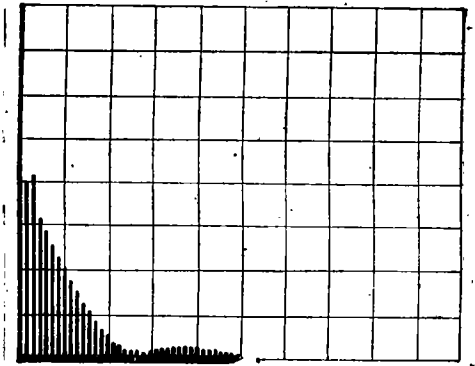


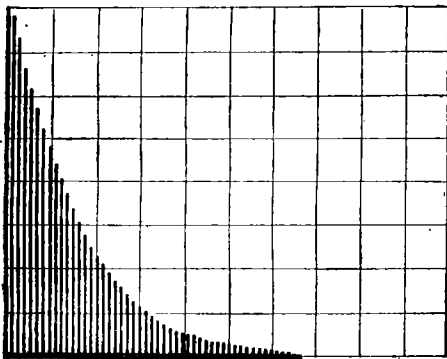
图3 温度效应测试系统方框图(其中: ---为温度影响测试部分;  
- · - · -为声速测试部分; — — —为声衰减测试部分)



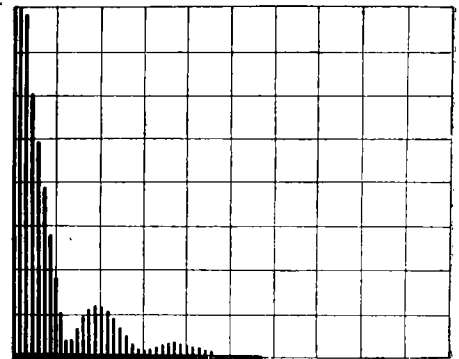
(a) 温度梯度  $b=0\text{K/cm}$



(b) 温度梯度  $b=2.0\text{K/cm}$



(c) 温度梯度  $b=3.5\text{K/cm}$



(d) 温度梯度  $b=5.2\text{K/cm}$

图4 温度梯度对脉冲回波包络的影响( $f=600\text{MHz}$ ,  $T_0=77\text{K}$ )

### 三、实 验

为观察温度场对脉冲回波包络图案的影响,本实验设计如图3所示。基于LiNbO<sub>3</sub>单晶体是压电晶体,并且介质本征声衰减较低,特别在低温情况下,能良好地显示温度效应测试结果。实验选用LiNbO<sub>3</sub>单晶体为测试材料,样品几何尺寸为:25mm×7mm×10mm,端面平行度为2",平整度为1/5波长,切割方向为z(电子工业部1426所置备),其声学特性见LiNbO<sub>3</sub>慢速度表面图<sup>[4]</sup>。实验系统中,Metec公司的Model 6600提供大功率射频脉冲信号和一个高灵敏度的接收发射系统;35Mc示波器监视实验结果;ER3控温仪在样品上产生一维温度场,用按文献<sup>[5]</sup>的方法自制热电偶测温度差;铂电阻联合PCB导纳电桥测热地温度;为不使液氮等物质进入测试样品,避免低温下空气的冷凝和空气的热传导对测试带来影响,并获得具有良好稳定性的热地端,实验采用真空测试腔体;同时附加了声衰减测试,并采用了表面激发及热接地等技术。测试结果如图4所示。

### 四、定量分析与实验结果的比较、讨论及结论

定量分析讨论中认为:温度梯度对脉冲回波包络的影响,与介质的声速及其变化特性直接相关,参见(2)式。因此,按图3中声速测定方框,采用脉冲重合法,测得LiNbO<sub>3</sub>晶体声速温度特性结果如图5所示,符号×代表实验值,连续曲线为声速拟合结果。拟合的基本思想是引入逼近函数  $v = \sum_{i=1}^n B_i T^{i-1}$ , 用最小二乘法去逼近实验曲线真值,使其偏离最小化。根据图4、图5实验结果,运用定量分析(2)式,我们可获得温度梯度对脉冲回波包络图案的影响(理论实验)比较图,

如图6。结果表明:在不均匀横向温度场中,声脉冲回波包络图案调制规律基本上符合定量分析(见图中极小点之吻合),不符合之处可以认为是声场衍射效应等非温度因素对脉冲回波包络图案发生的影响。(本文忽略了热膨胀本身对温度效应的影响,这是因为对LiNbO<sub>3</sub>晶体,热膨胀系数 $\eta$ 用X射线方法测试的结果为 $10^{-6}/K$ 数量级,而介质相对声速温度系数 $\beta$ 为 $10^{-4}/K$ 数量级)。由以上实验以及分析结果,可得结论:温度梯度越大,对脉冲回波包络图案的影响也越大,亦即对声衰减测试的影响也越大。在通常测试中,介质中的温度梯度是未知的,因此,在室温与腔室温度差别很大时,腔室的热接地等问题,在设计中应加以考虑,以满足所需精度对温度不均匀性的要求。实际上,在声学测试中,我们总期望能够获得声衰减的精确测试结果,但理想的实验条件往往在技术上难以实现,使我们只能借助于合理的近似,其结果正确与否随测试精度的要求而定,一定的误差容限,对应于一定的测试条件的要求。例如:要求误差小于0.01dB/echo,实验条件取射频频率为100MHz,电极半径为2.5mm,参考温度273K测试材料为LiNbO<sub>3</sub>晶体,z向切割,则根据本文定量分析(7)式,可知温度不均匀度应小于0.067K/cm;若射频频率为1GHz,这时,对温度不均匀的要求是小于0.0067K/cm,这在低温声测试中是很难满足的,因此,声测试中的恒温器温度不

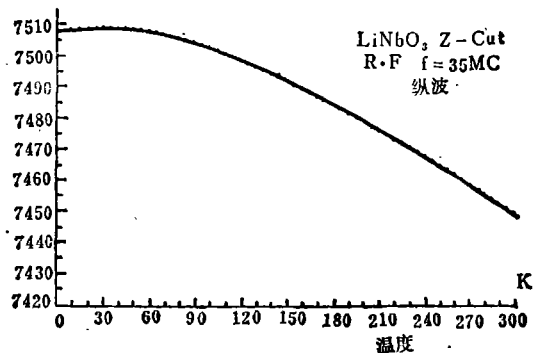
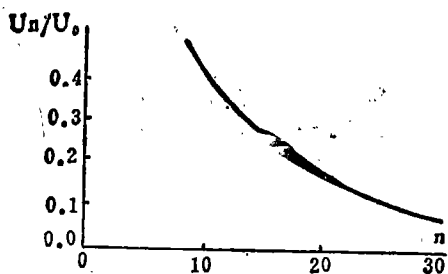
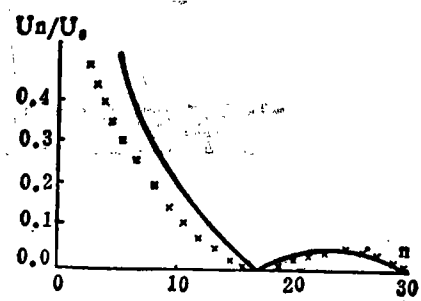


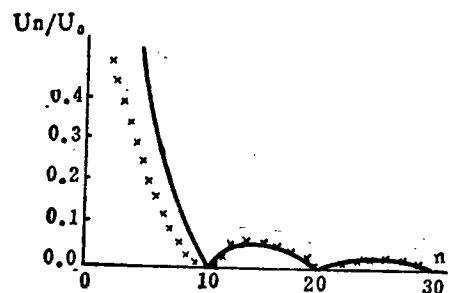
图5 LiNbO<sub>3</sub>晶体声速温度特性曲线



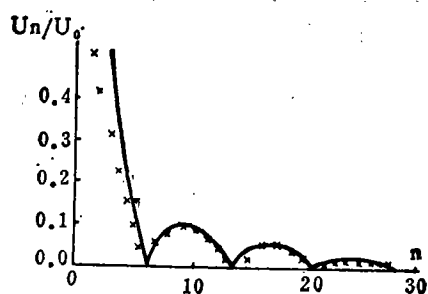
(a) 温度梯度  $b = K/cm$



(b) 温度梯度  $b = 2.0K/cm$



(c) 温度梯度  $b = 3.5K/cm$



(d) 温度梯度  $b = 5.2K/cm$

图6 温度梯度对脉冲回波包络图案的影响理论、实验比较图  
( $\times$ 代表实验值, 连续曲线是理论计算曲线)

均匀性检验是十分重要的, 对于超高频低温测试, 在具有同一绝对精度要求时尤为重要。此外, 对声测试影响的大小还与所测的介质材料有关, 一般地说本征声衰减较小的介质, 其测试绝对精度要求较高, 而本征声衰减较高的介质, 对腔体设计的要求则相应降低。而且测试结果还与介质的声速温度特性有关。所以, 在声衰减测试中, 不仅仅要考虑衍射效应、样品端面平行度等对结果的影响, 还要考虑温度不均匀的影响, 综合考虑各种因素, 才能对腔体设计提出要求, 以达到精密测试声衰减的目的。

### 参 考 文 献

- [1] Trueell Rohn Elbaum Charles, "Ultrasonic Methods in Solid State Physics", Academic Press, New York (1969) P.123
- [2] Emmanuel P. Papadakis, Ultrasonic Diffraction from Single Apertures with Application to Pulse Measurements and Crystal Physics. "Physical Acoustics", PTL p.151
- [3] [日]竹内洋一郎"热应力" (1977)
- [4] Auld, R. A. "Acoustic Fields and Waves in Solids" John Wiley (1973)
- [5] Poweli R. L., M. D. Buch & R. J. Corruccini, Low Temperature Thermocouples, NBS 9712, (1968);