

换能器对超声衰减测量的影响

陈雁 魏墨鑫 谭金星

(同济大学声学研究所)

一、引言

声衰减系数是媒质的主要声学特征量，它能提供物质内部结构及媒质某些非声学性质的信息，例如：悬浮液的浓度和粒度、粗晶材料和复合材料内粒子大小及分布等。影响衰减测量的因素，可概括为：1)换能器发射的衍射效应；2)换能器及耦合层对试样端面反射的影响；3)侧壁反射的影响；4)端面状况(平行度、平整度)的影响；5)温度不均匀的影响。这些因素使得衰减测量的精度下降，因此研究这些因素从而提出校正措施是一个急需解决的问题。

在影响衰减测量的五个因素中，换能器发射的衍射效应^[1]、端面状况(平行度；平

整度)的影响^[2,3]以及温度不均匀的影响^[4]，已有多篇文章进行了讨论。本文着重讨论试样端面由于换能器及耦合层的存在使得反射系数减小的问题。对于侧壁问题，将采取一些措施，尽量减小它对衰减测量的影响。

本文从理论上模拟了端面反射损失的一些规律，并提出了一种实验方法，来修正换能器及耦合层对端面反射的影响，使衰减测量的准确程度得到了提高。

二、理论分析与模拟

首先，用等效网络方法^[5]分析换能器、试样、耦合层等的分布参数系统。换能器用K.L.M.网络来等效，耦合层用传输线网络

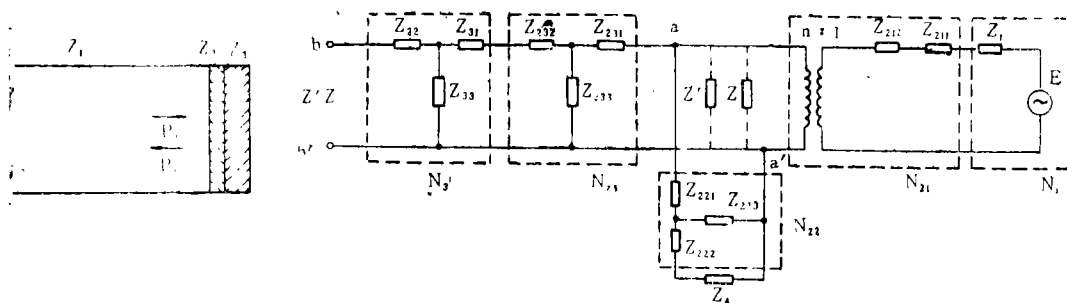


图1(a)实际分布参数系统

(b)等效网络： N_1 外部信号源及内阻， N_{21} 换能器等效电端网络， N_{23} 、 N_{22} 压电晶片前、后1/2声传输线等效网络(z_4 背衬声阻抗)， N_3 耦合层传输线等效网络

来等效。这样，耦合层、换能器就等效为由一些两端口网络的级并联所组成的网络(见图1)。

用传递矩阵 $\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$ 来

表示各网络的输入、输出特性。式中A、B、C、D为材料参数与工作频率的函数。

那么根据传递矩阵，可逐级求出各网络端口的等效阻抗。bb'端口的等效阻抗 z'_2 对应于换能器及耦合层在试样端面的等效声阻抗，所以试样端面的反射系数 $r = z'_2 - z_1 / z'_2 + z_1$ (z_1 为试样的特性阻抗)。模拟结果(见图2)告诉我们：工作频率偏离换能器共振频率越远，换能器及耦合层在端面造成的附加衰减

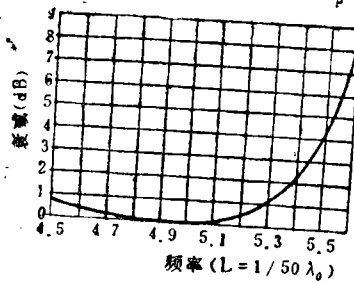
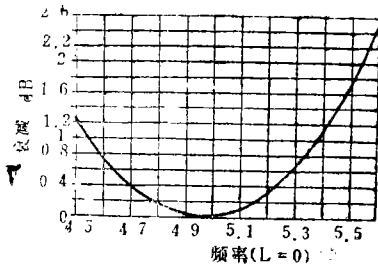


图2. 等效网络法模拟计算附加衰减(L为耦合层厚度, 铝试样, 石英换能器、硅油耦合)

越大; 耦合层越厚, 它对端面反射系数的影响也越大。

我们计算了10MHz晶片(PZT及石英), 耦合层为 $1/50 \lambda_0$ (分别为蜂蜜与硅油), 在系统(如图1a)共振频率附近的等效声阻抗。PZT晶片对应网络的等效声阻抗为 $0.8 \times 10^9 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$, 石英晶片对应网络的等效声阻抗约为 $5000 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$; 而铝的特性阻抗为 $17.3 \times 10^9 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$, 钢的特性阻抗为 $46.6 \times 10^9 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。从这里我们预言: PZT换能器与钢端面的反射系数总是大于PZT换能器与铝试样端面的反射系数, 即: 对于PZT换能器, 钢端面的反射损失小于铝端面的反射损失; 对于石英换能器, 两种端面的反射损失相差很小。

以上的分析是在假定端面声阻抗均匀的前提下进行的, 所以每次端面反射产生的附加反射损失是一定的, 然而实际情况是: 为了尽量减小侧壁对衰减测量的影响, 换能器的半径总是小于试样的半径, 那么在试样端面上的反射系数是不均匀的; 换能器所在区域的反射系数总是小于1, 而换能器区域外, 试样与空气接触部分的反射系数恒为1。根据惠更斯原理, 声波到达端面后, 此面将作为一个新声源再发射声波, 其声源振动幅度为此点的振幅乘以反射系数。

用格林函数法^[6]计算了考虑端面反射不均匀因素后的衍射声场。

格林公式为:

$$P(\vec{r}) = \iint \left[g(\vec{r}/\vec{r}_0) \frac{\partial P(\vec{r}_0)}{\partial Z} - P(\vec{r}_0) \frac{\partial g(\vec{r}/\vec{r}_0)}{\partial Z} \right] ds \quad (1)$$

$g(\vec{r}/\vec{r}_0)$ 为声场轴对称分布的格林函数 在柱坐标中的表示式。

$$g(\vec{r}/\vec{r}_0) = \int_0^\infty J_0(\mu\rho) J_0(\mu\rho_0) \frac{\mu d\mu}{\alpha} \alpha^{ia} (Z - Z_0) \quad (2)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sqrt{k^2 - \mu^2} & k \geq \mu \\ i\sqrt{\mu^2 - k^2} & \mu > k \end{cases} \quad (3)$$

$$P(\vec{r}) = \iint g(\vec{r}/\vec{r}_0) \frac{\partial P(\vec{r}_0)}{\partial Z} ds \quad (4)$$

\vec{r}_0 为点声源的坐标, ρ, Z, φ 为柱坐标。假定声源处声压为零, 那么

将(2)式代入(4)式, 得到轴对称声场内任一点的声压与声压梯度:

$$P(\vec{r}) = \frac{i}{2} \int_0^b d\rho_0 \int_0^\infty \frac{\partial P(\vec{r}_0)}{\partial Z} \rho_0 J_0(\mu\rho) J_0(\mu\rho_0) \frac{\mu d\mu}{\sigma} e^{i\sigma z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial P(\vec{r})}{\partial Z} = -\frac{1}{2} \int_0^b d\rho_0 \int_0^\infty \frac{\partial P(\vec{r}_0)}{\partial Z} \rho_0 J_0(\mu\rho) J_0(\mu\rho_0) \mu d\mu e^{i\sigma z} \quad (6)$$

当换能器以活塞形式辐射时,

$$\frac{\partial P(\vec{r}_0)}{\partial Z} = \begin{cases} 1 & \rho_0 < a \\ 0 & a < \rho_0 < b \end{cases} \quad (7)$$

a、b分别为换能器和试样的半径。

从(5)、(6)、(7)式中可以得到声波第一次到达试样端面时(即回波1),端面上任意一点的声压与声压梯度。将此端面作为新声源,此时:

$$\frac{\partial P(\vec{r}_0)}{\partial Z} = R \cdot \frac{\partial P(\vec{r})}{\partial Z} \Big|_{\vec{r} = \vec{r}_0} \quad (8)$$

$$R = \begin{cases} R_0 & \rho_0 < a \\ 1 & a < \rho_0 < b \end{cases}$$

(R_0 为换能器区域的反射系数)

从(5、6、8)式中,可以得到声波第二次、第三次……到达试样端面时的声压与声压梯

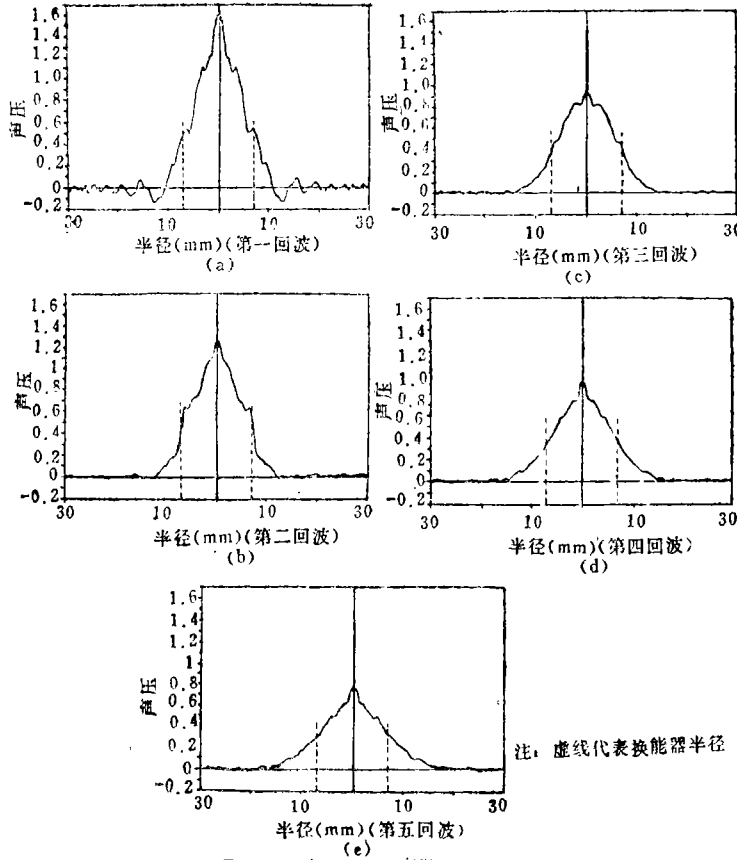


图3.前五次回波的衍射声场分布(已考虑反射影响) (铝试样 $a=7\text{mm}$, $b=30\text{mm}$, $R_0=0.9$)

表1 端面反射对衍射修正值的影响

| 回波数 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 衍射修正值(不考虑换能器及耦合层影响) | 相对值 | 0.826 | 0.768 | 0.765 | 0.681 | 0.598 |
| | 分贝数 | -1.660 | -2.293 | -2.327 | -3.337 | -4.466 |
| 衍射修正值(考虑换能器及耦合层影响) | 相对值 | 0.826 | 0.762 | 0.628 | 0.546 | 0.474 |
| | 分贝数 | -1.660 | -2.361 | -4.041 | -5.256 | -6.484 |
| 两者之差 | 分贝数 | 0.000 | 0.068 | 1.714 | 1.919 | 2.018 |

度(见图3),若对换能器区域求声压平均值,此值就是考虑了反射因素后的衍射修正值。将此衍射修正值与不考虑反射因素(反射系数恒为1)的衍射修正值比较,可以得到这样的结论(见表1及图3):随着回波数的增大,声束在扩散,换能器区域外有功区域在不断增大,而且换能器内外声压幅度越来越接近,所以换能器区域反射对声场的影响在相对减弱。(前两个回波处于近场,允许出现反常。)

不论是等效网络法还是格林函数法,均需知道换能器及耦合层的各项参数,才可算出反射系数及衍射修正值。然而耦合层厚度在现有条件下不能测得,它使得以上两种方法直接校正衰减测量值产生了困难。下节将提出一种实验方法,来实现超声衰减的正确测量。

三、实验方法测量反射损失及正确测量超声衰减

为了使端面反射对衰减的影响比较清晰地反映出来,采取了一些措施,尽量减小温度、侧壁及端面状况(平行度、平整度)等因素对声衰减的影响,并从一些晶片中挑选出一对PZT换能器及一对石英换能器,使得它们共振频率比较接近,极化方向与表面垂直并且以活塞形式发射纵波。

在这样的实验条件下,提出一种实验方法,用来修正换能器及耦合层在试样端面造成的反射损失。

实验方法及步骤:

1. 将换能器1粘贴在试样的一端(端面1),自发自收,那么声信号在端面1反射时就有反射损失 R_i (i 为相应的回波数)所以测得的声衰减(A曲线)包括反射损失 R_i 及试样本身的衰减。

2. 将换能器2贴在试样的另一面(端面2),尽量使它与换能器1同轴,换能器1仍作自发自收,那么声信号在端面1有反射损失

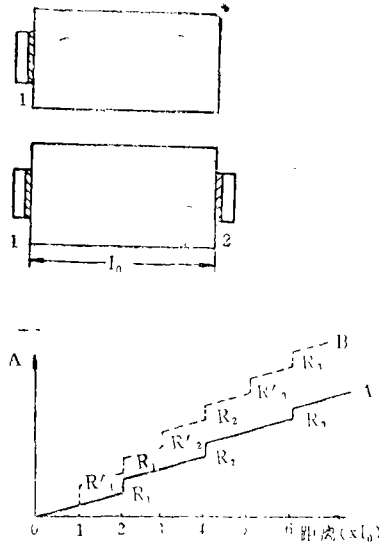


图4. 实验方法示意图

R_i , 在端面2有反射损失 R'_i ,测得声衰减(B曲线)包括反射损失 R_i 和 R'_i 以及试样本身的衰减,与步骤1测量值之差,就可得端面2造成的反射损失 R'_i 。

3. 步骤2状况不变,换能器2作自发自收,测得的声衰减包括反射损失 R_i 与 R'_i 以及试样本身的衰减。

4. 去掉换能器1,换能器2仍作自发自收,此时测得的声衰减包括反射损失 R'_i 及试样本身的衰减,与步骤3测量值之差,就是端面1造成的反射损失 R_i 。

将步骤1、步骤4测量值分别扣除反射损失 R_i 和 R'_i ,就校正了换能器和耦合层的影响,进一步作衍射修正后,可得到试样本身的声衰减。

根据以上的方法,用石英换能器(硅油耦合)分别测量了铝在10.2MHz(四组)、10.3MHz(四组)、10.4MHz(四组)的声衰减,用PZT换能器(蜂蜜耦合层)测量了铝在8.90MHz(四组)、8.93MHz(四组),9.23MHz(两组)的声衰减;并用石英换能器测量了钢在10.1MHz(三组)、10.2MHz(三组)的声衰减,用PZT换能器测量了钢在9.18

表2 反射和衍射修正前后衰减系数的平均值和偏差 单位: dB/cm

| 试样 | 换能器 | 频率 (MHZ) | 衰减系数(未修正) | | 衰减系数(反射修正后) | | 衰减系数(反射、衍射修正后) | | 静电换能器测量结果(衍射修正后) |
|----|-------|-------------|-----------|--------|-------------|--------|----------------|--------|-----------------------|
| | | | 平均值 | 偏差 | 平均值 | 偏差 | 平均值 | 偏差 | |
| 铝 | 石英 | 10.2 | 0.251 | ±0.020 | 0.211 | ±0.011 | 0.095 | ±0.010 | f = 10MHZ 0.12 |
| | | 10.3 | 0.256 | ±0.014 | 0.197 | ±0.007 | 0.087 | ±0.005 | |
| | | 10.4 | 0.265 | ±0.014 | 0.230 | ±0.007 | 0.117 | ±0.005 | |
| | PZT-5 | 8.90 | 0.46 | ±0.02 | 0.262 | ±0.006 | 0.162 | ±0.006 | |
| | | 8.93 | 0.49 | ±0.03 | 0.270 | ±0.020 | 0.173 | ±0.020 | |
| | | 9.23 | 0.61 | ±0.04 | 0.35 | ±0.02 | 0.265 | ±0.016 | |
| 钢 | 石英 | 10.1 | 0.77 | ±0.01 | 0.726 | ±0.005 | 0.599 | ±0.005 | |
| | | 10.2 | 0.75 | ±0.02 | 0.722 | ±0.005 | 0.594 | ±0.005 | |
| | PZT-5 | 9.18 | 0.65 | ±0.02 | 0.59 | ±0.03 | 0.49 | ±0.03 | |
| | | 9.50 | 0.90 | ±0.14 | 0.69 | ±0.01 | 0.59 | ±0.01 | |

MHz(四组)、9.50MHz(两组)的声衰减。实验测量值以及经过反射、衍射修正后的结果见表2。

四、结 论

从以上的理论分析和实验测量的结果中,我们可以概括为以下几点:

A. 反射对衰减的影响不可忽略。无论是用等效网络理论、格林函数法得到的结果还是实验结果都证实了这一点。从实验结果可知:由于换能器及耦合层的存在,使得声波在端面平均每次反射造成0.3~2dB的损失。对于某些低衰减材料,反射损失可能大于材料本身的衰减量。

B. 根据第3节提出的实验方法,用一对石英换能器和一对PZT换能器多次测量了铝和钢的衰减,并作了反射、衍射修正,所得数据的重复性尚好,铝试样衰减系数的测量误差在±10%左右,钢试样的衰减系数的测量误差±5%左右。用石英换能器测得的铝的衰减系数与静电换能器测量的结果比较接近。

C. 端面反射损失随着回波数的增大而

减小。从格林函数法计算声场公布中可以看到(见图3):随着声束扩散(回波数的增加),换能器区域外的有功区域在不断增大,而换能器与耦合层对端面的影响在相对减小。实验结果也证实了这点。

D. 低阻抗材料的反射损失大于高阻抗材料的反射损失。换能器在共振时,其等效声阻抗是一极小值,试样阻抗越大,与换能器等效阻抗偏离越远,反射系数越大,反之则相反。所以,实验测得(见表2):铝试样端面的反射损失大于钢试样端面的反射损失。

E. 经过反射、衍射修正后,对于同类换能器、同一块试样,工作频率越高,衰减系数也越大(见表2)。

F. 在固体中,采取单纯纵波模式的衍射修正还存在一定的问题。从表2中可以看到:反射修正使得每组数据的偏差有不同程度的减小,而且各频率测量值之间的偏差也在减小。但衍射修正既没使各频率测量值之间的偏差减小也没有使不同换能器测量值之间的偏差减小。从表2中可知:衍射修正对衰减系数的影响较大,如果我们采取一些措施(例如提高频率或增大换能器直径等),减小衍射对衰减的影响,那么端面反射对衰减测

超声波速度的精密测量理论及其应用

王寅观

(同济大学声学研究所)

一、引言

超声波在媒质中的传播速度是一个重要的物理量。在各种声速测量方法中,脉冲回波重合法(PEO)^[1]测量声速绝对值的精度较高,因而受到重视,已成为实验室中测量材料的声速和弹性常数的标准方法^[2-5]。我们采用脉冲回波重合法制成的TA-060型超声波速度测量仪^[6],测量精密优于万分之二,还能够测出材料由于受外界各种因素引起的声速微小变化(例如高温,低温,高压,电磁场,应力,硬度等)。脉冲回波重合法测量声速的精度较高,是因为它可能实现精确的衍射修正,耦合层修正,以及取得较长的

量的影响将更明显,测量误差也会进一步降低。

G*对于PZT换能器,由于其表面的粗糙不平会造成声波的漫散射以及材料的不均匀性将使其声波辐射形式与活塞辐射有一定的差异。因此我们建议,在固体衰减测量中,尽量使用石英换能器,在低衰减材料的超声检测中,这点尤其应加以重视。

参考文献

- [1] W.P.Mason 《Physical Acoustics》 Vol. XI P152~212 Academic Press (1975)
- [2] I.D.Calder "Calculation of the effect of nonparallelism on measu-

声程。

本文叙述了用于超声波速度精密测量的理论,并应用这一理论,对钢试样的纵波声速的绝对值进行了实验测量。

二、实验装置

测量装置的方框图如图1所示。虚线框内的各部分组成TA-060型超声波速度测量仪,频率计和示波器为通用设备。该装置的工作频率为5MHz。由于该系统是利用通用示波器的触发扫描单元来实现回波重合,所以测量时调整方便,水平扫描的线性良好。详细的工作原理参见文献^[6]。

rement of ultrasonic attenuation and velocity" J. A. S. A. Vol. 63, No. 3 P967~973

- [3] Shung-Lien Chuang "Acoustic wave scattering from a fluid-solid periodic rough surface" J. A. S. A. Vol. 71, No. 6 P1368~1374
- [4] 徐晓群等"温度场对衰减精密测试的影响"《声学技术》 Vol. 5, No. 3.
- [5] 吴万春、梁昌洪《微波网络及其应用》国防工业出版社(1980)
- [6] P.M. 莫尔斯、K.V. 英格特著《理论声学》吕如榆、杨训仁译 科学出版社(1984)