

超薄弹性层超声反射纵波频域定征方法*

张 锐¹ 万明习¹ 陈 晓¹ 曹文武²¹(西安交通大学 西安 710049) ²(宾州州立大学 宾州 美国)

摘要 本文在定义超薄单层弹性介质反射传递函数的基础上,提出以单层介质反射传递函数幅度谱、相位谱和复谱为基础的频域定征方法和在最小二乘意义上的反向算法对超薄弹性单层介质的声速、厚度、密度等声学参数进行定征。进一步分析了影响估计准确性的各种因素,研究了反射传递函数对材料各参数灵敏度函数在误差传递中的意义。实验结果证实,对于铝质超薄单层介质,该方法能够准确估计厚度小到 24 μm 铝层的声学参数。

关键词 超薄单层介质 超声波 传递函数 定量无损定征

Characterization of the Ultra-thin Elastic Layer by Ultrasonic Longitudinal Reflection Wave in the Frequency Domain

Zhang Rui¹ Wan Mingxi¹ Chen Xiao¹ Cao Wenwu²¹(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China) ²(Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA)

Abstract A low-frequency ultrasonic longitudinal reflection wave frequency-domain method suited for characterizing longitudinal wave velocity, thickness, and density of ultra-thin elastic layer is presented. The reflection transfer function of the ultra-thin layer is derived. In the least square error sense, an inverse algorithm is used to estimate the parameters mentioned above on the basis of the amplitude, phase and complex spectrum. An analysis of main sources of the estimate deviation is presented. The sensitivity of the reflection transfer function to parameters and its significance in the transfer of errors has been well discussed. It is observed that the agreement between the nominal and estimation values is excellent.

Key words Ultra-thin layer media Ultrasound wave Transfer function Quantity NDE

1 引 言

常规的超声波检测方法,如单载频脉冲重合法、共振法以及脉冲回波方法等,在对诸如材料表面保护涂层、粘贴型复合材料粘贴层和扩散型复合材料扩散层等多种超薄的单层和多层介质进行测试时受到本质上的限制,只适用于测试介质厚度 h 大于测量声波在介质中波长 λ 的样本^[1~4]。这里“超薄”的概念是指待测介质厚度远小于超声波波长,以致采用目前的超声方法无法区分材料前后界面的各次回波信号^[5~8]。

以往我们已经提出和研究了透射方式下的超薄层频域定征方法,但在某些实际应用场合中,难以从

被测样品两侧对其进行测量,或介质单侧清洁度要求较高^[9~10]。所以本文在进一步推导超声波垂直入射薄层介质时反射传递函数的基础上,采用单一超声波发射/接收超声波换能器,提出以单层介质反射传递函数幅度谱、相位谱和复谱为基础的频域定征方法和在最小二乘意义上的反向算法对超薄弹性单层介质的声学参数进行定征,适用于上述特殊场合。文章分析了影响估计准确性的各种因素,研究了反射传递函数对材料各声学参数灵敏度函数在误差传递中的意义。实验结果表明,该方法能够对厚度小至百分之一波长薄层介质的声学参数进行测量。

* 本文于 2000 年 4 月收到,系国家自然科学基金(8963929)和美国 Office of Naval Research 资助项目(96014-93-1-0340)。

2 方 法

2.1 反射传递函数定义

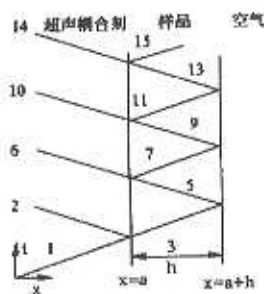


图 1 单层介质中的多次反射和透射示意图

如图 1 所示为超声波垂直入射超薄单层介质时的多次反射和透射示意图,图中入射波画成斜的利于看清材料内部两界面间多次反射的情况,材料和探头之间使用超声波耦合剂耦合,材料的另一面直接与空气相接触。

本文中定义超声波耦合剂、超薄弹性层样品、空气分别是 0、1、2 号介质,并假设垂直入射的平面波 u^i 在 $t=0$ 时刻到达介质前界面。

在图 1 中所示 u_2, u_4, u_{10}, \dots 分别是第 1、2、3 次和其后的反射波,在材料是薄层介质时,多次反射波在时域上混叠在一起,由透射接收探头和发射探头得到的是材料的总体反射波 u^r 。设发射探头前界面位于 $x=0$ 处,则经过较为复杂的推导,则由发射/接收换能器接收到的总体反射波 u_c^r 应为如下形式:

$$u_c^r = R_{01} f(\eta) + \frac{T_{01} T_{10}}{R_{10}} \sum_{m=1}^{\infty} (R_{12} R_{10})^m f(\eta - 2msh) \quad (1)$$

其中: $\eta = 1 + s_c(x - 2h_c)$, $s_c = 1/c_c$, c_c, h_c 分别是耦合剂的声速和厚度, R_{ij} 和 T_{ij} 分别表示 i 介质对 j 介质的声波反射及透射系数,表达式从略。

一般而言,待测试材料的声阻抗比空气大得多,所以上式中的 $R_{12} \approx 1$ 。将同种材料的厚(这里“厚”的概念是指时域上能清楚分开不同次反射波)的样品得到的第一次反射波作为参考信号,材料声学系统反射传递函数 $H_c^*(\omega)$ 为总体反射波 u_c^r 频谱与参考信号频谱之间的比值,经推导, $H_c^*(\omega)$ 为如下形式:

$$H_c^*(\omega) = \frac{R_{10} - e^{-2kh}}{R_{10} - R_{10}^2 e^{-2kh}} \quad (2)$$

将薄层弹性材料看作是一个声学系统,此声学系统的透射传递函数和反射传递函数是声速 c 、厚度 h 和密度 ρ 这三个参量的函数。如图 2 所示是采用本文实验系统,测量厚度为 $25.4 \mu\text{m}$ 的单层铝箔样品的参考信号和反射信号的时域波形, S_r 为数字示波器采样率。

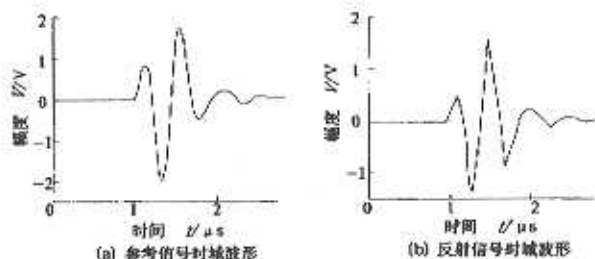


图 2 测量单层样品的参考信号和反射信号的时域波形
(材料:铝箔, $h=25.4 \mu\text{m}$, $c=6.207 \text{mm}/\mu\text{s}$, $\rho=2.701 \text{g}/\text{cm}^3$, $S_r=100 \text{MHz}$)

2.2 反向算法

在实验测量反射和参考信号并求得材料的反射传递函数之后,分别通过在最小二乘误差意义上和理论上材料传递函数的复谱、幅度谱和相位谱的比较,估算出材料的声学参数值。以复谱为例,材料参数的实验估计值应使下式取得最小值:

$$E(p) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \| H_j^*(p) - H_{jc}^* \|^2 \quad (3)$$

其中: $j=1 \dots N$, N 是估计材料参数时通频带内设定的频率点数,可以选择不同的数值, p 代表 c, h 和 ρ 中的一个, $H_j^*(p)$ 是相应于第 j 点频率处的理论传递函数复谱值, H_{jc}^* 是实验测量传递函数复谱值。

为求得上式的最小值,对两边求导,得到:

$$f(p) = \sum_{j=1}^N 2H_j^* S_{H_j, p} - (H_j^* S_{H_j, p} \bar{H}_{jc}^* + \bar{H}_j^* \bar{S}_{H_j, p} H_{jc}^*) \quad (4)$$

其中: $S_{H_j, p}$ 和 $S_{H_j^*, p}$ 的含意在后面给出,测量得到材料的实验传递函数后,使用牛顿—拉夫逊方法来求解使 $f(p)=0$ 的 p 值,即材料参数的估值。也可以很方便地写出幅度谱和相位谱的相应公式。

2.3 参数估计误差及灵敏度分析

对于反射声场,我们经过详细严密的推导,可以求得用反射传递函数复谱定征方法估计样品声学参数值所产生的估计误差为:

$$e(p) = \frac{\sum_{j=1}^N [e_{H_j} S_{H_j, p} + e_{\Phi_j} S_{\Phi_j, p} H_j^*]}{\sum_{j=1}^N [\| S_{H_j^*, p} \|^2]} \quad (5)$$

其中:

$$S_{H_j^*, p} = p \frac{\partial H_j^*}{\partial p}, S_{H_j, p} = p \frac{\partial H_j}{\partial p} \quad (6)$$

$$S_{\Phi_j, p} = p \frac{\partial \Phi_j}{\partial p} \quad (6)$$

$$e_{H_j} = \delta H_j, e_{\Phi_j} = \delta \Phi_j \quad (7)$$

由式(5)可以看出,当实验系统和测量误差 e_{H_j} 和 e_{Φ_j} 一旦确定下来,用来进行反向估计材料参数的

频率段处反射传递函数复谱对样品声学参数的灵敏度越大,参数估计误差 $e(p)$ 越小。幅度谱和相位谱的相应公式从略。

3 实验

实验测量系统如图3所示。将一支中心频率为2MHz的纵波宽带压电发射/接收换能器垂直放置于待测样品之上,换能器-3dB线性带宽为0.918~

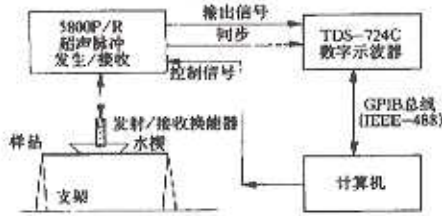


图3 实验测量系统原理框图

3.463MHz。精确调整换能器使待测材料位于换能器焦区的位置,本实验中换能器与待测材料之间使用水楔耦合方式。测量系统在计算机的控制下,触发脉冲发生器5800 P/R产生尖脉冲激励发射探头,5800 P/R将接收换能器收到的信号经内部放大器预放后送至TDS-

724C型数字示波器进行采样,示波器的采样频率 $Sr=100\text{MHz}$ 是预先设定的。为了减小随机噪声对实验结果的影响,数字示波器进行持续5分钟的多次采样,并且一边采样,一边将采样信号进行平均。可以推断,在没有外界干扰的情况下,平均的次数越多,由随机噪声造成的测量误差会越小。最后,平均后的采样信号通过GPIB(IEEE-488)总线送入计算机做进一步分析。

反射信号是发射探头测量得到的,此时发射探头也作为反射接收探头。实验的测试材料为不同厚度的铝箔。铝箔的声速及厚度是在美国宾夕法尼亚州购买时由商家提供的,我们使用电子测厚仪对厚度参数进行了校准,仪器的测量误差是 $\pm 2.54\mu\text{m}$ 。密度参数是使用阿基米德原理测量的。各样品的参数值在实验结果的表中附带给出。整个实验在恒温环境中进行,水楔内的水温控制在 $23\pm 0.1\text{C}$ 。

4 实验结果与讨论

我们采用反射传递函数方法分别对 $25.4\mu\text{m}\sim 152.4\mu\text{m}$ 的铝箔样品进行了测量与参数估计,表1~3为估计结果。

表1 采用反射传递函数方法对样品速度估计结果

(材料:铝箔, $c=6.207\text{mm}/\mu\text{s}$, $\rho=2.701\text{g}/\text{cm}^3$, $Sr=100\text{MHz}$)

样品厚度 ($\pm 2.54\mu\text{m}$)	h/ λ 范围			幅度谱估计结果		相位谱估计结果		复谱估计结果	
	最小	额定	最大	$C_{imp}(\text{m/s})$	err(%)	$C_{phs}(\text{m/s})$	err(%)	$C_{com}(\text{m/s})$	err(%)
25.4	0.004	0.008	0.014	6.117	-1.5	6.122	-1.3	6.140	-1.1
76.2	0.011	0.025	0.043	6.236	+0.5	6.128	-1.3	6.139	-1.1
152.4	0.023	0.049	0.085	6.950	-2.5	6.412	+3.3	6.287	+1.3

表2 采用反射传递函数方法对样品厚度估计结果

(材料:铝箔, $c=6.207\text{mm}/\mu\text{s}$, $\rho=2.701\text{g}/\text{cm}^3$, $Sr=100\text{MHz}$)

样品厚度 ($\pm 2.54\mu\text{m}$)	h/ λ 范围			幅度谱估计结果		相位谱估计结果		复谱估计结果	
	最小	额定	最大	$h_{am}(\mu\text{m})$	err(%)	$h_{phs}(\mu\text{m})$	err(%)	$h_{com}(\mu\text{m})$	err(%)
25.4	0.004	0.008	0.014	25.9	+2.1	26.1	+2.9	26.0	+2.2
76.2	0.011	0.025	0.043	75.4	-1.0	77.7	+2.0	77.0	+1.1
152.4	0.023	0.049	0.085	154.8	1.6	155.3	1.9	154.4	1.3

表3 采用反射传递函数方法对样品密度估计结果

(材料:铝箔, $c=6.207\text{mm}/\mu\text{s}$, $\rho=2.701\text{g}/\text{cm}^3$, $Sr=100\text{MHz}$)

样品厚度 ($\pm 2.54\mu\text{m}$)	h/ λ 范围			幅度谱估计结果		相位谱估计结果		复谱估计结果	
	最小	额定	最大	$\rho_{imp}(\text{g}/\text{cm}^3)$	err(%)	$\rho_{phs}(\text{g}/\text{cm}^3)$	err(%)	$\rho_{com}(\text{g}/\text{cm}^3)$	err(%)
25.4	0.004	0.008	0.014	2.618	-3.1	2.618	-3.2	2.614	-3.2
76.2	0.011	0.025	0.043	2.744	+1.7	2.642	-2.1	2.738	+1.4
152.4	0.023	0.049	0.085	2.647	-2.0	2.624	-2.8	2.644	-2.1

通过观察上面的实验数据可知,利用反射声场传递函数定征方法可以对超薄弹性层样品(h/λ 达到0.01左右)的声学参数进行较为准确的定征。仔细比较之后可以注意到该方法对声速和厚度两种参

数具有比较好的准确度,优于对密度的定征准确度。结合理论部分的灵敏度分析,对照图4中的灵敏度曲线,可以很清楚地看出反射声场传递函数对参数的灵敏度和实验估计参数误差之间有非常直接的关

系。

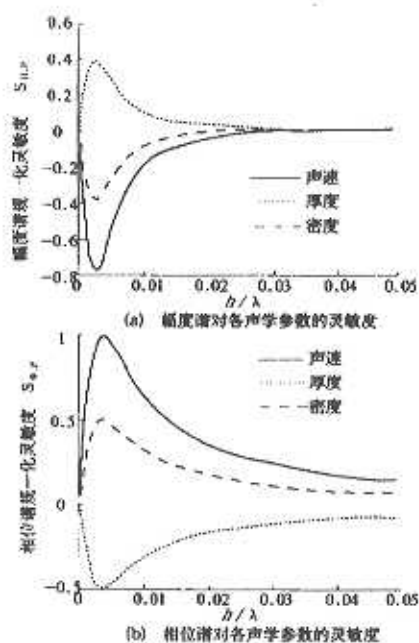


图4 反射传递函数幅度谱、相位谱对样品各声学参数的灵敏度曲线

由上图可知,反射声场传递函数对声速的灵敏度最好,其次是厚度,这两种参数的灵敏度都大于对密度的灵敏度,这就是方法对声速和厚度的准确度好于对密度的定征准确度的原因。还可以注意到,反射传递函数的相位谱对样品各声学参数的灵敏度与幅度谱对样品各声学参数的灵敏度符号相反。也就是说,当测量系统的幅度谱测量误差与相位谱测量误差同符号情况下,利用反射传递函数的相位谱和幅度谱对同样参数的估计值反向。

比较图4(a)和(b)可以得知,理论上反射传递函数的相位谱对样品各声学参数的灵敏度大于幅度谱对样品各声学参数的灵敏度,但综合表1~3可知,利用反射传递函数的相位谱对超薄层介质声学参数的估值误差常大于幅度谱对同样参数的估值误差。我们对测量系统的测量误差进行统计,结果表明,测量系统的幅度谱测量误差小于相位谱测量误差,如在0.006inch情况下, $\overline{\delta h} = 0.003$,而 $\overline{\delta s} = 0.06$,两者之间相差20倍,这就是幅度谱方法的估计误差普遍低于相位谱估值误差的原因。又因为复谱的测量误差是由幅度谱和相位谱误差共同决定的,所以复谱估值方法的估值误差往往介于幅度谱

和相位谱之间,尽管 $S_{H,P}$ 从数值上大于 $S_{H,D}$ 和 $S_{\phi,D}$ 。

最后,进一步观察反射传递函数幅度谱、相位谱对样品各声学参数的灵敏度曲线可知,方法对样品的定征误差并非随着待测样品厚度的增大而呈现简单的线性减小规律,这一点与常规超声波检测方法不同,所以一定要根据待测样品的具体情况,分析其反射传递函数对各声学参数灵敏度的规律,才能制定出最为合理的定征方案。

5 结 论

本文通过理论分析和实验验证,提出和研究了一种可以用来估计 h/λ 达到0.01左右超薄弹性层声学参数(声速、厚度和密度等)的超声波反射纵波频域定征方法,该方法采用单一超声波换能器,从被测样品单侧对其进行测量,适用于密闭箱体、样品单侧浸水或洁净度要求高等场合中。该方法得到如下结论:

1. 超声波反射纵波频域定征方法可以用来有效估计材料声速、厚度和密度,估计误差在4%之内。相对而言,该方法对声速和厚度两种参数的准确度优于对密度的定征准确度,这是由于反射声场传递函数对声速和厚度两种参数的灵敏度大于对密度的灵敏度造成的。

2. 由于本实验系统的幅度谱测量误差小于相位谱测量误差,所以幅度谱的估值误差普遍小于相位谱的估值误差,复谱的估值误差处于幅度谱和相位谱之间。

3. 方法对样品的定征误差并非随着待测样品厚度的增大而呈现简单的线性减小规律,一定要根据待测样品的具体情况,分析其反射传递函数对各声学参数灵敏度的规律,才能制定出最为合理的定征方案。

参考文献

- 1 E. P. Papadakis. Ultrasonic velocity and attenuation; Measurement methods with scientific and industrial applications, in Physical Acoustics Principles and Methods. New York: Academic Press, 1976: 277~374.
- 2 J. Krautkramer, M. Krautkramer. Ultrasonic testing of materials; 4th fully revised edition. Springer Verlag: Academic Press, 1990: 283~296.
- 3 F. H. Chang, J. C. Couchman, B. G. W. Yee. Ultrasonic resonance measurements of sound velocity in thin composite laminates. J. Composite Material, 1974, 8 (10): 356~363.

(上接第 379 页)

- 4 H. L. Mcksimin. Pulse superposition method for measuring the velocity of sound in solids. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1961, 33(1): 12~16.
- 5 Wan Mingxi, B. Jiang, Cao Wenwu. Direct measurement of ultrasonic velocity of thin elastic layers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1997, 101(1): 626~628.
- 6 张锐, 万明习, 巩欣洲, 等. 低频多模式超声兰姆波超薄弹性层定征方法. *计量学报*, 2000, 21(1): 59~67.
- 7 Qian Ming, Wan Mingxi, Cao Wenwu. Ultrasonic characterization of ultra-thin elastic layers using retrieve function. *Chinese Journal of Acoustic*, 1998, 17(4): 329~333.
- 8 张锐, 万明习, 钱明. 超薄弹性层低频超声频域定征方法. *计量学报*, 1998, 19(4): 291~298.
- 9 V. K. Kinra, V. R. Iyer. Ultrasonic Measurement of the Thickness, Phase Velocity, Density or Attenuation of a Thin-Viscoelastic plate. Part I: the Forward Problem. *Ultrasonics*, 1995, 33(2): 95~109.
- 10 V. K. Kinra, V. R. Iyer. Ultrasonic Measurement of the Thickness, Phase Velocity, Density or Attenuation of a Thin-Viscoelastic plate. Part II: the Inverse Problem. *Ultrasonics*, 1995, 33(2): 110~122.