

固体间不同厚度界面层的超声反射*

宁伟 许明翔 王耀俊

(南京大学近代声学实验室 南京·210093)

将固体间界面层模拟为固体或流体薄层,本文讨论了界面层对斜入射纵波和横波的反射和透射,测量了垂直入射纵波的反射系统随声波频率和两铜块之间水界面层厚度的变化。理论和实验结果基本符合。

Ultrasonic reflection from an interface layer between two solids

NING Wei XU Mingxiang WANG Yaojun

(Laboratory of Modern Acoustics Nanjing University, Nanjing 210093)

By simulating the interface between two solids as a thin solid or liquid layer, we discussed the reflection and transmission coefficients of sound waves obliquely incident on the interface. We also measured the ultrasonic reflection coefficients of longitudinal wave normally incident on water layers with different thickness between two cooper blocks. The theoretical and experimental results are in good agreement.

术评价界面特性时的参考。

1 引言

层状复合材料在现代工业中得到了广泛的应用。人们发现,复合材料经过长时间使用后可能发生断裂,而这种断裂往往出现在复合材料中的界面上。近几年来,超声反射谱技术因能较灵敏地检测界面特性而受到重视^[1~3],而其中关键问题之一是界面层力学特性(包括界面层厚度)对声波反射和透射的影响。本文将界面层模拟为固体或液体薄层,讨论了斜入射纵波或横波遇界面层时的反射和透射系数,并且用单个超声换能器测量了纵波垂直入射时反射系数随界面层厚度和声波频率的变化。本文的结果可作为超声谱技

2 研究层状固体媒质声反射的一般方法

在研究层状固体媒质中的声反射时,转移矩阵方法是常用的一种方法。设有如图1所示的3层固体媒质,其底部(媒质1)和上部(媒质2)均为半无限固体,中间固体层厚度为 h ,且各层固体均为各向同性。今有角频率为 ω 的简谐平面纵波和横波入射到上半无限媒质与中间层之间的界面上。用 ϕ_i, ψ_i 表示入射纵波和横波的位移势(设它们在 x 方向上具有相同的相位因子), ϕ_r, ψ_r 表示上半

* 江苏省自然科学基金资助课题

收稿日期:94-7-30

无限媒质中反射纵波和横波的位移势, ϕ_i, ψ_i 表示下半无限媒质中透射纵波和横波的位移势。根据 Snell 定律, 所有的反射和透射波在 x 方向上具有相同的波矢量分量。

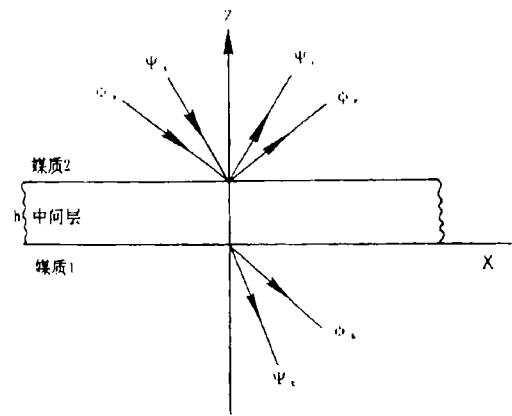


图 1 3 层固体媒质中声波反射与透射

由上下半空间中声场与相应界面上质点振动速度(或位移)和应力之间的关系, 联系中间层固体上下界面上质点振动和应力之间的传递矩阵, 可以得到:^[4]

$$\begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_r \\ \psi_i \\ \psi_r \end{bmatrix} = [D] \begin{bmatrix} \phi_t \\ 0 \\ \psi_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$[D] = [C][B][A]$$

以上各矩阵都为 4×4 阶矩阵。 $[B]$ 为中间层固体的传递矩阵, $[C]$ 和 $[A]$ 分别与上下半无限媒质纵横波速度、密度和入射角有关。以上各矩阵中元素的表达式详见参考文献[4]。

式(1)建立了入射声波位移势函数和反射、透射声波势函数之间的关系, 将它进行适当的重新安排, 即可得到不同波的反射和透射系数。

3 固体间液体层的声反射和透射系数

前面介绍的研究层状固体媒质中声反射的一般方法同样也适用于此类问题。考虑到当中间层为液体时, 界面上切向应力 σ_{xz} 为 0,

且液体中只存在纵波, (2)式中各矩阵需要进行适当的变换。

对中间为液体层的结构, 仅需考虑上下界面上质点振动速度分量 v_z 和应力分量 σ_{zz} 的传递作用, 我们可以得到:

$$\begin{bmatrix} v_z \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix}_{z=h} = [M]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} v_z \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix}_{z=0} \quad (3)$$

其中, $[M]$ 与声波频率、在液层中传播方向及液层厚度有关。其具体表达式见附录。

在上界面, 由质点振动速度和应力之间的关系可以得到:

$$\begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_r \\ \psi_i \\ \psi_r \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} v_z \\ v_z \\ \sigma_{zz} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

在下界面同样有:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_z \\ \sigma_{zz} \\ 0 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \phi_t \\ 0 \\ \psi_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

当纵波入射时, 令 $\phi_i = 1, \psi_i = 0$, 综合(3)~(5)式, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \phi_r \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \phi_t, \quad \psi_t = -\frac{A_{41}}{A_{43}} \phi_t \quad (6)$$

于是可以得到纵波入射时声波位移势的反射透射系数:

$$R_u = \frac{\phi_r}{\phi_i} = \frac{D_2}{D_1}, \quad R_t = \frac{\psi_r}{\phi_i} = \frac{D_3}{D_1}$$

$$T_u = \frac{\phi_t}{\phi_i} = \frac{1}{D_1}, \quad T_t = \frac{\psi_t}{\phi_i} = -\frac{A_{41}}{A_{43}} \frac{1}{D_1} \quad (7)$$

其中, R_{mn}, T_{mn} 分别代表反射和透射系数, 下标 m, n 分别表示入射波和反射(透射)波波型, l 表示纵波, t 表示横波(以下的表示方法与此相同)。 D_1, D_2, D_3 的具体表达式见附录。

当入射波为横波时, 令 $\phi_i = 1, \psi_i = 0$, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} \phi_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \phi_i, \quad \phi_i = -\frac{A_{41}}{A_{43}} \phi_i \quad (8)$$

于是,可以得到横波入射时声波位移势的反射、透射系数:

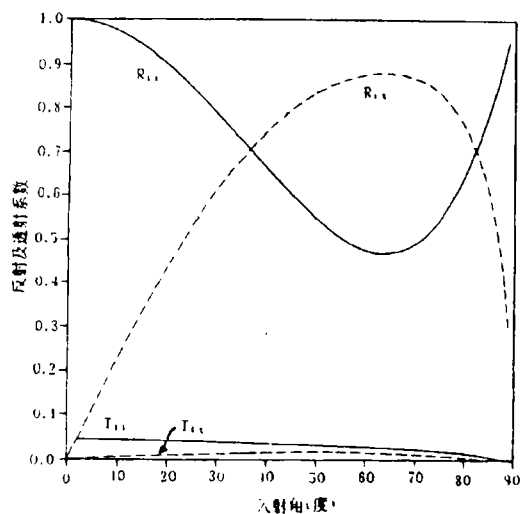
$$\begin{aligned} R_u &= \frac{\phi_r}{\phi_i} = \frac{D_1}{D_2}, & R_u &= \frac{\phi_r}{\phi_i} = \frac{D_3}{D_2} \\ T_u &= \frac{\phi_t}{\phi_i} = \frac{1}{D_2}, & T_u &= \frac{\phi_t}{\phi_i} = -\frac{A_{41}}{A_{43}} \frac{1}{D_2} \end{aligned} \quad (9)$$

4 数值计算与实验测量

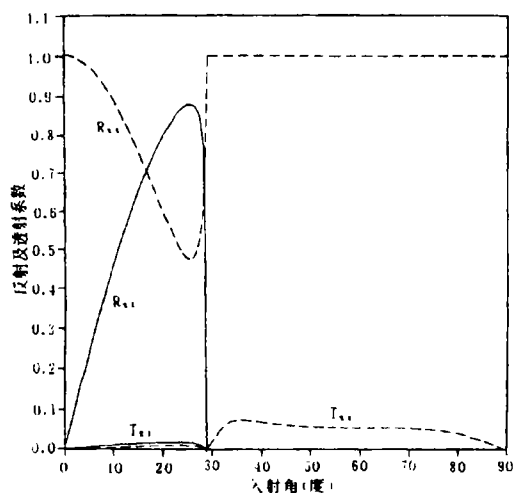
我们计算了上下两层媒质为铜,中间有一水层的 3 层结构的声反射、透射系数,如图 2 所示。其中图 2(a)代表纵波入射,图 2(b)代表横波入射的情形。图中横坐标为入射角,

纵坐标为反射、透射系数,入射声波频率为 2MHz,水层厚度为 0.1mm。图中透射系数很小,这显然是由于铜的特性阻抗大于水,此时声波入射到两种媒质的交界面上时只有很少一部分能量能透射过去。由图 2 中可见,当入射角为 0° 时,对纵波入射,横波反射及透射系数为零;对横波入射,纵波反射及透射系数为 0° ,这是因为垂直入射时在界面上不发生模式转换。另外在图 2(b)中,当入射角为 28.7° 时,纵波反射系数变为 0° ,即此角度为临界角 α ,其值由 $\sin\alpha = c_t/c_l$ 决定,其中 c_t 及 c_l 分别代表上半无限媒质中横波与纵波速度。当入射大于 α 时,则不存在反射纵波。由于各向同性媒质中 $c_t < c_l$,因此当纵波入射时反射横波不会出现临界角。

图 3 中实线为铜/水/铜结构中垂直入射



(a) P 波入射



(b) S 波入射

图 2 不同波型声波反射、透射系数随入射角的变化)

纵波时反射系数随 $f \cdot h$ 变化的理论曲线。图中横坐标为 $f \cdot h$, 单位为 $\text{MHz} \cdot \text{mm}$, 纵坐标为纵波反射系数。可见反射系数呈现周期性变化,在某些 $f \cdot h$ 处,出现极小值。

由图 2 我们知道,对包含水层的层状结构,声波透射很小,因此测量反射系数是更加有意义的。对铜/水/铜结构,我们用单个换能器测量垂直入射时反射系数随 $f h$ 的变化,

实验装置如图 4 所示。上下两层为 5cm 厚的铜块,中间为一薄的水层,换能器用油耦合在上面的铜块上,其辐射面平行于铜块上表面,此换能器兼做发射与接收之用。当发射信号为 burst 信号时,可以从示波器分辨出反射信号。改变入射信号的频率以及中间水层的厚度,可测量纵波反射系数。实验值如图 3 中圆形点所示,与理论曲线基本吻合。

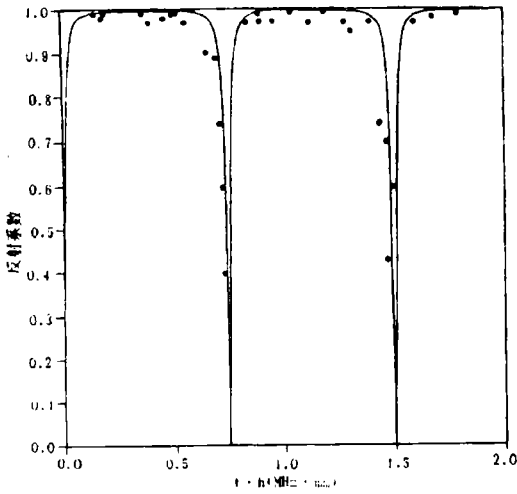
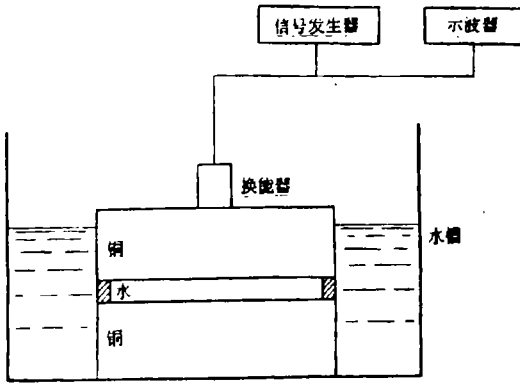
图3 垂直入射时声波反射系数随 $f \cdot h$ 的变化

图4 单个换能器测垂直入射时声波反射系数实验装置图

5 结语

我们讨论了两固体间固体和液体耦合层的声反射、透射以及单个换能器测量有液体耦合层时垂直入射声波的反射系数的方法。在实际应用中,人们关心的是如何由实验值推算中间液层的厚度^[5,6]。因此,我们的最终目的应该是建立反演液层厚度或界面层力学特性的方法,从而在实际应用中起指导作用。

(3)式中 $[M]$ 中各元素定义如下:

$$M_{11} = \cos(k \cos \theta h),$$

$$M_{12} = \frac{-i}{z_0} \sin(k \cos \theta h)$$

$$M_{21} = -i z_0 \sin(k \cos \theta h),$$

$$M_{22} = \cos(k \cos \theta h)$$

其中, k 为入射声波波数, θ 为入射角, h 为液层厚度, $z_0 = \rho_f c_f / \cos \theta$, ρ_f , c_f 分别为液层的密度和声速。

(6)~(9)式中 D_1, D_2, D_3 写作:

$$D_1 = N_{11}(M_{11}G_1 + M_{12}G_2) + N_{12}(M_{21}G_1 + M_{22}G_2)$$

$$D_2 = N_{21}(M_{11}G_1 + M_{12}G_2) + N_{22}(M_{21}G_1 + M_{22}G_2)$$

$$D_3 = N_{31}(M_{11}G_1 + M_{12}G_2) + N_{32}(M_{21}G_1 + M_{22}G_2)$$

其中

$$N_{11} = C_{12} - \frac{C_{11}C_{32}}{C_{31}}, N_{12} = C_{13} - \frac{C_{11}C_{33}}{C_{31}}$$

$$N_{21} = C_{22} - \frac{C_{21}C_{32}}{C_{31}}, N_{22} = C_{23} - \frac{C_{21}C_{33}}{C_{31}}$$

$$N_{31} = C_{42} - \frac{C_{41}C_{32}}{C_{31}}, N_{32} = C_{43} - \frac{C_{41}C_{33}}{C_{31}}$$

$$G_1 = A_{21} - \frac{A_{23}A_{41}}{A_{43}}, G_2 = A_{31} - \frac{A_{33}A_{41}}{A_{43}}$$

参考文献

- 1 S. I. Rokhlin, W. Wang and Y. J. Wang. Ultrasonic evaluation of interphasial properties in adhesive joints. Review of Progress in QNDE, 1990; 9:1231~1238
- 2 E. James Chern and B. B. Djardjevic. Applications of generalized pulse echo formulas for evaluation of multi layered structures. Review of Progress in QNDE, 1990; 9:1301~1307.
- 3 G. E. Kechter and J. D. Achenbach. Pulse echo technique to determine bondline reflection coefficients. Review of Progress in QNDE, 1990; 9:1239~1246
- 4 王耀俊. 具有刚性联接界面和滑移界面的层状固体媒质的声反射. 声学学报, 1992; 17(2), p. 81-92
- 5 S. I. Rokhlin and Y. J. Wang. Analysis of boundary conditions for elastic wave interaction with an interface between two solids. J. Acoust. Soc. Am., 1991; 89:503~515
- 6 A. Pilarski and J. L. Rose. A transverse wave ultrasonic obliquely incidence technique for interfacial weakness detection in adhesive bonds, J. Appl. Phys., 1988; 63:2187~2191