

固-液-固 3 层结构板中超声兰姆波的频散特性

刘镇清, 张海燕

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要: 文章采用传递矩阵方法研究固-液-固 3 层结构板中兰姆波的传播, 数值计算结果证明了用该方法分析层状材料中的兰姆波的有效性与实用性。文章计算出的多种频散曲线对超声兰姆波的应用是有益的。

关键词: 兰姆波; 频散曲线; 固-液-固 3 层结构

中图分类号: O422.7 **文献标识码:** A

Dispersion property of ultrasonic Lamb wave in solid-liquid-solid three-layered structure

LIU Zhen-qing, ZHANG Hai-yan

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Transfer matrix method is used to study the propagation of Lamb wave in solid-liquid-solid three-layered structure. Numerical calculations proved that the method is effective and practical to analyse the Lamb wave in layered structure. The varied dispersion curves worked out this paper is helpful in application of ultrasonic Lamb wave.

Key words: Lamb waves; dispersion curve; solid-liquid-solid three-layered structure

1 引言

兰姆波(Lamb Waves)通常指在自由边界固体板中的弹性波, 当板的厚度与波长处于同一数量级时, 板中的纵波和横波发生耦合, 于是固体声波导中形成一种特殊形式的应力波。兰姆波在板的两表面和中部都有质点的振动, 声场遍及整个板的厚度。兰姆波可测量构件的厚度、探测分层、裂纹等缺陷, 也可探测复合材料的粘合质量等。兰姆波可分对称型和非对称型两种, 它取决于两表面质点的振动对板中部是否对称。对称型兰姆波有零次阶(s_0)、一次阶(s_1)、二次阶(s_2)…… n 次阶(s_n), 非对称型兰姆波有零次阶(a_0)、一次阶(a_1)、二次阶(a_2)…… n 次阶(a_n)。

金属薄板无损检测是兰姆波技术的最早应用领域, 由于兰姆波理论及检测机理的复杂性, 金属薄板兰姆波至今仍存在许多不一致的观点和未解决的问题。美国材料试验学会标准(ASTM)及宇航材料规范(AMS)均提出对金属薄板探伤可采用兰姆波, 但对其具体实施方法却未涉及。这些问题属于对兰姆波的研究与认识尚处于不断完善阶段而造成的, 还

可能会在较长的时期内存在。以前的文章大多给出某一具体位置、大小缺陷对板中 Lamb 波的影响^[3~6], 不易看出其中的规律。本文研究计算了 3 层复合结构板中 Lamb 波的频散曲线, 3 层复合结构中包含了中间有不同位置、厚度的液体层的状况, 以此模拟板中的缺陷及变化过程, 希望通过频散曲线的演化过程找出中间液体层的厚度、位置对复合结构板系兰姆波的影响。

2 理论

研究超声兰姆波在复合结构板无损检测中的应用, 需要研究兰姆波在多层结构中的传播。目前研究计算兰姆波在多层结构中的传播大致有两类途径, 一是国内学者较多采用的经典兰姆波计算方法^[5~6], 该方法随着板的层数增多、其运算矩阵也线性增加, 例如: 计算双层板中的兰姆波需要解八阶线性方程组、计算 3 层板中的兰姆波需要解十二阶线性方程, 板的层数增多使运算变得较困难^[7]; 另一途径是国外学者较多采用的传递矩阵计算方法^[3~4], 该方法计算兰姆波在多层结构中传播时始终仅要求不大于 4×4 的矩阵运算, 本文即采用该理论计算方法。

第 1 个关于波在包含任意多数量平面层媒质中传播的方程的推导是 Thomson 在 1950 年发表的^[1], Haskell 发展了该理论在地震学中的应用^[2],

收稿日期: 2000-07-10; 修回日期: 2000-10-16

同济大学理科发展基金资助课题

作者简介: 刘镇清(1962-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事超声波及其应用、现代信号处理与系统的研究。

此方法中通过矩阵相乘将边界条件从 1 个边界向另 1 个边界传播,一般称为 Thomson-Haskell 方程。传递矩阵的工作原理是将多层系统压缩成 1 个与第 1 个界面及最后 1 个界面的边界条件相关的 1 组 4 个方程。

图 1 所示即为下面讨论中用到的 3 层板系统,它是 1 个包含有 3 层板和两个半空间(板两边自由态时为真空)的 5 层结构, X_1 的方向定义为与板的表面平行、 X_2 的方向定义为向下与板的表面垂直。假设在第 1 个界面(interface)上的位移和应力为已知,则第 2 个界面的位移和应力为可以通过 l_2 层的波的幅值得到:

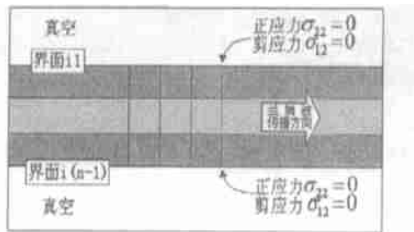


图 1 真空板中的模型

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_3, \text{顶}} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_2, \text{底}} = [L]_{l_2} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_2, \text{顶}} \quad (1)$$

方程中, u_1 与 u_2 分别代表超声波与板的表面垂直及平行的位移, σ_{22} 和 σ_{12} 分别代表超声波作用下与板的表面垂直和平行方向的应力, l_2 与 l_3 分别代表 5 层结构中的第 2 层与第 3 层。这个方程中的矩阵积与单个层的上表面和下表面的位移和应力有关,称 $[L]$ 为层矩阵,对第 2 层为 $[L]_{l_2}$ 。显然在两层间的界面上位移和应力必须连续,且这一过程可以一层一层延续,于是有下面的方程:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_n, \text{顶}} = [S] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_2, \text{顶}} \quad (2)$$

这里 n 为最后 1 层(如图 1 中的第 5 层,即: l_5),而 $[S]$ 为系统矩阵,是所有层矩阵的乘积,即:

$$[S] = [L]_{l(n-1)} [L]_{l_3} [L]_{l_2} \quad (3)$$

若两个半空间均为真空,则要求在第 1 个界面和最后 1 个界面的应力分别为零(如图 1)。则式(2)可化为:

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{31} & S_{32} \\ S_{41} & S_{42} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}_{l_2, \text{顶}} \quad (4)$$

这里的 $\begin{bmatrix} S_{31} & S_{32} \\ S_{41} & S_{42} \end{bmatrix}$ 矩阵是 S 矩阵的左下角子阵(第 3 行、第 4 行与第 1 列、第 2 列)。若要满足方程,则子矩阵一定要为奇异阵。即:

$$S_{31} * S_{42} - S_{41} * S_{32} = 0 \quad (5)$$

式中 $*$ 表示相乘运算。方程中层矩阵 $[L]$ 中的系数取决于该层在多层板厚上的位置、材料的属性(密度、纵横波声速)、超声波频率以及波数 k ,有关其描述可参考文献[4],不再复述。故求解方程(5)即可得到多层板中超声兰姆波的相速度曲线。

3 数值计算结果

传递矩阵法中总是假设层与层交界处位移和应力分量连续,而当中间层为液体时,在交界处位移和应力分量通常并不连续,且液体中只有纵波,不能传播横波。对于这种情况,在计算时可采用若干技巧使之适合于固体情形的传递矩阵法^[8],求解出兰姆波在该板系中传播的特性。这里介绍两表面为真空的铝-水-铝 3 层结构板系兰姆波频散曲线变化情况,作为对比,先计算了厚度为 2mm 铝板的兰姆波相速度频散曲线(见图 2(a))及厚度为 1.998mm 铝板负载 0.002mm 厚水层的兰姆波相速度频散曲线(见图 2(b))。这里,铝板的各项参数为:纵波声速 $c_l = 6400\text{m/s}$,横波声速 $c_t = 3170\text{m/s}$,密度 $= 2700\text{kg/m}^3$;水的各项参数为:纵波声速 $c_l = 1500\text{m/s}$,密度 $= 1000\text{kg/m}^3$ 。图 2 中各图的横坐标为频率,范围是 0MHz~4MHz,纵坐标为相速度,范围是 1km/s~9km/s, s_0 、 s_1 代表零阶、一阶对称型兰姆波, a_0 、 a_1 代表零阶、一阶非对称型兰姆波。

从图 2(a)与图 2(b)可知,由于铝板减薄很少、且水层很薄(总厚度不变),相速度频散曲线无大的变化。图 2(c)、2(d)、2(e)、2(f)中以 mm 为单位表示的铝-水-铝 3 层板各层厚度分别为:0.019-0.002-1.979、0.199-0.002-1.799、0.599-0.002-1.399、0.999-0.002-0.999,即:保持水层厚度不变,但使其在 3 层结构中的位置变化。从图 2(c)至图 2(f)的兰姆波相速度频散曲线可知,由于两铝板之间有一薄水层、且水层不能承受切向应力,造成低频极限频率时两铝板中零阶对称型兰姆波的振动相互独立,而图 2(c)中的上层铝板厚度很薄,使得频率较高时上层铝板的频厚积仍较小,出现频率较高时始终有低频极限频率零阶对称型兰姆波模式的现象,随着水层向 3 层结构中间位置移动,这一现象逐渐减弱,图 2(f)的兰姆波相速度频散曲线与文献[5]类似。有的文献将图 2(f)中的 a_1 模式归为另一个 s_0 模式,但作者及其合作者根据该模式

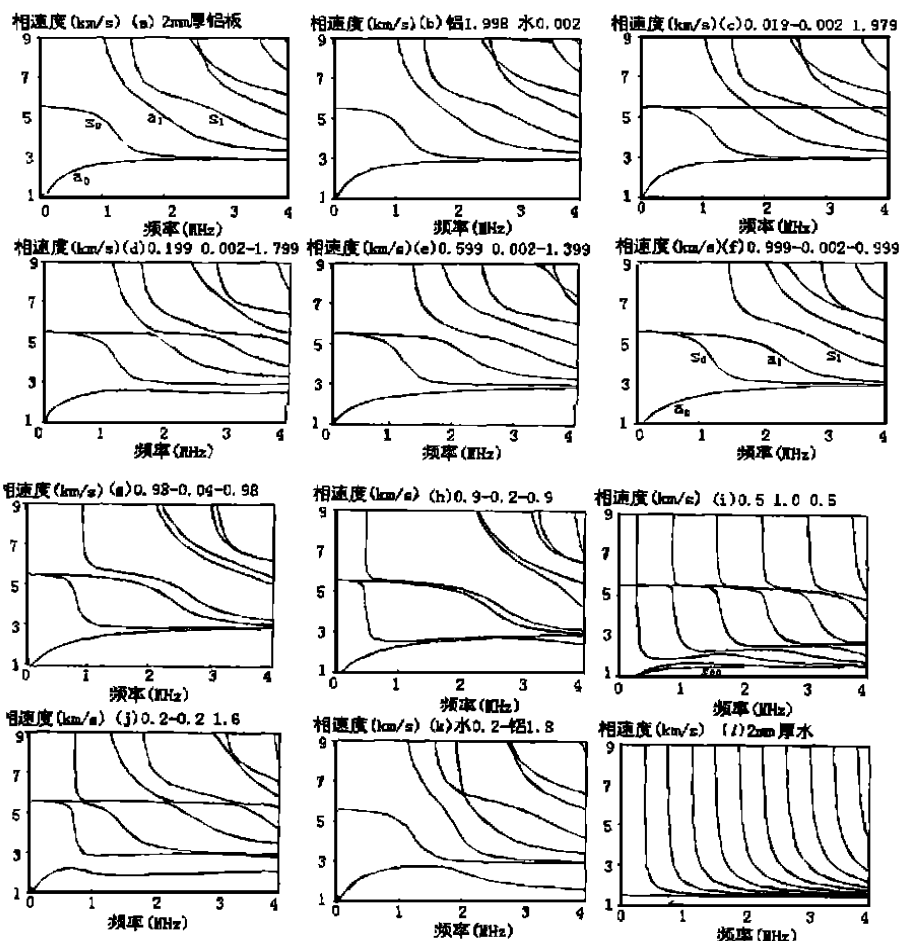


图2 3层结构板兰姆波频散曲线

的位移形态将其归为 a_1 模式。

图2(g)、2(h)、2(i)中以mm为单位表示的铝-水-铝3层板各层厚度分别为: 0.98 0.04 0.98、0.9 0.2 0.9、0.5 1.0 0.5, 即保持水层在3层结构中的位置不变、但使其厚度不断增加。作为对比, 图2(l)给出了2mm厚水层的导波频散曲线。从这些频散曲线图可看出, 随着水层的不断增厚3层结构的兰姆波频散特性越来越多地受到水层导波的影响。图2(i)中出现了始终比 a_0 模式相速度更低的一个模式即 s_0 模式, 与文献[5]介绍的现象类似, 这种由中间水层质点振动引起的导波模式在水层不断增厚时突现出来。另外, 水层不断增厚也使各模式高频相速度趋向水的纵波声速的现象越来越明显。图2(j)与图2(k)中以mm为单位表示的各层厚度分别为: 铝0.2-水0.2-铝1.6、水0.2-铝1.8(双层结构), 由于水层的增厚使得图2(j)与图2(d)、图2(k)与图2(b)中的频散曲线形态变化较大, 水0.2-铝1.8双层结构中 a_0 模式随着频率增高相速度趋向水的纵波声速的现象较明显。

由于图2中一些3层结构是不对称的, 出现各种模式不能简单地归结为 a_0 、 s_0 、 s_1 或 a_1 模式^[6], 因此这里没有标识出。但我们可以通过3层结构变化时的频散曲线形态演化过程, 大致可判断各模式的分化趋向。

4 结束语

兰姆波在板材中的传播一直是许多学者致力于研究的课题。由于其频散方程的复杂性, 且兰姆波的传播具有多种模式, 因此对兰姆波的研究在很多方面没有定论。尤其是中间含液层(模拟缺陷)的多层结构板, 其兰姆波传播模式更为复杂、频散曲线形态的变化也较大, 这一方面对人们认清该类导波的性质造成了困难; 另一方面, 复杂的传播模式及形态也提供了丰富的信息含量, 只要我们充分认识它的规律, 就有可能发掘其各种应用的途径。本文采用传递矩阵法研究固-液-固3层结构板中兰姆波

传播的频散曲线, 3层复合结构中包含了中间有不同位置、厚度的液体层的状况, 通过频散曲线的演化过程找出了中间液层厚度、位置对复合结构板系兰姆波影响的规律, 对超声兰姆波的应用提供帮助。

参考文献:

- [1] W. T. Thomson. Transmission of elastic waves through a stratified solid[J]. J. Appl. Phys., 1950, 21: 89-93.
- [2] N. A. Haskell. Dispersion of surface waves in multilayered media[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1953, 43: 17-34.
- [3] A. H. Nayfeh. The general problem of elastic wave propagation in multilayered anisotropic media[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1990, 89(4): 1524-1531.
- [4] M. J. S. Lowe. Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media[J]. IEEE Trans. UFFC, 1995, 42(4): 525-541.
- [5] 宁伟, 王耀俊. 三层复合结构中的漏Lamb波: 理论与实验[J]. 声学学报, 1996, 21(5): 767-772.
- [6] 朱哲民, 李剑, 邹薇. 有液层负载时薄板中类Lamb波的传播[J]. 声学学报, 1996, 21(2): 174-181.
- [7] 刘江韦. Lamb波在层状材料中传播特性的研究[D]. 上海: 同济大学声学专业硕士学位论文, 1998年3月.
- [8] 谢远遐. 层状板材超声Lamb波无损检测研究[D]. 上海: 同济大学声学专业硕士学位论文, 2000年3月.