

斜面型厚度变化板中导波的研究*

田光春, 刘镇清, 景永刚

(同济大学声学研究所 上海 200092)

摘要: 针对单一模式导波入射的情况, 利用混和边界元模型计算了斜面型散射区域的反射系数和透射系数与各种入射模式、入射频率以及斜面倾角变化的关系, 研究了在单一模式导波入射时导波与散射体的相互作用。文章的结果可以用来提高大量实际的无损检测工程中的检测灵敏度与能量的穿透能力, 尤其是在那些发生了斜面状厚度变化波导中的情形。

关键词: 导波; 混和边界元法; 散射; 模式转换; 二维傅立叶变换

中图分类号: TB559 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2004)01-0039-04

Guide waves in an inclined discontinuity plate

TIAN Guang-chun, LIU Zhen-qing, JING Yong-gang

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

Abstract: Aiming at specific guided-wave mode incidence situations, hybrid boundary element modeling is used to estimate reflection and transmission from inclined scatterers. Interaction between individual guided-wave modes and the scatterers is investigated by calculating the reflection and transmission coefficients in the scattered fields for various incident modes, frequencies, and angles of inclination. Results obtained in this paper can be used to improve inspection sensitivity and penetration power for a variety of practical NDE applications, notably those in which thickness variation is present.

Key words: guided wave; hybrid boundary element method; scattering; mode conversion; 2-D FFT

1 引 言

对 Lamb 波在遭遇缺陷或是遇到不连续处时发生的散射进行足够的理论和数值分析, 对于优化无损检测技术和发展新技术是非常必要的, 却又是一个求解十分困难的问题。对 Lamb 波的传播和散射, 由于缺陷几何形状的不规则性和散射时存在的复杂多模式转换现象, 与导波传播的传统数值边值问题相比, 边界元法^[1]有着更强的优势。将边界元法应用来求解 Lamb 波的散射问题的是美国宾州州立大学的 Joseph L. Rose 研究小组^[2,3,4,5]。1996 年他们首次应用边界元法来解决 Lamb 波在自由板材端面上的反射问题。本文利用混合边界元法模型计算了在斜面型散射体情况下的反射和透射情况。通

过计算散射区域的反射系数和透射系数与各种入射模式、入射频率以及斜面倾角变化时的关系, 研究了在单一模式导波入射时导波与散射体的相互作用。在实验上研究了板中的斜面状不连续引起的模式转换现象, 并将 S0 模式入射时的实验结果与利用混和边界元法从理论上求出的反射系数与透射系数作了分析比较, 结果符合得很好。

2 混合边界元模型的建立

将边界元法与 Lamb 波的本征模式函数相结合, 就形成了混和边界元法, 它对研究导波的散射是很有用的^[6]。如图 1 所示, 虚拟边界 1 和 3 将无限大自由平板分成三个部分: 左边的半无限板、右边的半无限板以及中间的由 1 边界和 3 边界组成的包含斜面的区域。2 边界和 4 边界是板的上下两表面, 其中上表面 4 上有一斜面。1 和 3 边界是两个假想的虚拟平面。此时边界 = 1+ 2

收稿日期: 2002-07-25; 修回日期: 2002-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10074050)

作者简介: 田春光(1978-), 男, 贵州人, 硕士生, 研究方向: 超声控制。

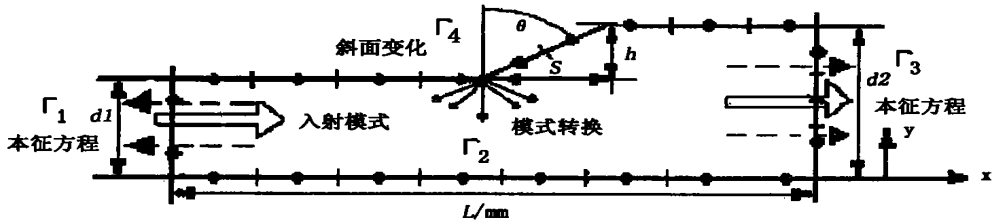


图1 混合边界元法示意图

+ 3+ 4。在 2、4 两个边界上满足表面力自由边界条件,即:

$$i = n_j, \quad ij = 0, \quad (i, j = x, y) \quad (1)$$

将边界划分为 n 个单元, 对于所有 n 个节点, 得到联立一次方程组:

$$H_{2n \ 2n} U_{2n \ 2n} = G_{2n \ 2n} T_{2n \ 2n} \quad (2)$$

其中, H 和 G 为系数矩阵, U 和 T 分别为 n 个节点的位移分量和表面应力分量构成的向量。将边界条件代入(2)式即可求得边界上未知的位移分量和应力分量。

式(2)是一个由 $2n$ 个方程构成的线性方程组, 包含 $2n$ 个位移分量 U 和 $2n$ 个应力分量 T 。由(1)式可知, 只有 $2n - k - q$ 个表面力是已知的(假设 k 为 1, q 为 3 边界上的节点个数), 未知量的个数大于方程数, 无法求解该方程组, 需要通过其它途径增加方程的个数, 可以想到用 Lamb 波的本征模式函数。这就是混合边界元法。

假定入射 Lamb 波幅度为 1 , 第 j 阶反射 Lamb 波和第 m 阶透射 Lamb 波的幅度分别为 j 、 m , 则第 j 阶反射模式 Lamb 波的反射系数定义为:

$$R^j = \frac{j}{^1} \quad (3)$$

第 m 阶透射模式 Lamb 波的透射系数定义为:

$$T^m = \frac{m}{^1} \quad (4)$$

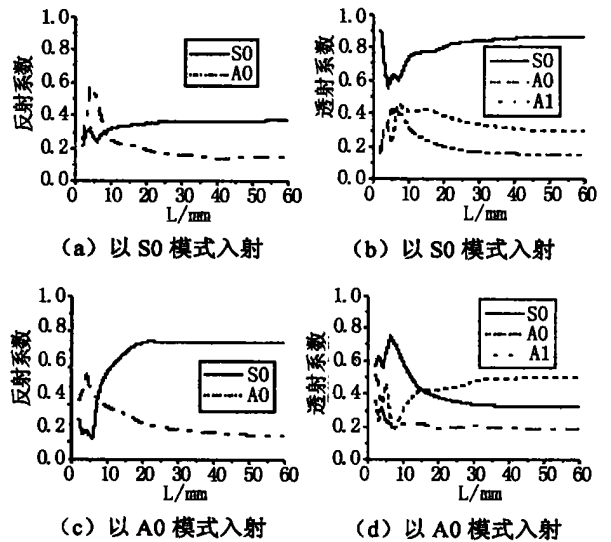
以上概括介绍了混和边界元法的建立思想, 详情见文献[7]。

3 数值计算结果

3.1 反射面和透射面之间的距离 L 的选择

为了取得较为满意的计算结果, 混和边界元法的建立过程中有一点要特别注意: 即反射面和透射面之间的距离 L 不能太长, 也不能太短。通过实验, 我们发现当 L 较小($L < 10\text{mm}$) 时, 反射系数和透射系数随 L 变化很大; 当然, 如果 L 太大, 势必太耗计算量。从图 2 可以看出, 当 L 增加到一定值

时, 反射系数和透射系数随 L 的变化就不明显了。在下面的计算中, 我们取 $L = 40\text{mm}$ 。图 2 是取 $d_1 = 1\text{mm}$, $d_2 = 2\text{mm}$, 从 d_1 端向 d_2 端分别发射 S0 和 A0 模式导波, 得到随 L 变换的反射系数和透射系数。

图2 反射系数和透射系数随 L 的变化关系

3.2 斜面型板的反射和透射时的模式转换

取 $d_1 = 2\text{mm}$, $d_2 = 1\text{mm}$, $s = h = 1\text{mm}$ (斜面的倾角为 45°), 入射频率从 $0.2\text{MHz} \sim 1.4\text{MHz}$ 变化。从 d_1 端向 d_2 端分别发射单模式的 S0 和 A0 导波, 得到随频率变化的反射系数如图 3(a)、3(b) 所示; 从 d_2 端向 d_1 端分别发射单模式的 S0 和 A0 导波, 得到随频率变化的透射系数如图 3(c)、3(d) 所示, 由图可见, 当入射频率增加到 0.9MHz 时, 在反射系数图和透射系数图中都增加了 A1 模式。

3.3 取三种不同的倾斜角, 反射系数与透射系数随入射频率的变化情况

取 $d_1 = 2\text{mm}$, $d_2 = 1\text{mm}$, $h = 1\text{mm}$, 斜面倾角分别取 30° 、 45° 和 60° , 从 d_1 端发射单模式的 S0 和 A0 导波, 频率为 $0.2\text{MHz} \sim 1.4\text{MHz}$, 得到随频率变化的反射系数和透射系数。我们发现, 无论是以 S0 模式还是以 A0 模式入射, 反射系数和透射系数随入射

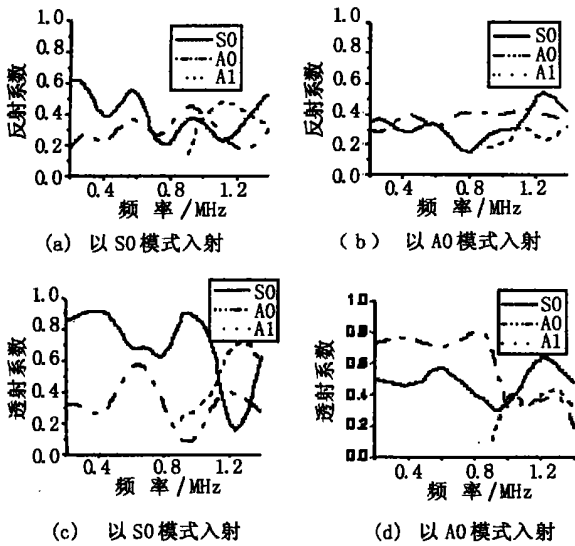


图 3 反射系数和透射系数与频率的关系

频率的变化规律都不明显; 但以 S0 模式入射时, 反射系数和透射系数随入射频率的变化幅度比以 A0 模式入射时要明显。

3.4 取三种不同的入射频率, 反射系数和透射系数随斜面倾角的变化关系

取 $d_1 = 2\text{mm}$, $d_2 = 1\text{mm}$, $h = 1\text{mm}$, 斜面倾角为 $0 \sim 75^\circ$, 对应着 S 为 $0 \sim 3.7321\text{mm}$, 所选频率为 0.5MHz , 1.0MHz 和 1.4MHz , 分别发射单模式的 S0 和 A0 导波, 得到随 S 变化的反射系数和透射系数。图 4 是以 S0 模式入射的结果; 图 5 是以 A0 模式入射的结果。由图可见, 以不同的入射频率入射时, 各模式的反射系数和透射系数的变化规律是不同的。在图 4(a) 中, 当入射频率为 0.5MHz 时, S0 模式的反射系数基本上是随 S 线性变化的, 所以可以用 S0

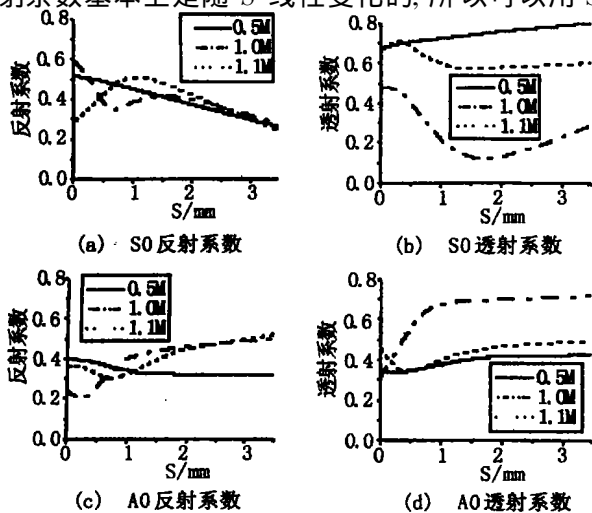


图 4 以 S0 模式入射, 反射系数和透射系数随 S 的变化

模式的反射系数来表征 S 的变化, 也即可以用 S0 模式的反射系数来表征斜面倾角的变化。由图 4 (b) 可见, 用 0.5MHz 的频率入射时, S0 模式的透射系数也是随 S 的增大而线性变化的, 但变化的幅度不大。在图 5 中, 不同的入射频率, 对应的各模式的反射系数和透射系数的变化规律不是很明显, 从图 5(b) 中可以看出, 选用 1.4MHz 的入射频率时, S0 模式的透射系数在 $S > 0.3\text{mm}$ 时, 是随 S 的增大而增大的。在用 0.5MHz 的频率入射时, S0 模式的反射系数基本上是随 S 线性递减的, 但是变化的幅度不大。其它模式的反射系数和透射系数不能很好地反映 S 的变化。

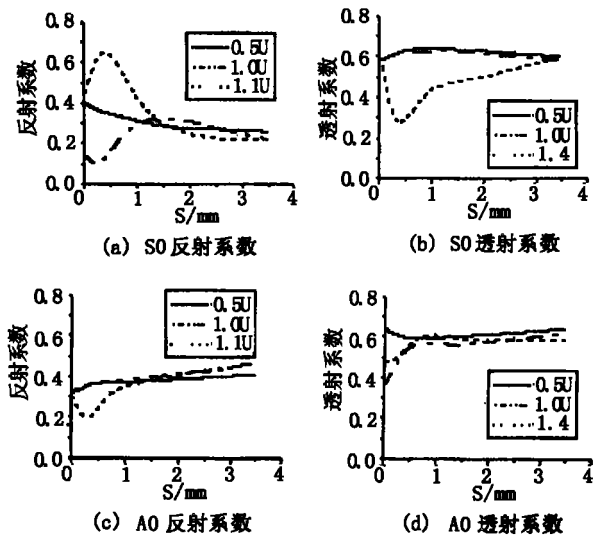


图 5 以 A0 模式入射, 反射系数和透射系数随 S 的变化

4 实验结果

4.1 模式转换现象

发射和接收换能器中心频率均为 1MHz 。用可变角换能器发射, 接收换能器用直探头。发射换能器固定, 移动接收换能器, 从两者相距 175mm 处开始以步长为 1mm 滑动, 总采样点为 64 个点, 时域采样点 2000 点, 采样频率 20MHz 。实验中用到的试样材料均为铝板, 铝板的一端厚 2.0mm , 另一端厚 1.5mm , 分别从厚端向薄端以 31° 角和从薄端向厚端以 28° 角发射 S0 模式的导波, 接收的信号经二维傅里叶变换^[8]后得到结果分别如图 6(a)、6(b) 所示。由图可见, 经模式转换后有 A0、S0 和 A1 模式, 这与前面的理论计算结果相符合。

4.2 透射系数随斜面倾角的变化

取板的一端厚 1mm , 另一端厚 2mm , 斜面的倾角

取 30 和 45, 分别从薄端和厚端以 27 和 31 发射 S0 模式导波, 接收到的信号经二维傅立叶变换后, 在得到的结果中, 取固定频率 1MHz, 得到随波数变化的幅度如图 7(a)、7(b) 所示。由图可见, S0 模式的透射系数随斜面倾角的增大而减小, 而 A0 模式的透射系数随斜面倾角的增大而增大; 而且, 从厚端入射时, A0 模式的透射系数明显比从薄端入射时大。

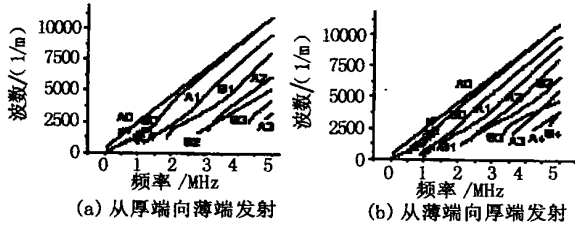


图 6 斜面型板的模式转换

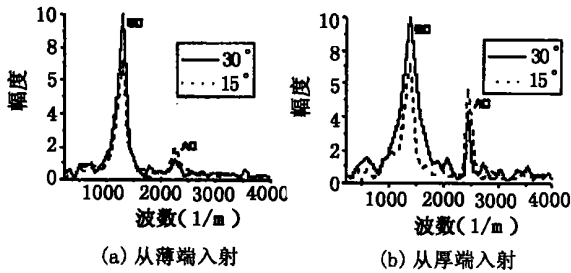


图 7 以 S0 模式入射, 透射系数随斜面倾角的变化关系

5 结 论

(1) Lamb 波遇到斜面的散射过程中除了出现数种传播模式外, 还会产生一些非传播模式(关于非传播模式的定义, 见文献[9]), 但是可以通过选择足够长的 L 以消除非传播模式对左右边界应力、位移值的影响。

(2) 斜面能引起导波的散射。数值计算和实验结果都表明导波在斜面处存在模式转换, 各散射模式的反射系数和透射系数并非单调增加或是单调减少, 而是有所起伏的, 且不同的模式散射系数之间呈现此消彼长的现象, 说明了入射波能量在不同模式之间相互转换, 但总的能量基本保持不变。

(3) 由于所研究模型的非对称性, 散射波中出现了与入射波不同类型的模式, 即不论入射模式是对称的还是反对称的, 散射波中均会产生对称模式

和反对称模式。

(4) 斜面对导波的散射行为与斜面的倾角有关。S0 模式的透射系数随斜面倾角的增大而减小, 而 A0 模式的透射系数随斜面倾角的增大而增大。

(5) 当入射频率确定后, 可以选用一定模式导波的反射系数或透射系数来表征斜面倾角的变化, 如图 4(a) 中, 频率为 0.5MHz 时, S0 模式的反射系数; 图 5(b) 中, 频率为 1.4MHz 时, S0 模式的透射系数。

参 考 文 献

- [1] Pelts S P, Cysyk J P, and Rose J L. The boundary element method for flaw classification in wave guides[A]. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation [C]. New York, 1997. 137-143.
- [2] Cho Younho, Rose J L. An elastodynamic hybrid boundary element study for elastic guide wave interactions with a surface breaking defect[J]. Inter. J. of Solids and Stru. 2000, 37: 4103-4124.
- [3] Rose J L, ZHU Wenhao, and Cho Y. Boundary element modeling for guided wave reflection and transmission factor analyses in defect classification[A]. IEEE Ultrasonics Symposium [C]. Nevada, 1998. 885-888.
- [4] Cho Younho, Rose J L. A boundary element solution for a mode conversion study on the edge reflection of Lamb waves[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1996, 99(4): 2097-2109.
- [5] Sohichi Hirose, Masaki Yamano. Scattering analysis and simulation for Lamb wave ultrasonic testing[A]. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation (Vol. 15) [C]. New York, 1996. 201-207.
- [6] 黄瑞菊. 边界元法在兰姆波无损检测中的应用[D]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
- [7] Alleyne D, Caeley P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals [J]. J. Acoust. Soc. Am, 1989, 89(3): 1159-1168.
- [8] 刘镇清, 他得安. 用二维傅里叶变换识别兰姆波模式的研究[J]. 声学技术, 2000, 89(3): 212-216.
- [9] 刘镇清. 无损检测中的超声兰姆波[J]. 无损检测, 1999, 21(9): 409-413.

欢迎订阅 欢迎赐稿 欢迎刊登广告