

文章编号: 1005-0523(1999) 01-0001-05

# 各向同性板的声—超声特性

童谷生<sup>1</sup>, 孙良新<sup>2</sup>, 宁志威<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学 土木工程系, 江西 南昌 330013; 2. 南京航空航天大学 飞行器系, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 声—超声技术是近几年发展的评估材料损伤的新技术, 笔者在本文探讨了应用该技术于板类构件时一个超声发射换能器与多个超声接受换能器输入—输出的理论分析问题<sup>19</sup>。借助于广义 Lamb 问题的远场解与波射线追踪方法分析了 2 个或多个接收换能器置于构件同一表面时延迟时间的计算公式<sup>19</sup>。这为多个接收信号的应力波因子分析, 更快速地检测构件的完整性和剩余强度提供了一种新的思想和方法<sup>19</sup>。

**关键词:** 应力波因子; 超声; 换能器; 损伤评估

**中图分类号:** O 34; TB 35; U 22 **文献标识码:** A

## 0 引言

随着高级复合材料在工程结构中的大范围应用以及复合材料损伤形式的复杂性, 使用更可靠和有效的无损检测(NDT)方法来测定和定量评价材料的总体损伤(NDE), 监视损伤的发展日显重要<sup>19</sup>。最近由美国 NASA 路易斯研究中心提供的一种应力波因子技术(也叫声—超声技术)正引起人们的极大兴趣<sup>[1~2]</sup><sup>19</sup>。研究表明, 该技术特别适宜于对与复合材料机械性能有关的参数的定量检测, 已有的报导将该技术应用于高级陶瓷和金属复合材料的刚度、强度、疲劳特性的研究<sup>[3~6]</sup><sup>19</sup>。

该技术的基本思想是: 采用压电换能器或者激光照射等手段在复合材料(或各向同性材料)表面激发询问脉冲应力波, 与此同时再利用压电传感器在材料的同一表面的其它一个或多个地方接收应力波信号, 在此基础上通过信号分析确定反映材料对于瞬间脉冲波传播效率的应力波因子<sup>13</sup>。从而以此表征材料的机械性能的变化<sup>13</sup>。该技术理论上可分为 3 个过程: 脉冲波的激发, 传播和接收<sup>13</sup>。目前这一技术的研究大都限于其中一个过程的研究<sup>[6~8]</sup><sup>13</sup>。对于该技术的理论研究, 由于涉及的因素复杂, 明显落后于技术的应用, 已有的报导均为一些初步理论模型<sup>[9~10]</sup>, 还不足以充分揭示影响应力波因子的各种因素<sup>13</sup>。

本文以各向同性板为波导元件探讨了声—超声技术中超声换能器的单输入—多输出理论模型<sup>13</sup>。利用 Lamb 问题的远场解, 讨论了通过多输出分析材料完整性方法的思想和分析方法, 为复合材料板结构的声—超声技术提供理论基础<sup>13</sup>。

收稿日期: 1998-09-22; 修订日期: 1998-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59675025)

作者简介: 童谷生(1962-), 男, 江西石城人, 华东交通大学讲师, 在读博士研究生。

# 1 理论分析

本文所研究的对象为一各向同性板,板厚为  $h$ ,发射和接受换能器的半径为  $a$ ,3个换能器放置于各向同性板的同一表面的同一直线上,取  $xy$  平面直角坐标系如图 1 所示<sup>[13]</sup>假定发射换能器输入电压为一稳态正弦电压,电压幅值为  $U$ (换能器作用如同如活塞源)<sup>[13]</sup>

## 1.1 对于传感器的假设<sup>[11]</sup>

设换能器将电压转变成接触面上的均布应力,反之亦然<sup>[13]</sup>如果输入电压幅值为  $U$ ,频率为  $\omega$  则输入电压

$$U_i(t) = Ue^{i\omega t} \quad (1)$$

法向应力为经机电转换后发射换能器与试件接触面的应力

$$\sigma_z(t) = F_1(\omega) Ue^{-i(\omega t + \phi)} \quad (2)$$

式中: $F_1(\omega)$  是传导比; $\phi$  为相角<sup>[13]</sup>

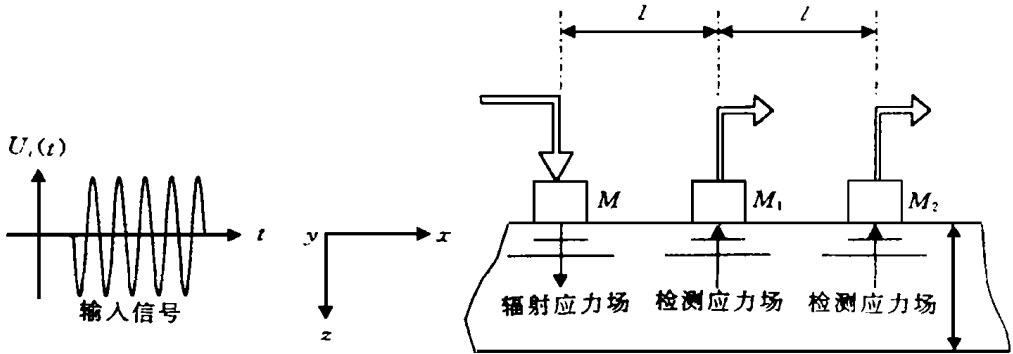


图 1 换能器在平板上的布置图

因此法向应力的幅值

$$T_1 = F_1(\omega) U \quad (3)$$

类似地,如果作用于接收换能器的正应力的幅值为  $T_2, T_3$ , 即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z^2 &= T_2 e^{-i\omega t} \\ \sigma_z^3 &= T_3 e^{-i\omega t} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

两个接收传感器的输出电压分别为

$$\left. \begin{aligned} U^{(2)} &= F_2(\omega) T_2 e^{-i(\omega t + \phi)} \\ U^{(3)} &= F_3(\omega) T_3 e^{-i(\omega t + \phi)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $F_2(\omega), F_3(\omega)$  为接收换能器的传导比<sup>[13]</sup>

这样 2 个接受换能器输出电压幅值

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= F_2(\omega) T_2 \\ U_3 &= F_3(\omega) T_3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

## 1.2 由发射换能器辐射的远场应力及远场条件

为得到由发射传感器在板内辐射的应力,可利用广义 Lamb 问题的解得远场应力场,在图

2 所示坐标系中有<sup>[11]</sup>

$$\sigma_z = -iaT_1 \left\{ \frac{D_1(\omega \theta)}{k} \exp[ik(R - C_1t)] + \frac{4D_2(\omega \theta)}{R} \exp[ik_2(R - C_2t)] \right\} \quad (7)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= \frac{\cos \theta k^2 - 2\sin^2 \theta^2 J_1(k_1 a \sin \theta)}{\sin \theta [(k^2 - 2\sin^2 \theta^2 + 4\sin^2 \theta \cos \theta) k^2 - \sin^2 \theta]} \\ D_2 &= \frac{\cos^2 \theta \sin \theta}{k(2\sin^2 \theta - 1)^2 + 4\sin^2 \theta \cos \theta} \frac{1 - k^2 \sin^2 \theta J_1(k_2 a \sin \theta)}{1 - k^2 \sin^2 \theta} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中:  $k = c_1/c_2 = k_2/k_1$ ,  $k_1 = \omega/c_1$ ,  $k_2 = \omega/c_2$ ,  $c_1$ 、 $c_2$  分别为纵波和横波波速;  $J_1$  为贝塞尔函数;  $D_1$ 、 $D_2$  分别为 P 波和 S 波的指向性函数;  $R$  为半空间中一点的位置矢径<sup>[13]</sup>

远场条件

$$R \geq R_{\text{下}} = 3(4a - \lambda)/(4\lambda) \quad (9)$$

式中:  $R_{\text{下}}$  为远场下限;  $\lambda$  为纵波波长<sup>[13]</sup>

$$\lambda^2 = \pi \bar{v} / \omega \quad (10)$$

### 1.3 平面边界上的波反射

板边界上斜辐射一平面 P 波, 则该波在板内将经历边界反射和波形转换则在 P 波入射角为  $\theta$  时, 由边界反射的 P 波与转换后的 ST 波的关系可由 Snell 定律给出

$$\sin \theta = c_1 \sin \theta / c_2 \quad (11)$$

反射 P 波与 S 波的幅值可由反射系数  $Q_{pp}$  和  $Q_{ps}$  给出<sup>[13]</sup>

$$Q_{pp} = \frac{2\sin 2\theta \sin 2\theta - k^2 \cos^2 2\theta}{\sin 2\theta \sin 2\theta + k^2 \cos^2 2\theta} \quad (12)$$

$$Q_{ps} = \frac{2\sin 2\theta \cos 2\theta}{\sin 2\theta \sin 2\theta + k^2 \cos^2 2\theta} \quad (13)$$

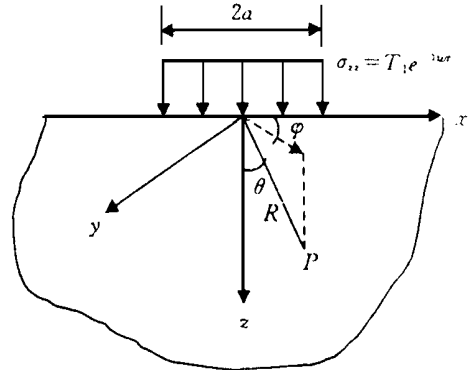


图 2 换能器在半空间中激发的应力波

在板面内的球面波当波长足够短时可看成平面波<sup>[13]</sup>, 所以该问题中式 (12), (13) 仍适用<sup>[13]</sup>

### 1.4 经板内多次反射后的稳态输出电压幅值

设板厚为  $h$ , 传感器之间距离为  $l$ , 到达  $M_1, M_2$  处的波各经历  $n$  次和  $2n$  次下底面反射, 这样, 到达换能器  $M_1, M_2$  的入射波各经历  $2n - 1$  和  $4n - 1$  次反射<sup>[13]</sup>从图 3 可见

$$\theta = \arctan(l/2nh) \quad (14)$$

到达换能器  $M_1$  与  $M_2$  的波程

$$\left. \begin{aligned} R_{M_1} &= l/\sin \theta \\ R_{M_2} &= 2R_n = 2l/\sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

因此从发射处  $M$  到接收(其中  $M'_1, M'_2$  相应于两接收换能器放置于半空间内的位置)  $M_1, M_2$  的延迟时间为  $T_{M_1}$  与  $T_{M_2}$

$$\left. \begin{aligned} T_{M_1} &= R_n/c_1 \\ T_{M_2} &= 2R_n/c_1 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

如果没有下底面边界波在半空间传播,波前到达点处相应的应力幅值为式 7 中  $R$  分别取  $R_n$  和  $2R_n$ , 这样

$$\left. \begin{aligned} T_{M_1} &= \alpha T_1 D_1 / R_n \\ T_{M_2} &= \alpha T_1 D_1 / 2R_n \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

由于板边界的存在,波各经历  $2n-1$  与  $4n-1$  次反射,于是在  $M_1, M_2$  点处的正应力幅值应乘以相应的反射系数得

$$\left. \begin{aligned} T_{M_1} &= \alpha T_1 D_1 Q_{pp}^{2n-1} / R_n \\ T_{M_2} &= \alpha T_1 D_1 Q_{pp}^{4n-1} / 2R_n \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

这样  $M_1, M_2$  处的输出电压幅值

$$\left. \begin{aligned} U_{M_1} &= F_2 \alpha T_1 D_1 Q_{pp}^{2n-1} / R_n \\ U_{M_2} &= F_3 \alpha T_1 D_1 Q_{pp}^{4n-1} / 2R_n \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

引入纵波在介质中的衰减常数  $\alpha_1, \alpha_2$ , 与两接触传感器的信号放大系数  $k_1, k_2$ , 式(19)可以改写成

$$\left. \begin{aligned} U_{M_1} &= k_1 F_1 F_2 U_a D_1 Q_{pp}^{(2n-1)} e^{-\alpha_1 R_n} / R_n \\ U_{M_2} &= k_2 F_1 F_3 U_a D_1 Q_{pp}^{(4n-1)} e^{-2\alpha_2 R_n} / 2R_n \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

## 2 结果与讨论

对于两个接收传感器紧靠在一起的情况,本文就变成了文献[11]所给出的模型,文献[11]给出了从发射到接收传感器的反射延迟时间的理论与实验比较,取得了相当一致的结果,这说明对于各向同性板可用半空间广义问题的远场近似解于板为波导的声—超声计算<sup>[13]</sup>本文在算法上是文献[11]的一种推广,这可以说明本文所采用的方法的正确性<sup>[13]</sup>

从式(20)可以看出,本文得到了由一个输入响应到 2 个(也可推广到 2 个以上)接收传感器的输出响应的精确的理论公式,因此可以用它们来计算输出响应,也可用来计算应力波因子<sup>[13]</sup>另外还可以通过两接收波形的相似性比较推断缺陷的位置,确定传递通道上材料机械性能的变化,从而可以一次性推广检测范围,节省检测时间<sup>[13]</sup>

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Govada A K, Duke J C, Henneke E G. A study of the stress wave factor technique of the characterization of composite materials[J]. NASA CR-174870, 1985
- [2] Gyekeuysi J P. Structural integrity brauch[J]. NASA, Lewis Research Report 1994, 99~100
- [3] Vary A. Acousto-ultrasonic characterization of fiber reinforced composite[J]. Material Evaluation. 1982, 44, 650~654
- [4] Duke J C. A study of the stress wave factor technique for evaluation of composite materials[J]. NACA

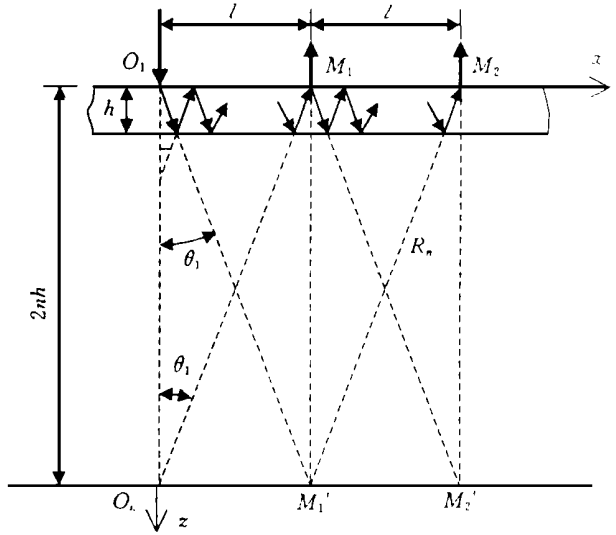


图3 板内P波传播

CR 4195, 1989

- [5] Kautz H E, Lercb B A. Preliminary investigation of acousto-ultrasonic evaluation of metal-matrix composite specimeas[J]. *Material Evaluation* 1991, 53:607~612
- [6] Green E R. Transient impact response of fiber composite laminate[J]. *Acta Mechanica*, 1991, 86:153~165
- [7] Kim I, Hahn H T. Wave dispersion in thick composite plate[J]. In Proc sec Int SYMP, on comp Mater and Struc, Beijing
- [8] Liu T, Zhang X. Response of disk mass on half to dilational waves[J]. *J Apl Mech* 1994, 61:722~724
- [9] 刘铁让, 以梁为波导耦合的超声发射换能器与接收换能器输入-输出理论分析[J]. *振动测试与诊断*, 1997, 17(3):37~42
- [10] Liu Tierang. Ultrasonic input-output characteristics for transmitting and receiving contact-type transducers coupled to Timosheuko beam[J]. *Transaction of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*. 1996, 13(1):46~52
- [11] Williams Jr J H, Karagulle H, Lee S S. Ultrasonic input-output for transmitting and receiving longitudinal transducers coupled to same face of isotropic elastic plate[J]. *Materials Evaluation*, 1982, 40(6):655~662

## Acousto-ultrasonic Characterization of Isotropic Elastic Plate

TONG Gu-sheng<sup>1</sup> SUN Liang-xin<sup>2</sup> NING Zhi-wei<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>. Civil Eng. Depar. EastChina Jiaotong Univ., Nanchang 330013, China; <sup>2</sup>. Aircraft Eng. Depar. Nanjing Aeronautics and Astronautics Univ. Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Acousto-ultrasonic technique is a newly developed one to evaluate the damage of composite materials. This paper discusses the theoretical analysis of the input-output of an ultrasonic transmitter and two or more receiving transducers, when the technique is applied to isotropic plate. By using far field solution of extensive lambs problem and ray-tracing method, the response and the time delay is given. This provides a new conception and a new way of the analysis of stress wave factor, which can be used to evaluate integration and residual strength of materials.

**Key words:** stress wave factor; ultrasonic transducer; damage evaluation