

# 声-超声检测技术

常新龙,尼 涛,艾春安

(第二炮兵工程学院,西安 710025)

**摘要:**声-超声技术用以评估弥散缺陷分布以及由此产生的材料力学性质变化,已成功应用于金属、复合材料、粘接结构和木材等的无损检测。综述了声-超声检测技术发展现状。在阐述声-超声技术基本思想的基础上,分析了声-超声检测系统的组成及影响检测结果的各种因素。重点讨论了传播模型研究中的自然模态和频散模态分析,以及信号处理方法中的应力波因子法、超声波衰减率法和统计分析法等。最后对声-超声技术进一步研究的关键技术进行了展望。

**关键词:**声-超声检测技术;可重现性;自然模态;频散模态;应力波因子;超声波衰减率;平均时间;功率谱形心

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2009)05-0381-05

## Acousto-Ultrasonic Testing Techniques

CHANG Xin-Long, NI Tao, AI Chun-An

(The Second Artillery Project Institute, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** As a method of assessing diffusing defects in materials and the variety of mechanical properties, acousto-ultrasonic techniques have been successfully used in the NDT of the composites, bonding and lumber. This paper provides an overview of the acousto-ultrasonic techniques. Based on the principle of the technique, the implementation and the influence factors were discussed. A few emphasis aspects included the natural modes and dispersion modes in academic analysis, stress wave factors, ultrasonic decay rate and the statistic analysis. In the end a conclusion and some challenging issues were proposed.

**Keywords:** Acousto-ultrasonic technique; Reproducibility; Natural mode; Dispersion mode; Stress wave factor; Ultrasonic decay rate; Meaning time; Centroid of the power spectrum

传统无损检测方法通过检测结构内宏观的不连续缺陷,以判断其是否满足使用条件。但在对纤维增强复合材料等进行无损检测时发现,有时结构中虽然存在纤维断裂、分层和局部孔隙等缺陷,但是材料整体仍可以满足使用;与此相对,有时虽然检测结果显示不存在宏观缺陷,但结构的强度和韧性等参数却发生了明显下降,表明结构内部必然存在微小的缺陷。上述现象表明,对复合材料结构等进行无损检测时,不仅需要检测问题缺陷的大小,还要对其力学性能的变化进行评估。引入声-超声(以下简称

AU)方法的最初目的就是为了评估复合材料结构中影响力学性能的因素以及亚临界缺陷和材料不规则的累积效应<sup>[1-3]</sup>。

AU 测量的总体目标是评估材料内应力波传播的相对效率,最基本也是最有效的测量方法就是测量应力波的能量损失。其基本假设是加载期间更有效的应变能传递和应变分布对应于更高的强度和断裂韧性。这个假设基于“应力波相互作用”原理,即作用于断裂处的自发应力波会促进微裂纹快速扩展,直至能量以其它形式耗散(如塑性变形和微裂纹偏移)。对于复合材料而言,较低的衰减意味着更高的应力波能量传播效率,也就意味着更好的动态应变能量的传递和分布。

收稿日期:2008-07-02

作者简介:常新龙(1965—),男,教授,博士生导师,研究方向为火箭发动机失效物理与可靠性,以及复合材料结构无损检测。

## 1 声-超声检测方法

AU技术检测原理如图1所示。检测时,利用压电换能器或激光照射的方法<sup>[4-5]</sup>,在材料表面激发询问应力波。该应力波在复合材料内部与材料的微结构经过复杂的相互作用,到达置于材料的同一或另一表面的接收装置。通过分析接收到的AU信号,确定材料内部的力学性能的变化。检测的核心思想在于能够真实模拟自发应力波,即要排除由于模拟声发射而产生的虚假应力波,如耦合剂产生的震荡等。因此AU检测的关键在于保证信号的真实性和可重现性。影响检测可重现性的因素有很多,下面讨论接触式压电换能器作为激发和接收器件的情况。

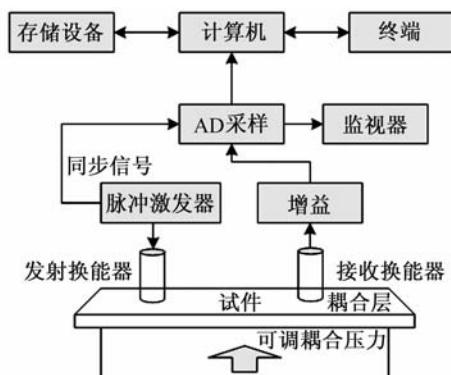


图1 AU技术检测原理图

### 1.1 测试设备的系统稳定性

测试设备的系统稳定性对检测结果的稳定具有重要的意义。NASA使用传统模拟探伤仪测试表明,在给设备进行预热的最初4 h内,应力波因子下降了10.3%,之后系统趋于稳定<sup>[6]</sup>。现在虚拟仪器技术的发展减小了系统稳定性造成的影响,测量硬件都采用板卡化设计,稳定性大大增强;后期处理全部通过软件实现,保证了结果的可靠性。然而,在进行测量时,对系统的稳定性进行检测仍然是十分必要的。

### 1.2 换能器

AU检测中选择发射探头的中心频率和接收探头的带宽至关重要。发射探头确定激发应力波的特性,为使激发应力波与接收应力波信号差异更加显著,在保证信号可检测的前提下,应适当提高发射探头工作的中心频率,使之对应的波长小于结构厚度,从而引起更大的高频成分衰减。有文献建议最佳条件是工件厚度为波长的整数倍,以产生共振<sup>[2]</sup>。但

是随后的理论分析指出,共振属于结构的自然模态,与结构内部的微结构信息关系并不密切,由共振造成的峰值会掩盖相应频率处的结构信息,因此其具体影响还需进一步研究。接收探头应具有很大的带宽,可以覆盖结构中所有的频率成分。此外接收探头还要有较高的灵敏度,尤其对高频成分,因为高频成分往往包含更丰富的结构信息。

### 1.3 耦合剂

为了减小换能器与被测工件声阻抗的匹配问题,增加透射声强,换能器和被测工件之间通常都要使用耦合剂。研究表明,AU信号对耦合因素具有很强的敏感性,主要表现在耦合剂类型、耦合剂使用和耦合压力三个方面。

Henneke 和 Duke 等按照粘性增加的顺序测试了一系列耦合剂,发现粘性最大的耦合剂效果最好。分析表明,粘性越大,耦合剂传递的剪切波成分越大,被测材料内激发的应力波也越强<sup>[6]</sup>。其次,耦合剂使用时要确保在换能器和材料表面之间形成一层均匀的薄膜,气泡、表面粗糙度等都会影响耦合剂的均匀分布。最后,各种因素中耦合压力对检测结果的影响最为显著。试验表明,存在一个最佳的耦合压力,在达到最佳耦合压力之前,随压力的增加,信号也随之增强,之后信号趋于稳定<sup>[2,6]</sup>。耦合压力大小有不同观点,具体应以试验为准。

### 1.4 检测装置

检测过程中需使用固定装置,以保证探头位置和耦合条件的稳定性。根据不同情况,检测装置有很多形式。传统的AU检测使用的是手动检测,其典型装置如图2所示。该结构使用夹具对换能器施加给定压力;导向装置保证探头对中;加装支撑板可以保证换能器对试件的相对位置和耦合压力的稳定可靠。

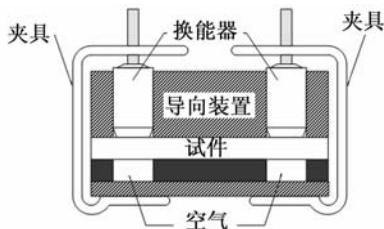


图2 声-超声固定装置

NASA Glenn Research Center 采用先进的虚拟仪器技术构建了自动AU检测系统<sup>[7-8]</sup>。该系统可以自动实现手动控制要求,由计算机完成载荷和运动的自动控制;并可在检测过程中实现AU信号

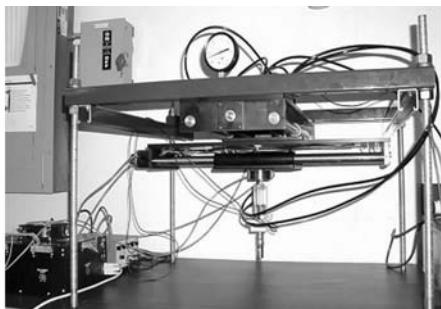


图 3 声-超声自动扫描装置

自动化实时处理。其扫描装置如图 3 所示。

## 2 传播物理模型

由于 AU 信号的复杂性, AU 技术传播物理模型的建立进展非常缓慢<sup>[7-13]</sup>。重要的模型有自然模态和频散模态模型。

### 2.1 自然模态

对于理想平面波,沿厚度方向在上下表面垂直传播的情况下,纵波和横波与结构边界条件相互作用而发生干涉,最终产生各种振动模态。这种模态是结构的自然模态,具有理论上无限的相速度,其频率和位移计算也非常简单。对于一定厚度的无限大平板,建立如图 4 所示坐标系,存在以下公式:

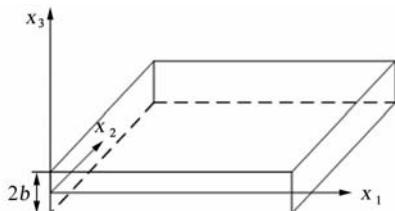


图 4 坐标轴定义

#### (1) 对称模态

$$u_3 = B' \sin \frac{m\pi x_3}{2b} \quad u_1 = 0 \quad m = 1, 3, \dots \quad (1)$$

$$u_1 = C' \cos \frac{n\pi x_3}{2b} \quad u_3 = 0 \quad n = 2, 4, \dots \quad (2)$$

#### (2) 反对称模态

$$u_1 = D' \sin \frac{n\pi x_3}{2b} \quad u_3 = 0 \quad n = 1, 3, \dots \quad (3)$$

$$u_3 = A' \cos \frac{m\pi x_3}{2b} \quad u_1 = 0 \quad m = 2, 4, \dots \quad (4)$$

式中  $u_1, u_3$ —— $x_1$  或  $x_3$  方向的位移;

$A', B'$ ——待定常数;

$C', D'$ ——待定常数;

$b$ ——半平板厚度。

试验证明,共振频率和相应的振动节型对声-超

声波形影响巨大。共振频率可以占据谱分量的主要部分,这种情况对于发射换能器主频在共振频率附近的情况尤为严重。接收换能器相对于节点线的位置则进一步影响了声-超声的频谱特性。

### 2.2 频散模态

虽然发射探头在试件表面输入的是垂直纵波,但是能量的辐射会产生斜入射和剪切波。纵波和剪切波在边界条件的相互作用下会产生各种频散模态。当板厚与波长可比时,一些不同速度的 Lamb 波会同时进行传播。

Lamb 波是一种频散波,其速度随频率的改变而改变,群速度与相速度不相等。在厚度为  $h$  的无限大固体自由平板中,Lamb 波频散方程为:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 qp}{(k^2 - q^2)^2} \quad (5)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2 qp} \quad (6)$$

式中  $p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2$ ;  $q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2$ ;  $k = \frac{\omega}{c_p}$ ;  $k$  是 Lamb 波在板中沿平行板的表面方向传播的波数; $c_L$  和  $c_T$  分别为板材的纵波和横波传播速度; $c_p$  是板中 Lamb 波的相速度; $\omega$  为波的角频率; $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  为波的频率。式(5)为 Lamb 波对称模式的特征方程,式(6)是反对称模式的特征方程,求解方程可得 Lamb 波的相速度曲线。

在波长大于板厚的情况下,Lamb 波在复合材料板中占据主要成分<sup>[14]</sup>,但是单一模式的 Lamb 波是不可能的,因为激励波形不是长时间持续的单频率脉冲,而是宽带脉冲。而且,由于层间和纤维-基体界面可能发生的断裂,也会造成声波的随机传播。

## 3 声-超声信号处理方法

AU 技术的检测概念与传统概念不同,它测量的是结构内部微结构的累积效应,属于结构整体性评价。与传统超声测量中有明确传播和反射路径的情况不同,AU 信号是发射探头和接收探头之间超声波在材料内经过多次反射和与微结构相互作用的结果。信号中包含体波、导波和一些类型的板波,这意味着接收信号是波形的重叠、散射和模式转换的结果。这种信号通常已很难分辨独立的缺陷源信息,但却包含了结构内部关于材料性质、微结构和弥散缺陷的整体信息。通过一定的手段,可以获得表征结构整体状态的一些力学和结构参数的信息。

### 3.1 应力波因子(SWF)评估

根据 AU 技术的基本假设, Vary 等人提出了用应力波传播的相对效率来表征材料的性能, 即狭义上的应力波因子技术(SWF 技术), 高的 SWF 值对应更有效的应变能传播和更好的力学性能。SWF 的定义有很多种, 取决于波形中反映探头、材料或者结构几何特性的特征<sup>[1]</sup>。许多学者研究了不同的 SWF 形式, 用以表征不同的结构和缺陷。下面给出常见的几种形式。

#### 3.1.1 峰值 SWF( $E_v$ )

$$\text{SWF} = E_v = V_{\max} \quad (7)$$

式中  $V_{\max}$  是输出信号的最大值。

#### 3.1.2 振铃 SWF( $E_c$ )

$$\text{SWF} = E_c = PRC \quad (8)$$

式中  $P$  为激励脉冲重复率;  $R$  为计数器的预设时间;  $C$  是每个波形的振铃计数。

#### 3.1.3 权振铃 SWF

在时域波形的电压幅值方向依次划分出不同的水平等级  $V_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 对落入不同等级区间的振铃分别予以计数  $C_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 从而定义:

$$\text{SWF} = \sum_{i=0}^n V_i (C_i - C_{i+1}) \quad (9)$$

式中  $V_0$  和  $V_n$  分别对应于噪声水平和波形峰值。

#### 3.1.4 能量积分 SWF( $E_t$ )

这种 SWF 将应力波信号的相对能量定义成电压波形变化  $U(t)$  在一段时间间隔内的积分, 即:

$$\text{SWF} = E_t = \int_{t_1}^{t_2} U^2(t) dt \quad (10)$$

与此等价, 还可以定义其频域和均方根表示。

### 3.2 超声波衰减率法(UD rate 法)

通过比较 AU 信号的相对衰减, 从而获得结构信息是 AU 技术的核心思想。观察可以发现, AU 信号大体服从指数衰减, 但是由于波形传播的复杂性, 事实上波形在时域内很难准确满足指数规律。然而将信号视作指数衰减并取其对数, 通过比较系数就可以大体上比较不同 AU 信号的衰减速度。这就是 UD rate 法的基本原理<sup>[15]</sup>。

定义时域波形的平方值  $|\varphi(t)|^2$  为:

$$|\varphi(f, t)|^2 = K(f) g \exp[-\beta(f)t] \quad (11)$$

式中  $K(f)$  是只与频率相关的参数, 表示在频率  $f$  处由于各种因素减少了的入射能, 包括换能器的耦合条件和其它与时间无关的因素;  $|\varphi(f, t)|^2$  则可用信号的功率谱密度代替;  $\beta(f)$  即 UD rate, 表示时域对数信号的下降斜率。

对 AU 信号作时频分析即可求得 UD rate, 具体方法是: 求  $[(t_1 \leq t_{\text{part}} \leq t_2), (f_1 \leq f_{\text{filt}} \leq f_2)]$  内频率的零阶矩:

$$M_0(t_{\text{part}}, f_{\text{filt}}) = \exp[-\beta(f_{\text{filt}}) t_{\text{part}}] \left[ \int_{f_1}^{f_2} K(f) df \right] \quad (12)$$

对零阶矩取对数, 由于  $K(f)$  与时间独立, 因此零阶矩的对数函数在时域内的导数就是  $-\beta(f)$ 。

从  $-\beta(f)$  的计算方法可以知道, 采用 UD rate 法可以有效排除由于耦合条件和其它与时间无关的因素影响。  $-\beta(f)$  表征 AU 信号的指数衰减速度, 比较不同位置和不同时间处的  $-\beta(f)$  值, 就可以得出信号衰减强弱的相对信息。  $-\beta(f)$  越大, 信号衰减越强。

### 3.3 统计分析法(动量法)

对于简单几何形状和边界条件, 通过正确设置换能器可以大体排除歧义和不相干的信号分量, 这种情况下可以将信号作为整体进行分析。这些方法主要利用衰减性相互作用的随机统计特性, 数学上即为时频域的各阶动量。常用的为形心法, 通过观察时频域的形心移动来表征信号的变化<sup>[12-13, 15-16]</sup>。

#### 3.3.1 平均时间和倾斜因子法

有时比较 AU 信号可以发现, 其波形在时间轴上有明显的移动, 这时可以采用表征时域信号形心的平均时间法进行评估。定义波形  $\varphi(t, f_{\text{filt}})$  的平均时间为  $\bar{t}$ , 其在时间间隔  $(t_a, t_b)$  内的计算方法是:

$$\bar{t} = \frac{\int_{t_a}^{t_b} |\varphi(t, f_{\text{filt}})|^2 t dt}{\int_{t_a}^{t_b} |\varphi(t, f_{\text{filt}})|^2 dt}$$

$$\text{即 } \bar{t} = \frac{M_1(t_a, t_b, f_{\text{filt}})}{M_0(t_a, t_b, f_{\text{filt}})} \quad (13)$$

式中  $|\varphi(t, f_{\text{filt}})|^2$  是特定频率区间内原始信号的平方值;  $(t_a, t_b)$  为需要关注的时域间隔。平均时间与 UD rate 变化趋势相反, UD rate 增加, 则平均时间减小。

倾斜因子  $s$  的定义为:

$$s = \frac{\frac{t_a + t_b}{2} - \bar{t}}{\frac{t_a + t_b}{2}} \quad (14)$$

$s$  的变化区域在  $(-1, 1)$  内, 如果  $s > 0$ , 表示时域信号中心向时间间隔左方移动, 反之则向右方移动。

#### 3.3.2 功率谱形心法

试验发现, 在结构包含损伤时, 其频谱峰值会发

生移动。因此,计算频域形心是对信号进行统计分析的重要方法。

选择时间间隔( $t_a, t_b$ ),计算其功率谱  $PS(f, t_a, t_b)$ ,其功率谱形心定义为:

$$f(f_1, f_2, t_a, t_b) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} PS(f, t_a, t_b) f df}{\int_{f_1}^{f_2} PS(f, t_a, t_b) df}$$

即  $f(f_1, f_2, t_a, t_b) = \frac{M_1(f_1, f_2, t_a, t_b)}{M_0(f_1, f_2, t_a, t_b)}$  (15)

而高阶频域动量值使用时需要谨慎,因为其有可能因为测量条件的改变而发生很大变化,从而导致错误。但高阶频域动量值对高频分量的变化更加敏感,在需要的时候也可考虑使用。与平均时间类似,也可以定义功率谱倾斜因子,用以表征特定频率处功率谱线的相对移动。此外同样可以使用频谱形心,其作用与功率谱形心类似。

#### 4 结语

目前声-超声技术的研究主要集中在物理传播模型的建立上,以期在理论指导下合理解释接收信号,进一步改进评估方法。文献表明,多种分析方法相结合可能是理论发展的方向。同时,声-超声检测的可重现性一直是困扰该技术实际应用的重要因素,易受材料不确定因素以及测量条件的影响。综上所述,AU技术还需要在以下几个方面开展进一步研究:

(1) 改进试验装置,解决AU检测对耦合条件等因素的敏感性,进一步提高信号的可重现性,进而发展和改进AU自动检测系统。

(2) 对各种类型的材料和缺陷对AU信号的影响进行试验分析,建立量化模型,为日后检验理论模型的正确性提供依据。

(3) 采用有限元和边界元等方法,建立应力波激发模型,描述换能器在结构表面激发的扰动分布,确定原始激发应力波。

(4) 结合使用自然模态分析和频散模态分析等手段,建立应力波传播模型,描述应力波传播中出现的反射、散射、平面波和导波现象。

#### 参考文献:

- [1] Vary A. The Acousto-Ultrasonic Approach [R]. NASA TM 89843, 1987.
- [2] 李家伟,陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [3] Vary A. Acousto-ultronics: retrospective exhortation with bibliography[J]. Materials Evaluation, 1991, 49(5):581—591.
- [4] Huber R D, Green R E Jr. Acousto-ultrasonic nondestructive evaluation of materials using laser beam generation and detection[R]. USA: NASA CR 1868840, 1990.
- [5] Kautz H E. Noncontact acousto-ultronics for material characterization [R]. USA: NASA TM 1998208410, 1998.
- [6] Henneke E G II, Duke J C Jr, Strinchcomb W W, et al. A study of the stress wave factor technique for the characterization of composite materials [R]. USA: NASA CR 3670, 1983.
- [7] Renneisen J D, Williams J H. Input-output characterization of fiber reinforced composites by P waves[R]. USA: NASA CR 185287, 1990.
- [8] Egan D M, Williams J H. Acoustic emission spectral analysis of fiber composite failure mechanisms[R]. USA: NASA CR 2938, 1978.
- [9] Kiernan M T, Duke J C Jr. A physical model for the acousto-ultrasonic method [R]. USA: NASA CR 185294, 1990.
- [10] Williams J H, Liao P. Acousto-ultrasonic input-output characterization of unidirectional fiber composite plate by SH waves[R]. USA: NASA CR 4087, 1987.
- [11] Liao P, Williams J H. Acousto-ultrasonic input-output characterization of unidirectional fiber composite plate by SV waves[R]. USA: NASA CR 4152, 1988.
- [12] Aduda B C, Rawlings R D. Spectral analysis of acousto-ultrasonic waves for defect sizing[J]. NDT & E International, 1996, 94(4):237—240.
- [13] Karagulle H, Lee S S, Williams J H. Input-output characterization of an ultrasonic testing system by digital signal analysis[R]. USA: NASA CR 3756, 1984.
- [14] 刘镇清,黄瑞菊.薄板声-超声检测超声传播模式的实验研究[J].声学学报,2000,25(3):268—273.
- [15] Kautz H E. Acousto-ultronics to assess material and structural properties [R]. USA: NASA CR 2002211881, 2002.
- [16] Duke J C Jr, Henneke E G II, Kiernan M T, et al. A study of the stress wave factor technique for evaluation of composite materials[R]. USA: NASA CR 4195, 1989.
- [20] 刘镇清.纤维缠绕复合材料层间质量声-超声无损评价[J].固体火箭技术,2001,24(2):58—62.