

声学综合无损检测技术

陈积懋

(中国航空工业制造工程研究所, 北京 100024)

[摘要] 论述了检测复合材料和胶接结构不连续(缺陷)的新型多模综合无损检测技术。该技术以声与超声检测技术为基础, 包含五种不同检测模式, 用以检测复合材料与胶接结构的失粘、脱粘、分层、疏松、夹芯压皱及其他缺陷。它适用于复合材料与构件的制造、维修和使用现场。它的适用对象范围广泛, 几乎覆盖了现有常用的复合材料和胶接结构。它的检测可靠性高, 重复精度高。文章还讨论了组成多膜声学综合胶接检测仪的五种不同检测模式的原理, 并从我们和国内外同行的大量实践经验出发, 说明了综合无损检测技术的巨大发展前景。

[关键词] 声学综合检测; 综合无损检测; 复合材料无损检测; 机械阻抗分析; 振动分析; 共振检测

1 前言

以先进的纤维增强塑料复合材料及其复合结构为代表的新材料、新结构、新工艺的日益广泛应用, 尤其是在制造工程中关键承力部位的应用, 其结构的整体性和可靠性已成为保证产品质量和延长使用寿命的基础。这就向无损检测提出了严峻的挑战。无损检测已迅速发展为涉及材料物理性质、产品损伤容限设计、制造工艺、检测技术、断裂力学和安全使用寿命评定等的综合性工程学科。对应用来说, 贯串在产品的设计、加工制造、成品检验及在役检查的各个阶段。在一些工业发达国家, 无损检测已被视为科学技术发展的尖兵。

然而, 在无损检测的发展中, 近一二十年曾经历了如下的一段误区:

随着新材料、新结构、新工艺的涌现, 无损检测与评定的对象越来越复杂多样, 为了应付层出不穷的检测对象, 研究开发了各种新技术, 产生了多种不同设备和方法。迄今, 尚没有一种单一的检测方法能适于检测和评定当前应用的各种各样的结构变化, 即使是同种类型的构件也是如此。这就使得

在发展中的现代制造业往往对无损检测技术望而却步, 明知无损检测是保证产品生命线——质量的不可缺少的关键环节, 可又不切实际地幻想从管理上或制造工艺的控制上设法取代, 形成了无损检测越是发展越是难以推广的怪圈。

自从复合材料与胶接结构成为制造工程的重要部件以来, 它们的检测技术已成为无损检测的一个重要分支。超声和声检测技术曾经是颇为适用的。但是, 由于针对不同检测对象的检测设备过于繁杂, 致使人为因素影响很大的传统的人工敲击方法, 在国内仍然牢固地占据着很多胶接检测阵地。为了提高检测的可靠性, 声学综合无损检测技术的发展已是时势所趋。同时, 微处理器、贮存芯片和软件的飞速发展已为综合声学检测技术的发展创造了物质条件, 允许几种声和超声检测方法结合起来制成小型便携式仪器, 并能非常方便地从一种检测模式转换成另一种检测模式, 从而使很多不同材料和规格的复合材料构件可以用一台仪器以综合检测技术来评定。以研制成的多模综合胶接检测仪为例, 它集5种不同检测方法模式于一台仪器, 形成声学综合检测技术, 成为一种新型的无损检测手

段，从而提高了检测性能，扩大了检测范围，增加了检测可靠性，特别是加强了现场适用性，大大地推动了无损检测的实际普及应用。

2 机械阻抗分析法数学模型

机械阻抗分析法是声学综合检测技术的一项重要内容，其数学模型为：叠层复合材料结构或蒙皮与芯粘接的蜂窝结构的振动，其基本单元可模拟为单一自由度的弹簧-质量系统，如图 1 所示^[1]。当激励力为 $F_0 \sin \omega t$ 时，该振动属“强迫简谐振动”。若给予系统的为一脉冲激励，可以将其模拟为一个具有初始位移或初始速度的“自由振动”。从而，使脉冲激励响应具有与自由振动相同的形式。强迫简谐振动和自由振动（带起始速度的），这两种类型的振动模式又可分别采用稳态和瞬态测量的方法。

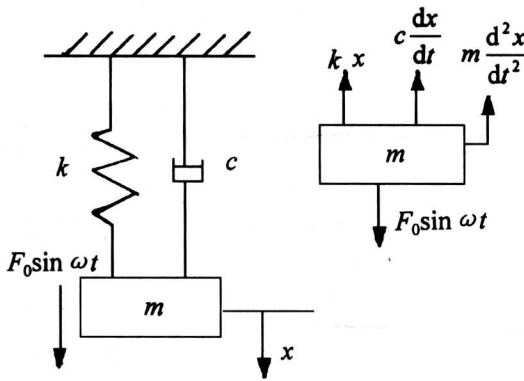


图 1 单自由度结构模型

Fig.1 Single degree of freedom structure

在正弦力作用下，图 1 所示的自由物体的振动方程为^[2]：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

式中： $m d^2 x / dt^2$ —惯性力（ m 为质量， $d^2 x / dt^2$ 为加速度）；

$c dx / dt$ —粘滞阻尼力（ c 为胶层粘滞阻尼系数， dx / dt 为速度）；

kx —弹性恢复力（ k 为胶层刚度， x 为位移）。

式 (1) 的齐次（瞬态）解为：

$$x_t(t) = a \cdot \exp(-\zeta \omega_n t) \cdot \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t + \psi), \quad (2)$$

式中： a —常数，决定于初始条件；

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}, \text{ 粘滞阻尼因子；}$$

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{k}{m}};$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ 无阻尼振荡的自然频率；}$$

ψ —初始相位，决定于初始条件。

稳态解为：

$$x_s(t) = X \sin(\omega t - \phi), \quad (3)$$

式中： X 为响应幅度，

$$X = \frac{F_0}{k \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}}; \quad (4)$$

$$\phi \text{ 为初相角 } \phi = \arctan \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}. \quad (5)$$

倘若 ζ 很小，式 (2) 可简化为：

$$x_t(t) = a \cdot \exp(-\zeta \omega_n t) \cdot \sin(\omega_n t + \psi). \quad (6)$$

一自由度系统的典型频率响应示于图 2，系统的阻尼与谐振峰的形状相关。阻尼大小用品质因素 Q 表示，幅度降至 0.707 倍峰值（下降 3 dB）的点，即通常所称的“半功率点”。两半功率点之间的频率增量称为系统的带宽。对胶层形成的轻阻尼（ $\zeta < 0.1$ ），可以证明：

$$Q = \frac{1}{2\zeta} = \frac{\omega_n}{\omega_2 - \omega_1}. \quad (7)$$

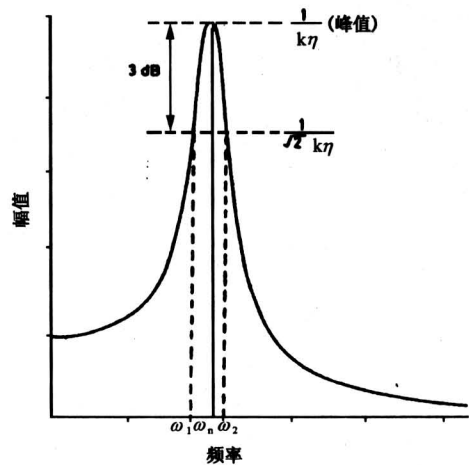


图 2 单自由度系统的频率响应

Fig.2 Frequency response of a single degree of freedom system

在结构内，脱粘或分层型的不连续（粘接强度

为零), 脱粘或分层以上的材料层可认为是其周边被遏制的板。倘若该板被激励, 它能以膜片的第一模态谐振。从板的振动显示出, 周边固定的板膜片第一模态谐振频率为^[3]

$$f_r = \frac{0.47 h}{r^2} \cdot \frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}, \quad (8)$$

式中: h —不连续的深度 (此处为上板或蒙皮厚度);

r —不连续的半径;

E —不连续上面材料 (上板或蒙皮) 的杨氏模量;

ρ —不连续上面材料的密度;

ν —不连续上面材料的泊松比。

式 (8) 表示了薄 (膜片) 圆板中心的共振频率。作为普遍导则, 不连续直径必须至少是蒙皮厚度的 20 倍, 这一公式才有效。常数 0.47 是用固定周边条件的结果。从而, 可以看出, 对于一个给定的结构, 不连续中心处共振频率 f_r 是不连续的深度、大小和其边界条件的函数。我们与国内外同行的大量实践均已证实^[1,4,5], 利用这一原理制成的机械阻抗测试技术 (国内称声阻仪) 可以容易地测定直径为深度 10 倍的不连续 (脱粘、分层与气孔), 特别适合于薄蒙皮结构, 且不需液体耦合剂。

3 检测方法

为了检测各种复杂多样的复合材料与胶接结构, 声学综合无损检测技术开创了综合几种声与超声检测技术的新途径。它改变了其他声与振动分析检测仪器^[6]只有一种检测模式的做法, 集机械阻抗分析、共振检测等声学方法, 扫频定距发送/接收模式、脉冲定距发送/接收模式与射频定距发送/接收模式等超声板 (兰姆) 波方法和声-超声方法于一台仪器^[5]。使用时, 根据所选探头, 仪器能自动地识别与设置, 以满足不同结构的检测, 并使检测技术具有应用到非平行面复合材料等特殊几何形状构件的可能性。

3.1 机械阻抗分析

机械阻抗分析检测开创于前苏联, 称为声阻法, 是 Ю.В.Ланге 于 1959 年提出的。它采用一单点尖端接触的双晶片探头^[1]。位于锥体传声杆顶部的驱动晶片发送一声频波, 经传声杆和耐磨触头进入被测工件。被测工件作为探头的振动负载 (阻抗), 其粘接刚度随着粘好到脱粘从高到低发生

变化 (见式 (1) 与式 (6)), 从而引起位于锥体底部的接收晶片信号幅度和相位变化。其变化是增加还是减小是根据使用频率是接近还是高于层板的共振频率而定的。建立时, 驱动频率从 2.5 kHz 到 10 kHz 扫描以寻求测试频率。操作者选择完好粘接与脱粘之间幅度与相位差别最大的频率 (图 3), 检测在这一选定频率上进行。

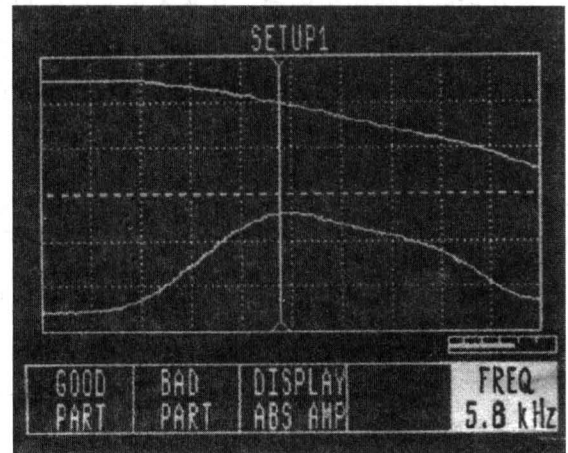


图 3 机械阻抗分析使用频率的选择

Fig.3 Mechanical impedance analysis swept frequency display

仪器采用极坐标方式同时显示幅度与相位, 从而能同时测定不连续大小及其深度。

机械阻抗法不要求耦合剂, 具有很小的接触面积, 所以它能用于不规则表面或曲面表面。它对复合材料薄壁构件的脱粘、分层、芯压皱尤为灵敏。

3.2 共振检测

共振检测采用专用的窄带、面接触换能器^[1]。检测的原理是, 当这一具有尖锐谐振峰的高 Q 值超声换能器耦合至被测工件时, 它的声阻抗将引起变化。仪器测得的探头的电阻抗将受到作为探头负载的被测件的声阻抗所影响。特定复合材料内的声阻抗是随其粘接质量而改变的。另一方面, 当脱粘部分以上的板厚等于板内波长的 1、3、5 等奇数谐波时, 即作用为薄膜振动并产生驻波, 波长 $\lambda = v/f$, 式中, v 为材料中声波的速度, f 为谐振频率。驻波形成于板厚 $t = \lambda/2$ 。板的厚度越薄频率越高。

这就说明了, 为什么共振检测 (通常用单晶片声阻法) 的谐振频率随上板厚度减小而增加; 机械阻抗分析 (通常用双晶片声阻法) 的谐振频率则随

板厚减小而降低，见式 (8)。

声阻抗 $Z = \rho v \tanh [\alpha + i(\beta + kt)]$ ，其中， α 为反射常数， β 为相位变化， t 为板厚， k 为波数。

在粘接工件中，脱粘引起的等效厚度的变化将明显改变换能器谐振频率信号的相位与幅度。在多层复合材料中相位与脱粘深度相关。

仪器通过一定频率范围扫频，自动寻找换能器在空气中的谐振频率，并设定相位零点。然后，仪器在使用中即以该频率操作。将换能器耦合至被检工件，使被检工件作用如同一直阻件（声负载），它同时改变换能器谐振频率和降低响应信号幅度，使带宽增加。通过对完好粘接信号调零，脱粘信号相位和幅度的矢量端点对应于完好粘接以极坐标表示（见图 4），脱粘信号的端点随着脱粘深度的增加从右侧开始作反时针方向运动，从而，如图 4 右侧所示，在仪器上可设置包含幅度与相位的报警选通。

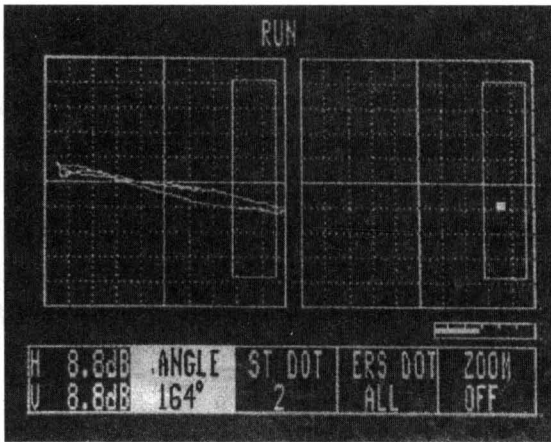


图 4 谐振检测信号显示

Fig.4 Resonance test signal display

探头换能器频率的选择以蒙皮（或上板）厚度与材料为基准。蒙皮越薄探头频率越高，脱粘检测灵敏度越好。所用探头的频率与该层的声阻抗成正比。诸如碳纤维或玻璃纤维环氧树脂复合材料等低声阻抗材料要求使用较金属蒙皮低的频率探头。这里，声阻抗表达式可简化为 $z = \rho v$ 。对大多数复合材料与蜂窝胶接结构的粘接检测，包括用于薄金属蒙皮结构的较高频率，仪器 35~500 kHz 的频率范围均能满足。谐振检测通过与标定样件相位比较，能确定脱粘深度。

谐振检测实质上是阻抗分析检测的一个特例。只是由于它使用的是探头谐振频率附近的频率，且是面接触探头并添加了声耦合剂，从而它的检测深度远大于上述点接触的机械阻抗分析。实验证明，应用这一技术能可靠地检测 9 层碳环氧树脂板（8 层胶缝）、总厚度为 20 mm 的最低胶层直径 25 mm 的脱粘伤，以及蜂窝芯高 25 mm 的碳环氧树脂材料面板-芳纶芯结构的远侧直径 25 mm 脱粘伤。

3.3 扫频定距发送/接收检测

扫频定距发送/接收检测是应用超声波板波检测技术^[1]。它采用双晶双点接触的无耦合剂低频超声探头。将探头两传声触点置于扫查平行方向，以 20~40 kHz 的低频电子扫频激励发送换能器，产生的超声波经触头进入被检工件。接收换能器通过与发送器触头定距的另一触头拾取传经工件的超声波。超声波以板波模式在探头两触点之间横穿过工件传播。检测返回的信号并以相位-幅度曲线显示，以指示声径上的完好和脱粘。用一定范围的频率扫频可以得到在脱粘时较大的带小谐振回线的近圆形显示，如图 5。

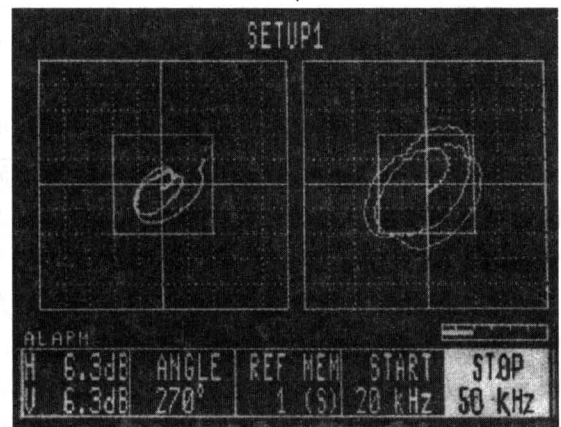


图 5 扫频定距发送/接收检测显示

Fig.5 Pitch/catch swept test signal display

由于板波被耦合进入完好粘接层下面的叠层所衰减，因而完好粘接显示小的接收波；在脱粘区，波形在板内很少衰减，从而显示较大的圆形。

研究证明，在层板内波传播的基本模式是一阶不对称板波模式。较小能量的其他模式有时可产生某些小回线，它们可能是受边界效应的影响。没有观察到这些小回线与粘好或脱粘的确定关联。

对特定的板材,板波的传播速率或相速度是频率-板厚的函数。对低频和在粘接检测中经常遇到的层板厚度,其一阶非对称模式具有最大斜率,因此,相对某一频率-厚度具有较大的相速度差,从而具有较高的检测灵敏度。

用这一方法检测很方便并且不要求耦合剂,只需将探头置于完好与脱粘的样件,调节增益,使来自脱粘样件的信号落在设置的脱粘报警方框上,见图 5。完好粘接信号的显示远较方框小得多。探头与工件之间的不良耦合或脱离,其结果将减小信号幅度或减小近似于圆形的图形大小至接近显示屏的中心,则又远小于完好粘接信号。这是相反于脱粘信号的效应,极大地降低了误报警。由于使用的是低频,这一检测方法对检测脱粘和较深缺陷最为有利。

3.4 脉冲定距发送/接收检测

这一检测模式采用的是一种将超声与声发射结合起来的无损检测新技术——声-超声 (Acousto-Ultrasonic, 简称 AU) 技术^[1]。它的实施类似于 3.3 节的扫频模式,只是所使用的是单频短脉冲 (2.5~70 kHz)。频率的选择是在被检件层厚-材料内产生最大弯曲运动。当探头由完好粘接到脱粘区扫查时,用一个时间可调的选通门来选择幅度变化最大的接收脉冲。

当探头移动至脱粘区的上面时,接收信号幅度将大于粘接完好区的信号幅度,这是由于后者的波的能量通过粘接层损失在基层材料中的原故 (应力波传递因子改变^[1])。

通常,调节频率和增益以在脱粘区上得到最大信号。然后,用完好区的信号与之比较。当选通门选至完好区信号的阻尼时间内时,完好粘接信号将显著减小。操作者置时间选通于该最佳时间以监视接收信号的响应。可以用时间-幅度曲线显示,并选择幅度设置报警。换个方法,亦可用相位-幅度显示,并设置幅度报警或幅度与相位报警。这一方法是对扫频定距发送/接收检测的有力补充,某些不能用扫频方法的构件可用这一方法进行检测。

3.5 射频定距发送/接收模式

这是多模综合声学胶接检验仪新开发的又一模式 (见图 6)。这一方法的基本设置与上述两种定距发送/接收模式类似。它同样使用双晶双触点的无耦合剂超声探头,只是晶片发送和接收频率的上限较高,频率范围为 2.5~150 kHz,可根据使用

要求选择。它对薄壁材料构件的粘接检测很适用,例如碳环蒙皮-芳纶纸芯 (Nomex 芯子) 蜂窝结构的检测。

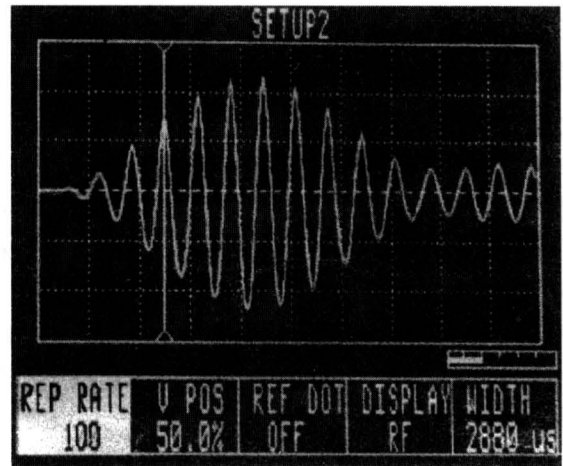


图 6 射频定距发送/接收模式

Fig.6 RF mode of pitch/catch

4 结束语

根据多模声学综合技术制成的包含多种声与超声检测模式的粘接检验设备已成功地在复合材料与胶接结构的生产和维修现场得到了应用。一台仪器即具有多种检测功能,检测对象范围宽,现场适用性好,检测方便等优点,满足了发展中的现代制造业质量保证的要求,是一种具有广阔应用前景的结构无损检测手段。

参考文献

- [1] 陈积懋主编. 航空制造工程手册——工艺检测分册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1993. 303~315, 210~216, 268~281
- [2] Short S R. Transient and steady state vibration testing for structural anomalies [J]. Material Evaluation, 1999, 57 (1): 65~68
- [3] Wong B S, Guo N, Tui C G, et al. Mechanical impedance inspection of aluminum honeycomb structures [J]. Material Evaluation, 1996, 54 (12): 1390~1396
- [4] Adams R D, Cawley P. A review: Discontinuity types and nondestructive testing for composites and bonded joints [J]. NDT International, 1988, 21 (4): 208~222
- [5] 陈积懋, 张颖. 复合材料无损检测的新进展 [J].

航空工艺技术, 1998, (5): 17~19, 27

ASNT NDT method [J]. Material Evaluation, 1998, 56 (7): 830~834

[6] Pagliaro L, Hunt A. Vibration analysis—A new

Sonic General Non-destructive Testing Technique

Chen Jimao

(Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

[Abstract] This paper describes new general multi-mode non-destructive testing (NDT) of composite materials and bonded structures for detecting discontinuities (defects), the only multi-mode one of its kinds. This technique which is based on sonic and ultrasonic testing performs five different modes of testing to detect disbond, unbond, delamination, porosity, crushed core and other defects in composite materials and bonded structures. It equally suits for applications in manufacturing, maintenance and repair of composite materials and structures which almost include them in common use now availability. Good repeatability and reliability have been found. This paper discusses the principles of the five sonic mode constitute multi-mode sonic general bondtester and demonstrates the vast range of prospect for general NDT from our and our internal and external comrades' much practical experience.

[Key words] sonic general testing; general non-destructive testing (NDT); non-destructive testing of composite materials; mechanical impedance analysis (MIA); vibration analysis (VA); resonance testing

技术创新和成果转化能力不断增强的 北京钢铁研究总院

北京钢铁研究总院近几年来在科研、经营和产业化等方面取得迅速发展的同时,还创办了一批高成长性的科技中小企业,为企业的多元化经营、技术创新和成果转化创造了有利条件。

1999年度,在国家科技部主持设立的科技型中小企业技术创新基金资助项目中,由北京钢铁研究总院创办的新锐、华仪理中等4家科技型中小企业分别申报的“高效CA精铸”、“钢液定氢仪及测头”等4个技术创新项目全部入选,基金的支持为项目迅速进入产业化创造了条件。同时,这也是社会和有关主管部门对北京钢铁研究总院创办的中小企业所具有的技术创新和成果转化能力的肯定。可以有理由认为,随着企业化转制的不断深化,北京钢铁研究总院必将发展成为一个充满生机与活力的大型科技企业集团。

(刘 骁)