

复合材料的超声检测新技术

I. 声-超声技术

张 谦 琳 胡 建 恺

(中国科技大学超声无损检测实验室 合肥 230027)

1993 年 11 月 1 日收到, 修改稿 1994 年 3 月 1 日收到

摘要 本文对于在航空航天工业中占有重要地位的先进复合材料的两项超声检测新技术的原理、特点和应用进行了简明介绍。本部分先介绍声-超声 (AU) 技术。

关键词 复合材料, 超声检测, 声-超声技术

New techniques of ultrasonic testing on composite materials

I. The acousto-ultrasonic technique

Zhang qianlin, Hu jiankai

(Ultrasonic NDT Laboratory University of Science and Technology of China Hefei 230027)

Abstract The principle and features of acousto-ultrasonic technique are mentioned. This technique is useful for nondestructive testing of composite materials.

Key words Composite materials, Ultrasonic testing Acousto-ultrasonic technique

1 前言

近十几年来, 由于航空航天技术发展的需要, 复合材料得到迅速发展。各类先进的复合材料正在取代传统的机体的结构材料和发动机的结构材料。美国已有十多种军用飞机采用了先进复合材料, 其产量正以 16% 的年增长率持续上升。先进复合材料的突出优点是重量轻, 强度和刚度高, 耐磨性好, 韧性好, 高温性能好。正因如此, 它虽问世不久, 已同铝合金、高强度钢和钛合金被列为四大结构材料。

先进复合材料由基体和增强体 (纤维或颗粒) 两部分组成, 按基体的种类不同可将复合材料分为三大类, 即树脂基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料。它们有各自的特

点和应用场合, 其中树脂基和金属基复合材料多用于高强度部位, 如美国 AV-8B 垂直起落战斗机的前机身、机翼和尾翼, 都采用了这类复合材料, 使飞机航程增加一倍; 陶瓷基复合材料在很高温度下 (1650℃) 具有高强度、高刚度, 膨胀系数小, 抗热抗震性能好等长处, 多用于导弹弹头, 火箭喷管, 飞机机轮和发动机零件等。

与传统结构材料相比, 先进复合材料的结构、制造过程和工艺有很大不同。通常是先按照对材料的性能要求进行材料设计, 其中包括选择增强材料的种类、形状和尺寸, 选择基体材料, 设计加工工艺和制造过程等, 然后进行制造加工。在制造过程中, 需要进行质量控制和质量检测, 其中包括力学性能 (刚度、强度、韧性等) 和温度性能等物理性质的检测。在用复合

材料制成结构件以及整机后还要进行检测,对于在役的整机构件也需要进行阶段性的检测和评价。因此,对于先进复合材料,从材料的制造到整机的使用过程中,无损检测与评价是很重要的步骤。

各类先进复合材料的主要缺陷是裂纹、脱层、纤维断裂、界面脱裂(纤维与基体之间)、微孔、外来杂质和材料非均质性。由于这类材料的缺陷的复杂性和材料的非均质性,使得大多数常规检测方法难以胜任,如 X-射线技术、涡流技术和红外热图像技术等都不尽人意。实践证明,超声方法是检测和评价先进复合材料的主要方法,目前广泛采用的有声-超声(AU)技术,非接触 C-扫描和成像技术。本文将分两次介绍上述超声检测技术的原理和应用。

2 声-超声(AU)技术的原理

AU 技术(Acousto-Ultrasonic Technique)又称为 SWF 技术(Stress-Wave-Factor Technique),它的最初想法来源于 Egle 的工作^[1]。Egle 用各种声激励法研究应力波模拟,1979 年,他的同事 Vary 提出用超声模拟应力波和

声发射信号分析来评价复合材料的性质和缺陷状态,这便是所谓 AU 技术^[1,2]。因此,AU 技术是描述声发射和固体材料内部声学特性之间的紧密关系的一种方法。与声发射技术不同,AU 技术不关心声源的位置和特征,它研究弥散的缺陷状态的整体效应,热力学衰减和亚临界缺陷的分布密度,这些因素关系到材料力学性质的变化。

AU 技术的装置系统方框图如图 1 所示。

由图 1 可见,AU 技术中使用两只超声换能器,放在待测复合材料板的同一面的不同位置上,一个作发射用,一个作接收用。两个换能器均为宽带,工作中心频率在 1MHz—5MHz,根据被检测的材料的声衰减大小而选择。发射换能器产生的超声脉冲在复合材料板中沿长度方向传播,接收换能器探测后将信号送入低噪声宽带放大器中,然后进入数据处理系统。

发射换能器为纵波换能器,在复合材料板中沿厚度方向产生纵波驻波,同时沿板的长度方向有横波和板波传播。接收换能器亦为纵波换能器,它对横波和板波的位移敏感。所以,AU 技术中所接收到的信号是发射的超声脉冲信号在传播路径中经多次反射及其与材料微结构相互作用的总结果。图 2 表明了这一情况。

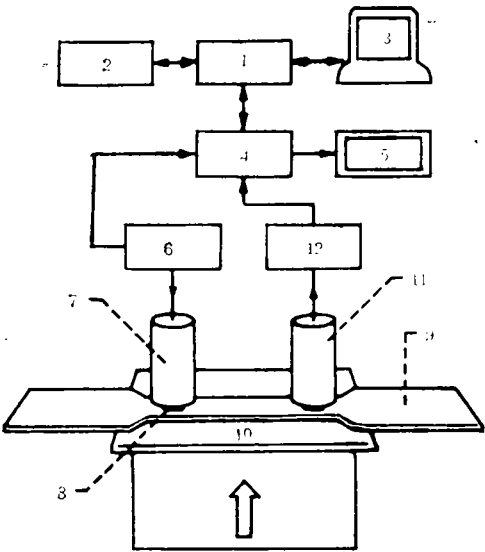


图 1 AU 技术方框图和数据处理系统

1 微机,2 驱动盘,3 终端显示器,4 波形数字处理器,5 显示器,6 脉冲信号发生器,7 发射换能器,8 耦合介质,9 试样板,10 样品台,11 接收换能器,12 放大器

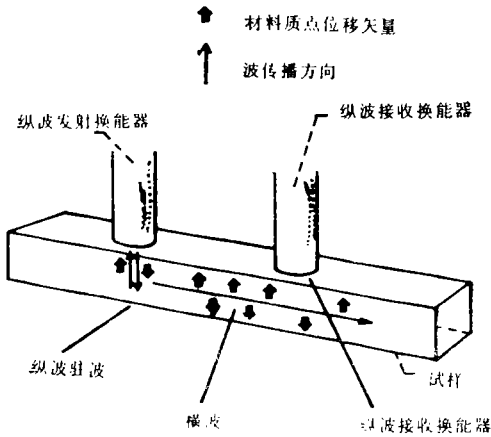


图 2 在复合板材中 AU 方法的波的发射、传播和接收模式

图 3 为 AU 技术的接收信号(a)及其频谱(b)。SWF 定义为下式:

$$SWF = \int_a^b G(f)df \quad (1)$$

其中, $G(f)$ 为信号谱幅度函数, 积分限 a, b 由具体实验而定. SWF 是材料损坏程度的标志, 称为应力波因子, 对于完好的材料, SWF 值较高. 借助 SWF , AU 技术可以检测微结构缺陷、材料强度的降低和预见最终断裂的位置, 而这些常常是其他无损评价技术难以做到的.

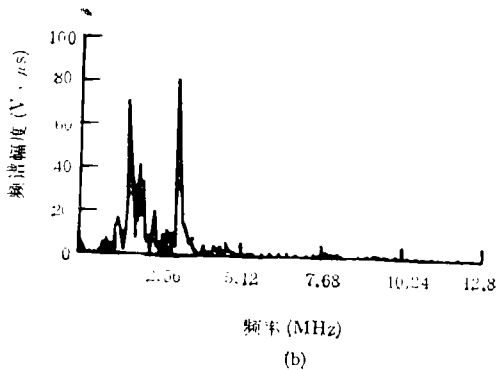
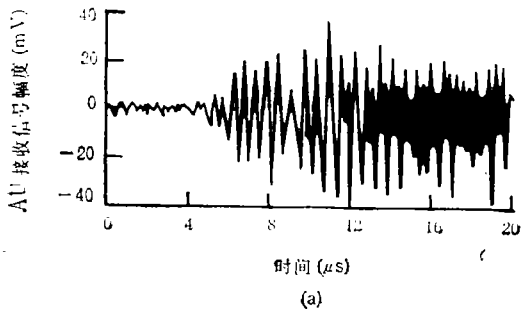


图3 AU 技术的接收信号

(a) 时域信号 (b) 频谱

SiC/Ti, 发射频率 5MHz, 接收频率 2.25MHz

3 AU 技术的特点

AU 技术具有如下的特点, 在应用中是需要明确的:

3.1 AU 技术的检测概念与传统概念不同, 它把影响材料强度、刚度、韧度和动态响应等重要力学参数的微缺陷总体和物性异常作为主要检测对象. 它测量的基本特性是应力波在材料中传播的能量损耗特征^[3].

3.2 AU 技术中的接收信号是超声波在板

中多次反射及其与材料微结构相互作用的总结果, 其中涉及到体波、波导波和几种类型的板波. 复合材料中的薄层和纤维网络界面破坏了波的传播路径而产生波的随机传播, 这使得波与微结构和弥散缺陷的相互作用多次重复而产生波的迭加、散射和模式转换等现象, 所接收到的信号是发射声波在传播过程中经历这些现象后的总结果.

3.3 在 AU 技术中, 发射换能器的中心频率、接收换能器的带宽和灵敏度的选择是至关重要的. 对于复合材料板而言, 发射超声波的波长应小于板厚, 接收系统必须具有宽带低噪声和高灵敏度的性能.

3.4 AU 技术对于信号分析、谱分析和统计分析等技术是兼容的, 这些技术应用于 AU 技术中将会提高 AU 技术的检测水平.

还须指出, 图 2 所示的 AU 发射接收系统中, 超声换能器与样品之间靠传声介质耦合, 即所谓常规接触式的超声检测. 它具有常规检测的主要缺点, 不适合快速检测和运动状态检测, 也不适合高温条件下的检测. 为了克服这些缺点, 可采用非接触超声检测技术, 如激光超声技术. 这样, 可以实现快速扫描和远距离传感, 使得 AU 技术如虎添翼, 在先进复合材料的检测和评价中得到更为广泛的应用.

4 AU 技术的实验基础及其应用

AU 技术已成为检测和评价先进复合材料的主要手段. 这是由于 AU 技术的测量可以有效地表征复合材料的强度、刚度、韧度等重要力学性质, 也可表征复合材料的微结构和主要缺陷的结果. AU 技术的这种能力是以大量的实验为依据的, 其中包括力学实验、热力学实验和超声实验. 下面介绍 AU 技术与这些实验之间的对应关系.

4.1 AU 技术与断裂拉伸实验

对同一复合材料样品板进行断裂拉伸实验, 同时进行 AU 测量, 然后将两种实验结果进行比较. 在断裂拉伸实验中, 对试样施力不断增加, 使其应变进入非弹性区, 直到能观察到

增强纤维和基体间发生脱粘 (debonding) 现象。对于 AU 测量的结果,按公式(1)算出应力波因子 SWF。表 1 为纤维增强金属基复合材料 SiC/Ti 的断裂拉伸实验结果,图 4 为应力波因子 SWF 与拉伸实验脱粘程度的比较^[4]。

表 1 SiC/Ti 断裂拉伸实验结果

样品号	断裂应变 %	脱粘程度
1	50	无
2	85	轻微
3	60	轻微
4	100	严重
5	50	轻微
6	60	轻微

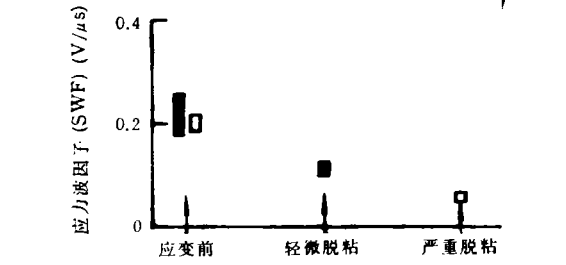


图 4 SWF 与拉伸实验纤维脱粘程度的比较
■ 样品 1; □ 样品 2

图 4 表明,SWF 与拉伸实验中纤维脱粘程度有较好的对应关系。这一结果很重要,因为复合材料的界面(即纤维与基体间的界面)行为是评价其力学性能的一个很重要的标志。界面结合的越好,表示材料的力学性能也越好;反之,表示材料存在缺陷或受到了损伤。

4.2 AU 技术与热循环实验

把 AU 技术所得结果与热循环实验结果相比较,发现热循环会引起 SWF 的降低。图 5 为热循环与归一化的 SWF 的关系。

对于先进复合材料,早期的热循环实验期望能产生纤维与基体之间的脱粘以及基体裂纹。然而,实验结果表明,由于热循环引起的材料损坏程度很轻微,不能产生脱粘和裂纹。从 SWF 与热循环的关系可以得到这样的结论,即 AU 技术可以探测到复合材料的很小程度的损

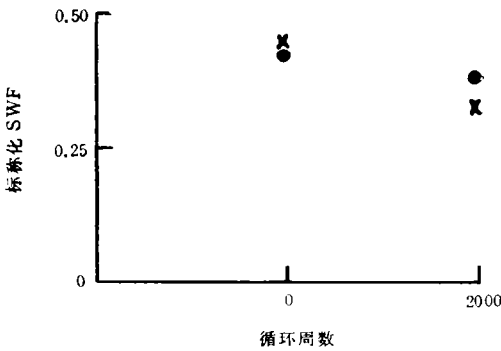


图 5 热循环与 SWF 的关系
● 样品 1; × 样品 2

坏,因为 SWF 的降低就说明了这一点。而这样小程度的损坏是其他手段,如破坏性实验和粗糙的实验,所不能发现的。

4.3 AU 技术与超声声速测量

AU 信号从发射器到接收器的传播时间对材料的弹性模量敏感。对不同复合材料样品的实验结果表明,拉伸模量越高,AU 信号的传播时间越短,即声速越大。AU 信号对于复合材料的纤维取向反应不大明显,而对于材料结构的组合刚度敏感。

实验还表明,纤维与基体之间的界面质量对于复合材料的弹性模量影响很大。因此,AU 方法可以用来探测材料的界面行为。图 6 为两个样品的声速与模量的关系,其中模量大的样品对应于纤维与基体间界面厚的情形。

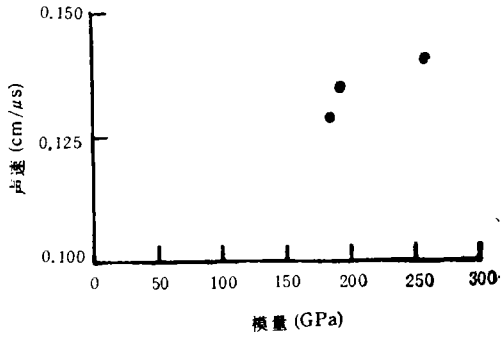


图 6 AU 信号的声速与模量的关系

4.4 AU 技术与信号分析和谱分析技术

如前所述,信号分析和谱分析技术都可用于 AU 技术之中。这样可以有效地检测复合

材料中的脱层、裂纹、气泡和外来夹杂等宏观缺陷,也能更有效地评价材料的力学性质和纤维与基体间的界面质量。最近有人已把 C-扫描、信号处理和成像技术用于 AU 技术之中,成功地检测复合材料压力容器壳体的脱层、干缠绕等缺陷^[4]。

综上所述,AU 技术已成为检测和评价先进复合材料的最有效方法之一。它不仅广泛用于航天航空工业领域,而且也已用于民用工业,如对木材、纸张、木制品和粘接材料的检测。预计,随着理论和检测设备水平的提高,AU 技

术在检测和表征复合材料方面会起更大的作用。

参 考 文 献

- [1] Egle D M. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1979, Vol. 65: 1198—1203.
- [2] Vary A, Lark R F. *J. Testing and Evaluation*, 1979, Vol. 7: 185—191.
- [3] Vary A. *Materials Evaluation*, 1991, Vol. 49: 581—584.
- [4] Kautz H E, Lerch B A. *Materials Evaluation* 1991, Vol. 49: 601—606.

声级计国际标准的修订进展与内容

章 句 才

(中国计量科学研究院 北京 100013)

1993 年 6 月 21 日收到,修改稿 1994 年 11 月 22 日收到

摘要 描述了 1993 年 2 月颁布的 IEC 651(1979):声级计的修正件 1 及 IEC 804(1985) 积分-平均声级计修正件 2 的主要内容,并给出有关这两项国际标准修订的进程与近况。

关键词 声级计,国际标准,修订

Progress in and contents of the revision of International Standard of Sound Level Meters

Zhang Jucai

(National Institute of Metrology, Beijing 100013)

Abstract The main contents of Amendment No. 1 of IEC 651(1979): Sound Level Meters and Amendment No. 2 of IEC 804(1985): Integrating-averaging Sound Level Meters, published in Feb. 1993 are described. The relevant proceedings and the recent situation of the revision to these International Standards are also reported.

Key words Sound level Meter, International Standard revision

包括中国在内的许多国家,都把声级计视为最重要最普遍的声学仪器。由于作者主持 OIML 有关声级计的法规工作,故需参与国际讨论。谨就所掌握的有关国际新资料整理成文,及时提供给我国广大从事噪声测量、仪器设计及标准计量领域的技术人员参考。

1 修订工作的进程

IEC 有关声级计的国际标准在 70 年代以前划分为普通声级计 (IEC 123-1961) 与精密声级计 (IEC 179-1973),按准确度区别,前者为 $\pm 2\text{dB}$; 后者为 $\pm 1\text{dB}$ 。这种划分法对全球的