

复合材料的超声检测技术

II. 非接触超声 C-扫描技术

张 谦 琳 胡 建 恺

(中国科技大学超声无损检测实验室, 合肥 230022)

1994 年 10 月 5 日收到

摘要 本文对于激光超声、干耦合和空气耦合三种非接触超声 C-扫描技术的原理、特点及其在复合材料检测中的应用做了简明介绍。

关键词 复合材料, 非接触超声检测, C-扫描

Ultrasonic nondestructive testing for composite materials

II. noncontact ultrasonic C-Scan techniques

Zhang Qianlin, Hu Jiankai

(Ultrasonic NDT Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230022)

Abstract The principles and features of laser ultrasonic C-Scan, dry-contact C-Scan and air-contact C-Scan techniques are presented in this paper and the applications of them in noncontact ultrasonic nondestructive testing on composite materials expounded.

Key words Composite materials, Noncontact ultrasonic NDT, C-Scan.

用于超声无损检测的传统技术是接触式的,即在超声探头和待测试样之间必须用水或其它液体作为声耦合介质。传统的接触式超声 C-扫描通常是在水槽中进行,即用水作耦合介质。这种传统方法对于航空航天用的复合材料板的检测是不适用的,主要原因是水会使试样受潮或变污,这会严重影响构件的力学强度和尺寸的稳定^[1]。因此,必须另辟蹊径,不使用液体作为耦合介质。非接触超声 C-扫描技术便是解决这个问题新途径,这里主要介绍激光超声、干耦合和空气耦合三种非接触超声 C-扫描技术。

1 激光超声 C-扫描技术

1.1 激光超声 C-扫描系统 (Laser Ultrasonics C- Scan System)

激光超声 C-扫描系统由脉冲激光发生器、光干涉接收器和 C-扫描声成像三个部分组成。与传统接触式超声 C-扫描系统的主要区别是激光超声部分,它是非接触式超声源,可以在固体中产生超声波。激光产生超声波的原理如图所示 1。

当功率密度较小的激光束照射到固体材料表面时,照射点下小区域内有高度的热量集中,

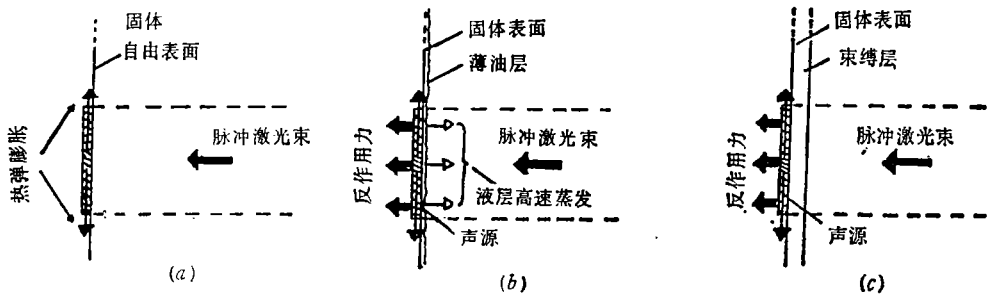


图1 脉冲激光产生超声波的示意图

(a) 热弹状况, (b) 表面涂薄油层, (c) 表面有固体束缚层

由于热弹效应导致沿表面的快速膨胀, 此种状态向材料内部传播即声波, 如图 1(a) 的情形, 称为热弹状态。在热弹状态下, 所产生超声横波, 大于超声纵波, 这时的超声波激发对材料表面是无损伤的^[2]。当激光功率密度增大, 大到足以烧蚀表面的程度(对金属材料而言, 大于 10^7 W/cm^2), 这时若表面上预先涂有液体薄层或镀有束缚层, 由于液体快速蒸发的反冲量或束缚层快速烧蚀挥发的反作用力, 在固体中主要产生超声纵波, 如图 1(b)、(c) 情形。因此, 脉冲激光束在固体中产生的超声波的模式和强度与激光功率密度以及材料的表面状况有着密切关系^[2-4]。图 2 为脉冲激光束照射厚铝板表面时, 在板的另一面用激光干涉仪接收时所得到的超声脉冲位移信号。

1.2 激光超声 C-扫描技术的特点

激光超声源产生的超声脉冲是一种宽带窄脉冲, 它要求宽带接收系统。可用光干涉仪或电容换能器连同宽带接收放大系统进行非接触超声接收, 组成完整的非接触超声检测系统。

C-扫描系统可以获取扫描平面上各点的声学信息, 并且通过声成像系统可以实时成像。这对于缺陷的确定(定位、定量、定形状)和直接观察都是很有利的。因此, 非接触超声发射接收系统与 C-扫描系统(包括声成像系统)相结合, 是现代超声无损检测新技术的典范。

激光超声的一个主要特点是非接触和远距离传感。在声源和样品间, 以及样品和接收器之间不需要任何物理的接触, 避免了耦合层所

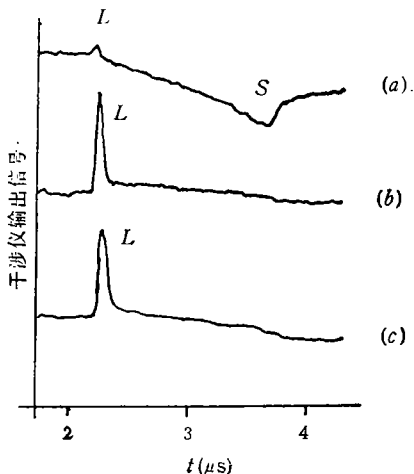


图2 脉冲激光产生的超声脉冲位移波形

(a) 热弹状态, 产生纵波 (L), 横波 (S); (b) 大功率状态, 表面有薄油层, 产生纵波 (L); (c) 大功率状态, 表面有束缚层, 产生纵波 (L)。

导致的声强度化和频率依赖性; 此外, 试样不会受潮或变污, 这对于复合材料板的检测是特别有利的。所谓远距离传感, 是指脉冲激光器和光干涉仪都可距试样表面几十厘米, 甚至几米远分别进行发射和接收。这使得激光超声系统可以很方便地与 C-扫描系统相联接, 对先进复合材料进行检测和成像^[4]。

激光超声的另一特点是高带宽和高空间分辨率。Q-开关固体激光器产生 10—50 ns 宽度的光脉冲, 所产生的超声脉冲的频谱为 20—50 MHz, ps 脉冲激光器所产生的超声脉冲具有更高的带宽。在接收部分, 用光干涉仪作接收器, 在频率 10 KHz—100 MHz 范围内具有很平

坦的频率响应。另一方面,由于激光束能够会聚成大小近于衍射尺寸的光点,因而可达到高空间分辨率。热弹源的尺寸在毫米量级,激光干涉仪探针的聚焦束的光点尺寸为 10 μ m,与压电超声探针相比,毫米尺度的空间分辨率已是很高的。高空间分辨率使得激光超声 C-扫描系统可以精确地确定缺陷的位置和大小,也可以精确地测定试样的超声性质的变化,可以进行逐点检测。这样,可以对材料的结构进行理论模拟,并通过实验确定材料的传递函数。

激光超声 C-扫描系统的第三个优点是 可以实现快速扫描,这是因为光束运动不存在惯性,也不存在耦合介质引起的阻力。这是其它超声 C-扫描技术望尘莫及的。

2 干耦合 C-扫描技术

干耦合 C-扫描 (Dry-Contact C-Scan) 又称为干接触 C-扫描。它是在探头和工件之间装上软橡胶或塑料,利用压力使探头与试件保持大面积的良好接触。因此,它本质上不是真正的非接触技术。由于不用耦合介质,人们习惯上也把它称之为非接触。

干耦合技术主要用于检测混凝土和耐火砖等非均质和表面粗糙的材料,一般采用穿透法。近年来,把这种技术与 C-扫描相联结,使用特制的机械扫描、稳定的定位和加压装置,用来对复合材料进行检测。美国 Lockheed 导弹和空间公司实验室最先使用这种技术检测具有铝蜂窝夹心的石墨-环氧树脂夹芯复合材料板^[1]。使用轮式超声换能器,工作频率在 200—700KHz,扫描速度为 6—10cm/s. 可检测出脱粘、夹杂等缺陷。

干耦合 C-扫描技术的主要缺点是扫描速度太慢,换能器易磨损,易产生误指示。为了克服这些不利因素,在复合材料的检测中又使用下面的空气耦合 C-扫描技术。

3 空气耦合 C-扫描技术 (Air-Contact C-Scan Technique)

空气耦合技术早在 1968 年 D. S. Dean 就

曾用于检测固体推进剂火箭发动机。由于固体和空气间界面的声能损失太大,长期以来无人问津。众所周知,固体与空气的声阻抗率相差 5 个数量级,因而两者界面间的声能损失是可想而知的。实验证明,空气耦合比接触式耦合的接收灵敏度降低 110dB 之多。所以,采用这种技术必须在以下几个方面进行精心考虑:一是加大发射功率,二是使用优良性能的接收放大系统,三是在换能器与空气的接触面上加性能优良的声匹配层。

最佳匹配材料的声阻抗率 Z_m 为

$$Z_m = \sqrt{Z_i \cdot Z_0}$$
 (1)

式中 Z_i 为固体换能器材料的声阻抗率, Z_0 为空气的声阻抗率。在室温下, PZT 压电陶瓷的 Z_i 约为 3×10^7 瑞利,空气的 Z_0 为 4.2×10^2 瑞利,按式(1)计算的 Z_m 为 1.1×10^5 瑞利。如此低阻抗率的固体材料在自然界是难寻的,必须进行人工合成。

直到近几年,由于高功率脉冲发射机,良好的低噪声放大接收系统和优良性能的声匹配材料以及超声聚焦换能器的成功发展,人们又把空气耦合技术与 C-扫描相结合,成功地用于复合材料的检测中。典型的空气耦合 C-扫描系统示意如图 3。

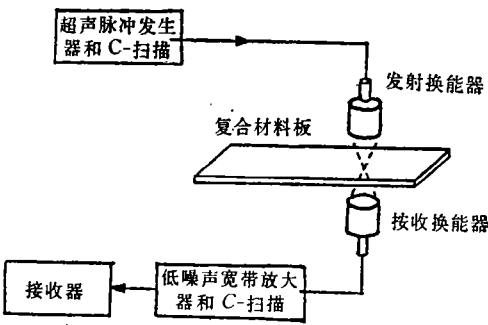


图 3 空气耦合超声 C-扫描系统

改进后的空气耦合超声 C-扫描系统具备了如下优点:实现了真正的非接触检测,不存在换能器的磨损,可进行快速扫描 (25-50cm/s),容易实现由超声纵波到横波、板波和瑞利波的模式转换等。实验表明,对于复合材料板的检测,横波、板波和瑞利波比纵波的灵敏度高。

因此,上述优点对于有效地解决复合材料板的检测和材料特性的表征是很重要的。

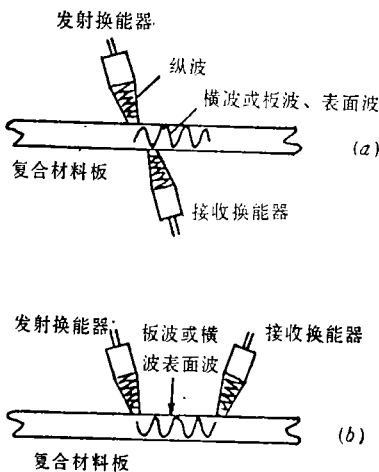


图 4 纵波斜入射和模式转换
(a) 穿透法; (b) 单面法

空气耦合技术的效果与超声纵波(发射波)的人射角度和两个换能器(发射和接收)的相对

位置有关,一般采用斜入射法,如图 4 所示。
对于形状复杂的复合材料构件和在役构件的检测,一般采用单面法,穿透法在这种场合是不可能进行的。

空气耦合超声 C-扫描技术已经成功地用于某些复合材料板的检测。它可以检测出脱粘、脱层、气孔、夹杂和纤维断裂等缺陷。可是,由于固体和空气界面的声能损失太大,这种技术并不是对所有的复合材料都能奏效的,它对各种复合材料板进行检测的适用程度必须由试验来预先判定^[1]。

参 考 文 献

[1] Rogovsky AJ *Materials Evaluation*, 1991,49(12): 1491—1497.
[2] Scruby, CB Dewhurst, RJ Hutchins, DA *et al. J. Appl. Phys.* 1980, 51(12): 6210—6216.
[3] Hutchins, D Hu, J Lungren, K *Materials Evaluation*, 1986, 44(9): 1244—1253.
[4] Scruby. CB *Ultrasonics*, 1989; 27(7): 195—209.

医学图象的存档和通讯系统

超声、CT、核磁共振等成象诊断技术已在医院广泛应用,积累了大量图象资料。为了充分运用这些资料,提高诊断的效率和水平,必须用联网的计算机系统保存和管理其医学图象。90年代以来,这方面有了突破的进展。本文介绍由美国加州大学旧金山分校辐射信息学实验室研究和建立的图象存档和通讯系统 PACS (Picture Archiving and Communication System)。

这些 PACS 系统是目前世界上最先进的医学图象系统,它是一个联接旧金山地区主要医院的高速计算机网络,它管理和保存这些医院的各种成象诊断技术得到的医学图象,并随时根据需要把指定的图象传送到需要的医生处,大大提高了医疗诊断的效率。

PACS 的中心建立在加州大学旧金山分校辐射信息学实验室,它的核心是 PACS 网(图 1 上部)。PACS 网联结一些医学成象设备,包括两个 CR (数字 X 光机),5 个 CT,5 个核磁共振,3 个激光图象数字转换仪,1 个超声图象的存档通讯系统 (Aegis)。这个网有一个运程异步传输网关 (ATM Gateway),和其他医院联网。PACS 网传输的图象的数据量很大。通常电话线的通讯速率是 14.4K—1.5M 比特每秒,不能满足要求,因此 PACS 用的是每秒 155M 比特的异步传输模式的光缆 (ATM OC3)。位于加州大学旧金山分

校的 PACS 中心通过奥克兰太平洋贝尔公司的 ATM 交换机与 Mr Zion 医院,旧金山核磁共振中心,旧金山综合医院,旧金山 VA 医学中心联网,各医院都可以与 PACS 中心交换图象。

所有的医学图象最终存放在一个 1.3T Byte (1.3×10^{12} Byte) 巨型光盘库内,这个光盘库由 PACS 网上的存档服务器(一个 Sun SPARC 690MP 服务器)管理。所有图象先送入这个服务器的磁盘上,当有用户调用时,服务器能很快地送出图象。如果在一个确定时期内无人调用,图象就转入光盘库永久保存。存档服务器还负责向分布在全院的 1K 和 2K 显示器传送图象。与图象有关的文字资料,如病人资料,诊断报告等存储在由两个 Sun SPARC 10 工作站组成的 PACS 数据库服务器上。

通过校园网, PACS 和四个系统联接,它们是包括病人资料、检查日程、诊断报告的检查信息系统 (RIS),包括病人化验、病理和微生物检查记录的医院信息系统 (HIS)、国家和全校图书馆目录的图书信息系统 (Library),传送电子邮件和文件的 Inter 网。

PACS 网通过全系图文服务器与全系网 (图 1 下部)相联。全系网上有大约 130 个微机 and 系内一些其他设备。从这些微机可以提取 PACS 存储的图象和资料。用病人姓名调用各种病历和文字资料平均需要