

# 先进复合材料超声无损检测新技术的应用

周正干, 孙广开, 马保全, 李洋

北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191

**摘要** 针对航空航天高端装备制造与服役过程中复合材料部件的复杂型面检测、非接触检测、快速检测、现场检测等问题, 依托自主研发的新型超声检测系统开展实验研究, 基于相控阵超声技术实现碳纤维增强树脂基复合材料L型构件R区孔隙、分层缺陷检测; 基于空气耦合超声技术实现蜂窝夹芯复合材料脱黏缺陷检测; 基于激光超声技术实现碳纤维树脂基复合材料孔隙、紧固孔分层检测及耐高温复合材料分层缺陷检测。分析了各项技术的关键问题、应用范围和发展方向。研究表明, 应用超声无损检测新技术可以实现复合材料部件的复杂型面检测、非接触检测和快速检测, 并且可以现场应用。

**关键词** 复合材料; 无损检测; 超声检测; 相控阵超声; 空气耦合超声; 激光超声

**中图分类号** TB553

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.09.001

## Application of New Developed Techniques for Ultrasonic Nondestructive Testing for Advanced Composite Materials

ZHOU Zhenggan, SUN Guangkai, MA Baoquan, LI Yang

School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** The applications of the ultrasonic phased array technique, the air-coupled ultrasonic technique and the laser ultrasonic technique for the non-destructive testing for advanced composite materials are reviewed. For the problems of the non-destructive testing for composite parts of aeronautical and astronautical sophisticated equipment in manufacture and service stages, such as the testing of the complex profile parts, the noncontact testing, the fast testing, the on-site testing, a series of self-developed novel ultrasonic testing systems are developed. The effective detection of the porosity and the delamination located at the corner of the L-shaped carbon fibre reinforced plastic (CFRP) composite parts is realized by using the ultrasonic phased array technique. The detection of the interface debonding in honeycomb sandwich composite parts is realized based on the air-coupled ultrasonic technique. The detection of the porosity, the impact-damage and the drilling-induced delamination in CFRP composite parts and the detection of the delamination in refractory composite parts are realized by using the laser ultrasonic technique. The key technical problems, the application scopes and the future development of these novel ultrasonic testing techniques are analysed. It is shown that the new ultrasonic testing techniques can be used for the complex profile detection, the noncontact detection, the fast detection and the on-site detection for composite parts.

**Keywords** composite; NDT; ultrasonic testing; ultrasonic phased array; air-coupled ultrasonic; laser ultrasonic

先进复合材料是现代航空飞行器设计与制造采用的主要材料类型之一<sup>[1,2]</sup>。在复合材料零部件的制造和使用过程中, 超声技术是检测部件缺陷损伤并评定其安全性能的关键技术。近年来, 为满足大承载和高性能新机种的零部件制造

需要, 复合材料技术快速发展, 新材料、新结构、新工艺不断出现, 常规超声技术已经难以满足复合材料的检测要求<sup>[3-5]</sup>。目前广泛使用的常规超声技术, 难以检测型面或结构复杂的部件, 蜂窝夹芯、泡沫夹芯复合材料以及新型高温结构材料

收稿日期: 2013-12-13; 修回日期: 2014-02-16

基金项目: 国家国际科技合作专项(2013DFR70780); 航空科学基金资助项目(20120951015)

作者简介: 周正干, 教授, 研究方向为超声无损检测, 电子信箱: zzhenggan@buaa.edu.cn

引用格式: 周正干, 孙广开, 马保全, 等. 先进复合材料超声无损检测新技术的应用[J]. 科技导报, 2014, 32(9): 15-20.

等不宜使用超声耦合剂,大型飞机结构难以进行自动、快速检测以及现场检测等。因此,需要发展新的技术以满足新型飞机复合材料结构的检测要求。复杂型面检测、非接触检测、快速检测和现场检测是新机无损检测技术的紧迫需求和发展方向。

针对以上问题,国外在复合材料超声检测方面开展了大量研究工作,实现多项新技术的应用<sup>[3,4]</sup>。目前,波音公司已将相控阵超声技术用于复杂型面构件的快速检测,实现特殊部位的全覆盖扫描;航空公司已使用空气耦合超声技术检测蜂窝夹芯构件,检测过程中不再使用超声耦合剂;洛克希德·马丁和空客公司已采用先进的激光超声系统对大型复杂型面部件进行快速、自动检测;达索公司已将激光超声系统用于在役飞机的现(外)场检测。

本文针对飞机制造与服役过程中亟待解决的复合材料部件检测问题,介绍超声无损检测新技术的应用。通过自主研发的新型超声检测系统开展实验研究,应用相控阵超声技术实现碳纤维增强树脂基复合材料L型构件R区孔隙、分层缺陷检测;应用空气耦合超声技术实现蜂窝夹芯复合材料脱黏缺陷检测;应用激光超声技术实现碳纤维树脂基复合材料孔隙、紧固孔分层检测以及耐高温复合材料分层缺陷检测。提出的新型超声检测技术可以实现复合材料部件的复杂型面检测、非接触检测和快速检测,实现现场应用。

## 1 相控阵超声技术

相控阵超声技术是解决复杂型面和特殊部位检测问题的途径。该项技术采用的声换能器具有多个阵元晶片,可以通过电子方式控制各晶片的发射或接收时间实现声波的合成、偏转和聚焦<sup>[6,7]</sup>,具有很高的声束可控性,可以实现复杂型面部件和特殊部位的多方位、高效率扫描<sup>[8,9]</sup>。针对典型的复合材料L型构件R过渡区的检测问题,介绍相控阵超声技术的应用。

复合材料L型构件是常用的飞机构件类型,其R过渡区受应力集中作用,在制造和使用过程中容易产生缺陷。但是,由于R区呈弧面且空间小,常规超声技术无法对其进行全范围检测。相控阵超声技术是解决此类问题的有效途径。基于线阵换能器的复合材料L型构件R区相控阵超声检测原理如图1所示(其中 $\frac{m}{2}$ 、 $\frac{m}{2}+1$ 表示阵元序列, $N$ 表示阵元个数, $L$ 表示探头边距)。

### 1.1 基于费马原理的延迟时间算法

相控阵超声换能器中各阵元的发射延迟时间算法是波束聚焦和偏转控制技术的核心<sup>[10,11]</sup>。针对复合材料L型构件R过渡区的检测问题,提出基于费马原理的延迟时间算法。

根据费马原理,声波总是沿最短时间路径由一点传播到另一点。基于费马原理可以计算出声波从发射(或接收)阵元到达聚焦点的传播时间,通过计算各阵元的声波传播时间差即可获得阵元发射延迟时间。以图2中的L型构件为例

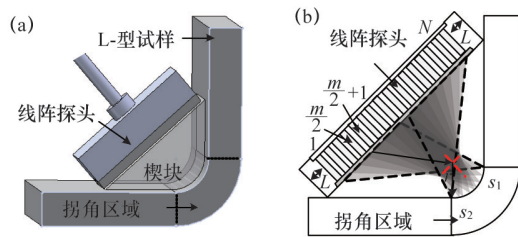


图1 复合材料L型构件R区相控阵超声检测的线阵换能器布置(a)和全覆盖扫描原理(b)

Fig. 1 Arrangement of linear array transducers (a) and full coverage scanning of the R-region (b) for the detection of the L-shaped composite components by using ultrasonic phased array technique

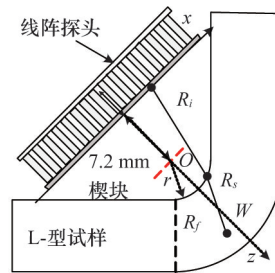


图2 基于费马原理的R区检测延迟时间计算

Fig. 2 Delay time calculation for the detection of R-region based on Fermat's principle

( $x, z$ 是方向坐标),介绍基于费马原理的R区检测延迟时间算法,这一算法适用于楔块与试样的声阻抗差小的情况。

图2中L型构件R区的圆弧半径 $r$ 为5 mm,厚度 $W$ 为10 mm,材料为铝合金,密度 $2700 \text{ kg/m}^3$ ,纵波声速 $6260 \text{ m/s}$ ,横波声速 $3080 \text{ m/s}$ ;楔块介质密度 $1150 \text{ kg/m}^3$ ,纵波声速 $2337 \text{ m/s}$ ;线阵换能器中心频率 $5 \text{ MHz}$ ,阵元晶片32个,阵元间距 $0.6 \text{ mm}$ ,阵元宽度 $0.5 \text{ mm}$ 。

线阵换能器的起始和终止阵列孔径需要聚焦到R区的两个端点 $S_1$ 和 $S_2$ ,以使阵列孔径合成的声束覆盖整个R过渡区,如图1(b)所示。设定每阵列孔径含8阵元,扫描间距1阵元宽度。表1列出了检测R区时线阵换能器第1~10阵列孔径的声束偏转角度和聚焦深度。计算过程中,发射声波聚焦在R区上表面,接收声波聚焦到R区下表面。设第 $i$ 号阵元位于 $R_i(x_i, z_i)$ ,聚焦点位于 $R_f(x_f, z_f)$ ,则第 $i$ 号阵元到达聚焦点的时间为

$$t_i = \frac{1}{c_1} |R_i - R_s| + \frac{1}{c} |R_s - R_f| \quad (1)$$

式中, $c, c_1$ 分别为楔块、试样的纵波声速,  $m/s$ ;  $R_i$ 为R区表面处声波的折射点位置。根据式(1)可以计算出阵列孔径中各个阵元到达聚焦点的声波传播时间 $t_i, s$ ;各阵元的声传播时间差即为阵元延迟时间。

表1 发射声束的偏转角度和聚焦深度

Table 1 Steering angle and focus depth of emission beam

晶片序号	转向角/(°)	聚焦深度/mm
1	45.0	15.2
2	42.5	14.8
3	39.8	14.4
4	36.9	14.0
5	33.7	13.7
6	30.3	13.3
7	26.6	13.0
8	22.6	12.8
9	18.4	12.6
10	14.0	12.4

例如,第1个阵列孔径(即第1~8号阵元)的声场偏转角为45.0°,其发射声波聚焦在构件上表面,接收声波聚焦在构件下表面,采用以上算法得出的阵元延迟时间如表2所示。

表2 第1个阵列孔径的延迟时间

Table 2 Delay time for the first aperture

序号	发射延迟/ns	接收延迟/ns
1	0	0
2	195	175
3	385	345
4	575	505
5	755	685
6	930	885
7	1100	1080
8	1265	1270

### 1.2 L型构件R过渡区全覆盖扫描

以碳纤维增强树脂基复合材料L型构件为试样,厚度4 mm、R区半径5 mm。试样中含有沿R区圆周方向长11 mm、宽8 mm、埋深2 mm的预置缺陷。基于线阵换能器,通过控制阵元发射延迟时间对R过渡区进行全范围扫描检测(图3)。

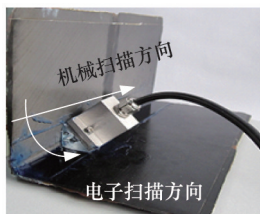
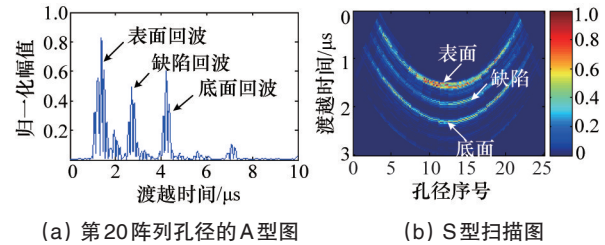


图3 碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)L型构件扫描检测  
Fig. 3 Scanning of the L-shaped CFRP specimen

图4为R区缺陷位置处第10阵列孔径的A型和S型图,可以观测到R区表面、缺陷、底面的超声回波以及各界面的相对位置。通过图4(a)中缺陷回波时间计算出缺陷埋深约1.91 mm,与实际值相对误差约4.50%。



(a) 第20阵列孔径的A型图 (b) S型扫描图

图4 L型试样的检测结果(第35个机械扫描位置)

Fig. 4 Results of the L-shaped specimen inspection (the 35<sup>th</sup> position in mechanical scanning direction)

图5为L型构件的超声C扫描图像,横向采用基于位置编码器的机械扫描,扫描分辨率1.0 mm;纵向采用基于阵列孔径偏转、聚焦的电子扫描,扫描分辨率0.29 mm。图5中可以观测到L型构件R区缺陷的形貌、位置和尺寸特征,验证了相控阵超声技术用于此类结构检测的可行性。

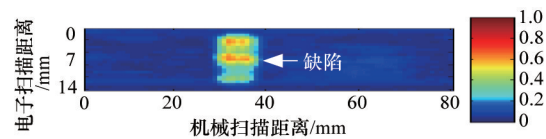


图5 L型复合材料试样相控阵超声C扫描图像

Fig. 5 C-scan image of the L-shaped CFRP specimen with ultrasonic phased array technique

## 2 空气耦合超声技术

空气耦合超声检测技术以空气作为耦合介质,利用空气耦合超声换能器激发和接收超声波来检测材料和构件中的缺陷,该技术通过特殊设计的声换能器在材料中激发和接收超声波,检测过程中不使用超声耦合剂,并且适合大型结构的快速检测和现场检测<sup>[12-14]</sup>。针对蜂窝夹芯复合材料结构脱粘缺陷的检测问题,介绍空气耦合超声技术的应用。

蜂窝夹芯复合材料是飞机结构上大量使用的材料类型,在制造和使用过程中容易在黏接层产生界面脱黏缺陷。超声技术是目前普遍使用的检测手段,但常规超声技术并不适宜检测泡沫、纸蜂窝等容易受到超声耦合剂影响的夹芯材料,空气耦合超声技术可以用于此类结构的非接触式检测<sup>[15]</sup>。

### 2.1 空气耦合超声检测系统设计

设计基于穿透法的空气耦合超声检测系统。利用Tektronix AFG3102任意/函数发生器产生原始激励信号,通过功率放大器提高信号电压,激励空气耦合超声换能器产生超声波;基于Panametric 5800PR超声波发射/接收仪对空气耦合超声换能器接收的超声信号进行滤波并提高增益<sup>[16]</sup>;超

声信号的A/D转换由NI-5114卡完成,以便上位机总控程序读取A型数据;利用LS-06扫描器带动超声换能器对工件进行C扫描检测,驱动单元包括Galil-DMC-1842和QMI-MC-ST-02;通过上位机总程序控制检测过程,程序中已内置相位编码脉冲压缩技术以提高空气耦合超声信号幅值和信噪比(图6)<sup>[17,18]</sup>。空气耦合超声检测系统原理如图7所示。

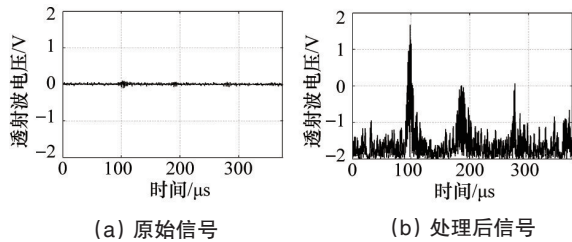
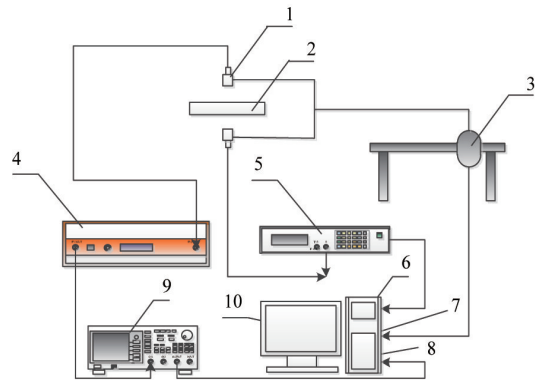


图6 蜂窝夹芯复合材料结构中的空气耦合超声透射信号  
Fig. 6 Transmission signal of air-coupled ultrasonic wave in honeycomb sandwich composite material



- 1—空气耦合换能器; 2—蜂窝夹芯复合材料结构;
- 3—机械扫描机构; 4—功率放大器; 5—信号处理器;
- 6—数据采集卡; 7—运动控制器; 8—触发;
- 9—信号发生器; 10—计算机

图7 空气耦合超声检测系统构成原理  
Fig. 7 The layout of the air coupled ultrasonic testing system

### 2.2 蜂窝夹芯复合材料的空气耦合超声检测

以含预埋缺陷的碳纤维蒙皮-纸蜂窝夹芯复合材料结构为试样,如图8(a)。试样的蒙皮层厚度约1 mm、芯层厚度10 mm。图8(b)为蜂窝夹芯复合材料试样的空气耦合超声C扫描图像,其中缺陷位置及分布特征清晰可辨,验证了空气耦合超声技术用于蜂窝夹芯复合材料脱黏缺陷检测的可行性。

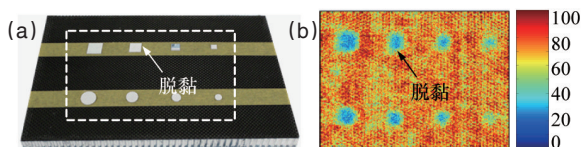


图8 蜂窝夹芯复合材料(a)及其空气耦合超声C扫描图像(b)  
Fig. 8 Honeycomb sandwich composite specimen (a) and its C-scan image with air-coupled ultrasonic technique (b)

## 3 激光超声技术

激光超声检测技术利用激光激发和接收超声波来检测材料和构件中的缺陷,该技术是解决大型复杂结构快速、现场检测问题的途径。该技术以脉冲激光在材料中激发超声波,基于光学仪器对声波进行非接触式的测量<sup>[19]</sup>,检测过程中不使用超声耦合剂,并且可以达到很高的空间分辨力。激光可以在不垂直结构表面的条件下远距离激发、接收超声波。因此,激光超声技术适合快速检测型面复杂的大型部件,也可以现场应用。

针对碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)孔隙、紧固孔分层以及耐高温复合材料(C/SiC)分层缺陷的检测问题,介绍激光超声技术在先进复合材料检测中的应用。

### 3.1 激光超声检测系统设计

设计基于全光学激发和接收的激光超声系统<sup>[20]</sup>。利用Nd:YAG脉冲激光器激发超声波,激光器参数为激光波长1064 nm、脉冲宽度10 ns、单脉冲能量0~200 mJ、焦斑直径0.7~2 mm;利用激光干涉测量系统接收超声波,测量用连续激光波长532 nm、功率0~0.1 mW、焦斑直径可调节至100 μm,系统测量带宽100 MHz;接收到的超声信号经噪声抑制处理后,通过Tektronix DPO7254C数字示波器实时监测,同时使用NI-5114卡进行A/D转换;基于精密二维机械平台进行C扫描,扫描过程由上位机总程序控制。激光超声检测系统原理如图9所示。

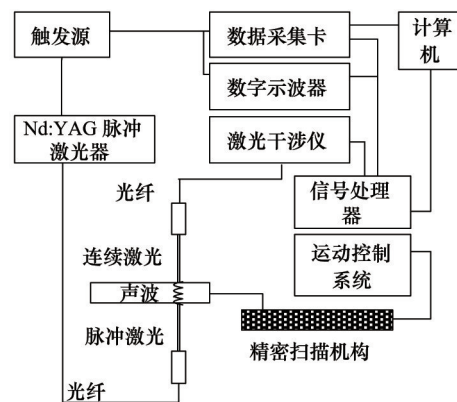


图9 激光超声检测系统构成原理  
Fig. 9 Layout of the laser ultrasonic testing system

### 3.2 CFRP孔隙缺陷的激光超声检测

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)是飞机上大量使用的复合材料类型。部分CFRP结构型面复杂,目前广泛使用的常规超声技术在型面适用性、缺陷检出率和效率上存在问题,激光超声技术是解决此类问题的途径<sup>[21,22]</sup>。

针对含有预埋缺陷CFRP试样(图10)的激光超声C扫描图像如图11所示,其中缺陷处声波幅度衰减约17 dB,缺陷形态及其分布特征清晰可辨,验证了激光超声技术用于CFRP复合材料孔隙缺陷检测的可行性。

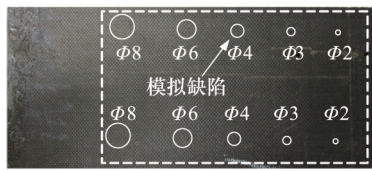


图 10 碳纤维增强树脂基复合材料试样  
Fig. 10 Carbon fiber reinforced plastic specimen

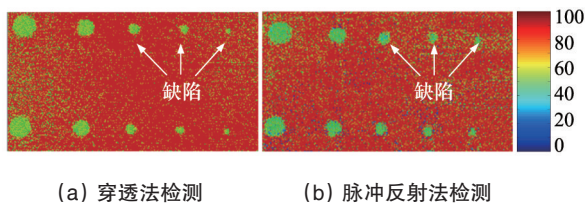


图 11 CFRP 复合材料孔隙缺陷的激光超声 C 扫描检测  
Fig. 11 C-scan testing of carbon fiber reinforced plastics with laser ultrasonics for the detection of porosity defects

### 3.3 CFRP 紧固孔分层的激光超声检测

飞机复合材料结构在装配过程中因钻孔产生的紧固孔分层将严重影响结构安全。目前,现场检测中普遍使用的便携超声仪在紧固孔周围的空间分辨力较低,漏检率和误判率高,激光超声技术是解决此类问题的途径。

针对 CFRP 复合材料钻孔试样(图 12)的激光超声 C 扫描图如图 13 所示,其中紧固孔周围分层的形态和分布特征清晰可辨,穿透法和脉冲反射法的图像差异与分层深度位置有关,脉冲反射法难以检出近表面的分层缺陷。研究结果可以初步验证激光超声技术用于紧固孔分层检测的可行性。

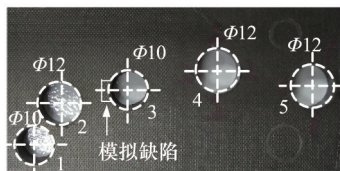


图 12 钻孔加工后的 CFRP 复合材料试样  
Fig. 12 Carbon fiber reinforced plastic specimen with several drilling holes

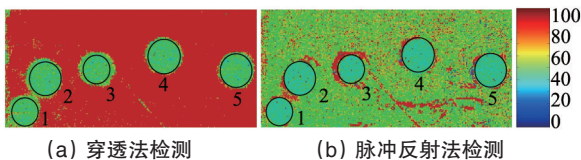


图 13 CFRP 复合材料紧固孔分层激光超声 C 扫描检测  
Fig. 13 C-scan testing of CFRPs with laser ultrasonics for the detection of drilling-induced delamination

### 3.4 C/SiC 复合材料分层的激光超声检测

耐高温、低密度的超高温复合材料是提高航空发动机推重比和火箭冲质比的关键。目前,航空发动机的燃烧室、涡轮外环、密封片等部件的设计与制造已倾向于使用高温长寿命陶瓷基复合材料。同时,使用 C/SiC 复合材料制造燃烧室-喷管已经成为火箭发动机性能水平的标志。鉴于耐高温复合材料零部件的特殊用途,常规超声检测技术可能因使用声耦合剂而影响材料的高温性能,激光超声技术是解决此类问题的途径。

含有预埋缺陷的 C/SiC 复合材料试样和激光超声 C 扫描图如图 14 所示,其中缺陷形态及其分布特征清晰可辨,验证了激光超声技术用于 C/SiC 复合材料内部缺陷检测的可行性。

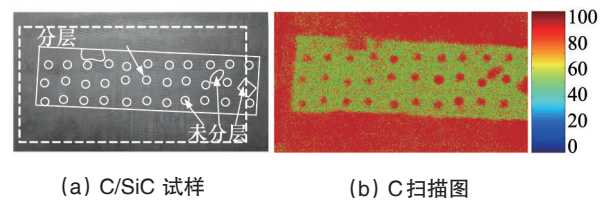


图 14 C/SiC 复合材料试样及其激光超声 C 扫描检测图  
Fig. 14 C/SiC specimen with artificial delamination and its C-scan image by using laser ultrasonics

## 4 结论

1) 相控阵超声技术以电子扫描取代传统的机械扫描方式,通过控制阵元晶片的收发时间实现声波的合成、偏转和聚焦,可以对复合材料 L 型构件 R 区进行全覆盖(即可检范围覆盖全部待检区域)检测,并可现场应用。基于相控阵超声技术的缺陷定位、定量检测是需要深入研究的关键问题,研究新算法以降低技术复杂度并提高缺陷表征准确度是技术的发展方向。

2) 空气耦合超声技术以空气作为声波的传导介质,具有完全无损、不用声耦合剂、简易高效的特点,可以对蜂窝夹芯复合材料结构进行非接触式的检测,也可用于大型结构的快速检测和现场检测。提高空气耦合超声转化效率的声换能器设计和噪声抑制及信号处理技术是需要深入研究的关键问题,嵌入高效抑噪和信号处理单元的自动、快速检测仪器是技术的发展方向。

3) 激光超声技术以激光激发和接收超声波,具有无损、不用声耦合剂、高精度、高效率的特点,可以检测 CFRP 的孔隙、紧固孔分层和 C/SiC 的分层缺陷,适合快速检测型面复杂的大型部件,并且可以现场应用。针对特定复合材料的声波无损激发控制方法和缺陷量化表征与评定是需要深入研究的关键问题,达到可靠性、适用性、高柔性、经济性“四性”要求的自动化检测仪器是技术的发展方向。

参考文献 (References)

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.  
Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] 杜善义, 关志东. 我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 1-10.  
Du Shanyi, Guan Zhidong. Strategic considerations for development of advanced composite technology for large commercial aircraft in China [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 1-10.
- [3] 耿荣生, 郑勇. 航空无损检测技术发展动态及面临的挑战[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 1-5.  
Geng Rongsheng, Zheng Yong. Prospective view on the application of nondestructive testing in air industry and possible challenges[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(1): 1-5.
- [4] 刘松平, 刘菲菲, 郭恩明, 等. 快速无损检测方法与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2005, 11: 40-43.  
Liu Songping, Liu Feifei, Guo Enming, et al. Fast NDT methods and the development tendency[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 11: 40-43.
- [5] 罗雄彪, 陈铁群. 超声无损检测的发展趋势[J]. 无损检测, 2005, 27(3): 148-152.  
Luo Xiongbiao, Chen Tiequn. Development Trends of Ultrasonic Testing [J]. Nondestructive Testing, 2005, 27(3): 148-152.
- [6] Drinkwater B W, Wilcox P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review[J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525-541.
- [7] 施克仁, 郭寓岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 15-25.  
Shi Keren, Guo Yumin. Phased array ultrasonic imaging and testing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 15-25.
- [8] 钟志民, 梅德松. 超声相控阵技术的发展及应用[J]. 无损检测, 2002, 24(2): 69-71.  
Zhong Zhimin, Mei Desong. Development and application of ultrasonic phased array technique[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(2): 69-71.
- [9] 林莉, 杨平华, 张东辉, 等. 厚壁铸造奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术概述[J]. 机械工程学报, 2003, 39(2): 1-9.  
Lin Li, Yang Pinghua, Zhang Donghui, et al. Review of phased array ultrasonic testing for thick wall cast austenitic stainless steel pipeline welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(2): 1-9.
- [10] Woo S C, Shi Y. Optimum beam steering of linear phased arrays[J]. Wave Motion, 1999, 29(3): 245-265.
- [11] Spies M. Efficient optimization of single and multiple element transducers for the inspection of complex-shaped components[J]. NDT & E International, 2004, 37(6): 455-459.
- [12] Blomme E, Bulcaen D, Declercq F. Air-coupled ultrasonic NDE: Experiments in the frequency range 750 kHz-2 MHz[J]. NDT & E International, 2002, 35(7): 417-426.
- [13] Green Jr R E. Non-contact ultrasonic techniques[J]. Ultrasonics, 2004, 42(1): 9-16.
- [14] Luukkala M, Heikkila P, Surakka J. Plate wave resonance—a contactless test method[J]. Ultrasonics, 1971, 9(4): 201-208.
- [15] 周正干, 魏东. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 10-14.  
Zhou Zhenggan, Wei Dong. Progress of air-coupled ultrasonic non-destructive testing technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 10-14.
- [16] 周正干, 魏东, 向上. 空气耦合超声检测中衰减因素的研究[J]. 中国机械工程, 2010(19): 2350-2354.  
Zhou Zhenggan, Wei Dong, Xiang Shang. Research on attenuation factor of air-coupled ultrasonic testing[J]. China Mechanical Engineering, 2010(19): 2350-2354.
- [17] 魏东, 周正干. 改进的非线性调频脉冲压缩方法在空气耦合超声检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16): 8-13.  
Wei Dong, Zhou Zhenggan. Application of non-linear frequency-modulation based pulse compression in air-coupled ultrasonic testing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(16): 8-13.
- [18] 周正干, 马保全, 孙志明, 等. 相位编码脉冲压缩方法在空气耦合超声检测信号处理中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 48-54.  
Zhou Zhenggan, Ma Baoquan, Sun Zhiming, et al. Application of phase coded pulse compression method to air-coupled ultrasonic testing signal processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 48-54.
- [19] 何存富. 激光超声技术及其应用研究[D]. 北京: 清华大学, 1995.  
He Cunfu. Laser ultrasonic techniques and applications[D]. Beijing: Tsinghua University, 1995.
- [20] Dubois M, Drake Jr T E. Evolution of industrial laser-ultrasonic systems for the inspection of composites[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2011, 26(3/4): 213-228.
- [21] 刘松平, 郭恩明, 刘菲菲, 等. 激光超声检测碳纤维增强树脂基复合材料的缺陷评估技术研究[J]. 无损检测, 2007, 29(7): 396-398.  
Liu Songping, Guo Enming, Liu Feifei, et al. Evaluation of defects in carbon fiber-reinforced composites by laser ultrasonic technique[J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(7): 396-398.
- [22] 周正干, 孙广开, 李征, 等. 激光超声检测技术在复合材料检测中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(6): 119-122.  
Zhou Zhenggan, Sun Guangkai, Li Zheng, et al. Application of laser ultrasonic testing technique on the detection of composite structures[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2012, 17(6): 119-122.

(编辑 田恬)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。