

# 空气耦合超声技术在航空航天复合材料无损检测中的应用

危 荃<sup>1</sup>, 金翠娥<sup>1</sup>, 周建平<sup>1</sup>, 周正干<sup>2,3</sup>, 孙广开<sup>2</sup>

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;

3. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

**摘要:** 制备预埋人工缺陷的蜂窝夹芯复合材料、模压复合材料和陶瓷基复合材料试样, 利用自主研发的内置专用信号处理单元的空气耦合超声无损检测系统进行试验, 实现 GFRP 蒙皮 Nomex 蜂窝夹芯复合材料模拟脱粘缺陷检测、模压复合材料模拟内部分层缺陷检测以及 C/SiC 复合材料模拟内部分层缺陷检测。试验结果表明, 空气耦合超声无损检测技术可应用于蜂窝夹芯复合材料、模压复合材料以及陶瓷基复合材料构件的非接触无损检测, 在航空航天工程领域应用前景广阔。

**关键词:** 空气耦合超声; 无损检测; 复合材料; 航空航天

中图分类号: TB553; TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2016)08-0006-06

## Application of Air-Coupled Ultrasonic Technology for Nondestructive Testing of Aerospace Composites

WEI Quan<sup>1</sup>, JIN Cui-e<sup>1</sup>, ZHOU Jian-ping<sup>1</sup>, ZHOU Zheng-gan<sup>2,3</sup>, SUN Guang-kai<sup>2</sup>

(1. Shanghai Aerospace Research Institute of Precision Machinery, Shanghai 201600, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

3. The Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine (CICAAE), Beijing 100191, China)

**Abstract:** Various kinds of composite materials with simulated defects are prepared as specimen, including the GFRP-Nomex honeycomb sandwich composites, molded composites, and ceramic matrix composites. An air-coupled ultrasonic testing system with dedicated signal processing unit is self-developed and the corresponding experiments are conducted based on the system. The nondestructive testing of the composite specimens with simulated defects are realized, including the detection of disbonding in GFRP-Nomex honeycomb sandwich composites, the testing of delamination in molded composite structures, and the detection of delamination in C/SiC composites. The results prove that the air-coupled ultrasonic testing technology is applicable for the noncontact testing of honeycomb sandwich composites, molded composites, and ceramic matrix composites. It has a wide range of applications in aerospace industry.

**Key words:** Air-coupled ultrasonic; Nondestructive testing; Composite; Aerospace

收稿日期: 2016-03-31

基金项目: 中国航天科技集团公司航天科技创新基金资助项目 (CASC06)。

作者简介: 危 荃(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无损检测新技术, E-mail: which2003@163.com。

通信作者: 周正干(1967—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为无损检测与计算机测控技术, E-mail: zzhenggan@buaa.edu.cn。

随着材料工艺的成熟及产品质量的提高, 高性能复合材料在航空航天领域的使用比例大幅度提升(波音 B787“梦想”飞机的复合材料用量已达结构重量的 50%)<sup>[1]</sup>, 有些材料已代替金属成为某些核心部件的主要结构材料, 使得航空航天技术的发展有了质的飞跃。在航空航天领域已得到应用的新型复合材料主要包括纤维增强复合材料、夹芯结构复合材料、耐高温复合材料等<sup>[2-3]</sup>, 此类材料普遍具有高

比强度、高比刚度、高模量、耐腐蚀等优异性能,然而受工艺、材料特性和服役条件等因素影响,容易产生分层、夹杂、脱粘、孔隙等多种类型的缺陷。因此,必须采用有效的无损检测方法准确检出复合材料在制造和使用过程中产生的各种缺陷。但是,近年来逐渐在航空、航天等领域获得应用的多种高性能新型复合材料因其制造成本高、结构特殊、使用环境特殊等,对无损检测技术提出了更苛刻、更有针对性的检测条件(不能使用耦合剂、检测空间狭小、构件尺寸大、结构复杂)和要求(检测高效、检测结果实时直观等),故研究与新型复合材料技术发展水平相适应的无损检测技术已成为国内外研究人员普遍关注的新课题。

空气耦合超声无损检测技术是近年来国内外研究的重要方向<sup>[4-7]</sup>。该技术不仅具有传统超声检测方法的声束可控、声波转换效率高、灵敏度高、可靠性高、成本低等特点,同时还兼具系统搭建简便、高效率、节约资源、无污染、适合原位检测等其他诸多优点。IMIELINISKA 等<sup>[2]</sup>研究了碳纤维、玻璃纤维、聚酰胺纤维增强树脂基复合材料冲击损伤的空气耦合超声检测方法。PETERS 等<sup>[3]</sup>建立了空气耦合超声系统并应用于 MD-80 飞机构件的现场检测。目前,国外已研制出高性能空气耦合超声换能器和成套系统,并逐步应用于航空航天工程领域,如:德国无损检测技术研究所的 HFUS2400 AIRTECH 系列,美国 ULTRAN GROUP 公司的 NCT/NCG 系列换能器和 SECONDWAVE M510 系统、QMI 公司的 AS 系列换能器和 AIRSCAN SONDA-007CX 系统,日本 JAPAN PROBE 公司的 NAUT21 系统等。在国内,周正干等<sup>[8-11]</sup>研究了空气耦合超声检测的线性调频、非线性调频和相位编码脉冲压缩技术,提高了复合材料中空气耦合超声信号的幅度和信噪比。徐春广等<sup>[12]</sup>研究了空气耦合超声换能器声场的计算方法和测量方法及其基本声学性质。刘战捷等<sup>[13]</sup>采用 SONDA-007CX 空气耦合超声系统进行了蜂窝夹芯复合材料检测试验。但是,目前空气耦合超声无损检测技术仍然没有在航空航天工程领域得到广泛应用,在航空航天先进复合材料的空气耦合超声检测方面仍需要开展必要的试验与验证。

针对这一问题,笔者利用自主研制的空气耦合超声检测系统开展先进复合材料无损检测的应用试验,验证了该技术在航空航天复合材料无损检测方

面的适用性,以推进其在航空航天工程领域的应用。

## 1 空气耦合超声检测的基本原理

空气耦合超声检测技术是以空气作为耦合介质、利用空气耦合超声换能器激励和接收超声波进而检测材料和结构中缺陷的无损检测技术,具有完全无损和非接触的特点,通常采用的检测方法主要包括穿透法、脉冲反射法以及表面波法、兰姆波法等,其中以穿透法的应用最为广泛。基于穿透法的空气耦合超声检测原理示意如图 1 所示。

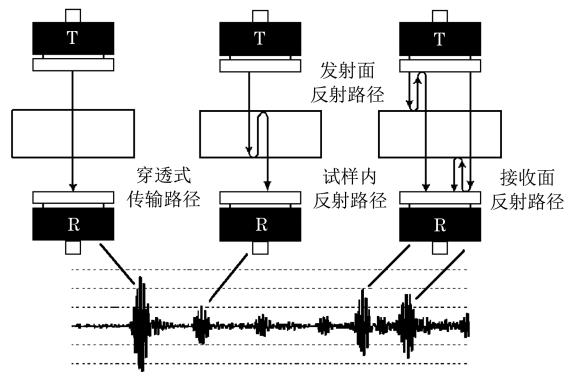


图 1 穿透式空气耦合超声检测技术的基本原理示意

空气耦合超声检测系统与普遍采用的液浸式超声无损检测系统类似,可通过对已有检测系统进行适当改造来实现,重点是需要配置与空气耦合超声换能器相匹配的专用功率放大器和超低噪声前置信号放大器,以提高空气耦合超声信号的幅度和信噪比。典型的穿透式空气耦合超声检测系统的基本原理示意如图 2 所示。

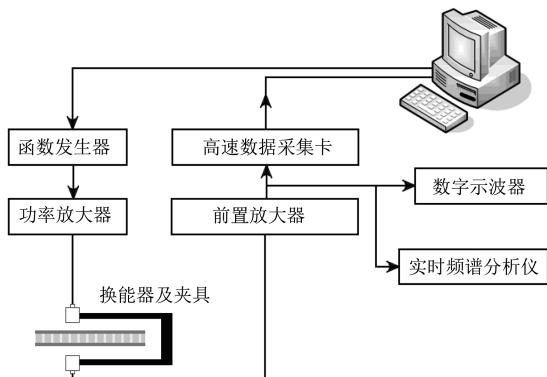


图 2 穿透式空气耦合超声检测系统的基本原理示意

## 2 空气耦合超声无损检测系统

根据空气耦合超声检测技术的基本原理,建立了空气耦合超声无损检测系统<sup>[14-16]</sup>,该系统的总体构成示意见图 3,实物照片如图 4 所示,主要包括任

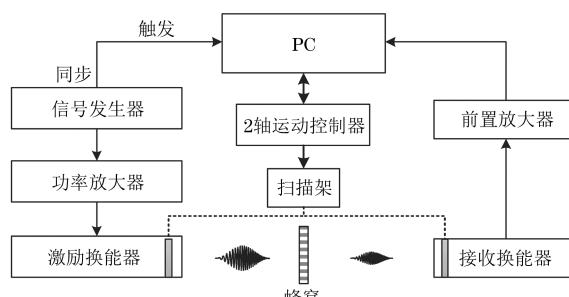


图 3 空气耦合超声无损检测系统的总体构成示意



图 4 空气耦合超声无损检测系统的实物照片

意信号(函数)发生器、功率放大器、空气耦合超声换能器、前置放大器、数据采集卡、运动控制器、2轴运动控制器、2维扫描执行机构和工控机等。

其中,采用的任意函数发生器可以生成任意信号,也可通过软件创建多种自定义的波形信号(包括方波、正弦、尖脉冲及相应的脉冲串,复杂的调频、调相等调制信号以及其他任意自定义信号);采用的功率放大器可以将任意函数发生器产生的信号进行放大并激励发射换能器;配置了一系列不同频率的空气耦合超声换能器来激励和接收超声波信号;采用的前置放大器可以将接收信号的增益放大 164 dB;采用了高性能的工业控制计算机作为控制中枢,计算机中安装了高性能数据采集卡来接收放大后的空气耦合超声信号;采用了多轴运动控制器以匹配 2维扫描执行机构,运动控制器负责接收计算机程序设定的运动参数及采集步进电机编码信息等功能,实现超声扫描成像过程的运动控制,并实时运动状态显示,可设置的扫描范围为 1 820 mm×910 mm;最高扫描速度为 250 mm·s<sup>-1</sup>;最高扫描精度为 0.1 mm。

基于模式化程序设计理论与方法,开发了空气

耦合超声检测软件,软件主界面如图 5 所示。软件基本功能包括:超声信号数据实时采集和存储、扫描过程的运动控制(设置扫描范围、速度及步进精度等)、A 型信号实时显示(多闸门设置、采样率、采集深度设置)、C 扫描成像、A 型信号及 C 扫描图像存储、缺陷分析以及其他信号分析与处理(高通、低通、带通滤波)等。

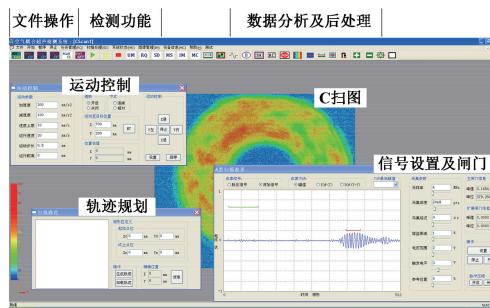


图 5 空气耦合超声无损检测系统的软件主界面

同时,为提高空气耦合超声检测信号的幅度和信噪比,开发了内置多种脉冲压缩算法的专用信号处理程序模块<sup>[8-11]</sup>,如图 6 所示。



图 6 内置多种脉冲压缩算法的专用信号处理程序模块

在空气耦合超声信号处理程序模块的开发过程中,首先基于脉冲压缩信号处理技术的原理、实现方法及参数选优方法,编制了可灵活设置参数的脉冲压缩实时处理模块,该模块不仅可实现线性调频、非线性调频、相位编码脉冲压缩实时处理,同时具备灵活的参数设置功能(包括时宽、带宽、激励信号类型、窗函数、脉冲压缩区间);其后,编制了参数可调的小波阈值滤噪实时处理模块,可实现小波基选取、分解

层数、阈值函数等参数设置。最后,编制了基于小波阈值滤噪及脉冲压缩联合算法的实时处理模块,该模块可实现基于联合信号处理方法的空气耦合超声C扫描检测。

### 3 先进复合材料的空气耦合超声检测

#### 3.1 GFRP 蒙皮 Nomex 蜂窝夹芯复合材料检测

制备了GFRP蒙皮Nomex蜂窝夹芯复合材料试样,试样长度为220 mm、宽度为66 mm、厚度为6 mm,蜂窝芯格边长为3 mm。在GFRP蒙皮和Nomex蜂窝芯层之间预置10片厚度0.1 mm、直径3~15 mm的铜箔片以模拟此类蜂窝夹芯材料中的脱粘型缺陷。

制备的GFRP蒙皮Nomex蜂窝夹芯复合材料试样的结构形式和材料内部模拟缺陷的布置方式如图7所示。

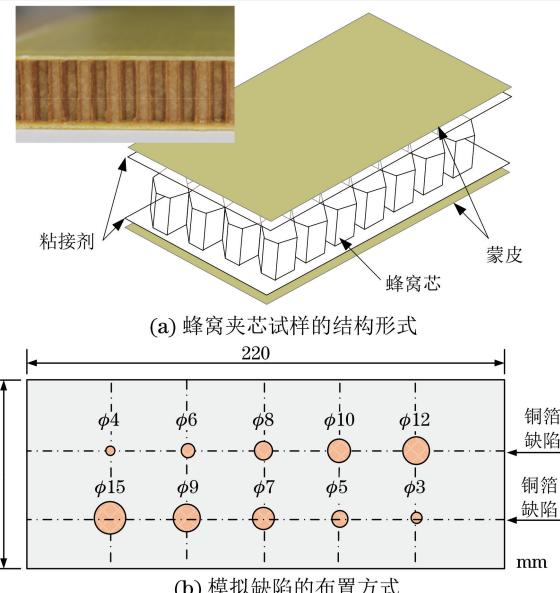


图7 GFRP蒙皮 Nomex蜂窝夹芯复合材料试样结构及模拟缺陷的布置示意

基于研制的空气耦合超声检测系统进行GFRP蒙皮Nomex蜂窝夹芯复合材料检测试验,通过多次试验选定适用于GFRP-Nomex蜂窝夹芯复合材料的检测参数,其中空气耦合超声换能器频率为225 kHz、焦斑直径为1.2 mm、焦距为30.5 mm,扫描过程中的采样点间距为1 mm。采用穿透式空气耦合超声C扫描方法得到的试样图像如图8所示,其中可以观测到直径6 mm以上模拟夹杂缺陷的形状和分布特征。

试验结果表明:采用空气耦合超声无损检测方法可以有效检出GFRP蒙皮Nomex蜂窝夹芯复

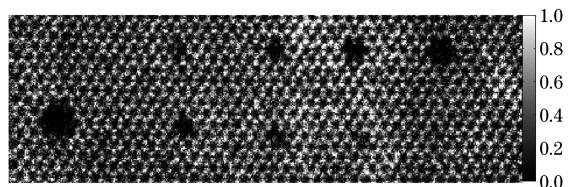


图8 GFRP蒙皮 Nomex蜂窝夹芯复合材料的空气耦合超声C扫描检测

合材料中直径6 mm以上的层间脱粘缺陷;对直径<6 mm的脱粘缺陷,可采用常规水浸/喷水超声检测方法,而空气耦合超声检测方法可以应用于此类材料及结构中大尺寸(直径 $\geq 6$  mm)脱粘缺陷的非接触无损检测。

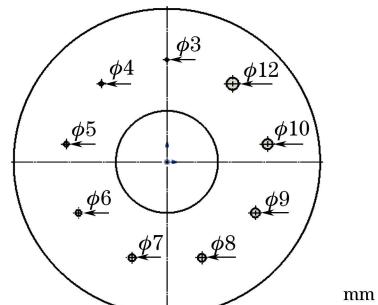
#### 3.2 玻璃钢、碳纤维模压复合材料检测

采用模压法制备了圆形的玻璃钢、碳纤维复合材料试样,在试样中预置了直径尺寸分别为12、10、9、8、7、6、5、4、3 mm的9个圆形铜箔片模拟材料内部的分层缺陷,制备试样的实物照片和模拟缺陷的分布如图9所示。

采用空气耦合超声系统进行玻璃钢、碳纤维模压复合材料检测试验,通过多次试验选定适用于模压复合材料的检测参数,其中空气耦合超声换能器频率为400 kHz、焦斑直径为1.0 mm、焦距为27.94 mm,扫描步长为0.5 mm。为提高模压复合材料中空气耦合超声信号的幅度和信噪比,试验过程中采用了相位编码脉冲压缩和小波滤噪联合处理方法,其参数设置界面如图6所示。采用穿透式空气耦合超声C



(a) 试样实物照片



(b) 模拟缺陷尺寸及分布示意

图9 玻璃钢、碳纤维模压复合材料试样实物照片与模拟缺陷尺寸及分布示意

扫描方法得到的模压复合材料试样图像如图 10 所示, 其中可以观测到直径 5 mm 以上模拟内部分层缺陷的形状和分布特征。

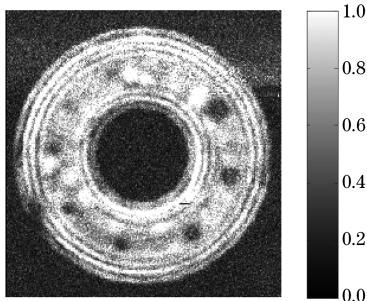


图 10 玻璃钢、碳纤维模压复合材料试样的空气耦合超声 C 扫描图像

试验结果表明:采用空气耦合超声无损检测方法可以有效检出玻璃钢、碳纤维模压复合材料中直径 5 mm 以上的内部分层型缺陷;对直径  $< 5$  mm 且具有体积型特征的分层缺陷, 可采用射线方法进行检测, 而空气耦合超声检测方法可以应用于此类材料及结构中大尺寸(直径  $\geq 5$  mm)分层缺陷的非接触无损检测。

### 3.3 陶瓷基(C/SiC)复合材料检测

制备了模拟材料内部分层缺陷的 C/SiC 复合材料试样。以 T300 碳纤维为增强材料编织成二维叠层碳布, 在碳布层间预置厚度约 0.2 mm 的石墨纸模拟分层缺陷(石墨纸中含有圆形、椭圆、矩形的通孔, 圆形通孔直径 5~15 mm, 矩形通孔长  $\times$  宽约 10 mm  $\times$  8 mm, 通孔处可近似为完整区域, 即不存在分层), 当碳布叠层达到标定厚度时, 采用碳纤维束缝合碳布叠层, 得到二维预制体; 采用化学气相沉积法在二维预制体上沉积热解碳界面层, 并通过化学气相沉积法制备 SiC 基体, 得到厚度约为 4.2 mm 的 C/SiC 复合材料试样, 试样几何尺寸(长  $\times$  宽  $\times$  厚)约 200 mm  $\times$  100 mm  $\times$  4.2 mm。制备的 C/SiC 复合材料试样实物和缺陷分布示意如图 11 所示, 其中缺陷分布图中的灰色矩形区域为预置石墨纸, 石墨纸中的白色圆形和矩形区域为不同形状的通孔。

采用空气耦合超声系统进行陶瓷基(C/SiC)复合材料检测试验, 通过多次试验选定适用于 C/SiC 复合材料的检测参数, 其中空气耦合超声换能器频率为 120 kHz、焦斑直径为 1.8 mm、焦距为 36.7 mm, 扫描步长为 1.0 mm, 扫描范围如图 11(b)中虚线矩形区域所示。采用穿透式空气耦合超声 C 扫描方法得到的试样图像如图 12 所示, 其中可以观测到模拟分层缺陷的形状和分布特征。

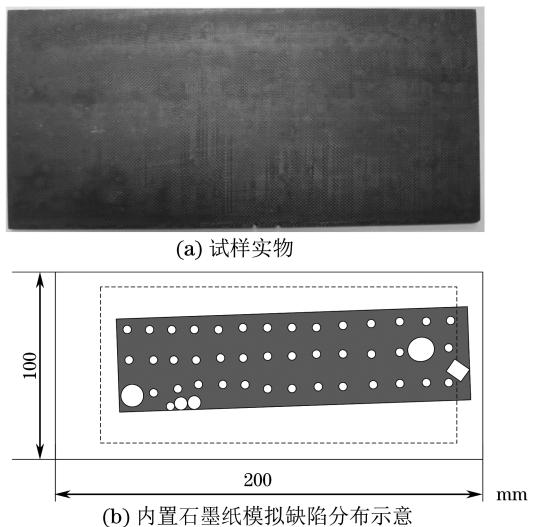


图 11 模拟材料内部分层的 C/SiC 复合材料试样

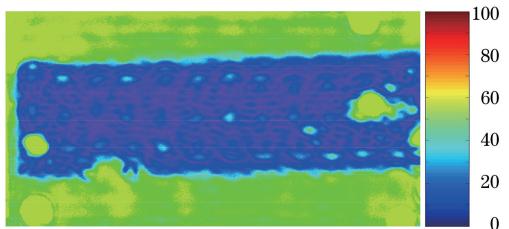


图 12 C/SiC 复合材料试样的空气耦合超声 C 扫描图像

试验表明:采用空气耦合超声无损检测方法可以有效检出陶瓷基(C/SiC)复合材料内部的大尺寸面积型分层缺陷, 并且可以表征 C/SiC 复合材料内部直径 5 mm 以上的分层/非分层区域。

## 4 结论

(1) 自主研制了一套空气耦合超声无损检测系统, 该系统配置了专用的空气耦合超声信号处理程序模块, 可实现线性/非线性调频脉冲压缩算法、相位编码脉冲压缩算法和小波滤噪算法, 以及脉冲压缩/小波滤噪联合处理算法, 能够有效提高空气耦合超声信号的幅度和信噪比。

(2) 空气耦合超声无损检测方法可以有效检出 GFRP 蒙皮 Nomex 蜂窝夹芯复合材料中直径 6 mm 以上的层间脱粘缺陷; 对直径  $< 6$  mm 的脱粘缺陷, 可采用常规水浸/喷水超声检测方法, 而空气耦合超声检测方法可以应用于此类材料及结构中大尺寸(直径  $\geq 6$  mm)脱粘缺陷的非接触无损检测。

(3) 空气耦合超声方法可检出玻璃钢、碳纤维模压复合材料中直径 5 mm 以上的内部分层缺陷; 对直径  $< 5$  mm 且具有体积型特征的分层缺陷, 可采用射线方法进行检测, 而空气耦合超声检测方法可以应用于此类材料及结构中大尺寸(直径  $\geq 5$  mm)分层缺陷

的非接触无损检测。

(4) 空气耦合超声方法可检出陶瓷基(C/SiC)复合材料内部的大尺寸面积型分层缺陷,并且可以表征C/SiC复合材料内部直径5 mm以上的分层/非分层区域。

#### 参考文献:

- [1] 陈绍杰. 大型飞机与复合材料 [J]. 航空制造技术, 2008(15): 32-37.
- [2] 张立同. 国外航空用陶瓷发展趋势 [J]. 航空科学技术, 1994(6): 25-28.
- [3] 张权明. CMC在航天领域的应用 [J]. 宇航材料工艺, 2011(6): 1-3.
- [4] PALMER S B, DIXON S. Industrially viable non-contact ultrasound [J]. Insight, 2003, 45(3): 211-217.
- [5] 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.
- [6] IMIELINSKA K, CASTAINGS M, WOJTYRA R, et al. Air-coupled ultrasonic C-scan technique in impact response testing of carbon fibre and hybrid: glass, carbon and Kevlar/epoxy composites [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157: 513-522.
- [7] PETERS J J, BARNARD D J, HSU D K. Development of a field able air-coupled ultrasonic inspection system [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2004, 23 (23): 1368-1375.
- [8] 周正干, 魏东, 向上. 线性调频脉冲压缩方法在空气耦合超声检测中的应用研究 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 24-28.
- [9] 周正干, 张宏宇, 魏东. 脉冲压缩技术在超声换能器激励接收方法中的应用 [J]. 中国机械工程, 2010 (17): 2127-2131.
- [10] 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]. 2012, 48(16): 8-13.
- [11] 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]. 2014, 50(2): 48-54.
- [12] 孔涛, 徐春广, 张运涛, 等. 空气耦合超声换能器声场计算与测量研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (22): 19-24.
- [13] 刘战捷. 空气耦合超声无损检测技术应用 [C]//第八届全国无损检测大会会议论文集. 苏州: [出版者不详], 2003.
- [14] YANEZ Y, GARCIA-HERNANDEZ M J, SALAZAR J, et al. Designing amplifiers with very low output noise for high impedance piezoelectric transducers [J]. NDT & E International, 2005, 38 (6): 491-496.
- [15] SALAZAR J, TURO A, CHAVEZ J A, et al. High-power high-resolution pulser for air-coupled ultrasonic NDE applications [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52(6): 1792-1798.
- [16] KAZYS R, MAZEIKA L, ZUKAUSKAS E. Investigation of accurate imaging of the defects in composite materials using ultrasonic air-coupled technique [J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2011, 41(1): 105-116.

(上接第5页)

- [7] ZHANG W, SONG Y, YANG Z, et al. Infrared thermal wave nondestructive technology on the defect in the shell of solid rocket motor [C] // 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies. Dalian: International Society for Optical Engineering, 2010: 76590V-76590V-6.

- [8] GUO X, VAVILOV V. Pulsed thermographic evaluation of disbonds in the insulation of solid rocket motors made of elastomers [J]. Polymer Testing, 2015, 45: 31-40.
- [9] VAVILOV V P, BURLEIGH D D, KLIMOV A G. Advanced modeling of thermal NDT problems: from buried landmines to defects in composites [J]. Proc Spie, 2002, 4710:507-521.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告