

机器人辅助激光超声检测系统及参量匹配方法*

孙广开^{1,2}, 曲道明¹, 周正干²

(1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心 北京 100192;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083)

摘要:为解决飞行器复合材料构件的非接触、高精度无损检测问题,提出基于关节型机器人的激光超声检测系统及光声学参量匹配方法。采用有限元方法建立层状复合材料模型,计算分析材料层状各向异性导致激光超声的非对称分布、声束倾斜和畸变特征,结合实验分析得出利用激光超声表征分层的光声学参量匹配方法。在系统设计上,利用1 064 nm波长的Nd:YAG脉冲激光器激励超声波,利用基于光折变效应的双波混合干涉测量系统探测超声信号,激励和探测激光由光纤传导并投射至被检测工件表面,采用精密六轴关节型机器人作为C型扫描装置,建立系统的实验室原型,实现碳/环氧复合材料试样的C型扫描检测,得到试样中模拟缺陷的分布、形状和尺寸特征,验证了检测系统及参量匹配方法的有效性。研究表明,研制的机器人辅助激光超声检测系统可以实现碳/环氧复合材料内部直径1 mm以上分层的检测与成像,在飞行器复合材料构件的无损检测方面具有应用前景。

关键词:激光超声;无损检测;复合材料;航空制造

中图分类号: TH878⁺.2 TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Robot assistant laser ultrasonic test system and its parameter matching method

Sun Guangkai^{1,2}, Qu Daoming¹, Zhou Zhenggan²

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instrument, Beijing Information Science & Technology

University, Beijing 100192, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of non-contact and high precision non-destructive test of aircraft composite material structures, a laser ultrasonic test system based on articulated robot and optoacoustic parameter matching method is proposed. The model of layered anisotropic composite material is built with finite element method, and the characteristics of the asymmetric distribution and beam tilt and distortion of laser ultrasonic induced by the layered anisotropic property of the material are calculated and analyzed. The optoacoustic parameter matching method using laser ultrasonic to characterize the delamination is obtained based on the numerical simulation and experiment results. In the system design, an Nd:YAG pulse laser with 1 064 nm wavelength is used to generate the ultrasonic signal, and the ultrasonic signal is detected by a two wave mixing laser interference system based on photorefractive effect. The exciting and detecting lasers are transmitted by the optical fibers and projected on the surface of the target under test. A precise six-axis articulated robot is adopted as the C-scan device. The laboratory prototype of the system was built, the C-scan test of the carbon fiber reinforced plastic (CFRP) specimen was realized, and the shape, size and distribution characteristics of the simulated defects in the specimen was obtained. Thus the effectiveness of the test system and parameter matching method is verified. The research results prove that the developed robot assistant laser ultrasonic test system can realize the detection and imaging of the internal delamination with diameter larger than 1 mm in the CFRP composite specimen, and has application prospect in the nondestructive test of aircraft composite material structures.

Keywords: laser ultrasonic; non-destructive test; composite material; aeronautical manufacture

收稿日期:2017-01 Received Date: 2017-01

* 基金项目:教育部“创新团队发展计划”光电信息与仪器(IRT_16R07)、北京市教委科技发展计划(KM201511232021)、北京市教委创新能力提升计划(TJSHG201510772016)、国家自然科学基金(U1430120)项目资助

0 引言

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。在复合材料结构的制造和使用过程中,超声无损检测技术是检测结构中各类缺陷并评价其安全性能的关键技术,在保证飞行器的制造质量和安全可靠性能方面发挥着重要的作用^[1-3]。近30年间,为满足大承载和高性能新机种零部件的制造需要,复合材料技术迅速发展,使用量大幅增加,新材料、新结构、新工艺不断出现,整体成型制造的大型复杂型面的复合材料结构日益增多。目前,空客A350、波音B787等新一代中大型客机的复合材料用量已达到50%以上,洛克希德·马丁的F-22、F-35飞机复合材料用量分别达到约24%和36%,并大量用于飞机主承力结构的设计制造,如中央翼盒、尾翼、翼肋等^[4-5]。随着复合材料技术的应用发展,广泛采用的压电超声检测技术已经无法满足生产实际需要,如大幅提高大型复杂结构的扫描效率,高精度地检测孔边、拐角等特殊部位的小缺陷,不适合使用耦合剂的新材料的非接触检测等。另外,老旧飞机复合材料部件的原位快速扫描检测也成为一大问题^[6-8]。这种情况下,激光超声无损检测技术以其突出的技术特点和优势在航空工程领域受到广泛关注,从20世纪80年代至今一直是研究的热点^[8]。

激光超声检测技术利用激光来激励和探测超声波,根据超声波与材料作用的散射或衰减等性质检测材料与结构中的缺陷。与压电超声检测技术相比,激光超声技术可以在不垂直构件表面的条件下远距离地激励和探测超声波,并利用激光扫描镜技术对大型复杂型面构件进行高效率的自动扫描检测,可以高分辨地检测孔边、拐角等超声探头难以到达的位置,能够实现特殊材料与结构的非接触检测,也可对飞机部件进行原位快速检测。因此,该技术是解决飞机复合材料构件无损检测问题的有效技术方法。

早在20世纪80年代初,通用动力就预测利用激光超声技术能够大幅缩短复合材料结构的检验检测周期、降低生产成本,并在1983年启动一项专门的技术研究和设备研制计划^[8-9]。到20世纪80年代末,通用动力率先建立起完备的工业用激光超声无损检测系统原型机,示范了复合材料结构的激光超声检测。20世纪90年代初,在美国空军项目资助下,通用动力对激光超声检测系统原型机进行了改进升级,并在1997年建立起工业型激光超声检测系统用于F-35飞机计划,以提高飞机复合材料部件的检测效率,降低制造成本。与此同时,洛克威尔国际科学中心开展了复合材料构件激光超声检测技术的研究工作,但于20世纪90年代末在没有实现技术应用

的情况下停止了相关研究。在2000~2005年间欧洲启动了一项为期4年的激光超声原型机研究计划,但是至今没有实现技术设备的工业应用。从2000年起,洛克希德·马丁陆续安装了两套激光超声系统用于检测F-22和F-35等飞机的复合材料构件。2005年洛克希德·马丁基于多年的技术应用积累和实际技术需求,启动了一项5年计划以提高激光超声检测设备的技术指标,主要研究大功率、高重复频率CO₂脉冲激光器使用寿命的延拓,新型的激光激励装置,新型的激光探测装置,以及新型的机器人方案。2010年洛克希德·马丁开发出一种新型的工业激光超声检测设备(型号iPLUS),该设备采用高性能的大功率CO₂脉冲激光器激励超声波,采用改进的双腔CFP激光干涉装置探测超声信号,采用六轴关节型机器人进行空间定位,并采用二维精密光学扫描器对构件进行快速扫描检测。2011年空客购置了一套iPLUS型激光超声设备开始进行飞机复合材料构件的激光超声检测试验。目前,激光超声无损检测技术与设备经过50多年的研究和发 展,除洛克希德·马丁等少数机构使用外,仍然没有在航空工程领域得到广泛应用。DUBOIS分析指出,目前激光超声检测设备的购置和维护成本高昂,尚无法在应用成本、检测性能和系统可靠性之间达到平衡,这是限制该技术广泛应用的主要因素。

本文从航空制造领域的复合材料无损检测应用需求和限制技术应用的主要因素出发,提出基于关节型机器人的非接触激光超声无损检测系统及光声学参量匹配方法。利用波长1064 nm的Nd:YAG脉冲激光器激励超声波,利用基于光折变效应的双波混合干涉测量系统探测超声信号,采用关节机器人作为扫描机构,实现碳/环氧复合材料的激光超声成像检测,得到模拟缺陷的分布、形状和尺寸特征,验证了检测系统和参量匹配方法的有效性。

1 数值模型与计算方法

1.1 层状复合材料模型

采用有限元方法建立层状复合材料模型,模型的几何尺寸为86 mm×44 mm×8.6 mm。在复合材料建模过程中,先依序建立43个单向的碳/环氧预浸料模型,然后通过布尔运算将43个单向碳/环氧预浸料模型合成为一个43层的碳/环氧复合材料模型,通过设置各层单元材料性能主方向模拟复合材料各层结构性能,铺层方式为 $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{43}$ 。材料的物理性能参数如表1和2所示,其中 ρ 是密度、 c 是比热容、 λ 是热导率、 α 是热膨胀系数、 E 是弹性模量、 ν 是泊松比、 G 是剪切模量。

表 1 有限元计算采用的复合材料热学性能参数

Table 1 Thermal property parameters of the composite material used in finite element calculation

$c/$ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	$\lambda/$ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	$\alpha_1/$ K^{-1}	$\alpha_2/$ K^{-1}	$\alpha_3/$ K^{-1}
880	238.6	2.38×10^{-5}	70	0.33

表 2 有限元计算采用的复合材料力学性能参数
Table 2 Elastic properties of composite material used in finite element calculation

$\rho/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	E_{33}/GPa	G_{12}/GPa
1550	150	10	10	4.9
G_{13}/GPa	G_{23}/GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
4.9	3.2	0.33	0.33	0.44

1.2 热弹耦合计算方法

脉冲激光与固体材料作用产生的热弹性效应以其不损伤材料的特点成为激光超声无损检测采用的主要超声激发机制。通常采用热弹性耦合理论描述激光超声的热弹激发与传播过程,热弹耦合方程的有限元形式可表示为^[17-18]:

$$KT + C\dot{T} = R_q + R_Q \tag{1}$$

$$M\ddot{U} + KU = R_{ext} \tag{2}$$

式中: K 是传导矩阵, T 是温度向量, C 是热容矩阵, T 是温升率向量, R_q 热通量向量, R_Q 是热源向量, M 是质量矩阵, U 是位移矢量, \ddot{U} 加速度矢量, R_{ext} 是外力矢量。

根据式(1)、(2)所示的热弹耦合有限元方程,采用准定常假设条件,将热弹耦合机制分解为两个阶段进行数值计算。第 1 阶段,将脉冲激光等效为热流载荷施加在材料模型表面,基于热传导方程计算脉冲激光在材料中产生的温度场的传播过程,得到不同时刻材料模型各节点的温度载荷。第 2 阶段,将计算得到的随时间变化的温度载荷作为激励载荷施加于材料模型各节点,基于热弹方程计算弹性波的产生和传播过程。为保证数值计算精度,采用的时间步长和单元长度选择依据如式(3)。

$$\Delta t \leq \frac{1}{180f_{max}}; L_e \leq \frac{\lambda_{min}}{20} \tag{3}$$

式中: Δt 是积分时间, f_{max} 是分析涉及的最高声波频率, L_e 是单元长度, λ_{min} 是分析涉及的最小波长。

采用有限元方法计算分析层状复合材料中激光超声的激励与传播过程。第 1 阶段的温度场计算阶段,采用的单元类型为适用于瞬态热分析的三维 20 节点热单元,各节点具有单一的温度自由度,计算得到全部节点的随时间变化的温度数据;第 2 阶段的弹性波计算阶段,采用的单元类型为三维 20 节点结构实体单元,各节点具有沿 X、Y、Z 方向的自由度,将温度载荷作为激励载荷施加到各单元节点,计算得到全部节点的随时间变化的位移、应力、应变数据,可以表示形成的超声场。

2 实验装置设计

2.1 机器人辅助激光超声检测系统的总体设计

图 1 所示为本文提出的基于关节型机器人的激光超声无损检测系统的总体结构。该系统利用一台光纤传导脉冲激光器激励超声波,脉冲激光器产生的激光束由低损耗光纤传导至激光聚焦端口投射到被检物表面,激励激光的焦斑尺寸可通过更换聚焦端口透镜调节;利用一套基于光折变效应的双波混合干涉测量系统探测超声信号,探测激光的传导、聚焦方式与激励激光方式相同;利用前置放大器和组合滤波器处理探测到的模拟超声信号,并由数据采集卡转换为数字信号,进而完成超声信号数据的接收和采集;采用一套精密六轴关节型机器人系统作为仿形扫描装置,以实现各种复合材料结构的自动仿形扫描检测;机器人的关节末端装有两个三维微位移平台及固定面板,用于安装激光聚焦端口并精密调节投射激光的距离和位置,在扫描过程中使激励和探测激光焦斑的相对位置保持稳定且探测激光与工件表面法线方向平行;利用机器人控制程序,通过导入工件数模或示教插值的方式可生成机器人仿形扫描轨迹,并控制扫描运动过程,反馈位置坐标数据到位于上位机的检测程序。

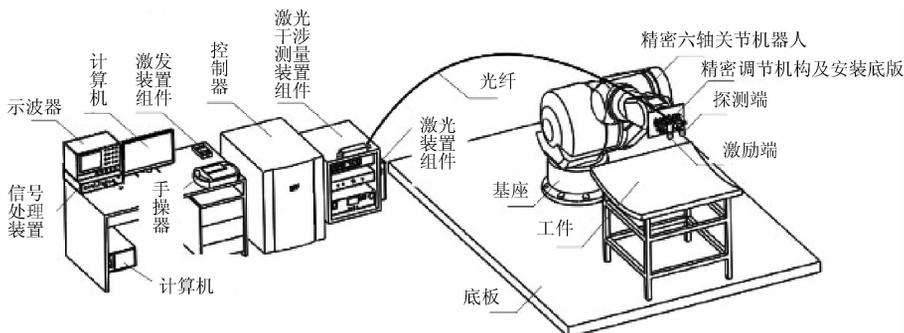


图 1 激光超声无损检测系统总体结构

Fig. 1 Overall structure diagram of laser ultrasonic non-destructive test system

如上所述,与 LaserUT、iPLUS 等激光超声检测系统不同,该系统在总体设计上直接采用精密六轴关节型机器人作为仿形扫描装置,而没有采用二维精密光学扫描器作为高效扫描装置。这种方式降低了系统复杂度和对探测系统的技术要求,可使探测激光在扫描过程中始终保持与工件表面法线方向平行,进而使探测系统对材料表面粗糙度和结构型面变化具有良好的适应性。

2.2 激光超声的激励与探测装置

设计的激光超声激励与探测装置的主要仪器部件与组成结构如图 2 所示。

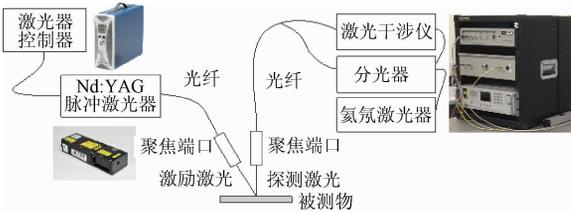


图 2 激光超声的激励与探测装置

Fig. 2 Laser ultrasonic excitation and detection devices

在激光超声激励装置设计上,采用 QUANTEL ULTRA 20 型 Nd:YAG 脉冲激光器作为激励源,激光波长 1 064 nm、脉冲宽度 10 ns、脉冲能量 0 ~ 20 mJ;采用金属管包裹的纤芯直径 2 mm 的阶跃折射率多模光纤将脉冲激光从激励源传导至聚焦输出端口;聚焦端口输出的脉冲激光光斑直径为 3 mm,采用不同的聚焦透镜可调节端口输出脉冲激光的光斑直径。

在激光超声探测装置设计上,采用基于光折变晶体的 LUKS-1550-TWM 型双波混合干涉仪和 He-Ne 激光器、分光器组成探测装置接收超声信号。采用单模光纤传导探测激光,探测激光波长 1 550 nm,探测光斑直径 200 μm,探测装置的频带响应范围 50 kHz ~ 125 MHz。

采用 Olympus 前置放大器和组合滤波器处理接收信号,提高超声信号电压和信噪比,并在一定频率范围提取窄带信号。前置放大器的增益范围为 0 ~ 40 dB、频带响应范围为 50 kHz ~ 10 MHz。组合滤波器的频率范围为 1 ~ 10 MHz,频率调节量 1 MHz。

2.3 扫描装置及控制程序

为实现各种复合材料构件的扫描检测,采用 Staubli RX160 型精密六轴关节机器人作为扫描装置,扫描检测的工作行程 1 710 mm,实测重复定位精度 ±0.02 mm/m。采用 Robotmaster 程序生成扫描运动轨迹数据,通过 Staubli CS8C 控制器处理扫描数据、控制扫描过程。基于以上硬件平台,开发一套与机器人系统匹配的激光超声 C 扫描检测控制程序,实现扫描检测与成像的同步控制。图 3 所示为本文建立的基于关节机器人的激光超声检测系统实物。

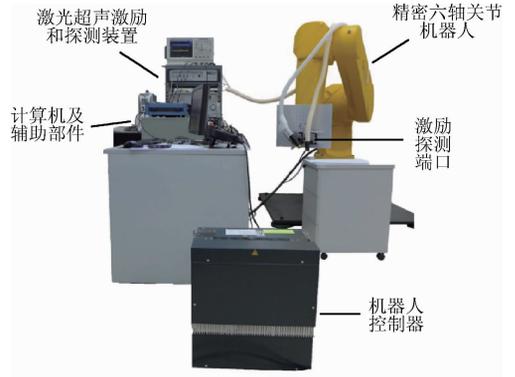
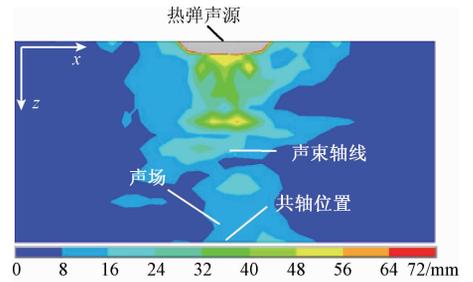


图 3 基于关节机器人的激光超声检测系统实物
Fig. 3 Photo of the articulated robotic laser ultrasonic test system

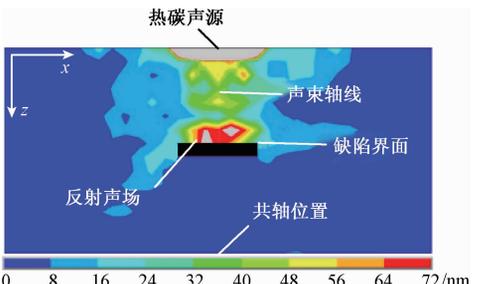
3 数值计算与实验验证

3.1 层状复合材料中激光超声场的分布特征

图 4(a)所示为采用完好结构模型计算得出的均匀各向同性和层状各向异性材料中光激超声场的纵向截面瞬态位移分布(2.0 μs),其中 0 ~ 72 nm 表示位移幅度范围。图 4(b)所示为采用模拟缺陷模型计算得出的光激超声场瞬态位移分布(2.0 μs),模拟缺陷界面长度 3 mm、距模型表面 4.5 mm。计算采用的主要参量为脉冲激光能量 1.8 mJ、脉冲宽度 10 ns、光斑直径 3 mm,激光光斑中心与分层中心沿材料表面法向同轴,积分时间步长 0.5 ns、单元长度 10 μm。



(a) 完好结构声场分布
(a) Acoustic field distribution for intact structure



(b) 含缺陷结构声场分布
(b) Acoustic field distribution for defect structure

图 4 层状复合材料中激光超声的声场分布
Fig. 4 The acoustic field distribution of laser ultrasonic for layered composite material

由图 4(a) 分析得出在激光超声的热弹性激励机制下, 碳/环氧复合材料中的光激声场沿材料法线呈非对称型分布特征, 声波在传播过程中产生非对称的声束倾斜和畸变。对比分析图 4(a)、(b) 得出对于碳/环氧复合材料的内部分层缺陷, 其界面与光激声场作用产生的反射声场呈非对称型分布特征, 并导致显著的透射声能衰减。

以上分析表明, 利用激光超声表征碳/环氧复合材料内部分层缺陷时, 材料的层状各向异性特征会导致入射声波和分层界面反射回波的非对称传播和声束倾斜与畸变; 采用微米级光斑的激光探测装置进行高分辨力检测时, 最大声波幅度不一定在表面声源中心或底面相对位置测得; 扫描过程中, 探测相对位置应保持恒定以避免其微小偏差导致的探测超声幅度的不规律变化, 进而提高缺陷量化表征准确度。

3.2 碳/环氧复合材料缺陷的激光超声检测

采用热压罐成型工艺制备碳/环氧复合材料试样, 试样几何尺寸约 86 mm × 44 mm × 8.6 mm, 碳纤维型号 HT3、环氧树脂型号 NY9200、碳纤维预浸料厚度约 0.2 mm、铺层数量 43 层, 铺层方式为 [0°/45°/-45°/90°]₄₃。在试样制备过程中, 在试样内部横向布置聚四氟乙烯圆片模拟分层, 圆片数量 10、厚度 0.5 mm、直径 1~9 mm、埋深约 1.5~5.5 mm。试样实物如图 5 所示, 预置缺陷尺寸及深度位置如表 3 所示。



图 5 碳/环氧复合材料试样实物

Fig. 5 Photo of the carbon fiber reinforced plastic composite specimen

表 3 预置模拟缺陷尺寸及深度位置

Table 3 Preset size and depth location of simulated defects (mm)

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
直径	1	3	5	7	9	3	3	5	7	9
深度	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	1.5	5.5	5.5	5.5	5.5

由于波长 1 064 nm 的脉冲激光在碳/环氧复合材料中具有较大的侵彻深度, 大部分激光能量会穿过材料表层环氧层进而被碳纤维层吸收, 导致纤维层温度大幅升高, 可能灼伤环氧基体^[10-12]。因此, 需要采用相对较小功

率密度的脉冲激光辐照碳/环氧复合材料表面, 使碳纤维层吸收激光能量后的温度低于环氧基体的熔蚀阈值, 这种情况下将形成具有大埋深特征的热弹性声源, 进而在不灼伤环氧基体的条件下产生相对较高幅度的超声波。

利用激光超声检测系统实验分析不同脉冲激光功率密度条件下碳/环氧材料表面的熔蚀情况。利用 1 064 nm 波长的脉冲激光辐照碳/环氧复合材料试样表面, 脉冲激光时间宽度 10 ns、聚焦光斑直径 3 mm, 通过调节脉冲能量改变脉冲功率密度, 采用 LEICA DM4000M 型金相显微镜观测试样表面熔蚀情况, 实验得到脉冲功率密度在 $2.5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ W/cm² 范围时试样表面熔蚀程度如图 6 所示。分析图 6 得出, 当脉冲激光功率密度在 2.5×10^6 W/cm² 时材料表面没有明显可见灼伤, 此时超声波主要由热弹性效应产生。

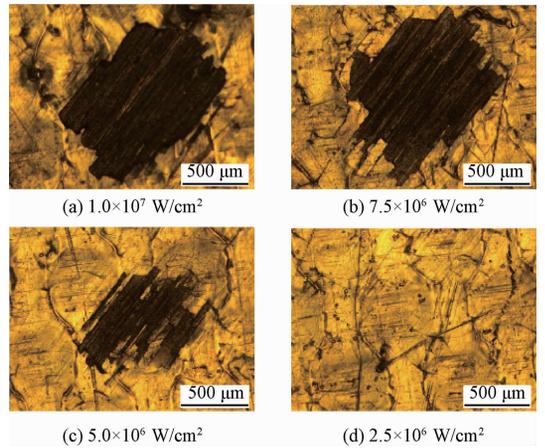
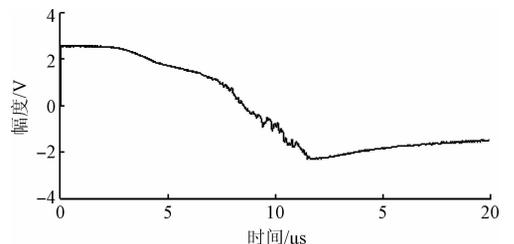


图 6 碳纤维复合材料表面受激光作用区域的显微图

Fig. 6 Micrograph of the laser illuminated area on the surface of the CFRP specimen

在此条件下, 采用双波混合干涉仪探测激光超声信号, 探测光斑位于激励光斑中心位置^[13-15], 接收信号增益提高 40 dB, 得到的激光超声信号如图 7 所示。分析图 7 得出, 脉冲激光在碳/环氧复合材料中产生的超声波具有宽频带性质, 超声幅度随频率增加呈指数减小趋势, 超声能量主要分布在 2 MHz 以内, 在 2~10 MHz 频率范围也分布有一定的超声能量, 可以从宽带信号中提取特定窄带信号成分用于检测缺陷。



(a) 激光超声信号时域波形
(a) Time-domain waveform of laser ultrasonic signal

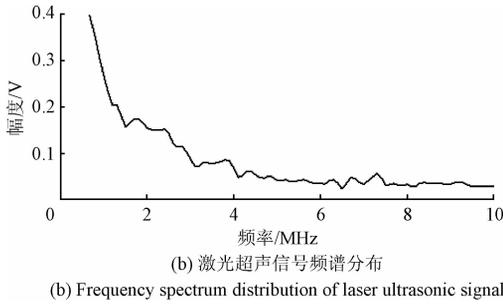


图7 脉冲激光在碳/环氧复合材料中产生的超声信号
Fig. 7 Ultrasonic signal generated by a pulse laser in the CFRP composite material

基于图4所示的复合材料完整结构和模拟分层结构模型激光超声传播计算结果,选择模型表面声源中心节点提取以位移表示的宽带激光超声信号并采用带通滤波器截取3~5 MHz频率成分,得到的窄带激光超声信号如图8(a)所示。利用图3所示实验装置和图5所示试样进行相应实验分析,主要实验参量为脉冲激光功率密度约 $2.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 、脉冲宽度10 ns、光斑直径3 mm,分层界面长度3 mm、距试样表面约4.5 mm,得到碳/环氧试样有、无分层位置的窄带激光超声反射信号如图8(b)所示。

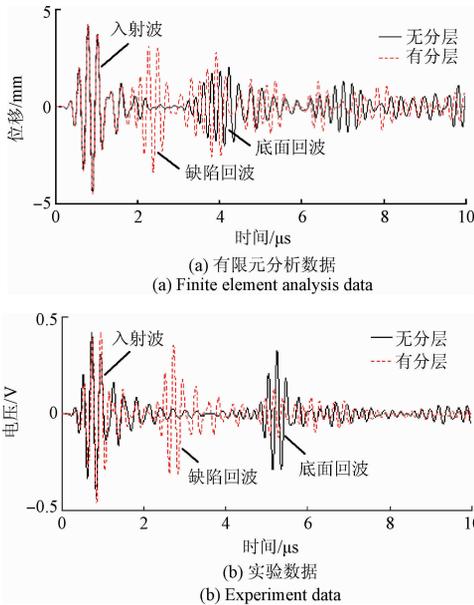


图8 复合材料完整区和分层区的激光超声反射信号
Fig. 8 Laser ultrasonic reflected signals in intact and layered areas of composite material

由图8(a)、(b)可以观测到碳/环氧复合材料内部分层界面的激光超声反射信号,表明采用计算和实验方法得到的基于声波反射的缺陷表征具有一致性,而导致波形特征和到达时间存在差异的主要原因为:模型与试样的性能参量和细观结构存在一定差异;基于热弹耦合理

论的数值计算存在误差。

3.3 激光超声频率和探测位置参量选取

为选择窄带激光超声信号频率得到高幅度的分层反射回波,基于在碳/环氧材料分层模型表面声源中心提取的原始宽带激光超声信号和相应实验得到的宽带超声信号,采用不同中心频率的滤波器提取窄带成分的激光超声信号,计算得到分层界面反射回波幅度与声波频率的对应关系如图9所示,其中反射系数定义为分层界面反射回波幅度与入射声波幅度的比值。

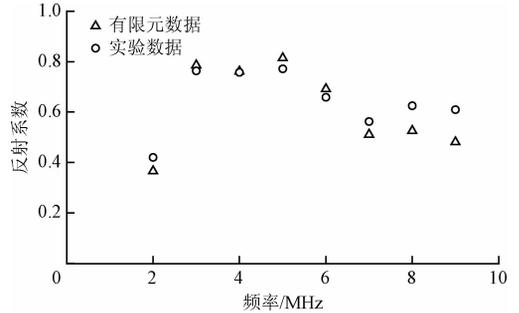


图9 复合材料分层的激光超声反射系数谱
Fig. 9 Reflection coefficient spectrum of laser ultrasonic for the delamination in composite material

分析图9得出,表征碳/环氧材料分层的激光超声反射系数随声波频率增加不呈线性变化关系,其最小值对应于2 MHz频率成分,最大值对应5 MHz频率成分,在3~5 MHz频率范围声波具有较高的反射系数,而在6~9 MHz频率范围反射系数相对较小。根据超声衰减机制和层状各向异性材料激光超声传播特性,分析得出导致相对高频成分反射系数减小的主要原因:1)高频反射回波在传播过程中的衰减量显著增大而回波幅度减小;2)高频声波的波长更短,对材料的层状各向异性更灵敏,声波的非对称传播和声束倾斜与畸变更严重,采用高分辨力激光探测方法得到的分层反射回波幅度减小。

基于以上分析,对于碳/环氧复合材料内部直径3 mm以上分层,可在3~5 MHz频率范围提取窄带激光超声信号,利用脉冲反射法根据分层界面反射回波幅度表征分层缺陷。

为选择声波探测位置得到高幅度分层反射回波并保持回波信号稳定,基于碳/环氧材料分层模型和实验装置与试样进行计算和实验分析,主要参量与图5对应参量相同并采用精密位移平台控制探测激光光斑位置,得出探测激光光斑以0.5 mm间距沿正、负方向偏离声源中心过程中探测到的分层回波反射系数与声波测量位置的对应关系如图10所示,其中测量位置“0”对应于声源中心位置,“-1”和“1”表示向声源中心两侧偏离1 mm距离。

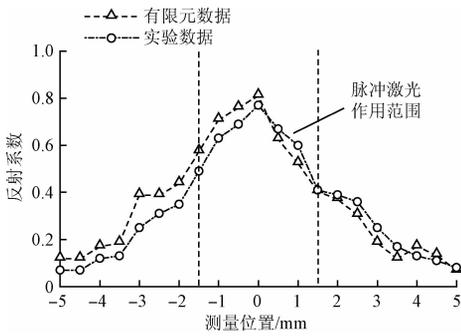


图 10 激光超声反射系数与测量位置关系

Fig. 10 Relationship between reflection coefficient of laser ultrasonic and measurement position

分析图 10 得出,复合材料分层回波的反射系数随激光探测位置偏移呈非对称分布和不规律变化,根据计算数据在声源中心(测量位置“0”)探测到分层回波的反射系数为 0.81,当探测位置向声源中心两侧偏离 0.5 mm 时分层回波反射系数分别减小至 0.62 和 0.76,实验数据反映出相同的变化特征。数据表明可以选择声源中心位置探测反射回波信号表征分层缺陷;当探测激光光斑出现 0.5 mm 微小位置偏移时分层回波幅度变化显著且呈非对称性的不规则波动,进而影响分层缺陷的量化表征;采用高分辨力激光探测装置进行扫描过程中,需要精密控制探测激光光斑空间相对位置使其保持恒定,减小探测位置偏移对分层反射回波幅度的影响,提高分层缺陷的量化表征准确度。

4 复合材料缺陷的成像检测

利用设计建立的激光超声检测系统,采用脉冲反射法对碳/环氧复合材料模拟分层试样进行 C 扫描成像检测实验^[16-18],根据碳/环氧复合材料试样底面回波信号的幅度变化表征缺陷^[19-20],检测结果如图 11 所示。实验采用的主要参量为脉冲激光功率密度 $2.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 、光斑直径 3 mm、超声频率 2~3 MHz;探测激光光斑直径约 200 μm ;扫描采样点间距 0.2 mm,探测激光光斑位于声源中心位置,并精密调节、控制探测光斑相对位置使其偏移量小于 0.5 mm。

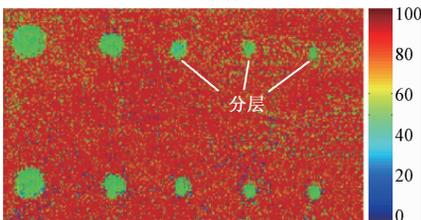


图 11 碳/环氧材料模拟分层试样的激光超声 C 扫描检测

Fig. 11 C scan image for the CFRP specimen with simulated delamination using laser ultrasonic

从图 11 中可以观测到碳/环氧复合材料试样内部直径 1~9 mm 的模拟分层缺陷,其形状和分布特征与图 5 (b) 所示预置模拟缺陷特征一致。

根据图 11 所示检测数据,通过 C 扫描控制程序测量得到与表 1 中 10 处分层位置对应的实测分层尺寸和深度位置数据如表 4 所示,其中分层尺寸为测量得到的分层尺寸的最大值,分层深度位置是采用反射法根据分层回波信号计算得出的深度值。对比分析表 3 和 4 数据得出,模拟分层缺陷直径测量误差的绝对值在 1 个采样间距(0.2 mm)范围、缺陷深度位置测量误差的绝对值不大于 0.3 mm。

表 4 激光超声检测程序测量得到的缺陷尺寸和位置

Table 4 The size and depth location of simulated defects measured with the laser ultrasonic test program

		(mm)									
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
尺寸	1.2	3.2	4.8	7.2	8.8	3.2	3.2	5.2	6.8	9.2	
误差	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
深度	3.6	3.4	3.7	3.8	3.3	1.7	5.6	5.3	5.7	5.5	
误差	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.0	

实验结果验证了该系统及参量匹配方法用于碳/环氧复合材料扫描成像检测的有效性。

5 结 论

本文设计建立了基于关节机器人的激光超声无损检测系统的原型机,分析了检测参量的匹配方法,验证了该系统应用于碳/环氧复合材料检测的有效性,得出主要结论如下。

1) 利用 1 064 nm 波长的脉冲激光辐照碳/环氧复合材料试样表面激励超声波,当脉冲激光功率密度在 $2.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时材料表面无明显可见灼伤,此时材料表层纤维吸收大部分光能后的温度低于环氧基体的熔蚀阈值,超声波主要由热弹效应产生。

2) 受到材料层状各向异性性质影响,碳/环氧复合材料中的激光超声具有非对称传播和声束倾斜与畸变特征,热弹性光激声场和分层界面反射声场呈非对称不规则分布,并随时间呈不规则变化。

3) 脉冲激光在碳/环氧复合材料中产生的超声波具有宽频带性质,超声幅度随频率增加呈指数减小趋势,超声能量主要分布在 2 MHz 以内,在 2~10 MHz 频率范围分布有一定的超声能量,可以从宽带信号中提取一定频率的窄带信号成分用于检测缺陷。

4) 采用脉冲反射法时,可选择声源中心位置探测反

射信号表征分层;在3~5 MHz 频率范围提取窄带成分以获得高反射系数;精密控制探测光斑位置,减小探测位置偏移对信号幅度的显著影响,提高分层表征准确度。

5) 利用建立的激光超声检测系统,通过检测缺陷回波信号或试件底面反射回波信号幅度变化可以表征碳/环氧复合材料中的分层缺陷,通过对试件进行激光超声C扫描检测可以得到分层的形状、尺寸和分布特征,实验结果验证了该系统用于碳/环氧复合材料检测的有效性。

参考文献

- [1] QIU L, LIU B, YUAN S F, et al. Impact imaging of aircraft composite structure based on a model-independent spatial-wavenumber filter [J]. *Ultrasonics*, 2016, 64(7): 10-24.
- [2] BABBAR V K, UNDERHILL P R, STOTT C, et al. Finite element modeling of second layer crack detection in aircraft bolt holes with ferrous fasteners present [J]. *NDT&E International*, 2014, 65(5): 64-71.
- [3] KATUNIN A, DRAGAN K, DZIENDZIKOWSKI M. Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques [J]. *Composite Structures*, 2015, 127(9): 1-9.
- [4] MARTARELLI M, CHIARIOTTI P, PEZZOLA M, et al. Delamination detection in composites by laser ultrasonics [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2014, 1600(1): 405-412.
- [5] KARABUTOV A A, PODYMOVA N B. Quantitative analysis of the influence of voids and delaminations on acoustic attenuation in CFRP composites by the laser-ultrasonic spectroscopy method [J]. *Composite Part B*, 2014, 56(1): 238-244.
- [6] LI C, PAIN D, WILCOX P D, et al. Imaging composite material using ultrasonic arrays [J]. *NDT&E International*, 2013, 53(16): 8-17.
- [7] HERNANDEZ-VALLE F, DUTTON B, EDWARDS R S. Laser ultrasonic characterisation of branched surface-breaking defects [J]. *NDT&E International*, 2014, 68(12): 113-119.
- [8] DUBOIS M, DRAKE T E. Evolution of industrial laser-ultrasonic systems for the inspection of composites [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2011, 26(3-4): 213-228.
- [9] CHIA C C, LEE J R, PARK C Y, et al. Laser ultrasonic anomalous wave propagation imaging method with adjacent wave subtraction: Application to actual damages in composite wing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(2): 428-440.
- [10] ZHOU Z G, SUN G K, CHEN X C, et al. Detection of drilling-induced delamination in aeronautical composites by noncontact laser ultrasonic method [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(12): 2656-2663.
- [11] PELIVANOV I, SHTOKOLOV A, WEI C W, et al. A 1kHz A-scan rate pump-probe laser-ultrasound system for robust inspection of composites [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2015, 62(9): 1696-1703.
- [12] CARA LECKEY A C, ROGGE M D, RAYMOND P F. Guided waves in anisotropic and quasi-isotropic aerospace composites: Three-dimensional simulation and experiment [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1): 385-394.
- [13] KLEIN M B, BACHER G D, JEPSEN A G, et al. Homodyne detection of ultrasonic surface displacement using two-wave mixing in photorefractive polymers [C]. *Conference on Process Control and Sensors for Manufacturing*, 1999: 22-29.
- [14] LEE J H, BURGER C P. Finite element modeling of laser-generated lamb waves [J]. *Computer & Structures*, 1995, 54(3): 499-514.
- [15] WANG J J, SHEN Z H, XU B Q, et al. Numerical simulation of laser-generated ultrasound in non-metallic material by the finite element method [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(4): 806-813.
- [16] 祝连庆, 李伟仙, 潘志康, 等. 变臂关节式坐标测量机的参数自标定方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(3): 572-579.
ZHU L Q, LI W X, PAN ZH K, et al. Research on parameter self-calibration method for partly-bonded articulated arm coordinate measuring machine [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2014, 35(3): 572-579.
- [17] 胡宏伟, 王泽湘, 彭凌兴, 等. 基于均方根速度的水浸超声合成孔径聚焦成像 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(2): 365-370.
HU H W, WANG Z X, PENG L X, et al. Immersion ultrasonic imaging using the synthetic aperture focusing technique based on the root mean square velocity [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2016, 37(2): 365-370.
- [18] 周正干, 李洋, 陈芳浩, 等. 矩阵换能器超声三维成像方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(2): 371-378.
ZHOU ZH G, LI Y, CHEN F H, et al. Research on three dimensional imaging method using ultrasonic matrix array transducer [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2016, 37(2): 371-378.

- [19] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.
JIN SH J, YANG X X, CHEN SH L, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934.
- [20] 张昊, 陈世利, 贾乐成. 基于超声相控阵线阵的缺陷全聚焦三维成像[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 992-999.
ZHANG H, CHEN SH L, JIA L CH. Three-dimensional total-focus imaging based on ultrasonic linear phased array [J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2016, 30(7): 992-999.

作者简介



孙广开, 分别在 2007 和 2010 年于河北科技大学获得学士和硕士学位, 2015 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学讲师, 主要研究方向为新型传感与检测技术。

E-mail: guangkai.sun@buaa.edu.cn

Sun Guangkai received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hebei University of Science and Technology in 2007 and 2010, respectively, received his Ph. D. degree in 2015 from Beihang University, respectively. Now he is a lecturer in Beijing Information Science and Technology University. His main research interest includes novel sensing and test technologies.



周正干, 分别在 1987 年、1990 年和 1992 年于哈尔滨工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为北京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为超声无损检测及评价技术。

E-mail: zzhenggan@buaa.edu.cn

Zhou Zhenggan received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Harbin Institute of Technology in 1987, 1990 and 1992, respectively. Now, he is a professor and doctoral supervisor in Beihang University. His main research interest includes modern ultrasonic NDT & E technologies.