

文章编号:1004-2474(2017)05-0780-04

机器人辅助激光超声检测系统的设计与实现

孙广开^{1,2}, 曲道明¹, 周正干^{1,2}

(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结构的非接触、高精度无损检测问题,提出一种基于关节型机器人的激光超声检测系统。在系统设计上,利用波长 1 064 nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器激励超声波,基于光折变效应的双波混合干涉测量系统探测超声信号,激励和探测激光全部由光纤传导至光束聚焦端口投射到被测物表面,采用精密六轴关节型机器人作为扫描执行机构进行 C 型扫描检测。建立了系统的实验室原型,实现了碳/环氧复合材料试样的激光超声 C 扫描检测,得到试样内部模拟缺陷的分布、形状和尺寸特征,验证了系统的有效性。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 $\varnothing 1$ mm 以上分层的检测,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;机器人;无损检测;复合材料;航空工程**中图分类号:**TB553 **文献标识码:**A

Design and Implementation of Laser Ultrasonic Testing System Based on Articulated Robot Technology

SUN Guangkai^{1,2}, QU Daoming¹, ZHOU Zhenggan^{1,2}

(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 the noncontact and high precision non-destructive testing for the aircraft composites, a laser ultrasonic testing system based on articulated robot is proposed in this paper. In the design of the system, a 1 064 nm Nd:YAG pulse laser is used to excite the ultrasonic wave, and a laser interferometer based on photorefractive effect is used to measure the ultrasonic signals. The exciting and detecting laser are transmitted through the optical fiber to the focusing module and then projected on the surface of the detected object. A precise six-axis articulated robot is used as the scanning mechanism for C-scan imaging. The laboratory prototype of the system is built. The laser ultrasonic C-scan testing of the carbon/epoxy composite specimen is realized, and the distribution, shape and size features of the simulated internal defects are characterized. The effectiveness of the system is verified. The results show that the robot assistant laser ultrasonic testing system is capable of detecting the internal delamination with a diameter larger than $\varnothing 1$ mm in carbon/epoxy composite materials, thus the system has a broad application prospect in the nondestructive testing of aircraft composite structures.

Key words: laser ultrasonic; robot; nondestructive testing; composite; aeronautical engineering

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^[1-2]。在复合材料结构的制造和使用过程中,超声无损检测技术^[3]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方面发挥着重要的

作用。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,使用量增加,新材料、新结构及新工艺不断出现,整体成型制造的大型复杂型面的复合材料结构日益增多。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^[4-6],如大幅提高

收稿日期:2016-12-16**基金项目:**教育部“创新团队发展计划”光电信息与仪器基金资助项目(IRT_16R07);北京市教委科技发展计划基金资助项目(KM201511232021);北京市教委创新能力提升计划基金资助项目(TJSHG201510772016);国家自然科学基金资助项目(U1430120)**作者简介:**孙广开(1984-),男,河北廊坊人,讲师,博士,主要从事先进测控技术的研究。E-mail: guangkai.sun@buaa.edu.cn.

0~20 mJ;采用金属管包裹的纤芯直径 $\varnothing 2$ 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 $\varnothing 3$ 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,探测激光波长为1 550 nm,探测光斑直径 $\varnothing 200 \mu\text{m}$,探测装置的频带响应范围为50 kHz~125 MHz。

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为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为建立的基于关节机器人的激光超声检测系统的实物图。

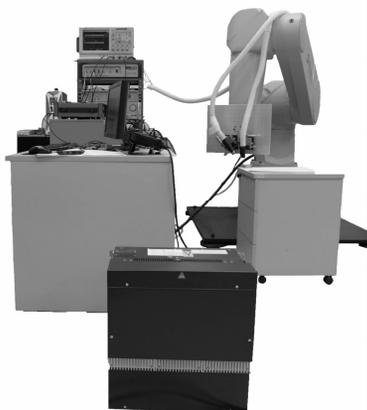


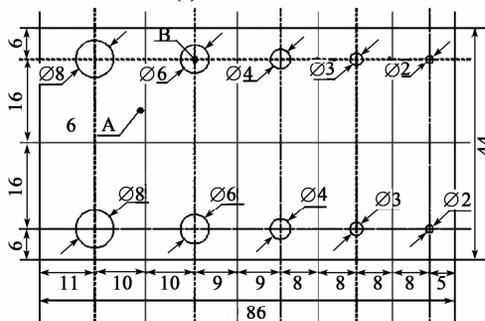
图3 基于关节机器人的激光超声检测系统原型

2 实验分析与验证

采用热压罐成型工艺制备碳/环氧树脂复合材料试样,试样几何尺寸约86 mm \times 44 mm \times 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 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{43}$ 。试样制备过程中,将试样内部横向布置聚四氟乙烯圆片模拟分层,圆片数量为10,厚为0.5 mm,直径 $\varnothing(1\sim 9)$ mm,埋深约为1.5~5.5 mm。试样设计与实物如图4所示。预置缺陷尺寸及深度位置如表1所示。



(a) 试样实物图



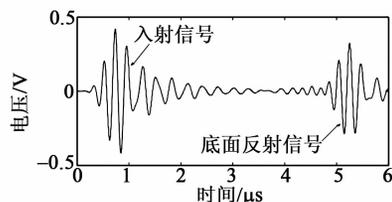
(b) 试样设计图(单位:mm)

图4 碳/环氧树脂复合材料试样设计与实物

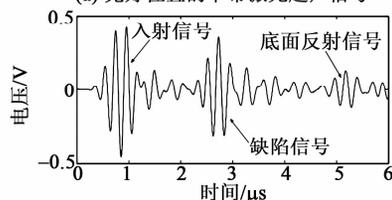
表1 预置模拟缺陷尺寸及深度位置

编号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
直径/mm	$\varnothing 1$	$\varnothing 3$	$\varnothing 5$	$\varnothing 7$	$\varnothing 9$
深度/mm	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
编号	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
直径/mm	$\varnothing 3$	$\varnothing 3$	$\varnothing 5$	$\varnothing 7$	$\varnothing 9$
深度/mm	1.5	5.5	5.5	5.5	5.5

利用1 064 nm波长的脉冲激光辐照碳/环氧树脂复合材料试样表面,脉冲激光时间宽度10 ns、聚焦光斑直径 $\varnothing 3$ mm、脉冲激光功率密度 2.5×10^6 W/cm²。此时材料表面无明显可见灼伤,超声波主要由热弹性效应产生。采用脉冲反射法,在碳/环氧树脂复合材料的完好位置和模拟分层位置分别激励、探测宽带激光超声信号,采用带通滤波器提取2~3 MHz的窄带信号,得到有、无分层位置的窄带激光超声信号,如图5所示。



(a) 完好位置的窄带激光超声信号



(b) 分层位置的窄带激光超声信号

图5 碳/环氧试样有、无分层位置的窄带激光超声信号

由图 5(a)可看出,激光超声信号具有良好的信噪比;在试样的完好位置存在声源产生的入射波信号和试样底面的反射回波信号;由于不受缺陷散射作用,不存在缺陷回波信号,试样底面反射信号具有较高幅度。由图 5(b)可看出,在试样的模拟分层位置受缺陷散射作用,在入射波和底面反射回波之间存在较高幅度的缺陷回波信号,试样底面反射信号幅度减小。

实验表明,利用设计建立的激光超声检测系统,可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表征缺陷,验证了该系统用于碳/环氧复合材料检测的有效性。

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,根据试样底面回波信号幅度变化表征缺陷,检测结果如图 6 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 $\varnothing 3 \text{ mm}$ 、超声频率 $2 \sim 3 \text{ MHz}$;探测激光光斑直径约 $\varnothing 200 \mu\text{m}$;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 。

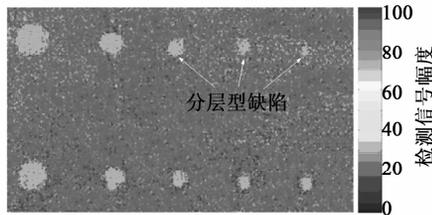


图 6 碳/环氧材料模拟分层试样的激光超声 C 扫描检测

由图 6 可看出,碳/环氧复合材料试样内部直径 $\varnothing(1 \sim 9) \text{ mm}$ 的模拟分层缺陷,其形状和分布特征与图 4(b)所示预置模拟缺陷特征一致。

根据图 6 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 2 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 1、2 可得,分层直径的测量误差不大于 0.2 mm ,深度位置误差不大于 0.3 mm 。

表 2 C 扫描程序测量得到的模拟分层的尺寸和位置数据

编 号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
尺寸/mm	1.2	3.2	4.8	7.2	8.8
误差/mm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
深度/mm	3.6	3.4	3.7	3.8	3.3
误差/mm	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2

续表

编 号	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
尺寸/mm	3.2	3.2	5.2	6.8	9.2
误差/mm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
深度/mm	1.7	5.6	5.3	5.7	5.5
误差/mm	0.2	0.1	0.2	0.2	0

3 结束语

设计了机器人辅助激光超声检测系统,该系统利用 1064 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;激励和探测激光全部由光纤传导至光束聚焦端口投射到被测物表面;采用精密六轴关节型机器人作为执行机构对构件进行扫描检测。开发了该系统的实验室原型,通过对试件进行激光超声 C 扫描检测可得分层的形状、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] 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: 1-9.
- [2] MARTARELLI M, CHIARIOTTI P, PEZZOLA M, et al. Delamination detection in composites by laser ultrasonics[J]. AIP Conference Proceedings, 2014, 1600: 405-412.
- [3] 刘化龙. 变压器局放超声检测和定位技术现状及发展[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014(7): 71-79. LIU Hualong. Actualities and perspectives of techniques of detection and localization of partial discharges in power transformers adopting ultrasonic methods[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2014(7): 71-79.
- [4] 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: 238-244.
- [5] HERNANDEZ-VALLE F, DUTTON B, EDWARDS R S. Laser ultrasonic characterisation of branched surface-breaking defects[J]. NDT & E International, 2014, 68: 113-119.
- [6] DUBOIS M, DRAKE T E. Evolution of industrial laser-ultrasonic systems for the inspection of composites[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2011, 26: 213-228.
- [7] 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.