

碳纤维复合材料激光超声检测方法研究

刘霞¹, 单宁², 马晓峰², 王少华², 刘团结²

(1. 西安工程大学机电工程学院, 陕西西安 710048; 2. 武警工程大学装备工程学院, 陕西西安 710086)

摘要:激光超声检测技术具有非接触、快速及高效等优点,在复合材料无损检测领域应用前景较好。该文研究了激光热弹激发超声应力的机理,构建了非接触式扫描激光超声检测系统,用于碳纤维复合材料结构健康状况的实时在线检测。实验研究了超声信号与激光参数和接收距离等参数间的关系。实验结果表明,激光超声检测技术可有效用于碳纤维复合材料结构健康检测;建立的碳纤维复合材料激光超声检测系统采用了扫描激光技术,单次检测仅需 0.1 s,提高了检测效率,且装置简单,操作方便,易于安装调试;热弹范围内超声信号幅值随激光能量增大而增大,随接收距离增大而减小。

关键词:激光超声;无损检测;碳纤维;复合材料;扫描激光

中图分类号:TM201.46 **文献标识码:**A

Study on Laser Ultrasound Detection Method of Carbon Fiber Composite Materials

LIU Xia¹, SHAN Ning², MA Xiaofeng², WANG Shaohua², LIU Tuanjie²

(1. College of Electromechanical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. Equipment Engineering College, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract: The laser ultrasound detecting technology has many advantages of non-contact, quick and high efficiency. It has good application foreground in the field of non-destructive detection of carbon fiber composite materials. In this paper, the theory of laser thermoelastically generated ultrasound stress is studied. A non-contact scanning laser ultrasound detecting system is set up for the real-time and online detection of the structure health status of the carbon fiber composite materials. The relationships among the ultrasound signals and laser parameters and receiving distance are experimentally studied. The results show that the laser ultrasound detecting technology can be used for the structure health detecting of carbon fiber composite materials effectively. The laser ultrasound detecting system adopts the scanning laser technology. Its single detection only needs 0.1 s, thus the detecting efficiency has been improved. The system is simple in structure, easy to operate and easy to install and debug. The ultrasound signals amplitude increases with the increase of laser energy and reduces with the increase of receiving distance in thermoelastical range.

Key words: laser ultrasound; non-destructive testing; carbon fiber; composite materials; scanning laser

0 引言

碳纤维复合材料具有高强度、高硬度、小密度及轻质量等优点,已广泛应用于航空航天领域^[1]。碳纤维复合材料采用碳纤维等高性能增强相增强复合材料性能,其制造工艺独特,但生产过程中工艺稳定性较差,且其包含多样组分及各项异性,使其存在制造缺陷。这些缺陷将导致碳纤维复合材料结构性能

下降,如分层缺陷会使构件撕裂缺陷迅速增大,脱粘缺陷严重影响构件的整体完整性,夹杂缺陷使构件的力学性能下降等,给构件的工作安全带来隐患^[2-3]。因此,为保证碳纤维复合材料结构高可靠性、高质量和高性能要求及工作安全,必须对其进行无损检测,以便及时发现构件的故障和隐患。

目前用于复合材料无损检测的方法主要有射线

收稿日期:2016-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305458);西安工程大学学科建设经费资助项目

作者简介:刘霞(1979-),女,河南西华人,讲师,博士,主要从事检测技术及自动化的研究。E-mail:ning25531@163.com。单宁(1980-),男,副教授,博士,主要从事激光超声检测技术、光纤传感器设计的研究。

检测法、热波成像法、微波检测法、声发射法及超声检测法^[4-10]。超声检测法具有灵敏度高,穿透力强,操作方便及无污染等优点,能可靠的检测出复合材料中的许多缺陷,已成为复合材料结构无损检测的主要技术方向^[11]。激光超声检测技术利用高能量激光脉冲与物质表面的瞬时热作用,在物质表面产生热特性区,发生热膨胀运动,产生热应力,从而带动周围介质一起运动,在物体内部激发出超声信号,可实现快速、实时、非接触式检测,精度、精确性较高,灵活性较强,适合于大型复合材料结构微小缺陷的快速无损检测^[12-14]。

本文分析研究了激光热弹激发超声应力的机理,构建了非接触式扫描激光超声检测系统,用于碳纤维复合材料结构健康状况的实时在线检测,并进行了实验研究。

1 激光超声激发机理

一束脉冲激光入射到体积为 V 的材料表面时,材料吸收光能并迅速转化为热能,由于时间短,材料的热传导效率可忽略,则由激光激发的体积应变 ΔV ^[15] 为

$$\Delta V = \frac{3\alpha}{\rho C} QH(t) \quad (1)$$

式中: α 为材料线性膨胀系数; ρ 为材料密度; C 为材料热容; Q 为材料吸收入射激光转化的热能; $H(t)$ 为脉冲激光时间剖面函数。

由体积应变在材料内部产生的热应力为

$$\sigma = (3\lambda + 2\mu) \frac{\Delta V}{3V} \quad (2)$$

式中 λ 、 μ 为拉梅常数。

若以激光点源照射位置为原点,则由热应力激发出的位移为

$$u(x_i, t) = M(t) * G_{i,j}(x_i, \xi_i, t) \quad (3)$$

式中: $*$ 为卷积算符; $M(t)$ 为激光点源强度的动量; $G_{i,j}(x_i, \xi_i, t)$ 为平行于 x_i 轴的单位脉冲力。

当试样为各向同性材料时有

$$M(t) = \sigma V \quad (4)$$

令 $g = G_{i,j}(x_i, \xi_i, t)$, 将式(4)代入式(3)可得

$$u(x_i, t) = \sigma H(t) V * g^U(x, 0, t) \quad (5)$$

式中 $g^U(x, 0, t)$ 为准阶跃函数生成的格林函数。

由式(5)可看出,激光在试样内部激发出的超声位移主要由 $g^U(x, 0, t)$ 确定,且位移振幅与吸收的激光能量成线性关系。

2 复合材料激光超声检测系统建立

碳纤维复合材料易成型,可用于加工结构形状较复杂的结构件。为使建立的激光超声检测系统更适合工程实践,本文激光激发源采用扫描激光照射,实际检测中无需调整激光的照射角度和焦点距离等条件即可实现构件无损检测。图1为碳纤维复合材料激光超声检测系统。脉宽约为 10 ns 的脉冲激光照射在反射镜上,反射镜安装在电机上,由计算机控制电机高速旋转,输出高速扫描激光照射到碳纤维复合材料试样表面,试样表面局部吸收激光能量,膨胀后会产生微弱的热激励超声波。超声波在试样内部传播后,携带试样缺陷信息的超声波被粘贴在试样表面的超声探头接收,经超低噪声放大器及滤波器等处理后送入高速数据采集卡,并将接收到的数据存入计算机中。

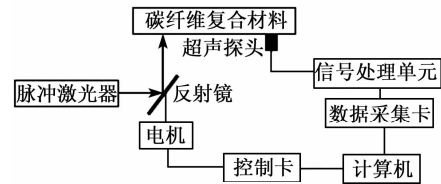


图1 复合材料激光超声检测系统

3 实验结果

为了在实际应用中更好地控制激发的超声信号,提高信噪比,增强信号检出率,正确分析超声信号与试样内部信息间的相互作用,需研究超声信号与激光参数和接收距离等参数间的关系。激光在试样内部可激发出多种波型,其中声表面波沿介质浅表面传播,通过测量表面声波可获得表面或亚表面的微小裂纹、缺陷等重要信息。因此,本文采用图1所示检测系统,对碳纤维复合材料表面缺陷进行了相应的实验研究。

实验中,选用 100 mm × 100 mm × 1.8 mm 的 12 层碳纤维/环氧树脂基复合材料为试样,铺层方式为 $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ 。超声探头采用频率为 2 MHz 的 JAPANPROBE 公司的探头。激光源与试样的垂直距离为 450 mm,激光扫描间隔为 0.27 mm。

当碳纤维复合材料试样无缺陷时,令激发源与超声探头水平距离分别为 30 mm 和 50 mm,其不同激光能量在复合材料试样中激发出的超声信号如图 2、3 所示。

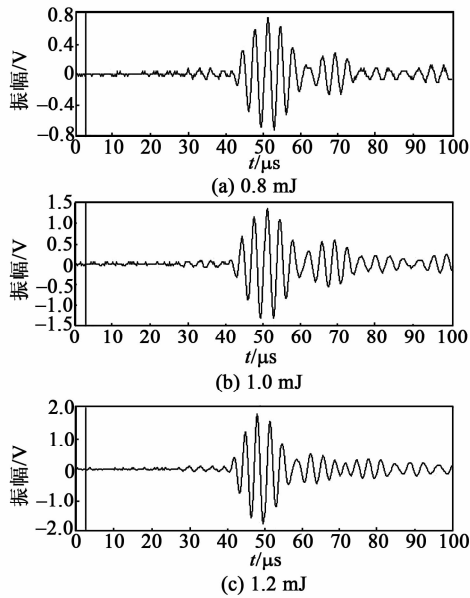


图 2 无缺陷距离 30 mm 时接收到的超声信号

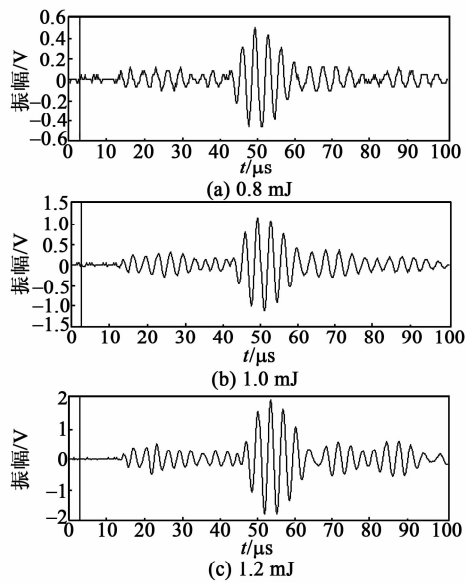


图 3 无缺陷距离 50 mm 时接收到的超声信号

在碳纤维复合材料试样表面制造出人工缺陷,缺陷尺寸为 1 mm×5 mm×1 mm,激光源位于超声探头与缺陷中间。超声探头与缺陷水平距离分别为 30 mm 和 50 mm,调节激光能量为 0.8 mJ 时,超声探头接收的超声信号如图 4、5 所示。

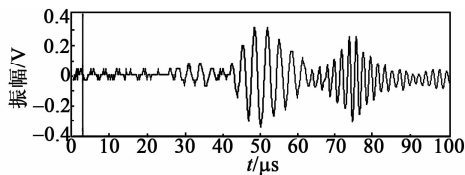


图 4 有缺陷距离 30 mm 时接收到的超声信号

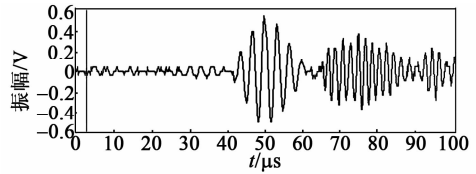


图 5 有缺陷距离 50 mm 时接收到的超声信号

4 结论

碳纤维复合材料以其优异的性能已广泛应用于航空航天、汽车、建筑及医疗等领域,制造和使用过程中的缺陷将导致碳纤维复合材料结构性能急剧下降,造成重大损失。因此,必须对其进行无损检测,以便及时发现构件的故障和隐患。激光超声检测技术具有非接触、快速及高效等优点,适合复合材料结构的实时在线健康监测,在复合材料无损检测领域应用前景较好。本文分析研究了激光热弹激发超声应力的机理,构建了碳纤维复合材料激光超声检测系统,用于碳纤维复合材料结构健康状况的实时在线检测,并对超声信号与激光参数和接收距离等参数间的关系进行了实验研究。综合实验结果可得结论:

1) 由图 2~5 可看出,碳纤维复合材料无缺陷时,超声信号无回波现象,有缺陷时能发现明显回波,表明激光超声检测技术可有效用于碳纤维复合材料结构健康检测。

2) 由图 2、3 可看出,在热弹范围内增大激光能量,超声信号幅值明显增大;随着接收距离增大,超声信号幅值有所降低。

3) 由图 4、5 可看出,由于碳纤维复合材料为各向异性,对超声波有较大衰减,故超声探头距离试样边缘较远时无三次回波,较近则有明显三次回波。

4) 建立的碳纤维复合材料激光超声检测系统采用了扫描激光技术,单次检测仅需 0.1 s,提高了检测效率,且装置简单,操作方便,易于安装调试。

参考文献:

[1] ROBERT I M. Advanced composite structures research in australia[J]. Composite Structures, 2002, 57(3):3-10.

[2] 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.

[3] 范玉青, 张丽华. 超大型复合材料机体部件应用技术的最新进展——飞机制造技术的新跨越[J]. 航空学报,

- 2009,30(3):534-543.
- FAN Yuqing, ZHANG Lihua. New development of extra large composite aircraft components application technology—advance of aircraft manufacture technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(3):534-543.
- [3] 刘松平, 刘菲菲, 李乐刚, 等. 自动化无损检测技术及其应用[J]. *航空制造技术*, 2009(4):26-31.
- LIU Songping, LIU Feifei, LI Legang, et al. Automated non-destructive testing techniques and its applications [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009(4):26-31.
- [4] DU Dong, CAI Guorui, TIAN Yuan, et al. Automatic inspection of weld defects with X-ray real time imaging [J]. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 2007,362:359-366.
- [5] STEVEN M S, JAMES R L, TADIQ A, et al. Thermographic inspection of composite structures [J]. *SAMPLE Journal*, 2003,39(5):53-58.
- [6] 杨玉娥, 闫天婷, 任保胜. 复合材料中碳纤维方向和弯曲缺陷的微波检测[J]. *航空材料学报*, 2015, 35(6):91-96.
- YANG Yu'e, YAN Tianting, REN Baosheng. Microwave evaluation of direction and bending defect of carbon fiber in composite material[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2015, 35(6):91-96.
- [7] SCHMIDT K, LITTLE J, ELLINGSON W A. A portable microwave scanning technique for nondestructive testing of multilayered dielectric materials [C]// *State of California: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2009, 29(6):179-189.
- [8] LOUTAS T H, KOSTOPOULOS V. Health monitoring of carbon/carbon, woven reinforced composites. Damage assessment by using advanced signal processing techniques. Part I: acoustic emission monitoring and damage mechanisms evolution[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(2):265-272.
- [9] THOMAS S, BONGIOVANN C, NUTT S R. In situ estimation of through-thickness resin flow using ultrasound[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 38(15/16):3093-3098.
- [10] 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.
- [11] 朱建峰, 郭伟剑, 刘俊邦, 等. 小波变换在多层复合材料的超声波检测中的应用 [J]. *四川兵工学报*, 2014(7):67-70.
- [12] LEE J R, YOON C Y. Development of an optical system for simultaneous ultrasonic wave propagation imaging at multi-points [J]. *Experimental Mechanics*, 2010, 50(7):1041-1049.
- [13] WANG Jijun, XU Baiqiang, SHEN Zhonghua, et al. Numerical simulation of thermo-elastic stress field and laser ultrasound in transversely isotropic plate[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2008, 47(2):956-963.
- [14] XU Baiqiang, WANG Feng, FENG JUN, et al. Laser-generated thermoelastic acoustic sources and acoustic waves in anisotropic plate[J]. *Science in China, Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(3):566-574.
- [15] ROSE L R F. Point-source representation for laser-generated ultrasound[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1984, 75(3):723-732.