

激光超声技术在无损检测中的应用

郭佳¹, 李四海¹, 宁宁², 李闵行², 张昭², 王丹²

(1. 西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

(2. 中国飞机强度研究所 结构无损检测及健康监测研究室, 西安 710065)

摘要: 激光超声检测技术作为一种新兴的无损检测方法,以其非接触、点式检测及对复杂形状试件检测效率高显著优势,逐渐进入了人们的视线。介绍激光超声技术的原理及优点,制作带预置缺陷的复合材料层压板试件,使用激光超声检测系统,分别采用穿透法和脉冲反射法两种手段对含有预置缺陷的复合材料层压板进行验证性检测,均能检出 $\phi 2$ mm 的预置缺陷。通过与采用压电探头的传统超声检测系统的检测结果对比,表明激光超声检测系统可以达到和传统超声检测系统一致的检出率。

关键词: 非接触性; 复合材料层压板; 无损检测; 激光超声; 穿透法; 脉冲反射法

中图分类号: TN247

文献标识码: A

Application of Laser Ultrasonic Technique in Non-destructive Testing

Guo Jia¹, Li Sihai¹, Ning Ning², Li Minhang², Zhang Zhao², Wang Dan²

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Nondestructive Testing & Structural Health Monitoring Research Department,
Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: As a new nondestructive detection method, laser ultrasonic, which gradually goes into our sight, is non-contact, point detection and have the significant advantage in the complex shape sample test with high efficiency. The principle and advantages of laser ultrasonic technique is introduced, and the composite laminates specimen with preset injury is made. The penetration method and pulse reflection method are used to test the sample, which is composite laminates containing a preset damage. Results show that $\phi 2$ mm preset defects could be detected by both methods, which can reach the same detection-rate as a ultrasonic test system with a conventional piezoelectric probe.

Key words: non-contact; composite laminates; nondestructive testing; laser ultrasonic; penetration method; pulse reflection method

0 引言

超声检测技术是利用声波与物质相互作用时,声速及声波的能量会发生变化这一现象,通过对声速和声波衰减的测量,来确定物质的一些基本物理参数的无损检测方法。该技术是研究物质结构及其特性的基本方法之一,在许多领域已获得成功应用。

随着超声技术的不断发展,激光超声检测技术逐渐进入了人们的视线。激光超声检测技术以激光激发并接收超声波实现对材料缺陷的检测^[1-2]。激光超声检测技术具有非接触、宽带及点式检测的特点,因而可以很好地满足复杂形貌或是恶劣环境下的工件检测^[3]。LaserUT 是洛克希德·马丁公司开发的激光超声检测系统,是目前世界上较为先进的激光超声检测系统。该系统采用脉冲回波方式用于飞机复合材料结构检测,可以应用于不同的飞机制造程序,包括 F-2、F-16、F-22 和 F-35 机型。LaserUT 具有较高的优越性,例如精密的模具或

者用户定制的探头结构,激光超声的检测速度可以 10 倍于常规超声检测系统,实现了对形状复杂的复合材料构件进行成本低、效益高的检验^[4]。

传统的超声 C 扫描检测利用压电探头激励和接收超声波,因而必须将探头接触在试件表面并需要耦合剂粘合,对于特殊结构(例如 R 角),探头无法完全接触时会出现漏检等现象,而激光超声非接触探测的优势很好地弥补了上述缺点。

本文依据激光超声检测的理论基础,制作带预置损伤缺陷的复合材料层压板试件,分别利用穿透法和脉冲反射法对该试件进行检测,并将检测结果与成熟的超声 C 扫描检测结果进行对比研究,从检出率上来初步验证激光超声的工程适用性,为激光超声在复合材料无损检测中的广泛应用奠定基础。

1 激光超声检测原理

激光超声检测的原理是将强度受到调制的激光照射在样品表面上,样品表面吸收光能而温度升高,温度升高至固体的热弹阈值,照射区会因热膨胀而产生应力脉冲。应力脉冲同时以纵波、横波和表面波的形式向固体内部或沿表面传播,即形成超声波,根据超声波在试样内部传播过程中的能量衰减、路径变化来表征缺陷^[5-6]。

1.1 热弹机制激发原理

当入射光的功率密度较低时,材料表层由于吸收光能导致局部升温,引起热膨胀,从而产生表面切向压力,同时激发出横波、纵波和表面波,热弹效应示意图如图 1 所示。

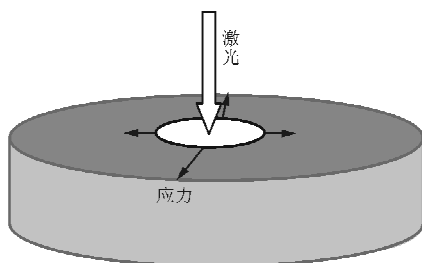


图 1 热弹效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermo-elastic effect

在这种机制下,声信号的幅度随着激发功率的增加而线性增加。由于激发功率的密度较低,表层的局部升温没有导致材料的任何相变,因而具有严

格检测的特点。但热弹激发超声过程中,光能转化为热能的效率很低^[7-8]。为了提高热弹激发超声的效率,常在固体表面涂各种涂层(例如水、油),以增加表面的光吸收系数。同样,采用脉冲宽度极窄的高能量密度光束照射,也可以获得较高的声波能量。

1.2 烧蚀机制激发原理

当入射光的功率密度逐渐升高时,材料表面的瞬态升温将逐步导致材料的熔化、汽化和形成等离子体。这时将有一小部分表面物质被喷射出来,从而给样品表面施加了一个非常大的反作用力,导致声波的产生。烧蚀效应示意图如图 2 所示。

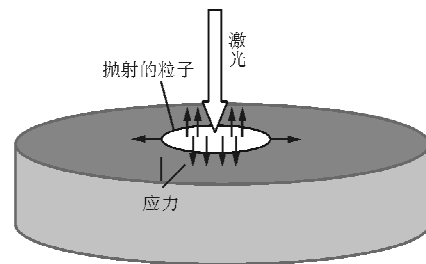


图 2 烧蚀效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hot-ablated effect

在这种机制下可以获得大幅度的纵波和表面波,激发效率比热弹机制高 4 个数量级。但烧蚀机制每次对表面产生约 $0.3 \mu\text{m}$ 的损伤,故只能用于某些场合,且通常用来产生超声纵波^[8]。热弹机制由于对表面无损伤,且能产生各种波形,所以现阶段应用较为广泛。

激光超声检测系统由脉冲激光器(发射激光器)、连续激光器(接收激光器)、干涉仪、光路系统、信号采集与处理系统、扫描运动控制系统等构成。其系统组成图如图 3 所示。

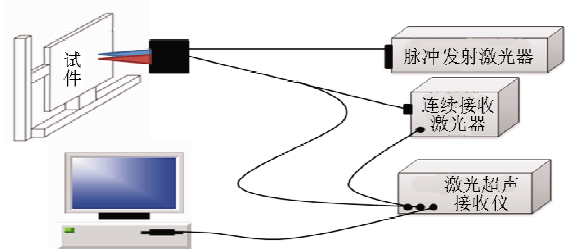


图 3 激光超声系统组成图

Fig. 3 Schematic diagram of laser ultrasound system

激光超声检测系统的工作原理如下:

(1) 脉冲发射激光器发出的激光脉冲打到材料表面引起热胀,产生预期超声波;

(2) 超声波在材料内部传播,通过信号衰减和路径变化表征材料内部的缺陷信息;

(3) 连续接收激光器发出连续激光,通过光纤分离器分成两路激光束,即参考光束和检测光束,两路光束在激光超声接收仪内进行混合干涉,通过光电转换,光信号转变成电信号,然后电信号转变成超声波形输出;

(4) 计算机借助数据采集卡采集到上面的超声信号,并通过激光超声检测软件显示超声 A 扫描、B 扫描和 C 扫描。

2 激光超声的优势

与传统的压电换能器技术相比,激光超声最主要的优点是非接触检测,因为它是利用光学方法激发和探测材料表面的超声振动,消除了压电换能器技术中耦合剂的影响。同时,由于激光超声技术无需耦合,对那些不能进水的工件,具有更加明显的优势。

激光超声技术具有非接触、点源/点接收及对复杂形状试件检测效率高等优点,更有利于材料的无损评估、材料表征和缺陷检测、加工过程监测,以及对复杂形貌的工件或在高温高压、辐射等环境下对设备的监测等^[9]。

激光超声技术的另一优势是其具有较高的检测速度和灵活性。激光超声检测系统对复杂构件的检测速度比传统的压电换能器技术快 10 倍,原因是扫描借助了两个细的高速镜来完成。在传统系统中,利用一个慢速的操作机将换能器在构件上每一点进行移动,同时还要求保持换能器与各扫描点的对中并保持一定距离。激光超声系统的入射角可以达到 45° ,而传统系统的入射角为 $2^\circ\sim 3^\circ$ ^[10]。

3 检测应用试验

3.1 检测对象

试验件为预制平底孔模拟缺陷的碳纤维材料板,长为 150 mm,宽为 100 mm,厚为 3 mm。预置平底孔缺陷深度分别为 1 和 2 mm 各 1 排。孔的直径分别为 1、2、3、4、6 和 8 mm。试验件如图 4 所示。

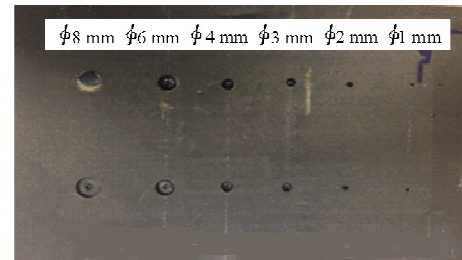


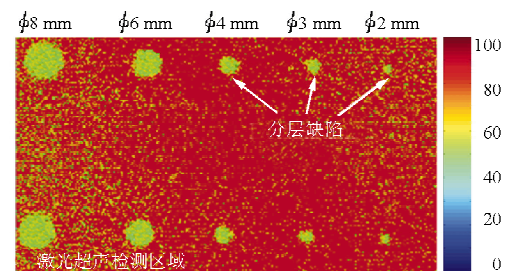
图 4 检测试件实物图

Fig.4 Picture of test specimen

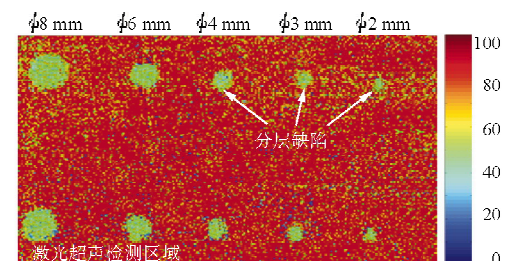
3.2 检测设备与检测结果

激光超声设备采用北京航空航天大学超声无损检测技术研究室自行研制的用于航空复合材料质量评价的 BLUT 激光超声检测系统。激光超声检测采用穿透法和脉冲反射法分别对试件进行检测。检测设备采用 Nd:YAG 激光器,波长为 1 064 nm、脉冲激光能量为 10 mJ/pulse、脉冲激光光斑直径约为 5 mm、测量激光光斑直径为 100 μm ;扫查系统分辨率 0.35 mm,超声频率 2~3 MHz。试验中,采用穿透法检测时,脉冲发射激光器与连续接收激光器分别位于试件两侧并垂直于试件;采用脉冲反射法检测时,脉冲发射激光器与试件之间呈 45° 角,连续接收激光器垂直于试件,二者在试件同侧且与试件距离约为 15 cm。

检测结果如图 5 所示。



(a) 穿透法检测结果



(b) 脉冲反射法检测结果

图 5 复合材料板激光超声检测结果

Fig.5 Result of the composite by the laser ultrasound

从图5可以看出,两种方法均可以检测出 $\phi 2$ mm及其以上的预制缺陷。激光超声C扫描系统采用激光器的功率不够高,而脉冲反射法所需要的能量大于穿透法,故试验中穿透法的检测结果优于脉冲反射法。对复合材料进行快速检测时,最小能够检出 $\phi 2$ mm的缺陷是能够达到快速检测工程应用要求的。

激光超声C扫描结果中的噪点,主要来源于两个方面:一是激光测量仪的灵敏度受机械振动影响而存在20%~30%的浮动,这会导致探测信号幅值变化,进而可能呈现出噪点;二是复合材料的表面粗糙,也会导致激光测量信号幅值变化,呈现出噪点。

4 参考试验

采用传统的压电换能器检测系统对预制平底孔模拟缺陷的碳纤维材料板进行扫描检测。

传统超声C扫描系统是英国SonaTest集团开发的Rapidscan II超声相控阵快速超声C扫描系统,5 MHz、128晶片的轮式探头,扫描增益为49.9 dB,声速为3 100 m/s,重复频率为20 kHz,扫描中设置8个晶片同时激发形成一个聚焦声束。采用水耦合反射法检测。

检测结果如图6所示。

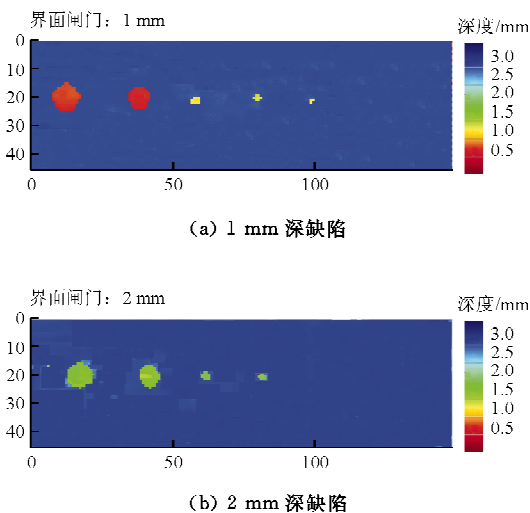


图6 复合材料板超声C扫描检测结果

Fig. 6 Result of composite by ultrasound C-scan

从图6可以看出,传统的压电换能器检测系统可以检出 $\phi 3$ mm及以上的预制缺陷,根据复合材料的检测要求,此检测结果也是符合工程应用要

求的。

通过和参考试验的对比,说明本文采用的激光超声检测试验系统可以达到与Rapidscan II设备相同的检出率。

5 结论

(1) 激光超声C扫描技术可以对试件实现非接触式检测。试验中,激光器与试件之间的距离为15 cm,将激光器的能量提高,距离还能进一步增加。因而对于不能用水做耦合剂的材料进行检测,激光超声技术提供了有效的替代手段。

(2) 本文采用的激光超声检测系统可以检测出 $\phi 2$ mm的缺陷,能够达到与Rapidscan II设备相同的检出率。

(3) 激光超声检测系统的检测速度取决于系统激发、接收激光器重复频率及扫描系统的响应速度。本文试验系统的重复频率为20 Hz,目前国外先进检测系统的重复频率能够达到400 Hz。

参考文献

- [1] 魏勤, 尤建飞. 超声C扫描系统在颗粒增强型金属基复合材料无损检测中的应用[J]. 华东船舶工业学院学报: 自然科学版, 2003, 17(3): 66-69.
Wei Qin, You Jianfei. Application of ultrasonic C-scanning system in nondestructive testing of particulate reinforced metal matrix composites[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute; Natural Science Edition, 2003, 17(3): 66-69. (in Chinese)
- [2] 周正干, 肖鹏, 刘航航. 航空复合材料先进超声无损检测技术[J]. 航空制造技术, 2013(4): 40-43.
Zhou Zhenggan, Xiao Peng, Liu Hanghang. Advanced ultrasonic testing technology for aviation composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(4): 40-43. (in Chinese)
- [3] 白小宝, 孙建望, 周建平, 等. 脉冲回波式激光超声检测[C]. 昆明: 云南省机械工程学会无损检测分会, 2003.
Bai Xiaobao, Sun Jiawang, Zhou Jianping, et al. The pulse reflection of laser ultrasonic detection[C]. Kunming: The Nondestructive Testing Meeting of Yunnan Mechanical Engineering Society, 2003. (in Chinese)
- [4] Mark A Osterkamp, David L Kaiser. Application of laser ultrasonics for the non-destructive inspection of complex composite aerospace structures[C]. Montreal: 1st International Symposium on Laser Ultrasonics; Science, Technology and Applications, 2008.
- [5] 钱梦麟. 激光超声检测技术及其应用[J]. 上海计量测试,

(下转第501页)

- 1-9.
- [6] Feng Guorui, Huang Guangbin, Lin Qingping, et al. Error minimized extreme learning machine with growth of hidden nodes and incremental learning [J]. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 2009, 20(8): 1352-1357.
- [7] Holland J H. *Adaptation in natural and artificial systems; an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence* [M]. USA: University of Michigan Press, 1975.
- [8] 刘文琰, 王智, 隋福成. 单机寿命监控技术指南 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 42-51.
Liu Wenting, Wang Zhi, Sui Fucheng. *Individual aircraft life monitoring technology guide* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 42-51. (in Chinese)

作者简介:

张夏阳(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞机结构健康监测及系统建模。

黄其青(1955—),女,教授。主要研究方向:飞机结构疲劳、断裂、可靠性分析。

殷之平(1977—),男,副教授。主要研究方向:飞机结构疲劳与损伤容限技术。

曹善成(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞机系统建模。

刘飞(1990—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞机结构健康监测及系统建模。

(编辑:马文静)

(上接第 490 页)

- 2003, 30(1): 4-7.
- Qian Menglu. *Laser ultrasonic technique and its applications* [J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2003, 30(1): 4-7. (in Chinese)
- [6] 谭项林. 激光超声无损检测系统关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
Tan Xianglin. *Research on the key technology of laser-generated ultrasonic nondestructive testing system* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [7] 苏琨, 任大海, 李建, 等. 基于激光超声的微裂纹检测技术的研究 [J]. *光学技术*, 2002, 28(6): 518-522.
Su Kun, Ren Dahai, Li Jian, et al. *Research of contacting microcracks detection technology* [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(6): 518-522. (in Chinese)
- [8] 陈清明, 蔡虎, 程祖海. 激光超声技术及其在无损检测中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(4): 53-57.
Chen Qingming, Cai Hu, Cheng Zuhai. *Laser ultrasonic technique and its applications in non-destructive testing* [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(4): 53-57. (in Chinese)
- [9] 雷和平, 张斌, 冯其波. 激光超声检测方法及应用 [J]. *光学技术*, 2009(35): 99-101.

Lei Heping, Zhang Bin, Feng Qibo. *Laser ultrasonic detection and its application* [J]. *Optical Technique*, 2009(35): 99-101. (in Chinese)

- [10] 石林. 复合材料构件的激光超声检测 [J]. *航空工程与维修*, 2002(2): 37-38.

Shi Lin. *Laser inspection for composite parts* [J]. *Aviation Engineering and Maintenance*, 2002(2): 37-38. (in Chinese)

作者简介:

郭佳(1987—),女,硕士研究生,助理工程师。主要研究方向:结构健康监测。

李四海(1962—),男,博士,教授。主要研究方向:惯性导航。

宁宁(1973—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:无损检测。

李闵行(1964—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:结构健康监测。

张昭(1983—),男,硕士,助理工程师。主要研究方向:结构健康监测。

王丹(1986—),女,硕士,工程师。主要研究方向:无损检测。

(编辑:马文静)