

激光超声技术及其应用

曾 伟¹, 杨先明², 王海涛¹, 田贵云^{1,3}, 方 凌¹

- (1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016; 2. 烟台富润实业有限公司, 烟台 264670;
3. 纽卡斯尔大学 电子与计算机工程学院, 纽卡斯尔 EU1 7RU)

摘 要: 综述了激光超声技术的基本特点, 介绍了激光超声产生机理及检测方法。概述了激光超声技术在工业无损检测技术中的应用。得出激光超声技术作为一种新兴技术, 具有非接触、远距离、高时空分辨力等特点, 将在工业无损检测中具有十分广泛的应用价值。

关键词: 激光超声; 无损检测; 非接触; 时空分辨力

中图分类号: TG115. 28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2013)12-0049-04

Laser Ultrasonic Technology and Its Applications

ZENG Wei¹, YANG Xian-Ming², WANG Hai-Tao¹, TIAN Gui-Yun^{1,3}, FANG Lin¹

- (1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Yantai Furun Industrial Company with Limited Liability, Yantai 264670, China;
3. School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Newcastle University, Newcastle NE1 7RU, UK)

Abstract: The features of laser ultrasonic techniques are reviewed in the paper. Laser ultrasonic generation mechanism and detection methods are presented. Applications in the industrial nondestructive testing technology are commented. As an emerging technology, the laser ultrasonic is characteristic of a non-contact, long-range, high spatial and temporal resolution, which has a very wide range of applications in the industrial NDT.

Keywords: Laser ultrasonic; Nondestructive testing; Non-contact; Spatial and temporal resolution

近年来,随着现代工业技术的飞速发展,在一些恶劣的环境中,如高温、高压、易腐蚀及放射性强的条件下,传统的无损检测方法无法完全满足检测要求,需要寻求一种更有效的无损检测方法对一些环境恶劣的工件进行检测。激光超声技术作为一种非接触、远距离的新兴检测技术,将激光技术与超声技术进行了有机结合,与传统意义上的超声检测技术相比,激光超声技术的特点如下:

(1) 可实现与被检测材料表面非接触激发超声信号,因此,在材料表面无需添加任何耦合剂,避免耦合剂对检测精度的影响,同时也避免对试件表面产生各种化学污染。

(2) 可实现大面积、快速扫描及超声成像等特

点,能够实现在实际工业生产中对一些快速运动的试件进行在线检测的要求。

(3) 可实现在一些绝缘体、陶瓷及有机材料中激发不同模式的超声波。而传统的压电超声技术中一种换能器只能在材料表面产生一种超声信号。

(4) 激光器产生激光声源,可大可小且易聚焦。在实际检测中,可以自由选取点、线、环的激光声源。

(5) 对被检材料表面的要求较低,对一些材料表面粗糙、形状复杂的试件以及焊缝根部,可以实现较好的缺陷检测。

激光超声技术采用激光激发和超声检测,受到了各国研究学者的深入研究。1963年, R M White^[1]和 A Askaryan^[2]等人提出采用激光技术在固体材料中激发超声信号的方法。1979年, Ledbetter^[3]等人在一次激发中同时接收到纵波、横波和表面波(SAW)。到了20世纪80年代中期, J P Monchalin^[4]等人提出采用球面共聚焦法布里-珀罗

收稿日期: 2013-06-17

作者简介: 曾 伟(1984—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光超声无损检测。

(简称 FP)干涉仪来检测超声信号的超声测厚技术,首次实现了在 1 m 远处对未抛光的钢板进行激光超声试验。俄罗斯的 Alexander A^[5-6] 等人开发出一种集成激光激发超声波和超声波接收的接触式的激光超声探头,在评估复合材料方面开展了一系列研究工作。Master ZM^[7] 等人提出采用从接收到的超声波信号中提取缺陷散射波信号的算法,展开对材料缺陷的定量分析。

1 激光超声技术原理

1.1 激光超声的产生

根据激光是否与被测工件接触产生超声信号的方法,可将激光超声检测技术分为直接式与间接式两大类。直接式主要采用激光与被测工件表面直接作用,一般这种方法主要通过热弹效应或熔蚀作用产生超声信号;间接式则通过与被测工件周围介质产生超声信号。直接式是激光束直接与被测材料表面直接作用产生超声信号,因此产生的超声信号不仅与激光束本身的时空特性有关,而且还与被测工件的材质及表面特性有关。

1.2 热弹机制

激光束在固体材料中激发出超声信号主要是由于激光源与被测试件表面的相互作用。这个相互作用主要是将激光源的电磁能转换成声能的过程。在热弹机制中,激光束直接照射到试件材料表面的某一区域,被照射区域中的电子吸收光子能量,从基态跃迁至高能态,处于高能态的电子通过辐射跃迁产生发光,其中无辐射跃迁及化学作用将导致超声信号的产生。对于一些表面材料干净、无约束的固体来说,当激光束的功率密度较低时,其值低于被测工件材料表面的损伤阈值时,被测工件表面由于吸收激光束辐射能导致材料局部温度上升而不足以使其材料熔化,由于热膨胀而在其表面产生切向压力,可同时在被测工件表面产生横波、纵波及表面波信号。在这种热弹机制下,产生的超声波信号幅度随着激光束功率的增加而增加。由于激光束的功率较低,其在材料表面完全无损。但是在这种机制中,其光热转换效率比较低,为了提高其转换效率,一般在其激光束照射的区域内涂各种涂层(如水或油),可以提高被测材料表面吸收系数。同时在实际检测中,采用一些脉冲宽度较窄的激光束同样可以提高超声信号的能量。热弹激发机理原理如图 1 所示。

1.3 熔蚀机制

在熔蚀机制中,当激光束功率密度很大,被照射

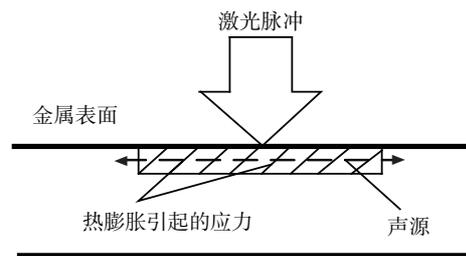


图 1 热弹机制

材料表面的瞬态温度迅速达到材料的熔点时,导致被照射材料表面产生等离子体,这时在被检测材料表面有小部分物质会以很高的速度喷射出来,并在被检测材料表面产生一个垂直的反作用力,同时在激光照射的表面产生一个压缩脉冲,产生的应力波和表面波的波形振幅显剧增强。这种熔蚀机制对被测物体表面有一定的损伤(每次对表面产生约 0.3 μm 的损伤),但是在此机制下能获得较大强度的纵波和表面波,因此这种机制适用于某些对超声信号强度有较高要求的无损检测场合。

为了降低被检测材料的表面损伤度,近年来产生了一些表面修饰技术,如湿表面技术。该技术主要在试件照射区的表面涂一层油或一滴水,同样也可以产生烧蚀激发效果,而在材料中激发产生足够强度的超声波,而不对试件表面产生损伤。熔蚀激发原理如图 2 所示。

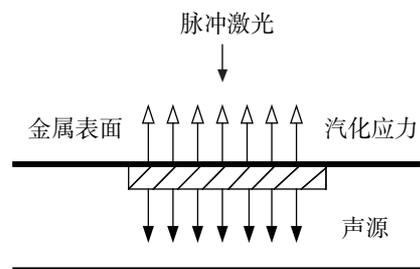


图 2 熔蚀机制

1.4 激光超声的接收

激光超声信号的检测方法主要有传感器检测和光学法检测。传感器检测法主要是采用 PVDF 压电薄膜直接与被测材料表面进行耦合接触,接收激光产生的超声信号。一般说来,这种检测方法具有较高的检测灵敏度。但这种接触式的检测超声信号方法,在使用时需要在传感器与被测材料之间添加耦合剂,一般对检测材料表面要求较高。常见的换能器一般有电磁、压电陶瓷换能器和电容换能器,这些换能器具有较宽的频带,可在被检测材料表面接收到超声信号。但对于一些复杂形状的材料来说,

该检测方法无法使用且灵敏度低。

光学检测法是一种非接触、宽带的超声信号检测方法。该方法通过连续激光照射被检测表面,接收表面产生的反射光,从接收到的反射光的幅值等特征值的变化中得到超声信号。该检测方法又分为干涉检测与非干涉检测。干涉法检测主要是将接收的反射光与参考光束发生干涉,得到频移信号,从而检测出被测材料表面的振动位移。一般在检测系统中引入外差干涉检测仪,以提高检测信号的抗干扰能力。非干涉检测法是利用当被检测材料表面照射检测光束小于接收的超声信号波长时,表面反射的光束会受到表面超声波的振动而产生偏转,偏转大小直接与超声波信号的幅值及性质有关。该检测方法具有装置简单、频带宽等特点,是对一些抛光材料表面进行超声波检测的有效工具。

2 激光超声技术的应用

目前激光超声技术被应用于材料评估、生物工程和无损检测等很多工业领域。

2.1 无损检测

激光超声技术可对材料内部缺陷进行定性与定量检测。激光器产生的脉冲宽度很窄,其最高频率可达几千兆赫,产生的波长只有几微米,可以提高对材料内部微缺陷的检测能力,一般精度可达0.1 mm。激光超声技术作为一种非接触的无损检测方法,可在高温、高压、强辐射、有毒等恶劣环境下对材料进行高精度的无损检测。对于一些形状复杂的试件(如楔形结构、V型结构和蜂窝夹层等),激光超声技术能在一次激发过程中产生多种模式的超声波信号,因此可应用于对风机叶片、机翼主轴的零部件以及核电材料中的一些关键零部的裂纹缺陷实时检测。

2.2 材料特性测量

激光超声技术为材料提供了一种非接触、精确地测量超声速度及衰减的新方法。激光产生的超声波在材料内部传播时,其材料内部的性能参数变化会影响超声信号的波速或对超声产生衰减,因此,一般采用激光超声技术来对材料的以下特性进行检测:

- (1) 对材料的尺寸测量,如宽度、厚度及形状面积等。可在高温条件下对试件进行在线测厚。
- (2) 测量材料内部的力学特性,如残余应力、硬度等参数。
- (3) 检测材料内部、表面及亚表面的微缺陷。
- (4) 材料内部及表面应力分布。激光超声技术

能检测金属、铝合金等材料内部的残余应力及疲劳损伤等^[8],在材料生产加工过程中,对零件进行裂缝检测。

(5) 对介质的声衰减进行精确测量。激光超声技术为介质的声衰减检测提供了一个宽带、可重复的超声信号,这为精确测量衰减提供了保障。激光超声技术可应用于在纳米材料的检测,研究不同纳米材料的物理化学特性,这对于研究纳米材料内部的微观组织结构,具有十分广泛的实用价值。

2.3 超声快速扫描与成像

在激光超声技术应用于快速成像方面,Ruzzene M, Michaels TE^[9-10]等人提出采取频域滤波法对超声信号进行处理,对超声信号进行傅里叶变换,滤除正向传播的超声信号,得到反向传播的散射波信号,对缺陷进行位置识别和定量分析。Jung-Ryul Lee^[11-12]等人提出采取异常波传播图像法对一些复杂形状的采集进行激光超声可视化检测,这种异常波传播图像法不仅能有效抑制事件波信号,而且能对异常波信号进行有效的分离提取,对缺陷进行位置检测和定量,取得较好的缺陷定量分析结果。M Kaphle, V Giurgiutiu 和 W Fan^[13-14]等人提出采取小波变换的方式对超声信号进行分析。小波分析的方法能很好地识别超声波模式,提供了一种提取超声波有用信号的有效方法。研究不同的散射波分离算法对从超声信号中准确分离出缺陷产生的散射波信号,对散射波信号进行传播映像,实现对散射波信号动态图像可视化,可对一些复杂形状的设备进行缺陷的定量分析。

2.4 生物组织光声成像

激光超声技术还可应用于生物医学工程中。该技术主要采用超声波信号在生物组织中传播成像方法,为医学提供了一种无损伤、实时、高分辨力的成像技术。该光声成像的基本原理是:脉冲激光束照射至生物体,生物组织吸收激光束的能量,由于热膨胀效应,产生的超声波信号在人体中传播,利用检测到的超声波信号对其图像进行重建,从而得到生物组织影像。该光声成像技术^[15-16]主要应用于生物医学工程方面,例如口腔癌、血管病变^[17]等方面,具有十分广阔的应用前景。

3 结语

激光超声技术作为一种在无损检测和无损评估领域的重要检测技术,已经取得了许多令人瞩目的

成就。但是,激光超声检测技术存在灵敏度低、系统复杂、价格高等缺点。尽管激光超声技术在工业无损检测领域中仍有一段相当长的路要走,但是随着激光超声技术的发展,其将在工业无损检测领域有着更广泛的应用。

参考文献:

- [1] White R M. Elastic wave generation by electron bombardment of electron magnetic wave absorption[J]. J Appl Phys,1963(34):2123-2124.
- [2] Askaryan G A. Excess negative charge of an electron-photon shower and its coherent radio emission[J]. Soviet Physics,1963,14(2):441-443.
- [3] Ledbetter H M, Moulder J C. Laser-induced Rayleigh waves in aluminum[J]. J Acoust Soc Am,1979(65):840-842.
- [4] JMonchal P, Heon R. Laser ultrasonic generation and optical-detection with a confocal Fabry-Pérot interferometer[J]. Mater Eval,1986,44(9):1231-1237.
- [5] Podymova N, Karabutov A. Laser optoacoustic non-destructive method of thickness measurement of sub-surface damaged layer in machined silicon wafers [J]. Journal of Physics,2010,214(1):12-54.
- [6] Podymova N, Karabutov A, Ikobelev L. Laser optoacoustic method of local porosity measurement of particles reinforced Composites [J]. Journal of Physics, 2011,218(1):12-38.
- [7] Master ZM, Michaels TE, Michaels JE. Incident wave removal for defect enhancement in acoustic wave field imaging[J]. AIP CP894-Review of Quantitative Non-destructive Evaluation,2007(26):665.
- [8] 潘永东. 激光超声检测铝合金材料的残余应力分布

(上接第 45 页)

参考文献:

- [1] 谢宗琪,苏霓,张磊,等. 复合材料蜂窝夹芯板低速冲击损伤扩展特性[J]. 南京航空航天大学学报,2009,41(1):31-35.
- [2] 张广平,戴干策. 复合材料蜂窝夹芯板及其应用[J]. 纤维复合材料,2000,25(2):25-29.
- [3] Chotard T J. New applications of acoustic emission technique for real-time monitoring of material processes[J]. Journal of Materials Science Letters, 2002, (21):1261-1266.
- [4] 皇甫劭炜,童小燕,姚磊江,等. 复合材料层合板损伤的声发射试验研究[J]. 机械科学与技术,2009,28(5):

- [5] [J]. 声学学报,2004(3):254-257.
- [9] Ruzzene M. Frequency-wave number domain filtering for improved damage visualization[J]. Smart Materials and Structures,2007(16):2116.
- [10] Michaels TE, Massimo R, Michaels JE. Incident wave removal through frequency-wave number filtering of full wavefield data[J]. AIP CP1096-Review of Quantitative Nondestructive Evaluation,2009(28):604.
- [11] Jung-Ryul Lee, Chen Ciang Chia, Chan-Yik Park, et al. Laser ultrasonic anomalous wave propagation imaging method with adjacent wave subtraction: Algorithm[J]. Optics & Laser Technology, 2012(44):1507-1515.
- [12] Jung-Ryul Lee, Chen Ciang Chia, Chan-Yik Park. Laser ultrasonic anomalous wave propagation imaging method with adjacent wave subtraction: Application to actual damages in composite wing[J]. Optics & Laser Technology,2012(44):428-440.
- [13] Yu L, Giurgiutiu V. Advanced signal processing for enhanced damage detection with piezoelectric wafer active sensors [J]. Smart Structures and Systems, 2005,1(2):185-215.
- [14] Fan W, Qiao P. A 2-D continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures [J]. International Journal of Solids and Structures,2009(46):4379-4395.
- [15] 钱盛发. 光声结合用于撒物组织成像的研究进展[J]. 激光生物学报,2000,9(3):228-231.
- [16] 王亚非. 激光扫描声学显微镜光学系统的设计[J]. 光学技术,1998(5):73-75,81.
- [17] 马勇. 超谐次声波场及其生物组织成像的理论及实验研究[J]. 声学学报,2006,31(5):433-437.
- [18] 669-673.
- [5] 耿荣生,沈功田,刘时风. 基于波形分析的声发射信号处理技术[J]. 无损检测,2002,24(6):257-261.
- [6] 郑洁,姚磊江,程起有,等. 复合材料损伤的声发射实验研究[J]. 机械科学与技术,2010,29(11):1478-1481.
- [7] 李海斌,阳建红,刘承武,等. 复合材料随机渐进失效分析与声发射监测[J]. 复合材料学报,2011,28(1):223-229.
- [8] Dmitry S Ivanov, Fabier Baudry, Björn Van Den Broucke, et al. Failure analysis of triaxial braided composite[J]. Composites Science and Technology, 2009,69:1372-1380.
- [9] Jeongguk Kim, Peter K Liaw. The nondestructive evaluation of advanced ceramics and ceramic-matrix composites[J]. Composites,1997(28A):473-480.