

文章编号:1674-8190(2014)03-269-06

激光超声技术在航空碳纤维复合材料无损检测中的应用

张昭,肖迎春,李闵行,郭佳,王倩

(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: 随着碳纤维复合材料在航空航天领域越来越广泛的应用,激光超声技术在对其进行无损检测方面的优势逐渐凸显。分析了发展复合材料激光超声无损检测技术的必要性,介绍了碳纤维复合材料激光超声无损检测技术的发展概况,分析了其主要关键技术,包括超声波激光激励技术、超声波激光接收技术和干涉技术等,评述了现有技术存在的问题及未来的发展方向,对激光超声技术未来的应用和发展有一定的参考和借鉴作用。

关键词: 激光超声;碳纤维;复合材料;无损检测

中图分类号: TN247; V25

文献标识码: A

Applications of Laser Ultrasonic Nondestructive Testing Technology in Aeronautical Carbon Fiber Composite

Zhang Zhao, Xiao Yingchun, Li Minhang, Guo Jia, Wang Qian

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

Abstract: With the application of carbon fiber composite materials in the aerospace field more and more widely, the superiority of the laser ultrasonic technique in the nondestructive testing is showed gradually. The necessity of nondestructive testing technology of laser ultrasonic in composite is analyzed, the development situation of this technology is introduced and the key technical point is indicated, including the ultrasonic laser exciting technique, ultrasonic laser receiving and interference technique etc. Finally, the existing problem and the development of the technique are described. It has certain reference in future development and application for laser ultrasonic nondestructive testing technology.

Key words: laser ultrasonic; carbon fiber; composite; nondestructive testing

0 引言

与金属材料相比,复合材料具有更好的比强度、比刚度、抗疲劳能力、安全性和减震性,成型工艺简单^[1],其密度相对较小,大面积采用复合材料可大幅降低飞机自身的重量。从某种意义上讲,在飞机构造中应用复合材料比例的高低标志着飞机的先进程度。为满足结构设计和降低制造成本的

需要,越来越多的帽型和整体成型结构被使用,这些复杂复合材料结构的使用在提高产品性能的同时,也给相应的无损检测技术提出了更高的要求^[2]。

从技术层面上,超声、X射线、声振(声阻)、激光电子剪切、红外等技术均可用于复合材料的无损检测,但就复合材料结构特点和缺陷特征、检测要求和检测环境等而言,超声是目前复合材料结构的一种主要无损检测方法,国际上70%~80%的复合材料结构都采用了超声检测技术^[3]。

激光超声检测技术作为一种新兴无损检测手段,在复合材料检测方面有着独特的优势,特别是对结构复杂的大型复合材料构件,该技术在最近几

十年里得到了快速发展。

本文以复合材料无损检测的激光超声技术为重点,介绍其发展概况及最新技术进展,分析其关键技术,对激光超声技术未来的应用和发展有一定的参考和借鉴作用。

1 发展及应用概况

1963年,R. M. White^[4]发现激光超声现象。自20世纪80年代,美国学者开始研究将激光超声应用于无损检测^[5-6],到20世纪90年代,主要有三个研究机构在进行针对复合材料的激光超声检测,分别是洛克韦尔国际科学中心,加拿大国家研究院和美国通用动力公司^[7-9]。洛克韦尔国际科学中心在20世纪90年代后期停止了相关研究。加拿大国家研究院搭建出两套准工业激光超声系统,称为LUS系统,一套提供给了法国宇航公司^[10],另一套提供给了美国空军^[11]。通用动力公司相关部门在20世纪90年代初被洛马公司收购,后者成为现阶段复合材料激光超声技术研究的领军者。

1998年,为了配合美国军方联合攻击机JSF的竞争,洛马公司建造了第一套激光超声系统(LUS);2000年和2004年,又分别为F22和F35战机建造了第二套和第三套激光超声系统;2011年向空客公司交付了一套LUS系统,安装在法国南特。

根据洛马公司公布的数据,在2000年6月到2006年1月之间,超过13 000件复合材料构件被激光超声系统所检测。LUS系统的检测速度高达450件/月,单套系统的检测速度可达400件/月,如图1所示^[12]。

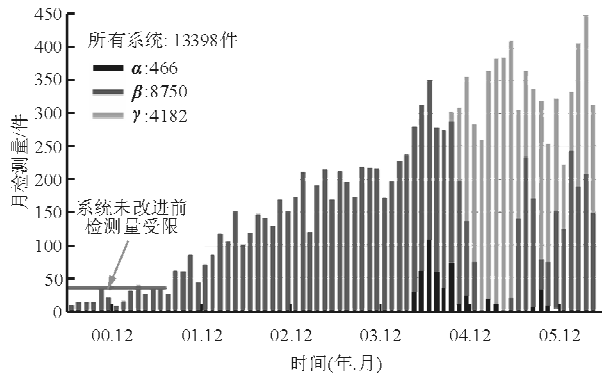


图1 洛马公司位于田纳西工厂的三套LUS系统从2000年到2006年的复合材料月检测量

Fig. 1 Composite amount of monthly of three sets LUS system from 2000 to 2006 to detect in lockheed Martin's Tennessee plan

在400 Hz的重频下,LUS的检测速度可达 $5.8 \text{ m}^2/\text{h}$ 。在配备了多维机械臂的情况下,LUS系统可以对形状复杂、体积庞大的试件进行高效检测,如图2所示。



(a) 某机型进气道



(b) 某机型机尾

图2 形状复杂、体积庞大的复合材料构件

Fig. 2 Composite component by complex shape and huge volume

LUS系统的检测速度受激光器重频的限制,目前最高为400 Hz,随着激光技术的发展,大于1 kHz的可用激光器一旦应用于激光超声检测,将大大提高其检测速度,美国和加拿大的科研人员正在研制大于1 kHz的激光器^[13]。

国内对激光超声的研究起步较晚,始于20世纪90年代末。钱梦麟等^[14]进行了激光超声产生机理研究并建立了理论模型。沈中华等^[15]研究了点光源和线光源激励表面波的数值模拟方法。近年来,北京航空航天大学、中国航空综合技术研究所、南京航空航天大学等研究机构陆续搭建了针对金属材料的激光超声检测试验系统。目前国内对于激光超声的研究尚停留在试验室阶段,中国飞机强度研究所针对复合材料的激光超声检测研究做了部分理论工作,而对于复合材料激光超声无损检测的系统尚未见报道。

2 激光超声无损检测的关键技术

2.1 超声波激光激发技术

激光束照射在试样表面,发生热弹效应或融蚀效应,在试样表面 $10\sim 100\mu\text{m}$ 的厚度内激发出超声波。对于金属材料,使用工业上常见的 Nd:YAG 脉冲激光器即可激发出超声波,而对于复合材料来说,存在两个重要问题:①YAG 激光器发射出的 1064 nm 激光束在碳纤维-环氧胶中的光吸收长度在 1 mm 以上,造成盲区大;② 1064 nm 激光束能够穿透复合材料表面,对其内部造成伤害^[16]。现阶段,针对复合材料,单脉冲能量大于 200 mJ 的 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 脉冲激光器为最佳的激励激光器, CO_2 激光器光束在碳纤维和环氧胶中的光吸收深度如图 3 所示^[17]。

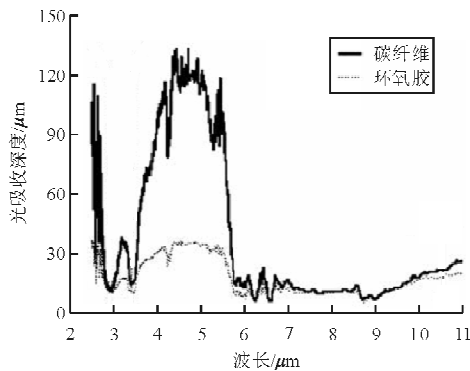


图 3 不同波长激光在碳纤维和环氧胶中的光吸收深度
Fig. 3 Relationship between absorption depth and various wave-lengths of laser in carbon fiber and epoxy

根据美国学者的研究,产生适合复合材料检测的 $1\sim 10\text{ MHz}$ 带宽的超声信号,最佳的光吸收深度约为 $100\mu\text{m}$,最佳的脉冲持续时间为 33 ns 。从图 3 可以看出,光吸收深度在 $100\mu\text{m}$ 的激光波长对应在 $3.0\sim 3.4\mu\text{m}$ 之间。然而,现阶段并没有这个波段的工程应用激光器,美国和加拿大的研究者正在致力于这方面的研究。

2.2 超声波激光接收技术

在激光超声研究的前期,研究者在试验室使用功率相对较低(小于 5 W)的连续激光器作为探测激光器。对复合材料来说,入射激光束在其相对粗糙的表面上发生散射,并有一部分被其深色的表面吸收,因此低功率的连续激光器不能提供检测表面超声振动所需的能量;另外,一些复合材料对激光束的吸收系数很大,由于累积效果,连续的激光照

射会导致复合材料表面烧伤,如图 4 所示。

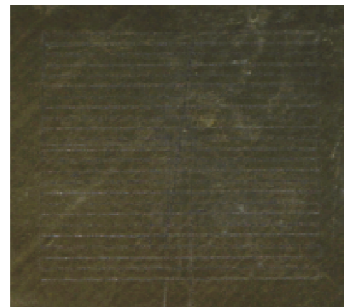


图 4 热量累积造成的碳纤维复合材料的表面烧伤
Fig. 4 Surface burning of the carbon fiber composite caused by thermal cumulation

针对复合材料,需要使用高能量脉冲激光器来解决上述问题,从而得到幅值足够大的反射信号,并且避免连续热量累积导致的烧蚀。

由于复合材料的漫反射作用,探测激光器可以不必保持和试件表面垂直,根据洛马公司的数据,使用 500 W 的探测激光器,激光头距试件 1.8 m 时,角度可以偏转 $\pm 45^\circ$ 。传统的使用压电效应的超声检测技术,一般要求探头必须和试件表面垂直,否则返回的超声波便不能被探头接收,激光超声则可以打破这一限制,如图 5 所示,这也是激光超声在复杂形状复合材料检测上的优势所在。

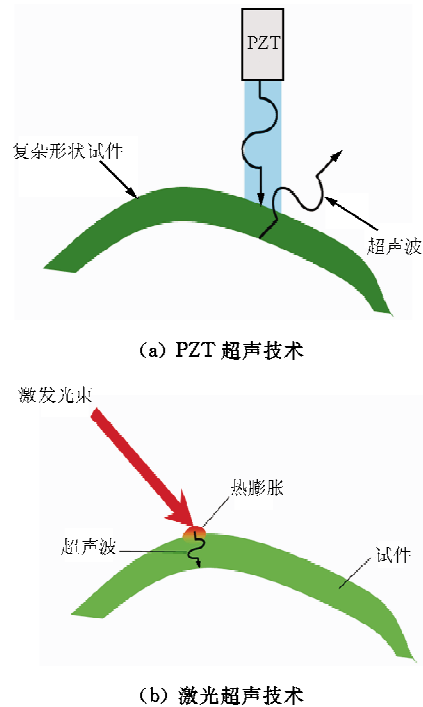


图 5 基于压电效应和激光热冲击效应的超声技术对比
Fig. 5 Ultrasonic technology comparison between piezoelectric effect and laser thermal shock effect

高能量的脉冲激光器一般由一个低功率的连续激光器和放大器组成,其中单频低功率放大器被称为源激光器。放大器的作用是以一定间隔重复将源激光器的光束放大到所需光强。放大器由激光二极管等光学增益器件组成。超声信号在复合材料中的传播时间根据其厚度和材料不同而有所差异,一般情况下不会超过 $50\mu\text{s}$,放大器提供的高能激光脉冲一般取 $80\mu\text{s}$,试样中的超声信号将被完整记录。近年来,一种新型光学放大器被研制出来,从而产生一种新型高能脉冲探测激光器结构。该新型光学放大器基于光纤放大器而来,能够将激光功率稳定放大到 500 W 以上,而传统放大器的峰值功率为 500 W 左右。除了成本,相对于传统放大器,光纤放大器在各个方面都具有优势。基于光纤放大器的探测激光器,可以工作在任意重复频率,光纤放大器最主要的应用领域是电信行业,巨大的行业需求和应用也使得其性能得到保证。光纤放大器和基于光二极管泵浦的盘型激光放大器的使用寿命对比如图 6 所示。

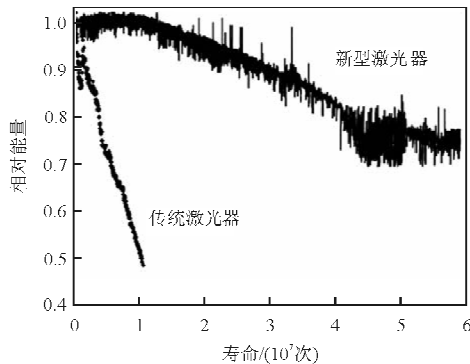


图 6 新型激光器与传统激光器的使用寿命对比结果

Fig. 6 Life comparison between new laser and traditional laser

从图 6 可以看出,和基于光二极管放大器相比,光纤放大器具有显著较高的可靠性和能量。

2.3 干涉技术

1988 年,Monchalin 第一次使用共焦法布里—珀罗干涉仪(CFP)探测超声波^[18]。在多数情况下,CFP 干涉仪被用来对纤维增强型复合材料进行检测。相对于单腔 CFP 干涉仪,双腔 CFP 干涉仪能够提供更大的信噪比,两个腔的超声信号相位相反,将其进行差分,即可得到双倍的信号强度,同

时也去除了部分噪声信号,双腔的另一个优点是充分利用了试样返回的光信号。单腔和双腔 CFP 干涉仪探测信号信噪比对比如图 7 所示。

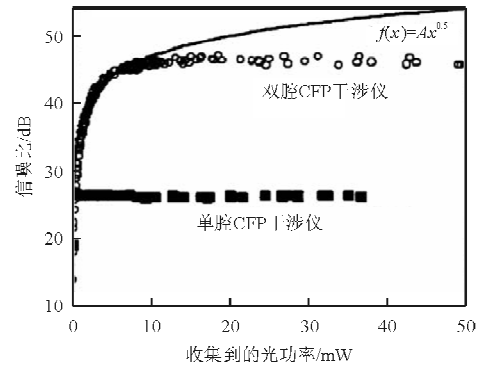


图 7 单腔和双腔 CFP 干涉仪探测信号信噪比对比

Fig. 7 Signal-to-noise ratio of detection signal comparison between single-chamber and dual-chamber CFP

从图 7 可以看出:当收集的光功率大于 1 mW 时,双腔 CFP 干涉仪的信噪比高于单腔 CFP 干涉仪,归因于两个腔的差分过程抵消了部分噪声信号;然而双腔 CFP 干涉仪的信噪比曲线在大于 10 mW 后趋于平缓,这是因为探测激光束的相位噪声,相位噪声和超声信号相似,而干涉仪是用来处理光信号的,因此双腔 CFP 干涉仪不能削弱相位噪声的影响。

CFP 干涉仪适用于激光超声信号的检测得益于其在粗糙表面上使用相对较大的光斑直径(大于 5 mm)。缺点是需要稳定腔体不受环境变化和光束偏移的影响,可以使用试样返回的光束和参考光进行稳定。使用试样返回的光束其问题在于光束强度不稳定,导致在光强小于某一值时发生失稳,从而损失数据;而使用参考光束的问题在于很难将参考光束和测量光束结合到一起然后再进行分离^[17]。

双波混合干涉仪(TWM)也被用来进行复合材料激光超声信号的处理,加拿大 Tecnar 公司的复合材料激光超声系统采用该类型干涉仪,美国 Bossa Nova 公司研制出的新型 TWM 干涉仪可以同时检测面内振动和离面振动^[19]。

3 存在的问题及发展方向

激光超声作为一项新兴的检测技术,虽然在碳纤维复合材料检测上具备一些现有技术所没有的

优势,但就现阶段而言,还存在一些关键问题。首先是成本问题,碳纤维复合材料激光超声检测系统动辄上千万美元的价格使其只有少数航空巨头能够负担得起,这些造价中,大功率高技术难度的激光器和复杂的扫查系统是主要贡献者;其次是系统本身庞大的体积限制了其使用场合只能是宽敞的生产车间或者单独建造的检测实验室,而非航空零部件工作的现场;第三是检测速度,检测复杂形状碳纤维复合材料部件具有速度优势,但是在检测平板或者曲率较小的碳纤维复合材料部件时,激光超声技术和传统超声技术在速度上相比没有任何优势,这一问题源于现阶段激光超声系统的绝对重复速度;最后是烧蚀问题,虽然烧蚀现象的发生可控,但是在实际应用中,能量的大小、信号的衰减以及检测距离之间总是存在需要权衡的矛盾,特别是被检测件厚度较大的情况。

上述问题,大部分可以归结到激光器上,要突破现阶段遇到的瓶颈,需要研制出高单脉冲能量、高重复频率的激励激光器,并且还需要附上高脉冲持续时间的接收激光器;激光器的体积也必须越来越小;想要摆脱对激光器的能量依赖,需要提高检测系统的灵敏度,而检测系统的灵敏度又依赖于其自身的光学系统和电学系统,目前能做的是改善光学干涉仪的结构,以提高微振动的检测能力;对于烧蚀问题,目前学者们积极研究的是在被检测材料表面涂上可以产生超声波并且能够保护材料的薄膜材料,如水混合物,除此之外,引进更加智能的激光能量控制方法也是可取的途径。

激光超声技术以期在碳纤维复合材料检测领域获得大范围应用,还需进行如下改进:

首先,集成化及小型化。激光器、探头、干涉仪等组件,都要做到小型化;激光器、干涉仪和信号处理系统更加集成化。未来的激光超声仪要和现在的常规超声仪一样是便携式的,探头和基于压电效应的超声探头大小相当,甚至可以手持在试件表面移动。其次,远距离快速扫查。未来的激光超声系统不仅能够取代传统超声仪对试件进行近距离精细检测,也可以远距离对大型部件甚至是整机进行快速扫查,这是激光超声技术所具有的潜力。

4 结束语

激光超声无损检测技术具有高的时间和空间

分辨率、非接触测量、不需要耦合剂、对复杂构件检测效率高等诸多优势,在碳纤维复合材料使用越来越广泛的趋势下,激光超声检测技术具有广阔的应用前景和巨大的发展潜力。

现阶段,由于成本和体积限制,碳纤维激光超声检测技术在国外主要应用于飞机制造环节。由于受到现阶段激光器技术及光学技术的限制,激光超声技术的发展和运用遇到一些技术瓶颈,首先需要突破的是激光器技术,亟需研制出体积小、成本低、重频高的激光器,这是碳纤维激光超声检测设备能否小型化、普遍推广的关键。

参考文献

- [1] 沈海军. 现代飞机的“血肉”: 复合材料[J]. 百科知识, 2008(6): 21-22.
Shen Haijun. Modern aircraft “flesh and blood”; composite materials[J]. Encyclopedic Knowledge, 2008(6): 21-22. (in Chinese)
- [2] 何方成, 王铮, 史丽军. 复合材料制件拐角部位超声检测技术[J]. 材料工程, 2011(7): 80-84.
He Fangcheng, Wang Zheng, Shi Lijun. Ultrasonic testing technique for the inspection of defects in the corner of composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(7): 80-84. (in Chinese)
- [3] 刘松平, 郭恩明, 刘菲菲, 等. 面向大型复合材料结构的高效超声自动扫描成像检测技术[J]. 航空制造技术, 2012(18): 79-82.
Liu Songping, Guo Enming, Liu Feifei, et al. High efficient ultrasonic automatic scanning imaging inspection technique for large-scale composites structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(18): 79-82. (in Chinese)
- [4] White R M. Generation of elastic waves by transient surface heating[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(12): 3559-3567.
- [5] Birnbaum G, White G S. Research techniques in non-destructive testing[M]. New York: Academic Press, 1984: 259-365.
- [6] Moss B C, Scruby C B. Investigation of ultrasonic transducers using optical techniques[J]. Ultrasonics, 1988, 26(4): 179-188.
- [7] Tittmann B R, Linebarger R S, Addison Jr R C. Laser-based ultrasonics on Gr/epoxy composite; interferometric detection[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1990, 9(4): 479-486.
- [8] Christian Padioleau, Paul Bouchard, René Héon, et al. Laser ultrasonic inspection of graphite epoxy laminates[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1993, 12(2): 1345-1352.
- [9] Chang F H, Drake T E, Osterkamp M A, et al. Laser ul-

- trasonic inspection of honeycomb aircraft structures[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1993, 12(4): 611-616.
- [10] Pétillon O, Dupuis J P, David D, et al. Laser ultrasonics; a non contacting NDT system[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1995, 14(4): 1189-1195.
- [11] Fiedler C J, Ducharme T, Kwan J. The laser ultrasonic inspection system(LUIS) at the sacramento air logistics center[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16(2): 515-522.
- [12] Voillaume H, Simonet D, Eads Ccr, et al. Analysis of commercial aeronautics applications of laser ultrasonics for composite manufacturing[C]. Proceeding of the 9th European NDT Conference. Berlin; 2006.
- [13] Antonio Tanarro, Tecnomat, Spain. A new standard in QA for composites manufacturing using laser ultrasonics[J]. Aerospace Testing International Showcase, 2011: 86-90.
- [14] 钱梦霖, 张万春, 吴田成, 等. 激光热弹激发超声脉冲的特性研究[J]. 声学学报, 1995, 20(1): 1-10.
Qian Menglu, Zhang Wanchun, Wu Tiancheng, et al. Study of characteristics of ultrasound pulse thermoelastically generated by a laser pulse[J]. Acta Acustica, 1995, 20(1): 1-10. (in Chinese)
- [15] 沈中华, 关键飞, 陆建, 等. 激光热弹激发超声的有限元数值模拟[J]. 声学技术, 2005, 24(1): 9-10.
Shen Zhonghua, Guan Jianfei, Lu Jian, et al. Finite element simulation of laser ultrasonic thermoelastic[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(1): 9-10. (in Chinese)
- [16] Edwards C, Stratoudaki T, Dixon S, et al. Laser based ultrasound generation efficiency in carbon fibre reinforced composites[C]// AIP Conference Proceedings, 2001: 220-227.
- [17] Marc Dubois, Thomas E Drake Jr. Evolution of industrial laser-ultrasonic systems for the inspection of composites[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2011, 26(3/4): 213-228.
- [18] Jean-Pierre Monchalín. Optical detection of ultrasound at a distance using a confocal Fabry-Perot interferometer[J]. Applied Physics Letters, 1985, 47(1): 14-16.
- [19] Pouet B, Wartelle A, Breugnot S. Multi-detector receiver for laser ultrasonic measurement on the run[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2011, 26(3/4): 253-266.

作者简介:

张 昭(1984—),男,硕士,助理工程师。主要研究方向:飞机结构无损检测及健康检测。

肖迎春(1964—),男,博士,研究员。主要研究方向:飞机结构无损检测及健康检测。

李闵行(1963—),男,高级工程师。主要研究方向:飞机结构无损检测及健康检测。

郭 佳(1987—),女,硕士,助理工程师。主要研究方向:飞机结构无损检测及健康检测。

王 倩(1985—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构无损检测及健康检测。

(编辑:马文静)