

引文格式: 曾吕明, 龙柏年, 廖为圣, 等. 薄型层压复合材料的大视场激光超声检测研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(22): 53-59.

ZENG Lüming, LONG Bainian, LIAO Weisheng, et al. Large-field laser ultrasonic testing of thin layer laminated composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(22): 53-59.

# 薄型层压复合材料的大视场激光超声检测研究\*

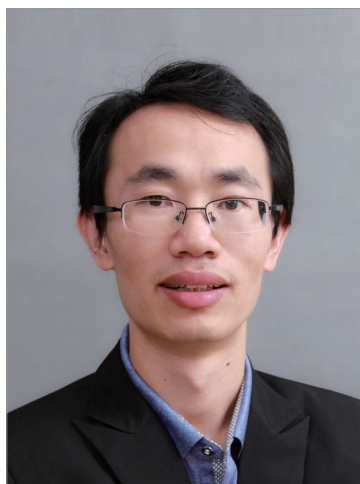
曾吕明, 龙柏年, 廖为圣, 程中文, 纪轩荣

(广东工业大学精密电子制造技术与装备国家重点实验室, 广州 510006)

**[摘要]** 层压复合材料由两层或多层同种或异种材料叠压形成, 因其优异的力学性能被广泛应用于航空、航天和航海等领域。然而在生产和使用阶段, 层间易产生脱黏和分层等缺陷, 极大影响构件的稳定性。目前, 常用的接触式超声检测法存在盲区大、视场小、伪影多、需水耦合等局限性。结合激光超声与空耦超声的优点, 搭建一套由八阵元 250 kHz 空耦超声换能器组成的非接触激光超声检测系统, 对厚度分别为 0.8 mm 金属-碳纤维和 0.3 mm 金属-金属的薄型层压复合材料进行检测。系统不仅能清晰显示出样品内部的多个脱黏缺陷, 还成功识别出由黏结层的压痕和气泡形成的微空洞缺陷, 成像视场和信噪比分别高达 220 mm 和 35 dB, 并在与高频相控阵检测和 X 射线检测对比中展现出优异的成像对比度、分辨率和灵敏度。试验结果表明, 开发的大视场空耦激光超声检测系统在大尺寸层压复合材料方面具有广阔的应用前景。

**关键词:** 层压复合材料; 空耦激光超声; 阵列式空耦超声换能器; 大视场检测; 缺陷检测

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.22.053



曾吕明

副研究员, 研究方向为激光超声成像。

层压复合材料是一种由两种或两种以上材料按照一定顺序叠合, 经过黏合、压合等工艺制成的多功能

复合材料<sup>[1]</sup>。由于其具有加工周期短、比重小、比强度高、耐腐蚀、阻燃和耐冲击等诸多优点, 被广泛应用于飞机、火箭和卫星等航空航天领域<sup>[2]</sup>。例如, 飞机的机翼、尾翼和机身蒙皮主要采用层压复合材料<sup>[3]</sup>, 空客 A380 客机的机身蒙皮壁板大量使用层压复合材料<sup>[4]</sup>。然而在加工和服役过程中, 层压复合材料不可避免地受到冲击、载荷等影响导致材料内部出现不可见的损伤, 这影响材料的结构强度和耐久性, 造成材料在使用过程中易发生形变、断裂等不可预见的损失。

目前, 对于层压复合材料的检测技术主要包括声发射检测法<sup>[5-6]</sup>、超声波检测法<sup>[7-8]</sup>、射线检测法<sup>[9-10]</sup>。声发射技术是利用材料内部变形而产生声信号, 并不能适配主动检测<sup>[11-13]</sup>。传统超声检测由于要使用耦合剂, 不

适用于检测环境恶劣、被测对象对耦合剂敏感等场合。此外, 超声检测中盲区的存在加大了对浅层区域缺陷的识别难度<sup>[14-17]</sup>。X 射线检测技术对于体积缺陷(如孔隙和空洞缺陷)非常敏感, 但对于分层和脱黏等非体积缺陷检测灵敏度则会降低<sup>[18-19]</sup>。此外, 对于特殊结构的样品(如蜂窝夹芯结构), 若 X 射线照相角度不合理, 则会出现投影重叠的情况, 可能导致缺陷无法被成功检测<sup>[20]</sup>。

激光超声作为一种新兴的非接触检测技术, 具有长距离、频带宽和空间分辨率高等优点<sup>[21-23]</sup>, 摆脱了常规超声检测的耦合剂限制。当前, 对激光产生的超声信号的接收方式主要有接触式与非接触式两种<sup>[21]</sup>。刘松平等<sup>[24]</sup>使用超声换能器接收激光产生的超声信号, 识别出碳纤维增强

\* 基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金重点项目(U2133213); 国家自然科学基金(51975131, 62205070); 广东省自然科学基金(2023A1515011620, 2022A1515240040)。

双马树脂基复合材料中的分层缺陷。朱倩等<sup>[25]</sup>采用日本富士公司生产的中心频率为 350 kHz 的低频声发射传感器接收激光超声信号,检测出由碳纤维复合材料和铝板组成的双层层压材料的表面缺陷。Lee 等<sup>[26]</sup>使用振镜控制激光偏转对风力涡轮机叶片表面进行扫查,使用声发射传感器接收信号,实现对叶片的远距离检测。然而,接触式传感器必须固定在样品的表面,无法发挥激光超声检测非接触的优势。非接触式检测主要采用光学方法检测超声信号。周正干等<sup>[27]</sup>利用激光干涉仪搭建完全非接触激光超声检测系统,实现对复合材料层压板表面钻孔缺陷的激光超声 C 扫描。Ji 等<sup>[28-29]</sup>采用 TWM 干涉仪检测激光超声信号,成功检测出铜-铝、不锈钢-碳钢两种层压复合材料的内部缺陷。全光学非接触激光超声系统,需要结合干涉仪实现完全非接触检测。然而,干涉仪成本高昂,对检测对象表面要求苛刻,限制其发展<sup>[30]</sup>。空耦超声换能器灵敏度高、成本效益好、抗干扰能力强,具备实现完全非接触激光超声检测技术的潜力。刘旭<sup>[31]</sup>和 Zeng<sup>[32]</sup>等利用空耦超声换能器搭建空耦激光超声检测系统,检测碳纤维增强环氧树脂编织复合材料表面和内部的缺陷,但其采用机械移动平台扫描,效率低下。

为解决以往激光超声检测技术存在的不足,本文提出采用阵列式空耦超声换能器接收激光产生的超声信号,搭建一套非接触的大视场空耦激光超声检测系统。该系统在降低检测成本的前提下,保证检测灵敏度并增加单次检测范围,搭配二维扫描振镜实现对样品的快速扫描,极大地提高检测效率。本文研究了阵列式空耦超声换能器的性能和阵列式空耦激光超声对铝-碳纤维薄型层压复合材料与铝-不锈钢板薄型层压复合材料脱黏表征性能,并通过对比高频相控阵超声与 X 射线检测技术

验证大视场空耦激光超声检测系统的可靠性和准确度,为薄型层压复合材料脱黏缺陷检测奠定技术基础。

## 1 系统介绍

### 1.1 系统原理

本研究搭建的空耦激光超声检测系统主要组成部分包括脉冲激光器、扫描振镜和八阵元空耦超声换能器等。激光器采用双波长调 Q 激光器 PD-1064-1-KD (苏州帕沃激光公司生产),波长为 532 nm,脉冲宽度为 8.7 ns,单次脉冲能量最大为 0.72 mJ;扫描振镜为 UltraScan (A) 10 (深圳市大族思特公司),扫描角度为  $\pm 12.5^\circ$ ,扫描速度最高可达 2 m/s,场镜焦距为 500 mm;八阵元空耦超声换能器是基于 1-3 型压电复合材料自主研发的,中心频率为 250 kHz;控制卡为 NI 9263 型的 4 通道电压输出模块 (美国 National Instruments 公司);放大器为 5662 型的超声前置放大器 (日本奥林巴斯公司),放大倍数为 54 dB;滤波器为 BLP-1.9+ 型的 1.9 MHz 低通滤波器 (美国 Mini-Circuits 公司);采集卡为 NI PXIe-5105 型的八通道高速采集卡 (美国 National Instruments 公司),采样率可达 50 MHz。

该系统的工作原理如图 1 所示,计算机通过控制卡分别发送方波信号至激光控制器控制激光触发、锯齿波信号至扫描振镜控制镜片偏转。

激光控制器在接收方波信号后向激光器发送指令,激光器随即产生光束。光束在经过振镜偏转与场镜聚焦后,激励样品表面产生超声波并往样品内部传播过程中,遇到缺陷会发生反射、折射、透射和衍射等现象,使信号幅值出现改变。超声波穿透样品与空气耦合,被放置在样品另一侧的空耦超声换能器接收。接收的信号依次经过放大器、低通滤波器后被采集卡所采集。在完成信号采集后,激光束通过振镜偏转移动至下一个位置激发超声波,并重复上述过程。通过逐点激发激光超声信号完成对样品的扫查,最后将所得激光位置及声信号数据传输至计算机进行重建成像。

### 1.2 八阵元空耦超声换能器参数与测试

八阵元空耦超声换能器的实物如图 2 (a) 所示,长  $\times$  宽  $\times$  高为 220 mm  $\times$  48 mm  $\times$  38 mm,单个阵元孔径面积为 25 mm  $\times$  20 mm,相邻两个阵元间的间距为 1 mm。中心频率为 250 kHz 附近的发射型空耦超声换能器发射超声波信号,八阵元空耦超声换能器中每个阵元单独接收,8 个阵元实测对应超声信号响应的中心频率如图 2 (b) 所示,最小值为 242 kHz,最大值为 249 kHz,平均值为 245 kHz。8 个阵元的中心频率都较为接近,标准差为 2.45 kHz; -6 dB 带宽参数最小值为 19.47%,最大值为 24.74%,平均

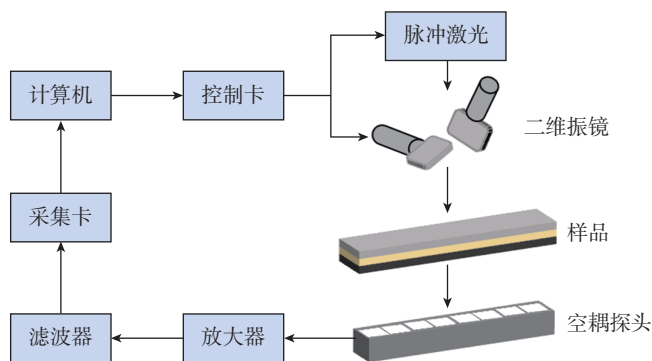


图 1 系统工作原理图

Fig.1 System working principle diagram

值为 22.02%，标准差为 1.84%。

为获得空耦超声换能器对激光超声信号实际响应频率，采用单点脉冲激光激发空耦超声换能器透射式接收方式测量。测量步骤如下：将激光照射在厚度为 3.2 mm 的铝-碳纤维层压材料表面，采用透射式接收激光超声信号，时域信号如图 3 (a) 中黑色曲线所示，蓝色曲线为对黑色曲线进行傅里叶变换的结果，可得空耦超声换能器对激光超声信号实际响应的中心频率约为 270 kHz。

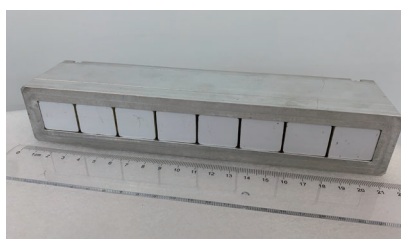
超声波在空气中传播会发生衰减并影响空耦超声换能器接收到的信号幅值<sup>[33]</sup>。因此，分别研究空耦超声换能器与样品之间的最大工作距离和最大接收角度。测量 0~60 mm 范围内空耦超声换能器接收到的信号幅值随两者间垂直距离增加的变化趋势，测量间距为 1 mm，具体变化关系如图 3 (b) 所示。随着距离的增加，换能器接收到的信号幅值呈下降趋势，在距离为 0~10 mm 之间信号幅值下降较急剧；当距离大于 10 mm 时，信号幅值的下降逐渐趋于平缓。以信号幅值下降 -6 dB 为标准，有效接收距离为 13 mm。为测量空耦超声换能器最大的接收角度，将空耦超声换能器与样品之间的相对垂直距离固定为 5 mm，通过改变轴向与横向激光的照射位置，得到空耦超声换能器在两个方向的最大接收角度，如图 3 (c) 和 (d) 所示。可知，轴向范围接收的信号变化趋势比较急剧，而横向范围变化则比较平滑。以信号幅值下降 -6 dB 为标准，并与阵元尺寸进行比较，得到空耦超声换能器的最大接收角度，与孔径面积几乎一致。

## 2 试验

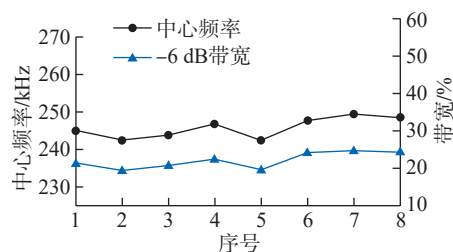
为验证系统的可靠性，制作两种类型的薄型层压复合材料，分别为金属与碳纤维粘接而成的薄型层压复合材料和金属与金属粘接而成

的薄型层压复合材料，如图 4 (a) 和 (b) 所示。金属-碳纤维层压复合材料的制作方法为：将长和宽均为 160 mm × 34 mm，厚度分别为 0.2 mm 的 1060 铝板和 0.5 mm 的碳纤维板，通过厚度为 0.1 mm 的胶层进行粘接；金属-金属层压复合材料的制作方法为：将长和宽均为 150 mm × 30 mm，厚度分别为 0.1 mm 的 1060 铝箔和 0.08 mm 的 304H 不锈钢箔，通过厚度为 0.1 mm 的胶层进行粘接。两种复合材料均在胶层中去除边长 25 mm 的三角形、边长 25 mm 的正方

形和直径 25 mm 的圆形区域，以模拟层压复合材料内部的脱黏缺陷，如图 4 (c) 和 (d) 所示。两种材料通过胶层粘接时，胶层中被去除的部分则为空气，超声波在传播过程中会由于声阻抗的差异使信号幅值出现差异。试验参数设置为激光能量 0.25 mJ、激光重复频率 10 kHz、振镜扫描两点间的步距 0.2 mm。使用 LabVIEW 程序控制激光的触发与扫描振镜的偏转。根据先前测试的激光超声信号对接收距离的变化趋势，样品与空耦超声换能器之间的距离设置为 5



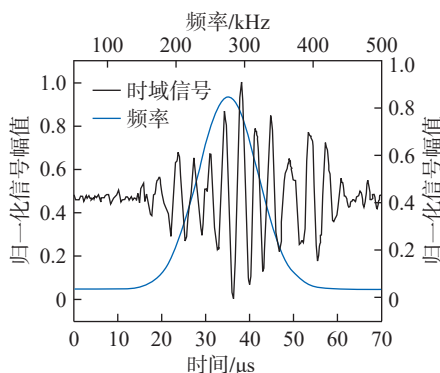
(a) 探头实物图



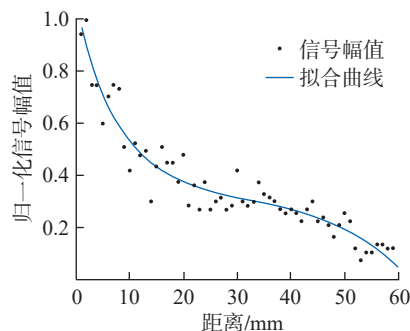
(b) 中心频率与-6 dB带宽

图 2 250 kHz 空耦超声换能器实物与参数

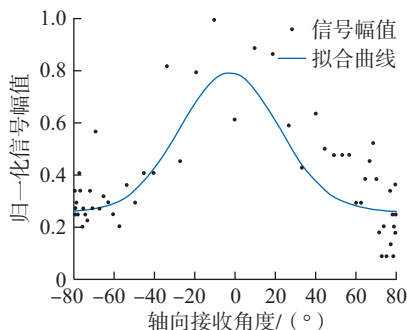
Fig.2 Picture and parameters of 250 kHz air-coupled ultrasonic transducer



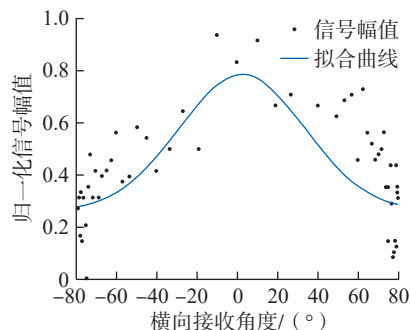
(a) 探头对于激光超声信号的响应



(b) 信号幅值随接收距离的变化



(c) 信号幅值随轴向接收角度的变化



(d) 信号幅值随横向接收角度的变化

图 3 250 kHz 空耦超声换能器性能表征

Fig.3 Performance characterization of 250 kHz air-coupled ultrasonic transducer

mm。为提高信号的信噪比,平均次数设置为 40 次。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 金属与碳纤维薄型层压复合材料

金属-碳纤维薄型层压复合材料的空耦激光超声成像效果如图 5 (a) 所示,结果显示,人为制作的 3 个脱黏缺陷均被精确地定位并清晰地成像,信噪比高达 35 dB。为验证本文所搭建的空耦激光超声检测系统的可靠性,还对该样品进行 20 MHz 相控阵超声检测 (ROBUST 32-128 (64)\_TOFD),探头晶元数为 64,晶元虚拟孔径为 8,晶元步距为 1。为增强信号的信噪比,将增益设置为 20 dB。此外,为消除界面处产生的杂波影响,将闸门阈值设置为 10%,成像效果如图 5 (b) 所示。可知,人造缺陷虽然能被成功地检测出,但缺陷的形状则发生明显的改变。这是由于相控阵超声检测采用的是线性探头,每个阵元在长度方向与宽度方向(步进方向)的聚焦声束焦斑大小不同,导致两个方向上的分辨率产生差异,引起缺陷的形状发生变化<sup>[34]</sup>。此外,受限于相控阵探头在长度方向的扫描范围,圆形与正方形缺陷无法被扫描完整。并且由于使用的水槽尺寸较小,相控阵超声在检测过程中相比空耦激光超声检测系统需将样品分开两次扫描。在相控阵检测结果中,左上角处幅值较高的原因是样品不平整导致相控阵超声无法一直保持聚焦在缺陷所处的平面。

#### 3.2 金属与金属薄型层压复合材料

金属-金属薄型层压复合材料的空耦激光超声成像效果如图 6 (a) 所示。可知,除人造缺陷能被成功检测出外,在样品制作过程中内部胶层出现的压痕以及气泡均能被成功识别,如图 6 (a) 中白色箭头所示。20 MHz 相控阵超声检测的结果如图 6 (b) 所示,高频相控阵同样能成功检测出人造的脱黏缺陷,但 3 个缺陷

在宽度上同样无法被检测完整。高频相控阵无法成功识别样品内部胶层出现的压痕及气泡,这表明空耦激光超声检测具有更高的分辨率且对微小缺陷检测更敏感。受限于水槽的大小,样品同样需分开两次检测。此外,还对该样品进行 X 射线检测 (Sanying Precision nanoVoxel3000D 的微焦 CT,天津三英精密仪器股份有限公司)。检测所用电压和电流分别为 70 kV 和 50  $\mu$ A,曝光时间为 0.6 s,结果如图 6 (c) 所示, X 射线能够检测出人造缺陷,但相比空耦激光超声检测与高频相控阵检测,其信噪比较差,仅有约 1 dB。原因是胶层的

厚度太薄导致对 X 射线的吸收较小,与无胶层的区域(缺陷区域)的差异不明显,最终在图像中呈现对比度较差<sup>[35]</sup>。此外,内部胶层出现的压痕及气泡也无法被 X 射线识别。同时受限于设备的检测范围, X 射线也无法一次完成对样品的检测。为验证检测的可靠性,在对样品进行二次加热后,将两种金属剥离以验证内部的粘接状况,如图 6 (d) 所示。通过与空耦激光超声成像结果进行比较,验证了空耦激光超声成像结果中出现的幅值异常区域属于胶层压痕和空气微孔缺陷,如图 6 (d) 中白色箭头处所示,同时二次加热也导致部分原

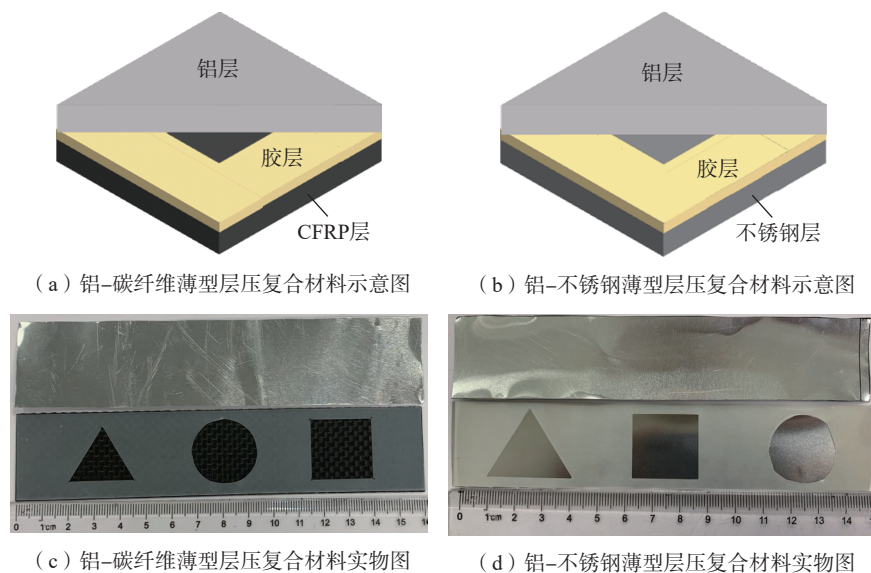


图 4 两种类型薄型层压复合材料  
Fig.4 Two types of thin layer laminated composite materials

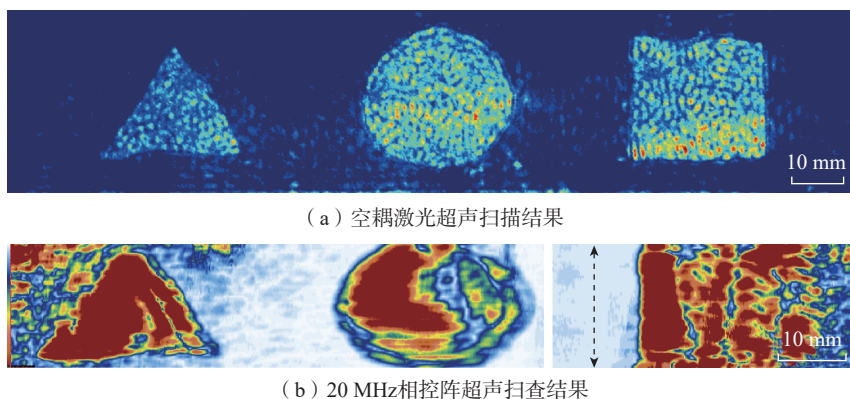


图 5 铝-碳纤维薄型层压复合材料检测结果  
Fig.5 Testing results of Al-CFRP thin layer laminated composite materials

有微孔缺陷出现不一致。

试验对比表明,本研究所搭建的大视场空耦激光超声检测系统与其他两种检测系统相比,拥有更大的检测范围。空耦激光超声检测相较于相控阵超声检测更能反映薄型层压复合材料内部脱黏缺陷的真实尺寸。与 X 射线检测相比,空耦激光超声检测更适合非体积类的缺陷检测,检测结果具有更好的信噪比。此外,空耦激光超声检测能更好地识别薄型层压复合材料内部天然形成的微小缺陷,这表明空耦激光超声检测具有更好的检测分辨率。因此,本文所搭建的大视场空耦激光超声检测系统有望在检测薄型层压复合材料内部缺陷上得到应用。

#### 4 结论

本文使用脉冲激光器、扫描振镜及中心频率为 250 kHz 的八阵元空耦超声换能器搭建一套大视场空耦

激光超声检测系统,扫查范围最大可达 220 mm。

(1) 测试随着空耦超声换能器与样品之间接收距离与接收角度的变化,空耦超声换能器对于激光超声信号接收的变化趋势,并得到空耦超声换能器对于激光超声信号的最大接收距离为 13 mm,最大接收角度与孔径面积几乎一致。

(2) 制作两种不同类型的薄型层压复合材料样品,分别为厚度 0.8 mm 的铝-碳纤维薄型层压复合材料与厚度 0.3 mm 的铝-不锈钢薄型层压复合材料。采用大视场空耦激光超声检测系统对两种样品进行检测,结果表明,该检测系统不仅可以清晰地显示出人造缺陷,还能检测出样品制作过程中内部胶层出现的压痕及气泡。

(3) 与 X 射线检测法和相控阵超声检测法进行对比可得,相比相控阵检测,空耦激光超声检测更能准确

反映缺陷的真实尺寸且非接触;与 X 射线检测相比,空耦激光超声检测对脱黏缺陷的检测结果信噪比更好且成像视场更大。

在后续的工作中,将改进使用阵元数量更多、阵元尺寸更小的阵列式空耦超声换能器,并配合相控阵和机械手的方式来接收激光超声信号,以提高对复杂形状样品的检测能力。

#### 参考文献

[1] 宋志刚,孙卫和.层压复合材料的工艺性能及使用性能[J].锻压技术,2007,32(1):43-46.

SONG Zhigang, SUN Weihe. Technical and application properties of the laminated matrix composites[J]. Forging & Stamping Technology, 2007, 32(1): 43-46.

[2] 李瑞,陈秀华,刘沛禹.Ti-C 纤维金属层压板自由振动试验和数值分析[J].复合材料学报,2016,33(5):1064-1071.

LI Rui, CHEN Xiuhua, LIU Peiyu. Tests and numerical analyses on free vibration of Ti-C fiber metal laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(5): 1064-1071.

[3] 陈新波,李小丽,王莉,等.基于声学的航空复合材料构件损伤检测与评价方法研究[J].无损探伤,2022,46(5):18-23.

CHEN Xinbo, LI Xiaoli, WANG Li, et al. Research on damage detection and evaluation method of aviation composite components based on acoustics[J]. Nondestructive Testing Technology, 2022, 46(5): 18-23.

[4] 陈绍杰.浅谈空客A380的复合材料应用[J].高科技纤维与应用,2008,33(4):1-4,24.

CHEN Shaojie. Application of composites materials in A380[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2008, 33(4): 1-4, 24.

[5] 袁忠,黄频波,耿文霞.基于近似熵谱的碳纤维复合材料层压板拉伸损伤声发射分析[J].宇航材料工艺,2014,44(4):73-77.

YUAN Zhong, HUANG Pinbo, GENG Wenxia. Acoustic emission analysis for carbon fiber composite materials in tensile damage based on approximate entropy spectrum[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(4): 73-77.

[6] 陈霞,肖迎春.含冲击损伤复合材料层压板压缩破坏机制的声发射特性研究[J].实验力学,2013,28(2):187-192.

CHEN Xia, XIAO Yingchun. Experimental

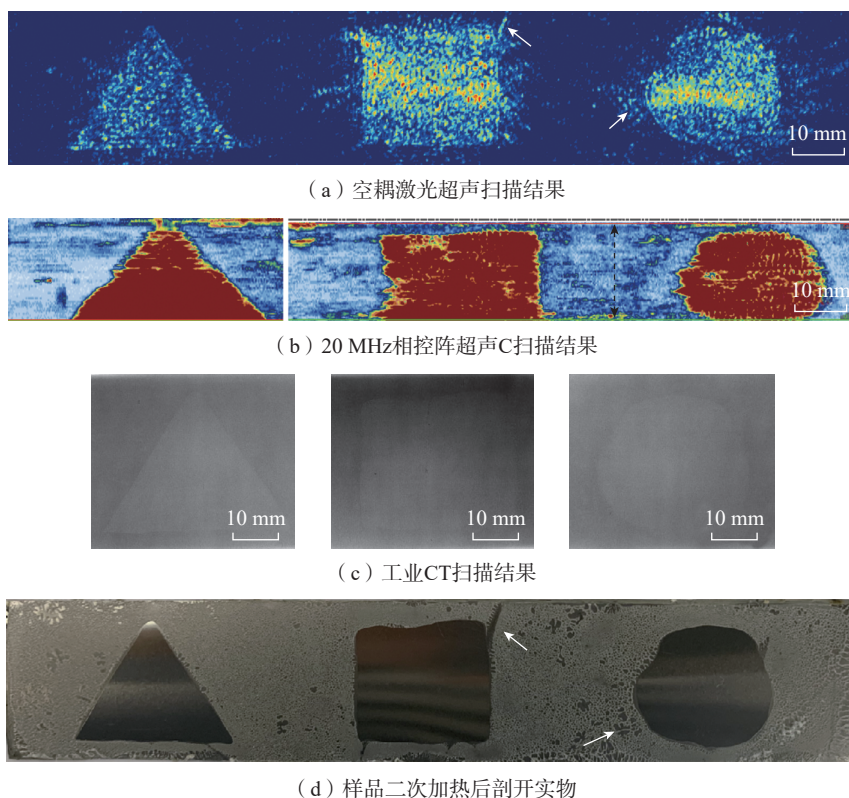


图 6 铝-不锈钢薄型层压复合材料检测结果

Fig.6 Testing results of Al-stainless steel ultra-thin laminated composite materials

investigation on compression failure mechanism of composite laminates with impact damage based on acoustic emission[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(2): 187-192.

[7] 胡业发, 孟由, 张锦光, 等. 含夹杂缺陷碳纤维复合材料层压板的无损检测与评估研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2023(2): 94-100.

HU Yefa, MENG You, ZHANG Jinguang, et al. Nondestructive testing and evaluation of carbon fiber reinforced polymer laminates with inclusions[J]. *Composites Science and Engineering*, 2023(2): 94-100.

[8] 曹弘毅, 马蒙源, 丁国强, 等. 复合材料层压板分层缺陷超声相控阵检测与评估[J]. *材料工程*, 2021, 49(2): 149-157.

CAO Hongyi, MA Mengyuan, DING Guoqiang, et al. Delamination defects testing and evaluation of composite laminates using phased array ultrasonic technique[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(2): 149-157.

[9] 杨玉森, 魏然. 复合材料层压板冲击损伤的无损检测与评估[J]. *科技创新与应用*, 2023, 13(1): 63-68.

YANG Yusen, WEI Ran. Nondestructive testing and evaluation of impact damage of composite laminates[J]. *Technology Innovation and Application*, 2023, 13(1): 63-68.

[10] 李小丽, 陈新波, 单柏荣, 等. 飞机复合材料分层缺陷的CT与X射线检测对比试验研究[J]. *无损探伤*, 2020, 44(5): 41-43.

LI Xiaoli, CHEN Xinbo, SHAN Borong, et al. Comparative experimental study on CT and X-ray detection of delamination defects in aircraft composite materials[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2020, 44(5): 41-43.

[11] 柴孟瑜, 段权, 张早校. 声发射技术在金属疲劳断裂研究中的应用[J]. *化工机械*, 2015, 42(6): 735-741, 777.

CHAI Mengyu, DUAN Quan, ZHANG Zaoxiao. Application of acoustic emission technology in study of fatigue fracture of metals[J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2015, 42(6): 735-741, 777.

[12] 缪长青, 梅明星, 田洪金, 等. 声发射技术在金属结构疲劳损伤中的应用研究进展[J]. *水利与建筑工程学报*, 2015, 13(4): 23-27.

MIAO Changqing, MEI Mingxing, TIAN Hongjin, et al. Recent research progress of the application of acoustic emission technology in the detection of metal structure fatigue damage[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2015, 13(4): 23-27.

[13] 周洁, 毛汉领, 黄振峰, 等. 金属疲劳断裂的声发射检测技术[J]. *中国测试技术*, 2007, 33(3): 7-9.

ZHOU Jie, MAO Hanling, HUANG Zhenfeng, et al. Acoustic emission technique for the detecting of metal fatigue fracture[J]. *China Measurement Technology*, 2007, 33(3): 7-9.

[14] OHARA Y, KAWASHIMA K. Detection of internal micro defects by nonlinear resonant ultrasonic method using water immersion[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(5S): 3119.

[15] BABA A, SEARFASS C T, TITTMANN B R. High temperature ultrasonic transducer up to 1000 °C using lithium niobate single crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(23): 232901.

[16] SEARFASS C T, PHEIL C, SINDING K, et al. Bismuth titanate fabricated by spray-on deposition and microwave sintering for high-temperature ultrasonic transducers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(1): 139-146.

[17] BURROWS S, MCAUGHEY K, EDWARDS R, et al. Sol-gel prepared bismuth titanate for high temperature ultrasound transducers[J]. *RSC Advances*, 2012, 2(9): 3678-3683.

[18] GUYOTT C C H, CAWLEY P, ADAMS R D. The non-destructive testing of adhesively bonded structure: A review[J]. *The Journal of Adhesion*, 1986, 20(2): 129-159.

[19] 王琳锐, 王开, 何乃军, 等. X射线数字成像技术在铸件产品及材料质量检测中的应用[J]. *铸造技术*, 2021, 42(10): 891-894.

WANG Linrui, WANG Kai, HE Naijun, et al. Application of X-ray digital imaging technology in the quality inspection of casting and alloys[J]. *Foundry Technology*, 2021, 42(10): 891-894.

[20] 章清乐, 刘松平, 刘菲菲. 大型复合材料蜂窝夹芯结构X射线数字成像自动化快速扫描检测技术[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(13): 78-83.

ZHANG Qingle, LIU Songping, LIU Feifei. Fast inspection of large-scale composite honeycomb sandwich structures using automated X-ray digital radiography scanning imaging technique[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(13): 78-83.

[21] 胡平, 艾琳, 邱梓妍, 等. 金属增材制造构件的激光超声无损检测研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(14): 297-308.

HU Ping, AI Lin, QIU Ziyang, et al. Laser ultrasonic nondestructive testing on metal additive

manufacturing components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(14): 297-308.

[22] 郑凯, 武兴, 李俊燕, 等. 高温下金属材料厚度的激光超声检测研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(10): 21-27.

ZHENG Kai, WU Xing, LI Junyan, et al. Laser ultrasonic evaluation of metallic material thickness at high temperature[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(10): 21-27.

[23] 付磊, 韩军, 龙晋桓. 金属增材制件的超声无损检测与评价研究进展[J]. *应用声学*, 2023, 42(2): 434-442.

FU Lei, HAN Jun, LONG Jinhuan. Application of ultrasonic nondestructive testing and evaluation on metal additive manufacture parts[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2023, 42(2): 434-442.

[24] 刘松平, 郭思明, 刘菲菲, 等. 激光超声检测碳纤维增强树脂基复合材料的缺陷评估技术研究[J]. *无损检测*, 2007, 29(7): 396-398, 401.

LIU Songping, GUO Enming, LIU Feifei, et al. Evaluation of defects in carbon fiber-reinforced composites by laser ultrasonic technique[J]. *Nondestructive Testing*, 2007, 29(7): 396-398, 401.

[25] 朱倩, 裘进浩, 张超, 等. 双层层压材料中激光超声检测方法的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 126-133.

ZHU Qian, QIU Jinhao, ZHANG Chao, et al. Application of laser ultrasonic detection method for double-layer laminated material[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 126-133.

[26] LEE J R, SHIN H J, CHIA C C, et al. Long distance laser ultrasonic propagation imaging system for damage visualization[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(12): 1361-1371.

[27] 周正干, 孙广开, 李征, 等. 复合材料层压板钻孔分层激光超声检测方法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(22): 29-33.

ZHOU Zhenggan, SUN Guangkai, LI Zheng, et al. Laser ultrasonic detection of drilling-induced delamination in composite laminates[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(22): 29-33.

[28] JI B P, CAO J S, YU M Y, et al. Application of laser ultrasonic for detecting delamination in Cu/Al composites[J]. *Optik*, 2021, 243: 167426.

[29] JI B P, ZHANG Q D, CAO J S, et al. Non-contact detection of delamination in stainless steel/carbon steel composites with laser

ultrasonic[J]. *Optik*, 2021, 226: 165893.

[30] GACHAGAN A, HAYWARD G, WRIGHT W M D, et al. Air coupled piezoelectric detection of laser generated ultrasound[C]//1993 Proceedings IEEE Ultrasonics Symposium. Piscataway: IEEE, 2018: 651–654.

[31] 刘旭, 吴俊伟, 何勇, 等. 基于空耦合换能器的碳纤维增强环氧树脂编织复合材料激光超声检测技术[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(9): 2822–2831.

LIU Xu, WU Junwei, HE Yong, et al. Laser ultrasonic testing technology for carbon fiber reinforced resin braided composites based on air-coupled transducer[J]. *Acta Materiae Compositae*

*Sinica*, 2021, 38(9): 2822–2831.

[32] ZENG L M, WANG B D, LIU X, et al. High-resolution air-coupled laser ultrasound imaging of microstructure and defects in braided CFRP[J]. *Composites Communications*, 2021, 28: 100915.

[33] 周正干, 魏东, 向上. 空气耦合超声检测中衰减因素的研究[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(19): 2350–2354.

ZHOU Zhenggan, WEI Dong, XIANG Shang. Research on attenuation factor of air-coupled ultrasonic testing[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(19): 2350–2354.

[34] 王宝定, 吴俊伟, 廖为圣, 等. 玻璃

钢缺陷的空耦激光超声检测[J]. *无损检测*, 2022, 44(6): 26–31.

WANG Baoding, WU Junwei, LIAO Weisheng, et al. Air-coupled laser ultrasonic testing of glass fiber reinforced polymer defect[J]. *Nondestructive Testing*, 2022, 44(6): 26–31.

[35] 韩彬, 廖天禄, 曾晓慧, 等. X射线无损检测技术在软包夹焊缝检测中的应用[J]. *机械工程与自动化*, 2022(4): 145–147.

HAN Bin, LIAO Tianlu, ZENG Xiaohui, et al. Application of X-ray nondestructive testing techniques in inspection of bale clamp welds[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2022(4): 145–147.

## Large-Field Laser Ultrasonic Testing of Thin Layer Laminated Composite Materials

ZENG Lüming, LONG Bainian, LIAO Weisheng, CHENG Zhongwen, JI Xuanrong

(State Key Laboratory of Precision Electronics Manufacturing Technology and Equipment, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**[ABSTRACT]** Laminated composite materials are formed by laminating two or more layers of the same or different materials. Due to the excellent mechanical properties, laminate composite materials are widely used in aerospace and navigation fields. However, during the production and service stage, defects such as disbond and delamination between layers have greatly affected the stability of component. Currently, the commonly used contact ultrasonic testing has limitations such as large blind area, small field of view, many artifacts and water coupling. Combining the advantages of laser ultrasound and air-coupled ultrasound, a non-contact laser ultrasonic testing system consisting of eight elements 250 kHz air-coupled transducer is developed to detect thin laminated composite materials with thickness of 0.8 mm metal–carbon fiber and 0.3 mm metal–metal, respectively. The system can not only clearly display multiple disbond defects inside the sample, but also successfully identify micro cavity defects formed by bonding layer indentation and bubbles. The imaging field and SNR are up to 220 mm and 35 dB, respectively. Besides, compared to high-frequency phased array testing and X-ray testing, the system exhibits excellent imaging contrast, resolution, and sensitivity. The experimental results show that the developed large-field air-coupled laser ultrasonic testing system has broad application prospects in the large laminated composite materials.

**Keywords:** Laminated composite materials; Air-coupled laser ultrasound; Array air-coupled transducer; Large-field detection; Defect detection

(责编 阳光)