

基于光学传声器的非接触超声无损检测技术

帅家盛¹, 殷晓芳², 曹玉玲³

(1. 北京嘉盛智检科技有限公司, 北京 100016; 2. 江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330096; 3. 北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要: 介绍了一种基于光学传声器的新型非接触超声检测技术与应用, 该光学传声器基于声场对光折射率的影响来进行声电能量转换, 替代了传统声学传感器通过感应振动来完成声电能量转换的方式, 具有极佳的带宽和灵敏度。通过对汽车点焊结构及蜂窝夹芯复合材料的检测, 验证了该技术的可靠性和优势。

关键词: 超声检测; 光学传声器; 折射率

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6656(2022)03-0006-06

Non-contact ultrasonic testing technology based on optical microphone

SHUAI Jiasheng¹, YIN Xiaofang², CAO Yuling³

(1. Jiasheng Test Engineering Co., Ltd., Beijing 100016, China; 2. Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 3. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper introduces a new non-contact ultrasonic testing technology and its application based on optical microphone. The optical microphone is based on the effect of the acoustic field on the light refractive index to carry out the acoustoelectric energy conversion, which replaces the traditional acoustic sensor to complete acoustoelectric energy conversion by inducing vibration, and thus makes the optical microphone has excellent bandwidth and sensitivity. The reliability and advantages of the technology are verified by testing applications in automotive structure spot welding and honeycomb sandwich composites.

Key words: ultrasonic testing; optical microphone; refractive index

声波传播至不同的材料界面时会发生反射和透射, 反射率和透射率由两种材料的声阻抗决定, 声阻抗差异越大反射率越大; 声阻抗差异越小透射率越大。因此想要实现更大的超声透射率, 需要在探头与工件之间施加一层耦合介质以进行阻抗匹配。传统的超声检测均采用接触式耦合, 在探头与检测材料间施加油脂或水等声耦合介质使超声能量更多地进出被检工件, 而对于不允许或不适合使用耦合剂的材料, 或因高温、空间限制等因素难以进行接触式检测的场合, 则需要使用非接触式超声检测方法来进行检测。常见的非接触式超声检测有空气耦合超

声和激光超声等。

文章介绍了一种基于光学传声器的新型非接触超声检测技术。光学传声器是一种新型的声电换能器(声学传感器), 其利用声压对空气中光折射率的影响来进行声电能量转换^[1]。该技术可采用多种方式在被检工件内产生超声波, 包括类似激光超声的激光激励、空气耦合超声中的压电换能器激励及热声发射器激励等^[2]。光学传声器不仅综合了激光超声与空气耦合超声的特点, 同时避免了激光超声激光接收和空气耦合超声压电换能器接收的局限性。此外由于原理性的革新, 其在很多应用中均体现出了独特的优越性。

1 光学传声器的原理及特性

光学传声器的内部结构及实物如图 1 所示。传

收稿日期: 2021-07-15
作者简介: 帅家盛(1970—), 男, 硕士, 主要从事无损检测新技术、新方法研究及应用与咨询服务工作
通信作者: 帅家盛, gm@jiashengtest.com

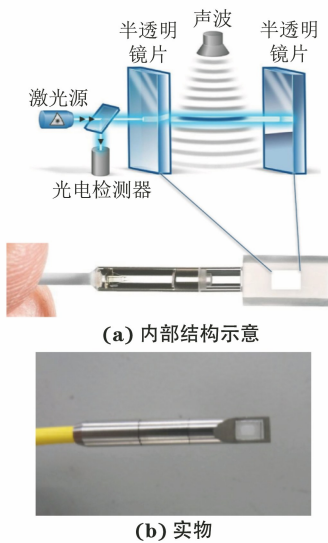


图 1 光学传声器的内部结构示意图及实物
声器采用一个微型 Fabry-Perot Etalon 频谱分析干涉仪(以下简称 FPE)来进行声压波的纯光学检测,其前端用两个平行的半透明镜构成小型干涉腔,干涉腔接收到的声压能够改变超声传播所经过介质(如空气)的光密度,即改变光的折射率。

激光器发出的单色入射激光从一侧进入 FPE,在第一个反射镜面处,一部分能量被反射回去,其余能量则穿过反射镜传播到 FPE 干涉腔中。在另一个反射镜面上,反射能量的一部分折射穿过反射镜向前传播并离开 FPE,其余能量再次反射回 FPE。来回反射持续进行,每次迭代激光都会发生强度损失。反射的强度可用 Airy 函数来描述[见式(1)]。

$$I_R = 1 - \frac{1}{1 + F \cdot \sin^2\left(\frac{q}{2}\right)} \tag{1}$$

式中: I_R 为反射强度; F 为 Finesse 系数; q 为往返相移,可由式(2)计算得到。

$$q = \frac{4\pi nd}{\lambda_0} \tag{2}$$

式中: n 为介质(空气)中光的折射率; d 为两反射镜之间的间距; λ_0 为入射光在真空中的波长。

Finesse 系数 F 由式(3)计算得到(式中 R 为反射率)。

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2} \tag{3}$$

式(1)~(3)中唯一可变的参数是光的折射率 n 。 λ_0 是基于所用激光类型的常数。FPE 中反射镜间的距离 d 也是固定的,没有空间位移或机械形变。Finesse 系数 F 取决于所选反射镜的反射率,可以视为一个常数。

各向同性介质(如空气)中光的折射率取决于介质的极化率和密度,密度取决于局部声压幅值,其变化可使光的波长发生微小偏移。光的波长 λ_n 取决于折射率,其计算式为

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n(\rho)} \tag{4}$$

式中: $n(\rho)$ 为密度为 ρ 的介质的折射率。

从式(4)可以看出,FPE 内声场引起密度的任何改变都会引起反射光强的变化,这种变化可以被光电二极管检测到,从而实现了声压-介质密度-介质折射率-介质中光的波长-光信号的反射率-反射光强度-电信号的完整演变过程。

光学传声器技术用于超声无损检测具有如下特点:① 光学传声器通过一只激光二极管激发出光束以连续波模式工作,其与传感器耦合为一体,不受强电磁干扰的影响;② 可测量空气中传播的 10 Hz 到超过 1 MHz 的全频谱声波,其频率响应基本不受环境噪声影响;③ 具有极高的声压分辨能力,可以检测低于 10^{-14} 的折射率变化,其对应于小至 1 μ Pa 的压力变化(归一化为 1 Hz 带宽);④ 光学传声器属于非惯性传感器,可以更好地进行狄拉克(Dirac)脉冲成像,其检测盲区比常规超声压电换能器的小。

2 基于光学传声器的非接触超声无损检测应用

2.1 非接触光学超声检测系统的构成

与常规超声检测方式类似,非接触光学传声器超声无损检测系统(简称光学超声检测系统)同样可应用于单侧布置检测(反射式或导波)和双侧布置(穿透式)检测(见图 2)。

光学传声器超声检测系统构成如图 3 所示。单侧布置模式下,激励激光头和光学传声器接收头可以封装为一体;扫描机构根据检测任务定制,可以采用多轴机械工装或机械手;光学传声器的特性决定了其相比于传统的水浸或喷水超声 C 扫描检测系统的扫描探头,不需要接触工件,不需要声束垂直入射面,也不存在耦合剂耦合状态的控制问题,因而对机械系统的要求更低。

非接触光学传声器超声检测技术的应用非常广泛,由于篇幅所限,文章仅介绍以金属薄板点焊和蜂窝夹芯复合材料样件为对象进行的检测应用。

2.2 点焊质量的光学传声器非接触超声检测

电阻点焊是汽车车身部件连接最常用的焊接方式,一辆小汽车约有几千甚至上万个焊点,其焊接质

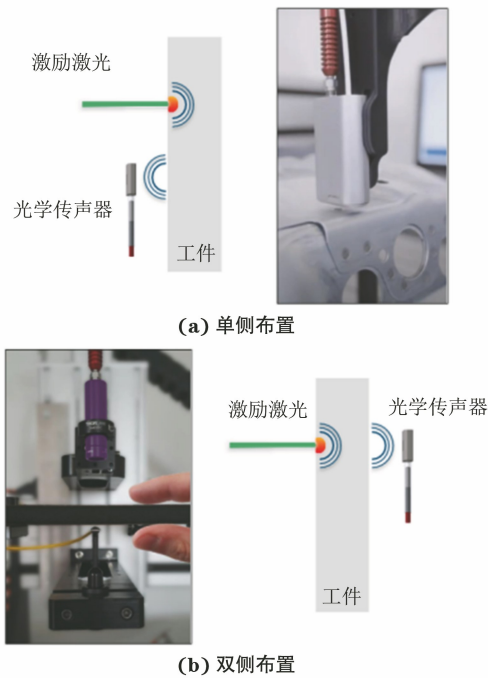


图 2 光学传声器检测布置方式示意

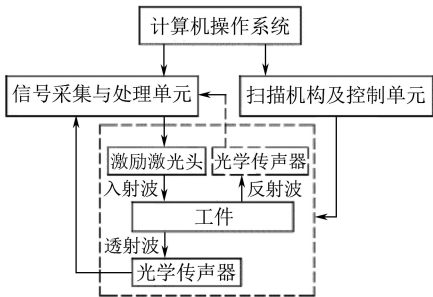


图 3 光学传声器超声检测系统的构成示意

量一般利用超声检测熔核的直径进行评估。

常规超声或相控阵超声检测需使用耦合剂并将探头对准焊点;自动化检测的可靠性受到耦合效果、取向定位精度的影响;人工检测效率低、成本高,对操作人员的操作技能和手法要求更高。光学传声器的点焊超声 C 扫描检测技术具有非接触、免耦合、探头对焊点的定位对准精度要求不高(最大可偏差 $\pm 5^\circ$)、高接收带宽、对噪声源和电磁干扰不敏感、板面连续扫描等优点,已成功应用于汽车车身、航空航天飞行器等点焊金属结构的自动化无损检测中。

2.2.2.1 穿透法

使用穿透法检测双层薄钢板点焊工件,工件尺寸(长 \times 宽)为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$,厚度为 1 mm 。光学传声器外径约为 5 mm ,放置在工件下面距工件 1 cm 处,典型检测结果如图 4 所示。检测发现,光学传声器的脉冲宽度极小(小于 $2\text{ }\mu\text{s}$),频带极宽;工程上利用半高宽(图 4 中箭头所示)来评价焊点的质

量,据此可知图 4(b)对应的点焊质量较差,通过 C 扫描图像也可以看出,其焊点直径相对图 4(a)所示的小。生产线上一般使用双机械手安装激励激光头和光学传声器,直径检测精度高于 0.3 mm ,检测一个焊点大约需要 3 s 。

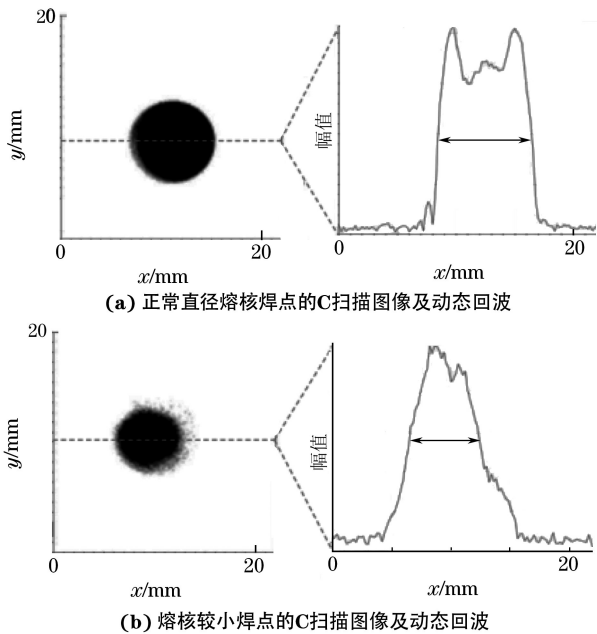


图 4 点焊工件穿透法的典型检测结果

2.2.2.2 单侧法

光学传声器也可以采用一发一收模式,使用瑞利兰姆波对焊点进行单侧检测(见图 5)。图 5 中激励激光头在左侧距焊点 7 cm 处,光学传声器在右侧进行扫查接收,扫查范围为 $50\text{ mm}\times 55\text{ mm}$ (宽 \times 长),检测结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,瑞利波传播至焊点后发生波型转换生成了对称型 S_0 和反对称型 A_0 兰姆波。根据各类型声波传播速度的差异(对称型 $>$ 反对称型,固体 $>$ 气体)来分析 B 扫描图像,以区分空气中传播的纵波和在工件表面传播的 A_0 兰姆波(波速约为 $1\,500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)与 S_0 兰姆波(波速约为 $5\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

将光学传声器用于点焊检测,无论是通过 C 扫描结果还是动态回波曲线,都可以判断焊点质量及区分携带焊点信息的 A_0 和 S_0 兰姆波。在实际工程应用中,更多采用单侧法利用兰姆波检测工件剖面中衰减截面的宽度来评估点焊熔核的直径,并将板材的材料、厚度和层数等影响因素参数化,评估算法比简单地使用动态回波来评估要复杂。汽车生产线使用的一体化封装非接触点焊超声收发探头如图 7 所示,该设备检测一个焊点约需 5 s ,测量精度高于 0.3 mm 。

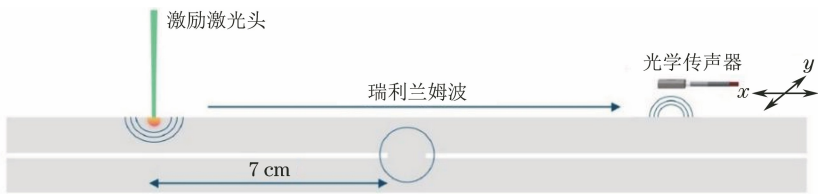
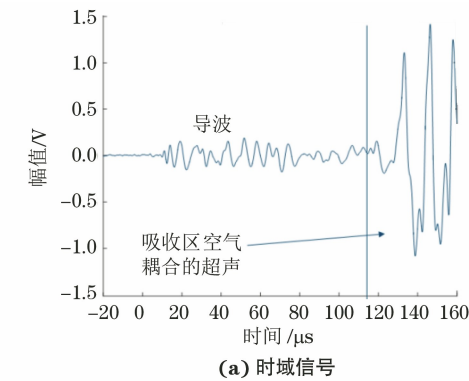
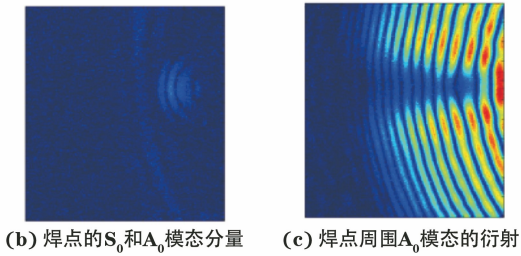


图 5 一发一收式光学传声器单侧瑞利兰姆波检测示意



(a) 时域信号



(b) 焊点的 S_0 和 A_0 模式分量 (c) 焊点周围 A_0 模式的衍射

图 6 点焊工件单侧法的检测结果

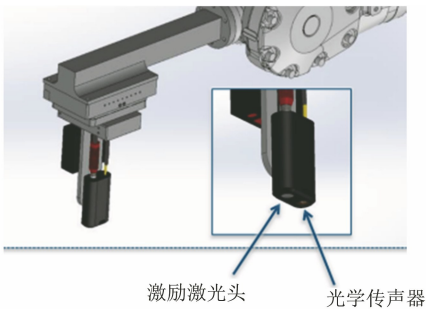


图 7 一体化封装非接触点焊超声收发探头

2.3 蜂窝夹层复合材料的光学传声器非接触超声检测

2.3.1 航空蜂窝夹层复合材料的检测

飞机机翼蜂窝芯修理样件结构如图 8 所示, 蜂窝夹层复合材料结构的上下两层面板均为 CFRP (碳纤维层压增强塑料), 夹芯材料为 NOMEX 蜂窝材料。在样件的中间部位切除掉部分蜂窝芯体, 底部黏接一块层压板, 事先在层压板上层的胶膜上加工一个环形切口, 将替代的蜂窝芯填充进去, 然后压上 CFRP 层压顶板。环形槽即为模拟的脱黏缺陷, 距表面的距离约为材料厚度的 $3/4$ 。

采用单侧一发一收的方式进行检测, 扫描设备

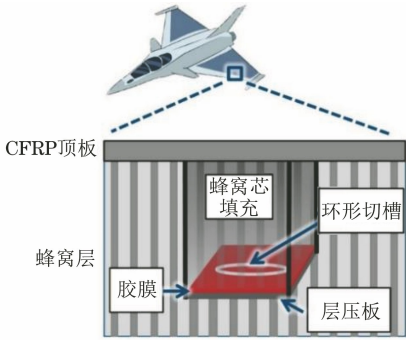
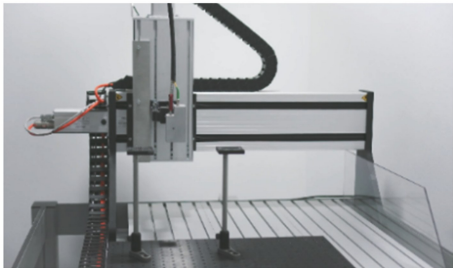
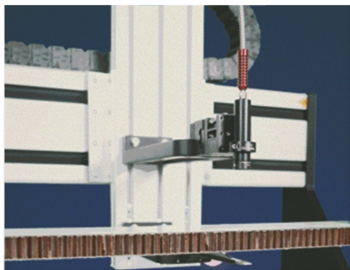


图 8 飞机机翼蜂窝芯修理样件结构示意图

及探头外观如图 9 所示, 该扫描设备为三轴扫描机构。样件的光学传声器非接触超声检测结果如图 10 所示, 可见, 六边形蜂窝芯结构在整个扫描区域上均显示为规则的背景图像, 相邻蜂窝单元间隔约 4 mm; 在规则的背景图像上, 环形切口缺陷显示清晰。为了得到更多数据的详细信息, 对每个 A 扫描信号进行快速傅里叶变换, 得到光学传声器接收的 50 kHz~2 MHz 带宽内每个测量点的频谱。绘制不同频域内的 C 扫描结果可得到不同的效果[见图 10(b), (c)], 这说明不同的特征会引起不同频率的共振, 而激光激励的光学传声器可以在一次检测中覆盖这些共振, 这体现了该方法的检测优势。



(a) 扫描设备



(b) 探头

图 9 扫描设备及探头外观

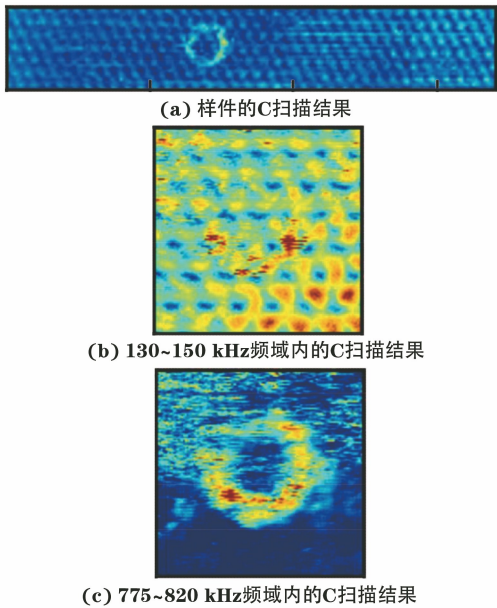


图 10 样件的光学传声器非接触超声检测结果

由以上分析可以看出,光学传声器检测的分辨率

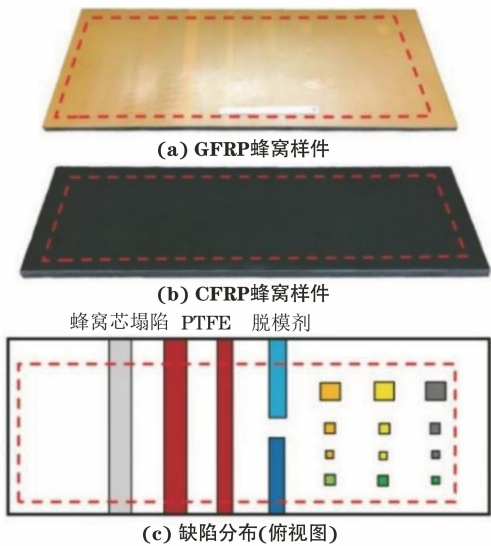


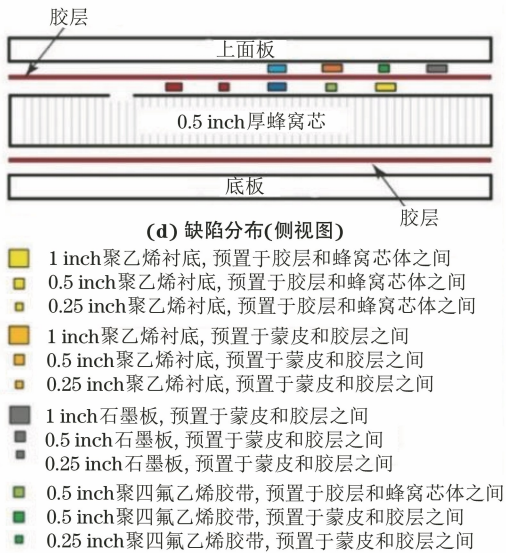
图 11 样件外观及缺陷位置示意

该类蜂窝夹芯结构件是航空航天业中常用的零件,一般采用喷水穿透法对其进行超声无损检测,检测频率为 0.5~1 MHz。试验采用光学传声器穿透法进行检测,使用的脉冲激励激光波长为 532 nm,脉冲重复频率为 10 kHz,机器扫查速度可达 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, x 和 y 轴扫描步进可设置为 0.5 mm(小于预置缺陷尺寸和 3 mm 的蜂窝间距),也可设置为 1 mm 或 2 mm,这样扫描分辨率不受扫描步进的限制,只取决于光学超声系统自身的扫描分辨率。接收器 A 扫描的采样率为 25 MHz,试验证明其扫查速度能与最先进的液体耦合扫查相媲美,约为空气耦合超声扫查速度的 10 倍。如用圆柱透镜将激励激光束

足以处理蜂窝芯结构;对数据的频谱分析也表明,其超声波宽带激励检测的一次检测结果包含了样件多个不同频率的共振,可以同时揭示不同频率下的材料特征。这种单侧布置远离表面的宽带非接触检测技术也适用于航空航天 CFRP 类材料的超声检测。

2.3.2 CFRP 与 GFRP 蜂窝夹层复合材料的检测

样件为两块蜂窝芯三明治结构复合板,尺寸(长×宽×厚)均为 $620\text{ mm}\times 230\text{ mm}\times 13\text{ mm}$,其外观及缺陷位置如图 11 所示(图中红色虚线内为检测扫描区域,1 inch=25.4 mm)。两个样件面板分别为 CFRP 和 GFRP(玻璃纤维增强塑料)层压板,中间为蜂窝芯,底板材料与面板材料相同,面板与蜂窝芯界面预置了多种缺陷,有聚四氟乙烯(PTFE)胶带、石墨板、聚乙烯衬底材料、1.3 mm 深的蜂窝芯塌陷以及多个尺寸的脱模剂处理区域。这些人工预置缺陷基本覆盖了复合材料生产过程中可能产生的脱黏或外来夹杂物缺陷。



轮廓调整为线轮廓,传声器扩展为 8 通道,则扫查速度可以再提高 8 倍。

两个样件的 C 扫描检测结果如图 12 所示(图中带通滤波频率为 1.15~1.20 MHz)。从图 12(a), (b)中无法识别缺陷位置,这与样件右半部分信号幅度减小的大椭圆形区域有关(该区域碰巧做脱模剂处理,蜂窝与面板未黏接,因此该脱黏遮掩了下面的人工缺陷)。对比图 12(a), (c)可见,使用带通滤波器后,未滤波前没出现的缺陷变得可见。这体现了高带宽激光激励光学传声器检测技术的优势,避免了耗时耗力地使用不同频率换能器对工件进行多次检测。

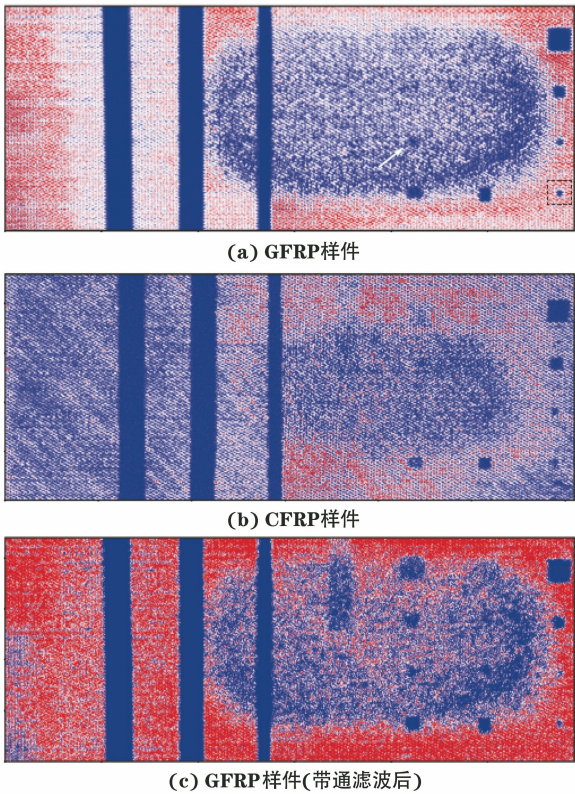


图 12 两个样件的 C 扫描检测结果

对 GFRP 顶板与黏接膜间 $6.35\text{ mm}\times 6.35\text{ mm}$ (长 \times 宽)的 PTFE 内置缺陷的检测结果进行放大 (见图 13),使用不同频率范围的滤波器对图 13 的数据进行滤波,得到如图 14 所示的图像,图中的六边形图像为样件的内部蜂窝结构显示,较大的深蓝色区域是由放置在此处作为参考缺陷的镶嵌物引起的显示。图 14(a)主要为蜂窝芯壁的信号,图 14(b)为蜂窝结构中的空气柱信号。由此可见,光学超声能够选择性地研究样件的不同结构及不同的超声波传播模式。频率为 $200\sim 250\text{ kHz}$ 的透射信号主要由蜂窝芯壁中传播的导波模式主导;频率为 $400\sim 450\text{ kHz}$ 时,超声波几乎仅在蜂窝结构孔洞的空气柱中传播;频率为 $750\sim 800\text{ kHz}$ 时,蜂窝芯壁和空气柱超声波信号的出现使得图像对比度下降,只有 PTFE 参考缺陷的信号较明显,但幅值较低,这个频率下的带通滤波使缺陷与蜂窝结构空腔的对比度得到提高。

上述试验表明,对于蜂窝夹层复合材料内部蜂窝芯壁、单元空腔(空气柱)和任何结构不连续的检测,激光激励的光学传声器检测技术都能获得更好的宽带数据和检出效果,而如果使用常规液体耦合或空气耦合超声检测方法,则需要进行多组不同频率的扫查试验,才能获得这样的数据^[3]。

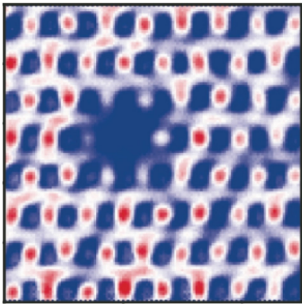
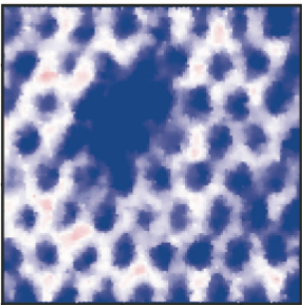
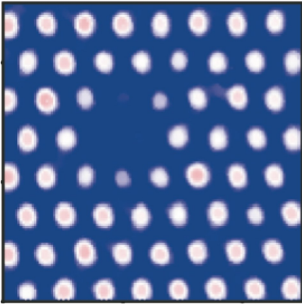


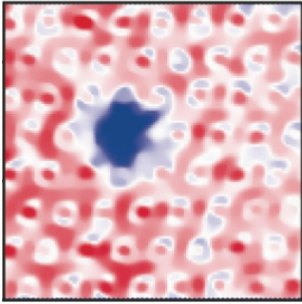
图 13 PTFE 内置缺陷检测结果的放大显示



(a) 200~250 kHz



(b) 400~450 kHz



(c) 750~800 kHz

图 14 不同频率带通滤波后 PTFE 内置缺陷的检测结果

3 结语

光学传声器本身结构中无运动部件,使得整个检测设备不受机械共振的干扰,拥有极高的频率带宽和时间/空间分辨力;接收的超声波不需要耦合进入类似压电换能器的固体中,少了固-气界面,只存在样件-空气一个界面,极大地提高了信噪比,相比现有的液体耦合和空气耦合超声,其在无损检测的

(下转第 26 页)