



碳纤维增强复合材料褶皱缺陷的超声成像

张海燕 宋佳昕 任燕 朱琦 马雪芬

Ultrasonic imaging of wrinkles in carbon-fiber-reinforce-polymer composites

Zhang Hai-Yan Song Jia-Xin Ren Yan Zhu Qi Ma Xue-Fen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 114301 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210032

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210032>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用扩散场信息的超声兰姆波全聚焦成像

Full focal imaging of ultrasonic Lamb waves using diffuse field information

物理学报. 2018, 67(22): 224301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181268>

SiC纤维增强Ti17合金复合材料轴向残余应力的拉曼光谱和X射线衍射法对比研究

Comparison between axial residual stresses measured by Raman spectroscopy and X-ray diffraction in SiC fiber reinforced titanium matrix composite

物理学报. 2018, 67(19): 197203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181157>

微泡造影剂增强超声调制激光回馈成像对比度的机理研究

Mechanism of contrast-enhancement in ultrasound-modulated laser feedback imaging with ultrasonic microbubble contrast agent

物理学报. 2019, 68(21): 214304 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190770>

光纤超声传感器及应用研究进展

Fiber-optic ultrasonic sensors and applications

物理学报. 2017, 66(7): 074205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074205>

基于模式分离的兰姆波逆时偏移成像

Reverse time migration Lamb wave imaging based on mode separation

物理学报. 2017, 66(21): 214301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.214301>

钛酸锶纳米纤维表面羟基化处理对聚偏氟乙烯复合材料介电性能和储能性能的影响

Effects of surface hydroxylated strontium titanate nanofibers on dielectric and energy storage properties of polyvinylidene fluoride composites

物理学报. 2020, 69(21): 218101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200592>

碳纤维增强复合材料褶皱缺陷的超声成像*

张海燕^{1)†} 宋佳昕¹⁾ 任燕¹⁾ 朱琦²⁾ 马雪芬³⁾

1) (上海大学通信与信息工程学院, 上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444)

2) (上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444)

3) (上海电机学院机械学院, 上海 201306)

(2021年1月7日收到; 2021年2月8日收到修改稿)

碳纤维增强复合材料在制造和使用过程中会产生褶皱, 褶皱缺陷的存在使得纤维层起伏不平, 超声波传播至纤维界面时不同声束方向的声能量存在差异. 针对此问题, 提出一种基于声束指向性函数校正的全聚焦阵列成像方法: 制备了含褶皱缺陷的碳纤维增强复合材料试样, 建立超声阵列数据采集实验系统, 捕获全矩阵数据; 考虑超声发射/接收阵元不同声束方向的声能量差异, 提出全聚焦成像方法的校正模型; 将校正前后的全聚焦成像结果与试样的实物图和光学显微镜图像进行对比分析. 实验结果表明: 基于指向性函数校正的全聚焦成像方法能够有效降低背景噪声, 恢复出被检试样的褶皱缺陷和铺层结构等细节信息, 为碳纤维增强复合材料褶皱缺陷的精确表征提供了理论指导.

关键词: 超声相控阵, 褶皱缺陷, 全聚焦成像, 指向性校正

PACS: 43.20.+g, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.70.20210032

1 引言

相比于铝合金等轻质金属材料, 以碳纤维为增强材料, 树脂为基体构成的碳纤维增强复合材料^[1,2](carbon fiber reinforced polymer, CFRP)具有质量轻、强度高、韧性好和耐腐蚀等优点, 被广泛应用于航空航天、汽车、海洋工程等领域^[3], 如: 民用飞机的飞机舱门、机翼、卫星天线、主体骨架结构, 汽车车身和底盘等^[4,5]. 由于CFRP是由两种材料复合而成, 并且制造工艺复杂独特, 加工过程中存在很多不稳定因素, 导致在生产过程中出现富脂、贫脂、褶皱、夹杂和孔隙等缺陷^[6]. 在服役过程中也会因外部因素诱发分层、断裂、脱粘等不同程度的损伤^[7,8]. 研究表明缺陷的扩展严重降低复合材料的疲劳极限、拉伸强度和寿命^[9,10], 其中富脂和纤维褶皱等微缺陷很难检测识别, 如果不能及时发现和修复细微缺陷最终将造成重大经济损失

和安全事故. 因此对CFRP进行缺陷检测具有重要的研究价值和意义.

近年来, 航空航天领域中复合材料的检测有了很大的发展. Zhen等^[11]采用不同频率的探头对CFRP中的分层和富树脂进行检测和表征, 使用时间校正增益抑制系统噪声提高信噪比, 证实了树脂层和分层的反射强度与探头频率相关. Wang等^[12]采用超声相控阵对CFRP进行三维损伤量化, 利用重建体积的回波幅度特征, 根据-6 dB下降准则可直接进行损伤识别、定位和量化. Nelson等^[13]提出了基于超声回波无损技术的方法, 使用Radon变换方法处理脉冲回波的瞬时幅度数据, 以获得局部区域的纤维分布方向, 叠加瞬时相位数据可定位层界面.

利用超声相控阵进行缺陷检测是当前超声检测技术的主流. 超声相控阵能够在使用一个探头且不需要移动探头位置的情况下, 通过控制每个压电片的延迟时间, 实现声束的偏转和聚焦, 进而完成

* 国家自然科学基金(批准号: 11874255, 11904223)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hyzh@shu.edu.cn

对检测物体的大范围扫描成像. 2005 年, Holmes^[14] 提出全聚焦算法 (total focus method, TFM), 在 API(array performance indicator) 的评价系数标准下, TFM 的成像效果远高于其他常规相控阵成像方法, 是目前最热门的后处理方法之一. Pain 等^[15] 对不同纤维波纹度的 CFRP 进行研究, 实验证明回波信号的幅度信息受噪声影响很大, 而相位对信号的衰减相对不敏感, 采用全聚焦瞬时相位成像方法进行表征效果更好. Beatriz 等^[16] 使用三种不同的方法检测和表征 CFRP 褶皱缺陷, 得出全矩阵捕获和全聚焦成像方法最佳的结论, 采用角度-速度校正方法可实现成像进一步增强. Wilcox 等^[17] 使用与超声波幅度衰减和声束偏转相关的向量函数对全聚焦成像方法进行修正, 可以分辨出缺陷的方向性, 提高了对小缺陷的检测率. 周正干等^[18] 通过楔块耦合建立双层介质能量衰减模型, 利用衰减校准系数修正全聚焦算法, 扩大了检测角度范围, 降低了漏检率.

由此可见, 目前国内外对 CFRP 结构中孔隙、分层和脱粘等宏观缺陷检测已经进行过大量的研究, 而褶皱缺陷的检测相对较少. 这是由于褶皱的存在使得 CFRP 纤维层结构十分复杂 (如纤维错层、富脂、贫脂等), 超声波在其中传播时路径多变, 导致不同路径方向的声能量差异显著, 常规检测方法很难显示出缺陷的细节信息. 鉴于此, 本文研究了 CFRP 褶皱缺陷的超声相控阵成像技术. 利用全聚焦成像算法对全矩阵捕获的回波信号进行后处理, 根据声波在待检测区域内的传播特性, 在全聚焦算法的基础上提出了基于指向性函数的校正模型.

2 指向性函数校正模型

2.1 全聚焦成像原理

全聚焦成像算法是基于全矩阵采集的后处理算法, 图 1 是其原理图. 利用超声相控阵捕获全矩阵信号, 由 N 个阵元组成的超声探头依次单独激励阵元发射超声信号, N 个阵元同时接收信号, 得到一个 $N \times N$ 的全矩阵信号.

全聚焦成像算法利用所有全矩阵数据, 增加了对小缺陷检测的敏感度, 同时具有更大的检测覆盖面积. 对被检测对象进行网格划分, x 方向是探头在表面移动的方向, z 方向是被检测物体的深度方向. 假设在 (x, z) 处为目标聚焦点, 则从第 i 个阵元

发射超声波到达缺陷, 由第 j 个阵元接收到缺陷的散射信号, 超声波的旅行时间为

$$t_{ij}(x, z) = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + z^2} + \sqrt{(x - x_j)^2 + z^2}}{c}, \quad (1)$$

其中, c 为超声波在被检测材料中传播速度, x_i 为发射传感器的位置, x_j 为接收传感器的位置.

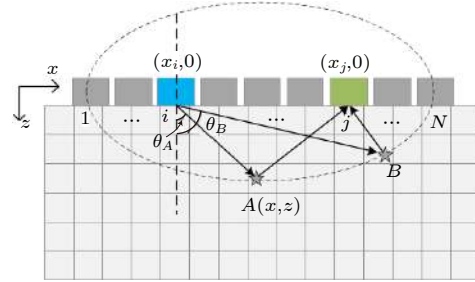


图 1 全聚焦成像算法原理图

Fig. 1. The schematic diagram of TFM imaging.

将 N 个传感器所组成的传感器阵列内所有收发组旅行时间所对应的信号幅值进行叠加, 可得到空间内任意网格点 (x, z) 处的像素值^[19], 从而实现缺陷的表征:

$$I_a(x, z) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h_{ij}(t_{ij}(x, z)), \quad (2)$$

其中, $h_{ij}(t)$ 表示第 i 个阵元发射超声波第 j 个阵元接收得到的回波数据.

2.2 全聚焦成像校正算法

图 1 中聚焦点 A 和 B 位于以发射传感器和接收传感器为焦点的椭圆上, 根据椭圆定律可知, 超声波从发射传感器经过 A 点和 B 点到达接收传感器的距离是相等的, 代入 (1) 式两者的旅行时间相等. (2) 式表明全聚焦成像算法中每一点的像素值仅依赖于时间变量, 则在聚焦点 A 和 B 处的像素值是相同的. 而实际上, 相较于 B 点, 声束传播到 A 点方向与超声阵列法线方向的夹角更小 (图 1 中 $\theta_A < \theta_B$), A 点的超声振幅更大^[20]. 对于 CFRP 这种结构复杂的待检测试样, 褶皱的存在使得纤维层起伏不平, 超声波入射到纤维层界面时不同声束方向的声能量存在差异, 常规全聚焦成像方法很难呈现出 CFRP 的铺层结构和纹理结构, 从而无法实现褶皱缺陷的精确表征, 因此十分必要考虑不同声程的能量影响.

超声阵元的声场能量具有指向性, 将指向性函数作为权重因子引入全聚焦成像算法, 可降低不同声程的能量差异, 显示出不同纤维层的结构信息. 阵元指向性函数定义为远场中任意方向的声压与主声束偏转方向上声压之比, 表征了超声波在传播时声场能量与声束扩散方向的关系 [21]:

$$H(\theta) = \frac{\sin(\pi d / (\lambda \sin \theta))}{\pi d / (\lambda \sin \theta)} \cos \theta, \quad (3)$$

其中, d 为阵元宽度, λ 为超声波波长, θ 为界面法线方向与声束传播方向的夹角.

使用指向性函数对全聚焦成像方法进行校正, 且阵元指向性函数权重因子为

$$H(\theta_i, \theta_j) = H(\theta_i) \times H(\theta_j), \quad (4)$$

其中 θ_i, θ_j 分别为聚焦点与发射阵元和接收阵元的夹角.

(4) 式体现了不同声束方向的声场能量, 综合 (2) 式和 (4) 式, 校正后的全聚焦成像公式为 [22]

$$I(x, z) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H(\theta_i, \theta_j) \times h_{ij}(t_{ij}(x, z)), \quad (5)$$

其中 $H(\theta_i, \theta_j)$ 为阵元指向性函数权重因子.

3 实验

搭建实验装置如图 2 所示, 实验仪器与材料包括: 计算机、M2M (Multi2000, M2M Inc, Les Ulis, France) 相控阵超声波探伤仪、相控阵探头、3 块 CFRP 试样. 相控阵超声探头共有 32 个发射/接收阵元, 实验时设置激励信号为 5 个周期的高斯正弦波.

3 块待检测试样 A, B, C 的大小均为 90 mm × 80 mm × 18 mm, 试样的纤维铺层结构如图 6(a)、

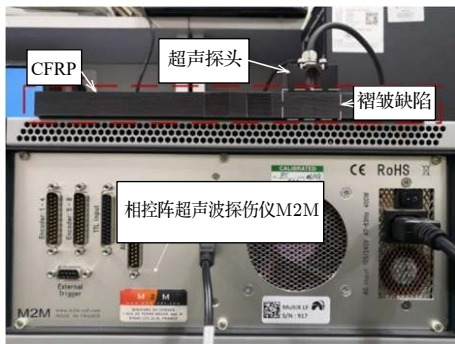


图 2 实验装置图

Fig. 2. Experimental device.

图 7(a)、图 8(a) 所示, 其中试样 A 无褶皱, 试样 B 和试样 C 褶皱缺陷样式不同. 每块试样可细分为 5 大层. 第 1 大层厚 6 mm, 其中含有 1 层玻璃纤维, 40 层碳纤维预浸料. 其他 4 大层的厚度分别为 3.0, 2.5, 3.0, 3.5 mm, 其中含有 1 层玻璃纤维, 20 层碳纤维预浸料. 0°和 90°碳纤维预浸料交替铺层, 且预浸料中含有树脂纤维, 树脂纤维厚度约为 0.003—0.010 mm. 试样上下表面为玻璃纤维. 玻璃纤维和 0°/90°碳纤维预浸料平均厚度约为 0.15 mm. 图 3 给出了试样中有、无褶皱的光学显微镜图像, 其中图 3(a) 显示的是试样 A 的第 3 大层结构, 图 3(b) 是试样 B 中含有褶皱缺陷的部分显微镜图像, 从中可以清晰地观察到纤维的铺层信息及是否存在褶皱.

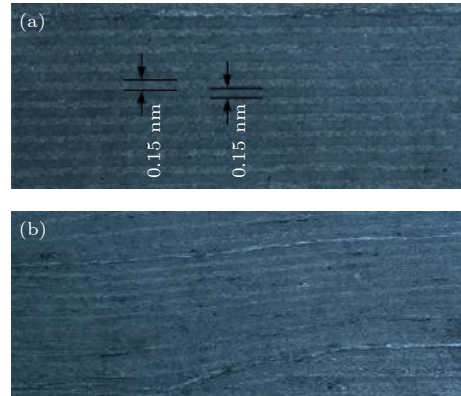


图 3 CFRP 显微镜图 (a) 无褶皱; (b) 有褶皱

Fig. 3. Microscopic image of CFRP: (a) No wrinkles; (b) wrinkles.

对 3 块 CFRP 试样进行超声检测, 以 0°碳纤维铺层方向为 x 轴, 垂直方向为 z 轴. 将超声相控阵探头放置于复合材料表面, 32 个阵元的排列方向为 x 轴方向. 采用纵波激励方式, 纵波在该复合材料板中的传播波速约为 $v = 2900$ m/s, 则波长为 $\lambda = v/f = 0.58$ mm. 为了增强复合材料单层的反射, 由该材料单层的共振频率决定超声检测探头的中心频率. 第一阶的共振频率公式满足下式 [23]:

$$f_1 = v / [2(d_1 + d_2)], \quad (6)$$

其中, d_1 为碳纤维层厚度, d_2 为树脂纤维厚度. 如图 3(a) 所示, 碳纤维预浸料厚度为 0.15 mm (包含树脂纤维, 即 $d_1 + d_2 = 0.15$), 代入上式可以计算出样品的共振频率约为 $f_1 = 9.67$ MHz. 当中心频率 f_c 满足 $0.4 \leq f_c / f_1 \leq 1.3$ 时, 单层的反射系数较大 [24], 所以选取 $f_c = 5$ MHz 的探头是可行的, 超声相控阵具体参数配置如表 1 所示.

表 1 超声相控阵参数配置

Table 1. Parameters configuration of ultrasonic phased array.

参数	值	参数	值
阵元个数	32	阵元宽度/mm	0.9
阵元中心距/mm	1.0	采样频率/MHz	50
中心频率/MHz	5	激励方式	纵波

将超声探头的激励接收模式设置为全矩阵捕获模式, 获得 32×32 个回波信号, 时间窗口长度均为 $100 \mu\text{s}$. 图 4 为 16 号传感器自发自收的前 $15 \mu\text{s}$ 时域信号. 从中可以观察到幅值很大的表面直达波、幅值较小的损伤散射波及底面反射波.

图 5 为 1 号传感器发射超声波, 编号为 $4n$ (n 为整数) 的传感器接收到的前 $15 \mu\text{s}$ 回波信号. 从图 4 可看出: 当接收阵元距离发射阵元较近时, 由于阵元间的电子和机械串扰, 回波信号持续时间较长且混叠了噪声信号, 这种现象在 4 号和 8 号阵元的回波信号中较明显. 此外, 由于系统产生的非线性效应, 各阵元接收到的始波信号还延伸至约 $4 \mu\text{s}$ 处, 如图中的虚线方框位置. 若将这些信号用

于全聚焦成像, 将会在材料表面产生盲区, 从而掩盖近表面层的纤维信息.

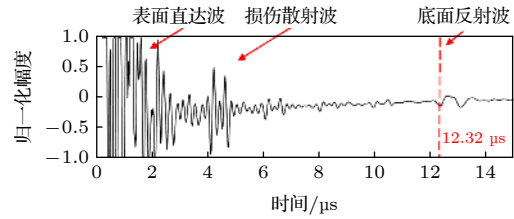


图 4 $i = j = 16$ 时域信号

Fig. 4. For $i = j = 16$ time domain signal.

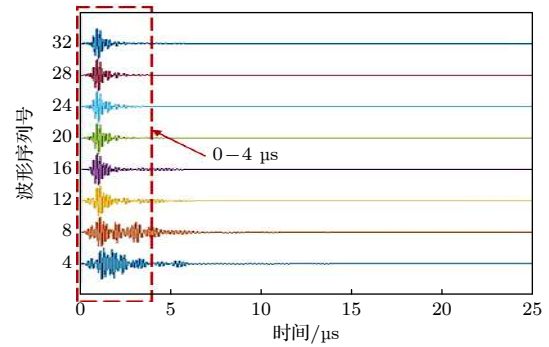


图 5 典型阵列回波信号

Fig. 5. Typical echo signal captured by full matrix.

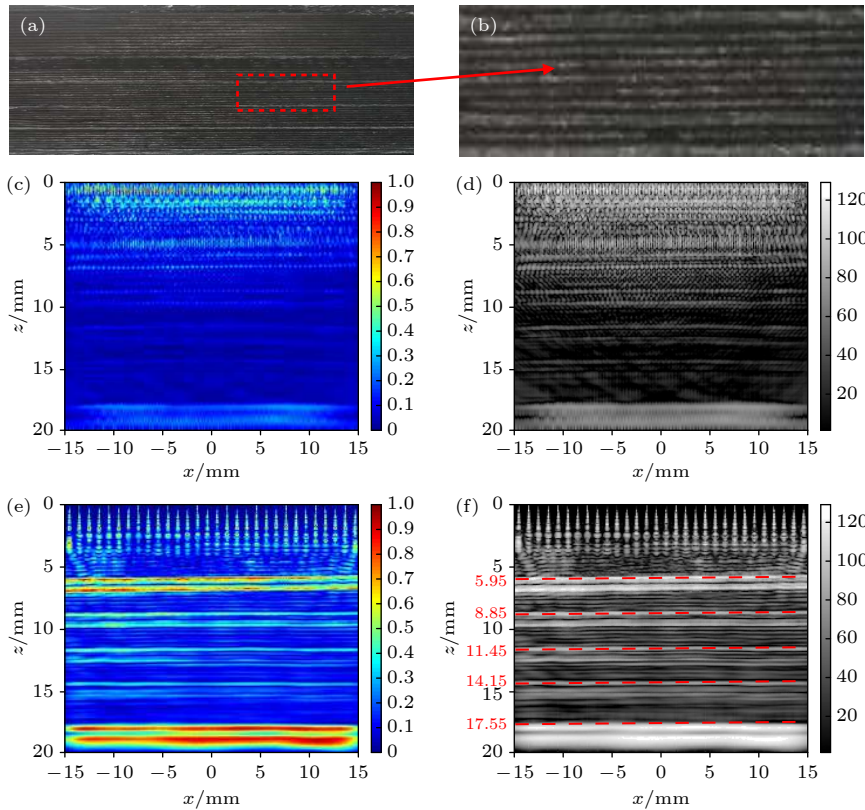


图 6 试样 A 及其成像结果 (a) 实物图; (b) 图 6(a) 的局部放大图; (c) 全聚焦成像结果; (d) 图 6(c) 的灰度图; (e) 用指向性函数校正的全聚焦成像结果; (f) 图 6(e) 的灰度图

Fig. 6. Sample A and imaging results: (a) Sample A; (b) partial enlarged view of Fig.6 (a); (c) total focus method; (d) gray scale of Fig.6 (c); (e) total focus method corrected by directivity function; (f) gray scale of Fig.6 (e).

4 结果与讨论

采用图 2 中的相控阵实验装置, 选取 1 个阵元发射纵波, 32 个阵元同时接收, 依次激发各个阵元, 最终捕获到 32×32 的全矩阵数据. 图 6 是试样 A 即无褶皱 CFRP 的实物图和成像结果, 成像区域为 $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. 其中, 图 6(a) 是实物图, 图 6(b) 是图 6(a) 中方框标记区域的局部放大图, 图 6(c) 是直接全聚焦成像结果, 图 6(d) 是图 6(c) 的灰度图, 图 6(e) 是经指向性函数校正后的成像结果, 图 6(f) 是图 6(e) 的灰度图. 由成像结果可知, 直接全聚焦成像方法 (图 6(c) 和图 6(d)) 十分模糊, 基本看不出 CFRP 的铺层结构, 而指向性函数校正后的全聚焦成像方法可以恢复出纹理信息. 从图 6(e) 和图 6(f) 可观察出: 试样 A 含有 5 大层结构. 由于玻璃纤维相对于碳纤维具有高反射性, 所以较粗明亮纹路为玻璃纤维, 90° 碳纤维预浸料中含有更多的树脂纤维, 反射系数随着树脂厚度增加而增大, 所以较细明亮纹路为 90° 碳纤维, 深色

纹路为 0° 碳纤维. 因加工过程中存在许多不稳定因素, 无法使 0° 碳纤维和 90° 碳纤维厚度绝对均匀, 或者因纤维之间存在多次回波, 对成像结果的分辨率产生了影响, 导致层间较粗明亮纹路是由多层方向各异碳纤维组成. 除了第一大层部分纤维纹路被噪声完全覆盖, 其他 4 大层中可见 1 层玻璃纤维, 20 层碳纤维, 符合图 3 中无褶皱试样光学显微镜图像呈现的制造工艺, 且玻璃纤维的成像位置和实际位置基本一致, 具体数值见表 2. 由于声波在传播过程中能量逐渐降低, 反射回波信号较弱, 使得 $z = 15 \text{ mm}$ 以下的成像图相对模糊. 研究中还发现, 由于系统产生的非线性效应, 各阵元接收到的始波信号延伸至约 $4 \mu\text{s}$ 处 (图 4), 将在材料表面产生噪声区域, 如图 6(d) 中 z 方向 $0-6 \text{ mm}$ 区域. 经指向性函数校正后的全聚焦成像可以分辨出 $4-6 \text{ mm}$ 的纤维纹路, 如图 6(f) 所示. 可见, 基于指向性函数校正的全聚焦成像可以降低近表面噪声, 提高图像的信噪比和分辨率, 恢复出更多细节信息.

同理, 对试样 B 和试样 C 进行数据采集并成像, 得到图 7 和图 8. 可以观察到, 未校正的图像基

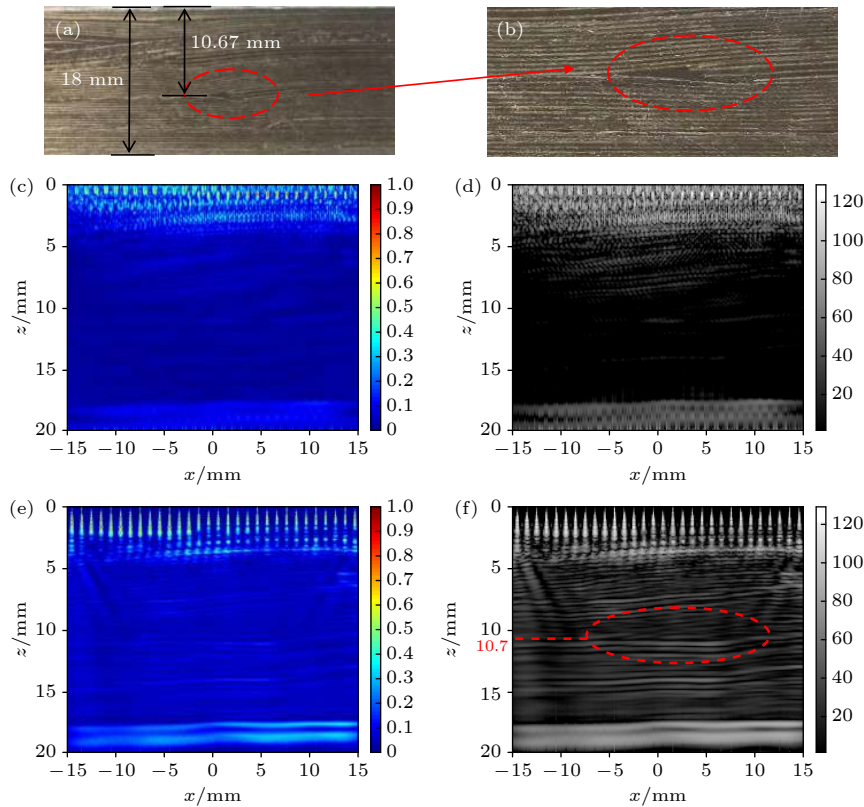


图 7 试样 B 及其成像结果 (a) 实物图; (b) 图 7(a) 的局部放大图; (c) 全聚焦成像结果; (d) 图 7(c) 的灰度图; (e) 用指向性函数校正的全聚焦成像结果; (f) 图 7(e) 的灰度图

Fig. 7. Sample B and its imaging results: (a) Sample B; (b) partial enlarged view of Fig.7(a); (c) total focus method; (d) gray scale of Fig.7 (c); (e) total focus method corrected by directivity function; (f) gray scale of Fig.7 (e).

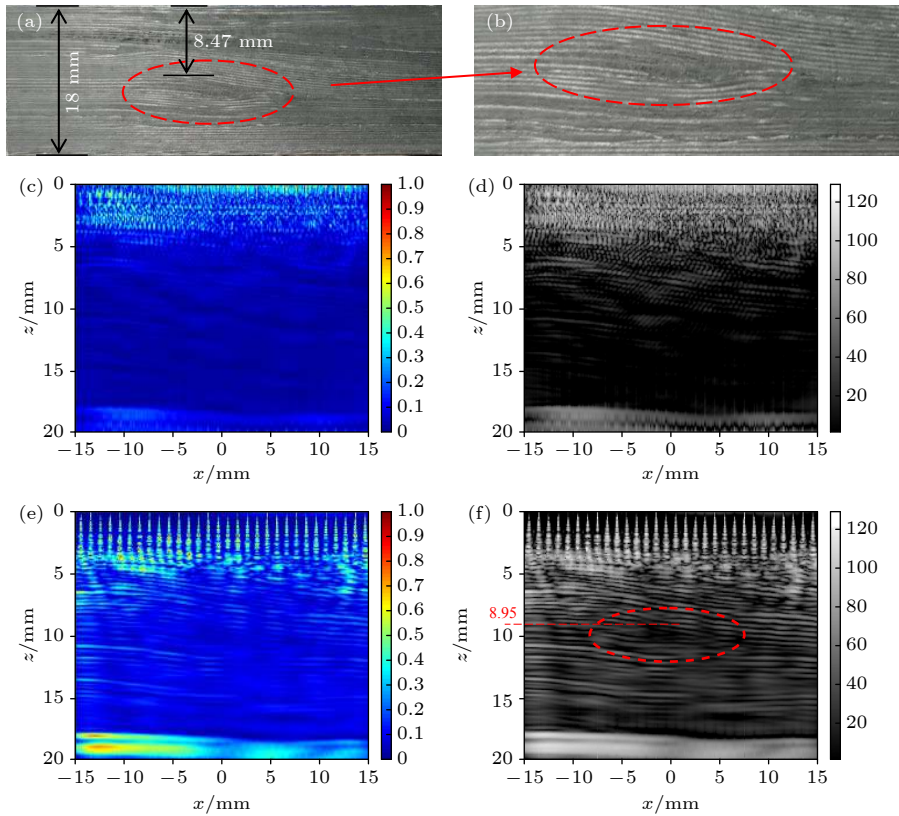


图 8 试样 C 及其成像结果 (a) 实物图; (b) 图 8(a) 的局部放大图; (c) 全聚焦成像结果; (d) 图 8(c) 的灰度图; (e) 用指向性函数校正的全聚焦成像结果; (f) 图 8(e) 的灰度图

Fig. 8. Sample C and its imaging results: (a) Sample C; (b) partial enlarged view of Fig. 8 (a); (c) total focus method; (d) gray scale of Fig. 8 (c); (e) total focus method corrected by directivity function; (f) gray scale of Fig. 8 (e).

表 2 图 6(f) 中玻璃纤维的成像位置和实际位置对比

Table 2. Comparison of imaging position in Fig. 6(f) and actual position of glass fiber.

玻璃纤维	实际位置/mm	成像位置/mm	误差/%
第一层底部	6.0	5.95	0.83
第二层底部	9.0	8.85	1.60
第三层底部	11.5	11.45	0.04
第四层底部	14.5	14.15	2.40
第五层底部	18.0	17.55	2.50

本观察不到纤维铺层结构及是否含有褶皱缺陷, 而校正后的图像可以恢复出褶皱信息, 且图 7(f) 和图 8(f) 中褶皱与实物试样高度一致, 如圆圈标记区域的细节信息与图 7(b) 和图 8(b) 局部放大图一致, 且缺陷深度与实际深度误差不超过 6%. 可见, 经指向性函数校正之后, 全聚焦成像的质量大大提高, 从而可实现褶皱缺陷的精确表征.

5 结论

针对 CFRP 在制造和使用过程中产生的亚宏

观褶皱缺陷, 提出一种全聚焦成像的校正方法, 使用相控阵对 3 块复杂纤维铺层的 CFRP 试样进行超声检测, 得到了高质量的重建图像, 能够再现纤维层的细节信息. 主要研究结果包括:

- 1) 针对超声阵列中同一阵元发射的超声波声束方向不同而存在的能量差异问题, 提出了声束指向性函数校正的全聚焦成像方法;
- 2) 将校正后的全聚焦成像算法用于 CFRP 褶皱缺陷的表征, 成像图中的铺层结构符合光学显微镜图像中呈现的制造工艺, 且褶皱缺陷和实物图高度一致;
- 3) 指向性函数的引入可以有效地抑制近表面噪声, 恢复出了部分近表面纤维层信息, 提高了图像信噪比.

参考文献

[1] Peng J T, Ren J T 2014 *China Adhes.* **23** 48 (in Chinese) [彭金涛, 任天斌 2014 *中国胶粘剂* **23** 48]
 [2] Wei Y Y 2016 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University) (in Chinese) [魏莹莹 2016 博士学位论文 (上海: 上海交通大学)]

- [3] Zhou D R, Gao L, Huo H Y, Zhang B Y 2020 *Acta Mater. Compos. Sin.* **37** 1785 (in Chinese) [周典瑞, 高亮, 霍红宇, 张宝艳 2020 *复合材料学报* **37** 1785]
- [4] Xing L Y, Feng Z H, Bao J W, Li S M 2020 *Acta Mater. Compos. Sin.* **37** 2700 (in Chinese) [邢丽英, 冯志海, 包建文, 礼嵩明 2020 *复合材料学报* **37** 2700]
- [5] Sun S P, Liu F L, Xue S, Zeng M, Zeng F X 2015 *Renew. Sust. Energ. Rev.* **45** 589
- [6] Hagstrand P O, Bonjour F, Manson J A E 2004 *Composites Part A* **36** 705
- [7] Zhang X H, Qiao Y J, Xu H T, Liu R L 2019 *China Offshore Platform* **34** 9 (in Chinese) [张学辉, 乔英杰, 徐宏涛, 刘瑞良 2019 *中国海洋平台* **34** 9]
- [8] Zeng Z W, Liao Y F, Liu X H, Lin J M, Dai Y H 2020 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **69** 5755
- [9] Hsiao H M, Daniel I M 1996 *Compos. Sci. Technol.* **56** 581
- [10] Dattoma V, Gambino B, Nobile R, Panella F W 2018 *Procedia Struct. Integrity* **8** 444
- [11] Zhen Z, Shifeng G, Qian L, Fangsen C, Andrew A M, Zhongqing S, Menglong L 2020 *Compos. Sci. Technol.* **189** 1
- [12] Wang X Y, He J J, Guo W H, Guan X F 2020 *Ultrasonics* **110** 1
- [13] Nelson L J, Smith R A 2019 *Composites Part A* **118** 1
- [14] Holmes C, Drinkwater B W, Wilcox P D 2005 *NDT&E Int.* **38** 701
- [15] Pain D, Drinkwater B W 2013 *Nondestruct Eval* **32** 215
- [16] Beatriz L V, Smith R A, Tayong R B, Antonio F L, Alfredo G 2018 *Composites Part A* **114** 225
- [17] Wilcox P D, Holmes C, Drinkwater B W 2007 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **54** 1541
- [18] Zhou Z G, Peng D, Li Y, Hu H W 2015 *J. Mech. Eng.* **51** 1 (in Chinese) [周正干, 彭地, 李洋, 胡宏伟 2015 *机械工程学报* **51** 1]
- [19] Lin L, Cao H Q, Luo Z B 2018 *NDT and E Int.* **97** 51
- [20] Jia L C, Chen S L, Bai Z L, Zeng Z M, Yang X X 2017 *Chinese Journal of Scientific Instrument* **38** 1589 (in Chinese) [贾乐成, 陈世利, 白志亮, 曾周末, 杨晓霞 2017 *仪器仪表学报* **38** 1589]
- [21] Selfridge A R, Kino G S, Khuri-Yakub B T 1980 *Appl. Phys. Lett.* **37** 35
- [22] Tasinkevych Y, Trots I, Nowicki A, Lewin P A 2012 *Ultrasonics* **52** 333
- [23] Teng G Y 2019 *Ph. D. Dissertation* (Zhejiang: Zhejiang University) (in Chinese) [滕国阳 2019 博士学位论文 (浙江: 浙江大学)]
- [24] Smith R A, Nelson L J, Mienczakowski M J, Wilcox P D 2018 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **65** 231

Ultrasonic imaging of wrinkles in carbon-fiber-reinforce-polymer composites*

Zhang Hai-Yan^{1)†} Song Jia-Xin¹⁾ Ren Yan¹⁾ Zhu Qi²⁾ Ma Xue-Fen³⁾

1) (*School Institute for Advanced Communication and Data Science, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

2) (*School of Mechatronic and Automation Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

3) (*School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China*)

(Received 7 January 2021; revised manuscript received 8 February 2021)

Abstract

Carbon-fiber-reinforced-polymer (CFRP) composites are widely used in aerospace, automobile and other industries because of their excellent performances. However, wrinkles will be formed during the manufacturing and service life process of composites, which is detrimental to the fatigue limit and tensile strength. Due to the fiber waviness, the presence of such defects leads to the acoustic energy difference in different beam directions during ultrasonic nondestructive testing. The directly obtained imaging amplitude cannot characterize the wrinkle properly. In order to solve this problem, the total focusing method (TFM) imaging combing the acoustic beam directivity function correction is presented.

Firstly, the longitudinal wave signal is excited by an ultrasonic phased array, from which the echo data is collected by full matrix capture (FMC) in both the healthy and defected samples prepared. Then, considering the difference in acoustic energy from different beam directions of each ultrasonic transmitting/receiving array element, a correction TFM is proposed. Finally, the echo signals are post processed while the results are compared with the optical images.

No wrinkle information can be indicated from the direct TFM imaging. In contrast, the wrinkles and layer-up information can be recovered from the corrected TFM imaging with an improved signal-to-noise ratio and resolution. Furthermore, owing to the directivity function, the near-surface noise can be effectively reduced and the near-surface fibrous layer information is restored. This method paves the way for the accurate, quantitative and rapid characterizing of wrinkles in real CFRP structures.

Keywords: ultrasonic phased array, wrinkle defects, total focus method imaging, directional correction

PACS: 43.20.+g, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.70.20210032

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11874255, 11904223).

† Corresponding author. E-mail: hyzh@shu.edu.cn