

文章编号 1004-924X(2018)11-2732-12

小孔隙率碳纤维复合材料的富树脂超声检测

曾祥^{1,2}, 杨辰龙^{1*}, 周晓军¹, 滕国阳¹

(1. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要:针对孔隙率接近 0 的小孔隙率碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Composite, CFRP)的富树脂检测需求, 提出富树脂超声检测技术。对超声检测信号中的噪声消除方法、衰减抑制方法和富树脂检测的多视图成像技术进行研究, 并开发小孔隙率 CFRP 富树脂超声检测软件。首先提出共振频率估计方法, 通过低通滤波抑制高频随机噪声。其次根据频率差异, 应用变分模态分解算法分离并消除共振结构噪声, 提取低频成分。该低频成分包括表面回波、底面回波、富树脂反射信号和由层间反射信号、材料散射噪声等构成的相干噪声。再次, 引入瞬时幅值比修正低频成分的幅值衰减并描述被检测小孔隙率 CFRP 的局部反射能力。最后, 应用 Otsu 多阈值方法自适应获得富树脂识别的阈值, 消除相干噪声的影响, 完成富树脂识别。进一步对小孔隙率 CFRP 的超声检测结果进行多视图成像, 在三维视图、C 扫描视图 and B 扫描视图内识别富树脂。结果表明: 变分模态分解的分量数为 2, Otsu 多阈值的类别数为 3 时, 能够准确识别小孔隙率 CFRP 超声检测信号中的富树脂反射信号; 采用 0.15 作为多视图成像的阈值, 可简洁有效地描述富树脂在小孔隙率 CFRP 中的分布。

关键词:小孔隙率碳纤维复合材料; 富树脂; 变分模态分解; Otsu 多阈值; 多视图成像; 软件开发

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182611.2732

Ultrasonic detection of rich-resin in low-porosity CFRP

ZENG Xiang^{1,2}, YANG Chen-long^{1*}, ZHOU Xiao-jun¹, TENG Guo-yang¹

(1. State Key Lab of Fluid Power and Mechatronic Systems, College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. CRRC Zhuzhou Institute Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China)

* Corresponding author, E-mail: yclzju@163.com

Abstract: To satisfy the demand of rich-resin defect detection in the so-called low-porosity carbon fiber reinforced composite (CFRP) with porosity close to zero, an ultrasonic testing methodology was proposed in this article. The denoising methods, attenuation suppression method, and 3D imaging technology for rich-resin identification are investigated, and low-porosity CFRP rich-resin detection software was developed. The rich resin was detected in four steps. First, the resonant frequency was estimated, and the high-frequency stochastic noise was suppressed. Second, variational mode decomposition (VMD) was used to separate the resonant structure noise and extract the low-frequency component. The low-frequency component consisted of the front-wall echo, back-wall echo, rich-resin reflection signal, and remaining coherent noise made up of the interlayer reflection signals and material

收稿日期: 2018-03-30; 修订日期: 2018-04-25.

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(No. LY18E050002); 中央高校基本科研基金资助项目(No. 2018QNA4001)

scattering noise. Third, the instant amplitude ratio was introduced to correct the envelop attenuation of the low-frequency component and describe the local reflectivity of the low-porosity CFRP. Finally, the multi-threshold Otsu method was used to search the threshold of the rich-resin detection, resulting in the elimination of interference and finishing the detection of rich resin. Further, multi-view imaging was performed on the test results, and the rich resin was identified in the 3D, C-scan, and B-scan imaging processes. The experimental results show that when the VMD mode was set to two and the classes in the multi-threshold Otsu method are set to three, a rich-resin reflection signal can be detected. When the threshold in the multi-view imaging is set to 0.15, the rich resin can be effectively characterized.

Key words: low-porosity Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP); rich-resin; variational mode decomposition; multi-threshold Otsu method; multi-view imaging; software development

1 引 言

以碳纤维为增强材料,树脂为基体构成的碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)广泛应用在航空航天等领域。CFRP中可能出现孔隙、富树脂等微缺陷,降低其使用性能。因此,对CFRP的微缺陷检测具有实际工程价值^[1-2]。

超声无损检测技术具有无害性、高准确性、易于实施性和适用对象广的特点,被广泛应用于CFRP微缺陷检测。目前,相关研究人员对CFRP中孔隙缺陷的检测方法进行了大量工作,相继提出了基于衰减理论的待定系数法^[3]、随机孔隙模型衰减分析法^[4]、声速法^[5]、声阻抗法^[6]、背散射信号小波分析法^[7]、背散射信号线性预测编码分析法^[8]和背散射信号递归分析法^[9]等孔隙率评估方法。但孔隙率是对CFRP总体孔隙含量的评价,并未考虑孔隙的分布。实际中孔隙可能在CFRP中出现局部富集现象,形成局部孔隙。Mienczakowski等^[10]应用高通滤波、希尔伯特变换等技术处理背散射信号,通过包络谱分析检测局部孔隙。陈越超等^[11]应用提升小波变换、低通滤波和自适应滤波处理超声检测背散射信号,对厚截面CFRP局部孔隙进行了检测。但是这些研究均针对的是无富树脂CFRP,而对于孔隙率接近0%的小孔隙率CFRP的研究相对较少。对于小孔隙率CFRP,富树脂的存在将显著降低其承载能力,容易在冲击或疲劳载荷作用下诱发裂纹,造成构件失效。因此,对小孔隙率CFRP的富树脂检测在保证材料性能、改进生产工艺方面均具有实际意义。

CFRP是典型的层状构件。超声波在CFRP

内传播时,会发生多次反射和透射,在超声检测信号中形成共振结构噪声。共振结构噪声在CFRP近表面比较强烈,随传播距离增加而迅速衰减直至消失。当CFRP含有富树脂时,将在超声检测信号中形成缺陷回波。因此,含富树脂小孔隙率CFRP的超声检测信号是典型的多分量信号,成分比较复杂,包括超声表面回波和超声底面回波、共振结构噪声、层间反射信号、富树脂反射信号、材料散射噪声、随机噪声。根据各成分的频率特性,超声检测信号通常可以分为3组:第1组是共振结构噪声,共振频率与超声波在CFRP中的声速和CFRP的层厚有关;第2组是由超声表面回波、超声底面回波、层间反射信号、富树脂反射信号和材料散射噪声构成的低频成分,其中心频率接近探头中心频率;第3组是随机噪声。此外,CFRP的层厚波动、纤维弯曲等因素也进一步加强了超声信号的复杂性。超声检测信号的多分量特性和非平稳性给小孔隙率CFRP的富树脂检测带来了挑战。

本文研究了小孔隙率CFRP中富树脂的超声检测方法。对于给定的超声检测信号,首先应用低通滤波抑制高频随机噪声;其次采用变分模态分解滤除共振结构噪声,获得低频成分;然后根据超声底面回波对表面回波的衰减,修正低频成分的幅值,并提出瞬时幅值比评估CFRP局部的反射能力;最后,应用自适应阈值方法处理低频成分中背散射信号的瞬时幅值比,实现富树脂的检测。通过实验验证了该富树脂识别方法的有效性,并对小孔隙率CFRP富树脂超声检测信号处理结果作多视图成像(三维成像、C扫描成像和B扫描成像),完成富树脂识别。为提高富树脂检测

的效率,开发了小孔隙率 CFRP 富树脂超声检测信号处理软件。

2 信号处理方法基础

2.1 变分模态分解算法

经验模态分解算法(Empirical Mode Decomposition, EMD)^[12]能够自适应地将信号分解为一系列内禀模态函数,但可能存在模态混叠。变分模态分解算法(Variational Mode Decomposition, VMD)^[13]将信号分解问题转换为变分问题,通过

$$L(\{c_i\}, \{\omega_i\}, \lambda) = \alpha \sum_i \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{i}{\pi t} \right) * c_i(t) \right] e^{-i\omega_i t} \right\|_2^2 + \left\| x(t) - \sum_i c_i(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), x(t) - \sum_i c_i(t) \rangle. \quad (2)$$

应用交替方向乘子法求解式(2)的“鞍点”,将原始信号分解为 K 个分量。算法流程为:

Step1. 初始化 $\{c_i^1\}, \{\omega_i^1\}, \lambda^1, n$;

Step2. $n \leftarrow n+1$;

Step3. 循环; $i=1, 2, \dots, K$, 更新 \hat{c}_i 和 ω_i :

$$\hat{c}_i^{n+1}(\omega) \leftarrow \frac{\hat{x}(\omega) - \sum_{j<i} \hat{c}_j^{n+1}(\omega) - \sum_{j>i} \hat{c}_j^n(\omega) + \frac{1}{2} \hat{\lambda}^n(\omega)}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_i^n)^2}, \quad (3)$$

$$\omega_i^{n+1} \leftarrow \frac{\int_0^\infty \omega | \hat{u}_i^{n+1}(\omega) |^2 d\omega}{\int_0^\infty | \hat{u}_i^{n+1}(\omega) |^2 d\omega}. \quad (4)$$

Step4. 更新 λ :

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau(\hat{x}(\omega) - \sum_i \hat{c}_i^{n+1}(\omega)). \quad (5)$$

Step5. 给定判别精度 $\epsilon > 0$, 重复 Step2 ~ Step4 直到满足迭代终止条件:

$$\sum_i \| \hat{c}_i^{n+1} - \hat{c}_i^n \|_2^2 / \| \hat{c}_i^n \|_2^2 < \epsilon. \quad (6)$$

为便捷起见, 比照 EMD, 本文将 $\{c_i\}$ 按 $\{\omega_i\}$ 作降序排列, 即使得 $\omega_1 > \omega_2 > \dots > \omega_K$ 。

2.2 自适应阈值法

多阈值 Otsu 方法^[14]是经典的 Otsu 方法^[15]的推广。经典的 Otsu 方法在图像阈值分割中应用非常广泛。对于像素总数为 N 、灰度等级为 L 、灰度范围为 $[0, L-1]$ 的图像, 建立该图像的直方图, 若灰度值为 i 的像素数为 N_i , 那么其概率为 $p_i = N_i/N$ 。设有阈值 T 将图像划分为区域 1 和区域 2。其中区域 1 的像素灰度值不高于 T , 区域 2 的像素灰度值高于 T 。区域 1 和区域 2 的像素概率

迭代不断更新各模态及中心频率。将原始信号 $x(t)$ 分解为 K 个有限带宽的分量的变分问题可表述为:

$$\min_{\{c_i\}, \{\omega_i\}} \left\{ \sum_i \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{i}{\pi t} \right) * c_i(t) \right] e^{-i\omega_i t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } \sum_i c_i = x, \quad (1)$$

其中: $\{c_i\} = \{c_1, c_2, \dots, c_K\}$ 为 VMD 得到的分量, $\{\omega_i\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K\}$ 为各分量的频率中心。

引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘子 $\lambda(t)$, 得到如下的增广拉格朗日函数:

分布可以表示为:

$$P_1 = \sum_{i=0}^T p_i, P_2 = \sum_{i=T+1}^{L-1} p_i. \quad (7)$$

区域 1 和区域 2 的均值分别为:

$$\mu_1 = \frac{\sum_{i=0}^T iN_i}{\sum_{i=0}^T N_i}, \mu_2 = \frac{\sum_{i=T+1}^{L-1} iN_i}{\sum_{i=T+1}^{L-1} N_i}. \quad (8)$$

图像的平均灰度为:

$$\mu = P_1 \mu_1 + P_2 \mu_2. \quad (9)$$

区域 1 和区域 2 的类间方差为:

$$\sigma^2 = P_1 (\mu_1 - \mu)^2 + P_2 (\mu_2 - \mu)^2. \quad (10)$$

Otsu 方法认为, 当类间方差达到最大时, 对应的阈值为最优阈值。由于 Otsu 方法通过直方图获得阈值, 因此对于一维信号, 也可以建立直方图, 应用 Otsu 方法获得阈值。

将经典的 Otsu 方法推广到多阈值情形, 即为多阈值 Otsu 方法。设有一组共 $n-1$ 个单调递增的阈值 $T_i (i=1, 2, \dots, n-1)$ 将图像划分为区域 1 ~ 区域 n , 那么这些区域的类间方差为:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n P_i (\mu_i - \mu)^2. \quad (11)$$

当式(11)表示的类间方差达到最大时, 对应的一组阈值 T_i 即为最优阈值。

3 基于超声信号消噪的小孔隙率 CFRP 富树脂识别

对于含富树脂的小孔隙率 CFRP 超声检测信号, 富树脂的识别流程为: (1) 低通滤波, 滤除信

号中的高频随机噪声;(2)变分模态分解,滤除共振结构噪声,分离低频成分;(3)修正声波的衰减,计算瞬时幅值比;(4)自适应阈值处理,消除相干噪声的影响,从瞬时幅值比中识别富树脂。具体实施细节详述如下。

3.1 低通滤波

为抑制高频随机噪声,滤波器的截止频率选择为 1.5 倍共振频率。共振频率可以根据渡越时间和 CFRP 的层数进行估计,方法如下。

对于层数为 N_0 、层厚为 d_0 、声速为 c_0 的 CFRP,超声波在 CFRP 内的渡越时间 Δt 可以按下式估计:

$$\Delta t \approx \frac{2N_0 d_0}{c_0}. \quad (12)$$

共振频率 f_r 近似为:

$$f_r \approx \frac{c_0}{2d_0}. \quad (13)$$

由此,可以根据渡越时间和 CFRP 的层数估计共振频率:

$$f_r \approx \frac{N_0}{\Delta t}. \quad (14)$$

3.2 模态分解

经过低通滤波后,超声检测信号主要由共振结构噪声和低频成分组成。共振结构噪声对富树脂检测造成干扰,为此,这里通过变分模态分解分离共振结构噪声和低频成分。

变分模态分解时,主要需要设置分解的模态数 K 、惩罚因子 α 两个参数。

记低通滤波后的超声检测信号为 $x(t)$,理想的分解结果为 $\{u_k\}$,残量为 r_u 。实际分解结果为 $\{c_k\}$,残量为 r 。理想的分解结果应该为: u_K 为低频成分, u_{K-1} 为共振结构噪声。由此,在分解超声检测信号时, $K=2$ 是一个较合理的选择,同时可以引入两个约束以限制 α 的取值。

约束 1:频率约束。 c_1 的中心频率 $\omega_1/2\pi$ 应接近共振频率 f_r ,而 c_2 的中心频率 $\omega_2/2\pi$ 应接近探头的中心频率 f_c 。引入阈值 T_1 、 T_2 ,频率约束可以表示为:

$$\begin{cases} |k_1| \leq T_1, k_1 = \frac{\omega_1/2\pi - f_r}{f_r} \times 100\% \\ |k_2| \leq T_2, k_2 = \frac{\omega_2/2\pi - f_c}{f_c} \times 100\% \end{cases}. \quad (15)$$

约束 2:幅值约束。 u_2 作为低频成分,应该被完整地分解到 c_2 。由于共振结构噪声只存在于近表面,因此底面回波处的幅值比应满足关系:

$A_2/A_1 \approx 1$ 。引入阈值 T_3 ,则幅值约束如下:

$$|k_3| \leq T_3, k_3 = \left[1 - \frac{A_2}{A_1}\right] \times 100\%. \quad (16)$$

选择满足频率约束和幅值约束的 α 对 $x(t)$ 进行分解,在给定 K 的情形下,较小的 α 得到的分量频带较宽,超声检测信号具有较宽的频带,因此 α 的取值将偏小。由于 α 允许在较大的范围内进行选择,因此采用网格搜索,检查频率约束和幅值约束,实现 α 的选择。超声信号频带较宽,约束应相对宽松,本文 T_1 、 T_2 和 T_3 均取 15%。同时满足频率约束和幅值约束的 α 可能有多个,此时可以根据特定规则选取,如选择使得 $|k_1| + |k_2| + |k_3|$ 最小的 α 值;但实际上,此时分解结果通常相差不大, α 可以任取。

应用分解参数 K 、 α ,对接收信号作 VMD 得到共振结构噪声 c_1 、低频成分 c_2 和残量 r ,富树脂形成的反射回波即存在于 c_2 中。

3.3 包络谱衰减修正

理论上,超声波在 CFRP 中传播时,受到层间反射和声波吸收的影响,低频成分 c_2 中背散射信号的幅值近似具有指数下降规律。为此,可以考虑采用指数衰减函数拟合 c_2 背散射信号的包络谱 e_2 ,通过自适应滤波抑制声波衰减^[11]。但是,由于实际 CFRP 中的富树脂反射、层厚波动、材料散射等的影响, c_2 背散射信号的幅值可能产生较大的波动。以富树脂反射为例,若 CFRP 内仅含有单处富树脂,则 c_2 背散射信号将只在该处出现明显回波,而在其他位置均只出现幅值较低的层间反射波;也就是说,此时 e_2 总体上为单峰形式。显然,此时 e_2 难以用指数衰减函数拟合。对于实际 CFRP, e_2 通常更加复杂,指数衰减拟合很容易失效。

超声底面回波相对于表面回波的衰减反映了超声波在 CFRP 中传播时的总体衰减量。若在 e_2 中,表面回波、底面回波的位置分别为 N_1 和 N_2 ,幅值分别为 A_1 和 A_2 ,当量衰减率为 β ,那么有:

$$A_2 = A_1 e^{-\beta(N_2 - N_1)}. \quad (17)$$

考虑声波衰减后, e_2 的幅值可以按下式近似修正:

$$e_2(k) = \begin{cases} e_2(k) e^{\beta(k - N_1)}, & N_1 \leq k \leq N_2 \\ e_2(k), & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (18)$$

e_2 的幅值与表面回波幅值的比值描述了 CFRP 各局部的反射能力。定义瞬时幅值比为:

$$g_\alpha(k) = \frac{e_2(k)}{A_1}. \quad (19)$$

幅值修正后, e_2 在表面回波和底面回波处幅值最高, 均为 A_1 。因此 $g_0 \leq 1$, 且在表面回波、底面回波处取得最大值 1。对于富树脂检测而言, 应用的是 g_0 的背散射信号段, 将之记作 g 。

3.4 自适应阈值处理

瞬时幅值比 g 较高的区域可能含有富树脂。为此, 可以考虑选取某个阈值, 当 g 高于该阈值时, 即可判断相应区域含有富树脂。

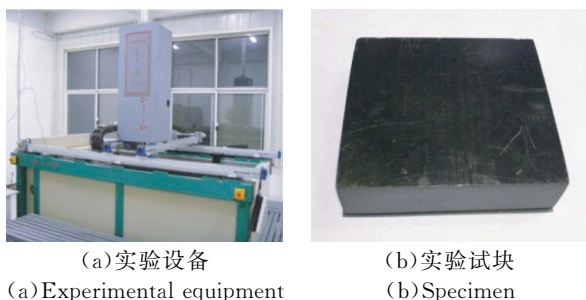
瞬时幅值比 g 的极大值序列按照幅值高低可以分为 3 个等级: (1) 主要由富树脂反射回波引起的极大值, 幅值较高; (2) 主要由层间反射回波等造成的极大值, 幅值处于中间水平; (3) 由于超声脉冲的瞬态特性和多波形叠加形成的波谷, 幅值最低。对于富树脂检测而言, 等级 (2) 和等级 (3) 属于相干干扰。

为实现富树脂识别, 可以采用两个阈值将 g 的极大值序列划分为 3 类, 具有最高幅值的类别即对应富树脂区域。这一目标可以通过应用 Otsu 双阈值分割 ($n=3$) 实现。

4 实验研究

4.1 实验设备和试块

实验设备为如图 1(a) 所示的脉冲反射法超声检测平台。该超声检测平台主要由工业控制计算机、伺服电机、多轴机械臂、数字超声采集卡和超声探头组成。探头中心频率为 7.5 MHz, 信号采样频率为 100 MHz。实验试块为如图 1(b) 所示的由某飞机制造公司提供的小孔隙率 CFRP 试块。试块层数为 72 层, 层厚为 0.125 mm。对同一批次的其他 CFRP 试块的金相观察表明: 该批次 CFRP 未观察到明显孔隙, 孔隙率接近于 0, 但是在少数局部位置观察到了严重的富树脂。



(a) 实验设备 (b) 实验试块
(a) Experimental equipment (b) Specimen

图 1 实验设备和试块

Fig. 1 Experiment equipment and specimen

4.2 信号采集与处理

采集该小孔隙率 CFRP 的超声脉冲反射信号。某次采集的超声信号及相应的包络谱如图 2 所示。由于多种分量的干扰, 通过包络谱识别富树脂具有一定困难。

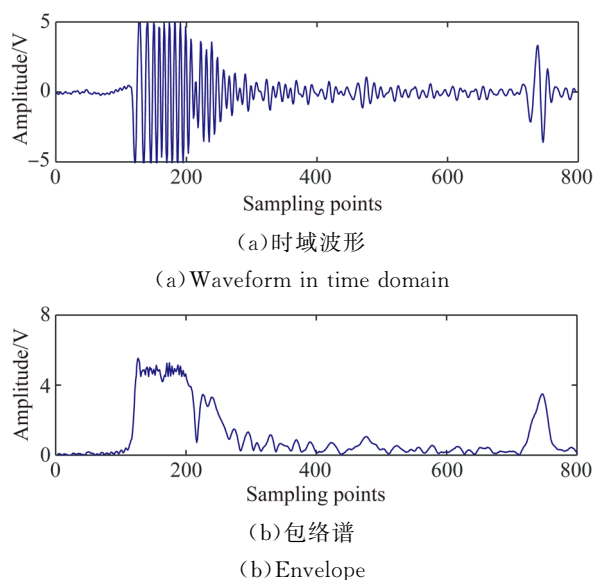


图 2 超声检测信号

Fig. 2 Ultrasonic testing signal

处理图 2 中所示超声检测信号, 应用低通滤波滤除高频随机噪声, 按式 (14) 估计得到共振频率为 $f_r = 11.92$ MHz, 低通滤波后的超声信号 $x(t)$ 及相应的包络谱如图 3 所示。

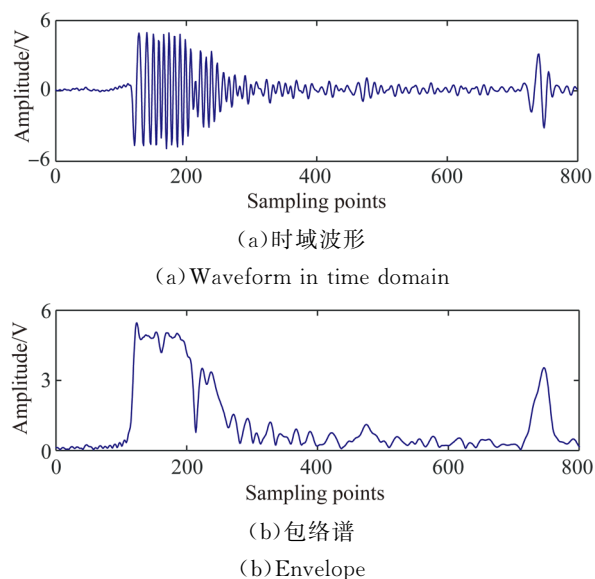


图 3 低通波后的超声检测信号

Fig. 3 Ultrasonic testing signal after low-pass filtering

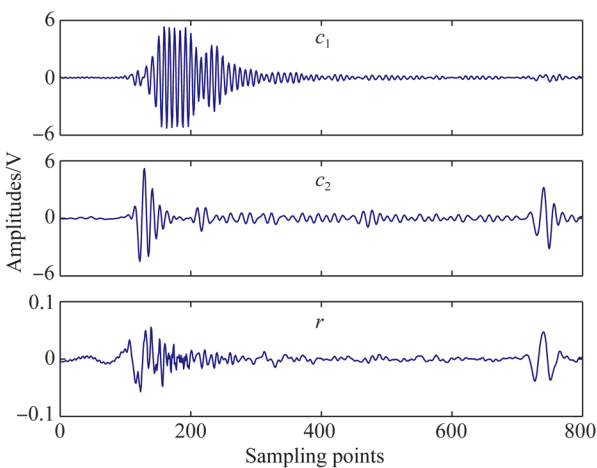
应用 VMD 处理低通滤波后的超声信号。选择候选的 $\alpha \in \{2^j\}$, 其中 $j=1, 2, \dots, 10$ 。经 VMD 得到各分量的中心频率偏差和幅值偏差分布如表 1 所示。

表 1 分量的频率和幅值偏差

Tab. 1 Differences of frequencies and amplitudes of components

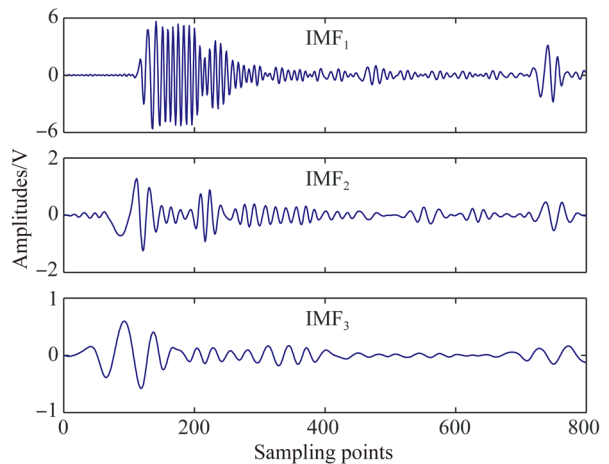
α	$k/\%$		
	k_1	k_2	k_3
2	-1.99	-20.05	13.45
4	-0.26	-13.37	8.79
8	0.09	-11.75	8.52
16	0.53	-9.56	8.64
32	0.68	-8.71	9.27
64	0.70	-8.44	10.40
128	0.76	-7.79	12.52
256	0.88	-6.53	16.50
512	1.08	-4.36	23.56
1 024	1.34	-1.12	34.30

根据频率约束和幅值约束, α 的合理取值范围为 4~128。可以预计, 此时分解得到的 2 个分量均具有实际的意义, 其中 c_1 主要为共振结构噪声, 而 c_2 为低频成分, 而残量 r 的幅值非常小。以分解参数 $K=2$ 和 $\alpha=16$ 为例, 分解所得信号如图 4(a) 所示。作为对比, 图 4(b) 给出了 EMD 的分解结果。图 4(b) 中, 在首个 IMF 中同时出现了共振结构噪声和超声底波, 即在首个 IMF 中发生了模态混叠。因此, EMD 的分解结果并不理想。



(a) VMD 所得分量

(a) Components given by VMD



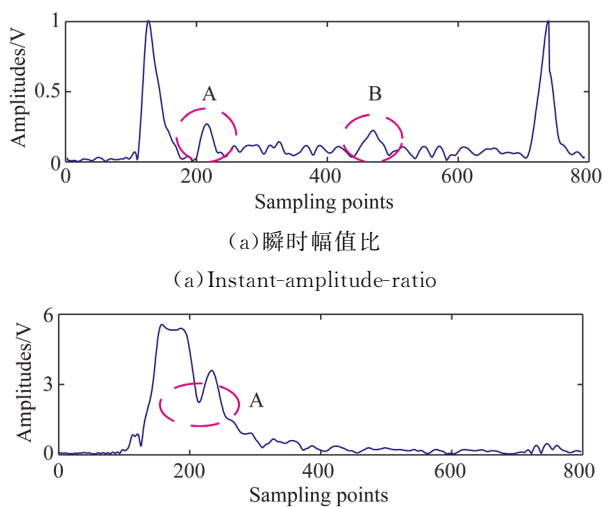
(b) EMD 所得分量

(b) Components given by EMD

图 4 超声检测信号分解结果

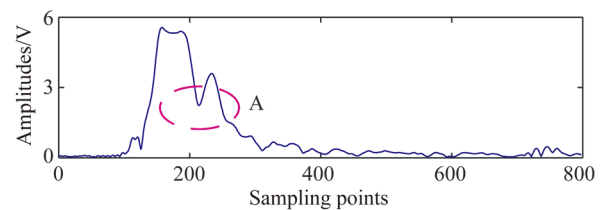
Fig. 4 Decomposition results of the ultrasonic testing signal

应用希尔伯特变换求 c_2 的包络谱, 并修正超声波衰减造成的影响, 计算瞬时幅值比 g_0 。结果如图 5(a) 所示。观察图 5(a) 可见, 区域 A 和区域 B 出现明显峰值, 推测区域 A 和区域 B 可能存在富树脂。此外, 对比图 2(b) 可见, 原始超声检测信号的包络谱在 A 处出现了剧烈下降的深谷, 形成了极小值。类似现象也发生在 c_1 , 由图 5(b) 可见, 共振结构噪声的幅值在 A 处也出现了明显的深谷。可以推测, 这是由于区域 A 处的富树脂破坏了共振结构噪声的连续性导致的。



(a) 瞬时幅值比

(a) Instant-amplitude-ratio



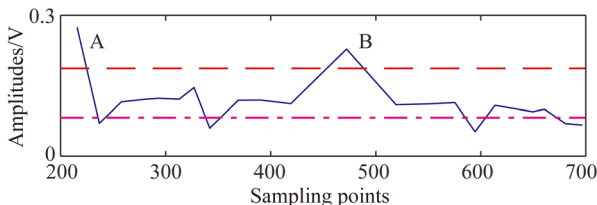
(b) c_1 的包络谱

(b) Envelope of c_1

图 5 超声检测信号分解结果

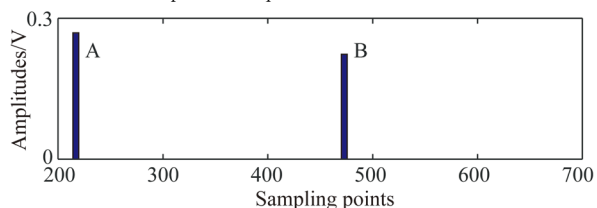
Fig. 5 Decomposition results of the ultrasonic testing signal

选取 g 的极大值序列,应用 Otsu 双阈值方法计算阈值。阈值处理结果如图 6 所示,最大阈值为 0.18, A、B 区域高于该阈值。



(a) 极值点序列与双阈值

(a) Extreme points sequence and the dual threshold



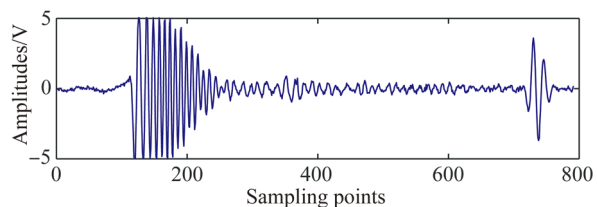
(b) 阈值化后的极值点序列

(b) Extreme points sequence after thresholding

图 6 自适应阈值处理结果

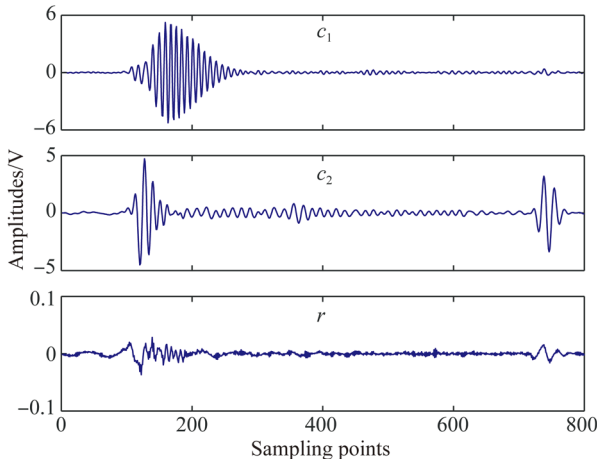
Fig. 6 Results of adaptive thresholding

图 7 给出了相同实验参数下,另一采集位置的超声检测信号及其处理结果。信号处理结果表明,区域 C 幅值较高,可能存在富树脂。此外, g_0 在近表面区域无明显峰值,而原始超声检测信号、 c_1 的共振结构噪声保持完好,在近表面未出现剧烈下降的深谷,与图 5 中的区域 A 相反。



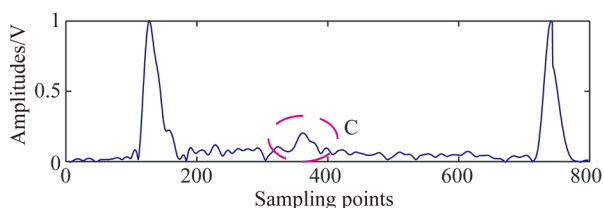
(a) 超声检测信号

(a) Ultrasonic testing signal



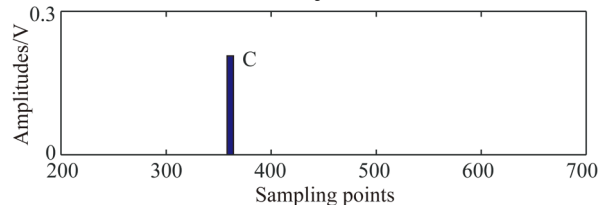
(b) VMD 所得分量

(b) Components given by VMD



(c) 瞬时幅值比

(c) Instant-amplitude-ratio



(d) 自适应阈值处理结果

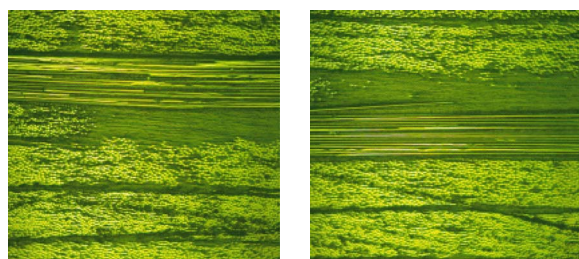
(d) Results of adaptive thresholding

图 7 超声检测信号与处理结果

Fig. 7 Ultrasonic testing signal and the processing results

4.3 金相观察

在该小孔隙率 CFRP 试块上标记超声检测区域,进行打磨、抛光并在金相显微镜上进行观察。图 8(a)、图 8(b)分别给出了区域 A、C 的金相图,两处位置均出现了较明显的富树脂。可见,第 3 节的超声信号处理方法能够有效地识别富树脂。此外,区域 A 存在富树脂,说明近表面的富树脂确实破坏了共振结构噪声的连续性,与推测一致。因此小孔隙率 CFRP 的近表面富树脂可以通过检测超声信号共振区包络谱的深谷实现。



(a) 区域 A 的金相图

(b) 区域 C 的金相图

(a) Metallograph of region A (b) Metallograph of region C

图 8 区域 A 和 C 的金相图

Fig. 8 Metallographs of regions A and C

4.4 方法对比和分析

带通滤波和小波分解在超声信号处理中应用广泛。现在以图 2 所示的超声检测信号为例,选择椭圆带通滤波器、小波分解代替本文的“低通滤波—变分模态分解”分离低频成分,计算瞬时幅值比 g 并作自适应阈值处理,结果分别如图 9、图 10 所示。图 9 中滤波器的通带范围选择为 1~9.5 MHz。这里,9.5 MHz 近似为探头中心频率和共振频率的均值。图 10 中,小波基选择为 db4,分

解层数为 3 层, $d_1 \sim d_3$ 为重构的 3 个细节信号, a_3 为重构的第 3 个概貌信号, 即分离得到的低频成分。

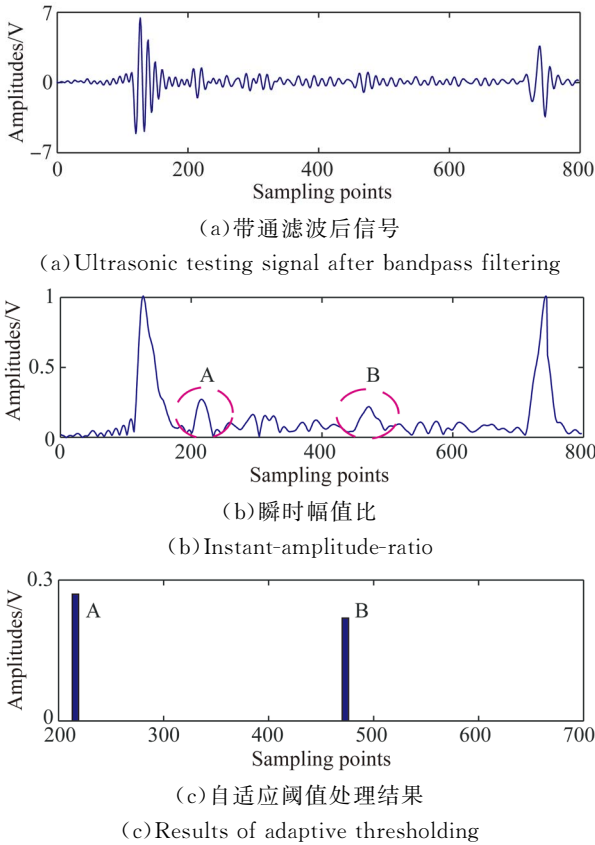


图 9 带通滤波-衰减修正-自适应阈值的处理结果
Fig. 9 Processing results given by the bandpass filtering-attenuation correction and adaptive thresholding

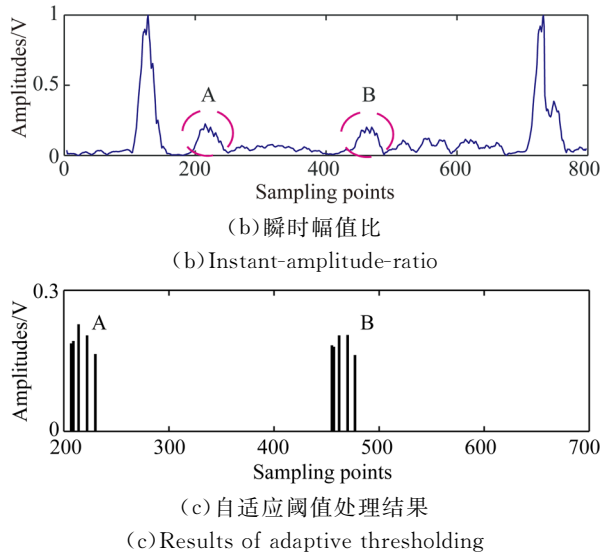
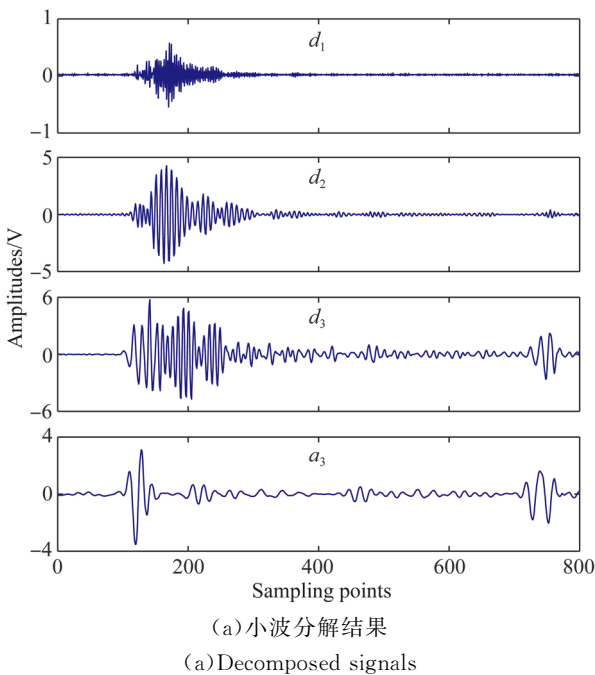
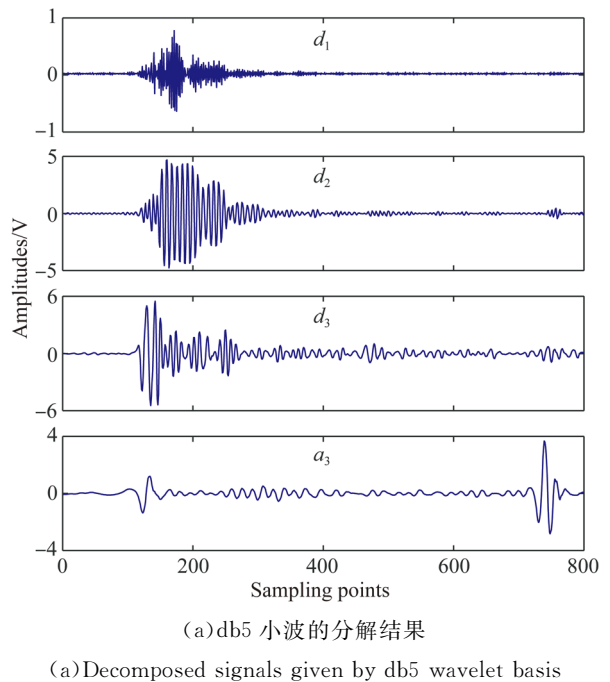
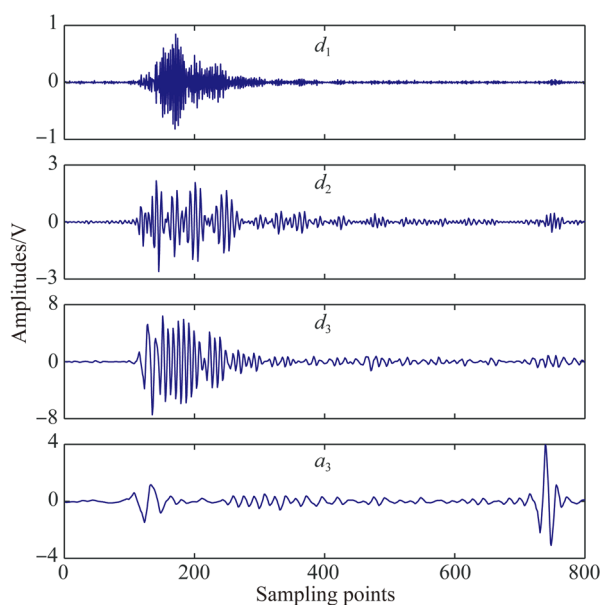


图 10 小波分解-衰减修正-自适应阈值的处理结果
Fig. 10 Processing results given by the wavelet decomposition-attenuation correction and adaptive thresholding

图 9、图 10 均准确地实现了富树脂检测。但是,图 10 尽管准确地检测得到了富树脂缺陷,在由图 10(a)可见,超声底波同时被分解 d_3 和 a_3 , 与图 4(b) EMD 的模式混叠现象类似,分解结果有待改进。

带通滤波受滤波器的类型和截止频率等的影响较大,而小波分解受小波基和分解层次的影响较大。以小波基对小波分解的影响为例,图 11 给出了小波基分别为 db5、sym4 时,超声检测信号的分解结果,显然,分解结果均不理想。





(b)sym4 小波的分解结果

(b)Decomposed signals given by sym4 wavelet basis

图 11 不同小波基下的分解信号

Fig. 11 Decomposed signals given by different wavelet bases

综合图 9 和图 10 可见,如果带通滤波器或小波滤波器组设计合理,同样可以实现小孔隙率 CFRP 的富树脂识别。然而,对于小孔隙率 CFRP 的超声检测信号而言,共振结构噪声和低频成分的频率接近,容易发生频谱混叠,因此带通滤波和小波分解相关参数的选择存在一定困难,通常需要通过多次试验验证。

5 小孔隙率 CFRP 富树脂超声检测多视图成像

基于第 3 节的超声检测信号处理方法,可以实现小孔隙率 CFRP 富树脂超声检测的多视图成像,从而系统、直观地给出小孔隙率 CFRP 中富树脂的分布。采用的视图包括三维视图、C 扫描视图和 B 扫描视图。

5.1 数据采集和批量处理

按一定间隔扫描待检测小孔隙率 CFRP 表面,依次采集相应位置的脉冲反射超声检测信号。

批量处理采集到的超声数据。由于在超声检测信号中,富树脂只在少数局部位置出现或不出现,因此对同一批次的小孔隙率 CFRP 而言,超声检测信号的渡越时间和共振频率基本不变。因此可以对所有超声检测信号采用同一截止频率作低通滤波。对该批次多个超声检测信号的处理结

果表明,共振频率 f_r 均近似为 12 MHz,因此,截止频率可以选为 18 MHz。

对于 VMD,对该小孔隙率 CFRP 的多个超声检测信号的处理结果表明, α 取值为 16~32 时,频率约束和幅值约束均得到满足。

根据 VMD 得到的低频成分 c_2 ,计算瞬时幅值比 g_0 。截取背散射段的瞬时幅值比 g 用于多视图成像。为提高平滑性,可以对数据进行插值处理。

5.2 多视图产生

三维视图能够给出该小孔隙率 CFRP 内富树脂的总体分布规律。工程应用中,常用的是 C 扫描视图、B 扫描视图。C 扫描视图可以取为三维视图在深度方向上的最大值投影视图^[11],B 扫描视图可以认为是三维视图在前视、侧视方向上的剖视图。如图 12 所示,设三维视图数据矩阵为 \mathbf{V} ,则 C 扫描视图 \mathbf{C} 的生成方式为:

$$\mathbf{C}(i, j) = \max \mathbf{V}(i, j, k). \quad (20)$$

前视 B 扫描视图 \mathbf{B}_F 和侧视 B 扫描视图 \mathbf{B}_S 的生成方式为:

$$\begin{cases} \mathbf{B}_F(i, k) = \mathbf{V}(i, j = j_0, k) \\ \mathbf{B}_S(j, k) = \mathbf{V}(i = i_0, j, k) \end{cases} \quad (21)$$

当某区域存在富树脂时,该区域的瞬时幅值比 g 较高。为此,对多视图作阈值处理, g 值较低的数据不予绘制显示。选择的阈值需要低于富树脂区域的 g 值,以保证富树脂区域不被漏检。在此基础上,阈值的选择要求并不严格,因为此时阈值只对显示的简洁性产生影响。根据对该小孔隙率 CFRP 多个超声检测信号的处理结果,本文选择阈值为 0.15,该值能够应用于该批次小孔隙率 CFRP 的富树脂检测;事实上,其他阈值,如 0.18 等,也能够保证富树脂的准确检测,因此也是可行的。

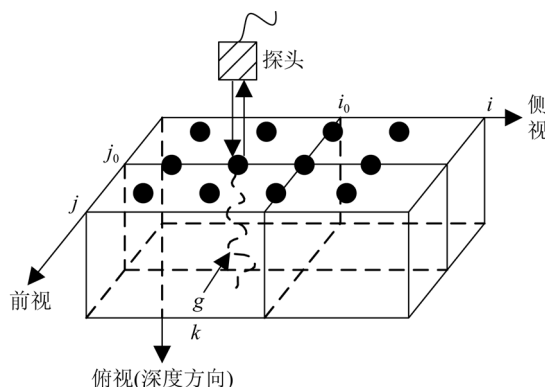


图 12 成像方法:C扫描和B扫描

Fig. 12 Imaging methods: C-scan and B-scan

5.3 多视图成像结果与富树脂检测

图 1(b)所示小孔隙率 CFRP 试块的多视图成像结果如图 13 所示。由图 13(a)可见,三维视图中给出了该小孔隙率 CFRP 各位置处的瞬时幅值比 g ,区域 1~区域 5 的 g 值较高,可能含有富树脂。图 13(b)的 C 扫描视图中,对应于 1、3、4、5 的 g 值较高,而 C 扫描视图损失了深度信息,区域 2 被区域 1 所掩盖。图 13(c)、图 13(d)分别给出了区域 1 和区域 2 位置的前视 B 扫描视图和侧视 B 扫描视图,给出了富树脂的深度信息,区域 2 处的富树脂被揭示。实际上,这里的区域 1、2、3 分别对应于第 4 节的区域 A、B、C。

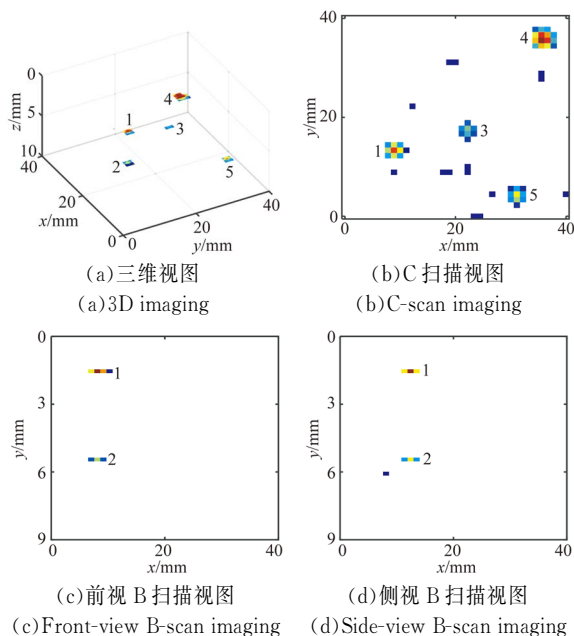


图 13 富树脂检测结果的多视图成像
Fig. 13 Multi-view imaging results of rich-resin defects

6 小孔隙率 CFRP 富树脂超声检测软件开发

为提高小孔隙率 CFRP 富树脂检测的易操作性和规范性,应用面向对象技术设计了小孔隙率 CFRP 富树脂超声检测软件。

6.1 超声检测信号处理

超声检测信号处理要求能够实现单个超声检测信号的处理和多超声检测信号的批量处理,前者为后者的参数选择提供了一定依据。根据打开对象的类型(文件/文件夹),软件自动进入相应的处理模式。图 14 给出了软件对单个超声检测信

号的处理结果,其中衰减抑制和 Otsu 多阈值处理均集成在“自适应阈值”操作中。

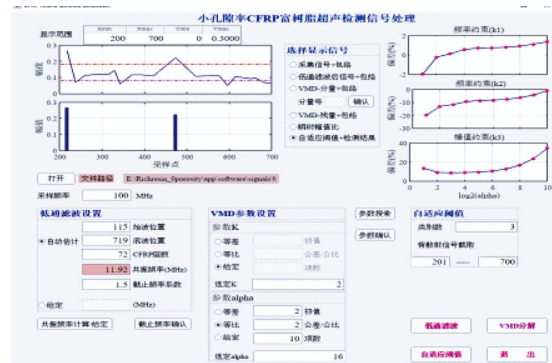


图 14 单个超声检测信号的软件处理

Fig. 14 Processing results of single ultrasonic testing signal given by the software

6.2 超声检测结果多视图成像

多视图成像的目标是直观地给出小孔隙率 CFRP 超声检测的总体结果,以利于迅速判断富树脂的分布。图 15 给出了软件生成的多视图。

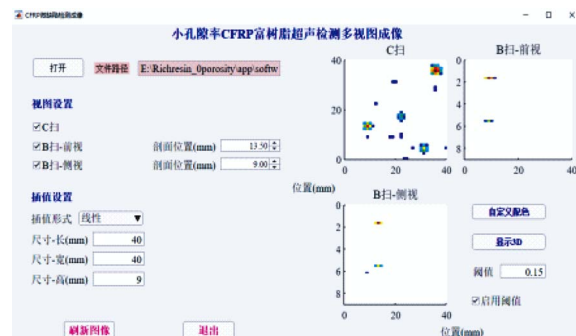


图 15 多视图成像的软件处理

Fig. 15 Multi-view imaging results given by the software

7 结 论

本文针对小孔隙率 CFRP 中的富树脂缺陷,提出了相应的超声检测方法。应用低通滤波、变分模态分解、自适应阈值技术,消除超声检测信号中的高频随机噪声、共振结构噪声和相干噪声,引入瞬时幅值比修正超声信号的衰减。在处理所有超声检测信号的基础上,实现小孔隙率 CFRP 富树脂检测的多视图成像,生成三维视图、C 扫描视图和 B 扫描视图,系统地、直观地给出小孔隙率 CFRP 内的富树脂分布。根据需要,开发了小孔隙率 CFRP 富树脂超声检测软件。结果表明:变

分模态分解的分量数为 2, 自适应阈值的类别数为 3 时, 能够准确识别超声检测信号中的富树脂

反射信号; 采用 0.15 作为多视图成像的阈值, 可简洁有效地识别小孔隙率 CFRP 中的富树脂。

参考文献:

- [1] 周正千, 肖鹏, 刘航航. 航空复合材料先进超声无损检测技术 [J]. 航空制造技术, 2013, 424(4): 38-43.
ZHOU ZH G, XIAO P, LIU H H. Advanced ultrasonic testing technology for aviation composites [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 424(4): 38-43. (in Chinese)
- [2] 路士增, 林兰波, 姜明顺, 等. 基于光纤光栅传感器的复合材料损伤识别系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2894-2901.
LU SH Z, LIN L B, JIANG M SH, *et al.*. Identification system of composite material damage based on FBG sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2894-2901. (in Chinese)
- [3] 周晓军, 游红武, 程耀东. 含孔隙碳纤维复合材料的超声衰减模型 [J]. 复合材料学报, 1997, 14(3): 100-107.
ZHOU X J, YOU H W, CHENG Y D. Ultrasonic attenuation model of void contained carbon-fibre reinforced plastic [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1997, 14(3): 100-107. (in Chinese)
- [4] LIN L, CHEN J, ZHANG X, *et al.*. A novel 2-D random void model and its application in ultrasonically determined void content for composite materials [J]. *NDT & E International*, 2011, 44(3): 254-260.
- [5] 胡宏伟, 李雄兵, 杨岳, 等. CFRP 复杂型面构件的孔隙率超声检测方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1315-1319.
HU H W, LI X B, YANG Y, *et al.*. Method of inspecting porosity in CFRP with complex surface by ultrasonic [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(4): 1315-1319. (in Chinese)
- [6] 林莉, 罗明, 郭广平, 等. 碳纤维复合材料孔隙率超声声阻抗法检测 [J]. 复合材料学报, 2009, 26(3): 105-110.
LIN L, LUO M, GUO G P, *et al.*. Ultrasonic determination of carbon fiber composite porosity using acoustic impedance [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(3): 105-110. (in Chinese)
- [7] KIM K B, HSU D K, BARNARD D J. Estimation of porosity content of composite materials by applying discrete wavelet transform to ultrasonic back-scattered signal [J]. *NDT & E International*, 2013, 56: 10-16.
- [8] LOZAK A, BOLLER C, BULAVINOV A, *et al.*. Phase statistics and spectral analysis of ultrasonic signals for CFRP component assessment [C]. *European Workshop on Structural Health Monitoring*, 2014: 2290-2297.
- [9] 何晓晨, 金士杰, 林莉. 超声背散射信号递归定量分析无损表征 CFRP 孔隙分布仿真 [J]. 复合材料学报, 2018: 1-6.
HE X CH, JIN SH J, LIN L. Simulation on non-destructive evaluation of CFRP void distribution with recurrence quantification analysis of ultrasonic back-scatter signals [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018: 1-6. (in Chinese)
- [10] MIENCZAKOWSKI M. *Advanced ultrasonic NDE of composite airframe components: physics, modeling and technology* [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2010.
- [11] 陈越超, 杨辰龙, 周晓军, 等. 厚截面 CFRP 孔隙超声脉冲反射检测方法 [J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(3): 425-431.
CHEN Y CH, YANG CH L, ZHOU X J, *et al.*. Study of ultrasonic pulse echo method for voids test in thick-section CFRP [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(3): 425-431. (in Chinese)
- [12] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C]. *Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1998: 903-995.
- [13] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 531-544.
- [14] 申铨京, 刘翔, 陈海鹏. 基于多阈值 Otsu 准则的阈值分割快速计算 [J]. 电子与信息学报, 2017, 39

(1): 144-149.

SHEN X J, LIU X, CHEN H P. Fast computation of threshold based on multi-threshold Otsu criterion [J]. *Journal of Electronics & Information Technol-*

ogy, 2017, 39(1): 144-149. (in Chinese)

[15] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.

作者简介:



曾 祥(1989—),男,湖南株洲人,博士研究生,2012年于武汉大学获得学士学位,主要从事超声检测及自动化方面的研究。E-mail: zzzju0104@163.com



杨辰龙(1974—),男,山西运城人,博士,副教授,1999年、2002年于太原科技大学分别获得学士、硕士学位,2005年于浙江大学获得博士学位,主要从事复合材料超声检测及成像方面的研究。E-mail: yclzju@163.com