

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.053

厚截面复合材料局域孔隙超声检测方法*

陈越超¹ 周晓军¹ 杨辰龙¹ 李 钊¹ 郑慧峰²

(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027; 2. 中国计量学院计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要: 采用超声脉冲反射法对厚截面复合材料局域孔隙缺陷进行检测,提取超声背散射信号进行分析。结果表明,在材料近表面区域可能产生共振结构噪声,孔隙会导致结构噪声频率降低、幅值减小;在远表面区域的背散射信号恢复正常状态,孔隙则会导致较小幅值回波的出现。在此基础上提出了基于背散射信号处理的局域孔隙识别方法。对近表面信号使用改进S变换生成时频系数矩阵,再计算信号主频极小值及增益来识别孔隙。对远表面信号则先进行小波变换模极大值去噪,再使用改进S变换生成时频系数矩阵,最后计算信号主频极大值及增益来识别孔隙。对厚截面复合材料平板和曲面试块的实验表明,使用该信号处理方法可以有效识别厚截面复合材料局域孔隙缺陷。

关键词: 厚截面复合材料 超声脉冲反射法 背散射信号 改进S变换 小波模极大

中图分类号: TB553; TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0372-07

Ultrasonic Testing Method for Localized Void Defect Identification in Thick Section Composites

Chen Yuechao¹ Zhou Xiaojun¹ Yang Chenlong¹ Li Zhao¹ Zheng Huifeng²(1. *The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*2. *College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China*)

Abstract: The ultrasonic pulse echo method was adopted to test the localized void defects in thick section composites and the extracted ultrasonic backscattered signal was analyzed. The results showed that the resonance structure noise may appear in the near surface region of the material. The voids can result in frequency reduction and amplitude decrease of the structure noise. The backscattered signal was back to normal state in the far surface region and the voids can lead to the appearance of low amplitude echo. The localized void identification method based on the backscattered signal processing was proposed. The near surface signal was processed by a modified S-transform to generate time-frequency coefficient matrix. The minimum and gain of the signal main frequency can be calculated to identify the voids. For the far surface signal, the wavelet transform modulus maximum denoising method was applied firstly, and then the denoised signal was processed by the modified S-transform to generate time-frequency coefficient matrix. Finally, the maximum and gain of the signal main frequency could be calculated to identify the voids. The experiments were implemented for the thick section composite plate specimen and curved surface specimen, respectively. The results showed that the localized void defects in thick section composites could be effectively identified by this signal process method.

Key words: Thick section composites Ultrasonic pulse echo method Backscattered signal Modified S-transform Wavelet modulus maximum

收稿日期: 2014-06-26 修回日期: 2014-08-04

* 国家自然科学基金资助项目(51075358)、浙江省自然科学基金资助项目(LY14E050013)和浙江省高校重中之重学科开放基金资助项目(JL130112)

作者简介: 陈越超, 博士生, 主要从事无损检测及其自动化研究, E-mail: cyczju07@126.com

通讯作者: 周晓军, 教授, 主要从事检测、信息处理与质量保证研究, E-mail: cmeesky@163.com

引言

孔隙作为碳纤维复合材料(CFRP)中最常见和最重要的微观缺陷,其形状大小和体积分数对CFRP的强度和刚度有重要影响^[1-2],因此对孔隙缺陷的检测成为国内外学者关注的热点。超声波无损检测是评价材料内部缺陷的重要手段^[3],目前运用较多的CFRP超声检测方法有声速法^[4-6]、衰减法^[7-10]和声阻抗法^[11]等,这些检测方法主要针对较薄的复合材料,并且主要关注材料总体孔隙率的检测,对于孔隙的具体位置则很难识别。相对于薄板复合材料,厚截面复合材料中出现孔隙非均匀分布的可能性大大增加。这时可能出现材料平均孔隙率满足设计要求,而材料内局域孔隙率严重超标的情况,从而对材料性能造成较大影响。因此,需要对厚截面复合材料局域孔隙缺陷进行识别。

本文通过研究厚截面复合材料超声脉冲反射信号的时频域特征,提出基于超声背散射信号处理的局域孔隙缺陷识别方法。

1 厚截面复合材料超声信号特征

CFRP是由多层纤维层和树脂层交替间隔铺层成型的。对于厚截面材料,其纤维层数目可达40层以上。超声波在垂直厚截面复合材料表面入射时,可能会在复合材料内部的层状结构中经多次反射而发生干涉,从而形成共振波^[12-13]。由于该信号与材料内部结构有关,因而可以被称为共振结构噪声。共振结构噪声的频率取决于复合材料层厚度。由于纤维层厚度远大于树脂层厚度,可以将纤维层厚度近似当作复合材料层厚度。共振频率为

$$f_n = \frac{nc}{2d} \quad (1)$$

式中 n ——固有频率阶数

c ——超声波在复合材料中传播速度, m/s

d ——复合材料层厚度, m

因此只需测得复合材料的层厚和声速即可得到复合材料固有共振频率。共振幅值取决于材料固有共振频率和入射超声波中心频率的接近程度。材料共振频率和入射超声波频率越接近,则共振幅值越大。

由于复合材料对超声波有较强的衰减作用,在检测较厚复合材料时,共振结构噪声主要在材料近表面产生,随着声波传播距离的增加,结构噪声逐渐减弱直到消失,远表面的检测信号变为正常背散射信号,仅含有材料散射噪声和外界电子噪声。

图1a为某厚截面复合材料的检测信号,其增益

为40 dB,图1b为该信号时频图。所用超声探头为普通宽频带探头,中心频率为7.5 MHz。所检测材料为64层,每层厚度为0.125 mm。经计算该复合材料声速近似为3 000 m/s,根据式(1)可得一阶共振频率为12 MHz。从图1b中可以看到,从始波到近表面背散射信号,信号主频从7.5 MHz迅速上升到12 MHz左右,该区域对应于图1a中的共振结构噪声,可以看到该区域的信号幅值较大。在离开近表面后信号主频则迅速下跌到10 MHz以下,对应于图1a中的正常背散射信号。可以看到该区域信号幅值较小,但是信号波动较为复杂。

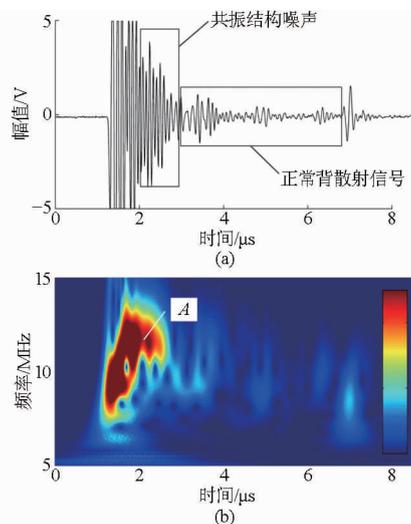


图1 厚截面复合材料检测信号

Fig. 1 Test signal of thick section composite

(a) 时域检测信号 (b) 信号时频图

如果材料近表面出现孔隙缺陷,则将破坏声波在该区域原有的共振状态,使得结构噪声频率下降、幅值减小甚至完全消失。如图1b中A处结构噪声幅值相对于其两侧出现下降,即可能由孔隙缺陷引起。这样可通过计算近表面信号主频及主频幅值变化趋势,来识别材料近表面孔隙缺陷。因此在第2节中将提出一种改进的S变换,该变换具有良好的时频分辨率。对近表面检测信号使用改进S变换,再通过适当的信号处理方法,可以有效识别材料近表面孔隙,进而判断孔隙严重程度。

对于材料远表面信号,结构噪声已经基本消失,如果该区域出现孔隙缺陷,则将使材料远表面信号中出现小的回波。由于孔隙影响形成的缺陷回波幅值本身较小,加上复合材料对声波较强的衰减作用,使得远表面处回波幅值进一步降低,导致孔隙缺陷回波容易淹没在环境噪声中而难以识别。因此需要先对远表面信号进行去噪处理。在第2节中提出了小波变换模极大值去噪方法,对远表面信号噪声有良好的抑制作用。对去噪后的信号再使用改进S变

换判断信号主频变化趋势,可以对远表面孔隙进行有效定位,并判断孔隙严重程度。

2 超声背散射信号处理方法

2.1 改进 S 变换

Stockwell 等^[14]提出的 S 变换,是对连续小波变换和短时傅里叶变换的发展。设 $h(t) \in L^2(\mathbf{R})$, $L^2(\mathbf{R})$ 表示实数域上的平方可积空间,则 $h(t)$ 的 S 变换定义为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (2)$$

式中 τ ——平移因子(时间)

f ——频率

由于 S 变换中的基本变换函数形态固定,使得 S 变换的应用受到了限制。Assous 等^[15-16]提出使用 f/λ 代替 f ,得到 $h(t)$ 的广义 S 变换

$$S(\tau, f, \lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\lambda \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2\lambda^2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (3)$$

式中 λ ——窗口频率分辨率比例因子

基于以上广义 S 变换,将高斯窗比例因子 λ 表示为随频率呈线性变化的函数,即

$$\lambda = af + b \quad (4)$$

式中 a ——频率线性变化斜率

b ——截距

此时 $h(t)$ 的改进 S 变换可表示为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{(af + b) \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2(af + b)^2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (5)$$

这样,参数 a 和 b 可以通过控制高斯窗长度来改进时域和频域分辨率,从而使改进 S 变换可以更好地表现信号高低频局部信息。

2.2 小波变换模极大值去噪

2.2.1 二进小波变换

设 $\varphi(t) \in L^2(\mathbf{R})$, $L^2(\mathbf{R})$ 表示实数域上的平方可积空间。若其傅里叶变换 $\psi(\omega)$ 满足可容许条件

$$\int_{\mathbf{R}} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (6)$$

则 $\varphi(t)$ 为一个基本小波,对其进行伸缩和平移,可以得到连续小波变换

$$\varphi_{a,\tau}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (a > 0, \tau \in \mathbf{R}) \quad (7)$$

将 $\varphi_{a,\tau}(t)$ 尺度进行二进制离散,得到二进小波

$$\varphi_{2^k,\tau}(t) = 2^{-\frac{k}{2}} \varphi\left(\frac{t-\tau}{2^k}\right) \quad (k \in \mathbf{N}, \tau \in \mathbf{R}) \quad (8)$$

由于二进小波具有时域平移不变性,被广泛用于信号奇异性检测及信号降噪处理中^[17-19]。

2.2.2 模极大值降噪原理

通过 Lipschitz 指数 α 可以刻画信号的奇异性。而小波变换模极大值能够用来描述信号局部奇异性^[20]。

设表征信号 $f(t)$ 奇异性的 Lipschitz 指数 α 在 $0 \sim 1$ 之间,若 v 为信号 $f(t)$ 的局部奇异点,则存在一个常数 A ,对 v 的领域中的任意点 δ 有

$$|\varphi_{2^k} f(\delta)| \leq A(2^k)^\alpha \quad (9)$$

$$|b|\varphi_{2^k} f(\delta)| \leq lbA + \alpha k \quad (10)$$

由此可知,若信号 $f(t)$ 的 Lipschitz 指数 $\alpha > 0$,则该信号的小波变换模极大值将随尺度增大而增大。若 $\alpha < 0$,则信号的小波变换模极大值将随尺度增大而减小。通常信号的 Lipschitz 指数大于 0,而噪声信号的 Lipschitz 指数小于 0,因此可以根据信号与噪声在不同尺度上模极大值的变化特征,选出由目标信号产生的模极大值点。通过这些模极大值点来重构信号,可以对信号实现有效降噪。

2.3 背散射信号特征提取方法

首先采用超声脉冲反射法对复合材料工件进行检测,得到脉冲反射检测信号 $x(t)$ 并使用改进 S 变换生成信号的整体时频图。根据复合材料参数计算该材料的各阶固有共振频率并和探头中心频率进行比较。由于材料共振频率和入射超声波频率越接近,共振幅值越大,因此可以得到固有共振频率的主阶数,从而得到近表面共振结构噪声频率。对信号整体时频图进行分析,将频率接近共振频率,幅值相比远端信号明显偏大的背散射信号确定为共振结构噪声信号。将整体频率恢复到正常探头中心频率后的信号确定为正常背散射信号。这样就将背散射信号分解成了近表面共振结构噪声信号 $x_1(t)$ 和远表面正常背散射信号 $x_2(t)$ 。

对近表面共振结构噪声信号 $x_1(t)$ 使用改进 S 变换生成时频系数矩阵 \mathbf{M}_1 。其中对于 \mathbf{M}_1 中的某一点 $M_1(x_n, f_n)$, x_n 为该点时间, f_n 为该点频率, $M_1(x_n, f_n)$ 为信号在该时间和频率点的幅值。当复合材料近表面出现孔隙缺陷时,含孔隙区的共振结构噪声信号将会减弱甚至消失,表现为信号幅值减小,频率降低。因此可以通过结构噪声主频变化趋势来确定近表面含孔隙区域。先计算 \mathbf{M}_1 各列向量最大值,得到信号每一时刻主频幅值序列 $[a_1, a_2, \dots, a_n]$ 。若有 $a_{m-1} > a_m$ 且 $a_m < a_{m+1}$ ($m-1 \geq 1, m+1 \leq n$),则 a_m 所在时刻点对应区域可能有孔隙存在。由于从材料表面到远离近表面过程中共振结构噪声在整体上呈减弱趋势,因此计算 a_m 两端极大值点 a_{m-k} 和 a_{m+l} ($m-k \geq 1, m+l \leq n$),得到 a_m 点的相对增益表示为

$$\alpha = 20\lg\left(\sum_{i=m-k}^{m+l} a_i / [(l+k)a_m]\right) \quad (11)$$

α 值越大,说明该位置孔隙缺陷越严重。设定 α 阈值下限,即可以实现对近表面孔隙缺陷的有效识别。

由于远表面共振结构噪声信号 $x_2(t)$ 中通常含有较多外界噪声,首先对 $x_2(t)$ 进行小波变换模极大值去噪得到 $x'_2(t)$ 。对 $x'_2(t)$ 使用改进 S 变换生成时频系数矩阵 M_2 。当复合材料远表面端出现孔隙缺陷时,会导致背散射信号幅值增大。因此计算 M_2 各列向量最大值,得到信号每一时刻主频幅值序列 $[a_1, a_2, \dots, a_p]$ 。若有 $a_q > a_{q-1}$ 且 $a_q > a_{q+1}$ ($q-1 \geq 1, q+1 \leq p$), 则 a_q 所在时刻点对应区域可能有孔隙存在。由于材料远表面背散射信号在整体上并没有减弱趋势, a_m 点的相对增益 β 为

$$\beta = 20\lg\left(pa_p / \sum_{i=1}^p a_i\right) \quad (12)$$

β 值越大,说明该位置孔隙缺陷越严重。设定 β 阈值下限,即可以实现对远表面孔隙缺陷的有效识别。

通过以上对超声背散射信号的处理,可以识别出厚截面复合材料中的孔隙缺陷。

3 厚截面复合材料局域孔隙识别实验

采用第 2 节中的超声背散射信号特征提取方法对厚截面复合材料中的孔隙进行识别。实验设备采用自主搭建的超声脉冲反射检测实验平台,其原理图如图 2a 所示,实验平台主要由超声波探头、超声采集卡、工控机和显示器组成。超声波探头选用 Olympus 水浸宽频带探头,中心频率为 7.5 MHz。超声采集卡为 Ultratek 公司的 PCIUT3100,设定采样频率为 100 MHz。图 2b 所示为该超声脉冲反射检测实验平台。

使用上述实验平台对 2 块厚截面复合材料进行检测。试块 1 为 64 层复合材料平板试块,每层厚度为 0.125 mm,如图 3a 所示。试块 2 为 80 层曲面复合材料试块,每层厚度也为 0.125 mm,如图 3b 所示。为了使背散射信号有足够的强度从而表现出丰富的信息,检测时将增益设为 40 dB。

图 4 所示为试块 1 某位置处的脉冲反射检测信号。根据试块参数由式(1)可计算得到该试块一阶共振频率为 12 MHz。从图中可以看到,近表面信号幅值比远表面信号幅值要大得多,这是由于信号在材料近表面区域共振引起的。使用 2.3 节中方法对试块 1 检测信号进行处理。

图 5a 为提取的近表面共振结构噪声,图 5b 为

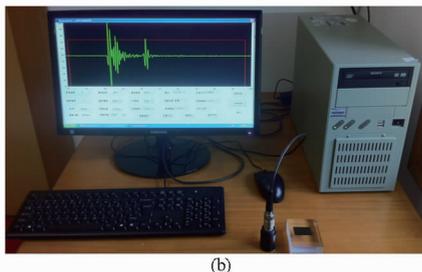
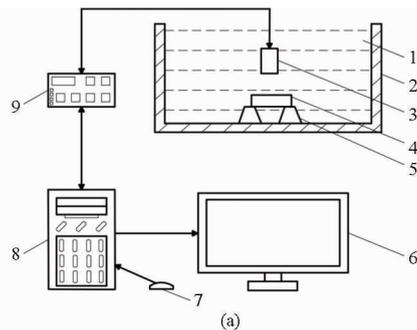


图 2 超声脉冲反射检测实验平台
Fig. 2 Ultrasonic pulse echo test platform
(a) 超声检测平台原理图 (b) 超声检测平台
1. 水 2. 水槽 3. 超声波探头 4. 试块 5. 支架 6. 显示器
7. 鼠标 8. 工控机 9. 超声采集卡

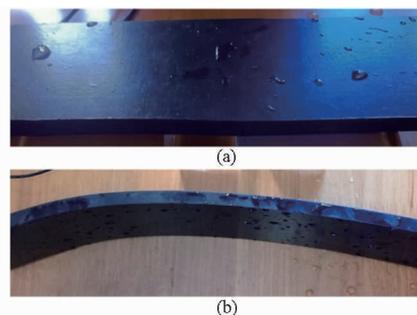


图 3 厚截面复合材料试块
Fig. 3 Thick section composite specimens
(a) 平板试块 1 (b) 曲面试块 2

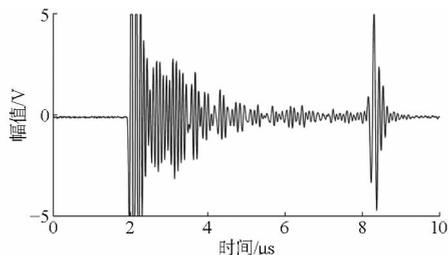


图 4 试块 1 超声检测信号
Fig. 4 Ultrasonic test signal of specimen 1

使用改进 S 变换生成的结构噪声时频图。从图 5b 中可以看到,结构噪声总体上呈减弱趋势,但其主频幅值在中间某几处出现了极小值,这些共振减弱的区域是材料近表面孔隙造成的。对这些主频幅值极小值进行定位并计算其相对增益值,设定增益下限阈值为 2 dB,得到图 5c 所示的孔隙缺陷位置及增益。其中孔隙在材料中的深度可通过孔隙时间定位

换算得到。这样就得到了该材料近表面孔隙缺陷位置及当量大小。

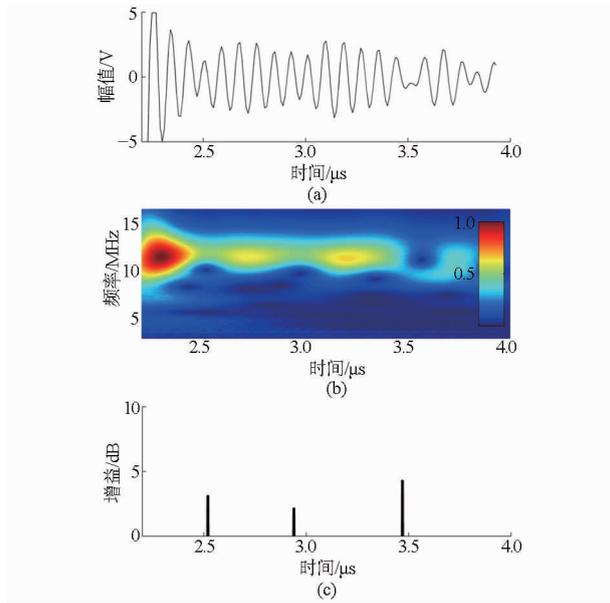


图5 试块1近表面信号处理

Fig. 5 Near surface signal processing of specimen 1

(a) 近表面信号 (b) 信号时频图 (c) 孔隙定位及增益

图6a为提取的远表面正常背散射信号,图6b为经小波变换模极大值去噪后的远表面信号。可以看到,图6a中的信号表现十分复杂,无法对远表面孔隙缺陷进行定位。经过小波模极大值去噪后,图6b中的信号特征表现则较为清晰,因此,小波模极大值去噪可以有效去除远表面信号中的外界干扰噪声。图6c为去噪后远表面信号的时频图,可以看到,远表面信号主频已经下降到了10 MHz以下。对图6c中的主频幅值极大值进行定位并计算其相对增益值,设定增益下限阈值为2 dB,可以得到图6d所示的远表面孔隙缺陷位置及增益。

图7所示为将近表面和远表面孔隙位置及增益信息组合后,得到的该检测信号覆盖区域的孔隙位置及增益信息。这样就对该检测区域孔隙的位置及当量大小作出了识别。

对孔隙识别结果进行显微观察验证,在试块表面标记出该信号检测的区域,采用破坏性试验后使用金相显微镜对该区域进行观察。图8a为近表面区域显微照片,图8b为远表面区域显微照片。从图中可以看到,试块近表面区域存在较密集的孔隙,远表面区域存在不少尺寸较大的孔隙。结果表明使用2.3节中的信号处理方法可以对厚截面复合材料平板中的孔隙作出正确识别。

对图8a和图8b中对应区域采集的金相照片分别进行统计分析,可以得到该材料近表面局部孔隙区域和远表面局部孔隙区域的孔隙率分别为3.8%

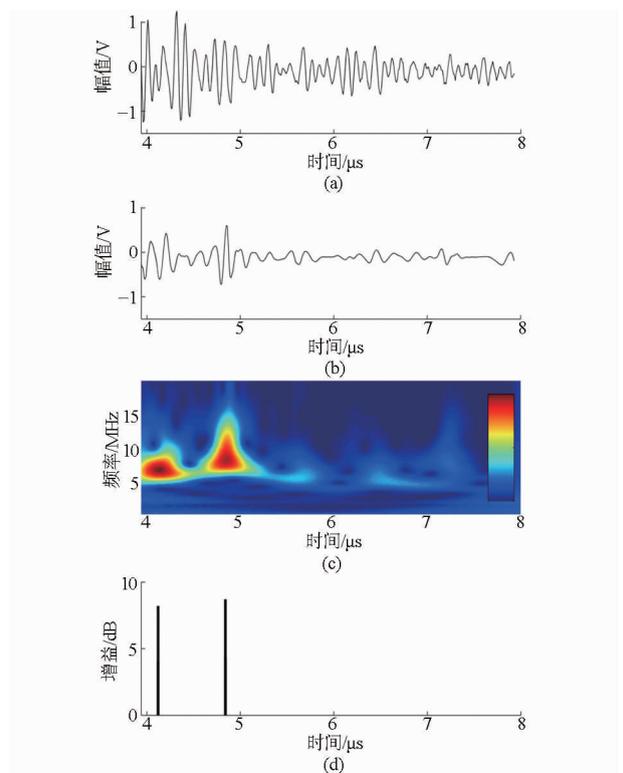


图6 试块1远表面信号处理

Fig. 6 Far surface signal processing of specimen 1

(a) 远表面信号 (b) 去噪后信号

(c) 信号时频图 (d) 孔隙定位及增益

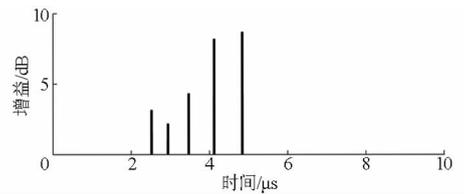


图7 试块1孔隙识别结果

Fig. 7 Void identification result of specimen 1

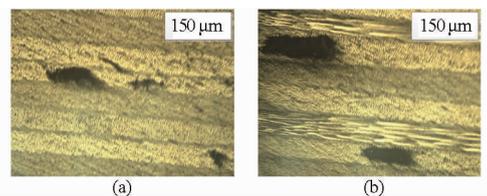


图8 试块1检测区域显微照片

Fig. 8 Micrographs of test region in specimen 1

(a) 近表面区域 (b) 远表面区域

和5.2%,结合图7中的孔隙识别结果,证明随着孔隙率增大,由孔隙造成的相对增益变大。这样在检测批量厚截面复合材料局域孔隙时,可以先对试样进行标定得到不同局域孔隙率下的信号相对增益,再利用金相验证法测定这些区域的孔隙率,获得局域孔隙率与相对增益关系曲线。从而可以根据检测孔隙率的标准,设定相对增益的下限阈值对该批材料进行检测。

图9所示为试块2某位置处的脉冲反射检测信

号。同样,根据试块参数由式(1)可计算得到该试块一阶共振频率为 12 MHz。使用 2.3 节中方法对试块 2 检测信号进行处理。

图 10a 所示为近表面共振结构噪声,图 10b 为该结构噪声时频图。

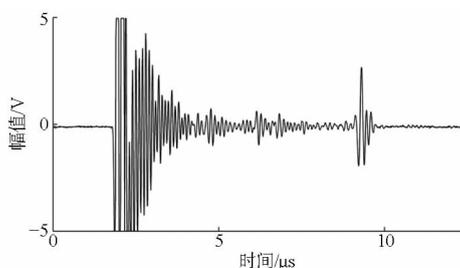


图 9 试块 2 超声检测信号

Fig. 9 Ultrasonic test signal of specimen 2

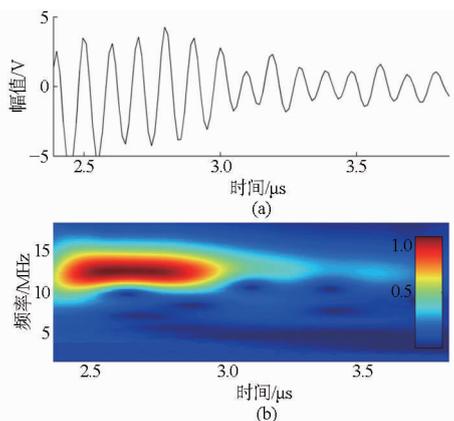


图 10 试块 2 近表面信号处理

Fig. 10 Near surface signal processing of specimen 2

(a) 近表面信号 (b) 信号时频图

从图 10b 中可以看到,结构噪声主频幅值总体上呈减小趋势。使用 2.3 节中近表面缺陷处理方法对主频幅值极小值进行计算,设定增益下限阈值为 2 dB,计算结果表明该结构噪声主频幅值并没有出现极小值(除端点外),说明该试块近表面并没有明显孔隙缺陷。

图 11a 为该信号中的远表面背散射信号,图 11b 为经小波变换模极大值去噪后的远表面信号。可以看到,相比图 11a 中的原始远表面信号,经过小波模极大值去噪后,图 11b 中的信号可以更好地表现出试块远表面孔隙信息。图 11c 为去噪后远表面信号的时频图,对图 11c 中信号的主频幅值极大值进行定位并计算其相对增益值,设定增益下限阈值为 2 dB,可以得到图 11d 所示的远表面孔隙缺陷位置及增益。

由于该试块检测区域近表面无孔隙缺陷,因此将远表面孔隙检测信息整合到整个信号所在时域上,如图 12 所示,即对该检测区域孔隙的位置及当量大小作出了识别。

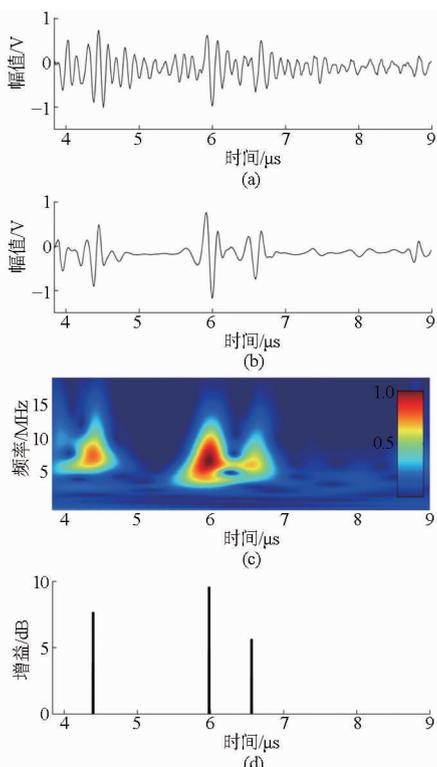


图 11 试块 2 远表面信号处理

Fig. 11 Far surface signal processing of specimen 2

(a) 远表面信号 (b) 去噪后信号
(c) 信号时频图 (d) 孔隙定位及增益

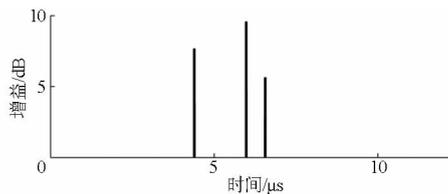


图 12 试块 2 孔隙识别结果

Fig. 12 Void identification result of specimen 2

同样,对该曲面复合材料试块的孔隙识别结果进行显微观察验证。图 13a 为近表面区域显微照片,图 13b 为远表面区域显微照片。从图中可以看到,试块近表面区域纤维组织情况良好,无较明显孔隙出现,试块远表面区域则存在较多孔隙,这与实验信号处理得出的结果一致,表明 2.3 节中的信号处理方法可以对厚截面曲面复合材料试件中的孔隙作出正确识别。

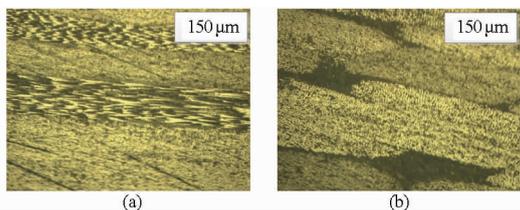


图 13 试块 2 检测区域显微照片

Fig. 13 Micrographs of test region in specimen 2

(a) 近表面区域 (b) 远表面区域

4 结论

(1) 采用超声脉冲反射法对厚截面复合材料进行局域孔隙识别研究,分析提取背散射信号。结果表明,当使用中心频率与材料共振频率相差不多的宽频带探头检测时,在材料检测近表面区域产生了共振结构噪声,在远表面区域则恢复为正常背散射信号。当近表面某区域存在孔隙时,会导致该区域共振结构噪声频率降低、幅值减小。当远表面某区域存在孔隙时,会导致该区域背散射信号中出现幅值较小的回波。

(2) 提出了基于超声背散射信号处理的厚截面复合材料局域孔隙识别方法。将背散射信号分为近表面共振结构噪声和远表面正常信号。对于近表面信号,使用改进 S 变换生成时频系数矩阵,通过计算信号主频极小值及增益来识别近表面孔隙。对于远表面信号,先对其作小波变换模极大值去噪,再使用改进 S 变换生成时频系数矩阵,通过计算信号主频极大值及增益来识别远表面孔隙。分别对厚截面复合材料平板和曲面试块进行孔隙识别实验,结果表明使用该超声背散射信号处理方法可以有效识别厚截面复合材料局域孔隙缺陷。

参 考 文 献

- Judd N C W, Wright W W. Voids and their effects on the mechanical properties of composites—an appraisal [J]. *Sample Journal*, 1978(1-2): 10-14.
- Hagstrand P O, Bonjour F, Manson J A E. The influence of void content on the structural flexural performance of unidirectional glass fiber reinforced polypropylene composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36(5):705-714.
- 张杨,周晓军,杨辰龙,等. 基于声束追踪的变厚度曲面工件超声探头位姿规划[J]. *农业机械学报*,2012,43(9):230-234.
Zhang Yang, Zhou Xiaojun, Yang Chenlong, et al. Ultrasonic probe position and orientation planning for curved components with variable thickness based on ultrasonic beam analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(9): 230-234. (in Chinese)
- Jeong H, Hsu D K. Experimental analysis of porosity induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites [J]. *Ultrasonics*, 1995, 33(3): 195-203.
- Rokhlin S I, Lewis D K, Graff K F, et al. Real time study of frequency dependence of attenuation and velocity of ultrasonic waves during the cure reaction of epoxy resin [J]. *Journal of the Acoustic Society of America*, 1986, 79(6): 1786-1793.
- Karabutov A A, Podymova N B. Nondestructive porosity assessment of CFRP composites with spectral analysis of backscattered laser-induced ultrasonic pulses[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2013, 32(3): 315-324.
- 李钊,周晓军,杨辰龙,等. 变厚度碳纤维复合材料孔隙率超声衰减模型[J]. *农业机械学报*,2014,45(7):325-332.
Li Zhao, Zhou Xiaojun, Yang Chenlong, et al. Ultrasonic attenuation model for porosity test of CFRP with variable thickness [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 325-332. (in Chinese)
- Jeong H. Effects of voids on the mechanical strength and ultrasonic attenuation of laminated composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 1997, 31(3): 276-292.
- Jones B R, Stone D E W. Towards an ultrasonic attenuation technique to measure void content in carbon-fiber composites [J]. *Non-Destructive Testing*, 1976, 9:71-79.
- Hale J M, Ashton J N. Ultrasonic attenuation in voided fiber reinforced plastics [J]. *NDT International*, 1988, 21(5): 321-326.
- 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.
- Dominguez N, Mascarot B. Ultrasonic non-destructive inspection of localized porosity in composite materials[C]//9th European Conference on Non-Destructive Testing, 2006; Tu. 2. 1. 4.
- Cong Sen, Gang Tie. Ultrasonic thickness measurement for aluminum alloy irregular surface parts based on spectral analysis [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(Supp. 2): 323-328.
- Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum; the S transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(4): 998-1001.
- Assous S, Boashash B. Evaluation of the modified S-transform for time-frequency synchrony analysis and source localization [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2012, 1: 1-18.
- Benammar A, Draï R, Guessoum A. Ultrasonic flaw detection using threshold modified S-transform [J]. *Ultrasonics*, 2014, 45(2): 676-683.
- 曲巍巍,高峰,杜发荣,等. 叶片类截面数据特征点精确识别方法[J]. *农业机械学报*,2010,41(1):195-199.
Qu Weiwei, Gao Feng, Du Farong, et al. Accurate recognition method for cross-section data feature points of blades [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(1): 195-199. (in Chinese)
- 秦毅,王家序,毛永芳. 基于软阈值和小波模极大值重构的信号降噪[J]. *振动、测试与诊断*,2011,31(5):543-547.
- 李月琴,栗辛,闫晓鹏,等. 小波变换模极大去噪法在无线电信号处理中的应用[J]. *兵工学报*,2008,29(10):1172-1176.
Li Yueqin, Li ping, Yan Xiaopeng, et al. Wavelet transform modulus maximum denoising method for radio fuze signal processing [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(10): 1172-1176. (in Chinese)
- Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, 38(2): 617-643.