

基于条纹抑制技术的脉冲太赫兹无损检测层析成像

钟一帆^{1,2*}, 任姣姣^{1,2**}, 李丽娟^{1,2}, 张丹丹^{1,2}, 张霁阳^{1,2}

¹ 长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学光电工程学院光电工程国家级实验教学示范中心, 吉林 长春 130022

摘要 玻璃纤维增强复合材料广泛应用于航空航天、建筑行业 and 运输行业等领域,但由于制作和使用该材料的过程中常出现脱粘、分层等缺陷,很有必要对其进行无损检测。采用太赫兹层析技术与缺陷特征波形成像相结合的方法,对不同深度、不同面积的玻璃纤维增强复合材料脱粘缺陷进行了研究。针对层析成像中出现的条纹干扰,提出了一种基于相位的太赫兹层析图像条纹抑制方法,该方法消除了层析成像中出现的条纹干扰,进一步提高了成像质量,实现了对距试件上表面 5 mm、直径为 5 mm、厚度为 0.05 mm 的脱粘缺陷的识别。该研究为对反射式太赫兹层析成像结果的处理提供了新的方法。

关键词 光谱学; 太赫兹时域光谱; 层析成像; 无损检测

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1014001

Pulsed Terahertz Nondestructive Detection Tomography Based on Fringe Suppression Technology

Zhong Yifan^{1,2*}, Ren Jiaojiao^{1,2**}, Li Lijuan^{1,2}, Zhang Dandan^{1,2}, Zhang Jiyang^{1,2}

¹ Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² National Demonstration Center for Experimental Opto-Electronic Engineering Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Glass fiber reinforced composite materials are widely used in aerospace, construction, and transportation industries. However, due to the defects such as debonding and delamination during the production and using processes of composite materials, non-destructive detection is necessary to carry out. In this paper, the method combining terahertz tomography and defect characteristic waveform imaging is used to study the debonding defects of glass fiber reinforced composite materials with different depths and different areas. Aiming at the fringe interference in tomography, a phase-based fringe suppression method for terahertz tomographic images is proposed, which eliminates the fringe interference in tomography, and further improves the imaging quality. The identification of debonding defects with a distance from surface of 5 mm, a diameter of 5 mm, and a thickness of 0.05 mm is realized. This study provides a new method for processing the results obtained by reflection type terahertz tomography.

Key words spectroscopy; terahertz time domain spectroscopy; tomography; nondestructive detection

OCIS codes 300.6495; 110.6955; 110.6795; 120.4290

1 引言

玻璃纤维增强复合材料(FRP,以下简称玻璃钢)作为一种新兴的工业材料,具有质量轻、强度高、耐热性好、耐腐蚀、可设计性好、成本低等优点,广泛

应用于建筑行业、运输行业、航天航空等领域^[1]。目前世界上常见的玻璃钢生产方法主要有手糊法、喷射法、模压法和树脂传递模塑法。我国的玻璃钢产品主要是靠手糊法生产的,所以在玻璃钢材料的制作过程中,可能会产生分层、气泡、脱粘和褶皱等缺

收稿日期: 2020-04-03; 修回日期: 2020-05-01; 录用日期: 2020-06-04

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20170521003HJ)、长春理工大学青年创新基金(XJLJG-2018-03)

* E-mail: 1493461328@qq.com; ** E-mail: zimengrenjiao@163.com

陷,这些缺陷将直接影响结构件的工作性能,影响整体结构的安全性,因此必须对其进行无损检测^[2]。

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波,其对大部分干燥、非金属、非极性材料,如泡沫、陶瓷、树脂、橡胶等有良好的穿透能力^[3]。该特性使得太赫兹技术在复合材料的无损检测中得到广泛应用。目前太赫兹无损检测主要分为连续太赫兹无损检测技术与太赫兹时域光谱(THz-TDS)无损检测技术,其中 THz-TDS 技术是基于飞秒激光脉冲技术发展的一种光谱测量新技术,发射的太赫兹脉冲在经过样件后,可利用接收的太赫兹脉冲振幅的变化及飞行时间等参数获得样件的信息^[4-7]。在对玻璃钢材料的检测方面,Mieloszyk 等^[8]通过太赫兹光谱技术对嵌入在玻璃纤维增强塑料中的光纤光栅传感器进行了定位;Han 和 Kang^[9]利用太赫兹时域系统对玻璃纤维增强聚合物复合板的多层分层及其厚度进行了可视化研究,检测出纵向精度为 0.15 mm 的分层缺陷;张瑾等^[10]将小波融合的方法应用到太赫兹无损检测中,检测到玻璃纤维增强塑料内部深度为 1.5 mm、缺陷厚度为 0.2 mm 的脱粘缺陷。目前的太赫兹无损检测技术对于玻璃钢材料脱粘、分层的太赫兹无损检测的纵向精度一般为 0.1 mm,太赫兹时域反射式层析成像中会掺杂噪声、条纹等干扰,影响对微小缺陷的识别。

本文采用反射式太赫兹时域光谱层析成像技术对玻璃钢材料脱粘的问题进行了研究,首先设计并制作了不同深度、不同面积的脱粘缺陷实验样品,其次利用太赫兹时域光谱系统对其进行了检测,采用太赫兹层析与缺陷特征波形成像相结合的方法,对脱粘缺陷进行识别。针对层析成像结果中出现的条纹干扰,分析了其产生原因,并提出了基于相位的太赫兹层析图像条纹抑制方法,从而消除了条纹,提高了成像质量,准确识别了不同深度的脱粘缺陷。

2 实验装置与样本

2.1 检测系统

本文所用的检测系统为自行搭建的太赫兹时域光谱系统,其工作原理如图 1 所示。飞秒激光器发出的激光脉冲经过分束镜后分为两束,其中:能量较强的一束光作为泵浦脉冲,经过斩波器的斩波后照射到碲化钢晶体表面以激发 THz 脉冲;另一束能量较弱的光作为探测光,从分光镜出射后到达时间延迟控制单元,经光电导取样测量获取 THz 脉冲电场

强度随时间变化的太赫兹光谱信息。该系统的频谱宽度为 0.2~2.5 THz,输出功率为 20 mW,信噪比大于 70 dB。

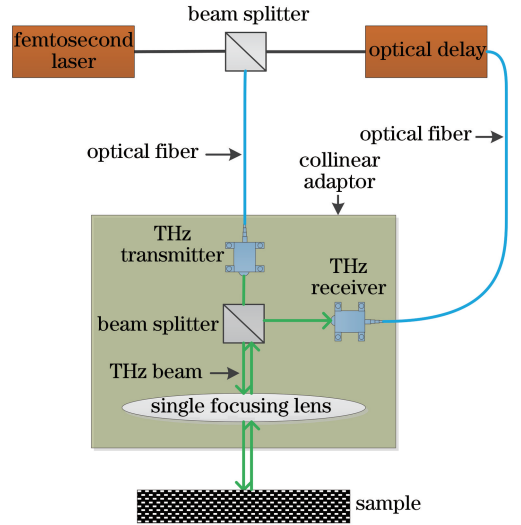


图 1 太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)原理示意图
Fig. 1 Principle diagram of THz-TDS

2.2 样本制备

玻璃钢是一种由多层玻璃布粘接压制而成的复合材料^[11-13],如图 2 所示。本文将聚四氟乙烯(PTFE)薄膜材料预埋到玻璃钢材料中以模拟脱粘缺陷。设计了三组距玻璃钢上表面蒙皮不同深度、不同面积的圆形聚四氟乙烯薄膜 A1、A2、A3 以及梯形空气楔槽来模拟脱粘缺陷。

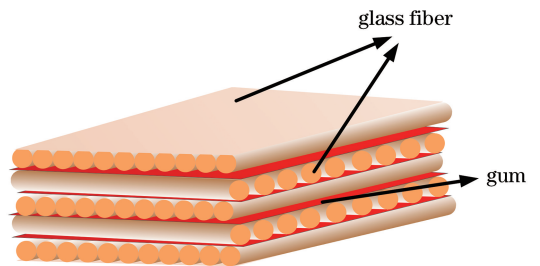


图 2 FRP 内部结构图
Fig. 2 FRP internal structure

本文通过逐点扫描样本来获取数据,扫描步距为 1 mm,THz 时域光谱系统的时间分辨率为 0.1 ps,故设计以下缺陷。缺陷信息如表 1 所示,其中缺陷深度为缺陷距上表面的距离。

实验样品的几何尺寸为 155 mm×140 mm×6 mm,设计的聚四氟乙烯薄膜及梯形空气楔槽在样品中的分布如图 3 所示,缺陷深度及厚度确定,每一组聚四氟乙烯薄膜的直径分别为 5,10,15 mm。梯形空气楔槽的几何尺寸为:宽度为 13 mm,底边长为 13 mm,顶边长为 7 mm。

表 1 缺陷信息表

Table 1 Table of defect information

| Defect type | Defect depth /mm | Defect thickness /mm |
|---------------|------------------|----------------------|
| PTFE-film | A1: 0.5 | 0.05 |
| | A2: 3.0 | 0.05 |
| | A3: 5.0 | 0.05 |
| Wedged-groove | 1.0 | 0.3 |
| | 2.0 | |
| | 3.0 | |

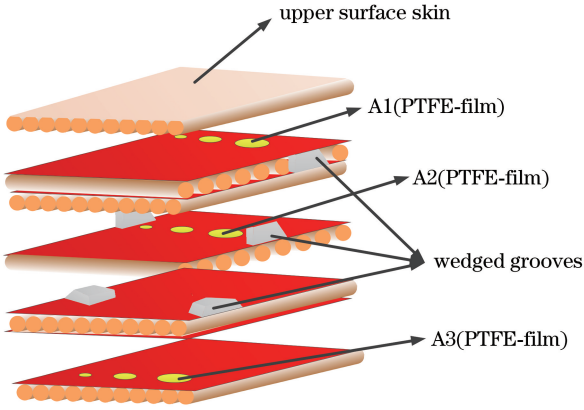


图 3 缺陷设计图

Fig. 3 Defect design

3 原理及方法

3.1 多层介质传播理论

玻璃钢材料属于多层粘接压制材料,本文以单个周期单元即玻璃钢材料层-胶层-玻璃钢材料层三层结构为例,对太赫兹波在其内部的传播过程进行了分析,如图 4 所示, $E(\omega)$ 为光电导天线产生的太赫兹脉冲电场强度,三层介质的厚度分别为 l_1, l_2 和 l_3 ,三层介质的复折射率分别为 \tilde{n}_1, \tilde{n}_2 和 \tilde{n}_3 。第一层材料上表面返回的太赫兹脉冲信号为 $E_{01}(\omega)$,第一层材料下表面返回的太赫兹脉冲信号为 $E_{12}(\omega)$,第二层材料下表面返回的太赫兹脉冲信号为 $E_{23}(\omega)$,第三层材料下表面返回的太赫兹脉冲信号为 $E_{34}(\omega)$ 。接收器接收到的太赫兹波时域信号 $E(t)$ 为 $E_{01}(\omega), E_{12}(\omega), E_{23}(\omega), E_{34}(\omega)$ 之和的傅里叶逆变换,即

$$E(t) = \mathcal{F}^{-1}[E_{01}(\omega) + E_{12}(\omega) + E_{23}(\omega) + E_{34}(\omega)], \quad (1)$$

式中: \mathcal{F}^{-1} 为傅里叶逆变换。

3.2 反射式脉冲太赫兹层析成像法

反射式脉冲太赫兹层析成像技术是基于飞行时间的三维成像技术^[14-16],通过逐点扫描样品获得的 THz 时域光谱数据是三维数据。如图 5 所示,空间

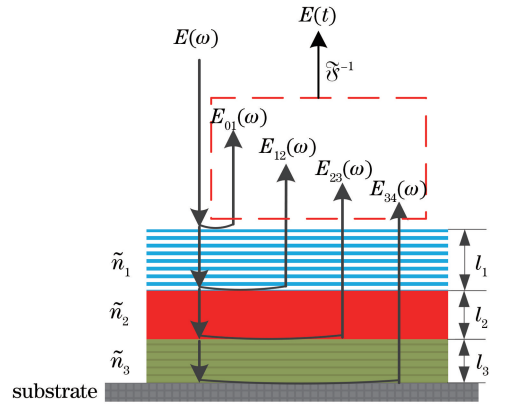


图 4 典型 3 层结构的太赫兹波光程

Fig. 4 Optical path of terahertz waves in typical three-layer structure

三个维度分别为图像的长度 M 、图像的宽度 N 和飞行时间 T 。在空间上取出一个像素点,以飞行时间为横轴、时域波形的幅值为纵轴,得到了该样品单点像素对应的太赫兹时域波形^[17]。若采用二维空间的某一维度与时间维度进行成像,即对于样品长度 M 与时间维度切面 $S(m, t)$ 进行成像,则所得图像称为行 B-Scan 图,对于样品宽度 N 与时间维度切面 $S(n, t)$ 进行成像,则所得图像称为列 B-Scan 图。取某一时间点处该样品的所有像素并按照其空间位置作图,即可以得到该样件一个切面 $S(m, n)$ 的成像图,该成像图就是反射式脉冲太赫兹层析成像的结果。

上述图像中某一点像素的灰度值为该时间点对应的 THz 信号的幅值, $S(m, t), S(n, t)$ 和 $S(m, n)$ 分别为

$$\begin{cases} S(m, t) = \text{Amplitude}[E(t)], t \in [t_1, t_2] \\ S(n, t) = \text{Amplitude}[E(t)], t \in [t_1, t_2] \\ S(m, n) = \text{Amplitude}[E(t_s)], t_s \in [t_1, t_2] \end{cases}, \quad (2)$$

式中: t_1, t_2 分别为测试样品的上表面与下表面太赫兹反射回波到达探测器对应的时间; t_s 为所取的层析切面对应的飞行时间;Amplitude 为求取幅度的函数。

若测量样品的深度为 d_s ,折射率为 n ,光的传播速度为 c ,则样品深度与飞行时间 t_s 的关系为

$$d_s = \frac{c \cdot (t_s - t_1)}{2n}. \quad (3)$$

由(3)式可得,当选取飞行时间为 t_s 时,层析成像得到的相应的切面反映的是对应样品深度为 d_s 的信息,从而可以获取样品内部信息。

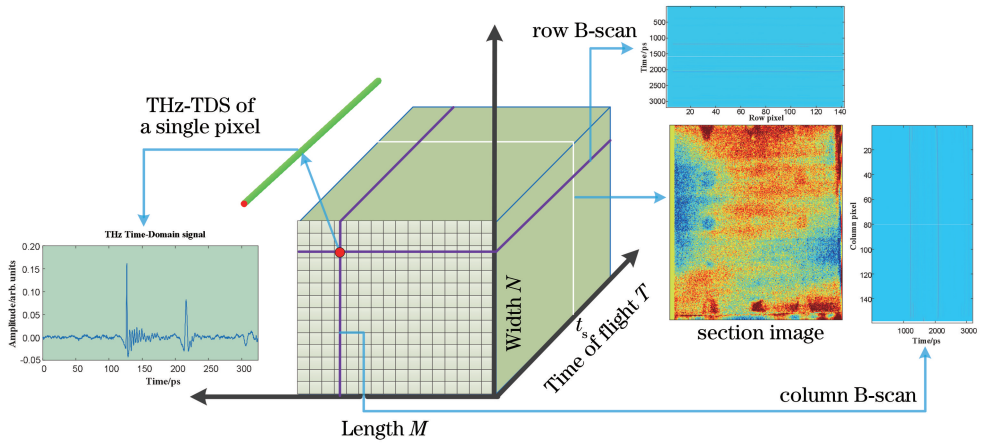


图 5 三维光谱数据立方图

Fig. 5 3D spectral data cube

3.3 基于相位的太赫兹层析图像条纹抑制方法

实际检测过程中无法保证实时检测的 THz 测头与被测试件之间的距离相等,且材料自身的不均匀等情况使得样件在局部等效为一个小角度的楔形平板样件。如图 6 所示,角度的影响使得 THz 源距离试件上表面的光程发生变化,在试件不同厚度处的电场强度可表示为 $E_j(\omega)$,令 h_j 为电场强度为 $E_j(\omega)$ 处对应的试件厚度, \tilde{n}_2 为玻璃钢材料的折射率,入射光与反射光的相位差为 $\Delta\varphi_j$ 。相位差导致在同一时间点所有同一深度位置的太赫兹时域波形产生相位延迟,使得最后的层析成像结果中同一深度处的各点灰度值差值较大,产生了一些随时间扩散的条纹,从而影响在样件中某一深度的缺陷识别。

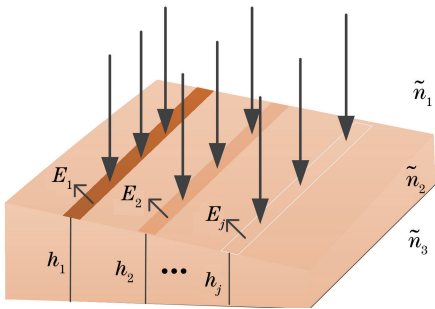


图 6 样件局部等效示意图

Fig. 6 Local equivalent diagram of prototype

某一位置处的电场强度 $E_j(\omega)$ 的计算公式为

$$E_j(\omega) = 2E(\omega) \cdot \sqrt{1 + \cos(\Delta\varphi_j)}, \quad (4)$$

其中

$$\Delta\varphi_j = \omega \cdot \frac{2\tilde{n}_2 h_j + \lambda/2}{c}, \quad (5)$$

式中: ω 为角频率。

为了消除这一影响,需要对由厚度不均匀而引

起的相位差 $\Delta\varphi_{ij}$ 进行补偿。 $\Delta\varphi_{ij}$ 为厚度为 h_i 处入射光与反射光的相位差 $\Delta\varphi_i$ 与厚度为 h_j 处入射光与反射光的相位差 $\Delta\varphi_j$ 的差值,可表示为

$$\Delta\varphi_{ij} = \Delta\varphi_i - \Delta\varphi_j = \omega \cdot \frac{(h_i - h_j) \cdot \tilde{n}_2}{c}. \quad (6)$$

所测得的太赫兹频域信号包括幅值和相位信息,通过在频域中添加一个相位因子,可以将偏离的波形相位进行修正。对(4)式中的电场强度 $E_j(\omega)$ 进行相位补偿:

$$E_j(t) = \mathcal{F}^{-1}[E_j(\omega) \cdot \exp(-i\omega\Delta t)], \quad (7)$$

其中

$$\Delta t = \frac{(h_j - h_{\text{avg}}) \cdot \tilde{n}_2}{c} = t_{p_j} - t_{\text{avg}}, \quad (8)$$

式中: $E_j(t)$ 为经过相位修正的时域信号; h_{avg} 为试件的平均厚度; t_{p_j} 为单个像素的太赫兹时域信号中波峰的飞行时间; t_{avg} 为样品所有像素的太赫兹时域信号中波峰的飞行时间均值。

如图 7 所示,峰值在 t_{p1} 与 t_{p2} 具有相位延迟的太赫兹时域波形,在经过相位修正后其峰值位置被抑制到了 t_{avg} 处。

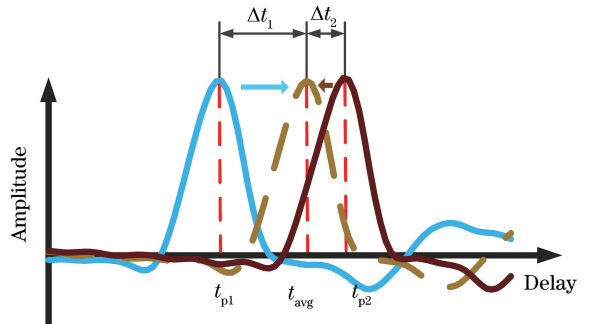


图 7 相位延迟抑制图

Fig. 7 Phase delay suppression graph

4 分析与讨论

首先对玻璃钢脱粘模拟样品的 THz 时域信号进行功率谱成像,如图 8 所示,图中有 6 个空气梯形楔槽,空气梯形楔槽较正常区域厚度较薄,对太赫兹信号的吸收较少,得以清晰呈现。除此之外,仅有靠近上表面的聚四氟乙烯模拟脱粘处由于回波信号较强,成像效果比较明显。然后对图 8 中 1 号、2 号、3 号十字所在的行和列分别进行 B-Scan 断层扫描成

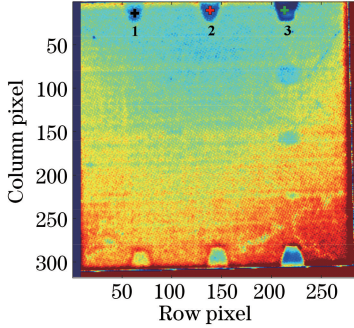


图 8 玻璃钢脱粘模拟样品 THz 时域信号功率谱
Fig. 8 THz time-domain signal power spectrum of FRP debonding simulation sample

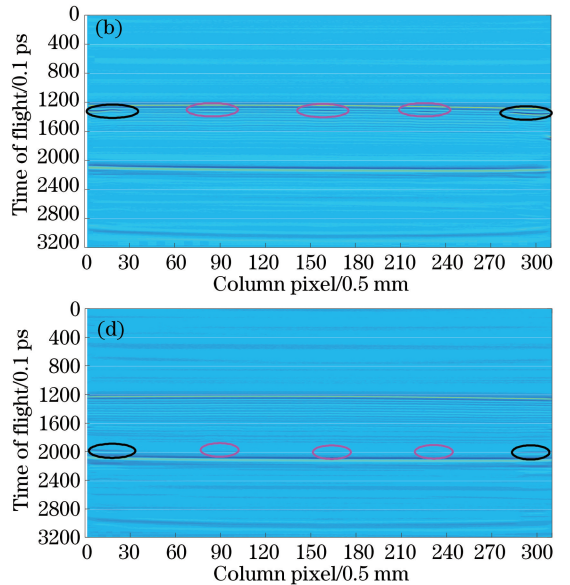
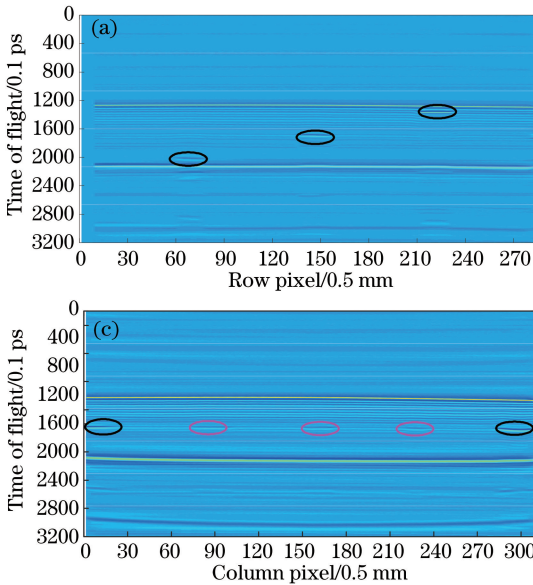


图 9 梯形楔槽位置处的长、宽 B-Scan 图。(a) 3 号行 B-Scan 图;(b) 3 号列 B-Scan 图;
(c) 2 号列 B-Scan 图;(d) 1 号列 B-Scan 图

Fig. 9 Long and wide B-Scan images of trapezoidal wedge groove positions. (a) 3# row B-Scan image;
(b) 3# column B-Scan image; (c) 2# column B-Scan image; (d) 1# column B-Scan image

由图 8 和图 9 可大致判定缺陷的位置,但除了可以看到梯形楔槽与最上层脱粘的缺陷形状外,其他几处脱粘形状完全未知。本文采用反射式 THz 层析成

像,获得如图 9 所示的成像结果。

图 9(a)所示为 3 号十字标出的梯形楔槽所在行形成的行 B-Scan 图,其中横轴为所在行位置,纵轴为 THz 脉冲所对应的飞行时间,由于本文所采用的 THz 时域光谱系统时间间隔 Δt 为 0.1 ps,时间窗口为 320 ps,故单个 THz 脉冲的序列长度为 3200,纵坐标的单位为 0.1 ps。从图 9 中明显可见三处梯形楔槽具有不同的深度。图 9(b)为 3 号十字标出的梯形楔槽所在列所成的列 B-Scan 图,除了边缘位置两处梯形楔槽外,所模拟的最上层聚四氟乙烯膜的脱粘缺陷同样清晰可见。图 9(c)为 2 号十字标出的梯形楔槽所在列形成的列 B-Scan 图,可以看到 5 处缺陷,与图 9(a)中最上层聚四氟乙烯膜的脱粘缺陷相比,其分辨率明显降低。图 9(d)为 1 号十字标出的梯形楔槽所在列形成的列 B-Scan 图,其中所模拟的聚四氟乙烯膜的脱粘缺陷的分辨率最低,甚至不可分辨。除此之外,由于玻璃钢材料属于多层粘接压制材料,在材料上表面与下表面对应的飞行时间位置之间明显可见由多层介质产生的多次回波,这对 THz 信号的信噪比有一定的影响。

像技术,对任意一处时间点进行切片成像,图 10 列出了飞行时间为 132.5,166.3,200.7 ps 处的层析图像,据此可对其余几处脱粘缺陷形状进行判定。

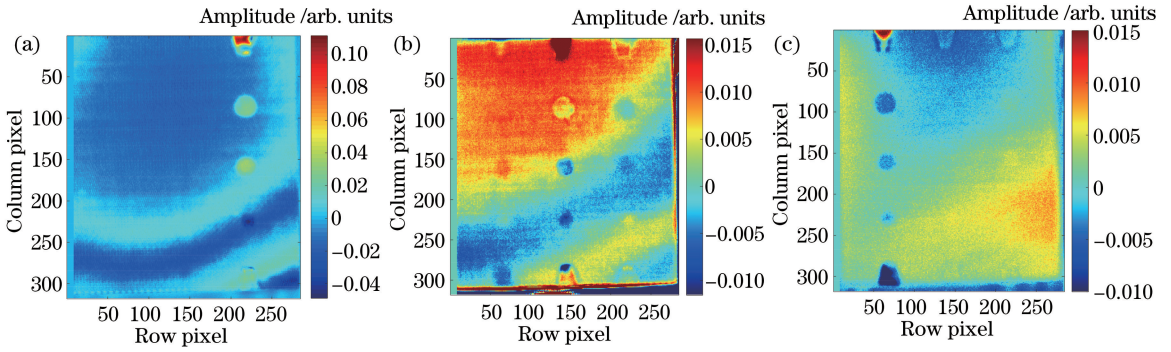


图 10 不同飞行时间下的 FRP THz 反射层析成像。(a)飞行时间为 132.5 ps;
(b)飞行时间为 166.3 ps;(c)飞行时间为 200.7 ps

Fig. 10 Images obtained by THz reflection tomography for FRP at different flight time. (a) Flight time is 132.5 ps;
(b) flight time is 166.3 ps; (c) flight time is 200.7 ps

为了得到分辨率更高的缺陷成像图,结合图 8~10 大致判定的缺陷位置,在缺陷相应位置处提取 THz 波形,再对缺陷进行进一步清晰的成像,图 11 显示了无缺陷处的 THz 波形及距玻璃钢上表面蒙皮 0.5,3,5 mm 深度处预埋缺陷的 THz 波形,其中圈出的部分分别为梯形空气楔槽与聚四氟乙烯膜的脱粘缺陷的特征,从图中可看出在同一深度的缺陷波形中,梯形空气楔槽的回波幅值高于聚四氟乙烯薄膜的回波幅值。对于不同深度的缺陷回波来说,深度越深回波的幅值越小,其信噪比越低,这是

由材料吸收导致的。对于信噪比较高的缺陷特征,可根据其时域或者频域特征进行成像,但是对于信噪比较低的特征,如图 11(c)中下层 PTFE 薄膜缺陷区域所示,则采用飞行时间差进行成像。

通过分析各种缺陷特征后,对玻璃钢材料不同缺陷位置处进行相应的成像,图 12(a)、(b)分别为玻璃钢材料上层缺陷与中层缺陷的最大值成像结果,图 12(c)为对下层缺陷的飞行时间差成像结果。图 12 较图 10 而言,图像质量明显提高,但是成像中仍有扩散的条纹,从而影响缺陷的识别。

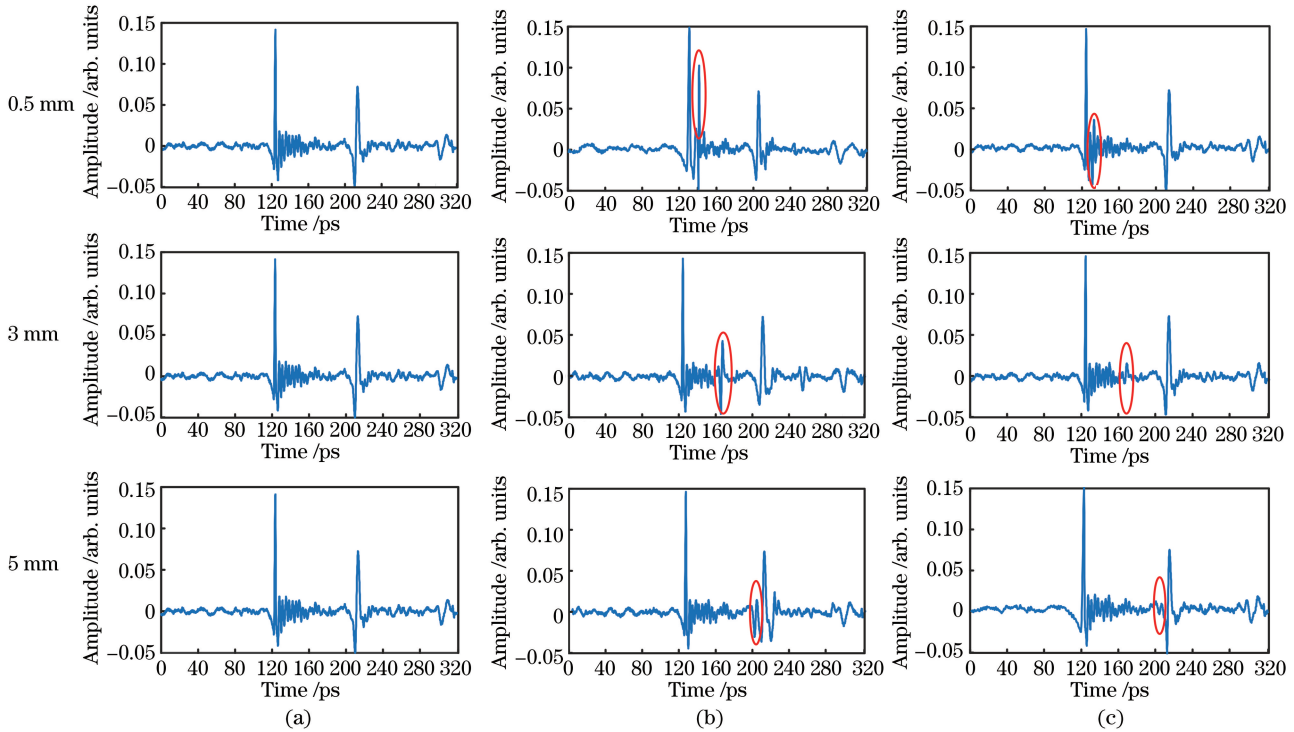


图 11 三组不同深度正常及缺陷位置处的 THz 波形。(a)正常区域;(b)楔槽缺陷区域;(c) PTFE 薄膜缺陷区域

Fig. 11 THz waveforms at three different depths at normal and defect regions. (a) Normal region;
(b) wedged-groove defect region; (c) PTFE-film defect region

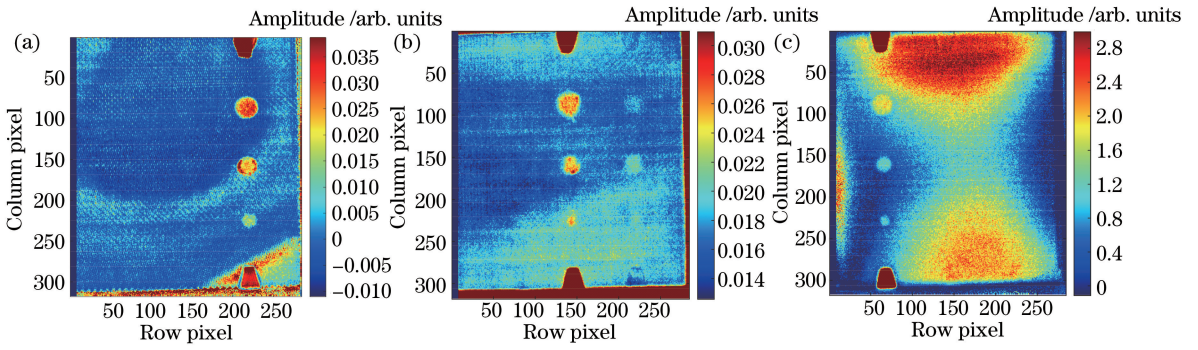


图 12 图像增强后的不同深度处 FRP 缺陷图。(a)上层;(b)中层;(c)下层

Fig. 12 FRP defect maps at different depths after image enhancement. (a) Upper layer; (b) middle layer; (c) lower layer

上述图像中出现的条纹会降低针对缺陷的成像分辨率。本文使用了基于相位的太赫兹层析图像条纹抑制方法。图 13(a)为上层缺陷处经条纹抑制后的太赫兹时域波形,图 13(b)为中层缺陷处经条纹

抑制后的太赫兹时域波形,图 13(c)为下层缺陷处经条纹抑制后的太赫兹时域波形。图中虚线框中幅值较大的波形为梯形空气楔槽缺陷处的回波,幅值较小的波形为聚四氟乙烯薄膜缺陷处的回波。分别

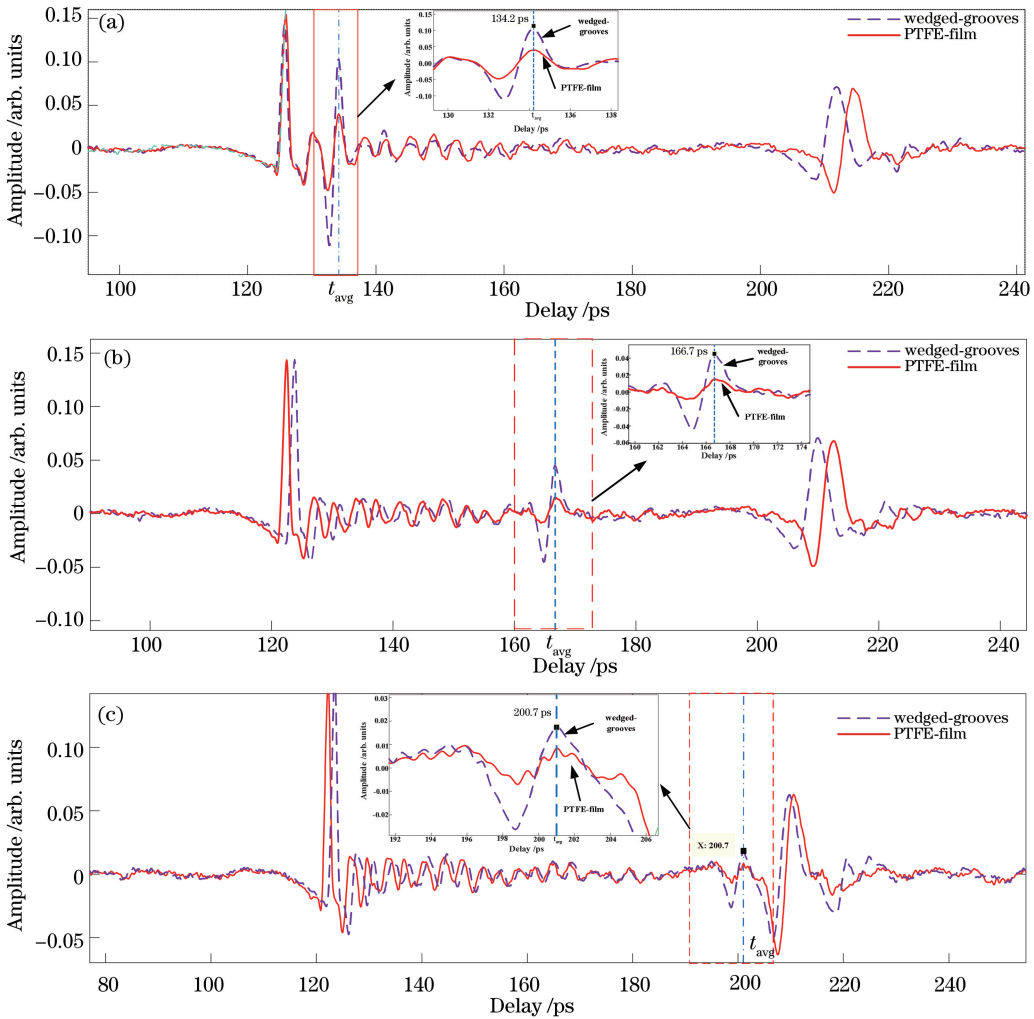


图 13 条纹抑制后的 THz 时域波形。(a)条纹抑制后上层缺陷处波形;
(b)条纹抑制后中层缺陷处波形;(c)条纹抑制后下层缺陷处波形

Fig. 13 THz time-domain waveforms after fringe suppression. (a) Waveform of upper defect after fringe suppression;
(b) waveform of middle defect after fringe suppression;(c) waveform of lower defect after fringe suppression

将上层、中层、下层缺陷处的太赫兹时域波形的峰值对应的飞行时间控制在其均值 t_{avg} 处。

在条纹抑制后进行层析成像,当飞行时间到达图中虚线对应的时间处,即 t_{avg} 分别为 134.2,

166.7,200.7 ps 时得到对应的缺陷成像。图 14 中图像质量较图 12 得到显著提高,并消除了条纹的影响。该处理结果验证了基于相位的太赫兹层析图像条纹抑制方法的可行性。

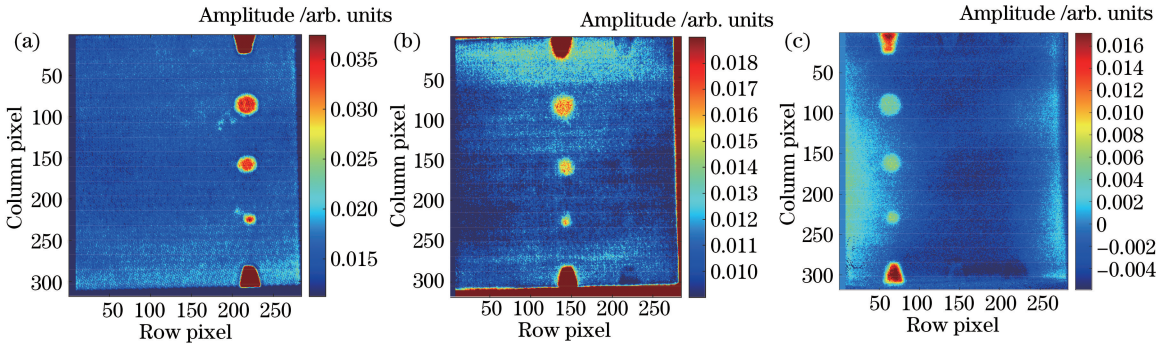


图 14 条纹抑制后的不同深度处 FRP 缺陷图。(a)飞行时间为 134.2 ps;(b)飞行时间为 166.7 ps;(c)飞行时间为 200.7 ps
 Fig. 14 FRP defect maps at different depths after fringe suppression. (a) flight time is 134.2 ps;
 (b) flight time is 166.7 ps; (c) flight time is 200.7 ps

5 结 论

采用基于反射式太赫兹层析成像技术的无损检测方法,对含有聚四氟乙烯薄膜及空气楔槽缺陷的玻璃钢材料进行了检测及分析,初步识别了不同深度、不同面积的薄膜缺陷,提取缺陷处的太赫兹时域光谱特征波形并进行了进一步的成像,提高了成像的质量。在此过程中分析了层析成像中出现条纹干扰的原因,并提出了一种基于相位的太赫兹层析图像条纹抑制方法,该方法有效地抑制了条纹干扰,使得缺陷识别的效果提升。该方法解决了实际测量中由客观因素造成的太赫兹时域波形相位延迟的问题,具有实际意义。下一步的研究工作中,可以制作一些厚度非均匀的样块,并埋入缺陷,以进一步验证基于相位的太赫兹层析图像条纹抑制方法,并在提升缺陷识别效果的基础上提高对缺陷定量检测的精度。

参 考 文 献

[1] Wang J, Zhang J, Chang T Y, et al. A comparative study of non-destructive evaluation of glass fiber reinforced polymer composites using terahertz, X-ray, and ultrasound imaging [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(6): 963-972.
 [2] Xie X. Effect of workers' skill level on the quality of glass fiber/resin composites by hand lay-up method [D]. Shanghai: Donghua University, 2019: 19-23.
 谢茜. 工人技能对手糊成型玻璃纤维/树脂复合材料品质的影响[D]. 上海: 东华大学, 2019: 19-23.

[3] Ren J J, Li L J, Zhang D D. Multi-feature parameter neural network analysis technique based on terahertz nondestructive testing [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 0412002.
 任姣姣, 李丽娟, 张丹丹, 等. 太赫兹无损检测的多特征参数神经网络分析技术[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 0412002.
 [4] Zhang J. Nondestructive evaluation of fiber-reinforced polymer composites using terahertz technology [D]. Changchun: Jilin University, 2016: 13-18.
 张瑾. 纤维增强复合材料的太赫兹无损检测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 13-18.
 [5] Zhang D D, Ren J J, Li L J, et al. Terahertz nondestructive testing technology for glass fiber honeycomb composites [J]. Journal of Photonics, 2019, 48(2): 0212002.
 张丹丹, 任姣姣, 李丽娟, 等. 玻璃纤维蜂窝复合材料的太赫兹无损检测技术[J]. 光子学报, 2019, 48(2): 0212002.
 [6] Yang Z G, Liu J S, Wang K J. Experimental research on nondestructive inspection for multilayer cellular samples using continuous terahertz waves imaging system [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(6): 1158-1162.
 杨振刚, 刘劲松, 王可嘉. 连续太赫兹成像系统对多层蜂窝样件无损检测的实验研究[J]. 光电子 • 激光, 2013, 24(6): 1158-1162.
 [7] Zhang J Y, Ren J J, Chen S H, et al. Application of wavelet denoising in terahertz nondestructive testing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0114001.
 张霁暘, 任姣姣, 陈思宏, 等. 小波去噪在太赫兹无损检测中的应用[J]. 中国激光, 2020, 47(1):

- 0114001.
- [8] Mieloszyk M, Majewska K, Ostachowicz W. Application of THz spectroscopy for localisation of fibre optics embedded into glass fibre reinforced composite [J]. *Composite Structures*, 2019, 209: 548-560.
- [9] Han D H, Kang L H. Nondestructive evaluation of GFRP composite including multi-delamination using THz spectroscopy and imaging [J]. *Composite Structures*, 2018, 185: 161-175.
- [10] Zhang J, Wang J, Shen Y, et al. Wavelet-based image fusion method applied in the terahertz nondestructive evaluation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(12): 3683-3688.
张瑾, 王洁, 沈雁, 等. 小波图像融合在太赫兹无损检测中的应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(12): 3683-3688.
- [11] Im K H, Lee K S, Yang I Y, et al. Advanced X-ray nondestructive evaluation of defects in FRP solid composites [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(6): 1093-1098.
- [12] Zhou Z G, Sun G K, Li Y. Application of advanced nondestructive testing technologies for the detection of defects in composites [J]. *Aeronautical Manufacturing Gechnology*, 2016(4): 28-35.
周正干, 孙广开, 李洋. 复合材料无损检测技术: 先进无损检测技术在复合材料缺陷检测中的应用 [J]. *航空制造技术*, 2016(4): 28-35.
- [13] Ren J J, Li L J, Zhang D D, et al. Terahertz time domain spectral reflective tomography technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 176-181.
任姣姣, 李丽娟, 张丹丹, 等. 太赫兹时域光谱反射式层析成像技术 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(2): 176-181.
- [14] Guo L T, Mu K J, Deng C, et al. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 51-56.
郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 51-56.
- [15] Zhang C L, Mu K J. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(2): 023001.
张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(2): 023001.
- [16] Wang B, Wang X K, Yu Y, et al. Terahertz linear array fast scanning imaging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614029.
王彪, 王新柯, 俞跃, 等. 太赫兹线阵快速扫描成像 [J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614029.
- [17] Wang Y Y, Chen L Y, Xu D G, et al. Three-dimensional reconstruction of rat brain trauma based on terahertz imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0317002.
王与焯, 陈霖宇, 徐德刚, 等. 基于太赫兹波成像的鼠脑创伤三维重构 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0317002.