

光学学报

玻纤复合材料分层缺陷太赫兹无损检测技术

王奇书^{1,2}, 牟达^{1,2*}, 周桐宇^{1,2}, 任姣姣^{1,2}, 张丹丹^{1,2}, 辛胤杰^{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 利用时域有限差分法和太赫兹时域光谱技术对玻纤复合材料分层缺陷进行研究。首先, 基于透射式太赫兹时域光谱系统获得玻纤复合材料在太赫兹波段的光学参数, 并用时域有限差分法对缺陷进行数值仿真; 其次, 利用太赫兹时域光谱系统对提前预制的缺陷样件进行实际检测; 最后, 对比理论和实际检测获得的时域波形数据, 对缺陷进行成像分析, 发现两种方法均实现了在距离材料上表面 3 mm 和 5 mm 处对 0.3 mm 厚度分层缺陷的检测。结果表明: 时域有限差分法可为利用太赫兹时域光谱系统检测复合材料缺陷提供理论支撑, 减小对标准件的依赖性; 太赫兹时域光谱系统可有效检测材料内部缺陷, 可通过检测结果判断材料整体性能。

关键词 测量; 无损检测; 时域有限差分; 太赫兹; 光学参数提取; 复合材料

中图分类号 O451

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1712003

Terahertz Nondestructive Test of Delamination Defects in Glass-Fiber-Reinforced Composite Materials

Wang Qishu^{1,2}, Mu Da^{1,2*}, Zhou Tongyu^{1,2}, Ren Jiaojiao^{1,2}, Zhang Dandan^{1,2}, Xin Yinjie^{1,2}

¹ Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Optical Information Transmission Technology, 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 Finite-difference time-domain and terahertz time-domain spectroscopy are used to study the internal delamination defects in glass-fiber-reinforced composite materials. First, the optical parameters of the glass-fiber-reinforced composite material in the terahertz frequency band are obtained using transmission terahertz time-domain spectroscopy; the finite-difference time-domain method is used to simulate the defects. Second, a terahertz time-domain spectroscopy system is used to inspect the prefabricated sample. Finally, the defects are imaged and analyzed for comparison to the time-domain waveform data determined theoretically and through actual detection. It is found that both methods can detect delamination defects with a thickness of 0.3 mm at a distance of 3 and 5 mm from the upper surface of the materials. These results show that the finite-difference time-domain method can provide theoretical support for detecting defects in composite materials by using terahertz time-domain spectroscopy while reducing the dependence on standard components; the terahertz time-domain spectroscopy system can effectively detect internal defects of materials and assess their overall performance through the detection results.

Key words measurement; non-destructive testing; finite-difference time-domain; terahertz; optical parameter extraction; composite material

OCIS codes 120.4290; 260.2110; 300.6495

收稿日期: 2021-01-15; 修回日期: 2021-03-23; 录用日期: 2021-03-31

基金项目: 吉林省科技资源开放共享服务平台与科研条件保障项目(20191004022TC)、吉林省科技发展计划(201506230147C)、长春理工大学青年创新基金(XJJLG-2018-03)

通信作者: *md_79@126.com

1 引言

玻纤复合材料与金属相比,具有质量轻、比强度高、耐冲击及耐阻燃性好等特有优点,被广泛地用在航天军工、能源设备和交通运输等领域^[1]。常用的玻纤复合材料是以树脂为基体,玻璃纤维及其制品通过缠绕、人工糊制及压制成型工艺制备的复合材料^[2-3]。在制作过程中或是生命周期内,由于外界因素干扰产生的内部微小缺陷,含有缺陷的玻纤复合材料在装备工程方面存在一定的安全隐患。

随着超快激光技术不断取得新的进展,太赫兹脉冲的产生在技术上也向前迈进一大步。太赫兹无损检测不需要超声检测中所需要的耦合剂且适用于多种新型复合材料,较红外热波检测而言对环境和材料的要求较低,因此太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统广泛应用于对材料内部缺陷检测方面。物质的太赫兹光谱含有大量的材料自身信息,太赫兹时域光谱检测系统可对材料内部特征进行成像分析^[4-6]。近几年来,国内外很多学者利用 THz-TDS 系统对复合材料做了大量研究。2008 年,Stoik 等^[7]利用反射式 THz-TDS 系统对玻璃纤维复合材料的弯曲损伤、内部空洞及灼烧等缺陷进行检测。2016 年,Dong 等^[8]通过反射式 THz-TDS 系统对玻纤复合材料分层等缺陷进行检测成像,使用小波滤噪技术去除了水蒸气对检测结果的影响。2015 年,郭小弟等^[9]分析了在特定频段下的缺陷的时域波形和缺陷样品的折射率吸收谱。2019 年,张丹丹等^[10]用反射式层析成像对缺陷粘接质量进行分析,采用缺陷特

征时间区域成像优化技术提高了缺陷检测能力和识别精度。

理论探究对实际检测起着重要的指导作用,时域有限差分(FDTD)近些年被用于研究波在电磁场内的传播情况^[11]。2013 年,Lopato 等^[12]描述了脉冲太赫兹波的全波模型,该模型用于无损检测的系统,并使用 FDTD 对其进行数值分析。2016 年,涂婉丽等^[13]将 FDTD 应用在船舶防护涂层中分析太赫兹波的传播,对涂层中的气孔、涂层氧化物等缺陷进行分析。2020 年,周桐宇等^[14]利用 FDTD 法对玻璃钢内部的脱胶和分层缺陷进行分析,在 1 mm 厚的玻璃钢中脱粘缺陷检测厚度达到 20 μm,对于材料中厚度为 80 μm 的分层缺陷,检测层数达到 2。

理论分析和实验验证是分析物质特性相辅相成的重要手段,本文利用 FDTD 法分析太赫兹波在玻纤复合材料中的传播特性,将获得的理论数据用于指导实际检测,且通过实际检测验证 FDTD 数值分析的可靠性,以准确高效地获得缺陷信息。

2 玻纤复合材料时域有限差分仿真

2.1 时域有限差分法原理

对于复杂的电磁场问题,可利用 FDTD 来近似计算。用有限差分来近似麦克斯韦方程中的时间和空间导数,通过构造方程,用前一时间步瞬时场值来计算后一时间步瞬时场值,以此构造时间向前推进的算法,来模拟电磁场在时域的进程^[15]。在二维坐标系中,麦克斯韦方程中 E_x 分量的 FDTD 差分离散形式为

$$E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)=\frac{1-\frac{\sigma(m)\Delta t}{2\epsilon(m)}}{1+\frac{\sigma(m)\Delta t}{2\epsilon(m)}}\times E_x^n\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)+\frac{\Delta t}{1+\frac{\epsilon(m)\Delta t}{2\epsilon(m)}}\left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right)-H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k\right)}{\Delta y}-\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right)-H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z}\right], \quad (1)$$

式中: ϵ 为介电常数; σ 为电导率; Δt 为时间步长; (i,j,k) 为 Yee 元胞节点; n 为计算的时间步; $H_z^{n+\frac{1}{2}}$ 和 $H_y^{n+\frac{1}{2}}$ 为磁场在 z 和 y 方向的分量; $m =$

$\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)$,代表观察点处一组整数或半整数。同理, E_y 分量的 FDTD 离散形式不做赘述。

若使 FDTD 离散方法有意义,则要同时保证

FDTD 方程的解有收敛和稳定的性质,即满足条件:

$$\delta \leq \frac{\lambda_{\min}}{10}, \quad (2)$$

$$\Delta t \leq \frac{1}{\nu_{\max} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}}, \quad (3)$$

式中: λ_{\min} 为在仿真频段内的最短波长; ν_{\max} 为太赫兹波在传播过程中的最大波速; δ 为空间离散间隔。由于在完成 FDTD 计算时,计算机有限的内存满足不了电磁散射时计算域是无限的条件,因此需要设置合适的边界条件来模拟无限自由空间。

2.2 玻纤复合材料太赫兹波段光学参数提取

在不同的波段内,材料的光学性质是不一致的,材料的光学参数获取为数值建模奠定了基础。提取的光学参数准确与否,对数值计算的准确性起到至关重要的作用。本文主要探讨的光学参数包括折射率和消光系数,因此采用自研的透射式太赫兹时域光谱系统来提取待测材料的光学参数。令不经过样品的太赫兹波的时域信息为参考信号 $E_1(t)$, 经过待测样品的太赫兹波的时域信息为样品信号 $E_2(t)$ ^[16]。认为待测样品表面均匀一致且上下表面平行,介质面为磁各向同性,介质的电磁响应是线性关系且无表面自由电荷^[17]。对获取的时域信号进行傅里叶变换后得到 $E_1(\omega)$ 和 $E_2(\omega)$ 。 $E_1(\omega)$ 的表

达式为

$$E_1(\omega) = E_0(\omega)P(\omega, x), \quad (4)$$

式中: ω 为角频率; 相位变化函数 $P(\omega, x) = \exp(-j\omega\tilde{n}_0 x/c)$, \tilde{n}_0 为介质的复折射率, c 为太赫兹波在空气中的传播速度。 $E_2(\omega)$ 的表达式为

$$E_2(\omega) = E_0(\omega)P(\omega, x-a)t_{01}p_2(\omega, d)t_{10}, \quad (5)$$

式中: a 为放入样品后的空气厚度; t_{01} 、 t_{10} 分别为空气与样品界面、样品与空气界面的透射系数; $p_2(\omega, d)$ 为太赫兹波在样品内部的相位变化。设待测样品的厚度为 d , 光源正入射到样品表面, 结合 Snell 定律, 得到理论传递函数:

$$H(\omega) = \frac{E_2(\omega)}{E_1(\omega)} = \frac{4\tilde{n}_1}{(1+\tilde{n}_1)^2} \exp\left[-j\frac{\omega d}{c}(\tilde{n}_1 - 1)\right] = \rho(\omega) \exp[-j\phi(\omega)], \quad (6)$$

当 $\kappa_1 \ll n_1$ 时, 将 $\tilde{n}_1(\omega) = n_1(\omega) - j\kappa_1(\omega)$ 代入(6)式, 可得到样品折射率和消光系数。它们的计算公式分别为

$$n_1(\omega) = \phi(\omega) \frac{c}{\omega d} + 1, \quad (7)$$

$$\kappa_1(\omega) = \ln \left\{ \frac{4n_1(\omega)}{\rho(\omega)[1+n_1(\omega)]^2} \right\}, \quad (8)$$

式中: ρ 为传递函数的振幅; ϕ 为传递函数的相位。对由(7)和(8)式获得的数据进行数据拟合后, 得到玻纤复合材料的折射率和消光系数, 如图 1 所示。

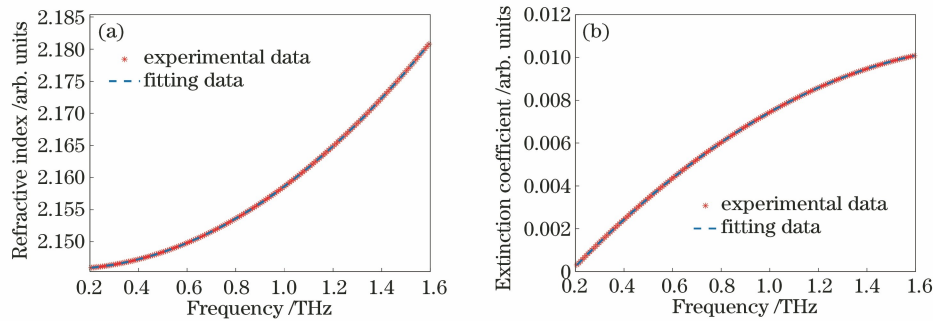


图 1 玻纤复合材料的光学参数。(a) 折射率; (b) 消光系数

Fig. 1 Optical parameters of glass fiber composite material. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

由图 1(a)可知, 在 0.2~1.6 THz 频率范围内, 玻纤复合材料的平均折射率为 2.165 左右; 由图 1(b)可知, 在 0.2~1.6 THz 频率范围内, 消光系数小于 0.012。

2.3 玻纤复合材料 FDTD 数值建模

玻纤复合材料的结构如图 2 所示, 是由多层玻纤压制而成的。在制作过程中, 由于工艺等原因, 玻纤之间发生分层, 产生空气间隙缺陷。本实验样品的几何尺寸为 155 mm × 140 mm × 6 mm, 在距离样品上表面 3 mm、5 mm 处分别预制了厚度为

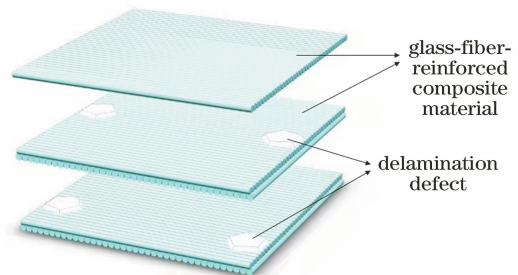


图 2 玻纤复合材料结构

Fig. 2 Glass fiber composite material structure 0.3 mm 的空气槽来模拟分层缺陷。

图 3 显示了无分层缺陷和存在分层缺陷时,太赫兹波在介质中传播的光路。图 3(a)中 n_0 是空气的折射率, n_1 是玻纤复合材料的折射率, n_4 是基底的折射率。由于光在不同介质分界面会发生反射,当玻纤复合材料不存在缺陷时,太赫兹波经过样件后产生两个回波,样件上表面反射回波 E_0 和从基

底反射的回波 E_{14} 。图 3(b)中, n_0, n_1, n_2, n_3, n_4 分别为空气、玻纤复合材料、缺陷(这里认为是空气)、玻纤复合材料(n_1 和 n_3 都代表玻纤复合材料的折射率,二者在数值上相等)、基底的折射率,若存在分层缺陷,在表面反射回波和基底反射回波之间一定会存在第三个回波。

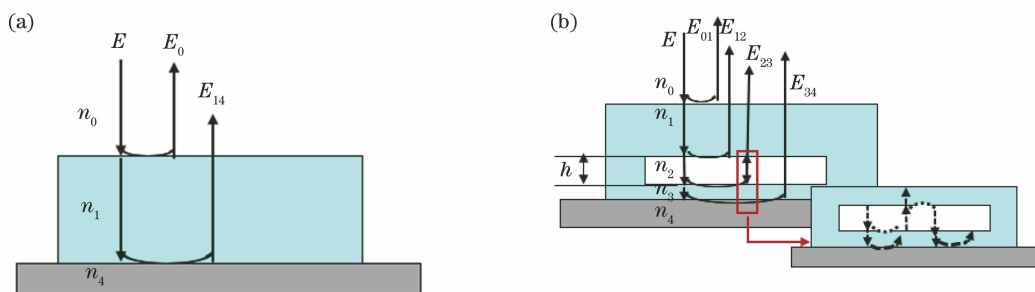


图 3 太赫兹波在介质中传播的光路。(a)无分层缺陷时太赫兹波传播的光路;
(b)有分层缺陷时太赫兹波传播的光路

Fig. 3 Optical path of terahertz wave propagating in medium. (a) Optical path of terahertz wave propagation without delamination defect; (b) optical path of terahertz wave propagation with delamination defect

将提取的材料光学参数导入到 FDTD Solutions 软件,拟合后进行建模。通过 FDTD 法来分析太赫兹脉冲与物质相互作用的过程。选择的探测方式为太赫兹二维反射式工作方式。图 4 为实际的仿真结构。

仿真时,以理想平面波作为太赫兹辐射源,在垂直于光传播方向,采用 Perfectly Match Layer (PML)边界条件,吸收反射或透射的光;在平行于光传播方向,采用 Periodic Boundary Conditions (PBC)边界条件,避免不必要的衍射现象。以 Perfect Electrical Conductor (PEC)材料作为基底,PEC 材料对太赫兹波百分之百反射,因此可用来代替实验中的铝基底。采用时域观察点对太赫兹信号进行采集和观测。为了保持数值稳定性,仿真中

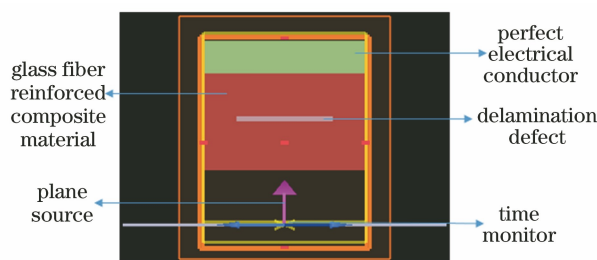


图 4 反射式仿真实验结构

Fig. 4 Reflective simulation experiment structure

$$\Delta x = \Delta y = 0.005 \text{ mm}, \Delta t = \frac{\Delta x}{2c} = 8.3 \text{ fs}.$$

2.4 实验装置

采用的太赫兹时域光谱系统为自行搭建的反射式太赫兹时域光谱系统。图 5(a)和图 5(b)分别为

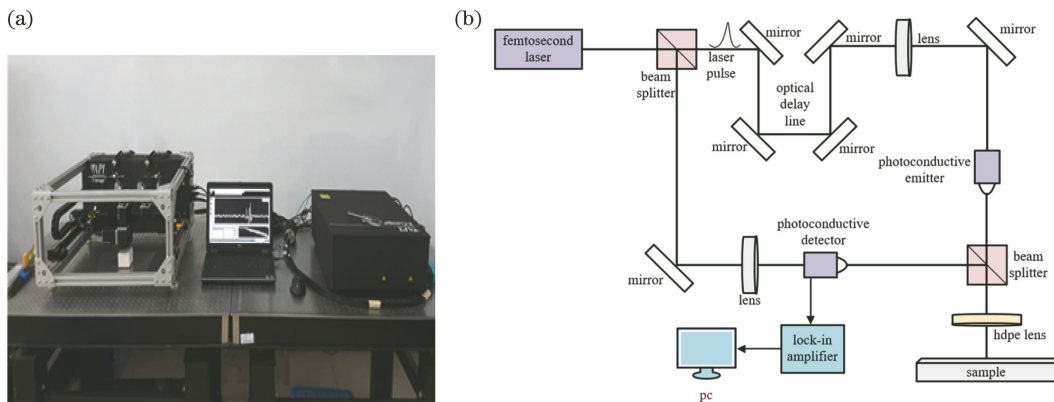


图 5 太赫兹时域光谱系统。(a)实物图;(b)原理图

Fig. 5 Terahertz time domain spectroscopy system. (a) Physical picture; (b) schematic diagram

太赫兹时域光谱系统的实物图和工作原理图,主要由锁模钛蓝宝石飞秒激光器、光学延迟线、太赫兹发射器、太赫兹接收器和光学系统组成。

飞秒激光器主要用来产生飞秒激光脉冲,中心波长为 810 nm,重复频率为 80 MHz,脉宽为 100 fs。从激光器发出的激光脉冲通过分光镜被分为两束光,能量较高的一部分作为泵浦光,泵浦光经光学延迟线照射在太赫兹发射器中的光电导天线的半导体衬底上,在外加偏置电压的作用下,产生太赫兹波;另一部分作为探测光,对太赫兹探测器采集到的太赫兹反射信号进行采样,通过改变机械时间延迟线来改变探测脉冲和泵浦脉冲之间的光程差。对太赫兹脉冲的电场强度进行采样,最后获得太赫兹脉冲电场强度的时域波形,该太赫兹时域光谱系统的信噪比大于 70 dB,时间间隔为 0.1 ps,时间窗口为 320 ps/160 ps^[18]。

3 结果与讨论

3.1 时域有限差分法仿真结果

利用时域有限差分法模拟了太赫兹波与玻纤复合材料的相互作用,对太赫兹波在材料中的传播进行分析。图 6 为有无分层缺陷样件的时域波形。图 6(a)显示当玻纤复合材料无分层缺陷时的太赫兹波反射特征波形,从特征波形可以看到,在无缺陷时,仅有样件上表面和基底反射的两个典型峰值,在 26.71 ps 处为样件上表面反射回波,在

112.81 ps 处为基底反射回波。图 6(b)为当距离样件上表面 3 mm 时,厚度为 0.3 mm 的分层缺陷的特征波形,结合图 3(b),在 26.71 ps 处为样件上表面反射的回波 E_{01} ,在 69.8 ps 处为玻纤复合材料与空气隙上表面界面反射的回波 E_{12} ,71.89 ps 处为空气隙下表面和玻纤复合材料界面反射的回波 E_{23} ,110.68 ps 处为基底反射的回波 E_{34} ;在 69.8~71.89 ps 处(椭圆标记)出现了谷和峰的变化,这是由于太赫兹波在样件中传播时首先从光密度较大的介质玻纤复合材料(n_1)传输到光密度较小的介质空气(n_2)中,继续从空气介质(n_2)进入玻纤复合材料(n_3),发生了振幅和相位的变化。图 6(c)为当距离样件上表面 5 mm 时,厚度为 0.3 mm 的分层缺陷的特征波形,结合图 3(b),在 26.71 ps 处为样件上表面反射的回波 E_{01} ,在 98.36 ps 处为玻纤复合材料与空气隙上表面界面反射的回波 E_{12} ,在 100.42 ps 处为空气隙下表面与玻纤复合材料界面反射的回波 E_{23} ,110.68 ps 处为基底反射的回波 E_{34} 。从特征波形中可看到,随着分层缺陷与样件上表面距离的增加,缺陷出现的时间相应后移。

图 7 是有无分层缺陷的 B-scan 图,横轴为时间,纵轴为位置。图 7(b)中,椭圆部分即是距样件上表面 3 mm 处 0.3 mm 厚的分层缺陷;图 7(c)中,椭圆部分即是距样件上表面 5 mm 处 0.3 mm 厚的分层缺陷。

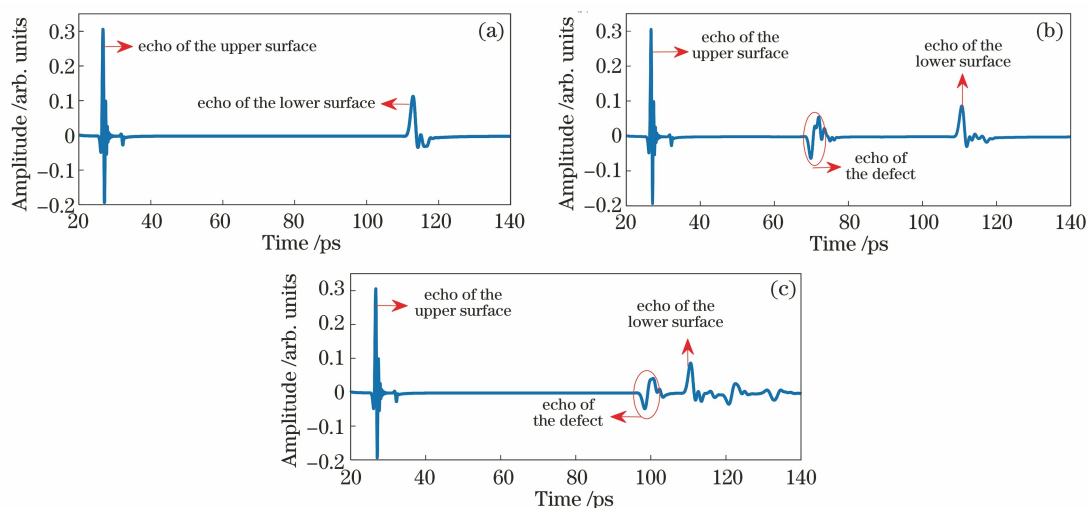


图 6 时域有限差分法仿真时域波形。(a)无分层缺陷;(b)分层缺陷距离样件上表面 3 mm 处;
(c)分层缺陷距离样件上表面 5 mm 处

Fig. 6 Time-domain waveform simulation using finite difference time domain. (a) Without delamination defect; (b) delamination defect is 3 mm away from the upper surface of the sample; (c) delamination defect is 5 mm away from the upper surface of the sample

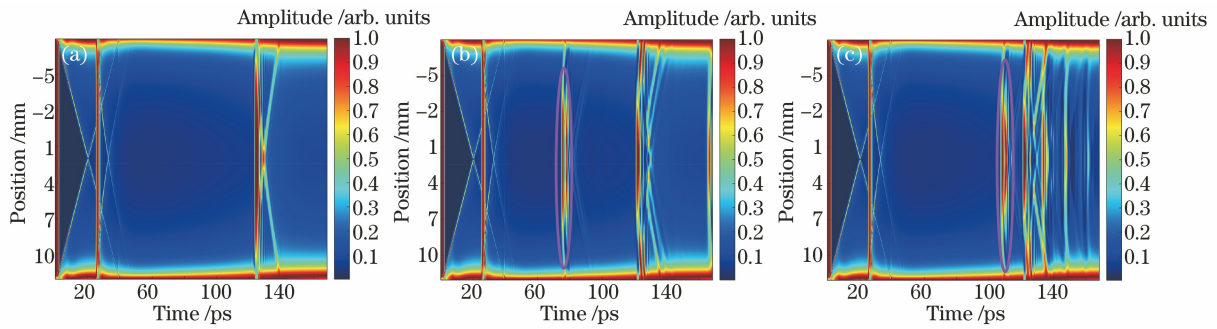


图 7 B-scan 图。(a)无分层缺陷;(b)分层缺陷距样品上表面 3 mm;(c)分层缺陷距样品上表面 5 mm
Fig. 7 B-scan figures. (a) Without delamination defect; (b) delamination defect is 3 mm away from the upper surface of the sample; (c) delamination defect is 5 mm away from the upper surface of the sample

3.2 THz-TDS 检测结果

将时域有限差分法获取的数据波形作为理论指导,通过使用反射式太赫兹时域光谱系统,对提前预制好分层缺陷的样品进行检测。发射端的太赫兹波聚焦在样品下表面,扫描步距为 0.5 mm,时间分辨率为 0.1 ps。分析样品的时域波形并进行成像,得到的结果如下。

图 8(a)为无缺陷的玻纤复合材料的时域波形,样品上表面和基底的反射峰值分别在 124.6 ps 和 212.8 ps 处;图 8(b)为距离样品上表面 3 mm 处 0.3 mm 厚的分层缺陷时域波形,样品上表面的返回峰值出现在 124.6 ps 处,在 166.4~168.5 ps 之间的谷和峰为缺陷的返回波形,基底的反射峰值出现在

211.3 ps 处;图 8(c)为距离样品上表面 5 mm 处 0.3 mm 厚的分层缺陷时域波形,样品上表面和基底的返回波峰值分别出现在 124.6 ps 和 211.6 ps 处,在 200.2~202.4 ps 之间是缺陷产生的反射回波。

图 9 是对距离样品上表面 3 mm 和 5 mm 处的分层缺陷进行成像的结果和列 B-scan 成像图。图 9(a)和图 9(c)是对缺陷进行成像的结果,可以看到,由于缺陷位置为空气隙,在此处的太赫兹波的吸收相对于其他位置较弱些。图 9(b)和图 9(d)中椭圆位置即分别是对图 9(a)和图 9(c)中缺陷的位置进行列 B-scan 的成像图,同样可以观察到与时域有限差分仿真结果相似的规律,缺陷出现的时间与缺陷在样品中的位置有关。

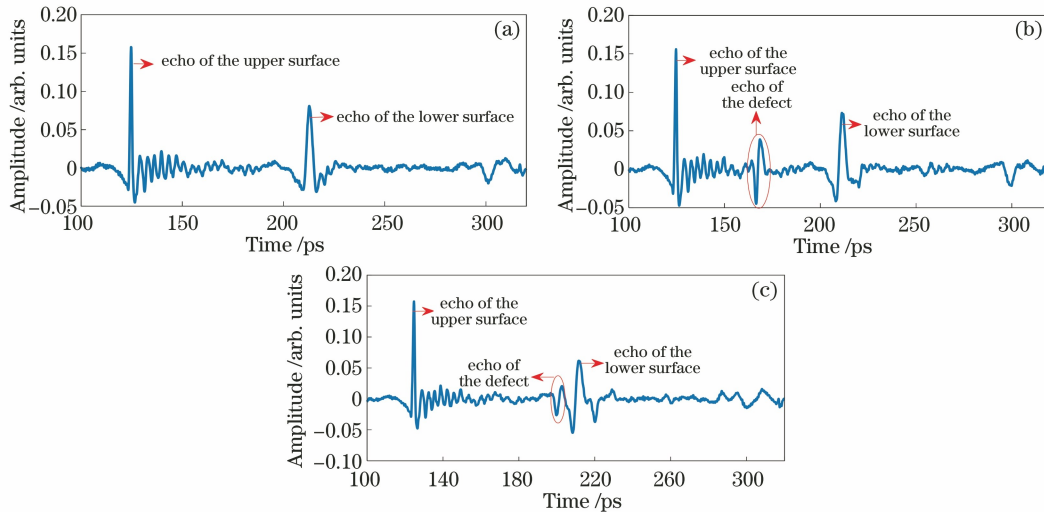


图 8 THz-TDS 检测缺陷时域波形。(a)无分层缺陷;(b)分层缺陷距离样品上表面 3 mm 处;
(c)分层缺陷距离样品上表面 5 mm 处

Fig. 8 THz-TDS time-domain waveform of detected defects. (a) Without delamination defect; (b) delamination defect is 3 mm away from the upper surface of the sample; (c) delamination defect is 5 mm away from the upper surface of the sample

3.3 讨论

理论数值仿真和实际检测的波形图分别如图 6

和图 8 所示。在样品不存在分层缺陷时,理论和实测波形仅有样品上表面和基底的反射波形峰值,如

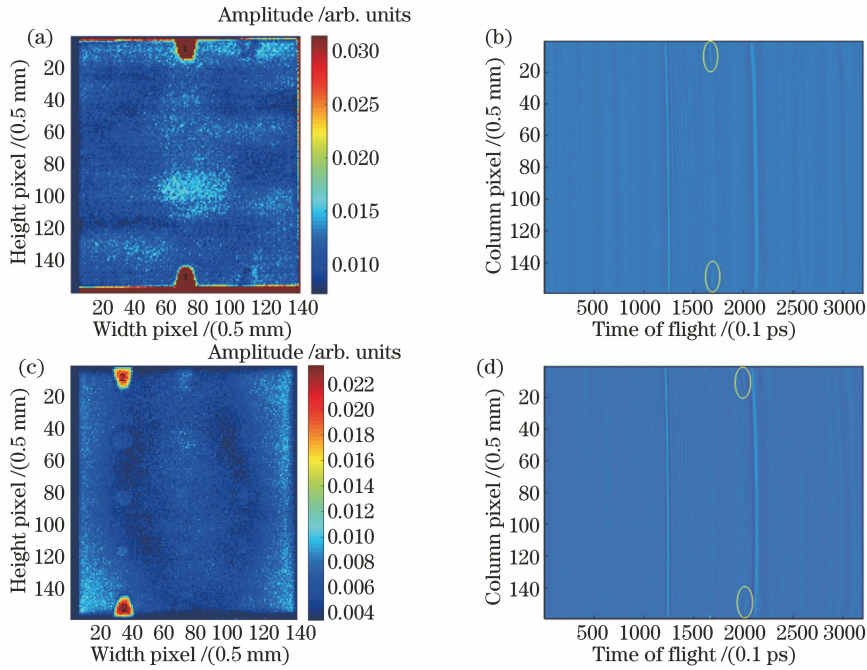


图 9 分层缺陷成像图。(a) 分层缺陷距样品上表面 3 mm; (b) 1 位置列 B-scan 图; (c) 分层缺陷距样品上表面 5 mm; (d) 2 位置列 B-scan 图

Fig. 9 Delamination defect imaging. (a) Delamination defect is 3 mm away from the upper surface of the sample; (b) column B-scan at position 1; (c) delamination defect is 5 mm away from the upper surface of the sample; (d) column B-scan at position 2

图 6(a) 和图 8(a) 所示; 当缺陷距离样品上表面 3 mm 处时, 均可发现在样品上表面和基底反射的回波之间首先出现一个谷值然后出现一个峰值, 说明太赫兹波在不同介质的界面发生了反射, 且当太赫兹波从光疏介质射入光密介质时, 反射光发生了 π 的相位反转, 如图 6(b) 和图 8(b) 所示; 随着缺陷位置距样品上表面越远, 缺陷波形出现的时间越延后, 甚至与基底反射回波发生重合, 并且峰值的大小也相对减小, 这是材料对太赫兹波的吸收导致的, 如图 6(c) 和图 8(c) 所示。通过对理论数值波形和实

际检测波形进行相似性分析, 可以获取缺陷波形的信息, 为后续对缺陷大小的判断奠定了基础。

根据太赫兹波在材料不同界面产生的反射回波飞行时间差和光程差, 通过公式

$$h = \frac{c \Delta t}{2n}, \quad (9)$$

可对缺陷厚度进行计算。其中 c 是真空中光传播的速度, Δt 为飞行时间差, n 为材料的平均折射率, h 为缺陷的厚度。应用(9)式分别对仿真和实际测得的数据进行缺陷厚度计算。计算结果如表 1 所示。

表 1 时域有限差分法和太赫兹时域光谱系统检测的分层缺陷厚度和误差

Table 1 Delamination defect thickness and error detected by FDTD and THz-TDS system

Method	Delamination defect is 3 mm away from the upper surface of the sample		Delamination defect is 5 mm away from the upper surface of the sample	
	h /mm	Error /%	h /mm	Error /%
FDTD	0.3135	4.5	0.3090	3.0
THz-TDS	0.3150	5.0	0.3300	10

从表 1 可以看到, 通过理论仿真和实际检测验证, 均能够在误差允许范围内获取缺陷的厚度, 时域有限差分法获得的结果误差相对实际检测小一些。两种方法获得的结果存在差异, 是因为在利用时域有限差分进行数值建模中, 背景折射率与实际检测光路存在微小误差。

4 结 论

将时域有限差分与太赫兹时域光谱技术相结合, 对玻纤复合材料的分层缺陷的厚度进行分析。通过时域有限差分法在理论上对玻纤复合材料内不同位置的分层缺陷进行时域波形分析和 B-scan 成像, 并将获取的结果用来指导实际检测; 利用太赫兹

时域光谱系统,分析预制好分层缺陷的样件的时域波形和成像结果;通过时域波形上缺陷出现的位置信息,计算其厚度,分别在理论和实际上计算得到了缺陷厚度且误差很小。结果表明,时域有限差分能够为太赫兹时域光谱系统检测提供理论支撑,太赫兹时域光谱无损检测系统能够对复合材料内部微小缺陷进行检测,通过检测结果可判断结构的性能安全性。

参 考 文 献

- [1] Guo X D, Wang Q, Gu X H, et al. Defects depth inspection and data analysis of glass fiber based on THz-TDS[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(7): 602-606.
郭小弟, 王强, 谷小红, 等. 基于太赫兹时域光谱的玻璃纤维缺陷深度检测及数据分析[J]. *红外技术*, 2016, 38(7): 602-606.
- [2] Zhang J, Cui H L, Shi C C, et al. Terahertz spectroscopic study on the property of epoxy resin adhesive [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(4): 919-923.
张瑾, 崔洪亮, 施长城, 等. 环氧树脂胶的太赫兹光谱特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(4): 919-923.
- [3] Zhong Y F, Ren J J, Li L J, et al. Pulsed terahertz nondestructive detection tomography based on fringe suppression technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1014001.
钟一帆, 任姣姣, 李丽娟, 等. 基于条纹抑制技术的脉冲太赫兹无损检测层析成像[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1014001.
- [4] Lai H B, He M X, Tian T, et al. Porosity of tablets based on terahertz spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0630001.
赖慧彬, 何明霞, 田甜, 等. 基于太赫兹光谱的固体片剂孔隙率研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0630001.
- [5] Fang B, Qi C K, Deng Y Q, et al. Characteristics of highly absorptive coatings used in terahertz radiometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614020.
方波, 戚岑科, 邓玉强, 等. 宽频段太赫兹辐射计高吸收率涂层的特性[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614020.
- [6] Wang Y, Lin Z H, Tang T C, et al. Thermal damage detection of fluororubber material based on terahertz wave [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 173003.
王洋, 林振衡, 唐天赐, 等. 基于太赫兹波的氟橡胶材料热损伤检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 173003.
- [7] Stoik C D, Bohn M J, Blackshire J L. Nondestructive evaluation of aircraft composites using reflective terahertz time domain spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 17039-17051.
- [8] Dong J L, Locquet A, Citrin D S. Enhanced terahertz imaging of small forced delamination in woven glass fibre-reinforced composites with wavelet de-noising[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2016, 37(3): 289-301.
- [9] Guo X D, Wang Q, Gu X H, et al. Analysis of terahertz spectroscopic inspection experiment for glass fiber composite material defects [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 764-768.
郭小弟, 王强, 谷小红, 等. 玻璃纤维复合材料缺陷的太赫兹光谱检测实验分析[J]. *红外技术*, 2015, 37(9): 764-768.
- [10] Zhang D D, Ren J J, Li L J, et al. Terahertz non-destructive testing technology for glass fiber honeycomb composites [J]. *Acta Photonica Sinica*, 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(英文)[J]. *光子学报*, 2019, 48(2): 0212002.
- [11] Meagher T, Jiang B, Jiang P. An enhanced finite difference time domain method for two dimensional Maxwell's equations [J]. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 2020, 36(5): 1129-1144.
- [12] Lopato P, Chady T, Sikora R, et al. Full wave numerical modelling of terahertz systems for nondestructive evaluation of dielectric structures[J]. *COMPEL - the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2013, 32(3): 736-749.
- [13] Tu W L, Zhong S C, Zhou Q, et al. Computed terahertz wave propagation in marine protective coating[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(1): 19-26.
涂婉丽, 钟舜聪, 周卿, 等. 太赫兹波在船舶防护涂层系统的传播特性研究[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(1): 19-26.
- [14] Zhou T Y, Li L J, Ren J J, et al. Pulsed terahertz nondestructive testing of glass fiber reinforced plastics based on FDTD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1226002.
周桐宇, 李丽娟, 任姣姣, 等. 基于FDTD的玻璃纤维增强复合材料脉冲太赫兹无损检测[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1226002.
- [15] Chen K N. FDTD method was used to analyze the

influence of micro-nano surface layer on internal light intensity distribution of KDP crystal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 10-14.

陈宽能. 用 FDTD 分析 KDP 晶体微纳表层对内部光强分布的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 10-14.

- [16] Ji B B, Li Z X, Zhou W, et al. Accurate optical parameters measurement of different optical path in the terahertz range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0417002.

季琲琲, 李照鑫, 周薇, 等. 不等光程法太赫兹波段材料光学参数的精确测量[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0417002.

- [17] Liu C, Yue L Y, Wang X K, et al. Measurement of optical parameters of organic solvents by THz time-domain reflection spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(6): 1471-1475.

刘畅, 岳凌月, 王新柯, 等. 利用太赫兹反射式时域光谱系统测量有机溶剂的光学参数[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(6): 1471-1475.

- [18] Zhang J Y, Ren J J, Li L J, et al. THz imaging technique for nondestructive analysis of debonding defects in ceramic matrix composites based on multiple echoes and feature fusion [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 19901-19915.