

# 基于 FDTD 的玻璃纤维增强复合材料脉冲 太赫兹无损检测

周桐宇<sup>1,2</sup>, 李丽娟<sup>1,2\*</sup>, 任姣姣<sup>1,2</sup>, 张丹丹<sup>1,2</sup>, 张霁旸<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 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;

<sup>2</sup> 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具有耐腐蚀性强、介电性能良好和热性能良好等优良性能,被广泛应用于航空航天、铁道铁路等相关行业。以脉宽调制后的太赫兹脉冲激励源作为输入光源,采用德拜模型对材料实测太赫兹波段光学参数进行拟合优化,并将其作为材料输入参数应用于时域有限差分方法中。建立了玻璃纤维增强复合材料胶接缺陷的太赫兹脉冲检测模型。基于时域有限差分法,对太赫兹波在玻璃纤维增强复合材料胶接缺陷结构中的传播特性进行了数值仿真分析,重点从时域波形及 B-Scan 成像两方面分析了太赫兹波在胶接缺陷结构中的传播过程以及高次回波的成因。针对玻璃纤维增强复合材料中存在的脱粘缺陷、分层缺陷进行了诊断分析,1 mm 厚玻璃纤维增强复合材料中的脱粘缺陷检测厚度达到 20  $\mu\text{m}$ ;玻璃纤维增强复合材料中厚度为 80  $\mu\text{m}$  的分层缺陷的检测层数达到两层。所提方法可为基于太赫兹脉冲成像的玻璃纤维增强复合材料胶接缺陷的无损检测和评估提供理论支撑。

**关键词** 物理光学; 时域有限差分; 太赫兹; 无损检测; 高次回波

中图分类号 O451

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1226002

## Pulsed Terahertz Nondestructive Testing of Glass Fiber Reinforced Plastics Based on FDTD

Zhou Tongyu<sup>1,2</sup>, Li Lijuan<sup>1,2\*</sup>, Ren Jiaojiao<sup>1,2</sup>, Zhang Dandan<sup>1,2</sup>, Zhang Jiyang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> National Demonstration Center for Experimental Opto-Electronic Engineering Education, School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Fiberreinforced plastics have excellent properties such as strong corrosion resistance, good dielectric properties, and good thermal properties. They are widely used in aerospace, railway and other related industries. In this paper, the pulse-width modulated terahertz pulse excitation source is used as the input light source, and the measured optical parameters of materials in the terahertz band are fitted and optimized using the Debye model, which are used as the material input parameters in the finite-difference time-domain method. A terahertz pulse detection model for the bonding defects of fiber reinforced plastics is established. The finite-difference time-domain method is used to numerically analyze the propagation characteristics of terahertz waves in the bonding defects of fiber reinforced plastics. The propagation process of terahertz waves in the bonding defect structure and the causes of higher-order echoes are analyzed from the two aspects of time domain waveform and B-Scan imaging. We diagnose and analyze the debonding and delamination defects in fiber reinforced plastics. The thickness of delamination defects in 1 mm thick fiber reinforced plastics can reach 20  $\mu\text{m}$ . The number of layers for layered defect detection with a thickness of 80  $\mu\text{m}$  reaches two layers for fiber reinforced plastics. The proposed method can provide a theoretical support for the non-destructive detection and evaluation of bonding defects in fiber reinforced plastics based on terahertz pulse imaging.

收稿日期: 2020-02-17; 修回日期: 2020-03-18; 录用日期: 2020-03-23

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(201506230147C)、长春理工大学青年创新基金项目(XJJLG-2018-03)

\* E-mail: custjuan@126.com

**Key words** physical optics; finite-difference time-domain; terahertz; nondestructive testing; high order echo  
**OCIS codes** 260.2110; 300.6495; 120.4290; 350.5500

## 1 引 言

太赫兹辐射通常指频率在 0.1~10.0 THz 区间,太赫兹时域光谱技术在无损检测中的应用广泛<sup>[1-2]</sup>,利用该技术对材料进行检测,可以同时获得电场信号的振幅和相位信息。太赫兹时域光谱技术在目前无损检测领域中是最为安全且精度较高的检测技术之一<sup>[3-5]</sup>。

太赫兹无损检测被广泛应用于航空、航天、高铁等领域,可检测隔热材料、涂层材料、橡胶材料、玻璃纤维增强复合材料(以下简称玻璃钢 FRP)等多种材料<sup>[6-8]</sup>。随着玻璃钢材料在工业制造中的广泛应用,对其进行无损检测的需求也日益增加,许多研究人员展开了对玻璃钢材料的太赫兹无损检测技术研究。目前,对玻璃钢的脱粘、分层等典型缺陷进行太赫兹无损检测时,其微小缺陷的纵向检测精度为 100  $\mu\text{m}$ <sup>[9-11]</sup>。在实际检测时,受光学仪器精度及采样频率的影响,理论上玻璃钢中微小缺陷引起的波形变化无法被准确检测出来。受空气噪声的影响,时域谱上高次反射回波的幅值与空气噪声的幅值量级相当,会出现无法区分高次回波和空气噪声波形的情况。目前,对玻璃钢材料的太赫兹波时域光谱检测技术无法给出一个评估标准,且微米量级的典型缺陷制作苛刻,直接进行缺陷的判定分析显然是困难的。

时域有限差分法(FDTD)在空间域和时间域上对电场  $E$ 、磁场  $H$  采取离散处理并进行交替抽样,是求解 Maxwell 方程组正向求解的时域方法<sup>[12-13]</sup>。对于太赫兹无损检测的研究,使用时域有限差分方法研究

太赫兹波段在不同介质中的传播机理是热门的方法。Lopato 等<sup>[14-15]</sup>利用时域有限差分方法,仿真了太赫兹波在单一介质中的传播情况。Zhang 等<sup>[16]</sup>利用时域有限差分方法,研究了在太赫兹波段下多类型蝴蝶结天线的传输及吸收特性。Tu 等<sup>[17]</sup>利用时域有限差分方法,对船舶涂层太赫兹传播机理进行了理论研究。但是,关于玻璃钢胶接缺陷的太赫兹无损检测理论研究及高次回波分析鲜有报道。

为了解决玻璃钢胶接缺陷的太赫兹无损检测问题,本文使用时域有限差分方法详细分析了玻璃钢的太赫兹传播机理。本文以脉宽调制后的太赫兹脉冲激励源作为输入光源,采用德拜模型对材料实测太赫兹波段光学参数进行拟合优化,并将其作为材料输入参数应用于时域有限差分方法中。以玻璃钢材料中的典型缺陷作为研究对象,基于时域有限差分算法建立了具有多种缺陷结构的玻璃钢材料模型,并研究了太赫兹在其中的传播特性,着重从时域波形及 B-Scan 成像两方面对玻璃钢材料的典型缺陷进行评估分析及检测诊断。

## 2 FDTD 原理

FDTD 是对 Maxwell 旋度方程在时间域和空间域上进行离散处理,并对时间和空间的一阶偏导数取中心差分近似,进而求解 Maxwell 旋度方程的近似解<sup>[18]</sup>。图 1 为介质模型在空间中进行网格划分后的示意图,其中  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$  以及  $H_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$  分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的电场分量及磁场分量。在三维笛卡尔坐标系中,Maxwell 方程中  $E_x$  分量的时域递推方法描述为

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

式中: $\Delta t$  为时间步长; $\epsilon$  为介电常数; $\sigma$  为电导率; $\delta$  为空间步长; $(i,j,k)$  为 Yee 单元的节点; $n$  为计算的时间步。电磁场其他分量方程均如此推导,不作赘述。

对于三维立方体 Yee 元胞,其立方体边长即为空间步长。为了保证数值稳定性并满足数值色散条件<sup>[15]</sup>,此处空间步长和时间步长设置应满足

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

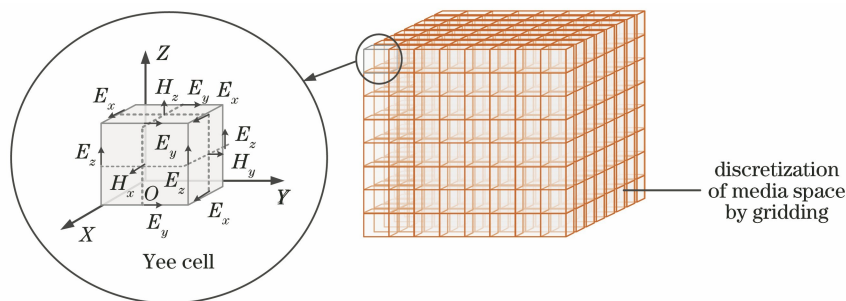


图 1 介质空间中使用 FDTD 方法划分的 Yee 元胞

Fig. 1 Yee cells in medium space divided by FDTD method

$$\Delta t \leq 1 / \left[ v_{\max} \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}} \right], \quad (3)$$

式中： $\lambda_{\min}$  表示太赫兹宽光谱光源中的最短波长； $v_{\max}$  表示太赫兹波在传播过程中的最大波速； $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的立方体边长。在电磁场问题中，为了在有限计算区域内模拟无限空间，必须在计算区域的截断边界上设置合理的吸收边界条件。

### 3 数值仿真模型

#### 3.1 光源模型

以脉宽调制后的太赫兹脉冲激励源作为输入光源并将其应用于时域有限差分方法中。使用反射式太赫兹时域光谱系统进行检测，得到原始时域太赫

兹信号  $E'_0(t)$ ，对原始信号进行反卷积信号处理得到信号  $E'(t)$ <sup>[19]</sup>，并通过傅里叶变换得到脉宽调制前后的频域信号  $E'_0(\omega)$ 、 $E'(\omega)$ 。如图 2(a)所示，通过反卷积信号处理，脉宽全宽度为 4.4 ps 的原始信号被调制为脉冲半宽度为 0.6 ps 的近似高斯脉冲信号，其中 FWHM 为半峰全宽。太赫兹信号经调制后，脉宽变窄，检测精度得到提高。图 2(b)所示为太赫兹光源调制前后的频域信息，调制后的太赫兹光源能量集中在 0.1~2.0 THz 区间，因此本文太赫兹仿真频段使用 0.1~2.0 THz。

反卷积方法<sup>[20]</sup>描述为

$$E'(t) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}[E'_0(t) \cdot W(\omega)] \}, \quad (4)$$

式中： $\omega$  为频率； $\mathcal{F}$  为傅里叶变换； $\mathcal{F}^{-1}$  为傅里叶逆变换； $W(\omega)$  为维纳滤波器，其作为反向滤波器可避免发散现象。

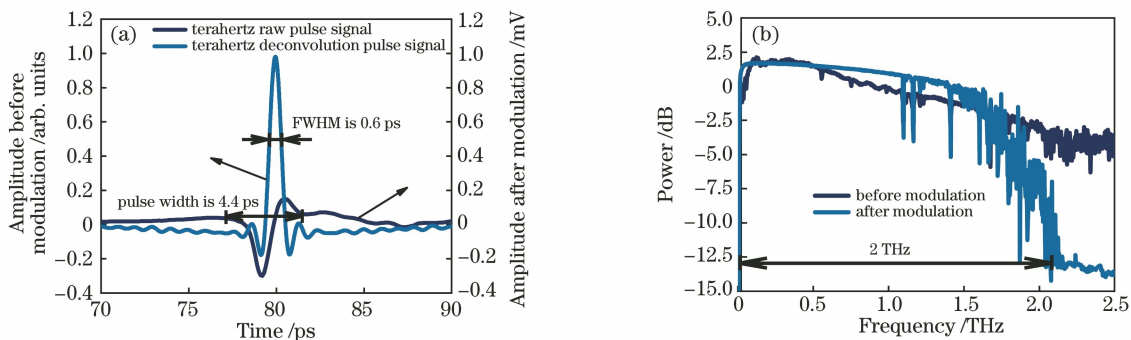


图 2 太赫兹脉冲信号调制前后的结果。(a)在时域；(b)在频域

Fig. 2 Results before and after modulation of terahertz pulse signal. (a) In time-domain; (b) in frequency-domain

#### 3.2 玻璃增强纤维复合材料的几何模型

玻璃钢作为一种理化性能良好的复合材料，被广泛用于民生、军工等领域。如图 3 所示，玻璃纤维在轴向和径向上进行分层缠绕并同时涂抹大量黏接剂，经过一定时间后固化形成玻璃钢。受缠绕工艺以及黏接工艺的影响，玻璃钢内部在应变影响下易发生分层或脱粘现象。

玻璃钢材料中存在的典型缺陷是脱粘缺陷和分

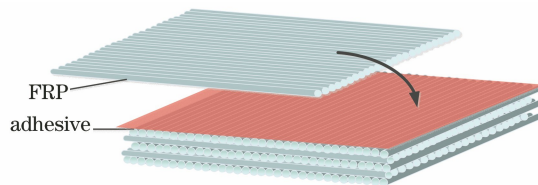


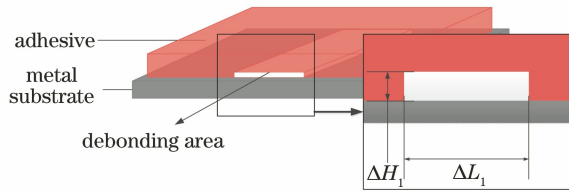
图 3 玻璃钢制作结构图

Fig. 3 Structural drawing of FRP production

层缺陷。其中，脱粘缺陷是指玻璃纤维与黏接剂之

间的空气间隙。分层缺陷指的是缠绕时由于缠绕工艺的问题,轴向、径向面板之间发生分离<sup>[21-22]</sup>。通常来说,分层缺陷的尺寸要大于脱粘缺陷的尺寸。进行理论分析时,对模型进行简化并建立两种太赫兹脉冲仿真模型。脱粘模型及分层模型的建模方法如下。

如图4(a)所示,黏接剂基体厚度为1 mm,黏接剂与金属基板连接处有一个厚度为 $\Delta H_1$ 、长度为



$\Delta L_1$  的脱粘缺陷。缺陷空气间隙  $\Delta H_1$  分别取 0, 60, 100, 200  $\mu\text{m}$ , 长度  $\Delta L_1 = 0.8 \text{ mm}$ 。如图4(b)所示,玻璃钢基体厚度为1 mm,在距离上表面300  $\mu\text{m}$ 处,设置单层分层模型中的分层缺陷厚度为  $\Delta H_2 = 80 \mu\text{m}$ ; 长度为  $\Delta L_2 = 0.8 \text{ mm}$ ; 在距离上表面300  $\mu\text{m}$ 和600  $\mu\text{m}$ 处,分别设置双层分层模型的分层缺陷,缺陷空气间隙厚度均为  $\Delta H_2 = 80 \mu\text{m}$ ,长度均为  $\Delta L_2 = 0.8 \text{ mm}$ 。

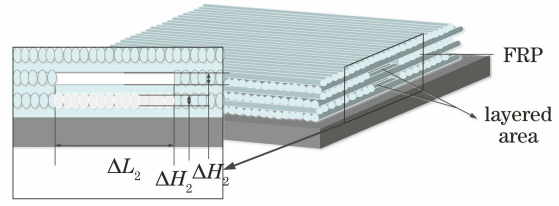


图4 太赫兹脉冲仿真检测几何模型。(a)脱粘缺陷的几何模型;(b)分层缺陷的几何模型

Fig. 4 Geometric model for THz pulse simulation detection. (a) Geometric model of debonding defects; (b) geometric model of delamination defects

### 3.3 材料光学参数模型

在电磁场中,不同材料的光学特性通常用复折射率表征,复折射率表示为  $\tilde{n}(\omega) = n(\omega) - i\kappa(\omega)$ , 其中  $n(\omega)$  为随频率变化的折射率,  $\kappa(\omega)$  为随频率变化的消光系数。本文使用的太赫兹源光谱范围为 0.1~2.0 THz, 在 0.1~2.0 THz 区间材料的复折射率随着频率的变化而变化<sup>[23]</sup>。在仿真过程中,采用真实材料的光学参数来提高仿真准确性。采用透射式太赫兹时域光谱仪,分别检测未放置样品及放置样品时的太赫兹时域信号,并将其进行傅里叶变换,采用基于单纯形法的光学参数测定方法,对材料的光学参数进行测定<sup>[24]</sup>。

德拜模型一般用于描述固体的色散效应。德拜模型使用复介电系数进行描述,复介电系数表示为  $\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon' - i\epsilon''$ ,  $\epsilon'$  为复介电系数的实部,  $\epsilon''$  为复介电系数的虚部。二级德拜模型展开可表述为

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_2}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_2}, \quad (5)$$

式中:  $\epsilon_2$  为中间频率介电常数;  $\epsilon_s$  为低频时的静态介电常数;  $\epsilon_\infty$  为频率趋近于无穷时的静态介电常数;  $\tau_1, \tau_2$  为弛豫时间。

本文利用德拜模型描述材料在太赫兹波段的色散情况,将原有的介电系数直接表述为复折射率,即

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = [\tilde{n}(\omega)]^2 = [n(\omega) - i\kappa(\omega)]^2, \quad (6)$$

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_2}{1 + (\omega\tau_1)^2} + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_\infty}{1 + (\omega\tau_2)^2} = [n(\omega)]^2 - \frac{[\alpha(\omega)]^2 c^2}{4\omega^2}, \quad (7)$$

$$\epsilon''(\omega) = \omega\tau_1 \frac{\epsilon_s - \epsilon_2}{1 + (\omega\tau_1)^2} + \omega\tau_2 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_\infty}{1 + (\omega\tau_2)^2} = \frac{\alpha(\omega)n(\omega)c}{\omega}, \quad (8)$$

式中:  $\alpha(\omega)$  为材料的吸收系数;  $c$  为真空中的光速。利用测定的实际参数,对德拜模型中的各个参数进行优化拟合,得到的拟合曲线能够充分反映所给实验数据点的变化趋势<sup>[25-26]</sup>。实验数据及仿真使用的拟合曲线如图5所示。

## 4 结果及分析

使用时域有限差分方法进行反射式太赫兹传播模拟仿真研究时,光波遇到介质分界面会发生折射、反射等现象。利用横电(TE)模式<sup>[27]</sup>,在二维笛卡尔坐标系下模拟太赫兹波与不同介质的相互作用。在仿真中,边界条件采用完全匹配层(PML)模式,利用吸收边界对电磁场仿真边界进行吸收截断处理。以3.1节的建模光源为激励源,太赫兹脉冲均正入射到检测介质表面上,介质参数及建模方法均采用3.2节、3.3节中的物理模型。时域观察点设置在紧邻光源后端。

### 4.1 脱粘缺陷的仿真计算结果

黏接剂脱粘模型的太赫兹检测光路图如图6所示,其中图6(a)为无脱粘缺陷光路图,图6(b)为有脱粘缺陷光路图。脱粘缺陷  $\Delta H_1$  分别取 0, 60, 100, 200  $\mu\text{m}$ 。脱粘缺陷均为微米量级,传播过程中会产生大量二次回波及高次回波。太赫兹波在图6(a)所示的无缺陷胶层模型中传播时,太赫兹波从



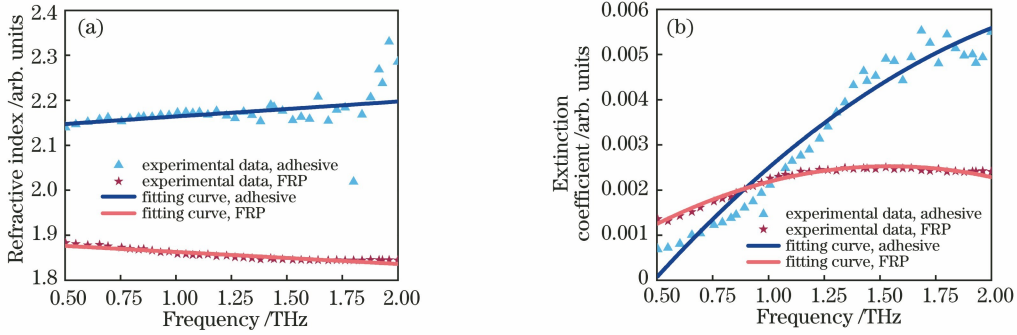


图 5 光学参数曲线。(a)折射率曲线;(b)消光系数曲线

Fig. 5 Optical parameter curves. (a) Refractive index curve; (b) extinction coefficient curve

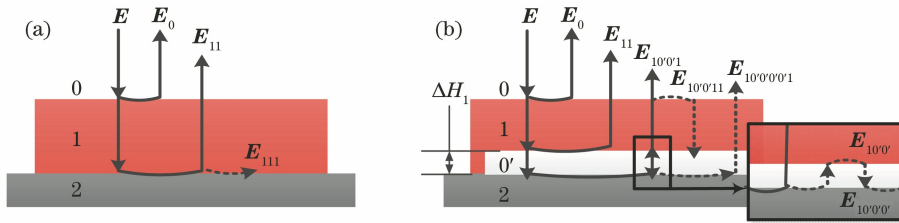


图 6 黏接剂脱粘模型的太赫兹脉冲仿真光路图。(a)无脱粘缺陷;(b)有脱粘缺陷

Fig. 6 Optical path map for terahertz pulse simulation with adhesive debonding model.

(a) Without debonding defects; (b) with debonding defects

空气介质 0 中穿过胶层 1、金属基底 2 两层介质。太赫兹波初始电场信号为  $E$ ，被黏接剂上表面反射到空气中的电场信号为  $E_0$ ，被金属板上表面反射的电场信号为  $E_{11}$ ，二次回波为  $E_{111}$ ，依次类推。太赫兹波在图 6(b)所示的缺陷胶层模型中传播时，太赫兹波从空气介质 0 穿过胶层 1、空气间隙  $0'$ 、金属基底 2 三层介质，与图 6(a)所示模型不同，脱粘缺陷介质为空气，空气折射率为 1、吸收系数为 0，太赫兹波在空气间隙内不衰减，发生多次振荡反射后产生多种高次回波。

脱粘模型的仿真结果如图 7 所示。其中仿真区域大小为  $5 \text{ mm} \times 7.7 \text{ mm}$ ，网格步长为  $\Delta x = \Delta y = 1.5 \text{ }\mu\text{m}$ ，时间步长  $\Delta t = 2.5 \text{ fs}$ ，FDTD 中 Yee 元胞总数为  $7.99829 \times 10^6$ 。受时域有限差分算法中 PML 截断边界条件的影响，每个边界截断边缘处均会产生边界衍射效应，具体表现为图 7 所示的波形变化。

图 7 中 B-Scan 图色度条反映了反射信号的强度，其中最强信号是有脱粘缺陷时金属基底分界面处的主脉冲，分别在 72.09, 71.74, 71.52, 70.94 ps 处出现。不同厚度脱粘缺陷在 B-Scan 图中得到清晰表征。如图 7(b)、(c)、(d) 所示，分别在 71.34, 70.85, 69.59 ps 处出现了最弱信号，B-Scan 图清晰展示了缺陷处的位置。

图 7(a)为无缺陷时的仿真结果，在空气-黏接剂

分界面 (59.69 ps)、黏接剂-金属基底分界面 (72.09 ps) 处均产生反射回波。在金属基底分界面处产生强反射信号后，还出现一些明显的振荡现象，这是多次反射现象，二次回波包括  $E_{10'0'1}$ 、 $E_{10'0'0'}$ 。

图 7(b)为  $\Delta H_1 = 60 \text{ }\mu\text{m}$  的脱粘缺陷仿真结果，在空气-黏接剂分界面 (59.69 ps)、黏接剂-缺陷分界面 (71.33 ps)、缺陷-金属基底分界面 (71.74 ps) 处均产生反射回波。由于黏接剂与金属基底间的  $60 \text{ }\mu\text{m}$  脱粘缺陷过薄，反卷积处理后太赫兹脉冲从光密介质入射到光疏介质产生的谷值与有脱粘缺陷时金属基底的主脉冲左旁瓣重叠，且太赫兹波在过薄的空气间隙中发生多次反射，造成脉冲右旁瓣多次振荡， $E_{10'0'}$ 、 $E_{10'0'1}$ 、 $E_{10'0'11}$  处的小脉冲均为高次反射回波。

图 7(c)为  $\Delta H_1 = 100 \text{ }\mu\text{m}$  的脱粘缺陷仿真结果，在空气-黏接剂分界面 (59.69 ps)、黏接剂-缺陷分界面 (70.86 ps)、缺陷-金属基底分界面 (71.52 ps) 处均产生反射回波。主脉冲左旁瓣与黏接剂-空气间隙的反射回波谷值仍重叠，但随着缺陷厚度的增大，主脉冲左旁瓣与黏接剂-空气间隙的反射回波谷值的分离趋势越加明显，脉宽增加，幅值变低。高次反射回波发生在  $E_{10'0'}$ 、 $E_{10'0'0'}$ 、 $E_{10'0'1}$ 、 $E_{10'0'0'0'1}$ 、 $E_{10'0'11}$  处。

图 7(d)为  $\Delta H_1 = 200 \text{ }\mu\text{m}$  的脱粘缺陷仿真结果，在空气-黏接剂分界面 (59.69ps)、黏接剂-缺陷

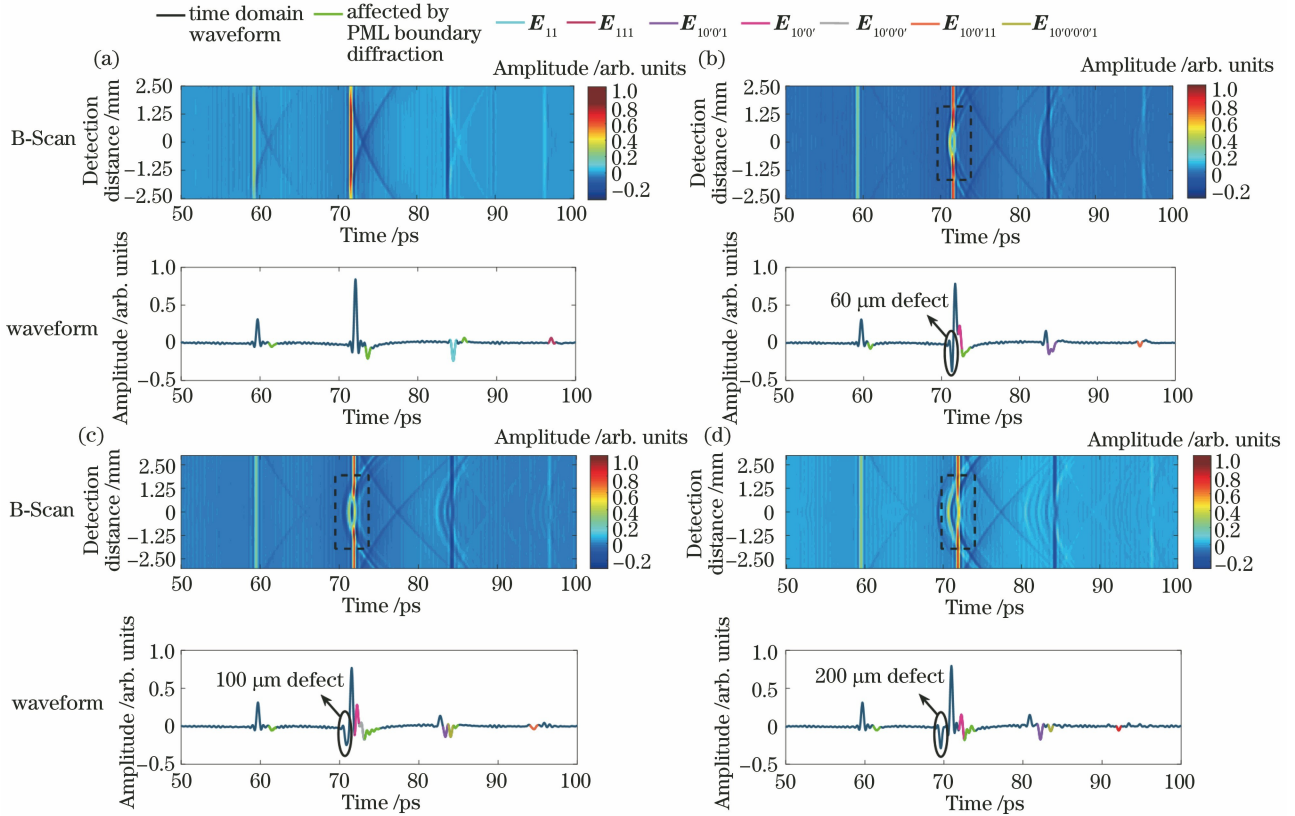


图 7 脱粘缺陷的太赫兹脉冲仿真结果。(a) 无缺陷；(b)  $\Delta H_1 = 60 \mu\text{m}$  的脱粘缺陷；(c)  $\Delta H_1 = 100 \mu\text{m}$  的脱粘缺陷；(d)  $\Delta H_1 = 200 \mu\text{m}$  的脱粘缺陷

Fig. 7 THz pulse simulation results with debonding defects. (a) No defects; (b) debonding defects with  $\Delta H_1 = 60 \mu\text{m}$ ; (c) debonding defects with  $\Delta H_1 = 100 \mu\text{m}$ ; (d) debonding defects with  $\Delta H_1 = 200 \mu\text{m}$

分界面(69.6 ps)、缺陷-金属基底分界面(72.3 ps)处均产生反射回波。由于脱粘缺陷厚度的增加,缺陷的反射回波谷值与主脉冲左旁瓣发生明显的分离。 $E_{10'0'}$ 、 $E_{10'0'0'}$ 、 $E_{10'0'0'0'1}$ 、 $E_{10'0'11}$  处产生的脉冲均为高次反射回波。

#### 4.2 分层缺陷的数值仿真计算结果

玻璃钢分层模型的太赫兹检测光路图如图 8 所示,其中图 8(a)为无缺陷光路图,图 8(b)、(c)为单层、双层缺陷光路图。分层缺陷均为  $\Delta H_2 = 80 \mu\text{m}$  的缺陷,微米量级分层缺陷在传播过程中会导致大量高次反射回波的产生。太赫兹波在图 8(a)所示玻璃钢模型中从空气 0 中传播经过玻璃钢 3 和金属基底 2。玻璃钢上表面反射回空气中的电场信号为  $E_0$ ,金属板上表面反射的电场信号为  $E_{11}$ 。在图 8(b)中,太赫兹波从空气 0 中开始传播,经过玻璃钢 3、空气间隙 0'、玻璃钢 3、金属基底 2 四层介质。与图 8(a)不同的是,图 8(b)中太赫兹波穿过单层空气缺陷,即分层缺陷下表面反射的电场信号为  $E_{30'0'3}$ 、金属板上表面反射的电场信号为  $E_{30'33}$ 。太

赫兹波在空气间隙内发生多次振荡反射,产生多种高次反射回波。在图 8(c)中,太赫兹波从空气 0 中开始传播,经过玻璃钢 3、空气间隙 0'、玻璃钢 3、空气间隙 0'、玻璃钢 3、金属基底 2 六层介质。与图 8(b)不同的是,图 8(c)中太赫兹波依次穿过双层分层缺陷,即下层分层缺陷下表面反射的电场信号为  $E_{30'30'0'}$ 、金属板上表面反射的电场信号为  $E_{30'30'33}$ 。在双层分层缺陷内均产生多种高次反射回波。

在分层模型中,使用与脱粘模型相同的仿真参数设置,仿真结果如图 9 所示。

如图 9 B-Scan 图所示,最强信号为玻璃钢-金属基底分界面处的主脉冲,分别在 74.14, 73.51, 72.88 ps 处出现。如图 9(b)所示,玻璃钢分层为单层时,在 63.45 ps 处信号强度最低,63.45~63.94 ps 为太赫兹波穿过单层分层缺陷所需要的飞行时间。如图 9(c)所示,玻璃钢分层为两层时,在 63.46 ps 及 67.19 ps 处信号强度最低,63.46~63.95 ps 及 67.19~67.66 ps 为太赫兹波分别穿过两层分层缺陷所需要的飞行时间。

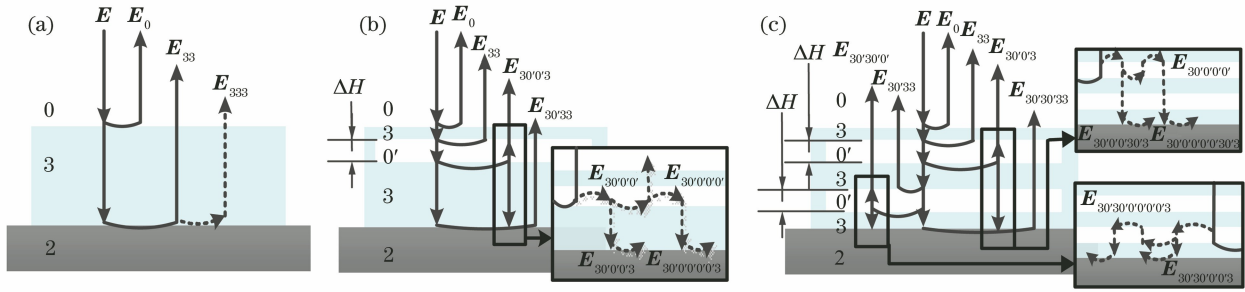


图 8 玻璃钢分层模型的太赫兹脉冲仿真光路图。(a)无缺陷;(b)一层分层缺陷;(c)两层分层缺陷  
Fig. 8 Optical path for THz pulse simulation with FRP delamination model. (a) No defects;  
(b) one layered delamination defects; (c) two layered delamination defects

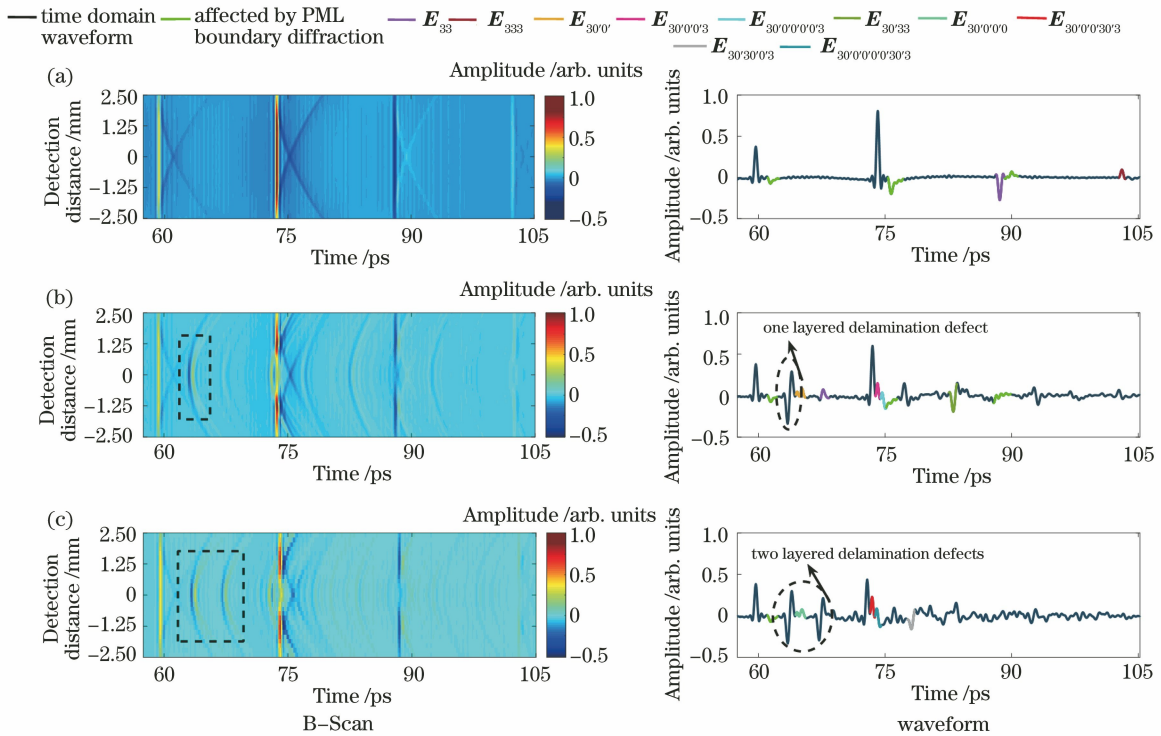


图 9 分层缺陷的太赫兹脉冲仿真结果。(a)无缺陷;(b)  $\Delta H_2 = 80 \mu\text{m}$  的一层分层缺陷;(c)  $\Delta H_2 = 80 \mu\text{m}$  的两层分层缺陷  
Fig. 9 THz pulse simulation results with delamination defects. (a) No defects; (b) one layered delamination defect with  $\Delta H_2 = 80 \mu\text{m}$ ; (c) two layered delamination defects with  $\Delta H_2 = 80 \mu\text{m}$

图 9(a)为玻璃钢无分层缺陷时的仿真结果,在空气-玻璃钢分界面(59.68 ps)、玻璃钢-金属基底分界面(74.14 ps)处均产生反射回波。主脉冲后的脉冲  $E_{33}$ 、 $E_{333}$  均为二次反射回波。

图 9(b)为玻璃钢中单层分层缺陷的仿真结果,在空气-玻璃钢分界面(59.68 ps)、玻璃钢-金属基底分界面(73.51 ps)处均产生反射回波。在 63.45 ps 和 64.94 ps 处出现“一谷一峰”,这是因为玻璃钢的分层缺陷的上下表面分界面处回波发生了幅值、相位变化。在 67.67 ps 处出现峰值,这是由于玻璃钢厚度大于分层缺陷厚度,太赫兹波传播到分层缺陷时,光波发生反射的时刻要早于太赫兹继续传播到

金属基底发生反射的时刻,导致在时域上二次反射  $E_{33}$  比玻璃钢-金属基底分界面处的回波早产生。在分层缺陷中,多次振荡反射产生多种高次反射回波,进而使许多脉冲发生重叠或相消。 $E_{30'0'0'3}$ 、 $E_{30'0'0'0'3}$  处的脉冲均为高次反射回波。

图 9(c)为玻璃钢中两层分层缺陷的仿真结果,在空气-玻璃钢分界面(59.68 ps)、玻璃钢-金属基底分界面(72.88 ps)处均产生反射回波。玻璃钢中分层的玻璃纤维有两层时,在 63.46 ps、63.95 ps 及 67.19 ps、67.66 ps 处均出现“一谷一峰”,这是因为上下两层玻璃钢分层缺陷的上下表面分界面回波发生了幅值和相位变化。在两层分层缺陷结构中,发

生的多次振荡反射产生了大量高次反射回波,进而使许多脉冲发生重叠或相消,造成整体波形出现不规则形态。 $E_{30^{\circ}0'0'30^{\circ}3}$ 、 $E_{30^{\circ}0'0'0'30^{\circ}3}$ 、 $E_{30^{\circ}30^{\circ}33}$  处的脉冲均为高次反射回波。

## 5 结 论

基于时域有限差分方法,研究了玻璃纤维增强复合材料两种典型缺陷结构的太赫兹波传播特性。采用脉宽调制后的太赫兹脉冲激励源作为输入光源,使用德拜模型对材料实测太赫兹波段光学参数进行拟合优化并将其作为材料输入参数。基于时域有限差分法,对太赫兹波在玻璃纤维增强复合材料胶接缺陷结构中的传播特性进行了数值仿真分析,重点从时域波形及 B-Scan 成像两方面分析了太赫兹波在胶接缺陷结构中的传播过程以及高次回波的成因。该模型为玻璃纤维增强复合材料两种典型缺陷的太赫兹脉冲无损检测和评估提供了理论支撑,可明确判定微米量级缺陷的波形并区分高次回波波形与噪声波形,为实际玻璃纤维增强复合材料无损检测的波形分析提供了借鉴。

## 参 考 文 献

- [1] Lee Y S. Principles of terahertz science and technology[M]. New York: Springer, 2009: 259-294.
- [2] Vandrevalla F, Einarsson E. Decoupling substrate thickness and refractive index measurement in THz time-domain spectroscopy[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1697-1702.
- [3] Cai H, Guo X J, He T, et al. Terahertz wave and its new applications[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(3): 209-222.  
蔡禾, 郭雪娇, 和挺, 等. 太赫兹技术及其应用研究进展[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(3): 209-222.
- [4] Gowen A A, O' Sullivan C, O' Donnell C P. Terahertz time domain spectroscopy and imaging: Emerging techniques for food process monitoring and quality control [J]. Trends in Food Science & Technology, 2012, 25(1): 40-46.
- [5] Xing L Y, Cui H L, Shi C C, et al. Nondestructive examination of polymethacrylimide composite structures with terahertz time-domain spectroscopy [J]. Polymer Testing, 2017, 57: 141-148.
- [6] Wang Q, Li X Y, Chang T Y, et al. Nondestructive imaging of hidden defects in aircraft sandwich composites using terahertz time-domain spectroscopy [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 97: 326-340.
- [7] Li T J, Sun Y, Shao G F, et al. Terahertz nondestructive detection method of ceramic matrix composites[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061101.  
李铁军, 孙跃, 邵桂芳, 等. 陶瓷基复合材料的太赫兹无损检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061101.
- [8] 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.
- [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] 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.
- [11] Kim D H, Ryu C H, Park S H, et al. Nondestructive evaluation of hidden damages in glass fiber reinforced plastic by using the terahertz spectroscopy[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2017, 4(2):211-219.
- [12] Jin J M. The finite element method in electromagnetics[M]. New York: Wiley, 2002: 89-230.
- [13] Sundberg G. Numerical modeling of electromagnetic scattering in explosive granular media[D]. Portland: Portland State University, 2010: 36-139.
- [14] Lopato P, Chady T. Time reversal pulsed terahertz inspection of dielectric structures [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, 39(1): 427-433.
- [15] Lopato P, Chady T, Sikora R, et al. Full wave numerical modelling of terahertz systems for nondestructive evaluation of dielectric structures[J]. COMPEL, 2013, 32(3): 736-749.
- [16] Zhang C, Ninkov Z, Greg F, et al. Optical simulation of terahertz antenna using finite difference time domain method[J]. Proceeding of SPIE, 2015, 9483: 94830D.
- [17] Tu W L, Zhong S C, Shen Y C, et al. Nondestructive testing of marine protective coatings using terahertz waves with stationary wavelet



- transform[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 582-592.
- [18] Schneider J B, Wagner C L, Kruhlak R J. Simple conformal methods for finite-difference time-domain modeling of pressure-release surfaces [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 104(6): 3219-3226.
- [19] 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): 185-190.  
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): 185-190.
- [20] Lu T, Li X J, Mao H Y, et al. Photoacoustic tomography with Wiener filter deconvolution algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1854-1857.  
卢涛, 李秀娟, 毛慧勇, 等. 基于维纳滤波反卷积的光声成像[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1854-1857.
- [21] Im K H, Lee K S, Yang I Y, et al. Advanced T-ray nondestructive evaluation of defects in FRP solid composites [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(6): 1093-1098.
- [22] Ospald F, Zouaghi W, René B G, et al. Aeronautics composite material inspection with a terahertz time-domain spectroscopy system [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(3): 031208.
- [23] 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.
- [24] Zhang D D, Ren J J, Li L J, et al. Terahertz time-domain spectroscopy method for optical parameter extraction of plastic materials [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2017, 15(6): 916-920.
- [25] Truong B C Q, Tuan H D, Kha H H, et al. Debye parameter extraction for characterizing interaction of terahertz radiation with human skin tissue[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2013, 60(6): 1528-1537.
- [26] Willis K, Knezevic I, Hagness S C. A generalized Drude model for doped silicon at THz frequencies derived from FDTD/EMC/MD simulations [C] // 2013 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium), July 7-13, 2013, Lake Buena Vista, FL, USA. New York: IEEE, 2013: 14043668.
- [27] Yang Y D, Huang Y Z, Chen Q. Comparison of Q-factors between TE and TM modes in 3-D microsquares by FDTD simulation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(22): 1831-1833.