

基于多次回波数值模拟的涂层缺陷太赫兹无损检测

顾健¹, 任姣姣^{1,2}, 张丹丹^{1,2}, 张霁旸^{1,2}, 李丽娟^{1,2*}

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528437

摘要 当涂层粘接缺陷厚度过小时, 缺陷的太赫兹时域光谱信号与基体反射信号产生混叠, 难以从主脉冲信号中获取有效的粘接缺陷特征。通过构建基于传输矩阵法的薄涂层粘接缺陷太赫兹传播仿真模型, 对太赫兹波在涂层粘接缺陷结构中的传播特性进行数值仿真分析。结合仿真结果和实际检测信号, 提出基于多次回波特征的涂层粘接缺陷识别方法, 利用缺陷太赫兹信号偏度特征进行成像, 准确识别厚度为 50 μm 和 80 μm 的涂层样品中预置的 10 μm 和 15 μm 粘接缺陷, 平均识别准确率达 95.2%。

关键词 测量; 涂层; 粘接缺陷; 偏度成像; 太赫兹时域光谱; 无损检测

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1512007

Terahertz Nondestructive Testing of Coating Defects Based on Multiple Echoes Numerical Simulation

Gu Jian¹, Ren Jiaojiao^{1,2}, Zhang Dandan^{1,2}, Zhang Jiyang^{1,2}, Li Lijuan^{1,2*}

¹School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528437, Guangdong, China

Abstract It is difficult to obtain effective bonding defects characteristics from the main echo of terahertz pulse when the defect thickness is too small, because the terahertz time-domain pulse carrying the defect information overlaps with the reflection pulse from the substrate. To this end, a terahertz propagation model based on transfer matrix method is established. The model is used to numerically analyze the propagation characteristics of terahertz pulse in the bonding defects of thin coating. Combined with the terahertz time-domain simulation results of coating bonding defects, a method for identifying coating bonding defects based on multiple echo features is proposed, and the skewness characteristic of defect signal is used to construct terahertz image. The 10- and 15- μm -thick bonding defects preset in 50- and 80- μm -thick coatings are identified successfully with an average recognition accuracy of 95.2%.

Key words measurement; coating; bonding defect; skewness imaging; terahertz time-domain spectroscopy; nondestructive testing

1 引言

涂层材料被广泛应用于汽车、船舶制造、压力容器及航空航天领域, 达到保护、绝缘或装饰等目的。受喷涂质量环境因素影响, 涂层的物理或化学性能发生改变, 导致涂层与基体的粘接性能下降, 出现起泡、分层甚至脱落等问题^[1]。随着涂层服役时间增加, 粘接缺

陷会不断扩展, 最终导致涂层完全失效。因此, 采用行之有效的技术手段对涂层粘接缺陷进行检测十分必要。

太赫兹波指频率在 0.1~10 THz (1 THz=10¹² Hz) 范围内 (波长为 30~3000 μm) 的电磁波。太赫兹波对于大多数非金属材料具有良好的穿透性, 太赫兹无损检测技术已成为一种新兴的无损检测技术。

收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-04-23; 录用日期: 2022-05-10

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目 (JKH20210823KJ)

通信作者: *custjuan@163.com

与传统无损检测方法(如超声、红外热波、涡流、X射线等)相比,太赫兹无损检测无需耦合剂、无需接触被测物^[2],对环境对人体安全无害^[3],在玻璃纤维复合材料^[4-6]、陶瓷基复合材料^[7]、多胶接结构粘接缺陷^[8-9]等材料的无损检测方面得到了广泛应用。在涂层厚度太赫兹无损检测方面,国内研究学者提出多种模型迭代优化算法^[10-12]实现对单层及多层涂层厚度的精确测量。在涂层缺陷的太赫兹无损检测方面,美国空军研究实验室在 2019 年将太赫兹检测技术应用于飞机涂层在线质量监测,为飞机涂层的应用提供了有效保证^[13]。Catapano 等^[14]对飞机防冰涂层进行检测,采用时域层析技术测量了涂层厚度并成功识别了涂层表面划痕缺陷。Tu 等^[15-16]构建了基于时域有限差分(FDTD)的船舶涂层传播仿真模型,提取了涂层气孔和隐藏腐蚀缺陷的太赫兹时域特征。徐亚军等^[17]对制备的掺杂环氧树脂的功能材料中的气孔缺陷进行检测,通过对比材料吸收谱实现了涂层气孔缺陷的识别。李迎等^[18]采用太赫兹时域光谱技术对涂层中厚度大于 0.6 mm 的气泡缺陷进行定量检测,准确获得了缺陷大小和厚度。叶东东等^[19]针对热障涂层中的平行裂纹缺陷进行检测并获得了裂纹缺陷的位置及尺寸信息。目前,受到太赫兹信号分辨率限制,当粘接缺陷厚度过小时,界面间反射信号将发生“重合”,掩盖了缺陷信号特征,使得难以从主脉冲信号中提取有效的缺陷信息,为涂层的粘接缺陷检测带来挑战。

本文采用传输矩阵法(TMM)建立涂层粘接缺陷

太赫兹传播模型,研究不同涂层厚度和不同粘接缺陷厚度的太赫兹时域信号表征,提取太赫兹信号二次回波中涂层粘接缺陷有效特征。采用太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)对制作的涂层样件进行检测,成功识别涂层样件中预置的 15 μm 和 10 μm 粘接缺陷。

2 样件制备与检测

2.1 涂层缺陷样品制备

为了模拟涂层粘接缺陷,在金属基体上预先喷涂一种低密度环氧树脂漆,用于模拟涂层与基体间出现的空气间隙。如图 1(a)所示,在 60 mm \times 60 mm 喷涂区域内分别预置 10 mm \times 10 mm 及 20 mm \times 20 mm 的两个缺陷,缺陷厚度分别设置为 10 μm 和 15 μm 。待预置缺陷完全固化后,采用空气加压喷涂方式将涂料涂敷于金属基体,所用涂层为环氧树脂涂料,主要应用于汽车、飞机等涂层的色漆层,最终得到如图 1(b)所示的涂层结构,图中蓝色区域为喷涂的涂层。

设计并制作了两个不同涂层厚度和缺陷厚度的涂层样本,制备的涂层样品实物如图 2 所示。受喷涂精度及涂层固化收缩等因素影响,制备的涂层样品厚度与设计尺寸存在偏差。使用千分尺分别对金属基体、预置缺陷及外涂层的厚度进行测量,以获得准确的预置缺陷及外涂层厚度。为了减少测量随机误差,选取喷涂区域中不同位置进行 5 次厚度测量,并采用 5 次测量的平均值作为最终厚度测量结果。涂层样件设计尺寸及测量数据如表 1 所示。

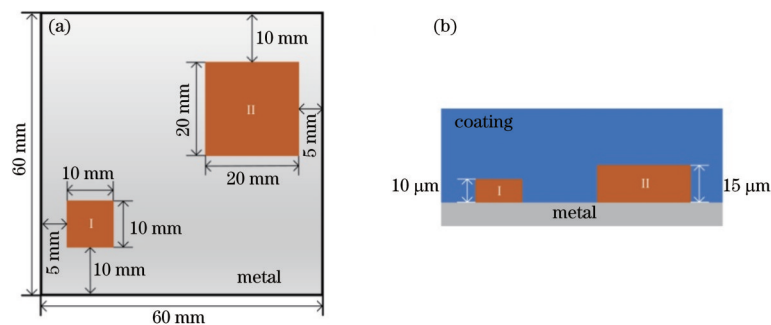


图 1 预置粘接缺陷及涂层样件结构示意图。(a)金属基底上预置粘接缺陷;(b)预置粘接缺陷涂层样件结构

Fig. 1 Structure diagram of preset defects and coating sample. (a) Preset defects on metal; (b) structure of coating sample with defects

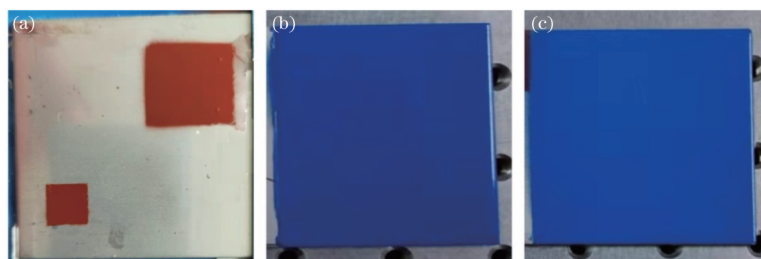


图 2 涂层样品实物图。(a)预置粘接缺陷;(b)1#涂层样品;(c)2#涂层样品

Fig. 2 Photos of coating samples. (a) Preset defects; (b) sample 1#; (c) sample 2#

2.2 检测系统

本文所采用的反射式 THz-TDS 测量系统如图 3(a)所示。采用钛蓝宝石飞秒激光器产生波长为

1560 nm、重复频率 100 MHz、脉冲持续时间 50 fs 的超快激光脉冲。采用色散补偿模块对光纤传输产生的色散进行补偿,以获得更窄的脉冲宽度。经光纤分束器

表 1 涂层样品及缺陷信息
Table 1 Information of coating samples and defects

Sample	Coating thickness (design) / μm	Coating thickness (measurement) / μm	Defect size / mm	Defect thickness (design) / μm	Defect thickness (measurement) / μm
1#	80	78	10×10	10	12
			20×20	15	17
2#	50	46	10×10	10	9
			20×20	15	16

分为探测脉冲和泵浦脉冲。时间延迟线用于调整泵浦脉冲与探测脉冲之间的光程差,泵浦脉冲通过激发砷化镓光电导天线(PCA)产生太赫兹波,其频谱范围为 0~5 THz,频谱分辨率为 6.25 GHz,时间分辨率 0.1 ps,快速扫描范围 320 ps,信噪比大于 60 dB 的频谱范围介于 0.1~2 THz 之间。发射器发射太赫兹波,反射信号经半反半透镜被探测器接

收,经锁相放大器获取探测的脉冲信号并由电脑记录。

采用图 3(b)所示反射式太赫兹二维平面扫查系统对制作的涂层样件进行逐点扫描,扫描步距为 0.5 mm,探测器焦距 3 inch(1 inch=2.54 cm)并聚焦到涂层金属基体表面。实验在温度 24.3℃、相对湿度 36.7% 的环境中进行。

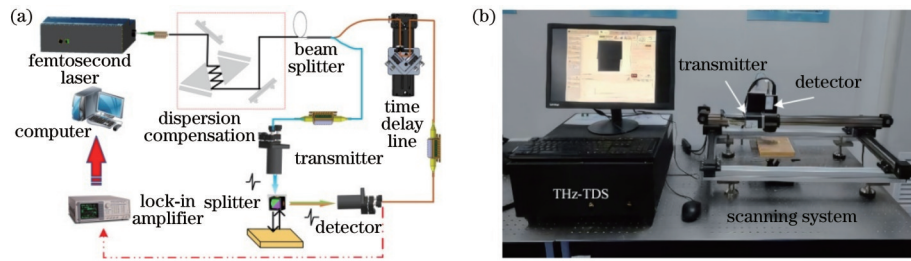


图 3 反射式太赫兹时域光谱系统原理及实物图。(a)反射式太赫兹时域光谱系统原理图;
(b)太赫兹时域光谱系统及扫查系统实物图

Fig. 3 Schematic diagram and photo of reflection-type THz-TDS system. (a) Schematic of reflection-type THz-TDS system;
(b) photo of THz-TDS and scanning system

3 数值仿真与分析

3.1 传输矩阵法

传输矩阵法是一种有效的光学建模方法,广泛应用于薄膜光学仿真,可以实现能带图、反射及透射

谱^[20]、发射谱^[21]等计算。太赫兹波在多层介质中的传播过程如图 4 所示,太赫兹波在每个介质界面发生反射和透射。图 4 中符号 + 表示入射电场强度, - 表示出射电场强度。

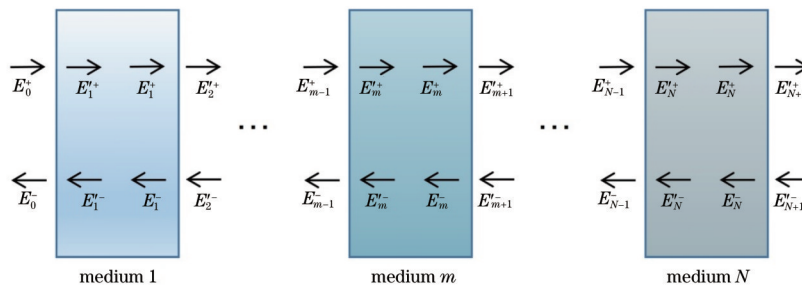


图 4 太赫兹波在多层介质中的传播模型

Fig. 4 Propagation model of terahertz wave in multilayer media

TMM 法采用 2 阶菲涅耳系数矩阵和传播矩阵描述太赫兹波在材料中的正向和反向传播过程^[22]。菲涅耳系数矩阵 F 表征界面间的反射率和透射率,传播矩阵 P 表征相位变化,表达式如下:

$$F_{m-1,m} = \frac{1}{t_{m-1,m}} \begin{bmatrix} 1 & r_{m-1,m} \\ r_{m-1,m} & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$P_{m-1} = \begin{bmatrix} \exp(-i\delta_{m-1}) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_{m-1}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $t_{m-1,m} = 2n_{m-1}/(n_{m-1} + n_m)$ 为透射系数; $r_{m-1,m} = (n_{m-1} - n_m)/(n_{m-1} + n_m)$ 为反射系数; $\delta_{m-1} = \omega \tilde{n}_{m-1} d_{m-1}/c$ 为相移,其中 ω 为角频率, \tilde{n}_{m-1} 为第 $m-1$

1 层介质的复折射率, d_{m-1} 为第 $m-1$ 层介质物理厚度, c 为真空中光速。

对于图 3 所示的 $N+1$ 层结构, 其传输矩阵可表示为

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = F_0^{-1} \left[\prod_{m=1}^N F_m P_m F_m^{-1} \right] F_{N+1} \begin{pmatrix} E_{N+1}^+ \\ E_{N+1}^- \end{pmatrix} \quad (3)$$

由于菲涅耳系数矩阵和传播矩阵均为二阶方阵, 因此式(3)可以简化为

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{N+1}^+ \\ E_{N+1}^- \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中: T_{11} 、 T_{12} 、 T_{21} 、 T_{22} 为对应的等价矩阵系数。

由式(4), 可将此 $N+1$ 层结构等效为一个反射系数为 r 及透射系数为 t 的单层介质, 等效的反射系数和透射系数表达式如下:

$$r = \frac{E_0^-}{E_0^+} \Big|_{E_{N+1}^- = 0} = \frac{T_{21}}{T_{11}}, \quad (5)$$

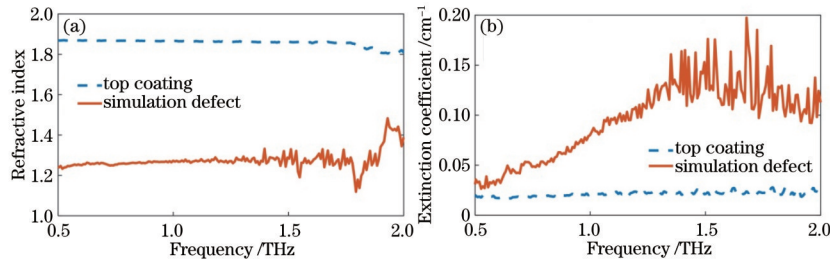


图 5 涂层在太赫兹频段的光学参数。(a) 折射率; (b) 消光系数

Fig. 5 Optical parameters of the coating at terahertz band. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

太赫兹波在涂层中传播过程如图 6 所示, 其中图 6(a) 为太赫兹波在无缺陷涂层中传播示意图, 图 6(b) 为太赫兹波在含粘接缺陷涂层中传播示意图。当不存在粘接缺陷时, 入射太赫兹波 E 在空气介质 1 与涂层介质 2 的界面处产生反射信号 E_{12} , 并在涂层介质 2 与基体介质 4 的界面处产生反射信号 E_{24} 。由于涂层非

$$t = \frac{E_{N+1}^+}{E_0^+} \Big|_{E_{N+1}^- = 0} = \frac{1}{T_{11}}. \quad (6)$$

由式(5), 涂层的太赫兹反射时域信号 E_{sim} 可由入射光场 E_0^+ 与等效反射系数 r 在频域乘积的逆傅里叶变换得到:

$$E_{sim} = F_{\text{ifFT}} [r(\omega) \cdot E_0^+(\omega)]. \quad (7)$$

3.2 涂层粘接缺陷数值仿真分析

为了对涂层粘接缺陷进行数值仿真, 需先获得材料在太赫兹波段的光学参数。采用 Advantest 公司型号为 TAS7500U 的太赫兹时域光谱仪对本文所用涂层材料进行测试, 光谱仪有效频率范围为 0.5~7 THz。涂层光学参数测试结果如图 5 所示。由于材料对太赫兹波的吸收作用, 使光学参数有效频率范围降低至 0.5~2 THz。在有效频率范围内, 表面涂层平均折射率为 1.87, 模拟缺陷涂层平均折射率为 1.24。

常薄, 太赫兹波在涂层中传播时产生多次反射信号 E'_{24} 。当存在粘接缺陷时, 涂层与金属基体间形成一个微小的空气层(介质 3), 太赫兹波将在该空气层上下界面产生额外的反射信号 E_{34} 并在涂层和空气层内部产生多次回波 E'_{34} 。

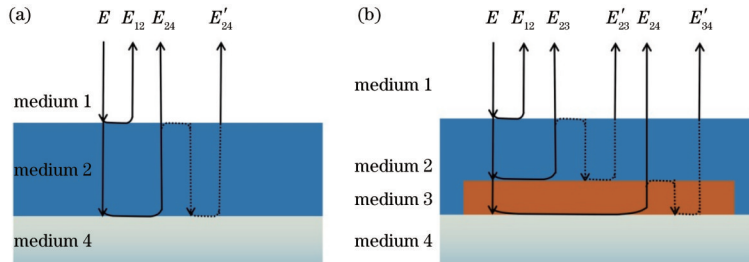


图 6 太赫兹波在涂层中传播过程示意图。(a) 无粘接缺陷; (b) 存在粘接缺陷

Fig. 6 Schematic diagram of terahertz wave propagation in the coating. (a) Without bonding defects; (b) with bonding defects

采用传输矩阵法对无缺陷模型和有缺陷模型进行仿真, 构建厚度为 80 μm 和 50 μm 的涂层模型, 粘接缺陷厚度设置为 10 μm 、20 μm 、30 μm 及 40 μm , 仿真结果如图 7 所示。

图 7(a) 所示为无粘接缺陷 80 μm 涂层太赫兹时域仿真结果, 由于涂层厚度较小, 涂层表面反射波 E_{12} 与金属基底反射波 E_{24} 发生混叠, 二次回波 E'_{24} 在传输过

程中发生半波损失导致信号相位反转, 在时域信号中产生一个波谷。图 7(b) 所示为含粘接缺陷 80 μm 涂层太赫兹时域仿真结果, 当太赫兹波从涂层进入粘接缺陷空气层时产生一个波谷 (E_{23}), 随着缺陷厚度的增加该波谷的深度也不断增加。粘接缺陷的二次回波 E'_{34} 在涂层二次回波 E'_{23} 之后产生一个正峰, 由于粘接缺陷厚度较薄, 缺陷二次回波叠加到涂层二次回波 E'_{23} 中,

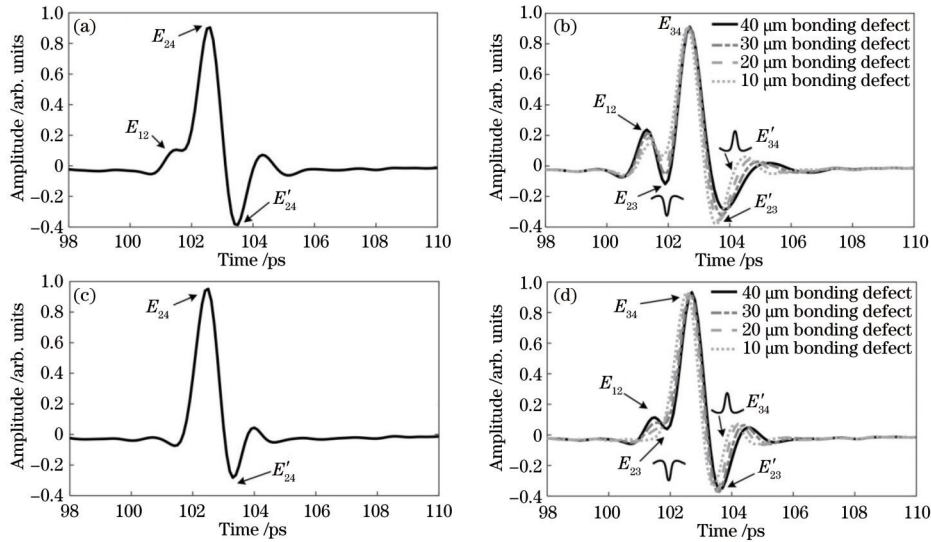


图 7 涂层太赫兹时域仿真结果。(a)无粘接缺陷 80 μm 涂层;(b)存在粘接缺陷 80 μm 涂层;(c)无粘接缺陷 50 μm 涂层;(d)存在粘接缺陷 50 μm 涂层

Fig. 7 THz time-domain simulation results of coatings. (a) 80-μm-thick coating without bonding defects; (b) 80-μm-thick coating with bonding defects; (c) 50-μm-thick coating without bonding defects; (d) 50-μm-thick coating with bonding defects

使涂层二次回波 E'_{23} 形态发生改变,随着缺陷厚度的增加涂层二次回波 E'_{23} 的脉宽逐渐增加且信号逐渐趋于平缓。图 7(c)所示为无粘接缺陷 50 μm 涂层太赫兹时域仿真结果,由于涂层厚度过薄,涂层表面回波 E_{12} 与金属基体反射波 E_{24} 完全重合,在回波 E_{24} 后同样出现涂层二次回波 E'_{24} 。图 7(d)所示为含粘接缺陷 50 μm 涂层太赫兹时域仿真结果,与含粘接缺陷 80 μm 涂层的仿真结果类似,回波 E_{12} 与 E_{34} 之间出现了因粘接缺陷产生的波谷(E_{23}),同时由于粘接缺陷二次回波 E'_{34} 的出现改变了涂层二次回波 E'_{23} 的形态。

由仿真结果可知,随着涂层粘接缺陷厚度的变化,太赫兹二次回波信号的形态也将发生改变。为了表征太赫兹信号的变化以识别涂层粘接缺陷,提取区间回波 E'_{23} 及其之后 3 ps 区间内的太赫兹信号并计算其偏度值,采用的偏度算法为

$$s = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)^3}, \quad (8)$$

式中: s 为偏度值; n 为信号长度; x_i 为信号 i 处幅值; \bar{x} 为信号均值。

区间信号偏度与涂层粘接缺陷厚度的关系如图 8 所示。随着缺陷厚度的增大,缺陷二次回波信号 E'_{34} 飞行时间增加,其与回波 E'_{23} 发生叠加,使回波 E'_{23} 飞行时间延长、脉宽增加,导致区间信号偏度降低。

4 结果与分析

对涂层样件太赫兹检测数据进行分析,分别提取 1#涂层样品与 2#涂层样品中无缺陷区域、10 μm 缺陷

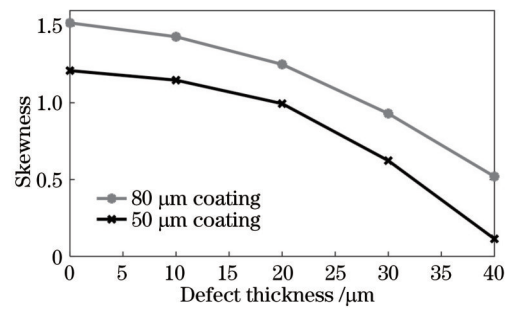


图 8 二次回波偏度与涂层粘接缺陷厚度的关系

Fig. 8 Relationship between skewness of the second order echo and defect thickness

区域及 15 μm 缺陷区域的太赫兹时域信号,如图 9 所示。涂层样品二次回波在 168.5~171.5 ps 之间,并且随着缺陷厚度的增加,回波 E'_{23} 飞行时间增加且脉宽增加,实际检测结果与仿真结果一致。

对采集的涂层太赫兹时域数据分别进行涂层/缺陷界面波谷最小值成像、二次回波峰-峰值成像及二次回波偏度成像,成像结果如图 10 所示。

在 1#涂层样品成像结果中,最小值成像中心区域存在大量噪声,且难以识别 10 mm×10 mm 缺陷的边缘,峰-峰值成像与偏度成像均能够有效识别缺陷,但峰-峰值成像在边缘部分存在一定噪声,偏度成像的噪声干扰最小。2#涂层样品比 1#涂层样品更薄,在涂层固化期间涂层受表面张力影响产生一定收缩,因此边缘区域涂层厚度低于设计厚度。在 2#涂层样本成像结果中,由于峰-峰值成像与最小值成像依赖于特定特征峰,在涂层较薄的边缘部位两种成像方法难以对缺陷进行识别而产生误判,偏度成像避免了涂层厚度的干扰,能够准确对薄涂层中的粘接缺陷进行识别。

为了进一步对成像结果进行量化,采用自适应阈值

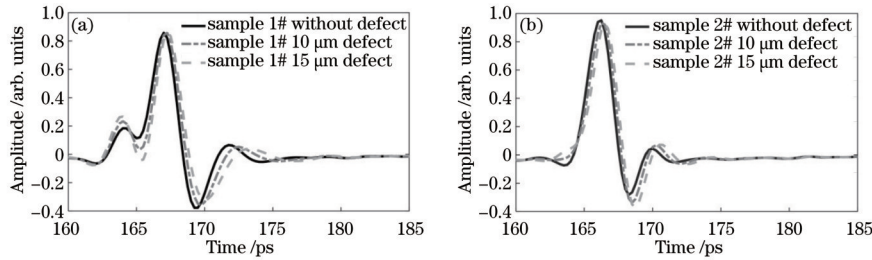


图 9 涂层样品太赫兹检测时域信号。(a) 1#涂层样品；(b) 2#涂层样品

Fig. 9 THz-TDS signals of coating samples. (a) Sample 1#; (b) sample 2#

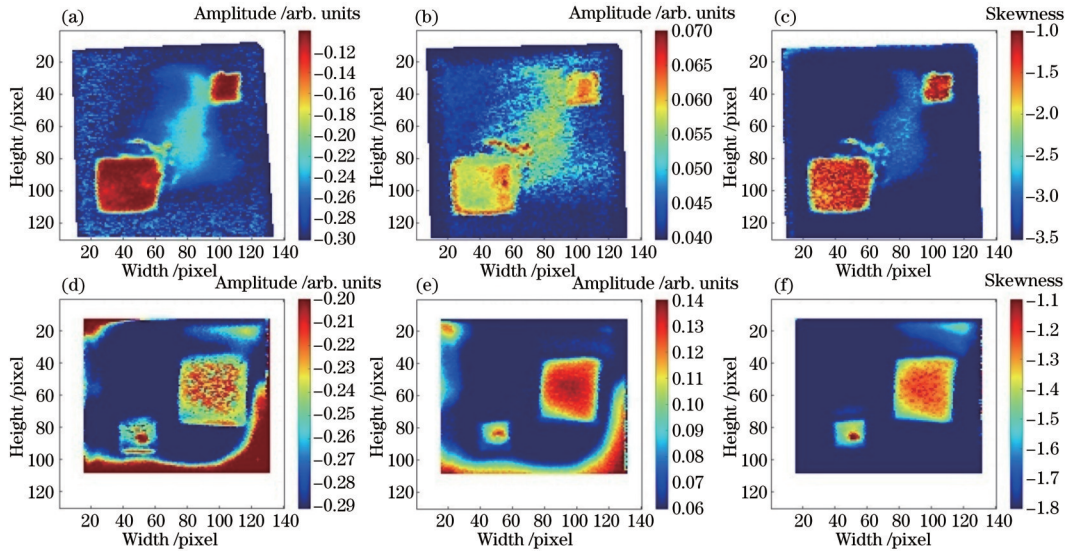


图 10 涂层样品太赫兹成像结果。(a) 样品 1#峰-峰值成像；(b) 样品 1#最小值成像；(c) 样品 1#偏度成像；(d) 样品 2#峰-峰值成像；(e) 样品 2#最小值成像；(f) 样品 2#偏度成像；

Fig. 10 Terahertz imaging results of coating samples. (a) Peak-to-peak imaging of sample 1#; (b) minimum imaging of sample 1#; (c) skewness imaging of sample 1#; (d) peak-to-peak imaging of sample 2#; (e) minimum imaging of sample 2#; (f) skewness imaging of sample 2#

分割算法^[23]提取图像中缺陷并计算缺陷的面积,将缺陷检测面积与缺陷实际面积的比值作为识别准确率参数:

$$F_A = 1 - \frac{|A_{\text{meas}} - A_{\text{design}}|}{A_{\text{design}}}, \quad (9)$$

式中: F_A 为识别准确率; A_{meas} 为缺陷检测面积; A_{design} 为缺陷设计的实际面积。

三种成像方式的缺陷识别准确率如表 2 所示。峰-峰值成像与最小值成像均不能对两个涂层样本完全有效识别,平均识别准确率分别为 88.0% 和 83.9%。本文提出的偏度成像算法对两个涂层样品均能够有效识别,粘接缺陷平均识别准确率为 95.2%。

表 2 不同成像方式涂层缺陷识别准确率

Table 2 Accuracy of coating defect identification of different imaging types

Sample	Area (design) / mm ²	Peak-to-peak imaging		Minimum imaging		Skewness imaging	
		Area (measurement) / mm ²	Accuracy / %	Area (measurement) / mm ²	Accuracy / %	Area (measurement) / mm ²	Accuracy / %
1#	100	95	95.0	136	64.0	94	94.0
	400	423	94.3	331	82.8	375	93.8
2#	100	76	76.0	92	92.0	96	96.0
	400	347	86.8	387	96.8	387	96.9
Mean accuracy			88.0		83.9		95.2

5 结 论

本文采用传输矩阵法构建涂层太赫兹传播仿真模型,分别对厚度为 50 μm 和 80 μm 的树脂基涂层中不同厚度的粘接缺陷进行了仿真分析,分析结果表明太赫兹二次回波的偏度随着粘接缺陷厚度增加而降低。利用太赫兹时域光谱系统对预置缺陷的涂层样本进行检测,采用最小值成像、峰-峰值成像及本文提出的偏度成像方法对两个涂层样品进行成像。结果表明,偏度成像方法能够准确识别 50 μm 和 80 μm 厚度涂层中预置的 10 μm 及 15 μm 粘接缺陷,缺陷平均识别准确率达到 95.2%,准确度优于最小值成像及峰-峰值成像方法。

参 考 文 献

- [1] Graystone J, Kennedy R. Non-destructive measurement of coating adhesion[J]. *Surface Coatings International*, 2000, 83(8): 389-398.
- [2] Amenabar I, Lopez F, Mendikute A. In introductory review to THz non-destructive testing of composite mater [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, 34(2): 152-169.
- [3] Zimdars D, Duling I, Fichter G, et al. Production process monitoring of multilayered materials using time-domain terahertz gauges[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1211(1): 564-571.
- [4] 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.
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.
- [5] 王赫楠, 任姣姣, 张丹丹, 等. 基于连续小波变换的玻璃纤维增强树脂复合材料太赫兹特征增强及缺陷成像[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(12): 4190-4197.
Wang H N, Ren J J, Zhang D D, et al. Glass fiber reinforced polymer terahertz feature enhancement and defect imaging based on continuous wavelet transform[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(12): 4190-4197.
- [6] 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.
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.
- [7] 张国强, 赵长兴, 辛燕, 等. 基于调频连续波太赫兹技术的复合陶瓷隔热瓦无损检测[J]. *无损检测*, 2020, 42(12): 29-34.
Zhang G Q, Zhao C X, Xin Y, et al. Nondestructive inspection for ceramic matrix composite insulation tile based on FMCW terahertz technology[J]. *Nondestructive Testing*, 2020, 42(12): 29-34.

- [8] 贾美慧, 李丽娟, 任姣姣, 等. 多胶接缺陷太赫兹检测信号的 PSO-BP 神经网络识别[J]. *光子学报*, 2021, 50(9): 0930004.
Jia M H, Li L J, Ren J J, et al. Terahertz nondestructive testing signal recognition based on PSO-BP neural network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 0930004.
- [9] 熊伟华, 李丽娟, 任姣姣, 等. 耐高温材料胶接缺陷 THz 多特征参数成像研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1711001.
Xiong W H, Li L J, Ren J J, et al. THz multi-feature parameter imaging of bonding defects of high temperature composite materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1711001.
- [10] 曹丙花, 郑德栋, 范孟豹, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的多层涂层高效可靠测厚方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0112001.
Cao B H, Zheng D D, Fan M B, et al. Efficient and reliable thickness measurement method for multilayer coatings based on terahertz time-domain spectroscopy technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0112001.
- [11] 涂婉丽, 钟舜聪, 罗曼婷, 等. 薄厚度有机防护涂层的太赫兹无损检测与多元回归分析[J]. *测控技术*, 2021, 40(11): 96-101.
Tu W L, Zhong S C, Luo M T, et al. Regression analysis in terahertz quantitative nondestructive evaluation of thinner organic protective coatings[J]. *Measurement & Control Technology*, 2021, 40(11): 96-101.
- [12] 张洪楨, 何明霞, 石粒力, 等. 随机优化算法应用于太赫兹测厚方法的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(10): 3066-3070.
Zhang H Z, He M X, Shi L L, et al. Terahertz thickness measurement based on stochastic optimization algorithm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(10): 3066-3070.
- [13] Ripple B. AFRL scientists, engineers to highlight technology advancements at DOD lab day[EB/OL]. [2019-04-22]. <https://afresearchlab.com/news/air-force-research-laboratory-scientists-engineers-to-highlight-technology-advancements-at-dod-lab-day/>.
- [14] Catapano I, Soldovieri F, Mazzola L, et al. THz imaging as a method to detect defects of aeronautical coatings[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2017, 38(10): 1264-1277.
- [15] 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.
- [16] 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.
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.
- [17] 徐亚军, 代鑫, 杨涛, 等. 掺杂环氧树脂复合材料制备及太赫兹检测研究[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(21):

- 89-95.
Xu Y J, Dai X, Yang T, et al. Investigation on preparation and terahertz detection of doped epoxy resin composites[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(21): 89-95.
- [18] 李迎, 张朝晖, 赵小燕, 等. 非金属涂层缺陷的太赫兹时域谱检测[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(11): 129-136.
Li Y, Zhang Z H, Zhao X Y, et al. Terahertz time-domain spectrum detection of non-metallic coating defects [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41 (11): 129-136.
- [19] 叶东东, 王卫泽, 周海婷, 等. 基于太赫兹技术的热障涂层平行裂纹监测研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(5): 91-97.
Ye D D, Wang W Z, Zhou H T, et al. Parallel crack monitoring of thermal barrier coatings based on terahertz technology[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(5): 91-97.
- [20] Qiao F, Zhang C, Wan J, et al. Photonic quantum-well structures: multiple channeled filtering phenomena[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(23): 3698-3700.
- [21] Snow P A, Squire E K, Russell P S J, et al. Vapor sensing using the optical properties of porous silicon Bragg mirrors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86 (4): 1781-1784.
- [22] Katsidis C C, Siapkas D I. General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(19): 3978-3987.
- [23] Peuwun K, Woraratpanya K, Pasupa K. Modified adaptive thresholding using integral image[C]//2016 13th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE), July 13-15, 2016, Khon Kaen, Thailand. New York: IEEE Press, 2016.