

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108673

碳纤维复合材料不同深度缺陷的太赫兹检测研究<sup>\*</sup>徐亚军<sup>1</sup> 向红星<sup>1</sup> 钟勉<sup>1</sup> 杨文锋<sup>2</sup> 刘炳伟<sup>3</sup> 魏东山<sup>4</sup> 李辰<sup>5</sup>

(1. 中国民用航空飞行学院航空电子电气学院 广汉 618307; 2. 中国民用航空飞行学院航空工程学院 广汉 618307;  
3. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093; 4. 东莞理工学院 东莞 523808;  
5. 深圳市太赫兹科技创新研究院 深圳 518110)

**摘要:** 太赫兹 (THz) 无损检测技术具有非破坏性、非电离和非接触的优点, 在航空航天领域纤维增强复合材料无损检测中得到了较快的发展和运用。在碳纤维复合材料层合板的 4 个不同深度 (0.225、0.450、0.675、0.900 mm) 插入聚四氟乙烯作为人工缺陷, 采用太赫兹时域光谱和成像系统对其进行成像和光谱分析, 探讨太赫兹波辐射下缺陷的成像效果和光谱特性。研究结果发现, 在 0.25~2.0 THz 频率范围内, 太赫兹反射成像可以成功检测出碳纤维复合材料中不同深度缺陷; 随着缺陷深度的增加, 太赫兹频域成像信号和光谱信号随缺陷深度线性增大, 吸收系数成像信号和光谱信号随缺陷深度线性减小; 随着频率的增加, 缺陷的功率谱密度先增大后减小, 吸收系数缓慢增大。该结果可以为碳纤维复合材料缺陷深度的可视化和定量化分析提供参考依据。

**关键词:** 太赫兹无损检测技术; 碳纤维复合材料; 太赫兹反射成像; 不同深度缺陷

**中图分类号:** TN29; TG115.28; V258+3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25; 510.20

## Research on THz detection of CFRP with different depth defects

Xu Yajun<sup>1</sup> Xiang Hongxing<sup>1</sup> Zhong Mian<sup>1</sup> Yang Wenfeng<sup>2</sup> Liu Bingwei<sup>3</sup> Wei Dongshan<sup>4</sup> Li Chen<sup>5</sup>

(1. Institute of Electronic and Electrical Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;  
2. Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;  
3. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 4. Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China;  
5. Shenzhen Institute of Terahertz Technology and Innovation, Shenzhen 518110, China)

**Abstract:** Terahertz (THz) non-destructive testing technology has the advantages of non-destructive, non-ionizing and non-contact, and has been rapidly developed and applied in the non-destructive testing of fiber-reinforced composite materials in the aeronautics and astronautics field. PTFE was inserted into 4 different depths (0.225, 0.450, 0.675, 0.900 mm) of carbon fiber composite laminates as artificial defects, and the terahertz time-domain spectroscopy and imaging system was used to image and spectrally analyze it, discuss the imaging effects and spectral properties of defects under terahertz radiation. The results of the study show that in the frequency band of 0.25~2.0 THz, terahertz reflection imaging can successfully detect different depths defects in carbon fiber composites, the terahertz frequency imaging signal and spectral signal linear increased with the defect depth increment, the absorption coefficient imaging signal and spectral signal linear decreased with the defect depth increment, and with the increase of frequency, the power spectral density of the defect firstly increment and then decrement, and the absorption coefficient slowly increases. The results can provide a reference for the visualization and quantitative analysis of unknown depth defects in carbon fiber composites.

**Keywords:** Terahertz non-destructive testing technology; CFRP; terahertz reflection imaging; defects of different depths

## 0 引言

碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymer/plastic,

CFRP)因其耐高温、耐腐蚀、重量轻和强度高而广泛应用于建筑工程、医疗健康和航空航天等各个领域<sup>[1-3]</sup>。CFRP在制造过程和使用过程中受到不同因素的影响产生不同类型

收稿日期:2021-12-24

\* 基金项目:四川省科技厅重点研发项目(2021YFSY0025)、中国民用航空飞行学院面上项目(J2020-49)、四川省大学生创新创业训练计划项目(S202110624128)资助

的缺陷<sup>[4-5]</sup>,其中CFRP的内部缺陷是民用飞机安全运行潜在隐患的最重要因素之一,在咨询通报AC25.571-IC特别规定中举出了单个区域的损坏会引起载荷重新分布,从而导致邻近区域破坏或者部分破坏<sup>[6]</sup>,因此对于内部缺陷的检测十分重要。在不损伤或破坏复合材料的结构、稳定性的前提下,目前常用的无损检测(nondestructive testing, NDT)方法有超声波法、涡流法、磁粉法等方法<sup>[7-9]</sup>,但均有不足之处。如超声波法检测时需使用耦合剂,不同缺陷需要更换不同的探头;涡流法需要导电基底和样品接触;磁粉法只适用于检测铁磁性材料。

近年来,太赫兹无损检测技术作为一种非破坏性、非电离和非接触的无损检测方法受到了越来越多的关注<sup>[10-12]</sup>,国内外的研究人员对太赫兹无损检测技术进行了深入的研究并取得了一定的成果。Zhong等<sup>[13]</sup>通过太赫兹时域反射成像系统检测了复合材料中低速冲击损伤的缺陷,可以获得对缺陷的有效检测频带(0.12~2.0 THz)。Zhang等<sup>[14]</sup>使用反射太赫兹成像检测出碳纤维复合材料中聚四氟乙烯人造模拟的缺陷,证明了聚四氟乙烯可以用于模拟缺陷。Dong等<sup>[15]</sup>使用太赫兹成像技术成功对碳纤维增强复合材料层合板的亚表面损伤进行了表征,发现了碳纤维复合材料的电导率会随深度迅速衰减,但对于太赫兹光谱特性与深度的关系缺少研究。Zhang等<sup>[16]</sup>对不同厚度的碳纤维复合材料太赫兹反射和透射特性进行了研究,获得了碳纤维复合材料在太赫兹频率范围内的折射率和吸收系数,但是缺少对时域和频域的研究。Wang等<sup>[17]</sup>对碳纤维复合材料缺陷的太赫兹检测的局限性进行了定量的解释,当试样厚度小于趋肤深度时才能有效地检测出缺陷。李薇等<sup>[18]</sup>证明了利用太赫兹时域光谱成像技术检测了碳纤维增强复合材料的内含缺陷需要太赫兹波方向要与碳纤维方向垂直。Liu等<sup>[19]</sup>利用太赫兹反射成像技术有效的检测出碳纤维复合材料内部不同深度中的缺陷,时域谱中存在衰减和延迟,随着缺陷深度的增加,太赫兹信号峰峰值和峰值呈线性衰减,可以利用信号特征对不同深度的缺陷进行识别和排序,但对碳纤维复合材料内部不同深度的缺陷的太赫兹频域和吸收系数光谱特性的研究尚未见报道,值得进一步深入研究。

基于此,本文制备了不同深度缺陷(0.225~0.900 mm)的碳纤维复合材料(CFRP)样品,利用太赫兹光谱及成像技术对样品进行测试,对样品的太赫兹成像效果和光谱特性进行对比分析,获得对于CFRP不同深度缺陷最佳的太赫兹检测范围,探讨了CFRP的太赫兹信号与缺陷深度的关系,为飞机在使用太赫兹成像技术在未知深度缺陷的可视化与量化分析中提供参考依据。

## 1 实验及方法

### 1.1 实验样品

本文设计并制备了人工预置在不同深度的圆形缺陷碳纤

维复合材料(CFRP)层合板。试件样品尺寸为宽7 cm,长10 cm,铺8层共1.8 mm厚,铺设方法为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_8$ ,共有设有8个缺陷,在这里取1~4号缺陷,如图1(a)所示。在试件内部,如图1(b)所示,缺陷共4处,分别标记在第1,2,3,4个夹层中预置厚度0.2 mm的聚四氟乙烯薄片,半径均为5 mm。使用锡箔纸将试件分为2个区域,4个缺陷分布在不同的深度,如图1(c)所示,如1号缺陷在0.225 mm处,以此类推,其他3个区域的缺陷分别在0.450 mm、0.675 mm以及0.900 mm处。

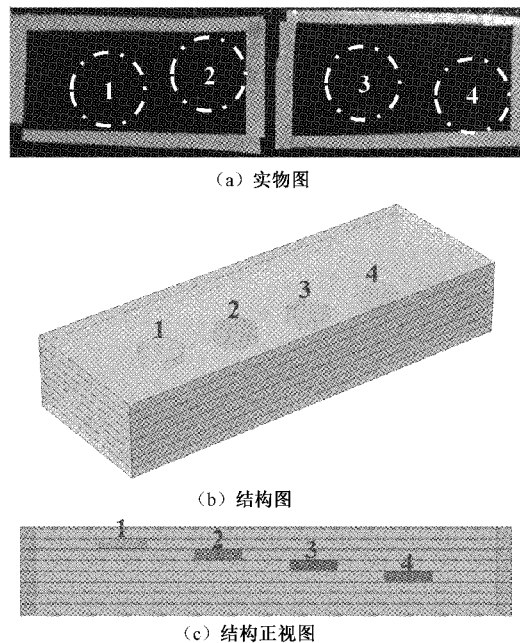


图1 试件样品

### 1.2 实验仪器

在实验中,采用了深圳市太赫兹科技创新研究院提供的CCT-1800系列太赫兹(THz)时域光谱和成像系统,包括3个部分:THz时域频谱分析主机、数据采集和分析软件以及反射接收模块,系统示意图如图2所示。在此系统中,利用反射成像模式对试件样品进行二维平台扫描,发射机发射的THz波从其正面穿过试件样品后返回到接收器接收的缺陷信息。系统光学时间延迟为54 ps,对应于18.5 GHz的光谱分辨率,动态范围高达80 dB。波形的采样率为15 Hz,最大扫描范围和最小扫描步长分别为50 mm×50 mm和0.08 mm。实验过程中,环境温度控制在23℃左右,湿度约为40%,在实验中还需不断加入氮气,以消除水蒸气对实验结果的干扰。

## 2 结果与讨论

### 2.1 太赫兹成像研究

为了研究碳纤维复合材料的太赫兹成像信号与缺陷深度的关系,本文对碳纤维复合材料层合板的不同深度缺陷进行了太赫兹时域、频域以及吸收系数成像表征和分析。

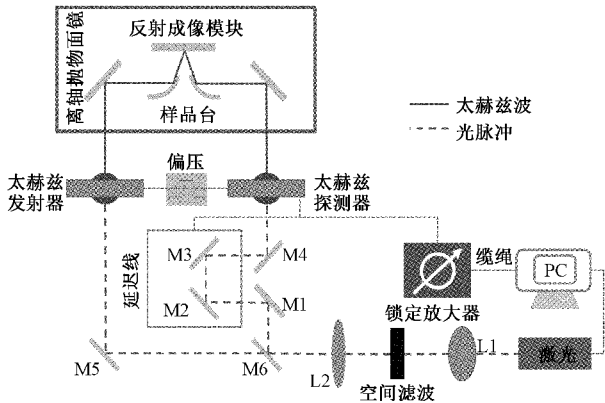


图 2 太赫兹时域光谱和成像系统原理

对 4 个不同深度(0.225~0.900 mm)缺陷的最佳成像效果参数进行了统计,如表 1 所示。

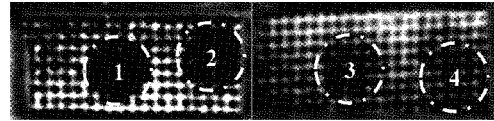
表 1 不同深度(0.225~0.900 mm)缺陷的最佳成像效果参数

编号	时域成像/ ps	频域成像/ THz	吸收系数 成像/THz	缺陷 深度/mm
1	13.500±0.03	1.904±0.05	0.677±0.02	0.225
2	13.400±0.03	1.520±0.05	0.861±0.02	0.450
3	13.100±0.03	1.044±0.05	1.044±0.02	0.675
4	12.900±0.03	0.861±0.05	1.154±0.02	0.900

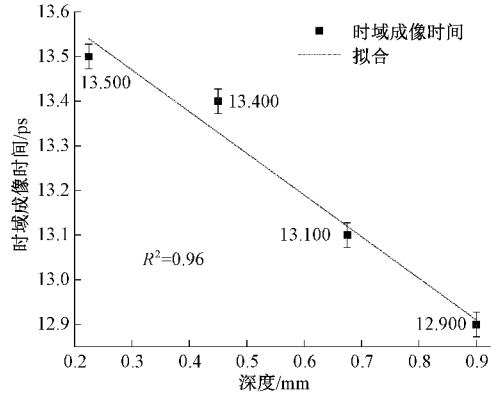
碳纤维复合材料层合板不同深度缺陷的太赫兹成像如图 3(a)、图 4(a)、图 5(a)所示,在灰度图像中,缺陷区域的颜色和非缺陷区域的颜色存在差异,可以清楚地分辨出不同深度缺陷区域的轮廓,这表明缺陷区域存在一定的信号衰减。太赫兹系统通过分析在材料内部(如夹杂物、缺陷或损伤等)反射或透射的太赫兹波来确定材料的内部特征,由于碳纤维对太赫兹信号的反射和吸收<sup>[20]</sup>。可以推测出,随着缺陷深度的增加以及碳纤维对太赫兹信号的反射和吸收,会导致透过缺陷区域与非缺陷区域信号的强弱不同,此时缺陷区域的颜色和非缺陷区域的颜色就会存在差异。

对所得到的参数进行拟合分析,时域成像时间与深度的关系图如图 3(b)所示,随着缺陷深度的增加,成像时间与缺陷深度呈现线性下降的趋势。频域成像频率与深度的关系图如图 4(b)所示,随着缺陷深度的增加,成像频率与缺陷深度呈现线性下降的趋势。吸收系数成像频率与深度的关系图如图 5(b)所示,随着缺陷深度的增加,成像频率与缺陷深度呈现线性上升的趋势。其原因是对于太赫兹波,聚四氟乙烯的吸收率远小于碳纤维复合材料的吸收率,当聚四氟乙烯埋入碳纤维复合材料层合板的深度较低时,此时太赫兹波的吸收较小,反射信号较强。随着聚四氟乙烯片层深度的增加,吸收会逐渐增加,反射信号会逐渐减小。

在对样品太赫兹成像研究过程中,可以清楚地分辨出

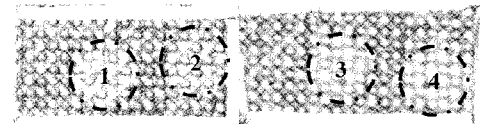


(a) 时域成像图

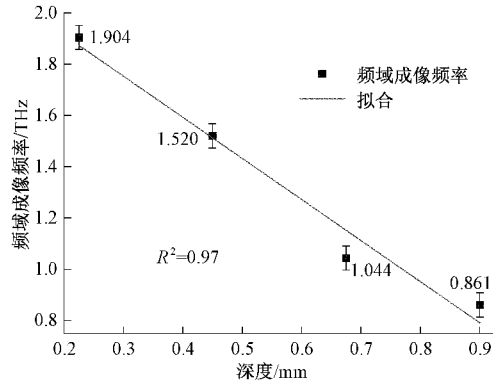


(b) 时域成像时间与深度的关系图

图 3 太赫兹时域成像



(a) 频域成像图



(b) 频域成像频率与深度的关系图

图 4 太赫兹频域成像

碳纤维复合材料层合板不同深度缺陷区域,根据以上得到太赫兹成像与深度之间的线性关系,可以对未知深度的缺陷进行预测,表明了太赫兹成像技术在未知深度缺陷的可视化分析中具有重要的应用价值。

## 2.2 太赫兹光谱研究

为了研究碳纤维复合材料的太赫兹光谱特性与缺陷深度的关系,本文对碳纤维复合材料层合板的不同深度缺陷太赫兹频域光谱以及吸收系数光谱进行了分析。

不同深度缺陷的太赫兹频域功率谱密度图如图 6 所示,这里频谱的选择范围为 0~2.0 THz,这是由于在这个范围内得到的频域信号具有一定的规律,在超过 2.0 THz 后信号会衰减严重,且包含了大量的干扰噪声,光谱图的波形会变得很杂乱。从图 6(a)中可以清楚地看出,当频率低

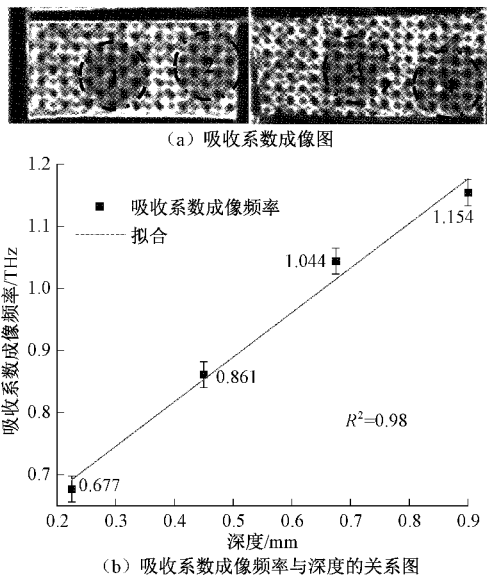


图5 太赫兹吸收系数成像

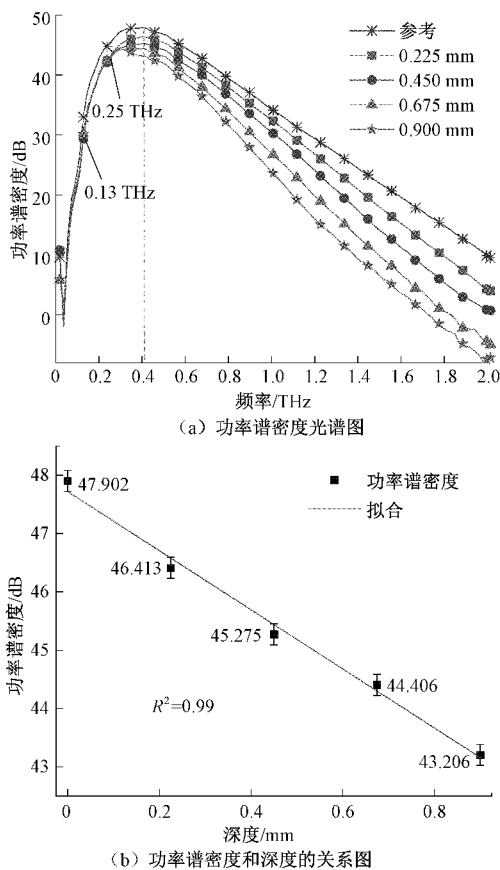


图6 太赫兹频域功率谱密度图

于 0.13 THz 时,缺陷与参考信号的频域信号基本相同;当在 0.13~2.0 THz 频率范围时,随着频率的增加,功率谱密度整体上呈现先增加后减少的趋势,且随着缺陷深度的增加功率谱密度会逐渐降低;其中在 0.13~0.25 THz 的频率范围内,四种缺陷的频域信号功率谱密度与频率的关

系也是基本相同。因此,可以认为实验中不同深度缺陷的有效检测频段为 0.25~2.0 THz。

取功率谱密度峰值处对应的频率  $f=0.403$  THz,分析功率谱密度和缺陷深度的关系,如图 6(b)所示,可以发现随着碳纤维复合材料缺陷深度的增加,功率谱密度呈现线性下降的趋势。这与上节频域成像频率与深度的关系图所示的关系一致,都随着缺陷深度的增加,呈现出一个线性下降的趋势。因此,可以通过频率的成像频率和光谱特性用于识别和排序频率域未知深度的缺陷。

其原因是对于太赫兹波,聚四氟乙烯的吸收率远小于碳纤维复合材料层合板的吸收率,当聚四氟乙烯埋入碳纤维复合材料层合板的深度较低时,其表面的太赫兹波反射率与纯聚四氟乙烯的太赫兹波反射率大致相当,此时太赫兹波的吸收较小,反射信号较强。随着聚四氟乙烯片层深度的增加,太赫兹波会先经过碳纤维复合材料再逐渐到聚四氟乙烯,此时碳纤维对太赫兹波的吸收也会逐渐增加,反射信号会逐渐减小。

不同深度缺陷的太赫兹吸收系数光谱图如图 7 所示,在这里选择 0.2~2.0 THz 频域范围内的吸收系数分析,该频段下的吸收系数具有比较明显的变化规律,在超过 2.0 THz 后信号会由于噪声区光谱图就失去变化规律,波形会变得很杂乱。从图 7(a)中可以清楚地看出,在 0.2~0.25 THz 频率范围内,0.225、0.450、0.675 mm 三个深度缺陷的吸收系数信号与频率的关系是基本相同;在 0.25~2.0 THz 频率范围内,随着频率的增加,吸收系数整体上呈现上升的趋势。因此,可以认为实验中对于不同深度缺陷的吸收系数光谱有效检测频段为 0.25~2.0 THz。这与文献[21]中太赫兹对于玻璃纤维不同缺陷深度所得到的吸收系数的光谱图的变化趋势整体上保持一致。

在图 7(a)中,可以发现 0.900 mm 的缺陷在  $f=1.16$  THz 处有一个比较明显的吸收峰,取此频率处分析功率谱密度和缺陷深度的关系,如图 7(b)所示,可以发现随着碳纤维复合材料缺陷深度的增加,功率谱密度呈现线性上升的趋势。这是因为碳纤维复合材料对太赫兹波有很强的吸收,那么随着缺陷深度的增加,太赫兹辐射在碳纤维复合材料中吸收系数也会增强。这同样与上节吸收系数成像频率与深度的关系图所示的关系一致,都随着缺陷深度的增加,呈现出一个线性上升的趋势。因此,可以通过吸收系数的成像频率和光谱特性用于识别和排序未知深度的缺陷。

根据得到的频域光谱图和吸收系数光谱图和缺陷深度之间的线性关系,在 0.25~2.0 THz 频率范围内,可以对未知深度的缺陷进行预测。对于未知深度缺陷的红外检测中,红外检测技术适合于试件浅表面较大面积的缺陷,而且对于深度小的缺陷的检测,热能集中会使得缺陷对应部位的温度迅速升高,这样在缺陷边缘部位就形成了较大的温度梯度,若测量时间选择不当就会造成较大误差<sup>[22]</sup>,而且缺陷温差峰值时间与深度不成比例<sup>[23]</sup>,不能对未知深度缺

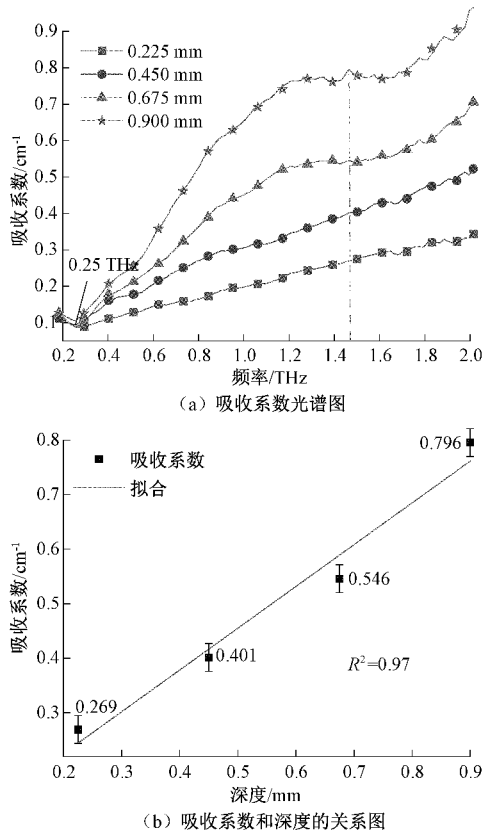


图 7 太赫兹吸收系数光谱图

陷进行一个预测。这也表明了太赫兹光谱技术在未知深度缺陷的定量分析中具有重要的应用价值。

### 3 结 论

本文采用太赫兹时域光谱和成像系统对碳纤维增强复合材料(CFRP)层合板的不同深度缺陷进行了时域、频域以及吸收系数的光谱和成像研究,对所得到的光谱信息和太赫兹成像进行分析,得到如下结论。

1)太赫兹频域功率谱密度光谱结果表明,随着频率的增加,功率谱密度整体上呈现先增加后减少的趋势,且随着缺陷深度的增加功率谱密度会逐渐降低,并呈现出线性减小的趋势,这是由于碳纤维对太赫兹信号进行了反射和吸收。

2)太赫兹吸收系数光谱结果表明,吸收系数随频率增加而增加,吸收系数与缺陷深度呈现出线性增大的趋势。太赫兹光谱图和缺陷深度之间的线性关系,可对未知深度缺陷进行预测,表明了太赫兹光谱技术在未知深度缺陷的定量分析中具有重要的应用价值。

3)在 0.25~2.0 THz 频率范围内,太赫兹反射成像可有效识别出不同深度(0.225~0.900 mm)的缺陷区域,随着缺陷深度的增加,成像效果也会随之变差。太赫兹成像与深度之间的线性关系,可对未知深度缺陷进行预测,表明了太赫兹成像技术在未知深度缺陷的可视化分析中具有重

要的应用价值。

碳纤维增强复合材料缺陷的深度与太赫兹的成像效果和光谱特性之间的关系,可以对未知深度缺陷进行预测。未来可进一步对此方向深入研究,达到精确最佳成像信号的目的。

### 参考文献

- [1] CHEN C, YANG Y, ZHOU Y, et al. Comparative analysis of natural fiber reinforced polymer and carbon fiber reinforced polymer in strengthening of reinforced concrete beams [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121572.
- [2] CHUA C Y X, LIU H C, DI TRANI N, et al. Carbon fiber reinforced polymers for implantable medical devices [J]. *Biomaterials*, 2021, 271: 120719.
- [3] VAN GROOTEL A, CHANG J, WARDLE B L, et al. Manufacturing variability drives significant environmental and economic impact; The case of carbon fiber reinforced polymer composites in the aerospace industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121087.
- [4] 霍雁, 张存林. 碳纤维复合材料内部缺陷深度的定量红外检测 [J]. *物理学报*, 2012, 61(14): 199-205.
- [5] WANG B, SUN Y, LI Y, et al. Debonding damage detection in CFRP plate-strengthened steel beam using electromechanical impedance technique [J]. *Sensors*, 2019, 19(10): 2296.
- [6] 斯而健. 飞机结构的损伤及其检测 [J]. *民用飞机设计与研究*, 2000(4): 4-10.
- [7] BLANDFORD B M, JACK D A. High resolution depth and area measurements of low velocity impact damage in carbon fiber laminates via an ultrasonic technique [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 188: 107843.
- [8] 任吉林, 曾亮, 张丽攀, 等. 碳纤维复合材料涂层厚度涡流法测量的研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(12): 2662-2668.
- [9] SONG Z M, SUN X, LI Y, et al. Carbon fibers embedded with aligned magnetic particles for efficient electromagnetic energy absorption and conversion [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(4): 5266-5274.
- [10] 何明霞, 陈涛. 太赫兹科学技术在生物医学中的应用研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(6): 471-483.
- [11] 赵国忠, 申彦春, 刘影. 太赫兹技术在军事和安全领域的应用 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(8): 1097-1101.
- [12] 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.
- [13] ZHONG M, LIU B W, LI C, et al. Terahertz spectroscopy and imaging detection of defects in civil aircraft composites [J]. Journal of Spectroscopy, 2020, 2020(12): 1-8.
- [14] ZHANG J, LI W, CUI H L, et al. Nondestructive evaluation of carbon fiber reinforced polymer composites using reflective terahertz imaging [J]. Sensors(Basel, Switzerland), 2016, 16(6): 875.
- [15] DONG J, POMAREDE P, CHEHAMI L, et al. Visualization of subsurface damage in woven carbon fiber-reinforced composites using polarization-sensitive terahertz imaging[J]. NDT & E International, 2018, 99: 72-79.
- [16] ZHANG J, SHI C, MA Y, et al. Spectroscopic study of terahertz reflection and transmission properties of carbon-fiber-reinforced plastic composites[J]. Optical Engineering, 2015, 54(5): 054106.
- [17] WANG Q, ZHOU H, LIU M, et al. Study of the skin depth and defect detection in carbon fiber composites with terahertz waves [J]. Optik, 2019, 178: 1035-1044.
- [18] 李薇, 施长城, 张瑾, 等. 纤维增强复合材料太赫兹成像无损检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(3): 396-400.
- [19] LIU B W, XIANG H X, ZHONG M, et al. Nondestructive detection of depth-dependent defects in carbon-fiber-reinforced polymer composites by terahertz time-domain spectroscopy [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2021, 57(5): 417-422.
- [20] NSENGIYUMVA W, ZHONG S, LIN J, et al. Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: A state-of-the-art review [J]. Composite Structures, 2021, 256: 112951.
- [21] 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.
- [22] 王永茂, 郭兴旺, 李日华, 等. 缺陷大小和深度的红外检测[J]. 无损检测, 2003, 25(9): 458-461.
- [23] 林隆荣, 伏喜斌, 黄学斌, 等. 复合材料缺陷的红外热成像检测研究[J]. 机电工程, 2019, 36(6): 628-632.

#### 作者简介

徐亚军, 硕士, 教授, 主要从事无损检测与信号处理研究。

E-mail:genius98@126.com

钟勉(通信作者), 博士, 讲师, 主要从事复合材料无损检测研究。

E-mail:mianzhong@cafuc.edu.cn