

文章编号：2095-4980(2023)11-1295-11

## 基于太赫兹技术的复合材料无损检测研究综述

金玉环<sup>1</sup>, 朱凤霞<sup>2</sup>, 封建欣<sup>1</sup>

(1. 北京远大恒通科技发展有限公司, 北京 100048; 2. 首都师范大学 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

**摘要：**随着高性能复合材料在航空航天和军事等高领域的广泛应用，对其质量和性能检查的要求愈加引起重视，如何通过各种方法对复合材料进行无损检测成为近年来研究人员关注的热点和研究方向。太赫兹波量子能量低，对大多数非极性物质透明，因此使用太赫兹技术对复合材料进行无损检测有着独特的应用优势。本文基于太赫兹技术的特点，对太赫兹时域光谱和太赫兹成像技术的无损检测分别进行了详细的论述，并总结了目前复合材料的太赫兹无损检测技术发展趋势，最后对其发展前景进行了展望。

**关键词：**太赫兹技术；无损检测；太赫兹时域光谱；太赫兹成像；复合材料

中图分类号：0437

文献标志码：A

doi: 10.11805/TKYDA2022237

## Review of nondestructive testing of composites based on THz technology

JIN Yuhuan<sup>1</sup>, ZHU Fengxia<sup>2</sup>, FENG Jianxin<sup>1</sup>

(1. Beijing Broad Hengtong Technology Development Co., Ltd, Beijing 100048, China;

2. Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** With the wide application of high performance composites in aerospace, military and other high-tech fields, more and more attention has been paid to the quality and performance inspection of composites. How to conduct Nondestructive Testing(NDT) of composites by various methods has become a hot research direction for researchers in recent years. Terahertz wave has low quantum energy and is transparent to most non-polar substances, so it has unique application advantages in the field of nondestructive testing of composites. In this paper, based on the characteristics of THz technology, the nondestructive testing of Terahertz Time-Domain Spectroscopy(THz-TDS) and terahertz imaging technology are discussed in detail, and the current development trends of terahertz nondestructive testing technology for composite materials are summarized. Finally, the development prospect is outlooked.

**Keywords:** terahertz technology; Nondestructive Testing; Terahertz Time-Domain Spectroscopy; terahertz imaging; composite materials

相比传统材料，复合材料具有强度高、密度低、耐腐蚀等多种优点。随着21世纪航空航天、汽车工业、石油化工和武器装备等诸多领域的高科发展，复合材料的应用越来越广泛。但在不同场景的制造、加工和使用过程中，由于制作工艺和使用环境等多方面的影响，材料会出现脱粘、孔洞和裂纹等缺陷，影响使用性能和质检要求。

为了控制复合材料的质量，保证使用的安全性，在实际应用中通常要求对其进行检测，以满足标准要求。由于使用场景的差异性，对复合材料的性能、可靠性和安全性也有了更高要求，传统的无损检测技术在检测复合材料内部结构和缺陷方面还存在着一些局限性，无法检测、检测不准确的情况时有发生。据此，国内外研究人员结合不同技术，在复合材料的无损检测方面投入大量工作，诸多无损检测新技术应运而生。太赫兹(THz)技术作为一种新兴的无损检测技术，4.14 meV的光子能量不会产生电离辐射，能够保障样品和检验人员的安全，对非极性材料有着良好的穿透能力，且不易受外界环境温度的影响，在复合材料的无损检测中具有巨大的应用价值，吸引了研究人员广泛的的关注。本文主要针对太赫兹无损检测技术的两大类方式进行阐述，介绍了近年来的研究进展，最后探讨了在复合材料中太赫兹无损检测技术的应用与发展。

## 1 太赫兹技术应用概述

太赫兹波指频率位于 0.1~10 THz 的电磁波(也有 0.3~30 THz 的表述), 波长约在 0.03~3 mm 内, 介于微波与红外光之间, 即电子学和光子学的中间区域, 如图 1 所示。正是由于其所处的特殊的频段范围, 太赫兹波融合了光和电的特性, 弥补了电磁波谱中的“太赫兹空隙”<sup>[1]</sup>。太赫兹波对大多数非极性物质具有高透过率, 穿透性强, 既能进行时间分辨的光谱测量, 也能在相应条件下获得分辨率较高的图像, 采用非接触探测方式无需耦合剂。太赫兹技术不仅涉及电子学和光子学领域, 也包括材料、物理、光学等学科内容, 属于前沿的交叉学科<sup>[2]</sup>, 无损、非电离、非接触等特点成为太赫兹技术在应用过程中显著的优点。

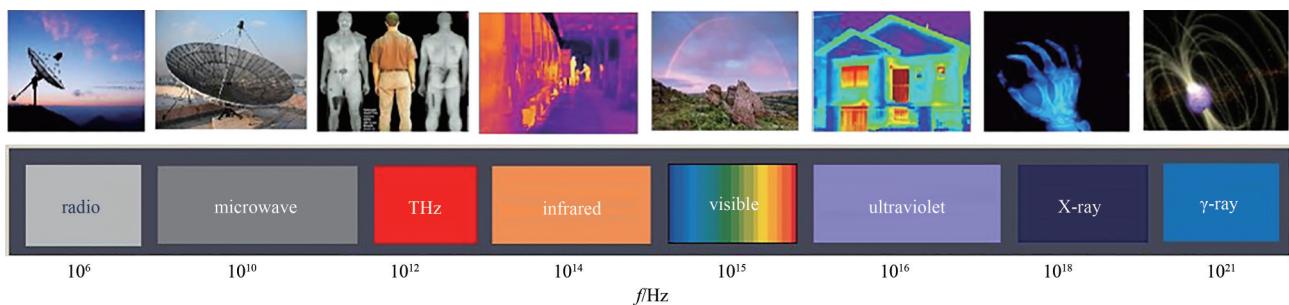


Fig.1 Diagram of the electromagnetic spectrum

图 1 电磁波谱示意图

太赫兹技术应用范围广泛。太赫兹波段探测大分子具有明确的“指纹性”, 有利于安检领域对毒品等危险品的检测<sup>[3]</sup>, 与 X 射线等其他射线相比, 太赫兹光子能量低, 对人体更加安全, 在安检领域有更独特的优势。由此, 太赫兹检测技术可提供与红外、可见光和 X 射线成像互补的物品信息, 目前已广泛用于生物医学如皮肤、肿瘤等生物组织的检测分析中。此外, 太赫兹波比红外对隐蔽物体的透射性和成像效果更好。近年来, 太赫兹技术在物质鉴别、安防通信、质量控制、生物医学等<sup>[4-6]</sup>领域都有相关应用。随着近些年无损检测领域的应用扩展, 太赫兹技术基于光和电特性的融合优势, 可以对特殊的物质在特定的环境和条件下进行无损检测, 分析物质特性, 成为现有无损检测方式的有力补充。

## 2 基于太赫兹时域光谱系统的无损检测技术

太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术是基于脉冲太赫兹波相关测量的新型光谱分析技术, 通过太赫兹波探测器采集太赫兹脉冲在被测物体中透射或在被测物体表面发生反射的信号。图 2 和图 3 为 THz-TDS 的基本结构图, 太赫兹时域光谱系统主要由飞秒激光器、太赫兹发射器、太赫兹接收器和光学延迟线组成。从飞秒激光器中发射出一束太赫兹信号, 经过分束器分为泵浦光和探测光, 泵浦光通过光学延迟线入射到太赫兹发射器, 得到向外辐射的太赫兹短脉冲, 再经由一组离轴抛物面镜后照射到待测物体上, 通过光学延迟线调整时延, 使得经待测物品透射或反射后的太赫兹脉冲与探测光同时入射到太赫兹接收器, 进而获得相应的太赫兹时域脉冲波形数据。

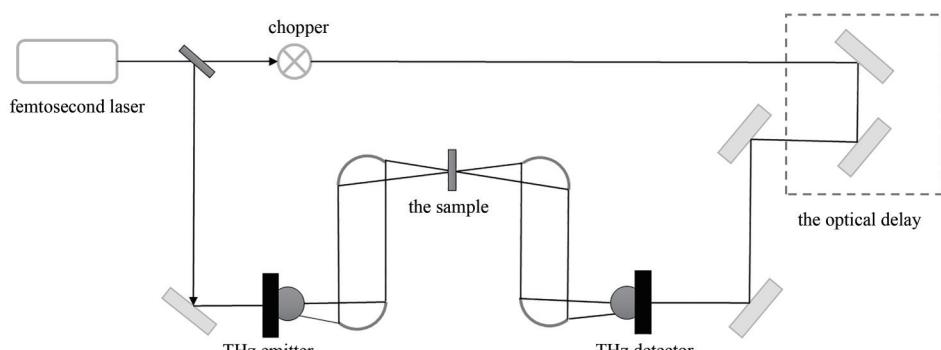


Fig.2 Structure diagram of transmission THz-TDS system

图 2 透射式太赫兹时域光谱系统结构图

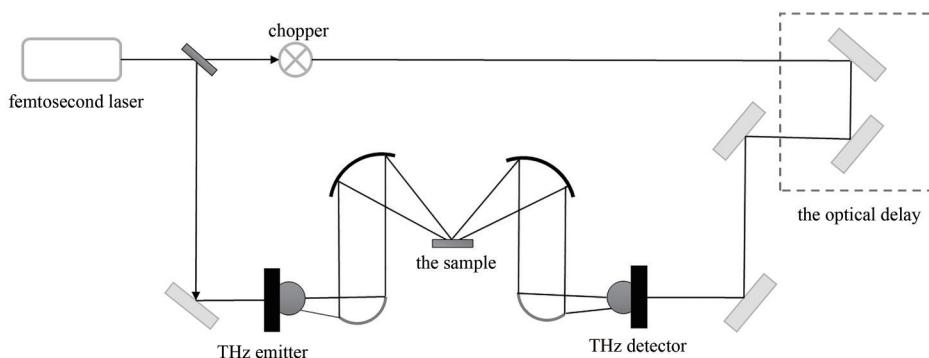


Fig.3 Diagram of reflective THz-TDS system  
图3 反射式太赫兹时域光谱系统结构图

作为太赫兹无损检测技术的关键技术之一, 太赫兹时域光谱技术能够采集到被测物体的时域信号、相位、折射率、延迟时间等丰富信息, 为无损检测的应用提供有效价值。利用太赫兹技术对复合材料进行无损检测时, 通过太赫兹时域光谱提取关键光学参数, 为特定物质的涂层测厚等无损检测提供了基础。基于太赫兹时域光谱技术开发的太赫兹光谱成像系统, 在无损检测应用中作为探索物质特性的光学测量设备也发挥着重要的作用。在实际的应用过程中, 还需要根据材料的不同特性选择相应的检测模式: 对于低吸收性材料, 常选择透射式太赫兹时域光谱探测; 高吸收性材料, 则选择反射式太赫兹时域光谱探测。根据检测目标的样品特性和检测目的选择相应的太赫兹时域光谱探测系统的透射模式或反射模式, 从而得到最佳检测结果。

## 2.1 太赫兹时域光谱系统

透射式太赫兹时域光谱技术是通过获取激发后的太赫兹脉冲透射过检测目标后的信号完成检测, 穿过检测目标的太赫兹信号包含了目标大量的物理信息<sup>[7]</sup>, 其基本结构如图2所示。透射式太赫兹时域光谱系统的内部光路调节相对比较简单, 所采集的检测目标信息的信噪比较高, 其最大优点是可获得丰富的物质光学信息<sup>[8]</sup>。太赫兹波在样品和空气中传播速度不同, 表现为时域波形上峰值的时间延迟存在差异。根据实验系统所采集的含样品信息和参考信息(不含样品信息)的太赫兹脉冲, 利用傅里叶变换及相应的光学计算, 可获得检测目标的折射率、吸收系数和厚度等相关参数。目前, 太赫兹透射式时域光谱系统在无损检测领域的应用范围不断扩大, 如检测药品包衣质量、漆层厚度、纸张生产、物质指纹吸收谱等<sup>[9-11]</sup>。这些物质对太赫兹波的吸收能力较弱, 因此太赫兹波透射过后所采集的时域波形仍能保持完整, 并且电场的相位信息和振幅也可以通过太赫兹脉冲的相干特性获得, 大大降低了检测目标光学信息的提取难度。除了硬件系统的优势, 目前基于透射式太赫兹光谱的物质光学参数的算法也较为系统, 在各个领域均有广泛应用, 且发展前景十分广阔。

由于太赫兹波难以穿透极性液体(如水)和金属, 部分物质也会对太赫兹波具有强烈的吸收性, 此时对检测目标的厚度便有所限制, 从而大大增加了样品的制备难度, 使透射式太赫兹时域光谱系统的应用存在一定的局限性。而反射式太赫兹时域光谱系统则无需穿透待测样品, 因此对该类物质更易检测, 更能确保测量过程的可操作性。图3为反射式太赫兹时域光谱系统结构图。反射式太赫兹时域光谱技术通过采集经检测目标表面反射后的太赫兹脉冲获得光谱信息, 对于吸收较强的材料, 如碳纤维复合材料, 可应用反射式太赫兹时域光谱技术。太赫兹反射式时域光谱系统在设备光路组装和实验条件上比透射式要求更高, 对于检测目标的位置和获取参考信号的反射镜的位置要求保持严格一致, 该系统对于获取透射信号困难的检测目标应用能力更强。

## 2.2 基于太赫兹时域光谱系统的无损测厚

太赫兹测厚是太赫兹时域光谱技术在无损检测领域的重要应用。在太赫兹透射或反射模式下, 基于飞行时间原理进行厚度检测, 其中涂层测厚便是一大研究热点。对于涂层厚度有多种测量方法, 表1<sup>[12]</sup>中比较了不同测厚方法的优缺点。研究表明不同厚度的涂层特征在太赫兹时域光谱波形上显示出差异性, 利用太赫兹技术能够实现对涂层厚度的无接触测量, 检测精确度高, 适用性强。以反射式太赫兹时域系统为例, 根据太赫兹波束传播特点和折射定律, 可计算出待测样品厚度 $d$ <sup>[13]</sup>:

$$d = \frac{c \sqrt{\frac{n_1^2 + n_2^2 \sin^2 \theta}{n_1^2}}}{2n_1} \Delta t \quad (1)$$

式中:  $c$  为真空中的光速;  $n_1$  为待测样品折射率;  $n_2$  为空气折射率;  $\theta$  为入射角;  $\Delta t$  为待测样品上表面与下表面反射时延差。

表1 不同涂层测厚方法比较

Table1 Comparison of the thickness measurement for different coatings

| testing method                | advantage  | disadvantage   | application field   |
|-------------------------------|--|--|---|
| method of weight              | The operation is simple and the wet film thickness can be measured                             | The measurement results are average values with low precision  | laboratory application, suitable for small size plate test                                |
| metallomicroscopy             | high measurement accuracy and strong applicability   | destructive detection, long cycle, high cost   | for laboratory applications, standard test blocks should be prepared                      |
| eddy current method           | the equipment is portable and easy to be operated  | It is sensitive to the conductivity of matrix and has edge effect  | The most common engineering application, suitable for flat non-magnetic metal matrix      |
| ultrasonic method             | high sensitivity and portable equipment  | The measurement accuracy is easily affected by roughness, which requires coupling agent and is inconvenient to use | Has realized engineering application, suitable for metal and composite material matrix    |
| magnetic induction method     | the measurement accuracy is high, and the multi-layer thickness can be measured simultaneously | The fitting process of magnetic field intensity corresponding to measuring point is complicated                    | research phase, suitable for metal and composite substrates                               |
| photothermal radiation method | non-contact, fast detection speed and large observation area                                   | The equipment is expensive and the detection accuracy is easily affected by the environment                        | research phase, suitable for metal and composite substrates                               |
| terahertz method              | non-contact, high detection accuracy, strong applicability                                     | The detection accuracy is limited by the type and thickness of coating, and the operation is complicated           | Engineering application has been realized abroad, suitable for metal and composite matrix |

2013 年, Fukuchi 等<sup>[14]</sup>根据太赫兹波束在陶瓷表面涂层和粘接层中的反射波形(图 4), 测量出  $(325 \pm 27) \mu\text{m}$  的涂层厚度。2017 年, Krimi 等<sup>[15]</sup>提出了一种基于图形处理器的数值回归方法, 能够完成对多层结构中各个层的实时太赫兹厚度测量, 其中单层最低厚度为  $16 \mu\text{m}$ 。2022 年, Sun 等<sup>[16]</sup>基于太赫兹信号理论模型, 利用局部极值提取峰值在线计算折射率, 消除折射率变化对厚度测量的影响, 实现厚度的自动测量, 并显著提高了测量效率。

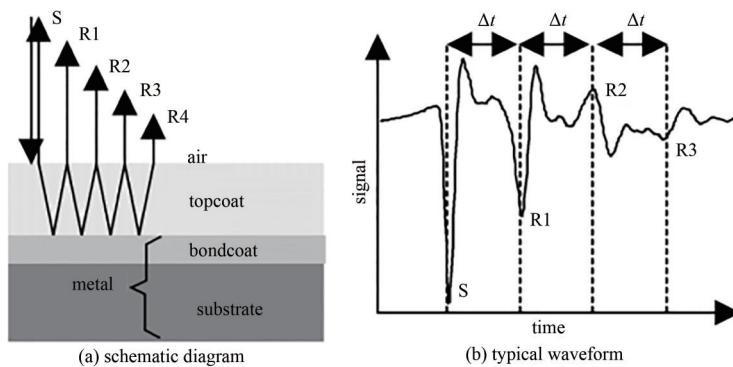


Fig.4 Multiple reflections of THz waves in the topcoat and typical reflected waveform

图 4 太赫兹波在涂层的多次反射和典型反射波形

透射模式或反射模式的太赫兹时域光谱系统, 在探索太赫兹和物质相互作用过程中发挥了重大的作用。但光谱检测需要专业的检测分析人员, 对人员要求高, 因此更加直观的太赫兹成像技术逐渐发展起来, 为检测人员和检测机构提供了更为直观的选择。

### 3 基于太赫兹成像技术的无损检测

不同于太赫兹光谱技术, 太赫兹成像技术可视性更强, 检测结果更加具象直接, 在近几十年发展迅速, 获得了行业人员的广泛认可。多样化的成像方式已经覆盖了多层次的应用领域, 包括生物医学成像、包装食品检测、文物检测以及反恐安防、人员安检等诸多方面。在太赫兹技术的无损检测应用中, 检测目标的含缺陷部分成像效果与无缺陷部分成像效果之间存在着显著的差异性, 因此通过太赫兹成像技术, 扫描检测目标使其成像, 以成像结果为基础进行处理, 根据检测要求可直观地观察检测目标的缺陷情况。太赫兹成像技术可分为不同类型, 按照信号类型进行分类, 主要分为连续波成像和脉冲成像, 表 2 为两种成像方式的比较。其中太赫兹连续波成像指太赫兹源发射的信号在整个周期内呈连续性; 太赫兹脉冲成像指成像信号在一个信号周期内仅在一定时间发射信号, 脉冲式太赫兹接收器探测出该信号从而获取成像结果。在复合材料的太赫兹无损检测实际应用过程中, 对于不同的检测目标, 可根据具体情况针对性地选择相应的太赫兹成像技术。

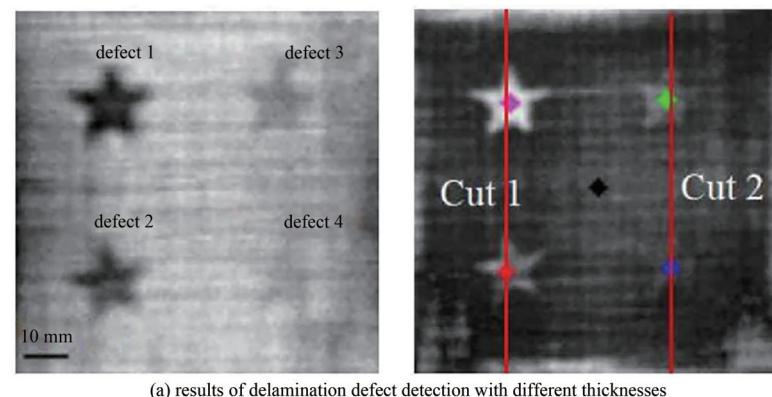
表2 太赫兹连续波成像和脉冲成像的比较

Table2 Comparison of continuous THz wave imaging and pulsed THz wave imaging

| category                     | continuous terahertz wave imaging | pulsed terahertz wave imaging |
|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| system complexity            | low                               | high                          |
| mass                         | about 3 kg                        | about 10 kg                   |
| speed                        | continuous, faster                | point by point, slower        |
| data complexity              | low                               | high                          |
| spectral information         | no                                | yes                           |
| depth information            | no                                | yes                           |
| refractive index information | no                                | yes                           |

### 3.1 太赫兹脉冲成像技术

太赫兹脉冲成像是当前应用范围最广泛的一种太赫兹成像方式，第一台以太赫兹为载波的成像系统就是太赫兹脉冲成像<sup>[17]</sup>。该成像方式通过逐点扫描技术获取检测目标的成像信息，其中每个采集到的点都包含了检测目标在对应点的振幅和相位信息。并且太赫兹脉冲处于亚皮秒量级，对于相位探测十分敏感，与其他一般强度成像方式相比，太赫兹脉冲成像的优势在于能获取更多、更有价值的信息，因此具有良好的成像潜力。太赫兹脉冲成像系统的基本构成是在太赫兹时域光谱系统的基础上新增加图像处理系统和扫描控制系统装置，通过反射或透射扫描方式进而完成对检测目标的成像。早期由于太赫兹辐射源和太赫兹探测技术水平的限制，太赫兹成像方式大多基于太赫兹脉冲源，从最初的太赫兹脉冲扫描成像，到后来的太赫兹电光取样实时成像、啁啾脉冲实时成像、太赫兹近场成像以及太赫兹层析成像<sup>[18]</sup>，基于 THz-TDS 的成像就是太赫兹脉冲成像技术的典型产品。



(a) results of delamination defect detection with different thicknesses

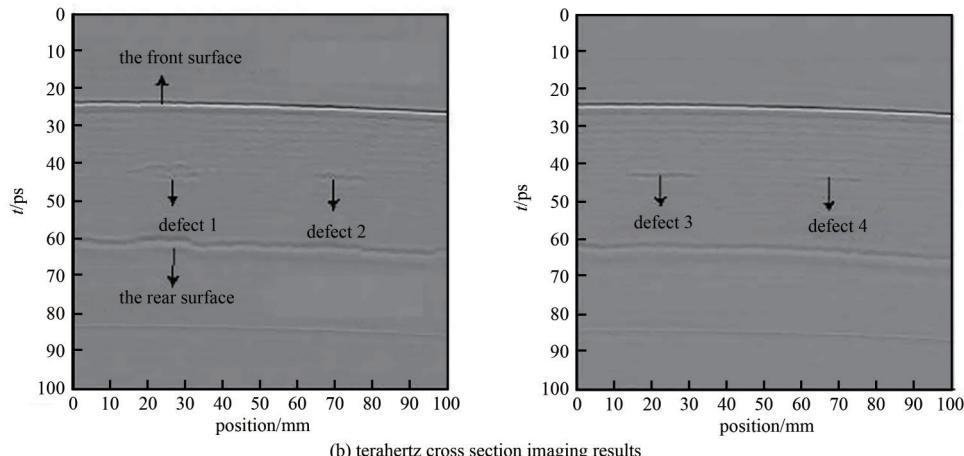


Fig.5 Terahertz imaging nondestructive testing results of GFRP

图 5 GFRP 的太赫兹成像无损检测结果

由于太赫兹脉冲成像技术采用逐点扫描的采样方式，因此获取的图像中任一像素点都与时域波形一一对应，使太赫兹波谱能够提供更丰富、更精确的信息，可以根据检测目标特点，从时域谱及傅里叶变换频谱中任选某一数据点的振幅或相位进行成像，从而重构检测目标的空间密度分布、折射率和厚度分布，分析检测目标的内部情况<sup>[19-21]</sup>。图 5 为太赫兹脉冲成像技术对复合材料 GFRP 的无损检测。该技术成像结果分辨率较高，有系统的

算法处理与之匹配，数据结果受背景噪声的干扰较小，信噪比较高，应用前景广阔，但也存在着一定的局限性。太赫兹脉冲源对飞秒激光器的性能要求很高，而能够投入使用的飞秒脉冲激光器大都价格昂贵，成本高。且获取单个点的信息需耗费一定时间，机械位移台扫描速度慢，所取像素点的多少决定了成像所需时间的长短，对于小面积的检测目标，成像动辄需十几个小时；对于大面积检测目标所需成像时间则更长。因而不适用于现场项目的实时监测，大多用于实验研究。

### 3.2 太赫兹连续波成像技术

THz-TDS 是一个宽谱的设备，对于某种特定材料，其与太赫兹相互作用可能只发生在某一特定的频率下，因此除了 THz-TDS 使用的太赫兹脉冲成像技术之外，太赫兹连续波成像技术(如 FMCW，调频连续波)的太赫兹无损检测系统在检测速度和功率上有更佳的表现。系统采用太赫兹连续波源，能够提供比脉冲波源更高的辐射强度。由于太赫兹连续成像系统无需使用飞秒激光泵浦产生太赫兹脉冲，不能像脉冲成像系统一样获取检测目标的光谱信息，但可以使用机械位移平台对检测目标进行连续大面积扫描而不需要使用时间延迟装置，在很大程度上节省了时间，简化了系统的复杂程度，降低了系统的价格成本<sup>[22-24]</sup>，更加有利于太赫兹成像技术的推广普及。

太赫兹连续波成像通常是根据检测目标被透射或反射后的太赫兹波强度获得太赫兹图像，实质是一种信号强度的成像。若是相干探测系统也可根据连续波的相位成像，尤其是对于大部分对太赫兹波无明显吸收的复合材料，可进行相位信息的厚度成像。经太赫兹源发射出的连续太赫兹信号穿过检测目标，若目标内部含有裂缝和孔洞等损伤和缺陷时，由于边缘效应或检测目标中掺有杂质会导致折射率发生变化，这些都会对穿过的太赫兹信号产生影响。当探测器采集到不同衰减程度的信号时，对检测目标进行成像，根据成像结果即可分析检测目标内部情况，判断所含缺陷的位置以及形状等，从而实现太赫兹无损检测。国内对太赫兹连续波成像技术十分重视，很多业内科研人员积极投入到连续太赫兹成像的研究中，太赫兹连续波成像技术已成为无损检测领域的重要应用研究。2005 年，首都师范大学太赫兹实验室首次成功调试出国内第一套太赫兹连续波成像系统，主要用于航空泡沫与铝基底粘合缺陷的探测、碳纤维材料结构探测以及航空工业中玻璃钢烧蚀程度检测等领域，图 6 为航天领域的缺陷检测<sup>[25]</sup>。2009 年以后，哈尔滨工业大学光电子研究所的李琦等<sup>[26-27]</sup>开始研究基于焦平面相机的太赫兹成像，并提出了一系列增强太赫兹成像分辨率的算法以及图像处理等方法。

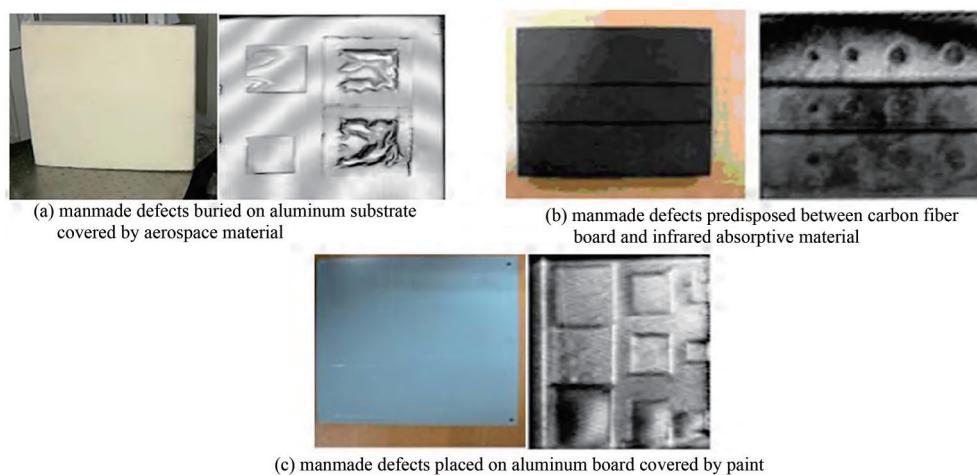


Fig.6 Defect detection in the aerospace field

图 6 航天领域的缺陷检测

## 4 复合材料的太赫兹无损检测技术发展趋势

复合材料是利用材料制备技术将不同性质的多种材料进行优化组合所形成的新材料，单一材料结构特点有限，通过多种材料性能的互补，能获取优异的综合性能。基于复合材料的优异特性，多用于航空航天、军事、核电、铁路等 10 大领域<sup>[28-30]</sup>，表 3 介绍了不同领域复合材料的相关应用情况。这些使用场景的环境更为苛刻，材料的结构也相对更为复杂，表 4 中列举了复合材料在使用中常见的缺陷类型及其对结构性能的影响，因此对复合材料的无损检测提出了更高要求。

表3 不同领域的复合材料应用情况

Table3 Application of composite materials in different fields

| field of application  | type of composites   |
|-----------------------|--|
| aerospace             | carbon fiber reinforced plastics, quartz glass fiber                                   |
| automotive industry   | carbon fiber reinforced thermoplastic and thermosetting composites                     |
| architecture          | carbon fiber laminate, thermosetting resin matrix composites                           |
| energy sources        | resin and fiber laminate   |
| energy storage        | carbon fiber reinforced plastics   |
| infrastructure        | glass fiber, aramid or carbon fiber composites   |
| ocean                 | fiber reinforced plastics, glass fiber, carbon fiber reinforced epoxy resin composites |
| pipes and tanks       | glass fiber, aramid fiber composites   |
| sports and recreation | carbon fiber, high strength glass fiber composites                                     |
| transportation        | metal matrix, thermoplastic resin composites   |

表4 复合材料在使用中常见的缺陷类型及其对结构性能的影响

Table4 Common types of defects in composite materials and their effects on structural properties

| defect types   | effect on structural properties                                       |
|--|---|
| cavity, incomplete curing, inclusion, delamination, fiber fracture deformation, crack, lack of glue, debonding | reduce the mechanical and physical properties of composite structures |
| surface scratches, cracks, uneven thickness of adhesive layer  | reduce the overall integrity, mechanical properties                   |

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，与传统的无损检测技术相比，在安全性、穿透性、成像分辨力以及散射强度等方面具有明显的优势，见表5，受到了国内外研究人员越来越多的关注。2007年，首都师范大学的张存林团队<sup>[31]</sup>基于连续太赫兹波成像实验平台对隔热泡沫进行成像，实现了最小2.6 mm的缺陷区域的成像。2014年，Ospald等利用太赫兹时域光谱反射技术检测碳纤维增强复合材料的表面涂层<sup>[32]</sup>。2016年，邢砾云等基于APIT-Ray 5000系统分析几种航空领域先进泡沫材料在太赫兹波段的光谱特性，利用THz-TDS成像技术检测泡沫材料的空洞、裂纹、脱粘以及夹杂等缺陷情况。图7为基于最大值时延模拟的脱粘程度三维图，进一步根据太赫兹成像机理提出超分辨率重建算法，显著提高了成像效果<sup>[33]</sup>。2021年，张国强等<sup>[34]</sup>基于调频连续波太赫兹技术，利用高超音速飞行器的复合陶瓷隔热瓦，设计出适用于无损检测的模拟裂纹类及孔洞类缺陷试块。采用连续太赫兹波技术进行实验，通过缺陷信号反射法和底面回波反射法，检测出这两类缺陷并优化了检测工艺。

表5 常规无损检测方法的优势与不足

Table5 Advantages and disadvantages of conventional NDT methods

| testing method             | advantages   | disadvantages   |
|----------------------------|--|---|
| ultrasonic testing         | It has comprehensive advantages in the parameters of defect size, location, direction, burial depth and property. The equipment is light, harmless to human body and environment, and can be tested on site. | Accurate qualitative and quantitative characterization of materials and parts defects still needs further research. The complexity of the part shape has certain limits.                                    |
| vibration testing          | It has comprehensive advantages in the detection of some composite defects that are difficult to be realized by conventional nondestructive testing methods.   | It has limitations on the detected object and is difficult to popularize in the field.  |
| pressure sensor testing    | suitable for testing composite sandwich plate and fatigue wearing parts  | In the structural design, it is necessary to consider the influence of inlaying on the mechanical properties of the structure, and it is not applicable to some structures with high strength requirements. |
| infrared heat wave testing | The depth of the defect can be determined and the detection speed is fast.   | The detection depth is not deep enough.   |
| radiographic testing       | The shape of defects is intuitive, and the size and nature of defects are judged quickly and accurately. No damage to the test room and partial pollution of the environment                                 | Radiation is harmful to human body and must be protected during operation.  |

综合国内外研究成果分析可见，太赫兹波技术在复合材料的无损检测领域已取得了十分优异的成绩。现阶段，国内外太赫兹无损检测技术的研究方向主要聚焦于涂层和漆层测厚以及表面和内部缺陷检测两方面，已取得相应的研究成果：沈阳飞机工业有限公司实现了基于太赫兹时域光谱系统的雷达吸波涂层测厚<sup>[35]</sup>；李迎等利用太赫兹透射时域光谱系统定量检测出含气泡涂层中直径大于3.5 mm、厚度大于0.6 mm的缺陷<sup>[36]</sup>，实现对缺陷大小和厚度的准确判断；图8为顾健等采用多种太赫兹成像方法准确识别2个目标涂层中预置的10 μm和15 μm粘接缺陷<sup>[37]</sup>。但这一检测技术缺陷样本相对单一，且存在探测速度慢，应用范围有限，对不同类别的缺陷检测方法无法定性分析，成像机理并未与缺陷特性相结合等问题<sup>[38-41]</sup>。

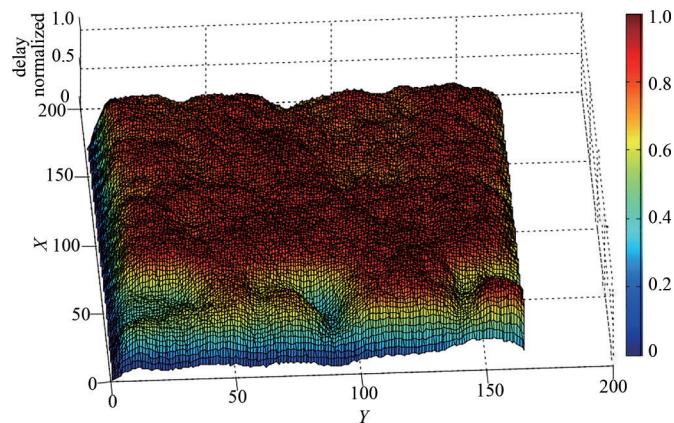


Fig.7 Terahertz 3D mapping based on maximum phase variation  
图7 基于最大值相位变化进行太赫兹三维构图

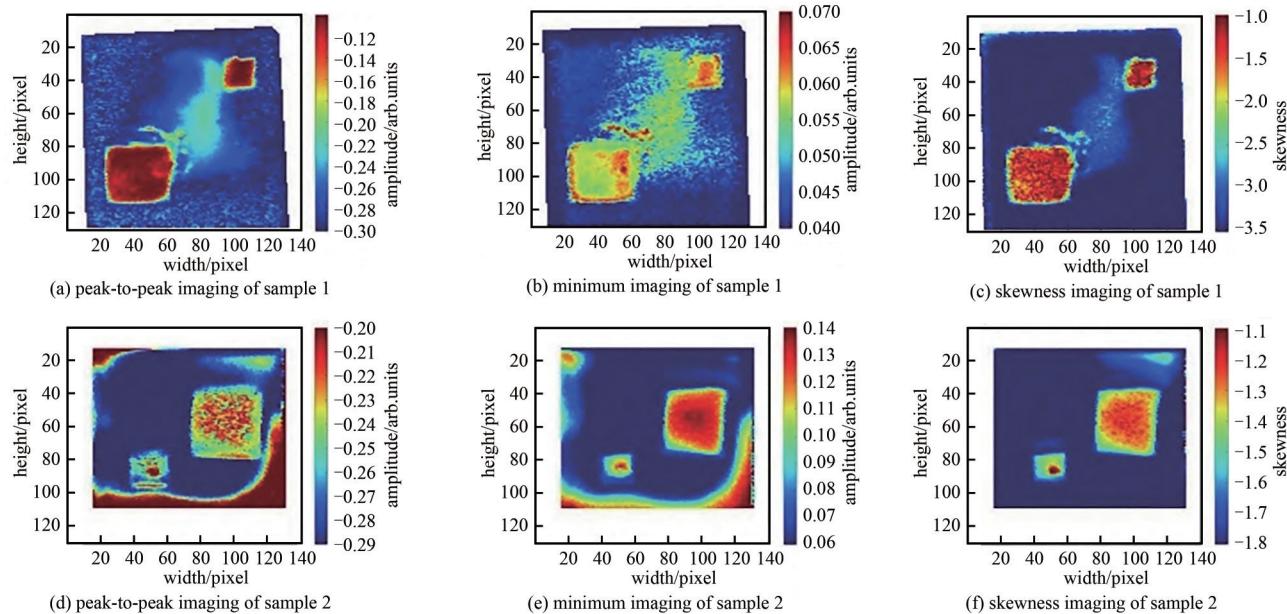


Fig.8 Terahertz imaging results of coating samples  
图8 涂层样品太赫兹成像结果

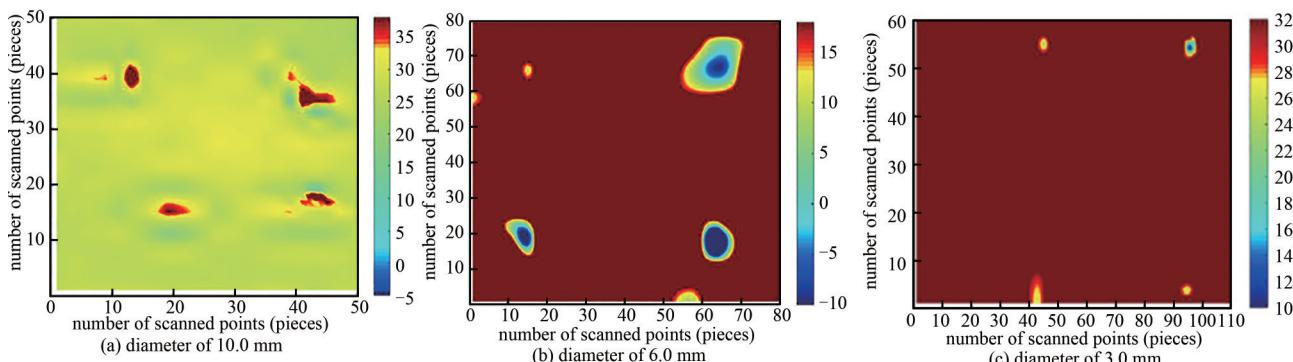


Fig.9 Image of processing results of debonding adhesive with different diameters  
图9 不同直径大小的胶粘剂脱粘处理结果图像

针对这一问题，近年来远大恒通联合首都师范大学光电子学教育部重点实验室做了大量的研究和测试，通过不断地研究，在快扫技术、测厚算法改进、特定算法建立、信号去噪、图像识别和可视化呈现等方面均取得了显著的成果，进一步提升了复合材料的无损检测实时性，减小检测目标特性对检测结果的影响，提升缺陷的定位以及缺陷区域的量化表征容限，建立三维和任一方向、任意切片可视化成像表征。图9为首都师范大学光电

子学教育部重点实验室部分研究成果，对胶粘剂脱粘情况进行无损检测，所得到的图像对比度、细节分辨率和边缘信息均显著增强；从标准偏差、平均梯度、信息熵、能量梯度和局部对比度进行比较<sup>[42]</sup>，5个客观评价指标数据均高于原始检测图像的对应值。在不断取得进步和成果的同时，仍存在样品和缺陷样本单一、检测成本高等问题。后续在降低设备成本，获取更多有实际缺陷的复合材料检测目标，优化算法，提高探测精确度和定量缺陷表征，建立不同缺陷的太赫兹响应特性数据库，运用机器学习提高图像分辨率等方面可进行更多研究，进而为太赫兹技术的广泛应用创造更多可能，更加有效地实现复合材料的无损检测。

## 5 结语

随着复合材料更多更广泛地用于高新技术领域，针对高性能复合材料的无损检测技术势必随之发展进步，从而满足复合材料的高质量要求，保障相关人员的安全。无损检测技术因高灵敏度、高穿透性、高信噪比，非常适合复合材料的检测，但我国无损检测技术仍处于尚未完全成熟的阶段，传统无损检测技术中的潜在劣势没有得到解决，新兴无损检测技术的潜在优势尚未得到开发，与国际水平仍存在差距，因此针对复合材料的无损检测技术仍有很长的发展之路。本文在总结与介绍太赫兹时域光谱和太赫兹成像技术的无损检测基础上，展望了未来基于太赫兹技术的复合材料无损检测的发展前景。不难看出，太赫兹技术作为新型的无损检测技术具有独特的优点，在无损检测领域有着不可替代的作用。展望未来，太赫兹无损检测技术有更为广泛的应用前景，并将继续成为现有复合材料无损检测技术的有力补充。

## 参考文献：

- [1] SIRTORI C. Bridge for the terahertz gap[J]. Nature, 2002, 417(6885):132–133. doi:10.1038/417132b.
- [2] FERGUSON B, 张希成. 太赫兹科学与技术研究回顾[J]. 物理, 2003, 32(5):286–293. (FERGUSON B, ZHANG Xicheng. Materials for terahertz science and technology[J]. Physics, 2003, 32(5):286–293.) doi:10.3321/j.issn:0379-4148.2003.05.002.
- [3] 余奕晨. 基于深度学习的太赫兹危险物品检测算法的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2019. (YU Yichen. Research on terahertz dangerous goods detection algorithm based on deep learning[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2019.) doi:10.27157/d.cnki.ghzku.2019.003106.
- [4] SLINGERLAND E J, JAHNGEN E G E, GOYETTE T M, et al. Terahertz absorption spectra of nitromethane[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2011, 112(14): 2323–2329. doi:10.1016/j.jqsrt.2011.06.006.
- [5] ALLIS D G, ZEITLER J A, TADAY P F, et al. Theoretical analysis of the solid-state terahertz spectrum of the high explosive RDX[J]. Chemical Physics Letters, 2008, 463(1/3):84–89. doi:10.1016/j.cplett.2008.08.014.
- [6] WIETZKE S, JANSEN C, JUNG T, et al. Terahertz time-domain spectroscopy as a tool to monitor the glass transition in polymers[J]. Optics Express, 2009, 17(21):19006–19014. doi:10.1364/OE.17.019006.
- [7] 刘嘉政. FPcA-II型太赫兹时域光谱仪设计及应用[D]. 天津:天津大学, 2013. (LIU Jiazheng. Designing the PFcA-II THz-TDS through instrumented impact and application[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2013.)
- [8] 廖晓玲. 太赫兹光谱技术在复合材料无损检测中的应用研究[D]. 杭州:中国计量学院, 2015. (LIAO Xiaoling. The research of terahertz spectrum detection technology applied in nondestructive testing of composite material[D]. Hangzhou, China: China Jiliang University, 2015.)
- [9] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(3):739–746. doi:10.1109/2944.571775.
- [10] PARK J W, IM K H, HSU D K, et al. Terahertz spectroscopy approach of the fiber orientation influence on CFRP composite solid laminates[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(7): 2051–2054. doi:10.1007/s12206-012-0513-5.
- [11] 孙霁. 基于太赫兹时域光谱的检测技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019. (SUN Ji. Research on detection technology based on terahertz time-domain spectrum[D]. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.) doi: 10.26969/d.cnki.gbydu.2019.000017.
- [12] 袁利娜,解二伟,张雪锋,等. 雷达隐身涂层测厚技术的现状与发展趋势[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(9):37–43. (YUAN Lina, XIE Erwei, ZHANG Xuefeng, et al. Status and prospect of thickness measurement for radar stealth coating[J]. Plating & Finishing, 2022, 44(9):37–43.) doi:10.3969/j.issn.1001-3849.2022.09.007.
- [13] 许健. 基于太赫兹时域光谱的复合材料无损检测技术研究[D]. 长沙:湖南大学, 2021. (XU Jian. Research on nondestructive testing technology of composite materials based on terahertz time domain spectroscopy[D]. Changsha, China: Hunan University, 2021.) doi:10.27135/d.cnki.ghudu.2021.002030.

- [14] FUKUCHI T,FUSE N,OKADA M,et al. Measurement of refractive index and thickness of topcoat of thermal barrier coating by reflection measurement of terahertz waves[J]. Electronics and Communications in Japan, 2013, 96(12): 37–45. doi: 10.1002/ecj.11551.
- [15] KRIMI S,TOROSYAN G,BEIGANG R. Advanced GPU-based terahertz approach for in-line multilayer thickness measurements[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017,23(4):1–12. doi:10.1109/JSTQE.2016.2646520.
- [16] SUN Fengshan,FAN Mengbao,CAO Binghua,et al. Terahertz based thickness measurement of thermal barrier coatings using long short-term memory networks and local extrema[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022,18(4):2508–2517. doi: 10.1109/TII.2021.3098791.
- [17] 周川. 太赫兹LFMCW雷达中频接收机的研究与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (ZHOU Chuan. Research and implementation of IF receiver for terahertz LFMCW radar[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [18] 邵丕彬. 太赫兹连续波成像及光子晶体光纤表面等离子体共振传感研究[D]. 天津:天津大学, 2011. (BING Pibin. Study on the terahertz continuous wave imaging and photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance sensor[D]. Tianjin,China: Tianjin University, 2011.)
- [19] 潘钊,温银堂,郑晓康,等. 基于太赫兹图像的航天复合材料粘接缺陷检测方法研究[J]. 计量学报, 2018,39(4):471–475. (PAN Zhao,WEN Yintang,ZHENG Xiaokang,et al. Study on nondestructive testing for bonding defects in aerospace composite based on terahertz image[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018,39(4):471–475.) doi:10.3969/j.issn.1000–1158.2018.04.05.
- [20] 王洁. 基于太赫兹时域光谱技术的材料超分辨层析成像研究[D]. 长春:吉林大学, 2022. (WANG Jie. Super-resolution tomography of materials based on terahertz time-domain spectroscopy[D]. Changchun, China: Jilin University, 2022.) doi: 10.27162/d.cnki.gjlin.2022.000156.
- [21] 贾宝栋. 无损检测技术在复合材料缺陷检测中的应用分析[J]. 冶金与材料, 2021,41(1):80–81. (JIA Baodong. Application analysis of nondestructive testing technology in defect detection of composite materials[J]. Metallurgy and Materials, 2021,41(1): 80–81.) doi:10.3969/j.issn.1674–5183.2021.01.036.
- [22] 江雪雷,许颖. 利用太赫兹时域光谱对覆盖层下钢板锈蚀厚度的无损检测[J]. 光学学报, 2022,42(13):68–75. (JIANG Xuelei, XU Ying. Nondestructive testing of corrosion thickness of steel plates under coatings by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2022,42(13):68–75.) doi:10.3788/AOS202242.1312001.
- [23] SARTORIUS B,SCHLAK M,STANZE D,et al. Continuous wave terahertz systems exploiting 1.5  $\mu\text{m}$  telecom technologies[J]. Optics Express, 2009,17(17):15001–15007. doi:10.1364/OE.17.015001.
- [24] MCGREGOR J A,POULTER E M,SMITH M J. Switching system for single antenna operation of an S-band FMCW radar[J]. IEE Proceedings—Radar,Sonar and Navigation, 1994,141(4):241–248. doi:10.1049/ip-rsn:19941231.
- [25] 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. (ZHANG Cunlin,MU Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2010,47(2):023001.) doi:10.1007/978–3–642–29564–5.
- [26] 丁胜晖,李琦,姚睿,等. THz共焦扫描成像图像处理方法初步研究[C]// 第九届全国光电技术学术交流会.北京:[s.n.], 2010: 656–660. (DING Shenghui,LI Qi,YAO Rui,et al. Preliminary study on image processing of THz confocal scanning image[C]// The 9th National Optoelectronic Technology Academic Exchange Conference. Beijing:[s.n.], 2010:656–660.)
- [27] 李琦,丁胜晖,姚睿,等. 太赫兹共焦扫描显微成像研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010,47(8):081101 (LI Qi,DING Shenghui,YAO Rui,et al. Advances in research of confocal THz scanning microscope[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2010,47(8):081101.) doi:CNKI:SUN:JGDJ.0.2010–08–003.
- [28] 潘钊,李宗亮,张振伟,等. 基于THz-TDS的陶瓷纤维复合材料缺陷检测分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2022,42(5):1547–1552. (PAN Zhao,LI Zongliang,ZHANG Zhenwei,et al. Defect detection and analysis of ceramic fiber composites based on THz-TDS technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022,42(5):1547–1552.) doi:10.3964/j.issn.1000–0593(2022)05–1547–06.
- [29] 陈奇,李丽娟,任姣姣,等. 基于太赫兹时域光谱技术的橡胶材料无损检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(3):379–384. (CHEN Qi,LI Lijuan,REN Jiaojiao,et al. Nondestructive testing of rubber materials based on terahertz time-domain spectroscopy technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(3):379–384.) doi:10.11805/TKYDA201903.0379.
- [30] 刘炳伟. 民机复合材料缺陷检测技术研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院, 2020. (LIU Bingwei. Research on defect detection technology of civil aircraft composite materials[D]. Guanghan,Sichuan,China:Civil Aviation Flight University of China, 2020.) doi:10.27722/d.cnki.gzgmh.2020.000082.
- [31] 沈京玲,张存林. 太赫兹波无损检测新技术及其应用[J]. 无损检测, 2005,27(3):146–147. (SHEN Jingling,ZHANG Cunlin. Terahertz nondestructive imaging technology and its application[J]. Nondestructive Testing, 2005,27(3):146–147.) doi:10.3969/j.

issn.1000-6656.2005.03.010.

- [32] OSPALD F, ZOUAGHI W, BEIGANG R, et al. Aeronautics composite material inspection with a terahertz time-domain spectroscopy system[J]. Optical Engineering, 2013,53(3):031208. doi:10.1117/1.OE.53.3.031208.
- [33] 邢砾云.航空泡沫芯材及夹层结构的太赫兹无损检测研究[D].长春:吉林大学,2016. (XING Liyun. Nondestructive testing of aviation foam core materials and sandwich structures using terahertz time domain spectroscopic imaging technology[D]. Changchun,China:Jilin University, 2016.)
- [34] 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 Guoqiang, ZHAO Changxing, XIN Yan, et al. Nondestructive inspection for ceramic matrix composite insulation tile based on FMCW terahertz technology[J]. Nondestructive Testing, 2020,42(12):29-34.) doi:10.11973/wsje202012007.
- [35] 袁利娜,解二伟,殷世坤,等.基于太赫兹时域光谱系统的雷达吸波涂层测厚方法:中国,CN202210847035.3[P].2022-10-11. (YUAN Lina, XIE Erwei, YIN Shikun, et al. A thickness measurement method for radar absorbing coatings based on terahertz time-domain spectroscopy system:China,CN202210847035.3[P]. 2022.)
- [36] 李迎,张朝晖,赵小燕,等.非金属涂层缺陷的太赫兹时域光谱检测[J].仪器仪表学报,2020,41(11):129-136. (LI Ying, ZHANG Zhaohui, ZHAO Xiaoyan, et al. Terahertz time-domain spectrum detection of non-metallic coating defects[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(11):129-136.) doi:10.19650/j.cnki.cjsi.J2006852.
- [37] 顾健,任皎皎,张丹丹,等.基于多次回波数值模拟的涂层缺陷太赫兹无损检测[J].光学学报,2022,42(15):103-110. (GU Jian, REN Jiaojiao, ZHANG Dandan, et al. Terahertz nondestructive testing of coating defects based on multiple echoes numerical simulation[J]. Acta Optica Sinica, 2022,42(15):103-110.) doi:10.3788/AOS202242.1512007.
- [38] 李宗亮.基于太赫兹技术的先进陶瓷纤维复合材料无损检测研究[D].秦皇岛:燕山大学,2021. (LI Zongliang. Research on nondestructive testing of advanced ceramic fiber composites based on terahertz technology[D]. Qinhuangdao,Shijiazhuang,China: Yanshan University, 2021.) doi:10.27440/d.cnki.gysdu.2021.001202.
- [39] ZHANG Jiyang, REN Jiaojiao, LI Lijuan, 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. doi: 10.1364/OE.394177.
- [40] 徐亚军,向红星,钟勉,等.碳纤维复合材料不同深度缺陷的太赫兹检测研究[J].电子测量技术,2022,45(8):58-63. (XU Yajun, XIANG Hongxing, ZHONG Mian, et al. Research on THz detection of CFRP with different depth defects[J]. Electronic Measurement Technology, 2022,45(8):58-63.) doi:10.19651/j.cnki.emt.2108673.
- [41] NUBLER D, JONUSCHEIT J. Terahertz based Non-Destructive Testing(NDT):making the invisible visible[J]. tm-Technisches Messen, 2021,88(4):199-210. doi:10.1515/teme-2019-0100.
- [42] LI Zhilong, ZUO Jian, ZHAO Yuanmeng, et al. A novel method for the enhancement of composite materials' terahertz image using unsharp masking and guided filtering technology[J]. Frontiers in Physics, 2021(9):750588. doi:10.3389/fphy.2021.750588.

#### 作者简介：

金玉环(1974-),女,硕士,高级工程师,主要从事太赫兹及红外热波技术应用推广、太赫兹产品应用研发、太赫兹无损检测、太赫兹生物以及太赫兹通信方面的研究.email:kathy.jin@broadht.com.

朱凤霞(1996-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹无损检测、太赫兹成像、图像处理.

封建欣(1973-),女,硕士,北京远大恒通科技发展有限公司CEO.