

文章编号: 2095-4980(2023)02-0157-19

## 太赫兹无损检测在文物保护领域的研究进展

孟田华<sup>1</sup>, 赵国忠<sup>\*2</sup>, 王浩航<sup>1</sup>, 刘红梅<sup>1</sup>, 任建光<sup>3</sup>, 胡伟东<sup>4,5</sup>, 卢玉和<sup>1</sup>, 李文宇<sup>1,2</sup>

(1.山西大同大学 物理与电子科学学院, 山西 大同 037009; 2.首都师范大学 物理系, 北京 100048; 3.云冈研究院, 山西 大同 037007; 4.北京理工大学 北京市毫米波与太赫兹技术重点实验室, 北京 100081; 5.太赫兹技术(大同)研究院, 山西 大同 037000)

**摘要:** 为更好地设计基于不同材料、不同制作工艺文物的最佳保护方案, 文物保护科技人员首先需要选用最有效的无损检测方法对文物进行全面检测。太赫兹波具有光子能量低、对非金属和非极性物质有较强穿透性、可同时获得脉冲电场振幅和相位信息、较好的抗干扰能力等独特性质, 使其在诸多无损检测方法中脱颖而出。本文系统综述了太赫兹技术在文物无损检测应用中的最新研究进展; 阐述了不同类型文物材料的太赫兹光谱特征、太赫兹成像检测技术原理和特点; 指出了太赫兹无损检测技术对不同类型文物进行无损检测的技术关键点, 列举了太赫兹技术在文物科学领域最成功和最具代表性的应用实例。最后展望了太赫兹无损检测技术在文物保护领域的发展趋势。

**关键词:** 无损检测; 太赫兹光谱; 太赫兹成像; 文物检测; 高灵敏度

**中图分类号:** TN29; O439

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2022132

## Research progress of terahertz nondestructive testing in the field of cultural relic

MENG Tianhua<sup>1</sup>, ZHAO Guozhong<sup>\*2</sup>, WANG Haohang<sup>1</sup>, LIU Hongmei<sup>1</sup>, REN Jianguang<sup>3</sup>,  
HU Weidong<sup>4,5</sup>, LU Yuhe<sup>1</sup>, LI Wenyu<sup>1,2</sup>

(1.School of Physics and Electronics Science, Shanxi Datong University, Datong Shanxi 037009, China;

2.Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

3.Yungang Research Institute, Datong Shanxi 037007, China;

4.Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

5.Terahertz Technology(Datong) Institute, Datong Shanxi 037000, China)

**Abstract:** To design the optimal protection scheme for cultural relics of different materials and production techniques, the cultural heritage scientists are in constant search of the most effective nondestructive testing method for the overall survey of the cultural relics. Due to the unique properties of terahertz wave's low energy, strong penetrability for non-metallic and nonpolar substances, simultaneous measurement of amplitude and phase information, strong anti-interference capacity, etc., terahertz technology has been gaining an edge over other conventional nondestructive testing methods. In this review paper, the latest progress of terahertz technology applied in nondestructive testing of cultural relics are introduced, and the terahertz spectra characteristics of various cultural relics materials are illustrated. The principle and characteristics of terahertz imaging detection technology are expounded. The key issues in the application of terahertz nondestructive testing technology for various cultural relics are discussed, and the most successful and representative application examples of terahertz technology in cultural relics science are listed. Finally, we present the developing trend of terahertz nondestructive testing technology in the field of cultural relics.

收稿日期: 2022-06-30; 修回日期: 2022-08-16

基金项目: 国家重点研发计划专项资助项目(2021YFB3200100); 国家自然科学基金资助项目(62071312); 山西省筹资金资助回国留学人员科研资助项目(2020-135); 山西大同大学云冈专项资助项目(2020YGZX002; 2020YGZX003; 2020YGZX004)

\*通信作者: 赵国忠 email:guozhong-zhao@126.com

**Keywords:** nondestructive testing; terahertz spectrum; terahertz imaging; cultural relics detection; high sensitivity

文物领域的无损检测有其特定的含义,泛指一切不给所测文物带来任何宏观物理变化和潜在危害的分析检测技术。文物保护科学家根据电磁波谱各个频段的优势和检测需求,几乎应用了所有频段<sup>[1-2]</sup>,如:利用超声波对文物浅层病害进行无损检测<sup>[3-4]</sup>;利用微波段的探地雷达探寻地下文物或遗迹<sup>[5]</sup>;利用可见光波段的摄影技术分析文物材料<sup>[6-9]</sup>;利用傅里叶红外光谱仪对可微量采样文物物质的化学结构进行识别<sup>[10]</sup>;应用非侵入性分析技术如红外和近红外相机高灵敏度地检测炭黑,从而显现图纸下的隐藏颜料和褪色文字<sup>[11-12]</sup>;基于光化学反应原理,使用紫外光对有机染料和油漆进行检测<sup>[13]</sup>;X射线荧光(X-Ray Fluorescence, XRF)光谱仪和X射线衍射方法通常用来进行矿物颜料等元素的分析<sup>[14]</sup>,以及传统的拉曼光谱<sup>[15]</sup>、XRF光谱<sup>[16]</sup>、中子技术<sup>[17-18]</sup>及可移动原子力显微镜<sup>[19]</sup>对文物材料如各种颜料的无损检测和分析。尽管电磁波谱中被称为亚毫米波和远红外射线的太赫兹(terahertz, THz)波(频率0.1~10 THz,波长30 μm~3 mm)在文物检测方面还未得到充分利用,但其对陶瓷、塑料、晶体、岩土等很多介电材料、非极性物质具有良好的穿透性,使得具备高分辨力、强稳定性、强穿透力和强抗干扰的THz技术在诸多无损检测方法中脱颖而出,其潜在的高效检测手段和更加细致可靠的评价方法为文物检测领域注入了新的活力<sup>[20-23]</sup>。THz辐射的独特性质决定了它在光谱技术方面可以成为红外光谱技术、拉曼光谱技术的互补技术;在成像方面可以成为X射线成像技术的互补技术,从而成为本世纪文物检测技术研究的一个热点。

为进一步推动THz技术在文物检测领域的研究,特别是推动国内相关研究的发展,本文梳理总结了THz技术在文物检测应用中的主要工作和重要进展,介绍了利用THz技术对不同类型文物材料的光谱和成像检测方法,希望吸引更多同仁投入到新型THz技术检测文物的研究中,从而助力我国THz技术的发展。

## 1 不同文物材料的太赫兹光谱研究

THz频率范围的光谱研究已经进行了几十年,为通信、生物和医学、无损检测、国土安全、食品和农业产品质量监测、全球环境监控、文物保护等领域做出了巨大贡献<sup>[24-25]</sup>。与中红外波段一样,很多物质会在THz波段出现指纹吸收光谱,但不同于中红外波段特征峰产生于分子内部信息,THz光谱的特征则取决于分子和分子间的行为。基础物理研究中,半导体和无机材料的远红外分析有着悠久的历史。事实上,早在1969年为了矿物开采研究,使用频率域THz系统检测了几种矿物和无机材料的光谱,包括朱砂(cinnabar, HgS)和雌黄(orpiment, As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>),而这些材料在历史上被广泛用作艺术品的颜料<sup>[26]</sup>。显然,跨学科交流和数据共享是推动THz技术在文物保护领域取得进展的重要组成部分。因而,建立不同材料的THz数据库是很有价值的,可以为相关文物保护研究人员提供其所需求材料的THz特征数据和THz检测系统参数<sup>[27]</sup>。

大多数光谱技术都有公开或商业可用的数据库,为艺术、建筑和考古材料的研究提供标准和比对光谱数据,如红外和拉曼数据库(<http://irug.org>)。尽管目前还没有商业或实用的THz谱库,但日本的国家信息通信技术研究院建立了文物材料的THz光谱数据库(<http://thzdb.org>),并与理化研究所的纯化学物质数据库进行了合并<sup>[28-29]</sup>。从起初的Fukunaga和Piccolo使用傅里叶变换红外太赫兹光谱(Fourier Transform Infrared Spectrometer-Terahertz, FTIR-THz)和太赫兹时域光谱(Terahertz-Time Domain Spectrometer, THz-TDS)所测量的500多个光谱数据<sup>[30-31]</sup>开始,经过后期相关研究者的陆续补充,现在的数据库中已达1 585条光谱数据。

### 1.1 绘画类文物材料的太赫兹光谱研究

在已报道的各种文物材料的THz光谱研究中,对壁画、版画、帆布画等绘画类艺术品相关材料的研究成果较多:

1) 利用THz光谱可以区别不同粒径的同种颜料。如图1(a)左边为世界名画《八桥图》的局部,在这幅作品中,利用颜料颗粒从极细渐变到粗糙的手法将花和叶子绘制在黄金上。虽然是由同一种矿物颜料制成,但由于颗粒大小不同而呈现出不同的颜色,其中淡蓝色和绿色的颗粒直径平均为5 μm,较暗颜色的颗粒直径为30 μm。分析这类艺术品,必须考虑颜料颗粒大小对光谱的影响。图1(b)为不同粒径蓝铜矿样品的THz-TDS测试光谱图,当颜料粒径小于40 μm时,光谱更加清晰。使用粗粒颜料时,产生的晦暗特征可能是由于Mie散射造成的<sup>[2,32-33]</sup>。

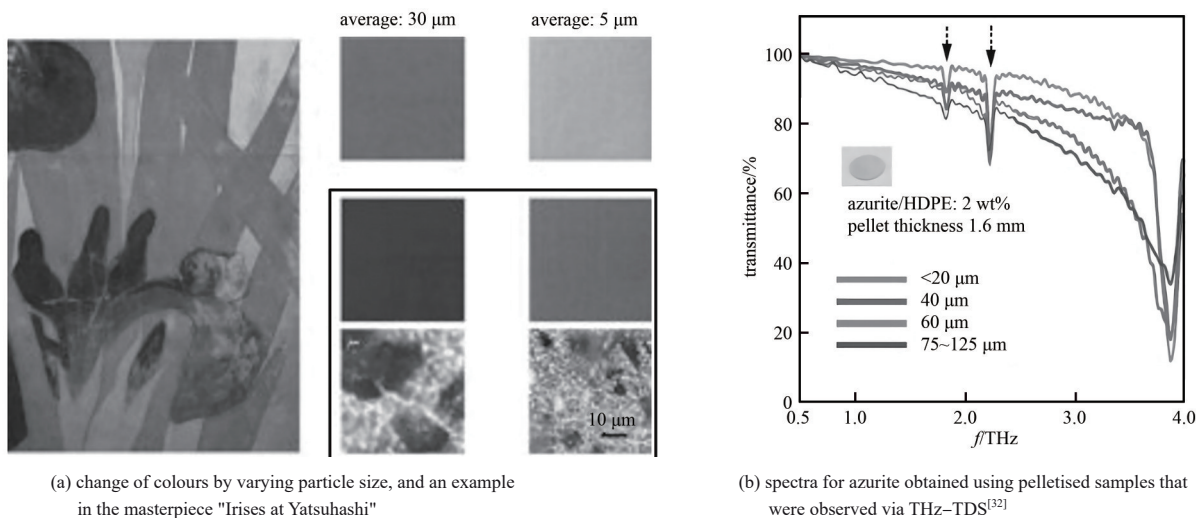


Fig.1 Influence of pigment particle size on THz spectra

图1 颜料颗粒对太赫兹光谱的影响

2) 利用 THz 光谱也可以区分同一种颜色的不同颜料。图 2 为人眼看来都是一样的 5 种白色颜料的 THz 光谱，测试的颜料有石灰白、铅白、锌白、立德粉(硫化锌和硫酸钡的混合物)和钛白<sup>[34]</sup>。这些颜料的 THz 透射特性完全不同，这表明可以辅助主成分分析法来区分材料。如，与油基粘合剂混合时变得透明的石灰白被广泛用作人体颜料，虽然石灰白的存在人眼无法识别，但利用 THz 光谱可以很容易区分开来<sup>[34]</sup>。

3) 利用 THz 光谱可以识别不同矿物颜料。图 3 为各种常用矿物颜料的 THz 光谱，除了炭黑和土颜料外，大多数颜料在 THz 波段都出现了明显的透射峰。其光谱特征不仅是由主元素的存在决定，分子结构也起着重要作用<sup>[35]</sup>。

4) 利用 THz 光谱可以识别不同有机颜料。图 4 为天然和合成有机染料的 THz 光谱，图 4(a)中，提取自昆虫的胭脂虫红和乌贼墨色在 THz 波段几乎是透明的，而来源于植物的染料光谱则变化较大(图 4(b))，特别是从植物根茎中提取的染料往往呈尖峰状。人工合成染料是现代绘画中常用的染料，其数量和种类将不断增加。图 4(c)为几种传统合成染料的 THz 光谱，大多出现清晰的特征透射峰<sup>[36]</sup>。

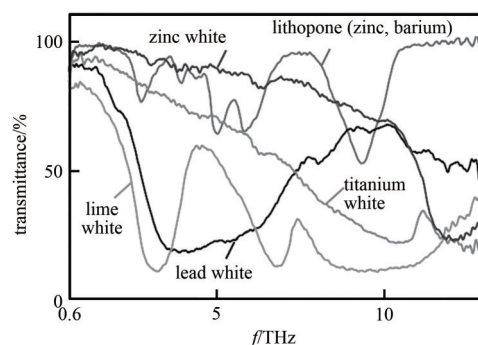
5) 利用 THz 光谱可以识别各种艺术品的粘合剂。一些研究小组对各种粘合剂进行了 THz 光谱无损分析，以确定这些粘合剂在 THz 区域是否会出现特征峰。然而如图 5 所示，并无明显的透射峰，但根据谱线的差异可以区分粘合剂的类型。此外，无论是天然的还是人造的粘合剂，大多在 THz 频段内是相对透明的(蜂蜡除外，如图 5(c)所示)<sup>[37]</sup>。此外，清漆等粘合剂在 THz 波段的高透过率/透明度可以使 THz 波穿透到绘画层，保证颜料的光谱不受清漆存在的影响，这是区别于中红外波段光谱检测的一个优势。

总之，由上述分析可见，利用 THz 光谱可以有效识别和区分绘画类文物中所用的相关材料。

## 1.2 其他文物材料的太赫兹光谱研究

与绘画类材料的众多研究报告相比，基于其他材料文物的 THz 光谱研究较少，通过文献整理，主要有以下几种材料：

1) 基于石质文物 THz 光谱可用来评价石质文物病害的劣化情况。图 6 为德国 Krügener 小组利用 THz 技术对汉诺威的下萨克森州国家博物馆的一个石质圆形浮雕内部裂隙进行探测的情况，通过 THz 时间延迟差不仅精确测量了 5~7 mm 的隐藏裂隙<sup>[38]</sup>，还有效检测了 16 世纪釉面陶土层下的缺陷<sup>[39]</sup>。山西大同大学研究小组(本课题组)在露天石质文物病害及防护检测和监测方面做了大量研究。如，利用云冈石窟不同风化深度砂岩样品的 THz 光谱数据，结合支持向量机(Support Vector Machine, SVM)软件，建立了风化深度预测模型。图 7 为深度范围在 0.1~5 cm, 8~20 cm 和 33~85 cm 的 3 个砂岩样品的 THz 透射谱<sup>[40]</sup>，其中图 7(a)中的小图为 0.795 THz 处的透射系数；图 8

Fig.2 Spectra of white pigments and an example of a mixture  
图2 白色颜料和混合物的光谱



为石质文物空鼓病害的 THz 无损检测及预测模型的应用流程图<sup>[41]</sup>。此外, 该研究组还对石质文物材料和文物风化程度进行了 THz 光谱检测和研究<sup>[42-46]</sup>。

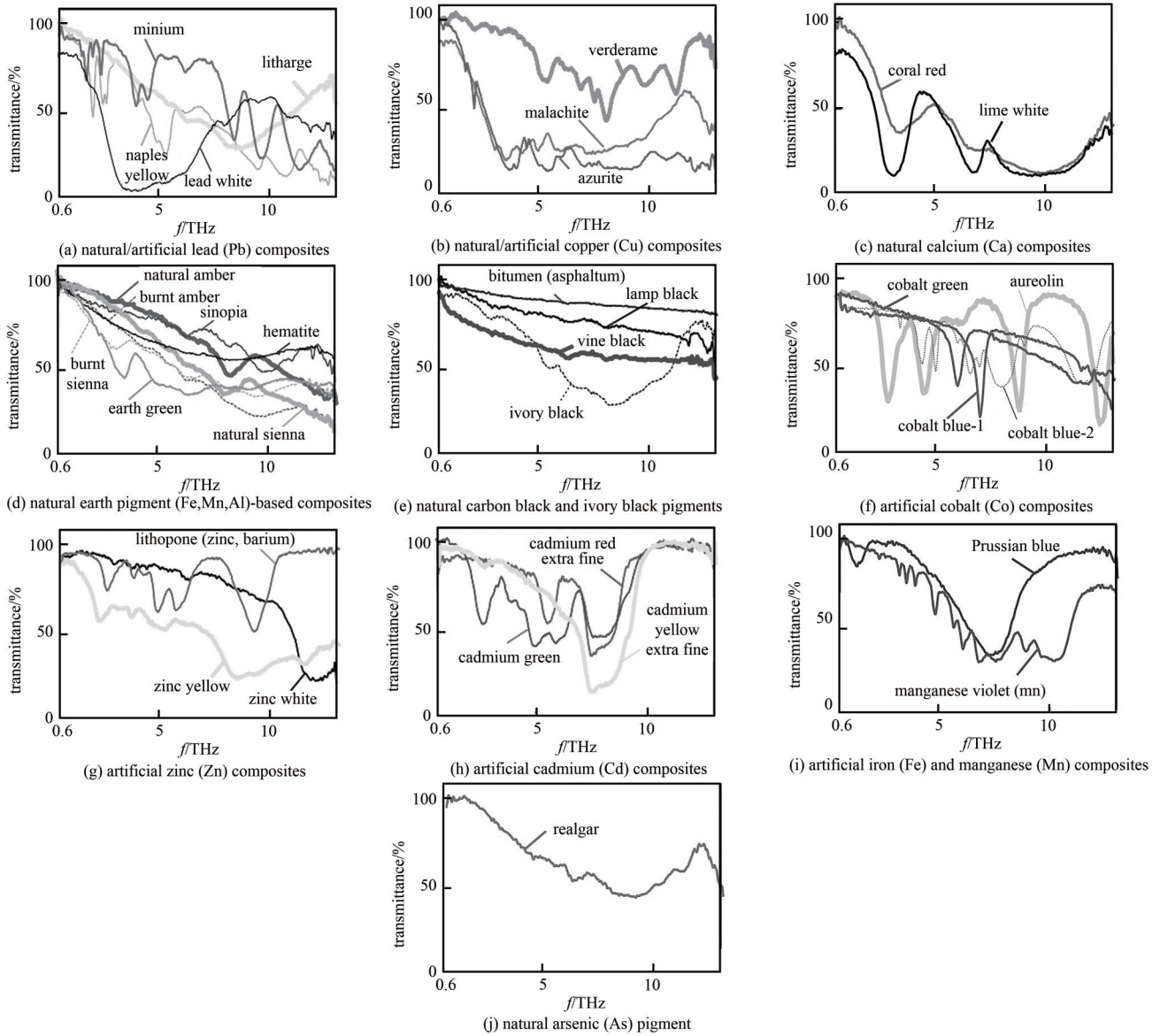


Fig. 3 Terahertz spectra of common mineral pigments

图 3 常用矿物颜料的太赫兹光谱

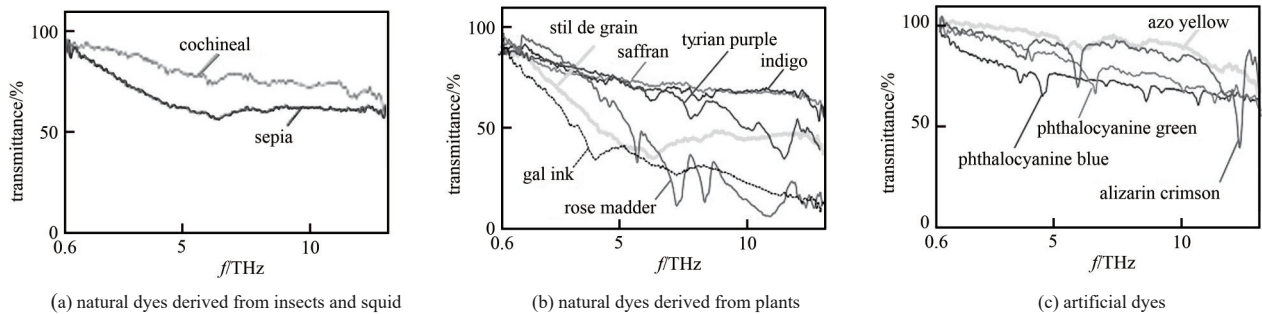


Fig.4 Terahertz spectra of natural dyes and artificial dyes

图 4 天然染料和合成染料的太赫兹光谱

2) 基于木制画像文物的 THz 吸收光谱可有效检测木制画像的内部结构和隐藏缺陷。Skryl 组对一幅 19 世纪的俄罗斯木质圣像画隐藏缺陷进行了检测<sup>[47]</sup>, 图 9 为白杨木样品及其木结和平整部分的 THz 吸收光谱, 可见其明显



的区别。

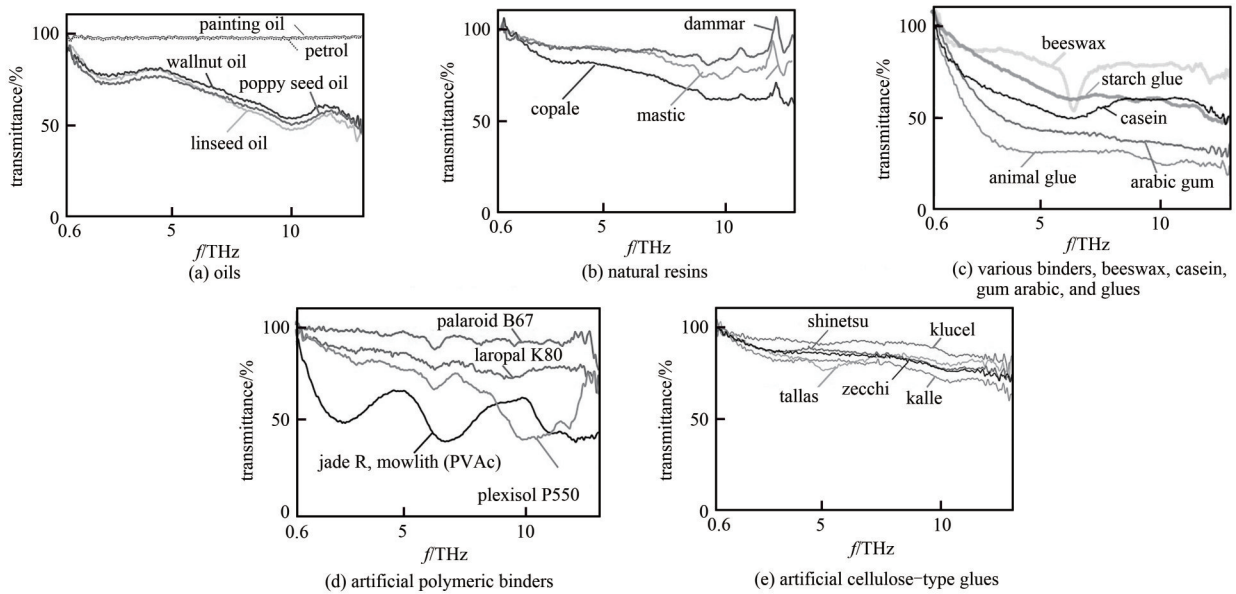


Fig. 5 Terahertz spectra of binders

图 5 粘合剂的太赫兹光谱

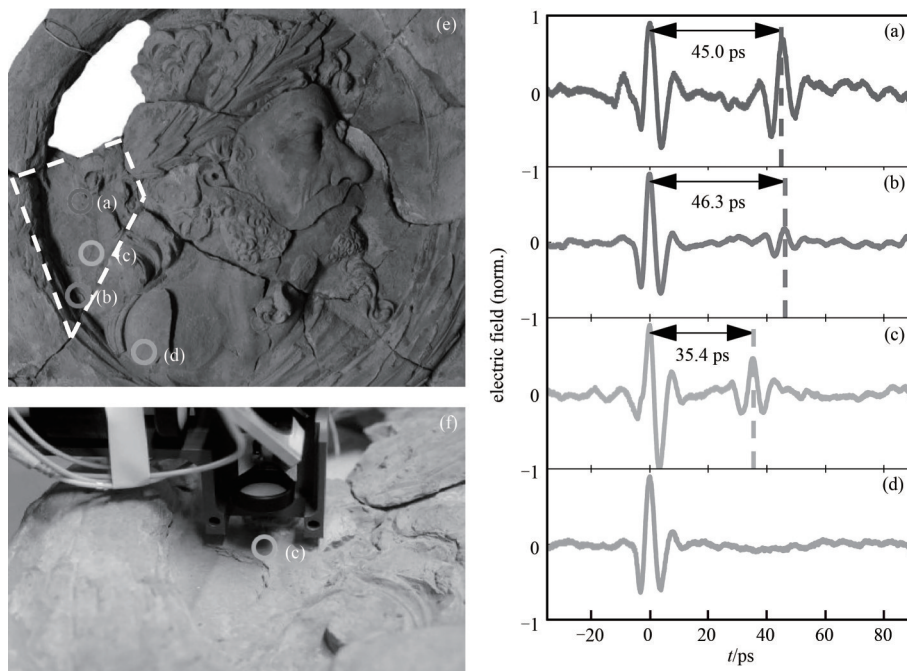


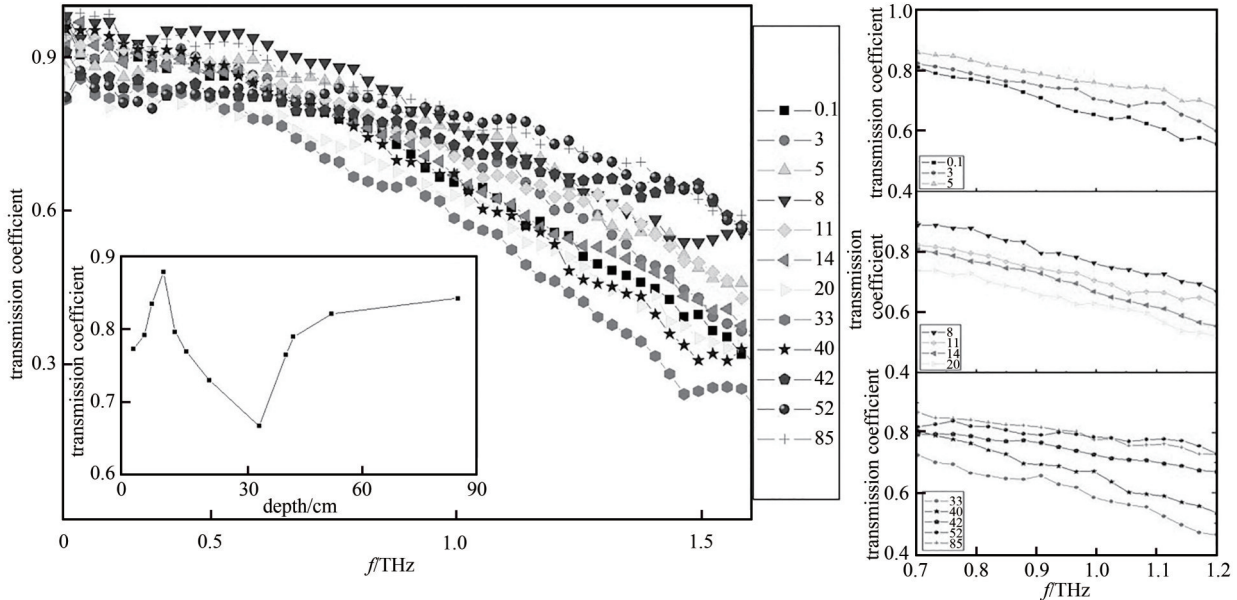
Fig. 6 Panels(a~d) are the reflected terahertz pulses from various locations on the medallion, the positions that correspond to each measurement are marked on panel; (e) it is easy to see that the area where points (a~c) lay presents an internal air gap that generates an echo 35 ps to 45 ps from the surface, which corresponds to 2.3 mm to 3.4 mm from the surface. The measurement at point (d) shows that the stone is solid and has no internal structure at that position, a dashed line approximately delimits the damaged area; (f) photograph of the measurement process at position (c), the measurement point is indicated

图 6 图(a)~(d)为从圆形浮雕板不同位置(a~d)反射的太赫兹脉冲,图上标记了与每个测量值相对应的位置;(e) 表面 2.3~3.4 mm 间的点(a~c)下内部空气狭缝所产生的回波位于 35~45 ps 间,d 点的测量表明石头是坚固的,在该位置没有内部结构,虚线大致划定了损坏区域;(f) c 点处测量过程

3) 基于纸质文物的 THz 透射、吸收及折射率光谱可以对纸质文献进行检测和鉴别。Bardon 系统研究了历史文献上的各种墨水<sup>[48]</sup>, 如图 10 所示, 为几种不同墨水的 THz 吸收和折射率谱, 通过光谱的差别可区分鉴别不同的墨水类型。另外, 该研究组还研究了 32 种羊皮纸的 THz 吸收光谱<sup>[49]</sup>。

此外, THz 光谱检测技术也逐渐用于文物防伪领域, 如基于 THz 波对红木良好的穿透性及指纹特性, 王远等分别对巴里黄檀、奥氏黄檀、大叶紫檀、小叶紫檀、交趾黄檀等 5 种红木, 实现了准确率高达 94% 和 96% 的分

类别识别<sup>[50]</sup>；张文涛等提出的一种基于随机森林(random forest)预测模型的 THz 时域光谱木材鉴别方法，也成功对 4 种木材(2 种红木，2 种非红木)进行了识别率为 91.25% 的准确识别<sup>[51]</sup>；刘海玲等对 2005 版真伪百元人民币的白水印和安全线两处防伪特征区域进行了成功鉴别<sup>[52]</sup>。



(a) the transmission spectra of the samples (b) the details of the transmission spectra at 0.7~1.2 THz

Fig.7 Terahertz spectra of the weathered sandstone samples in Yungang Grottoes

图 7 云冈石窟风化砂岩样品的太赫兹光谱

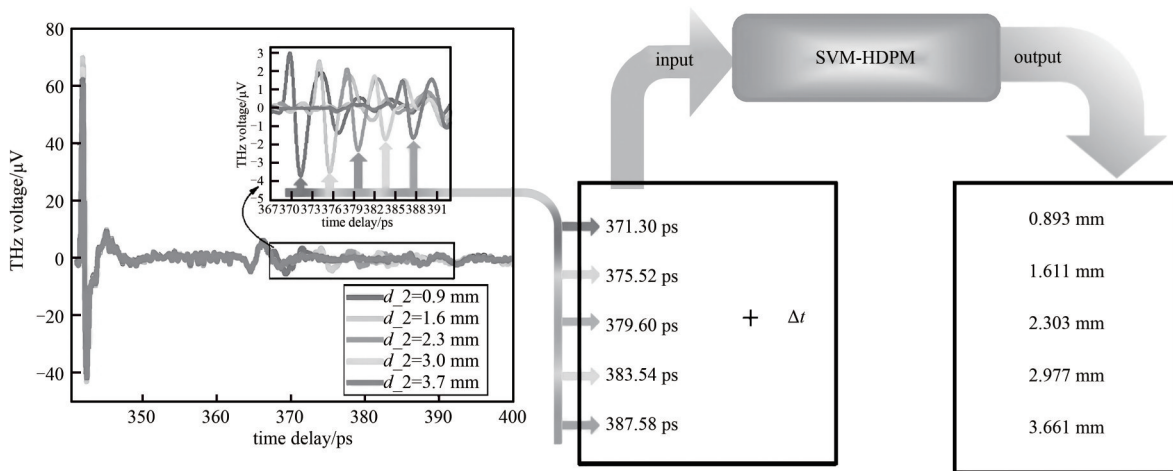


Fig.8 The diagram of detailed process for predicting hollowing deterioration thickness application of the SVM-HDPM<sup>[41]</sup>

图 8 SVM-HDPM 在空鼓检测应用中的流程示意图<sup>[41]</sup>

## 2 各类文物的太赫兹成像研究

THz 技术在诊断医学、安全、材料表征、无损评价、质量控制等领域的基础和应用研究都取得了巨大的进展，这源于它独一无二的特性，如介质穿透性、化学特异性、相较微波的高空间分辨率及对生物“近似无辐射”的辐射安全性<sup>[53-55]</sup>。近年来，THz 光谱成像技术(Terahertz Spectral Imaging Technique, THz-SIT)在生物化学、生物传感、工业过程管理、水合分析、食品质量监控和农业光子学等新兴应用领域高速发展<sup>[22,55-60]</sup>，同样，THz-SIT 也迅速征服了文物保护领域<sup>[38,61-64]</sup>。在已有成熟成像技术的情况下，THz-SIT 在该领域“迅速成名”的原因主要源于其非电离、非接触式成像。THz 波段提供了额外的化学特异性优势(特别是在这个领域常见的化学物质，如墨水、染料、釉、胶水、宝石中的金属氧化物等)和对大量材料的透明性(尤其是在这个领域常见的材料，纸、木头、布料、大理石、象牙、骨头等)。最重要的是，大多数 THz-SIT 成像仪都容易与反射模式的层析成像法扩展兼容，而反射模式可在野外环境中对各种人工制品进行深度剖面分析。因此，近年来，THz-SIT 在这一领域

有很多方向的应用<sup>[65-70]</sup>。

尽管 THz 波在各领域的应用急剧增长，但 THz-SIT 仍面临着采集速度低、成本高、成像系统笨重、“穿透屏障”模式下光谱对比度有限和空间分辨力低等问题。表 1 简要对比了各种商用成熟的成像技术与 THz-SIT 的主要优缺点。

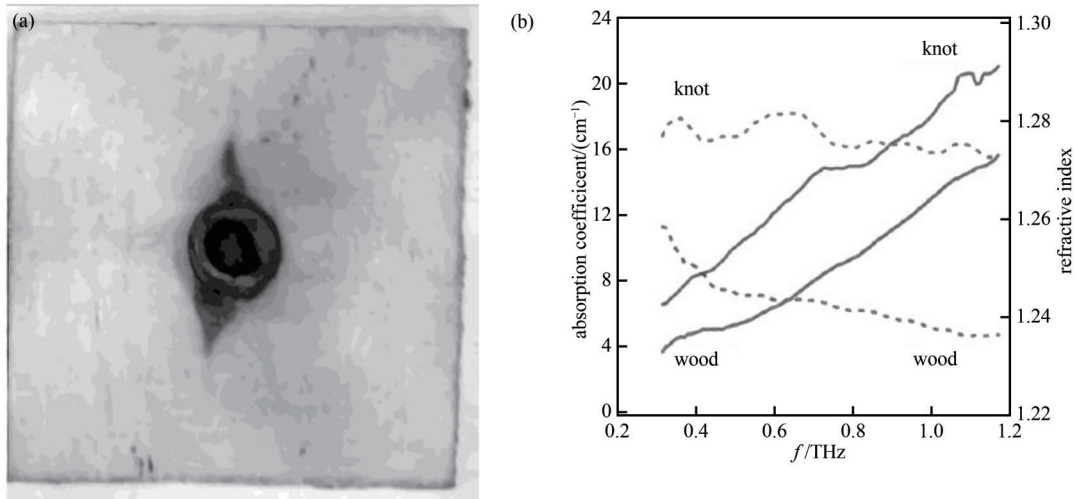


Fig.9 (a) photograph of the aspen sample; (b) absorption coefficients (solid) and refractive indices(dotted) of the knot and wood<sup>[47]</sup>  
图9 (a)白杨木样品照片;(b)木节和木材的吸收系数(实线)和折射率(点线)<sup>[47]</sup>

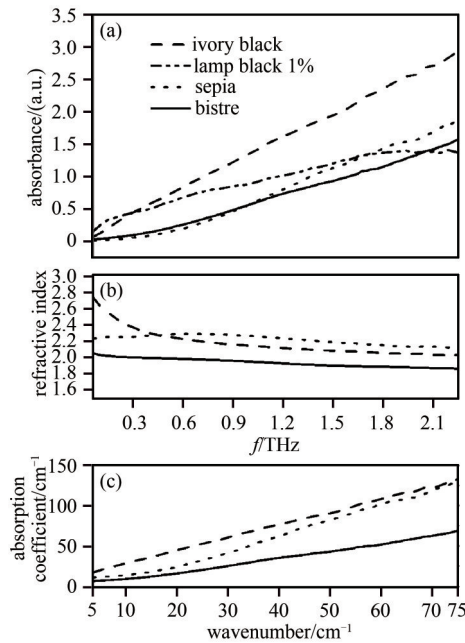


Fig.10 Terahertz absorbance spectra, refractive indices and absorption coefficients for bistre, ivory black, sepia and lamp black pigments, measured in transmission from 400 mg pellets with a mass ratio of pigment to polyethylene of 10% (lamp black: 1%)<sup>[49]</sup>  
图10 从颜料与聚乙烯质量比为10%(灯黑:1%)的400mg颗粒中以透射模式测量的赭黄、象牙黑、棕褐色和灯黑颜料的太赫兹吸收光谱(a)、折射率(b)和吸收系数(c)<sup>[49]</sup>

根据 THz 源的产生方式，THz 成像系统分为电子学 THz 成像系统和光子学 THz 成像系统 2 种类型<sup>[71-72]</sup>。目前，THz 电子学成像系统大多采用对微波进行倍频放大的方式获得 THz 源，以波导管和增益喇叭对 THz 波进行传输，利用成本较低的零偏检波器直接检波或外差式谐波混频器对 THz 波进行探测。此方法虽然在 THz 信号的产生上有着结构相对简单的优点，但由于多次倍频过程产生的复杂高阶谐波干扰，影响到系统的带宽和 THz 转换效率，导致成像质量降低<sup>[73]</sup>。而光子学 THz 成像系统则是借助超快飞秒激光技术的光整流法或光电导天线法产生 THz 辐射源。光整流法是利用亚皮秒级激光脉冲与非线性介质相互作用产生低频电极化场辐射 THz 脉冲，光电导天线法是利用飞秒激光脉冲照射半导体材料表面，激发光生载流子，利用载流子在外加偏置电场作用下



的加速运动效应而获得 THz 辐射。对应地, 采用基于光电导辐射机理逆过程的光电导采样测量和自由空间光电取样测量方法对 THz 光进行探测。此方法避免了电子学的多次倍频过程, 没有多余杂波产生, 具有较大的系统带宽, 频段更高, 信噪比更好, 可以实现高质量的振幅及相位成像<sup>[74]</sup>。

根据 THz 源的工作方式, THz 成像系统分为 THz 脉冲成像系统和连续波(Continuous Wave, CW)成像系统<sup>[75]</sup>。由于截然不同的机制, 2 种系统得到的图像数据是完全不同的。THz 脉冲成像系统的信息量丰富, 可以进行振幅和相位成像, 也可以对任意一个频率分量成像, 从而可以解释被测物的不同特征。其每一个像素点对应一个完整的时域波形, 通过对时域波形进行傅里叶变换并利用 Dorney T D 和 Duvillaret L D 等所提出的 THz-TDS 提取材料光学参数的物理模型<sup>[76-77]</sup>, 可以得到被测物的厚度与折射率等信息。但其实现方式较为复杂, 信号处理速度也较慢。而以损失景深、时域和频域信息为代价的 THz 连续波成像系统是一个紧凑、简便、快速成像的系统, 以矩阵形式储存强度信息, 可以直接转变为图像。连续波系统的光路复杂性与脉冲系统相比大大降低, 且不需要时间延迟扫描, 因此扫描速度非常快<sup>[78]</sup>。另外连续波成像系统的小型化、便携式等特点也为其在实际现场检测应用创造了条件。表 2 为 2 种成像系统的具体对比。2 种成像方式有很好的互补性, 需视实际文物无损检测的具体应用来选择、构建最佳的成像方案。脉冲 THz-TDS 能够提供成像物体的光谱信息, 甚至折射率色散, 这是连续波系统不能提供的信息; 连续波系统具有较高的辐射功率, 系统简单, 价格低, 成像速度快, 使用方便的特点。如果扫描的文物体积大且仅需检测缺陷或透射性质, 选择连续波系统较好; 如果探测的文物比较精细, 要求较高的分辨力并获得物体的折射率等信息, 则选择脉冲成像方法。

表 1 商用成熟的成像技术与 THz-SIT 的主要优缺点<sup>[55]</sup>

Table 1 The important advantages and disadvantages of various commercially mature imaging technologies and THz-SIT<sup>[55]</sup>

imaging technique	advantages	disadvantages
X-ray	high penetration depth	ionizing radiation
	low cost	no chemical specificity
	relatively fast capture ~ minutes	low resolution ~ 0.01 mm
ultrasound	non-ionizing	no chemical specificity
	low cost	low penetration ~ cm
	fast capture ~ seconds	low resolution ~ 0.01 mm
magnetic resonance	unlimited penetration	high cost
	non-ionizing	slow capture ~ hours
	high resolution ~ 0.001 mm	lack of sensitivity in thin tissue
THz spectral imaging	non-ionizing	high cost of the system
	high chemical specificity	slow capture ~ minutes to hours
	limited penetration through dielectrics	image contrast is dependent on environmental conditions

表 2 两种 THz 成像系统的比较<sup>[75]</sup>

Table 2 Comparison of two THz imaging systems<sup>[75]</sup>

	pulse imaging system	CW imaging system
theory and process	record intensity and phase of THz wave	edge scattering only record intensity
resolution	high (under 1.1 mm)	low (2.6 mm/0.2 THz)
noise	small	big
image speed	slow	fast
information quantity	big	small
application	image identification, hidden objects	nondestructive test security
price	expensive	cheap
complexity	complicate	simple
portability/kg	100	2

## 2.1 绘画类文物的太赫兹成像研究

1) 镀金画板是中世纪早期发展起来的一种特殊的艺术形式。制作方法是在木板支架上涂一层薄薄的底漆, 然后在底层打底的红玄武土层上绘金<sup>[38]</sup>。Gallerano 等在 2009 年首次尝试将 THz 技术用于镀金画板的检测, 成功测试了被石膏层(粉笔或石膏制备)部分遮蔽木板时的由金箔和颜料所组成的模型画板<sup>[79]</sup>。THz 可用于定位油漆层下的镀金叶片。图 11 为西西里岛陶尔米纳公共图书馆的 14 世纪圣母与圣婴圣像(32 cm×39 cm×0.8 cm), 该版画有了很大的损害, 在对它保护修复前, 分别使用 THz 和其他成像技术(可见光成像系统(Visible Imaging System, VIS)、红外反射成像(Infrared-Reflectance Transformation Imaging, IR-RTI))进行了病害检测<sup>[80]</sup>。每个插图分别展示 THz 技术在板画检测中的具体应用: 如图 11 左上图中的 A) 镀金叶片边缘定位, B) 污垢和清漆下的镀金和镀金装饰的预清洗可视化, C) 结构状态的评估(界面木材制备)<sup>[80-81]</sup>。图 11 下面 4 幅分别为利用红外成像和 THz 光

谱分析的一个 14 世纪雕像的细节<sup>[80]</sup>。在 THz 时域成像 (THz-TDI) 图像中, 人物面部轮廓处的方形镀金叶片清晰可见, 而 IR-RTI 却无法识别它们。因为 THz 波即使在厚而暗的清漆下也能探测到金箔层, 因此在文物清洗处理之前, 可利用 THz 波检查镀金叶片及金粉(贝壳金)的装饰工艺。图 11 下图为面板画在不同界面(木材、底漆、油漆)的 THz 图像, 可以揭示结构缺陷或油漆剥落状况。木纹的 THz 图像展示了 IR-RTI 所呈现油漆出现裂纹的原因<sup>[81]</sup>, 可见 THz 的非侵入性截面成像技术能对肉眼可见但无法通过其他方法所确定的油漆层裂缝范围及延伸至其他亚层的裂缝深度进行评估, 也可以对包含在 2 个石膏层间画布的传统复杂制作过程进行可视化分析<sup>[82]</sup>。

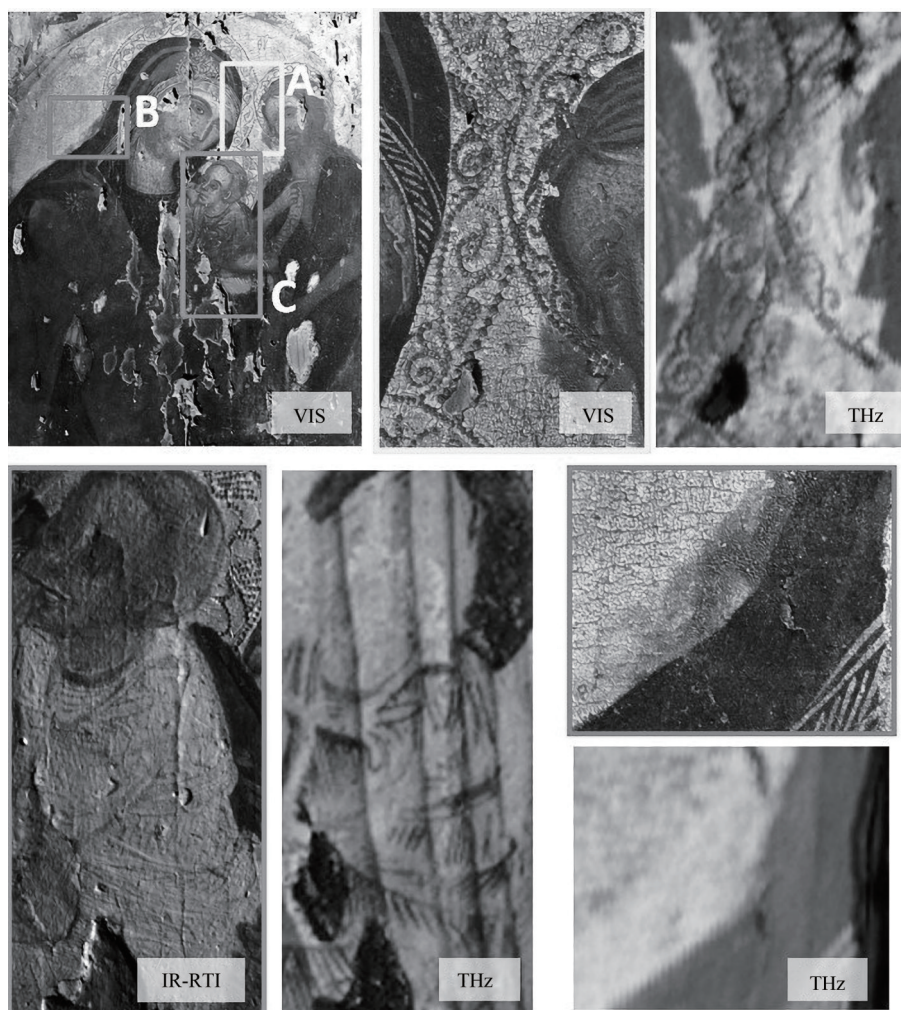


Fig. 11 Virgin with Child and a Saint, 14th century icon (32 cm×39 cm×0.8 cm), Public Library in Taormina, Sicily.

图 11 西西里岛陶尔米纳公共图书馆的 14 世纪圣母与圣婴圣像 (32 cm×39 cm×0.8 cm)

2) 帆布绘画。文艺复兴早期, 因为帆布价格便宜, 而且可以折叠便于运输, 画家们开始使用帆布代替画板作为绘画的支撑。相对木板, 帆布对 THz 光更加透明, 2006 年首次利用透射式 THz-TDS 对帆布画作进行了 THz 检测<sup>[83]</sup>。THz 辐射也被用来检测底稿、笔画的变化(再现被修改或被颜料遮盖的原始笔画)及被隐藏了的原始成分。虽然红外成像和 X 射线摄影是这类文物无损检测的首选方法, 但 THz 技术具有相较红外辐射法更好的穿透性和 X 射线法所不具备的深度分辨力。第一次对底稿进行 THz 的检测可以追溯到 2008 年, Abraham 等利用反射式 THz-TDS 成功检测了不同颜料覆盖下的石墨铅笔绘图<sup>[84]</sup>。如图 12 所示, 用棕土颜料绘制的底图通过反射式 THz-TDS 成像检测并清晰地显现出来<sup>[85]</sup>。石墨可以用红外成像检测, 而棕色对红外透明, THz 检测效果更好。

3) 石膏类壁画。自 2008 年, THz 成像可以穿透近 1 cm 深度石膏的研究报道<sup>[86]</sup>, 开启了对那些被粉刷成白色甚至覆盖了更厚一层灰泥的壁画的研究。图 13 为对 13 世纪的 3 个壁画的现场检测图, 可移动和紧凑的最新 THz-TDI 扫描仪可用于现场壁画的检测, 皮秒脉冲被由裂缝、覆盖的漆层或插入石膏中的物体(如钉子)等所引起的折射率不连续层反射回探测器, 可有效评估石膏的裂缝程度。特别是 THz 扫描能用于检测铅白粉刷的壁画, 而此类壁画对于红外成像是透明的<sup>[87]</sup>。

4) 画布上的油画。其通常是由很薄的油画布和绘画层组成, 为了无损地观察小于 0.2 mm 厚度的绘画层结构,



选择 THz 相干层析成像技术可能是各种无损检测方法中最有效的方法<sup>[88-89]</sup>。利用 THz 脉冲时域成像技术对 1626 年西蒙·武埃(Simon Vouet)的一幅油画《圣塞西利亚》进行检测,如图 14(a)所示。在面部区域识别出一些不可见的线条,这些线条显示了画作底层的痕迹。此外,这幅画的支撑物是由 2 片帆布缝合做成的一幅大画布,缝合部分已经成为一个表面有凸起的缺陷。文物修复师通过吸力台成功地将凸部向背面改造,从而产生凹面,如图 14(b)所示,修复结果在 THz 截面图像中清晰可见。而且 2 种布的表面信息也显示其网眼尺寸几乎相同,但深度略有不同<sup>[2]</sup>。

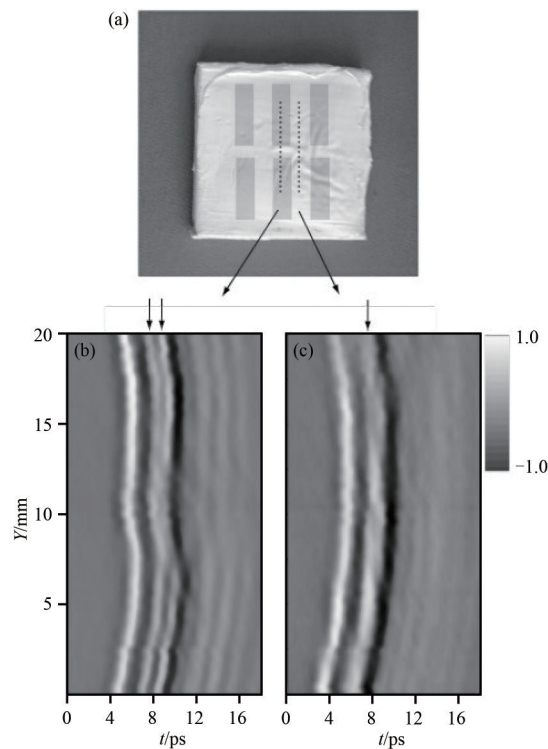
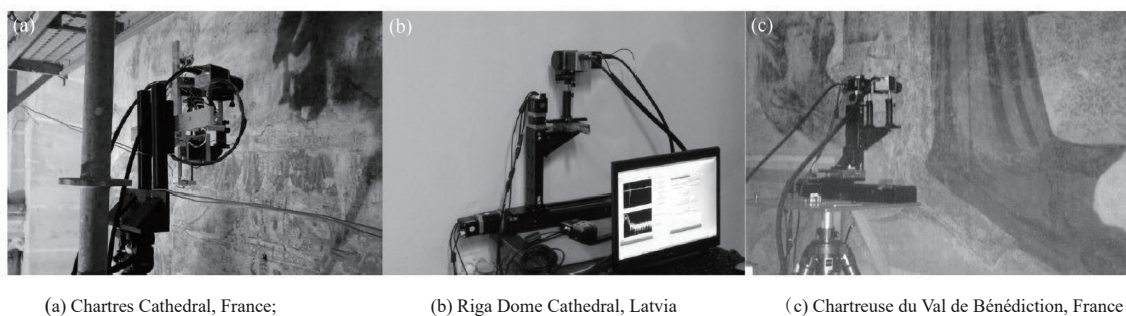


Fig.12 (a) photograph of the front surface of the painting on which the six raw umber strokes, hidden underneath the lead white, have schematically been drawn. The dashedlines represent the location of the line scans of which the results are shown in (b) and (c)

图 12 (a) 这幅画的前表面照片,有 6 道用生棕土颜料绘制的笔画隐藏在铅白下面,虚线表示线扫描的位置,结果如图(b)和(c)所示



(a) Chartres Cathedral, France;

(b) Riga Dome Cathedral, Latvia

(c) Chartreuse du Val de Bénédiction, France

Fig.13 Photographs showing experiments being conducted in three mural scenes

图 13 3 处壁画的实验检测现场图

通过科学检测可以揭示涂层结构和使用的材料类型,但实验数据不能告诉我们是谁添加了涂料。众所周知,毕加索经常重新绘制他的作品,并使用各种类型的艺术材料,包括为木匠准备的工业涂料<sup>[90]</sup>。因此,要解决这些复杂问题,并更好地继续开展保护工作,需要配合了解更多的历史背景资料。

## 2.2 其他文物的太赫兹成像研究

1) 利用 THz 光对纺织品的穿透性,可将 THz 成像技术用于研究艺术和考古用纺织品包裹的物体,如木乃伊,以检测其内部解剖特征<sup>[91-92]</sup>。因为 THz 成像的对比度取决于材料的折射率,而不是 X 射线成像中的元素密度,因此增加了非电离辐射、便携性和互补性的优势。虽然 THz 辐射不像 X 射线(图 15)具有那么深的穿透深度,但它提供了接近表面的高对比度图像(图 16),有助于显示绷带结构、保存状况,以及置于内部的物体<sup>[93]</sup>。



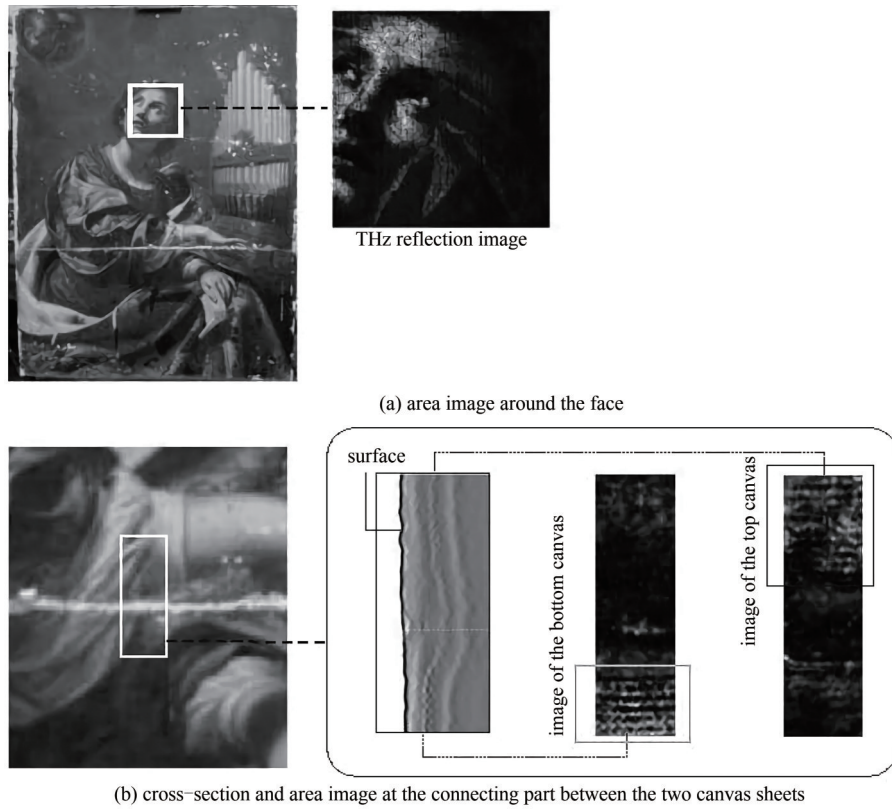


Fig.14 THz pulsed TDI of an oil painting on canvas, “Santa Cecilia”  
图 14 帆布油画《圣塞西莉亚》的 THz 脉冲时域成像图

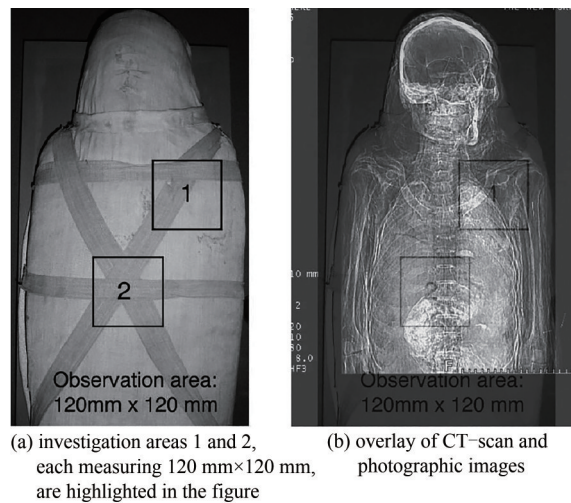


Fig.15 Mummy of Kharushere (MMA 86.1.35, Funds from Various Donors, 1886), Kharushere lived during Egypt’s Dynasty 22 (ca. 945–712 B.C.)  
图 15 卡鲁歇尔木乃伊(MMA 86.1.35), 卡鲁歇尔生活在埃及第22王朝(约公元前945–712年)

2) 漆器家具是用多层复合漆进行装饰的物品，是东亚艺术最重要的表达之一，深受西方国家的欣赏，对世界艺术和工艺产生了很大的影响。利用反射式 THz 成像系统可对其内部漆层、石膏及木制衬底进行检测和研究。Dandolo 组先后对丹麦皇家美术学院的欧式漆器仿制品<sup>[94]</sup>、17 世纪晚期欧洲白色漆柜<sup>[95]</sup>和一个 19 世纪的中国漆屏成功地进行了检测<sup>[96]</sup>。由图 17(c)可明显看到隐藏在表面之下的裂缝状况，图 17(d)~(e)则显示出了后期修补的痕迹。

3) 陶瓷类文物。通过多回波信号的 THz 成像无损分析方法<sup>[97]</sup>、将 THz 成像与高频图像相结合的图像融合方法<sup>[98]</sup>等可以对瓦块、陶瓷类物质的厚度和不规则形状进行精确测量。Labaune 组应用 THz-TDS 对 1 个埃及陶罐进行了 THz 透射层析成像(见图 18(a))，通过 3 个不同扫描角度投影图像(图 18(b~d))的分析得出，在投影顶部附近所看到的黑色垂直线不是裂隙，而是陶罐内的某种物体<sup>[99]</sup>。

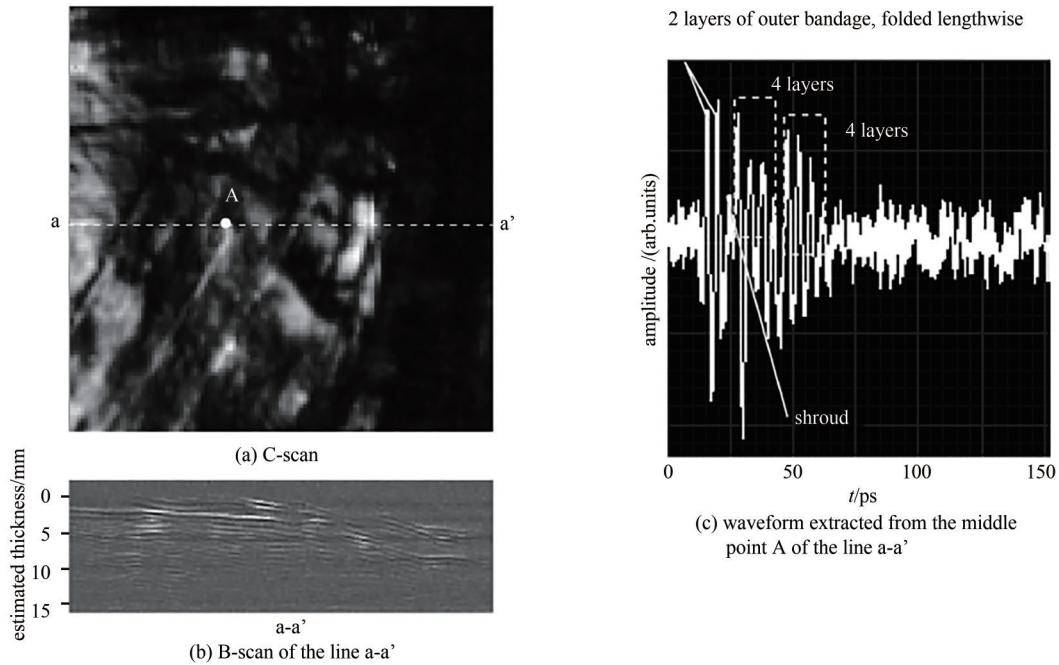


Fig.16 THz reflection images and an output signal waveform of the mummy of Kharushere, Area 1  
图 16 1 区卡鲁歇尔木乃伊的 THz 反射图像和输出信号波形(区域 1)



Fig.17 (a) The lacquered screen belonging to the Queen collection. The white square localizes the first scanned area; (b) the first scanned area; (c) THz peak-to-peak image; (d) false color rendering realized by placing the frequency intervals 0.06~0.28 THz, 0.53~0.65 THz, 0.86~0.93 THz respectively into the red, green and blue channel. The white square localizes the anomalous area; (e) relevant detail of the previous image  
图 17 (a)女王收藏的漆屏风,白色方块定位了第一个扫描区域;(b)第一个扫描区域;(c) THz 峰峰图;(d) 将频率间隔分别为 0.06~0.28 THz, 0.53~0.65 THz, 0.86~0.93 THz 置于红、绿、蓝通道实现的伪显色。白色方块表示异常区域;(e) 前图的相关细节

4) 金属类文物，利用 THz 成像技术可对其腐蚀程度、铭文、隐藏形状、结构、材质等进行精确的无损评估和鉴别<sup>[100-102]</sup>。图 19 为分别利用 THz 回波成像法和定点光谱检测法对埃及博物馆的一尊青铜雕像进行检测的结果，通过与激光诱导等离子体光谱(Laser-Induced Plasma Spectroscopy, LIPS)元素深度剖面结果对应分析得出，随着铜氧化物腐蚀程度的增加，锡含量随之上升，而外源钙的含量下降<sup>[103]</sup>。

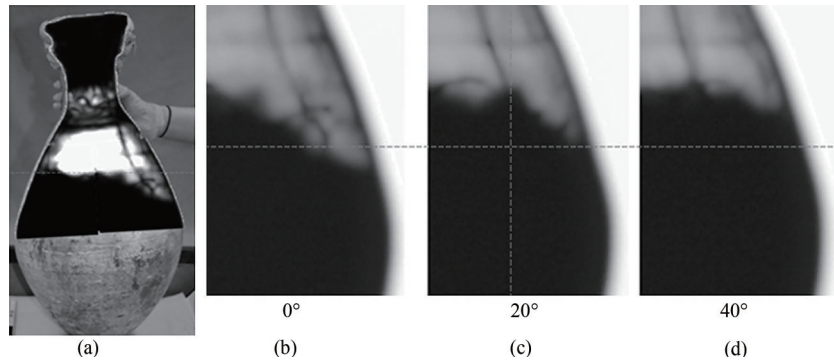


Fig.18 (a) composite optical and terahertz transmission images of a sealed Egyptian clay vessel at 0°; transmission projections of section of vessel at (b) 0°; (c) 20°; and (d) 40°<sup>[99]</sup>

图 18 (a) 0°时密封的埃及陶罐的复合光学和THz透射图像。陶罐截面的透射投影角度为:(b) 0°;(c) 20°;(d) 40°<sup>[99]</sup>

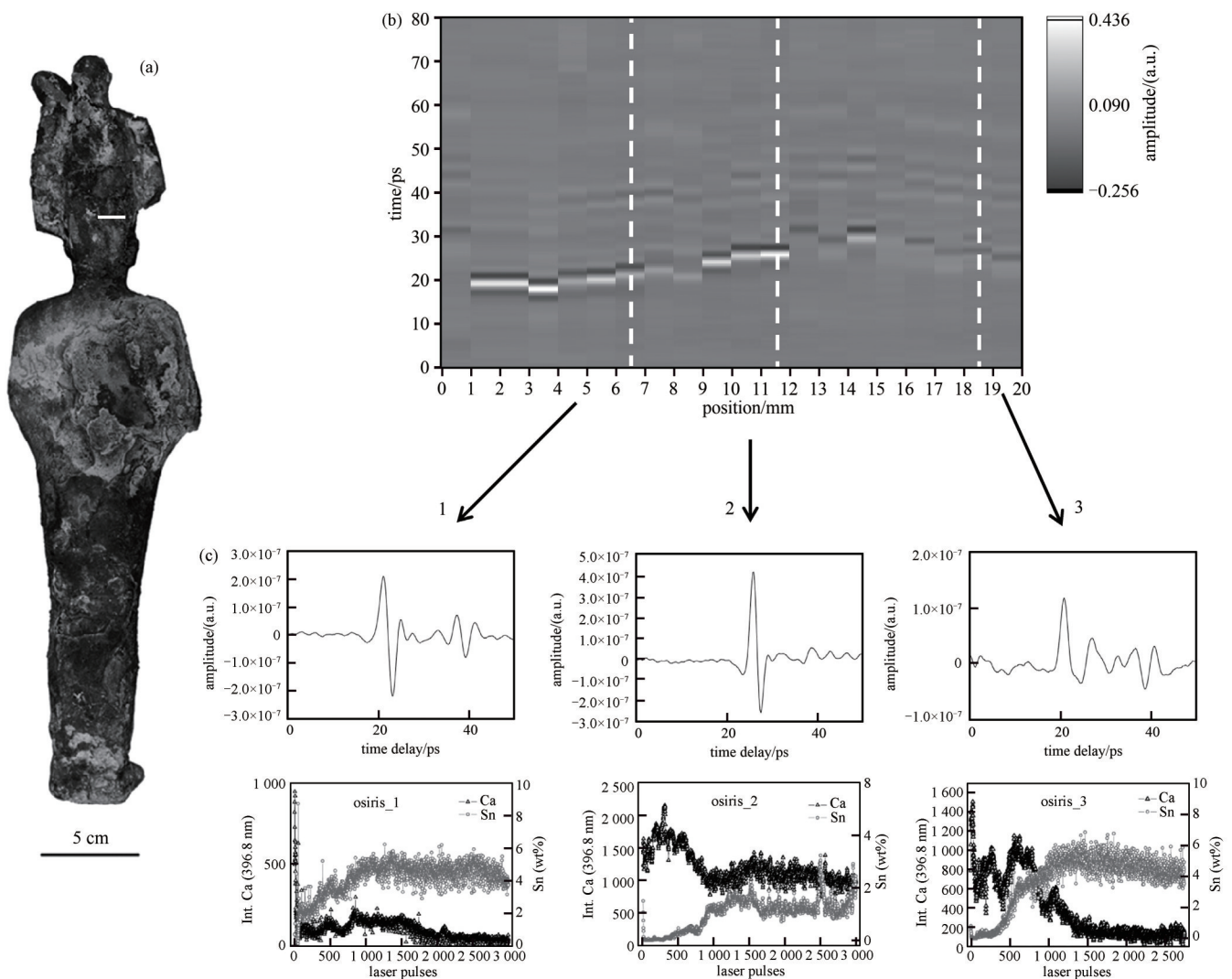


Fig.19 (Upper left) Bronze Egyptian figurine (Osiris inv. 5458); (upper right) echo pulse image and THz signals reflected from bronze beneath corrosion layers, and from a mineralization area with high stratification; (bottom) LIPS elemental depth profiles on three sites in correspondence of THz measurements with different degrees of corrosion<sup>[103]</sup>

图 19 (左上)埃及青铜雕像(奥西里斯, inv. 5458);(右上)由腐蚀层下的青铜和矿化区的高分层所反射的THz回波脉冲图像;(下图)3个不同腐蚀程度的LIPS元素深度剖面对应的THz测量结果<sup>[103]</sup>



### 3 结论与展望

THz 辐射仍是一个尚未开发完全的光谱范围, 它将为深入了解艺术品、寻找丢失文物、鉴定文物、勘探文物的劣化过程以及改善绘画、壁画和其他文物的保护提供一个重要新工具。使用 THz 技术对文物进行无损检测, 主要有以下潜在优势: a) 无辐射风险。相对 X 射线, THz 辐射是非电离的, 不会对文物工作者的健康和文物材料的安全产生负面影响, 不需要辐射屏蔽室等特定设施还可以保证高的信噪比。b) 非接触式。可以在反射模式下工作且检测速度快。c) 成本下降。随着脉冲激光器和其他光学元件以及整个 THz 系统成本的逐步下降, 这为博物馆等文保单位的广泛使用创造了潜在条件。d) 便于携带。研究设施中常见的相对笨重的 THz 实验站逐渐演变为商用、手提箱大小的仪器, 很容易带进博物馆及不可移动文物现场进行现场检测, 也便于在文保部门之间进行转移。

最后, 展望了 THz 无损检测技术未来在文物保护领域的应用趋势(见图 20): a) 经济。THz 检测系统成本的进一步降低, 促进文保单位的全面普及, 直至 THz 检测也成为类似超声波、探地雷达等的文物常规检测手段; b) 便携。THz 检测系统的小型化可以保证其检测不再受文物所处环境和条件的限制, 可以对露天文物、无法移动、无大平台等条件下的文物进行检测; c) 高效。结合大数据技术、人工智能预测模型建立等手段实时显示 THz 检测结果, 可大大提高文物精准检测效率, 为有效缩短文物修复时间提供技术参考, 进而加快文物修复方案的制定和实施步伐; d) 融合。没有任何一种单一的检测手段, 可以实现对文物的全面三维检测, 因此未来的 THz 检测系统将具备与常规文物无损检测方法的高度兼容性。根据实际检测需求, 灵活与其他检测仪器匹配, 同时进行全方位定制式检测。希望这篇综述可以促进 THz 专家与文物保护专家的合作, 以共同开发和改进用于文物保护领域的 THz 技术。

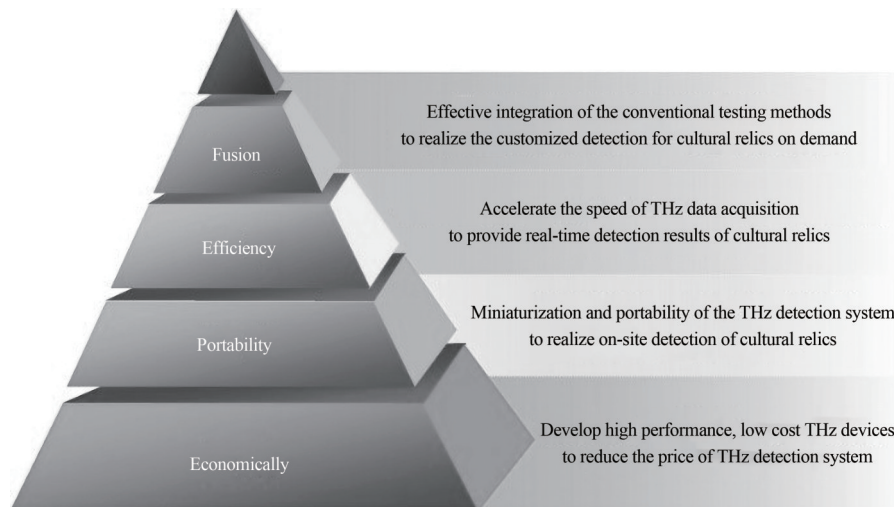


Fig.20 Future prospect of the application of THz nondestructive testing technology in the field of cultural relic protection

图 20 THz 无损检测技术在文物保护领域应用的未来展望

#### 参考文献:

- [ 1 ] DOEHNE E, PRICE C A. Stone conservation: an overview of current research[M]. California: The Getty Conservation Institute, 2010. doi:10.2307/1506649.
- [ 2 ] FUKUNAGA K. THz technology applied to cultural heritage in practice[M]. Tokyo: Springer, 2016. doi:10.1007/978-4-431-55885-9.
- [ 3 ] WEISS T, RASOLOFOSAON P N J, SIEGISMUND S. Ultrasonic wave velocities as a diagnostic tool for the quality assessment of marble[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2002, 205(1): 149, 164. doi:10.1144/GSL.SP.2002.205.01.12.
- [ 4 ] NEAL A, ROBERTS C L. Applications of Ground-Penetrating Radar(GPR) to sedimentological, geomorphological and geoarchaeological studies in coastal environments[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2000, 175(1): 139-171. doi:10.1144/GSL.SP.2000.175.01.12.
- [ 5 ] WISEMAN J R, EL-BAZ F. Remote sensing in archaeology[M]. Heidelberg: Springer, 2007. doi:10.1016/B978-0-12-003107-8.50010-4.
- [ 6 ] COSENTINO A. Identification of pigments by multispectral imaging: a flowchart method[J]. Heritage Science, 2014, 2(8): 1-12.

- doi: 10.1186/2050-7445-2-8.
- [7] COSENTINO A. A practical guide to Panoramic Multispectral Imaging[J]. *E-Conservation*, 2013(25): 64-73. doi: 10.1109/TIP.2015.2436342.
- [8] COSENTINO A, GIL M, RIBEIRO M, et al. Technical photography for mural paintings: the newly discovered frescoes in Aci Sant'Antonio(Sicily,Italy)[J]. *Conservar Patrimonio*, 2014,20(20):23-33. doi:10.14568/cp2015001.
- [9] COSENTINO A, STOUT S. Photoshop and multispectral imaging for art documentation[J]. *E-Preservation Science*, 2014(11): 91-98.
- [10] YAN Y, WEN C, JIN M, et al. FTIR spectroscopy in cultural heritage studies: non-destructive analysis of Chinese handmade papers[J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2019,35(4):586-591. doi:10.1007/s40242-019-9026-4.
- [11] BACCI M, BELLUCCI R, CUCCI C, et al. Fiber optics reflectance spectroscopy in the entire VIS-IR range: a powerful tool for the non-invasive characterization of paintings[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2004, 852(1): 156-166. doi: 10.1557/PROC-852-002.4.
- [12] GABRIELI F, DOOLEY K A, FACINI M, et al. Near-UV to mid-IR reflectance imaging spectroscopy of paintings on the macroscale[J]. *Science Advances*, 2019,5(8):7794. doi:10.1126/sciadv.aaw7794.
- [13] COSENTINO A. Practical notes on ultraviolet technical photography for art examination[J]. *Conservar Patrimonio*, 2015(21):53-62. doi:10.14568/cp2015006.
- [14] MASI G, BALBO A, ESVAN J, et al. X-ray photoelectron spectroscopy as a tool to investigate silane-based coatings for the protection of outdoor bronze: the role of alloying elements[J]. *Applied Surface Science*, 2018(433): 468-479. doi: 10.1016/j.apsusc. 2017.10.089.
- [15] BURRAFATO G, CALABRESE M, COSENTINO A, et al. ColoRaman project: Raman and fluorescence spectroscopy of oil, tempera and fresco paint pigments[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2004,35(10):879-886. doi:10.1002/jrs.1229.
- [16] COSENTINO A, STOUT S, SCANDURRA C. Innovative imaging techniques for examination and documentation of mural paintings and historical graffiti in the catacombs of San Giovanni, Syracuse[J]. *Syracuse. Int. J. Conserv. Sci.*, 2015,6(1):23-34.
- [17] BOM V R, COSENTINO A, SERACINI M, et al. Neutron back scattering for the search of the Battle of Anghiari[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2010,68(1):66-70. doi:10.1016/j.apradiso.2009.07.025.
- [18] KUZNETSOV A V, GORSHKOV I Y, EVSEIN A V, et al. Nanosecond Neutron Analysis for the search of the lost Leonardo's masterpiece, the Battle of Anghiari[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B*, 2009,267(23-24):3694-3697. doi:10.1016/j.nimb.2009.09.006.
- [19] KAMPASAKALI E, BRONWYN O, COSENTINO A, et al. A preliminary evaluation of the surfaces of acrylic emulsion paint films and the effects of wet-cleaning treatment by Atomic Force Microscopy(AFM)[J]. *Studies in Conservation*, 2011,56(3):216-230. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.11.001.
- [20] 刘小明, 俞俊生, 陈晓东. 毫米波及太赫兹准光学技术: 理论、应用与发展[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2022,20(7):631-652. (LIU Xiaoming, YU Junsheng, CHEN Xiaodong. Quasi-optical technology in the millimeter and terahertz wave ranges: theory, applications, and development[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2022,20(7):631-652.) doi:10.11805/TKYDA2021299.
- [21] SIRTORI C. Bridge for the terahertz gap[J]. *Nature*, 2002,417(6885):132-133. doi:10.1038/417132b.
- [22] COSENTINO A. Terahertz and cultural heritage science: examination of art and archaeology[J]. *Technologies*, 2016,4(1):6. doi: 10.3390/technologies4010006.
- [23] 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. *电子科技大学学报*, 2009,38(5):481-486. (LIU Shenggang, ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and its applications[J]. *Journal of UEST of China*, 2009,38(5): 481-486.) doi:10.3969/j.issn.1009-2412.2006.01.00.
- [24] TONOUCI M. Galore new applications of terahertz science and technology[J]. *Terahertz Science and Technology*, 2009,2(3): 90-101.
- [25] KRUGENER K, BUSCH S F, SOLTANI A, et al. THz time domain spectroscopy—non-destructive evaluation of material detachments from exposed natural stone and ceramic objects[C]// 2017 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Cancun, Mexico: [s.n.], 2017:1-2. doi:10.1109/IRMMW-THz.2017.8067084.
- [26] JARR C J, KOVACH J J. Far-infrared spectroscopy of minerals and inorganics[J]. *Applied Spectroscopy*, 1969,23(3):219-223. doi: 10.1366/000370269774380932.
- [27] FUKUNAGA K, HOSAKO I, PICOLLO M. Innovative terahertz spectroscopy and imaging technique for art conservation science [C]// 2010 10th International Conference on Solid Dielectrics. Potsdam, Germany: [s. n.], 2010: 426. doi: 10.1016/j.crhy.

2010.05.004.

- [28] IRUG COMMUNITY. Infrared Raman Users' Group website[EB/OL]. [2022-06-30]. <http://www.irug.org/>.
- [29] PRICE B A,PRETZEL B,LOMAX S Q,et al. Revised JCAMP-DX spectral file format for submissions to the Infrared & Raman Users Group(IRUG) spectral database[EB/OL]. [2022-06-30]. <http://mal.irug.org/>.
- [30] FUKUNAGA K,PICOLLO M. Terahertz spectroscopy applied to the analysis of artists' materials[J]. *Applied Physics A*, 2010,100(3):591-597. doi:10.1007/s00339-010-5643-y.
- [31] FUKUNAGA K. Terahertz spectral database: construction of open terahertz spectral database[J]. *J. Nat. Inst. Inf. Commun. Technol.*, 2008,55(1):61-66.
- [32] BANDYOPADHYAY A, SENGUPTA A, BARAT R B, et al. Effects of scattering on THz spectra of granular solids[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007,28(11):969-978. doi:10.1007/s10762-007-9276-y.
- [33] STRACHAN C J,RADES T,NEWNHAM D A,et al. Using terahertz pulsed spectroscopy to study crystallinity of pharmaceutical materials[J]. *Chemical Physics Letters*, 2004,390(1-3):20-24. doi:10.1016/j.cplett.2004.03.117.
- [34] FUKUNAGA K,HOSAKO I,KOHDZUMA Y,et al.Terahertz analysis of an East Asian historical mural painting[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2010,5(5):10024. doi:10.2971/jeos.2010.10024.
- [35] MIZUNO M,FUKUNAGA K,SAITO S,et al. Analysis of calcium carbonate for differentiating between pigments using terahertz spectroscopy[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2009,4(9):09044. doi:10.2971/jeos.2009.09044.
- [36] FUKUNAGA K,OGAWA Y,HAYASHI S,et al. Application of terahertz spectroscopy for character recognition in a medieval manuscript[J]. *IEICE Electro. Express*, 2008,5(7):223-228. doi:10.1587/elex.5.223.
- [37] YAMAMOTO K,FUKUNAGA K,MIZUNO M,et al. Examination of pigments by using FT-THz[C]// 2010 35th International Conference on Infrared,Millimeter,and Terahertz Waves. Rome,Italy:[s.n.], 2010:1-4. doi:10.1109/ICIMW.2010.5612321.
- [38] KRÜGENER K,SCHWERDTFEGER M,BUSCH S F,et al. Terahertz meets sculptural and architectural art: evaluation and conservation of stone objects with T-ray technology[J]. *Scientific Reports*, 2015,5(1):14842. doi:10.1038/srep14842.
- [39] KRÜGENER K,BUSCH S F,SOLTANI A,et al. Non-destructive analysis of material detachments from polychromatically glazed terracotta artwork by THz time-of-flight spectroscopy[J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2017,38(4):495-502. doi: 10.1007/s10762-016-0339-9.
- [40] MENG T H,DU R Q,HOU Z,et al. THz spectra-based SVM prediction model for Yungang Grottoes sample[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2015,55(3):280-285. doi:10.1016/j.jas.2015.01.012.
- [41] MENG T H,HUANG R,LU Y H,et al. Highly sensitive terahertz non-destructive testing technology for stone relics deterioration prediction using SVM-based machine learning models[J]. *Heritage Science*, 2021,9(24):9. doi:10.1186/s40494-021-00502-7.
- [42] FENG J,MENG T H,LU Y H,et al. Nondestructive testing of hollowing deterioration of the Yungang Grottoes based on THz-TDS [J]. *Electronics*, 2020,9(4):625. doi:10.3390/electronics9040625.
- [43] MENG T H,YANG C Q,LU Y H,et al. Spectroscopy study of Yungang Grottoes weathered material in terahertz range[C]// 2011 International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. Beijing, China: [s. n.], 2011: 81591C-1-7. doi: 10.1117/12.900825.
- [44] 卢玉和,孟田华,杨成全,等. 应用太赫兹技术对云冈石窟不同岩石样品的分析[J]. *测试技术学报*, 2011,25(6):536-539. (LU Yuhe,MENG Tianhua,YANG Chengquan,et al. Applications of terahertz technology in analysis of different rock samples for Yungang Grottoes[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2011,25(6):536-539.) doi:10.3969/j.issn.1671-7449.2011.06.012.
- [45] 杨成全,孟田华,石少坚,等. 云冈石窟内外石雕风化差异的光谱研究[J]. *内蒙古大学学报*, 2013,44(6):572-577. (YANG Chengquan,MENG Tianhua,SHI Shaojian,et al. Spectrum study on the weathering difference of stone carving between inside and outside of the Yungang Grottoes[J]. *Journal of Inner Mongolia University*, 2013,44(6):572-577.) doi:CNKI:SUN:NMGX.0.2013-06-003.
- [46] MENG T H,LU Y H,ZHAO G Z,et al. A synthetic approach to weathering degree classification of stone relics case study of the Yungang Grottoes[J]. *Heritage Science*, 2018,6(1):7. doi:10.1186/s40494-017-0165-y.
- [47] SKRYL A S,JACKSON J B,BAKUNOV M I,et al. Terahertz time-domain imaging of hidden defects in wooden artworks: application to a Russian icon painting[J]. *Applied Optics*, 2014,53(6):1033-1038. doi:10.1364/AO.53.001033.
- [48] BARDON T,MAY R K,TADAY P F,et al. Systematic study of terahertz time-domain spectra of historically informed black inks[J]. *Analyst*, 2013,138(17):4859-4869. doi:10.1039/C3AN00331K.
- [49] BARDON T,MAY R K,TADAY P F,et al. Material characterization of historical parchment using terahertz time-domain spectroscopy[C]// Proceedings of the 2014 39th International Conference on Infrared,Millimeter,and Terahertz waves. Tucson,



- AZ,USA:[s.n.], 2014:1–2. doi:10.1109/IRMMW-THz.2014.6956032.
- [50] 王远,折帅,周南,等. 基于太赫兹时域光谱技术的红木分类识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2019,39(9):2719–2724. (WANG Yuan,SHE Shuai,ZHOU Nan,et al. Classification of terahertz rosewood based on continuous projection algorithm and random forest[J]. Spectro. Spectral Analysis, 2019,39(9):2719–2724.) doi:10.3964/j.issn.1000-0593(2019)09-2719-06.
- [51] 张文涛,王思远,占平平,等. 基于太赫兹时域光谱技术的红木检测方法[J]. 光学学报, 2017,37(2):0230006. (ZHANG Wentao,WANG Siyuan,ZHAN Pingping,et al. Method of identifying red wood based on terahertz Time-Domain Spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2017,37(2):0230006.) doi:10.3788/AOS201737.0230006.
- [52] 刘海玲,翟东为,杨玉平,等. 基于 THz 光谱成像的纸币真伪鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018,38(7):2021–2025. (LIU Hailing,ZHAI Dongwei,YANG Yuping,et al. Identification of true and counterfeit Hundred RMB of the 2005 edition based on transmitted THz pulse imaging[J]. Spectro. Spectral Analysis, 2018,38(7):2021–2025.) doi:10.3964/j.issn.1000-0593(2018)07-2021-05.
- [53] MITTLEMAN D M. Twenty years of terahertz imaging[J]. Optics Express, 2018,26(8):9417–9431. doi:10.1364/oe.26.009417.
- [54] CASTRO-CAMUS E,KOCH M,MITTLEMAN D M. Recent advances in terahertz imaging: 1999 to 2021[J]. Applied Physics Letters B, 2022,128(1):1–10. doi:10.1007/s003400050750.
- [55] BANDYOPADHYAY A,SENGUPTA A. Review of the concept, applications and implementation issues of terahertz spectral imaging technique[J]. IETE Technical Review, 2022,39(2):471–489. doi:10.1080/02564602.2020.1865844.
- [56] WAN M,HEALY J J,SHERIDAN J T. Terahertz phase imaging and biomedical applications[J]. Optics and Laser Technology, 2020,122(10):105859–105871. doi:10.1016/j.optlastec.2019.105859.
- [57] SUN Q,HE Y,LIU K,et al. Recent advances in terahertz technology for biomedical applications[J]. Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, 2017,7(3):345–355. doi:10.21037/qims.2017.06.02.
- [58] GIOVANNACCI D,CHEUNG H C,WALKER G C,et al. Time-domain imaging system in the terahertz range for immovable cultural heritage materials[J]. Strain, 2019,55(2):12292. doi:10.1016/j.tifs.2011.12.006.
- [59] NAFTALY M,VIEWEG N,DENINGER A. Industrial applications of terahertz sensing: state of play[J]. Sensors, 2019,19(19):4203–4238. doi:10.3390/s19194203.
- [60] ARIUNBOLD G O,BANDYOPADHYAY A,PARAMESWARAN K,et al. Advanced spectroscopy in precision agriculture[J]. Optics & Photonics News, 2019,30(11):40–47. doi:10.1364/OPN.30.11.000040.
- [61] JACKSON J B,BOWEN J,WALKER G,et al. A survey of terahertz applications in cultural heritage conservation science[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):220–231. doi:10.1109/TTHZ.2011.2159538.
- [62] BENDADA A,SFARRA S,IBARRA-CASTANEDO C,et al. Subsurface imaging for panel paintings inspection: a comparative study of the ultraviolet, the visible, the infrared and the terahertz spectra[J]. Opto-Electronics Review, 2015,23(1):90–101. doi:10.1515/oere-2015-0013.
- [63] DANDOLO C L K,JEPSEN P U. Wall painting investigation by means of non-invasive terahertz time-domain imaging(THz-TDI): inspection of subsurface structures buried in historical plasters[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2016,37(2):198–208. doi:10.1007/s10762-015-0218-9.
- [64] BARDON T,MAY R K,JACKSON J B,et al. Contrast in terahertz images of archival documents—part I: influence of the optical parameters from the ink and support[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2017,38(4):443–466. doi:10.1007/s10762-016-0351-0.
- [65] YANG Y,ZHAI D,ZHANG Z,et al. THz spectroscopic identification of red mineral pigments in ancient Chinese artworks[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2017,38(10):1232–1240. doi:10.1007/s10762-017-0408-8.
- [66] GUILLET J P,ROUX M,WANG K,et al. Art painting diagnostic before restoration with terahertz and millimeter waves[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2017,38(1):369–379. doi:10.1007/s10762-017-0358-1.
- [67] DANDOLO C L K,SALDAÑA G M P,CABALLERO M A I,et al. Terahertz time-domain imaging to guide a conservation intervention on a stratified easel painting[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2018,39(8):773–784. doi:10.1007/s10762-018-0505-3.
- [68] STÜBLING E M,REHN A,SIEBRECHT T,et al. Application of a robotic THz imaging system for sub-surface analysis of ancient human remains[J]. Scientific Reports, 2019,9(1):3390. doi:10.1038/s41598-019-40211-7.
- [69] KASHIMA M,TSUCHIKAWA S,INAGAKI T. Simultaneous detection of density, moisture content and fiber direction of wood by THz time-domain spectroscopy[J]. Journal of Wood Science, 2020,66(1):27. doi:10.1186/s10086-020-01874-3.
- [70] MIKEROV M,SHRESTHA R,VAN DOMMELEN P,et al. Analysis of ancient ceramics using terahertz imaging and photogrammetry[J]. Optics Express, 2020,28(15):22255–22263. doi:10.1364/OE.399336.

- [71] XU L,ZHANG X C,AUSTON D H. Terahertz beam generation by femtosecond optical pulses in electro-optic materials[J]. *Applied Physics Letters*, 1992,61(15):1784. doi:10.1063/1.108426.
- [72] PFEIFER T,HEILIGER H M,VON KAMIENSKI E S,et al. Fabrication and characterization of freely positionable silicon-on-sapphire photoconductive probes[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1994, 11(12): 2547–2552. doi: 10.1364/josab.11.002547.
- [73] AUSTON D H,CHEUNG K P. Coherent time-domain far-Infrared spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1985,2(4):606–612. doi: 10.1364/JOSAB.2.000606.
- [74] FATTINGER C H,GRISCHKOWSKY D. Terahertz beams[J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 54(6): 490–492. doi: 10.1063/1.100958.
- [75] 杨昆,赵国忠,梁承森,等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. *中国激光*, 2009,36(11):2853–2858. (YANG Kun,ZHAO Guozhong,LIANG Chengsen,et al. Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009,36(11):2853–2858.) doi:10.3788/CJL20093611.2853.
- [76] DORNEY T D,BARANIUK R G,MITTLEMAN D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001,18(7):1562–1571.
- [77] DUVILLARET L,GARET F,COUTAZ J L. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time domain spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 1999,38(2):409–415. doi:10.1364/AO.38.000409.
- [78] 张存林,张岩,赵国忠,等. 太赫兹感测与成像[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (ZHANG Chunlin,ZHANG Yan,ZHAO Guozhong,et al. *Terahertz Sensing and Imaging*[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2008.)
- [79] LABAUNE J,JACKSON J B,FUKUNAGA K,et al. Investigation of Terra Cotta artefacts with terahertz[J]. *Applied Physics Letters A*, 2011,105(8):5–9. doi:10.1007/s00339-011-6567-x.
- [80] KOCH-DAMDOLO C L,COSENTINO A,JEPSEN P U. Inspection of panel paintings beneath gilded finishes using terahertz time-domain imaging[J]. *Studies in Conservation*, 2015,60(S1):159–166. doi:10.1179/0039363015Z.000000000220.
- [81] COSENTINO A,DANDOLO C L K,CRISTAUDO A,et al. Diagnostics pre and post conservation on a 14th century gilded icon from Taormina,Sicily[J]. *E-Conservation Journal*, 2015,3(1):27–40. doi:10.18236/econs3.201505.
- [82] PICOLLO M,FUKUNAGA K,LABAUNE J. Obtaining noninvasive stratigraphic details of panel paintings using terahertz time domain spectroscopy imaging system[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2015,16(1):73–80. doi:10.1016/j.culher.2014.01.006.
- [83] KÖHLER W,PANZNER M,KLOTZBACH U,et al. Non-destructive investigation of paintings with THz-radiation[C]// *Proceedings of the 9th European Conference on NDT:ECNDT*. Berlin,Germany:[s.n.], 2006:81.
- [84] ABRAHAM E,YOUNUS A,EL-FATIMY A,et al. Broadband terahertz imaging of documents written with lead pencils[J]. *Optics Communications*, 2009,282(15):3104–3107. doi:10.1016/j.optcom.2009.04.039.
- [85] ADAM A J L,PLANKEN P C M,MELONI S,et al. Terahertz imaging of hidden paint layers on canvas[J]. *Optics Express*, 2009,17(5):3407–3416. doi:10.1364/oe.17.003407.
- [86] JACKSON J B,MOUROU M,WHITAKER J F,et al. Terahertz imaging for non-destructive evaluation of mural paintings[J]. *Optics Communications*, 2008,281(4):527–532. doi:10.1016/j.optcom.2007.10.049.
- [87] WALKER G C,JACKSON J B,GIOVANNACCI D,et al. Terahertz analysis of stratified wall plaster at buildings of cultural importance across Europe[C]// *Proceedings of the Optics for Arts, Architecture, and Archaeology IV*. Munich,Germany:[s.n.], 2013:8790. doi:10.1117/12.2020596.
- [88] SECO-MARTORELL C, LOPEZ-DOMINGUEZ V,ARAUZ-GAROFALO G,et al. Goya's artwork imaging with terahertz waves [J]. *Optics Express*, 2013,21(15):17800–17805. doi:10.1364/OE.21.017800.
- [89] KOCH-DANDOLO C L,FILTENBORG T,FUKUNAGA K,et al. Reflection terahertz time-domain imaging for analysis of an 18th century neoclassical easel painting[J]. *Applied Optics*, 2015,54(16):5123–5129. doi:10.1364/AO.54.005123.
- [90] CASADIO F,ROSE V. High-resolution fluorescence mapping of impurities in historical zinc oxide pigments: hard X-ray nanoprobe applications to the paints of Pablo Picasso[J]. *Applied Physics Letters A*, 2013,111(1):1–8. doi:10.1007/s00339-012-7534-x.
- [91] CESARANI F,MARTINA M C,FERRARIS A,et al. Whole-body three-dimensional multidetector CT of 13 Egyptian human mummies[J]. *American Journal of Roentgenology*, 2002,180(3):597–606. doi:10.2214/ajr.180.3.1800597.
- [92] HOFFMAN H,TORRES W E,ERNST R D. Paleoradiology: advanced CT in the evaluation of nine Egyptian mummies[J]. *Radiographics*, 2002,22(2):377–385. doi:10.1148/radiographics.22.2.g02mr13377.
- [93] FUKUNAGA K,CORTES E,COSENTINO A,et al. Investigating the use of terahertz pulsed time domain reflection imaging for the study of fabric layers of an Egyptian mummy[J]. *Journal of the European Optical Society–Rapid Publication*, 2011,6(6):11040.

doi:10.2971/jeos.2011.11040.

- [94] DANDOLO C L K, JEPSEN P U, CHRISTENSEN M C. Characterization of European lacquers by Terahertz (THz) reflectometric imaging[C]// IEEE Proceedings of the 1st Digital Heritage Conference. Marseille, France: [s. n.], 2013: 89–94. doi:10.1109/DigitalHeritage.2013.6743717.
- [95] DANDOLO C L K, CATTERSEL V, JEPSEN P U. Terahertz time-domain imaging of a 17th century lacquered cabinet: a contribution to European lacquerwares characterization[C]// Proceedings of the 40th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Hong Kong, China: [s. n.], 2015: 1–4. doi:10.1109/IRMMW-THz.2015.7327534.
- [96] DANDOLO C L K, MOGENSEN J B, CHRISTENSEN M C, et al. Frequency analysis of Terahertz Time-Domain Imaging (THz-TDI) of a XIX century Chinese lacquered screen[C]// Proceedings of the 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Copenhagen, Denmark: [s. n.], 2016: 1–4. doi:10.1109/IRMMW-THz.2016.7758715.
- [97] 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. doi:10.1364/OE.394177.
- [98] MIKEROV M, SHRESTHA R, VAN DOMMELEN P, et al. An analysis of ancient ceramics using terahertz imaging and photogrammetry[J]. Optics Express, 2020, 28(15): 22255–22263. doi:10.1364/OE.399336.
- [99] LABAUNE J, JACKSON J B, FUKUNAGA K, et al. Investigation of Terra Cotta artefacts with terahertz[J]. Applied Physics Letters A, 2011, 105(1): 5–9. doi:10.1007/s00339-011-6567-x.
- [100] ZHAO H, WU D B, ZHAN H L, et al. Detection of iron corrosion by terahertz time-domain spectroscopy[C]// Proceedings of the Photoelectronic Technology Committee Conferences. Hefei, China: [s. n.], 2015: 97953. doi:10.1117/12.2214316.
- [101] DONG J L, RIBEIRO A, VACHERET A, et al. Revealing inscriptions obscured by time on an early-modern lead funerary cross using terahertz multispectral imaging[J]. Scientific Reports, 2022, 12(3): 3429. doi:10.1038/s41598-022-06982-2.
- [102] KURABAYASHI T, SAKAI S, FUJINO K. Sub-terahertz imaging of painted steel[C]// Proceedings of the 35th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Rome, Italy: [s. n.], 2010: 1–2. doi:10.1109/ICIMW.2010.5612796.
- [103] CACCIARI I, AGRETI J, SIANO S. Combined THz and LIPS analysis of corroded archaeological bronzes[J]. Microchemical Journal, 2016, 126(5): 76–82. doi:10.1016/j.microc.2015.11.051.

#### 作者简介：

孟田华(1980–)，女，博士，副教授，主要研究方向为文物保护技术。email:mengtianhua@sxtdtx.edu.cn.

赵国忠(1964–)，男，博士，教授，主要研究方向为太赫兹技术。

王浩航(2000–)，男，学士，主要研究方向为光电检测技术。

刘红梅(1980–)，女，博士，教授，主要研究方向为光电检测技术。

任建光(1971–)，男，硕士，副研究馆员，主要研究方向为文物保护技术。

胡伟东(1975–)，男，博士，教授，主要研究方向为太赫兹探测技术。

卢玉和(1961–)，男，硕士，教授，主要研究方向为文物保护技术。

李文宇(1989–)，女，博士，讲师，主要研究方向为太赫兹技术。