文史哲论丛
Literature, History and Philosophy
ISSN Print: 3079-5400
ISSN Online: 3079-5419
https://doi.org/10.63313/LHP.8063

太赫兹技术在文物保护与修复中的应用

刘相筠

北京联合大学应用文理学院，北京市

发布日期：2026年10月20日

摘　要

随着科技考古的深入发展，无损、精准的分析技术已成为文物保护与研究的核心需求。太赫兹技术的出现为文物保护与修复提供了一种新的、无损的检测手段。太赫兹波作为一种介于微波与红外之间的电磁波，以其低能量、高穿透性和“指纹谱”识别能力，能够在不破坏文物的前提下，获取文物内部的结构信息和材料特性。太赫兹技术在文物保护与修复中最主要的两种应用既是太赫兹时域光谱系统（THz-TDs）与太赫兹成像系统。

关键词

文物保护；太赫兹技术；无损检测；应用实例

Applications of Terahertz Technology in Cultural Heritage Conservation and Restoration

Xiangjun Liu

College of Applied Arts and Sciences of Beijing Union University, Beijing, China

Abstract

With the ongoing development of technological archaeology, non-destructive and precise analytical techniques have become a core requirement in cultural heritage research. The emergence of Terahertz technology provides a novel, non-destructive testing method for the conservation and restoration of cultural relics. As an electromagnetic wave situated between microwaves and infrared light, Terahertz waves offer low photon energy, high penetrability, and "fingerprint" spectral recognition capabilities. This allows for the acquisition of internal structural information and material characteristics of cultural relics without causing damage. The two primary applications of Terahertz technology in this field are the Terahertz Time-Domain Spectroscopy system and Terahertz imaging systems.

文章引用：刘相筠. (2026). 太赫兹技术在文物保护与修复中的应用. 文史哲论丛, 2(3), 72－79. ISSN Print: 3079-5400, ISSN Online: 3079-5419.
DOI: 10.63313/LHP.8063

Keywords

Cultural Relıc Protectıon; Terahertz Technology; Non-Destructıve Testıng; Applıcatıon Example

Copyright © 2026 by author(s) and Erytis Publishing Limited.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

传统的文物保护与修复方法在一定程度上能够延缓文物的损坏过程，但在检测文物内部结构和材料成分时，往往存在局限性。X 射线的光子能量高，存在电离风险，且对轻质元素的有机物分辨能力有限；红外与拉曼光谱的穿透性较差，多用于表面分析；超声波检测则受限于分辨率。太赫兹波位于微波与红外之间，其频率范围约为 0.1 至 10 THz，具有低能量、高穿透性、指纹谱性等独特性质，能够在不破坏文物的前提下，获取文物内部的结构信息和材料特性，为文物的保护、修复和研究提供重要的依据。

2. 太赫兹技术的原理

2.1. 太赫兹波的基本特性

太赫兹波（Terahertz wave），是指频率在 0.1-10THz、波长在 0.03-3mm 范围内的电磁波，其频率位于微波与红外之间。太赫兹波最先应用于军事、医疗、半导体等领域也在中药药材鉴别、农产品检验等领域得到了很好的应用，近年来开始应用于文化遗产领域中。在文物检测方面，因太赫兹波具有光子能量低的性质，能量约为 X 射线光子能量的百万分之一，所以不会对文物造成电离损伤，可以做到无损检测，同时也确保了文物检测过程中人员的安全性。太赫兹波对许多介电材料和非极性物质具有良好的穿透性，它能够穿透纸张、陶瓷、木质品、纺织品等常见的文物材料，从而获取文物内部的信息，具有非侵入性。许多有机分子和生物大分子的振动和转动能级间距位于太赫兹波段，使得不同物质在太赫兹波段具有独特的吸收和散射特性，形成特征指纹谱，可用于物质的定性与定量分析。太赫兹波的脉冲宽度通常在皮秒量级，具有很高的时间分辨率，能够对文物内部的微小结构和动态过程进行监测。

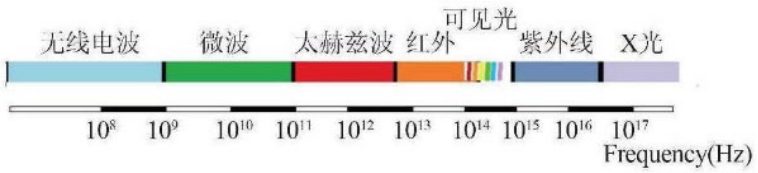


图 1. 太赫兹波谱图

2.2. 太赫兹光谱技术与太赫兹时域光谱系统（THz-TDs）

太赫兹光谱技术基于太赫兹波与物质分子的相互作用，通过测量物质在太赫兹波段的吸收、反射和透射光谱，获取物质的分子结构、化学键振动等信息。不同的化学键和分子结构在太赫兹波段具有特定的振动模式和吸收频率，通过分析这些光谱特征，可以识别材料成分、判断保存状态以及监测材料的老化过程。

在基础物理的研究当中，利用太赫兹分析半导体和无机材料已经有很长的历史。早在 1969 年，利用

第一台 FT - THz 系统观测了几种无机颜料在太赫兹波段的光谱，其中就包括朱砂（HgS）和雌黄（As2S3）这些在绘画作品中常出现的重要颜料。因此建立起不同材料的 THz 数据库是很有价值的，需要注意的是，目前还没有商业用的太赫兹光谱数据库，但日本情报通信研究院（The National Institute of Information and Telecommunications Technology, NICT)与 RIKEN 合作在 2007 年建立了首个文物材料的太赫兹数据库（www.thzdb.org)。2017 年，韩国延世大学的 Ha 等人优化了粉末样品的制备方法，成功提取了天青、朱砂等传统颜料在 0.1-3THz 范围内的数据。国内的研究方面，首都师范大学的张存林团队在 2017 年对铅丹、雌黄、朱砂等七种中国传统颜料进行了太赫兹时域光谱和傅里叶红外光谱的对比测试，发现在 0.25-2.5THz 的重叠频段内，太赫兹光谱能够更为清晰的表现出颜料的吸收峰。2024 年山西大同大学进一步突破了成分相近颜料的鉴别难题，通过吸收峰特征细微差异，成功区分了藤黄与雌黄、红土与红赭石等容易混淆的颜料，将鉴别精度提升至新高度。

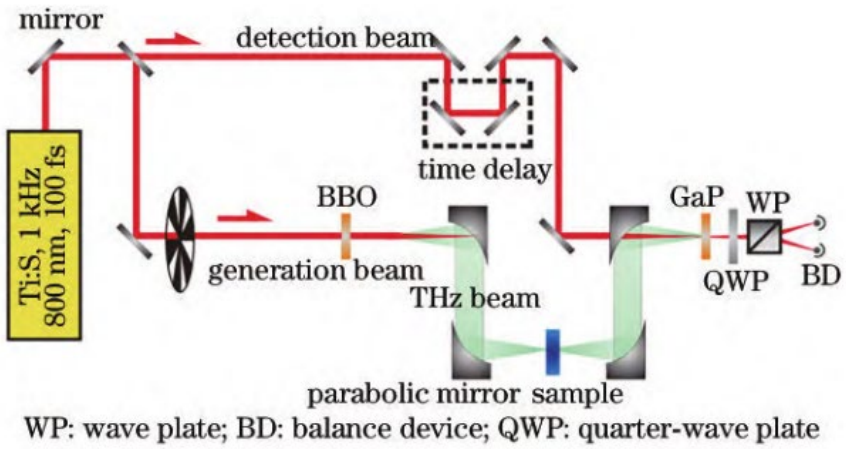


图 2. THz-TDS 示意图

目前可以得到太赫兹光谱的主要有三种技术：傅里叶变换光谱（FTS）、窄波段光谱技术和太赫兹时域光谱技术（THz-TDs）。前两种技术多被应用于天文学中，而最为常见的是太赫兹时域光谱(TDS)技术,也基于此技术搭建了太赫兹时域光谱系统[1]。太赫兹时域光谱技术的工作原理是利用飞秒激光分束产生的太赫兹脉冲穿透样品，并通过另一束探测脉冲激光与穿透后的太赫兹脉冲在探测警惕中汇合，测量太赫兹电场强度与相位的实时变化，经过傅里叶变换后可以无损的获取样品的折射率（n）、吸收系数（α）等关键参数，从而得到太赫兹光谱。太赫兹时域光谱系统的组成一般包括飞秒激光器、太赫兹发射装置太赫兹探测装置、光学平移台等。飞秒激光器发出超短激光脉冲脉冲经偏振分束镜(PBS)分成两束:一束用来产生太赫兹波,另外一束用来探测太赫兹波（如图 2）。张存林与牧凯军（2010）在其综述中详细阐述了这一过程，并指出 THz-TDS 是一种相干探测技术，其最大优势在于能够同时直接获取太赫兹波经过样品后的振幅信息和相位信息[2]。经过傅里叶变换后得到的样品折射率（n）、吸收系数（α）等关键参数是是受检物质的“身份证”，如李晨毓等人（2024）对六种古代颜料的研究所示，朱砂在 1.17 THz 和 1.76 THz 等处有明显的特征吸收峰，而铅丹的吸收峰则位于 1.87 THz 和 2.12 THz 等频率。这种独一无二的“指纹谱”可以鉴别文物上颜色相近的颜料成分[3]。

2.3. 太赫兹成像技术与太赫兹时域成像系统

太赫兹时域光谱技术诞生后很快便被应用于成像领域。1976 年，Hartwick 等人利用自建装置成功的

对一把钥匙实现了成像。然而该技术的真正成熟实在 20 世纪 90 年代飞秒激光器的发明之后，1995 年，贝尔实验室开发的太赫兹透射扫描成像系统被公认为首个真正意义上的太赫兹成像系统。2008 年来自美国密歇根大学的 J. Bianca Jackson 等将太赫兹反射光谱应用于壁画的隐藏层信息探测上，2009 年,Jackson 等利用太赫兹反射脉冲研究几个木材样本的年轮生长模式。2010 年，日本 NICT 的 Fukunaga 团队成功获取了文艺复兴大师乔托蛋彩画的非破坏性截面图像，首次实现了对内部结构的无损探查。

国内将太赫兹成像技术首次应用于文化遗产领域的是来自山西大同大学的杨成全教授团队,他们利用 THz-TDS 对云冈石窟进行了研究,并通过对比不同样品的光谱,定性区分了不同石窟。2013-2016 年,陕西省文物保护研究院承担了科研课题“太赫兹成像技术对壁画结构探查应用研究”,对壁画上的花纹彩绘进行了分析。2014-2016 年,首都师范大学与故宫博物院联合承担北京市科委的项目“太赫兹与红外热波文物多维信息获取与评估系统研究”,推进了太赫兹成像技术在油画上的应用探索。

太赫兹成像技术的理论基础在于太赫兹波与文物之间的相互作用，具体表现为通过对反射或透射信号的解析来获取文物内部的结构信息。该技术最基本的成像方式是逐点扫描成像，其工作原理是通过将太赫兹脉冲聚集在样品表面某一特定的点，通过移动样品或探头进行二维平面的逐点扫描，逐像素地采集太赫兹电场随实践变化的时域波形，从而构建出一个兼具空间二维坐标和时间维度的三维数据立方体（图 3）。通过对这一数据体进行傅里叶变换处理，可将各像素点的时域信号转换为具有特征表示作用的光谱数据，从而使得太赫兹成像不仅能显示物体的形态，更能通过光谱“指纹”确定其化学组成成分。基于该三维数据体系，可以进一步衍生出多种成像模式：利用脉冲最大峰值成像可以反映材料的消光系数；利用飞行时间成像可以计算样品的厚度或折射率分布；提取特定频率下的振幅或相位信息，则可以实现基于光谱特征的“功能成像”。例如，Mikerov 等人（2020）通过结合太赫兹成像与摄影测量技术，成功重构了古陶器碎片的三维形态并绘制了其折射率分布图，从而区分了不同时期、不同工艺的陶片材质[9]。为了适应实际应用场景得多样化需求，目前已经发展出了实时成像、层析成像（T-CT）和近场成像等技术。需要说明的是，无论是利用反射还是透射扫描。都可以对物体进行有效成像，成像方式主要取决于样品的物理特性与系统的检测能力。

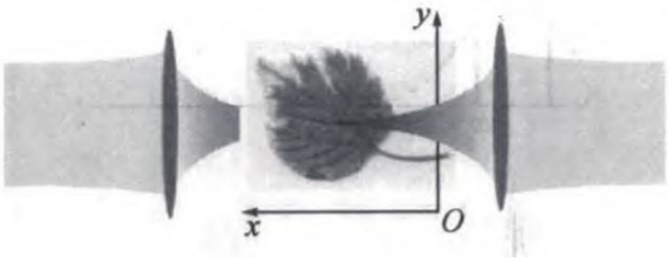


图 3. 太赫兹波扫描成像原理

在文物检测中，太赫兹成像系统可用于检测文物内部的缺陷、损伤和隐藏结构。对于石质文物，如古代石碑、雕像等，太赫兹成像可以发现内部的裂缝、空洞以及修复痕迹，为文物的修复和加固提供指导。在考古发掘中，太赫兹成像技术也可以对地下埋藏的文物进行无损探测，提前了解文物的分布和保存状况，避免在发掘过程中对文物造成不必要的损坏。

3. 太赫兹技术在文物保护与修复中的应用实例

3.1. 太赫兹技术在文物成分分析中的应用

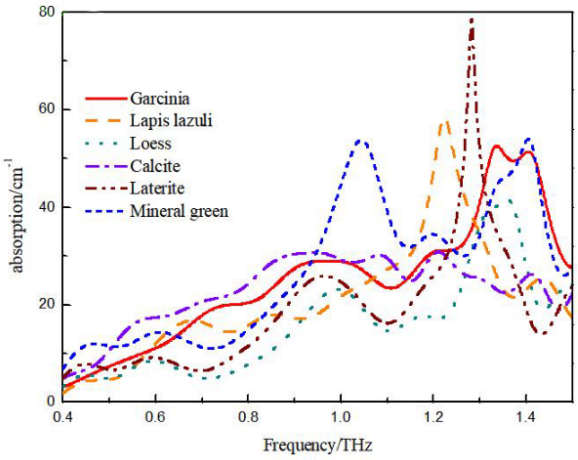


图 4. 六种颜料的太赫兹吸收谱

山西大同大学的刘艳红等人在 2024 年的研究中，利用采用 THz-TDs 系统，在 0.2-1.5 THz 频段对藤黄、黄土、红土、青金石、方解石、石绿这六种颜料进行分析（图 4），并且进一步分析了颜色极为相近的有机颜料藤黄与无机颜料雌黄和主要化学成分同为 Fe2O3 的红土与红赭石的折射率普和吸收光谱。首先将待测的颜料粉末与作为粘合剂和稀释剂的聚乙烯粉末按照比例混合并研磨均匀，随后使用压片机将其压制成厚度约为 1mm 的剥片样品。为了排除水汽对太赫兹信号的干扰，测试在严格控制温湿度的氮气环境中进。实验采用的是透射式的太赫兹时域光谱系统，分别测量了包含样品信息的太赫兹脉冲和自由空间的参考脉冲。通过对得到的时域信号进行傅里叶变换和计算，获得了每种颜料在 0.2-1.5THz 频率范围内的精确吸收光谱。研究结果清晰的显示，尽管藤黄和雌黄的颜色十分相似，但是两者的吸收光谱存在显著的差异：藤黄在 1.335THz 和 1.404THz 处存在两个明显的吸收峰，而雌黄仅在 1.386THz 处存在一个吸收峰。红土和红赭石的吸收峰位置也存在位移情况，红土的主峰在 1.281THz，而红赭石的主峰则在 1.323THz 处。通过研究证实，即使颜料的宏观颜色或主要的化学成分相同，但由于其来源与微观结构存在差异，会在太赫兹吸收谱上也表现出吸收峰位置和强度的明显不同，这为解决颜色相近、主成分相同颜料的精确鉴别难题提供了有效途径。[4]

3.2. 太赫兹技术在文物内部结构检测的应用

对于大型且不可移动的壁画类文物，能够无损探查其内部结构是文物保护工作的核心需求。2008 年，美国密歇根大学的 J. Bianca Jackson 团队采用反射式太赫兹时域成像技术，成功实现了对壁画隐藏层信息的无损检测模拟实验。研究团队共研究了两个样品。首先他们设计了一个模拟样品，先在 4mm 厚的石膏基底上绘制石墨铅笔的蝴蝶草图，然后使用混合的黑色碳铁氧化物、钛白色、黄棕色和棕褐色四种颜料在四个象限中进行全面的覆盖，使底稿完全不可见，如图 5（a）。实验过程中，利用太赫兹时域成像系统对样品表面进行驻点扫描，从绘画覆盖层方向与石膏基底方向进行了太赫兹成像。研究结果显示，太赫兹反射图像能够清晰在线被颜料层完全遮盖的蝴蝶草图轮廓，其线条特征与原始底稿保持高度的一致，如图 5（b）。从石膏基底层方向进行的太赫兹成像也能清晰的看清原始底稿的线条，如图 5（c）。该研究成果为探索壁画创作过程中的修改痕迹和原始构思提供了全新的技术途径，在壁画保护研究领域具有重要的应用价值。[1]

2010 年，日本国家信息通信技术研究所（NICT）的 Fukunaga 团队与意大利研究机构合作，将太赫兹成像技术应用于文艺复兴大师乔托的蛋彩画《巴迪亚祭坛画》，以探测其内部结构。该研究采用便携

式太赫兹时域成像系统，在意大利乌菲兹美术馆对画板进行了现场无损检测。实验采用反射式成像模式，使太赫兹脉冲垂直入射到画作表面，并且借助二维扫描平台逐点测量，系统地记录了从内部不同界面反射回来的太赫兹信号。通过对时域信号进行精确的时间延迟分析，成功实现了画作的截面图像重构。研究结果清晰地揭示了两项关键发现：一是在表面可见的裂纹下方，太赫兹图像显示其石膏准备层已完全缺失，证实了该损伤的深度和严重性；二是成功探测到了被上层颜料覆盖的隐藏金箔的精确轮廓（图 6）。[7]

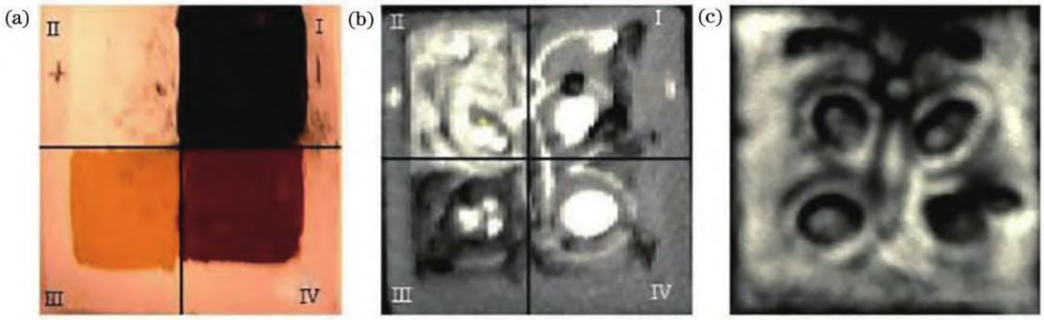


图 5. 模拟样品[1]。（a）颜料下石墨蝴蝶的光学照片；（b）从颜料（a）方向入射的太赫兹图像；（c）从 4mm 厚的石膏方向入射的太赫兹图像

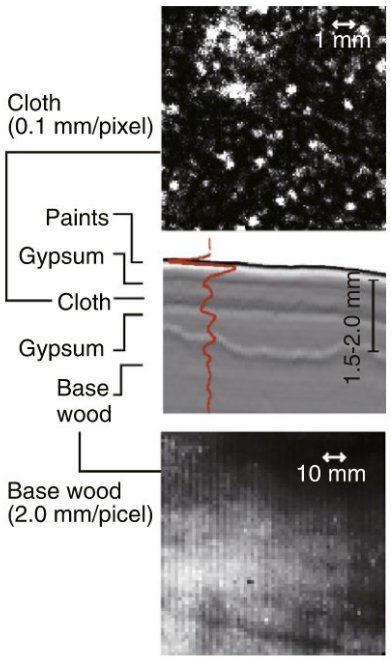


图 6. 《巴迪亚祭坛画》太赫兹成像图。从上至下分别为：画布层图像、截面结构图、木质基底表面图

3.3. 太赫兹技术在文物保护与修复中的其他应用

自 2011 年起，山西大同大学的研究团队将太赫兹时域光谱技术应用于云冈石窟石质风化的科学评估中。研究人员从石窟现场采集了风化深度从 0.1-5cm 至 33-85cm 的不同风化程度的砂岩样品，在实验室内制备成标准测试样品进行测试。所有的测试均在充氮环境中进行，湿度严格控制在 5%以下以确保排除

水汽的干扰。通过投射和反射相结合的测量，取得了不同砂岩样品在太赫兹波段的光学参数（图 7）。研究发现，随着风化程度的加剧，砂岩样品的吸收系数呈现出系统性的增大，而折射率明显降低，这一系数可以准确的反应岩石内部结构的劣化过程。卢民（2022）在研究中提出，利用太赫兹反射技术能够对石头内部的缺陷、空隙进行成像，并可根据图像估算出气隙的占地面积。他进一步展望，可以基于支持向量机（SVM）等机器学习模型，建立石质文物表面风化和内部空心化的预测模型，从而实现对其退化速度与深度的预测性诊断[5]。

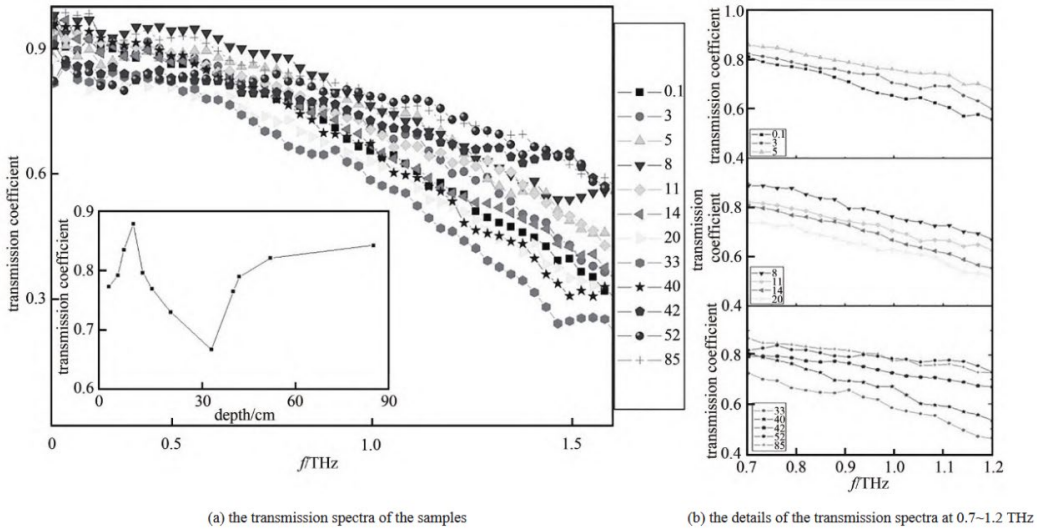


图 7. 云冈石窟风化砂岩样品的太赫兹光谱。（a）样品的透射光谱；（b）0.7~1.2 THz 频段的透射光谱

在漆器、木器与纺织品等复杂复合材质文物的分析上，一方面，太赫兹波对水分子极度敏感，这使得它可以非接触地监测纸张、木材的含水率及其分布，为控制文物保存环境提供直接数据。Fukunaga 与 Hosako（2010）展示了利用太赫兹实时成像系统观察纸张吸水过程的能力（图 8）[7]。另一方面，其穿透能力可用于探查这些有机质文物的内部结构，如李晨毓等人（2021）利用太赫兹飞行时间法对一件漆盒进行了成像，无损地揭示了其内部结构与工艺特征[10]。此外，对于木质佛像、图标画等，太赫兹层析成像还能探测其内部是否藏物或存在虫蛀、脱粘等隐患。

在陶瓷类文物分析方面，Caumes 等人（2011）采用太赫兹透射层析成像技术对一件第十八王朝的埃及密封陶罐进行检测，通过从 0°、20°和 40°等多个角度进行投影扫描，成功获取了陶罐内部的二维透射影像并重建了其三维结构[5]。Mikerov 等人（2020）年将太赫兹成像和摄影测量技术相结合用于分析古代陶器的碎片。研究不仅重构了陶片的三位形态，还绘制了其折射率分布图（图 9）。研究结果显示，不同时期、采用不同生产工艺烧制的陶器，其折射率在空间分布上存在系统性差异[9]。

4. 总结与展望

太赫兹技术作为一种新兴的无损检测手段，凭借其独特的电磁波特性，在文物保护与修复领域已经展现出巨大的应用潜力和独特的学术价值。理论研究层面，它建立在太赫兹波与物质相互作用的物理基础上，通过时域光谱技术和成像技术，能够同时获取文物的成分信息与内部结构信息。当前，太赫兹技术的实践探索成果已在颜料、壁画、油画、漆器、石质文物、纺织品等多种材质和方向取得成果，国内外研究均取得重要进展。

然而，太赫兹技术目前仍处于发展完善阶段，在实际应用中存在一定的局限性。其一，技术的普及程度较低，大型、高性能的太赫兹时域光谱系统通常造价较高且体积偏大，操作和维护也需要专业知识。其二，光谱数据库建设仍存在短板，尽管国际上已建立了如 thzdb.org 等开放的光谱数据库，但整体数据量仍显匮乏，尤其缺乏针对中国特有文物材质和传统工艺材料的系统太赫兹光谱数据。其三，太赫兹波对于含水量较高的物体穿透性能不佳，在高含水量物体中衰减剧烈。其四，太赫兹成像，尤其是高分辨率的三维层析成像，其数据采集和处理速度相对较慢。

展望未来，太赫兹技术将向着设备便携化、数据库标准化、多技术融合的方向发展。具体而言，深度学习驱动的光谱分析技术将大幅提升复杂混合材料的解析能力与效率；基于超表面光学器件的革新将推动成像系统向芯片级、低成本化迈进；主动式超表面成像技术有望突破传统成像在分辨率与景深方面的限制。随着人工智能算法的深度融入，太赫兹技术可在更广泛的文物类型中实现精准保护和深度研究，推动文物保护从被动修复向主动预防、从宏观干预向微观调控转变，成为继 X 射线、超声之后又一重要的无损检测工具。

参考文献

[1] 李晨毓,曲亮.太赫兹技术在文化遗产实践中的应用[J].激光与光电子学进展,2023,60(24):34-49.

[2] 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(02):1-14.DOI:CNKI:SUN:JGDJ.0.2010-02-002.

[3] 李晨毓,周庆莉,曲亮,等.几种颜料在太赫兹波段的光谱研究[J].激光与光电子学进展,2025,62(07):391-397.

[4] 刘艳红,杨康宇,孟田华.太赫兹时域光谱技术在彩色文物保护中的应用[J/OL].激光与光电子学进展,1-13[2025-01-05].http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20240919.0859.022.html.

[5] 孟田华,赵国忠,王浩航,等.太赫兹无损检测在文物保护领域的研究进展[J].太赫兹科学与电子信息学报,2023,21(02):157-175.DOI:CNKI:SUN:XXYD.0.2023-02-013.

[6] 卢民.太赫兹技术应用于文物保护及修复中的探索[J].现代信息科技,2022,6(12):96-100.DOI:10.19850/j.cnki.2096-4706.2022.012.025.

[7] Fukunaga K ,Hosako I .Innovative non-invasive analysis techniques for cultural heritage using terahertz technology[J].Comptes rendus - Physique,2010,11(7-8):519-526.DOI:10.1016/j.crhy.2010.05.004.

[8] Jackson J ,Mourou M ,Whitaker J , et al.Terahertz imaging for non-destructive evaluation of mural paintings[J].Optics Communications,2007,281(4):527-532.DOI:10.1016/j.optcom.2007.10.049.

[9] Mikhail M ,Rabi S ,Peter D V , et al.Analysis of ancient ceramics using terahertz imaging and photogrammetry.[J].Optics express,2020,28(15):22255-22263.DOI:10.1364/OE.399336.

[10] 李晨毓,张宏飞,曲亮,等.太赫兹飞行时间成像在漆盒上的应用[J].激光与光电子学进展,2021,58(06):101-106.DOI:CNKI:SUN:JGDJ.0.2021-06-010.

[11] 王刚,曹佳炜,袁英豪.全光纤耦合式太赫兹近场探针光谱成像系统[J].上海理工大学学报,2024,46(05):539-544.DOI:10.13255/j.cnki.jusst.20230323001.