

文章编号:1001-5078(2025)03-0472-09

· 太赫兹技术 ·

太赫兹波涂层检测技术研究进展

时翔,王苗苗,陈健

(常州工学院 计算机信息工程学院,江苏 常州 213032)

摘要:太赫兹(THz)波已经在探测与通信领域获得了令人瞩目的应用。太赫兹波无损检测(THz-NDT)技术能够在对物质本身无损伤的前提下穿透表面的掩盖层,实现物质特征的高分辨率识别,在材料检测特别是涂层缺陷检测领域具有广泛的应用前景。本文综述了近年来国际和国内 THz-NDT 技术在涂层材料缺陷检测领域的研究进展,对其发展现状及趋势做出总结和展望,为其更进一步的应用提供必要的参考依据和研究思路。

关键词:太赫兹波;无损检测;材料检测;涂层检测

中图分类号:TN29;TP274 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.023

Research progress of terahertz wave coating detection technology

SHI Xiang, WANG Miao-miao, CHEN Jian

(School of Computer Science and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China)

Abstract: Terahertz (THz) waves have gained remarkable applications in the fields of detection and communication. THz wave non-destructive testing (THz-NDT) technology can penetrate the surface mask layer without damaging the material itself and achieve high-resolution recognition of material characteristics, which has a wide range of application prospects in material testing, especially in the field of coating detection. The research progress of THz-NDT technology in coating materials detection both internationally and domestically in recent years is reviewed, and the current status and trend of its development are summarized and outlooked to provide necessary reference basis and research ideas for its further application.

Keywords: THz wave; non-destructive testing; material testing; coating testing

1 引言

太赫兹波(0.3~3 THz)处于微波与光波之间,因其频率窗口尚未被全面研究,被称为电磁波谱中的“THz 间隙”(THz Gap)。从2004年美国首次提出太赫兹技术,并将其列为“改变未来世界的十大技术”,以及2005年中国香山科学会议启动太赫兹研究战略以来,太赫兹技术正逐渐从实验室走出,步入我们的生活。在通信领域,2019年首届全球6G峰会拟定的全球首份6G白皮书中,明确6G发展的

基本方向之一为太赫兹通信;世界无线电通信大会(WRC-19)批准了275GHz以上地面有源无线电业务应用的可用频谱资源,将可用频谱资源上限提升到450GHz的THz频段。在探测领域,美国宇航局(NASA)的SOFIA(Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy),是目前世界上最大的机载探测平台,探测波长在0.3~1.6mm之间,可提供可见光、红外、太赫兹三个波段上的平流层信息^[1];全球合作建立的ALMA(Atacama Large Millimeter/submilli-

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 62371075)资助。

作者简介:时翔(1974-),男,博士,副教授,研究方向为太赫兹波与光波技术。E-mail:shix@czu.cn

收稿日期:2024-08-21;修订日期:2024-09-23

meter Array) 地基天文台,工作波段涵盖太赫兹频段,在 $3\ \mu\text{m} \sim 9.6\ \text{mm}$ ($0.03 \sim 100\ \text{THz}$)之间,成为人类获得星系和行星演变的数据,寻找宇宙起源的重要工具^[2]。此外,在工业检测^[3-4]、空间通信^[5-6]、航空安检^[7-8]、生物医疗^[9-10]、环境检测^[11-12]、国土安全^[13-14]等重要领域,THz 技术正发挥着令人瞩目的作用。

现代工业领域,为保护核心基材不受外界环境侵蚀或改善基材表面性能(耐热、耐磨、耐腐蚀、抗氧化特性等),往往在基材表面涂敷一层或多层特殊性质的涂层。在涂层流水制备及其防护工作过程中,如产生厚度不匀、内部孔洞、异物夹杂,或表面缺损、材质老化等缺陷,会直接影响涂层的防护周期和功效,存在重大安全隐患。为确保基材涂层安全有效地工作,亟需先进的无损检测技术(NDT)在涂层流水制备时进行在线检测、精准进行涂层质量控制,在涂层防护工作期内定期进行现场的涂层厚度、缺损等的安全评测。

传统的涂层 NDT 包括涡流检测、超声检测、红外热成像、微波检测和 X 射线检测等。He 等^[15]基于自主开发的涡流检测系统,进行了钛合金(Ti-6Al-4V)涂层和基材之间的嵌入缺陷检测;Lysenko 等^[16]利用阵列式涡流检测技术,进行了飞机部件小缺陷和亚表面缺陷的检测,以精确确定部件涂层下的金属件缺陷尺寸和位置信息。Hong 等^[17]提出了一种非接触式超声成像方法来检测金属水下管道外防腐层的脱落损伤,以具有三层聚乙烯外防腐层的金属水下管道为检测对象,有效地进行了管道缺陷的定位检测;Ma 等^[18]提出了一种基于多尺度特征的高斯过程回归算法,基于超声脉冲回波技术,能够高效率预测热障涂层(TBC)的孔隙率。李永君^[19]通过外加的激光激励,使基于红外辐射成像原理的热像仪测得的 TBC 厚度更加精确、高效;Shi^[20]等提出了一种灰度梯度空间直方图熵(GGSHE)、多阈值分割和堆叠约束玻尔兹曼机(GEMSS)的新算法,使基于红外检测的 TBC 内部裂纹位置检测和裂纹密度检测下的平均准确率分别为 95.5% 和 86.7%。Sezer^[21]等采用微波 NDT 技术,使用在 45 MHz 至 110 GHz 频率范围内工作的网络分析仪来测量散射波的振幅和相位变化,来评估锐角激光钻孔后,涂有稳定氧化锆 TBC 的高温合金基材的完整性。Wit-

te^[22]等采用 X 射线衍射测量的方法,以非破坏性的方式测量了钢上锌涂层厚度的空间分布。

在涂层材料检测领域,THz-NDT 至少在下述几个方面比上述技术占据优势^[23-24]。

1. 与涡流检测、超声波检测技术相比,使用范围更广,限制条件更少。
2. 与红外检测技术相比,有更高的穿透力;与微波检测技术相比,有更高的分辨率。
3. 与 X 光检测技术相比,更加安全,区分度更高。

因此,THz-NDT 能够穿透涂层表面,为目标识别与诊断提供高的成像对比度和足够高的分辨率,再加上其辐射安全的优点,成为近年来涂层材料 NDT 领域的研究和应用热点。

2 涂层材料 THz-NDT 机理

涂层材料检测主要包括涂层厚度测量、多涂层质量控制,以及涂层表面脱落、涂层内部空隙或杂质、以及涂层与涂层下基体表面破损、腐蚀等的准确诊断于识别等。太赫兹波对非极性材料具有选择性穿透能力,材料不同,穿透能力也不同,但会被金属材料全反射。当太赫兹波在不同介质材料中传播时,由于在两种介质的分界面处的折射率改变,太赫兹波会发生反射和透射,利用太赫兹脉冲在检测目标内部不同界面的反射信号的时间延迟,实现目标的纵向高分辨层析成像。以涂层厚度检测为例,基于反射与透射机理的涂层材料 THz-NDT 机理简述如下。

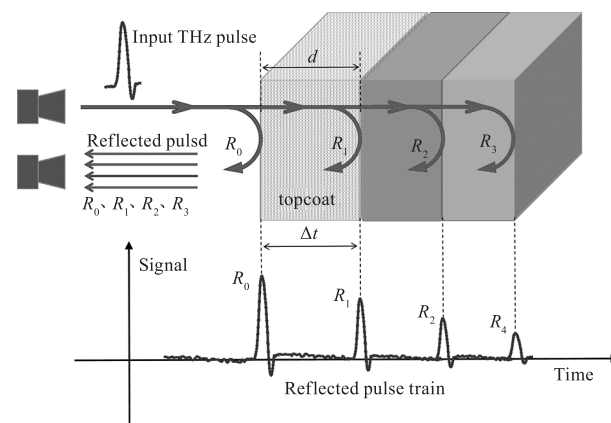


图 1 基于太赫兹波反射与透射测量的涂层检测示意图

Fig. 1 Coating detection based on THz reflection and transmission measurement

如图 1 所示的涂层厚度 d 可由下式给出:

$$d = \frac{c\Delta t}{2n} \quad (1)$$

式中, c 为真空光速; Δt 为入射太赫兹脉冲在顶层涂层上表面反射波 R_0 和下表面反射波 R_1 之间的时延; n 为顶层涂层材料的太赫兹波折射率。

多层涂层的各涂层厚度公式均可用公式(1)表达, 式中的时延 Δt 分别为各自涂层上、下表面反射波的时间差, 式中的 n 也分别代表不同涂层材料的太赫兹波折射率。

在实际的 THz-NDT 应用中, 太赫兹波系统通过检测上述脉冲回波串 R_1 、 R_2 、 R_3 ... 的时间, 建立起不同涂层材料厚度的提取模型, 通过分析各涂层对 THz 波的响应, 计算出涂层的厚度及其分布均匀性(与标准涂层材料样本进行对比)。综合进行脉冲回波串各波形之间的时延、幅值以及形状(上升沿、下降沿、脉冲宽度等)的改变, 与样本库数据进行对比和分析, 可建立其波形各特征量与涂层厚度、涂层下金属缺损程度等的科学关联^[25-26]。

综上所述, 涂层材料 THz-NDT 是通过利用太赫兹波的高穿透性和高分辨率特性, 基于时域光谱测量, 结合相干测量与相关分析, 不仅实现对涂层厚度的快速精准测量, 同时还能鉴别涂层的成分和结构、缺损与杂质等, 为涂层检测提供了一种先进且高效的方法。

3 涂层材料 THz-NDT 应用

如前所述, THz-NDT 在材料检测领域得到广泛应用的原因是其介质穿透及无损特性, 特别适合涂层及涂层下材料的气隙、杂质或损伤检测等, 下面将从油漆涂层、海洋防护涂层以及 TBC 三种主要涂层的 THz-NDT 应用进行综述。

3.1 油漆涂层

在汽车或航空涂装过程中, 油漆涂层的漆膜厚度是最关键和最具限制性的质量参数之一。尽管目前有许多无损检测技术用于评估油漆和涂层的厚度, 超声检测、X 射线微计算机断层扫描和涡流检测等, 但很难实时质量控制要求的工业标准, THz-NTD 是进行汽车、飞机等油漆涂层质量评估的良好方法^[27-28]。

Yasui 等^[29]提出了一种基于太赫兹回波信号的飞行时间测量的油漆测量仪, 用于非接触和远程监测漆膜的厚度和干燥过程。该方法能够有效地测量单层和多层漆膜厚度、监测漆膜从湿到干的转变, 使 THz 油漆测量仪成为车身涂装过程中, 漆膜质量控

制的有力工具。Yasuda 等^[30]在进行油漆厚度 THz-NDT 的研究中, 提出了一种类似于基于多元回归分析的方法的数值参数拟合算法, 在确定干漆膜和湿漆膜的光学厚度、几何厚度和组折射率的无损检测中, 该方法可有效地提高太赫兹系统的灵敏度, 并减小最小可检测厚度的大小。Su 等^[31]更进一步, 将数值拟合算法与太赫兹波在多层介质中传播的高精度一维电磁模型相结合, 能够精确测得多层汽车漆膜的消光系数和折射率, 以及薄至 18 μm 的底漆层厚度等参数。

Dong 等^[32]报道了用 THz 脉冲成像(TPI)和红外 OCT 表征汽车涂料的实验结果, 结果证实, 真实汽车的所有四层油漆样品的单层厚度都可以通过 TPI 测量来确定, 而 OCT 测量只能对汽车油漆的前两层进行成像, 但图像分辨率更好。

Kim 等^[33-34]在汽车用强化玻璃纤维塑料(GFRP)和碳纤维增强基复合材料(CFRP)的涂层和油漆评估中, 应用了太赫兹无损检测技术, 获得了良好的效果。Liebelt 等采用 THz-TDS 技术, 进行了汽车油漆厚度测量和表征的无损检测研究。研究表明, THz 脉冲的特性(带宽和动态范围)直接影响了厚度测定性能, 提高信噪比和增大太赫兹带宽, 能够以相对较高的速度分辨厚度从几纳米到几微米的汽车油漆涂层^[35]。

上述研究综述表明, THz-NDT 在油漆涂层检测领域的应用, 主要集中在汽车或航空涂装过程中单层及多层涂层厚度测量的质量控制, 在工业智能化升级的今天, THz-NDT 将逐渐从实验室走出, 广泛应用于现代化工厂油漆涂装流水线上的涂层质量智能控制。

3.2 海洋防护涂层

在海洋工业中, 防护涂层在保护船舶面板和船底等海下或近海结构方面发挥着重要作用。随着时间增长, 这些结构保护涂层的退化、老化或失效不可避免, 引起更严重的船体结构件损坏。

在海洋防护涂层的 THz-NDT 应用中, Chady 等^[36]采用了谐波分析的方法处理 THz 信号, 能够准确检测和评估玻璃纤维增强复合材料(GFRP)层压板中不同类型的损伤和缺陷; Iwata 等^[37]还改进偏最小二乘法(PLS), 将其用于处理太赫兹数据, 能够准确预测单层海洋防护涂层漆膜的厚度。

Tu 等^[38]采用 FDTD 模型计算了太赫兹波的传播和反射,反射波波形的细节参数可用于海洋涂层厚度的特征提取,定量评估涂层下缺陷的发生情况。为了清楚地识别防污和防腐涂层之间的界面信息,Tu 等^[39]继续采用平稳小波变换(SWT)的方法将获得的太赫兹脉冲函数分解为近似系数和细节系数,来提取涂层的厚度特征。实验结果证实,所开发的信号特征模型和基于 SWT 的算法可以用于精确评估涂层下方的缺陷情况(如油漆脱落或腐蚀缺陷等)。通过反射式 THz-TDS 系统,Tu 团队^[40]使用傅立叶反褶积算法定期分析了从样本反射的太赫兹回波脉冲,以获得脉冲响应函数,评估海洋涂层的厚度。在后续的研究中,Tu 等^[41]使用 THz-TDS 测量了几种类型的海洋防护涂层的缺陷样品,比较了从样品的原始和受损区域测量的信号,以解释在样品的不同水平上观察到的太赫兹信号的变化。此外,他们还对样品进行了结构分析,对油漆凸起缺陷、腐蚀缺陷和油漆脱落缺陷进行了明确的区分和定量评估。近期,Tu 团队^[42]新提出了一种基于小波包能量的有机防护涂料太赫兹无损评价的有效方法,以检测信号的相对小波能量及其香农熵作为小波能量指标,用以涂层不均匀性的评估和潜在腐蚀缺陷的识别。

Choi 等^[43]提出了一种太赫兹信号分解的方法来分解太赫兹反射波的特性参量,借助每个分解的太赫兹信号中提取的频谱特征量信息,能够准确识别海洋涂层样品的各个层组成。

上述研究综述表明,THz-NDT 在海洋防护涂层检测领域的应用,主要集中在海洋工业中防护涂层退化、老化或失效的涂层缺陷检测。THz-NDT 应用于海洋防护涂层检测,不仅能够精确测量涂层单层及多层漆膜厚度、准确诊断涂层及涂层下材料的缺陷,还能对涂层结构与性能进行评估,有效地进行海洋防护涂层的测量、诊断、评估及预测,实现涂层质量的智能监控。

3.3 TBC

飞机、汽车、船舶等的易损或高温结构件上,通常采用 TBC 以形成高科技的保护表面。TBC 由陶瓷面漆和金属粘结层组成,厚度分别为 200 ~ 600 μm 和 100 μm ,当结构件系统温度超过 700 $^{\circ}\text{C}$ 时,热生长氧化物(TGO)层便开始在 TBC 顶涂层和

金属结合涂层之间生长。太赫兹波能够非接触穿透聚合物、陶瓷和油漆等非金属基材,准确获得顶涂层的质量、脱胶和厚度,以及金属结合涂层的气隙、杂质、破损、变形等信息,THz-NDT 在该领域的应用也成为近年来的研究热点。

2010 年,Chen 等^[44]利用太赫兹时域反射仪对氧化锆陶瓷 TBC 中热生长氧化物(TGO)层的形成与生长过程,以及涂层下金属表面界面处的空隙随热暴露时间的增加而发生的变化进行了监测。太赫兹反射波的脉冲宽度和形状变化,与上述这些生长和变化过程的特征量密切相关,从而使 TBC 的寿命预测、剥落警告等成为可能。

Fukuchi 等^[45]对于易损高温部件(如燃气轮机叶片)TBC 的 THz-NDT 进行了研究,基于涂层折射率参数,通过获得涂层上表面与下表面(界面)反射波之间的时间差来获得涂层厚度;从界面反射波振幅的二维轮廓来检测涂层下方金属件表面的缺陷。基于该方法,在 TBC 样品中成功检测到面漆下 1 mm \times 1 mm 的人工缺陷。基于反射测量原理,Fukuchi 等^[46]继续开发了一种根据反射波波形特征来确定燃气轮机叶片 TBC 顶涂层的折射率和厚度的方法。将该方法应用于表面涂层材料钇稳定氧化锆(YSZ)的试样测试,所获得的折射率与在基于太赫兹透射的 THz-TDS 获得的折射系数一致,所获得的厚度与使用接触式厚度计的测量结果一致。在使用 THz-NDT 术对 TBC 进行实际评估时,研究表明,面漆表面的粗糙度通常会影响到不同层的折射率和厚度等特征的准确性,因此 Fukuchi 等^[47-48]综合考虑到太赫兹系统的频率特性,使用与之相适应的 TBC 表面粗糙度校正系数,能够确保准确的 TBC 折射率和厚度,以及 TGO 层厚度的测量。

Ye 等^[49]探讨了 THz-NDT 用于 TBC 样品孔隙率评估的可行性,其测量结果达到了 9.09 % 至 21.68 % 的孔隙率水平。Waddie 等^[50]使用法向入射太赫兹反射率方法来确定陶瓷 TBC 系统的双折射特性和光学厚度,并报告了准确的结果。

Unnikrishnakurup 等^[51]基于 THz-TDS 技术进行了航空发动机表面喷涂的等离子体陶瓷 TBC 系统降解水平的评估。该种基于 THz-TDS 的精确厚度测量技术,揭示了 TBC 随着使用寿命的增加而逐步退化的一般线性规律,有助于准确创建发动机数字

孪生模型,制定预防性维修措施,从而提高飞机发动机关键部件的寿命和安全性。

尽管 THz-NDT 能够精确地测量 TBC 系统中 TGO 层的厚度,但是这些层的平均厚度通常为几微米厚,小于太赫兹波的脉宽,需要额外的信号或图像处理措施来获得准确的结果。Luo 等^[52]提出了一种结合了平稳小波变换(SWT)和反向传播(BP)神经网络的算法,适用于 TGO 的薄厚度检测。Zhang 等^[53]在太赫兹反射模式下使用先进的信号处理方法,确保了 THz-NDT 的厚度测量精度。该项研究也获得了国家自然科学基金“非匀态厚热障涂层的太赫兹无损检测机理及定量评估研究”(2023/01 - 2026/12)项目的支持。

TBC 在涡轮发动机叶片的隔热保护方面有着重要作用,但热冲击引起的横向裂纹扩张、热生长氧化物的生长以及粘结层断裂等问题都容易导致 TBC 的脱粘,降低热障涂层服役周期。蔡恩泽^[54]提出了基于太赫兹技术的 TBC 脱粘缺陷检测与分析方法,实现了 TBC 脱粘缺陷无损非接触检测,有效地监测与评估了 TBC 健康状况,以保障涡轮发动机的正常服役。李素珍^[55]开展了 TBC 脱粘缺陷的太赫兹无损检测技术的研究,在涂层出现鼓包或脱落前通过亚表面成像,来检测涂层内部结合状态,及时降低涂层失效风险。

针对固体火箭发动机金属壳体外防护涂层紧贴型无黏结缺陷检测问题,张振伟等^[56]采用反射式 THz-TDS 技术对标准涂层试件进行检测,实现对黏好区、紧密接触但是黏结失效区(无黏结区)、交界区和微小缺陷区分布情况判识。针对等离子喷涂工艺制备的 TBC 内部结构复杂、太赫兹波在热障涂层内传播衰减严重等问题,何普等^[57]提出利用太赫兹波强度关系的 TBC 厚度测量方法,建立 TBC 的太赫兹波传播模型,得到基于太赫兹波检测信号的 TBC 厚度计算方法,准确地进行了 TBC 厚度测量。

王兆祺等^[58]基于太赫兹无损检测技术,进行了 TBC 厚度的多次测量与对比,得出测量的相对误差在 5.6% 以内,测量精度可达到 2.35%,上述测量结果再配合具体的健康管理算法,可以完成对涡轮叶片 TBC 在实验室环境下的健康评估与寿命预测。杨大林^[59]提出了 TBC 脱粘缺陷太赫兹图像超分辨率重建方法,能够在 2 倍重建下实现较好的重建效果,

为 TBC 快速检测提供了新的方法。

上述研究综述表明,THz-NDT 在 TBC 检测领域的应用,主要集中在 TBC 厚度测量、TBC 脱落或缺损诊断,以及 TBC 下技术材料的缺损、腐蚀诊断等。THz-NDT 应用于 TBC 检测,为飞机、汽车、船舶等的易损或高温结构件安全维护,提供了有效的智能化监控与诊断技术。

4 挑战与应对

尽管 THz-NDT 的硬件和软件系统近十几年来均发展迅速,在涂层检测领域的应用逐渐推广和深入,但该技术的广泛应用依然受到许多挑战。下面对本文所述各项研究中的 THz-NDT 技术特征按太赫兹波的产生、系统扫描及成像方法、以及信号分析与图像处理算法进行了总结。针对该三项主要技术特征,分析、总结了前述各文献所述 THz-NDT 技术的不足与挑战,并探讨了应对各项挑战的有效措施。

4.1 系统小型化、便携性、低成本化挑战与应对

从上述的研究可知,涂层检测领域应用的 THz-NDT 及其系统,太赫兹波均基于光波下变频技术产生。如基于飞秒激光器产生脉冲太赫兹波的 THz-TDS,一对具有太赫兹频率差的连续波激光器通过混频产生连续太赫兹波的 THz-FDS(频域光谱系统)等。该类系统技术成熟度高,已有商用产品面世,工作频率高,因而成像检测所需的高分辨率得到满足。但基于光学方法或真空电子技术产生太赫兹波的方法,通常需要冷却、超导等技术实现,这也导致了该类太赫兹检测系统在成本、重量与体积、设备复杂度上居高不下。

应对上述挑战的有效方法,一是继续进行上述 THz-TDS、THz-FDS 等的系统开发,面向紧凑、坚固、高效,室温操作和便携式发展方向进行;二是基于电子学的方法,通过微波、毫米波倍频产生太赫兹波,基于化合物半导体材料如:GaAs(砷化镓)、InP(磷化铟)、GaN(氮化镓)等,开发低成本、紧凑型太赫兹芯片、器件及前端系统。目前,基于电子学的太赫兹技术,已经广泛应用于深空探测、射电天文、雷达探测等领域。随着该类电子学太赫兹系统工作频率低、辐射功率小的问题逐步解决,THz-NDT 技术应用领域将会得到进一步的拓展与深入。

4.2 信号、图像采集的低速率与误差率挑战与应对

上述研究中,THz-NDT 及其系统大多基本采取

单像素、缓慢成像的方法,以避免扫描系统的机械振动、转角误差等,保障在较高的扫描精度下获得足够图像处理和目标识别的分辨率。该类太赫兹系统的信号、图像采集速率虽低,但精度较高,提高扫描速度会带来信号和图像采集的误差率。

应对上述挑战的有效方法,一是继续在原基础上优化系统,采用异步光学采样、电子控制的光学采样和激光腔调谐等方法,提高信号采集速率,在可控范围内消除机械运动的误差和延迟;二是发展适当的成像扫描机制,实现多像素数据的并行测量,通过高扫描精度的光机扫描或电子扫描(相位控制阵列)实现三维或者旋转(圆周或圆柱)测量等等,使信号的获取或图像捕捉实时、可靠,并精确可视化。

4.3 信号分析、图像处理算法的精确性和有效性挑战与应对

尽管上述研究中已经介绍了较多的基于学习的信号处理技术、手动特征提取方法、机器学习算法等,以帮助获取有效的太赫兹波目标特征量,但依然因为条件的限制,不能进行大规模的测量与分析,各种信号处理和图像算法只能基于少量样本。此外,环境因素(如温度、湿度以及其他测试条件等)对THz-NDT的结果往往造成较大影响。在实际的工业测试中,基于微弱信号检测的THz-NDT信号特征量往往被环境因素导致的噪声淹没,难以获得足够SNR(信噪比)水平的信号,使信号处理和特征识别变得困难。

应对上述挑战的可靠方法是建立基于大量样本测试的样本数据库。该数据库的建立一方面为NDT的结果提供可靠的比对数据,另一方面则为现行的大数据技术、人工智能算法提供样本充分、真实可靠的数据库,通过反复训练,获得各相对复杂样本独有的太赫兹光谱指纹。

上述挑战和应对主要是针对THz-NDT近十年来在涂层缺陷检测领域的应用提出。不仅如此,现行技术的发展在未来也会为THz-NDT技术的更广泛和更深入应用提供便利。如现行的3D打印技术使更高精度、更复杂高效的太赫兹器件与系统制造成为可能;超材料、纳米、等离子体、石墨烯等新技术也为高效、高能太赫兹波的产生提供了芯片基础;大规模的计算机建模和图形技术,使THz-NDT系统

更加紧凑,信号采集和图像处理更加高效。THz-NDT技术的软、硬件升级及其大规模应用,需要做的工作还很多,但行则必至。

5 结语

本文回顾了THz-NDT在涂层检测领域的三种主要应用,文献综述表明太赫兹波特有的介质穿透性、无损特性以及高分辨率,使其在涂层产品检测、结构监测、质量控制等方面具有重要的应用前景。上述所有THz-NDT在涂层检测领域的应用,都已经或即将走出实验室,在工业生产的各相关领域中,发挥着高效、无损、精准的检测作用。同时,在实验室中,依然在进行着大量的THz-NDT在该领域的应用研究、太赫兹探测与成像系统的更新与优化、信号与图像处理的新方法研究。可以肯定并可预见的是,这些发展正在努力填平曾经的“THz-Gap”,逐渐地将太赫兹技术进行发展和推广,使其更好地服务社会与生产。

参考文献:

- [1] Risacher C, Güsten R, Stutzki J, et al. First supra-THz heterodyne array receivers for astronomy with the SOFIA observatory[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016, 6(2): 199 - 211.
- [2] Uzawa Y. The development of superconducting receivers for the atacama large millimeter/submillimeter array (ALMA) [J]. Oyo Buturi, 2014, 83(8): 644 - 650.
- [3] Guo Youdong, Lin Furi, Yao Jianquan. Super-resolution reconstruction for terahertz images based on gradient transform [J]. Laser Technology, 2020, 44(3): 271 - 277. (in Chinese)
郭佑东, 凌福日, 姚建铨. 基于梯度变换的太赫兹图像超分辨率重建[J]. 激光技术, 2020, 44(3): 271 - 277.
- [4] Naftaly M, Vieweg N, Deninger A. Industrial applications of terahertz sensing: state of play [J]. Sensors, 2019, 19(19): 4203.
- [5] Fu X, Liu Y, Chen Q, et al. Applications of terahertz spectroscopy in the detection and recognition of substances [J]. Frontiers of Physics, 2022, 10: 869537.
- [6] Song H J, Lee N. Terahertz communications: challenges in the next decade [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2022, 12(2): 105 - 117.
- [7] Ma Chensheng, He Yuanzhi. Spatial terahertz communication channel modeling technology [J]. Applied Laser,

- 2024,44(4):123–138. (in Chinese)
 馮震升,何元智.空间太赫兹通信信道建模技术[J].
 应用激光,2024,44(4):123–138.
- [8] Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20(7):266–280.
- [9] Choi K, Hong T, Sim K I, et al. Reflection terahertz time-domain spectroscopy of RDX and HMX explosives[J]. *Journal Of Applied Physics*, 2014, 115(2):18.
- [10] Tzydynzhapov G, Gusikhin P, Muravev V, et al. New real-time sub-terahertz security body scanner[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, 41(6):632–641.
- [11] Yang X, Zhao X, Yang K, et al. Biomedical applications of terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Trends in Biotechnology*, 2016, 34(10):810–824.
- [12] Gong A, Qiu Y, Chen X, et al. Biomedical applications of terahertz technology[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2020, 55(5):418–438.
- [13] Ge L N, Zhan H L, Leng W X, et al. Optical characterization of the principal hydrocarbon components in natural gas using terahertz spectroscopy[J]. *Energy Fuels*, 2015, 29(3):1622–1627.
- [14] Leng W, Zhan H, Ge L, et al. Rapidly determining the principal components of natural gas distilled from shale with terahertz spectroscopy[J]. *Fuel*, 2015, 159:84–88.
- [15] He D, Kusano M, Watanabe M. Detecting the defects of warm-sprayed Ti-6Al-4V coating using Eddy current testing method [J]. *NDT & E International*, 2022, 125:102565.
- [16] Lysenko I, Kuts Y, Uchanin V, et al. Evaluation of Eddy current array performance in detecting aircraft component defects[J]. *Transactions on Aerospace Research*, 2024, (2):1–9.
- [17] Hong X, Huang L, Gong S, et al. Shedding damage detection of metal underwater pipeline external anticorrosive coating by ultrasonic imaging based on HOG + SVM [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9, 364.
- [18] Ma Z, Sun L, Chen Y, et al. Ultrasonic prediction of thermal barrier coating porosity through multiscale-characteristic-based Gaussian process regression algorithm[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 195:1–11.
- [19] Li Yongjun, Xiao Junfeng, Zhu Lichun, et al. Research on detection of thickness of thermal barrier coating by laser transmission infrared thermal wave method [J], *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7):1–5. (in Chinese)
 李永君,肖俊峰,朱立春,等.热障涂层厚度激光透射法红外热波检测技术研究[J].*红外与激光工程*, 2017, 46(7):1–5.
- [20] Shi L, Long Y, Wang Y, et al. Online nondestructive evaluation of TBC crack using infrared thermography [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(11):115008.
- [21] Sezer H K, Li L, Wu Z, et al. Non-destructive microwave evaluation of TBC delamination induced by acute angle laser drilling [J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 18(1):167.
- [22] Witte M. Measurement of coating thickness with X-ray diffraction[J]. *Powder Diffraction*, 2023, 38(2):112–118.
- [23] Fan S, Jeong K, Wallace V P, et al. Use of terahertz waves to monitor moisture content in high-pressure natural gas pipelines[J]. *Energy Fuels*, 2019, 33(9):8026–8031.
- [24] Lee E, Nellen S, Kohlhaas R B, et al. Terahertz non-destructive testing technology for industrial applications[J]. *Electronics and Telecommunications Trends*, 2018, 33(3):59–69.
- [25] Fukuchi T, Ozeki T, Okada M, et al. Nondestructive inspection of thermal barrier coating of gas turbine high temperature components [J]. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2016, 11(4):391–400.
- [26] Burger R, Frisch J, Hübner M, Goldammer M, et al. THz-TDS reflection measurement of coating thicknesses at non-perpendicular incidence; experiment and simulation [J]. *Sensors*, 2021, 21(10):3473.
- [27] Krimi S, Klier J, Jonscheit J, et al. Highly accurate thickness measurement of multilayered automotive paints using terahertz technology [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(2):021105.
- [28] Hernandez S A I, Castro C E. Determination of automobile paint thickness using non-contact THz-TDS technique [C]//40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), Hong Kong, China, 2015.
- [29] Yasui T, Yasuda T, Sawanaka K, et al. Terahertz paintmeter for noncontact monitoring of thickness and drying progress in paint film [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(32):6849–6856.

- [30] Yasuda T, Iwata T, Araki T, et al. Improvement of minimum paint film thickness for THz paint meters by multiple-regression analysis [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(30):7518–7526.
- [31] Su K, Shen Y C, Zeitler J A. Terahertz sensor for noncontact thickness and quality measurement of automobile paints of varying complexity [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(4):432–439.
- [32] Dong Y, Zhang J, Shen Y, et al. Non-destructive characterization of automobile car paints using terahertz pulsed imaging and infrared optical coherence tomography[C]//40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), Hong Kong, China, 2015.
- [33] Kim S K, Jung J A. Terahertz scanning techniques for paint thickness on CFRP composite solid laminates [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(10):4413–4416.
- [34] Kim S K, Hsu D K, Jung J A. Coating thickness characterization of composite materials using terahertz waves [J]. *Materials Science Forum*, 2017, 878:70–73.
- [35] Liebelt L, Weber S, Klier J, et al. Influence of bandwidth and dynamic range on thickness determination using terahertz time-domain spectroscopy [C]//44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), Paris, France, 2019.
- [36] Chady T, Lopato P, Szymanik B. Terahertz and thermal testing of glass-fiber reinforced composites with impact damages [J]. *Journal of Sensors*, 2012, (4–9):276–283.
- [37] Iwata T, Yoshioka S, Nakamura S, et al. Prediction of the thickness of a thin paint film by applying a modified partial-least-squares-1 method to data obtained in terahertz reflectometry [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, 34(10):646–659.
- [38] Choi J, Kwon W S, Kim K S, et al. Nondestructive evaluation of multilayered paint films in ambient atmosphere using terahertz reflection spectroscopy [J]. *NDT and E International*, 2016, 80:71–76.
- [39] Tu W, Zhong S, Shen Y, et al. Nondestructive testing of marine protective coatings using terahertz waves with stationary wavelet transform [J]. *Ocean Engineering*, 2016, 111:582–592.
- [40] Tu W, Zhong S, Shen Y, et al. Neural network based hybrid signal processing approach for resolving thin marine protective coating by terahertz pulsed imaging [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173:58–67.
- [41] Luo M, Zhong S, Yao L, et al. Thin thermally grown oxide thickness detection in thermal barrier coatings based on SWT-BP neural network algorithm and terahertz technology [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(13):4097–4104.
- [42] Tu W, Zhong S, Luo M, et al. Non-destructive evaluation of hidden defects beneath the multilayer organic protective coatings based on terahertz technology [J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9:676851.
- [43] Tu W, Zhong S, Zhang Q, et al. Quality evaluation of organic protective paints using terahertz pulse imaging technology based on wavelet packet energy method [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 267.
- [44] Chen C C, Lee D J, Pollock T, et al. Pulsed terahertz reflectometry for health monitoring of ceramic thermal barrier coatings [J]. *Optics Express*, 2010, 18(4):3477–3486.
- [45] Fukuchi T, Fuse N, Okada M, et al. Application of terahertz waves to nondestructive testing of thermal barrier coating [C]//The International Conference on Electrical Engineering, Kanazawa, Japan, 2012:1586–1589.
- [46] 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.
- [47] Fukuchi T, Fuse N, Okada M, et al. Topcoat thickness measurement of thermal barrier coating of gas turbine blade using terahertz wave [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2014, 189(1):1–8.
- [48] Fukuchi T, Ozeki T, Okada M, et al. Nondestructive inspection of thermal barrier coating of gas turbine high temperature components [J]. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2016, 11(4):391–400.
- [49] Ye D, Wang W, Zhou H, et al. In-situ evaluation of porosity in thermal barrier coatings based on the broadening of terahertz time-domain pulses: Simulation and experimental investigations [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20):28150–28165.
- [50] Waddie A J, Schemmel P J, Chalk C, et al. Terahertz optical thickness and birefringence measurement for thermal barrier coating defect location [J]. *Optics Express*, 2020, 28(21):31535–31552.
- [51] Unnikrishnakurup S, Dash J, Ray S, et al. Nondestructive

- evaluation of thermal barrier coating thickness degradation using pulsed IR thermography and THz-TDS measurements; a comparative study [J]. *NDT & E International: Independent Nondestructive Testing and Evaluation*, 2020, 116(1): 102367.
- [52] Luo M, Zhong S, Yao L, et al. Thin thermally grown oxide thickness detection in thermal barrier coatings based on SWT-BP neural network algorithm and terahertz technology [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(13): 4097 - 4104.
- [53] Cai Enze. Study on characterization of debonding defects in thermal barrier coatings based on terahertz technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021. (in Chinese)
蔡恩泽. 基于太赫兹技术的热障涂层脱粘缺陷识别方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [54] Li Suzhen. Research on terahertz imaging method for debonding defects of thermal barrier coatings [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021. (in Chinese)
李素珍. 热障涂层脱粘缺陷太赫兹成像检测方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [55] Zhang Z, Huang Y, Zhong S, et al. Time of flight improved thermally grown oxide thickness measurement with terahertz spectroscopy [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2022, 17(4): 49.
- [56] Zhang Zhenwei, Wu Yinhong, Zhang Qiang, et al. Terahertz imaging for external protective coating close-fitting defects of solid rocket motor [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(2): 304 - 312. (in Chinese)
张振伟, 吴迎红, 张强, 等. 固体发动机外防护涂层紧贴型缺陷太赫兹成像实验研究 [J]. *固体火箭技术*, 2023, 46(2): 304 - 312.
- [57] He Pu, Zhao Jiyuan, Yan Jiangtao. Thermal barrier coating thickness measurement method using terahertz wave intensity relationship [J]. *China Measurement & Test*, 2023, 49(10): 1 - 6. (in Chinese)
何普, 赵纪元, 颜江涛. 基于太赫兹波强度关系的热障涂层厚度测量方法 [J]. *中国测试*, 2023, 49(10): 1 - 6.
- [58] Wang Zaoqi, Kong Xiangxing, Yang Bowen. Thickness measurement method of thermal barrier coatings based on terahertz non-destructive testing technology [J]. *Aerospace Power*, 2023, (4): 51 - 54. (in Chinese)
王兆祺, 孔祥兴, 杨博闻. 基于太赫兹无损检测技术的热障涂层厚度测量方法 [J]. *航空动力*, 2023, (4): 51 - 54.
- [59] Yang Dalin. Research on super-resolution reconstruction method of terahertz image of thermal barrier coating debonding defect [D]. Xuzhou: China University of mining and technology, 2023. (in Chinese)
杨大林. 热障涂层脱粘缺陷太赫兹图像超分辨重建方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.