

陶瓷基复合材料的太赫兹无损检测方法

李铁军^{1,2}, 孙跃¹, 邵桂芳^{3*}, 石为人¹, 刘建军⁴, 颜识涵⁵

¹重庆大学自动化学院, 重庆 400044;

²集美大学信息工程学院, 福建 厦门 361021;

³厦门大学自动化系, 福建 厦门 361000;

⁴九江学院电子工程学院, 江西 九江 130061;

⁵中国科学院重庆绿色智能技术研究院太赫兹技术研究中心, 重庆 400714

摘要 提出了一种时频域多模式新光谱成像方法,对内含缺陷的4种陶瓷基复合材料(CMC)样本实现了无损检测,形成了检测样本的太赫兹图像库,并引入5个图像质量的客观综合评价指标,通过指标融合处理选出了质量最佳的太赫兹图像。基于尺度不变特征变换与K均值聚类实现了该图像的检索。实验结果证实,该方法可有效地对CMC不同位置处的不同宽度缺陷进行成像检测。

关键词 成像系统;陶瓷基复合材料;太赫兹透射时域光谱成像技术;无损检测;尺度不变特征变换

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061101

Terahertz Nondestructive Detection Method of Ceramic Matrix Composites

Li Tiejun^{1,2}, Sun Yue¹, Shao Guifang³, Shi Weiren¹, Liu Jianjun⁴, Yan Shihan⁵

¹College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

²College of Information Engineering, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China;

³Department of Automation, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

⁴School of Electronic Engineering, Jiujiang University, Jiujiang, Jiangxi 130061, China;

⁵Research Center of THz Technology, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

Abstract A novel spectral imaging method based on multi-modes in time-frequency domain is proposed. This method is used for the nondestructive detection of four kinds of ceramic matrix composite (CMC) samples with defects. A THz image set for the test samples is formed, and five quantity evaluation indexes for image quality are introduced. The THz images with the best quality are chosen via the index integration treatment. The retrieval of this image is realized based on the Scale Invariant Feature Transform (SIFT) feature selection and K-means clustering algorithm. The experimental results confirm that the proposed method can be effectively used in the imaging detection of the CMC materials with various defect widths at different positions.

Key words imaging systems; ceramic matrix composites; terahertz transmission time-domain spectral imaging technology; nondestructive detection; scale invariant feature transform

OCIS codes 110.6795; 110.4155; 100.2000

收稿日期: 2017-12-01; 收到修改稿日期: 2017-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(61403318)

作者简介: 李铁军(1976—),男,博士研究生,主要从事图像处理与智能优化方面的研究。E-mail: litiejun@jmu.edu.cn

导师简介: 孙跃(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事智能电力电子方面的研究。E-mail: syue06@cqu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: gfshao@xmu.edu.cn

1 引言

太赫兹波是一种频率范围覆盖 0.1~10 THz 的电磁波,该频段介于红外与微波之间。在 20 世纪 80 年代之前,由于缺乏太赫兹波段高效的发射源和灵敏的探测器,该频段的电磁辐射未得到深入研究,因此太赫兹波段曾被称为电磁波谱的“太赫兹空隙”^[1-2]。随着激光科学和材料科学的发展,太赫兹波的产生与探测技术均得到了较快发展。由于其光谱和成像技术可提供传统微波、红外以及 X 射线等技术所不能提供的探测信息,太赫兹技术被广泛应用于生物医学^[3-6]、无损探伤^[7-8]、安全检查^[9-10]及国防安全^[11-12]等领域。太赫兹辐射可以穿透塑料、陶瓷、纤维和泡沫等非极性分子材料,太赫兹无损检测技术备受关注,已逐渐发展为工业电子计算机断层扫描(CT)、超声波与红外热像等传统无损检测技术的重要补充技术之一。

太赫兹检测技术在陶瓷基复合材料(CMC)及其他复合材料的无损检测中得到了广泛应用。Ullmann 等^[13]利用太赫兹反射式探测方法,检测了一种利用高孔隙率氧化物 CMC 所制备的飞行器头锥面板,获得了太赫兹时域图谱;Becker 等^[14]利用太赫兹时域光谱成像技术,研究了预置缺陷的氧化物纤维增强 CMC;李薇等^[15]利用太赫兹时域光谱成像技术,检测了一种内含缺陷的玻璃纤维与碳纤维增强复合材料,获得了材料内部缺陷的太赫兹透射图像;廖晓玲等^[16]采用太赫兹时域光谱技术,对碳纤维和玻璃纤维材料的特性进行了研究;张文涛等^[17]采用太赫兹时域光谱技术结合随机森林预测识别模型,实现了红木的真伪检测;刘影等^[18]采用连续太赫兹波偏振成像方法,实现了太赫波无损检测的快速成像。上述这些方法大多采用太赫兹时域信息成像,成像模式单一,导致图像质量较差。实际上,由于太赫兹无损检测设备功率和功能等的差异,对于很多低功率的检测设备,仅仅采用单一的成像模式,常常无法有效成像。因此,有必要采用调整太赫兹的成像模式并结合后期太赫兹图像处理的方法,提高太赫兹成像质量,以满足 CMC 无损检测的需求。

本文提出了一种基于太赫兹时域和频域光谱信息多模式的成像方法,形成了 CMC 样本的太赫兹无损检测图像库,并引入 5 个图像质量客观综合评价指标,通过指标融合处理,选出了质量较佳的太赫兹图像。最后以该图像为待检索图像,检索太赫兹图像库,从而选出了能够反映样本缺陷及内部特征

的一组代表性太赫兹图像。综合考虑算法的优势和实时性要求,提出了一种基于尺度不变特征变换(SIFT)的特征提取^[19]与 K 均值聚类^[20-21](K 为种类数)相结合的方法,实现了样本代表性太赫兹图像的快速有效检索。

2 实验装置与样本

利用美国 Advanced Photonix 公司(API)的 T-Ray 5000 太赫兹时域光谱成像探测系统进行太赫兹无损检测,对预置缺陷的 4 种常用 CMC 实验样本进行检测。利用多模式信息成像和后期太赫兹图像综合处理方法,获得能够清晰表现每种材料内外状况的太赫兹透射图像,该图像能从多角度准确反映检测样本的缺陷特征。

2.1 实验装置与检测方法

实验采用太赫兹波透射模式的检测方法,T-Ray 5000 太赫兹时域光谱成像探测系统的原理如图 1(a)所示,其中 M 代表反射镜。该系统由钛蓝宝石激光器产生中心波长为 1064 nm、脉宽为 80 fs、重复频率为 100 MHz、输出功率为 20 mW 的飞秒脉冲激光,通过光电导天线(PCA)产生和探测太赫兹脉冲。该系统的有效频率带宽为 0~3.5 THz,频谱分辨率为 12.5 GHz,快速扫描范围为 80 ps,时间分辨率为 0.1 ps,光斑直径为 1.2 cm,光学分辨率小于 0.5 mm。首先,飞秒激光通过偏振分光镜后分为两束,能量较弱的一束作为探测光,该束光经过光学镜头折射和会聚之后,不经过样本直接照射在用于探测的光导天线上;另外能量较强的一束作为抽运光,经光学镜头延时和聚焦后会聚在加有偏电压的 PCA 上,从而产生平均输出功率为 130 nW 的太赫兹脉冲,太赫兹脉冲辐射通过由高阻硅材料制成的半球面透镜发射出来。然后,太赫兹脉冲辐射经过高密度聚乙烯(HDPE)透镜 TX 聚焦在样本表面,探测透镜 RX 会将透过样本之后的太赫兹信号会聚,并照射在探测 PCA 上。最后,由探测光对太赫兹信号进行离散采样,从而获取该信号的时域波形。通过对太赫兹时域信号波形进行离散傅里叶变换,最终可获取样本的透射太赫兹频谱信息。

API T-Ray 5000 系统实物如图 1(b)所示。实验过程中,太赫兹波发射器和接收器镜头固定安装在水平光学导轨上,待测样本放置于可在 XY 轴方向移动的二维扫描平台上,并处于太赫兹脉冲的聚焦位置,通过步进电机的二维扫描实现样本的太赫兹光谱采集和成像。成像扫描时,样本暴露在干

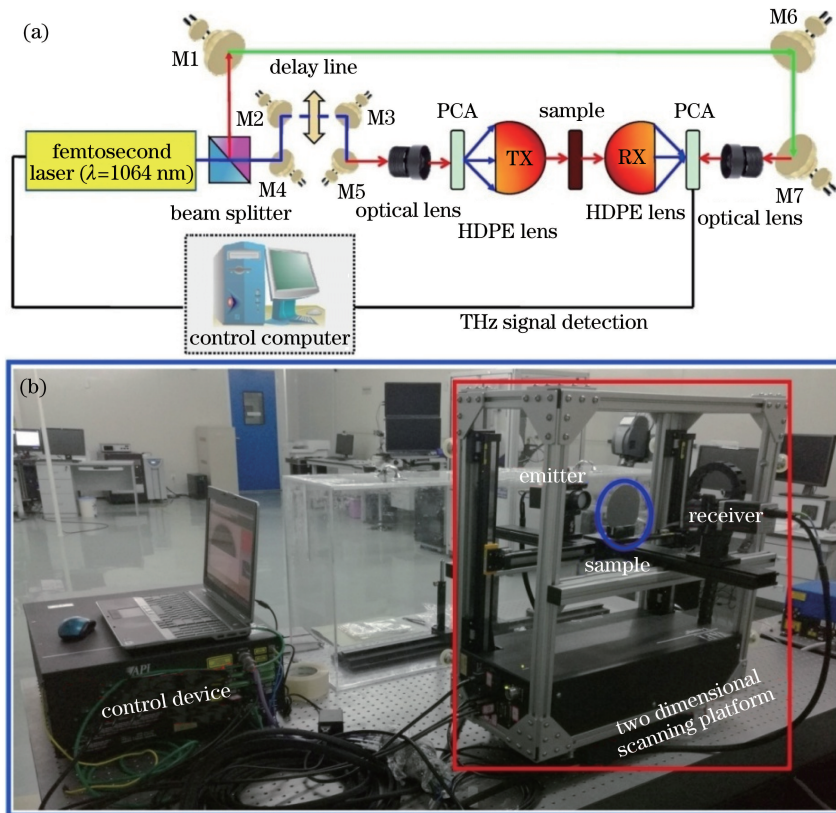


图1 API T-Ray 5000 太赫兹透射时域光谱探测系统。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 1 API T-Ray 5000 THz transmission time domain spectral detection system. (a) Schematic; (b) physical map

燥空气中,二维扫描平台的扫描步长设置为 0.25 mm,横向的线扫描速度为 100 mm/s。

2.2 实验样本

选取 4 种典型的 CMC 作为实验样本,其分别为氧化铝(Al_2O_3)陶瓷片、氮化铝(AlN)陶瓷片、氧化铍(BeO)陶瓷片和氧化锆陶(ZrO_2)陶瓷片。为便于实验比对,每种材料都预置缺陷,缺陷主要包括裂纹和套孔。其中样本的长度、宽度和裂纹缺陷以及套孔的大小均用游标卡尺测量 3 次,取其平均值;样品厚度采用螺旋测微仪在不同位置测量 5 次,取其平均值,精度均保留到 0.1 mm;样品的密度等其他参数直接采用生产商给出的数值。

3 基于多模式成像与 SIFT 特征聚类检索的太赫兹无损检测

T-Ray 5000 系统的二维扫描成像是将每个扫描空间像素点的频域能量谱密度之和作为成像参数,这种由系统单一信息直接生成的太赫兹图像无法完全体现样本边缘和内部缺陷信息,图像模糊,质量较差。为此,提出一种基于多模式成像与 SIFT 特征聚类检索的太赫兹无损检测方法。首先引入时

域与频域多种成像模式,包括时域信号电场强度的峰峰值成像、最大最小值成像及均值成像,频域的不同频率点能量谱密度值成像等,从而生成样本的一系列太赫兹图像,形成图像库;然后采用 5 个客观图像质量评价指标进行融合处理,选出质量较佳的图像;最后针对较佳图像采用 SIFT 特征点提取,并结合 K 均值进行特征聚类检索,从图像库中选择出一组太赫兹图像,该方法的流程示意图如图 2 所示。

3.1 多模式成像

为避免 API T-Ray 5000 系统自带图像软件的单一成像模式造成样本有效信息的丢失,首先引入了时域信息间接成像,把样本经二维平台成像扫描所获取的每个空间像素点的时域电场强度信号(如峰峰值、最大值、最小值)和相位等时域信息作为成像参数;其次引入频域间接成像模式,通过对每一空间像素点的时域信号波形进行离散傅里叶变换,获得该像素点对应的频域谱,再按频域的采样间隔将每一采样频率点所对应的能量谱密度值作为成像参数。采用这两种间接的成像模式,可以获取大量的太赫兹图像数据,从而形成样本的太赫兹无损检测图像库。接下来关键的问题是从图像库中选取能够体

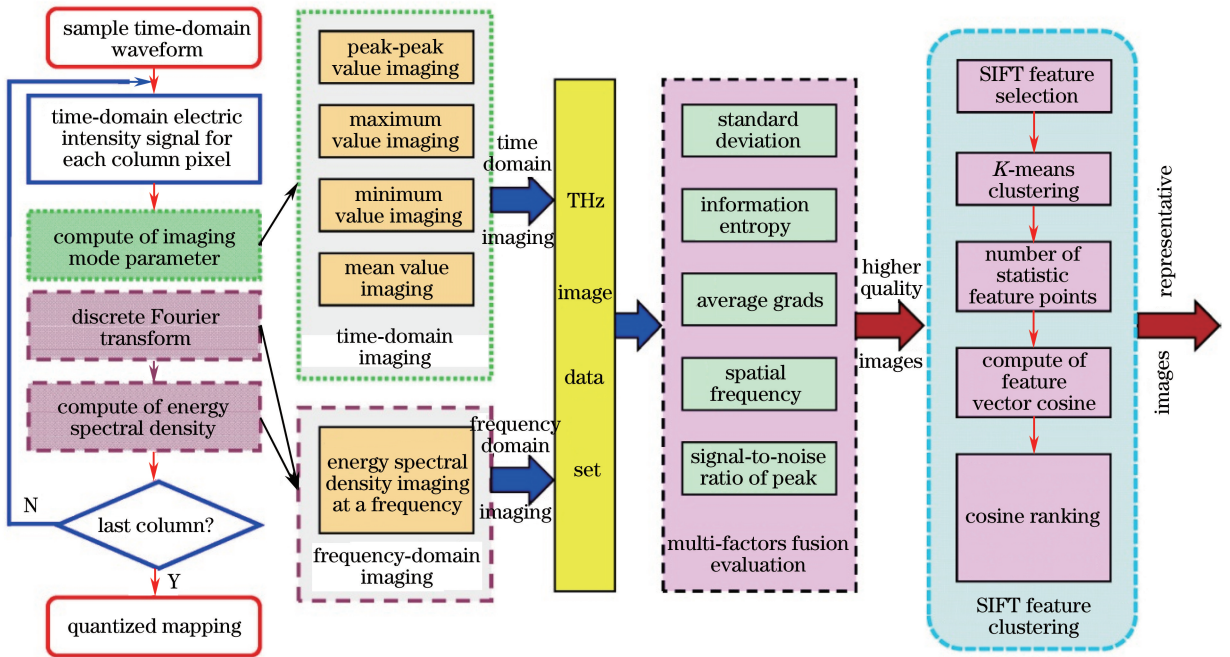


图2 基于多模式成像与 SIFT 特征聚类的太赫兹无损检测方法流程示意图

Fig. 2 Flow chart of THz nondestructive detection method based on multi-modes imaging and SIFT feature clustering

现样本边缘和内部缺陷信息的代表性太赫兹图像。

3.2 基于多评价指标融合的图像选取

为从大量的太赫兹图像数据中挑选出质量较佳(或最佳)的图像,引入了数字图像的客观质量评价方法,选取标准差(SD)、信息熵(H)、平均梯度(AG)、空间频率(SF)和峰值信噪比(PSNR)5个不同的评价参数^[22-24]。

由于信息熵和平均梯度这两个参数反映了样本内部缺陷细节的关键信息,因此将这两个指标作为权重最大的指标,通过遍历计算图像库中所有的太赫兹图像的客观评价指标,选取出该样本的较佳太赫兹图像。

3.3 基于 SIFT 特征聚类的图像检索

利用基于客观图像评价指标的融合处理,可以得到一幅质量较佳的太赫兹图像。但是能够体现样本缺陷特征的往往是一类图像,因此有必要采用图像检索的方法,得到一组样本的代表性图像。

为快速准确地检索出一组相似的太赫兹图像,根据 SIFT 算法的优势,兼顾实时性的要求,采用基于 SIFT 特征点提取和 K 均值聚类相结合的图像相似度匹配检索方法。首先,提取所有图像的特征点;然后,采用 K 均值聚类通过迭代不断调整聚类中心,最终将数据集中的个体划分为 K 类,使得所有个体到其所属类的类中心的欧氏距离之和最小;最后,利用向量空间余弦相似度度量图像差异。

图像匹配检索方法的具体过程如下。

- 1) 图像预处理,将经过客观图像质量评价所获得的质量较佳图像作为待检索图像;
- 2) 根据典型的 SIFT 特征点提取算法,提取待检索图像和图像库中所有图像的 SIFT 特征点;
- 3) 采用 K 均值聚类的方法,根据 SIFT 特征点的个数,选择聚类的数目 K,随机生成 K 个初始聚类中心;
- 4) 根据生成的初始聚类中心对所有的 SIFT 特征点进行聚类;
- 5) 统计待检索图像和图像库中每张图像在每个聚类中的特征点个数,每张图像对应一个 K 维的特征向量;
- 6) 根据余弦相似定理,计算待检索图像的特征向量与图像库中所有图像特征向量之间夹角的余弦值,根据夹角余弦值的大小进行排序,依次选出 8 幅余弦值最大的图像,作为匹配度最高的图像。

4 实验结果与讨论

4.1 太赫兹透射谱分析

在密闭的亚克力容器中,充入 0.2 MPa 的氮气,当相对湿度(RH)降至 4% 以下时,记录背景和样本不同位置处的透射时域波形,重复 6 次取实验电场强度的平均值,得到样本的透射时域谱,如图 3(a)所示。对样本透射时域谱进行离散傅里叶

变换(采样频率点的间隔为 0.003125 THz),得到的样本透射频域谱如图 3(b)所示。

从图 3 可以看出,太赫兹脉冲均能有效穿透 4 种样本,样本的时域谱线出现在背景参考谱线的后方,透射后电场强度的幅值均有一定程度的衰减,其中氧化锆样本的衰减最大,氧化铝次之,氮化铝和氧

化铍样本的衰减较小,其峰值大小几乎相等。由图 3(b)的透射频域谱可知,系统的有效频率带宽为 0.2~3.5 THz(如背景频谱线的灰色区域所示),氧化锆样本的截止频率约为 0.5 THz,氧化铝样本的截止频率约为 1.5 THz,氮化铝和氧化铍样本的截止频率约为 2 THz。

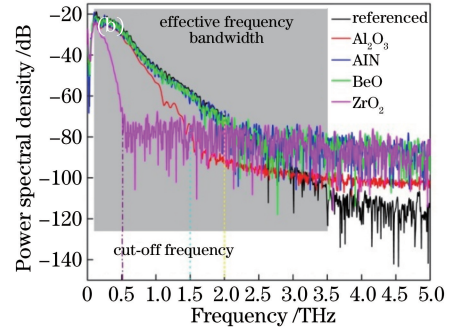
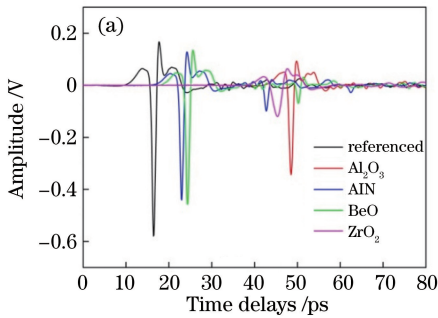


图 3 样本的透射谱。(a)时域谱;(b)频域谱

Fig. 3 Transmission spectra of samples. (a) Time domain; (b) frequency domain

4.2 多成像模式对比及图像质量评价

实验中,样本表面有预置缺陷的一面朝向接收端的太赫兹透镜,分别对每种样本进行成像扫描。利用时域和频域多种成像模式的成像处理,获得了样本的无损检测太赫兹图像库,并通过多评价指标

对库中的太赫兹图像进行图像质量评价。图 4~7 所示分别为氧化铝、氮化铝、氧化铍和氧化锆陶瓷片在三种成像模式(时域峰峰值、时域均值、频域能量值)下定量的实验结果。

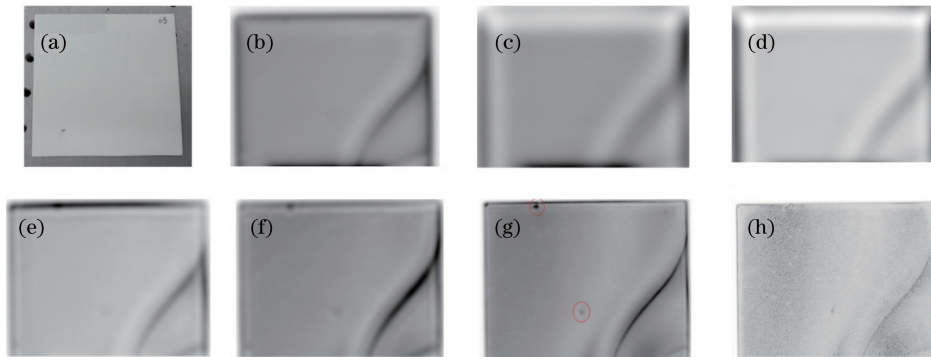


图 4 氧化铝样本在多种成像模式下成像结果对比。(a)光学图像;(b) API 系统成像;

(c)峰峰值成像;(d)均值成像;(e) 0.20 THz 成像;(f) 0.34 THz 成像;(g) 0.76 THz 成像;(h) 1.30 THz 成像

Fig. 4 Comparison among THz imaging results of Al_2O_3 sample under various imaging modes.

(a) Optical images; (b) imaging from API system; (c) peak-peak value imaging; (d) average value imaging;

(e) 0.20 THz imaging; (f) 0.34 THz imaging; (g) 0.76 THz imaging; (h) 1.30 THz imaging

从实验结果可以明显看出,采用时域电场强度峰峰值和均值信息间接成像的模式时,太赫兹图像的质量较差;而系统软件直接成像的图像效果优于时域信息成像的;频域不同频率对应的能量值成像模式,其图像效果总体优于前两种成像方式的。特别是在对比不同频率下太赫兹透射能量成像的效果之后,得到以下结论。1)4 种样本在低频段的太赫兹图像分辨率较低,这主要是由于该频段所对应的

太赫兹波波波长较长,图像分辨率受到了衍射极限约束的影响;2)在中频段范围内,样本内部缺陷的表达较为明显;3)在高频波段,太赫兹波的能量逐渐降低,穿透样本的能力下降,因此高频波段太赫兹图像虽然有较高的分辨率,但信噪比明显降低,图像的噪声较大,特别是氧化锆样本在太赫兹频率为 0.5 THz 以上时,其图像的有用信息逐渐被淹没,无法有效辨别内部缺陷信息。

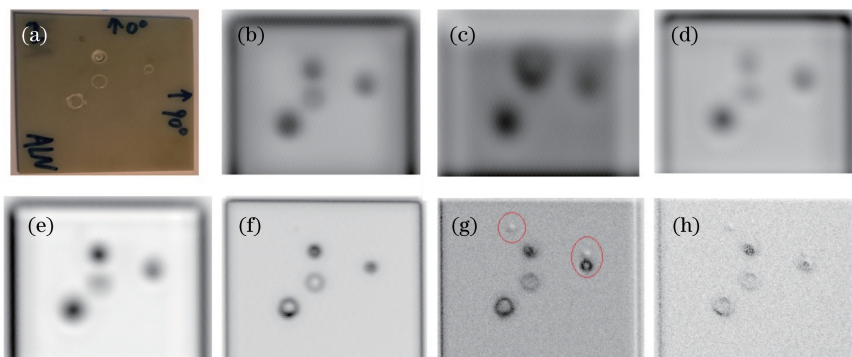


图5 氮化铝样本在多种成像模式下的成像结果对比。(a)光学图像;(b) API系统成像;(c)峰峰值成像;(d)均值成像;(e) 0.36 THz 成像;(f) 0.83 THz 成像;(g) 1.48 THz 成像;(h) 1.80 THz 成像

Fig. 5 Comparison among THz imaging results of AlN sample under various imaging modes.

(a) Optical images; (b) imaging from API system; (c) peak-peak value imaging; (d) average value imaging; (e) 0.36 THz imaging; (f) 0.83 THz imaging; (g) 1.48 THz imaging; (h) 1.80 THz imaging

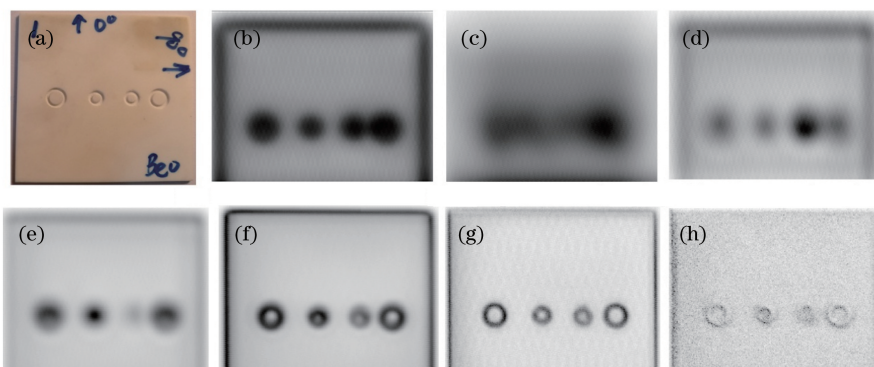


图6 氧化铍样本在多种成像模式下的成像结果对比。(a)光学图像;(b) API系统成像;(c)峰峰值成像;(d)均值成像;(e) 0.36 THz 成像;(f) 0.67 THz 成像;(g) 1.48 THz 成像;(h) 1.82 THz 成像

Fig. 6 Comparison among THz imaging results of BeO sample under various imaging modes.

(a) Optical images; (b) imaging from API system; (c) peak-peak value imaging; (d) average value imaging; (e) 0.36 THz imaging; (f) 0.67 THz imaging; (g) 1.48 THz imaging; (h) 1.82 THz imaging

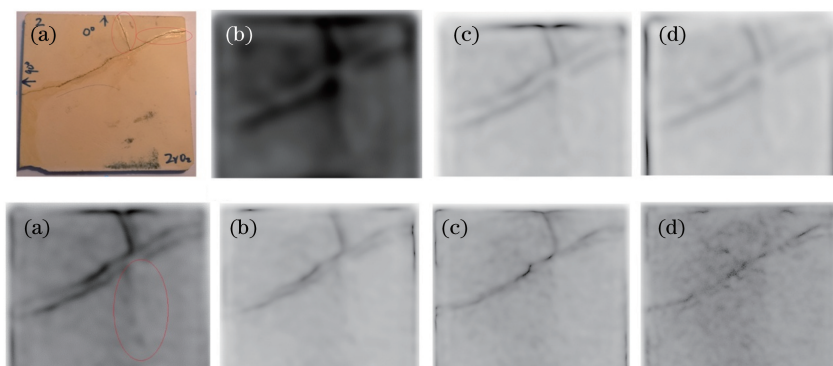


图7 氧化锆样本在多种成像模式下的成像结果对比。(a)光学图像;(b) API系统成像;(c)峰峰值成像;(d)均值成像;(e) 0.24 THz 成像;(f) 0.29 THz 成像;(g) 0.37 THz 成像;(h) 0.46 THz 成像

Fig. 7 Comparison among THz imaging results of ZrO_2 sample under various imaging modes.

(a) Optical images; (b) imaging from API system; (c) peak-peak value imaging; (d) average value imaging; (e) 0.24 THz imaging; (f) 0.29 THz imaging; (g) 0.37 THz imaging; (h) 0.46 THz imaging

此外,为了进一步验证上述结论并提取较佳图像,利用引入的5个评价指标分别评价获取的图像库数据,部分客观评价结果见表1。

表1 图像质量的客观评价指标对比

Table 1 Comparison among objective evaluation indexes for image quality

Sample	SD	H	AG	SF	PSNR /dB
Al ₂ O ₃ (0.76 THz imaging)	27.3029	6.3136	3.1963	6.7835	17.7804
AlN(1.48 THz imaging)	30.5493	6.2903	9.6805	17.0891	10.8352
BeO(1.48 THz imaging)	27.4678	6.4980	8.3973	14.5815	9.8233
ZrO ₂ (0.24 THz imaging)	57.2762	6.5141	1.3461	2.7334	7.5815

轮廓和内部边缘缺陷清晰度较高,细节体现完整,内部隐含的微小气泡缺陷也得到了清晰的体现(圆圈处标示),因此可将该幅太赫兹图像作为氧化铝样本的较佳无损检测图像。氮化铝和与氧化铍样本的透射谱线非常接近(如图3所示),因此在成像评价指标上也表现了一定的相似性,这两个样本在1.48 THz成像时获得了综合评价指标最好的结果,图像峰值信噪比居中,平均梯度、空间频率和信息熵的值在同类指标中处于较高的水平,从图5(g)和图6(g)中可以看到套孔缺陷的内外边缘细节清晰,锐度较大,尤其是在图5(g)中,可以清楚看到其他同类图像上表现不明显的气泡缺陷(圆圈处标示),因此可将这两幅图作为对应样本的较佳太赫兹无损检测图像。氧化锆样本在0.24 THz成像时图像的峰值信噪比最大,同时其他评价指标也较大,综合评价指标最好,从图7(e)可以清楚看到样本粘合的裂

从表1的客观评价指标来看,氧化铝样本在0.76 THz成像时综合评价指标最好,峰值信噪比保持了较高的水平,同时从图4(g)中可以看到图像的

纹缺陷,对比样本的光学图像,可见用 α -氰基丙烯酸乙酯粘合的痕迹与太赫兹图像上表现的缺陷宽度基本吻合,同时样本内部的裂纹缺陷也得到了体现(圆圈处标示),因此可将该幅太赫兹图像作为氧化锆样本的较佳无损检测图像。

4.3 基于SIFT特征聚类的代表性图像匹配检索

利用基于SIFT特征点提取算法和K均值聚类相结合的图像相似度匹配检索方法,并将通过质量评价指标融合处理获取的较佳图像作为待检索图像,设定SIFT特征点提取的高斯尺度值为0.5,K均值聚类数目 $K=500$ 。对每种样本在频域成像模式下产生的1000幅太赫兹图像进行匹配检索,最后得出8幅特征向量间夹角余弦值最大的太赫兹图像,这组图像可以有效代表该种样本的太赫兹无损检测图像,如图8~11所示,其中图像按特征向量间夹角的余弦值从大到小排列。

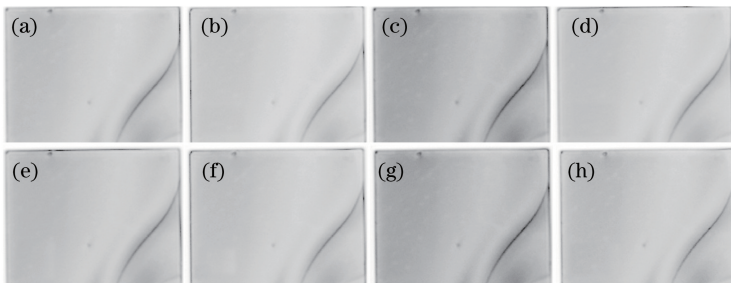


图8 不同频率下氧化铝样本的代表性图像。(a) 0.86562 THz;(b) 0.88125 THz;

(c) 0.91562 THz;(d) 0.85 THz;(e) 0.85312 THz;(f) 0.91875 THz;(g) 0.88437 THz;(h) 0.96875 THz

Fig. 8 Representative THz images of Al₂O₃ sample at different frequencies. (a) 0.86562 THz; (b) 0.88125 THz;

(c) 0.91562 THz; (d) 0.85 THz; (e) 0.85312 THz; (f) 0.91875 THz; (g) 0.88437 THz; (h) 0.96875 THz

图像检索结果表明,该方法能有效检索出一组代表性太赫兹图像。不同代表性图像间除灰度略有差别外,其他图像细节表现具有一致性。

为进一步证明代表性图像选取的正确性,计算4种样本数据库中图像的相似度特征向量夹角余弦值,结果如图12所示。其中,余弦值越接近1,表明向量夹角越接近0°,即检索的图像与待测图像越相

似,这里取余弦值从0到1,余弦值为负的均按0来处理。

从图12可以看出,氧化铝的代表性图像主要分布在0.7~1.0 THz这个频段的成像上,氮化铝主要分布在1.4~1.7 THz,氧化铍主要分布在1.1~1.5 THz,氧化锆主要分布在0.2~0.5 THz。因此,在对这4种样本的太赫兹无损检测成像处理过程

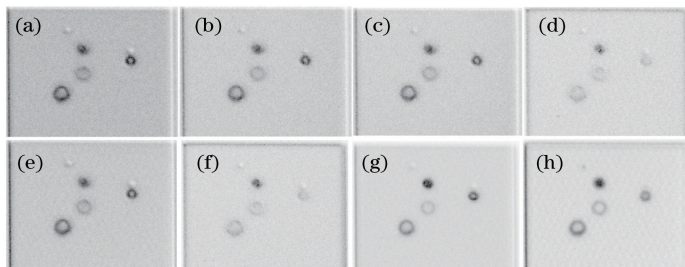


图9 不同频率下氮化铝样本代表性图像。(a) 1.4844 THz;(b) 1.4969 THz;

(c) 1.5 THz;(d) 1.5937 THz;(e) 1.4781 THz;(f) 1.5906 THz;(g) 1.3375 THz;(h) 1.1687 THz

Fig. 9 Representative THz images of AlN sample at different frequencies. (a) 1.4844 THz; (b) 1.4969 THz;

(c) 1.5 THz; (d) 1.5937 THz; (e) 1.4781 THz; (f) 1.5906 THz; (g) 1.3375 THz; (h) 1.1687 THz

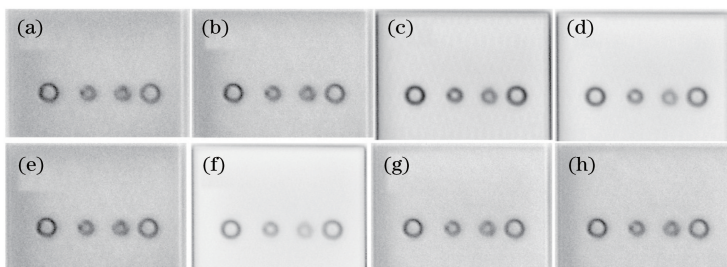


图10 不同频率下氧化铍样本代表性图像。(a) 1.4781 THz;(b) 1.4719 THz;

(c) 1.1969 THz;(d) 1.1937 THz;(e) 1.475 THz;(f) 1.1875 THz;(g) 1.4656 THz;(h) 1.4687 THz

Fig. 10 Representative THz images of BeO sample at different frequencies. (a) 1.4781 THz; (b) 1.4719 THz;

(c) 1.1969 THz; (d) 1.1937 THz; (e) 1.475 THz; (f) 1.1875 THz; (g) 1.4656 THz; (h) 1.4687 THz

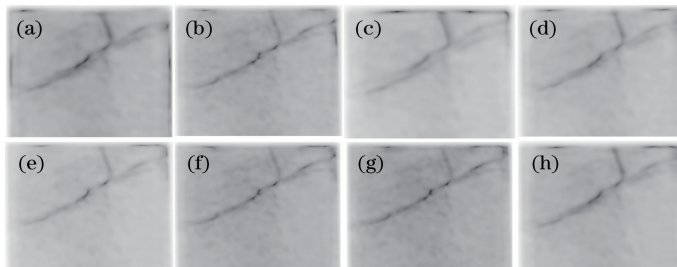


图11 不同频率下氧化锆样本代表性图像。(a) 0.31562 THz;(b) 0.38437 THz;

(c) 0.2625 THz;(d) 0.32187 THz;(e) 0.35625 THz;(f) 0.3875 THz;(g) 0.39062 THz;(h) 0.325 THz

Fig. 11 Representative THz images of ZrO_2 sample at different frequencies. (a) 0.31562 THz; (b) 0.38437 THz;

(c) 0.2625 THz; (d) 0.32187 THz; (e) 0.35625 THz; (f) 0.3875 THz; (g) 0.39062 THz; (h) 0.325 THz

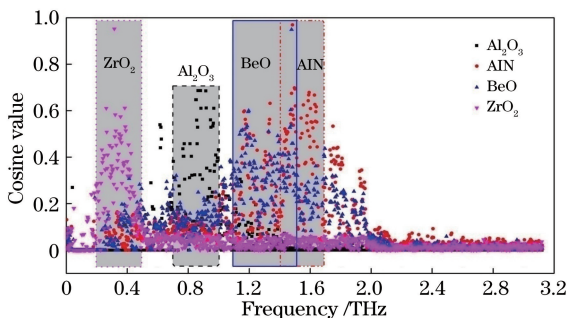


图12 四种样本图像的相似度余弦值分布

Fig. 12 Similarity cosine value distributions of images for four kinds of samples

中,所提方法可以针对样本相应的特定频段调整成像参数,并快速检索出代表性太赫兹图像,进而提高太赫兹无损检测的效率。

5 结 论

应用太赫兹时域光谱检测成像技术,获取了4种CMC样本的每一空间像素点的透射时域谱数据。通过时域和频域多种成像模式,构建了相应样本的太赫兹图像库,并引入了5个图像质量评价指标,通过融合处理获得了一幅质量较佳的图像。基于SIFT特征聚类实现了一组代表性太赫兹图像的

检索,从而满足了每种样本的太赫兹无损检测需求。实验结果表明,该处理方案可有效完成对 CMC 内部(包括气泡、裂纹和孔洞)及表面不同深度和宽度的凹陷、裂痕等缺陷特征的成像检测。所采用的成像模式、图像质量评价和图像相似度匹配检索方法具有一般性,可以指导其他非极性分子复合材料的太赫兹无损检测,并为发展准确、灵敏、高效的 CMC 太赫兹无损检测技术提供了基础实验数据。下一步工作将着重研究太赫兹光谱信号与图像处理的新方法,以进一步提高太赫兹图像的空间分辨率,发展更加准确、灵敏、高效的太赫兹无损检测技术。

参 考 文 献

- [1] Sirtori C. Bridge for the terahertz gap[J]. *Nature*, 2002, 417(6885): 132-133.
- [2] Won R. Bridging the terahertz gap[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(10): 673-674.
- [3] May R K, Evans M J, Zhong S, *et al.* Terahertz in-line sensor for direct coating thickness measurement of individual tablets during film coating in real-time[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2011, 100(4): 1535-1544.
- [4] Yu C, Fan S, Sun Y, *et al.* The potential of terahertz imaging for cancer diagnosis: a review of investigations to date[J]. *Quantitative Imaging in Medicine & Surgery*, 2012, 2(1): 33-45.
- [5] Wang W A, Liu W, Yang X, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy of anhydrous glucose[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1111001. 王文爱, 刘维, 杨茜, 等. 无水葡萄糖的太赫兹时域光谱特性[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1111001.
- [6] Pan Y T, Lü J H. Terahertz spectroscopy of the interfacial water in phospholipid membranes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 043001. 潘亚涛, 吕军鸿. 基于太赫兹光谱技术的生物膜界面水研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 043001.
- [7] Duling I, Zimdars D. Terahertz imaging: revealing hidden defects[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(11): 630-632.
- [8] Jackson J B, Labaune J, Bailleul-Lesuer R, *et al.* Terahertz pulse imaging in archaeology[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2015, 8(1): 81-92.
- [9] Qiao Y L, Zhao Y M, Zhang C L, *et al.* Terahertz/visible dual-band image registration based on hybrid powell algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211005. 乔玉龙, 赵源萌, 张存林, 等. 基于混合 Powell 法的太赫兹/可见光双波段图像配准[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0211005.
- [10] Du Y, Zhang W B, Xiao L. Application of terahertz wave technology in explosive analysis[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2011, 9(3): 287-290. 杜宇, 张伟斌, 肖丽. 太赫兹检测技术在炸药检测中的应用[J]. *信息与电子工程*, 2011, 9(3): 287-290.
- [11] Liang D C, Wei M G, Gu J Q, *et al.* Broad-band time domain terahertz radar cross-section research in scale models[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 214102. 梁达川, 魏明贵, 谷建强, 等. 缩比模型的宽频域太赫兹雷达散射截面(RCS)研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(21): 214102.
- [12] Qi Z M. Study of application of THz wave in military field[J]. *Infrared*, 2008, 29(12): 1-4. 戚祖敏. 太赫兹波在军事领域中的应用研究[J]. *红外*, 2008, 29(12): 1-4.
- [13] Ullmann T, Yuan S, Rahner N, *et al.* Quality assurance for the manufacturing of oxide fiber reinforced ceramic composites for aerospace applications[C]. *International Symposium on NDT in Aerospace*, 2012: We.2.B.1.
- [14] Becker S, Ullmann T, Busse G. 3D terahertz imaging of hidden defects in oxide fiber reinforced ceramic composites[C]. *International Symposium on NDT in Aerospace*, 2012: Th.4.A.2.
- [15] Li W, Shi C C, Zhang J, *et al.* Nondestructive evaluation of fiber reinforced plastic using terahertz imaging[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(3): 396-400. 李薇, 施长城, 张瑾, 等. 纤维增强复合材料太赫兹成像无损检测[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(3): 396-400.
- [16] Liao X L, Liu Y L, Liu X H, *et al.* Experimental analysis of fiber material property based on terahertz wave[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 100607. 廖晓玲, 刘延雷, 刘晓华, 等. 基于太赫兹波的纤维材料特性实验分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 100607.
- [17] Zhang W T, Wang S Y, Zhan P P, *et al.* Method of identifying red wood based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 061101-9

0230006.
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.
- [18] Liu Y, Zhao G Z, Shen Y C. Polarization imaging detection based on the continuous terahertz wave[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0111001.
刘影, 赵国忠, 申彦春. 连续太赫兹波偏振成像检测[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0111001.
- [19] Lee H Y, Kim H S, Lee H S. Robust image watermarking using local invariant features[J]. Optical Engineering, 2006, 43(3): 037002.
- [20] Kanungo T, Mount D M, Netanyahu N S, *et al.* An efficient k -means clustering algorithm: Analysis and implementation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 881-892.
- [21] Bai T Z, Hou X B. An improved image matching algorithm based on SIFT[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(6): 622-627.
白廷柱, 侯喜报. 基于 SIFT 算子的图像匹配算法研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(6): 622-627.
- [22] Yu Z, Wu H R, Winkler S, *et al.* Vision-model-based impairment metric to evaluate blocking artifact in digital video[J]. Proceeding of the IEEE, 2002, 90(1): 154-169.
- [23] Nill N B, Bouzas B H. Objective image quality measure derived from digital image power spectra[J]. IEEE Signal Processing Letter, 2002, 9(3): 388-392.
- [24] Gao C. Research of image fusion evaluation method[J]. Electronic Test, 2011(7): 30-33.
高超. 图像融合评价方法的研究[J]. 电子测试, 2011, (7): 30-33.