

耐高温材料胶接缺陷 THz 多特征参数成像研究

熊伟华^{1,2}, 李丽娟^{1,2*}, 任姣姣^{1,2}, 顾健^{1,2}, 张丹丹^{1,2}

¹ 长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学光电工程学院光电工程国家级实验教学示范中心, 吉林 长春 130022

摘要 传统的太赫兹时域光谱成像通过寻找成像目标的单一特征参数来进行成像, 这种方法有很大的局限性, 无法灵活对比各种特征参数成像的优劣, 很难对成像目标形成明显的对比。为此, 针对耐高温复合材料胶接缺陷的太赫兹无损检测, 提出一种新的图像增强方式——多特征参数成像, 该方法可以通过改变单一特征参数在成像通道的权重, 改善整体的成像效果。基于多特征参数成像方法, 实现了耐高温复合材料上胶层 0.05 mm 厚度, 下胶层 0.15 mm 厚度预置脱粘缺陷识别, 相比于单特征参数成像方法, 图像对比度提高了 2 倍。

关键词 成像系统; 太赫兹; 多特征参数; 时域光谱; 图像对比度

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1711001

THz Multi-Feature Parameter Imaging of Bonding Defects of High Temperature Composite Materials

Xiong Weihua^{1,2}, Li Lijuan^{1,2*}, Ren Jiaojiao^{1,2}, Gu Jian^{1,2}, Zhang Dandan^{1,2}

¹ Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

Changchun, Jilin 130022, China;

² National Demonstration Center for Experimental Opto-Electronic Engineering Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Traditional terahertz time-domain spectral imaging is performed by finding a single characteristic parameter of the imaging target. This method has great limitations, it cannot flexibly compare the advantages and disadvantages of imaging with various characteristic parameters, and it is difficult to form a clear contrast to imaging target. This paper proposes a new imaging method, multi-feature parameter imaging, for terahertz non-destructive detection of high temperature composite material bonding defects. This method can improve the overall imaging effect by changing the weight of a single characteristic parameter in the imaging channel. Based on the multi-feature parameter imaging method, the thickness of the upper adhesive layer of 0.05 mm and the lower adhesive layer of 0.15 mm are preset for debonding defect recognition. Compared with the single-feature parameter imaging method, the image contrast is increased by 2 times.

Key words imaging systems; terahertz; multi-feature parameters; time domain spectroscopy; image contrast

OCIS codes 110.6795; 300.6495; 120.4290; 350.5730

1 引 言

耐高温复合材料属于低热传导性、低密度、多层结构、多孔的非极性材料, 具有耐高温、耐腐蚀、抗氧化等优点, 由于耐高温材料具有这些独特的物理性质, 传统的无损检测方法, 如超声无损检测、红外无损检测、磁粉无损检测等无法对该种材

料进行有效的内部探伤^[1]。太赫兹时域光谱 (THz-TDS)^[2-4] 技术是近些年来迅猛发展起来的一种全新光谱测量技术, 通过宽频带的太赫兹脉冲发射和接收前后的振幅变化及其飞行时间等参量来携带太赫兹波飞行路径上的介质信息, 从而定性定量地对样品进行内部探伤^[5]。用 THz 波对耐高温复合材料进行无损检测在国内发展迅速,

收稿日期: 2020-04-03; 修回日期: 2020-05-07; 录用日期: 2020-06-02

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(201506230147C)、长春理工大学青年创新基金项目(XJLJG-2018-03)

* E-mail: custjuan@126.com

首都师范大学利用 0.2~0.38 THz 的连续太赫兹无损检测系统对耐高温航天泡沫的粘接层人为预置缺陷进行了无损检测^[6]。THz-TDS 技术的应用非常广泛,不仅应用在耐高温复合材料的无损检测方面^[7],还在涂层、陶瓷材料等非极性材料的检测中应用广泛^[8-9]。

传统太赫兹时域光谱成像方式多是用目标的单一特征参数进行成像,在切换特征参数成像方式上较为繁琐,一定程度上会影响实验者的判断。本文针对耐高温复合材料胶接缺陷检测提出多特征参数成像方法,通过改变每种单一特征参数所占的权重占比,来改善多特征参数成像效果,并对单一特征参数成像和多特征参数成像进行成像效果对比。

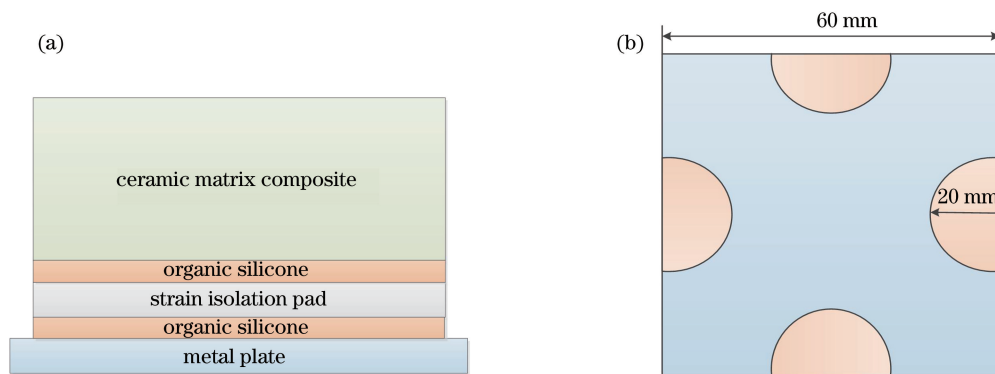


图 1 耐高温复合材料样品结构示意图。(a)耐高温复合材料结构;(b)耐高温复合材料上、下层缺陷

Fig. 1 Schematic diagram of sample structure of high temperature composite material. (a) High temperature composite material structure; (b) upper and lower layer defects of high temperature composite material

2.2 太赫兹时域光谱系统

实验中采用如图 2 所示的反射式太赫兹时域光谱系统对样品进行检测,其中激光器为锁模钛蓝宝石飞秒激光器,产生的激光脉冲中心波长为 810 nm,脉宽为 100 fs,输出功率为 20 mW,飞秒激光器作为泵浦和探测光源,其发射的飞秒激光脉冲经分束镜分为两束,透射较强的部分作为泵浦光经过斩波器调制后入射到光导天线上,由光导天线产生 THz 脉冲,产生的 THz 辐射在样品处光斑大小约为 1 mm。最后,经光电导取样测量获得 THz 时域光谱信息。该 THz-TDS 系统的探测频谱宽度为 0.2~2.5 THz,频谱分辨率为 3.1 GHz,信噪比大于 70 dB,快速扫描范围为 320 ps,时间分辨率为 0.1 ps。

3 多特征参数成像模型

当 THz 波从一种介质进入另一种介质时,在其界面处便会发生反射及折射。图 3 所示为一个典型

2 样品制备及检测

2.1 样品制备

图 1 为制作的耐高温复合材料结构图,从上到下依次是耐高温复合材料 40 mm、有机硅上胶层、缓冲垫 4 mm、有机硅胶下胶层、金属板。耐高温复合材料和缓冲垫以及金属板之间都是通过有机硅胶进行胶接,在耐高温材料和缓冲垫与缓冲垫和金属板粘接的有机硅胶层预置缺陷。如图 1(b)所示,上层选用硬质聚四氟乙烯薄片厚度为 0.05 mm,下层选用硬质聚四氟乙烯薄片厚度为 0.15 mm,四侧的预置缺陷都是半径为 20 mm 的半圆形硬质聚四氟乙烯薄片,以直径为边埋入下胶层内。

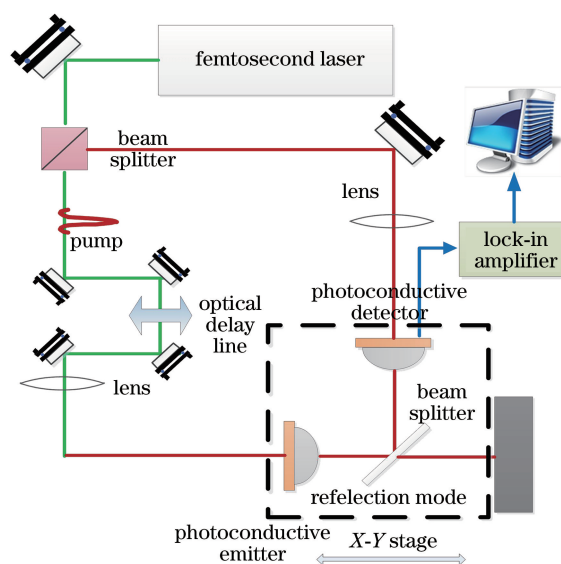


图 2 反射式太赫兹原理图

Fig. 2 Schematic of reflective terahertz

结构的反射式 THz 时域波形,太赫兹波从发射端进入样件内部,反射回来被太赫兹接收器接收,接收到

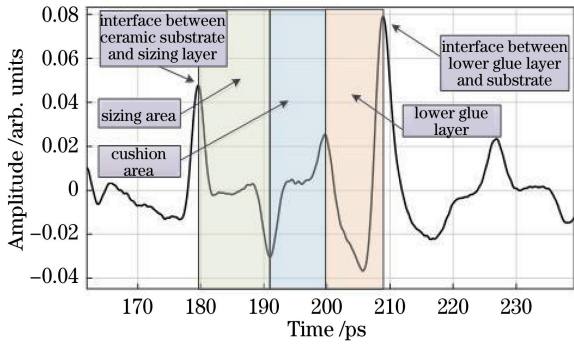


图 3 耐高温复合材料样品介绍图

Fig. 3 Introduction of high temperature composite material samples

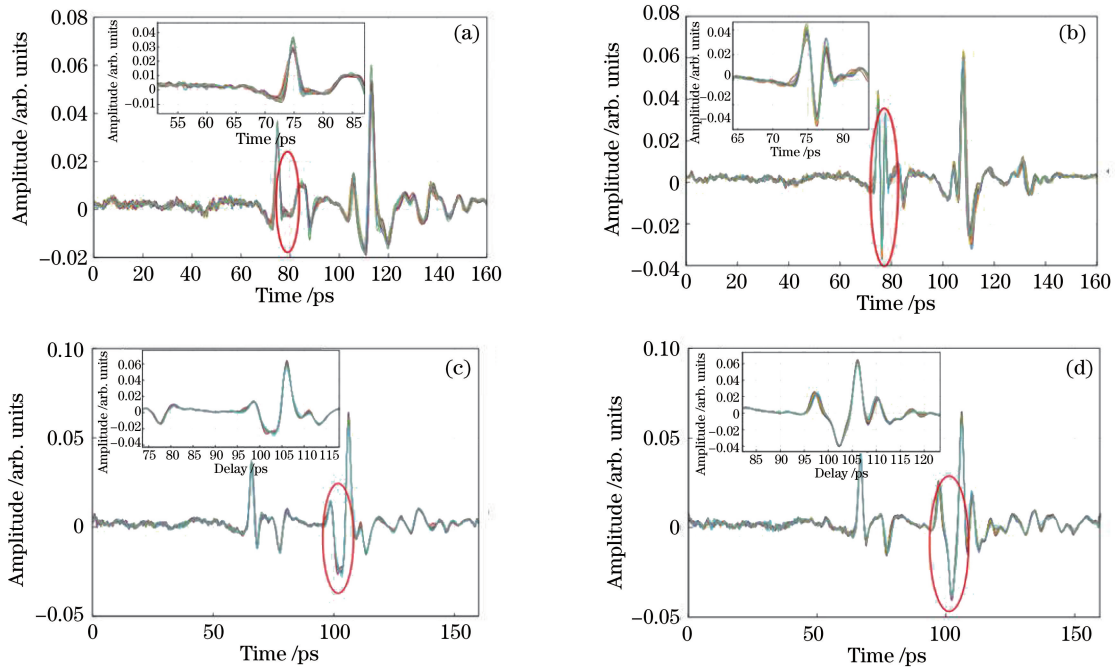


图 4 耐高温复合材料不同部位的特征提取的 THz 时域波形。(a)上胶层正常粘接区域;(b)上胶层缺陷粘接区域;(c)下胶层正常粘接区域;(d)下胶层脱粘区域

Fig. 4 THz time-domain waveform of feature extraction from different parts of high temperature composite material. (a) Normal bonding area of upper layer; (b) defect bonding area of upper layer; (c) normal bonding area of lower layer; (d) debonding area of lower layer

本文首先对下层脱粘特征信号的幅值及飞行时间进行提取,提取之前先获取由耐高温复合材料下表面反射信号所对应的飞行时间 T_{HRC} 及幅值 V_{HRC} ,分别表示为

$$[V_{HRC}, T_{HRC}] = \max [E(t)], t \in [T_1, T_2], (1)$$

式中: $E(t)$ 为太赫兹信号脉冲; T_1 、 T_2 为下表面反射信号所对应的时间。

从实际检测信号的角度出发,在提取 $[V_{HRC}, T_{HRC}]$ 时,需要限定其时间窗口 $t \in [T_1, T_2]$,一方面是由于样品与 THz 发射器之间的倾斜度影响,即

的太赫兹波形中包含了样品的大部分信息,对应着太赫兹波形中的各种特征参数,利用这些特征参数成像可以表征样品内部缺陷信息,并对样品内部缺陷进行分析。

3.1 特征提取

图 4 所示为耐高温复合材料不同部位的特征提取的 THz 时域波形,图 4(a)为胶层正常粘接区域的 THz 时域波形,图 4(b)为上胶层脱粘区域的 THz 时域波形,图 4(c)下胶层正常粘接区域的 THz 时域波形,图 4(d)为下胶层脱粘区域的 THz 时域波形。这两处时域波形均为反卷积滤波后的时域波形。图中信号的主要差异体现在图中红色椭圆圈出部位。

材料下表面距离 THz 发射器的位置变化对飞行时间差的影响,另一方面是由于材料自身厚度不均匀造成的飞行时间差变化的影响。

完成对耐高温复合材料下表面反射信号所对应的飞行时间及幅值的提取后,设置一定的时间阈值 Δt_1 、 Δt_2 ,获得下层脱粘特征信号的幅值及对应的飞行时间,分别表示为

$$[V_{\text{under-debond}}, T_{\text{under-debond}}] = \text{findpeak}[E(t), W_{\text{under-debond}}], t \in [T_{HRC} + \Delta t_1, T_{HRC} + \Delta t_2], (2)$$

$$W_{\text{under-debond}} = \mu \frac{V_{\text{under-debond}}}{V_{\text{HRC}}}, \mu \in (0, 1), \quad (3)$$

式中： μ 为相对幅值系数。

3.2 多特征参数成像建模

1) 多特征参数图像构建

$$T = \{C_{ij} = (C_{\text{PR}}, C_{\text{PG}}, C_{\text{PB}}) \mid 0 \leq i \leq M, 0 \leq j \leq N\}, \quad (4)$$

$$C_{\text{PR}} = C_{\text{min}} + \frac{C_{\text{max}} - C_{\text{min}}}{Q_{\text{maxd1}} - Q_{\text{mind1}}} \times V_{\text{Pd1}}, \quad (5)$$

$$C_{\text{PG}} = C_{\text{min}} + \frac{C_{\text{max}} - C_{\text{min}}}{Q_{\text{maxd2}} - Q_{\text{mind2}}} \times V_{\text{Pd2}}, \quad (6)$$

$$C_{\text{PB}} = C_{\text{min}} + \frac{C_{\text{max}} - C_{\text{min}}}{Q_{\text{maxd3}} - Q_{\text{mind3}}} \times V_{\text{Pd3}}, \quad (7)$$

式中： $C_{\text{PR}}, C_{\text{PG}}, C_{\text{PB}}$ 分别代表着不同通道的色彩分量； $Q_{\text{mind}k}, Q_{\text{maxd}k}, V_{\text{Pd}k}$ ($k=1, 2, 3$) 分别代表每一个特征参数的最小值、最大值和 P 点的值^[10]。

由于多特征参数成像中一般为 3 个变量，故将单一特征参数峰峰值成像 T_{kurt} 、最小值时间成像 T_{min} 和峰峰值时间成像 T_{var} 引入 R、G、B 三个通道（在实际的图像处理中，可以根据实际的缺陷情况进行不同成像方式的组合），定义多特征参数成像中各彩色通道分量表示为

$$R = k_1 \times T_{\text{kurt}}, \quad (8)$$

$$G = k_2 \times T_{\text{min}}, \quad (9)$$

$$B = k_3 \times T_{\text{var}}, \quad (10)$$

式中： k_1, k_2, k_3 分别为样品不同特征参数所在 R、G、B 通道所对应的权重因子。

2) 检测得到的图像对比度评价

$$c_{\text{ct}} = \text{sqrt} [g / (m * n)], \quad (11)$$

式中： g 为样件每一个采样点的幅值与样件整体幅值的均值差值的平方累计； m, n 为样件的行列值，以此来判断样件的成像质量。

3) 权重因子的判定

在确定特征参数成像方式之后，计算每种特征参数成像方式单独成像所得到的图像对比度，根据图像对比度的数值大小来进行权重分配。

$$\begin{cases} k_1 = m_1 \times c_{\text{ct}1} \\ k_2 = m_2 \times c_{\text{ct}2}, \\ k_3 = m_3 \times c_{\text{ct}3} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $c_{\text{ct}1}, c_{\text{ct}2}, c_{\text{ct}3}$ 是每种单特征成像的图像对比度； m_1, m_2, m_3 为比例系数。

为了表征不同成像方式对缺陷的识别好坏，引入相对面积概念，对不同成像方式所得到的缺陷面

积进行相对面积计算，由于不同成像方式对缺陷的识别原理不同，这就导致了缺陷面积用不同方式成像所得到的数值不一样，因此按照固定的样件区域进行图像颜色的分布，通过比较相对面积判断哪种成像方式所得到的缺陷面积更加接近真实缺陷面积。相对面积计算公式为

$$A = \frac{|S_{\text{actual}} - S_{\text{theory}}|}{S_{\text{theory}}}, \quad (13)$$

式中： S_{actual} 为特征成像缺陷的面积； S_{theory} 为理论缺陷面积。

4 结果与分析

多特征参数成像在一定程度上可以认为是 3 种单一特征参数成像的某种性质上的叠加，调整每种特征参数在 R、G、B 通道中的权重，进行多特征参数成像可以得到每种单一特征参数的优点，使最后成像效果更加明显，显著增加图像的对比度。

针对样件上胶层预置缺陷的分析，由于成像方式的制约，本文进行单特征峰峰值成像、均值成像、方差成像、能量成像、变异系数成像^[11]，并将多特征参数成像与单特征参数成像进行对比，上胶层 0.05 mm 预置缺陷成像如图 5 所示。

由图 5 可知，方差成像对于缺陷的识别率较高，整体图像对比度较高，缺陷区域和正常区域的界限较为清晰，但是图像边缘有很多的噪声点，导致边缘地方不明显，影响图像中的缺陷辨识度；峰峰值成像中的缺陷处可以大致判断出来，但不是特别明显，图像对比度较低，这对缺陷的后续处理有很大的影响，该种单一特征参数成像后的边界信息很清晰，没有多余的噪声点；能量成像可以将缺陷大概位置显示出来，但不能显示缺陷的轮廓，缺陷边缘不明显；变异系数成像能将缺陷的大致位置和轮廓显示出来，但缺陷的边缘显示不够明显，不利于后续的缺陷分析；均值成像能将缺陷清楚地显示，但缺陷区域和正常区域的交界面很模糊，图像边缘处的无用信息没有去除，在一定程度上影响了缺陷面积的判断，模糊的边界也对后续的处理带来了不好的影响；多特征参数成像能很好地识别样件中预置的缺陷，相对于单一特征参数成像，对缺陷和正常区域的边界识别更加清晰，缺陷区域的边界更容易辨别，在图像边缘没有多余的噪声点，图像对比度最高。

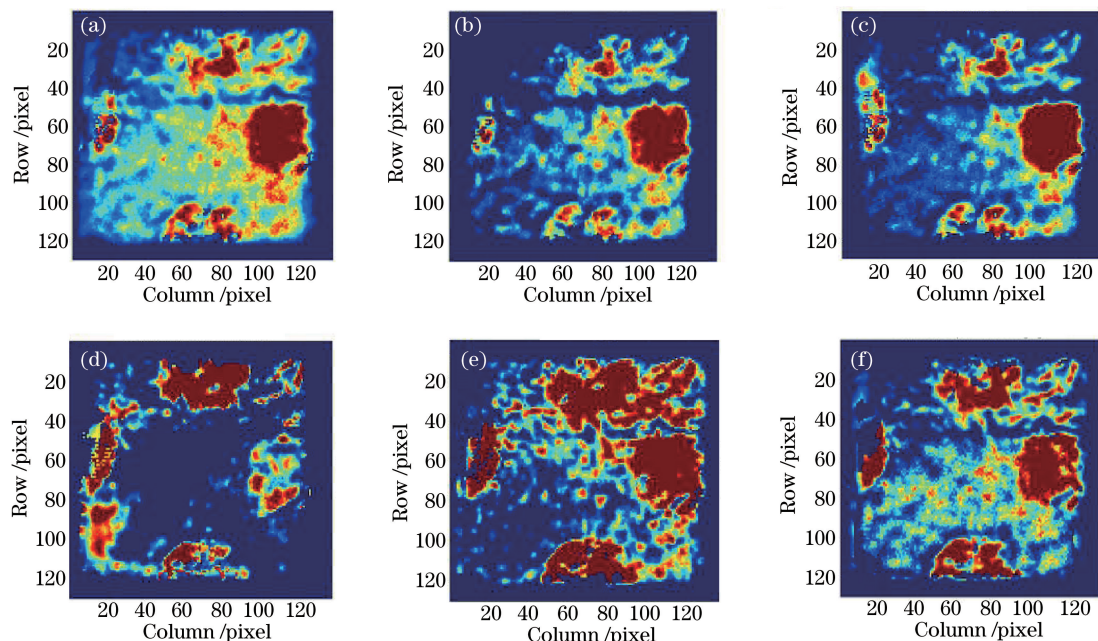


图 5 上层预置缺陷实验成像结果图。(a)方差成像;(b)峰峰值成像;(c)能量成像;(d)变异系数成像;(e)均值成像;(f)多特征参数成像

Fig. 5 Experimental imaging results of the upper layer preset defects. (a) Variance imaging; (b) peak-to-peak imaging; (c) energy imaging; (d) coefficient of variation imaging; (e) mean imaging; (f) multi-feature parameter imaging

表 1 为不同成像方式缺陷的相对面积汇总,在预置缺陷时,放置的都是半径为 20 mm 的半圆形缺陷,但是在真空加压以及抽出半圆形缺陷的过程中,对样件中的缺陷面积造成了一定的影响,导致检测出来的缺陷和预置的缺陷尺寸信息不完全一致。在

进行相对面积计算时,理论缺陷面积使用的是抽出硬质聚四氟乙烯薄片的实际面积,如图 6 所示,经测量 4 个预置缺陷的理论面积分别是:上缺陷面积为 930 mm²,右缺陷面积为 1156 mm²,下缺陷面积为 907 mm²,左缺陷面积为 721 mm²。

表 1 不同成像方式缺陷相对面积

Table 1 Relative area of defects in different imaging methods

Imaging method	Up defect relative area	Right defect relative area	Down defect relative area	Left defect relative area
Peak-to-peak imaging	25.6	9.10	50.9	82.6
Coefficient of variation imaging	8.3	18.10	2.0	69.1
Energy imaging	26.8	0.26	36.5	71.2
Mean imaging	18.4	11.70	7.5	20.8
Variance imaging	46.5	1.90	50.9	82.6
Multi-feature imaging	7.5	0.08	2.3	52.0

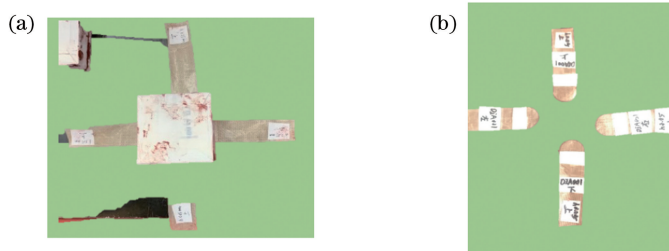


图 6 样件缺陷实物图。(a)样件缺陷未抽出实物图;(b)样件缺陷抽出实物图

Fig. 6 Physical picture of sample defects. (a) Physical image of the sample defect is not extracted; (b) physical image of the sample defect is extracted

由表 1 可以看出,多特征参数成像对于样件的预置缺陷的整体识别效果最好,对预置缺陷识别相对面积最小,意味着识别出来的缺陷面积最接近于理论面积,多特征参数对于缺陷识别的能力最强。

下胶层预埋缺陷为厚 0.15 mm、半径 20 mm 的半圆,由于太赫兹波要穿过空气层、陶瓷基、上层有机硅胶、应变隔离垫等介质,随着介质数量的不断

增加,下胶层预置缺陷的辨识度降低,有些单特征参数成像难以将下胶层的缺陷显示出来。故本文针对下胶层预置缺陷,在成像效果较为明显的成像方式中挑选峰度成像、最小值成像、幅值积分成像、能量成像进行成像对比^[12],并利用多特征参数成像与单特征参数成像对缺陷区域成像进行对比,图 7 为下胶层成像实验结果。

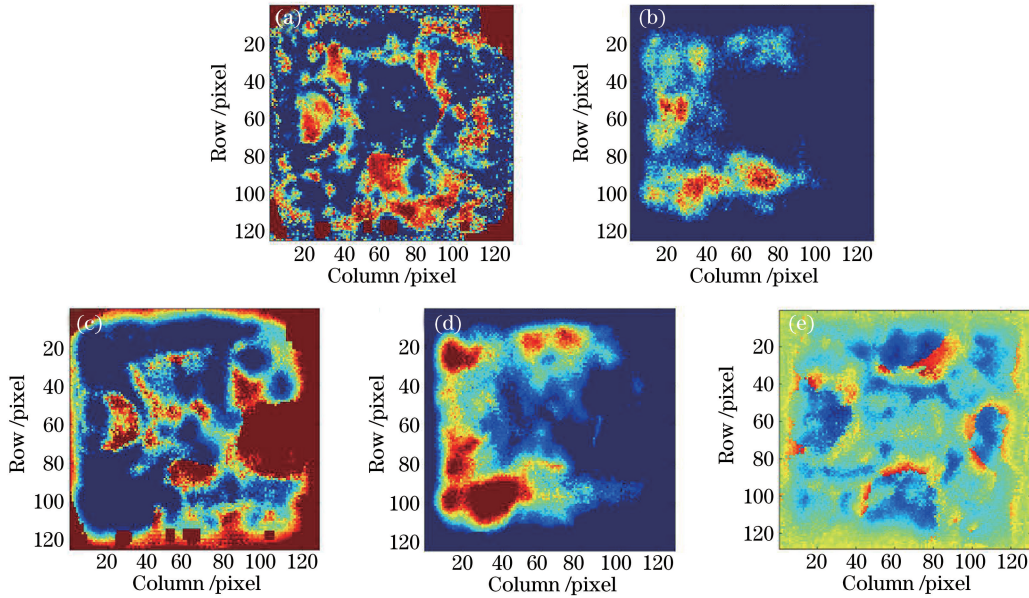


图 7 下层预置缺陷实验成像结果图。(a)峰度成像;(b)最小值成像;(c)幅值成像;(d)能量成像;(e)多特征参数成像
Fig. 7 Experimental imaging results of the lower layer preset defects. (a) Kurtosis imaging; (b) minimum imaging; (c) amplitude imaging; (d) energy imaging; (e) multi-feature parameter imaging

从峰度成像图中基本分辨不出下层预置缺陷的大小和位置,图像整体很杂乱;最小值成像中看不出预置缺陷的大小和位置;在幅值成像中,对于缺陷的识别不是很准确,左右两边的缺陷能大致看出来轮廓,上下两边的缺陷基本看不出来;用感兴趣区域的能量对缺陷区域进行识别的效果和最小值成像的效果基本一致,没有识别出预置的缺陷;多特征参数成像可以较为清楚地分辨预置缺陷位置和大小,图像

整体的对比度也较高,比较容易辨认出缺陷。

由表 2 不同成像方式获得的图像质量对比可知,上胶层预置缺陷处方差成像所成的图像对比度最低,多特征参数所成的图像对比度最高。下胶层预置缺陷处最小值成像所成的图像对比度最低,多特征参数所成的图像对比度最高。多种成像方式以 R、G、B 通道的形式进行多特征参数成像后,图像的对比度明显提高,比单特征参数成像至少提高了 2 倍。

表 2 图像质量对比

Table 2 Comparison of image quality

Imaging method	Sizing image contrast	Imaging method	Contrast image
Minimum imaging	0.012801	Minimum imaging	0.001602
Peak-to-peak imaging	0.021021	Energy imaging	0.008234
Maximum imaging	0.010086	Kurtosis imaging	0.020341
Energy imaging	0.004179	Amplitude imaging	0.012108
Mean imaging	0.002157	Multi-feature parameter imaging	0.042651
Variance imaging	0.000162		
Multi-feature parameter imaging	0.054768		

5 结 论

在耐高温复合材料粘接结构上下层预置缺陷的不同成像方式识别中,多特征参数成像的识别能力最强,能识别 0.05 mm 的上层预置缺陷和 0.15 mm 的下层预置缺陷,能有效增加图像的对比度,可以很好地继承不同通道中单一特征参数成像的优点,通过调整不同参数在通道中所占的比例值,可以改变单一参数在多特征参数成像效果图中的比例,根据实际要求来决定每个特征参数所占的比例,以此来达到不同的研究目的。

参 考 文 献

- [1] Zhou Y, Mu K J, Zhang Y D, et al. Nondestructive testing of fuel tank foam with continuous wave terahertz[J]. *Nondestructive Testing*, 2007, 29(5): 266-267, 271.
周燕, 牧凯军, 张艳东, 等. 燃料箱泡沫板的连续太赫兹波无损检测[J]. *无损检测*, 2007, 29(5): 266-267, 271.
- [2] Li H T, Wang X K, Mu K J, et al. Experimental studies on terahertz continuous wave related to security inspection[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(9): 876-878.
李海涛, 王新柯, 牧凯军, 等. 连续太赫兹波在安全检查中的实验研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(9): 876-878.
- [3] Jepsen P U, Cooke D G, Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging-modern techniques and applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(1): 124-166.
- [4] Shen J L, Zhang C L. Terahertz nondestructive imaging technology and its application [J]. *Nondestructive Testing*, 2005, 27(3): 146-147.
沈京玲, 张存林. 太赫兹波无损检测新技术及其应用[J]. *无损检测*, 2005, 27(3): 146-147.
- [5] Li Q, Ding S H, Yao R, et al. Experiments on continuous-wave terahertz reflection-mode imaging for concealed objects[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(8): 0811001.
李琦, 丁胜晖, 姚睿, 等. 隐藏物的连续太赫兹反射扫描成像实验 [J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0811001.
- [6] Zhao B Q, Wei X L, Yang Z G, et al. Terahertz nondestructive inspection of heat shield [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(2): 185-189.
赵毕强, 魏旭立, 杨振刚, 等. 隔热板的太赫兹无损检测 [J]. *激光技术*, 2015, 39(2): 185-189.
- [7] Yang Z G, Liu J S, Wang K J. Experimental research on nondestructive inspection for multilayer cellular samples using continuous terahertz waves imaging system [J]. *Journal of Optoelectronics · laser*, 2013, 24(6): 1158-1162.
杨振刚, 刘劲松, 王可嘉. 连续太赫兹成像系统对多层蜂窝样品无损检测的实验研究 [J]. *光电子·激光*, 2013, 24(6): 1158-1162.
- [8] Li W J, Wang T Y, Zhou Y, et al. Terahertz non-destructive inspection of air defect within adhesive layers of multi-layer bonded structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0111002.
李文军, 王天一, 周宇, 等. 多层胶接结构胶层空气缺陷的太赫兹无损检测 [J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0111002.
- [9] Ji Z J, Zheng Q S, Liu Y, et al. Experimental research on pulsed terahertz scanning imaging [J]. *Journal of Hubei University of Education*, 2018, 35(8): 15-19.
吉紫娟, 郑秋莎, 刘勇, 等. 脉冲太赫兹扫描成像实验研究 [J]. *湖北第二师范学院学报*, 2018, 35(8): 15-19.
- [10] Qiao X L, Ren J J, Zhang D D, et al. Terahertz spectrum multi characteristic parameters imaging method [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2017, 40(3): 25-31.
乔晓利, 任姣姣, 张丹丹, 等. 太赫兹波谱多特征参数成像方法 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(3): 25-31.
- [11] Sun J Z, Zhang L, Gao F, et al. Quality improvement and noise reduction of terahertz continuous wave imaging [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(11): 3343-3346.
孙建忠, 章乐, 高飞, 等. 太赫兹连续波成像的质量改进与降噪 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(11): 3343-3346.
- [12] Wu W B, Sun J Y, Wang X K. Summery of terahertz (THz) imaging technology in dimension characterization [J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2015, 26(11): 98-102.
武文彬, 孙璟宇, 王新柯. 太赫兹(THz)成像技术测量几何特性概述 [J]. *航空科学技术*, 2015, 26(11): 98-102.