

防热瓦复合材料结构损伤缺陷的 太赫兹无损检测方法研究^{*}

叶梓龙^{1,2} 王赛男^{1,2} 刘武刚³ 宋俊柏³ 周伟^{1,2}

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 河北大学计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071002;
3. 北京强度环境研究所可靠性与环境工程技术重点实验室 北京 100076)

摘要: 防热瓦复合材料凭借其优异的耐高温性能在航天领域得到广泛应用,但服役过程中易产生内部缺陷,对飞行器安全构成潜在威胁。因此,开展防热瓦复合材料的无损检测研究具有重要工程意义。本研究基于太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS),对预制孔洞缺陷的防热瓦材料进行系统性无损检测研究。采用反射式太赫兹扫描系统获取样本时域信号,并引入 Savitzky-Golay 滤波算法进行信号降噪优化,提取关键特征参数构建成像。针对单一参数成像结果在缺陷检测精度上的局限性,创新性地提出小波图像融合与 Canny 边缘检测算法相结合的检测方法。实验结果表明,该方法不仅实现了对预置孔洞缺陷的全部识别,缺陷识别率达到 100%,而且对直径分别为 10 mm 和 5 mm 的孔洞缺陷,检测误差均控制在 0.5 mm 范围内,相对误差不超过 6%。这种高精度检测方法为防热瓦复合材料缺陷检测的智能化发展提供了思路和方案。

关键词: 陶瓷复合材料;太赫兹;孔洞缺陷表征;无损检测;缺陷识别

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.4030

Research on terahertz non-destructive testing methods for damage and defects in thermal protection tile composite material structures

Ye Zilong^{1,2} Wang Sainan^{1,2} Liu Wugang³ Song Junbai³ Zhou Wei^{1,2}

(1. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China;
2. National & Local Joint Engineering Research Center of Metrology Instrument and System, Hebei University, Baoding 071002, China; 3. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Thermal protection tile composites are widely used in the aerospace field due to their excellent high-temperature resistance. However, internal defects are prone to occur during service, posing potential threats to aircraft safety. Therefore, conducting nondestructive testing research on thermal protection tile composites holds significant engineering importance. This study systematically investigates the nondestructive testing of thermal protection tile materials with prefabricated hole defects based on a THz-TDS system. A reflective terahertz scanning system was used to acquire time-domain signals from the samples, and the Savitzky-Golay filtering algorithm was introduced to optimize signal denoising. Key feature parameters were then extracted to construct imaging. To address the limitations of single-parameter imaging in defect detection accuracy, an innovative detection method combining wavelet image fusion and the Canny edge detection algorithm was proposed. Experimental results demonstrate that this method not only achieves a 100% recognition rate for all prefabricated hole defects but also controls the detection error within 0.5 mm for hole defects with diameters of 10 mm and 5 mm, with a relative error not exceeding 6%. This high-precision detection method provides technical support and methodological reference for the intelligent development of defect detection in thermal protection tile composites.

Keywords: ceramic matrix composites; terahertz; porous defect characterization; non-destructive testing; defect identification

0 引言

随着现代军事技术的快速发展,航空飞行器已成为国

防体系的核心组成部分。防热瓦复合材料因其优异的性能——包括低密度、高温稳定性、抗氧化性能及低热导率等特性^[1],在航天工程领域占据重要地位。然而,在极端服

役环境下,刚性隔热瓦不可避免地产生不同程度的结构损伤,严重制约其服役性能与使用寿命^[2-3]。因此,建立高效可靠的内部缺陷检测,对确保飞行器结构完整性与运行安全具有重要意义。

传统无损检测技术主要包括射线检测、超声检测、声发射检测及渗透检测等方法,但在陶瓷材料内部孔洞缺陷检测方面均存在固有缺陷。以美国国家航空航天局(NASA)^[4]开发的 X 射线检测技术为例,该技术虽能成功识别陶瓷基复合材料发动机叶片中的孔隙缺陷,但在复杂内部结构解析方面存在信息获取不完整的问题,且伴随辐射安全隐患;Guel 等^[5]基于多源声发射数据融合技术,实现了氧化物陶瓷复合材料的损伤检测与模式识别,但对材料内部深层缺陷的检测能力仍存在显著盲区。

太赫兹波对非极性材料具有优异的穿透特性,因此太赫兹技术在无损检测领域展现出巨大应用潜力^[6]。任姣姣等^[7-9]系统研究了太赫兹技术在涂层检测与结构损伤评估中的应用机理,成功实现了含双胶层陶瓷基复合材料内部缺陷的高分辨率检测。Wu 等^[10]基于波传播数值模拟理论,构建了高分辨率太赫兹计算机断层扫描系统,显著提升了三维重构精度。Palka 等^[11]提出了基于直方图高斯拟合的自适应阈值分割算法,结合 THz-TDS 实现了玻璃纤维复合材料的缺陷识别,在夹杂物检测中达到 87% 的识别率,分层缺陷检测准确率达 100%。该研究团队^[12]进一步制备了氧化铝陶瓷防护材料,通过 THz-TDS 精确测定了材料的复折射率参数。Hakobyan 等^[13]基于 THz-TDS 建立了氧化铝陶瓷介电常数测量方法,实现了孔隙率的定量表征。Liu 等^[14]针对石英纤维增强聚合物开展内部缺陷检测研究,采用基于 Transformer 架构的深度学习算法实现缺陷自动识别,验证了神经网络在预埋分层缺陷表征中的有效性。刘增华等^[15]构建了反射式 THz-TDS 检测系统,对陶瓷基复合材料试件实施非接触式检测,成功重构了缺陷的三维空间分布。Li 等^[16]将 THz-TDS 与机器学习算法相结合,建立了热障涂层孔隙率评估模型。Nidheesh 等^[17]采用太赫兹反射成像技术,实现了软木酚醛复合材料健康区域与脱粘区域的有效区分。Fosodeder 等^[18]验证了太

赫兹技术在玻璃纤维增强塑料分层缺陷检测中的可行性。Wang 等^[19]结合 ResNet18 与支持向量机算法,构建了复合材料缺陷智能分类系统,实现了三类典型缺陷的准确识别。

当前,陶瓷材料孔洞缺陷检测技术已取得显著进展,相关研究成果日趋丰富。然而,现有技术仍面临诸多挑战:一方面,太赫兹波在厚壁试件中的穿透能力有限,导致成像质量下降,制约了其在大型厚壁构件检测中的推广应用;另一方面,缺陷智能识别算法尚不完善,缺乏对孔洞几何参数的精确定量表征能力,亟需在理论方法和技术手段方面实现突破。

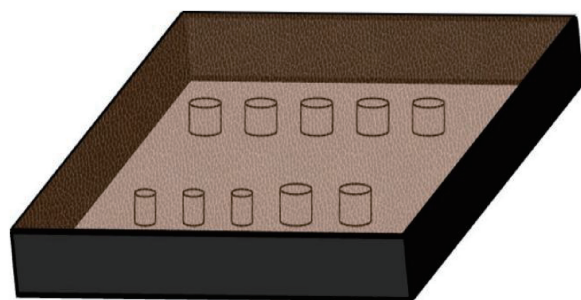
基于此,本研究构建了太赫兹时域光谱无损检测系统,针对含预置孔洞缺陷的隔热瓦试件开展了非接触式检测实验。研究采用 Savitzky-Golay 滤波算法对太赫兹时域信号进行噪声抑制,随后提取滤波后信号的多维特征参数构建成像矩阵,通过对比分析不同成像模式下的缺陷显示效果,优化检测参数配置。进而运用小波融合技术增强图像对比度,结合 Canny 边缘检测算子实现缺陷轮廓的精确提取,建立了孔洞缺陷的高精度识别与几何特征量化分析方法。该研究为太赫兹技术在陶瓷基复合材料缺陷检测领域的工程化应用提供了技术支持。

1 实验及方法

1.1 实验样品

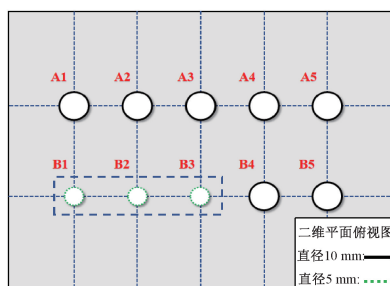
本研究所采用的隔热瓦复合材料为层状复合结构,主要由表面隔热涂层与氧化铝-二氧化硅纤维陶瓷多孔基体构成。其中,隔热涂层采用硼硅玻璃材料制备,完全包覆陶瓷基体表面。试件总体厚度为 30 mm,表面隔热涂层厚度约为 0.2 mm。

试件结构如图 1(a) 所示。为系统评估太赫兹技术在陶瓷多孔隔热材料孔洞缺陷检测中的应用效能,本研究在陶瓷复合材料基体内部预置了两种规格的圆形孔洞缺陷:直径分别为 5 mm 和 10 mm,5 mm 缺陷以虚线框的形式标出,缺陷总数为 10 个。各缺陷在试件内部呈规律性阵列分布,按几何位置依次编号为 A1~B5。具体缺陷分布配置如图 1(b) 所示。



(a) 隔热瓦材料样品示意图

(a) Schematic diagram of thermal protection tile material sample



(b) 试件缺陷示意图

(b) Schematic diagram of specimen defects

图 1 试验样品设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test sample design

1.2 实验装置

本实验所采用的检测设备为 QT-TO1000 太赫兹时域光谱系统。该系统由多个关键模块协同构成,包括光纤延迟系统模块、光电子学收发一体模块、数据分析软件模块、成像检测综合模块、可变角度旋转测量系统、数据采集系统,此外还包含光学平台以及外部光路系统。实验设备及系统示意图如图 2 所示。系统的频率范围为 $0.1 \sim 5.5$ THz,动态范围 ≥ 80 dB,成像范围为 $90 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,工作模式为反射式,采用垂直入射,扫描平台步长设置为 0.5 mm 。系统所配备的数据分析软件模块功能丰富,能够同时呈现时域波形图以及扫描成像图,为后续的数据深入分析与缺陷特征提取提供了多样化的数据可视化手段。

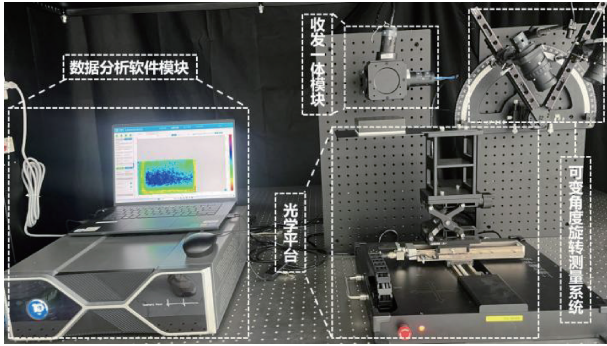


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system

系统光路工作原理如图 3 所示。飞秒激光器输出的超短脉冲经分光棱镜分束后形成泵浦光与探测光两路光束。泵浦光聚焦至光电导天线表面,通过光电导效应激发产生太赫兹脉冲。所产生的太赫兹波经光学准直与聚焦系统作用后,与探测光在探测器处实现时空重合,通过光电采样技术完成太赫兹信号的相干探测与记录。系统通过精密时间延迟控制装置调节泵浦光与探测光之间的相对时延,从而实现太赫兹时域波形的完整重构。

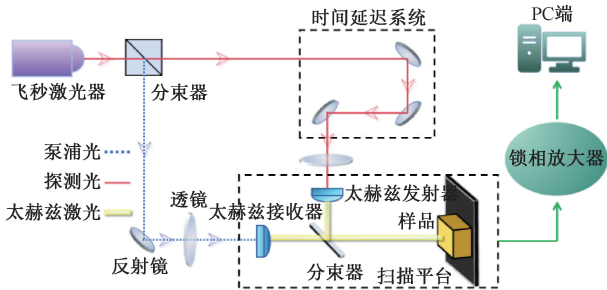


图 3 光路原理图

Fig. 3 Optical path schematic

2 时域信号分析

2.1 Savitzky-Golay 算法降噪分析

太赫兹时域信号中的时间延迟特征与峰值幅度信息

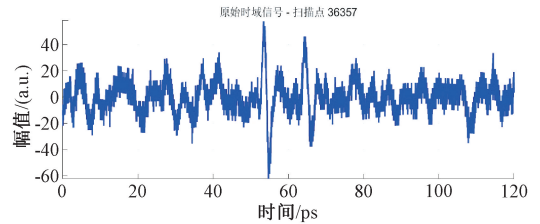
构成了太赫兹成像技术的核心参量。Savitzky-Golay 平滑滤波算法具有独特的信号保真特性,能够在有效抑制高频噪声分量的同时,最大程度保持信号的局部特征结构,包括峰值位置、波形形状等关键信息,符合太赫兹无损检测对信号完整性的技术要求。

Savitzky-Golay 滤波算法是一种基于局部多项式拟合的滤波平滑算法^[17]。它的数学表达式为:

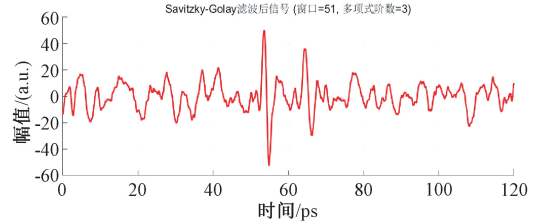
$$y_i = a_0 + a_1 i + a_2 i^2 + \cdots + a_k i^k + \varepsilon_i \quad (i = -m, -m+1, \cdots, m) \quad (1)$$

其中, y_i 是窗口内第 i 个点的信号值; a_0, a_1, \cdots, a_k 是多项式系数; k 是多项式阶数(通常 $k \leq 4$); ε_i 是噪声或残差。目标是通过最小二乘法确定多项式系数,使得拟合曲线与原始数据的残差平方和最小。

以缺陷位置信号为例,窗口宽度设置为 51,多项式阶数选择 3,滤波过程在 Matlab 软件完成。原始时域信号波形图与降噪完成后的时域信号波形图如图 4 所示。可以发现,降噪后的曲线更为平滑,有效去除了噪声干扰,同时保留了信号的关键特征,为后续成像分析提供了高质量的数据基础。



(a) 原始时域信号
(a) Original time-domain signal



(b) 滤波信号
(b) Filtered signal

图 4 信号降噪对比图

Fig. 4 Signal denoising comparison diagram

2.2 单点信号分析

图 5 为随机选取的无缺陷位置单点信号以及缺陷位置的单点信号。信号时间长度为 $0 \sim 120 \text{ ps}$,并选取其中 $20 \sim 100 \text{ ps}$ 时间长度范围。

通过对比分析无缺陷区域与缺陷区域的太赫兹时域响应特征,发现两者存在显著差异。无缺陷区域的时域信号在 65 ps 时刻呈现单一主峰特征,而含孔洞缺陷区域的信号则在 53 ps 与 65 ps 时刻分别出现双峰响应模式。该现象的物理机制在于太赫兹波传播至孔洞缺陷界面时发生额外的界面反射,形成多重回波信号叠加效应,其传播路径示意如图 6 所示。

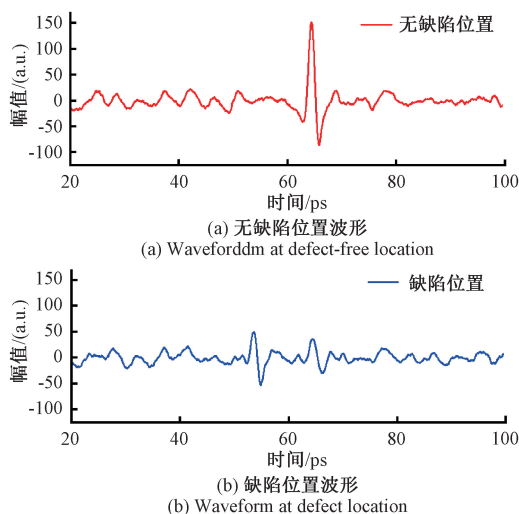


图 5 缺陷位置与无缺陷位置时域信号对比

Fig. 5 Defect and defect-free location time-domain signal comparison diagram

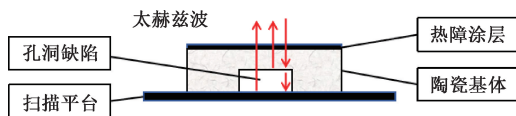


图 6 缺陷检测原理图

Fig. 6 Schematic diagram of defect detection principle

定量分析表明,无缺陷区域主峰幅值约为 150 个单位,显著高于缺陷区域的峰值响应(约 60 个单位)。同时,在时域特征方面,无缺陷区域的主峰时延位于 65 ps 附近,而缺陷区域的特征峰则前移至 53 ps 左右,呈现明显的时域偏移特性。上述幅度衰减与时延变化的差异化特征为后续特征参数提取与缺陷成像可视化奠定了理论基础。

3 缺陷成像及检测

3.1 时域波形特征参数

典型时域波形图如图 7 所示。特征参数主要包括时域波形最大值 A、波形最小值 B 以及峰峰值 C,这些信息主要包含了样品的厚度以及 THz 波的吸收特性,飞行时间 a、b、c、d 反映了样品的折射率的变化,脉宽参数 e 体现物体的色散性质。可利用这些不同的特征参数生成效果不同的图像。

根据上节内容对缺陷位置与无缺陷位置的波形分析,得出缺陷信息主要体现在波峰峰值以及时间延迟等参数,故本文选取时域波形的峰值最大值,峰峰值以及飞行时间 3 个参数进行缺陷成像表征。

3.2 无参考图像质量评价指标

为了评估不同特征参数成像质量优劣,采用无参考图像评价指标中标准差、平均梯度、信息熵参数对图像进行评估。

标准差反映图像灰度变换的多样化,标准差越大,图

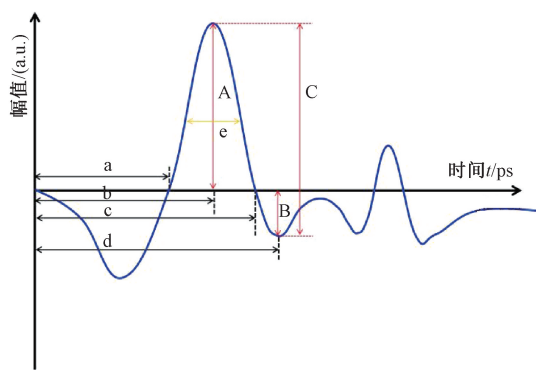


图 7 典型时域波形图

Fig. 7 Typical time-domain waveform

像对比度越高。计算公式如下^[20]:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (F(i, j) - u)^2} \quad (2)$$

式中: M 与 N 表示图像的大小, $F(i, j)$ 表示对应像素点的灰度值, u 表示图像所有像素点的平均灰度值。

平均梯度反映图像的细节表达能力。定义如下^[17]:

$$MG = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right]^2} \quad (3)$$

其中, $\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}$ 表示水平方向上的梯度, $\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}$ 表示垂直方向上的梯度。

信息熵反映图像的复杂程度以及信息量的大小,信息熵越大,则表明图像包含更多细节。定义如下^[17]:

$$IE = - \sum_{i=0}^{L-1} p(s_i) \log_2 p(s_i) \quad (4)$$

$p(s_i)$ 表示灰度水平 s_i 的概率。

3.3 缺陷成像结果分析

图 8 展示了基于不同特征参数的成像结果,包括时域波形最大值(图 8(a))、峰峰值(图 8(b))和飞行时间(图 8(c))参数成像。观察发现,无缺陷区域的色彩强度在 3 种成像方式中呈现显著差异。这种差异主要源于以下因素:防热涂层表面的不均匀性对太赫兹波的散射影响;试件 30 mm 的厚度对太赫兹波的穿透衰减;以及陶瓷材料本身较高的孔隙率特性。

通过对比分析,太赫兹波表现出良好的穿透性能。其中,飞行时间参数成像对缺陷边缘轮廓表现出较高的敏感性,在缺陷定位和形貌表征方面优于其他两种方法。峰峰值成像次之,其缺陷轮廓显示效果优于最大值成像。表 1 的图像质量评估结果显示,飞行时间成像的各项指标略低于时域幅值成像,最大值成像呈现最大标准差,而峰峰值成像在平均梯度和信息熵方面表现最优。

深入分析表明,飞行时间成像虽在主观评价中效果良好,但量化指标相对较低,这主要归因于其对热障涂层和试件内部非缺陷信息的有效抑制。时域最大值和峰峰值

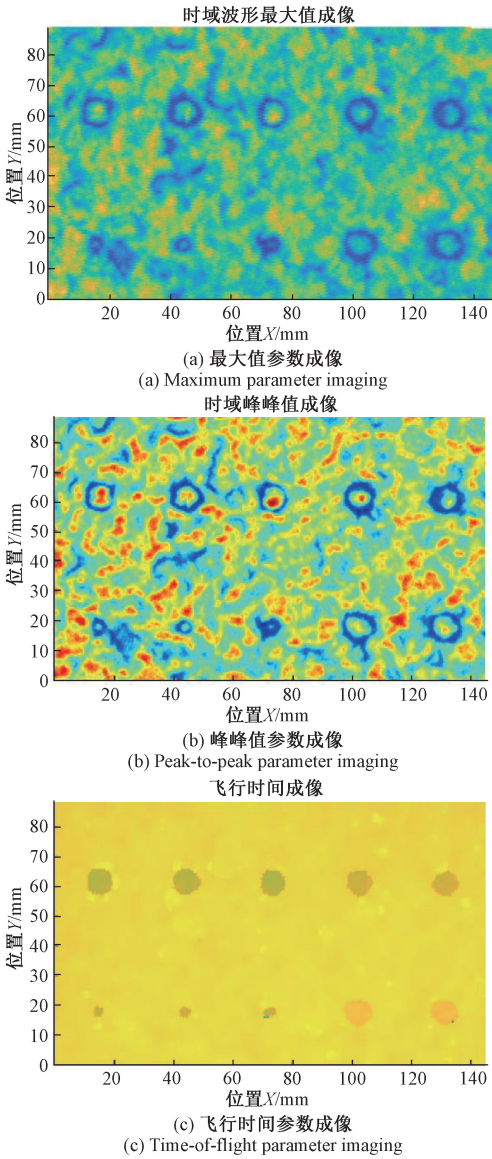


图 8 不同特征参数成像结果

Fig. 8 Imaging results using different feature parameters

表 1 成像质量结果对比

Table 1 Imaging quality results comparison

成像方式	图像评价指标		
	SD	MG	IE
最大值成像	55.66	40.16	3.72
峰峰值成像	47.91	55.25	3.78
飞行时间成像	34.72	31.82	2.67

成像则因表面均匀性和涂层不平整性而受到不同程度干扰,导致成像背景效果不佳。

3.4 基于小波图像融合的 canny 算子缺陷边缘检测

1) 缺陷表征

为了能够从特征参数图像中精确识别到缺陷,综合考

虑了计算性能,检测精度等问题,采用 canny 算子实现对缺陷的自动检测。canny 算子为双阈值检测,具有定位精度高,抗噪性强的优点。因此,在实际工程应用中,可以用于检测含有丰富边缘信息的图像。

第一步对参数特征图像进行灰度处理,并添加高斯滤波,由此作为检测前提。高斯滤波的数学实现公式为^[21]:

$$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{5}$$

式中: x,y 为样本点的坐标信息, σ 控制平滑强度,数值越大,去噪效果越强,但边缘可能模糊,本实验设置为 2。

第二步计算梯度幅值与方向,实现方式如下:

$$G_x=\begin{bmatrix}-1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1\end{bmatrix}\otimes\mathbf{A} \tag{6}$$

$$G_y=\begin{bmatrix}-1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1\end{bmatrix}\otimes\mathbf{A} \tag{7}$$

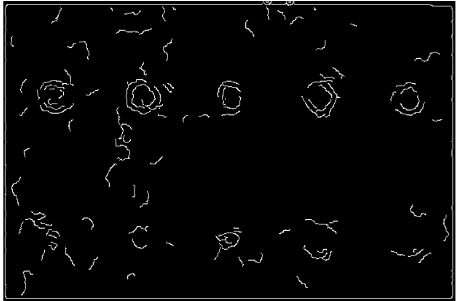
$$M=\sqrt{G_x^2+G_y^2} \tag{8}$$

$$\theta=\arctan(\frac{G_y}{G_x}) \tag{9}$$

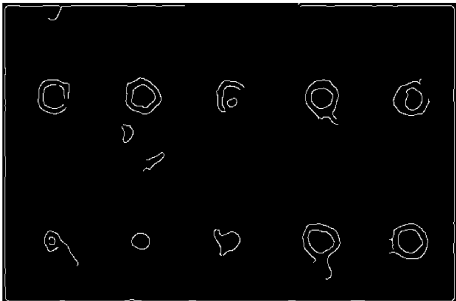
其中, \mathbf{A} 是滤波图像的像素矩阵, G_x 和 G_y 是水平和垂直方向上的梯度, θ 是边缘方向, M 是梯度幅度。

边缘检测结果如图 9 所示。图 9 的(a)、(b)、(c)图像依次为最大值,峰峰值以及飞行时间成像 canny 算子检测结果。

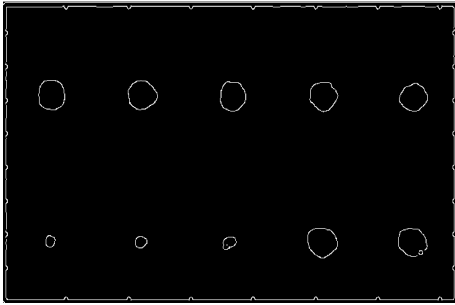
基于 Canny 边缘检测算法的不同成像模式对比分析表明,各方法在缺陷识别精度与抗噪性能方面存在显著差



(a) 最大值成像检测结果
(a) Maximum value imaging detection results



(b) 峰峰值成像检测结果
(b) Peak-to-peak imaging detection results



(c) 飞行时间检测结果
(c) Time-of-flight detection results

图 9 Canny 算子检测结果图

Fig. 9 Canny operator edge detection results

异。最大值成像模式下的边缘检测效果欠佳,背景噪声干扰严重,产生大量伪边缘,尤其对 B1~B5 系列缺陷的边缘轮廓提取能力不足,未能满足预期检测精度要求。峰峰值成像模式的检测性能有所改善,虽然部分缺陷边缘平滑度有限且背景存在轻微噪声干扰,偶有误检现象,但基本实现了全部 10 个孔洞缺陷的有效识别,伪边缘响应相对较少。飞行时间成像模式表现出最优的检测性能,通过优化算法参数配置,有效抑制了背景噪声干扰,实现了所有孔洞缺陷的高精度检测,且未出现伪边缘响应。

综合上述分析结果,选取峰峰值成像与飞行时间成像的 Canny 边缘检测结果作为典型案例,开展孔洞缺陷几何尺寸的定量表征研究。

表 2 为缺陷检测信息,根据结果显示,飞行时间成像模式的尺寸测量精度低于峰峰值成像模式。尽管飞行时间参数成像具有良好的视觉效果,但其几何尺寸测量误差维持在 1~1.5 mm 范围内。相比之下,峰峰值成像的测量精度通常控制在 0.5 mm 以内,个别孔洞测量精度偏差主要归因于局部成像质量不佳。

表 2 缺陷直径信息

Table 2 Defect diameter information

缺陷 编号	实际 直径/mm	检测直径/mm		误差/%	
		飞行时间	峰峰值	飞行时间	峰峰值
A1	10	8.67	9.82	13.3	1.8
A2	10	9.20	10.10	8.0	1.0
A3	10	8.57	7.80	14.3	22.2
A4	10	8.99	10.78	10.1	7.8
A5	10	8.78	10.21	12.2	2.1
B1	5	3.39	4.75	32.2	5.0
B2	5	3.70	4.83	26.0	3.4
B3	5	4.13	5.89	17.4	17.8
B4	10	9.20	10.36	8.0	3.6
B5	10	8.89	10.13	11.1	1.3

通过对比分析两种成像模式的结果发现,由于太赫兹

波的衍射效应,峰峰值成像产生了缺陷边缘“厚度”现象,但并不影响缺陷尺寸评估。而飞行时间成像的固有局限性,材料的不均匀性导致时间-距离的转换误差,这一差异直接影响了缺陷几何参数的测量精度。基于各成像模式的互补特性,可通过多模态图像融合算法集成不同参数的优势信息,有效规避单一成像模式的局限性,从而实现孔洞缺陷的高精度检测与表征。

2) 基于小波图像融合的缺陷检测

小波图像融合的基本原理是对多幅图像进行小波变换,并针对不同频率子带设计融合规则。通常,低频系数采用加权平均的方法,以保留主体信息;高频系数则取绝对值最大或区域能量最大化,以突出边缘纹理。最后,通过小波逆变换重构融合图像^[22]。

通过系统比较不同小波基函数与分解层级的融合性能,确定当采用 sym4 小波基函数并设置分解层数为 3 时,图像融合效果达到最优状态,融合结果如图 10 所示。

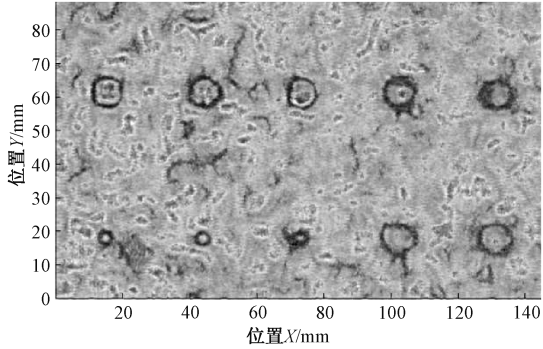


图 10 小波图像融合结果

Fig. 10 Wavelet image fusion result

从融合图像可以观察到,与最大值成像及峰峰值成像相比,背景噪声得到显著抑制,图像对比度明显提升,同时有效保持了孔洞缺陷的结构特征信息完整性。该融合策略成功整合了多模态成像的互补优势,为后续缺陷精确识别与量化分析奠定了良好基础。

对小波融合图像实施 Canny 边缘检测算法处理,检测结果如图 11 所示。孔洞缺陷识别的定量统计结果如表 3 所示。结果表明,该方法成功实现了全部 10 个预置孔洞缺陷的准确识别,伪边缘响应数量显著减少,未出现误检现象。进一步的几何尺寸量化分析显示,孔洞直径测量精度稳定维持在 0.5 mm 以内,相对测量误差控制在 6% 以下,验证了基于小波图像融合与边缘检测相结合的缺陷识别方法具有良好的检测精度与可靠性。

图 12 展示了飞行时间成像、峰峰值成像及小波融合成像 3 种模式下孔洞缺陷直径测量的相对误差分布特征。定量分析结果表明:飞行时间成像模式的测量误差最为显著;峰峰值成像模式的测量精度相对较优,误差分布基本控制在 7% 范围内,但受局部成像质量限制,个别缺陷出现了较大的测量偏差;小波融合成像模式有效整合了前两种



图 11 小波图像融合检测结果

Fig. 11 Wavelet image fusion detection result

表 3 小波图像融合缺陷直径信息

Table 3 Defect diameter information based on wavelet image fusion

缺陷编号	实际直径/mm	检测直径/mm	误差/%
A1	10	10.12	1.2
A2	10	9.93	0.7
A3	10	9.78	2.2
A4	10	10.51	5.1
A5	10	10.50	5.0
B1	5	5.28	5.6
B2	5	5.03	0.6
B3	5	5.30	6.0
B4	10	10.22	2.2
B5	10	9.90	1.0

方法的技术优势,克服了单一成像模式的固有局限性,实现了高精度的几何尺寸测量。

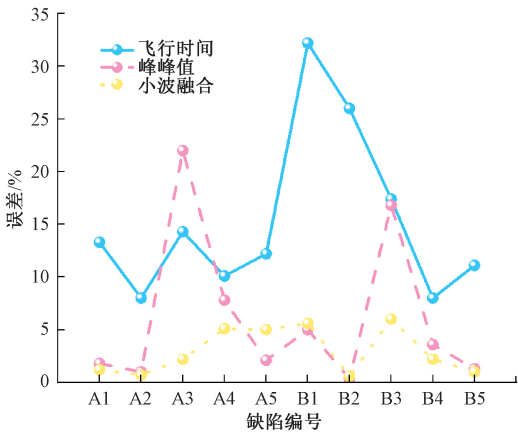


图 12 不同成像结果检测误差图

Fig. 12 Detection error comparison of different imaging results

4 结 论

本文利用 THz-TDS,对预置孔洞缺陷的防热瓦材料进行了无损检测,提出了一种用于检测孔洞缺陷的方法。

采用 Savitzky-Golay 滤波算法对原始太赫兹时域信号实施预处理,有效抑制了随机噪声干扰,并基于滤波后信号提取最大值、峰峰值及飞行时间等多维特征参数构建成像矩阵。对比分析表明,飞行时间参数成像在视觉效果方面表现最优。

为实现缺陷的智能化识别,引入 Canny 边缘检测算法对参数图像进行处理。飞行时间成像在缺陷识别方面表现出色,成功检出全部预置孔洞缺陷,识别准确率达 100%。然而,其几何尺寸测量精度相对较低,孔洞直径测量误差通常在 1.5 mm 以内,最大相对误差约 35%。峰峰值成像虽在局部区域成像质量有限,但整体测量精度较高,大部分缺陷的相对误差控制在 7% 以内。

采用小波变换算法对三种参数成像结果进行融合处理,结合 Canny 边缘检测技术,实现了孔洞缺陷几何尺寸的高精度测量,绝对误差控制在 0.5 mm 以内,相对误差均在 6% 以下。该方法为防热瓦复合材料内部缺陷的定量评估提供了有效的技术手段。

本研究主要针对预置圆形孔洞缺陷开展检测,未涉及裂纹、分层、夹杂等其他常见缺陷类型,也未系统研究缺陷深度与方向对检测的影响,限制了方法的通用性。此外,研究集中于二维成像,未充分利用太赫兹技术实现三维缺陷重构与深度定位。未来可扩展多类型缺陷检测,结合机器学习实现自动分类,并引入太赫兹 CT 与深度学习进行三维重构与定量分析,提升复杂结构中的缺陷表征能力。

参考文献

[1] 温银堂, 杨若然, 张玉燕. 新型陶瓷基复合材料粘接构件的脱粘超声检测信号处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(2): 143-149.
WEN Y T, YANG R R, ZHANG Y Y. Debonding ultrasonic detection signal processing method of novel ceramic matrix composite material bonding member[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(2): 143-149.

[2] 丁伟利, 张志鹏, 雷子琦, 等. 深度学习陶瓷表面缺陷检测算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(11): 161-166.
DING W L, ZHANG ZH P, LEI Z Q, et al. Deep learning ceramic surface defect detection algorithm research[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 161-166.

[3] 龚云丽, 曹丙花, 孙凤山, 等. 新型窗函数适配的热障涂层太赫兹盲反卷积算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(9): 271-279.
GONG Y L, CAO B H, SUN F SH, et al. A blind deconvolution method for terahertz thermal barrier coating adapted by novel window function[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(9): 271-279.

[4] GOLLER R, ROSIGER A, AZZAZ Y. Evaluation of

- ceramic matrix composite edge and surface damage[J]. Key Engineering Materials, 2019, 809: 161-166.
- [5] GUEL N, HAMAM Z, GODIN N, et al. Data merging of AE sensors with different frequency resolution for the detection and identification of damage in oxide-based ceramic matrix composites[J]. Materials(Basel, Switzerland), 2020, 13(20): 4691.
- [6] WANG SH N, MA Z J, WANG G L, et al. Metalens enabled terahertz imaging for non-destructive measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(10): 4919-4927.
- [7] 张丹丹, 任姣姣, 李丽娟, 等. 玻璃纤维蜂窝复合材料的太赫兹无损检测技术[J]. 光子学报, 2019, 48(2): 157-165.
- ZHANG D D, REN J J, LI L J, et al. Terahertz non-destructive testing technology for glass fiber honeycomb composites [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(2): 157-165.
- [8] 任姣姣, 李丽娟, 张丹丹, 等. 太赫兹无损检测的多特征参数神经网络分析技术[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 204-210.
- REN J J, LI L J, ZHANG D D, et al. Multi-feature parameter neural network analysis technique based on terahertz nondestructive testing[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 204-210.
- [9] ZHANG D D, REN J J, GU J, et al. Nondestructive testing of bonding defects in multilayered ceramic matrix composites using THz time domain spectroscopy and imaging[J]. Composite Structures, 2020, 251(21): 112624.
- [10] WU Q Y S, ZHANG N, LIM V, et al. Detection of a glass fiber-reinforced polymer with defects by terahertz computed tomography[J]. ChemPhysMater, 2024, 3(4): 470-480.
- [11] PALKA N, KAMINSKI K, MACIEJEWSKI M, et al. Automatic histogram-based defect detection in glass fibre reinforced polymer composites using terahertz time-domain spectroscopy reflection imaging [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 174: 107959.
- [12] PALKA N, KAMINSKI K, MACIEJEWSKI M, et al. Terahertz nondestructive testing of alumina-based ceramic ballistic protection armor[J]. Infrared Physics and Technology, 2024, 137: 105163.
- [13] HAKOBYAN D, HAMDI M, REDON O, et al. Non-destructive evaluation of ceramic porosity using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2022, 42(2): 525-533.
- [14] LIU Q H, WANG Q, GUO J S, et al. A Transformer-based neural network for automatic delamination characterization of quartz fiber-reinforced polymer curved structure using improved THz-TDS [J]. Composite Structures, 2024, 343: 118272.
- [15] 刘增华, 吴育衡, 王可心, 等. 基于太赫兹时域光谱的陶瓷基复合材料缺陷检测成像研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(14): 35-41.
- LIU Z H, WU Y H, WANG K X, et al. Research on defect detection imaging of ceramic matrix composites based on terahertz time-domain spectroscopy technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(14): 35-41.
- [16] LI R, YE D D, ZHANG Q K, et al. Nondestructive evaluation of thermal barrier coatings' porosity based on terahertz multi-feature fusion and a machine learning approach[J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(15): 8988.
- [17] NIDHEESH K B, AROLIVEETIL S, SANTHOSH K M C, et al. Nondestructive evaluation of cork phenolic-based aerospace structure using Terahertz time domain spectroscopy and imaging [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2024, 39(4): 905-922.
- [18] FOSODEDER P, PFLEGER M, RAHMAN K, et al. Fast terahertz reflection imaging for in-line detection of delaminations in glass fiber-reinforced polymers [J]. Sensors, 2025, 25(3): 851.
- [19] WANG ZH M, CHEN J J, XIN Y L, et al. Defect recognition in composite materials using terahertz spectral imaging with resnet18-SVM approach [J]. Materials, 2025, 18(11): 2444.
- [20] SHI Y, TONG CH X, LI Y, et al. Non-destructive evaluation of manufacturing defects in GFRP using cross-correlation method and enhanced terahertz imaging [J]. Science China Technological Sciences, 2025, 68(5): 1520204.
- [21] ZHAI M, LOCQUET A, CITRIN D S. Terahertz nondestructive layer thickness measurement and delamination characterization of GFRP laminates [J]. NDT and E International, 2024, 146: 103170.
- [22] 张瑾, 王洁, 沈雁, 等. 小波图像融合在太赫兹无损检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(12): 3684-3687.
- ZHANG J, WANG J, SHEN Y, et al. Application of wavelet image fusion in terahertz nondestructive testing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(12): 3684-3687.

作者简介

叶梓龙, 硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹与声学无损检测。

E-mail: 13832239569@163.com

周伟(通信作者), 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为特种设备与无损检测。

E-mail: zhouwei@126.com