

doi:10.3788/gzxb20174604.0412002

太赫兹无损检测的多特征参数神经网络分析技术

任姣姣^a, 李丽娟^a, 张丹丹^a, 乔晓利^b, 徐子鹏^a

(长春理工大学 a 光电工程学院 光电测控技术研究所; b 机电工程学院 长春 130022)

摘 要:提出一种基于太赫兹无损检测的多特征参数神经网络分析技术,用于分析耐高温复合材料的粘贴质量无损检测.采用抽片式方法设计了一种耐高温复合材料的脱粘缺陷样品,抽片厚度为 0.1 mm.采用太赫兹时域光谱无损检测技术对耐高温复合材料的多层脱粘缺陷进行了检测试验研究,对比了上下脱粘缺陷所对应的太赫兹时域波形及频谱信息的异同,针对性地建立了耐高温复合材料粘贴质量的上层脱粘参数、下层脱粘参数、频域吸收质心参数等多特征参数,将特征参数进行优化作为反向传播神经网络的输入并对其进行上下脱粘分类识别.通过对反向传播神经网络的训练测试,实现了耐高温复合材料上层脱粘 0.1 mm、下层脱粘 0.1 mm 的脱粘缺陷的识别.

关键词:光谱学;太赫兹时域光谱;神经网络;耐高温复合材料;无损检测;粘贴质量

中图分类号:O433.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)04-0412002-7

Multi-feature Parameter Neural Network Analysis Technique Based on Terahertz Nondestructive Testing

REN Jiao-jiao^a, LI Li-juan^a, ZHANG Dan-dan^a, QIAO Xiao-li^b, XU Zi-peng^a

(*a Institute of Optoelectronics Measurement & Control Technology, College of Opto-electronic Engineering;*
b College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A multi-feature parameter neural network analysis technique based on terahertz nondestructive testing for the analysis of the adhesion quality of the heat-resistant composites was proposed. A film (thickness is 0.1mm) extraction method was put forward to simulate the bonding defect of the heat-resistant composites. The terahertz time-domain spectroscopy nondestructive testing technology was used to detect the multilayer high temperature resistant composite bonding defects. Compared the similarities and differences of terahertz time-domain and the frequency domain information between the upper debond defect and the lower debond defect, the multi characteristic parameters were proposed for the adhesive quality, such as upper debond parameter, lower debond parameter and centroid absorption parameter for frequency domain. The characteristic parameters were optimized as the input of back propagation neural network to recognize the upper and the lower debond defects. Based on the back propagation neural network training test, the identification was realized for the 0.1mm thickness upper debond defect and the 0.1mm thickness lower debond defect.

Key words: Spectroscopy; Terahertz time-domain spectroscopy; Neural work; Heat-resistant composites; Nondestructive testing; Adhesion quality

OCIS Codes: 120.4290; 300.6495; 100.4996

0 引言

耐高温复合材料属于低密度、低热传导性、多孔、多层结构的非极性材料,传统的无损检测方法受制于其

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2015AA6036A)和国防技术基础科研(No. JSZL2015411C002)资助

第一作者:任姣姣(1988-),女,博士研究生,主要研究方向为太赫兹无损检测及应用. Email: zimengrenjiao@163.com

导师(通讯作者):李丽娟(1972-),女,教授,博导,主要研究方向为数字化装配、无损检测新技术. Email: custjuan@126.com

收稿日期:2016-10-24;录用日期:2016-12-26

<http://www.photon.ac.cn>

独特的材料性质,不能满足检测需求,使得耐高温复合材料的无损检测在很长一段时间内处于空白状态^[1].

太赫兹波指的是频率范围在 0.1~10 THz 之间的电磁波,可穿透纸、涂料、泡沫、塑料、玻璃等几乎所有的绝缘材料^[2]. 该特性使得复合材料的太赫兹无损检测的发展越来越快. 目前太赫兹无损检测主要分为连续太赫兹无损检测和太赫兹时域光谱(Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)无损检测,连续太赫兹波对被测材料只能获得其振幅信息,THz-TDS 技术是近年来在飞秒激光脉冲技术基础上发展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及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^[3-4]. 在耐高温复合材料太赫兹无损检测方面,国外采用连续太赫兹波检测方法实现了耐高温泡沫材料最小空气间隙 3mm 的缺陷检测^[5],国内首都师范大学利用 0.2THz 和 0.38THz 的连续太赫兹系统对绝热航天泡沫的人工缺陷进行了无损检测^[6]. 随着太赫兹技术的进步,目前除了耐高温复合材料,太赫兹无损检测技术被广泛应用在风电叶片、塑料、玻璃纤维增强材料等多种材料中^[7-10].

本文采用 THz-TDS 技术对耐高温复合材料脱粘的问题进行了深入研究,设计并制作了模拟上、下层脱粘缺陷实验样品,利用 THz-TDS 成像系统对其进行了检测,通过对所检测太赫兹波形时域、频域特征的提取来识别上、下粘接层脱粘缺陷.

1 实验

1.1 检测系统

实验中使用美国 API 公司的 THz-TDS 系统,主要工作原理如图 1. 其所采用的飞秒激光器为锁模钛蓝宝石飞秒激光器,产生的光脉冲中心波长为 810 nm,重复频率为 80 MHz,脉宽为 100 fs. 飞秒激光脉冲作为泵浦和探测光源,经分束镜后分成两束,大部分作为泵浦脉冲经过频率为 1.11 kHz 的斩波器斩波后照射在 InAs 晶片表面,激光斑点直径约 3 μm ,产生的太赫兹辐射在样品处光斑大小约为 1 mm. 最后,经电光取样测量获得时间分辨的太赫兹光谱信息. 该 TDS 系统的探测频谱宽度为 0.2~3 THz,频谱分辨率为 3.1 GHz,信噪比大于 70 dB.

1.2 样品制备

耐高温复合材料在与基体材料进行粘接时,考虑到其较脆的特点,增加缓冲垫(多为纤维编织结构)用于缓冲应力损伤. 因此,其与基体粘接检测主要包括两部分的检测,一部分是耐高温复合材料与缓冲垫之间的粘接层检测(上粘接层检测),另一部分是粘接完成后的耐高温复合材料-缓冲垫与基体之间的粘接层检测(下粘接层检测).

在超声无损检测中,常采用预埋聚四氟乙烯膜来模拟脱粘缺陷^[11-13]. 但是由于聚四氟乙烯膜与耐高温复合材料粘接剂在太赫兹波段的材料光学参数相近,无法沿用传统脱粘缺陷模拟方式. 本文采用预埋抽片的方法进行了模拟脱粘试块的制作,抽片厚度为 0.1 mm.

采用的耐高温复合材料几何尺寸为 60 mm \times 60 mm \times 50 mm,缓冲垫厚度为 2 mm. 图 2 为耐高温复合材料与缓冲垫粘接层(上粘接层)、耐高温复合材料-缓冲垫与粘接基体粘接层(下粘接层)预埋的对边边长为 20 mm 的等边三角形薄片区域分布

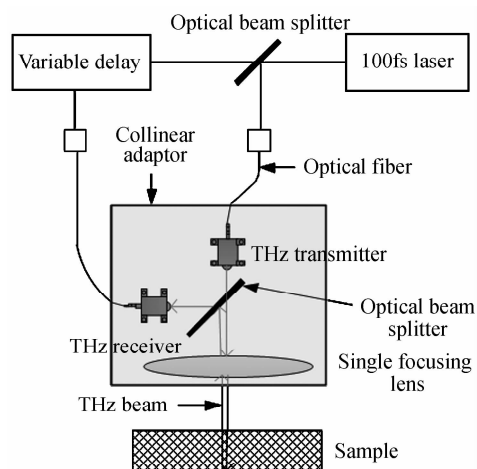


图 1 THz-TDS 原理示意图
Fig. 1 Principle of THz-TDS

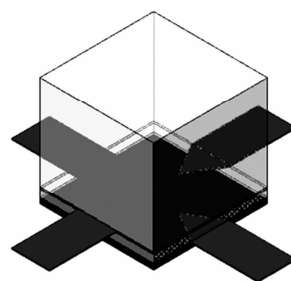


图 2 耐高温复合材料模拟脱粘样品缺陷示意图
Fig. 2 Bonding defect of sample simulated by heat-resistant composites

示意图.

2 理论建模

2.1 材料分析

耐高温复合材料粘接样品中所涉及到的三种原材料耐高温复合材料、缓冲垫、粘接剂及空气参考的反射式 THz-TDS 如图 3,图中太赫兹时域波形是通过将样品太赫兹波形与无样品太赫兹波形在 200 GHz 至 2 THz 进行傅里叶反卷积运算所得到的^[14]. 其中耐高温复合材料的厚度为 13.8 mm,粘接剂样块的厚度为 2 mm,缓冲垫厚度为 4 mm. 可看出耐高温复合材料较粘接剂的时间延迟较短,此外,由于缓冲垫属于纤维编织结构,其表面漫反射严重,在其 THz-TDS 中几乎观察不到上层反射信号. 图 4 为不同材料经过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)后的频域光谱,可以看出,三种材料在 0.1~0.6 THz 光谱范围内有明显吸收,且吸收频谱较为接近.

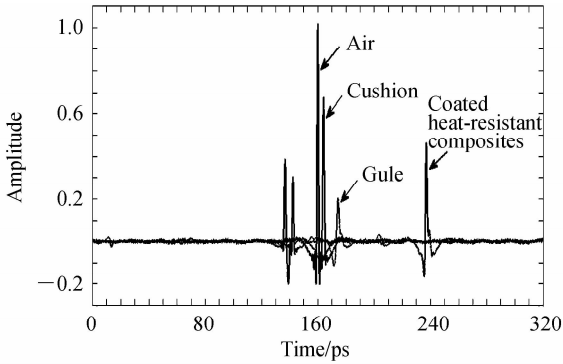


图 3 不同材料的反射式 THz-TDS
Fig. 3 Reflection THz-TDS of different materials

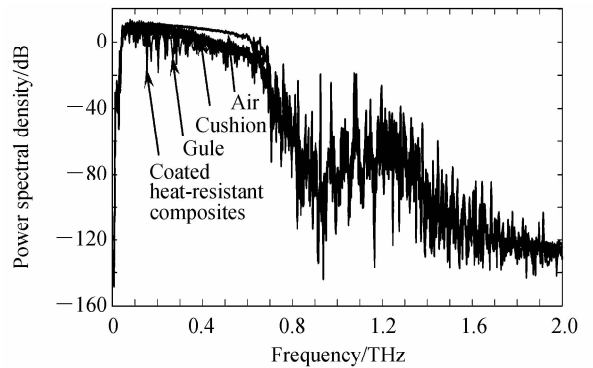


图 4 不同材料的反射式太赫兹频域光谱
Fig. 4 The reflection frequency spectrogram of different materials

图 5 为耐高温复合材料粘接样品正常粘接区域的反射式 THz-TDS,其中,峰 1 为耐高温复合材料下表面与上层粘接剂分界面;峰 2 为上层粘接剂与缓冲垫分界面;峰 3 为渗胶状态下产生的模糊分界面;峰 4 为缓冲垫与下层粘接剂分界面;峰 5 为下层粘接剂与粘接基体分界面,其他峰值为多次反射影响. 由于耐高温复合材料均匀性较差,采用固定阈值法对峰 1 和峰 5 特征的提取较为困难,本文通过提取太赫兹时域信号中的一阶包络、二阶包络特征,确定峰 1 和峰 5 所在位置. 图 6 为不同粘接区域所对应的太赫兹频谱.

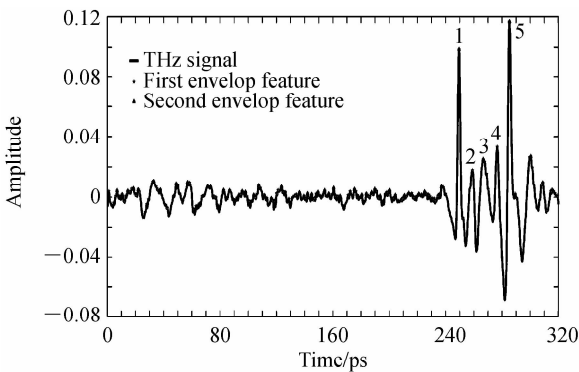


图 5 正常粘接区域的反射式太赫兹时域波形
Fig. 5 The reflection time domain spectrogram of normal bonding area

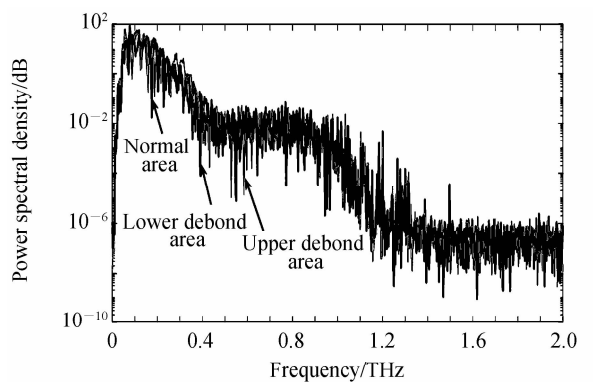


图 6 不同粘接区域的反射式太赫兹频域光谱
Fig. 6 The reflection frequency spectrogram of different areas

2.2 多值域特征提取

通过分析已知预制脱粘缺陷样品不同缺陷区域可知,不同粘接层的脱粘在时域波形上存在一定的差异,这种差异的物理意义便是太赫兹波在不同界面的多次反射. 缓冲垫属于纤维编织型材料,其质地较软、孔隙率大,由于粘接剂属于流体范畴,在粘接过程中存在粘接剂渗入的现象,这使得在耐高温复合材料粘接样品过程中,上层粘接剂与缓冲垫界面、缓冲垫与下层粘接剂界面变得模糊,导致检测到的太赫兹信号数据异常

复杂,只有耐高温复合材料与上层粘接剂界面、下层粘接剂与粘接基体界面的太赫兹信号容易分辨.因此,有必要对缺陷的时域、频域波形进行特征提取及分析,且这些特征有利于缺陷的智能识别.由于耐高温复合材料均匀性较差,采用固定阈值法对耐高温复合材料下层、粘接基体上层界面的提取较为困难,对样品进行 THz-TDS 系统检测,获得样品的太赫兹时域信号,常见的特征参数主要有:时域最大值 T_{\max} 、时域功率谱 T_{power} 、时域峰-峰值 $T_{\text{peak-to-peak}}$ 和特定频率振幅(相位) $F_{\text{amplitude}}$ 、频域功率积分 F_{power} 等^[15].在其基础上,针对性地提出了三个时域特征值、两个频域特征值,更加符合耐高温复合材料太赫兹脱粘缺陷检测.如图 6,不同粘接区域的太赫兹频谱特性差异较小,反而在时域上差异特征明显,因此,本文提出的特征值以时域特征居多.

1) 飞行时间差 $T_{\text{TOF,HRC,COM}}$

飞行时间差 $T_{\text{TOF,HRC,COM}}$ 表示耐高温复合材料底面与粘接基体的时间延迟,反映了上、下粘接层的缺陷及粘接剂均匀情况.其定义为

$$T_{\text{TOF,HRC,COM}} = T_{\text{COM},i} - T_{\text{HRC},i} \quad (1)$$

式中, $T_{\text{TOF,HRC,COM}}$ 为 i 位置处的飞行时间差, $T_{\text{COM},i}$ 为 i 位置处由粘接基体反射的太赫兹信号所对应的飞行时间,对应图 5 中的峰 5, $T_{\text{HRC},i}$ 是由耐高温复合材料底层反射的太赫兹信号所对应的飞行时间,对应图 5 中的峰 1.

2) 上层脱粘参数 $T_{\text{up-debond,HRC}}$

上层脱粘参数 $T_{\text{up-debond,HRC}}$ 表示耐高温复合材料底面与缓冲垫之间的脱粘状况.其定义为

$$T_{\text{up-debond,HRC}} = \frac{N \cdot (T_{\text{up-debond},i} - T_{\text{HRC},i})}{\sum_{i=1}^N (T_{\text{pad1},i} - T_{\text{HRC},i})} \quad (2)$$

其中,

$$T_{\text{up-debond},i} > V_{\text{up}} \mid T \in [T_{\text{HRC},i}, T_{\text{HRC},i} + \max(T_{\text{pad1},i} - T_{\text{HRC},i})] \quad (3)$$

$T_{\text{pad1},i}$ 为 i 位置处缓冲垫上层反射的太赫兹信号所对应的飞行时间, N 为所用无脱粘区域样本的数量,在 i 位置处 $T_{\text{up-debond},i}$ 定义为实际检测过程中,在区间 $[T_{\text{HRC},i}, T_{\text{HRC},i} + \max(T_{\text{pad1},i} - T_{\text{HRC},i})]$ 内幅值大于上层脱粘判定阈值 V_{up} 所对应的时间位置.在上层脱粘情况下,由于存在空气间隙,太赫兹波在该界面上会发生反射,对应的时间位置较正常粘接区域前移.此外,脱粘界面即胶-空气界面表面质量较好,其对应的幅值较高,而缓冲垫属于编织性材料,表面质量较差,其对应的幅值较低.上层脱粘判定阈值 V_{up} 为正常上层粘接界面所对应的幅值.

3) 下层脱粘参数 $T_{\text{down-debond,COM}}$

下层脱粘参数 $T_{\text{down-debond,COM}}$ 表示以粘接基体为基准的粘接基体与缓冲垫之间的脱粘状况.其定义为

$$T_{\text{down-debond,COM}} = \frac{N \cdot (T_{\text{COM},i} - T_{\text{down-debond,COM},i})}{\sum_{i=1}^N (T_{\text{COM},i} - T_{\text{pad2},i})} \quad (4)$$

其中,

$$T_{\text{down-debond,COM},i} > V_{\text{down}} \mid T \in [T_{\text{COM},i} - \max(T_{\text{COM},i} - T_{\text{pad2},i}), T_{\text{COM},i}] \quad (5)$$

在 i 位置处 $T_{\text{down-debond,COM},i}$ 定义为实际检测过程中在区间 $[T_{\text{COM},i} - \max(T_{\text{COM},i} - T_{\text{pad2},i}), T_{\text{COM},i}]$ 内幅值大于下层判定阈值 V_{down} 所对应的时间位置.在下层脱粘情况下,由于存在空气间隙,太赫兹波在该界面上会发生反射,其对应的时间位置较正常粘接区域前移.同样地,下层脱粘区域所对应的幅值较正常区域偏大.下层脱粘判定阈值 V_{down} 为正常下层粘接界面所对应的幅值.

4) 频域吸收平均参数 $F_{\text{average-absorption}}$

脉冲宽带太赫兹波具有一定的指纹性,其太赫兹光谱包含丰富的物理和化学信息,如分子的振动和转动光谱,以及分子间的相互作用如氢键和范德华力等在太赫兹波段均有很多特征峰,这些吸收特性是这些物质独一无二的指纹吸收谱,可以用于物质的识别.本文提出的频域吸收平均参数 $F_{\text{average-absorption}}$ 正是利用了其吸收特征峰特征,表示以多层介质频谱吸收平均幅值.其定义为

$$F_{\text{average-absorption},i} = \sum_{j=1}^m E_{i,j}(\omega_j) / m \quad (6)$$

式中, $E_{i,j}(\omega_j)$ 为 i 位置处太赫兹信号傅里叶变化的吸收频谱 ω_j 所对应的幅值, m 为一定频谱范围内吸收谱线的数量.

5) 频域吸收质心参数 $F_{\text{centroid-absorption}}$

频域吸收质心参数 $F_{\text{centroid-absorption}}$ 表示以多层介质频谱吸收质心参数. 其定义为

$$F_{\text{centroid-absorption},i} = \frac{\sum_{j=1}^m \omega_j E_{i,j}(\omega_j)}{\sum_{j=1}^m \omega_j} \quad (7)$$

2.3 识别算法

Rumelhart 和 McClelland 科学家小组在经过深入的研究与计算之后, 于 20 世纪八十年代提出了反向传播 (Back Propagation, BP) 神经网络. BP 网络是一种多层前馈网络, 其训练的方式是通过误差反向传播来进行的, 是目前应用最广泛的神经网络模型之一. 它是由非线性变换单元组成前馈网络, 网络模型如图 7 [16].

在图 7 的神经网络拓扑结构前向传播过程中, ω_{ih} 为网络输入层与隐含层之间的权值, i 为输入层所对应的节点, B_{N1} 为隐含层各个神经元的阈值, ω_{hj} 为网络隐含层与输出层之间的权值, j 为输出层所对应的节点, Q_{N1} 为输出层各个神经元的阈值, $f(\cdot)$ 为激活函数.

则隐含层第 $N1$ 个节点的输出 y_{N1} 的计算公式为

$$y_{N1} = f\left(\sum_{N1=1}^N \omega_{ih} x_{N1} + B_{N1}\right) \quad (8)$$

输出层第 $N1$ 个节点的输出 z_{N1} 的计算公式为

$$z_{N1} = f\left(\sum_{N1=1}^N \omega_{hj} y_{N1} + Q_{N1}\right) \quad (9)$$

误差反向传播过程中, 首先从输出层开始逐层计算各层节点的输出误差, 然后根据输出误差梯度下降法来调整各层之间的权值和阈值, 以使输出能够接近于期望输出值. 其中, 误差函数 E_p 的计算公式为

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^L (t_{pi} - O_{pi})^2 \quad (10)$$

式中, t_{pi} 为第 i 个节点的期望输出值, O_{pi} 为第 i 个节点的计算输出值.

可知误差函数是 2 层权值的函数, 因此通过调整权值可以使误差不断减小, 输出层权值和隐含层权值变化分别为

$$\omega_{ih} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \omega_{ih}} \quad (11)$$

$$\omega_{hj} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \omega_{hj}} \quad (12)$$

式中, $\eta \in (0, 1)$ 为比例系数, 反应训练中的学习效率.

利用输出层权值变化值和隐含层各神经元的输出来修正权值 ω_{hj} , 再利用隐含层权值变化值和输入层各神经元的输出修正权值 ω_{ih} , 最后判断误差函数是否满足要求.

神经网络技术用于缺陷智能识别的基本步骤为:

- 1) 建立缺陷模型. 计算出缺陷的特征值集合归一化后作为缺陷的判断标准;
- 2) 输入向量与输出向量. 输入向量为耐高温复合材料粘贴质量的太赫兹时域信号的多值域特征值. 以上层脱粘、下层脱粘、正常区域三种类型作为网络输出向量;
- 3) 构造神经网络样本. 由步骤 2) 可知一个样本包括一系列输入向量即待识别缺陷的特征参数指标, 和对应的一系列输出向量即识别出的缺陷类型;
- 4) 神经网络的训练. 采用预埋不同缺陷类型的样本, 使样本具有遍历性 (有限穷举), 通过特征参数进行

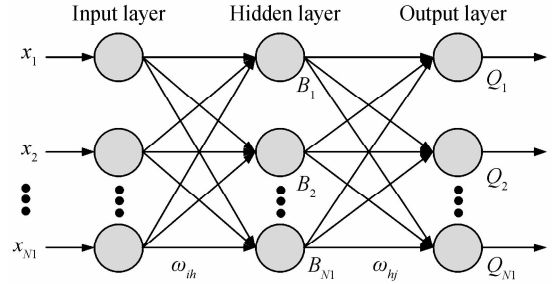


图 7 神经网络结构

Fig. 7 Neural network structure chart

BP 网络训练,达到一定的识别分类精度;

5) 神经网络的测试. 读入测试样本数据, 检验网络对缺陷的识别效果.

在时域分析、频域分析所提取的特征值的基础上, 对所有特征值进行评价优化, 确定了用于缺陷智能识别的最佳特征值子集.

3 结果与分析

3.1 特征优化分析

根据样品所设计的上、下层脱粘区域和正常区域的分布, 选取了各个区域中多组数据, 利用特征定义方式进行均值化处理, 得出如表 1 所示的各特征值的计算结果.

从表 1 可以看出, 飞行时间差、上层脱粘参数、下层脱粘参数、频域吸收平均参数、频域吸收质心参数具有一定的缺陷识别特征. 在神经网络智能识别算法中, 提取样品各处所测得的太赫兹信号中的这 5 个特征值作为输入样本集合, 进行上、下粘接层缺陷识别.

表 1 耐高温复合材料 THz-TDS 特征值

Table 1 THz-TDS feature values of heat-resistant composites bonding sample

Feature	The upper debond feature	The lower debond feature	No defect feature	
Time feature	$\overline{T_{tof}}$	22.8267	20.9219	24.2539
	$\overline{T_{max}}$	0.0895	0.0711	0.1382
	$\overline{T_{power}}$	0.0352	0.0295	0.0684
Frequency feature	$\overline{T_{up-debond,HRC}}$	0.6371	0.9167	0.9218
	$\overline{T_{down-debond,COM}}$	0.9238	0.382	0.9576
	$\overline{F_{power}}$	2.4632	2.6314	3.2316
Frequency feature	$\overline{F_{average-absorption}}$	11.5104	12.6423	13.5875
	$\overline{F_{centroid-absorption}}$	0.6337	0.8942	1.4327

3.3 神经网络智能识别成像结果及分析

利用神经网络算法, 以样品中设计缺陷的某些特定缺陷区域 THz-TDS 信号中提取出的特征值集合作为输入样本, 以无脱粘(1,0,0)、上层脱粘(0,1,0)和下层脱粘(0,0,1)为输出, 分别对样品上、下脱粘缺陷情况进行学习训练, 得到如图 8 所示结果.

图8中区域A为上层脱粘区域, 其与所涉及样品中上层脱粘区域吻合; 区域 B 为下层脱粘区域, 与预制样品相吻合; 区域 C 为正常粘接区域. 除了观察到下层脱粘区域外, 由于上层脱粘界面会引起太赫兹波的多次反射, 对下层脱粘智能识别有一定的影响. 在后续研究中可对多次反射现象进行影响分析, 寻找解决办法, 从而降低对检测结果的影响. 此外, 在样品制作过程中, 受到粘接工艺的影响, 粘接边缘区域确实存在下层脱粘状况, 检测结果与实际情况相符, 验证了利用神经网络智能识别技术对耐高温复合材料脱粘缺陷太赫兹无损检测的正确性和可行性.

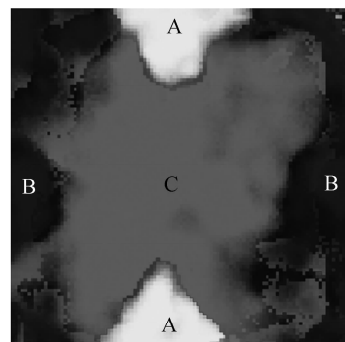


图 8 神经网络智能识别检测结果

Fig. 8 Neural network intelligent identification test results

4 结论

本文用 THz-TDS 系统对耐高温复合材料脱粘缺陷进行智能识别检测, 根据样品的太赫兹谱特性, 针对性地提出并优化了飞行时间差、上层脱粘参数、下层脱粘参数、频域吸收平均参数、频域吸收质心参数等 5 个时域及频域特征参数, 对上、下粘接层脱粘情况进行神经网络分析. 结果表明, 该方法对耐高温复合材料脱粘缺陷的检测比传统典型分析方法更具有优越性, 解决了太赫兹无损检测中传统算法的局限性. 并且, 通过优化多特征参数的耐高温复合材料粘贴质量太赫兹智能识别方法, 提高了太赫兹无损检测的可视化程度, 实现

了耐高温复合材料脱粘缺陷的智能识别.

参考文献

- [1] 杨光松. 损伤力学与复合材料损伤[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 117-120.
- [2] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 1,4.
- [3] HARTWICK T S, HODGES D T, BARKER D H, *et al.* Far infrared imagery[J]. *Applied Optics*, 1976, **15**(8): 1919-1922.
- [4] HU B B, ZHANG X C, AUSTON D H, *et al.* Free - space radiation from electro-optic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, **56**(6): 506-508.
- [5] KHARKOVSKY S, CASE J T, ZOUGHI R, *et al.* Millimeter wave detection of localized anomalies in the space shuttle external fuel tank insulating foam and acreage heat tiles[C]. *IEEE*, 2005: 1527-1530.
- [6] JIAO Yue-ying, ZHANG Cun-lin, ZHOU Yan. The research of nondestructive inspection of sprayed on foam insulation with continuous wave of terehertz[J]. *Nondestructive Testing*, 2008, **30**(10): 67-70.
焦月英, 张存林, 周燕. 航天绝热泡沫的连续亚毫米波检测[J]. *无损检测*, 2008, **30**(10): 67-70.
- [7] IM K H, HSU D K, CHIOU C P, *et al.* Terahertz wave approach and application on FRP composites[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, **2013**(22): 1-10.
- [8] PRZEMYSŁAW L, TOMASZ C. Terahertz detection and identification of defects in layered polymer composites and composite coatings[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2012, **28**(1): 1-16.
- [9] WALLACE V P, MACPHERSON E, ZEITLER J A, *et al.* Three-dimensional imaging of optically opaque materials using nonionizing terahertz radiation[J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science and Vision*, 2008, **25**(12): 3120-3133.
- [10] ZHANG Jin, SHI Chang-cheng, MA Yu-ting, *et al.* Spectroscopic study of terahertz reflection and transmission properties of carbon-fiber-reinforced plastic composites[J]. *Optical Engineering*, 2015, **54**(5): 1045-1048.
- [11] ZHANG Dong-mei, LIU Wei-ping, YU Guang, *et al.* Standard preparation of rezine-matrix composites structure for nondestructive inspection[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011, **20**(8): 74-77.
张冬梅, 刘卫平, 刘奎, 于光, 等. 树脂基复合材料无损检测标样制备的研究[J]. *航空制造技术*, 2011, **20**(8): 74-77.
- [12] ZHANG Nan-nan, GUO Xing-wang. Infrared NDT modeling of disbands in the insulator of solid rocket motors[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, **38**(8): 1-5, 11.
张南南, 郭兴旺. 固体火箭发动机绝热层脱粘的红外无损检测建模方法[J]. *无损检测*, 2016, **38**(8): 1-5, 11.
- [13] 李慧娟, 吴东流, 王俊涛, 等. 铝蒙皮蜂窝夹层结构的各种无损检测方法[J]. *无损探伤*, 2009, **33**(2): 9-12.
- [14] DORNEY T D, BARANIUK R G, MITTLEMAN D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, **18**(7): 1562-1571.
- [15] REN Jiao-jiao, ZHAO Duo, LI Li-juan. The coating curing properties study using terahertz time domain spectroscopy [C]. *SPIE*, 2015, 9677: 261-267.
- [16] 杨建刚. 人工神经网络实用教程[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001: 26-32.