

◇ 研究报告 ◇

多层结构中脱粘缺陷的超声检测方法

郑善朴^{1†} 陆铭慧¹ 王俊东² 罗艺¹ 董俊冬¹

(1 无损检测与光电传感技术及应用国家工程实验室(南昌航空大学) 南昌 330063)

(2 天津市交通科学研究院 天津 300399)

摘要 固体火箭发动机多层装药结构中的脱粘类型、位置和尺寸决定了其对整体安全性能构成的威胁程度。该文研究了多层结构中脱粘缺陷的超声检测方法,通过对不同脱粘缺陷超声脉冲回波的特征分析与统计,实现缺陷的定性、定位和定量。首先,采集含有多类脱粘缺陷的粘接结构的超声脉冲回波信号,分析信号中主能量波包所代表的声程,提取五种声程的波峰时刻和幅值作为特征值,组建已知脱粘类型训练样本并输入至 BP 神经网络,实现特征值域到类别域的非线性映射,即脱粘类型分类;其次,采用阈值法确定缺陷的界面位置;最后,提出分段线性插值-相关性定量法将待检测缺陷的定量结果缩小到 ± 2 mm 以内。该文利用 COMSOL 有限元仿真和实验操作验证了多层粘接结构中脱粘缺陷的定性、定位和定量方法的可行性和可靠性。

关键词 脱粘缺陷, BP 神经网络, 超声检测, 阈值定位, 线性插值

中图法分类号: TB332, TB52.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2019)01-0134-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.01.018

Ultrasonic testing method for debonding defects in multilayer structures

ZHENG Shanpu¹ LU Minghui¹ WANG Jundong² LUO Yi¹ DONG Jundong¹

(1 *National Engineering Laboratory for Nondestructive Testing and Photoelectric Sensing Technology and Applications, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China*)

(2 *Tianjin Institute of Transportation Science, Tianjin 300399, China*)

Abstract The type, location and size of the debonding defects in a multi-layer charge structure of a solid rocket motor determines its threat degree to overall safety performance. In this paper, the ultrasonic detection method of debonding defects in multilayer structure is studied. According to the analysis and statistics of ultrasonic pulse echoes of different debonding defects, the judge of type, position and area of defects is realized. Firstly, the ultrasonic pulse echo signals of the bonding structure containing multiple types of debonding defects are acquired, the sound paths represented by the main energy wave packet in the signal are analyzed, and the peak moments and amplitudes of the five sound paths are extracted as the eigenvalues to construct the known debonding defects' training samples and input the samples into the BP neural network to realize the nonlinear mapping from the eigenvalue domain to the category domain, equivalent to the classification of debonding defects. Secondly, the threshold method is used to determine the interface position of the defect. Finally, the segmented linear interpolation-correlation is proposed to reduce the quantitative result of defects to be detected to within ± 2 mm. In this paper, the feasibility and reliability of the judge method of type, position and area for debonding defects in multilayer bonded structures are verified by COMSOL finite element simulation and experimental operations.

Key words Debonding defect, BP neural network, Ultrasonic testing, Threshold positioning, Linear interpolation

2018-04-28 收稿; 2018-10-23 定稿

作者简介: 郑善朴 (1994-), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 研究方向: 超声无损检测。

† 通讯作者 E-mail: xin_toyu@163.com

0 引言

脱粘缺陷在固体火箭发动机装药结构中的位置、大小和类型是决定其危害程度的关键参数,对多层装药粘接结构中脱粘缺陷的无损检测是保证发动机安全、高性能工作的重中之重^[1-2]。随着大直径整体缠绕式复合材料逐渐代替高强度合金钢作为固体火箭发动机壳体成为国际主流趋势,装药结构粘接质量的无损检测技术也需与时俱进^[3]。超声检测技术的研发和应用程度远远小于较成熟的高精度工业CT技术和激光全息检测技术,但其成本低、无害的检测优势正是大直径发动机现场检测所需要的^[4]。脉冲反射法检测金属壳体装药结构时,金属产生屏蔽效应使声波能量聚集在金属层难以下传。因此,以往金属壳体装药结构的超声检测为基于板波诱发波法和聚焦探头双模式检测法的螺旋C扫成像^[5]。复合材料内部的结构复杂,衰减较大,不适合板波和横波的传播,因此选择单发单收的大功率接触型超声纵波垂直脉冲反射法对多层结构的脱粘缺陷进行检测。

超声脉冲反射法依靠声波在工件内的传播时间和回波确定缺陷位置和缺陷尺寸,但该技术缺少判定缺陷类型的信息源,至今为止未能实现缺陷定性的标准化,检测的准确与否很大程度上取决于探伤工作者的经验和素质。对固体火箭发动机装药结构的鼓包型、紧贴型和斑点型脱粘缺陷进行检测分类可改进其制作工艺和贮存条件^[6-7]。本文提出脱粘缺陷的超声定性、定位和定量检测方法,并通过Comsol仿真和实验验证各方法的准确性和可行性。

1 声波在不连续多层介质中的传播规律

图1为声波在不连续多层介质中的传播图,一束直径 S 、声压 P_r 的平面波垂直入射至界面1含不连续区域(直径 A)的多层介质中。依据声波在异质界面的声压分配规律,两侧介质的声阻抗 Z_i 决定了声波在异质界面上的透射率 T_{ij} 和反射率 F_{ij} 为

$$T_{ij} = \frac{2Z_j}{Z_i + Z_j}, \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (1)$$

$$F_{ij} = \frac{Z_j - Z_i}{Z_i + Z_j}, \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (2)$$

假设不连续区域的声阻抗远小于两侧介质,则声波入射到介质与不连续区域的界面几乎全反射。

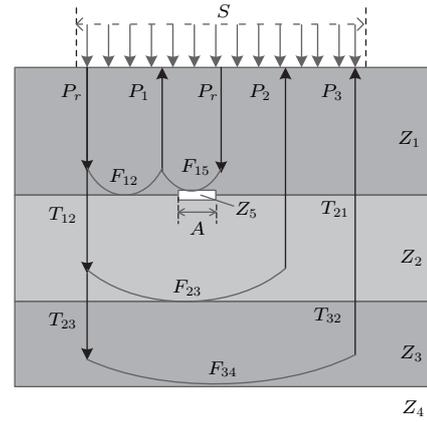


图1 声波在不连续多层介质中的传播图

Fig. 1 Propagation of ultrasonic waves in discontinuous multilayer media

结合介质的衰减系数 α_i 可求出声波的界面 i 反射声压 P_j 分别为

$$P_1 = \left(\left(1 - \frac{A}{S}\right) F_{12} + \frac{A}{S} F_{15} \right) P_r \alpha_1^2, \quad (3)$$

$$P_2 = \left(1 - \frac{A}{S}\right) P_r T_{12} F_{23} T_{21} \alpha_1^2 \alpha_2^2, \quad (4)$$

$$P_3 = \left(1 - \frac{A}{S}\right) P_r T_{12} T_{23} F_{34} T_{32} T_{21} \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2. \quad (5)$$

同理可知,当不连续区域位于界面2时,界面 i 反射声压 P_j 为

$$P_1 = P_r \alpha_1^2 F_{12}, \quad (6)$$

$$P_2 = \left(\left(1 - \frac{A}{F}\right) F_{23} + \frac{A}{F} F_{25} \right) P_r \alpha_1^2 \alpha_2^2 T_{12} T_{21}, \quad (7)$$

$$P_3 = \left(1 - \frac{A}{S}\right) P_r T_{12} T_{23} F_{34} T_{32} T_{21} \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2. \quad (8)$$

由以上公式可知,理想情况下,平面波入射至含有不连续区域的多层介质中,相同尺寸、不同深度的不连续区域对整体底面回波 P_3 影响不变;返回的界面 i 反射声波 P_j 与不连续区域的面积、位置有关,因此,可作为不连续区域的定性和定量依据。

2 BP神经网络在分类中的应用

多层粘接结构成型复杂,脱粘类型众多,超声脉冲反射信号与脱粘类别之间存在着极为复杂的非线性关系,且不同脱粘类型的信号之间具有高度相似性、模糊性,很难建立判定脱粘类型的标准。针对脱粘类型的分类困难,可利用BP(Back propagation)神经网络区分具有模糊边界的类别。BP神经网络是一种按误差反向传播算法训练的多层前馈神经网络,其可利用函数逼近功能来逼近分类边界,

实现特征域到类别域的非线性映射。BP神经网络模型分类为两部分,一部分为输入数据,由输入层经隐含层传到输出层,每层结果只向下传播;另一部分为当输出层结果不理想时,通过反向传播误差值来修改各层权值和阈值直至得到期望的结果。BP神经网络分类流程图如图2所示。

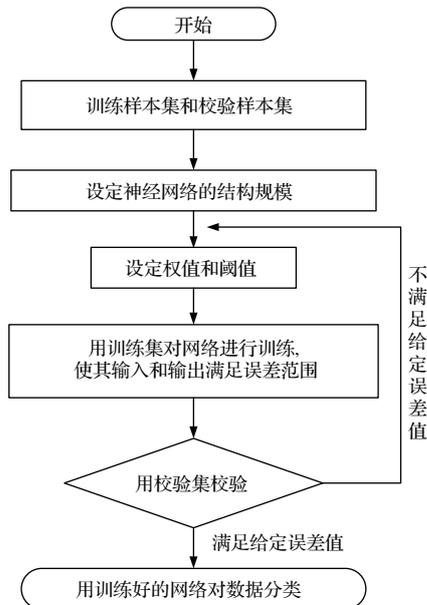


图2 BP神经网络分类流程图

Fig. 2 Classification flow chart of BP neural network

首先将已知脱粘类型的特征值组成的训练样本集和已知类型标号组成的校验样本集输入网络,根据输入数据和类型的数量设定神经网络的结构模型,分类标号结果作为输出;其次设定输入层、隐含层和输出层之间的初始权值和层内节点的阈值,通过梯度下降算法为学习原则反复迭代处理训练样本集实现网络的训练,将样本的分类结果与校验样本集内的分类标号对比进行学习。若校验结果不能满足误差值,则反复地反向修改样本权值和阈值、训练网络,直到分类结果与已知类型之间的误差到达要求时学习过程终止[8-11]。

3 脱粘缺陷超声检测的COMSOL仿真

3.1 仿真建模及特征值的提取

通过COMSOL有限元仿真软件中以弹性介质中的波动方程为基础的“固体力学(弹性波)”物理场建立含三种脱粘缺陷的复合材料壳体/橡胶绝热层/橡胶衬层三层粘接结构的二维各向同性仿真模型,各层材料属性如表1所示。

表1 仿真建模的材料参数

Table 1 Material parameters for simulation modeling

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纵波声速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
复合材料	1500	2830	7.591	0.348
橡胶	1352	1440	1.430	0.39
胶黏剂	1250	1850	2.560	0.36
空气	1.293	344	0.000153	0
水	1000	1450	0.00210	0.5

建立三种脱粘缺陷仿真模型,每种类型的界面1、界面2各设置5 mm、10 mm、15 mm、30 mm 4个长度的脱粘,总共24个模型。图3为含界面1长度为10 mm的鼓包型、紧贴型、斑点型脱粘缺陷的二维建模示意图。

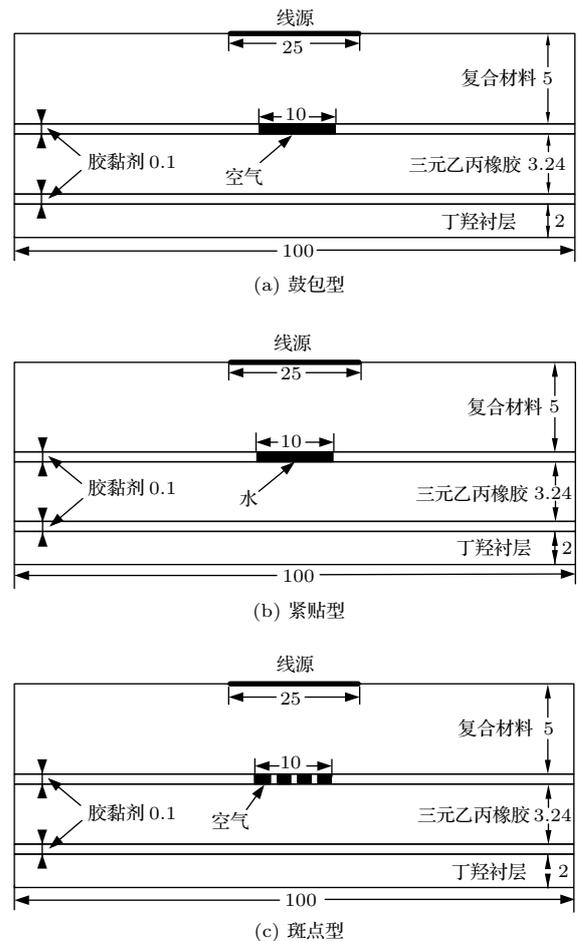


图3 含三种脱粘缺陷的二维建模示意图(单位:mm)
Fig. 3 Schematic diagram of two-dimensional modeling with three types of debonding defects(Unit: mm)

鼓包型脱粘是粘接层中的溶剂在高温硫化过程中挥发而造成的气体空间,通过图3(a)所示空气来模拟;紧贴型脱粘是粘接面上的污染物阻碍胶黏剂活性基团的扩散和渗透造成的极易扩展为分离脱粘的假性紧贴粘接,利用图3(b)所示液体水代替;斑点型脱粘是胶黏剂涂覆不均或异物掺杂造成的不连续群状脱粘,利用图3(c)所示胶黏剂和气体交叉连接代替^[12]。模型中激励线源长度为25 mm,加载到与缺陷同轴的模型上边缘。固体力学模块中利用“指定位移”代替超声激励,激励方程为经汉宁窗调制的正弦脉冲函数:

$$s(t) = (1 - \cos(2\pi ft)) \sin(2\pi ft)[\text{mm}], \quad (9)$$

式(9)中:超声脉冲的中心频率 f 设为1 MHz,激励时长 t 设为1 μs 的单个脉冲波。为获取更精准的结果,以材料中声波波长的十分之一作为划分网格最大单元尺寸的原则;选择“瞬态”求解器研究时域内声波动态传播过程,设置求解时间大于整体底面回波时长的2倍——25 μs ;根据划分最小网格边长和材料最大纵波波速可得出0.05 μs 为合适的求解步长^[13];经计算后,可将声波在25 μs 内结构中的位移求解结果以二维云图或一维点图的形式显示;由于该软件无法实现收发同源,因此,在激励线源正下方0.05 mm处设置同样长度的线段作为接收换能器。以相同位置、尺寸、不同类型的脱粘模型中25 μs 内接收线段的位移平均值为纵坐标画出脉冲反射回波的一维点图如图4所示。

图4中可见三种回波的始波重合,始波之后有多个明显波包,其波峰的时刻和幅值随着脱粘类型

呈现出微小的差异如幅值浮动、时刻偏移,此差异由脱粘类型的不同造成,因此波峰a~e的时刻、幅值信息成为判断缺陷类型的信息源。由仿真软件中二维云图的分帧绘图功能,根据波峰时刻值确定组成回波的声程如图5所示。其中需要注意的是,声波经过界面时均存在反射和透射现象,体现在回波中为多种波包,但部分回波的幅值与主能量相比十分微小且难以判别,因此图5为回波的主能量声程,未表示出每次透射界面时的反射现象。

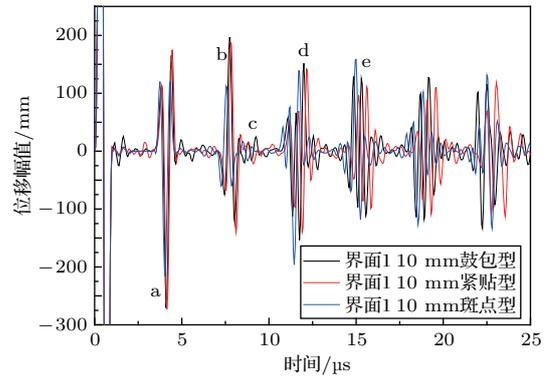


图4 良好粘接仿真模型脉冲反射回波

Fig. 4 Pulse echo of good bonding simulation model

五种声程均由声波主能量在粘接界面的反射和透射组成,不同程度地反映着粘接界面的信息,彼此相互制约并呈现一种非线性映射关系。界面存在脱粘缺陷时,不同脱粘类型必然存在各自的波峰变化机制,但具有分类模糊性。结合声波在多层不连续介质中的传播规律,确定将五种声程的波峰时刻、幅值作为区分脱粘类型的特征值。

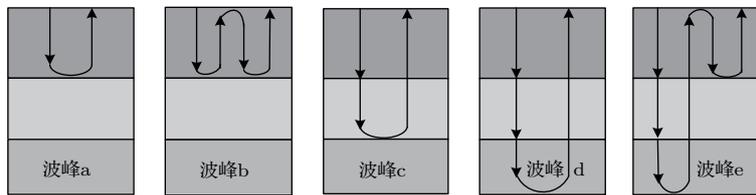


图5 回波的主能量声程

Fig. 5 Path of the echo's main energy

3.2 BP神经网络的脱粘分类

由仿真软件得到三类材料相同的含已知脱粘缺陷和待测缺陷结构中的脉冲反射信号,同类已知脱粘有八种不同位置和尺寸的缺陷。图6为三层BP神经网络的脱粘缺陷分类步骤,提取接收线段

上位移平均值一维点图中5个波峰的时刻和幅值作为特征值,某些回波中的部分波峰已经消失,取前5个波峰的时刻和幅值,由此组成矩阵为 24×10 的已知脱粘缺陷训练样本集,三类脱粘类型标号组成校验样本集。输入层神经元节点数 I 为特征值

10, 输出层神经元节点数 O 为脱粘类型三, 当BP神经网络作为分类器时, 隐层神经元节点数遵循公式 $Y = (I + O)^{0.5} + \eta (\eta = 1 \sim 10)$, 因此 Y 取 4~13 中的数, 经多次调整最终确定隐层节点数为 5^[14-15], 设定网络学习率为 0.5。样品集经过归一化预处理后输入BP神经网络进行训练和自学习, 网络输出样本分类, 根据结果与实际类型的误差函数反复调整神经网络的权值、阈值, 直到满足误差小于 1×10^{-5} 或迭代次数大于 20 的条件, 则BP神经网络训练完毕; 提取待测脱粘缺陷特征值, 归一化后输入至训练完毕的神经网络, 通过分析待测缺陷特征值与训练样本集特征值的关联度, 由阈值函数判定分类结果并输出, 实现待测试块的分类。图7为12个待测缺陷的BP神经网络分类结果与实际类型的对比图, 三类缺陷的分类结果全部正确, 证明了经过训练的三层BP神经网络脱粘分类方法用于对未知脱粘类型分类的可行性和准确性。

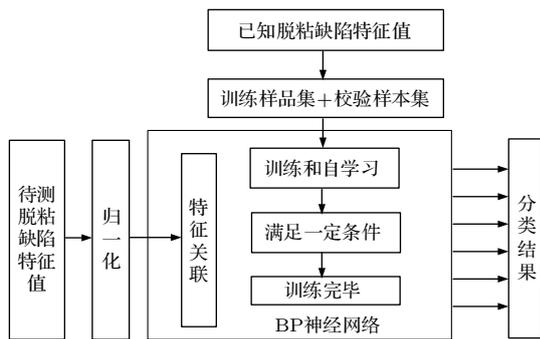


图6 基于BP神经网络的脱粘缺陷分类步骤
Fig. 6 Classification steps of debonding defects based on BP neural network

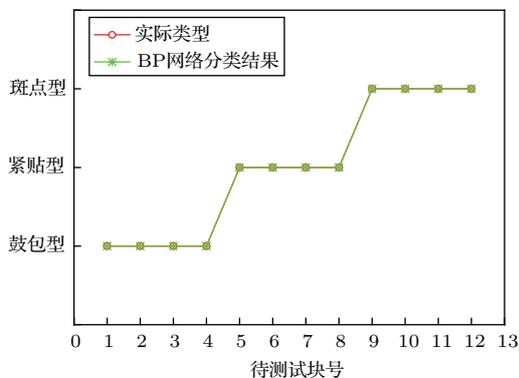


图7 BP网络分类结果及实际类型对比图
Fig. 7 Comparison of BP network classification results and actual types

3.3 脱粘缺陷界面位置、尺寸的识别

由5个波峰的声程可知波峰a、b对界面1脱粘缺陷的敏感度强于界面2, 以良好粘接波形的为基准, 计算24个已知脱粘缺陷与良好粘接回波中a、b峰值的误差平方根如图8所示。

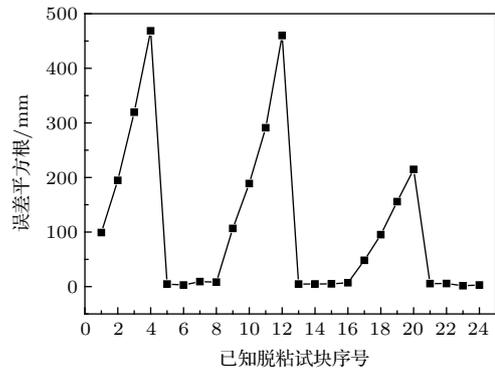


图8 待测与良好粘接试块波形a、b峰值的误差平方根

Fig. 8 Standard deviation of the a and b peaks of the waveform to be tested and good adhesion test block

图8显示, 某些误差平方根平稳且数值相对较小, 另一些波动较大且数值远远大于平稳误差平方根。对比实际脱粘类型可知较小的误差平方根来自含界面2脱粘缺陷的试块, 基于此原理可得出判断缺陷界面位置的阈值 f 为

$$f = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sqrt{(a_i - a_0)^2 + (b_i - b_0)^2}, \quad (10)$$

式(10)中: m 为标准差较小的脱粘试块个数; a_0 、 b_0 为良好粘接回波中的a、b波峰值; a_i 、 b_i 为第 i 个含缺陷回波中的a、b波峰值; 当含缺陷回波与良好粘接回波的a、b波峰值误差平方根大于 f 时, 缺陷位于粘接界面1, 反之位于粘接界面2。

确定了待测缺陷的种类和界面位置后, 可挑选出4个与待测缺陷种类、位置相同, 尺寸不同的样本。缺陷尺寸为30 mm与缺陷大于等于线源尺寸25 mm时的声波都集中在第一层材料中, 前者的回波可以代替后者。结合良好粘接样本, 共有缺陷尺寸为0 mm、5 mm、10 mm、15 mm和25 mm的样本特征值数据, 以鼓包型界面1脱粘缺陷为例, 其5个样本的5个波峰值折线图如图9所示。

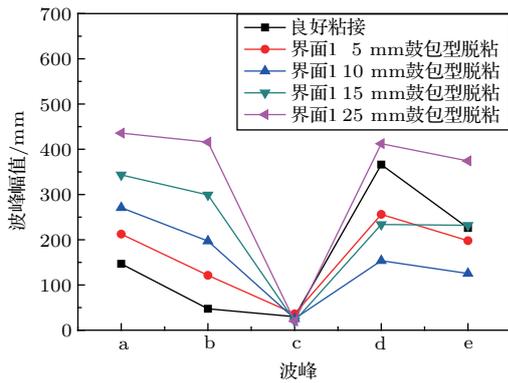


图9 5个样本的波峰值折线图

Fig. 9 Peak line diagram of five samples

图9中，横坐标为波峰类型，纵坐标为波峰峰值。a、b波的幅值随脱粘尺寸的增加而有规律地增加，其他幅值则没有明显的规律。在不同缺陷回波的相同峰值之间进行4、4、4、9的线性插值，形成精确到1 mm缺陷尺寸的波峰特征值组。将待测缺陷波峰值与插值后26组波峰值进行相关性分析，以最大相关系数为标准确定待测缺陷尺寸，实现精确到1 mm的缺陷定量检测。12个待测试块的定位、定量检测结果与实际缺陷信息的对比如图10所示。

由图10可知，根据阈值法检测的脱粘缺陷界面位置全部正确，而部分尺寸存在着最大2 mm的偏差且全部出现在15 mm以上的脱粘缺陷中，是由于15 mm到25 mm之间插值较多而引起的插值组之间的相似性较大。综上所述，阈值法和线性插值-相关性定量法可分别实现精确的缺陷定位和误差在2 mm以内的尺寸检测。

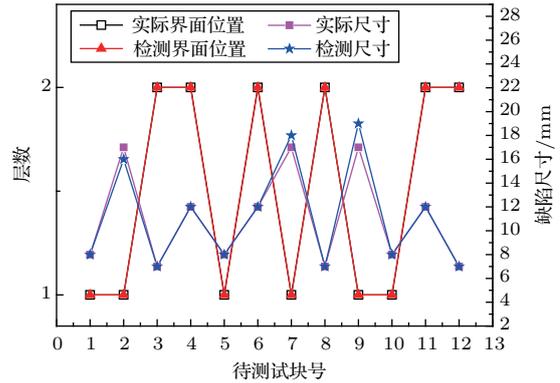


图10 待测试块中脱粘缺陷的定位、定量结果与实际对比

Fig. 10 Classification and quantitative results of defects in the block to be tested and actual comparison

4 脱粘缺陷检测的实验验证

设计三层粘接试件，第一层为中航工业哈尔滨飞机工业集团提供的碳纤维正交铺层复合材料板，采用树脂传递模塑成型工艺制作，铺层数为8，环氧树脂注射压力为0.2 MPa~0.4 MPa。下两层为三元乙丙橡胶板，三层之间通过环氧树脂A/B胶粘接，常温下加压固化使各层之间紧密贴合，固化后的胶层平均厚度为0.27 mm。利用材料通孔模拟鼓包型脱粘，通过内置聚四氟乙烯薄膜模拟紧贴型脱粘，利用密集通孔模拟斑点型脱粘^[15]，制作含缺陷的三种试块尺寸图如图11所示，其中图11(a)为鼓包型和紧贴型脱粘试块的尺寸图，图11(b)为斑点型脱粘试块尺寸图。

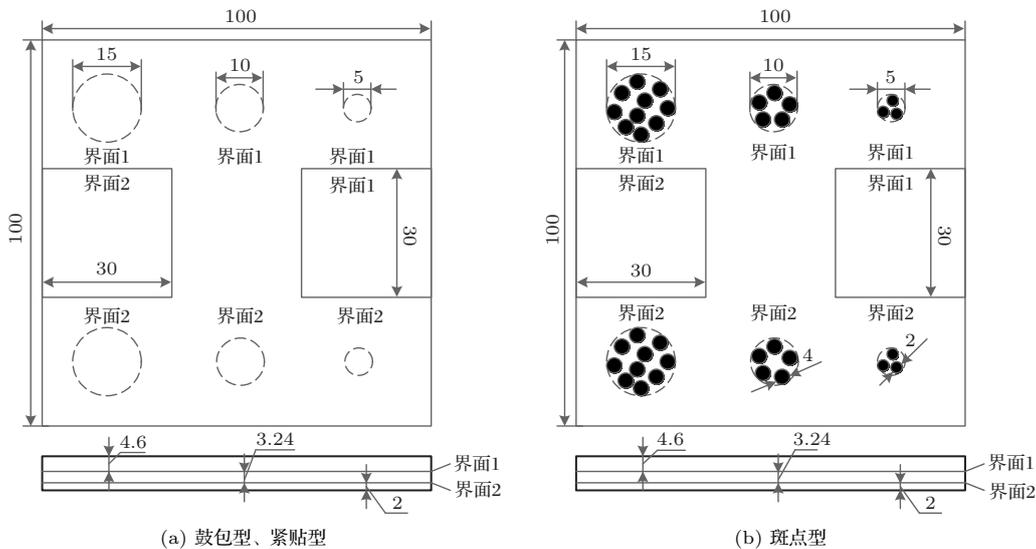


图11 脱粘试块尺寸图(单位:mm)

Fig. 11 Debonding test block size chart (Unit: mm)

使用直径为25 mm、中心频率为1 MHz的超声换能器。设定超声脉冲发射/接收仪为400 V电压激励。为了提高声波传输效率,对比多种耦合剂在相同条件下的耦合效果可知,经蜂蜜耦合的声波幅值大于机油、医用耦合剂,约5.2%。这是由于蜂蜜的声阻抗最大且黏稠,具有吸附力,既可以耦合声波又可以固定探头,因此选择蜂蜜作为耦合剂。回波信号以100 MHz的采样频率存入工控机并通过上位机软件实时采集。每个试块有9个检测点,每个检测点处检测10次求取平均值作为最终采集波形,利用Matlab软件提取已知脱粘缺陷的脉冲反射回波并自动保存五种声程对应波峰的时刻、幅值,组建已知脱粘缺陷样品集。输入至BP神经网络训练直到满足条件。图12为基于超声脉冲反射法的脱粘缺陷定性、定位和定量超声检测方法。

将待测试块的脉冲反射回波输入至计算机,经Matlab平台编写的程序自动提取特征值,输入至已训练完毕的BP神经网络即可得到缺陷类型。

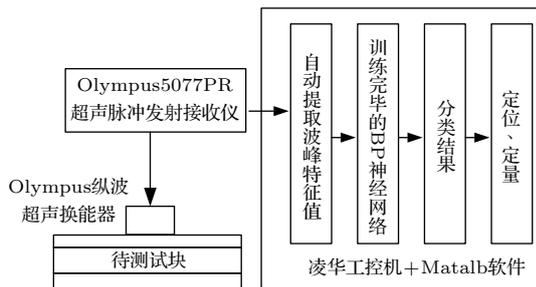


图12 基于超声脉冲反射法的脱粘缺陷超声检测方法

Fig. 12 Ultrasonic detection method for debonding defects based on ultrasonic pulse echo method

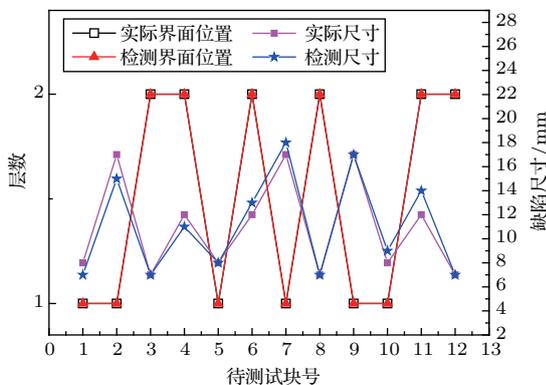


图13 脱粘缺陷定位、定量检测结果

Fig. 13 Test results of debonding defect location and quantitative

经过与实际缺陷类型的对比可知,缺陷分类全部正确。根据阈值法和线性插值-相关性定量法确定出缺陷的界面位置和检测尺寸,检测结果如图13所示。

图13表明,实验对于待测试块的界面位置检测准确率较高,而定量检测存在一些误差,误差最大波动尺寸在2 mm以内。因此,将待检测缺陷的尺寸定量结果缩小到 ± 2 mm的范围内,说明本文提取的波峰特征值很好地表征了检测信号,所利用的BP神经网络分类具有较好的性能。

5 结论

(1) 本文研究了多层结构中脱粘缺陷的超声检测方法,通过对不同脱粘缺陷超声脉冲回波的特征分析与统计,实现缺陷的定性、定位和定量,并利用COMSOL有限元仿真和实验操作验证了所提方法的可行性和可靠性。

(2) 基于BP神经网络从特征域到类别域的非线性映射功能,结合脉冲反射回波的特征值,可构建脱粘缺陷分类网络,分类结果证明了特征值选择的正确性和BP分类算法应用于脱粘缺陷定性的可行性。

(3) 波峰a、b的声程类型决定了其幅值对界面1脱粘更敏感,通过提出的阈值可准确实现待测缺陷的界面定位,而线性插值-相关性定量法可将待测缺陷的尺寸定量结果缩小到 ± 2 mm以内。

参 考 文 献

- [1] 孙得川, 权恩, 曹梦成. 超声波实时测量技术在固体火箭发动机中的应用[J]. 兵工学报, 2016, 37(11): 1969-1975.
Sun Dechuan, Quan En, Cao Mengcheng. Application of ultrasonic real-time measurement technology in solid rocket engine[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(11): 1969-1975.
- [2] 朱敏, 于光辉, 卢洪义, 等. 固体火箭发动机装药缺陷特征及危害性影响分析[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(3): 95-97.
Zhu Min, Yu Guanghui, Lu Hongyi, et al. Characters and hazard analysis of charge defects in solid rocket motor[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(3): 95-97.
- [3] 李正义, 陈刚. 玻璃纤维缠绕壳体在固体火箭发动机一二级上的应用研究[J]. 航天制造技术, 2011(1): 49-52.
Li Zhengyi, Chen Gang. Application of glass fiber winding shell in first and second stage solid rocket motor[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(1): 49-52.

- [4] 唐盛明, 齐子诚, 刘子瑜, 等. 电子束焊缝超声波 C 扫描与工业 CT 检测方法测试结果比较 [J]. 无损检测, 2014, 36(10): 49-52.
Tang Shengming, Qi Zicheng, Liu Ziyu, et al. Comparison of test method between ultrasonic C-scan and industrial CT in electron beam welding testing[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(10): 49-52.
- [5] 李建文, 王增勇, 汤光平. 金属壳体粘接结构件的超声检测 [J]. 无损检测, 2010, 32(4): 283-285.
Li Jianwen, Wang Zengyong, Tang Guangping. The ultrasonic testing of the metal shell bonds[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(4): 283-285.
- [6] 艾春安, 蔡堃, 吴安法. 声-超声技术在固体火箭发动机无损检测中的应用 [C]//中国宇航学会固体火箭推进 24 届年会, 2007.
- [7] 贾卫东, 周建, 刘亚冰, 等. 长期贮存固体火箭发动机界面脱粘安全性研究 [J]. 战术导弹技术, 2013(5): 101-106.
Jia Weidong, Zhou Jian, Liu Yabing, et al. Research on the safety of long term storage solid rocket motor with debonded layer[J]. Tactical Missile Technology, 2013(5): 101-106.
- [8] 詹映, 罗华平, 彭云发, 等. BP 神经网络南疆红枣颜色分级方法的研究 [J]. 食品工业, 2015, 36(1): 165-167.
Zhan Ying, Lou Huaping, Peng Yunfa, et al. Research of the BP artificial neural network in southern jujube color classification method[J]. Food Industry, 2015, 36(1): 165-167.
- [9] 郭少文, 赵其华, 张群, 等. BP 神经网络在岩体质量分级中的应用 [J]. 人民黄河, 2015, 37(1): 111-114, 118.
Guo Shaowen, Zhao Qihua, Zhang Qun, et al. Application of BP artificial neural network in rock mass quality classification[J]. Yellow River, 2015, 37(1): 111-114, 118.
- [10] 韦鹏宇, 潘福成, 李帅. 改进人工蜂群优化 BP 神经网络的分类研究 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(10): 158-163.
Wei Pengyu, Pan Fucheng, Li Shuai. Study on classification of improved artificial bee colony algorithm to optimization of BP neural network[J]. Computer Engineering & Applications, 2018, 54(10): 158-163.
- [11] Raju P, Rao B P, Rao V M. Gray wolf optimization-based artificial neural network for classification of kidney images[J]. Journal of Circuits Systems & Computers, 2018, 27(14): 1850231.
- [12] 艾春安, 曾一平, 李剑, 等. 基于功率谱形心 SWF 的 SRM 复合材料壳体脱粘缺陷识别方法 [J]. 固体火箭技术, 2012, 35(6): 833-837.
Ai Chun'an, Zeng Yiping, Li Jian, et al. Debonding defect identification method of SRM composite shell based on the power spectral centroid of SWF[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(6): 833-837.
- [13] 戴永. 基于激光超声检测金属材料表面缺陷的数值模拟 [D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- [14] 王嵘冰, 徐红艳, 李波, 等. BP 神经网络隐含层节点数确定方法研究 [J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(4): 31-35.
Wang Rongbing, Xu Hongyan, Li Bo, et al. Research on method of determining hidden layer nodes in BP neural network[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(4): 31-35.
- [15] 许鑫. 复合材料脱粘的红外无损检测及数值模拟 [J]. 检测技术, 2014(3): 54-58.
Xu Xin. Infrared nondestructive testing of composites debonding defects and numerical simulation[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(3): 54-58.