

复合缺陷电磁-声一体化检测方法的可靠性评估*

段志荣^{1,2} 张晓明¹ 井德强¹ 杨淑言² 黄磊³ 张鸿博³ 李亮³ 解社娟^{2**} 陈振茂²

(¹ 陕西省特种设备检验检测研究院, 西安, 710048)

(² 复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室, 陕西省无损检测与结构完整性评价工程技术中心,

西安交通大学航天航空学院, 西安, 710049)(³ 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 西安, 710077)

摘要 金属结构广泛应用于现代工业的各个领域, 在其制造和服役过程中会产生各种复杂缺陷, 例如金属结构的表面和底部都出现缺陷的复合缺陷情况, 这严重影响到金属结构的力学性能和使用寿命. 使用单一的检测方法难以满足实际检测需求, 而两种或多种检无损伤方法实施检测工作存在检测效率低、成本高等问题. 为解决这一难题, 本文开发了一种新型电磁-声一体化检测方法(脉冲涡流-电磁超声复合检测方法), 并基于检出概率理论重点对所提方法的检测能力进行深入评估. 首先针对铝合金试件同时存在表面裂纹和底部减薄缺陷的复合缺陷情况开发了脉冲涡流-电磁超声一体化检测方法的数值计算方法和实验系统, 并基于频谱分析理论研究复合信号的分离方法. 其次根据概率与统计学基本原理建立了检出概率的数学模型, 并通过数值模拟结果和实验结果建立了复合缺陷尺寸的信号特征量数据库. 最后对信号特征量数据库进行信号统计分析, 并根据建立的检出概率模型对表面裂纹和底部减薄缺陷的尺寸参数进行检出概率分析, 确定脉冲涡流-电磁超声复合检测方法的最小可检尺寸.

关键词 复合缺陷, 电磁-声一体化检测, 检出概率

DOI: 10. 19636/j. cnki. cjsm42-1250/o3. 2024. 038

0 引言

金属结构广泛应用于航空航天、能源化工等重工业领域, 但在其结构件的制作、结构的成型和服役等各个阶段, 材料内部都可能产生各种各样的缺陷. 这些缺陷通常会随时间历程而扩展, 势必会影响金属结构的力学性能和整体完整性^[1-3]. 因此, 对金属结构进行无损检测和评价具有重要意义. 由于电磁无损检测方法具有非接触、检测效率高、信号处理方便等优点, 是一种极其重要的缺陷无损检测方法^[4,5]. 常规电磁无损检测方法有涡流检测/脉冲涡流检测、漏磁检测、电磁超声检测等, 各有优缺点^[6-12].

随着现代工业的发展, 各种复杂的检测环境或检测对象层出不穷, 例如金属结构同时存在表面缺陷和底部缺陷, 这对金属结构的质量检验提出了更

高的要求. 面对这种复合缺陷, 单一的电磁检测方法难以满足所有要求, 需要开发多种电磁检测方法组合的复合电磁检测方法. 由于复合电磁检测方法是多种常规电磁检测方法的有机融合, 可以实现各种电磁检测方法的优势互补, 从而实现对复合缺陷的全面检测与综合评估. 因此, 开发新型复合电磁检测方法是现代工业质量控制复杂需求的重要保障.

目前, 对于复合电磁无损检测方法, 国外学者进行了大量研究. 例如, 德国 Rainer Pohl 等学者同时使用超声检测方法和涡流检测方法于火车检测系统中, 用超声检测火车的车轮, 用涡流检测导轨, 以达到对火车系统的全面质量控制^[13]. 美国 Missouri-Rolla 大学、波音公司和空军研究所的研究人员应用微波和涡流两种检测方法, 对飞机铆接多层结构中的腐蚀缺陷进行检测^[14]. 日本 Ryoichi Urayama 等学者提出了一种新型的结合电磁超声探头和涡流探

* 国家重点研发计划项目(2022YFC3005001, 2023YFF0615200), 国家自然科学基金项目 NSAF(No. U2130206)和国家自然科学基金项目 NSFC(No. 12222207)资助.

2024-09-02 收到修改稿, 2024-09-05 网络首发.

** 通讯作者. E-mail: xiesj2014@mail. xjtu. edu. cn.

头的双传感器结构,在高温环境下监测管道壁厚的减薄情况^[15].近年,复合电磁无损检测方法受到国内学者的高度重视,获得蓬勃发展.例如,陈积懋研究员等将几种电磁无损检测法结合起来并研制成便携式仪器设备,可以使用同一台仪器的不同检测方法对不同类型的缺陷进行无损检测^[16].孙峥等应用电磁超声与脉冲涡流两种方法对管道内壁缺陷进行检测,同样采用两套系统,但是共用一套激励装置^[17].此外,周正干、高斌、刘增华等学者也在这方面做出了突出贡献^[18-20].

以上分析表明,目前已有的复合电磁无损检测方法都是基于多种电磁无损检测方法的系统融合而开发出来的.这种复合检测方法通过多种电磁检测系统进行独立检测,得到多组独立的检测信号,然后应用数据融合技术进行信号处理,以达到复合检测的目的.由于这种复合检测方法多系统集成特点,需要多套检测仪器实施复合检测,存在系统复杂,操作繁琐,且检测效率低等缺点.

基于上述研究背景与现状,本课题组提出了一种新型的脉冲涡流-电磁超声复合检测方法,并针对该复合检测方法的可行性、信号分离处理以及缺陷定量评价等方面做了大量工作^[21-23].该复合检测方法仅需使用一套检测仪器即可获得脉冲涡流和电磁超声两种不同类型的检测信号,这大大提高了复合缺陷的检测效率.本文在此基础上,进一步研究脉冲涡流-电磁超声复合检测方法的检测能力与可靠性.针对同时带表面裂纹和底部缺陷的铝合金试件,基于检出概率开发了脉冲涡流-电磁超声复合检测的可靠性评估方法.

1 基本原理

1.1 脉冲涡流-电磁超声复合检测基本原理

根据脉冲涡流和电磁超声的工作原理,发现脉冲涡流检测的激励线圈和检出线圈可以采用自激自检模式,并且激励信号可以采用正弦脉冲电流.而电磁超声检测的线圈为自激自检线圈,其激励信号是正弦脉冲电流.因此,可以对脉冲涡流检测和电磁超声检测的检测探头和激励信号加以统一.其次电磁超声检测过程包括激励电流在试件中感应脉冲涡

流、脉冲涡流在恒定磁场作用下产生洛伦兹力、洛伦兹力引发质点振动并形成超声波三个阶段.其中第一阶段激励电流感应出脉冲涡流与脉冲涡流检测的工作原理一致.

因此,电磁超声检测的原始信号中存在两种信号成分,一种是激励电流在试件中感应的电磁成分,即脉冲涡流信号,另一种是质点振动在试件中引起的超声成分,即电磁超声信号.如果能将这两种信号分离出来,就可以实现脉冲涡流和电磁超声的复合检测.其中脉冲涡流信号可以用来检测试件的表面缺陷,电磁超声信号可以用来检测试件的底部缺陷.根据频谱分析原理,脉冲涡流信号和电磁超声信号具有不同的频谱特性^[21].因此,可以应用频谱滤波的信号分离方法来分离原始检测信号中的脉冲涡流信号和电磁超声信号.如图1所示,为脉冲涡流-电磁超声复合检测的原理图.根据麦克斯韦方程组、法拉第电磁感应定律等电磁学原理以及固体波动理论,脉冲涡流信号和电磁超声信号的计算公式为:

$$U_{eddy} = - \frac{\int \mathbf{B}(t + \Delta t) \cdot d\mathbf{s} - \int \mathbf{B}(t) \cdot d\mathbf{s}}{\Delta t} \quad (1)$$

$$U_{ultrasonic} = - \frac{d\phi}{dt} \approx - \frac{\phi(t - \Delta t) - \phi(t)}{\Delta t} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{B}(t)$ 为脉冲涡流产生的磁感应强度, ϕ 为检测线圈中的感应磁通量, t 为时间.

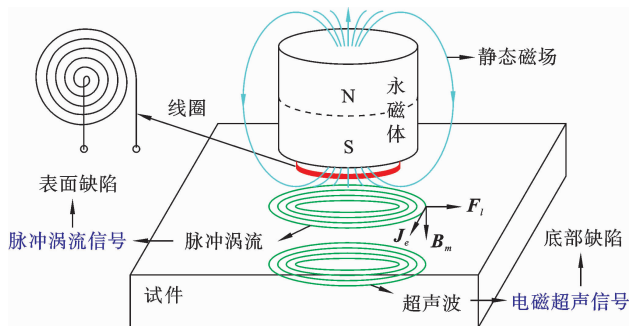


图1 脉冲涡流-电磁超声复合检测原理

Fig. 1 Principle of PECT-EMAT hybrid testing method

1.2 检出概率基本原理

无损检测的可靠性是指无损检测方法对缺陷的检出能力,即在一定检测条件和工艺下能够检测出某一尺寸范围缺陷的可能性,是无损检测方法检出

特定缺陷有效性的一种度量^[24]。一般引入检出概率来定量地表征无损检测方法对缺陷的检出能力,其定义为:经过培训的无损检测人员应用给定的检测方法检测某一特定类型、特定尺寸的缺陷,缺陷可以被可靠检测出来的概率^[25]。对于给定的无损检测方法,检出概率分析通过建立检出概率函数来表示检测信号与缺陷尺寸之间的关系,并根据信号的概率分布计算每一缺陷尺寸对应的检出概率进而绘制检出概率曲线^[26]。

通常无损检测的检出结果有两种数据形式,一种是目标缺陷尺寸 a 的检出/漏检数据(hit/miss),另一种是目标缺陷尺寸 a 的信号响应数据(a vs \hat{a})^[27]。相较于检出/漏检数据,信号响应数据能够提供更丰富的缺陷信息,因此本文应用基于信号响应数据模型的检出概率对脉冲涡流-电磁超声复合检测方法进行可靠性评估。对于缺陷的信号响应 \hat{a} ,可设置一个决策阈值 \hat{a}_{th} ,当信号响应 \hat{a} 大于决策阈值 \hat{a}_{th} 时,表示缺陷能够被检测出来。一般取检测信号的幅值作为信号响应,取 0.8~1.2 倍的噪声信号作为决策阈值^[28-30]。信号响应数据模型的检出概率公式如下^[27]:

$$POD(a) = \phi\left(\frac{\ln(a) - \mu}{\sigma}\right) \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mu = \frac{\ln(\hat{a}_{th}) - \beta_0}{\beta_1} \\ \alpha = \frac{\tau}{\beta_1} \end{cases} \quad (4)$$

式中, a 为目标缺陷尺寸, \hat{a} 为目标缺陷的响应信号, \hat{a}_{th} 为决策阈值, $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数, μ 和 σ 分别为 $\ln(a)$ 的均值和标准差, β_0 、 β_1 和 τ 为检测数据的线性回归参数,可通过极大似然估计法进行求解。如图 2 所示,为 POD 曲线的示意图。

2 脉冲涡流-电磁超声复合检测方法的检出概率分析

2.1 参数设置

根据脉冲涡流-电磁超声复合检测的基本原理开发相应的复合检测有限元程序与实验系统。如图 3 和图 4 所示,分别为复合检测模型和复合检测实验系统。信号发生器激发脉冲激励信号并加载到检

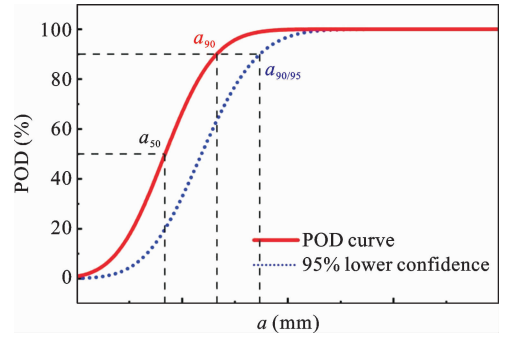


图 2 POD 曲线示意图

Fig. 2 Diagram of POD curve

测探头的线圈中,在线圈附近的试件中会感应出脉冲涡流,而脉冲涡流在永磁体的偏置磁场作用下产生超声波。由脉冲涡流和超声波混合而成的原始检测信号被探头接收。将原始检测信号通过滤波器进行不同带宽的频谱滤波即可分离出脉冲涡流信号和电磁超声信号。

检测探头由螺旋形自激自检线圈和放置在线圈正上方的永磁体构成。其中线圈直径为 20 mm,线径为 0.2 mm,匝数为 47;永磁体直径为 25 mm,高度为 40 mm;检测探头提高为 0.5 mm。激励信号的表达式为:

$$I(t) = \begin{cases} \sin(2\pi ft), & 0 \leq t \leq 1 \mu s \\ 0, & 1 \mu s \leq t \leq 2 \mu s \end{cases} \quad (5)$$

式中, t 为时间, $f=1$ MHz 为激励中心频率。被测试件采用铝合金材料,尺寸为 80 mm×80 mm×20 mm,材料参数如表 1 所示。数值模拟与实验的检测探头、激励设置、材料属性和试件尺寸等各类参数一致。

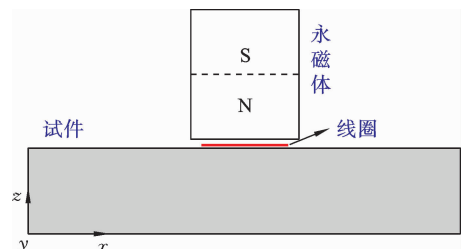


图 3 复合检测模型

Fig. 3 Composite detection model

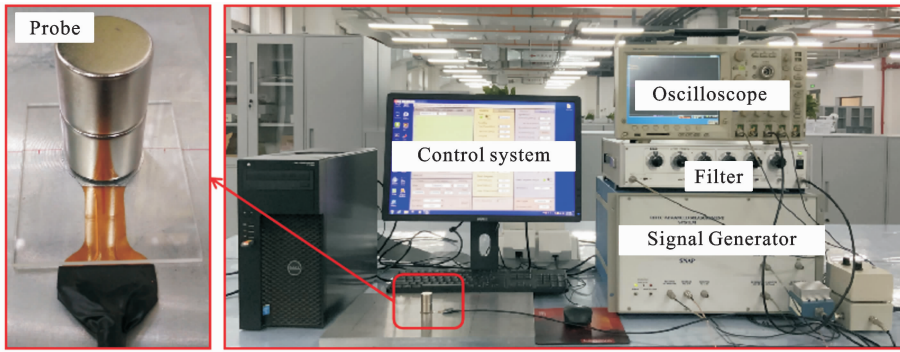


图 4 实验系统

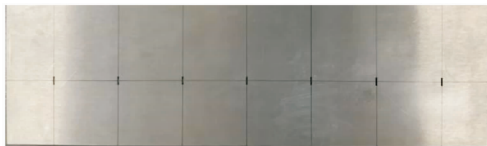
Fig. 4 Experiment system

表 1 铝合金试件的材料属性

Table 1 Material properties of aluminum alloy specimen

材料属性	数值
密度	$2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
杨氏模量	71.7 GPa
泊松比	0.35
磁导率	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
电导率	$3.767 \times 10^7 \text{ S/m}$

如图 5 所示,其中试件 1 制作有表面裂纹,由于自然裂纹的宽度很小,对检测信号的影响有限,故表面裂纹设置为固定宽度的槽型裂纹. 试件 2 制作有底部缺陷,由于底部缺陷的长度和宽度具有相同的考察意义,故不研究底部缺陷宽度的影响. 本文主要讨论表面裂纹长度和底部缺陷长度的检出概率问题,两种缺陷的具体尺寸如表 2 所示.



(a) 试件 1: 表面裂纹
(a) Specimen 1: surface cracks



(b) 试件 2: 底部减薄缺陷
(b) Specimen 2: bottom thinning defects

图 5 试件及缺陷

Fig. 5 Specimens and defects

表 2 缺陷尺寸

Table 2 Defects size

缺陷类型	表面裂纹尺寸($l/\text{mm} \times w/\text{mm} \times d/\text{mm}$)	底部缺陷尺寸($l/\text{mm} \times w/\text{mm} \times d/\text{mm}$)
试件 1: 表面裂纹	$2 \times 2 \times 1.0, 4 \times 2 \times 1.0, 6 \times 2 \times 1.0, 8 \times 2 \times 1.0,$ $12 \times 2 \times 1.0, 16 \times 2 \times 1.0, 20 \times 2 \times 1.0$	/
试件 2: 底部缺陷	/	$2 \times 10 \times 6, 4 \times 10 \times 6, 6 \times 10 \times 6, 8 \times 10 \times 6,$ $12 \times 10 \times 6, 16 \times 10 \times 6, 20 \times 10 \times 6$

2.2 检测信号分析

根据开发的脉冲涡流-电磁超声复合检测有限元程序,可计算出复合检测的脉冲涡流信号和电磁超声信号,如图 6 所示. 根据上述实验条件进行复合检测实验,可得原始混合检测信号,如图 7(a)所示.

对原始检测信号进行频谱分析,如图 7(b)所示. 结果表明,原始检测信号的频谱信号存在明显的脉冲涡流成分(I区)和电磁超声成分(II区),脉冲涡流信号的高峰值部分主要基本集中在 0.1 MHz 以下的频率范围,电磁超声信号的高峰值部分主要集中在

在 0.5 MHz-1.5 MHz 的频率范围, 因此对原始检测信号进行 0-0.1 MHz 的低通滤波和 0.5-1.5 MHz 的带通滤波, 可分离出脉冲涡流信号和电磁超声信号, 如图 8 所示. 信号分离提取过程与定量分析过程详见作者前期研究成果^[22].

相较于模拟信号, 实验信号由于受到系统、环境、操作等因素的影响, 检测信号会有噪声, 这会影响脉冲涡流-电磁超声复合检测方法的可靠性. 如图 6(a) 和图 8(a) 所示, 对于表面裂纹的脉冲涡流信号, 需要提取信号峰值作为特征值来表征表面裂纹

尺寸. 取无表面裂纹试件的两次脉冲涡流实验信号进行差分, 如图 9(a) 所示. 结果表明脉冲涡流实验信号中存在明显的噪声. 如图 6(b) 和图 8(b) 所示, 对于底部减薄缺陷的电磁超声信号, 需要提取缺陷回波的峰值作为特征量来表征底部缺陷尺寸, 而缺陷回波处于底部回波和表面波之间. 如图 9(b) 所示为底部无缺陷时的电磁超声信号, 在底部回波和表面波之间存在明显的噪声信号, 这严重干扰了缺陷回波特征量的提取.

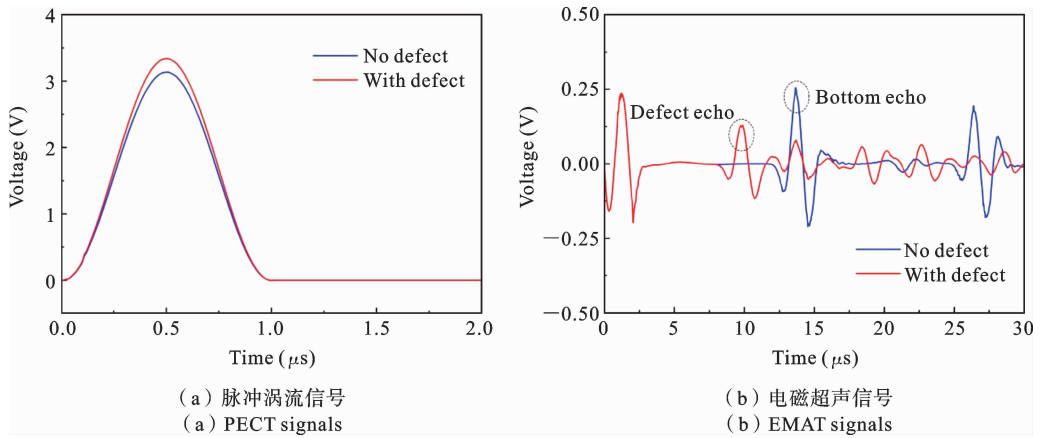


图 6 模拟信号

Fig. 6 Simulation signals

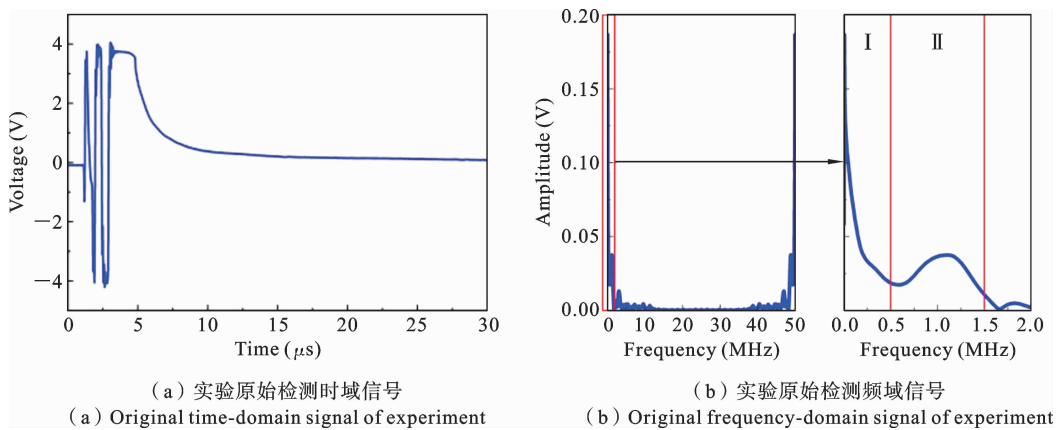


图 7 实验原始检测信号及其频谱分析结果

Fig. 7 Original detection signal of experiment and its spectrum analysis results

根据上述分析表明, 由于脉冲涡流信号的峰值本身包含噪声, 对无表面裂纹试件进行 10 次独立重复的脉冲涡流检测实验, 并分别提取每次检测结果的峰值信号, 并取其均值作为脉冲涡流信号的噪声

阈值. 此外, 由于电磁超声信号的底部回波和表面波之间存在明显的噪声信号, 对无底部减薄缺陷试件进行 10 次独立重复的电磁超声检测实验, 并分别提取每次检测结果的底部回波与表面回波之间的噪声

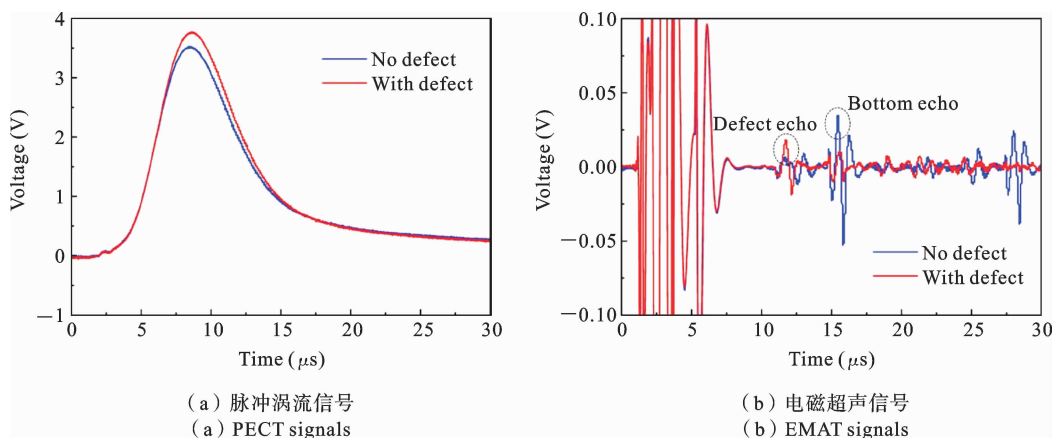


图 8 实验信号

Fig. 8 Experimental signals

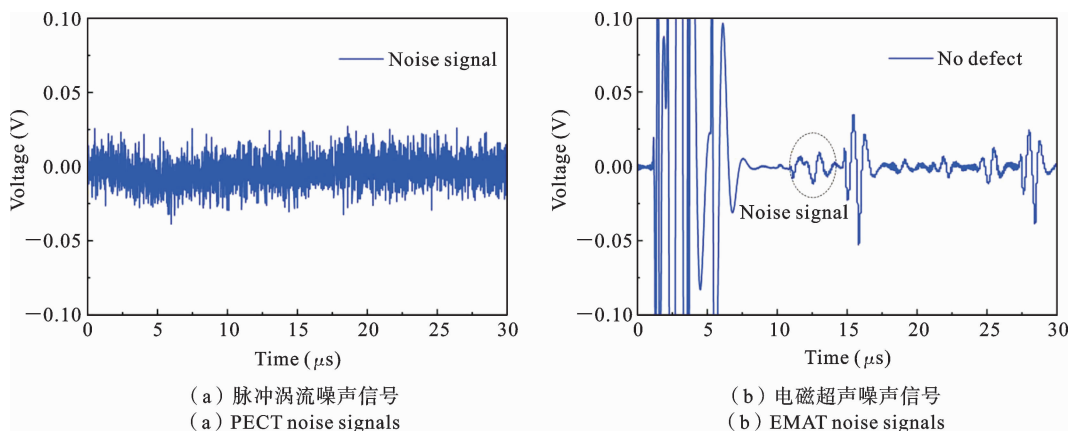


图 9 实验噪声信号

Fig. 9 Experimental noise signals

信号幅值,取其均值作为电磁超声信号的噪声阈值.如表 3 所示,为脉冲涡流信号和电磁超声信号的噪声阈值.

表 3 噪声信号分析结果

Table 3 Analysis results of noise signal

信号类型	噪声阈值(V)
脉冲涡流检测信号	3.526
电磁超声检测信号	8.151×10^{-3}

2.3 信号统计分析

在实际检测工作中,影响检测信号的因素有很多,比如设备性能、操作技能、检测环境等,这些因素都会给缺陷的检测结果带来不确定性.因此,无损检

测的结果具有统计特性,对某一特定缺陷进行独立的重复检测试验会得到不同的响应信号,但信号峰值大致服从正态分布.

然而数值模拟通常是在确定的框架内进行,建立起确定的数值模型即可得到确定的检测信号.因此需要对实际检测参数带来的不确定性进行有效处理以重现检测工作的现实环境.忽略材料属性及检测环境这些因素的影响,其它检测参数的影响主要体现在探头的位移和激励信号的中心频率这两方面.其中探头的位移涵盖了检测人员的操作技能,激励中心频率则涵盖了检测设备的性能,其它检测参数也基本可以用这两个因素来表示.因此,复合检测数值模拟的信号数据可以通过改变探头位移和激励中心频率来建立,记为 (f_0, x, z) ,其中 f_0 为中心频率, x 为探头中心在试件表面上相对于缺陷中心的

水平偏移, z 为探头提高. 本文以检测参数 $(1.0, 0, 0, 0.5)$ 为标准参照组, 分别设置了 $(1.0, 0, 0, 0.5)$ 、 $(0.8, 0, 0, 0.5)$ 、 $(1.2, 0, 0, 0.5)$ 、 $(1.0, -1, 0, 0.5)$ 、 $(1.0, -2, 0, 0.5)$ 、 $(1.0, 0, 0, 0.6)$ 和 $(1.0, 0, 0, 0.7)$ 共 7 组检测参数. 故此对表 2 中每个缺陷的数值模拟都可以得到 7 组检测结果, 共有 $7 \times 14 = 98$ 组数值模拟结果.

此外, 对于复合检测实验, 由于其本身受到各种检测因素的影响, 故此可以对表 2 中每个缺陷进行 10 次独立重复的检测试验, 即可得到 $10 \times 14 = 140$ 组实验结果.

2.3.1 响应信号的统计分析

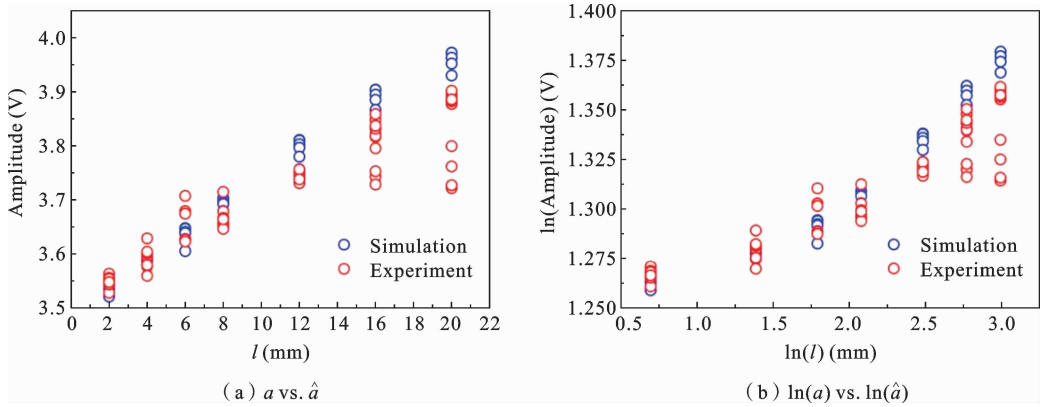


图 10 表面裂纹的脉冲涡流响应信号
Fig. 10 PECT response signals of surface cracks

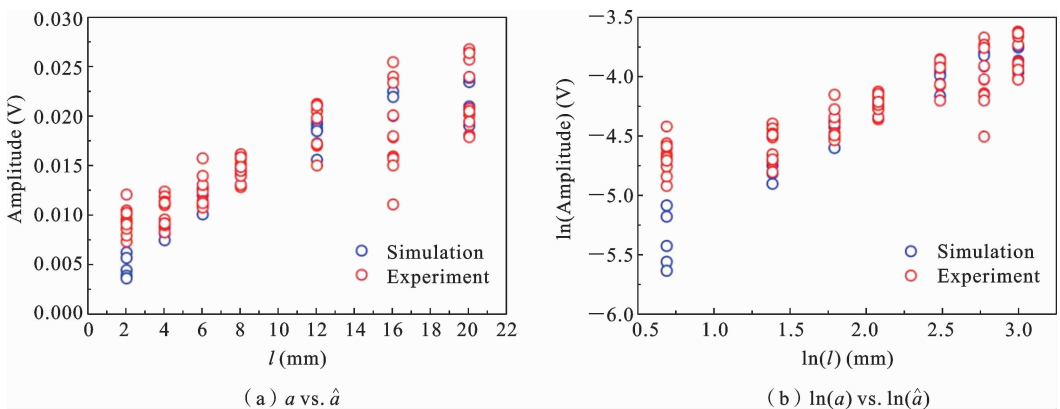


图 11 底部缺陷的电磁超声响应信号
Fig. 11 EMAT response signals of bottom defects

2.3.2 响应信号的线性回归分析

以下对脉冲涡流响应信号和电磁超声响应信号的 $\ln(a)$ vs $\ln(\hat{a})$ 数据进行线性回归分析, 并利用极大似然估计法计算回归参数 $\theta(\beta_0, \beta_1, \tau)$ 的估计值.

对于表面裂纹, 提取脉冲涡流信号的峰值值作为表面裂纹尺寸 a 的响应信号 \hat{a} , 并分别绘制 a vs \hat{a} 和 $\ln(a)$ vs $\ln(\hat{a})$ 两组响应信号关系图. 如图 10 所示, 为不同长度表面裂纹的脉冲涡流响应信号. 对于底部缺陷, 提取电磁超声信号的缺陷回波峰值值作为底部缺陷尺寸 a 的响应信号 \hat{a} , 并分别绘制 a vs \hat{a} 和 $\ln(a)$ vs $\ln(\hat{a})$ 两组响应信号关系图. 如图 11 所示, 为不同长度底部减薄缺陷的电磁超声响应信号. 由图可知, 由于 $\ln(a)$ vs $\ln(\hat{a})$ 表示的信号响应关系具有更好的线性相关性.

线性回归结果如图 12 和图 13 所示, 分别为不同长度表面裂纹和不同长度底部缺陷的线性回归结果, 回归参数估计值如表 4 所示.

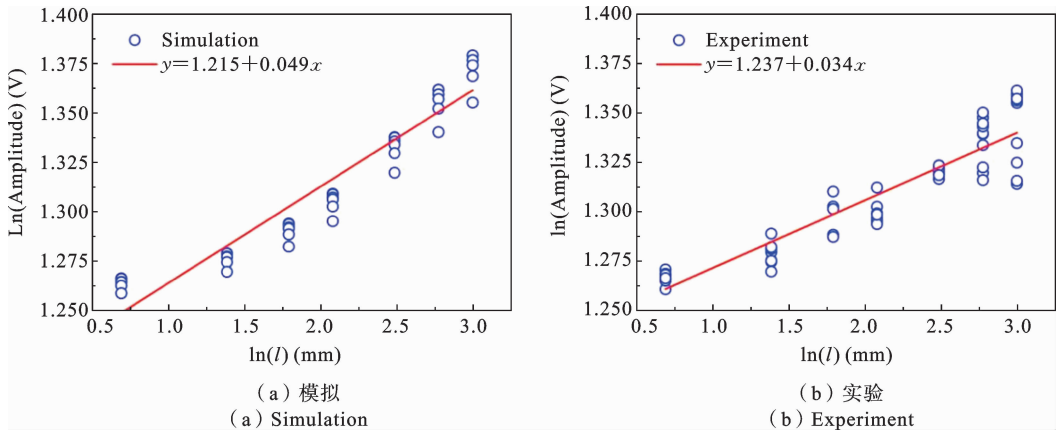


图 12 表面裂纹信号响应的线性回归分析

Fig. 12 Linear-regression analysis of response signal for surface cracks

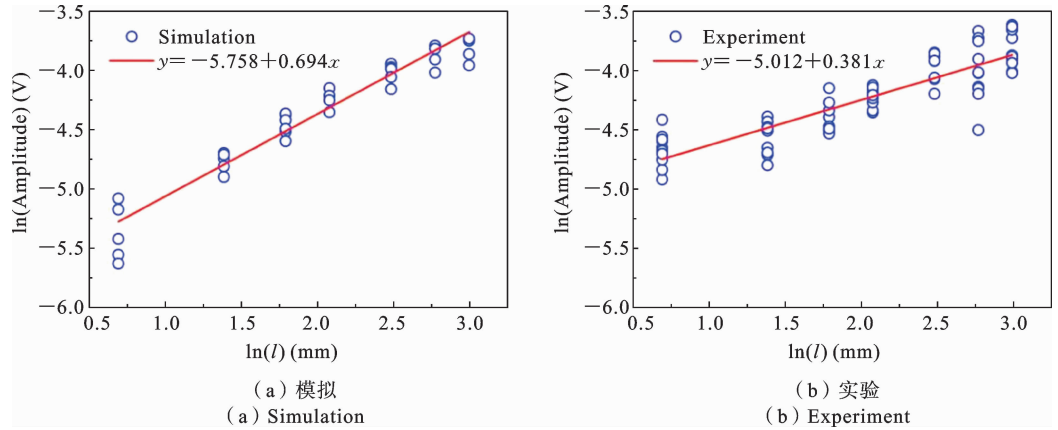


图 13 底部缺陷信号响应的线性回归分析

Fig. 13 Linear-regression analysis of response signal for bottom defects

表 4 线性回归分析的参数估计

Table 4 Parameter estimation of linear-regression analysis

		$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\tau}$
表面裂纹	模拟	1.215	0.049	0.001
	实验	1.237	0.034	0.001
底部缺陷	模拟	-5.758	0.694	0.016
	实验	-5.012	0.381	0.026

的决策阈值,结果如表 5 所示.

表 5 决策阈值

Table 5 Decision threshold

	$\hat{a}_{noise}(V)$	$\hat{a}_{th}(V)$	$\ln(\hat{a}_{th})(V)$
脉冲涡流信号	3.526	3.526	1.260
电磁超声信号	8.151E-3	8.151E-3	-4.810

2.4 检出概率分析

根据检出概率的基本原理,检出概率函数的决策阈值的确定至关重要,通常取 0.8-1.2 倍的噪声阈值作为决策阈值.在 2.2 节中已对脉冲涡流-电磁超声复合检测的实验信号进行了噪声分析,如表 3 所示.本文取 1.0 倍的噪声阈值作为检出概率函数

在求得复合检测响应信号的线性回归参数 $\theta(\beta_0, \beta_1, \tau)$ 估计值和判断阈值 \hat{a}_{th} 的前提下,根据公式(4)可以求解检出概率函数的均值 μ 估计值和方差 σ 估计值,如表 6 所示.根据公式(3)可以求解不同缺陷尺寸参数的检出概率曲线,如图 14 和图 15 所示,分别为不同长度表面裂纹脉冲涡流信号的检

出概率曲线和不同长度底部减薄缺陷电磁超声信号的检出概率曲线. 此外, 可分别求得 a_{50} 、 a_{90} 和 $a_{90/95}$, 如表 7 所示, 通常认为当缺陷尺寸大于 $a_{90/95}$ 时, 该缺陷可以被脉冲涡流-电磁超声复合检测方法可靠地检测出来.

对于不同长度的表面裂纹, 数值模拟结果表明, 当表面裂纹的长度大于 2.720 mm 时, 可以被脉冲涡流信号可靠地检测出来, 如图 14(a)所示. 实验结

表 6 POD 曲线的参数估计

Table 6 Parameter estimation of POD curve

		$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
表面裂纹	模拟	0.919	0.028
	实验	0.667	0.036
底部缺陷	模拟	1.366	0.023
	实验	0.530	0.067

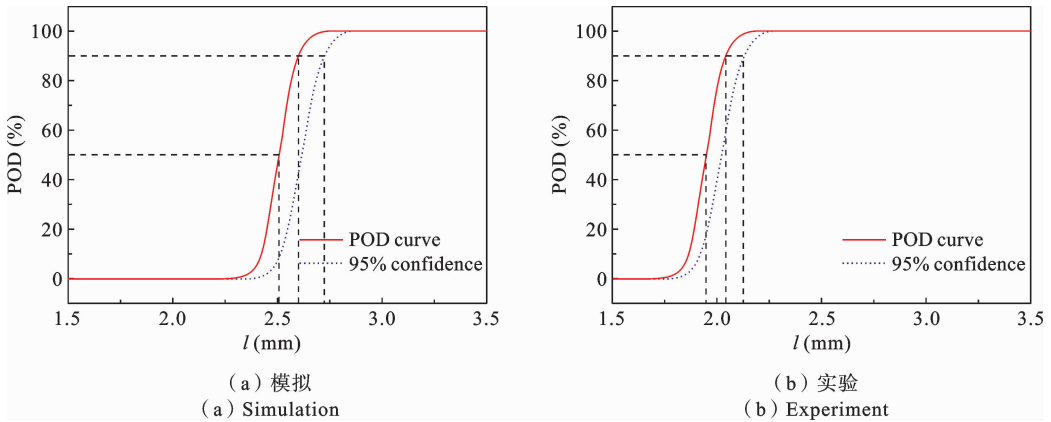


图 14 表面裂纹的检出概率曲线

Fig. 14 POD curve of surface cracks

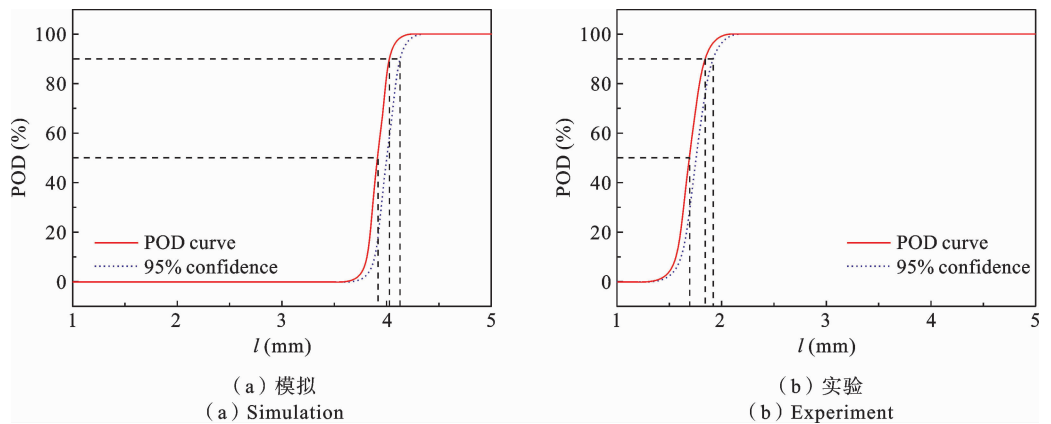


图 15 底部缺陷的检出概率曲线

Fig. 15 POD curve of bottom defects

表 7 POD 曲线的指标

Table 7 Index of POD curve

		a_{50} (mm)	a_{90} (mm)	$a_{90/95}$ (mm)
表面裂纹	模拟	2.506	2.599	2.720
	实验	1.946	2.039	2.123
底部缺陷	模拟	3.920	4.038	4.127
	实验	1.699	1.849	1.919

果表明, 当表面裂纹的长度大于 2.123 mm 时, 可以被脉冲涡流-电磁超声复合检测方法分离出来的脉冲涡流信号可靠地检测出来, 如图 14(b)所示. 对于不同长度的底部减薄缺陷, 数值模拟结果表明, 当底部减薄缺陷的长度大于 4.127 mm 时, 可以被电磁超声信号可靠地检测出来, 如图 15(a)所示. 实验结果表明, 当底部减薄缺陷的长度大于 1.919 mm 时,

可以被脉冲涡流-电磁超声复合检测方法分离出来的电磁超声信号可靠地检测出来,如图 15(b)所示。

3 结论

本文为了研究脉冲涡流-电磁超声复合检测方法的检测能力,开发了基于检出概率分析的可靠性评估方法.根据概率和统计学原理,建立了检出概率的数学模型,并根据检出概率对复合缺陷的检测能力进行评估.具体结论如下:

(1) 针对铝合金试件同时含有表面裂纹和底部减薄的复合缺陷情况,首先通过数值模拟方法与实验方法分析了脉冲涡流-电磁超声复合检测方法的检测信号,研究电磁-声一体化检测的可行性.

(2) 根据脉冲涡流-电磁超声复合检测方法建立缺陷尺寸与检测信号特征量的数据库,并对响应信号进行统计分析,估计检出概率函数中的统计参数.

(3) 对脉冲涡流-电磁超声复合检测方法进行检出概率分析,对于表面裂纹,数值模拟结果和实验结果表明其最小可检长度分别为 2.72 mm 和 2.12 mm,对于底部减薄缺陷,数值模拟结果和实验结果表明其最小可检长度分别为 4.13 mm 和 1.92 mm.

参考文献

[1] Sinnema G. Safety of spaceflight structures-The application of fracture and damage control[J]. *Acta Astronautica*, 2019, pp. 1-15.

[2] 张邢, 胡义锋, 李群, 师俊平, 梁浩, 徐勇, 张柏华, 曹小杉. 基于 GABP 的压力容器表面裂纹断裂研究[J]. *固体力学学报*, 2023, 44(02): 209-221. (Zhang X, Hu Y F, Li Q, Shi J P, Liang H, Xu Y, Zhang B H, Cao X S. Study on fracture of pressure vessel with surface crack based on GABP[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2023, 44(02): 209-221. (in Chinese))

[3] 李奇, 笄益辉, 王彬, 蒋浩, Dianzi Liu, 钱征华. 一种基于深度学习的超声导波缺陷重构方法[J]. *固体力学学报*, 2021, 42(01): 33-44. (Li Q, Da Y H, Wang B, Wang B, Jiang H, Liu D, Qian Z H. Deep

learning-assisted accurate defect reconstruction using ultrasonic guided waves[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2021, 42(01): 33-44. (in Chinese))

[4] Xie S J, Duan Z R, Li J, Tong Z F, Tian M M, Chen Z M. A novel magnetic force transmission eddy current array probe and its application for nondestructive testing of defects in pipeline structures[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2020, 309: 112030.

[5] He M R, Shi P P, Xie S J, Chen Z M, Uchimoto T, Takagi T. A numerical simulation method of nonlinear magnetic flux leakage testing signals for nondestructive evaluation of plastic deformation in a ferromagnetic material[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 155: 107670.

[6] Zhao Y S, Qi P, Xie Z, Bai P G, Chen H-E, Xie S J, Liao S, Chen Z M. A new array eddy current testing probe for inspection of small-diameter tubes in Tokamak fusion devices[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 157: 111627.

[7] Kobayashi N, Ueno S, Nagai S, Ochiai M, Jimbo N. Remote field eddy current testing for steam generator inspection of fast reactor[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241: 4643-4648.

[8] Yuan F, Yu Y, Liu B, Tian G Y. Investigation on velocity effect in pulsed eddy current technique for detection cracks in ferromagnetic material[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, 56(9): 6201008.

[9] Tong Z F, Xie S J, Liu H C, Zhang W, Pei C X, Li Y, Chen Z M, Uchimoto T, Takagi T. An efficient electromagnetic and thermal modelling of eddy current pulsed thermography for quantitative evaluation of blade fatigue cracks in heavy-duty gas turbines[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 142: 106781.

[10] Yang L, Wang Z, Gao S. Pipeline magnetic flux leakage image detection algorithm based on multiscale SSD network[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(1): 501-509.

[11] Xu K, Yang K, Liu J, Wang Y. Study on metal magnetic memory signal of buried defect in fracture process[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 498: 166139.

[12] Liu T H, Pei C X, Cai R, Li Y, Chen Z M. A flexi-

- ble and noncontact guided-wave transducer based on coils-only EMAT for pipe inspection[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2020, 314: 112213.
- [13] 苏剑彬. 内窥涡流集成化无损检测系统研究与实现 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2008. (Su J B. Research and Implementation of an Integrative NDT System of Endoscopy and Eddy Current [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese))
- [14] 文伟璐. 基于 D-S 证据理论的多传感器信息融合技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021. (Wen W L. Research on Multi-sensor Information Fusion Technology Based on D-S Evidence Theory [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese))
- [15] Urayama R, Uchimoto T, Takagi T. Application of EMAT/EC dual probe to monitoring of wall thinning in high temperature environment[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2010, 33(3,4): 1317-1327.
- [16] 陈积懋, 张颖. 复合材料及其构件的新型综合无损检测技术 [J]. *无损检测*, 2002, 24(6): 253-271. (Chen J Z, Zhang Y. Comprehensive nondestructive testing technology for composites and their components[J]. *Nondestructive Testing*, 2010, 33(3,4): 1317-1327. (in Chinese))
- [17] 孙峥. 基于电磁超声与脉冲涡流的管道内检测技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. (Sun Z. Research on Pipeline Inspection Based on EMAT and Pulsed Eddy Current Technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese))
- [18] 周正干, 黄凤英, 于芳芳. 电磁超声和涡流组合检测方法 [J]. *无损检测*, 2009, 31(09): 706-710+714. (Zhou Z G, Huang F Y, Yu F F. Testing method combing EMAT with eddy current[J]. *Nondestructive Testing*, 2009, 31(09): 706-710+714. (in Chinese))
- [19] Guo W, Gao B, Tian G Y, Si D. Physic perspective fusion of EMAT and PECT in non-destructive testing system[J]. *Philosophical Transactions A*, 2020, 378(2182):1-17.
- [20] Zhao X, Liu Z H, Gong Y, Huo Z, Chen Z, He C, Wu B. Performance degradation detection of 12CrMoV steel by magneto-acoustic compound inspection method[J]. *NDT&E International*, 2021, 124:102525.
- [21] Xie S J, Tian M M, Xiao P, Pei C X, Chen Z M, Takagi T. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection[J]. *NDT&E International*, 2017, 86:153-163.
- [22] Duan Z R, Xie S J, Huang L, Zhao R X, Tian M M, Liu T H, Pei C X, Chen Z M. Quantitative sizing of compound location defects based on PECT-EMAT hybrid testing methods[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 178: 109267.
- [23] Xie S J, Yang S Y, Tian M M, Zhao R X, Chen Z M, Zheng Y, Uchimoto T, Takagi T. A hybrid non-destructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques based on wavelet analysis[J]. *NDT&E International*, 2023, 138: 102900.
- [24] 郑世才. 无损检测技术的可靠性 [J]. *无损检测*, 1995, 08: 214-218+230. (Zheng S C. Reliability of nondestructive testing[J]. *Nondestructive Testing*, 1995, 08: 214-218+230. (in Chinese))
- [25] 吴瑞明. 数字化超声检测系统及关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004. (Wu R M. Research of the Basic Theory on Digital Ultrasonic Test [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese))
- [26] Jarvis R, Cawley P, Nagy P. Performance evaluation of a magnetic field measurement NDE technique using a model assisted Probability of Detection framework [J]. *NDT and E International*, 2017, 91: 61-70.
- [27] Department of Defense Handbook. Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, MIL-HD-BK-1823A [M]. Air Force, USA, 2004.
- [28] Rentala V, Kanzler D, Fuchs P. POD evaluation; The key performance indicator for NDE 4. 0 [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2022, 41: 1-20.
- [29] Liu J, Liu Y, Wang F, Wang Y. Study on probability of detection (POD) determination using lock-in thermography for nondestructive inspection (NDI) of CFRP composite materials [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 71: 448-456.

[30] 冯辅周, 张超省, 宋爱斌, 闵庆旭, 朱俊臻. 超声红外热像检测中疲劳裂纹的检出概率模型研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(03): 60-65. (Feng F Z, Zhang C S, Song A B, Min Q X, Zhu J Z. Probabili-

ty of detection model for fatigue crack in ultrasonic infrared imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(03): 60-65. (in Chinese))

Reliability Evaluation of Electromagnetic-Acoustic Integrated Testing Method for Composite Defects

Zhirong Duan^{1,2} Xiaoming Zhang¹ Deqiang Jing¹ Shuyan Yang²
Lei Huang³ Hongbo Zhang³ Liang Li³ Shejuan Xie² Zhenmao Chen²

(¹ Shaanxi Special Equipment Inspection and Testing Institute, Xi'an, 710048)

(² State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Shaanxi Engineering Research Center of Nondestructive Testing and Structural Integrity Evaluation, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049) (³ CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an, 710077)

Abstract Metal structures are widely used in modern industrial fields, but their manufacturing and service processes often produce composite defects that affect the mechanical properties and service life. Defects can appear both on the surface and beneath the structure, making it challenging for a single nondestructive testing (NDT) method to address all issues. Furthermore, using multiple NDT methods can result in low efficiency and high costs. To address this, a novel electromagnetic-acoustic integrated testing method, called PECT-EMAT, has been developed in this study, with its detection capability evaluated based on the theory of probability of detection (POD). Firstly, we established a simulation method and experimental system for PECT-EMAT to test aluminum alloy specimens with both surface cracks and bottom thinning defects, and explored a signal separation method using spectrum analysis. Next, we built a POD model based on statistical methods and created a signal database for composite defects. Finally, we conducted a statistical analysis of this database to determine the minimum detectable size of the PECT-EMAT hybrid testing method. The research findings indicate that: (1) For metal structures with both surface cracks and bottom thinning defects, the proposed PECT-EMAT method can effectively identify composite defects through signal separation. (2) The PECT signals and EMAT signals separated from the original detection signals exhibit distinct characteristics for detecting surface cracks and bottom thinning defects, respectively, leading to the establishment of a signal features' database for composite defects. (3) POD analysis reveals that the minimum detectable lengths for surface cracks are 2.72 mm in simulation and 2.12 mm in experiments, while for bottom thinning defects, they are 4.13 mm and 1.92 mm, respectively. This study provides a theoretical foundation for the adoption of the PECT-EMAT hybrid testing method and offers a reliable technical means for detecting complex defects in engineering structures.

Key words composite defects, electromagnetic-acoustic integrated detection, probability of detection