

涡流脉冲热像检测中疲劳裂纹的检出概率

孙吉伟¹, 冯辅周¹, 闵庆旭¹, 徐超¹, 黄楠²

(1. 陆军装甲兵学院 机械工程系, 北京 100072; 2. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 在涡流脉冲热像检测中, 检出概率是评价检测可靠性的最重要的指标之一。通常, 检出概率是指在特定检测条件下特定尺寸的缺陷被检出的概率。首先, 以含有不同尺寸疲劳裂纹的金属平板试件为研究对象, 通过正交试验方案设计, 完成了对不同检测条件下不同尺寸裂纹试件表面热响应信号的提取; 然后, 采用线性回归模型建立了裂纹区域的热响应信号与裂纹尺寸的定量化关系, 并采用极大似然估计法给出了裂纹检出概率模型中的具体参数; 最后, 基于 Wald 方法求得了检出概率的置信区间, 并绘制了检出概率曲线。研究成果可为涡流脉冲热像检测的可靠性评估提供量化依据。

关键词: 涡流脉冲热像; 裂纹生热; 检出概率; 置信区间

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0504002

Probability of detection for fatigue crack in eddy current pulsed thermography

Sun Jiwei¹, Feng Fuzhou¹, Min Qingxu¹, Xu Chao¹, Huang Nan²

(1. Department of Vehicle Engineering, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China;

2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: Probability of detection (POD) is one of the most important indexes to evaluate the reliability of detection in eddy current pulsed thermography (ECPT). Generally, the probability of detection is defined as the probability that the defect with fixed size is detected under the given detection conditions. Firstly, a series of metal plates with different lengths of fatigue cracks were introduced to obtain the thermal response signals through the design of orthogonal experiment. Secondly, a linear regression model was established to describe the relationship between thermal response signals and crack lengths, and the maximum likelihood estimation (MLE) method was employed to achieve the specific parameters of the crack POD model. Finally, the resulting confidence interval of POD was presented based on Wald method, and the curves of POD were drawn. The research results can provide a quantitative evaluation method for detection reliability in ECPT.

Key words: ECPT; crack heating; POD; confidence interval

收稿日期: 2017-12-05; 修订日期: 2018-01-03

基金项目: 军队科研计划

作者简介: 孙吉伟(1994-), 男, 硕士生, 主要从事红外无损检测技术方面的研究。Email: whusjw@163.com

导师简介: 冯辅周(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事故障诊断及无损检测技术方面的研究。Email: fengfuzhou@tsinghua.org.cn

0 引言

涡流脉冲热像(Eddy Current Pulsed Thermography, ECPT)是一种将电磁生热和红外热成像相结合的新型无损检测技术,具有检测面积大、检测效率高、成像结果直观等特点^[1],已在金属试件的检测领域中表现出了巨大的优势。在采用涡流脉冲热像技术进行检测时,当载有高频电流的线圈靠近被测试件,试件内部就会产生感应涡流,缺陷的存在会改变试件内涡流的分布,通过时间的积累,从而引起温度的变化。通过红外热像仪对试件表面的温度分布进行捕捉,并采用不同的方法对捕捉的热图像进行处理,最终实现对缺陷的检测^[2-6]。

目前,检出概率已成为评价无损检测能力的最重要指标之一。国外最先开展裂纹检出概率研究的是美国空军材料实验室的 Packman^[9]等人,在此之后,Lewis 等人对此进行了大量的研究,给出了不同检测条件下的 POD(Probability of Detection)曲线^[10]。英国的纽卡斯尔大学以及英国无损检测研究中心,相继对涡流脉冲热像技术原理展开了研究,并设计了针对该技术的检测系统^[11]。在国内,航空工业系统率先开展了对裂纹检出概率的研究,1982 年林富甲等人提出了无损检测可靠性评估的方法,并在此基础上组织编写了《裂纹检出概率曲线手册》^[12];傅惠民给出了基于 POD 曲线的单裂纹的尺寸测试方法^[13];哈尔滨工业大学的刘俊岩建立了 Chirp 调制下激光激励的红外热波雷达成像检测系统,并采用 Hit/miss 法分析了该系统的实验数据^[14],确定了该系统对 CFRP 层板缺陷的检出概率水平。

国内外学者针对检出概率的课题研究很多,然而,基于涡流脉冲热像技术检出概率的系统性研究还很不深入。目前应用于涡流脉冲热像技术的 POD 处理方法大都是借鉴于光激励热像技术,并且,缺少获得 POD 规范的、系统的操作流程。因此,文中以一系列含有不同尺寸疲劳裂纹的 45 钢平板试件为实验对象,完成了对不同检测条件下不同尺寸裂纹试件表面热响应信号的提取。然后采用线性回归模型建立了裂纹区域的热响应信号与裂纹尺寸的量化关系,并采用极大似然估计法估算出了裂纹检出概率模型中的具体参数。最后采用 Wald 方法求得了检

出概率的置信区间^[2],并绘制了检出概率曲线。

1 实验装置及试件

1.1 实验装置

为了满足实验需求,文中设计了如图 1 所示的系统,主要部件包括高频激励电源(功率为 3 kW)、电磁线圈、红外热像仪、水冷装置、采集控制终端(PC)和其他辅助设备(三维运动平台和被测试件等)。

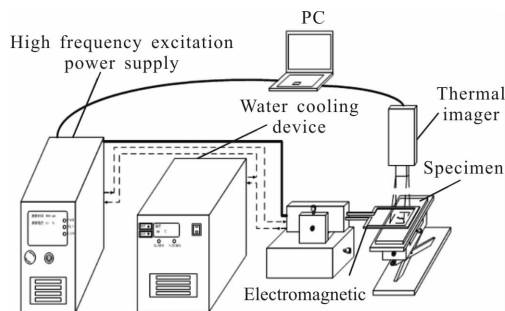


图 1 涡流脉冲热像系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of ECPT system

1.2 被测试件

为了获得实际应用中常见的缺陷裂纹,文中以 370 mm×5 mm×100 mm 的 45 钢平板材料为对象,经过疲劳试验获得如图 2 所示的裂纹,并采用线切割的方式获得图 2(a)、(b)所示 240 mm×5 mm×47.4 mm 的含有疲劳裂纹的平板试件。

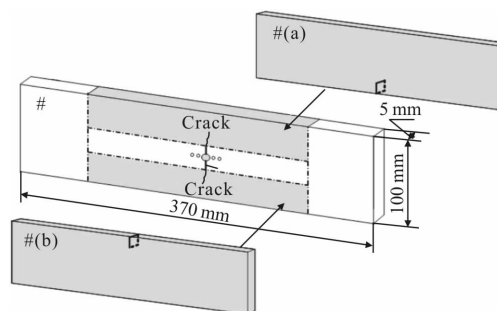


图 2 含疲劳裂纹的 45 钢平板试件

Fig.2 45 steel flat specimen with fatigue crack

通过电子显微镜观测获取了试件表面的裂纹尺寸,并将前后表面的平均值视为裂纹的尺寸,实验中所有试件的裂纹尺寸如表 1 所示。实验前,在被测平板试件的待测表面喷涂一层黑色的哑光漆以提高表面的发射率。

表 1 被测试件裂纹长度及其编号

Tab.1 Specimen crack lengths and their number

No.	Length/mm	No.	Length/mm
S1	419.91×10 ⁻³	S11	5 477.50×10 ⁻³
S2	1 707.41×10 ⁻³	S12	5 624.33×10 ⁻³
S3	1 986.66×10 ⁻³	S13	6 570.00×10 ⁻³
S4	2 181.48×10 ⁻³	S14	6 629.00×10 ⁻³
S5	3 454.42×10 ⁻³	S15	6 983.00×10 ⁻³
S6	3 474.50×10 ⁻³	S16	7 071.50×10 ⁻³
S7	3 898.49×10 ⁻³	S17	7 560.00×10 ⁻³
S8	4 639.50×10 ⁻³	S18	8 014.54×10 ⁻³
S9	4 866.00×10 ⁻³	S19	9 143.00×10 ⁻³
S10	5 263.50×10 ⁻³	S20	9 453.00×10 ⁻³

2 响应信号提取与分析

2.1 响应信号的提取

根据工程的实际需要,不同的检测对象必然导致不同的提离距离。为探究不同提离距离下的涡流脉冲热像检出概率,文中采用控制变量法设置了三组检测条件:激励强度 100%、激励时间 200 ms 保持不变,依次改变提离距离 5、15、20 mm,分别采用检测条件 I、II、III 的编号来简化描述上述三组检测条件。文中使用的 20 组裂纹试件,分别在上述三组检测条件下进行实验,每组试件在同一检测条件下进行 5 次信号提取,最终得到 300 组数据。红外热像仪则采取激励同侧安装的方式,以获得最大的裂纹热信号。

表 1 中编号为 S10 的裂纹在检测条件 II 下的裂纹区域(矩形方框区域)的温度分布情况如图 3 所示,其中图 3(a)为激励开始时刻的热像图,图 3(b)为激励结束时刻的热像图,颜色越亮代表温度越高。可以看到:激励结束时刻裂纹区域有明显的温度升高。因此,文中以激励结束时刻裂纹区域的温升作为响应信号。



(a) 激励开始时刻

(a) At the start time of the excitation



(b) 激励结束时刻

(b) At the end of the excitation

图 3 裂纹区域热像图

Fig.3 Thermal image of crack area

2.2 响应信号分析

假定采用 a 表示裂纹尺寸,采用与 a 相关联的特定参数 \hat{a} 来量化和记录响应信号,则判定缺陷的所有信息包含在响应信号 \hat{a} 中。为了进一步确定响应信号 \hat{a} 和裂纹尺寸 a 之间的关系,图 4 给出了检测条件 II 下,响应信号 \hat{a} 随裂纹尺寸 a 四种形式的变化关系,可以看出:图 4(b)所示的 $\ln(\hat{a})$ 和 a 整体上呈线性关系,通过 R 语言对其进行回归分析:响应信号的 $\ln(\hat{a})$ 形式与拟合直线的偏差满足同方差的正态分布,且数据集中不存在强影响点。

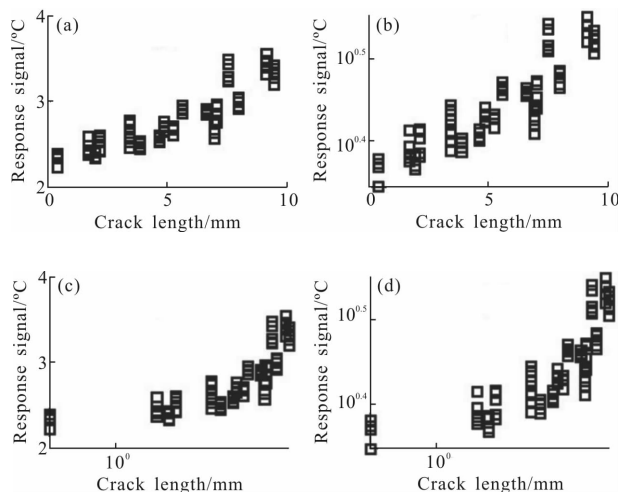


图 4 响应信号随裂纹尺寸的变化

Fig.4 Response signal changes with the crack length

3 POD 分析

3.1 计算模型

检出概率函数 $POD(a)$ 可以从响应信号 \hat{a} 和裂纹尺寸 a 之间的联系求得。

$$POD(a) = \int_{\hat{a}_{ac}}^{\infty} g_a(\hat{a}) d\hat{a} \quad (1)$$

式中： $g_a(\hat{a})$ 表示特定尺寸 a 响应信号 \hat{a} 的概率密度； \hat{a}_{dec} 表示判定阈值。

函数 $g_a(\hat{a})$ 的均值可以从响应信号 \hat{a} 和裂纹尺寸 a 之间的相关函数确定，也就是：

$$\hat{a} = \mu(a) + \delta \quad (2)$$

式中： $\mu(a)$ 表示 $g_a(\hat{a})$ 的均值； δ 表示响应信号 \hat{a} 和均值 $\mu(a)$ 差异的随机误差项。考虑 $\ln(\hat{a})$ 和 a 之间存在带有正态分布误差的线性关系，可将上述模型改写为：

$$\ln(\hat{a}) = \beta_0 + \beta_1 a + \delta \quad (3)$$

关于 $\mu(a)$ 的概率密度函数 $g_a(\hat{a})$ 取决于随机误差 δ 的分布特性。由图 4(b) 可知：随机误差 δ 服从均值为 0、标准差为 τ 的正态分布。

因此，公式(1)可改写为：

$$POD(a) = \Phi \left(\frac{a - [\ln(\hat{a}_{dec}) - \beta_0] / \beta_1}{\tau / \beta_1} \right) \quad (4)$$

确切地说，公式(4)是一个累积对数正态分布函数，其均值为：

$$\mu = \frac{\ln(\hat{a}_{dec}) - \beta_0}{\beta_1} \quad (5)$$

标准差为：

$$\sigma = \frac{\tau}{\beta_1} \quad (6)$$

3.2 参数估计

采用随机变量 k 来简化标记：

$$k = \frac{\ln(\hat{a}) - (\beta_0 + \beta_1 a)}{\tau} \quad (7)$$

因此， k 是服从均值为 0、方差为 1 的标准正态分布。其概率密度函数为：

$$\phi(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right) \quad (8)$$

第 i 次检测获得的响应信号 $\ln(\hat{a}_i)$ 的概率采用 $1/\tau \phi(k_i) dk$ 来表示，因此构造如下的似然函数：

$$L = \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{\tau} \phi(k_i) \right) \quad (9)$$

式中： n 表示检测的次数。公式(9)的对数形式表示如下：

$$\ln[L(\beta_0, \beta_1, \tau)] = -n \ln(\sqrt{2\pi}) - n \ln(\tau) -$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\ln(\hat{a}_i) - (\beta_0 + \beta_1 a_i)}{\tau} \right]^2 \quad (10)$$

POD(a) 中各个参数的极大似然估计可以通过下式计算求得：

$$\begin{cases} 0 = \frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta_0} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^n k_i \\ 0 = \frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta_1} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^n a_i k_i \\ 0 = \frac{\partial \ln(L)}{\partial \sigma_\delta} = \frac{1}{\tau} \left(-n + \sum_{i=1}^n k_i^2 \right) \end{cases} \quad (11)$$

应用公式(3)的线性拟合模型，结合上述方法计算求得的 POD 模型中的参数，绘制了如图 5 所示，在检测条件 I、II、III 下的响应信号 $\ln(\hat{a})$ 和裂纹尺寸 a 的线性拟合关系。通过图像可知：由于背景噪声的存在，当裂纹尺寸 < 2 mm 时，裂纹区域的生热量都会湮没在背景噪声中，无论何种水平的激励强度都无法够得到较大的响应信号，因此，文中将判定阈值 \hat{a}_{dec} 设定为 0.8 °C (一般为背景噪声的 2~3 倍)，当且仅当响应信号 \hat{a} 超过 \hat{a}_{dec} 时才能被判定为裂纹。表 2 给出了随机变量 K 中未知参数的估计值，将表 2 各个参数的估计值代入到公式(4)，可以确定出 POD 函数随裂纹尺寸的变化情况。

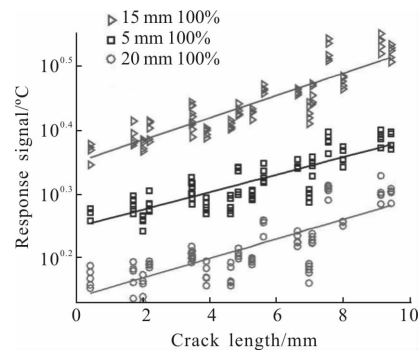


图 5 线性拟合模型

Fig.5 Linear fitting models

表 2 线性拟合模型参数

Tab.2 Parameters of linear fitting models

Parameters	Lift-off distance		
	5 mm	15 mm	20 mm
$\hat{\beta}_0$	0.572	0.807	0.320
$\hat{\beta}_1$	0.032	0.040	0.035
$\hat{\tau}$	0.051	0.053	0.068

图 6 给出了检测条件 I、II、III 下，POD 函数随裂纹尺寸的变化曲线。通过 R 语言计算得出 POD 重

要参数如表 3 所示,其中表示检出概率为 50% 对应的裂纹尺寸,表示检出概率为 90% 时对应的裂纹尺寸。可以看到:(1) 适当调整涡流脉冲热像检测系统的提高距离可以提高裂纹的检出概率,即涡流脉冲热像检测系统的检测能力可以通过调整合适的提高距离(该系统最佳提高距离是 15 mm^[15])来实现;(2) 随着检出概率的提高,数据的标准差逐渐降低,数据的误差更小,质量更高;(3) 随着金属疲劳裂纹尺寸的增加,其检出概率具有逐渐增加的趋势。

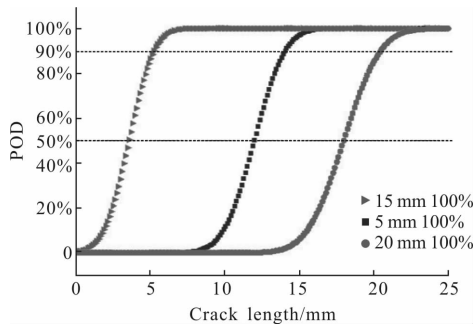


图 6 检出概率随裂纹尺寸的变化曲线

Fig.6 POD change curves with the crack length

表 3 检出概率模型参数

Tab.3 Parameters of POD model

Parameters	Lift-off distance		
	5 mm	15 mm	20 mm
$\hat{\mu}$	10.402	2.336	16.568
$\hat{\sigma}$	1.605	1.322	1.927
a_{50}	10.402	2.336	16.580
a_{90}	12.460	4.031	19.038

3.3 置信区间

为了更全面地评估检出概率,文中引入置信区间这一概念,采用 Wald 方法检验统计数据正态分布的性质,进而得到总体参数的估计区间。估计参数 $\hat{\theta}=(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\tau})$ 的方差-协方差矩阵定义如下:

$$V=(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\tau})^{-1} \quad (12)$$

式中: I 表示估计参数 $\hat{\theta}$ 的 Fisher 信息矩阵,其元素 I_{ij} 的组成可通过下式求出:

$$I_{11}=\frac{1}{m\tau^2}n$$

$$I_{22}=\frac{1}{m\tau^2}\sum_{i=1}^n a_i^2$$

$$I_{33}=\frac{1}{m\tau^2}\left(-n+3\sum_{i=1}^n k_i^2\right)$$

$$I_{12}=I_{21}=\frac{1}{m\tau^2}\sum_{i=1}^n a_i$$

$$I_{13}=I_{31}=\frac{2}{m\tau^2}\sum_{i=1}^n k_i$$

$$I_{23}=I_{32}=\frac{2}{m\tau^2}\sum_{i=1}^n a_i k_i \quad (13)$$

式中: m 表示重复测试的次数; n 表示测试目标的个数。

为线性化公式(5)和(6)的关系,文中采用了 μ 和 σ 真实值的泰勒级数展开式,并通过 Delta 方法获得 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 的方差-协方差矩阵 $V(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$,即:

$$V(\hat{\mu}, \hat{\sigma})=\frac{1}{\beta_1^2}TV(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\tau})T' \quad (14)$$

式中: T 为转化矩阵,则:

$$T=\begin{bmatrix} 1 & \hat{\mu} & 0 \\ 0 & \hat{\sigma} & -1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

POD(a)的置信度 α 的置信边界可通过下式求得:

$$POD_{\alpha}(a\pm h)=\Phi(p) \quad (16)$$

式中: $\Phi(k)$ 是标准累积正态分布,且

$$p=\frac{a-\hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \quad (17)$$

$$h=\Phi_{1-\alpha}(\text{var}(\hat{\mu})+p^2\text{var}(\hat{\sigma})+2pcov(\hat{\mu}, \hat{\sigma})) \quad (18)$$

式中: $\Phi_{1-\alpha}$ 为标准正态分布的 α 分位数。

实践中不存在检出概率为 100% 的无损检测方法,因此,将检出概率为 90% 时对应的缺陷特征尺寸 a 作为评价无损检测可靠性的指标之一。图 7 给出了检测条件 I 下不同尺寸裂纹对应的检出概率及

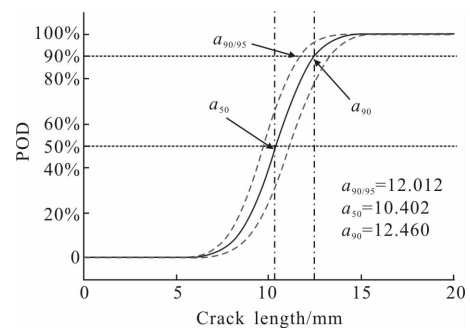


图 7 检出概率曲线的置信区间

Fig.7 Confidence interval of POD curve

其置信边界,裂纹的检出概率曲线如实线所示,检出概率曲线的 95%置信边界如虚线所示,用 $a_{90/95}$ 表示检出概率为 90%的裂纹尺寸对应的 95%置信下限。

4 结 论

为评估涡流脉冲热像技术的检测可靠性,文中引入检出概率这一概念,建立了基于裂纹尺寸的检出概率模型。分析了裂纹尺寸对响应热信号的影响,并采用极大似然估计法给出了裂纹检出概率模型中的具体参数。得到的结论如下:

(1) 规范了检出概率数据获得的方法,并建立了基于涡流脉冲热像技术的检出概率模型;

(2) 规范了检出概率曲线绘制方法,绘制了三组不同提高距离检测下的检出概率曲线,并给出了提高距离为 5 mm 时的置信区间以及评价 $a_{90/95}$ 值;

(3) 涡流脉冲热像检测系统的检测能力可以通过调整合适的提高距离来实现;

(4) 随着检出概率的提高,数据的标准差逐渐降低,数据的误差更小,质量更高。

研究成果可为涡流脉冲热像检测的可靠性评估提供量化依据,并为该技术的工程应用奠定基础。

参 考 文 献:

[1] Pan Mengchun, He Yunze, Chen Dixiang. Eddy Current Thermal Non Destructive Testing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 11-12. (in Chinese)

[2] Feng Fuzhou, Zhang Chaosheng, Song Aibin, et al. Probability of detection model for fatigue crack in ultrasonic infrared imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304005. (in Chinese)

[3] Li Xinyuan, Ji Muwei, Wang Hongzhi, et al. Research progress of near-infrared photothermal conversion nanocrystals [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10 (5): 0541. (in Chinese)

[4] Zhang Chaosheng, Song Aibin, Feng Fuzhou, et al. Research on optimization method of test conditions in sonic infrared imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0204005. (in Chinese)

[5] Sun Zhiyuan, Zhu Wei, Qiao Yanfeng. Amendment of gray drift in infrared temperature measurement [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(4): 391-396. (in Chinese)

[6] Hong Wenqing, Yao Libin, Ji Rongbin, et al. A super-frame processing method for infrared image based on accumulation of different integration time frame [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1490-1500. (in Chinese)

[7] Li Hang, Yan Cangxiang, Yu Ping, et al. Measurement of modulation transfer function for IR imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (4):698-708. (in Chinese)

[8] Zou Han, Yang Suixian, Zeng Jinjing, et al. Impact fatigue damage detection of metallic material by using eddy current thermography [J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38 (3): wsjc201603017. (in Chinese)

[9] Packman M N, Harrison C H, Ainslie M A. Rapid calculations of acoustic propagation loss in range dependent oceans [J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2002, 143(3): 184-189.

[10] Lewis W H. A review of nondestructive inspection reliability on aircraft structure[C]//12th Symposium NDE, 1979: 24-26.

[11] Wang F, Liu J, Liu Y, et al. Research on the fiber lay-up orientation detection of unidirectional CFRP laminates composite using thermal-wave radar imaging [J]. *Ndt & E International*, 2016, 84: 54-66.

[12] Lin Fujia, Huang Yushan. Statistical determination of a flaw detection probability curve [J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 1982, 3(4): 21-27.

[13] Fu Huimin, Qian Ruoli. Methods for non destructive inspection reliability and controlling lives [J]. *Journal of Aerospace Power*, 1994, 3(7): 227-231. (in Chinese)

[14] Liu J. Research on CFRP materials nondestructive testing by IR lock-in thermography [C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, 2009, 73833U: 73833U-9.

[15] Feng Fuzhou, Xu Chao, Min Qingxu, et al. Optimization method of detection conditions for metal fatigue cracks in eddy current pulsed thermography[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2017, 31(3): 89-93. (in Chinese)