文章编号：1006-4710(2014)04-0460-05

基于脉冲涡流磁场梯度检测的多层金属结构层间腐蚀缺陷成像

刘相彪，李勇，闫贝，陈振茂，齐勇

（西安交通大学 航天航空学院，机械结构强度与振动国家重点实验室，
核能结构安全检测与完整性评价研究中心，陕西 西安 710049）

摘要：多层金属结构常见于大型、复杂装备中，由于其恶劣的服役环境结构层间易出现腐蚀缺陷，严重影响在役装备结构的质量与安全。本研究通过仿真和试验研究，探究了脉冲涡流磁场梯度检测方法在多层金属结构层间腐蚀缺陷成像中的实现手段及优势性。建立了脉冲涡流磁场梯度检测的三维有限元模型，仿真分析了脉冲涡流磁场梯度检测方法在多层金属结构层间腐蚀缺陷成像中的有效性和优势性。搭建了脉冲涡流磁场梯度检测试验系统，对仿真结果进行了验证。研究结果表明脉冲涡流磁场梯度检测方法可对多层金属结构层间腐蚀缺陷进行高精度成像。

关键词：无损检测；脉冲涡流检测；磁场梯度测量；缺陷成像；层间腐蚀缺陷

中图分类号：TG115.28　　**文献标志码**：A

Defect imaging technique for interlayer corrosion in stratified conductors based on gradient-magnetic-field-measurement-based PECT

LIU Xiangbiao, LI Yong, YAN Bei, CHEN Zhenmao, QI Yong

(School of Aerospace, State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Research Centre for Inspection and Evaluation of Nuclear Structural Integrity, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Stratified conductive structures (SCS) are widely used in large and complex apparatus, which are subject to the interlayer corrosion due to rigorous environment. This paper intensively investigates the implementation and advantages of the proposed defect whereby seriously affecting quality and safety of using equipment structure, imaging technique for interlayer corrosion in SCS based on gradient-magnetic-field-measurement-based pulsed eddy current testing (GPECT) via simulations and experiments. A 3D Finite Element Model (FEM) of GPECT has been built, and the effectiveness and advantages of GPECT for defect imaging of interlayer corrosion are investigated through simulations. In parallel, an experimental system of GPECT has been set up, and a series of experiments have been conducted. The simulation results are tested. The research results indicate that the pulsed eddy gradient magnetic detecting method can carry out the imaging with high accuracy for the stratified conductive structure interlayer corrosion defect.

Key words: nondestructive testing; pulsed eddy current testing; gradient magnetic field measurement; defect imaging; interlayer corrosion

飞机机翼、核电管道等一般为多层金属结构，该结构在复杂及恶劣的服役环境下，结构层间极易出现腐蚀缺陷，严重影响结构质量与安全。因而，对多层金属结构层间腐蚀缺陷进行无损检测及评估十分重要。层间腐蚀缺陷具有隐蔽性，因而传统涡流[1-2]、超声、射线等检测手段很难对其进行行之有效地无损检测及评估。脉冲涡流检测[3-6]作为一种新型电磁无损检测技术之一，具有激励信号频谱宽、检测信号信息量丰富等优点，对多层金属结构深层和层间缺陷检测具有优势。

近年来，国内外学者对脉冲涡流检测技术在金属结构缺陷成像中的应用进行了研究[7-8]。研究表

收稿日期：2014-03-21

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51007069/E070104）；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（2011JDHZ20）。

作者简介：刘相彪，男，硕士生，研究方向为电磁无损检测理论和试验。E-mail：chukren@stu.xjtu.edu.cn。

李勇，男，副教授，研究方向为结构完整性和装备安全理论与技术。E-mail：yong.li@mail.xjtu.edu.cn。

明，基于脉冲涡流检测的缺陷成像技术可直观反映缺陷位置、形状等信息。然而，目前脉冲涡流检测腐蚀缺陷成像技术尚存在对缺陷边缘识别灵敏度低，成像效果差、缺陷评估精度低等不足之处。本研究组通过对脉冲涡流检测技术的进一步研究，提出了基于磁场梯度测量的新型脉冲涡流检测方法[9]，即脉冲涡流磁场梯度检测方法，采用该方法可实现单层金属结构材质劣化、裂纹和腐蚀缺陷的高效检测及评估[10-11]。基于前期研究成果，本研究通过仿真和试验研究，进一步探讨脉冲涡流磁场梯度检测方法在多层金属结构层间腐蚀缺陷成像中的实现手段及优势性。

1　脉冲涡流磁场梯度检测方法的仿真研究

目前，对于脉冲涡流检测三维数值的仿真大多使用的是商用有限元软件，存在对计算机性能要求高，仿真计算时间较长等问题。鉴于此，本研究采用基于退化磁矢位法[12-13]的脉冲涡流检测有限元计算方法[11]，建立脉冲涡流磁场梯度检测多层金属结构层间腐蚀缺陷三维仿真模型，由于该方法不需要对激励源划分网格，因此仿真计算具有较高精度与效率，可实现缺陷扫查信号的高效计算。

本研究所建立的三维有限元仿真模型如图 1 所示。

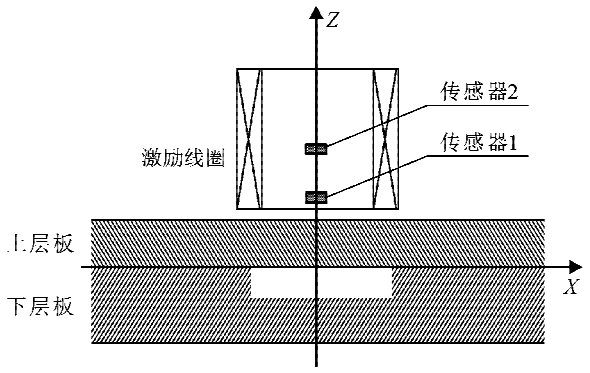

图 1　仿真模型示意图

Fig. 1　The simulation model

模型参数为：上层板尺寸 200 mm×200 mm×1 mm，下层板尺寸 200 mm×200 mm×4 mm，二者均为铝板，其导电率为 3.541 07 S/m，相对磁导率为 1；设定的层间腐蚀缺陷位于下层板上表面，其尺寸为 20 mm×20 mm×2.5 mm。检测探头包括盘式激励线圈和 2 个磁场传感器。盘式激励线圈内径为 10mm，外径为 15 mm，高为 20 mm，匝数为 1 500 匝，线圈设计提离为 0.5 mm。激励电流信号为方波信号，最大幅值为 0.8 A，频率 100 Hz，占空比 50%。2 个磁场传感器位于激励线圈中心轴的不同高度（高度差为 0.5 mm）同时采集磁场信号，所拾取磁场信号的差值除以传感器高度差即得磁场梯度信号。

检测探头扫查路径如图 2 所示。以缺陷中心为坐标原点，X 轴方向从－20 mm 处开始扫查至 20 mm 处结束，间隔为 2 mm，共扫查 21 点。Y 轴方向从－16 mm 开始至 16 mm 结束，间隔为 2 mm，共扫查 17 条。采用基于退化磁矢位法的脉冲涡流检测有限元计算方法计算得到各扫查点处的磁场信号和磁场梯度信号，提取两类信号峰值作为特征量，分别拟合得出信号峰值-探头位置曲线。为了后续对磁场信号和磁场梯度信号进行比较，对扫查所得到的信号峰值－探头位置曲线均进行了归一化处理。

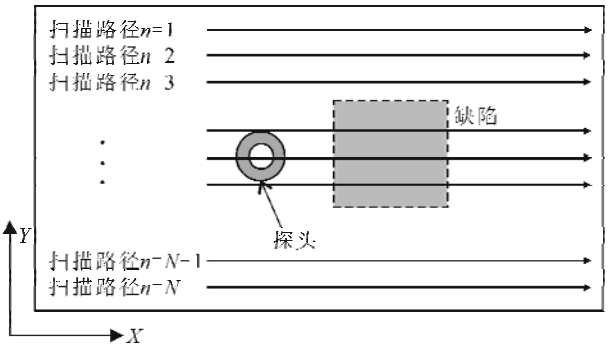

图 2　探头扫查路径

Fig. 2　The scanning paths of the probe

图 3 为在 $Y=0$ 处检测探头沿 X 轴扫查所得信号峰值－探头位置曲线。可以看出，随着探头接近缺陷中心区域，磁场信号峰值和磁场梯度信号峰值均增大，变化趋势一致。

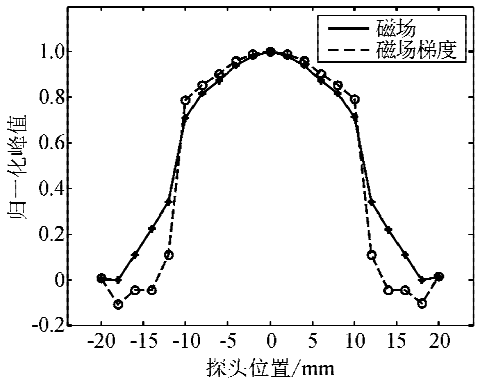

图 3　信号峰值-探头位置归一化曲线

Fig. 3　The normalized peak value vs. probe position

为了便于比较磁场信号和磁场梯度信号对缺陷边缘识别的灵敏度，对信号峰值－探头位置曲线进行求导，结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，在缺陷边缘处，磁场梯度信号峰值变化率大于磁场信号峰值变化率，说明脉冲涡流磁场梯度检测方法对缺陷

边缘识别的灵敏度更大。

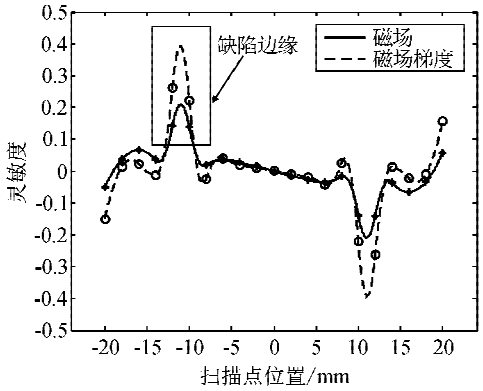

图 4 磁场梯度信号与磁场信号灵敏度曲线

Fig. 4 The sensitivity curve of gradient field and magnetic field signals against probe position

将扫查所得到的 17 条信号峰值—探头位置曲线输入 Matlab 程序中进行缺陷成像，为了提高成像分辨率，对原始成像结果进行三次样条插值，结果如图 5、图 6 所示，其中实线为层间腐蚀缺陷的实际边界。

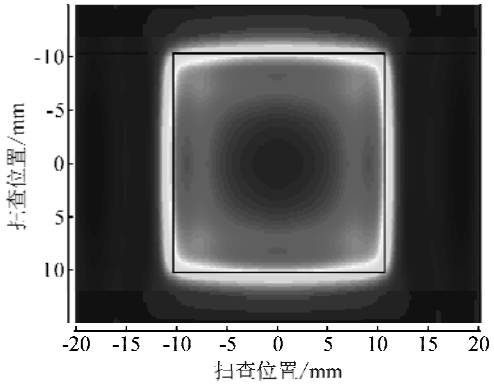

图 5 磁场梯度信号缺陷成像图

Fig. 5 Defect imaging using gradient field signals

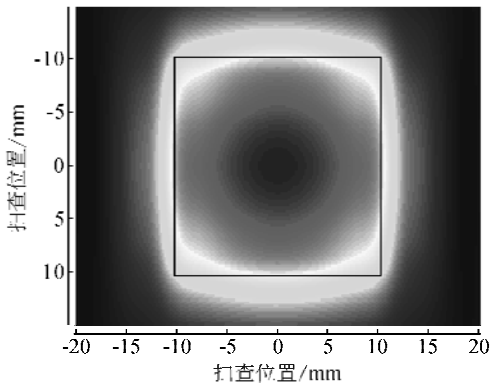

图 6 磁场信号缺陷成像图

Fig. 6 Defect imaging using magnetic field signals

为了使成像效果更为直观，对图 5、图 6 进行阈值处理。设定阈值为 0.7，背景像素值为 1(白)，目标处像素为 0(黑)，阈值处理后的成像结果如图 7、图 8 所示，其中实线为层间腐蚀缺陷实际边界。从图中可以直观看出，磁场梯度信号的成像结果可更为有效地描述层间腐蚀缺陷轮廓。由此可见，脉冲涡流磁场梯度检测方法对层间腐蚀缺陷的成像具有显著优势。

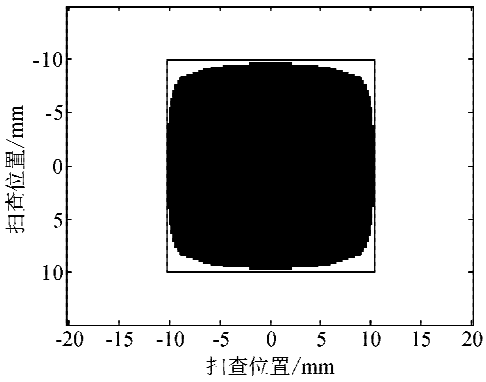

图 7 阈值处理后的磁场梯度信号缺陷成像图

Fig. 7 Defect imaging using gradient field signals after threshold processing

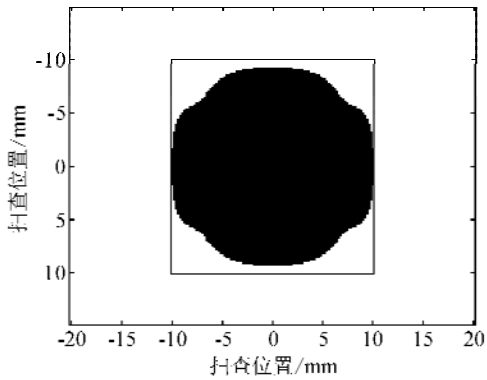

图 8 阈值处理后的磁场信号缺陷成像图

Fig. 8 Defect imaging using magnetic field signals after threshold processing

2 脉冲涡流磁场梯度检测层间腐蚀缺陷成像试验研究

2.1 试验系统

本研究所开发的脉冲涡流磁场梯度检测试验系统主要由信号发生器、功率放大器、差分放大器、滤波器、数据采集处理、探头以及试件等部分组成。信号发生器(NF 公司，WF1944B)用以产生方波激励信号。功率放大器(NF 公司，HSA4014)用于将激励信号进行放大以驱动探头。差分放大器(NF 公司，P61)将采集所得的检测信号(磁场梯度信号和磁场信号)进行放大。由于检测信号噪声主要集中在高频部分，采用滤波器(NF 公司，P63)对信号进行低通滤波。数据采集卡(ADLINK PCI-9812)用以实现前置处理所得信号的数据采集，配合 LabVIEW 程序实时显示检测信号、提取信号峰值、获取缺陷扫查曲线。

检测探头由 1 个盘式激励线圈和 2 个霍尔传感器(Hall，SS495A)组成。激励线圈内径为 10 mm，外径为 15 mm，高为 20 mm，匝数为 1 500 匝。2 个霍尔传感器放置于激励线圈中心轴的不同高度(高度差为 0.5 mm)，2 个传感器所拾取磁场信号的差值除以传感器高度差即得磁场梯度信号。

检测试件为紧密贴合的双层铝板，上层板尺寸为 200 mm×200 mm×1 mm，下层板尺寸为 200 mm×200 mm×4 mm，层间腐蚀缺陷(20 mm×20 mm×2.5 mm)位于下层板表面。

2.2　试验结果及分析

试验中采用幅值为 3.5 V，频率 100 Hz，占空比为 50%的脉冲方波作为激励信号，采用功率放大器对脉冲激励信号放大 10 倍以提高激励线圈磁场强度。对检测信号(磁场梯度信号和磁场信号)分别进行了差分处理，将差分后的信号放大 10 倍并进行低通滤波(截止频率为 15 kHz)，利用数据采集卡同步采集前置处理所得磁场梯度信号和磁场信号，如图 9、图 10 所示。

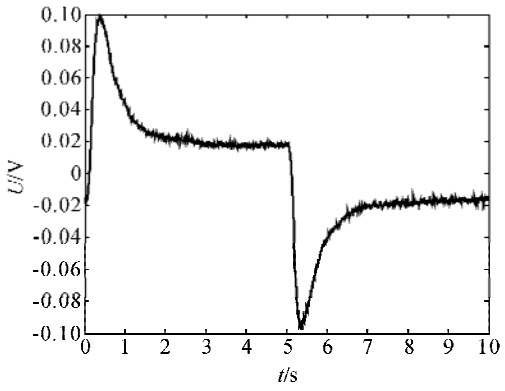

图 9　磁场梯度信号实测波形

Fig. 9　Gradient field signals of PECT

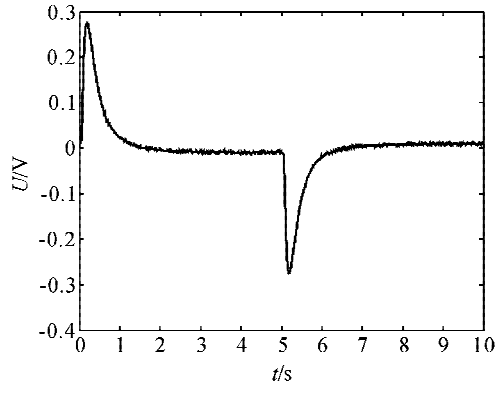

图 10　磁场信号实测波形

Fig. 10　Magnetic field signals of PECT

从图 9、图 10 可以看出，磁场梯度信号和磁场信号均有明显的峰值特征，故在后续扫查(探头扫查路径如图 2 所示)中，利用 LabVIEW 程序实时提取信号峰值作为特征量，拟合获取信号峰值－探头位置扫查曲线。将扫查曲线输入 Matlab 进行成像处理，为了提高成像分辨率，对原始成像结果进行了三次样条插值处理。磁场梯度信号和磁场信号缺陷成像结果如图 11，图 12 所示，图中实线框显示了检测试件层间腐蚀缺陷的实际边界。

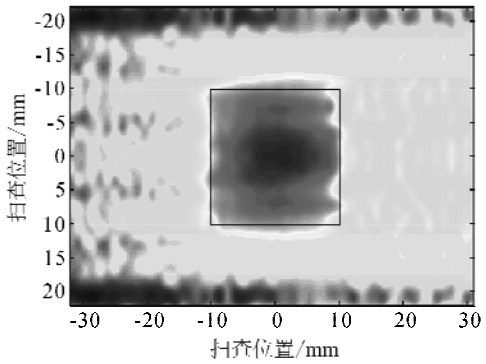

图 11　磁场梯度信号缺陷成像图

Fig. 11　Defect imaging using gradient field signals via experiments

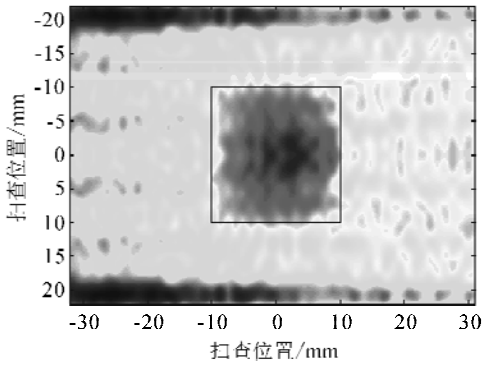

图 12　磁场信号缺陷成像图

Fig. 12　Defect imaging using magnetic field signals via experiments

对图 11、图 12 进行阈值处理，设定阈值为 0.7，背景像素值为 1(白)，目标处像素为 0(黑)，阈值处理后的成像结果如图 13、图 14 所示，图中实线为检测试件层间腐蚀缺陷实际边界。

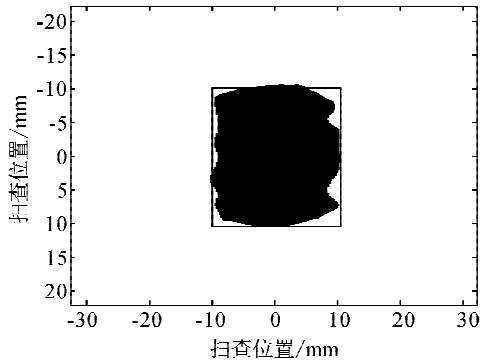

图 13　阈值处理后的磁场梯度信号缺陷成像图

Fig. 13　Defect imaging using gradient field signals after threshold processing via experiments

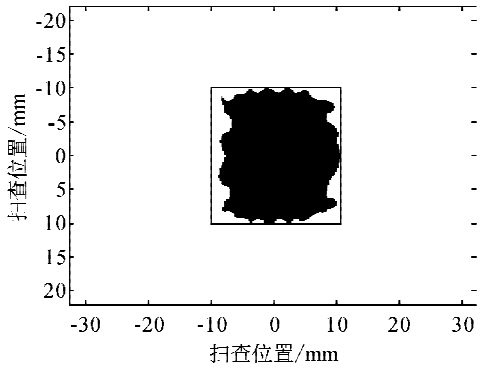

图14 阈值处理后的磁场信号缺陷成像图

Fig. 14 Defect imaging using magnetic field signals after threshold processing

从成像结果可见,基于脉冲涡流磁场梯度检测的层间腐蚀缺陷成像结果可更为有效地描述缺陷轮廓,该结论与仿真分析结论相一致。仿真和试验研究均表明,脉冲涡流磁场梯度检测方法可对多层金属结构层间腐蚀缺陷进行高精度成像。

3 结 论

1) 基于退化磁矢位法,建立了脉冲涡流磁场梯度检测多层金属结构层间腐蚀缺陷三维有限元模型,仿真分析了脉冲涡流磁场梯度检测方法在多层金属结构层间腐蚀缺陷成像中的有效性和优势性。

2)搭建了脉冲涡流磁场梯度检测试验系统,通过试验,进一步验证了仿真结论。仿真和试验研究结果表明:与传统脉冲涡流检测方法相比,脉冲涡流磁场梯度检测方法有效提升了多层金属结构层间腐蚀缺陷边缘识别灵敏度,具有较高的缺陷成像精度。

参考文献:

[1] 李玉军,梁琨,郭会军. 最小二乘支持向量机在多层金属膜厚度检测中的应用[J]. 西安理工大学学报,2010,26(3):345-350.
Li Yujun, Liang Kun, Guo Huijun. Application of least square support vector machine in measuring the thickness of multiple layers metal film [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010, 26(3):345-350.

[2] 李天鹏,何纲,王圣玉,等. 单个电涡流传感器多参数在线测量[J]. 西安理工大学学报,2003,19(3):269-271.
Li Tianpeng, He Gang, Wang Shengyu, et al. Multi-parameter of on-line measurement with single Eddy-Current sensor[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2003, 19(3):269-271.

[3] 周德强,李勇,张秋菊,等. 脉冲涡流金属厚度检测信号及其特征提取[J]. 中国机械工程,2012,23(15):1771-1773,1778.
Zhou Deqiang, Li Yong, Zhang Qiuju, et al. Feature extraction of pulsed eddy current signals on metal thickness measurement[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(15):1771-1773, 1778.

[4] 李勇,齐勇,陈振茂,等. 基于脉冲涡流差分信号提离交汇点的亚表面层材质劣化检测技术理论研究[J]. 无损检测,2012,34(7):1-10.
Li Yong, Qi Yong, Chen Zhenmao, et al. Evaluation of subsurface material degradation based on a new lift-off intersection point of pulsed eddy current [J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(7):1-10.

[5] 齐勇,李勇,陈振茂,等. 一种新型脉冲涡流提离交汇点的实验研究[J]. 空军工程大学学报,2012,13(6):80-84.
Qi Yong, Li Yong, Chen Zhenmao, et al. Experimental investigation on a new lift-off intersection point of pulsed eddy current testing[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2012, 13(6):80-84.

[6] Li Yong, Chen Zhenmao, Qi Yong. Generalized analytical expressions of liftoff intersection in PEC and a liftoff-Intersection-based fast inverse model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10):2931-2934.

[7] 王雅萍,朱目成,周肇飞,等. 亚表面缺陷的实时成像检测[J]. 光电工程,2006,33(5):108-112.
Wang Yaping, Zhu Mucheng, Zhou Zhaofei, et al. Real-time imaging testing for sub-surface defects[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006,33(5):108-112.

[8] 唐莺,潘孟春,罗飞路,等. 阵列脉冲涡流腐蚀缺陷成像检测技术研究[J]. 计算机测量与控制,2007,15(9):1151-1153.
Tang Ying, Pan Mengchun, Luo Feilu, et al. Research on array pulsed eddy current imaging technique used to detect corrosion [J]. Computer Measurement & Control, 2007, 15(9):1151-1153.

[9] 齐勇,李勇,陈振茂,等. 基于暂态磁场梯度信号的脉冲涡流无损检测和定量评估技术[J]. 无损检测,2011,34(10):3-45.
Qi Yong, Li Yong, Chen Zhenmao, et al. Research on pulsed eddy current testing using measurement of transient gradient magnetic field[J]. Nondestructive Testing, 2011, 34(10):3-45.

[10] Li Yong, Qi Yong, Chen Zhenmao, et al. Pulsed eddy current testing based on gradient magnetic field measurement [C]. 2012 Sixth international conference on electromagnetic field problems and applications, Dalian, China, 2012.

[11] 齐勇,李勇,刘相彪,等. 基于GMFM的脉冲涡流检测亚表面腐蚀缺陷成像技术[J]. 空军工程大学学报,2013,14(5):63-66,94.
Qi Yong, Li Yong, Liu Xiangbiao, et al. Research of pulsed eddy current testing for defect imaging based on gradient magnetic field measurement[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2013, 14(5):63-66,94.

[12] 肖美华,陈振茂,李勇,等. 多层管HIP焊接界面脱粘涡流检测数值模拟研究[J]. 失效分析与预防,2013,8(2):65-68.
Xiao Meihua, Chen Zhenmao, Li Yong, et al. Numerical study on feasibility of ECT for detection of delamination defect in HIP welding of multilayer tubes[J]. Failure Analysis and Prevention, 2013, 8(2):65-68.

[13] Chen Zhenmao, Mihai Rebican, Kenzo Miya, et al. 3D simulation of remote field ECT by using Ar method and a new formula for signal calculation[J]. Research in Nondestructive Testing, 2005, 16 :35-53.

(责任编辑 李虹燕)