

铁磁屏蔽对脉冲涡流检测的影响机理

王 俊^{1,2}, 周德强^{*1,2,3}, 肖俊峰^{1,2}, 尤丽华^{1,2}, 盛卫锋^{1,2}

(1.江南大学机械工程学院,江苏无锡,214122;2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室,
江苏无锡,214122;3.无锡国盛精密模具有限公司,江苏无锡,214024)

摘要 针对脉冲涡流进行缺陷检测经常受到激励磁场和背景磁噪声干扰的问题,提出对缺陷处进行铁磁屏蔽的方法。在脉冲涡流检测中的磁屏蔽理论分析基础上,建立了脉冲涡流检测的有限元仿真模型。仿真表明:对于铁磁性构件,铁磁屏蔽能够使感应涡流尽可能地分布在缺陷附近,该措施减弱了检测信号的幅值,但对于不同深度的缺陷能够更好的辨别,能有效提高缺陷检测的灵敏度。根据有限元仿真结果,制作了铁磁性材料的磁屏蔽罩。实验表明:在铁板的表面,铁磁屏蔽能有效提高其检测信号灵敏度,而在铁板亚表面,灵敏度获得的提升较小。

关键词 脉冲涡流;铁磁性;铁磁屏蔽;灵敏度

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.01.019

中图分类号 TG115.28 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)01-0100-06

Investigation of the Mechanism of the Influence of Ferromagnetic Shielding on Pulsed Eddy Current Testing(PECT)

WANG Jun^{1,2}, ZHOU Deqiang^{1,2,3}, XIAO Junfeng^{1,2}, YOU Lihua^{1,2}, SHENG Weifeng^{1,2}

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. The Key Laboratory for Advanced Food Manufacturing Equipment Technology of Jiangsu province, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 3. Wuxi G.S Precision Tool CO., LTD, Wuxi 214024, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the problem that eddy current signal was easily disturbed by the excitation magnetic field and background magnetic noise, the method of PECT based on ferromagnetic shielding was proposed. The finite element simulation model with ferromagnetic shielding was established on the base of the theoretical analysis of magnetic shielding. The simulation result showed that the component of eddy current became intensive under the ferromagnetic shielding, although it weakened the amplitude of the testing signal. The defects of different depth can be easily recognized and the sensitivity of signal is effectively improved. According to the results of finite element simulation, the magnetic shield of ferromagnetic material is manufactured. The experimental result indicates that magnetic shielding can effectively enhance the sensitivity of testing on the surface defects of ferromagnetic metal, whereas the method cannot improve the detection effect on the subsurface defects of ferromagnetic metal.

Key words: pulsed eddy current; ferromagnetic; ferromagnetic shielding; sensitivity

收稿日期:2015-04-14

基金项目:国家自然科学基金(5117053);中国博士后基金(2012M520994)

作者简介:王 俊(1989—),男,江苏扬州人,硕士生,主要从事无损检测及自动化研究.E-mail:906803846@qq.com

* 通讯作者:周德强(1979—),男,湖北天门人,博士,副教授,主要从事无损检测及自动化研究.E-mail:zhoudeqiang@jiangnan.edu.cn

引用格式:王俊,周德强,肖俊峰,等.铁磁屏蔽对脉冲涡流检测的影响机理研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(1):100-105. WANG Jun, ZHOU Deqiang, XIAO Junfeng, et al. Investigation of the Mechanism of the Influence of Ferromagnetic Shielding on Pulsed Eddy Current Testing(PECT)[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(1): 100-105.

脉冲涡流是近几年发展起来的一种新型无损检测方法^[1-3]。目前,该检测技术主要应用于非铁磁性材料(如铝、铜等)和铁磁性材料的缺陷检测和区域厚度的测量^[4-5]。国内外研究者在非铁磁材料涡流检测的理论建模、新型探头设计、缺陷反演等方面开展了深入研究,已经取得了一系列的研究成果^[6-9];而针对铁磁构件信号信噪比低、易受干扰的特点,实施涡流探伤时须增添磁饱和器和^[10],设计低噪声脉冲涡流微弱信号调理电路^[11]以及运用统计学对脉冲涡流信号进行处理^[12-13],以上方法均未从信号源的角度来提高检测灵敏度。文献^[14]提出了一种基于磁真空泄漏原理的漏磁检测新方法,认为磁屏蔽能够清除较强的背景磁场,使得缺陷处漏磁场泄露的最大化。在检测石油钻杆时,配有磁屏蔽器的探头可明显提高漏磁信号信噪比,有利于提高缺陷漏磁识别率^[15]。上述方法都是针对铁磁性构件在漏磁检测时使用磁屏蔽技术。

脉冲涡流检测时传感器往往会受到激励磁场和磁噪声的干扰,使得检测信号灵敏度较低,为了消除这种背景磁场的干扰,有研究者提出了采用磁屏蔽的技术来更好地获得缺陷处的涡流扰动磁场。在屏蔽材料的选择上,低频电磁场的屏蔽体应选用铁磁性材料,如纯铁、硅钢和坡莫合金等;某些金属或合金是良导体,如铜、铝等非铁磁性材料,对高频磁场有很好的屏蔽作用,但对低频磁场的屏蔽却不够理想^[16-17]。由于趋肤效应的存在,脉冲涡流激励电流频率一般在 100 kHz 以下,可以采用铁磁屏蔽的技术来提高检测信号的灵敏度,磁场屏蔽机理主要是依靠高导磁材料所具有的低磁阻,对磁通起着分路的作用,从而使得屏蔽体内部的磁场大为减弱,磁屏蔽材料对磁场能的吸收以及电磁波在屏蔽材料发生多次反射和折射造成原始磁场发生衰减^[18-20]。

本文从铁磁屏蔽对涡流磁场的折射和衰减的物理特性出发,提出一种增强铁磁性构件检测信号灵敏度的新方法,并通过有限元仿真和实验验证。

1 脉冲涡流检测屏蔽理论分析

在对缺陷处的检测区域增加屏蔽罩来提高缺陷的辨识能力,所屏蔽的是脉冲激励源场和周围电子元器件发散出的噪声磁场,目的是使霍尔传感器拾取的是纯粹涡流扰动场的信号。磁场具有聚集和扩散的特性并遵循连续传递条件:切向磁场强度相等、法向磁感应强度相等,根据此理论可以得出式(1)。图 1 为介质面处的磁折射。从图 1 可以看出,磁感线在穿过不同磁导率(μ_1 、 μ_2 分别为介质 1、2 的磁

导率)的材料时会像光线一样发生磁折射的现象, $B_1(H_1)$ 和 $B_2(H_2)$ 分别为介质 1 和介质 2 的磁感应强度(磁场强度), α_1 和 α_2 分别为介质 1、2 中磁感线与中法线的夹角,式(2)反映了磁感线的折射规则,磁的折射偏转方向与入射角以及介质的导磁率有关^[14]:

$$\begin{aligned} H_1 \sin \alpha_1 &= H_2 \sin \alpha_2 \Rightarrow \frac{H_1}{B_1} \frac{\sin \alpha_1}{\cos \alpha_1} = \frac{\sin \alpha_2}{B_2 \cos \alpha_2} \quad (1) \\ B_1 \cos \alpha_1 &= B_2 \cos \alpha_2 \end{aligned}$$

由 $B = \mu H$, 可得:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\mu_1} = \frac{\tan \alpha_2}{\mu_2} \Rightarrow \alpha_2 = \arctan \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right) \quad (2)$$

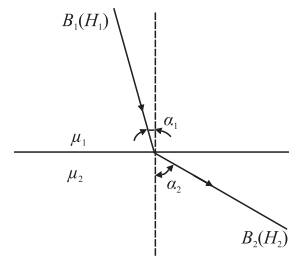


图 1 介质面处的磁折射

Fig.1 Magnetic refraction of medium interface

2 仿真模型及分析

2.1 模型的建立

本文所采用的仿真模型是基于 Comsol Multiphysics 4.3b 中的 AC/DC 模块建立,并在瞬态电磁场环境下进行求解和分析。本文针对铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测,分别建立了图 2 中非屏蔽下和铁磁屏蔽条件下的脉冲涡流圆柱型探头二维轴对称检测模型。脉冲涡流仿真参数设置如下:激励电流频率为 100 Hz、大小 0.1 A、占空比为 0.5 的方波,线径为 1 mm²,匝数为 667 匝;试件选用铁磁性构件,铁的初始相对磁导率为 4 000,电导率为 1.12×10^7 S/m,相对介电常数设置为 1,铁磁屏蔽材料的初始电磁参数与铁的电磁参数相一致,屏蔽层厚度为 1 mm,高度为 10 mm,宽度为 5 mm。

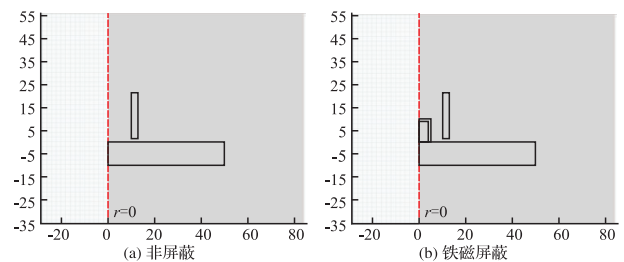


图 2 脉冲涡流检测模型

Fig. 2 The model of PECT

2.2 铁磁性构件缺陷脉冲涡流检测仿真分析

分别在非屏蔽和铁磁屏蔽下进行铁磁性构件缺

陷处的脉冲涡流仿真分析,得出各自的涡流密度和磁力线分布见图3。可看出非屏蔽和铁磁屏蔽下的感应电流密度最大值是 $1.03 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 、 $4.64 \times 10^6 \text{ A/m}^2$,因为非屏蔽下的感应电流密度较大,其原因是激励源产生的磁场遇到屏蔽材料时,磁场发生了衰减,但非屏蔽下的涡流分布却没有屏蔽时集中,铁磁屏蔽下的涡流更多集中分布在缺陷处,非屏蔽下的涡流分布区域较宽;另一方面,在铁磁屏蔽下进行检测,高磁导率的铁磁性屏蔽罩导致脉冲涡流磁感线发生较大的偏离,使磁感线都从磁屏蔽体内部经过,所以图3(b)中没有磁感线进入到屏蔽体内部。铁磁屏蔽较大地削弱了原始激励磁场,而涡流是具有传导性的电流,屏蔽体两侧附近产生的涡流传导进入缺陷,缺陷使涡流产生扰动,进而拾取磁场量的变化;铁磁屏蔽减少了激励磁场(一次磁场)的影响,获得了纯粹的缺陷处涡流扰动产生的磁场(二次磁场),因此检测灵敏度更好。

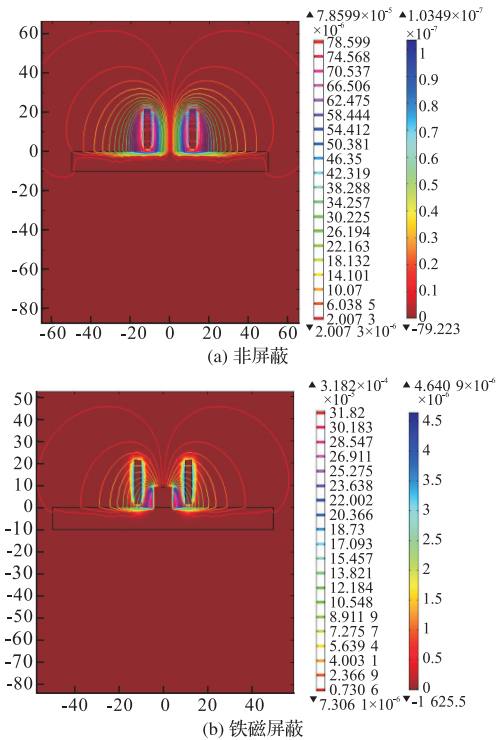


图3 涡流及磁场分布

Fig.3 The distribution of EC and magnetic induced lines

2.3 铁磁性构件检测信号灵敏度分析

为了进一步分析磁屏蔽对脉冲涡流检测效果的影响,仿真时设置缺陷长度为2 mm,小于屏蔽罩的宽度,分别对2~8 mm深度的缺陷进行检测和分析,提取缺陷上方1 mm磁通Z分量,得到非屏蔽和铁磁屏蔽状态下脉冲涡流时域检测波形见图4。可以看出,非屏蔽和铁磁屏蔽状态下的检测波形差异明显,具有铁磁屏蔽的时域波形先以较短的时间上升到一个极值,又迅速减小并趋于稳定。这是由于

铁磁性材料对低频信号具有较好的屏蔽效果,而脉冲涡流的高频和低频成分分别出现在响应的上升沿和稳定阶段,所以在屏蔽后信号的幅值在响应的稳定阶段迅速下降。2 mm缺陷的响应稳定阶段磁通密度在无屏蔽时为 $7.2 \times 10^{-3} \text{ T}$,有屏蔽时为 $2.2 \times 10^{-5} \text{ T}$,是因为铁磁屏蔽材料会对激励磁场产生损耗和衰减,尽管无屏蔽时磁通密度较大,然而磁屏蔽时的不同缺陷检测信号区分度却更为明显,为了进一步分析磁屏蔽对检测信号灵敏度和检测效果的影响,提取不同缺陷响应稳定阶段的信号峰值,并计算出它们的信号灵敏度情况。在非屏蔽和铁磁屏蔽中,基础磁通密度有较大的差异,单纯比较 ΔT 的大小并不能说明检测效果的优劣,鉴于此,以 $\Delta T/T$ 为基础,并引入式(3)计算灵敏度 $S^{[21]}$ 。

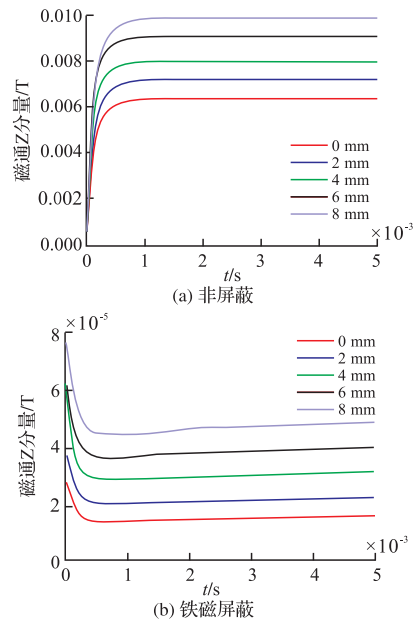


图4 脉冲涡流检测缺陷信号

Fig. 4 PECT response signal

$$S = 10 \times \lg(\Delta T/T) \tag{3}$$

表1为非屏蔽和磁屏蔽状态下的各个缺陷峰值和相邻缺陷信号之间的灵敏度情况,没有缺陷(即0 mm缺陷深度)时的非屏蔽和屏蔽下的峰值分别为 $6.4 \times 10^{-3} \text{ T}$ 和 $1.52 \times 10^{-5} \text{ T}$ 。

表1 仿真信号峰值及灵敏度

Tab.1 The peak value and sensitivity of simulation

缺陷/mm	非屏蔽信号		铁磁屏蔽信号	
	峰值/T	灵敏度	峰值/T	灵敏度
2	7.18×10^{-3}	-8.96	2.17×10^{-5}	-3.69
4	8.01×10^{-3}	-9.37	3.12×10^{-5}	-3.59
6	9.12×10^{-3}	-8.58	3.97×10^{-5}	-5.65
8	9.84×10^{-3}	-11.02	4.87×10^{-5}	-6.45

可以看出,非屏蔽的信号峰值较大,但铁磁屏蔽下的相邻缺陷的检测信号灵敏度比非屏蔽下的灵敏

度要高,再计算得到它们各自的平均灵敏度分别为 -9.48 和 -4.84,这充分说明采用铁磁屏蔽的方式能有效提升脉冲涡流对铁磁性构件的检测灵敏度。

3 实验装置及器材

本实验装置主要由脉冲信号发生模块、Hall 传感器探头、磁屏蔽罩、功率放大模块、信号调理电路、数据采集模块和被检试件等部分组成。脉冲信号发生模块采用 YUANLONG VD1641 函数发生器,它具有可选的任意波形生成功能。圆柱形探头由圆柱形线圈、铁氧体、霍尔传感器、铁磁屏蔽罩组合而成的铁磁屏蔽检测探头,见图 5,磁屏蔽罩的厚度为 1 mm,高度为 15 mm。其中 Hall 传感器探头采用 SS95A226 霍尔传感器,涡流检测的激励线圈为 800 匝,线径为 0.3 mm 的漆包线。功率放大模块采用英国牛顿科技公司研制的 Newtons4th Ltd. LPA05B 型号的功率放大器。信号调理电路主要包括滤波电路和信号放大电路,放大电路选用 ANALOGDEVICES 的 INA111 仪用放大器为核心芯片。数据采集模块选用 Adlink 公司推出的一款数据采集卡 DAQ2010 作为实验所使用的数据采集设备,并利用 Matlab 数据采集工具箱进行相应数据的采集。被检试件为刻有不同深度的铁板。实验装置参考文献[22],铁板尺寸以及缺陷大小见图 6。



图 5 铁磁屏蔽探头

Fig.5 The probe of iron shield

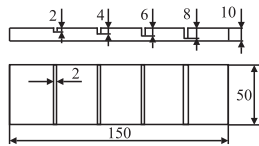


图 6 铁板的缺陷尺寸(mm)

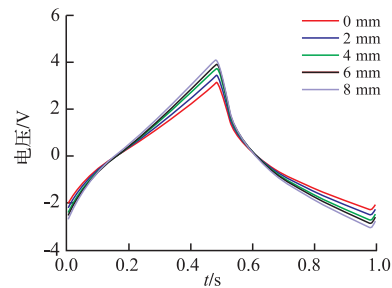
Fig.6 The defect size of the iron plate

4 实验及结果分析

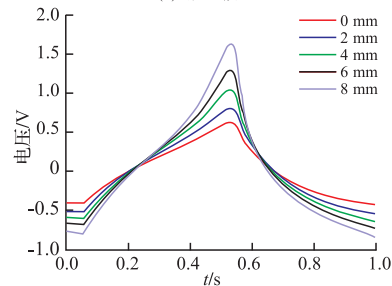
4.1 试件表面检测效果分析

根据仿真所得到的磁屏蔽下检测效果,设计相应的实验来验证仿真的结论。对激励线圈施加大小 1 A、频率 100 Hz 的脉冲方波,经过放大器,由霍尔

传感器捕获试件缺陷信号,经过调理电路后进行信号的采集,取 10 个周期的缺陷信号进行时域平均滤波处理,其数据处理流程可参考文献[22]。分别在非屏蔽和铁磁屏蔽下进行缺陷检测,提取脉冲涡流响应的差分信号进行分析,检测信号时域波形见图 7。可以看出:在没有屏蔽的情况下,缺陷的辨识度较低,检测效果不是很理想;而当增加了铁制屏蔽罩后,尽管信号幅值有所减弱,但可以明显看出能提高缺陷的辨识度,提高了检测效果。为了进一步分析磁屏蔽对检测信号灵敏度的影响,提取各个缺陷的差分信号的峰值,按照式(3)计算电压信号灵敏度,结果见表 2。由于铁磁屏蔽罩内置霍尔传感器而产生间隙,无法做到理想的完全屏蔽状态,故信号的幅值较仿真中减弱较小,0 mm 深度缺陷时的非屏蔽和屏蔽信号峰值分别为 3.16 V 和 0.63 V。从表 2 可以明显看出铁磁屏蔽下的检测信号灵敏度显著增大,这是由于铁磁屏蔽使得霍尔传感器更多捕获到的是缺陷处的涡流扰动磁场信号而消除了激励磁场以及实验中背景磁噪声的影响。



(a) 非屏蔽



(b) 铁磁屏蔽

图 7 铁板表面检测信号

Fig.7 The surface signal of iron plate

表 2 铁板表面信号峰值及灵敏度

Tab.2 The peak value and sensitivity of the surface of the iron plate

缺陷/mm	非屏蔽信号		铁磁屏蔽信号	
	峰值/V	灵敏度	峰值/V	灵敏度
2	3.45	3.76	3.90	4.08
4	-10.75	-10.57	-14.32	-13.146
6	0.8	1.05	1.29	1.648
8	-5.69	-5.05	-6.40	-5.67

4.2 试件亚表面检测效果分析

在非屏蔽和铁磁屏蔽下对试件的亚表面进行检测来进一步分析其检测效果。图8分别为非屏蔽和铁磁屏蔽下的脉冲涡流时域响应信号波形,可以看出亚表面的检测信号不管是非屏蔽还是磁屏蔽下,缺陷的辨识度都比较低。提取各个缺陷的峰值信号,计算出它们的灵敏度,得到表3,为了便于表示,0 mm深度缺陷的有关信息并没有出现在表中,在非屏蔽和屏蔽下其值分别为1.25 V和0.59 V。从表3可以得出,在铁磁屏蔽下,铁板亚表面的缺陷信号峰值较小,信号的灵敏度相对于非屏蔽状态下提升较小,这就说明了铁磁屏蔽对铁板亚表面的信号检测灵敏度影响较小,并未显著提高其检测效果。

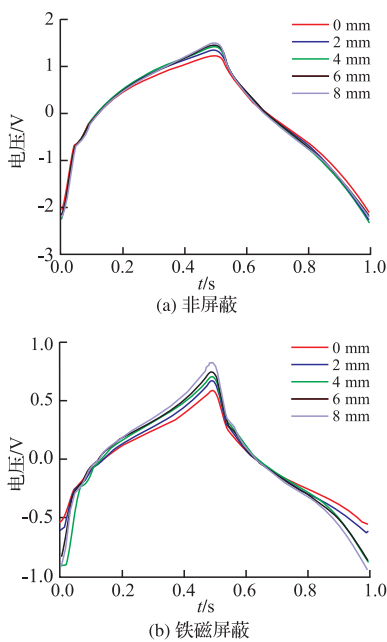


图8 铁板亚表面检测信号

Fig.8 The sub-surface signal of iron plate

表3 铁板亚表面信号峰值及灵敏度

Tab.3 The peak value and sensitivity of the sub-surface of the iron plate

缺陷/mm	非屏蔽信号		铁磁屏蔽信号	
	峰值/V	灵敏度	峰值/V	灵敏度
2	1.36	1.43	1.47	1.53
4	-10.56	-9.03	-15.53	-13.89
6	0.67	0.71	0.75	0.83
8	-8.68	-6.80	-12.49	-9.72

5 结论

本文进行了铁磁屏蔽下的脉冲涡流检测的理论分析,通过有限元仿真和实验相结合,对铁板的缺陷进行了脉冲涡流检测,并对检测信号进行了铁磁屏蔽机理分析,得出了以下结论:

1)对于铁磁性构件的脉冲涡流缺陷检测,铁磁屏蔽会减弱试件上的涡流强度,使得涡流更集中在缺陷附近分布,屏蔽了激励磁场的影响(一次磁场),传感器所拾取更多的是缺陷处的磁场(二次磁场)。

2)对铁磁性构件表面缺陷的脉冲涡流检测,铁磁屏蔽技术可以有效提高缺陷的辨识度,增强检测信号的灵敏度和检测效果;而对于铁磁性构件亚表面的检测,铁磁屏蔽对检测信号灵敏度提升较小,对检测效果没有显著的影响。

参考文献(References):

- [1] Smith R A, Hugo GR. Transient Eddy Current NDE for Ageing Aircraft Capabilities and Limitations[J]. Insight, 2001, 43(1): 14-25.
- [2] Clauzon T, Thollon F, Nicolas A. Flaws Characterization with Pulsed Eddy Currents NDT[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(3): 1873-1876.
- [3] Safizadeh MS, Lepine BA, Forsyth DS, et al. Time-Frequency Analysis of Pulsed Eddy Current Signals[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2001, 20(2): 73-79.
- [4] Young-Kil Shin, Dong-Myung Choi, Young-Joo Kim, et al. Signal Characteristics of Differential Pulsed Eddy Current Sensors in the Evaluation of Plate Thickness[J]. NDT&E International, 2009, 42(3): 215-221.
- [5] Dengfeng Chen, Qichun Ji, Hongcai Zhang, et al. Application of Pulsed Eddy Current in Plate Thickness Evaluation[C]//ICIEA, 2009: 3286-3288.
- [6] Theodoulidis T, Poulakis N, Dragogias. A. Rapid Computation of Eddy Current Signals from Narrowcracks[C]//NDT&E International, 2010, 43(1): 13-19.
- [7] Ladislav J, Klara C, Noritaka Y, et al. Multi-Probe Inspection for Enhancing Sizing Ability in Eddy Current Nondestructive Testing[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 144(6): 1618-1621.
- [8] 耿强,田淑侠,黄太回,等. 基于支持向量机和神经网络方法的应力腐蚀裂纹定量重构[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 196-199.
GENG Qiang, TIAN Shuxia, HUANG Taihui, et al. Quantitative Reconstruction of Stress Corrosion Crack Based on Support Vector Machine and Neural Network Method[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2010, 25(10): 196-199. (in Chinese)
- [9] 范孟豹,黄平捷,叶波,等. 基于反射与折射论的电涡流检测探头阻抗解析模型[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 5950-5954.
FAN Mengbao, HUANG Pingjie, YE Bo, et al. Imped-

- ance Analytical Model of Eddy Current Testing Based on the Theory of Reflection and Refraction[J]. Chinese Journal of Physics, 2009, 58(9): 5950-5954. (in Chinese)
- [10] 宋凯,康宜华,孙燕华,等.漏磁与涡流复合探伤时信号产生机理研究[J].机械工程学报,2009,45(7):233-237.
SONG Kai, KANG Yihua, SUN Yanhua, et al. Study of Signal Mechanism Based on Combining Magnetic Flux Leakage and Eddy Current testing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 233-237. (in Chinese)
- [11] 孙思成,付跃文.脉冲涡流检测微弱信号调理电路设计[J].无损检测,2013,35(5):18-22.
SUN Sicheng, FU Yuewen. Design of Weak Signal Conditioning Circuit for Pulsed Eddy Current[J]. Chinese Non-Destructive Testing, 2013, 35(5): 18-22. (in Chinese)
- [12] 黄琛.铁磁性构件脉冲涡流测厚理论与仪器[D].武汉:华中科技大学,2010.
HUANG Chen. Theory and Instrumentation for Pulsed Eddy Current wall-Thinning Measurement of Ferromagnetic Objects[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)
- [13] G Yang, G Y Tian, P W Que, et al. Data Fusion Algorithm for Eddy Current Detection[J]. Measurement Science & Technology, 2007, 1(6): 312-316.
- [14] 孙燕华,康宜华.一种基于磁真空泄漏原理的漏磁无损检测新方法[J].机械工程学报,2010,46(14):18-23.
SUN Yanhua, KANG Yihua. New MFL Nondestructive Testing Method Based on Magnetic Vacuum Leakage[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 18-23. (in Chinese)
- [15] 马义来,林立,蒋开文,等.利用磁屏蔽效应改善钻杆漏磁检测信号信噪比[J].无损检测,2013,35(3):9-11.
MA Yilai, LIN Li, JIANG Kaiwen, et al. SNR Improvement for Drill Pipeleakage Flux Testing Signals by Using Magnetic Shielding effect[J]. Chinese Non-destructive Testing, 2013, 35(3): 9-11. (in Chinese)
- [16] 王锦成.电磁屏蔽材料的屏蔽原理及研究现状[J].化工新型材料,2002,30(7):16-18.
WANG Jincheng. Mechanism and Development of Electromagnetic Shielding Materials[J]. New Chemical Materials, 2002, 30(7): 16-18. (in Chinese)
- [17] 李建华,钟达,梅刚华,等.电子设备的电磁屏蔽研究[J].电子元器件应用,2004,6(5):51-54.
LI Jianhua, ZHONG Da, MEI Ganghua, et al. Research on the Electromagnetic Screen of Electronic Equipment[J]. Electronic Component & Device Applications, 2004, 6(5): 51-54. (in Chinese)
- [18] 赵灵智,胡社军,胡玉琴,等.电磁屏蔽材料的屏蔽原理与研究现状[J].包装工程,2006,27(12):1-3.
ZHAO Lingzhi, HU Shejun, HU Yuqin, et al. Shielding Principle and Research Progress of Electromagnetic Shielding Materials[J]. Packing Engineering, 2006, 27(12): 1-3. (in Chinese)
- [19] 王晓辉,唐露新,李云智,等.电磁屏蔽技术及材料应用研究新动向[J].材料开发与应用,2007,23(2):67-71.
WANG Xiaohui, TANG Luxin, LI Yunzhi, et al. Electromagnetic Shielding Technology and new Trends of the Applied Materials Research[J]. Development and Application of Materials, 2007, 23(2): 67-71. (in Chinese)
- [20] 丁世敬,赵跃智,葛德彪.电磁屏蔽材料研究进展[J].材料导报,2008,22(4):30-37.
DING Shijing, ZHAO Yuezhi, GE Debiao. Research Progress in Electromagnetic Shielding Materials[J]. Material Review, 2008, 22(4): 30-37. (in Chinese)
- [21] 喻星星,付跃文.基于磁导率非线性条件下的油套管脉冲涡流检测仿真[J].无损检测,2013,35(2):1-4.
YU Xingxing, FU Yuewen. Simulation of Oil Casing Pulsed Eddy Current Testing Based on Nonlinear Magnetic Conductivity[J]. Chinese Non-Destructive Testing, 2013, 35(2): 1-4. (in Chinese)
- [22] 周德强,王俊,张秋菊,等.铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测传感机理研究[J].仪器仪表学报,2015,36(5):990-992.
ZHOU Deqiang, WANG Yun, ZHANG Qiuqu, et al. Research on Sensing Mechanism of Ferromagnetic Component Flaw Using Pulsed Eddy Current Testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 990-992. (in Chinese)

(编辑:徐敏)