

# 交流电磁场检测(ACFM)在薄壁不锈钢焊缝中的应用

刘子淇, 杨会敏, 严 宇

(核工业工程研究设计有限公司, 北京 101300)

**摘要:**为解决核设施焊缝检测工期紧、检测要求高、传统射线检测技术需要专用时间窗口、无法交叉施工、辐射风险大等问题,提出了使用交流电磁场检测(ACFM)技术检测薄壁不锈钢焊缝中直径约为0.5 mm的小缺陷。通过理论计算研究了该技术应用于薄壁不锈钢焊缝检测的可行性;运用仿真计算优化探头设计,提高了传统ACFM检测技术的检测精度和稳定性;利用该技术对不同种类、不同尺寸的缺陷进行了检测验证。验证结果表明,针对薄壁不锈钢焊缝,该技术对危害性较大的面积型缺陷可100%检出,且可检出直径约为0.4 mm的体积型缺陷。

**关键词:**核设施;交流电磁场;薄壁不锈钢;焊缝检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2023)09-0049-05

## Application of alternating current field measurement technique (ACFM) in the detection of thin-walled stainless steel welds

LIU Ziqi, YANG Huimin, YAN Yu

(Nuclear Industry Research and Engineering Co., Ltd., Beijing 101300, China)

**Abstract:** The weld inspection of nuclear facilities has a short limit time and high acceptance requirements. At the same time, traditional film radiography technology requires a special time window, cannot cross operation and has high radiation risks. To solve these problems, this paper innovatively proposed to use alternating current field measurement (ACFM) technique to detect small defects of about 0.5 mm in thin-walled stainless steel welds. The feasibility of applying this technology to the detection of thin-walled stainless steel welds was studied through theoretical calculation; the probe design was optimized by simulation calculation to improve the detection accuracy and stability of ACFM. The verification results showed that for thin-walled stainless steel welds, this technology can detect all the more harmful area defects, and the volume defect with a diameter of about 0.4 mm can be detected.

**Key words:**nuclear facility; alternating current field measurement; thin-walled stainless steel; weld inspection

在核设施建造过程中,由于射线照相法检出的缺陷图像较为直观,且容易检出存在局部厚度差的缺陷,核设施现场采用的主要体积检测技术为传统胶片射线技术,但小径管射线检测存在固有的局限性,即需要专用时间窗口和作业场所,焊接施工和检测无法并行进行,辐射安全风险较大等<sup>[1-2]</sup>。为提高

现场检测效率,降低辐射安全风险,需要采用先进可靠的检测技术来解决上述难题,提升检测效率的同时保障工程质量。

交流电磁场检测(ACFM)技术可检测各种导电材料表面、近表面缺陷以及薄壁材料的内部缺陷<sup>[3]</sup>。该技术经过近40年的发展,具有检测效率高、重复性好、无辐射、无需耦合、可交叉施工等优点<sup>[6]</sup>,已得到世界多个权威组织认可,应用越来越广泛<sup>[4-5]</sup>。

文章通过理论计算研究了该技术应用于薄壁不锈钢焊缝检测的可行性;运用仿真计算验证探头设

收稿日期:2023-07-07

作者简介:刘子淇(1995—),男,硕士,主要研究方向为无损检测

通信作者:刘子淇,761412429@163.com

计时的最佳激励频率,提高了传统 ACFM 检测技术的检测精度和稳定性;利用不同种类、不同尺寸的模拟试块对 ACFM 检测技术的缺陷检出能力进行了验证。

## 1 基本原理

ACFM 在电磁场数值有限元分析领域有精确的理论计算模型。但麦克斯韦方程组作为控制方程时计算中未知量过多<sup>[7]</sup>,文章引入矢量磁位  $A$  和标量电势  $\varphi$  作为控制方程中的未知函数来进行求解,并引入了辅助计算函数。为了保证解的适定性,先求出矢量磁位  $A$  和标量电势  $\varphi$ ,然后代入麦克斯韦方程组计算缺陷处电场和磁场值。

缺陷的存在会使得电磁场产生扰动,故为了方便计算可以将表示磁场分布的矢量磁位  $A$  分为两部分。

$$A(x, y, z) = A_o(x, y, z) + A_p(x, y, z) \quad (1)$$

式中:  $A_o$  为检测电流感应的矢量势函数;  $A_p$  为缺陷引起的电场扰动感应的矢量势函数;  $x, y, z$  表示坐标轴三个方向。

根据电磁感应,矢量势函数  $A_o$  和  $A_p$  都满足 Laplace 方程。 $A_o$  满足无缺陷状态的边界条件

$$\frac{\partial^2 A_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_o}{\partial y^2} + \frac{k}{\mu_r} \cdot \frac{\partial A_o}{\partial z^2} = 0 \quad | z = 0_+ \quad (2)$$

$A_p$  满足含缺陷状态的边界条件

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 A_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_p}{\partial y^2} + \frac{k}{\mu_r} \cdot \frac{\partial A_p}{\partial z^2} = \\ & \left(2 + \frac{ck}{\mu_r}\right) \frac{\partial A_p}{\partial z} (\delta y) \quad | z = 0_+ \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $k^2 = 2i/\delta^2$ ;  $\delta$  为电流趋肤层厚度;  $c$  为缺陷宽度。

趋肤层厚度  $\delta$  为<sup>[8]</sup>

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \mu_0 \pi \sigma f}} = \sqrt{\frac{2}{\mu \sigma \omega}} \quad (4)$$

式中:  $\mu_r$  为材料相对磁导率;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $\mu$  为材料的磁导率,  $\mu = \mu_r \mu_0$ ;  $\sigma$  为电导率;  $f$  为电流频率;  $\omega$  为电流的角频率。

## 2 仿真研究

文章采用 COMSOL Multiphysics 仿真软件对薄壁不锈钢焊缝进行仿真研究。仿真模型如图 1 所示,主要包括管道主体、管道环焊缝、焊缝缺陷、磁芯、激励线圈和外围空气(空气域在图 1 中做隐藏处

理),缺陷位于焊缝中部位置,检测方向沿管道周向。

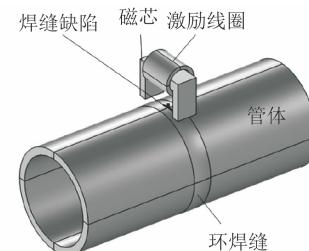


图 1 ACFM 管道环焊缝缺陷检测三维仿真模型

### 2.1 特征分析

为模拟现场实际工况焊缝,仿真时坡口宽度与余高均与现场保持一致,即内表面焊缝宽度为 4 mm,外表面焊缝宽度为 10 mm,焊缝余高为 2 mm。激励线圈缠绕在 U 形磁芯上,该磁芯尺寸为 22 mm×5.75 mm×15 mm(长×宽×高),厚度为 4 mm,磁芯的两磁腿横跨在焊缝缺陷正上方,沿管裂纹长度方向周向扫查。

在激励线圈中加载幅值为 10 V,频率为 1 000 Hz 的正弦交流电,管体及焊缝会产生感应电流,其分布情况如图 2 所示,可见,在激励区域,电流出现两个明显峰值,且恰好在裂纹两端集聚。



(a) 侧视 (b) 俯视

图 2 裂纹附近感应电流分布情况

进一步分析,可以得出以下结论。

(1) 当焊缝区域不存在缺陷时,均匀电流会经由焊缝一侧通过焊缝表面到达另一侧,即虽然焊缝的材料与母材材料不一致,但感应电流依然会均匀分布在整体结构的表面,不会因为材料不同而出现大的变化。

(2) 当焊缝区域存在缺陷时,均匀电流会受到缺陷的扰动而发生偏转和聚集,即在缺陷的两端电流密度增加,扰动和聚集增加,在缺陷的中间位置,电流密度减小。这与 ACFM 的基本原理相符合,因而可以通过检测感应电磁场信号反演裂纹的尺寸信息。

为研究焊缝区域信号特征,提取  $x$  方向及  $z$  方向磁场强度特征信号如图 3 所示。从图 3 中可以看出,  $B_x$  信号在缺陷两端凸起,中间缺陷部分下凹;  $B_z$  信号在缺陷两侧出现两个相反方向的极值。仿

真结果符合交流电磁场检测规律,证明了仿真模型的正确性。

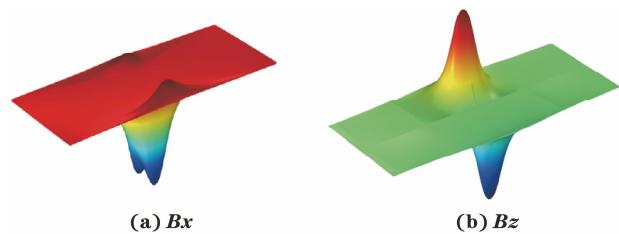


图 3 裂纹空间磁场强度特征信号

## 2.2 探头设计仿真优化

为确保检测时 ACFM 检测深度满足要求,并提高缺陷检测精度,研究了不同频率下 ACFM 的检测精度,即在 0.1 kHz 至 60 kHz 之间改变激励频率,提取得到的不同频率下的空间  $B_x$  磁场分布如图 4 所示。由图 4 可见,随着频率的增加,  $B_x$  信号的基值逐渐增加,且增速逐渐减慢,  $B_x$  瞬变率变化在 1 000 Hz 左右达到最大,且由复合集肤效应公式(4)可知,频率为 1 000 Hz 时可穿透 4.58 mm,满足检测需求,因此选定 1 kHz 作为激励频率。

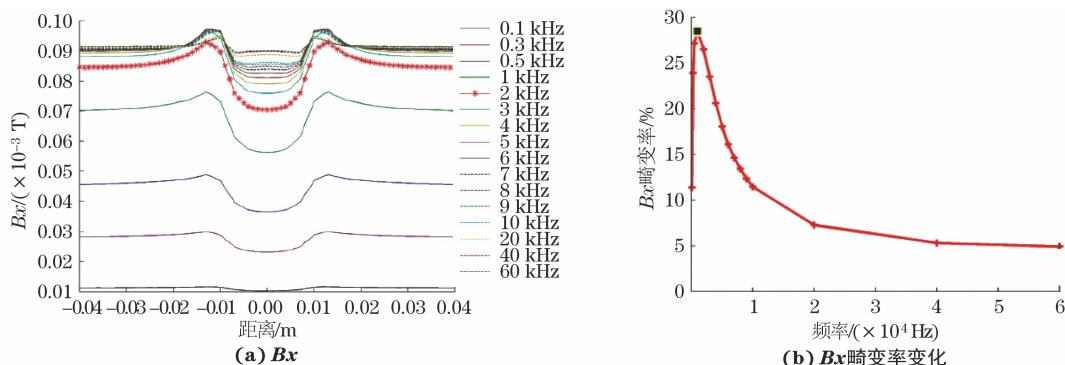


图 4 不同频率下的空间  $B_x$  磁场分布曲线

### 2.3 不同角度裂纹信号及孔状信号特征分析

为研究不同角度裂纹信号及孔状信号特征,建立不同角度裂纹和孔状缺陷(见图 5),对长为 5.0 mm,宽

为 0.2, 0.4 mm, 角度分别为  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  和  $90^\circ$  的裂纹 (定义和感应电流垂直的方向为  $0^\circ$ ) 和 0.4 mm 直径的孔进行仿真分析, 得到检测结果如图 6 和图 7 所示。

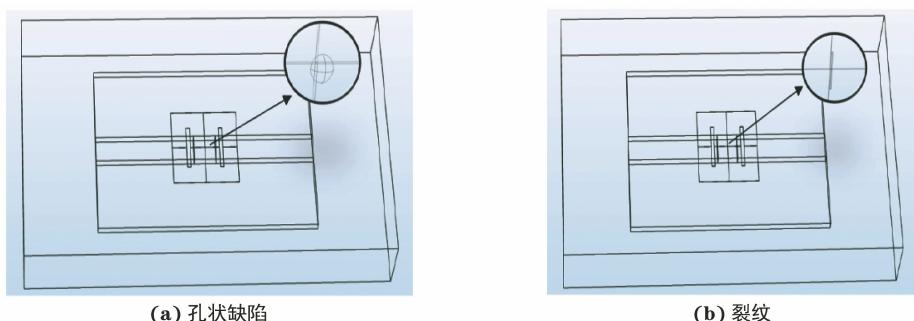


图 5 裂纹和孔状缺陷结构示意

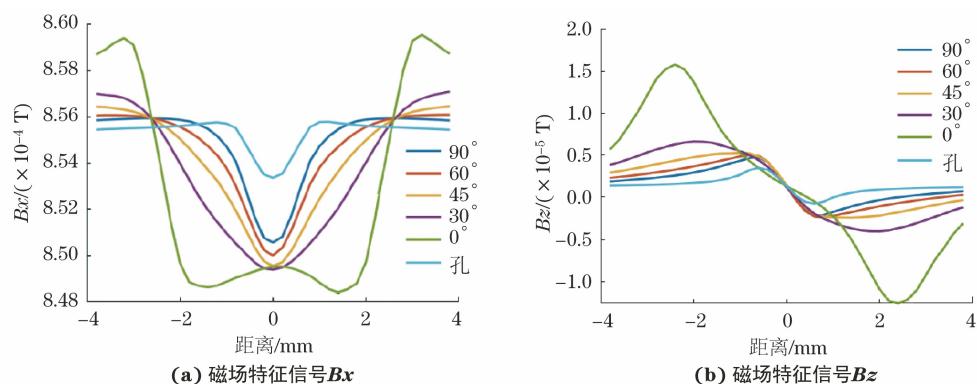


图 6 焊缝表面不同角度裂纹和孔特征信号

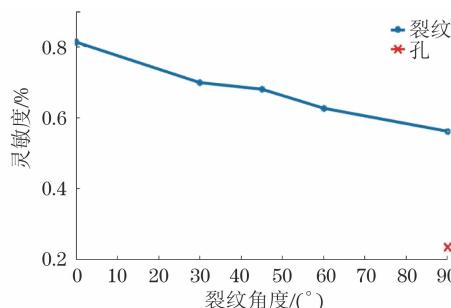


图 7 焊缝表面不同角度裂纹和孔的灵敏度

## 2.4 小缺陷的缺陷检出率分析

由以上分析可知,对于面积型缺陷,ACFM 较灵敏。为研究 ACFM 检测技术对于小缺陷的检出率(POD),仿真时每种尺寸气孔缺陷仿真 200 次,仿真以埋深最大位置缺陷为样本,模拟了所有存在的缺陷类型,考虑了余高、提离、焊瘤等影响因素,以尽可能贴合真实工况,所得到的 POD 数据具备普适性,代表了理论置信度缺陷 POD,仿真结果如图 8 所示。

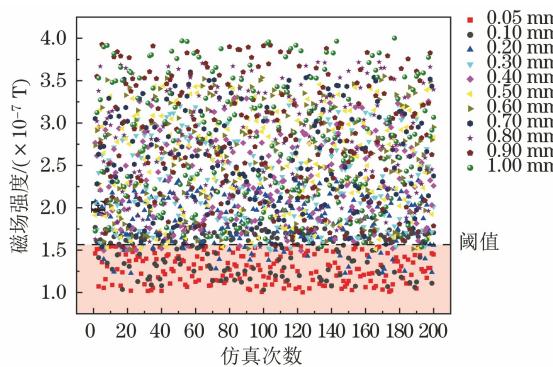


图 8 小缺陷 POD 仿真结果

每一次检测可看作一次随机试验,检测结果只有两个:检出和未检出。

基于统计学理论,取置信水平为 95%,算出每个尺寸气孔的检测概率置信下限值  $P_L$  与对应尺寸气孔点作图,结果如图 9 所示。

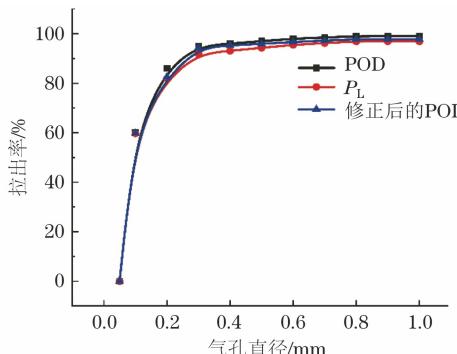


图 9 不同尺寸气孔 POD 分析曲线

采用对直径分别为 0.3, 0.4, 0.6, 0.75 mm 的气孔进行检测,小气孔的检测次数为 350 次,大气孔的检测次数为 200 次,结果统计如表 1 所示。

表 1 不同气孔的 POD 仿真结果

气孔直径/mm	检测次数	检出次数	POD/%	置信度水平/%	$P_L$ /%
0.30	350	324	92.6		89.6
0.40		328	93.7		91.3
0.60	200	189	94.5	95	91.8
0.75		191	95.5		92.4

POD 仿真分析数据表明:在 95% 置信度下,0.4 mm 气孔缺陷检出率不低于 90%;ACFM 检测技术满足工程应用的需求。

## 3 试验验证

### 3.1 试验装置

在验证试验中,采用的设备为 LKACFM-X1 型交流电磁场检测仪,检测探头频率设置为 1 kHz。由于小径管外径较小,为保证探头垂直紧贴焊缝,设计半包式探头紧贴焊缝,以实现在焊缝上的平稳扫查。试验装置及探头如图 10 所示。



图 10 试验装置及探头

### 3.2 模拟试块

模拟试块包括自然缺陷试块和小气孔试块。模拟试块的设计涵盖了全部典型缺陷,如裂纹、未熔合、未焊透、夹钨、气孔等,具有充分的代表性,其中面积型缺陷长为 5 mm,深为 0.3 mm,宽为 0.2 mm,孔状缺陷直径约为 0.4 mm。模拟试块中的模拟自然缺陷仅用来验证检出能力,不用于定量阈值。为与现场工艺保持一致,此次模拟试块分别制作了手工焊试块及自动焊试块。模拟试块缺陷设置信息如表 2 所示。

### 3.3 检测结果

根据 ACFM 检测工艺对自动焊模拟试块进行检测后,基于 NB/T 20003.3—2010《核电厂核岛机械设备无损检测第 3 部分:射线检测》对模拟试块进行了对比验证。

对于自动焊试块,预制缺陷共 36 处,射线(RT)

检出 32 处,未检出气孔缺陷 4 处,ACFM 检出 34 处(含 RT 检出的 32 处),未检出气孔缺陷 2 处,而

面积型缺陷均 100% 检出,缺陷检测对比结果如表 3 所示。

表 2 模拟试块缺陷设置信息

试块规格(直径×壁厚)/mm	手工焊试块	自动焊试块
17.1×1.65	面积缺陷 3 处,孔状缺陷 16 处	面积缺陷 3 处,孔状缺陷 15 处
33.4×3.38	面积缺陷 3 处,孔状缺陷 31 处	—
48.3×2.77	面积缺陷 3 处,孔状缺陷 15 处	面积缺陷 3 处,孔状缺陷 15 处
60.3×2.77	面积缺陷 3 处,孔状缺陷 15 处	—
88.9×3.05	面积缺陷 3 处,孔状缺陷 40 处	—

表 3 工艺管道自动焊模拟试块检测结果

试块规格(直径×壁厚)/mm	缺陷数量	RT 检测		ACFM 检测		
		检出数	检出率/%	检出数	检出率/%	误报数
17.1×1.65	18	16	88.89	16	88.89	0
48.3×2.77	18	16	88.89	18	100.00	0

根据 ACFM 检测工艺对手工焊模拟试块进行检测后,基于 NB/T 20003.3—2010 对模拟试块进行了对比验证。

对于手工焊试块,预制缺陷共 132 处,RT 检出

95 处,未检出气孔缺陷 37 处,ACFM 检出 131 处(含 RT 检出的 95 处),未检出气孔缺陷 1 处,而面积型缺陷均 100% 检出,ACFM 误报 10 处,其检测结果如表 4 所示。

表 4 工艺管道手工焊模拟试块检测结果

试块规格(直径×壁厚)/mm	缺陷数量	RT 检测		ACFM 检测		
		检出数	检出率/%	检出数	检出率/%	误报数
17.1×1.65	19	17	89.47	20	100.00	1
33.4×3.38	34	29	85.29	37	100.00	3
48.3×2.77	18	13	72.22	19	100.00	1
60.3×2.77	18	16	88.89	18	100.00	0
88.9×3.05	43	20	46.51	47	97.67	5
统计	132	95	—	141	—	10

射线检测时,小径管焊缝上直径约 0.4 mm 的圆形缺陷存在漏检现象,主要原因为采用了双壁双影透照工艺,透照厚度比和影像畸变较大,且缺陷尺寸设置过小,接近射线检测灵敏度极限。ACFM 漏检的原因因为检测时检测速度不一致,使得两处缺陷在检测时被识别为一处缺陷。ACFM 出现多检信号的原因主要为内表面不平整(如较深的焊纹)和缺陷信号无法区分。

## 4 结论

为研究 ACFM 检测技术在薄壁不锈钢管道焊缝检测中的可行性,文章开展了理论分析、仿真研究、模拟验证等工作,确定了 ACFM 检测技术在薄壁不锈钢焊缝检测应用中的可行性,并得出以下结论。

(1) 交流电磁场检测技术对气孔、夹渣及未熔合等缺陷均具有较好的检测能力,在进行技术优化后,对危害性较大的面积型缺陷可 100% 检出。

(2) POD 仿真分析数据表明在 95% 置信度下,Φ0.4 mm 气孔缺陷检出率不低于 90%,经试验验证可检出直径约为 0.4 mm 的体积型缺陷。

(3) 经与传统 RT 检测技术进行对比验证可知,ACFM 检测技术具有不低于 RT 检测的能力。

## 参考文献:

- [1] 张晓峰,严宇,杨建龙,等.核电主管道相控阵超声扫查器的国产化改进[J].无损检测,2022,44(7):10-12,18.
- [2] 王俊龙,朱序东,周杰.小径管对接焊缝的冷阴极数字 X 射线检测[J].无损检测,2021,43(8):21-24,57.
- [3] 李伟,尚亚期,杨会敏,等.基于 STM32 的交流电磁场检测实验系统设计[J].实验室研究与探索,2021,40(11):86-89,116.
- [4] 葛玖浩,杨晨开,胡宝旺,等.交流电磁场检测技术钢轨表面裂纹高速检测研究[J].机械工程学报,2021,57(18):66-74.

(下转第 60 页)

定量检测,深入探究铜铝线夹焊接界面金属层减薄缺陷的暂态涡流可视化定量检测技术关键。建立了铜铝过渡线夹暂态涡流检测的二维有限元模型,通过分析检测信号及扫查曲线对缺陷的响应特性,发现扫查曲线与无缺陷区域对应PV值的交点和缺陷宽度具有强关联性,扫查曲线的谷值和缺陷深度间具有强关联性。在仿真分析的同时,搭建了双层异质金属构件暂态涡流检测试验平台,设计开发了基于FPC的暂态涡流检测探头。通过试验研究,在验证仿真分析结论的同时,进一步探究双层异质金属构件界面损伤暂态涡流检测的可行性。试验结果表明,暂态涡流检测可对铜铝线夹焊接界面金属层减薄缺陷实现成像及形貌辨析,所提检测信号/图像特征与缺陷宽度和深度具有强关联性,综合利用这些信号/图像特征可实现对双层异质金属构件界面损伤参数的定量评估。

## 参考文献:

- [1] 汤晓磊,陈国宏,刘俊建,等.平面接触型铜铝过渡设备线夹的大气腐蚀行为[J].电力建设,2014,35(4):65-69.
- [2] 张程杰,胡明慧,徐小雄.钛合金深层裂纹缺陷涡流检测仿真与试验研究[J].传感技术学报,2021,34(3):305-310.
- [3] 罗冠一,范文茹.基于脉冲涡流的CFRP层压板损伤检测可行性研究[J].计算机仿真,2020,37(6):388-391,400.
- [4] 凡丽梅,董方旭,安志武,等.橡胶/铝合金粘接构件脱

粘缺陷非线性超声检测技术研究[J].中国测试,2020,46(8):15-21,43.

- [5] LAHRECH A C, NAIDJATE M, HELIFA B, et al. Development of an axial rotating magnetic field multi-coil eddy current sensor for electromagnetic characterization of stratified CFRP materials[J]. NDT & E International, 2022, 126: 102589.
- [6] LIU Z S, LI Y, REN S T, et al. Pulse-modulation eddy current evaluation of interlaminar corrosion in stratified conductors: semi-analytical modeling and experiments[J]. Sensors, 2022, 22(9): 3458.
- [7] XIE S J, ZHANG L, ZHAO Y, et al. Features extraction and discussion in a novel frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for the detection of a certain depth range of defects[J]. NDT & E International, 2020, 111: 102211.
- [8] LIU X C, YANG J M, WU B, et al. A novel generation method of oscillatory rotating eddy current for crack orientation determination and detection in metal plates [J]. NDT & E International, 2018, 97: 1-10.
- [9] CHEN X L, XU R R. A pulsed eddy current testing method for relative thickness of ferromagnetic components considering local hysteresis characteristics[J]. NDT & E International, 2021, 124: 102541.
- [10] REN S T, LI Y, LIU Z S, et al. Gradient-field pulsed eddy current imaging of hidden corrosion in layered conductors via Sparse Bayesian Learning alongside Baseline Estimation and Denoising with Sparsity[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 346: 113900.

(上接第53页)

- [5] 赵国华.交流电磁场检测技术在压力容器焊缝检测中的应用[J].中国建材科技,2019,28(3):8,10.
- [6] LI W, YUAN X A, CHEN G M, et al. High sensitivity rotating alternating current field measurement for arbitrary-angle underwater cracks [J]. NDT & E International, 2016, 79: 123-131.

- [7] YUAN X A, LI W, CHEN G M, et al. Inner circumferential current field testing system with TMR sensor arrays for inner-wall cracks inspection in aluminum tubes [J]. Measurement, 2018, 122: 232-239.
- [8] 胡江,任尚坤,祖瑞丽.钢板近表面缺陷的交流电磁场检测[J].无损检测,2017,39(9):11-14.