

doi:10.3785/j.issn.1006-754X.2023.00.035

乏燃料水池覆面板对接焊缝裂纹检测研究

张 佳¹, 周兆明^{1,2}, 练章华¹, 李 锴³, 陈 智⁴

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 西南石油大学 机电工程学院, 四川 成都 610500;

3. 国核电站运行服务技术有限公司, 上海 200233;

4. 中国石油西南油气田分公司 四川长宁天然气开发有限责任公司, 四川 成都 610051)

摘 要: 核电站乏燃料水池覆面板焊缝与母材交界面处的裂纹会严重影响设备的运行安全。考虑焊缝的真实特性, 提出采用交流电磁场检测 (alternating current field measurement, ACFM) 技术来检测焊缝裂纹, 以提高裂纹检测的灵敏度。首先, 采用COMSOL软件建立了焊缝裂纹检测模型, 分析了焊缝裂纹区域的磁场特征信号; 其次, 在实验试件焊缝与母材交界面处预置与数值仿真一致的人工裂纹, 进行焊缝裂纹ACFM实验; 最后, 制作了焊缝裂纹检测系统, 并进行了其性能测试。仿真、实验和测试结果表明: ACFM方法能够有效识别焊缝与母材交界面处平行于焊缝方向的裂纹, 而不能识别垂直于焊缝方向的裂纹; 通过焊缝裂纹检测系统测试得到的裂纹检测长度的偏差小于探头检测实验的偏差, 但两者比较接近, 证明了焊缝裂纹检测系统设计的合理性。ACFM能够实现乏池覆面板对接焊缝裂纹的定量化检测, 满足现场高灵敏度的使用要求。

关键词: 乏燃料水池; 焊缝裂纹; 电磁检测

中图分类号: TH878.3; TP212.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-754X (2023)03-0372-08

Research on crack detection of butt welds in the cladding panel of spent fuel pool

ZHANG Jia¹, ZHOU Zhaoming^{1,2}, LIAN Zhanghua¹, LI Kai³, CHEN Zhi⁴

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500,

China; 2. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. State Nuclear

Power Plant Service Company, Shanghai 200233, China; 4. Sichuan Changning Natural Gas Development Co., Ltd.,

PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Chengdu 610051, China)

Abstract: Cracks at the interface between the weld in the cladding panel of spent fuel pool of a nuclear power plant and the base material can seriously affect the operational safety of the equipment. Considering the true characteristics of weld, alternating current field measurement (ACFM) technology was proposed to detect weld crack to improve the sensitivity of crack detection. Firstly, a weld crack detection model was established by COMSOL software, and the magnetic field characteristic signals in the weld crack area were analyzed; secondly, an artificial crack that was consistent with the numerical simulation was preset at the interface between the experimental specimen weld and the base material, and then the weld crack ACFM experiment was carried out; finally, a weld crack detection system was developed and its performance testing was conducted. The simulation, experiment and testing results indicated that the ACFM method could effectively identify crack parallel to the weld direction at the

收稿日期: 2022-09-15

修订日期: 2022-10-15

本刊网址·在线期刊: <http://www.zjujournals.com/gcsjxb>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51974271); 西南石油大学研究生科研创新基金资助项目 (2021CXZD37)

作者简介: 张 佳 (1994—), 男, 甘肃宁县人, 博士生, 从事结构健康监测研究, E-mail: zhangjiaswpu@163.com

通信联系人: 周兆明 (1983—), 男, 河南南阳人, 副教授, 博士, 从事油气设施健康安全监测等研究,

E-mail: Zhouzhaom@126.com, <https://orcid.org/0000-0001-8539-8545>

interface between the weld and the base metal, but could not identify crack perpendicular to the weld direction; the deviation of crack detection length obtained through the testing of the weld crack detection system was smaller than that obtained through the probe detection experiment, but the two were relatively close, proving the rationality of the design of the weld crack detection system. ACFM can achieve quantitative detection of butt welds in the cladding panel of spent fuel pool, and meet the requirements of high sensitivity in the field.

Key words: spent fuel pool; weld crack; electromagnetic testing

乏燃料水池(以下简称乏池)属于核工业电站的安全设备,其覆面板的结构强度对于核电站的安全至关重要。乏池覆面板一般采用厚度为3~6 mm 矩形钢板,2块矩形钢板彼此对接并焊接在一起形成主结构。覆面板一面与硼酸水接触,另一面与混凝土接触。由于环境湿度的影响,对接焊缝长期被腐蚀而容易产生裂纹。部分裂纹具有穿透性,导致硼酸水在裂纹处泄漏,成为危及乏池安全运行的一大隐患。因此,对覆面板对接焊缝的裂纹进行研究具有重要意义。

焊缝及焊缝热影响区存在几何和材料的不连续性,且存在较大的残余应力,因此在该区域易出现裂纹和裂纹扩展,最终导致结构破坏。传统的裂缝检测方法如磁通量泄漏检测法、低频涡流检测法及超声波检测法对焊缝裂纹检测的灵敏度较低,采用磁粉探伤技术则须清洁设备表面。ACFM(alternating current field measurement,交流电磁场检测)是一种无损检测技术,它具有无提离测量、无须去除涂层和对结构表面要求低的特点,已广泛用于核工业设备、油气平台、压力容器和桥梁等结构表面及近表面裂纹的检测。针对ACFM技术,国外已取得很多前期的研究成果^[1],国内的研究晚于国外。经过多年不懈地探索,中国石油大学^[2-4]、电子科技大学^[5]、厦门大学^[6]、南昌航空大学^[7]等高校和北京奥斯博科贸有限公司在ACFM探头优化、裂纹识别、裂纹尺寸反演和信号处理等方面取得了不少的研究成果^[8]。

在ACFM探头检测焊缝与母材的交界面时容易因几何和材料的不连续性而出现干扰信号,裂纹特征信号极易被焊缝信号干扰,而现有的研究基本假设焊缝与母材的物理属性一致,忽略了焊缝电磁特性的影响。本研究旨在验证焊缝与母材交界面处ACFM的可靠性。首先,建立了覆面板焊缝裂纹检测模型,赋予焊缝真实属性;其次,对带有真实焊缝特性的试件进行电磁计算;最后,设计了检测系统,进行了焊缝与母材交界面裂纹的检测实验,以期为乏池覆面板对接焊缝裂纹的

检测提供指导。

1 ACFM原理

ACFM技术的理论基础是电磁感应原理。当通有交变电流的激励线圈靠近待测导体时,交变电流在周围的空间感应出交变磁场,被测导体表面的感应电流由于趋肤效应聚集于导体表面^[9-11]。当导体中无裂纹时,感应电流的流线平行分布;当导体中有裂纹时,电阻率的变化会对电流分布产生影响,电流在裂纹附近产生偏转,导体表面的磁场就会发生畸变。磁场变化的强弱能反映裂纹的大小。裂纹对电流和磁场的影响如图1所示。图中, x 向平行于工件表面并垂直于电流方向, y 向平行于电流方向, z 向垂直于工件表面。当导体中无裂纹时, x 向的磁感应强度 B_x 均匀无扰动, B_y 和 B_z 为0,故远离裂纹处,电流场是均匀的,电流线相互平行^[12]。当导体中有裂纹时,电流线会向裂纹两端和裂纹底面偏转,以致裂纹中心处的电流线变疏,电流密度下降,裂纹两端的电流线汇聚,从而导致工件表面磁场发生变化^[13-15]。在裂纹的右半边,电流的总体方向为顺时针方向,产生指向工件表面的磁力线,规定其方向为正;在裂纹的左半边,电流的总体方向为逆时针方向,产生指向工件底面的磁力线,规定其方向为负。因此,可以通过 B_z 测量出裂纹长度。当电流线向裂纹两端和裂纹底面偏转时,流经裂纹电流的强度下降,在裂纹中部,电流线最疏, B_x 最小, B_x 的极小值对应于裂纹最深处,因而可以通过 B_x 测量出裂纹深度^[16-18]。

2 焊缝裂纹ACFM仿真

2.1 焊缝裂纹检测模型的建立

乏池覆面板简化模型如图2所示^[19]。

采用COMSOL软件建立乏池覆面板焊缝裂纹检测模型。该模型由带有焊缝的试件、U形铁芯和励磁线圈组成。焊缝裂纹为体积型裂纹,其长度 l 、宽度 w 、深度 h 分别为20, 0.3, 8 mm,励磁线圈的线圈匝数为500。为了提高求解器的易收敛性,

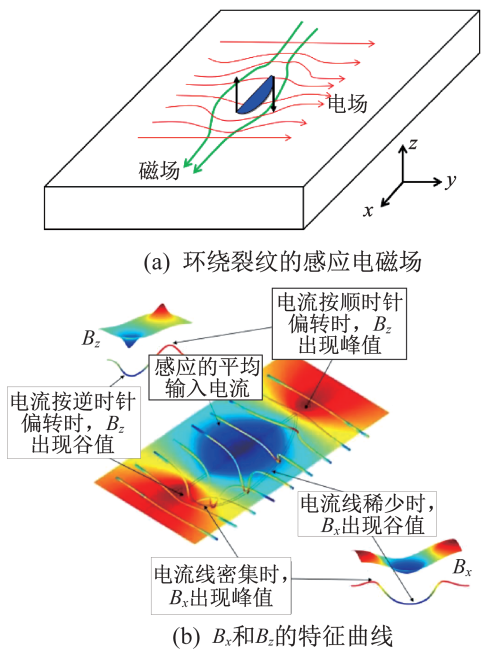


图1 裂纹对电流和磁场的影响示意

Fig. 1 Schematic diagram of the effect of crack on current and magnetic field

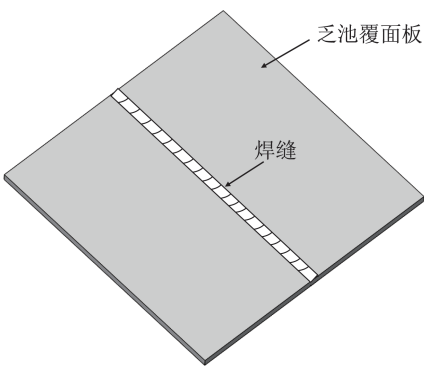


图2 乏池覆面板简化模型

Fig. 2 Simplified model of spent fuel pool cladding panel

空气电导率设置为较小的非零值。工件的材料为碳钢，U形铁芯的材料为锰-锌铁氧体，励磁线圈的材料为铜，环境为空气。模型的参数如表1所示。焊缝裂纹检测模型的网格划分如图3所示。进行网格敏感性测试，可知其计算结果的误差率小于0.5%。

表1 焊缝裂纹检测模型的参数

Table 1 Parameters of weld crack detection model

部件	材料	长度×宽度×深度(高度)/mm×mm×mm		相对磁导率	电导率/(S·m ⁻¹)
试件	碳钢	工件	焊缝裂纹	1.000 021	38 000 000
		300×300×10	20×0.3×8		
U形铁芯	锰-锌铁氧体	60×10×40		4 000	10 300 000

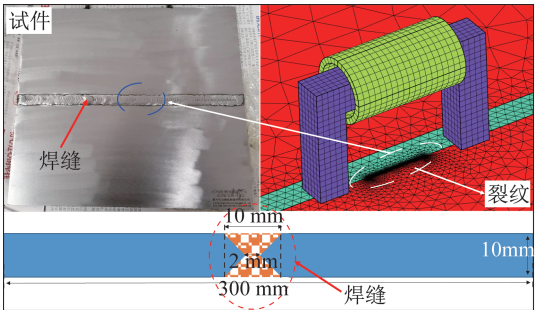


图3 焊缝裂纹检测模型的网格划分

Fig. 3 Grid division of weld crack detection model

焊接完成后，试件表面的应力分布如图4所示。由图可知，焊缝处的应力远大于试件其他位置，最大应力为641.306 MPa。焊缝为对接焊缝，最大残余应力位于焊缝与母材交界面的中心位置，而远离该位置的应力较小，应力从焊缝中心向两侧逐渐减小。当励磁线圈加载激励频率为5 kHz、驱动电流为2 A的交流电时，裂纹处的磁场分布如图5所示。

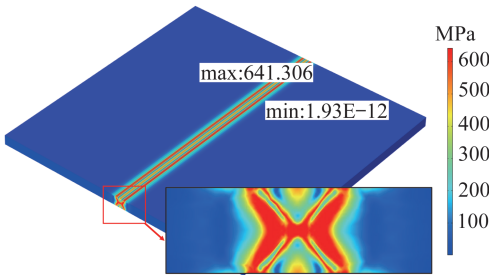


图4 试件表面的应力分布

Fig. 4 Stress distribution on the surface of workpiece

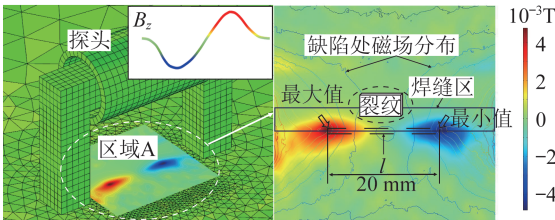


图5 裂纹处磁场分布

Fig. 5 Magnetic field distribution around the crack

2.2 裂纹检测信号特征分析

在焊缝与母材交界面预置4种不同尺寸的体积

型裂纹, 以用来分析 ACFM 探头的识别能力。裂纹①至裂纹③平行于焊缝, 裂纹④垂直于焊缝, 裂纹的尺寸及位置如图 6 所示。探头沿着交界面进行检测, 记录每处裂纹的 B_z 信号。取各裂纹正上方局部区域 (即图 5 区域 A) 进行分析, 结果如图 7 所示。对比分析各检测信号和实际裂纹的大小, 为 ACFM 探头的实际应用建立基础。

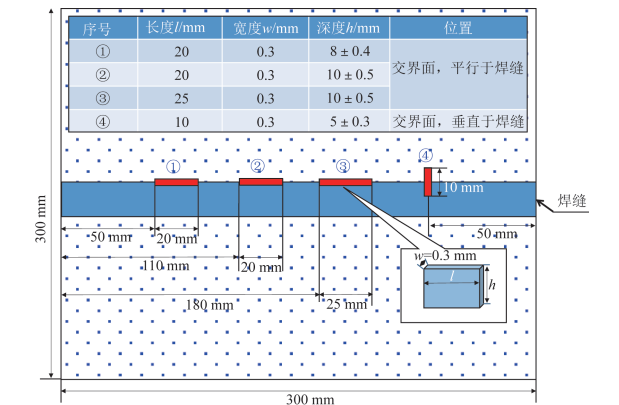


图 6 焊缝裂纹的尺寸及位置
Fig. 6 Size and location of weld cracks

图 7 中, B_z 曲线波峰与波谷之间的距离即为裂纹长度。由于受焊缝残余应力的影响, 磁场在一定程度上发生扰动, 裂纹检测信号的噪声较大。当探头在裂纹检测区域平行于裂纹方向检测时, B_z 存在波峰和波谷, 即能检测到裂纹, 如图 7(a)至图 7(d) 所示; 当探头垂直于裂纹方向检测时, B_z 曲线呈明显的上升趋势, 不存在波峰和波谷, 即不能识别裂纹。

焊缝裂纹长度 ACFM 仿真结果如表 2 所示。由表可知: 裂纹①的检测长度为 19.8 mm, 偏差为 0.2 mm; 裂纹②的检测长度为 19.4 mm, 偏差为 0.6 mm; 裂纹③的检测长度为 25.1 mm, 偏差为 0.1 mm; 裂纹④的检测长度为 11.4 mm, 偏差为 1.4 mm。可见, 在裂纹检测范围内, 当探头平行与裂纹方向检测时, 检测到的裂纹长度偏差较小, 检测结果较好。

表 2 焊缝裂纹长度 ACFM 仿真结果				
Table 2 ACFM simulation results of weld crack length				
单位: mm				
序号	裂纹长度	检测长度	偏差	探头检测方向
①	20	19.8	0.2	平行于裂纹方向
②	20	19.4	0.6	
③	25	25.1	0.1	
④	10	11.4	1.4	
④	10	—		垂直于裂纹方向

3 焊缝裂纹 ACFM 实验

焊缝裂纹 ACFM 实验采用英国 TSC Inspection Systems 生产的金属裂纹检测仪 Amigo^[20]。乏池覆面板母材尺寸与仿真时试件尺寸一致, 为 300 mm×300 mm×10 mm。在试件上加工焊缝裂纹, 裂纹尺寸与如图 6 所示一致。焊缝裂纹 ACFM 实验现场如图 8 所示。

焊缝裂纹 ACFM 实验结果如图 9 所示。从检测结果可知, 平行于裂纹方向检测时, 探头能够检测到裂纹的存在。裂纹长度检测结果如表 3 所示。由表可知: 裂纹①的检测长度为 18.4 mm, 偏差为 1.6 mm; 裂纹②的检测长度为 17.8 mm, 偏差为 2.2 mm; 裂纹③的检测长度为 23.1 mm, 偏差为 1.9 mm; 裂纹④的检测长度为 7.9 mm, 偏差为 2.1 mm。当探头垂直于裂纹方向检测时, 虽然能识别到裂纹, 但是误差极大, 没有参考意义。因此, 在探头可检测范围内, 平行于裂纹方向检测时均能得到较好的检测结果 (偏差较小), 垂直于裂纹方向检测时探头识别不出裂纹。在实际现场探头应多次检测才能准确识别所有裂纹。

表 3 焊缝裂纹长度 ACFM 实验结果				
Table 3 ACFM experimental results of weld crack length				
单位: mm				
序号	裂纹长度	检测长度	偏差	探头检测方向
①	20	18.4	1.6	平行于裂纹方向
②	20	17.8	2.2	
③	25	23.1	1.9	
④	10	7.9	2.1	
④	10	—		垂直于裂纹方向

4 焊缝裂纹检测系统性能测试

作者制作了乏池覆面板对接焊缝裂纹检测系统, 并进行其性能测试。裂纹检测系统如图 10 所示。设置裂纹尺寸与仿真和实验时一致。同样, 将探头平行/垂直于裂纹方向检测。探头的激励频率为 50 kHz, 驱动电流为 2 A, 以提高高度为零的检测方式对试件进行检测。探头平行于裂纹方向匀速扫描后, 得到的焊缝裂纹检测信号如图 11 所示。焊缝裂纹长度检测结果如表 4 所示。

由图 11 可知, B_x 和 B_z 曲线呈现了一系列波峰和波谷。在裂纹中心位置, B_x 曲线出现波谷 (缺陷深度信息); B_z 曲线在裂纹两端产生波峰和波谷 (缺陷长度信息)。测试表明, 所设计的检测系统可以用于

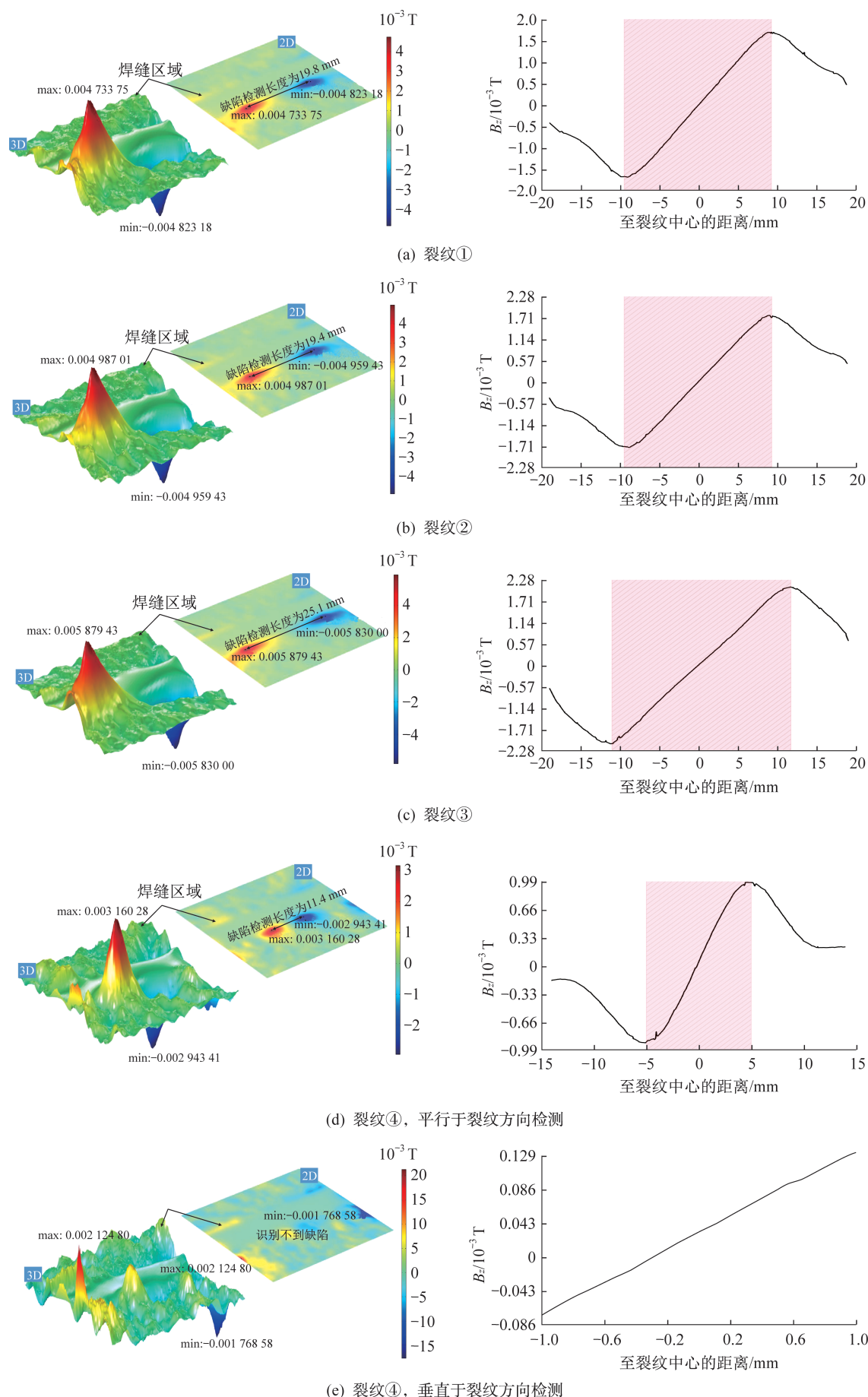
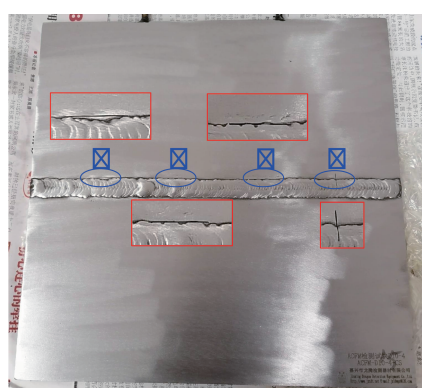
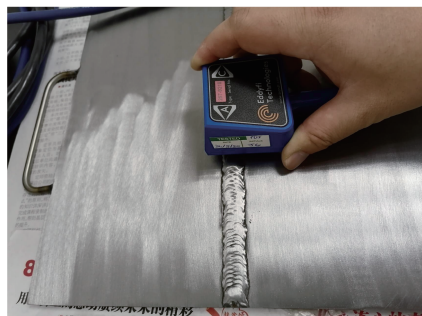


图 7 焊缝裂纹 ACFM 结果

Fig. 7 ACFM results of weld cracks



(a) 裂纹位置



(b) 平行于裂纹方向检测



(c) 垂直于裂纹方向检测

图8 焊缝裂纹ACFM实验现场

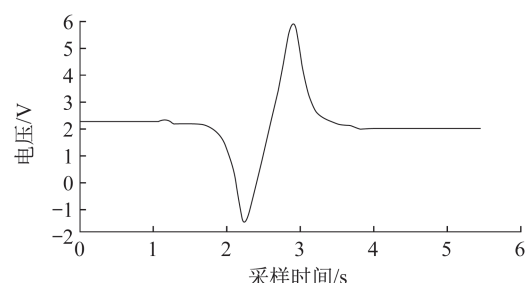
Fig. 8 ACFM experiment site for weld cracks

表4 焊缝裂纹长度测试结果

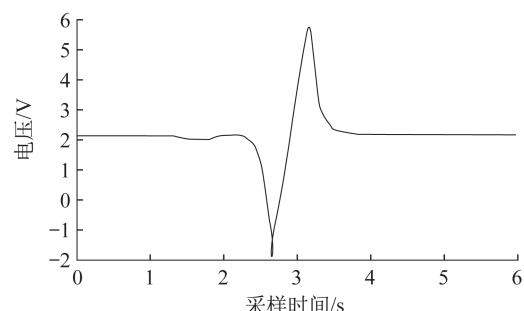
Table 4 Testing results of weld crack length 单位: mm

序号	裂纹长度	检测长度	偏差	探头检测方向
①	20	19.0	1.0	平行于裂纹方向
②	20	18.2	1.8	
③	25	23.4	1.6	
④	10	8.1	1.9	
④	10	—		垂直于裂纹方向

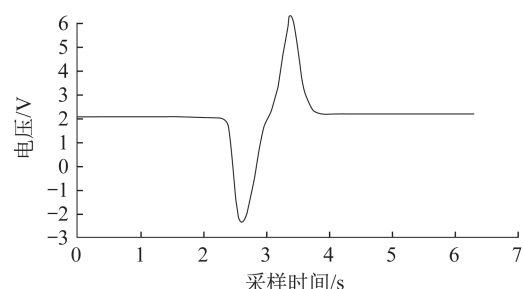
焊缝与母材交界面处裂纹的检测。由表4可知,裂纹①的检测长度为19.0 mm,偏差为1.0 mm;裂纹②的检测长度为18.2 mm,偏差为1.8 mm;裂纹③的检测长度为23.4 mm,偏差为1.6 mm;裂纹③的检测长度为8.1 mm时,偏差为1.9 mm。当探头垂直于裂纹方向检测时,未能检测出有效信号,与实验结果一致。



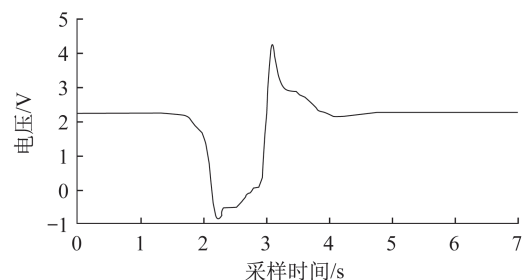
(a) 裂纹①



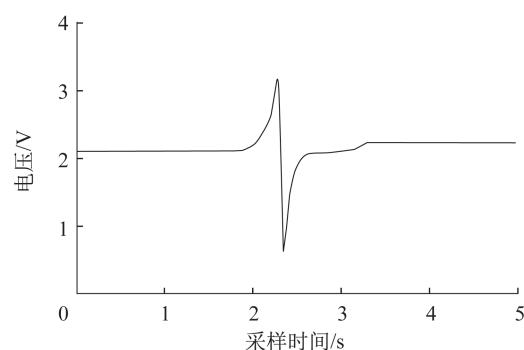
(b) 裂纹②



(c) 裂纹③



(d) 裂纹④, 平行于裂纹方向检测



(e) 裂纹④, 垂直于裂纹方向检测

图9 焊缝裂纹ACFM实验结果

Fig. 9 ACFM experimental results of weld cracks

不同方法下焊缝裂纹检测长度的偏差如表5所示。由表可知:通过检测系统测试得到的裂纹检测长度的偏差小于探头检测实验的偏差,但两

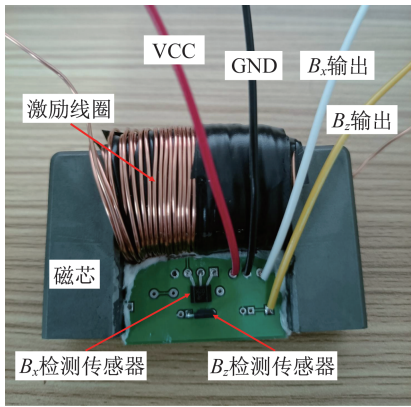


图 10 乏池覆面板对接焊缝裂纹检测系统

Fig. 10 Detection system of butt weld crack in the cladding panel of spent fuel pool

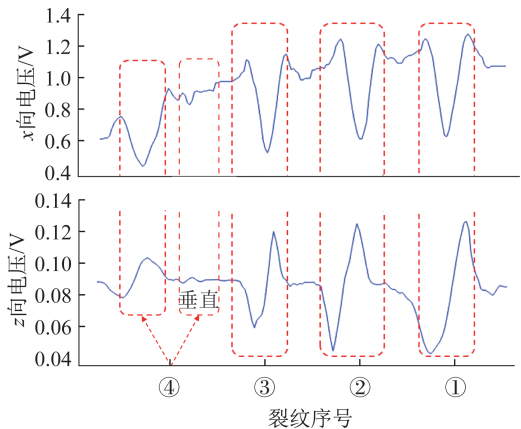


图 11 焊缝裂纹检测信号

Fig. 11 Detection signal of weld cracks

者比较接近,证明了检测系统设计的合理性;数值仿真得到的裂纹检测长度的偏差最小,该偏差可能由现场操作过程中探头抖动所致。裂纹检测长度的偏差在可接受范围内,证明了ACFM技术应用于乏池覆面板对接焊缝裂纹现场检测的可行性。

表 5 不同方法下焊缝裂纹检测长度的偏差

Table 5 Deviation of weld crack detection length under different methods				
单位: mm				
方法	裂纹①	裂纹②	裂纹③	裂纹④
数值仿真	0.2	0.6	0.1	1.4
探头实验	1.6	2.2	1.9	2.1
检测系统测试	1.0	1.8	1.6	1.9

5 结 论

- 1) 基于 ACFM 数值模拟,得到焊缝与母材交界面处裂纹的磁场畸变与 ACFM 原理一致,说明 ACFM 能够实现裂纹的定量检测;
- 2) ACFM 能够实现乏池覆面板对接焊缝裂纹的定量检测, B_z 曲线能较准确地反映裂纹长度信

息。ACFM 方法能满足现场高灵敏度的使用要求。

参考文献:

[1] DOVER W D, COLLINS R, MICHAEL D H. Review of developments in ACPD and ACFM[J]. British Journal of Non-Destructive Testing, 1991, 33(3): 121-127.

[2] 袁新安,李伟,殷晓康,等. 基于 ACFM 的奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化重构方法研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 43-49. doi:10.3901/jme.2020.10.027

YUAN X A, LI W, YIN X K, et al. Research on visualization reconstruction method of irregular crack of austenitic stainless steel based on ACFM[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 43-49.

[3] 倪春生,陈国明,李伟. ACFM 探测线圈的结构优化及试验测试[J]. 传感技术学报, 2007(2): 370-373.

NI C S, CHEN G M, LI W. Structure optimization and test of ACFM detection coil[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007(2): 370-373.

[4] YUAN X A, LI W, YIN X K, et al. Identification of tiny surface cracks in a rugged weld by signal gradient algorithm using the ACFM technique[J]. Sensors, 2020, 20(2): 380.

[5] XIAO X, GAO B, WOO W L, et al. Spatial-time-state fusion algorithm for defect detection through eddy current pulsed thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 90: 133-145.

[6] 吴德会,游德海,柳振凉,等. 交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 327-336.

WU D H, YOU D H, LIU Z L, et al. Mechanism and experimental study of skin depth by AC magnetic flux leakage detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2): 327-336.

[7] 郑玲慧,任尚坤,王景林. ACFM 技术的表面裂纹识别和尺寸反演算法研究[J]. 测控技术, 2020, 39(5): 80-85.

ZHENG L H, REN S K, WANG J L. Surface crack identification and size inversion algorithm based on ACFM technology [J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(5): 80-85.

[8] 王勇,沈功田,李邦宪,等. 压力容器无损检测-大型常压储罐的无损检测技术[J]. 无损检测, 2005, 27(9): 487-490.

WANG Y, SHEN G T, LI B X, et al. Nondestructive testing of pressure vessels: Nondestructive testing of large atmospheric storage tanks [J]. Nondestructive Testing, 2005, 27(9): 487-490.

[9] WILSON J W, TIAN G Y. Pulsed electromagnetic methods for defect detection and characterisation[J]. NDT & E International, 2007, 40(4): 275-283.

- [10] 唐莺,罗飞路,潘孟春.独立分量分析在交变磁场测量信号处理中的应用[J].计量技术,2008,4(12):28-31.
TANG Y, LUO F L, PAN M C. Application of independent component analysis in signal processing of alternating magnetic field measurement[J]. Metrology Science and Technology, 2008, 4(12): 28-31.
- [11] ZHAO J M, LI W, YUAN X A, et al. Detection system development of drill pipe thread based on ACFM technique[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(21): 23926-23933.
- [12] 孙露萍,闫志鸿,王俊涛,等.不锈钢薄板激光焊缝缺陷检测与识别[J].热加工工艺,2021(19):109-113.
SUN L P, YAN Z H, WANG J T, et al. Detection and identification of weld defects in laser welding of stainless steel sheet[J]. Hot Working Technology, 2021(19): 109-113.
- [13] 贾登,丁铁恒,骆学理,等.一种水下阵列式ACFM检测系统样机的设计与实现[J].国外电子测量技术,2021,40(4):150-157.
JIA D, DING T H, LUO X L, et al. Design and implementation of a prototype of underwater array ACFM detection system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(4): 150-157.
- [14] 周兆明,张佳,谷翠琳.基于交流电磁场裂纹缺陷识别仿真研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(12):146-151.
ZHOU Z M, ZHANG J, GU C L. Simulation research on crack defect identification based on AC electromagnetic field[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(12): 146-151.
- [15] FOSTER E A, BOLTON G, BERNARD R, et al. Automated real-time eddy current array inspection of nuclear assets[J]. Sensors, 2022, 22(16): 6036.
- [16] 陈涛,董袁航,张赛,等.高压电缆铝护套焊缝缺陷 ACFM检测方法 & 检测系统的研究[J]. 工程设计学报, 2022, 29(3): 394-400. doi: 10.3785/j.issn.1006-754X.2022.00.037
CHEN T, DONG Y H, ZHANG S, et al. Research on ACFM detection method and detection system of aluminum sheath weld defects in high voltage cable[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(3): 394-400.
- [17] 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.
GE J H, YANG C K, HU B W, et al. Research on high-speed detection of rail surface crack based on AC electromagnetic field detection technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18): 66-74.
- [18] 李伟,袁新安,陈国明,等.基于ACFM的隔水管表面裂纹链式阵列检测探头设计与试验研究[J].机械工程学报,2017,53(8):8-15.
LI W, YUAN X A, CHEN G M, et al. Design and experimental study of chain array detection probe for surface crack of riser based on ACFM[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 8-15.
- [19] 李锴,钟志民,孟令强.压水堆核电厂乏燃料水池失效分析与预防初探[J].金属热处理,2019,44(增刊1):435-440.
LI K, ZHONG Z M, MENG L Q. Failure analysis and prevention of spent fuel pool in pressurized water reactor nuclear power plant[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(Supplement 1): 435-440.
- [20] ZHOU Z M, ZHANG J, WAN F, et al. Structural optimisation of a standard alternating current field measurement excitation probe for concave and convex surfaces[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2019, 61(9): 542-548.

