

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.12.16

交流电磁场检测技术在核级阀门耐磨堆焊层表面及内部缺陷检测中的应用

李予卫, 朱从斌, 邹国伟

中广核工程有限公司, 广东 深圳 518124

摘要: 核电站中, 与冷却剂直接接触的阀门密封面的硬质合金耐磨堆焊层的焊材需严格控制Co含量。目前, 采用铁基、镍基合金两种无钴硬质合金替代钴基合金进行阀门密封面的堆焊是核电阀门设备制造重点的研究方向。由于阀门硬质合金堆焊层厚度小, 且属于奥氏体组织, 其表面和内部缺陷的检测是一个难点和痛点^[1]。本文通过设计不同基材和堆焊层组合的试块, 并加工不同深度和尺寸的人工缺陷, 利用交流电磁场检测(ACFM)技术能够有效检出直径为0.5 mm的缺陷, 最大检测深度可达5 mm, 且对表面开口缺陷和内部裂纹类缺陷的检出能力优于孔洞类缺陷。此外, ACFM技术在检测镍基堆焊层时, 其检测深度和灵敏度不低于铁基堆焊层。因此, ACFM技术是一种有效的无损检测检测方法, 在核级阀门制造和维修中具有广阔的应用前景, 未来需要进一步探索其在极限检测能力方面的应用。

关键词: ACFM检测技术; 铁基和镍基耐磨堆焊层; 无损检测; 核电站阀门

中图分类号: TG455 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2025)12-0116-06

Application of ACFM Detection Technology in the Surface and Internal Defect Detection of Wear-resistant Surfacing Layers on Nuclear-grade Valves

LI Yuwei, ZHU Congbin, ZOU Guowei

China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518124, China

Abstract: In nuclear power plants, the hard alloy wear-resistant surfacing layer of the valve sealing surface that comes into direct contact with the coolant needs to strictly control its Co content. Currently, using iron-based and nickel-based alloys as cobalt-free hard alloys to replace cobalt-based alloys for valve sealing surface welding is a key research direction in nuclear power valve equipment manufacturing. Due to the small thickness of the valve hard alloy surfacing layer and its austenitic structure, detecting its surface and internal defects is a challenge. This paper designs test blocks with different base materials and surfacing layer combinations, and processes artificial defects of different depths and sizes. Using ACFM technology can effectively detect defects with a diameter of 0.5 mm, with a maximum detection depth of up to 5 mm. Moreover, its ability to detect surface opening defects and internal crack-like defects is superior to that of hole-type defects. Additionally, when using ACFM technology to detect nickel-based surfacing layers, its detection depth and sensitivity are not inferior to iron-based surfacing layers. Therefore, ACFM technology is an effective non-destructive testing method, with broad application prospects in the manufacturing and maintenance of nuclear-grade valves. Further exploration of its ultimate detection capabilities is needed in the future.

Keywords: ACFM detection technology; Iron-based and nickel-based wear-resistant surfacing layers; Non-destructive testing; Nuclear power plant valves

引用格式: 李予卫, 朱从斌, 邹国伟. 交流电磁场检测技术在核级阀门耐磨堆焊层表面及内部缺陷检测中的应用[J]. 电焊机, 2025, 55(12): 116-121.

收稿日期: 2025-05-17 修回日期: 2025-09-15

作者简介: 李予卫(1966—), 正高级工程师, 主要从事核电站焊接及无损检测相关技术的研究。

Citation:LI Yuwei, ZHU Congbin, ZOU Guowei. Application of ACFM Detection Technology in the Surface and Internal Defect Detection of Wear-resistant Surfacing Layers on Nuclear-grade Valves[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 116–121.

0 引言

根据《我国核电发展规划研究》, 预计至 2035 年, 核电总装机容量将达到 1.69 亿千瓦, 发电量占比达到 13.5%, 每年保持 6~8 台的投产规模。我国第三代核电技术以“华龙一号”和 CAP1400 为代表、拥有独立自主技术和全产业链, 是未来机组主要堆型。

在核电技术的发展中, 控制钴含量是一个关键问题。钴元素在中子辐照下容易产生放射性同位素 Co60, 对人员和环境造成伤害, 钴含量过高也会降低构件的机械性能和耐蚀性能, 影响使用寿命及安全性。“华龙一号”核电技术标准 RCC-M(2007) 第 IV 卷规定, 对于与冷却剂直接接触的堆焊填充金属应规定 Co 含量, 奥氏体-铁素体不锈钢: $\text{Co} \leq 0.20\%$, 不宜大于 0.15%; 碳钢和低合金钢: $\text{Co} \leq 0.03\%$; 镍基合金: $\text{Co} \leq 0.10\%$ 。RCC-M S8000 推荐的硬质合金堆焊材料中, 除钴基合金外, 增加了铁基、镍基合金两种无钴硬质合金材料。EPR、AP1000、VVER 等国外三代核电堆型均要求核岛阀门密封面采用无钴合金^[1]堆焊。

目前, 我国三代核电无钴密封面阀门主要依赖进口, 在无钴硬质合金方面的研发和应用尚处于探索阶段, 在三门、台山、秦山等核电工程的国产化实践中曾遇到多起铁基硬质合金密封面开裂问题, 这对机组的冷试、热试乃至安全运行产生了严重影响。本文结合核级阀门密封面铁基和镍基硬质合金耐磨堆焊层(以下简称堆焊层)的设计结构和主要缺陷, 开展交流电磁场检测技术(ACFM 检测技术)针对堆焊层的检测能力的验证工作。

1 阀门密封面堆焊层概述

1.1 堆焊层厚度

阀门密封面堆焊层设计厚度通常约为 2.5 mm。为确保有足够的余量, 实际堆焊层厚度为 4~5 mm, 随后加工至设计厚度, 即进行化学成分和硬度的检

测面, 如图 1 所示。

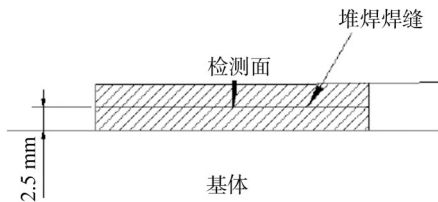


图 1 堆焊层示意

Fig. 1 Weld-deposited hardfacing layer

1.2 堆焊层组织

铁基和镍基硬质合金堆焊层主要的焊接方法包括钨极氩弧焊、等离子弧焊和激光束焊等。铁基堆焊层常用的焊材有 Norem 02A、Everit 50 或 ERFcCr-A5, 镍基堆焊层常用的焊材有 Grade 4、Grade 5, 两种堆焊层的主要金相组织均为奥氏体。试验证明, 铁基堆焊层中的铁素体含量高于镍基堆焊层, 磁性相对更高, 但由于铁基和镍基堆焊层的铁素体含量较低, 均不属于铁磁性材料范畴, 铁基和镍基堆焊层铁素体含量见表 1, 其中编号 Z1 是铁基堆焊层, Z2 和 Z3 是镍基堆焊层。针对铁基和镍基硬质合金堆焊层, 常规的磁粉检测(MT)检测方法不适用, 渗透检测(PT)只能检测表面开口缺陷。考虑到堆焊层的结构特性, 开发一种既能检测表面开口缺陷又能检测一定深度的内部缺陷的无损检测方法显得极为迫切。

表 1 铁基和镍基堆焊层铁素体含量(质量分数, %)

Table 1 Ferrite content of iron-based and nickel-based hardfacing layers(wt. %)

编号	铁素体含量									
Z1	3.8	3.3	3.1	2.7	3.8	3.1	3.5	3.6	3.3	2.5
Z2	0.83	0.48	0.63	0.72	0.86	0.69	0.49	0.45	0.52	0.40
Z3	0.32	0.33	0.35	0.33	0.36	0.37	0.49	0.55	0.48	0.64

2 ACFM 检测系统

2.1 ACFM 技术工作原理

交流电磁场检测技术(ACFM)是利用激励线圈在工件中感应出均匀的交变电流, 当存在缺陷时, 原来均匀的感应电场会在缺陷周围发生畸变, 畸变

电场引起空间磁场畸变(特征信号 B_x 呈现波谷,特征信号 B_z 呈现波峰和波谷),测量空间畸变磁场实现对缺陷的检测和评估。ACFM 检测技术依靠于特征信号 B_x 和 B_z 组成的蝶形图判定缺陷的存在,借助特征信号 B_x 和 B_z 的时基图实现缺陷的评估,其空间磁场畸变信号如图 2 所示^[2-8]。

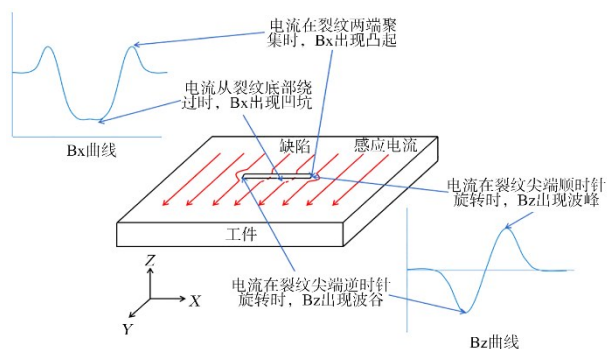


图 2 空间磁场畸变信号

Fig. 2 Spatial magnetic field distortion signal

ACFM 检测技术通常采用低频激励,无需饱和磁化,由于工件表面感应均匀,ACFM 技术能够有效检测表面应力腐蚀开裂、疲劳裂纹等较小的开口裂纹及浅层凹坑等不连续区域。这些缺陷会在感应电场中产生明显扰动,高精度传感器可以拾取这些由均匀电场引起的二次畸变磁场。ACFM 检测技术的工作原理如图 3 所示^[9-10]。

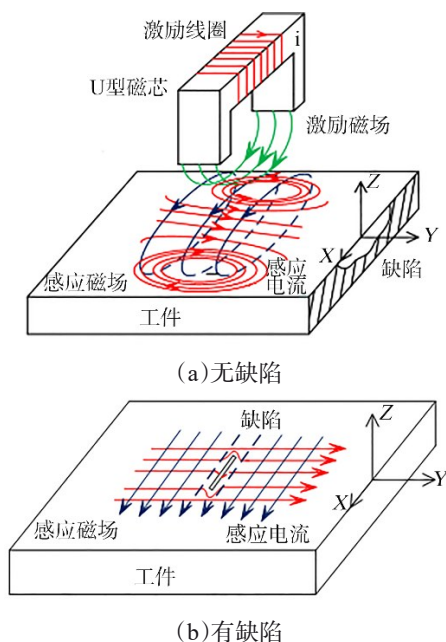


图 3 ACFM 检测技术检测工作原理

Fig. 3 Principle of ACFM detection technology

2.2 ACFM 检测系统

ACFM 检测系统由检测仪器、探头及其连接线组成。检测仪器包括信号发生模块、电源模块、信号调理模块和信号采集模块,电源模块向探头信号发生模块和信号采集模块提供所需电压,信号发生模块产生正弦激励信号(通常频率为 1 kHz、幅值为 10 V),输入至探头的激励线圈;探头沿着工件表面扫查,工件表面产生局部均匀的感应电流,在经过缺陷时,感应电流会发生扰动,导致空间磁场发生畸变,探头内部的高灵敏传感器拾取畸变的磁场响应信号,输出的信号经过信号调理模块对信号进行放大滤波处理。处理后的信号通过信号采集模块将模拟信号转化为数字信号,并通过检测软件进行后续的处理及显示。ACFM 系统组成及探头结构分别如图 4、图 5 所示^[11-12]。

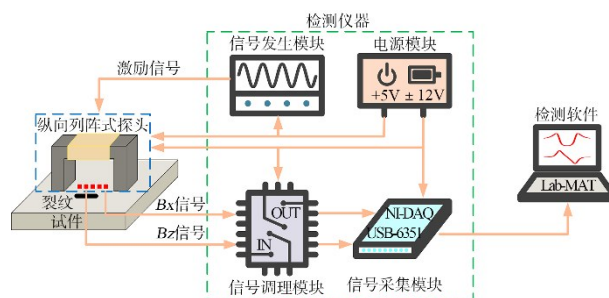


图 4 ACFM 检测技术检测工作原理

Fig. 4 ACFM detection system composition

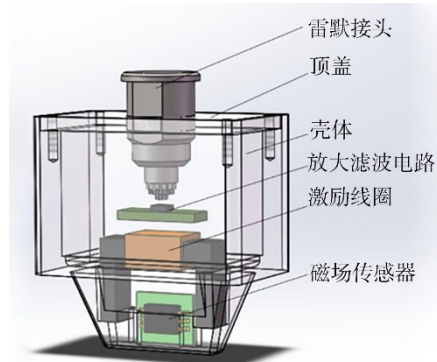


图 5 探头结构

Fig. 5 Probe structure diagram

3 试验验证

3.1 验证试块的设计

根据阀门密封面硬质合金堆焊层的焊接厚度,

并考虑目前行业人工缺陷的加工能力,设计了3种不同的堆焊层试块。设计碳钢和奥氏体不锈钢两种基材的目的是验证铁磁性材料和非铁磁性材料基材对检测深度和检测能力的影响。3种试块分别为:(1)碳钢基材+铁基堆焊验证试块,10个内部缺陷,最大深度5 mm,2个表面刻槽;(2)碳钢基材+镍基堆焊验证试块,6个内部缺陷,最大深度3 mm,2个表面刻槽;(3)奥氏体不锈钢基材+镍基堆焊层验证试块,5个内部缺陷,最大深度5 mm。验证试块人工孔和刻槽的分布、深度及尺寸如图6所示。

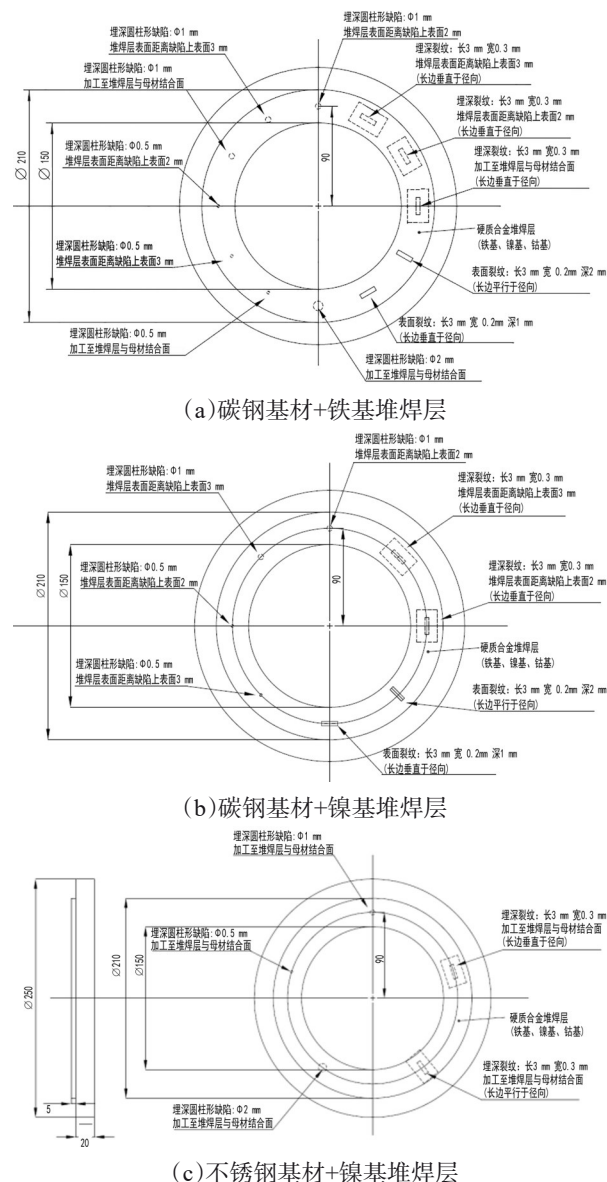


图6 带人工缺陷的堆焊层验证试块

Fig. 6 Weld-deposited hardfacing verification test block with artificial defects

3.2 检测结果

沿着圆形堆焊层试块的圆弧表面匀速进行手工扫查,每个缺陷扫查多次,以排除非相关因素的干扰,并通过仪器自带软件对缺陷自动判定,如图7所示。

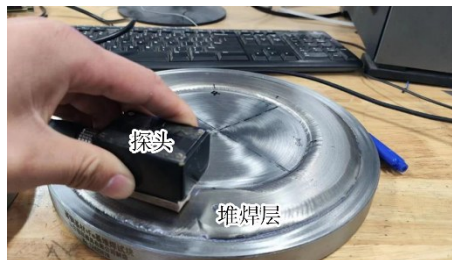


图7 手工扫查示意

Fig. 7 Schematic diagram of manual scanning

3.2.1 碳钢基材+铁基堆焊层试块

除了位于堆焊层与基材接合面(深度约5 mm)的0.5 mm的孔信号未达到阈值以外,其他2个表面刻槽和内部9个人工缺陷均可有效检出,从检测结果可以得出:

(1)5 mm深的0.5 mm孔特征信号未超过设定阈值,且无法与背景噪声有效区分,信号如图8a所示,不能有效检出;深度为3 mm的0.5 mm的孔则能够有效检出,信号如图8b所示。这表明ACFM检测技术能够检测一定深度的内部缺陷,但随着缺陷深度的增加,可检出的缺陷当量增大。在图8b中,人工孔缺陷前面有一个超过阈值的较强干扰信号,由于ACFM检测技术无法判定该信号属于堆焊层内部真实缺陷信号还是非缺陷干扰信号,说这表明在检测较深的小尺寸缺陷时,若阈值设置较低,存在将干扰信号误判为缺陷的可能性。

(2)对于尺寸为3 mm×0.2 mm×1 mm的表面刻槽可有效检出,信号如图8b所示,说明ACFM检测技术具有检测表面开口缺陷的能力。

(3)对于3 mm(长)×0.3 mm(宽)的内部刻槽,其检测深度可达5 mm左右,信号如图8c所示,说明ACFM技术在检测内部裂纹类缺陷方面的能力较孔洞类缺陷强。

3.2.2 碳钢基材+镍基堆焊层试块

碳钢基材+镍基堆焊试块设置了8个人工缺陷,最大深度3 mm,均可有效检出。说明在深度3 mm以内,在设计试块缺陷当量情况下,ACFM检测

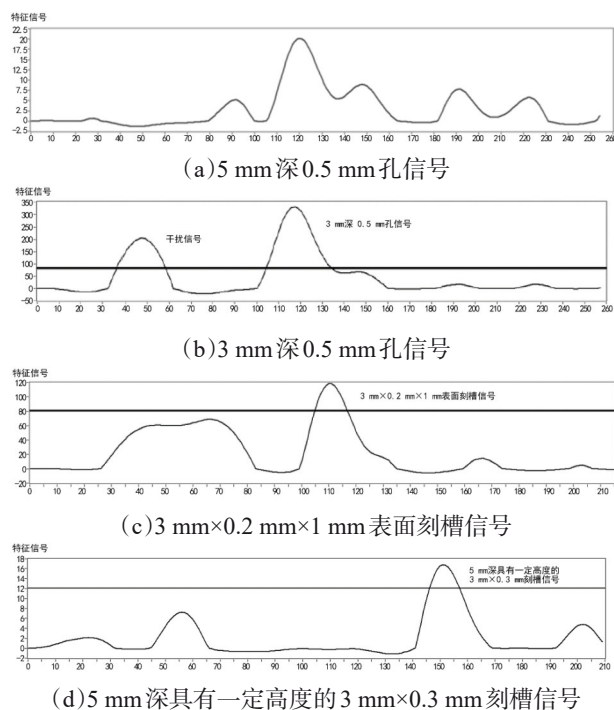


图8 碳钢基材+铁基堆焊层试块检测结果(图中直线为设定的阈值)

Fig. 8 Example of test block detection results of carbon steel substrate + iron-based hardfacing layer (The straight line in the figure represents the set threshold)

技术在检测镍基硬质合金堆焊层内部缺陷的能力与铁基堆焊层相当。图9是深度为3 mm、直径为0.5 mm的孔洞的信号,与图8b相比,图9中的孔洞信号前后没有明显的干扰信号,说明干扰信号的出现具有一定的随机性。

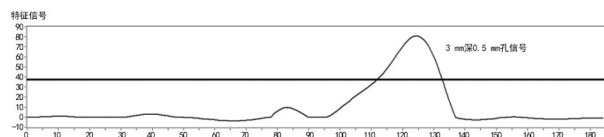


图9 3 mm深0.5 mm孔信号

Fig. 9 3 mm deep 0.5 mm hole signal

3.2.3 奥氏体不锈钢基材+镍基堆焊层试块

在奥氏体不锈钢基材上堆焊镍基合金的试块中,共设置了5个人工缺陷,这些缺陷均位于堆焊层与基材接合面附近,深度约为5 mm。所有这些缺陷均被有效检出。其中,0.5 mm孔的信号如图10所示。值得注意的是,尽管在碳钢基材上相同深度的0.5 mm孔洞未能有效检出,但在奥氏体不锈钢基材上却能检出。这一结果说明碳钢的导磁特性影响了位于界面位置处缺陷的检出能力。从试验结果

可以看出,ACFM检测技术对镍基堆焊层的检测深度和检测灵敏度不低于铁基堆焊层,甚至更高。

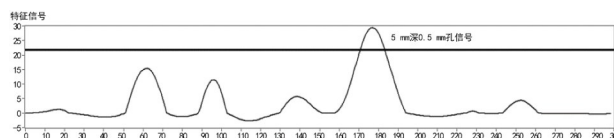


图10 5 mm深0.5 mm孔信号

Fig. 10 5 mm deep 0.5 mm hole signal

ACFM技术在检测表面和内部缺陷方面具有显著优势,但也存在局限性,如对深度较大的小尺寸缺陷检测能力有限,易受基材特性和干扰信号影响,未来需进一步优化检测方法,提高检测灵敏度,降低铁基和镍基合金带来的非缺陷干扰信号。

4 结论

通过设计并实施一系列试验,验证了交流电磁场检测技术(ACFM)在核级阀门铁基和镍基耐磨堆焊层检测中的应用潜力。试验结果表明,ACFM技术能够有效检测圆形试件中一定当量的表面缺陷和内部缺陷,包括裂纹和孔洞等。具体结论如下:

(1)ACFM检测技术具有检测表面缺陷的能力。无论是铁基还是镍基堆焊层,ACFM均能有效检出表面刻槽等开口缺陷,表明其在检测表面缺陷方面具有优势。

(2)ACFM检测技术具有一定的内部缺陷检测能力。对于内部缺陷,ACFM能够检出一定深度和尺寸的裂纹和孔洞,检测深度受缺陷当量影响,当量越大,可检出深度越深。

(3)ACFM检测技术对不同基材堆焊层的检测效果存在差异。碳钢基材对堆焊层内部缺陷的检测能力有一定影响,而奥氏体不锈钢基材则展现出更好的检测效果。

(4)ACFM检测技术对镍基堆焊层的检测效果优于铁基堆焊层。镍基堆焊层的检测深度和灵敏度均高于铁基堆焊层。

(5)ACFM检测技术可以用于核级阀门铁基和镍基耐磨堆焊层表面和内部缺陷检测。然而,仍需进一步探索ACFM技术的极限检测能力,并针对实际工程应用场景进行优化,以充分发挥其在核级阀

门无损检测中的价值。建议结合电磁场传播规律和交流电磁场检测理论,构建 ACFM 检测理论模型,并探索圆形试件的智能定量检测方法,以进一步提高 ACFM 技术的检测精度和可靠性。

参考文献:

- [1] 孙志强,李予卫,吴义党,等. 无钴基硬质合金在核级阀门中的应用分析[J]. 焊接技术, 2024, 53(02):11-15.
SUN Z Q, LI Y W, WU Y D, et al. Application analysis of non-cobalt-based cemented carbide in nuclear grade valve[J]. Welding Technology, 2024, 53(02):11-15.
- [2] 李伟,袁新安,陈国明,等. 基于外穿式交流电磁场检测的钻杆轴向裂纹在役检测技术研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(12):8-15.
LI W, YUAN X A, CHEN G M, et al. Research on In-service Detection for Axial Cracks on Drill Pipe Using the Feed-through Alternating Current Field Measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(12):8-15.
- [3] Papaelias M, Lugg M, Roberts C, et al. High-speed inspection of rails using ACFM techniques[J]. NDT and E International, 2008, 42(4):328-335.
- [4] 于海旭,王璇,李超月,等. ACFM 对焊缝表面缺陷的识别分析[J]. 设备管理与维修, 2023(12):66-69.
YU H X, WANG X, LI C Y, et al. ACFM Identification and Analysis of Weld Surface Defects[J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(12):66-69.
- [5] 杨敏,王凤森,黄险峰. GMR 传感器和 TMR 传感器的性能对比[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(1):127-131.
YANG M, WANG F S, HUANG X F. Compare of the performance between GMR sensor and TMR sensor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(1):127-131.
- [6] 窦如凤,井娥林. 基于 AD620 的微弱信号放大器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(3):45-47+81.
DOU R F, JING E L. Design of Weak Signal Amplifier Based on AD620[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(3):45-47+81.
- [7] 黄曼,王婕,周伟,等. 单向 CFRP 表面缺陷的涡流检测与有限元仿真研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(19):182-187.
HUANG M, WANG J, ZHOU W, et al. Eddy current detection and finite element simulation study of surface defects in unidirectional CFRP[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(19):182-187.
- [8] 李伟. 基于交流电磁场的缺陷智能可视化检测技术研究[D]. 山东:中国石油大学, 2007.
LI W. Research on intelligent visual detection technology for defects based on alternating electromagnetic fields[D]. Shandong: China University of Petroleum, 2007.
- [9] LI W, CHEN G M, YIN X K, et al. Analysis of the lift-off effect of a U-shaped ACFM system[J]. NDT & E International, 2013, 53:31-35.
- [10] 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, 2019, 61(9):542-548.
- [11] Yuan X, Li W, Yin X, et al. Identification of Tiny Surface Cracks in a Rugged Weld by Signal Gradient Algorithm Using the ACFM Technique[J]. Sensors, 2020, 20(2):380-380.
- [12] 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+106.
ZHENG L H, REN S K, WANG J L. Research on Surface Crack Identification and Size Inversion Algorithm Based on ACFM Technology[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(5):80-85+106.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>