

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.02.07

基于交流电磁场检测(ACFM)的不锈钢焊缝缺陷层间检测技术研究

马迎兵¹, 李哲¹, 丁建喜²

1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840
2. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580

摘要: 针对核电站建设中部分重要焊接结构无法实施常规射线检测(RT)的难题, 提出采用交流电磁场检测(ACFM)技术对不锈钢焊缝进行层间在线检测。研发了一套包括检测设备和探头的ACFM系统和工艺, 进行了分层焊缝缺陷的模拟仿真, 设计了高灵敏度窄底探头以适应不锈钢焊缝层间检测的需求, 并通过设计含有不同类型、尺寸和位置缺陷的模拟试块, 进行了ACFM检测试验, 试验结果表明, ACFM技术对试块中预设的81个超标缺陷(如直径 ≥ 1.2 mm的圆形缺陷)检出率为100%, 无漏检; 试验中出现的24个非相关显示(误报)经确认均由焊缝表面起伏或粗糙度过大引起, 可通过观察表面状态予以排除。对不锈钢焊缝进行层间ACFM检测的研究为检测焊缝内部缺陷提供了新方法和新思路。

关键词: ACFM技术; 不锈钢焊缝; 层间检测; 模拟试块

中图分类号: TG441.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)02-0063-10

Research on Interlayer Detection Defects Technology for Stainless Steel Welded Joints based on ACFM

MA Yingbing¹, LI Zhe¹, DING Jianxi²

1. China Nuclear Power Eng. Co., Ltd., Beijing 100840, China
2. Dept. of Mechanical and Electrical Eng., China Univ. of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

Abstract: To address the challenge that certain critical welded structures in nuclear power plant construction cannot be inspected by conventional radiographic testing (RT), this study proposes the use of Alternating Current Field Measurement (ACFM) technology for inter-layer online inspection of stainless steel welds. An ACFM system and process were developed, including inspection equipment and probes. Simulation of layered weld defects was carried out, and a high-sensitivity narrow-base probe was designed to meet the requirements of inter-layer inspection of stainless steel welds. By designing simulated test blocks containing defects of various types, sizes, and locations, ACFM inspection tests were conducted. The test results show that the ACFM technology achieved a 100% detection rate for the 81 preset unacceptable defects (e.g., circular defects with diameters ≥ 1.2 mm) in the test blocks, with no missed detections. The 24 non-relevant indications (false calls) that occurred during the tests were confirmed to be caused by weld-surface undulations or excessive roughness, and could be eliminated by examining the surface condition. The research on inter-layer ACFM inspection of stainless steel welds provides a new method and innovative approach for detecting internal weld defects.

Keywords: ACFM; stainless steel welded joint; interlayer detection; simulated test block

引用格式: 马迎兵, 李哲, 丁建喜. 基于交流电磁场检测(ACFM)的不锈钢焊缝缺陷层间检测技术研究[J]. 电焊机, 2026, 56(2): 63-72.

Citation: MA Yingbing, LI Zhe, DING Jianxi. Research on Interlayer Detection Defects Technology for Stainless Steel Welded Joints based on ACFM [J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(2): 63-72.

收稿日期: 2025-07-24 修回日期: 2025-09-22

作者简介: 马迎兵(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事核工程焊接及无损检测的研究。E-mail: myingbing@163.com。

0 引言

焊接是核电站建造过程中的重要施工方法,焊接接头的质量对核设施的建造和安装的可靠性有重要影响,直接影响到核电站的安全运行。目前,在建的核电项目中对焊接接头主要采用的无损检测技术包括射线检测(RT)^[1]、超声检测(UT)^[2]、渗透检测(PT)^[3]、涡流检测^[4]、磁粉检测^[5]等,其中,射线检测应用比例相对较大,其优点主要是检测焊缝内部的体积性缺陷。但在实际的工程建设中,对于一些重要焊接结构,经常会遇到设计规定对焊缝进行内部体积检测(射线检测或超声波检测),但因焊缝结构、材质原因(例如某些角接接头、支接管马鞍形焊接接头等)无法依照常规射线检测或超声波检测标准实施的问题,在核电建造规范 RCC-M 中对此类情况允许采用每三层焊道进行渗透检测的方法代替原规定的射线检测或超声波检测^[6],但同时也存在一些问题,首先,每三层进行渗透检测仍有可能造成缺陷漏检,其次,采用对焊缝分层渗透检测因需要焊缝冷却至室温再实施渗透检测,操作速度较慢(一般需几十分钟),尤其在焊缝厚度较大时会导致焊接生产效率严重下降,第三,一些焊接工艺要求焊接过程中需要保持较高的层间温度(例如大于 150 °C),如果中断保持层间温度的话,则需进行后热缓冷,如此条件对焊缝分层渗透检测所需的时间更长。

交流电磁场检测(Alternating current field measurement, ACFM)技术是一种新兴的表面和近表面电磁无损检测技术,也是近年来无损检测技术领域的主要进展之一,它具有许多优点,包括可实现非接触检测(穿透涂层)、对不锈钢等顺磁性材料可检缺陷埋深达 7 mm、无需标定、可实现 C 扫描图像、可实时记录、可存储检测过程和结果等^[7-10]。该技术除了在海洋工程、油气管道等领域对疲劳裂纹检测有较为广泛的应用外,近年来,在核工程领域,对于微小缺陷的检测也已有研究和应用案例。比如,对于薄壁奥氏体不锈钢焊缝的缺陷检测,具有不低于 RT 的检出能力^[11];对于新燃料运输容器吊耳角焊缝的表面缺陷,能够实现快速有效检出^[12]。

针对现有技术中存在的问题,本文基于 ACFM

技术对每层焊道进行检测,设计了高灵敏度窄底探头、进行了分层焊缝缺陷仿真,并设计了各类试块进行试验,不但能克服上述缺点,而且能够对内部缺陷进行检测,使得缺陷漏检风险大大减小,检测速度加快,检测效率大幅度提高。

1 仿真研究

1.1 仿真模型的搭建

采用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 对分层焊缝缺陷进行仿真分析。COMSOL Multiphysics 是一款基于先进数值方法的通用仿真软件,支持单一物理场及多物理场耦合建模,可用于工程、制造和科学研究的绝大多数领域。

在 50 mm 长度内的分层焊缝,焊脚高度不小于 3 mm。如图 1 所示,为 ACFM 分层焊接焊缝缺陷检测三维仿真模型,仿真模型主要参数如表 1 所示。模型主要包括试件、焊缝、焊缝缺陷、磁芯、激励线圈和外围空气,缺陷位于焊缝、焊趾,以及热影响区,且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。激励线圈缠绕在 U 形磁芯上,磁芯的两磁腿横跨在焊缝缺陷正上方,沿焊缝方向扫查。

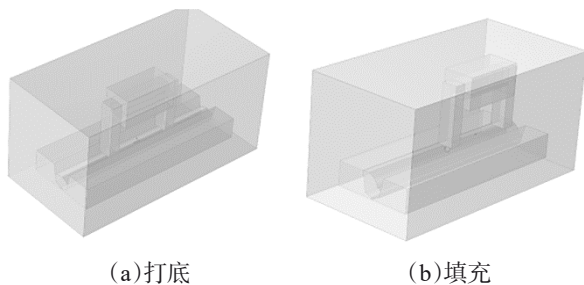


图 1 ACFM 分层焊缝缺陷检测三维仿真模型

Fig. 1 ACFM layered weld defect detection 3D simulation model

表 1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters

部件	电导率/(S·m ⁻¹)	磁导率	介电常数	尺寸/mm
试件(304L)	1.4×10 ⁶	1.1	1	50×30×6
磁芯	1	10000	1	20×5×16
线圈	5.96×10 ⁷	1.0	1	16×9×6

1.2 可行性研究

包括电磁场渗透深度、磁导率差异与形状差异影响,研究 ACFM 技术在层间焊缝检测应用的可

行性。

随着深度的增加,试件内部的感应电流呈指数型下降。通常来说,试件内部感应电流密度下降到表面电流密度的 $1/e$ 时的深度,为电流的集肤深度。集肤深度的公式见式(1)

$$d = \sqrt{\frac{l}{\pi f \mu_0 \mu_1 \sigma}} \quad (1)$$

式中 f 为电流频率,在本研究中为 1 000 Hz; μ_0 为真空磁导率,为 $4\pi \times 10^{-7}$; μ_1 为不锈钢的相对磁导率,为 1.1; σ 为不锈钢的电导率,为 1.4×10^6 S/m。

电流在不锈钢中的衰减曲线如图2所示。在电磁检测领域,通常使用集肤深度作为有效检测深度。本研究中不锈钢的集肤深度为 12.83 mm,因此理论上可以检测 12.82 mm 以内的缺陷。然而,不锈钢的电导率较低,感应电流幅值较小,在焊缝结构的影响下,缺陷的信噪比较低。加之核电领域待检测缺陷较小,因此,在较深的集肤深度以内仍然存在缺陷漏检的可能性。在核电领域,单层焊缝厚度通常为 3 mm,最大不超过 4 mm。从图2中可以看到,在深度 4 mm 时,电流衰减为表面电流密度的一半,检测 4 mm 厚度以内的缺陷具有一定的可行性。

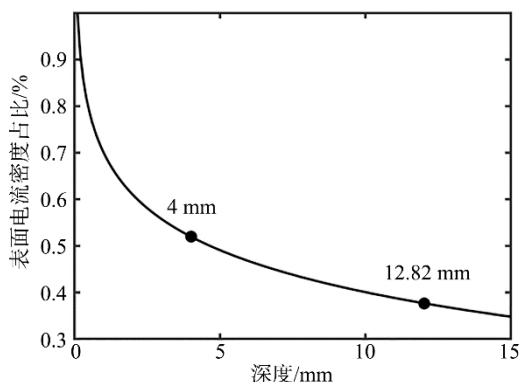


图2 不锈钢内部电流密度随着深度的衰减

Fig. 2 The current density inside stainless steel decays with depth

焊接本质上是一个高度局域化的、受控的热过程,焊接会导致焊缝的磁导率增加。在仿真模型中设置直径 1 mm 的半球形磁导率畸变区域,磁导率畸变范围从 1~20。检测探头信号变化如图3所示。随着磁导率增加,检测探头信号受磁导率变化影响减小。

焊缝存在鱼鳞纹结构,高低起伏变化会对检测探头信号产生影响。在仿真模型中设置直径 1 mm

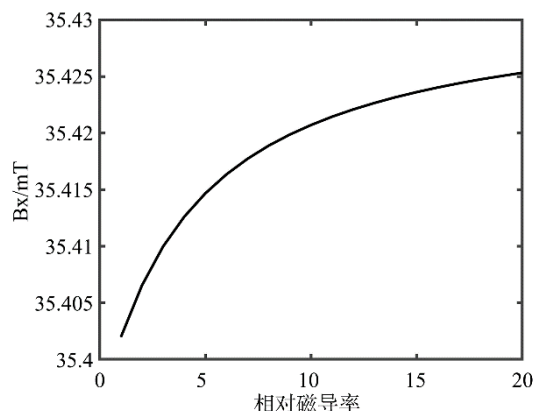


图3 不锈钢磁导率对磁场信号的影响

Fig. 3 The influence of stainless steel's magnetic permeability on the magnetic field signal

的半球形高度异变区域,高度异变从 1~5 mm。检测探头响应与高度异变呈线性关系,如图4所示。相对于磁导率畸变,形状异变带来的探头信号响应要更明显,更容易造成缺陷误判。因此,后续将主要研究形状异变带来的误判影响。

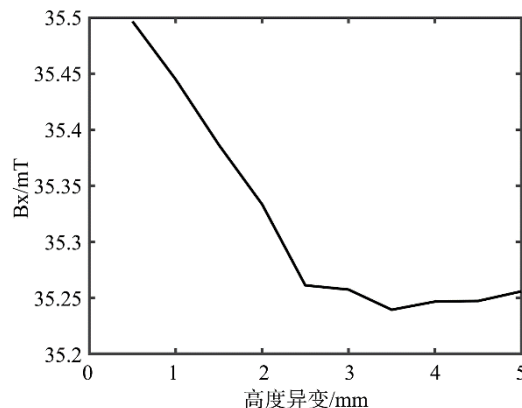


图4 形状差异对磁场信号的影响

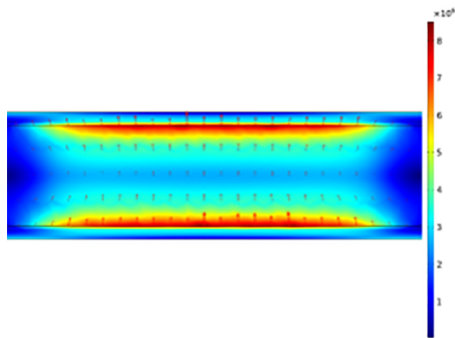
Fig. 4 The influence of shape variation on the magnetic field signal

1.3 检测探头仿真

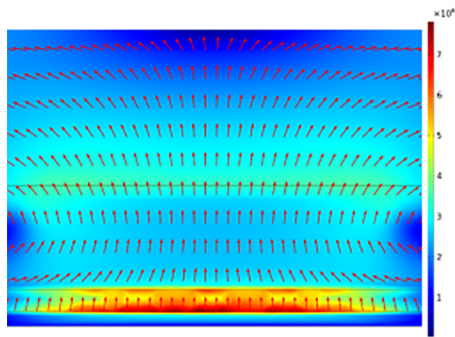
包括覆盖范围仿真、线圈匝数仿真、加载电流大小仿真、激励频率仿真、不同角度仿真等。

其中,覆盖范围依据焊缝宽度与检测磁芯尺寸,提取试件表面感应电流模,从图5可以看出,由于磁芯宽度和焊缝宽度基本一致,感应电流基本覆盖焊缝区域及热影响区,一次性扫查即可覆盖焊缝区域,满足实际检测需求。

激励频率仿真以试件直径 1.2 mm 长的圆缺陷为研究对象,保持其他仿真参数不变,分别改变激励频率为 500 Hz~10 kHz。提取不同频率下的空



(a) 打底焊缝感应电流分布



(b) 填充焊缝感应电流分布

图5 探头覆盖区域

Fig. 5 Probe coverage area

间磁场分布如图6所示。随着频率的增加, B_x 信号的变化量逐渐增加。 B_x 信号的变化量在 1 kHz 时达到最大, 之后随着频率的增大而减小; 综合考虑影响下, 当频率为 1 kHz 时, 特征信号有着最大的缺陷响应。

在实际检测中, 由于多道焊接的原因, 探头底

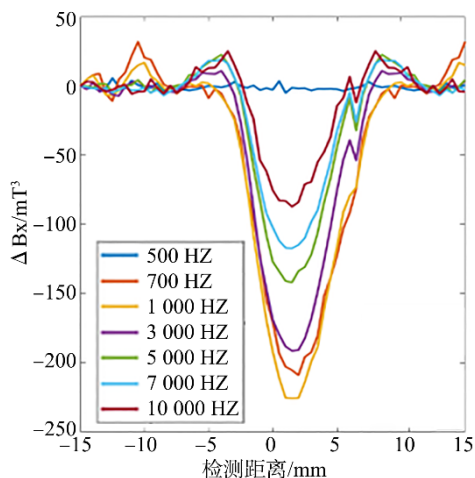


图6 不同频率下同一缺陷特征信号响应

Fig. 6 Feature signal response of identical defect at different frequencies

部有时会处于部分悬空状态, 运行不平稳, 从而产生一定的左右偏转, 如图7所示, 因此需要对探头的不同角度进行仿真。以焊缝区直径 1.2 mm 的圆形缺陷为研究对象, 提取不同偏转角度下的空间磁场分布。从图8中可以看出, 随着偏转角度的增大, B_x 信号的畸变量减小, 且信号衰减较快。

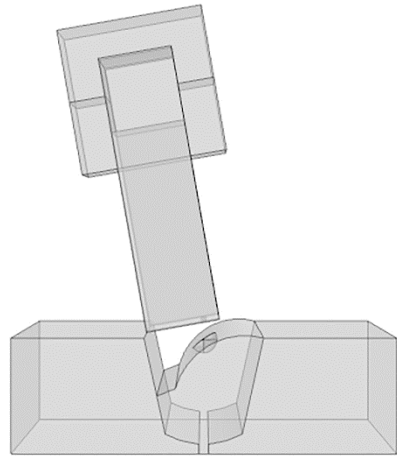


图7 探头偏转模型示意

Fig. 7 Schematic diagram of probe deflection model

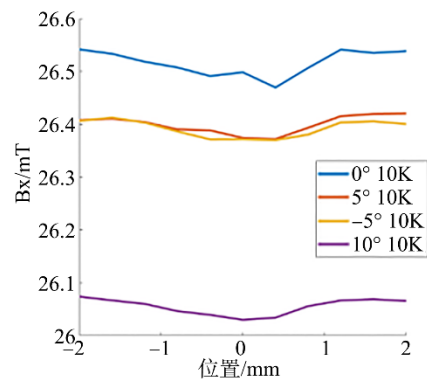


图8 偏转角度信号畸变量

Fig. 8 Signal distortion level at deflection angles

1.4 检测工艺仿真

包括扫查方向、探头偏移距离、探头提高高度、边缘效应缺陷、起弧收弧处缺陷等仿真。以焊缝区直径 1.2 mm 的圆形缺陷为研究对象, 保持其他仿真参数不变, 分别使探头进行正向扫查和反向扫查。提取得到的不同方向下的空间磁场分布如图9所示, 扫查方向对于 B_x 信号形状的影响不大, 与理论相一致。

对于探头偏移距离, 在实际检测中, 探头中心线与缺陷中心线可能并不在同一个垂直平面内, 或

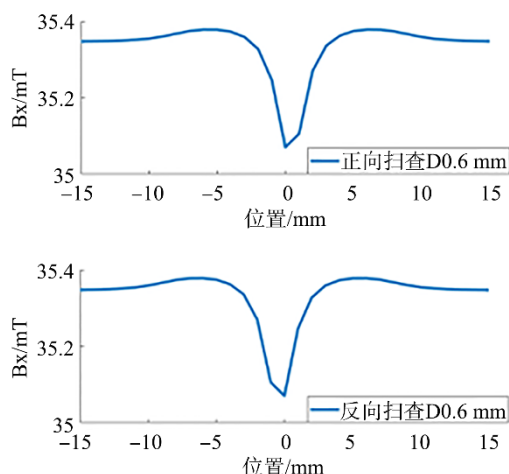


图9 不同扫查方向磁场特征信号

Fig. 9 Magnetic field feature signals in different scanning directions

者由于多数情况下探头在 y 方向上没有约束,从而探头在 y 方向上产生一定的偏移量。以焊缝表面中心直径1.2 mm的圆形缺陷为研究对象,提取不同偏移量下的空间磁场分布。由图10可以看出,随着偏移量的增大, B_x 信号的畸变量均减小,应将探头中心线的偏移量控制在 ± 2 mm以内。

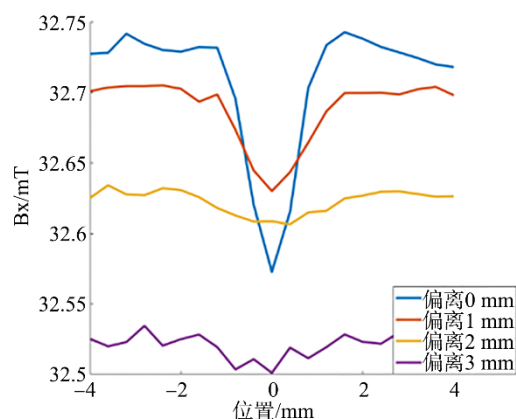


图10 不同偏离距离下特征信号响应

Fig. 10 Feature signal response at different deviation distances

以试件表面直径1.2 mm的圆形缺陷为研究对象,保持其他仿真参数不变,分别改变探头的提离高度为0 mm、1 mm、2 mm。提取得到的不同提离下的空间磁场分布如图11所示,随着探头提离高度的增加, B_x 信号畸变量逐渐减小,不利于缺陷的检测。因此,在保证探头和工件一定安全距离的情况下,应尽量减少提离高度。

当检测探头从焊缝边缘处开始扫查或检测结束时,由于材料与结构的不均匀性,会导致边缘效

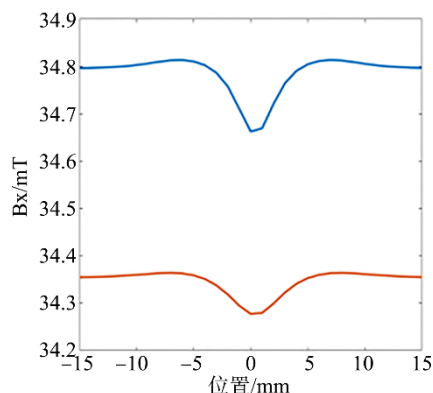


图11 不同提离高度磁场特征信号

Fig. 11 Magnetic field feature signals at different lift-off heights

应的产生。如图12所示,当无缺陷时,特征信号幅值随着靠近试件边缘而增大。当存在缺陷时,特征信号会呈现明显的ACFM检测特征畸变,该畸变量远远大于边缘效应。

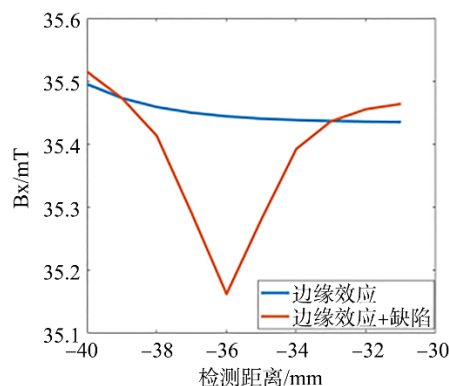


图12 边缘效应对缺陷特征信号的影响

Fig. 12 Effect of edge effects on defect feature signals

1.5 缺陷仿真

在激励线圈中加载幅值为1 A的正弦交流电,提离高度设置为1 mm。仿真分析了单个缺陷的畸变特征信号,包括裂纹、未熔合、未焊透、咬边、圆形缺陷与条形缺陷。

通过设置不同尺寸的同类缺陷,从图13可以看出,对于焊缝表面的平行裂纹,由于其主要尺寸沿探头检测方向拓展,因此对特征信号的影响较大。当裂纹长度增加时,信号畸变量会增大,而对于垂直裂纹,其长度拓展不影响信号畸变量;对于未熔合、未焊透、圆形与条形缺陷而言,其特征信号符合ACFM检测理论。特征信号畸变量随着缺陷的尺寸增加而增大。

另外,还研究了规则圆形缺陷和不规则圆形缺

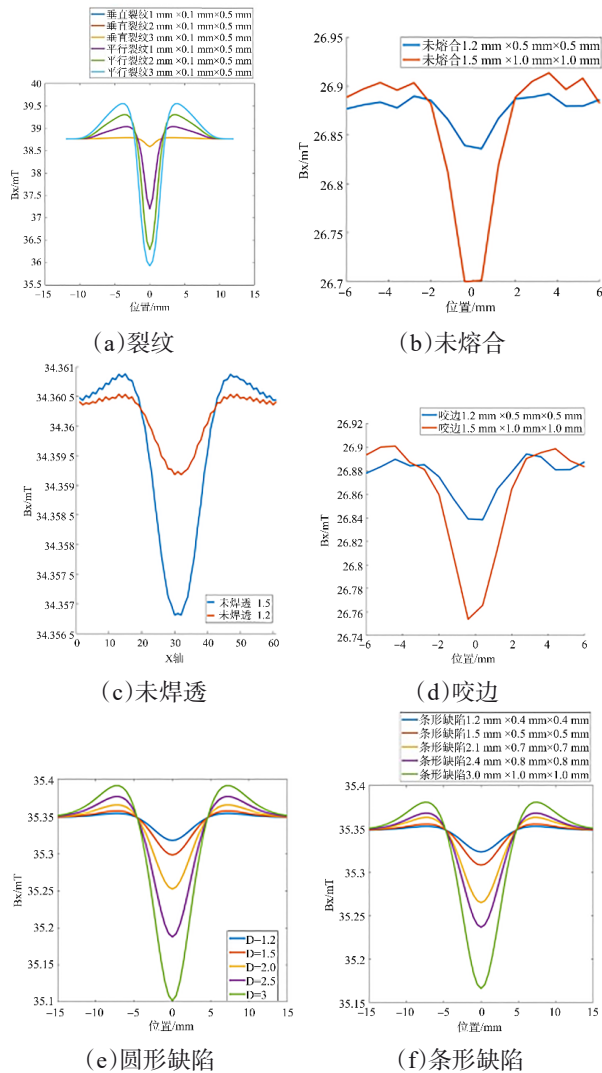


图 13 不同缺陷特征信号响应

Fig. 13 Feature signal response of different defects

陷的区别。在打底焊缝的底部中间位置分别设置直径为 1.5 mm 的规则和不规则圆形缺陷,图 14 中可见不规则圆形缺陷的检测信号畸变量更大。

2 试验设备

2.1 检测系统

检测系统选用鲁科检查科技(山东)有限公司的 LKACFM-X1 型 ACFM 检测仪(见图 15),以及分层焊缝专用的窄底探头(见图 16),其中,窄底探头是为了适应焊缝底部狭窄空间,在保证检测灵敏度的前提下,减小线圈匝数,可满足分层焊道检测需求。

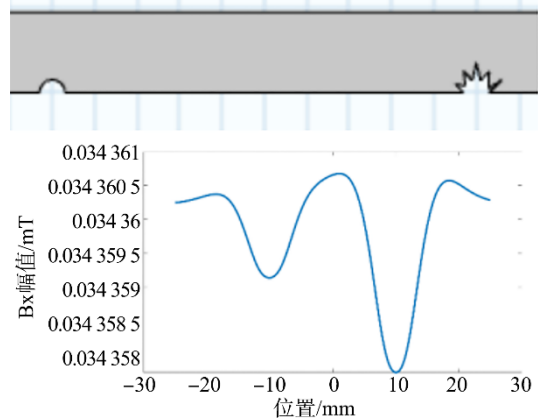


图 14 规则和不规则圆形缺陷检测信号对比

Fig. 14 Comparison diagram of detection signals for regular vs. irregular circular defects



图 15 ACFM 检测仪

Fig. 15 ACFM testing instrument

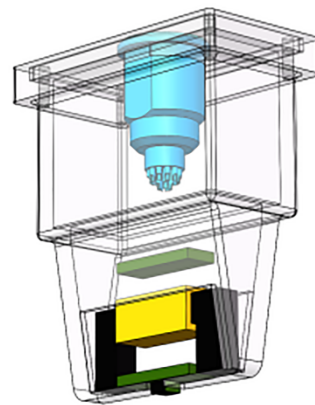


图 16 探头结构

Fig. 16 Probe structure diagram

2.2 试块设计

经过对三个核电项目在预制厂焊接的支接管马鞍型焊缝产生缺陷的调研和统计,设计了与现场被检工件同材质、同焊接方法的对比试块,以及含有不同类型、尺寸和位置缺陷的模拟试块。其中,对比试块设计图纸如图 17 所示,共计 3 块,包含 12

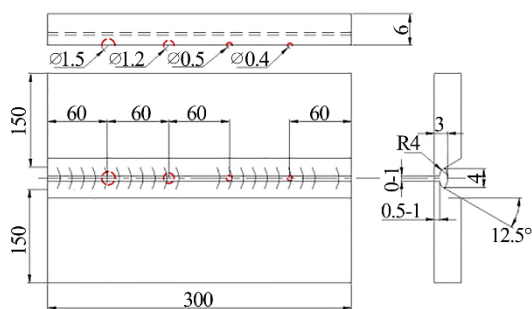


图 17 对比试块缺陷设计图例

Fig. 17 Design schematic of defects in reference block

个圆形缺陷。

模拟试块根据项目技术条件的验收标准设置缺陷类型,包括不超标和超标的危险性缺陷、单个缺陷等,共设计模拟试块24块(包括打底层和填充层模拟试块),包含117个不同类型的缺陷,对缺陷检出能力、最大检测深度、缺陷信号特征等进行试验研究。图18为部分模拟试块缺陷设计图例。

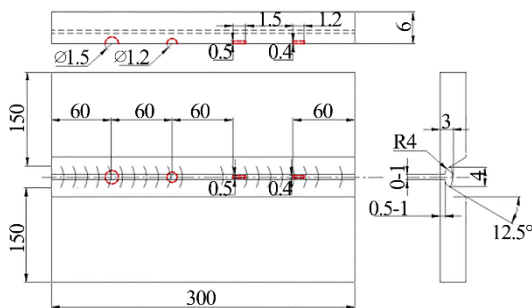


图 18 部分模拟试块缺陷设计图例

Fig. 18 Design schematic of defects in partial simulated blocks

所有试块均有测量管理体系ISO10012(AAA)认证、ISO9001:2015国际质量管理体系认证与CNAS认可,并按照JB/T8428—2015进行出厂检测。

2.3 灵敏度阈值工艺

根据射线检测标准与现场不同壁厚数量统计,壁厚分布在4.5~25mm区间的焊缝占比很大。在该

壁厚范围内,最小单个超标缺陷大小为直径1.5mm。考虑20%的安全阈值,以底部直径为1.2mm的圆形缺陷的信号响应作为第二条阈值线,其值为260。电磁检测能力最小缺陷为0.4mm,以底部直径为0.4mm的圆形缺陷的信号响应作为第一条阈值线,其值为156。对比试块1设置有上述两个缺陷,以对比试块1的缺陷信号响应设置阈值线,如图19所示。

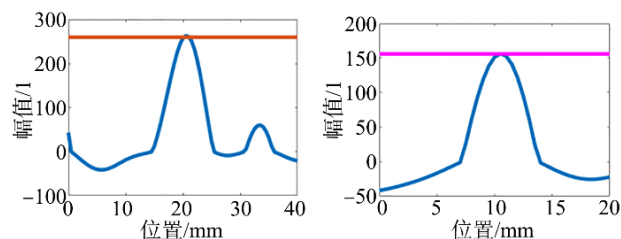


图 19 对比试块1中1.2mm和0.4mm缺陷阈值信号

Fig. 19 Threshold signals for 1.2 mm and 0.4 mm defects in reference block 1

3 试验结果与讨论

3.1 单个缺陷信号特征

根据实施方案中的研究内容,确定单个超标圆形与条形缺陷的信号特点,并能够检出全部单个超标圆形与条形缺陷。圆形与条形缺陷尺寸与分布多样,因此设计了5个模拟试块,包含长径为1.2~2.1mm的处于焊缝不同厚度位置的圆形与条形缺陷。检测结果如图20、图21所示,可以看出,在同一焊道的相同位置,长径相同的条形缺陷响应大于圆形缺陷。相对于底部缺陷,表面缺陷响应要远远超过阈值线。填充1道焊由于剖面中心线两侧不均匀的原因,信号响应较小,但是可以全部检出。

3.2 检测深度

在焊接过程中,单道焊接厚度会超过3mm,达

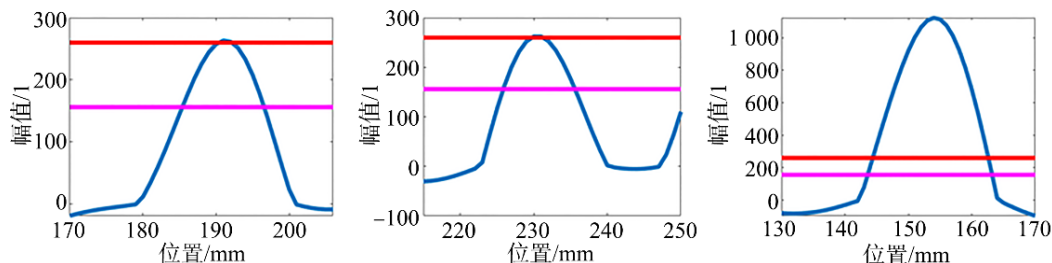


图 20 不同位置圆形缺陷信号(从左到右依次是焊缝底部、中间、表面)

Fig. 20 Circular defect signals at different locations (from left to right: weld bottom, middle, surface)

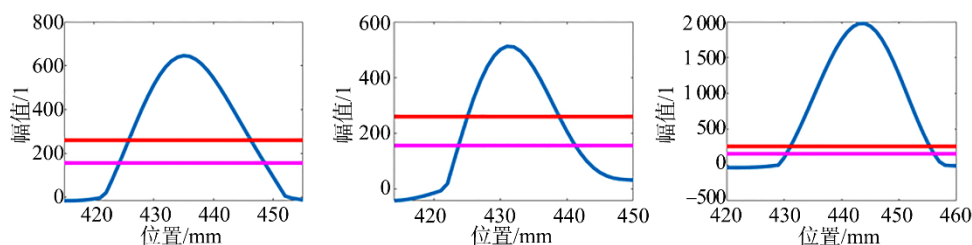


图 21 不同位置条形缺陷信号(从左到右依次是焊缝底部、中间、表面)

Fig. 21 Linear defect signals at different locations (from left to right: weld bottom, middle, surface)

到 4 mm。厚度增大会对检测产生一定的影响。设计了一块焊接厚度为 4 mm 的焊模拟试块,检测结果如图 22 所示,可以看出,埋深增大会减小信号响应,但是对于长径 1.2 mm 的圆形缺陷仍能够检出。

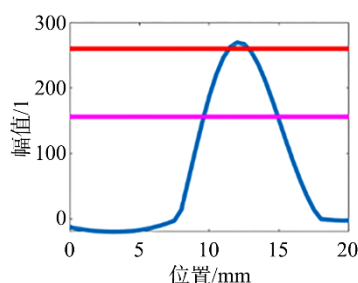


图 22 埋深 4 mm 时缺陷检测信号

Fig. 22 Defect detection signals at 4 mm burial depth

3.3 未超标缺陷检测

设置直径为 0.8 mm 的圆形缺陷,位于填充 1 焊道底部。通过检测信号(见图 23)可以看出,其阈值信号应超过第一条阈值线,未超过第二条阈值线。由于焊缝表面质量原因,在检测信号虽有响应,但是其阈值信号并未超过第一条阈值线。

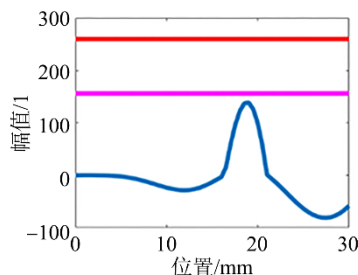


图 23 未超标缺陷检测信号

Fig. 23 Detection signals of sub-threshold defects

3.4 裂纹检测的 Bz 特征信号

根据电磁检测中对裂纹等面积型缺陷和圆形气孔等体积型缺陷的理论分析,面积型缺陷由于两端电流扰动曲率远远大于体积型缺陷,因此会导致 Bz 信号产生更大的畸变。因此,考虑利用 Bz 信号

阈值对裂纹等面积型缺陷进行检测。

根据项目调研情况及相关经验反馈,最小检测裂纹长度为 2.0 mm。考虑 20% 的安全阈值,设置裂纹长度为 1.6 mm。图 24、图 25 为 1.6 mm 与 2.0 mm 长裂纹与各对应壁厚下最小超标圆形缺陷的 Bz 特征信号的梯度值的对比。通过对比可知,1.6 mm 裂纹长裂纹的梯度阈值大于直径为 4.0 mm 的圆形缺陷,不会导致较多的误报。

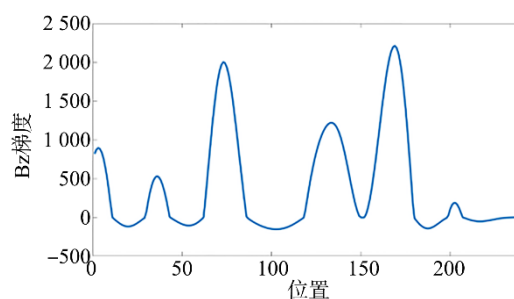


图 24 裂纹 Bz 检测信号梯度(1.6 mm 和 2.0 mm)

Fig. 24 Gradient of crack Bz detection signals (1.6 mm and 2.0 mm)

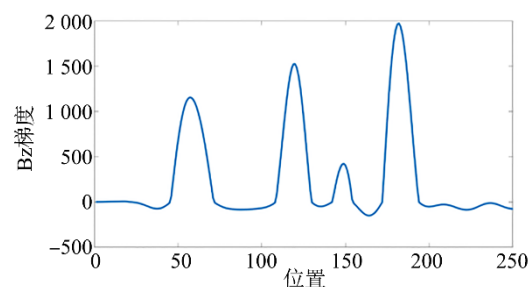


图 25 圆形缺陷 Bz 检测信号梯度(直径为 2.5 mm、3.0 mm、4.0 mm)

Fig. 25 Gradient of circular defect Bz detection signals (diameter: 2.5 mm, 3.0 mm, 4.0 mm)

3.5 试验结果统计

根据对试验结果的统计和信号分析,统计结果如表 2 所示,超标缺陷个数为 81 个,超阈值线报警数为 105 个。其中,超标缺陷均超阈值线,漏检率为 0%,其余 24 个均为非相关显示。

表2 试验结果统计

Table 2 Test results statistics

试块编号	焊道	射线描述缺陷	电磁检出统计
ACFM-1	打底	圆形缺陷, $\varnothing 1.5$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 1.2$, II级 条形缺陷, L1.5, IV级; 条形缺陷, L1.2, IV级	4个缺陷
ACFM-2	填充1	圆形缺陷, $\varnothing 1.5$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 1.2$, II级 条形缺陷, L1.5, IV级; 条形缺陷, L1.1, IV级	4个缺陷
ACFM-3	填充2	圆形缺陷, $\varnothing 1.5$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 1.2$, II级 条形缺陷, L1.2, IV级; 条形缺陷, L1.2, IV级	4个缺陷
ACFM-4	打底	圆形缺陷, $\varnothing 1.5$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 1.2$, II级 圆形缺陷, $\varnothing 2$, II级; 条形缺陷, L1.2, IV级 条形缺陷, L1.5, IV级; 条形缺陷, L2, IV级	6个缺陷
ACFM-5	填充1	圆形缺陷, $\varnothing 1.2$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 1.5$, II级 圆形缺陷, $\varnothing 2$, II级; 条形缺陷, L1.2, IV级 条形缺陷, L1.5, IV级; 条形缺陷, L2, IV级	6个缺陷, 4个非相关显示
ACFM-8	打底	圆形缺陷, $\varnothing 0.4$, I级; 圆形缺陷, $\varnothing 0.4$, I级 圆形缺陷, $\varnothing 0.4$, I级; 圆形缺陷, $\varnothing 0.4$, I级 条形缺陷, L1.2, IV级; 条形缺陷, L2, IV级	2个缺陷, 1个非相关显示
ACFM-9	填充1	圆形缺陷, $\varnothing 0.4$, I级; 圆形缺陷, $\varnothing 0.4$, I级 圆形缺陷, $\varnothing 0.4$, I级; 圆形缺陷, $\varnothing 0.4$, I级 条形缺陷, L1.2, IV级; 条形缺陷, L2, IV级	2个缺陷, 3个非相关显示
ACFM-10	填充1	条形缺陷(横), L1, IV级; 条形缺陷(横), L2, IV级 条形缺陷(横), L3, IV级; 条形缺陷(纵), L1, IV级 条形缺陷(纵), L2, IV级; 条形缺陷(纵), L3, IV级	6个缺陷, 2个非相关显示
ACFM-11	打底	条形缺陷, L1.2, IV级; 条形缺陷, L1.5, IV级 条形缺陷, L2.0, IV级; 条形缺陷, L3.0, IV级	4个缺陷, 1个非相关显示
ACFM-12	填充2	条形缺陷, L1.2, IV级; 条形缺陷, L1.5, IV级 条形缺陷, L1.2, IV级; 条形缺陷, L1.5, IV级	4个缺陷, 1个非相关显示
ACFM-13	打底	条状缺陷, L1.2, IV级; 条状缺陷, L1.5, IV级 圆形缺陷, $\varnothing 1.5$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 1.2$, II级	4个缺陷
ACFM-14	打底	圆形缺陷, $\varnothing 1.5$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 1.2$, II级 条状缺陷, L1.5, IV级; 条状缺陷, L1.2, IV级	4个缺陷, 1个非相关显示
ACFM-18	填充1	圆形缺陷, $\varnothing 1.8$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 1.5$, II级 圆形缺陷, $\varnothing 1.2$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 0.8$, I级	3个缺陷, 2个非相关显示
ACFM-19	填充1	条状缺陷, L1.8, IV级; 条状缺陷, L1.5, IV级 条状缺陷, L1.2, IV级; 条状缺陷, L0.9, IV级	3个缺陷, 1个非相关显示
ACFM-20	填充1	条形缺陷, L1, IV级; 条形缺陷, L2, IV级 条形缺陷, L3, IV级; 条形缺陷, L2, IV级	3个缺陷, 2个非相关显示
ACFM-21	填充1	圆形缺陷, $\varnothing 1.8$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 1.5$, II级 圆形缺陷, $\varnothing 1.2$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 0.8$, I级	3个缺陷, 2个非相关显示
ACFM-22	填充1	条形缺陷, L1.8, IV级; 条形缺陷, L1.5, IV级 条形缺陷, L1.2, IV级; 条形缺陷, L0.9, IV级 条形缺陷, L1.6, II级; 条形缺陷, L2.0, II级	3个缺陷, 2个非相关显示
不锈钢焊缝试块3	打底	条形缺陷, L0.1, II级; 条形缺陷, L0.1, II级 条形缺陷, L1.6, II级; 条形缺陷, L2.0, II级 条形缺陷, L1.6, II级; 条形缺陷, L2.0, II级	6个缺陷
不锈钢焊缝试块4	打底	圆形缺陷, $\varnothing 3$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 4$, II级 圆形缺陷, $\varnothing 2$, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 1.5$, II级	6个缺陷
不锈钢焊缝试块5	打底	条形缺陷, L5, II级; 条形缺陷, L8, II级 条形缺陷, L10, II级; 圆形缺陷, $\varnothing 2.5$, II级	4个缺陷, 2个非相关显示

通过信号分析和焊缝表面状态观察,非相关显示均为表面状态影响而造成的,包括表面起伏和表面粗糙度过大。比如模拟试块 ACFM-5,该试块包含长径为 1.2 mm、1.5 mm 与 2.0 mm 的圆形与条形缺陷,六个缺陷均能检出。但是由于表面质量的影响,存在两个误报信号,误报信号由于表面存在焊瘤与焊缝表面高度变化,如图 26 所示。又比如模拟试块 ACFM-11,其包含 1.2 mm×0.5 mm×0.5 mm、1.5 mm×1.0 mm×1.0 mm 的未熔合缺陷与 2.0 mm×0.1 mm×0.5 mm、3.0 mm×0.1 mm×0.5 mm 的平行裂纹缺陷,均位于打底焊缝底部,四个缺陷均能检出。但是存在两个误报信号,由图 27 可以看出,误报信号由于表面粗糙度大、表面高度变化造成的。

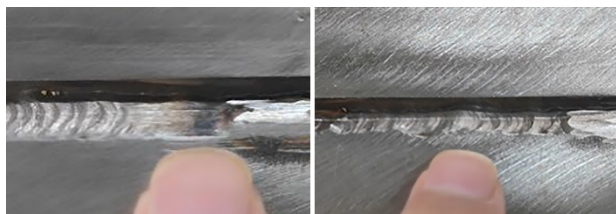


图 26 焊缝表面起伏

Fig. 26 Weld Surface Undulation



图 27 焊缝表面粗糙度过大

Fig. 27 Excessive weld surface roughness

4 结论与展望

针对核工程中某些重要焊缝结构无法进行常规射线检测的工况,本文对分层焊缝及缺陷进行了模拟仿真,并开发了高灵敏度窄底探头和检测工艺,并对各类试块进行了检测,主要结论如下:

(1)检测探头的宽度根据焊缝结构宽度进行设置,一次性扫查即可覆盖焊缝区域,满足实际检测需求;探头在频率为 1 kHz 时,特征信号响应达到最大。

(2)ACFM 对不同位置的裂纹、未熔合、未焊透、咬边、圆形与条形缺陷都具有较好的检测能力,

特征信号的畸变量随着缺陷尺寸的增加而增大。

(3)基于射线检测标准,ACFM 技术能实现对本试验所设置的超标缺陷的 100% 检出,无漏检。

(4)对于分层焊道表面起伏或表面粗糙度过大的情况,ACFM 检测会造成误报,但可通过检查焊道表面状态进行确认和排除。

基于 ACFM 技术的层间检测研究,拓展了不锈钢焊缝检测的赛道宽度,探索了焊缝层间检测的新方法,也为特殊焊缝结构和厚壁不锈钢焊缝进行内部缺陷检测提供了新思路。

参考文献:

- [1] 黄清辉,项杰波,朱从斌,等. 核电站管道射线检测非典型影像的评判与处理[J]. 无损检测,2025,47(3): 88-93.
HUANG Q H, XIANG J B, ZHU C B, et al. Evaluation and treatment of atypical defects in radio-graphic inspection of nuclear power plant pipelines [J]. Nondestructive Testing, 2025, 47(3): 88-93.
- [2] 陈树,闫国华,李玮,等. 核电站小径薄壁管的超声检测方法[J]. 无损检测,2024,46(1): 68-76.
CHEN S, YAN G H, LI W, et al. Ultrasonic detection method of small thin-walled tube in nuclear power plant [J]. Nondestructive Testing, 2024, 46(1): 68-76.
- [3] 孙庆音. 核电厂不锈钢 BOSS 焊缝中裂纹液体渗透检验研究[J]. 防爆电机,2024,59(4): 68-72.
SUN Q Y. Liquid Penetration Experiment Research on Crack in Stainless Steel BOSS Welding Seam of Nuclear Power Plant [J]. Explosion-proof Electric Machine, 2024, 59(4): 68-72.
- [4] 李邱达,胡恩义,夏炜铭,等. 脉冲涡流检测中核电运行机组电磁干扰研究[J]. 核科学与工程,2024,44(2): 341-349.
LI Q D, HU E Y, XIA W M, et al. Study on Electromagnetic Interference of the Pulsed Eddy Current Test for Operating Nuclear Power Plants [J]. Nuclear Science and Engineering, 2024, 44(2): 341-349.
- [5] 郭玉炳. 高温磁粉检测在核电站中的应用[J]. 无损检测,2021,43(9): 77-84.
GUO Y B. Application of high-temperature magnetic particle testing in nuclear power plant [J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(9): 77-84.
- [6] Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands, Section IV, Welding [S]. RCC-M, 2007.63(1): 279-285.