

核电厂反应堆水池覆面焊缝的阵列涡流检测

李庆顺¹, 龙 笛², 何 艺¹, 杨宏博¹, 邓江勇²

(1. 中广核检测技术有限公司, 苏州 215000; 2. 广西防城港核电有限公司, 防城港 538000)

摘 要: 核电厂反应堆水池普遍采用不锈钢覆面结构, 在建造和运行期间均发生过泄漏现象。从覆面结构特点出发, 开展了覆面焊缝的阵列涡流检测试验, 主要探讨平面对接焊缝中人工刻槽和孔型缺陷的可检出性。结果验证了阵列涡流用于反应堆水池焊缝缺陷检测的可行性。通过对某电厂在役检测期间的反应堆水池焊缝进行阵列涡流检测, 总结了其特点及存在的问题, 可为核电厂在役期间水池查漏提供参考建议。

关键词: 反应堆水池; 焊缝; 无损检测; 阵列涡流

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6656(2023)03-0018-04

Array eddy current inspection for reactor pool cladding weld in nuclear power plants

LI Qingshun¹, LONG Di², HE Yi¹, YANG Hongbo¹, DENG Jiangyong²

(1. CGN Inspection Technology Co., Ltd., Suzhou 215000, China;

2. Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538000, China)

Abstract: The reactor pool of nuclear power plants generally adopts stainless steel cladding structure, leakage occurred during construction and operation. Based on the characteristics of cladding structures, experimental investigation of the array eddy current inspection of cladding weld was carried out. The detectability of manual groove and hole defects in plane butt weld was mainly investigated. The results verify the feasibility of using array eddy current to detect weld defects in reactor pool. Through the array eddy current inspection of the reactor pool weld during the in-service inspection of a power plant, its characteristics and some problems encountered are summarized, which can provide reference suggestions for the leak detection of the pool during the in-service inspection of nuclear power plant.

Key words: reactor pool; weld; nondestructive testing; array eddy current

在民用核电厂运行期间, 具有高放射性的燃料及乏燃料组件更换, 倒料, 临时存储等相关操作一般需要在特定的水屏蔽环境下完成^[1]。承载用于屏蔽射线及冷却组件的水介质的结构按功能分类, 主要有反应堆厂房的堆腔换料水池, 燃料厂房的燃料转运仓, 乏燃料水池, 容器准备井, 容器装载井(其覆面结构相似, 下文统称为“反应堆水池”)。目前国内已有多个核电厂反应堆水池检漏管出现滴漏现象^[2], 这表明水池覆面或焊缝处出现了缺陷, 如何快速找

到缺陷并消除, 降低放射性液体污染扩散的风险是核电厂亟待解决的问题。

反应堆水池均采用钢筋混凝土加不锈钢薄壁钢板拼焊形成的覆面结构。由于反应堆水池功能的特殊性和覆面完整性的重要性, 水池覆面在制造验收阶段及在役期间须进行有效的无损检测, 来确保水池的泄漏率在可控范围内。针对水池泄漏漏点位置的确认, 当前采用的方法主要有充排水法、外观目视检验、真空发泡法、渗透检测、氦质谱检漏、交变电磁场测量法, 上述每种方法都存在一定的局限。

涡流检测因操作简单、无需耦合而广泛应用于金属表面和近表面检测中, 研究了阵列涡流技术在反应堆水池覆面焊缝检测中的可行性。

收稿日期: 2022-07-15

作者简介: 李庆顺(1987—), 男, 工程师, 主要从事核电厂在役无损检测新技术、新工艺方面的研究工作

通信作者: 李庆顺, citecxli@163.com

1 反应堆水池覆面及焊缝结构

反应堆水池由钢筋混凝土结构与不锈钢覆面钢板焊接而成,其结构如图 1 所示^[3]。这种覆面钢板使用超低碳不锈钢焊接而成,钢板厚度为 3~6 mm,例如乏燃料水池底覆面板厚为 6 mm,池壁覆面板厚为 4 mm,其他水池覆面板厚为 3 mm。

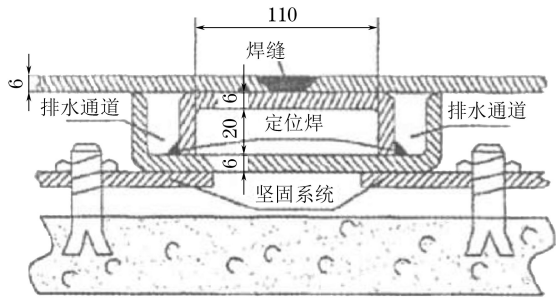


图 1 反应堆水池不锈钢覆面安装结构示意图

水池覆面的焊缝以对接焊缝为主,角焊缝及搭接焊缝为辅,焊接方式主要有平焊和立焊,焊缝形态各异,有横焊缝、竖焊缝、圆形焊缝、矩形焊缝等,长度短至几十毫米,长则数米不等。水池泄漏的位置主要为焊缝及热影响区域,也会出现在覆面本体及支撑预埋件区域。反应堆存水的泄漏对核燃料的冷却效果造成一定影响。针对容易产生缺陷的焊缝及热影响区,笔者在现场开展了阵列涡流试验。

2 阵列涡流基本原理

涡流阵列技术与传统的涡流检测技术相比,主要不同点在于涡流阵列的探头是由多个独立工作的线圈构成的(见图 2)。其探头尺寸较大,且外形可根据实际被检测对象的形面进行设计,因而具有克服和消除提离效应的优势。同时涡流阵列能给出大量有关焊接接头质量的数据,提高对微小缺陷的分辨率。

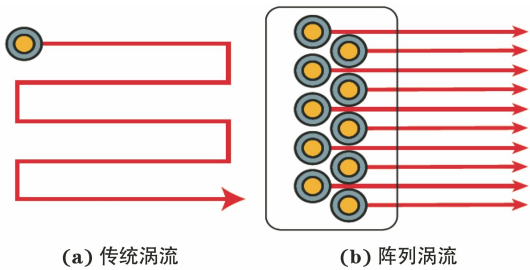


图 2 传统涡流和涡流阵列探头结构对比

阵列涡流探头的线圈按照特殊的方式排布,在工作时,激励线圈与检测线圈形成两种方向相

互垂直的电磁场(扫描原理见图 3),检测线圈逐个激发以消除互感的影响,可实现大面积范围的高速检测,且能够达到与单个线圈相同的测量精度和分辨率。

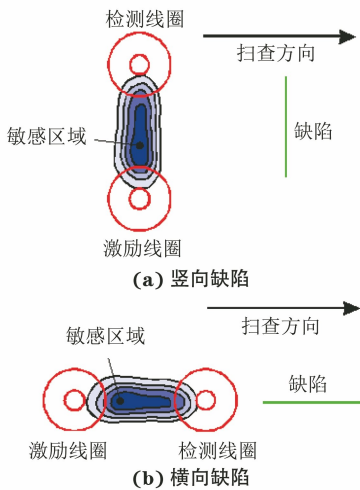


图 3 阵列涡流扫描原理示意图

3 试验制备

3.1 试验设备

试验选用某公司生产的阵列涡流检测系统,其由主机和柔性阵列探头组成(见图 4)。柔性阵列探头具有 32 个线圈,这些线圈分为两排,每排 16 个,相互错开。一侧安装有滚轮式编码器,探头在对焊缝进行扫查时,可以根据编码器的计数来进行显示信号的定位。涡流仪为手持便携式涡流仪,支持 C 扫描和三维立体成像技术。

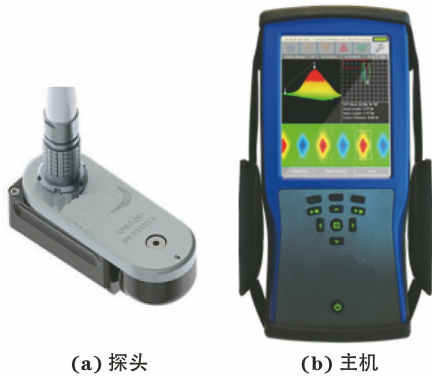


图 4 阵列涡流检测系统

3.2 检测频率

试验针对的是表面开口的贯穿性缺陷,为达到尽可能高的缺陷检测灵敏度,应设置较高的检测频率。受涡流检测的“集肤效应”影响,频率越高,焊缝的表面状态对缺陷信号的识别影响就越大。为了同时兼顾高灵敏度和高信噪比,测试了不同的检测频

率,最终确定频率为 150 kHz,该频率对于缺陷的检出有较好的表现。

3.3 试件对比试验

试件材料和焊接方式与现场水池覆面的材料和焊接方式一致,试件焊缝中的缺陷是具有代表性的贯穿性人工缺陷(电火花加工刻槽和机械加工通孔)。通孔用以模拟腐蚀坑、气孔等圆形缺陷,刻槽用以模拟裂纹。A 型试件焊缝表面外观如图 5 所示,从左向右依次为通孔和不同方向的刻槽,人工缺陷具体参数如表 1 所示。

表 1 A 型试件缺陷参数 mm

项目	缺陷编号					
	1	2	3	4	5	6
类型	通孔	通孔	通孔	纵向刻槽	横向刻槽	45°刻槽
尺寸	1×3(直径×长度)			5×0.2×3(长×宽×高)		



图 5 A 型试件焊缝表面外观

A 型试件阵列涡流检测信号如图 6 所示。C 扫描信号图使用融合通道进行显示,可以看出,通孔和不同方向的刻槽均可以被识别,且刻槽相对于通孔具有很高的辨识度。

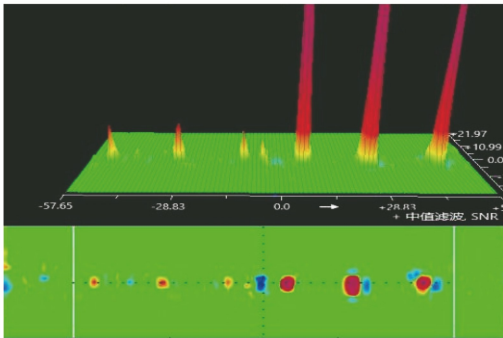


图 6 A 型试件阵列涡流检测信号

因为涡流方法仅适用于表面和近表面缺陷检测,所以焊缝表面粗糙度和近表面焊缝的微观结构形态是阵列涡流检测时不可忽视的影响因素。反应堆水池焊缝结构和焊接方式有多种,现场完工后的焊缝表面状态也呈现一定的差异。为了进一步验证不同焊缝状态对缺陷检出的影响,笔者另外选取了焊缝表面粗糙度不一的 B(细波纹)、C(粗波纹)、D(去余高)3 种试件,3 块试件的缺陷分布如图 7 所示,缺陷参数如表 2 所示,试件检测结果如图 8~10 所示。

1	2	3	4	5	6	7
°	°	—	/		°	°

图 7 B,C,D 试件缺陷分布示意

表 2 B,C,D 试件的缺陷参数 mm

项目	缺陷编号						
	1	2	3	4	5	6	7
类型	通孔	通孔	纵向刻槽	45°刻槽	横向刻槽	通孔	通孔
尺寸	1×3(直径×长度)		3×0.15×3(长×宽×高)			0.5×3(直径×长度)	

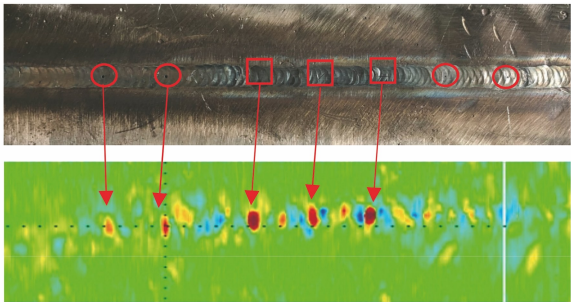


图 8 B 型试件外观及阵列涡流检测结果

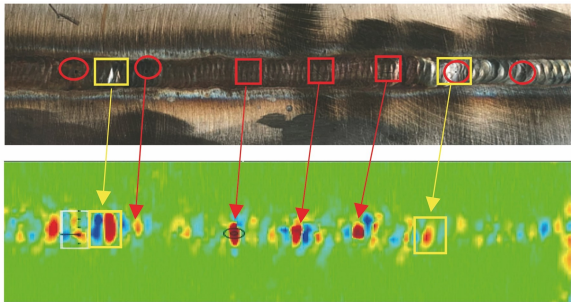


图 9 C 型试件外观及阵列涡流检测结果

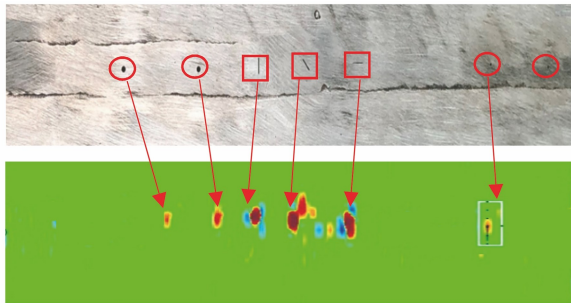


图 10 D 型试件外观及阵列涡流检测结果

3 种试件的检测结果分析如下所述。

- (1) 3 种试件上的各方向刻槽均可被检出。
- (2) B 型试件两个 ϕ 1 mm 通孔均可以被检出,但两个 ϕ 0.5 mm 通孔识别困难。
- (3) C 型试件两个 ϕ 1 mm 通孔中的一个可以被检出,另外一个识别困难;两个 ϕ 0.5 mm 通孔均

无法识别;焊缝表面凹坑(标记黄色信号部分)信号幅值水平较高。

(4) 打磨焊缝余高后的 D 型试件中,两个 ϕ 1 mm 通孔能被检出, ϕ 0.5 mm 通孔只可识别一个。

3 块试件的扫查结果表明:① 阵列涡流对焊缝中的刻槽有较高的检测灵敏度;② 通孔的检出性受焊缝表面状态的影响较大;③ 粗糙度较大焊缝的涡流信号本底噪声较大,部分噪声的形态与缺陷形态类似,影响缺陷信号的识别。

4 缺陷判别

4.1 噪声抑制

合适的滤波可以消除较小的“背景杂波”,使缺陷显示更加明显。滤波方法有均值滤波、高斯滤波、中值滤波和双边滤波,其中,中值滤波使用较多,在进行滤波设置时,其值不宜过大,过大的滤波会“滤掉”较多的有效信息,存在漏检的可能。

4.2 通道选择

不同类型通道的阵列涡流信号三维图和 C 扫描图显示有所不同,横向通道中横向缺陷显示明显,轴向通道中纵向缺陷显示明显,而融合通道可较好对上述两种方向的缺陷进行叠加显示。在进行信号分析时应首先在融合通道下对信号进行初步识别,然后对重点关注的信号在横向和轴向通道下作进一步判定。

4.3 特定形态

焊缝的阵列涡流信号中部分结构信号形态较为明显,如焊瘤信号在三位图上呈现为上下对称的形态。通过特定形态信号的甄别可排除一些非缺陷信号,减少误判。

虽然可通过上述方法对缺陷信号进行一定程度的判别,但焊缝阵列涡流技术对检验人员的经验依然有较高的要求。

5 应用案例

某核电厂机组反应堆水池检漏管有水滴出,滴速约为 1 L/h,水样的化学检测表明其为一回路水,即反应堆水池内衬存在少量泄漏。电厂对反应堆水池底部的 43 道底板焊缝及 26 道侧板的 1.5 m(长度)以下不锈钢覆面所有焊缝实施渗透检测和目视检测,未见异常。

为了加强对反应堆水池的监测,电厂在后续的某次大修中对部分焊缝实施了阵列涡流检测。由于大修工期和其他先决条件限制,仅挑选了部分对接

焊缝进行检测,典型的阵列涡流检测信号如图 11 所示,可见,多数焊缝检测信号本底噪声较小,个别焊缝噪声水平略高。此次反应堆水池的部分焊缝阵列涡流检测显示均未达到可记录标准。

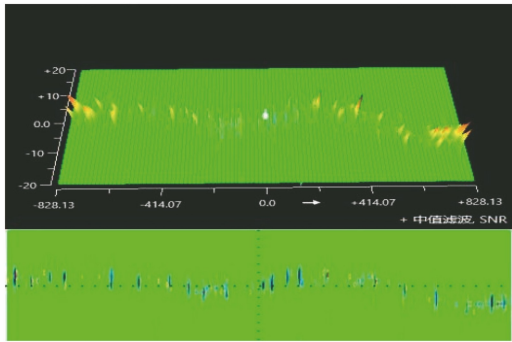


图 11 典型水池焊缝阵列涡流信号

6 存在的问题

(1) 焊缝本底噪声的影响。反应堆水池覆面焊缝粗糙度不一,粗糙度较大的焊缝涡流本底噪声较大,影响缺陷信号识别。粗糙度较大的焊缝表面相当于多个微小的缺陷,如使用滤波降低本底噪声的干扰,势必影响细小缺陷检出。华中科技团队对焊缝表面纹理产生的噪声进行研究得出,当纹理深度与缺陷深度比超过 0.5 时,检测信号的信噪比较低,甚至无法实施涡流检测^[4]。强噪声背景下缺陷信号的增强方法有待进一步研究。

(2) 焊缝结构、形态差异较大。反应堆水池焊缝分布在底面和侧面,焊缝长度和形态均有较大差异,一种探头无法适用所有类型焊缝的检测,一些特定的局部位置(楼梯、格架附近等)还可能存在检测盲区。因此若要实现水池覆面焊缝的全覆盖检测,还需要从探头尺寸、激励频率、结构上进行改善,设计多种探头以克服该缺点,防止漏检。

(3) 检测自动化需求。使用柔性阵列探头进行涡流检测时,扫查方式一般为手动扫查。由于不同位置的反应堆水池焊缝高度差异较大,焊缝长度也各有不同,在检测长焊缝时手动扫查效率较低,人员容易疲劳且高处焊缝受在役环境限制难以直接检测,同时还需考虑在役环境下反应堆水池环境剂量率较高的问题。针对上述问题,自动检测装置的开发尤为必要。

7 结语

对某电厂反应堆水池覆面焊缝进行阵列涡流检

(下转第 44 页)

冲击回波法结合 AI 在套筒灌浆检测中的应用

吴波涛^{1,2}, 于洪江^{2,3}, 杨经纬⁴, 张远军¹, 刘荣芳¹

(1. 四川升拓检测技术股份有限公司, 自贡 643000;

2. 装配式建筑重庆市高等职业技术学院应用技术推广中心, 重庆 400072;

3. 重庆建筑工程职业学院, 重庆 400072;

4. 重庆中建海龙两江建筑科技有限公司, 重庆 404100)

摘要: 为研究冲击回波法在套筒灌浆质量检测中的可行性和适用性, 对冲击回波法进行理论分析和试验研究。结果表明冲击回波法能较好地应用于套筒灌浆密实度的检测。通过实际工程进行验证, 进一步证明了冲击回波法在套筒灌浆检测中具有良好的应用前景。在试验和实际工程中发现, 套筒直径、埋深和边界等易对检测结果造成影响, 提出采用人工智能(AI)的辅助检测方法来优化上述影响, 提高了缺陷检出率。

关键词: 装配式建筑; 冲击回波法; 套筒灌浆; 人工智能

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-6656(2023)03-0039-06

Application of impact echo method combined with AI in sleeve grouting detection

WU Botao^{1,2}, YU Hongjiang^{2,3}, YANG Jingwei⁴, ZHANG Yuanjun¹, LIU Rongfang¹

(1. Sichuan Central Inspection Technology Inc., Zigong 643000, China;

2. Prefabricated Construction Application Technology Extension Center of Chongqing Higher Vocational and Technical College, Chongqing 400072, China; 3. Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China;

4. Chongqing China State Hailong Liangjiang Construction Technology Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

Abstract: In order to study the feasibility and applicability of the impact echo method in the quality inspection of sleeve grouting, theoretical analysis and experimental research were carried out on the impact echo method. The results show that the impact echo method can be well applied to the detection of sleeve grouting compactness. Through the verification of the actual project, it is further confirmed that the impact echo method has a good application prospect in the detection of sleeve grouting. It is found in experiments and practical projects that the diameter, buried depth and boundary of the sleeve are easy to affect the detection results. An artificial intelligence (AI) aided detection method is proposed to optimize the above effects to improve the defect detection rate.

Key words: prefabricated building; impact echo method; grouting of sleeve; artificial intelligence

装配式建筑作为建筑工业化的重要产物, 具有良好的节能环保性而应用广泛。其最常用的节点连接方式是套筒连接, 钢筋间的应力是通过套筒内的

灌浆料进行传递的, 而良好的灌浆质量才能保证钢筋连续、可靠地传力, 进而充分发挥结构的抗震性能和抗剪性能。

标准 JGJ 1—2014《装配式结构技术规程》要求钢筋套筒连接灌浆应密实饱满, 且应全数检测。标准 JGJ/T 485—2019《装配式住宅建筑检测技术标准》对检测方法及不同方法的抽检比例作了详细规定。冲击回波检测法具有高效、成熟和无损等优点, 在行业内得到了广泛的关注。为研究冲击回波法在套筒灌浆质量检测中的可行性和适用性, 对冲击回波法进

收稿日期: 2022-06-15
基金项目: 重庆中建海龙 2020 年科技研发课题(2020CQHL002); 重庆市高等职业教育教学改革研究项目(Z213195); 重庆建筑工程职业学院科研项目(JG-KJ-2019-001)
作者简介: 吴波涛(1992—), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事土木工程检测工作
通信作者: 吴波涛, wubt@scentralit.com