

反应堆压力容器下封头内表面缺陷涡流检验技术研究及应用

杨丽军^{1,2}

¹中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉

²中核武汉核电运行技术股份有限公司海南分公司, 海南 昌江

收稿日期: 2026年9月16日; 录用日期: 2026年9月30日; 发布日期: 2026年10月20日

摘 要

反应堆压力容器是核电厂的关键核安全一级设备, 其下封头内表面承受复杂工况环境和外来异物打击, 容易形成凹坑和危害性缺陷。针对反应堆压力容器下封头堆焊层磨损区的缺陷检测难题, 本文研究了一种基于弹性点式平面线圈探头的涡流检验方法。该方法采用弹簧支撑的单点式平面线圈探头设计, 通过弹性机构实现探头与缺陷表面的充分耦合, 有效减少提离效应对检测信号的影响。通过涡流渗透深度与激励频率的理论关系, 优化设计了300 kHz主频涡流检测系统。工程应用表明, 该技术能有效检出某核电站反应堆压力容器下封头内表面缺陷, 为核电站压力容器在役检查提供了可靠的技术手段。

关键词

反应堆压力容器, 下封头, 堆焊层, 涡流检测, 弹性点式探头, 单点式平面线圈, 提离效应

Research and Application of Eddy Current Testing Technology for Defects on the Lower Head Surface of the Reactor Pressure Vessel

Lijun Yang^{1,2}

¹China Nuclear Power Operation Technology Corporation, Ltd., Wuhan Hubei

²Hainan Branch of China Nuclear Power Operation Technology Corporation, Ltd., Changjiang Hainan

Received: September 16, 2026; accepted: September 30, 2026; published: October 20, 2026

Abstract

The reactor pressure vessel is critical nuclear safety Class I equipment in nuclear power plants. Its

文章引用: 杨丽军. 反应堆压力容器下封头内表面缺陷涡流检验技术研究及应用[J]. 核科学与技术, 2026, 14(4): 207-219. DOI: 10.12677/nst.2026.144018

lower head inner surface is subjected to complex operating environments and impacts from foreign objects, making it prone to forming pits and hazardous defects. To address the challenge of defect detection in the surfacing layer of the reactor pressure vessel lower head, this paper investigates an eddy current testing method based on an elastic point-type planar coil probe. The method employs a spring-supported single-point planar coil probe design, which achieves sufficient coupling between the probe and the defective surface through an elastic mechanism, effectively reducing the influence of the lift-off effect on the detection signal. Based on the theoretical relationship between eddy current penetration depth and excitation frequency, an eddy current testing system with a main frequency of 300 kHz was optimally designed. Engineering applications demonstrate that this technology can effectively detect defects on the inner surface of the lower head of a nuclear power plant's reactor pressure vessel, providing a reliable technical means for the in-service inspection of nuclear power plant pressure vessels.

Keywords

Reactor Pressure Vessel, Lower Head, Surfacing Layer, Eddy Current Testing, Elastic Point-Type Probe, Single-Point Planar Coil, Lift-Off Effect

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

反应堆压力容器是核电站反应堆的核心承压设备,属于核安全一级部件。在核电站运行过程中,反应堆压力容器承受着高温、高压和高辐照等综合作用。在安装调试或运行过程中,由于内部部件失效撞击容器内壁,容易形成大小不等的凹陷区域。国内某核电站由于堆内松动部件冲击,在压力容器下封头底部产生马蹄形磨损区。西屋公司曾针对该问题研发了多方法联合检验技术和装置,并对磨损区实施了检验。其涡流检验结果不佳,对磨损区的轮廓及磨损区表面及近表面是否存在危害性缺陷(如腐蚀、裂纹等)没有有效指示和结论。

在承压设备内表面缺陷检测领域,国内外学者围绕涡流与超声两大技术路线开展了研究。孙圣辉等采用涡流阵列对奥氏体不锈钢基材和焊缝进行检测,结果表明该技术可检出基材埋藏深度达 3 mm、焊缝区域埋藏深度达 1 mm 的近表面缺陷,并发现柔性探头在带曲率表面上具有更好的贴合性[1]。滕志勇等研究了阵列涡流对不同深宽比裂纹的响应,证实信号幅值、相位随裂纹深度呈规律性变化,为裂纹定量提供了依据[2]。吕天明等针对反应堆压力容器安全端异种金属焊缝,对比了常规双晶纵波与相控阵技术,指出相控阵在缺陷定量精度和检测效率上均优于双晶纵波[3]。

国内关于压力容器下封头区域的检验案例较少,主要原因是该区域结构复杂、干扰物多、放射性高,检验技术开发难度较大。针对上述问题,本文研究了一种基于弹性点式平面线圈探头的涡流检验技术,实现了探头与缺陷表面的充分耦合,减少提离效应的影响,有效提高了压力容器下封头内表面缺陷检出的灵敏度和可靠性。

2. 检验对象

反应堆压力容器下封头是压力容器的重要组成部分。其内表面通常堆焊有 4~12 mm 厚的不锈钢堆焊层,以避免堆芯高辐照直接作用于压力容器母材造成安全性能降低。当内壁发生挤压磨损形成较深凹坑

时，会造成堆焊层厚度减薄甚至消失。在高温、高压、高辐照的苛刻工况下，暴露的基体材料在应力集中和腐蚀介质的共同作用下容易产生裂纹、腐蚀等危害性缺陷。

某核电站反应堆压力容器底部区域在低合金钢母材上施有两层共 4 mm 不同材料的堆焊层。针对下封头内表面马蹄形磨损区开展涡流检验技术研究。被检对象材料和几何尺寸等参数见表 1。检验区域为底部磨损区及边沿 13 mm 区域，深度方向为磨损区表面及近表面 0~2 mm 区域，见图 1。

Table 1. Materials and geometrical dimensions of the test object
表 1. 被检对象材料和几何尺寸

对象	底封头
母材	SA508 3 级
堆焊层 ^{注①}	AWS type E309L
堆焊层 ^{注②}	AWS type E308L
母材厚度	120 mm
堆焊层厚度	4 mm
内径	3382 mm

注^{①②}：压力容器内表面沿圆周方向堆焊有两层不锈钢堆焊层。

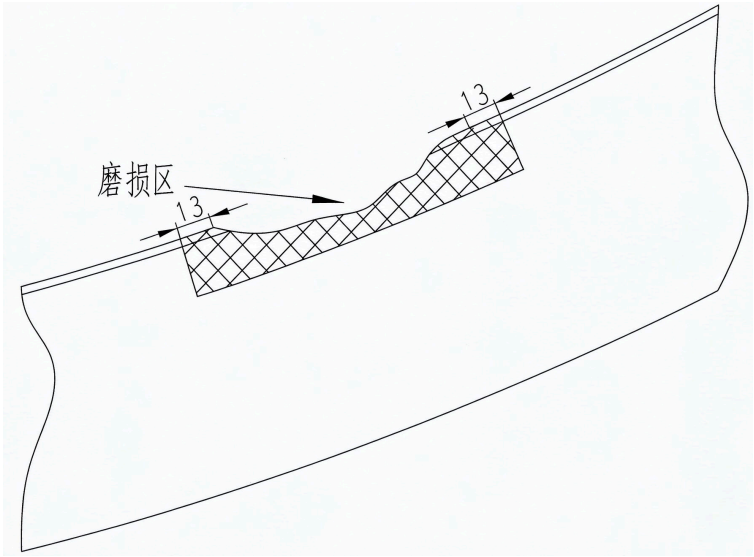


Figure 1. Inspection area
图 1. 检验区域

3. 检验理论

3.1. 涡流检验原理

涡流检验是基于电磁感应原理的无损检测方法。当载有交变电流的线圈靠近导电材料时，会在材料表面和近表面感应出涡流。这些涡流又会产生自己的磁场，与原磁场相互作用，引起线圈阻抗的变化。当材料内部存在缺陷时，会扰动涡流的分布，从而改变线圈阻抗的幅值和相位。

对于空心圆柱形线圈，当其靠近导电平板或管材时，线圈阻抗 Z 可表示为：

$$Z = R + j\omega L$$

其中, R 为线圈电阻(Ω), ω 为激励角频率(rad/s), $\omega = 2\pi f$, L 为线圈电感(H)。当存在缺陷时, 缺陷扰动了涡流场, 导致等效电阻 R 和电感 L 发生变化, 通过测量阻抗平面上信号的幅值和相位变化, 即可实现对缺陷的检测与定量。

涡流检验的核心参数包括渗透深度、检测灵敏度和信噪比, 这些参数与激励频率、探头结构、材料电磁特性密切相关。

3.2. 标准渗透深度

涡流渗透深度(也称标准渗透深度或集肤深度)是表征涡流检验能力的重要参数, 定义为涡流密度衰减至表面值的 $1/e$ (约 37%) 时的深度。标准渗透深度 δ 的计算公式为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

式中: δ 为标准渗透深度(mm), f 为激励频率(Hz), μ 为绝对磁导率(H/m), $\mu = \mu_d \mu_r$, μ_0 为真空磁导率($4\pi \times 10^{-7}$ H/m), μ_r 为相对磁导率, σ 为电导率(S/m), ρ 为电阻率($\Omega \cdot m$)。

3.3. 缺陷信号特征

缺陷引起的涡流信号变化与以下因素相关:

- (1) 缺陷深度: 深度越大, 涡流扰动区域越大, 信号幅值越高;
- (2) 缺陷宽度: 宽度越大, 涡流路径扰动越明显;
- (3) 缺陷取向: 与涡流方向平行的裂纹引起的涡流扰动大于垂直裂纹;
- (4) 缺陷类型: 裂纹类缺陷的信号相位与腐蚀类缺陷有显著差异。

4. 研究内容

4.1. 研究思路

涡流检验对表面以及近表面裂纹性显示有很高的检验灵敏度。磨损区相对整个压力容器底部很小, 可近似看作平面。本文所述涡流检验技术是一种基于平面的平板涡流检验技术。当被检材料及尺寸一旦确定后, 则其电导率、磁导率即相应确定。当检测线圈确定后, 则工作频率、提离效应、数字化率即成为了涡流检验的关键技术参数。

本研究主要包括检验系统设计、试块设计、探头设计、频率设计等, 同时对涡流数据采集的数字化率和提离效应影响进行了分析和研究, 最终确定检验方案。

(1) 通过理论分析和国内外相关涡流检验经验, 选用合适的设备, 针对被检对象设计涡流探头和试块, 选定试验参数并通过试验进行优化;

(2) 在反应堆压力容器 1:1 模拟体上, 通过对涡流标定试块进行扫查, 对涡流系统进行标定, 测量信噪比, 分析数据质量;

(3) 对灵敏度试块进行扫查, 通过对模拟裂纹的人工槽和模拟孔状缺陷的平底孔进行检验, 生成缺陷 C 扫或李沙育信号图, 根据分析结果与实际缺陷的对比, 验证对裂纹和孔状缺陷的检验灵敏度;

(4) 对模拟磨损区底部加工有 EDM 槽的模拟试件进行扫查, 验证涡流方法对磨损区裂纹的检出能力, 分析涡流方法的可行性。

4.2. 技术指标

涡流检验系统应满足以下技术指标:

- (1) 能检测出模拟试块上的人工缺陷；
- (2) 能检测出直径 0.5 mm、深度 2 mm 的孔；
- (3) 能检测出长 6 mm，宽 0.1 mm，深 0.5 mm 的人工槽；
- (4) 信噪比 S/N 大于等于 5。

4.3. 检测系统设计

检验时所用的机械扫查装置、涡流仪、涡流探头、涡流试块等必须备齐并处于良好的工作状态。涡流仪必须在检定或计量的有效期内。检验系统主要由以下部分组成，检验系统连接示意图见图 2。

涡流仪：多频涡流仪，支持 100~400 kHz 频率范围；

探头组件：弹性点式平面线圈探头，含探头本体和连接电缆；

扫查装置：机器人或自动扫查装置，实现探头定位和扫查；

采集工作站：高速数据采集卡，实时采集和存储涡流信号；

分析工作站：涡流信号分析软件，实现缺陷识别和定量。

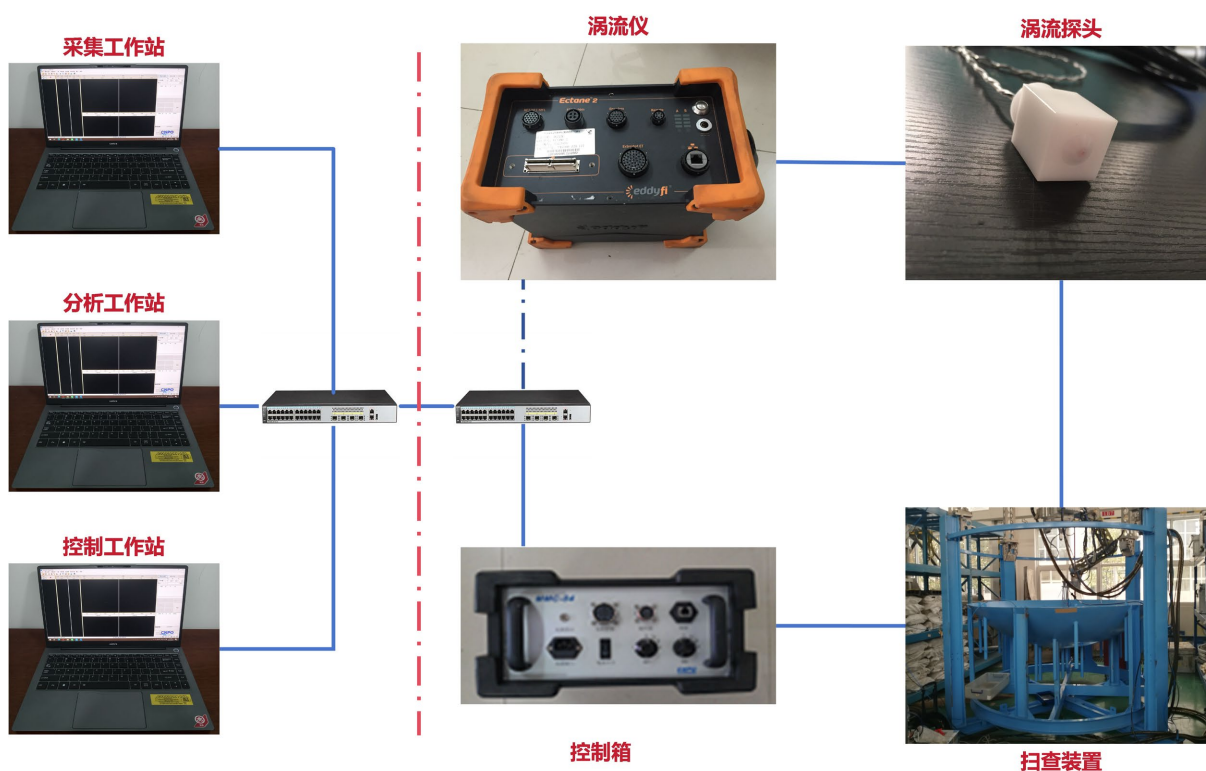


Figure 2. Schematic diagram of eddy current inspection system connection
图 2. 涡流检验系统连接示意图

4.4. 试块设计

针对本研究设计标定试块、灵敏度试块和模拟试件：

标定试块：用于检验开始时对涡流检验系统的标定，以及检验期间对标定结果的校验、对信噪比的测量和对数据质量进行分析；

灵敏度试块：用于验证系统检验能力；

模拟试件：用于验证检验效果。

4.4.1. 标定试块

标定试块应与被检对象的材料、几何尺寸、电磁特性和加工工艺相同，标定试块人工伤尺寸见表 2。

- (1) 标定试块尺寸为 $100 \times 50 \times 10$ mm；
- (2) 人工伤加工在堆焊层一面；
- (3) 材料：
 - i) 母材：A533 Grade B，厚度 6 mm；
 - ii) 焊缝：F9P4-EGN-GNE9016-G；
 - iii) 堆焊层^①：AWS type E309L，厚度 2 mm；
 - iv) 堆焊层^②：AWS type E308L，厚度 2 mm。

Table 2. Artificial defect dimensions of the calibration block
表 2. 标定试块人工伤尺寸

公称尺寸(mm)		形位公差(国标)	实测结果(mm)
槽 A	长：25	± 0.10	25.03
	宽：0.15	± 0.05	0.14
	深：2	± 0.05	2.02
槽 B	长：25	± 0.10	25.04
	宽：0.15	± 0.05	0.16
	深：1	± 0.05	0.98
槽 C	长：25	± 0.10	25.04
	宽：0.15	± 0.05	0.17
	深：0.5	± 0.05	0.53

4.4.2. 灵敏度试块

所用灵敏度试块应与被检对象的材料、几何尺寸、电磁特性和加工工艺相同，灵敏度试块人工伤尺寸见表 3。灵敏度试块的技术要求与标定试块相同，尺寸为 $50 \times 50 \times 10$ mm。

Table 3. Artificial defect dimensions of the sensitivity block
表 3. 灵敏度试块人工伤尺寸

缺陷编号	A	B	备注
缺陷宽度/直径(mm)	$\phi 0.50$	0.10	公差 ± 0.08
缺陷长度(mm)	/	6.00	
缺陷深度(mm)	2.00	0.50	

4.4.3. 模拟试件

模拟试件与被检压力容器下封头的材料、电磁特性和加工工艺相同。在堆焊层侧加工模拟磨损区的宽槽，并在宽槽底部加工模拟裂纹的 EDM 槽，各磨损区及 EDM 槽尺寸见表 4。

Table 4. Dimensions of the test specimen
表 4. 被检试件尺寸

磨损区编号	磨损深度	磨损宽度	EDM 槽加工尺寸	备注
A	2 mm	19 mm	长 12.7 mm	堆焊层厚度 4 mm
B	2 mm	12.7 mm	宽 0.25 mm	
C	4 mm	19 mm	深 2 mm	

4.5. 探头设计

4.5.1. 探头结构设计

针对反应堆压力容器下封头底部磨损区结构特点，设计一种弹性点式平面线圈探头[4]。该探头的特点是在对底部磨损区进行扫查时探头头部处于弹出状态，最大程度接近磨损区表面，提高对磨损区表面缺陷的检出能力。探头由 1 个直径为 3 mm 的点式线圈和弹性机构组成(图 3)。点式线圈对于缓慢变化的缺陷比较敏感，对轴向和周向方向上的缺陷都能检出。为了防止探头卡坏，设计 5 mm 倒角。线圈直径为 3 mm，要求扫查对磨损区覆盖，步进设置不大于线圈直径。

弹性点式探头主要包括以下组件：

- (1) 外壳体：探头外壳，保护内部结构；
- (2) 弹簧组件：提供弹性支撑，实现探头自动贴合；
- (3) 球形接触头：与被检表面直接接触，传递弹簧预紧力；
- (4) 平面线圈：位于球形接触头下方，进行涡流检验；
- (5) 引线组件：连接线圈与检测仪器，传输检测信号。

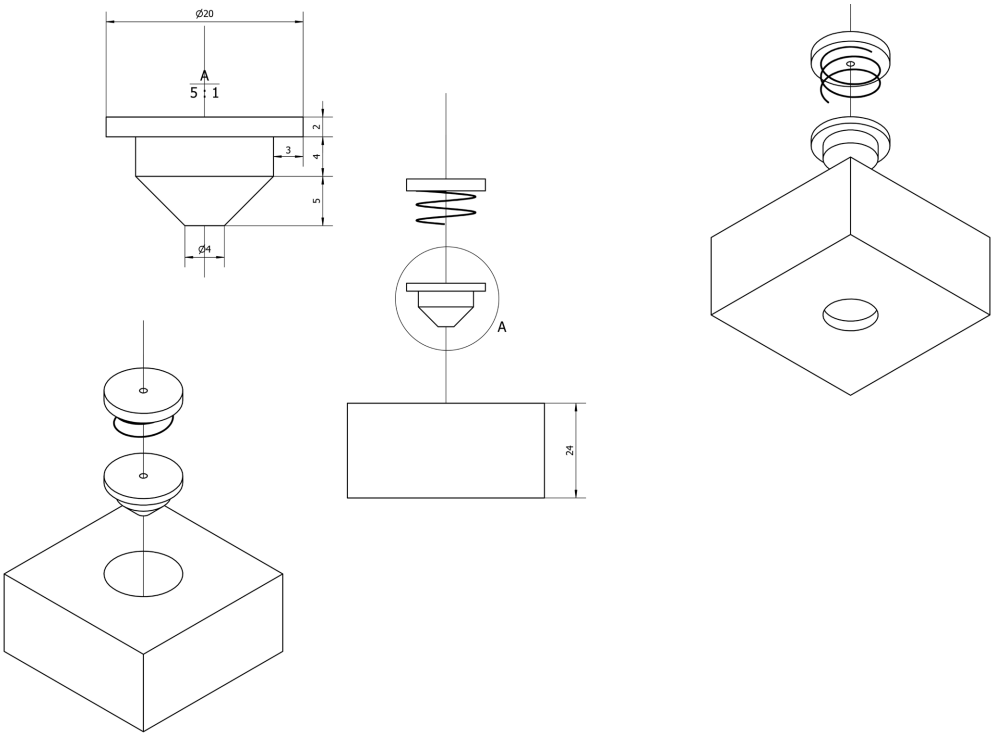


Figure 3. Probe structure diagram
图 3. 探头结构图

4.5.2. 单点式平面线圈探头特点

- 单点式平面线圈探头具有以下显著特点：
- (1) 点式检测：探头与被检表面为点接触，能够精确探测缺陷位置；
 - (2) 高空间分辨率：探头体积小，对细小缺陷具有高分辨率；
 - (3) 弹性支撑：弹簧支撑机构使探头能够自动适应表面轮廓变化；
 - (4) 提离控制：通过预紧力设计，将探头提离控制在稳定范围内；
 - (5) 多方向检测：可实现不同方向的缺陷检测，适用于复杂几何形状。

4.5.3. 探头几何与弹性机构优化

为兼顾缺陷检测灵敏度、空间分辨率与曲面随形能力，对线圈几何尺寸和弹性机构力学参数进行了优化设计，并以有限元仿真结果作为选型依据。

(1) 线圈直径。线圈直径直接决定单次检测的空间分辨率与磁场作用范围：直径过小，线圈电感与灵敏度下降，且对提离变化异常敏感；直径过大，则空间分辨率降低，对 $\varphi 0.5\text{ mm}$ 级小缺陷的响应被平均而减弱。建立线圈 - 工件轴对称有限元模型，工件取 E308L/E309L 堆焊层电磁参数，对直径 2~6 mm 的线圈在 $\varphi 0.5\text{ mm}$ 平底孔和 0.5 mm 深人工槽上的信号进行计算。由仿真结果可见， $\varphi 0.5\text{ mm}$ 平底孔信号在 $D = 3\text{ mm}$ 时达到最大，人工槽信号在 $D = 3\sim 4\text{ mm}$ 范围保持较高水平，而提离敏感度随直径增大单调降低。综合小缺陷灵敏度与提离稳健性，选定线圈直径 $D = 3\text{ mm}$ 。

(2) 弹性机构力学参数。弹性随形机构通过压缩弹簧为探头提供稳定的法向接触力，其刚度需在“接触可靠”与“避免卡死/过大摩擦”之间权衡：刚度过小，预紧力不足，曲面起伏引起的提离波动大；刚度过大，探头在凹坑边缘易被卡住并增大爬行阻力，甚至划伤表面。以预压缩量 5 mm 为约束，对刚度 0.1~0.8 N/mm 时的预紧力和扫查提离波动进行仿真计算。结果表明，刚度 $k = 0.3\text{ N/mm}$ 时预紧力约 1.5 N，提离波动可控制在 0.2 mm 以内且机构不发生卡滞，接触状态稳定。据此选定弹簧刚度 $k = 0.3\text{ N/mm}$ 、预压缩量 5 mm (对应预紧力约 1.5 N)，保证探头在下封头弧形及磨损区表面均能稳定贴合。

4.6. 检验频率

在涡流检验中，在满足检验深度要求的前提下，选择较高的检验频率可以提高检验灵敏度。工程上通常取标准透入深度的 3 倍作为涡流的有效透入深度。检测面为下封头内表面的奥氏体不锈钢堆焊层 (E308L/E309L)，其为非铁磁性材料，相对磁导率 $\mu_r \approx 1.0$ 。采用涡流电导仪对堆焊层试块实测，并结合材料手册，得到主要电磁参数如表 5 所示。

Table 5. Main electromagnetic property parameters of the tested material
表 5. 被检材料主要电磁性能参数

材料	电导率 $\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	相对磁导率 μ_r	电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$
E308L/E309L 堆焊层	1.40×10^6	≈ 1.00	7.14×10^{-7}
304 奥氏体不锈钢(参考)	1.37×10^6	≈ 1.00	7.30×10^{-7}
SA508 低合金钢(参考)	$\approx 3.0 \times 10^6$	≈ 1.00 (退火)	3.33×10^{-7}

依据趋肤效应，涡流标准渗透深度按式 $\delta = 1/\sqrt{(\pi f \mu \sigma)}$ 计算，得到各候选频率下的标准渗透深度及工程上常用的有效渗透深度(取 3δ ，对应涡流密度衰减至约 5%)。

结合检测目标分析：需检出的最深缺陷为深度 2 mm 的平底孔，要求有效渗透深度不小于 2 mm；同时为保证 $\varphi 0.5\text{ mm}$ 小缺陷的灵敏度，宜在满足深度覆盖的前提下选取较高频率。通过对不同激励频率下

的标准渗透深度计算, 400 kHz 时有效渗透深度 $3\delta \approx 2.02 \text{ mm}$, 虽勉强覆盖 2 mm 但裕量不足、信号衰减明显; 100~200 kHz 虽深度裕量大, 但表面小缺陷灵敏度相对偏低; 300 kHz 时 $3\delta \approx 2.34 \text{ mm}$, 可以可靠覆盖 2 mm 深缺陷并留有约 17% 的裕量, 且 $\phi 0.5 \text{ mm}$ 平底孔的相对信噪比最高。综合深度覆盖、灵敏度裕量与仪器频段(100~400 kHz), 最终选定 300 kHz 作为主检测频率。该结果与前述针对平板缺陷的工程经验一致, 且由计算和对比试验共同验证。

4.7. 提离效应

提离效应这一概念是针对放置式线圈而言, 是指随着检验线圈离被检对象表面距离变化而感应到被检材料涡流反作用发生变化的现象。采用弹性放置式线圈探头应尽可能使线圈贴近被检测表面, 减小提离效应的影响。

4.8. 数字化率

涡流检验数字化率等于采样率除以探头扫查记录速度的商, 即表示在单位长度内采样的点数。数字化率直接影响涡流扫查信号质量和缺陷检出灵敏度。根据 ASME 规范要求, 涡流检验最小数字化率为 30 点/英寸(即约为 1.18 点/毫米)。本研究采用数字化率不小于 2 点/毫米, 在采样率为 1000 点/秒时, 最大扫查速度不高于 500 mm/s。

5. 试验过程

5.1. 技术参数设置

涡流检验试验按以下步骤执行:

- (1) 连接涡流检验系统, 涡流探头安装到扫查托盘, 系统连接见图 2;
- (2) 正确设置涡流仪配置, 选定检验频率, 扫查方式等;
 - i) 涡流仪设置
主检测频率: 300 kHz;
采样率: 1000 点/秒。
 - ii) 标定设置
将标定试块中深度为 1 mm 的人工缺陷的涡流信号角度设置为 90° (即噪声水平), 幅值设置为 4 伏。
 - iii) 扫查器设置
扫查方式: 栅格扫查;
扫查速度: 不大于 150 mm/s;
扫查步进: 不大于 3 mm。
- (3) 开始扫查前, 探头放置于标定试块上对系统进行对中处理;
- (4) 对涡流标定试块进行扫查, 按照标定设置要求对信号进行调整, 分析信噪比;
- (5) 对灵敏度试块进行扫查, 对扫查的数据进行分析;
- (6) 对模拟试件进行扫查, 记录并分析数据。

5.2. 系统标定

对标定试块进行扫查的结果见图 4。通过测量分析, 最小信号 1.98 V, 最大噪声 0.19 V, 最小信噪比为 10, 能明显区分 0.5 毫米人工伤与噪声, 满足信噪比大于等于 5 的技术指标。

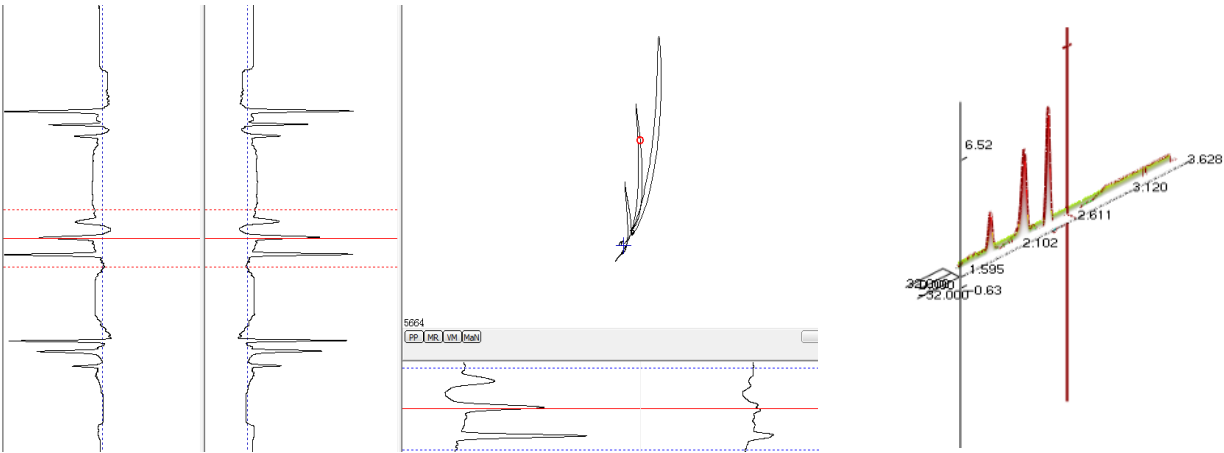


Figure 4. Calibration block scanning results
图 4. 标定试块扫查结果

5.3. 灵敏度验证

对灵敏度试块扫查结果见图 5。分析结果表明，涡流检验系统能准确检出模拟孔状缺陷的平底孔和模拟裂纹的人工槽(见表 6)，检验灵敏度满足技术要求。

Table 6. Eddy current test results of the sensitivity block
表 6. 灵敏度试块涡流试验结果

缺陷编号	缺陷设计参数			测量值	
	人工伤类型	模拟对象	尺寸	幅值	相位
1	平底孔	孔状缺陷	$\phi 0.5\text{ mm}$ 深 2 mm	0.56 V	261°
2	槽	裂纹	长 6 mm 宽 0.1 mm 深 0.5 mm	2.03 V	261°

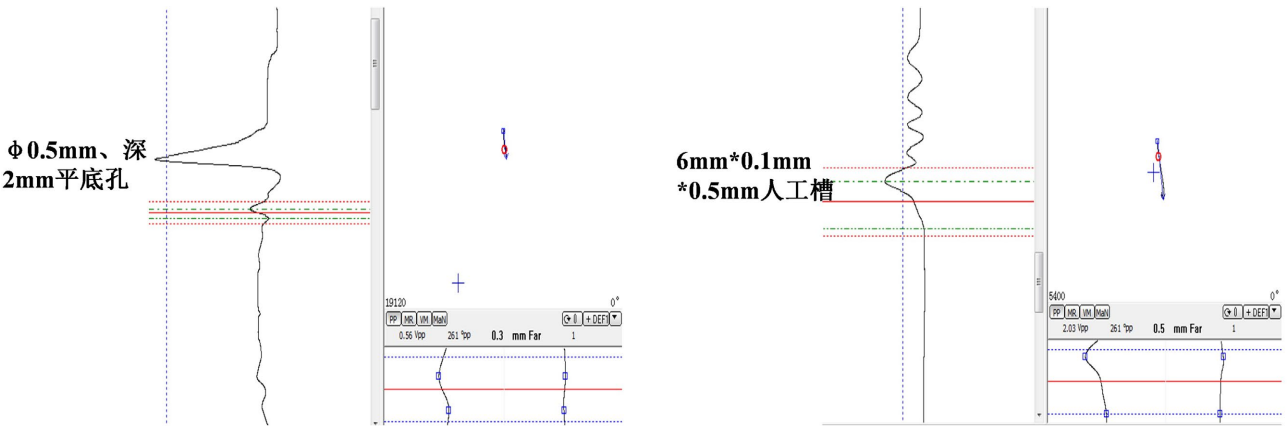


Figure 5. Sensitivity block scanning results
图 5. 灵敏度试块扫查结果

5.4. 模拟试件验证

在反应堆压力容器 1:1 模拟体上，通过机械扫查装置对模拟试件进行扫查，验证涡流方法对磨损区裂纹的检出能力。被检试件扫查结果见图 6 和表 7。

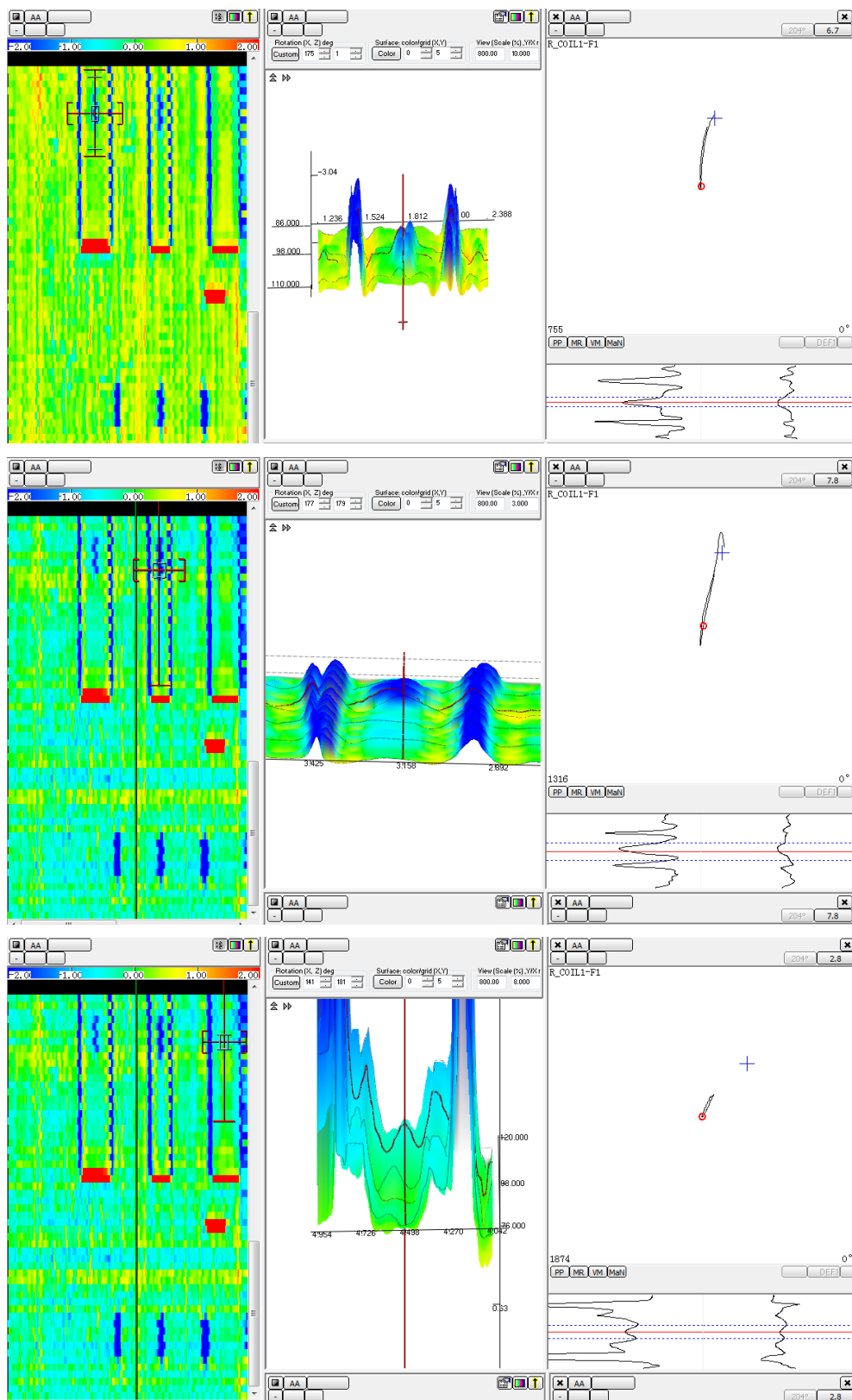


Figure 6. Scan results of wear A to C

图 6. 磨损 A-C 扫描结果

Table 7. EDM notch scanning results of the worn area
表 7. 磨损区 EDM 槽扫描结果

磨损区编号	EDM 槽加工尺寸	最大幅值	相位	测量长度
A	长 12.7 mm	1.79 V	101°	12 mm
B	宽 0.25 mm	2.73 V	98°	14 mm
C	深 2 mm	0.26 V	117°	10 mm

5.5. 试验结论

试验结果显示：

- (1) 涡流探头满足信噪比大于等于 5 的技术要求；
- (2) 能区分深度为 2 mm、1 mm、0.5 mm 人工槽；
- (3) 能检测出直径 0.5 mm、深度 2 mm 的孔；
- (4) 能检测出长 6 mm，宽 0.1 mm，深 0.5 mm 的人工槽；
- (5) 能检测出模拟试块上所有人工缺陷。

在对磨损区底部人工反射体的涡流检验试验中，所选用的涡流检验技术能检出不同尺寸磨损区底部的 EDM 槽。

6. 讨论

为更清晰地定位本研究的创新性与优势，结合引言所述相关技术，从检测原理、探头体制、适用场景、检测能力和工程适用性等方面，将本研究的小型弹性点式涡流技术与其他涡流探头技术及超声技术进行横向比较，如表 8 所示。

Table 8. Comparison of the proposed method and related detection techniques
表 8. 本研究方法与相关检测技术比较

技术方法	耦合要求	表面/近表面能力	复杂曲面贴合	定量方式	在下封头区域的局限/优势
常规绝对/差分涡流	无需耦合	表面强、近表面受频率限制	硬质探头贴合一般	幅值为主	难以小型化、提高干扰大
阵列涡流(ECA)	无需耦合	表面及浅近表面、大面积成像	柔性阵列可弯曲，较好	幅值 + 相位	需较大安装空间，狭窄区域受限
超声相控阵(PAUT)	需耦合剂	体积型缺陷强、有近表盲区	可楔块随形	回波时差定位	粗晶堆焊层散射严重、耦合受限
弹性点式涡流	无需耦合	表面及近表面(≤2 mm)灵敏	弹性随形、点式小型，优	相位定深 + 幅值定量	针对强反射高曲率狭窄区设计，优势明显

通过比较可以看出本研究的创新点主要体现在三个方面：其一，采用点式小型线圈($D = 3\text{ mm}$)并配合弹性随形机构，解决了下封头强反射、高曲率、空间受限条件下探头难以稳定贴合的难题，无需耦合剂即可获得稳定信号；其二，在 300 kHz 频率下兼顾了 2 mm 深缺陷的渗透覆盖与 $\varnothing 0.5\text{ mm}$ 小缺陷的灵敏度，并通过完整的电磁参数计算和有限元仿真给出了选型依据；其三，建立“相位定深度、幅值定规模”的信号判读方法和相位 - 深度标定关系，缺陷深度定量误差不超过 8%，实现了由定性检出向定量评估的提升。

与常规绝对/差分涡流、阵列涡流技术相比，本方法在单点灵敏度、小型化和曲面随形接触方面更适

应下封头这一特殊区域；与超声相控阵相比，本方法无需耦合、不受奥氏体粗晶散射影响、无近表面盲区，更适合表面开口及近表面小缺陷的检测。需要指出的是，本方法的有效检测深度集中于表面至约 2 mm 范围，对于更深层体积型缺陷，仍应与超声、射线等技术互补使用，形成多方法联合检验体系，这也是后续研究的方向。

7. 工程应用实例

在某核电站停堆在役检查中，采用本文所述的弹性点式平面线圈涡流检验技术进行检查，成功检出缺陷(见图 7)。检验结果表明：

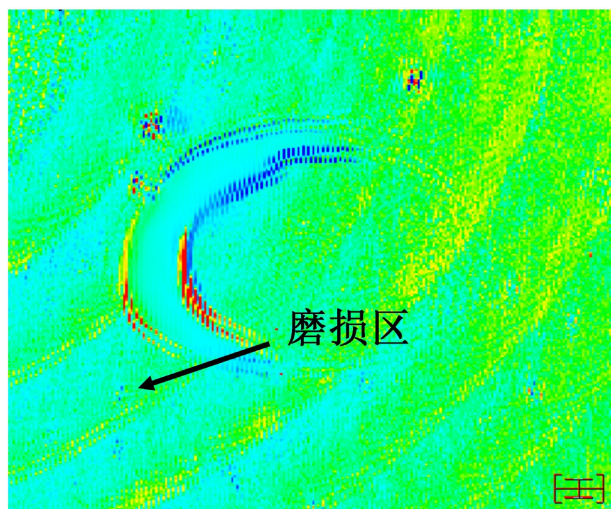


Figure 7. C-scan image of the worn area
图 7. 磨损区域 C 扫图

- (1) 弹性点式平面线圈探头能够良好适应磨损区的不规则表面轮廓，耦合状态稳定；
- (2) 弹簧支撑结构有效控制了提离变化，检测信号信噪比高；
- (3) 多频涡流技术实现了表面和近表面缺陷的有效检出，缺陷检出率 100%；
- (4) C 扫描成像直观显示了缺陷分布，缺陷定位准确；
- (5) 检测效率高，在有限窗口期内完成了全区域检测。

8. 结论

针对反应堆压力容器下封头堆焊层磨损区的缺陷检测问题，本文研究了一种基于弹性点式平面线圈探头的涡流检验方法，成功应用于某核电站在役检查，有效检出压力容器下封头堆焊层内表面马蹄形磨损缺陷，为核电站安全运行提供有力技术支撑。

参考文献

- [1] 孙圣辉, 张永青, 胡文杰. 不锈钢材料及焊缝的涡流阵列检测效果分析[J]. 无损检测, 2025, 47(2): 41-51.
- [2] 滕志勇, 高志刚, 于爽, 等. 阵列涡流检测不同深宽比裂纹的研究[J]. 失效分析与预防, 2024, 19(1): 20-23, 61.
- [3] 吕天明, 刘金宏, 李明, 等. 反应堆压力容器安全端异种金属焊缝超声检查技术[J]. 无损检测, 2014, 36(4): 8-13.
- [4] 林百涛, 张运平, 尹鹏, 等. 一种反应堆压力容器下封头堆焊层检测工具及方法: CN, CN111354487 B [P]. 2024-08-09.