

引文: 宫彦双, 完小康, 王宏军, 等. 基于增量磁导率提取的油气管道正交差分涡流内检测技术[J]. 油气储运, 2024, 43(9): 1002-1011.

GONG Yanshuang, WAN Xiaokang, WANG Hongjun, et al. Orthogonal differential eddy current testing for internal detection of oil and gas pipeline based on incremental permeability extraction[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(9): 1002-1011.

基于增量磁导率提取的油气管道正交差分涡流内检测技术

宫彦双¹ 完小康² 王宏军¹ 辛佳兴³ 陈广明¹ 陈金忠³ 余冰峰³ 马义来³

1. 中国石油塔里木油田公司油气工程研究院; 2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院; 3. 中国特种设备检测研究院

摘要:【目的】管道作为石油、天然气的主要运输工具,其运行工况复杂,易产生腐蚀、裂纹等缺陷。传统的漏磁检测设备由于质量大、磁吸力强,在小口径、低压管道中难以通过,且对于微小缺陷的检测能力不足;传统的涡流检测技术受趋肤效应的限制无法检出管道外壁及埋藏缺陷,同时难以识别缺陷的深度信息;超声检测由于需要耦合剂,不适用于天然气管道的内检测。【方法】提出了直流磁化与正交差分涡流结合的管道缺陷检测技术,利用有限元分析方法探究了管道内、外表面缺陷对于管道内部涡流场和磁导率的影响规律。研制了正交差分涡流检测探头,开展了管道内、外表面缺陷动态扫查实验。【结果】研制的正交差分涡流检测探头对管道内、外壁腐蚀及内壁裂纹均有信号响应。在一定范围内,特征信号峰值缺陷深度、宽度成正相关,峰值、峰谷间距与缺陷宽度正相关。管道埋藏缺陷与外壁缺陷特征信号相位相同且与内壁缺陷特征信号相反,可以为缺陷位置的快速判定提供参考。【结论】研究成果对弥补传统漏磁、涡流检测技术的不足,促进管道在线检测技术的发展具有重要意义。(图 13,表 1,参 21)

关键词: 增量磁导率提取; 差分涡流检测; 内检测; 检测探头

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)09-1002-10

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.09.005

Orthogonal differential eddy current testing for internal detection of oil and gas pipeline based on incremental permeability extraction

GONG Yanshuang¹, WAN Xiaokang², WANG Hongjun¹, XIN Jiaxing³, CHEN Guangming¹, CHEN Jinzhong³, YU Bingfeng³, MA Yilai³

1. Oil and Gas Engineering Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company; 2. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing); 3. China Special Equipment Inspection & Research Institute

Abstract: [Objective] Serving as the primary mode of transporting oil and natural gas, pipelines are prone to corrosion, cracks, and other defects under intricate operational conditions. However, conventional magnetic flux leakage testing equipment faces challenges in navigating small-diameter and low-pressure pipelines due to its bulkiness and strong magnetic field attraction. Additionally, this method falls short in pinpointing minor defects. The traditional eddy current testing technique is constrained by the skin effect, impeding its ability to identify outer wall flaws and buried defects, as well as discerning defect depths accurately. Furthermore, ultrasonic testing proves impractical for natural gas pipelines due to the need for couplants. [Methods] This paper presents a novel pipeline defect detection technique that combines DC magnetization and orthogonal differential eddy current methods. Initially, the impact of inner and outer surface defects on the internal eddy current field and magnetic permeability of pipelines was investigated using finite element analysis. Following this, an orthogonal differential eddy current testing probe was developed. Subsequently, dynamic scanning experiments were carried out to detect defects on the inner and outer surfaces of pipelines. [Results] The developed orthogonal differential eddy current testing probe generated signals in response to corrosion on the inner and outer walls as well as cracks in the inner wall. Within a certain range, the peak defect depth and width of the characteristic signal are positively correlated, and the peak and valley spacing are positively correlated with the defect width. The buried defects in pipelines have the same phase as the characteristic signals of the outer wall defects and are opposite to the characteristic signals of the inner wall defects, which can provide a reference for rapid determination of defect locations. [Conclusion] The research findings present

a methodology to address the shortcomings of traditional magnetic flux leakage and eddy current testing techniques, providing a valuable perspective for advancing the technological development of on-line pipeline testing. (13 Figures, 1 Table, 21 References)

Key words: incremental permeability extraction, differential eddy current testing, internal detection, testing probe

管道主要用于石油、天然气等重要资源的长距离运输,在国家发展中有着重要的战略地位^[1]。截至2023年上半年,中国油气长输管道总里程达到 1.65×10^5 km^[2],预计到2025年,中国油气管网规模将达到 2.4×10^5 km^[3]。中国现有老旧管道数量众多^[4],由于工作环境复杂、长期高负载运行,易产生变形、腐蚀、应力集中等多种缺陷,对管道安全运行产生重大隐患,容易造成人身伤亡、财产损失以及环境破坏^[5]。管道运行期间需要定期开展管道检测以消除隐患,而内检测技术被认为是当前最有效的方法^[6-7]。

目前主要的检测方法包括漏磁检测、超声检测及涡流检测^[8-10]等。其中漏磁检测使用最广泛,技术也最成熟,但是存在设备体积大,难以应用于低压、小口径管道,且对微小缺陷难以量化的缺点。超声检测由于需要耦合剂,不适用于天然气管道的检测。涡流检测技术具有分辨率高、响应速度快、无需耦合剂等优点,但在高频激励下检测深度有限^[11-12]。Rosado等^[13-14]设计了一种新型的差分涡流检测探头,实现了对管道内表面缺陷的检测与识别,并对探头进行了优化。Romero-Arismendi等^[15]利用不对称的GMR(Giant Magneto-Resistance)芯片与激励线圈对涡流检测探头进行优化,显著增加了涡流探头的灵敏度。Mussatayev等^[16]利用CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)层延纤维方向导电性高、在横向导电性低的特性,采用激励线圈产生均匀磁场沿纤维方向诱导电流流动,最后使用沿扫描方向排列的两个矩形接收线圈采集下方不对称的涡流场信号,通过分析线圈中的阻抗信息获得缺陷信息。冯一璟^[17]提出了一种新型弧形激励探头,可以在管道内部产生周期性旋转磁场,通过检测缺陷在磁场中所引起的畸变信号,实现了对任意角度裂纹缺陷的有效检测。Piao等^[18]提出了一种用于识别管道内外径缺陷的脉冲涡流传感方法,并结合涡流、漏磁两种技术研制了高速运行的管道内检测设备,但由于漏磁需要将管道饱和磁化,导致在运行过程中阻力过大。许鹏等^[19]设计了一种复合电磁检测探头,实现了对钢轨表面和埋藏缺陷的检测。杨雨沛^[20]研发了一种基于差分平面涡流传感器,但受趋肤效应的影响,难以检测埋藏缺陷与外表面缺陷。

可见,传统漏磁检测技术对微小缺陷检测能力不足,涡流检测技术难以检测管道埋藏缺陷和外表面缺陷。为此提出了一种基于增量磁导率提取的油气管道正交差分涡流内检测技术,利用直流磁化将试件磁化至磁场非饱和区域后,使用差分涡流探头检测管道内外表面和埋藏缺陷。

1 检测原理

按照磁场强度不同可将铁磁性材料B-H曲线(图1)分为非饱和区、近饱和区、饱和区及过饱和区。当试件磁场强度位于A点,此时若叠加一个振幅为 H_p 、角频率为 ω 的交流磁场 H_{ac} ,磁感应强度与磁场强度将产生变动幅值为 ΔB_a 和 ΔH 的磁滞回线A-A'。由于叠加的交流磁场 H_{ac} 与原本的直流磁场相比很小,在环路A-A'内B-H曲线变化可近似当作线性变化,此时A点增量磁导率^[21]可表示为:

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta B_a}{\Delta H} \quad (1)$$

式中: μ_Δ 为增量磁导率, H/m; ΔB_a 为磁感应强度变化量, T; ΔH 为磁场强度变化量, A/m。

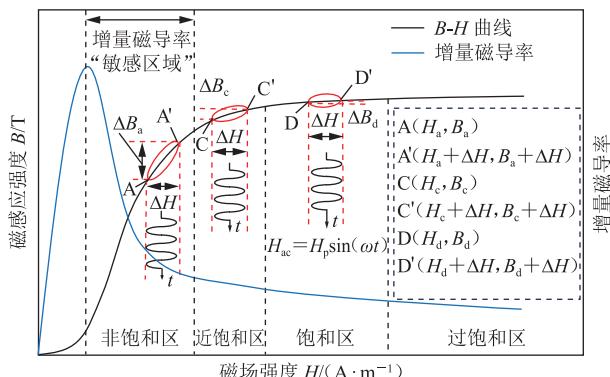


图1 铁磁性材料B-H曲线
Fig. 1 B-H curve of ferromagnetic materials

在直流磁化场与交流磁场 H_{ac} 共同作用下,工作点A试件内部产生的感应涡流 J ^[20]可表示为:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{\partial (B_a + \Delta B_a + \Delta B_J)}{\partial t} \quad (2)$$

$$J = \sigma E \quad (3)$$

式中: ∇ 为哈密顿算子; E 为试件内部电场强度, V/m;

σ 为试件电导率常数; J 为感应涡流, V/m ; ΔB_J 为二次磁场的磁感应强度, T ; t 为时间, s 。

当试件中叠加的交流磁场变动幅值 ΔH 与直流磁化的强度相比可忽略不计时, $B-H$ 曲线上某点对应的增量磁导率 μ_Δ 可近似看作该点的切线斜率。增量磁导率 μ_Δ 越大, 试件中磁感应强度 B 随时间 t 变化的越快, 产生的感应涡流 J 和二次磁场 ΔB_J 越大, 即感应涡流 J 、二次磁场 ΔB_J 与增量磁导率 μ_Δ 呈现正相关规律。

分别将试件磁化至 $B-H$ 曲线的非饱和区 A 点、近饱和区 C 点以及饱和区 D 点, 再叠加相同的交流磁场 H_{ac} , 三点的磁感应强度变化幅值分别为 ΔB_a 、 ΔB_c 及 ΔB_d , 且 $\Delta B_a > \Delta B_c > \Delta B_d$, 随着磁场强度 H 由非饱和区向饱和区增大, 增量磁导率 μ_Δ 减小。

综上, 提取不同试件在不同状态下的增量磁导率, 将试件磁化至增量磁导率“敏感区域”, 使叠加的交流磁场强度一定时, 试件内部感应涡流 J 更强, 即可达到增强信号的目的。

设计了激励线圈与差分接收线圈结构(图 2), 坚直放置的激励线圈用于产生交变磁场。为减小噪声的影响、提高信噪比, 通过两个除绕向相反外其他参数均相同的线圈接收其下方感应涡流场产生的二次磁场, 并对信号进行差分处理。

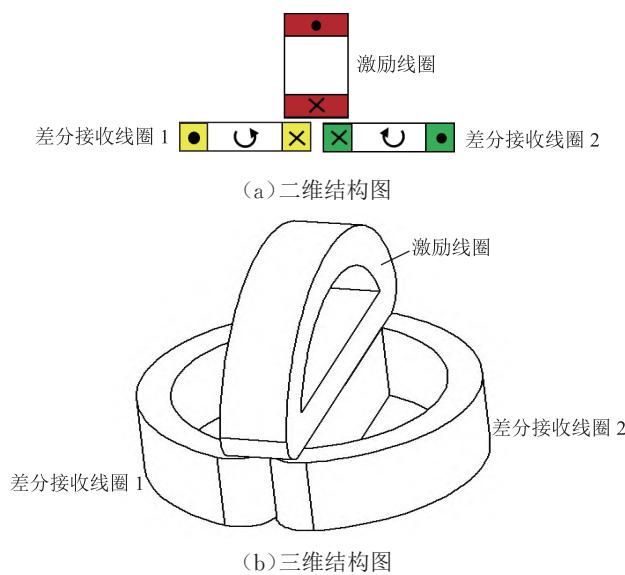


图 2 激励线圈与差分接收线圈结构示意图
Fig. 2 Structure diagram of excitation coil and differential receiving coil

两个差分线圈中的磁通量可表示为:

$$\Phi_{J_1} = \int B_{J_1} \cdot dS_{J_1} \quad (4)$$

$$\Phi_{J_2} = \int B_{J_2} \cdot dS_{J_2} \quad (5)$$

式中: Φ_{J_1} 、 Φ_{J_2} 分别为差分接收线圈 1、差分接收线圈 2

中的磁通量, Wb ; B_{J_1} 、 B_{J_2} 分别为差分接收线圈 1、差分接收线圈 2 下方涡流场 J_1 、 J_2 产生的二次磁场磁感应强度, T ; S_{J_1} 、 S_{J_2} 分别为涡流场 J_1 、 J_2 所包围的曲面面积, m^2 。

两个差分接收线圈中接收的磁通量为激励电场与试件表面涡流产生的二次磁场共同作用的结果, 可表示为:

$$\varepsilon_{J_1} = -N \left(\frac{\partial \Phi_{J_1}}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_{J_2}}{\partial t} \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{J_2} = -N \left(\frac{\partial \Phi_{J_2}}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_{J_1}}{\partial t} \right) \quad (7)$$

式中: ε_{J_1} 、 ε_{J_2} 分别为差分接收线圈 1、差分接收线圈 2 中产生的感应电动势, V ; N 为差分接收线圈的匝数; Φ_{J_1} 为激励磁场在接收线圈产生的磁通量, Wb 。

由于两个接收线圈相对于激励线圈对称放置, 除绕制方向不同, 其他参数相同, 所以式(6)、式(7)中的 Φ_{J_1} 相等, 方向相反, 可以相互抵消。差分接收线圈 1、2 中感应电动势之和表示为:

$$\varepsilon = \varepsilon_{J_1} + \varepsilon_{J_2} = -N \left(\frac{\partial \Phi_{J_1}}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_{J_2}}{\partial t} \right) \quad (8)$$

式中: ε 为差分接收线圈的总感应电动势, V 。

激励线圈下方涡流场的渗透深度可表示为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (9)$$

式中: δ 为涡流场渗透深度, mm ; f 为激励信号的交变频率, s^{-1} ; μ 为试件磁导率, H/m ; σ 为电导率常量。

感应涡流 J 沿着渗透深度的方向的衰减方程可表示为:

$$J(h) = J_0 e^{-\left(\frac{h}{\delta}\right)} \quad (10)$$

式中: $J(h)$ 为距离试件内表面深度为 h 处的感应涡流, V/m ; J_0 表示试件内表面深度为 0 处的涡流, V/m ; h 为距离试件内表面的深度, mm 。

基于增量磁导率提取的差分涡流检测原理(图 3)为: ①对于无缺陷试件(图 3a), 差分接收线圈 1 与差分接收线圈 2 下方试件的电导率 σ 与增量磁导率 μ_Δ 完全相同, 对应的感应涡流 J_1 、 J_2 也相同。输出的总电动势为 0, 即当差分接收线圈 1 与差分接收线圈 2 下方无缺陷时, 输出信号的基值为 0。②内表面缺陷处(图 3b)电导率 σ 变为 0, 当差分接收线圈 2 处于缺陷上方时, 其与试件之间的距离值 L_2 大于差分接收线圈 1 与试件之间的距离值 L_1 。在相同激励下, 距离值越大,

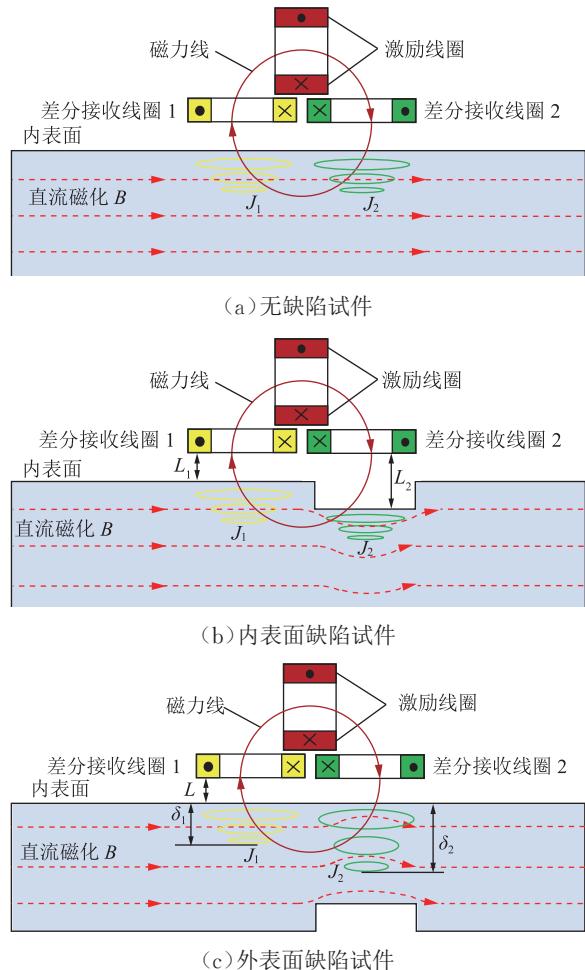


Fig. 3 Schematic diagram of detection using three types of specimens

激励磁场强度衰减越大,导致试件表面产生的涡流场越小,即 $J_2 < J_1$ 、 $B_{J_2} < B_{J_1}$ 、 $|\epsilon| > 0$ 。③对于外表面缺陷试件(图3c),外表面缺陷或埋藏缺陷会导致内表面相应位置磁场密度 H 增大,使磁导率 μ 减小,感应涡流 J 沿渗透深度方向衰减变慢,相同深度 h 处涡流密度增大,即 $J_2 > J_1$ 、 $B_{J_2} > B_{J_1}$ 、 $|\epsilon| > 0$ 。

2 数值模拟

2.1 模型建立

使用 Ansys Maxwell 软件建立二维仿真模型(图4),设置线圈沿 x 轴方向从 3 种缺陷左侧 30 mm 处扫描至缺陷右侧 30 mm 处,步进 1 mm,每个缺陷共扫描 60 个点。在每个点位停留一个正弦交流电周期的时间,即 1 μ s。模型参数设置:试件壁厚为 10 mm,缺陷尺寸宽度、深度分别为 1 mm、3 mm,激励、接收线圈截面尺寸分别为 2 mm \times 1 mm、1 mm \times 1 mm,激励、接

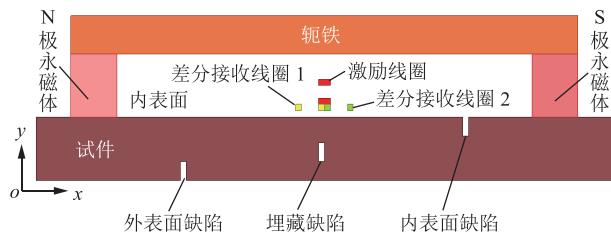
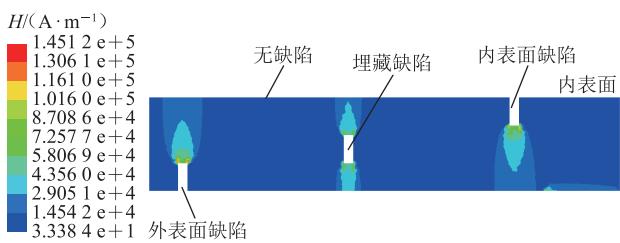


图 4 仿真模型图
Fig. 4 Illustration of simulation model

收线圈匝数均为 100,线圈内径为 2 mm,钢板电导率为 2×10^6 S/m,激励频率为 1 MHz,激励幅值为 1 A,提离值为 1 mm,平均磁化强度为 1.5 T。

当利用永磁体对试件进行直流磁化后,缺陷的存在会导致试件水平磁场分布不均匀(图 5a)。无缺陷处内表面的水平磁场近似均匀分布。外表面和埋藏缺陷的存在导致缺陷上方磁场更加集中,使试件内表面处于 B - H 曲线上的不同工作点。不同工作点对应的磁导率不同,无缺陷处的磁导率约为 700 H/m,外表面和埋藏缺陷处内表面的磁导率最小约为 6 H/m(图 5b)。



(a) 水平磁场强度分布

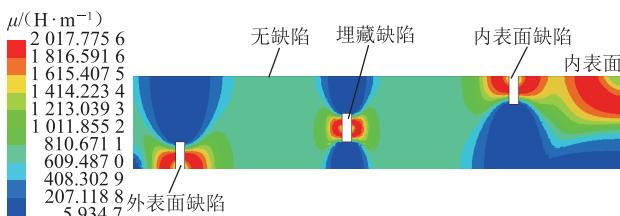


图 5 试件磁场强度与磁导率分布云图
Fig. 5 Distribution of magnetic field intensity and permeability of specimen

在对激励线圈添加幅值为 1 A、频率为 1 MHz 的正弦交流电后,在试件无缺陷处,差分接收线圈 1 与差分接收线圈 2 下方的涡流场完全对称(图 6a)。内表面缺陷试件中(图 6b),线圈 2 下方内表面缺陷的最大涡流强度约为 1×10^5 A/m²,线圈 1 下方无缺陷处的最大涡流场强度为约 2.2×10^5 A/m²。埋藏缺陷试件中(图 6c),无缺陷处涡流场渗透深度 δ_1 为 20% r (r 为试件壁厚),而埋藏缺陷处涡流渗透至缺陷处,深度 δ_2 达到 30% r 。外表缺陷试件中(图 6d),无缺陷处涡流

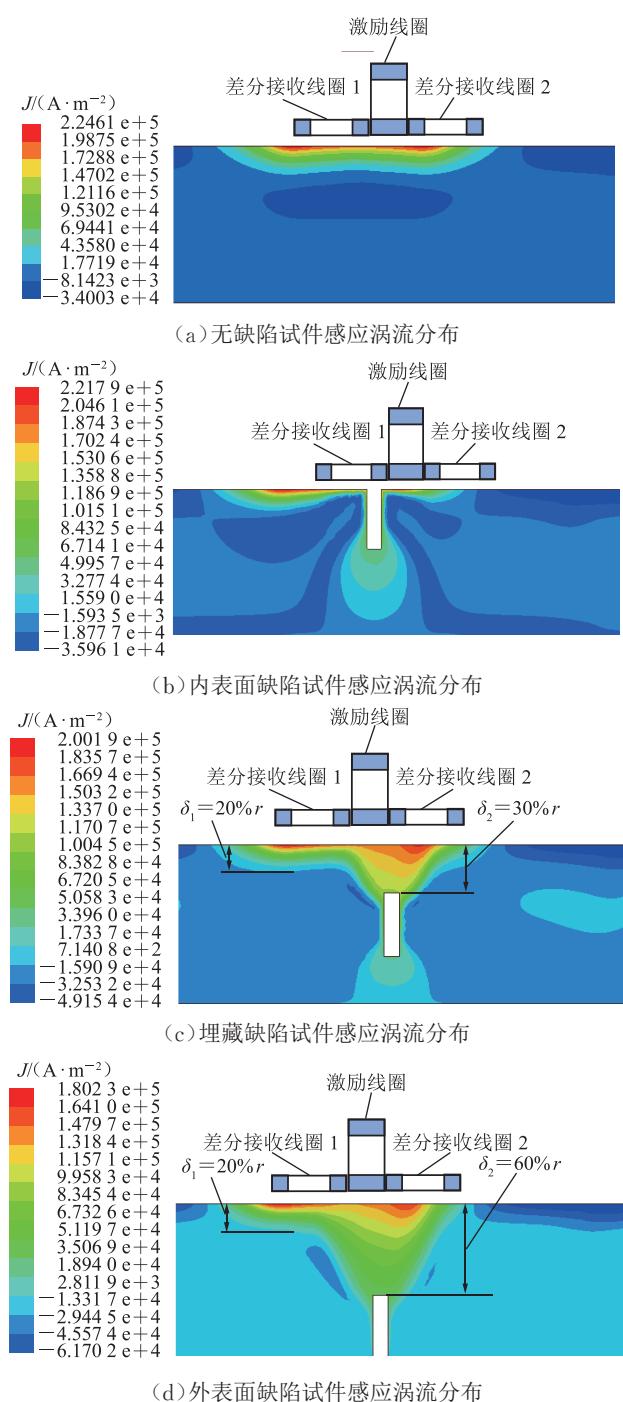


图6 试件内部涡流场分布云图

Fig. 6 Distribution of eddy current field in specimen

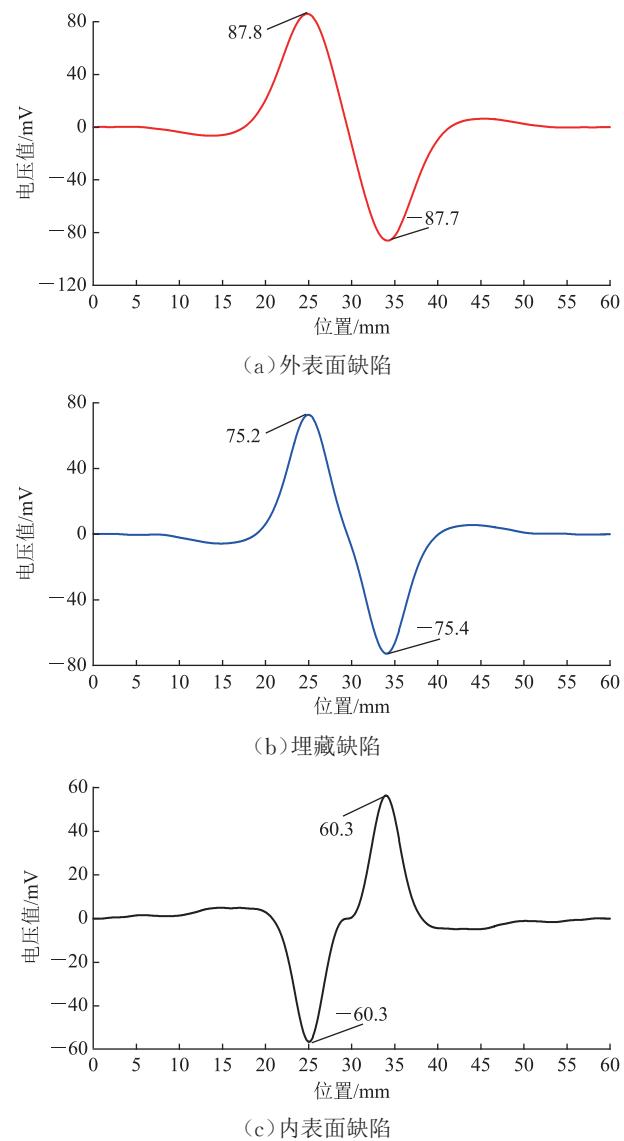
场渗透深度 δ_1 为 $20\%r$, 外表面缺陷处渗透深度 δ_2 达到 $60\%r$ 。仿真结果与式(9)吻合, 外表面缺陷处磁导率的减小导致涡流场渗透深度增加, 且与无缺陷处相比, 同一深度的涡流场强度增大, 对涡流场具有总体增强作用。

利用差分电路将差分接收线圈中的信号相加, 即可得到基于 0 的电压信号。当两个差分接收线圈下方都没有缺陷时, 电压值为 0; 当其中一个差分接收线圈下

方有缺陷时, 差分输出信号幅值将增大。通过观察其差分输出信号的电压值 U_0 的变化即可得到该处的缺陷信息。

2.2 仿真结果

进行参数化扫描后, 提取 60 个参数化位置接收的电压信号峰值, 并按照参数化位置绘制曲线(图 7)。可见, 当线圈经过外表面缺陷时, 电压峰值先由 0 上升至波峰 87.8 mV 再下降至波谷 -87.7 mV ; 当线圈经过埋藏缺陷时, 电压峰值由 0 上升至波峰 75.2 mV , 再下降至波谷 -75.4 mV ; 当线圈经过内表面缺陷时, 电压峰值由 0 先下降至波谷 -60.3 mV , 再上升至波峰 60.3 mV 。即外表面缺陷与埋藏缺陷的特征信号呈现先正峰后负峰, 内表面缺陷特征信号呈现先负峰后正峰。

图7 3种类型缺陷电压仿真结果图
Fig. 7 Simulation results of 3 types of voltage

3 实验验证

3.1 实验系统

搭建的裂纹与腐蚀缺陷检测系统(图 8)主要包括:计算机、三轴联动平台、磁化装置、信号发生器、功率放大电路、调理电路(包括差分电路和 AD630 锁相放大器)、采集卡及探头等。

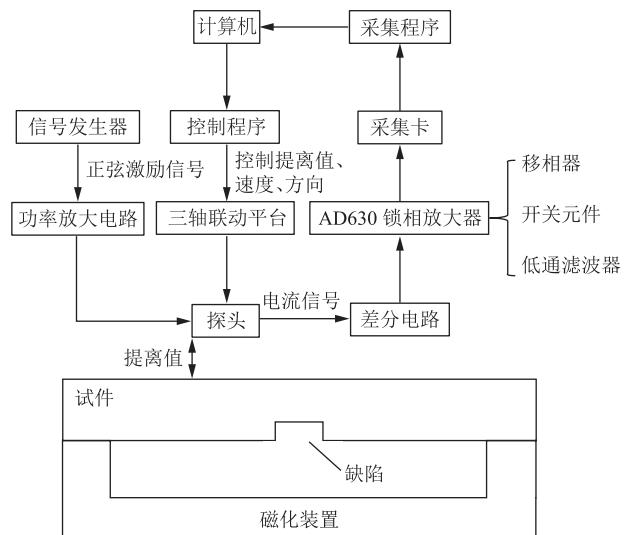


图 8 裂纹与腐蚀缺陷检测系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of testing system of crack and corrosion defects

进行检测的腐蚀试件与裂纹试件均采用 45 钢(图 9、表 1, 图 9 中 $A_1 \sim A_4$ 、 $B_1 \sim B_4$ 为矩形腐蚀缺陷, $C_1 \sim C_7$ 为裂纹缺陷, D_1 为梯形腐蚀缺陷), 其中: 试件 A/B 的厚度为 8 mm, 试件 C 厚度为 10 mm, 试件 D 厚度为 6 mm。

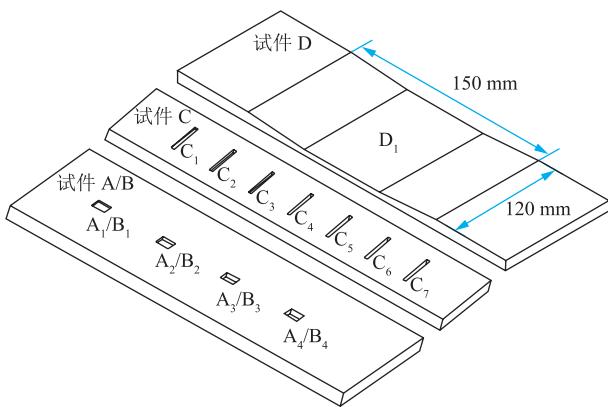


图 9 腐蚀与裂纹试件图

Fig. 9 Specimens with corrosion and crack

实验中采用电磁铁将试件磁化至增量磁导率敏感区域, 利用三轴联动平台保持探头以恒定的速度通过缺陷正上方, 探头激励为 4 V、10 kHz 正弦交流电, 探头提离值为 0.5 mm, 扫查速度为 25 mm/s。当交流

表 1 缺陷参数表
Table 1 Parameters of defects

缺陷类型及编号	长度/mm	宽度/mm	深度/mm
矩形腐蚀缺陷 A_1	10	10.0	0.8
矩形腐蚀缺陷 A_2	10	10.0	1.6
矩形腐蚀缺陷 A_3	10	10.0	2.4
矩形腐蚀缺陷 A_4	10	10.0	3.2
矩形腐蚀缺陷 B_1	15	15.0	0.8
矩形腐蚀缺陷 B_2	15	15.0	1.6
矩形腐蚀缺陷 B_3	15	15.0	2.4
矩形腐蚀缺陷 B_4	15	15.0	3.2
裂纹缺陷 C_1	24	0.5	1.0
裂纹缺陷 C_2	24	0.5	2.0
裂纹缺陷 C_3	24	0.5	3.0
裂纹缺陷 C_4	24	0.5	4.0
裂纹缺陷 C_5	24	0.5	5.0
裂纹缺陷 C_6	24	0.5	6.0
裂纹缺陷 C_7	24	0.5	7.0
梯形腐蚀缺陷 D_1	150	120.0	2.0

激励频率为 10 kHz 时, 接收线圈接收信号的周期为 10^{-4} s, 此时若以 25 mm/s 的恒定速度扫描时, 单个周期内探头只沿扫描方向运动了 2.5 μ m, 与毫米级尺寸的缺陷相比可以忽略不计, 可近似认为在单个周期内, 探头与试件相对静止。

当探头下方有缺陷时, 差分接收线圈能够接收到空间中磁场的变化, 同时将磁信号变为电流信号输出至差分电路。差分电路将电流信号变为电压信号输出至 AD630 锁相放大器, 同时利用与激励信号同频率的方波作为参照信号。首先通过移相器对参照信号进行移相, 使其与输入信号相位相同; 采用开关元件进行同步检波, 实现频率变换; 最后通过低通滤波器处理后即可得到滤波完成后的包络信号, 将处理后的信号输出至采集卡。

3.2 实验结果

3.2.1 腐蚀缺陷检测

将探头分别置于试件 A、B 矩形腐蚀缺陷同侧和异侧, 进行内外表面矩形腐蚀缺陷扫查实验(图 10)。探头在无缺陷处时检测信号趋于 0, 内表面腐蚀处信号呈现出先负峰后正峰(图 10a), 外表面腐蚀处信号呈现出先正峰后负峰(图 10b), 两种缺陷特征信号相位相差 180°。当缺陷宽度不变时, 随着缺陷深度从 0.8 mm 增大至 3.2 mm, 特征信号峰值增加, 内表面特征信号峰值的增幅逐渐变缓(图 10c、图 10d)。特征信号峰谷间距与缺陷宽度呈现正相关变化规律, 与缺陷深度无关(图 10e、图 10f)。

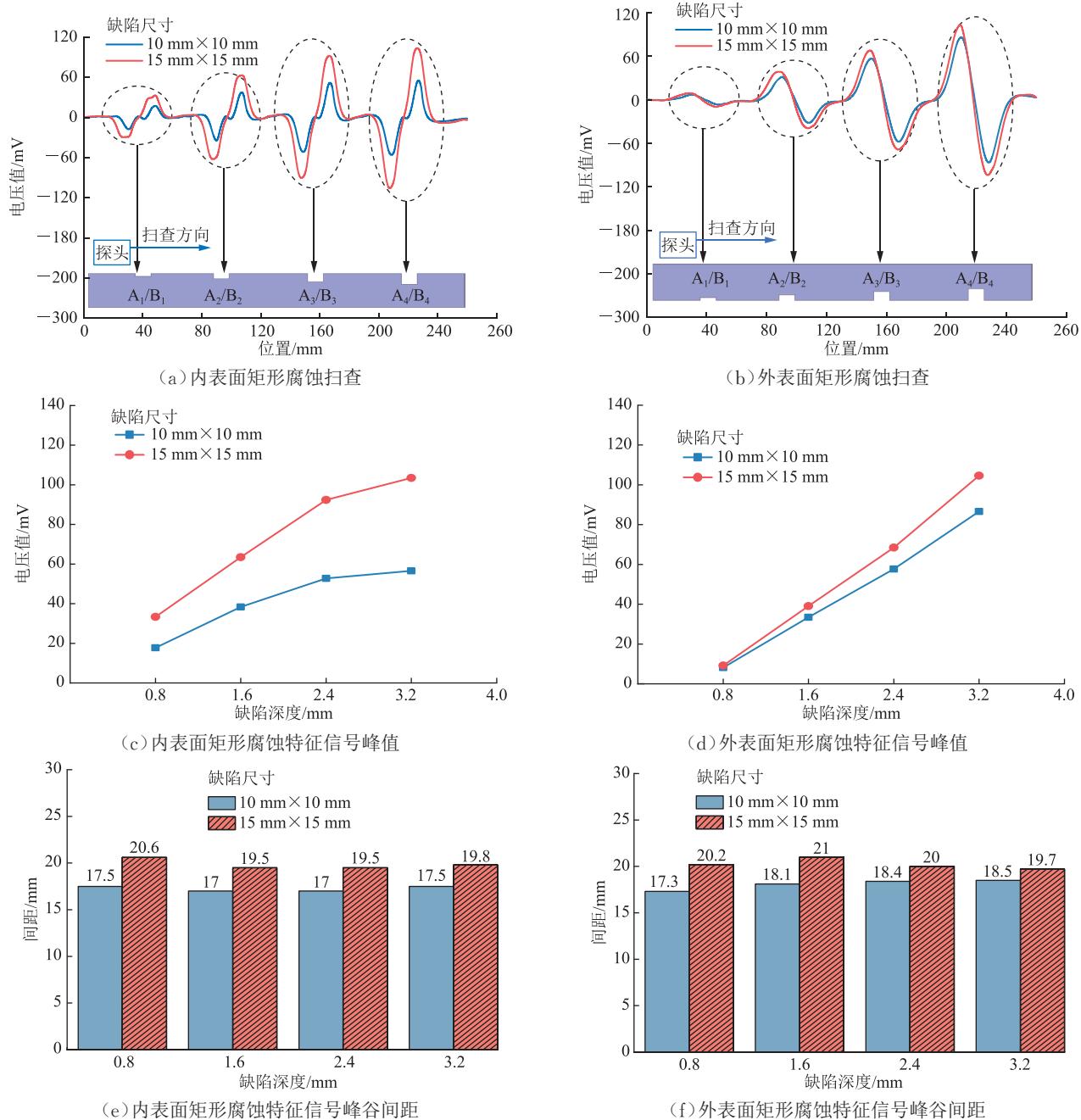


图 10 矩形腐蚀缺陷内外表面扫查结果图
Fig. 10 Scanning results of inner and outer surfaces with rectangular corrosion defects

分析试件 A/B 中矩形腐蚀缺陷特征信号, 探头特征信号对应探头位置关系为(图 11):当探头处于无缺陷处时,输出电压为基值 0;当探头其中一个差分接收线圈下方缺陷时,电压信号幅值将会增大,且当差分接收线圈位于缺陷正上方时,特征信号出现峰谷值。

分析试件 D 中大面积梯形腐蚀缺陷的内、外表面扫查结果(图 12)可知,特征信号峰值与谷值出现在缺陷边缘,当探头完全处于缺陷内部时,差分接收线圈 1、2 下方涡流场对称,差分输出信号为 0,此时无法判断探头下方有无缺陷。内、外表面缺陷扫查结果对应的特征

信号峰谷间距分别为 135 mm、134 mm,与梯形腐蚀试件的缺陷宽度 150 mm 相近。

综上,通过分析特征信号正峰与负峰出现的先后关系可以对内外表面缺陷进行判别,提取不同方向扫查结果的特征信号峰谷间距可以对缺陷长度和宽度进行定量分析,分析特征信号峰值可得到缺陷深度信息。

3.2.2 裂纹缺陷检测

对试件 C 中宽度为 0.5 mm,深度 1~7 mm 的裂纹缺陷分别进行内、外表面检测(图 13)。其中,内外表面裂纹缺陷特征信号相位相差 180°,形状与腐蚀缺

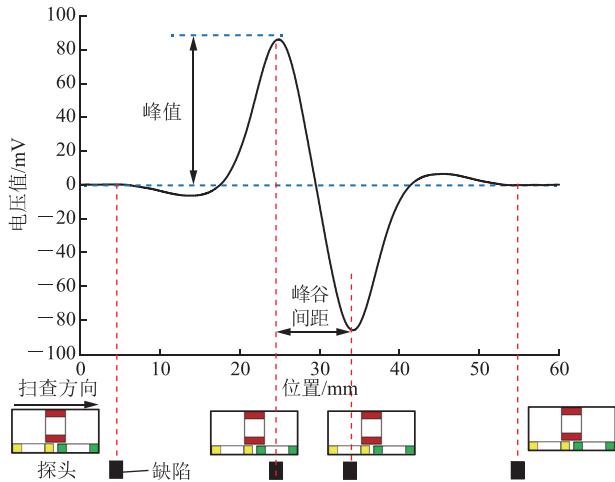
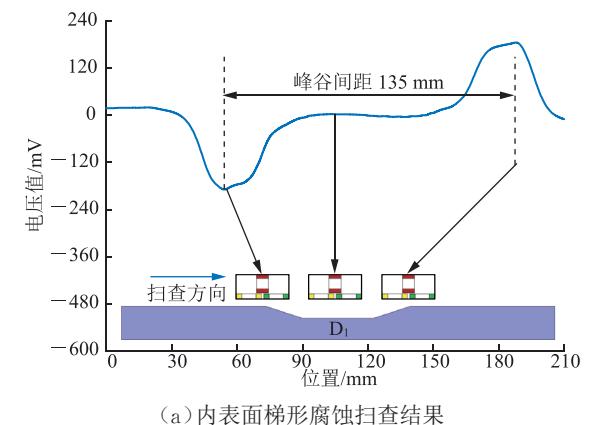
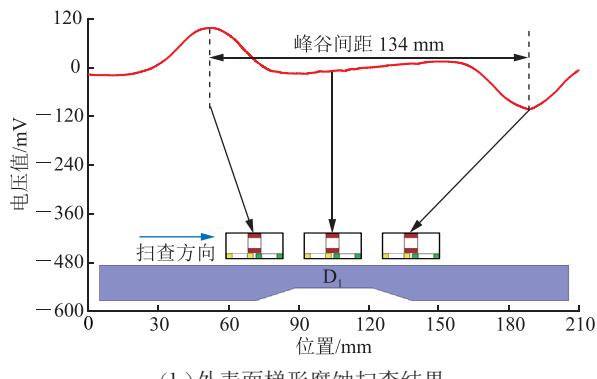


图 11 矩形腐蚀缺陷内外表面扫查特征信号与线圈位置关系图

Fig. 11 Correlations of inner and outer surfaces scanning with rectangular corrosion defects between characteristic signal and coil position



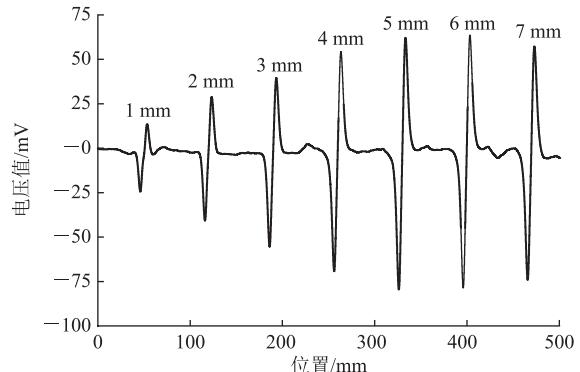
(a) 内表面梯形腐蚀扫查结果



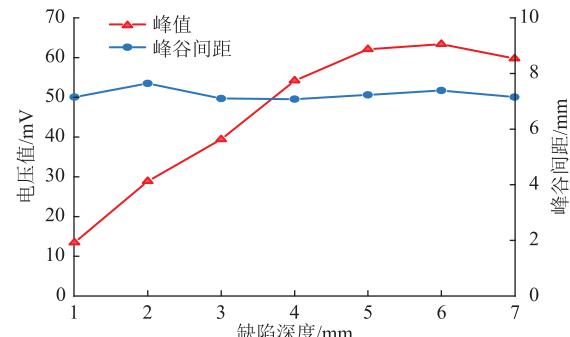
(b) 外表面梯形腐蚀扫查结果

图 12 梯形腐蚀缺陷内外表面扫查结果图
Fig. 12 Scanning results of inner and outer surfaces with trapezoidal corrosion defects

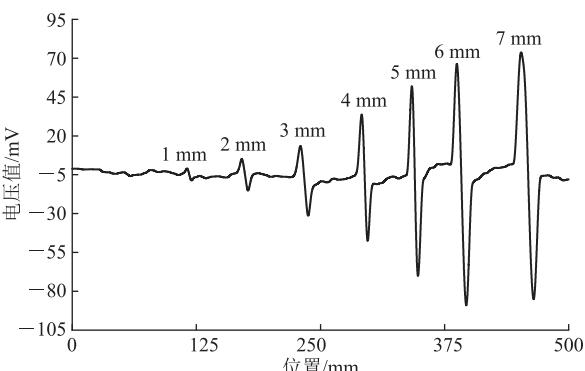
陷相似(图 13a、图 13c)。随着内表面裂纹深度的增加,受涡流趋肤效应的影响,其特征信号峰值逐渐增大,但增速逐渐减缓;当深度达到 5 mm 时,峰值趋于稳定。内表面裂纹特征信号峰谷间距与裂纹深度无关(图 13b)。随着外表面裂纹深度从 1 mm 增加至 7 mm,特征信号的峰值逐渐增加,但过深的缺陷会使试件内部的涡流场聚集在裂纹缺陷的上方,最终导致



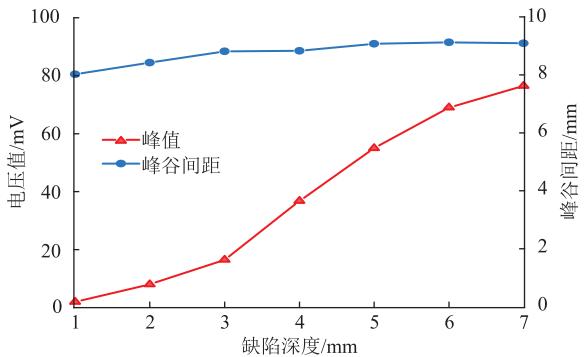
(a) 不同深度内表面裂纹扫查结果



(b) 内表面裂纹特征信号峰值与峰谷间距



(c) 不同深度外表面裂纹扫查结果



(d) 外表面裂纹特征信号峰值与峰谷间距

图 13 裂纹缺陷内外表面扫查结果图
Fig. 13 Scanning results of inner and outer surfaces with crack defects

试件内部涡流的生成空间减少,所以特征信号峰值增速逐渐减缓。外表面裂纹特征信号峰谷间距随裂纹深度增加而基本不变(图 13d)。

4 结论

分析了内外表面缺陷对试件磁导率与涡流的影响,通过有限元方法建立模型进行可视化分析,搭建了实验系统并开展了缺陷扫查实验,结论如下:

1)在直流磁化场的作用下,内表面缺陷、外表面缺陷分别导致试件内表面电导率不连续、磁导率不均匀分布。

2)内表面缺陷与外表面缺陷、埋藏缺陷的特征信号相位相反;内表面缺陷特征信号呈现先正峰后负峰,外表面缺陷、埋藏缺陷特征信号呈现先负峰后正峰。

3)在一定范围内随着缺陷深度的增加,特征信号的峰值呈现出正相关;随着缺陷宽度的增加,特征信号的峰谷间距呈现出正相关。

4)设计的探头可实现内表面深度5 mm以下缺陷定量检测,以及厚度10 mm试件外表面深度1 mm以上缺陷的定量检测。

参考文献:

- [1] 杨理践,耿浩,高松巍.长输油气管道漏磁内检测技术[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1736-1746. DOI: 10.3969/j.issn.0254-3087.2016.08.005.
YANG L J, GENG H, GAO S W. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1736-1746.
- [2] 丁建林,西昕,张对红.能源安全战略下中国管道输送技术发展与展望[J].油气储运,2022,41(6):632-639. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.005.
DING J L, XI X, ZHANG D H. Development and outlook of China's pipeline transportation technologies under energy security strategy[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(6): 632-639.
- [3] 王玮,苏怀,孙文苑,张劲军.油气管道技术发展现状与展望[J].前瞻科技,2023,2(2):161-167. DOI: 10.3981/j.issn.2097-0781.2023.02.012.
WANG W, SU H, SUN W Y, ZHANG J J. Development status and prospect of oil and gas pipeline technologies[J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(2): 161-167.
- [4] 吴霄.油气管道漏磁内检测技术研究与应用[C].嘉兴:中燃协安全委委员大会暨燃气安全交流研讨会,2023:288-290.
WU X. Research and application of magnetic flux leakage internal detection technology for oil and gas pipelines[C]. Jiaxing: The

General Meeting of the Safety Committee of the China Gas Association and the Gas Safety Exchange Seminar, 2023: 288-290.

- [5] 李亚军,胡朋,陈金忠.漏磁内检测技术在集输管道检测中的应用[J].中国特种设备安全,2023,39(4):28-32. DOI: 10.3969/j.issn.1673-257X.2023.04.007.
LI Y J, HU P, CHEN J Z. Application of magnetic flux leakage internal detection technology in gathering and transportation pipeline detection[J]. China Special Equipment Safety, 2023, 39(4): 28-32.
- [6] 李衍.管道焊缝自动超声检测系统应用综述[J].无损探伤,2023,47(5):1-7,21. DOI: 10.13689/j.cnki.cn21-1230/th.2023.05.009.
LI Y. Review on application of automatic ultrasonic inspection system for pipeline welds[J]. Nondestructive Testing Technology, 2023, 47(5): 1-7, 21.
- [7] 刘海峰,胡剑,杨俊.国内油气长输管道检测技术的现状与发展趋势[J].天然气工业,2004,24(11):147-150. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0976.2004.11.044.
LIU H F, HU J, YANG J. Existing state and developing trend of detection technology for long oil/gas transmission pipelines in China[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(11): 147-150.
- [8] 李睿.油气管道内检测技术与数据分析方法发展现状及展望[J].油气储运,2024,43(3):241-256. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.03.001.
LI R. Current progress and prospects of in-line inspection techniques and data analysis methods for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(3): 241-256.
- [9] 吴志平,玄文博,戴联双,李妍,常景龙,王富祥.管道内检测技术与管理的发展现状及提升策略[J].油气储运,2020,39(11):1219-1227. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.11.002.
WU Z P, XUAN W B, DAI L S, LI Y, CHANG J L, WANG F X. Development status and improvement strategy of in-line inspection technology and management[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(11): 1219-1227.
- [10] 辛佳兴,陈金忠,李晓龙,王长新,张雪伟,朱宏武.油气管道内检测技术研究前沿进展[J].石油机械,2022,50(5):119-126. DOI: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2022.05.016.
XIN J X, CHEN J Z, LI X L, WANG C X, ZHANG X W, ZHU H W. Advances in oil and gas pipeline internal inspection technology[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(5): 119-126.
- [11] 王志刚,罗清旺,师奕兵,陶爱华.铁磁性管道内涡流线圈耦合分析与管道参数检测[J].仪器仪表学报,2014,35(12):2843-2851.

- DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2014.12.024.
- WANG Z G, LUO Q W, SHI Y B, TAO A H. Analysis of eddy current coil coupling in ferromagnetic pipe and pipe's parameter detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(12): 2843-2851.
- [12] 李睿,王长新,富宽,李楠,辛佳兴,戴朝磊,等.油气管道裂纹涡流检测探头的研制[J].无损检测,2023,45(2):60-65. DOI: 10.11973/wsjsj.202302013.
- LI R, WANG C X, FU K, LI N, XIN J X, DAI C L, et al. Development of eddy current probe for crack inspection of oil and gas pipelines[J]. Nondestructive Testing, 2023, 45(2): 60-65.
- [13] ROSADO L S, SANTOS T G, RAMOS P M, VILAÇA P, PIEDADE M. A differential planar eddy currents probe: fundamentals, modeling and experimental evaluation[J]. NDT & E International, 2012, 51: 85-93. DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.06.010.
- [14] ROSADO L S, SANTOS T G, RAMOS P M, VILAÇA P, PIEDADE M. A differential planar eddy currents probe: fundamentals, modeling and experimental evaluation[J]. NDT & E International, 2012, 51: 85-93. DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.06.010.
- [15] ROMERO-ARISMENDI N O, PÉREZ-BENÍTEZ J A, RAMÍREZ-PACHECO E, ESPINA-HERNÁNDEZ J H. Design method for a GMR-based eddy current sensor with optimal sensitivity[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 314: 112348. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112348.
- [16] MUSSATAYEV M, YI Q J, FITZGERALD M, MAES V K, WILCOX P, HUGHES R. Directional eddy current probe configuration for in-line detection of out-of-plane wrinkles[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 268: 111048. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.111048.
- [17] 冯一璟.基于旋转电磁场的油气管道裂纹检测方法与技术研究[D].北京:中国石油大学(北京),2019.
- FENG Y J. Research on crack detection method and technology of oil and gas pipeline based on rotating electromagnetic field[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [18] PIAO G Y, GUO J B, HU T H, DENG Y M, LEUNG H. A novel pulsed eddy current method for high-speed pipeline inline inspection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 295: 244-258. DOI: 10.1016/j.sna.2019.05.026.
- [19] 许鹏,耿明,方舟,朱晨露,曾泓茗,王平.基于复合电磁的高速轨道缺陷检测方法研究[J].机械工程学报,2021,57(18):57-65. DOI: 10.3901/JME.2021.18.057.
- XU P, GENG M, FANG Z, ZHU C L, ZENG H M, WANG P. Study on high-speed rail defect detection method based on combination of EC and MFL testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18): 57-65.
- [20] 杨雨沛.基于差分平面涡流传感器的管道缺陷内检测技术研究[D].成都:电子科技大学,2022.
- YANG Y P. Research on inner detection technology of pipeline defects based on differential planar eddy current sensors[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [21] 邹继斌,刘宝廷,崔淑梅,郑萍.磁路与磁场[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998:21-26.
- ZOU J B, LIU B T, CUI S M, ZHENG P. Magnetic circuit and magnetic field[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998: 21-26.

(编辑:曾力波)

基金项目:“十四·五”国家重点研发计划“超大口径天然气管道磁电融合内检测技术研究及装备研制”,2022YFC3070102; 中国特检院重点项目“管道内表面缺陷检测自爬行机器人”,2022CSEI。

作者简介:宫彦双,男,1981年生,高级工程师,2005年毕业于武汉工业学院,现主要从事管道完整性方向的研究工作。地址:新疆库尔勒市建设路辖区石化大道26号中国石油天然气股份有限公司塔里木油田公司研发中心,841000。电话:13667536110。Email: gongys-tlm@petrochina.com.cn

- Received: 2023-10-23
- Revised: 2023-11-29
- Online: 2024-04-29

