doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.12.008

检验与维护

剩磁与涡流耦合增强的油气管道裂纹内检测试验研究

陈金忠[1,2],韩文博[3],辛佳兴[1,2],吴胜平[4,5],陈　潇[4,5],马殿国[1]

(1.中国特种设备检测研究院,北京 100029;2.国家市场监督管理总局技术创新中心(油气管道与储存设备安全),北京 100029;3.中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司,新疆巴音郭楞 841003;4.江苏省特种设备安全监督检验研究院,南京 214429;5.江苏省市场监管技术创新中心(油气储运设施安全运维),南京 210036)

摘　要:裂纹是油气管道中的严重缺陷,会显著降低油气管道的结构强度,增加泄漏或断裂发生的概率,对输送安全构成严重威胁。针对上述问题,根据铁磁性材料磁偶极子模型和磁导率扰动检测理论,提出一种基于剩磁与涡流耦合效应的裂纹检测方法。通过搭建裂纹动态扫查试验平台,开展带剩磁和无剩磁条件下的裂纹检测试验,提出快速傅里叶变换信号处理方法,对比分析内、外表面裂纹涡流响应信号的波形变化特征。结果表明,相较于单一涡流检测,本方法对内表面裂纹深度和宽度的检测信号峰峰值分别提高了136.78%和148.32%;同时,该方法突破了趋肤效应的限制,对外表面裂纹展现出良好的检测能力。研究可为油气管道裂纹内检测装备的研发提供关键的理论与试验依据。

关键词:油气管道;内检测;涡流;剩磁;裂纹

中图分类号:TH49;TG115.28　　**文献标志码:**B

Experimental study on remanent magnetism and eddy current coupling enhancement for crack in-line inspection in oil and gas pipeline

CHEN Jinzhong[1,2],HAN Wenbo[3],XIN Jiaxing[1,2],WU Shengping[4,5],CHEN Xiao[4,5],MA Dianguo[1]

(1.China Special Equipment Inspection & Research Institute,Beijing 100029,China;2.Technology Innovation Center of Oil and Gas Pipeline and Storage Equipment Safety,State Administration for Market Regulation,Beijing 100029,China;3.PetroChina Tarim Oilfield Company,Bayingolin 841003,China;4.Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province,Nanjing 214429,China;5.Jiangsu Provincial Market Regulation Technology Innovation Center(Oil and Gas Storage and Transportation Facility Safety Operation and Maintenance),Nanjing 210036,China)

Abstract: Cracks are critical defects in oil and gas pipelines, significantly reducing structural strength of the pipelines and increasing the probability of leakage or fracture, which poses a serious threat to transmission safety. In response to the above problems, based on the magnetic dipole model and magnetic permeability perturbation detection theory for ferromagnetic materials, a crack detection method utilizing the coupling effect between remanent magnetism and eddy current was proposed. By establishing a dynamic scanning experimental platform for cracks, crack detection tests under both remanent and non-remanent magnetism conditions were carried out. A signal processing approach using the fast Fourier transform (FFT) was introduced to compare and analyze the waveform characteristics of eddy current response signals for both internal and external surface cracks. The results demonstrate that, compared with the single eddy current method, the proposed method enhances the peak-peak values for internal surface crack depth and width by 136.78% and 148.32%, respectively. At the same time, the method overcomes the limitations of the skin effect and exhibits good detection capability for external surface cracks. This study can provide key theoretical and experimental support for the development of internal inspection equipment for crack detection in oil and gas pipelines.

Key words:oil and gas pipeline;in-line inspection;eddy current;remanent magnetism;crack

收稿日期:2025-06-18　**修回日期:**2025-11-28

基金项目:国家重点研发计划课题(2023YFF0615101);国家重点研发计划课题(2023YFC3010502);国家市场监督管理总局科技计划项目(2024MK038,2024MK214)

0 引言

近年来，我国油气管网建设高速发展，《中长期油气管网规划》指出，到2025年底，中国油气管网规模预计将达到24万公里[1]。随着管道服役年限增加和外部环境变化，管道事故发生率逐年上升[2]，可能引发严重的经济损失和环境污染[3]。管道内检测技术通过智能检测设备，精准获取管壁腐蚀、裂纹、壁厚减薄、几何变形及应力集中等缺陷信息，为科学评估管道结构完整性、识别风险与安全运维提供关键依据，已成为保障油气管道安全运行的核心手段[4-6]。主流的管道内检测技术包括漏磁检测（MFL）、涡流检测（ECT）、超声检测（UT）等。

经过数十年发展，电磁声内检测技术已在管道完整性管理中发挥不可替代的作用，但仍面临检测机理本身带来的若干挑战。漏磁检测对体积型缺陷有较高检出率，但难以检出裂纹类缺陷[7]；涡流检测具有分辨率高、响应速度快、无需耦合剂等优点，但在高频激励下缺陷深度的检出能力不足，且不具备管道外壁缺陷的检测能力；超声检测需要耦合剂，不适用于天然气管道的在线检测。此外，剩磁检测通常在实施管道漏磁内检测后开展，通过提取缺陷位置处的局部磁回路来识别缺陷信息，因此单一的剩磁检测信号信噪比较低，尚未在油气管道内检测工程中推广应用。

为克服涡流检测中的趋肤效应并提升检测能力，XU等[8]提出了一种基于多物理场耦合的铁路无损检测新方法，通过同步采集MFL与ECT信号，构建了三维磁-涡流联合特征空间，显著提升了对表面裂纹和埋藏缺陷的识别能力。李伟等[9]构建了交变磁场测量-电磁超声协同检测系统，通过解耦铝板缺陷引发的涡流磁场畸变与超声横波模态转换特征，建立了缺陷深度的双参数反演模型，并证实该模型对铝板的表面裂纹和近表面气孔具有显著量化优势。GUO等[10]开发了一种脉冲涡流与电磁超声协同检测系统，通过分析涡流衰减时间常数与超声横波走时偏移量的耦合关系，实现了管道壁厚和焊缝表面缺陷的同步量化检测。MISHAKIN等[11]提出了一种超声相控阵与多频涡流融合检测方法，通过测量纵波声速变化率和归一化阻抗相位角的协变关系，定量评估奥氏体不锈钢的晶间腐蚀损伤。CHANG等[12]开发了一种基于交流电磁场与超声的复合检测系统，通过融合漏磁场垂直分量与衍射-回波渡越时间，在2 mm深的45#钢和铝板中，实现了表面裂纹与内部缺陷的同步定量评估。

然而，现有电磁-超声复合检测方法大多依赖外部激励源与声波耦合机制，系统结构复杂，对信号处理的要求较高，在长距离、介质随流的管道动态检测环境中适用性受限。多频涡流检测技术在静态场景下具备管道内、外缺陷检测能力，但其动态响应特性与穿透深度难以兼顾：低频涡流分量响应速度慢、信号幅值弱，无法满足高速（数米/秒）工况下信号实时采集需求；高频涡流分量趋肤效应明显，电磁场渗透深度不足[13]。

综上所述，为了突破涡流检测的限制，提出一种基于铁磁性材料磁偶极子和磁导率扰动检测理论的管道缺陷检测方法，搭建涡流裂纹动态扫查试验平台，开展剩磁和非剩磁条件下的涡流裂纹检测对比试验，探究内、外表面裂纹在剩磁耦合涡流与单一涡流作用下的响应信号波形变化特征。研究结果可为油气管道裂纹内检测装备的研发提供关键的理论与试验依据。

1 剩磁与涡流耦合检测机理

1.1 铁磁性材料的μ-H曲线

图1示出铁磁性材料的B-H和μ-H曲线。铁磁性材料内部包含大量的磁畴结构。无外磁场作用时，各磁畴取向随机，磁效应相互抵消，材料整体不显磁性。在外加磁场作用下，磁畴发生定向偏转，沿外磁场方向的磁畴数量增加。微观上，磁畴壁的移动与磁矩转动受交换能、磁晶各向异性能等多种能量因素的影响，导致磁导率μ与磁场强度H间存在复杂的非线性映射关系[14]。

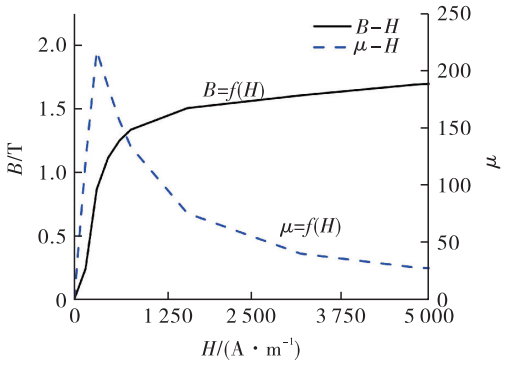


图1 铁磁性材料的B-H和μ-H曲线

Fig.1 B-H and μ-H curves of ferromagnetic materials

从磁荷理论角度来看，铁磁性材料在外磁场中被磁化时，内部磁偶极子有序排列。由于相邻

磁偶极子正负极相互抵消，仅在材料端面出现等效的正负磁荷。假设外加磁场强度为H_0时，通过下式计算缺陷2个壁面的磁荷密度为σ_s。

$$\sigma_s = H_0 \pi n \tan n \frac{(\mu-1)}{(n+\mu)} \tag{1}$$

$$n = d/w \tag{2}$$

式中，σ_s为磁荷密度，A/m；H_0为外加磁场强度，A/m；d为缺陷深度；w为缺陷宽度。

由式(1)可知，当外磁场与缺陷尺寸一定时，磁荷密度σ_s是材料磁导率的映射。缺陷壁面磁荷在铁磁性材料内部任意点处，所产生的磁场H_b的分量公式如下[15-16]：

$$\begin{cases} H_{bx}(x_0,y_0) = \dfrac{\sigma_s}{2\pi\mu}\left[\tan^{-1}\dfrac{d(x_0+w)}{(x_0+w)^2+y_0(y_0+d)} - \tan^{-1}\dfrac{d(x_0-w)}{(x_0-w)^2+y_0(y_0+d)}\right] \\ H_{by}(x_0,y_0) = \dfrac{\sigma_s}{4\pi\mu}\ln\dfrac{\left[(x_0+w)^2+(d+y_0)^2\right]\left[(x_0-w)^2+y_0^2\right]}{\left[(x_0+w)^2+y_0^2\right]\left[(x_0-w)^2+(d+y_0)^2\right]} \end{cases} \tag{3}$$

去除外磁场后，铁磁性材料仍会保留部分磁性，该剩余磁场称为剩磁，用H_w表示。对于含缺陷的剩磁材料，内部任意点处的总磁场强度为缺陷壁面磁荷所产生的磁场H_b与剩磁H_w的矢量叠加：

$$H_a = H_b + H_w \tag{4}$$

由式(4)可知，在缺陷底面上方的材料内部，磁荷产生的磁场方向和外加磁场方向相同，矢量叠加后形成一个增强的磁场H_a，对应的磁导率变为μ_a。

1.2 剩磁与涡流耦合信号分析

忽略位移电流的影响，涡流场强度满足以下方程：

$$\begin{cases} \nabla^2 H = j\omega\mu\sigma H \\ \omega = 2\pi f \\ \mu = \mu_0\mu \end{cases} \tag{5}$$

式中，∇^2为拉普拉斯算子；H为材料内部的磁场强度矢量，A/m；j为虚数单位；ω为角频率，rad/s；σ为材料的电导率，S/m；f为激励频率，Hz。

对于半无限大导体表面下方，深度z处的涡流场强度$J(z)$可表示如下：

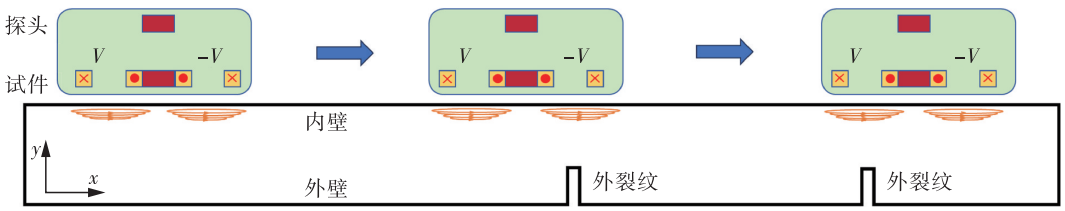
$$J(z) = J_0 e^{(-z/\delta)} e^{(-jz/\delta)} \tag{6}$$

$$\delta = \sqrt{1/(\pi f\mu\sigma)} \tag{7}$$

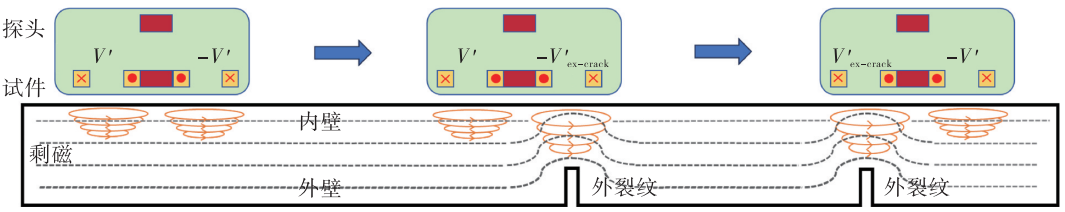
式中，J_0为导体表面的涡流密度幅值，A/m²；z为从导体表面算起的深度，m；δ为涡流标准渗透深度，m。

在进行管道内检测时，涡流检测探头可直接获取内表面缺陷的尺寸信息；在剩磁条件下，可通过检测内表面磁导率异常，间接识别外表面缺陷信息。

图2示出外表面裂纹检测对比。



(a)涡流裂纹检测



(b)剩磁与涡流耦合裂纹检测

图2 外表面裂纹检测对比

Fig.2 Comparison of external crack detection

图2(a)中，由于趋肤效应，涡流集中在管道内表面，涡流探头难以感应外表面缺陷信息，差分信号不包含裂纹特征。图2(b)中，当探头扫过带剩磁的外表面裂纹试件时，若探头位于无缺陷区域，两侧接收线圈感应电压大小相等、方向相反，差分信号为0；当外表面裂纹位于右侧接收线圈下方时，其近表面区域磁导率受裂纹影响发生变化，右侧线圈输出感应电压$-V'_{ex-crack}$，左侧接收线圈输出感应电压V'，此时探头输出差分信号$V'+-V'_{ex-crack}$。同理，若裂纹位于左侧接收线圈下方，则输出差分信号$-V'+V'_{ex-crack}$。因此，探头扫过剩磁条件下的含外表面裂纹试件，探头输出的差分信号将携带外表面裂纹的特征信号，理论上在剩磁场作用下，涡流探头将具备外表面裂纹的检测能力。

2 剩磁与涡流耦合试验

2.1 试验系统

图3示出剩磁与涡流耦合裂纹检测试验系统。该系统主要包括涡流检测探头、AFG31000系列信号发生器、直流稳压电源、锁相放大器、三轴工作台、含不同尺寸裂纹的X80(饱和磁化强度约为2.1 T，剩磁强度约为1.03 T)管道钢试件、NI USB-6211信号采集卡、采集程序和上位机(PC端)。

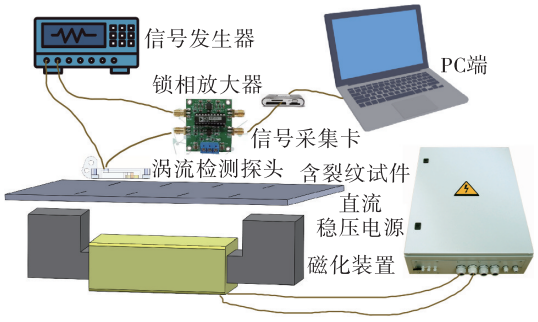
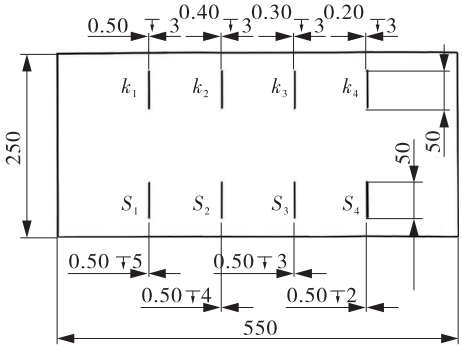


图3 剩磁与涡流耦合裂纹检测试验系统

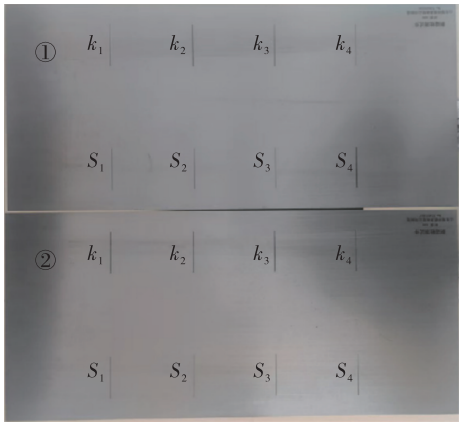
Fig.3 Residual magnetism and eddy current coupled crack detection experimental system

为提取有效的涡流响应信号，采用锁相放大器对探头输出信号进行处理。锁相放大器基于相敏检测(PSD)与窄带滤波原理：首先将输入信号与参考信号混频，将0.1 MHz载波变频至基带；随后通过四阶Butterworth低通滤波器(截止频率1 Hz，滚降速率-24 dB/oct)抑制噪声；最终输出与涡流扰动幅度和相位相关的直流电压信号。

为验证剩磁与涡流耦合方法对裂纹检测能力的提升效果，设计并加工含不同宽度与深度裂纹的试件，如图4所示。试件①与试件②尺寸完全一致，裂纹长度均为50 mm。k_1，k_2，k_3，k_4固定深度为3 mm，宽度分别为0.5，0.4，0.3，0.2 mm；S_1，S_2，S_3，S_4固定宽度为0.5 mm，深度分别为5，4，3，2 mm。



(a)试件二维图纸



(b)试件实物图

图4 含缺陷试件

Fig.4 Specimen with defects

2.2 测试步骤

通过对比磁化与非磁化条件下，铁磁性试件的裂纹检测效果，分析剩磁对涡流检测的影响，具体步骤如下。

(1)设置剩磁条件：使用磁化装置对试件①进行直流磁场饱和磁化，断电后保留剩磁；试件②不作磁化处理。

(2)连接试验系统：信号发生器CH1输出频率0.1 MHz、幅值4.5 V的正弦信号激励涡流探头；CH2输出同频同相的0.1 V参考信号至锁相放大器；锁相放大器处理探头差分信号并输出直流电压信号，经信号采集卡模数转换后上传至PC端。

（3）扫描试件①：控制三轴平台以20 mm/s速度，带动探头分别扫描试件①正、反两面的不同宽度与深度裂纹。

（4）扫描试件②：在相同条件下扫描未磁化试件②的对应裂纹区域。

（5）信号处理与分析：对采集的原始信号进行降噪与峰值提取，通过对比磁化与非磁化条件下的检测结果，评估剩磁对涡流裂纹检测的影响。

3 结果与分析

3.1 信号处理

在裂纹检测试验中，为完整捕捉信号特征，通常设置较高采样率，但这会导致数据量庞大、辨识度下降，并增加后续分析的复杂度。为此，采用均匀采样方法对原始数据序列进行降维处理：按固定间隔选取样本，在保留信号趋势特征的前提下剔除冗余数据，既避免图像混淆与过拟合风险，又显著降低计算负担。

对原始数据序列$x[n]$，均匀采样过程可表示如下：

$$x_{\text{sampled}[k]}=x[k\cdot d] \tag{8}$$

试验中因传感器抖动与试件表面粗糙度等因素，引入的非目标噪声会掩盖真实裂纹响应。为此，采用基于快速傅里叶变换（FFT）的平滑降噪方法，通过抑制噪声、增强特征，从受污染信号中准确提取裂纹有效信息，提升检测可靠性。

FFT是离散傅里叶变换（DFT）的高效算法，可将离散时域信号转换为频域信号进行分析。对长度为N的离散信号序列$x[n]$，其DFT定义如下：

$$X[k]=\sum_{n=0}^{N-1}x[n]\cdot \mathrm{e}^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \tag{9}$$

利用DFT的周期性与对称性，可将长度为N的DFT分解为2个长度为$N/2$的DFT之和，分别对应偶数下标与奇数下标序列：

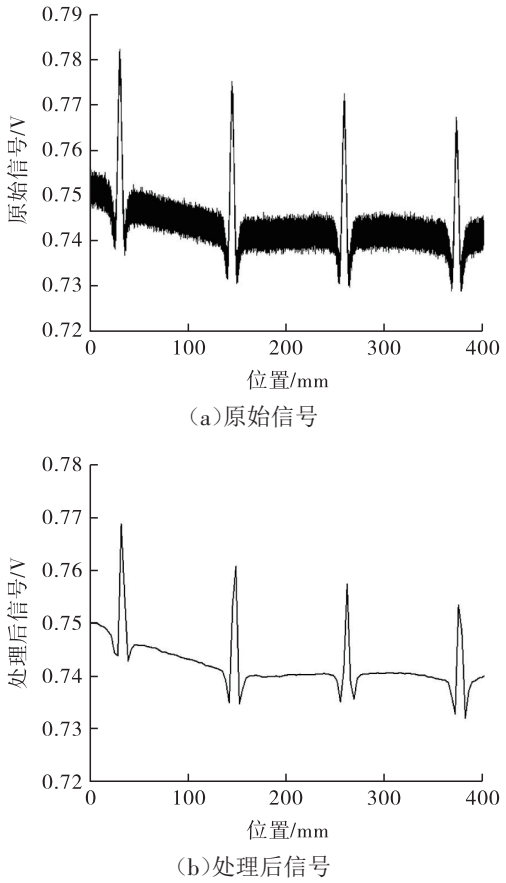
$$X[k]=X_{even}[k]+W_N^k\cdot X_{odd}[k] \tag{10}$$

$$W_N^k=\mathrm{e}^{-j\frac{2\pi}{N}k} \tag{11}$$

式中，W_N^k为旋转因子。

递归执行上述分解与合并过程，可实现FFT的高效计算。

图5示出信号处理前后的对比效果。可以看出，经采样与降噪后，大量无关噪声和冗余数据被有效抑制。处理后信号与原始信号的均方根误差约为0.608%，表明在去除冗余数据的同时，关键特征信息得到保留。



（a）原始信号

（b）处理后信号

图5 信号处理对比

Fig.5 Comparison of signal processing

3.2 结果与讨论

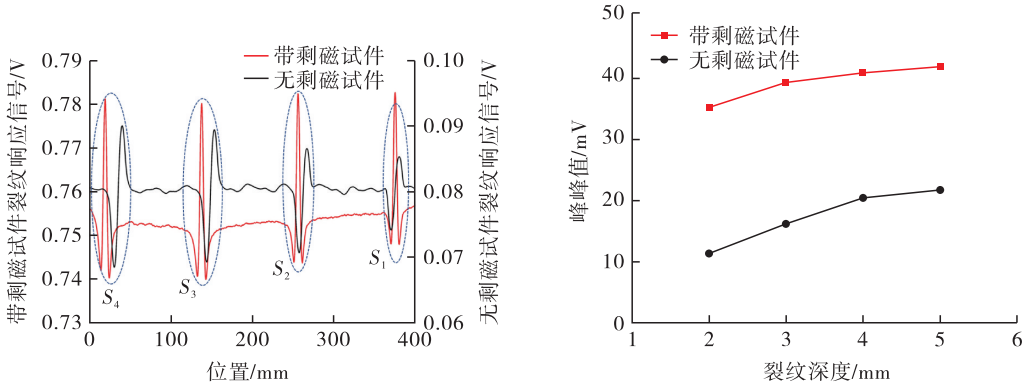
3.2.1 不同深度裂纹响应信号变化规律

涡流探头分别对带剩磁与无剩磁条件下的试件（S_1，S_2，S_3，S_4）进行扫查，检测其内、外表面裂纹，以探究有无剩磁和裂纹深度对响应信号的影响规律。

图6示出不同深度内表面裂纹响应信号。其中，图6（a）为探头在带剩磁与无剩磁条件下，扫查外裂纹试件时的响应信号。由图可知，对管道内裂纹进行检测时，2种涡流响应信号波形均发生了显著的变化。在无剩磁条件下，内表面裂纹响应信号表现为单峰单谷特征；在带剩磁条件下，裂纹处两侧的剩磁强度较强，导致信号形态演变为双谷单峰特征。

由图6（b）可以看出，无论是否磁化，裂纹信号的峰峰值均随裂纹深度增加而上升。对于无剩磁试件，其裂纹特征信号峰峰值分别为11.17，15.93，20.14，21.41 mV；带剩磁试件的信号峰峰值分别为

34.74，38.75，40.27，41.30 mV。分析表明，相较于单一涡流检测，剩磁–涡流耦合响应信号的峰峰值平均提升了136.78%，说明剩磁引起的磁导率异常与缺陷耦合作用，显著增强了涡流畸变程度。



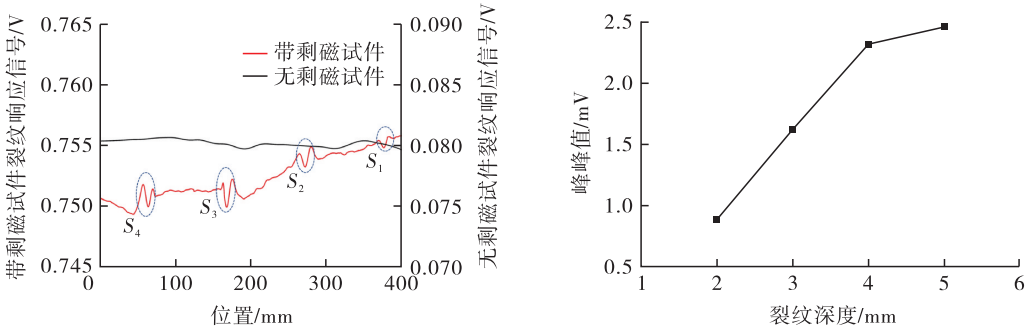
（a）响应信号　　（b）峰峰值

图6　不同深度内表面裂纹响应信号

Fig.6　Response signals of internal surface cracks under different depths

图7示出不同深度外表面裂纹响应信号。由图7(a)可以看出，无剩磁试件未产生有效的信号响应，表明单一的涡流检测技术受到趋肤效应的限制，对外表面裂纹不具备检测能力。涡流探头扫查带剩磁试件时，出现裂纹响应信号并表现为典型的单谷特征，表明在带剩磁条件下，外表面裂纹影响内表面磁导率的分布，进而引起涡流场畸变。

由图7(b)可以看出，外表面裂纹响应信号的峰峰值随裂纹深度增加而增大，各试件峰峰值分别为0.88，1.62，2.32，2.46 mV。尽管响应信号峰峰值远低于内表面裂纹，但剩磁对涡流的增强作用突破了趋肤效应的限制，可以通过内表面磁导率异常间接提取外表面裂纹信息。



（a）响应信号　　（b）峰峰值

图7　不同深度外表面裂纹响应信号

Fig.7　Response signals of external surface cracks under different depths

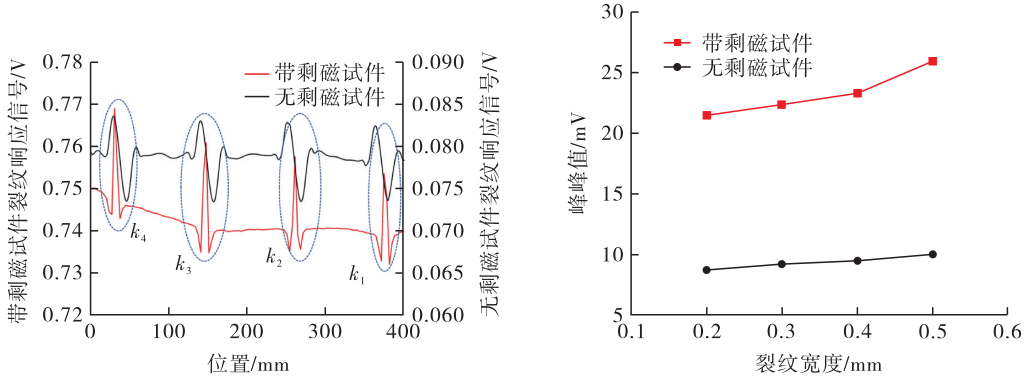
3.2.2　不同宽度裂纹响应信号变化规律

为探究有无剩磁和裂纹宽度对响应信号的影响规律，分别对带剩磁与无剩磁条件下的试件（k_1，k_2，k_3，k_4）进行内、外表面扫查。

图8示出不同宽度内表面裂纹的响应信号。由图8(a)可以看出，有无剩磁条件下，探头对内表面裂纹均产生响应，但信号波形特征存在明显差异：无剩磁条件下，响应信号呈典型的单峰单谷特征；在带剩磁条件下，信号演变为双谷单峰特征。由图8(b)可以看出，无论是否磁化，响应信号峰峰值均随裂纹宽度增加而逐渐增大。对于无剩磁试件，裂纹响应信号峰峰值分别为8.72，9.23，9.51，10.02 mV；对于带剩磁试件，裂纹响应信号峰峰值分别为21.47，22.36，23.31，25.93 mV。以上定量对比表明，相较于单一涡流检测，剩磁–涡流耦合方法使响应信号峰峰值平均提升了148.32%，显著增强了对内表面裂纹的检测能力。

图9示出不同宽度外表面裂纹响应信号。由图9(a)可以看出，涡流检测探头扫过带剩磁试件时，发现明显的信号畸变特征，而无剩磁试件由于

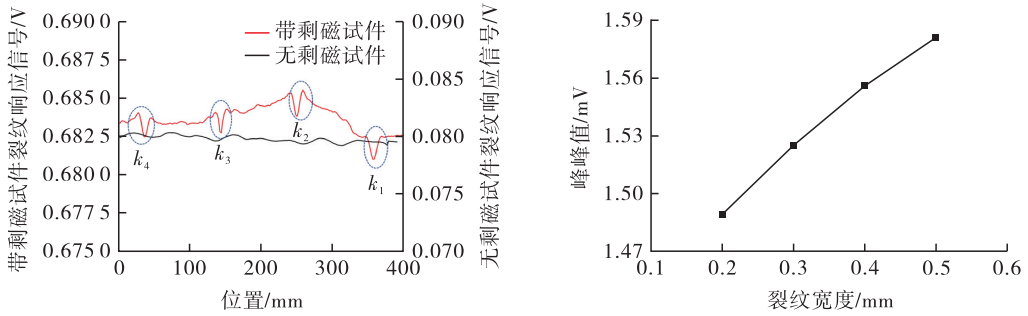
涡流场的趋肤效应，未产生明显的信号变化。由图9(b)可以看出，响应信号峰峰值分别为1.49，1.53，1.56，1.58 mV，外表面裂纹响应信号峰峰值与裂纹宽度正相关。



(a)响应信号 (b)峰峰值

图8 不同宽度内表面裂纹响应信号

Fig.8 Response signals of internal surface cracks under different widths



(a)响应信号 (b)峰峰值

图9 不同宽度外表面裂纹响应信号

Fig.9 Response signals of cracks on the outer surface under different widths

4 结论

本文提出一种基于剩磁与涡流耦合的油气管道裂纹检测方法，该方法利用铁磁性材料的剩磁特性，通过外表面缺陷引发的材料内部磁导率扰动，间接映射于涡流内检测信号，并开展系统性对比试验研究，主要结论如下。

(1)剩磁显著提升了涡流检测灵敏度。相较于单一涡流检测，剩磁-涡流耦合检测方法对不同深度裂纹的响应信号峰峰值平均提升了136.78%，对不同宽度裂纹的响应信号峰峰值平均提升了148.32%，表明剩磁扰动了材料内部的磁导率分布状态，放大了涡流检测时，裂纹磁场的畸变程度。

(2)剩磁与涡流耦合突破了趋肤效应。试验表明该耦合方法能够有效识别最小宽度0.2 mm、深度3 mm的外表面裂纹，形成了对管道内、外表面裂纹的全覆盖检测能力。

(3)研究为新型管道内检测器的开发提供参考。一是在完成漏磁检测后，利用管道中既有剩磁，直接实施剩磁-涡流耦合检测，以低成本实现裂纹精准识别；二是在漏磁检测节后集成涡流检测节，单次检测同步识别体积型与裂纹缺陷。

在实际部署过程中仍面临若干工程挑战，主要包括检测器长度与重量增加，导致通过性下降、高速振动工况下信号采集的稳定性差，以及管道材质、焊接、历史磁化等因素导致的剩磁场分布异常，影响涡流信号的波形特征，增加缺陷的误判风险。

参考文献：

[1] 《中长期油气管网规划》发布[J].天然气工业，2017,37(7):114.
The release of "medium and long-term oil and gas pipeline network planning"[J].Natural Gas Industry,2017,37(7):114.

[2] 陈金忠，刘三江，周汉权，等.智慧管道时代的检测数据综合应用[J].压力容器，2020,37(11):70-78.

CHEN J Z，LIU S J，ZHOU H Q，et al.Comprehensive application of inspection data in the age of smart pipeline [J]. Pressure Vessel Technology，2020，37(11)：70-78.

[3] 郭崇.浅析《油气输送管道完整性管理规范》[J].中国石油和化工标准与质量，2020，40(18)：14-15.
GUO C.A brief analysis of the "integrity management specification for oil and gas transmission pipelines" [J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality，2020，40(18)：14-15.

[4] 辛佳兴，陈金忠，李晓龙，等.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.
XIN J X，CHEN J Z，LI X L，et al.Advances in oil and gas pipeline internal inspection technology [J]. China Petroleum Machinery，2022，50(5)：119-126.

[5] 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.
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.

[6] 田野，陈海艳，胡江锋，等.基于平衡电磁的管道裂纹内检测技术研究与应用[J].压力容器，2024，41(7)：63-70.
TIAN Y，CHEN H Y，HU J F，et al. Research and application of internal crack detection technology in pipeline based on balanced electromagnetic technology [J]. Pressure Vessel Technology，2024，41(7)：63-70.

[7] 杨理践，石萌，耿浩.长输油气管道内检测技术[J].沈阳工业大学学报，2024，46(5)：676-684.
YANG L J，SHI M，GENG H. Internal detection technology of long-distance oil and gas pipeline [J]. Journal of Shenyang University of Technology，2024，46(5)：676-684.

[8] XU P，CHEN Y X，LIU L L，et al.Study on high-speed rail defect detection methods based on ECT，MFL testing and ACFM [J]. Measurement，2023，206：112213.

[9] 李伟，邵鑫宇，张伯莹，等.交流电磁场和电磁超声复合无损检测技术研究[J].机械工程学报，2022，58(16)：153-159.
LI W，SHAO X Y，ZHANG B Y，et al. Research on composite ACFM and EMAT nondestructive testing technology [J]. Journal of Mechanical Engineering，2022，58(16)：153-159.

[10] GUO W，GAO B，TIAN G Y，et al.Physic perspective fusion of electromagnetic acoustic transducer and pulsed eddy current testing in non-destructive testing system [J]. Philosophical Transactions A，2020，378(2182)：20190608.

[11] MISHAKIN V V，KLYUSHNIKOV V A，GONCHAR A V，et al. On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring [J]. International Journal of Engineering Science，2019，135：17-22.

[12] CHANG J L，CHU Z Q，GAO X Y，et al. A magnetoelectric-ultrasonic multimodal system for synchronous NDE of surface and internal defects in metal [J].Mechanical Systems and Signal Processing，2023，183：109667.

[13] PIAO G Y，GUO J B，HU T H，et al.A novel pulsed eddy current method for high-speed pipeline inline inspection [J]. Sensors and Actuators A：Physical，2019，295：244-258.

[14] 辛佳兴.油气管道内壁缺陷交变励磁检测方法研究[D].北京：中国石油大学(北京)，2023.
XIN J X.Research on alternating excitation detection methods for internal wall defects in oil and gas pipelines [D]. Beijing：China University of Petroleum (Beijing)，2023.

[15] DENG Z Y，LIAN G Z，TU J，et al. Magnetic permeability perturbation testing based on unsaturated DC magnetization for buried defect of ferromagnetic materials [J].Journal of Nondestructive Evaluation，2022，41(4)：1-11.

[16] DENG Z Y，SUN Y H，KANG Y H，et al. A permeability-measuring magnetic flux leakage method for inner surface crack in thick-walled steel pipe [J]. Journal of Nondestructive Evaluation，2017，36(4)：68.

作者简介：陈金忠(1981)，男，正高级工程师，主要从事油气管道电磁无损检测技术研究及装备研发工作，通信地址：100029北京市朝阳区和平街西苑2号中国特种设备检测研究院，E-mail：cchenbeiter@aliyun.com。

通信作者：辛佳兴(1994)，男，工程师，主要从事油气管道电磁无损检测技术研究及装备研发工作，通信地址：100029北京市朝阳区和平街西苑2号中国特种设备检测研究院，E-mail：jiaxingxin_cup@163.com。

本文引用格式：
陈金忠，韩文博，辛佳兴，等.剩磁与涡流耦合增强的油气管道裂纹内检测试验研究[J].压力容器，2025，42(12)：64-71.
CHEN Jinzhong，HAN Wenbo，XIN Jiaxing，et al.Experimental study on remanent magnetism and eddy current coupling enhancement for crack in-line inspection in oil and gas pipeline[J].Pressure Vessel Technology，2025，42(12)：64-71.