

埋地油气管道缺陷金属磁记忆检测研究评述

沈青¹, 陈峰华¹, 李旭光¹, 郑磊¹, 高志贤², 丁继峰², 王亮^{2*}

(1.北京中航油工程建设有限公司, 北京 100012;

2.青岛钢研纳克检测防护技术有限公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 从金属磁记忆检测原理出发, 详细介绍了埋地管道常见缺陷的磁检测法的发展现状, 系统概括了缺陷分类方法、数据信号处理和缺陷反演方法等方面的研究进展, 总结了针对不同工况、不同缺陷的磁测仪器开发的研究进展。讨论了埋地管道磁法检测目前的发展现状, 提出了未来的研究方向, 为埋地油气管道在线检测技术的开发和应用提供了参考。

关键词: 金属磁记忆检测技术; 埋地油气管道; 宏观缺陷; 缺陷反演; 仪器开发

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)11-0138-08

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2024.11.017

Research Review of Buried Oil and Gas Pipelines Defects Based on Metal Magnetic Memory Detection

SHEN Qing¹, CHEN Fenghua¹, LI Xuguang¹, ZHENG Lei¹, GAO Zhixian², DING Jifeng², WANG Liang^{2*}

(1. Beijing Aviation Oil Construction Co., Ltd., Beijing 100012, China; 2. Qingdao NCS Testing & Corrosion Protection Technology Co., Ltd., Shandong Qingdao 266071, China)

ABSTRACT: Based on the principle of metal magnetic memory detection, the development status of the magnetic detection method for common defects of buried pipelines is introduced in detail, and the research progress in defect classification method, data signal processing, and defect inversion method are systematically summarized. The progress of the research in developing magnetic measuring instruments for different working conditions and defects is summarized. The present development status of magnetic detection of buried pipelines is discussed, and the future research direction is put forward, which provides a reference for the development and application of online detection technology of buried oil and gas pipelines.

KEY WORDS: metal magnetic memory detection technology; buried oil and gas pipeline; macro defect; defect inversion; instrument development

石油是社会发展的基石, 油气管道更是国民经济的主干道。虽然管道运输是油气介质最安全的运输方式, 但目前国内的油气管道仍面临着运输途中的泄漏、易燃易爆、管道腐蚀等问题^[1-2], 这会造成严重的经济

损失和人员伤亡。由此可见, 油气的平稳输送对祖国的平稳发展、社会的和谐安定和人民的幸福生活有着重要的意义。目前, 由于施工人员水平有限、管道长距离输送以及现场环境等因素, 使得管道中的孔、坑、焊缝以

收稿日期: 2024-07-04; 修订日期: 2024-07-09

Received: 2024-07-04; Revised: 2024-07-09

引文格式: 沈青, 陈峰华, 李旭光, 等. 埋地油气管道缺陷金属磁记忆检测研究评述[J]. 装备环境工程, 2024, 21(11): 138-145.

SHEN Qing, CHEN Fenghua, LI Xuguang, et al. Research Review of Buried Oil and Gas Pipelines Defects Based on Metal Magnetic Memory Detection[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(11): 138-145.

*通信作者 (Corresponding author)

及裂纹等缺陷成为管道失效的主要原因^[3-5]。管道在线检测技术一直是近年来的热门研究问题, 管道检测技术的演变从盲目开挖到定点检查, 非接触式检测到接触式检测, 主要检测技术有电磁涡流技术^[6]、相控阵超声检测技术^[7]、漏磁检测技术等^[8]。上述方法由于存在集肤效应、受材料表面影响以及需要磁化等问题, 针对长距离油气管道的在线检测时检测成本过高、精度一般, 具有一定的局限性。

金属磁记忆检测技术是近年来发展起来的一门新型检测技术, 由于大部分埋地油气管道均为金属材料, 使得金属磁记忆检测技术在油气管道的非接触检测领域有着广阔的应用前景^[9]。金属磁记忆检测技术无需对被检材料进行表面处理, 无需激励源且绿色环保无污染, 在油气管道检测方面有较大优势。本文总结了金属磁记忆检测技术用于油气管道检测的检测原理, 分析了油气管道各类缺陷的特点、缺陷信号识别与定量研究方法, 同时还介绍了基于油气管道漏磁法传感器的发展现状, 为未来油气管道缺陷的识别和定量化分析以及仪器的开发和应用提供了参考依据。

1 基于金属磁记忆的管道检测技术概述

1997 年, Doubov^[10]首次提出了金属磁记忆检测技术的概念: 铁磁性材料在外加载荷和地磁场的作用下, 其内部会产生磁致伸缩性质的磁畴定向或不可逆的重新取向, 在宏观上表现为铁磁性材料表面出现漏磁场, 这种现象在载荷卸载后仍被保留, 材料内部的磁畴“记忆”着这种漏磁现象, 即磁记忆现象。目前, 金属磁记忆检测的微观机理主要包括 J-A 力磁耦合模型、能量守恒定律和磁偶极子模型。

1.1 J-A 力磁耦合模型

1984 年, Jiles 和 Atherton 基于接近原理和有效场理论, 提出了铁磁性材料在弹性阶段的磁化强度随着外磁场和应力变化而变化的本构方程, 即 J-A 模型^[11-12]。J-A 模型描述的是铁磁性材料在应力和外磁场作用下内部磁化强度的变化规律, 基于磁畴壁移动和旋转的思想, 利用较少的模型参数和一阶微分方程描述了应力对磁化的影响, 具体的模型如式 (1) 所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dM_{\text{irr}}}{dW} = \frac{1}{\zeta} (M_{\text{an}} - M_{\text{irr}}) \\ H_e = H_0 + \alpha M + \frac{3\sigma}{2\mu_0} \frac{d\lambda}{dM} \\ M_{\text{an}} = M_s \left[\cot h \left(\frac{H_e}{a_0} \right) - \frac{a_0}{H_e} \right] \\ \frac{dM}{d\sigma} = \frac{1}{\zeta} (M_{\text{an}} - M) \frac{\sigma}{E} + c \frac{dM_{\text{an}}}{d\sigma} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: M_{irr} 为不可逆磁化强度, A/m; W 为铁磁性材料单位体积的弹性能, Pa; ζ 为与单位体积能量有关的系数; M_{an} 为无磁滞磁化强度, A/m; H_e 为有效场, A/m; H_0 为环境磁场, A/m; α 为初始 Weiss 分子场耦合系数; M 为磁化强度, A/m; σ 为应力, Pa; λ 为磁致伸缩系数, m; a_0 为形状常数, A/m; E 为弹性模量, Pa; c 为可逆磁化系数。

1.2 能量守恒定律

当铁磁性材料受到载荷作用时, 其内部应力能增加, 根据能量最小原理, 应力能有一部分会转化为磁弹性能, 此时磁弹性能增大^[13]。为保证系统自由能最低, 系统将阻止磁弹性能增大。设饱和磁滞伸缩系数为 λ_s , 外加应力与磁化矢量方向夹角为 θ , 则磁弹性能为 E_σ ^[14]:

$$E_\sigma = -\frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cos^2 \theta \quad (2)$$

如式 (2) 所示, 当试件受到拉伸应力时, $\lambda_s \sigma$ 大于 0, 要想使磁弹性能 E_σ 最小, θ 取 0 或 π , 即磁畴将向与外加应力平行的方向平移或转动, 宏观上铁磁性试件的磁化强度发生改变。在外加磁场和应力的影响下, 材料内部微观变化导致宏观上磁特性的改变, 这种宏观磁特性的改变即漏磁场。当外加应力撤掉后, 在材料内部由应力集中产生的漏磁场仍会保留, 这种现象称为“磁记忆”现象^[15]。

1.3 磁偶极子模型

磁偶极子模型被用来模拟带缺陷的铁磁性材料在空间中任意一点的漏磁场强度, 磁偶极子理论认为, 带有缺陷的铁磁性试件, 在地磁场的作用下, 缺陷两侧有磁力线溢出试件。在磁力线从缺陷一侧穿出、另一侧穿入的过程中, 缺陷两侧形成磁极, 磁极可等效为等量异种磁荷。漏磁场是由在缺陷两侧的等量异种磁荷产生, 而这种现象可由磁偶极子模型模拟^[16], 其原理如图 1 所示。

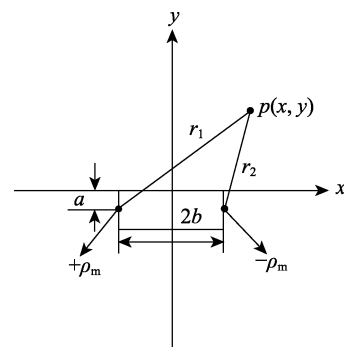


图 1 磁偶极子原理
Fig.1 Magnetic dipole principle

根据磁偶极子理论, 试件两端的等量异种磁荷在缺陷左右两侧诱导出新的磁极, 假设等量异种在深度方向上的磁荷线密度为 ρ_m 在缺陷凹槽两侧均匀分

布。对于矩形缺陷,空间中任一点 P 的漏磁场强度如式(3)所示。

$$\begin{cases} dH_1 = \frac{\rho_m da}{2\pi\mu_0 r_1^2} \vec{r}_1 = \frac{\rho_m da}{2\pi\mu_0 [(x+b)^2 + (y-a)^2]} \vec{r}_1 \\ dH_2 = \frac{\rho_m da}{2\pi\mu_0 r_2^2} \vec{r}_2 = \frac{\rho_m da}{2\pi\mu_0 [(x+b)^2 + (y-a)^2]} \vec{r}_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\vec{r}_1$ 、 $\vec{r}_2$ 向量分别为凹槽上等量异种磁荷与 P 点连线的方向,该方向指向 P 点。

1999年, Doubov 教授提出磁记忆现象可以应用于工业无损检测中。金属磁记忆检测技术是迄今为止对铁磁性构件进行早期诊断唯一行之有效的方法,油气管道中的缺陷在外加载荷和地磁场的作用下,会在缺陷周围产生漏磁场,通过对漏磁场的检测,从而对缺陷实现精准定位,最终实现对油气管道损伤的早期预警^[8]。同时,金属磁记忆检测技术受提离效应的影响较小,可以在非开挖的情况下实现损伤的定位,相比其他无损检测方法具有较大优势。

2 含有不同类型缺陷的油气管道磁检测研究进展

埋地长输油气管道在使用过程中,除外部施工作业导致的管道破裂外,管道发生泄漏的最常见形式为腐蚀导致的管道穿孔和应力导致的焊缝区域的开裂。管道腐蚀、裂纹缺陷的存在严重降低了油气管道构件的强度,是管道运行的安全隐患点,因此针对缺陷开展埋地油气管道磁记忆检测工作具有重要意义。

2.1 腐蚀缺陷检测

埋地长输油气管道的腐蚀通常以外腐蚀为主,影响埋地长输油气管道外腐蚀的主要因素有土壤电阻率、pH 值、含氧量、含水率以及含盐量等。另外,随着地铁、高铁和高压输电线路的兴建,土壤中的交、直杂散电流对埋地长输油气管道腐蚀的影响也越来

越多。从整体腐蚀形貌来看,腐蚀分为单点腐蚀和多点群腐蚀(如图2所示),腐蚀面积和体积的增加将严重威胁管道安全运行。

基于此,大量学者针对管道腐蚀缺陷开展了研究。中国石油大学熊毅等^[17]将含缺陷管道磁化至3个不同状态,研究励磁强度对漏磁信号的影响。结果表明,3个磁化阶段的分界点与缺陷深度有关,3个不同的磁化状态可以有效衡量励磁强度对漏磁信号的影响。沈阳工业大学刘斌等^[18]建立了管道复合缺陷的漏磁检测信号的分析模型,定量计算了复合缺陷的漏磁信号特性,研究了应力对漏磁信号的影响。结果表明,铁磁体的饱和磁化强度随应力的增加呈指数级下降,当使用漏磁信号来判断缺陷深度时,由于应力会导致对缺陷深度的低估,因此一定会明确缺陷周围是否有应力集中现象。田野^[19]基于 J-A 模型建立了管道磁化强度与应变的关系,并进行了试验验证。结果表明,当管体发生塑性变形时,会出现磁化反转现象,利用该特征可以判断管道应力集中处是否发生塑性应变。浙江大学包胜等^[20]通过拉伸试验,研究了残余磁场(RMF)的法向分量与缺陷深度和外加载荷之间的关系,将 X70 管道钢加工成6种深度和3种间隔的双重缺陷试样。结果表明,从试样前后获得的法向磁场参数能够检测到缺陷的深度,两者之间的线性关系的斜率随缺陷间距的增加而增大,管道钢的缺陷深度是可以计算的。董志军等^[21]采用自设计的杂散电流模拟系统进行了腐蚀评价试验,研究了杂散电流对镁合金腐蚀行为的影响。研究发现,随着时间的延长,矿坑发展为严重的局部腐蚀,腐蚀速率加快,杂散电流促进了腐蚀膜的破裂,因此杂散电流显著加速了镁合金的腐蚀速率。北京交通大学姚凯课题组^[22]设计了电化学腐蚀系统进行了腐蚀实验,并进行了3个不同的实验,研究了腐蚀对漏磁信号的影响,以及试样表面漏磁信号的分布,建立了腐蚀深度与磁特征参数的直接关系。在相同的工作条件下,预测值与实测值之间的平均误差率为8.94%(如图3所示),该方法可用于定量评价试样的腐蚀程度。



a 单点腐蚀



b 多点群腐蚀

图2 管道腐蚀

Fig.2 Pipeline corrosion morphology: a) single point corrosion; b) multi-point group corrosion

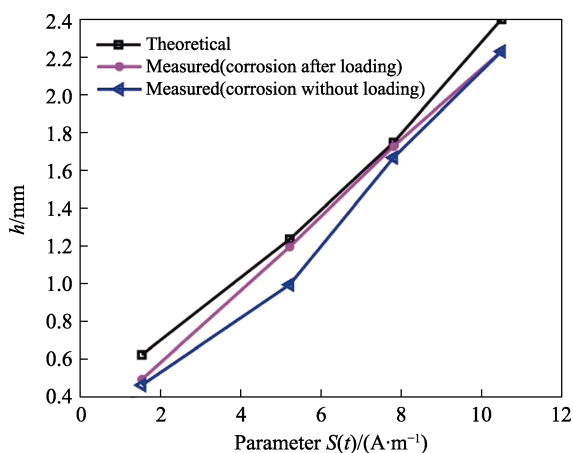


图 3 腐蚀深度测量值与理论值的比较

Fig.3 Comparison between measured and theoretical values of corrosion depth

2.2 焊缝缺陷检测

管道中的焊缝缺陷是指管道段连接处缺陷, 主要包括焊缝本身, 例如环焊缝、螺旋焊缝和直焊缝等焊缝缺陷, 以及焊缝中的裂纹、气孔和未融合等缺陷。由于焊接处的材质和管道材质不同, 且在焊接过程中焊缝受热不均匀, 在长期载荷作用下, 导致焊缝处出现应力不均匀, 空间中产生漏磁场, 管道中常见的焊缝缺陷如图 4 所示。



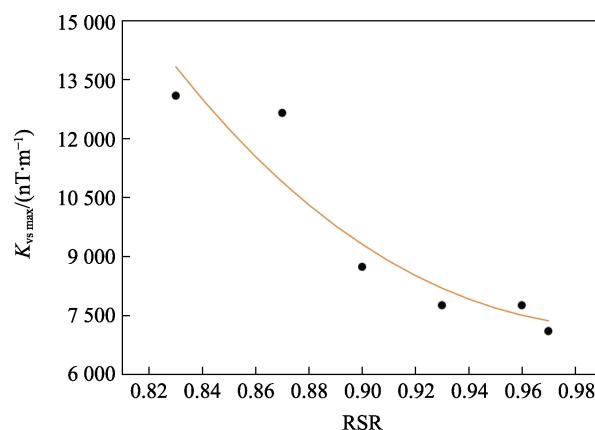
a 焊缝中的裂纹缺陷



b 环焊缝缺陷

图 4 管道中的焊缝缺陷^[23-24]Fig.4 Weld defects in pipelines^[23-24]: a) weld crack defect; b) circumferential weld defect

管道中的焊缝缺陷检测问题近年来也越发成为管道研究中的热门问题。东北大学冯建^[25]课题组提出了一种基于尺寸估计方法的特征建模解耦框架。首先, 建立一个特征提取模块, 提取无焊接信息的相对纯的缺陷特征; 其次, 构造一个反演模块, 在特征层次上解耦不同尺寸维度的信息, 实现准确的估计; 最终, 基于漏磁信号测量获得焊缝影响区域缺陷的准确尺寸。海军工程大学陈云^[26]通过对线切割后裂纹的模拟, 得到了正法分量的漏磁信号对表面的影响, 在拉力试验机上对管道构件进行拉伸, 并对管道构件表面磁记忆信号的正常分量进行了分析。研究发现, 裂纹法向分量中确实存在过零现象, 但当载荷增加到一定程度时, 随着拉拔作用出现过零现象, 过零点后不再漂移。结果表明, 不能简单地用法向分量来判断裂纹或应力集中。沈阳工业大学刘斌^[27]课题组利用线性磁偶极子模型研究了周向激励方法, 建立了管道中轴向裂纹的检测模型, 计算了漏磁信号与轴向裂纹几何特性之间的关系, 同时分析了轴向裂纹的检测精度和识别方法。结果表明, 由周向激励产生的不均匀磁场可以有效地检测管道轴向上的窄裂纹, 区分裂纹的深度和宽度特征。采用三次样条插值的光滑插值方法可以有效地减少影响。东北石油大学崔巍^[28]课题组针对环焊缝提出了一种智能评价算法, 该算法开发了管道焊接缺陷漏磁信号识别系统, 并采用反演方法对缺陷进行了量化, 形成了管道焊缝结构完整性智能评价算法体系。西南石油大学何国玺^[29]在密封管道中进行了许多水力试验, 以研究不同内压和检测高度下的磁信号, 同时建立了磁信号的数值模型, 并通过实验结果进行了验证, 最后提出了一个新的磁信号特征参数 K_{vs} 来全面反映环焊缝的应力状态, 如图 5 所示。可以看出, K_{vs} 随着 RSR 的增加而减小。

图 5 磁特征参数 K_{vs} 随应力参数 RSR 的变化关系Fig.5 Relationship between magnetic characteristic parameters K_{vs} and stress parameter RSR

3 油气管道缺陷反演方法及磁测仪器开发研究进展

油气管道在长期使用过程中, 由于部分管道制造

质量差、周边环境复杂以及动态造成第三方损坏等,会出现腐蚀、裂纹和应力损伤,从而造成经济损失甚至是人员伤亡。由此可见,检测埋地油气管道缺陷的深度和水平位置是极其重要的。

3.1 油气管道缺陷反演方法研究进展

缺陷的准确定量是管道泄漏检测领域长期存在的一个难题,提取管道缺陷漏磁信号是数据处理和实际反演的基础,通过处理后的漏磁数据,结合反演算法可以实现缺陷反演。要想实现缺陷反演,首先要对缺陷进行分类。合肥工业大学潘建华^[30]提出了一种利用 MFL 信号进行缺陷标记和分类的新方法,采用改进的团算法标记分段管道的缺陷区域,估计缺陷的数量和位置,然后研究并提取了标记区域的三维 MFL 特征信号,训练 SSA_BP 神经网络对缺陷进行分类。利用有限元模拟缺陷和实际缺陷,验证了该方法的有效性和准确性。

在现场对管道进行检测时,漏磁信号难免会受到噪声的干扰,因此有必要对检测信号进行降噪处理。西南石油大学石明江^[8]课题组采用基于小波阈值去噪方法的改进的平移不变小波去噪方法,对采集到的管道磁存储信号进行去噪,对支持向量回归机、反向传播(BP)神经网络和粒子群优化多输出最小二乘支持向量回归(MLS-SVR)3种方法进行了比较分析,对管道缺陷的总体缺陷大小进行了反演。结果表明,基于粒子群优化的 MLS-SVR 反演结果是最好的,总体均方误差达到 0.27 mm。最后,建立了管道损伤检测系统,对不同缺陷尺寸的管道的磁存储信号进行了检测,并对缺陷的深度和半径进行了反演。

在缺陷反演方面,东北大学张化光课题组^[31]提出了一种基于异构多类特征融合(HMFF)的端端不规则缺陷反演方法,来对漏磁检测系统的管道缺陷进行量化,并通过实验验证了该方法的精度和鲁棒性。中国石油大学郭岩宝课题组^[32]采用双轴磁通量泄漏检测装置对某油气管道进行了安全检测,并对检测结果进行了分析和研究,采用自主深度学习识别算法对管道故障特征进行了分类和识别。该算法中的网络包括卷积层、池化层和全连接层。通过多次仿真计算,对网络层数进行了优化。最后,根据现场采集的数据进行了实验。实验结果表明,训练准确率为 99.19%,测试准确率为 97.38%。东北大学刘金海^[33]课题组提出了一种基于堆叠学习的管道缺陷反演方法,在网络中实现了自适应学习,提高了对缺陷反演问题不同样本集的泛化能力。最后,利用实验平台采集的漏磁信号和仿真信号,对该方法进行了实验评价,将实验结果与其他先进方法综合比较分析,验证了该方法的优越性。中国石油大学刘得军课题组^[34]提出了一种分段分割方法来研究管道磁异常的特征,以提高计算性能,加速反演的收敛过程,然后建立了基于分段分割

方法和基于磁偶极子重建(MDR)的剖面分割方法的前向模型进行比较,如图6所示。结果表明,无论管道的测量高度和倾斜度、倾角的变化如何,这2种分割方法计算出的磁异常几乎相同。

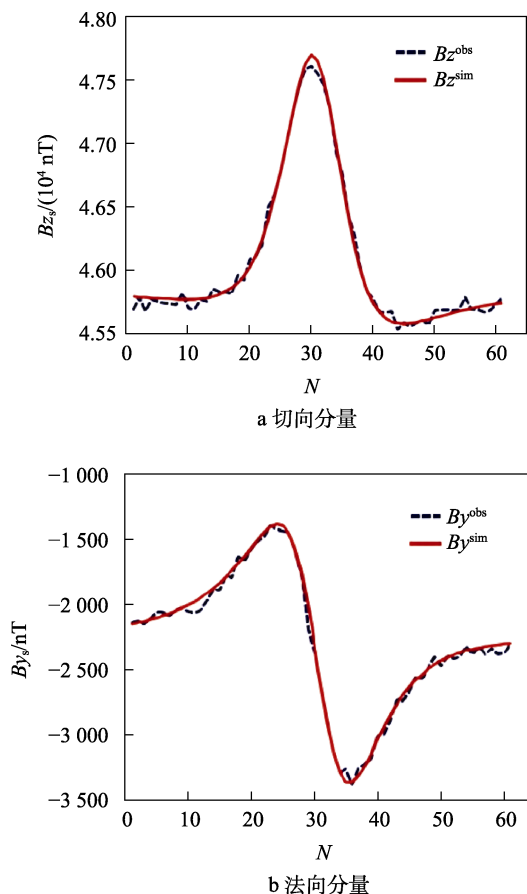


图6 分段分割法和剖面分割法比较结果

Fig.6 Comparison of segmentation and section segmentation methods for magnetic anomaly features: a) tangential component; b) normal component

3.2 油气管道磁测仪器开发研究进展

3.1 节介绍了管道缺陷的反演问题,在实际工程应用中,算法的革新往往伴随着检测仪器的升级。油气管道缺陷的无沟检测技术对于弥补管道内检测和管道直接评价技术的不足具有重要意义。中国石油化工股份有限公司齐光峰^[35]对俄罗斯生产的 TSC 系列金属磁记忆检测仪器进行了改进,对电源模块、信号调理模块、核心处理模块进行了优化,改进后的测试结果良好,更适用于检测现场。中国石油大学彭鹤^[36]根据典型管道缺陷引起的地面磁场波动范围,选择磁通门传感器作为检测管道磁波动的敏感元件,设计了磁通门传感器的激励电路、检测电路和数据处理电路,采用自制的通量门探测器进行了室内和现场条件下的长距离管道缺陷检测实验。结果表明,磁探测器的灵敏度高于国际先进的磁探测器,可检测深度大于

20 倍壁厚 (1.6~2.2 m, 7~10 倍管径) 的人工管缺陷。

针对管道环焊缝的检测, 中国石油天然气管道科学研究院李瑞^[37]提出了一种利用交替励磁检测技术检测油气管道异常环焊缝形成的新方法。该方法是基于对在交变磁场作用下焊接区域的微观磁场变化的分析, 设计并开发了一种检测周长焊缝异常形成的内部检测探头和电子系统。图 7 给出了环焊缝高度对磁场信号的影响, 通过检查切向和法向的磁场强度信号, 可以明显看出, 随着焊缝高度的不断增加, 信号之间的差异逐渐放大。环形焊缝的高度与磁场信号之间存在着很强的相关性, 肯定了通过分析管道涡流分布和空间磁场扰动来研究管道缺陷的可行性。最后通过数值模拟和实验研究, 验证了该系统对环焊缝错位、凹陷、根凹度和异常形成高度的识别能力。

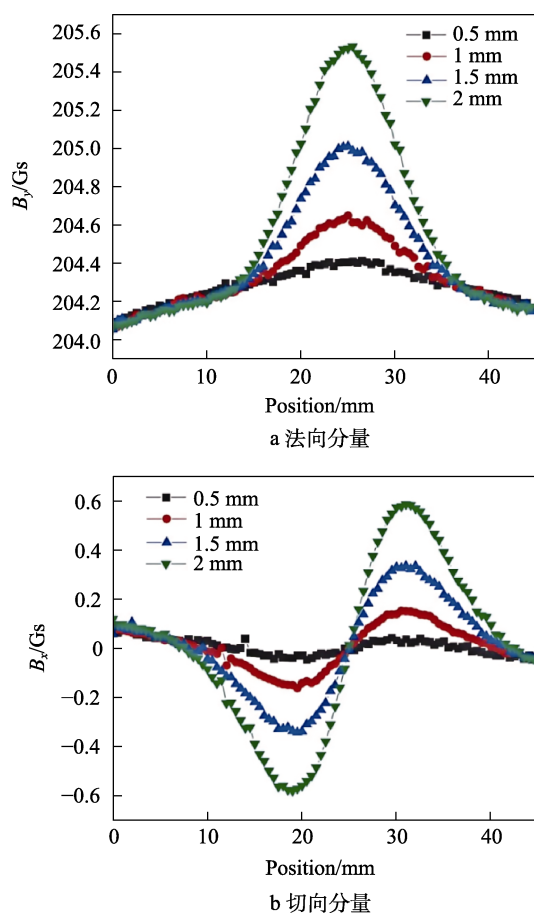


图 7 环焊缝高度与磁场信号的关系

Fig.7 Relationship between the height of circumferential welds and magnetic field signals: a) normal component; b) tangential component

针对管道中的腐蚀缺陷, Wasif 等^[38]利用有限元仿真技术, 设计并优化了一种新型的无线磁性涡流传感器, 它是一种可以永久安装的腐蚀传感器。对传感器的灵敏度研究表明, 激励频率是检测腐蚀缺陷的关键参数, 因此作者详细阐述了传感器的灵敏度与激励频率之间的关系, 并讨论了一种模拟传感器工作环境

的加速腐蚀试验的结果。研究表明, 传感器信号对腐蚀缺陷非常敏感, 由于温度和湿度的变化, 没有细微的差异。Gloria 等^[39]开发了一种腐蚀传感器, 该传感器的性能不受管壁厚度的影响, 是基于管道的一小块区域的直接磁响应, 同时进行了有限元计算, 并提出了传感器的最佳合成配置, 还用原型进行了实验, 实验结果证明了所提出的理论模型的有效性。

在实际检测过程中, 由于管道过长, 过慢的扫描速度会严重影响检测效率。针对这个问题, 沈阳工业大学杨理践课题组^[40]对动态涡流及缺陷漏磁场进行了理论分析, 设计了一种最高速度能达到 12 m/s 的高速漏磁检测系统, 并进行了不同速度下的漏磁检测实验。研究表明, 随着缺陷尺寸的增加, 缺陷特征信号减弱, 检测效果受涡流的影响更严重; 随着检测速度增加, 钢管内壁磁场最大值由线圈中心位置向钢管运动方向移动, 位于该区域的磁传感器的内壁缺陷信号检测效果优于位于线圈中心位置的传感器检测效果, 为提高内壁缺陷检测能力提供了一种思路。

4 结语

金属磁记忆检测技术作为一种对铁磁性材料早期损伤检测唯一行之有效的方法, 在埋地油气管道损伤检测方面发挥着重要作用。本文针对埋地油气管道缺陷的检测、定量识别和磁测仪器开发方面, 展开了详细的论述, 分析了腐蚀缺陷和焊缝裂纹缺陷的形成原因, 讨论了针对不同类型缺陷 (腐蚀缺陷和焊缝裂纹缺陷) 埋地油气管道近年来国内外磁测法的研究成果。在缺陷反演方面, 详细介绍了缺陷反演的过程, 包括缺陷分类、信号降噪和缺陷反演, 阐述了近几年国内外学者采用不同反演算法针对不同类型缺陷的反演方法。在磁测仪器开发方面, 结合不同工况下的埋地油气管道, 介绍了针对检测环焊缝缺陷和腐蚀缺陷的仪器开发进展, 以及针对油气管道缺陷的无沟检测技术和高速检测技术的仪器开发进展。

为了更好地将金属磁记忆检测技术应用于埋地油气管道检测中, 未来的研究方向应该更加倾向于以下几个方面:

1) 埋地管道距离地表埋藏深度远远大于实验室中金属磁记忆检测的埋藏深度, 所以现场检测时较大的埋藏深度会使磁记忆信号减弱, 结合土壤中的杂散电流干扰, 很难实现缺陷的检出和定位。因此, 要结合仿真、实际检测和开挖验证, 不断优化和更新缺陷判别标准。

2) 针对金属磁记忆检测信号弱的问题, 要想实现埋地管道缺陷的精准识别, 需要将管道基础数据 (土壤和天气参数等) 与动态无损巡检信息及工作数据 (巡检记录、运营日志等) 相结合, 基于人工智能技术研发基于海量数据分析的多传感信息处理平台

及历史数据库,从而实现数据的精准分析。

3) 针对缺陷定量化的问题,要想实现工程或结构的早期损伤评估,缺陷反演是一个不可避免的问题。针对埋地油气管道,结合计算机通信,基于深度学习神经网络的方法,实现缺陷的精准定位,实现有序、智能化、健康、安全的管道维护工作。

4) 针对埋地管道磁测仪器开发的问题,未来应该多结合埋地管道高提离、长距离和所处环境等特点,设计出针对埋地管道检测的、检测速度快的以及能够增强信号抗环境干扰能力的磁测仪器。

参考文献:

- [1] 李春燕, 张强, 李春玲, 等. 油气管线钢腐蚀研究现状[J]. 精密成形工程, 2022, 14(12): 96-108.
LI Chun-yan, ZHANG Qiang, LI Chun-ling, et al. Research Status of Oil and Gas Pipeline Steel Corrosion[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(12): 96-108.
- [2] 张宝臣. 管道泄漏与油气储运技术探讨[J]. 石化技术, 2024, 31(5): 138-140.
ZHANG B C. Discussion on Pipeline Leakage and Oil and Gas Storage and Transportation Technology[J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(5): 138-140.
- [3] 谢鹏, 陈昇琳, 郑若晗, 等. 轴向含多处椭圆缺陷管道的屈曲失稳分析[J]. 船舶力学, 2024, 28(5): 760-770.
XIE P, CHEN S L, ZHENG R H, et al. Buckling Analysis of Pipelines with Multiple Elliptical Defects in the Axial Direction[J]. Journal of Ship Mechanics, 2024, 28(5): 760-770.
- [4] 周孟, 李海明, 姚新宽, 等. 含未焊透缺陷的高温高压蒸汽管道的安全分析与评估[J]. 化学工程与装备, 2024(3): 135-137.
ZHOU M, LI H M, YAO X K, et al. Safety Analysis and Evaluation of High Temperature and High Pressure Steam Pipeline with Incomplete Penetration Defects[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2024(3): 135-137.
- [5] 史文武. 某化工厂输气管道不锈钢法兰裂纹缺陷原因分析[J]. 锅炉制造, 2024(3): 55-57.
SHI W W. Cause Analysis of Crack Defect of Stainless Steel Flange of Gas Pipeline in a Chemical Plant[J]. Boiler Manufacturing, 2024(3): 55-57.
- [6] 朱亚凯. 油气管道电磁涡流内检测技术应用研究[J]. 石化技术, 2024, 31(5): 207-209.
ZHU Y K. Research on Application of Electromagnetic Eddy Current Internal Detection Technology for Oil and Gas Pipelines[J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(5): 207-209.
- [7] WANG G Q, YANG L J, GENG H, et al. Research on Deflection and Focusing Technology of Pipeline Annular Ultrasonic Phased Array[J]. Measurement, 2023, 223: 113573.
- [8] SHI M, LIANG Y, ZHANG M, et al. Pipeline Damage Detection Based on Metal Magnetic Memory. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(8): 1-15.
- [9] 王宇. 非接触式磁力扫描技术在炼化企业埋地管道检测中的应用[J]. 现代盐化工, 2023, 50(6): 83-85.
WANG Y. Application of Non-Contact Magnetic Scanning Technology in Detection of Buried Pipelines in Refining and Chemical Enterprises[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2023, 50(6): 83-85.
- [10] DUBOV A A. A Study of Metal Properties Using the Method of Magnetic Memory[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39(9): 401-405.
- [11] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of the Magnetisation Process in Ferromagnets and Its Application to the Magnetomechanical Effect[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1984, 17(6): 1265-1281.
- [12] JILES D C. Frequency Dependence of Hysteresis Curves in 'Non-Conducting' Magnetic Materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(6): 3490-3492.
- [13] LIU B, HE Y Y, ZHANG H, et al. Study on Characteristics of Magnetic Memory Testing Signal Based on the Stress Concentration Field[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(1): 2-8.
- [14] 章鹏, 刘琳, 陈伟民. 磁性应力监测中力磁耦合特征及关键影响因素分析[J]. 物理学报, 2013, 62(17): 454-462.
ZHANG P, LIU L, CHEN W M. Analysis of Characteristics and Key Influencing Factors in Magnetomechanical Behavior for Cable Stress Monitoring[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(17): 454-462.
- [15] SHI P P, SU S Q, CHEN Z M. Overview of Researches on the Nondestructive Testing Method of Metal Magnetic Memory: Status and Challenges[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(2): 43.
- [16] 时朋朋. 缺陷漏磁场磁偶极子模型的若干解析解[J]. 无损检测, 2015, 37(3): 1-7.
SHI P P. Analytical Solutions of Magnetic Dipole Model for Defect Leakage Magnetic Fields[J]. Nondestructive Testing Technology, 2015, 37(3): 1-7.
- [17] 熊毅, 刘帅, 黄鹏, 等. 含缺陷管道磁化状态与漏磁信号规律研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(12): 187-192.
XIONG Y, LIU S, HUANG P, et al. The Influence of Excitation Intensity on Pipeline Magnetic Flux Leakage Detection[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(12): 187-192.
- [18] LIU B, LUO N, FENG G. Quantitative Study on MFL Signal of Pipeline Composite Defect Based on Improved Magnetic Charge Model[J]. Sensors, 2021, 21(10): 3412.
- [19] 田野. 基于管道应变的应力弱磁检测模型[J]. 油气储运, 2024, 43(1): 67-74.
TIAN Y. Study on Weak Magnetic Detection Model Based on Strain of Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(1): 67-74.
- [20] BAO S, LI Y, LUO Q, et al. Research on the Defect Depth Detection for Pipeline Steel with Double Defects Using Metal Magnetic Memory Method[J]. Results in Engi-

- neering, 2024, 22: 102297.
- [21] LIU H, LIU W, WEI J, et al. Effect of Stray Current on Corrosion Behavior of Mg Alloy Sacrificial Anode in Buried Pipeline[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 143: 106852.
- [22] ZHAO B X, YAO K, WU L B, et al. Application of Metal Magnetic Memory Testing Technology to the Detection of Stress Corrosion Defect[J]. Applied Sciences, 2020, 10(20): 7083.
- [23] FENG Q S, LI R, NIE B H, et al. Literature Review: Theory and Application of In-Line Inspection Technologies for Oil and Gas Pipeline Girth Weld Defection[J]. Sensors, 2016, 17(1): 50.
- [24] HUANG S L, PENG L S, SUN H Y, et al. Deep Learning for Magnetic Flux Leakage Detection and Evaluation of Oil & Gas Pipelines: A Review[J]. Energies, 2023, 16(3): 1372.
- [25] ZHANG X B, FENG J, LU S X, et al. FMD-Framework: A Size Estimation Method for Pipeline Defects in Weld-Affected Zones[J]. IEEE Transactions on Instrumentation Measurement, 2023, 72: 3250239.
- [26] ZHANG X Y, CHEN Y, CHEN Y H. Study on the Characteristics of Metal Magnetic Memory Signal of X70 Pipeline Steel[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1605(1): 012088.
- [27] LIU B, HE L Y, ZHANG H, et al. The Axial Crack Testing Model for Long Distance Oil-Gas Pipeline Based on Magnetic Flux Leakage Internal Inspection Method[J]. Measurement, 2017, 103: 275-282.
- [28] CUI W, WANG K, ZHANG Q, et al. Intelligent Evaluation Algorithm for the Structural Integrity Testing of Pipe Welds Defects[J]. Cluster Computing, 2019, 22(4): 7953-7963.
- [29] HE G X, HE T J, LIAO K X, et al. Experimental and Numerical Analysis of Non-Contact Magnetic Detecting Signal of Girth Welds on Steel Pipelines[J]. ISA Transactions, 2022, 125: 681-698.
- [30] PAN J H, GAO L. A Novel Method for Defects Marking and Classifying in MFL Inspection of Pipeline[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 202: 104892.
- [31] JIANG L, ZHANG H G, LIU J H, et al. Pipeline Irregular Defect Inversion for Magnetic Flux Leakage Detection System Based on Heterogeneous Multiclass Feature Fusion[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-9.
- [32] ZHANG M, GUO Y B, XIE Q J, et al. Defect Identification for Oil and Gas Pipeline Safety Based on Autonomous Deep Learning Network[J]. Computer Communications, 2022, 195: 14-26.
- [33] YU G, LIU J H, ZHANG H G, et al. An Iterative Stacking Method for Pipeline Defect Inversion with Complex MFL Signals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 3780-3788.
- [34] PAN Q, LIU D J, GUO Z Y, et al. Magnetic Anomaly Inversion Using Magnetic Dipole Reconstruction Based on the Pipeline Section Segmentation Method[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2016, 13(3): 242-258.
- [35] 齐光峰, 杨勇, 杨超, 等. 对金属磁记忆检测仪改进方法的研究[J]. 中国设备工程, 2022(2): 177-178.
- QI G F, YANG Y, YANG C, et al. Research on the Improvement Method of Metal Magnetic Memory Detector[J]. China Plant Engineering, 2022(2): 177-178.
- [36] PENG H, GONG J M, SONG Q, et al. Development and Application of Trenchless Magnetic Detector for Oil and Gas Pipeline Defect[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2021, 21(1): 163-174.
- [37] LI R, CHEN P C, HUANG J, et al. Research on Internal Shape Anomaly Inspection Technology for Pipeline Girth Welds Based on Alternating Excitation Detection[J]. Sensors, 2023, 23(17): 7519.
- [38] WASIF R, TOKHI M O, SHIRKOOHI G, et al. Development of Permanently Installed Magnetic Eddy Current Sensor for Corrosion Monitoring of Ferromagnetic Pipelines[J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1037.
- [39] GLORIA N B S, AREIZA M C L, MIRANDA I V J, et al. Development of a Magnetic Sensor for Detection and Sizing of Internal Pipeline Corrosion Defects[J]. NDT & E International, 2009, 42(8): 669-677.
- [40] 耿浩, 杨理践, 项行鸿. 钢管高速漏磁信号检测与分析[J]. 仪表技术与传感器, 2021(11): 88-93.
- GENG H, YANG L J, XIANG X H. High Speed Magnetic Leakage Signal Detection and Analysis of Steel Pipe[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(11): 88-93.