

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210979

含缺陷管道磁化状态与漏磁信号规律研究

熊毅^{1,2} 刘帅^{1,2} 黄鹏^{1,2} 董一凡³ 李秋^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院 北京 102249; 2. 应急管理部油气生产安全与应急技术重点实验室 北京 102249;
3. 国家石油天然气管网集团有限公司油气调控中心 北京 100028)

摘要: 漏磁检测技术是管道内检测领域常用的检测方法,基于漏磁信号的分析对于管道安全评价具有重要意义。建立漏磁检测的二维仿真模型,研究漏磁检测中励磁强度对于漏磁信号的影响;基于磁化状态对漏磁信号影响的物理模型,可将励磁强度分为3个阶段,即初始增长阶段、非线性增长阶段和饱和线性增长阶段。结果表明,3个阶段的分界点只受缺陷深度的影响,仿真结果与物理模型具有很好的一致性,所划分的3个阶段有效衡量管道漏磁检测中励磁强度的影响,对于漏磁信号采集分析具有指导意义。

关键词: 漏磁检测;励磁强度;磁化程度;有限元仿真

中图分类号: TG115.284 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

The influence of excitation intensity on pipeline magnetic flux leakage detection

Xiong Yi^{1,2} Liu Shuai^{1,2} Huang Peng^{1,2} Dong Yifan³ Li Qiu^{1,2}

(1. College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;

2. Key Laboratory of Oil and Gas Safety and Emergency Technology, Ministry of Emergency Management, Beijing 102249, China;

3. Oil and Gas Control Center of National Oil and Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Magnetic flux leakage detection technology is a common detection method in the field of pipeline internal detection. The analysis base on magnetic flux leakage signal is of great significance for pipeline safety evaluation. Establishing a two-dimensional simulation model of magnetic flux leakage detection, and studying the influence of excitation intensity on magnetic flux leakage signal in magnetic flux leakage detection; Based on the physical model of the influence of magnetization state on MFL signal, the excitation intensity is divided into three stages, namely, initial growth stage, nonlinear growth stage and saturated linear growth stage. The results show that the dividing points of the three stages is only affected by the depth of defects, and the simulation results are in good agreement with the physical model. The divided three stages effectively measure the influence of excitation intensity in pipeline magnetic flux leakage detection, which has guiding significance for magnetic flux leakage signal acquisition and analysis.

Keywords: magnetic flux leakage detection; excitation intensity; degree of magnetization; finite element method (FEM) simulation

0 引言

漏磁检测技术相比于其他无损检测方法,如涡流检测、超声检测等,具有可靠性高、无需耦合剂等优点,广泛运用在管道内检测领域。管道漏磁检测技术利用励磁源对含缺陷管道进行磁化,通过磁传感器采集缺陷附近的漏磁信号,实现对于缺陷的检测^[1-2]。

现有的管道漏磁检测技术多是在管道被磁化到磁饱和状态下应用^[3-7],杨理践等^[3]提出一种基于饱和磁场的高速

检测方法,并利用这种方法实现管道内外壁缺陷的定位区分;Singh等^[4]研究了饱和励磁强度下的漏磁检测灵敏度对漏磁信号的影响,运用图像融合技术得到了缺陷的几何轮廓;Jian等^[5]研究了探测器振动对漏磁信号的影响,提出了一种基于有限元仿真的漏磁信号传感器提高值修正方法;王宏安等^[6],赵翰学等^[7]通过深度学习建立了磁饱和状态下的缺陷识别方法。这些研究表明在饱和磁化状态下,漏磁检测技术可以很好的表征管道缺陷。但是饱和磁化会产生剩磁,既影响管道本体安全,又增加漏磁检测实施难度,

收稿日期:2022-08-06

基于非饱和励磁的漏磁检测技术逐渐应用到管道漏磁检测中^[8-13]。张卫民等^[9]使用弱磁场环境下的霍尔元件阵列,实现对于缺陷的量化。张森林^[10]、于霞等^[11]研究了非饱和励磁下管道内检测方法以及阵列传感器的检测方式,证明非饱和励磁下的漏磁检测同样具有良好效果。Liu 等^[12]在弱磁场下使用缺陷的径向信号区分管道的内外缺陷。屈英豪等^[13]研究在弱磁场环境下的地磁场对于漏磁信号的影响,发现材料自身磁化才是影响漏磁信号规律的主要因素。

上述研究表明,不同励磁强度下的漏磁检测技术均在管道缺陷检测中予以应用,但是现有研究由于缺乏对励磁强度与漏磁信号变化规律的分析,难以对强弱磁场进行量化区分,没有给出饱和磁化与非饱和磁化状态的明确分界。本文通过建立漏磁检测仿真模型,模拟不同励磁强度下管道缺陷处的漏磁场,研究含缺陷管道磁化状态对漏磁信号的影响规律;根据磁化状态对漏磁信号影响规律,构建物理模型,提出励磁强度的划分标准,并研究缺陷参数对划分标准的影响。

1 含缺陷管道漏磁检测模型

1.1 含缺陷管道漏磁检测模型

含缺陷管道漏磁检测可简化为如图 1 所示,由励磁源、钢板、轭铁组成近似闭合的磁路系统,通过磁传感器检测漏磁场^[14]。其中轭铁、两个励磁源以及磁传感器共同构成检测装置,磁传感器靠近钢板表面,其与钢板距离为传感器提高高度 h ,励磁源对钢板进行磁化,当钢板存在缺陷时,磁力线会泄漏到空气中,通过磁传感器获取到漏磁场信号,进而实现缺陷的检测与识别^[15]。

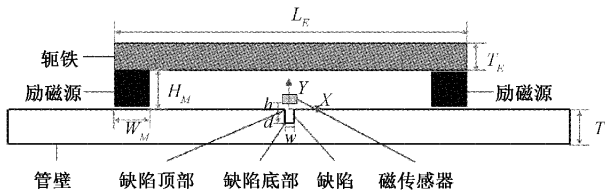


图 1 含缺陷管道漏磁检测模型

根据图 1 所示漏磁检测物理模型,通过 COMSOL Multiphysics 仿真分析软件,可构建有限元仿真模型,模型参数如表 1 所示。

表 1 管道漏磁仿真模型参数

名称	尺寸/mm	名称	尺寸/mm
钢板厚度 T	10	永磁体宽度 W_M	10
轭铁长度 L_E	100	提高高度 h	1
轭铁厚度 T_E	8	缺陷深度 d	3
永磁体高度 H_M	10	缺陷宽度 w	4

在仿真过程中,为模拟漏磁检测过程,采用参数化扫描的方式,将检测装置以图 2 所示在管道表面进行移动,通过

提取不同运动位置处磁传感器的磁场信号模拟缺陷漏磁场。

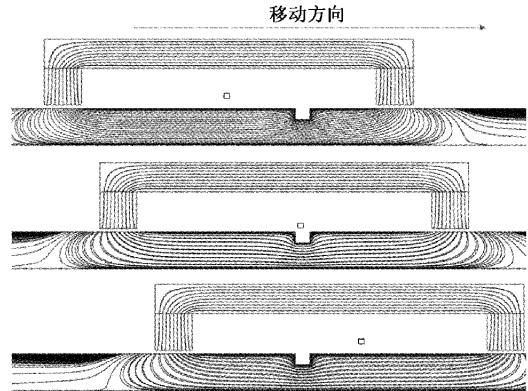


图 2 参数化扫描仿真过程示意图

对于稳态无电流漏磁场,遵循麦克斯韦方程规律,可将磁场关系描述如下^[16]:

$$\nabla \times H = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{2}$$

$$B = \mu_0 (H + M) \tag{3}$$

$$B = \nabla \times A \tag{4}$$

式中: B 为磁通密度, H 为磁场强度, M 为磁化强度, μ_0 为真空磁导率。 A 为磁矢量,定义为^[17]:

$$\nabla \times A = B \nabla^2 A = 0 \tag{5}$$

根据上面的约束关系,可求解模型中各个网格节点的磁矢量,进而求得其他物理量。

1.2 漏磁信号表征

基于仿真模型,用励磁源剩余磁通密度 B 表征管道励磁强度,当励磁强度为 1.5 T 时,按照如图 2 所示过程模拟漏磁检测结构相对于缺陷的运动状态,可以得到磁传感器位置处切向磁通密度与缺陷中心距离的关系,如图 3 所示。在图 3 中,当检测位置位于缺陷正上方时,漏磁场信号强度最大,当检测装置远离缺陷中心时,漏磁场信号逐渐减小。取漏磁信号最强值与无缺陷时该位置处的背景磁场(图中的红线)的差定义为切向漏磁信号峰值,可用该信号表征管道缺陷特征。

2 磁化状态对漏磁信号的影响研究

2.1 切向漏磁信号峰值随励磁强度变化规律

通过改变模型中的励磁源励磁强度,可以得到不同励磁强度下的切向漏磁信号峰值曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,根据切向漏磁信号峰值随励磁强度的变化趋势曲线,切向漏磁信号峰值变化可以分为 3 个部分,分别是初始增长阶段、非线性增长阶段、饱和线性增长阶段;为了更好的分辨 3 个阶段的分界位置,对切向漏磁信号峰值相对于励磁强度求导,可得到切向漏磁信号峰值增长速率曲线,如图 4 的虚线所示。在初始增长阶段,励磁强度较弱,切向漏

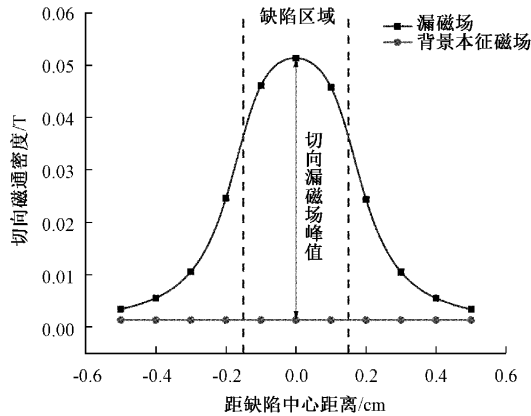


图3 检测探头移动过程中,传感器位置处切向磁通密度与缺陷距离关系图

磁信号峰值整体数值较小,但随着励磁强度呈线性增长,增长速率也稳定在一个较低水平;在非线性增长阶段,切向漏磁信号峰值随励磁强度快速增加,其增长率先快速增加达到最大值,再逐渐减小;在饱和线性增长阶段,切向漏磁信号峰值继续随励磁强度呈线性增加,增长率维持在一个高的恒定值。为了准确描述切向漏磁信号峰值随励磁强度的变化规律,将其3个阶段的变化曲线分别进行方程拟合,拟合方程如式(6)所示,其中 B_l 为切向漏磁信号峰值, B_e 为励磁强度,拟合方程的置信区间为 95%,3 个方程的 R^2 分别为 0.996 2, 0.999 1, 0.999 8。通过拟合方程也可以看出 3 个阶段曲线变化的明显区分。

$$B_l = \begin{cases} 0.001828e^{-\frac{B_e - 0.5775}{0.1038}}, & B_e \leq 0.6 \\ 0.05268B_e^4 - 0.3817B_e^3 + 0.9375B_e^2 - 0.7432B_e + 0.1822, & 0.6 < B_e < 2.8 \\ 0.08407B_e + 0.069, & B_e \geq 2.8 \end{cases} \quad (6)$$

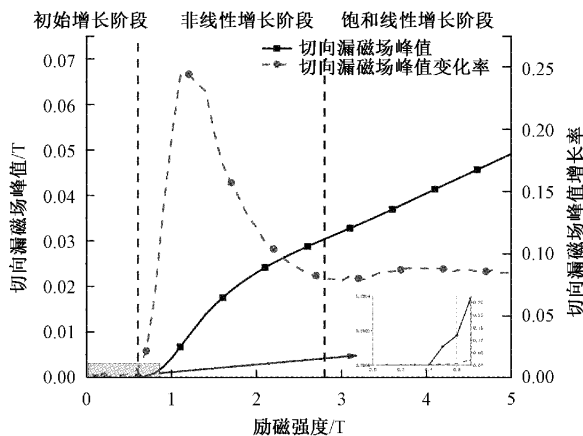


图4 切向漏磁场峰值变化曲线

2.2 磁化状态对漏磁信号影响的物理模型

从图4中可以发现,励磁强度对漏磁信号峰值有较明显的影响,而不同励磁强度实际对应的是被测试样的不同磁化状态,磁化状态的不同则试样内部磁力线密度也不同。通过分析不同励磁强度下缺陷位置处的磁通密度情况,可以得到如图5所示的不同励磁强度下缺陷处的磁力线分布图,箭头代表磁力线的方向,颜色代表磁通密度的大小。由图5可知,在初始增长阶段(图5(a)~(c)),由于试样整体磁化强度低,缺陷位置虽然汇聚了更高的磁通密度,但该区域磁化状态仍未达到饱和,只有很少磁力线泄漏到空气域,所以这一阶段切向漏磁信号峰值很小,且随励磁强度增长缓慢,因此初始增长阶段又可以称为非饱和励磁阶段。而在非线性增长阶段(图5(d)~(f)),缺陷区域的磁化强度进一步增强,部分区域逐渐达到饱和磁化状态,磁力线开始大量泄漏入空气域,漏磁信号快速增长,随着缺陷区域内完成饱和磁化转换的区域进一步增大,饱和磁化区域转换难度增加,相同的励磁强度增加值下饱和磁化转换区域减小,漏磁场的增长速率达到最大值后逐渐降低。当缺陷区域全部完成饱和磁化转换,变化曲线进入饱和线性增长阶段(图5(g)~(i)),励磁强度增加引起的管壁内磁通量增加均完全泄漏入空气域,导致漏磁信号与励磁强度呈线性增长关系。

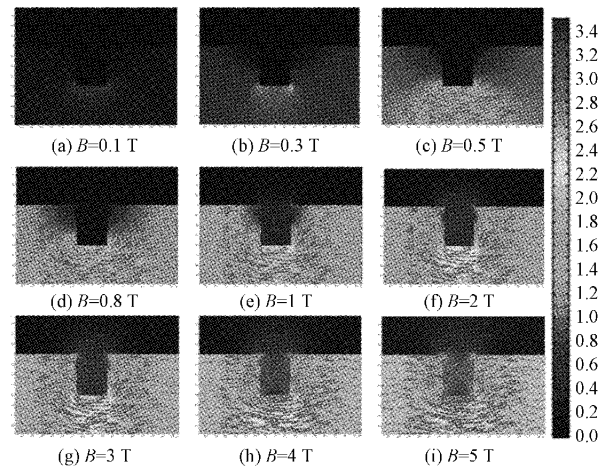


图5 不同励磁强度下磁力线图

磁力线的变化过程也是管壁被磁化的过程。管壁作为铁磁性材料,由许多自发磁化的小区域磁畴组成,当无外加励磁源时,磁畴不外显磁性;当外加励磁源时,磁畴会随着磁畴的移动而沿外加磁场的方向移动;当磁畴的所有磁矩与外加磁场方向一致且强度不再增加时则意味着已经被饱和磁化^[18]。管壁在缺陷位置处①和②的磁化强度随励磁强度变化如图6所示。

由图6可知,当位置①处的管壁磁化强度开始明显增加时,恰好为励磁强度初始增长阶段和非线性增长阶段的分界。当位置①和②磁化强度都接近饱和时,为励磁强度

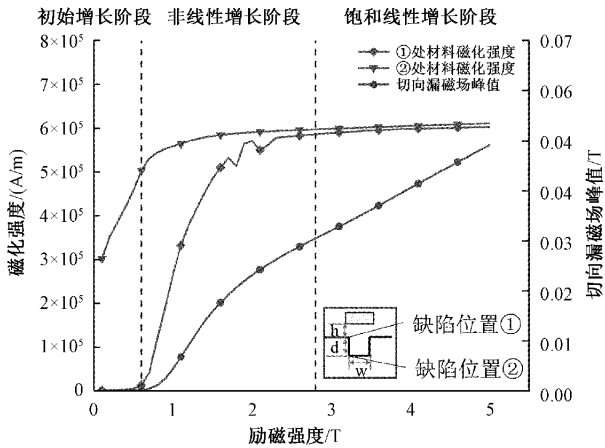


图 6 管壁缺陷位置处的磁化强度

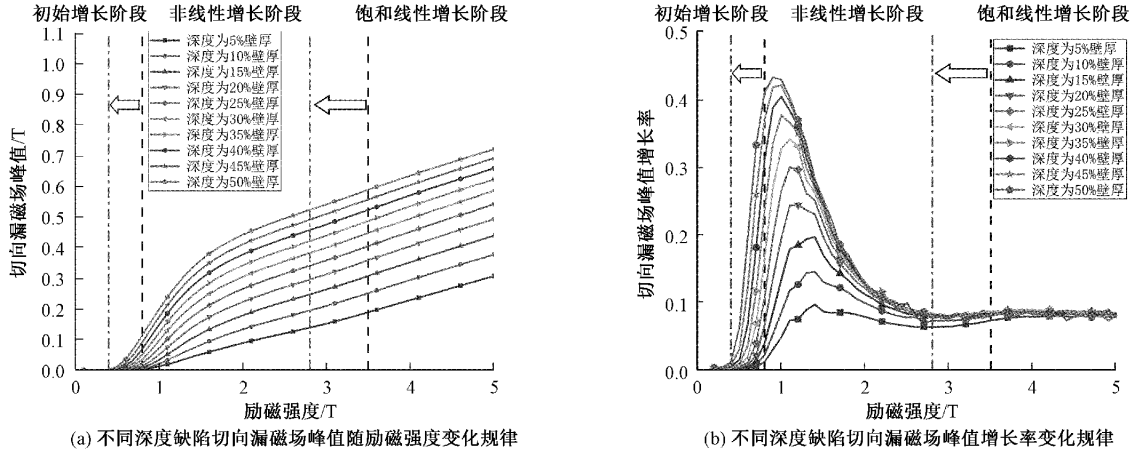
非线性与饱和和线性阶段的分界。因此励磁强度的变化曲线分别对应了材料的 3 种磁化状态,在初始增长阶段,管壁的磁化强度在不断增加,但缺陷处整体磁化强度较小;在非线性阶段,缺陷处管壁的磁化强度不断增加,缺陷位置①处已经到磁饱和,磁力线开始泄漏到空气中;在饱和和线性增长阶段,缺陷处钢板已经达到磁饱和,此时增加励磁强度,泄漏到空气中的磁力线也将跟随励磁强度增加。通过分析发

现,线性增长区域为饱和励磁区域,非线性增长区域和初始增长区域为非饱和励磁区域。

3 缺陷特征对磁化状态与漏磁信号规律的影响

3.1 缺陷深度的影响

为了研究缺陷深度对磁化状态与漏磁信号规律的影响,通过仿真模型求解得到如图 7(a) 所示的不同深度缺陷切向漏磁场峰值随励磁强度变化规律,从图 7(a) 中可以发现,当缺陷深度为钢板厚度的 5%~50% 时,随着缺陷深度的增加,初始增长阶段与非线性阶段分界点对应的励磁强度逐渐减小,非线性阶段与饱和线性阶段的分界点对应的励磁强度也逐渐减小,即分界点由黑色虚线向红色点画线移动(分界线左移)。随着缺陷深度的增加,切向漏磁场峰值整体增加,在非线性阶段和饱和线性阶段都尤为明显。缺陷深度带来的是励磁强度曲线变化由缺陷处的磁化强度导致的。缺陷深度增加即缺陷位置①到缺陷位置②的距离增加,缺陷处的管壁壁厚减薄,同样的励磁强度下,缺陷处管壁汇聚的磁力线密度更大,更容易进入磁饱和状态,从而导致磁力线更易进入空气域,形成漏磁场。因此,随着缺陷深度的增加,励磁强度变化曲线的分界点逐步提前。



(a) 不同深度缺陷切向漏磁场峰值随励磁强度变化规律

(b) 不同深度缺陷切向漏磁场峰值增长率变化规律

图 7 不同深度缺陷的检测效果图

图 7(b) 为不同深度下,切向漏磁场峰值增长率随励磁强度的变化规律,从图 7(b) 中可以看出,缺陷深度的增加会使得非线性增长阶段的切向漏磁场峰值增长率明显增加,但在增长率达到最大值以后,不同深度缺陷下的增长率逐渐减小,在进入饱和和线性阶段之后,增长率都维持在一个固定值。

3.2 缺陷宽度的影响

图 8(a) 为不同宽度缺陷下,漏磁信号随励磁强度变化规律。当缺陷宽度为钢板厚度的 5%~50% 时,切向漏磁场峰值变化曲线的 3 个阶段都可以明显看出,并且 3 个阶段的分界线并未随缺陷宽度变化而变化。缺陷宽度的变化不改变缺陷处管壁壁厚,在相同励磁强度

下,缺陷宽度的变化同样不会改变缺陷位置①和缺陷位置②的磁化强度,因此磁化状态 3 个阶段的分界线不会发生变化。当缺陷宽度在钢板厚度的 5%~15% 时,随着缺陷宽度的增加,切向漏磁场峰值增长较快,在缺陷宽度为钢板厚度的 15%~50% 区间时,切向漏磁场峰值增长较为缓慢。

图 8(b) 为不同宽度缺陷下,切向漏磁场峰值增长率随励磁强度的变化规律,从图 8(b) 中可以看出在非非线性增长阶段,切向漏磁场峰值增长率变化缺陷整体先增大后减小,出现这一现象的原因是当缺陷宽度大于一定值之后,切向漏磁场随着位移变化的曲线由单峰转变为了双峰,中间位置处不再是切向漏磁场的最大值。

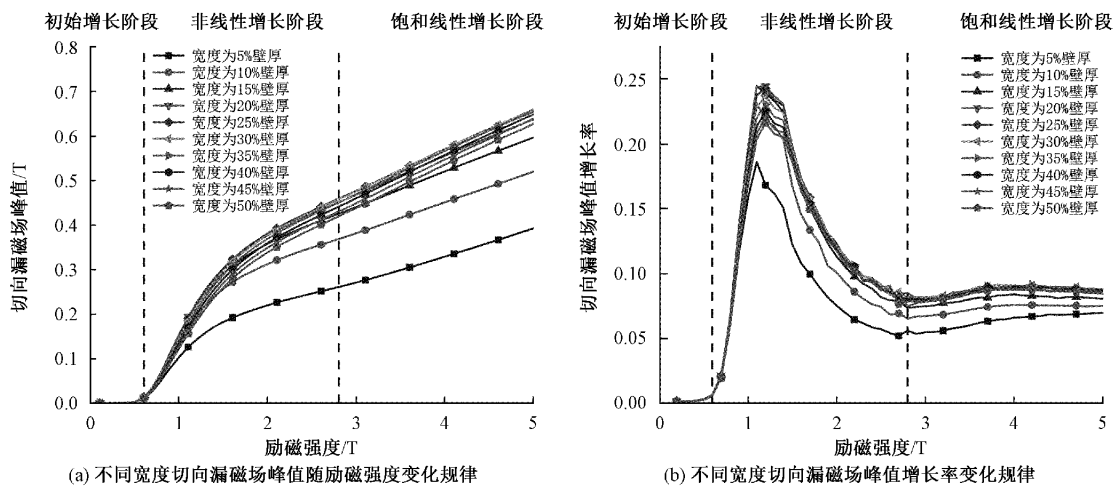


图8 不同宽度缺陷的检测效果图

3.3 缺陷位置的影响

固定缺陷宽度为4 mm,缺陷深度为3 mm时,将缺陷向管壁内部移动,直至缺陷从管壁上表面变为下表面,不同位置处的切向漏磁场峰值变化规律如图9(a)所示。缺陷位置的改变同样不改变缺陷处的管壁壁厚,在相同励磁强度下,缺陷位置的变化也不会改变缺陷位置①和缺陷位

置②的磁化强度,因此缺陷位置的变化对于磁化状态和漏磁信号的分界没有影响。随着缺陷位置不断地向内部移动,切向漏磁场峰值变化数值逐渐减小。不同位置处,切向漏磁场峰值增长率的变化规律如图9(b)所示,随着缺陷位置的向内部移动,切向漏磁场峰值增长率数值逐渐减小。

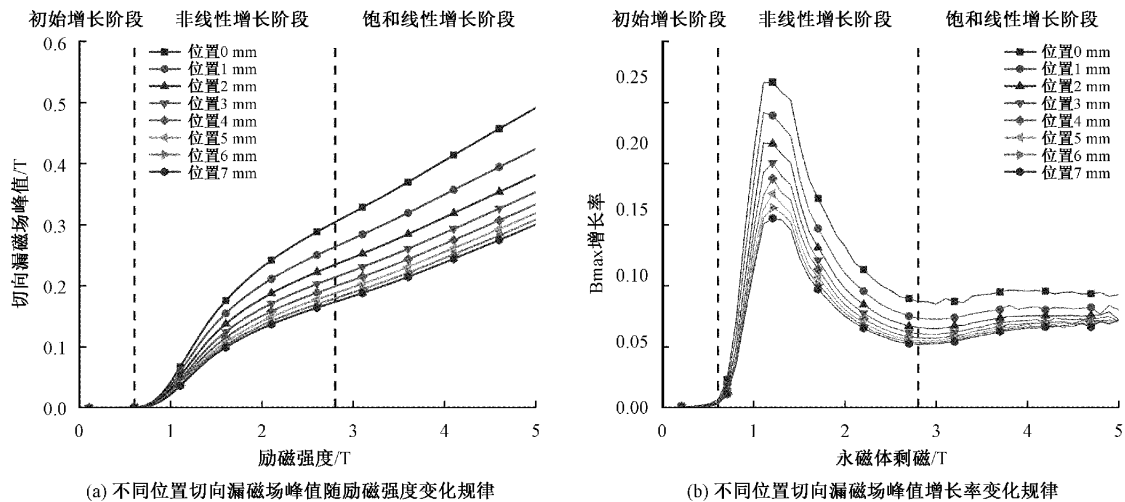


图9 不同位置缺陷的检测效果图

4 结论

管道漏磁内检测中对缺陷处的励磁强度可以分为3个阶段,分别是初始增长阶段、非线性增长阶段和饱和线性增长阶段,这3个阶段表征了缺陷管道磁化状态与漏磁信号规律。

励磁强度的3个阶段划分是由材料自身磁化状态所决定的,在初始增长阶段,缺陷处汇聚的磁通密度较小,泄漏到空气中的磁力线较少;在非线性增长阶段,缺陷处汇聚的磁通密度不断增加,大量的磁力线开始泄漏到空气域中,前两个阶段都为非饱和磁化状态;在饱和线性增长阶

段,此时缺陷处已经达到饱和磁化状态。

只有在缺陷处壁厚发生变化时,即缺陷深度发生更改时,励磁强度的3个阶段分界线才会发生变化,随缺陷深度增加,分界线向左移动(分界线对应的励磁强度减小)。

参考文献

- [1] 田贵云,高斌,高远来,等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1763-1780.
- [2] 冯博,伍剑波,邱公喆,等. 高速漏磁检测方法的发展[J]. 无损检测, 2021, 43(2): 57-63.
- [3] 杨理践,耿浩,高松巍,等. 高速漏磁检测饱和场建立过

- 程及影响因素研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 1-9.
- [4] SINGH, SHARATCHANDRA W, STEGEMANN, et al. Three-dimensional finite element analysis of the stress-induced geometry effect on self-magnetic leakage fields during tensile deformation[J]. Insight: Non-Destructive Testing & Condition Monitoring, 2016, 58(10):544-550.
- [5] JIAN F. A sensor liftoff modification method of magnetic flux leakage signal for defect profile estimation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(7), DOI:10.1109/TMAG.2017.2690628.
- [6] 王宏安, 陈国明. 基于深度学习的漏磁检测缺陷识别方法 [J]. 石油机械, 2020, 48 (5): 127-132, DOI: 10.16082/.cnki.issn.1001-4578.2020.05.021.
- [7] 赵翰学, 张咪, 郭岩宝, 等. 基于机器学习的管道金属损失缺陷识别方法[J]. 石油机械, 2020, 48(12):138-145, DOI:10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2020.12.020.
- [8] 张静, 胡祥云, 蔡建超. 磁化器励磁强度对管道漏磁检测系统影响的研究[C]. 2015 年中国地球科学联合学术年会论文集, 2015:853-854.
- [9] 张卫民, 杨旭, 王珏, 等. 基于霍尔元件阵列的缺陷漏磁检测技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(6): 647-651.
- [10] 张森林. 管道非饱和漏磁内检测方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [11] 于霞, 张卫民, 邱勇, 等. 弱磁场激励下基于阵列磁传感器的缺陷检测方法[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(5):460-463, 469.
- [12] LIU B, CAO Y, ZHANG H, et al. Weak magnetic flux leakage: A possible method for studying pipeline defects located either inside or outside the structures[J]. NDT & E International; Independent Nondestructive Testing and Evaluation, 2015, DOI:10.1016/j.ndteint.2015.05.008.
- [13] 屈英豪, 张劲泉, 夏润川, 等. 弱磁检测漏磁信号影响因素实验与仿真研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(15): 310-316, DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.15.048.
- [14] 张宏杰, 刘梦涛, 杨涛, 等. 基于单永磁体磁化的漏磁检测系统[J]. 天津工业大学学报, 2021, 40(1):67-73, 80, DOI:10.3969/j.issn.1671-024x.2021.01.012.
- [15] 姜福琨. 管道漏磁三轴检测方法的理论研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- [16] PARK G S, PARK E S. Improvement of the sensor system in magnetic flux leakage-type nondestructive testing(NDT) [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2):1277-1280.
- [17] 杜志叶, 阮江军, 余世峰, 等. 油管漏磁检测的有限元建模技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007(27):108-113.
- [18] PING W, GAO Y, TIAN G Y, et al. Velocity effect analysis of dynamic magnetization in high speed magnetic flux leakage inspection [J]. Ndt & E International, 2014, 64:7-12.

作者简介

熊毅, 博士, 讲师, 主要从事动态风险分析方法、安全检测与监控等方面的研究。

E-mail: xiongyi@cup.edu.cn