

磁记忆检测在小口径钢管中的应用

赵睿, 李健, 管清政, 赵佳, 付嘉瑞

中国石油管道局工程有限公司管道投产运行分公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2024年7月24日; 录用日期: 2024年8月25日; 发布日期: 2024年9月14日

摘要

磁记忆检测是一种新兴的管道检测技术, 在内部压力作用下, 管道缺陷处会产生应力集中, 使得管道自漏磁场发生改变。本文以含气孔缺陷的管道为研究对象, 利用COMSOL Multiphysics软件分析缺陷对管道自漏磁场的影响。研究表明: 缺陷会使缺陷部位前的法向磁场分量 H_y 和轴向磁场分量 H_z 产生一次突变, 且会增大管道的 H_y 和 H_z 数值; 在研究的范围内, 气孔尺寸、在焊缝中的位置对自漏磁场影响较大, 管道压力的影响很小。研究成果为磁记忆检测用于管道焊缝缺陷检测提供了依据。

关键词

磁记忆, 管道, 焊缝, 气孔, 磁场, 应力

Application of Magnetic Memory Testing in Small-Diameter Steel Pipes

Rui Zhao, Jian Li, Qingzheng Guan, Jia Zhao, Jiarui Fu

Pipeline Production and Operation Branch, China Petroleum Pipeline Bureau Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

Received: Jul. 24th, 2024; accepted: Aug. 25th, 2024; published: Sep. 14th, 2024

Abstract

Magnetic memory testing is an emerging pipeline inspection technology. Under internal pressure, stress concentration occurs at pipeline defects, leading to changes in the pipeline's self-magnetic leakage field. This paper studies pipelines with porosity defects, using COMSOL Multiphysics software to analyze the impact of defects on the pipeline's self-magnetic leakage field. The study shows that defects cause a sudden change in the normal magnetic field component H_y and axial magnetic field component H_z ahead of the defect, and increase the values of H_y and H_z in the pipeline. Within the scope of the study, the size and location of the porosity in the weld have a signifi-

cant impact on the self-magnetic leakage field, while the influence of pipeline pressure is minimal. The research results provide a basis for the application of magnetic memory testing in detecting weld defects in pipelines.

Keywords

Magnetic Memory, Pipeline, Weld, Porosity, Magnetic Field, Stress

Copyright © 2024 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

目前常用的检测方法具有精度低、不能开机检测、工作效率低下的缺点，同时对缺陷的最小尺寸有要求，因此很难发现微观缺陷[1]。起源于 20 世纪 90 年代的金属磁记忆(MMM)技术[2]全称为 Metal Magnetic Memory，包含金属学、铁磁学、损伤力学、信号处理学等方面的内容，既能检测宏观缺陷也能发现金属中存在的微观裂纹，具有广阔的发展前景。Zhang 等[3]的研究表明，磁记忆检测技术在高压管道焊缝中的应用效果显著，研究表明，该技术能够有效检测焊缝中的缺陷，特别是在高压环境下，能够准确识别潜在的缺陷区域。徐寅虎[4]分别对含表面凹槽缺陷、尖端裂纹缺陷、焊接裂纹缺陷的试样开展了载荷拉伸试验，总结分析了凹槽缺陷试样在整个加载过程中表面磁特征信号的变化规律。Sun 等[5]综述了磁记忆技术在复杂焊缝接头中的应用。他们总结了相关研究成果，指出磁记忆检测技术能够有效应对复杂焊缝接头的挑战，并且在结构组件中的应用也显示了良好的效果。张伟等[6]研究了磁记忆技术在高压管道焊缝缺陷检测中的应用，提出了有效的检测方法并验证了其在实际环境中的应用效果。他们的研究表明，尽管存在技术难题，但磁记忆技术在焊缝缺陷的判定中依然具有显著优势。

2. 管道磁记忆检测机理

磁记忆检测是一种新兴的管道检测方法，其原理是基于俄罗斯 Dubov 教授在 1997 年提出的磁记忆效应，他将发生自发磁化时铁磁性材料上磁化方向相同的一个小区域叫作磁畴，当不受到外部荷载和磁场作用时，材料内部各磁畴呈现无序的状态，磁化强度会互相抵消，宏观上不表现出磁性[7]。

在外部磁场作用下，磁畴方向会沿磁场方向发生偏转，由于铁磁性材料很容易达到磁饱和，即使磁场消失，磁畴方向仍然会呈现一定的定向分布。在外部应力作用下，为了保持材料内部微观组织的平衡，材料内部小区域磁畴方向会发生不可逆的变化[8]，如图 1 所示。

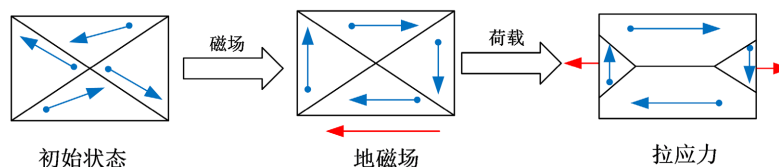


Figure 1. Principle of pipeline magnetic memory testing

图 1. 管道磁记忆检测原理

一般来说，管道缺陷部位往往是应力集中的区域，因此可以通过检测管道上的磁场变化情况来判断

缺陷存在的部位。

3. 无焊缝缺陷管道自漏磁场研究

以天然气站场 $\Phi 114.3 \times 8.5$ 的管道为例,该管道长2 m,焊缝为V型,宽度为9 mm,焊缝余高为1 mm,材质为X65,建立力-磁耦合模型,模型采用全尺寸的1/12,焊缝几何尺寸示意图和几何模型如图2所示。

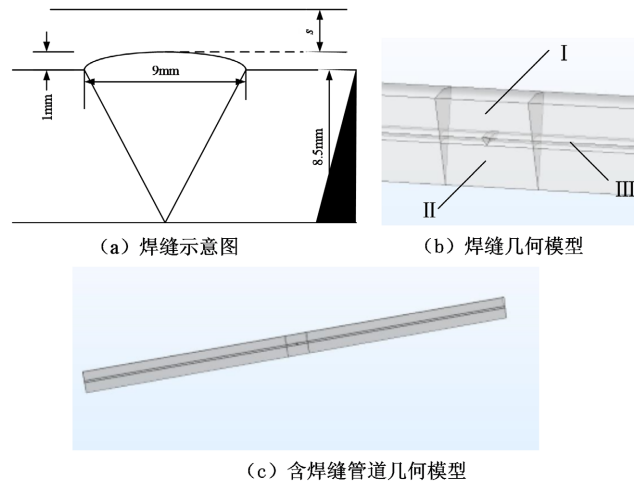


Figure 2. Welded pipeline model
图2. 焊缝管道模型

模型由三部分组成, I、II 为空气, III 为管道, 将管道四周边界条件设置为固定, 并且在管道内表面施加 6 MPa 的压力; 根据研究, 我国的地磁场变化范围为 0.02~0.04 mT, 因此将地磁场强度设定为 0.03 mT, 自漏磁场水平分量、法向分量和轴向分量如图3所示。

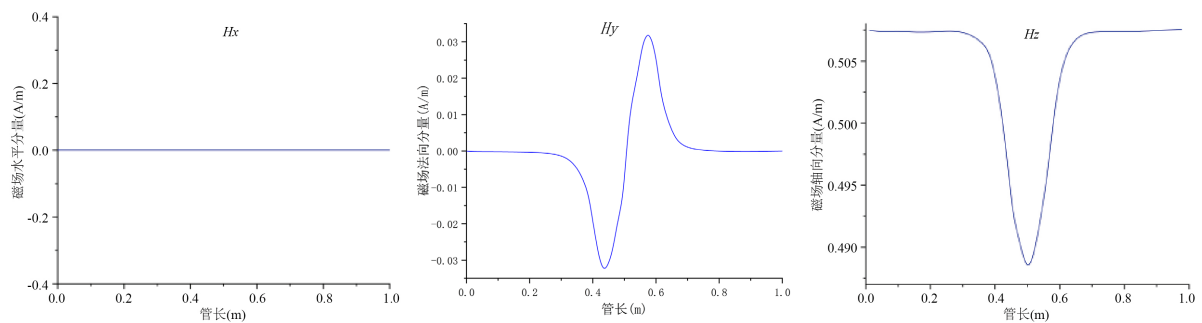


Figure 3. Self-magnetic leakage field of a pipeline without weld defects
图3. 无焊缝缺陷管道自漏磁场

如图3所示, 无焊缝缺陷管道自漏磁场是低强度磁场, 水平分量 H_x 为 0; 因焊缝的存在, 法向分量 H_y 关于中心位置呈对称羽翼状分布, 存在波谷与波峰; H_z 关于中心线对称, 在中心处取得最小值。

4. 气孔缺陷对管道自漏磁场的影响

根据规定, 焊缝中的气孔直径应小于等于 3 mm, 建立半径为 1 mm 的气孔缺陷, 气孔中心距焊缝上表面为 3 mm, 焊缝缺陷示意图和几何模型示意图如图4所示。

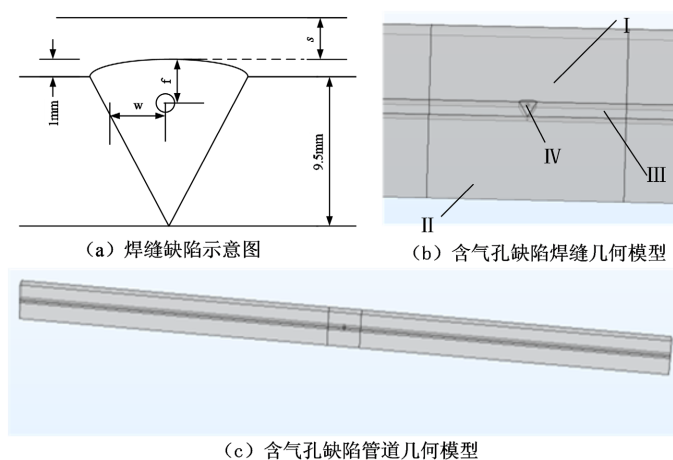


Figure 4. Weld with Porosity Defects
图 4. 含气孔缺陷焊缝

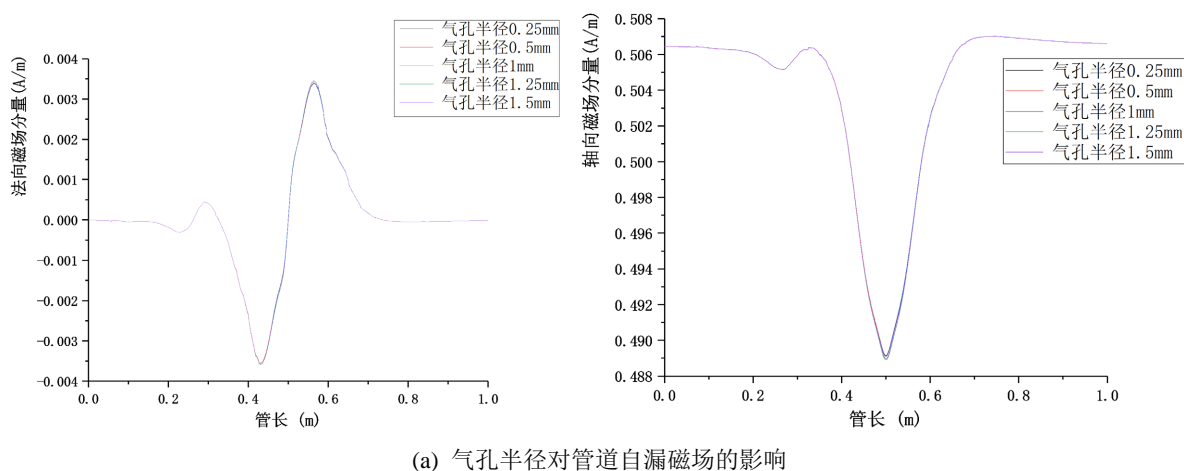
采用五种不同的尺寸分析网格参数对模拟结果的影响,以提离值 s 等于 0.025 m 时的法向磁场分量最大值 $H_y \max$ 为指标,结果如表 1 所示。

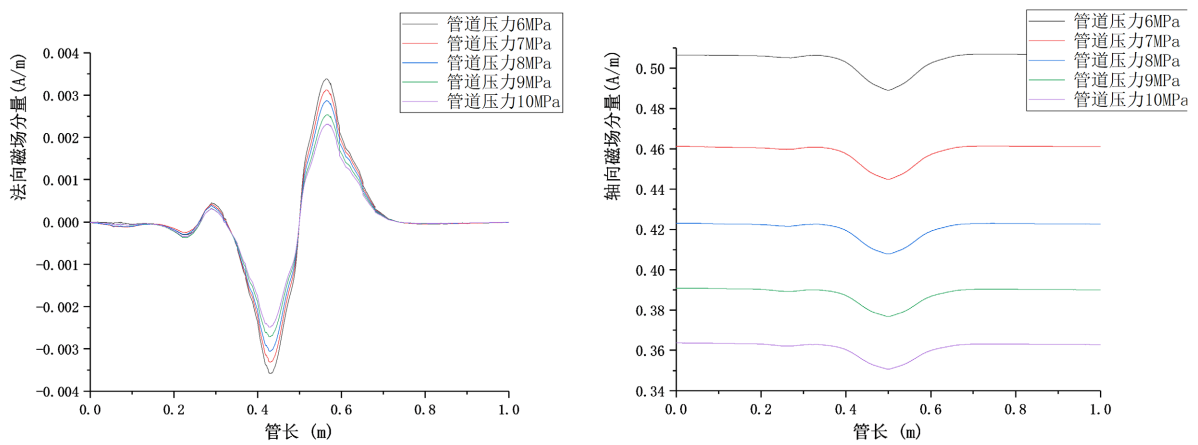
Table 1. The impact of grid parameters on simulation results
表 1. 网格参数对模拟结果的影响

方案名称	网格数量	$H_y \max, \text{A/m}$	与方案一的差值
方案一	3272348	0.0034	0
方案二	994766	0.0034	0
方案三	434029	0.0036	5.89%
方案四	145929	0.0037	8.82%

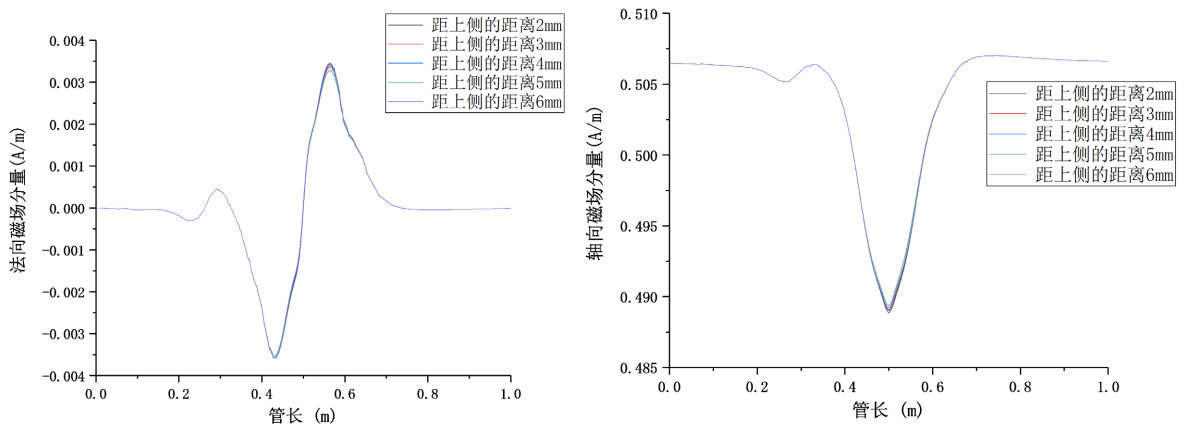
可以看出,网格数量为 994766 时,网格参数对分析结果已经不会产生明显的影响,为了节省计算时间,最终选择方案二的网格参数进行计算。

分析气孔半径 r 、管道压力 P 、气孔中心距管道焊缝上表面的距离 f 和气孔中心距焊缝中心线的距离 w 的影响,分析结果如图 5 所示。

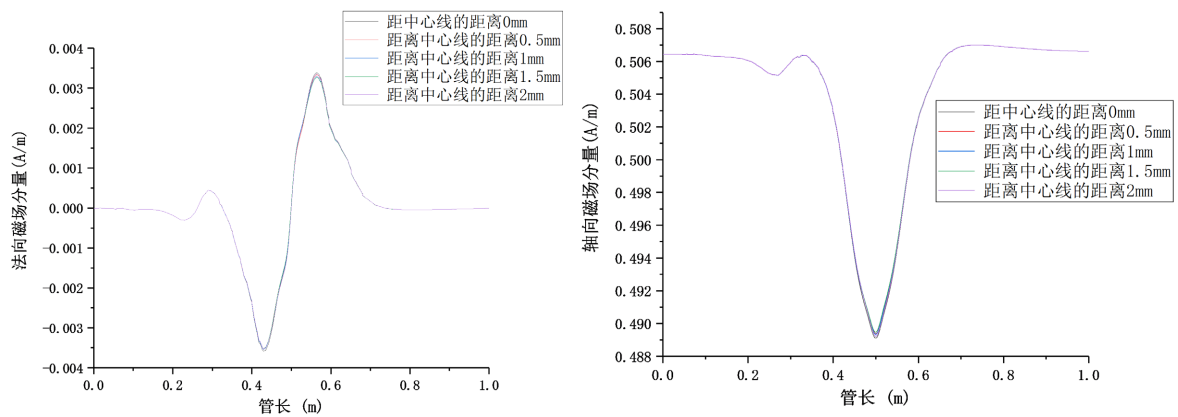




(b) 管道压力对自漏磁场的影响



(c) 气孔距焊缝上表面的距离对管道自漏磁场的影响



(d) 气孔距中心线的距离对管道自漏磁场的影响

Figure 5. Study on the factors influencing the self-magnetic leakage field of pipelines
图 5. 管道自漏磁场影响因素研究

对比图 3 和图 5，当焊缝中存在气孔缺陷时，管道自漏磁场法向分量 H_y 和轴向磁场 H_z 均会增加，且缺陷前方的磁场均会出现一次明显的波动；在研究的范围内，由于管径较小，气孔附近的应力集中变化较小，导致气孔尺寸、气孔的位置对管道自漏磁场的影响较小。运行压力变化不但会导致管道的应力

状态发生变化,也会导致气孔缺陷处磁化特性的改变,在压力从 6 MPa 增加到 10 MPa 的过程中,法向磁场分量 H_y 的绝对值和轴向磁场分量均减小, H_y 绝对值的最大值从 0.0035 A/m 减小到 0.0023 A/m, H_z 的最小值从 0.491 A/m 减小到 0.352 A/m。

5. 结论

通过分析含气孔缺陷管道自漏磁场分布情况,可以得出以下结论:

- (1) 地磁场作用下的管道自漏磁场是低强度磁场;
- (2) 没有缺陷时, H_x 为 0, H_y 关于中心位置呈对称羽翼状分布, H_z 关于中心线对称;
- (3) 存在气孔缺陷时, H_y 和 H_z 在缺陷部位前均会产生一次突变,但缺陷后侧的管道磁场则不会发生这种变化,且缺陷的存在会增大管道自漏磁场 H_y 和 H_z ,说明管道自漏磁场与应力集中程度大小呈正相关关系;
- (4) 在研究的范围内,气孔尺寸、在焊缝中的位置对自漏磁场影响较小,管道压力的影响很大,压力越小,自漏磁场强度(绝对值)越大。

参考文献

- [1] 钱康. 基于金属磁记忆的无损检测研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [2] Dubov, A.A. (1999) Diagnostics of Metal Items and Equipment by Means of Metal Magnetic Memory. In *Proceedings of NDT (Non-Destructive Testing)'99 and UK Corrosion'99*, Dorset, 1999, 287-293.
- [3] Zhang, W., Chen, S., Zhang, Y. and Li, J. (2021) Application of Magnetic Memory Testing Technology in High-Pressure Pipeline Welds. *Journal of Nondestructive Testing & Evaluation*, **28**, 112-124.
- [4] 徐寅虎. 基于金属磁记忆效应的缺陷检测与定量评定[D]: [硕士学位论文]. 烟台: 烟台大学, 2024.
- [5] Sun, X., Li, H. and Zhao, Q. (2019) Magnetic Memory Technique for Complex Weld Joints: A Review and Application in Structural Components. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **174**, 95-104.
- [6] 张伟, 李刚, 陈松. 基于磁记忆技术的高压管道焊缝缺陷检测研究[J]. 无损检测, 2019, 41(3): 89-95.
- [7] 陈超. 管道非接触式磁记忆检测正演理论与应用技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [8] 周兆明, 周文超, 喻建胜, 等. 金属磁记忆检测技术研究进展[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(8): 6-10.