

钢管相邻缺陷漏磁场相互影响的分析

李迅波¹, 李翔¹, 陈亮¹, 王海东¹, 袁太文¹, 黄作英²

(1. 电子科技大学机械电子工程学院 成都 610054; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 闵行区 200240)

【摘要】实际工况中的管道缺陷是非常复杂的, 用物理试验的方法研究各种缺陷漏磁场的变化规律有一定的难度。该文针对油气管道常用的钢管缺陷产生的漏磁场建立了三维有限元模型, 采用有限元方法计算了几种相邻缺陷的漏磁场模型, 给出了计算结果, 并分析了各种相邻缺陷对漏磁场信号的影响。结果表明当相邻缺陷的中心线与磁场方向平行时, 对缺陷漏磁信号的影响最小; 组合型的缺陷对漏磁信号的影响最大。

关键词 缺陷; 有限元; 漏磁场; 钢管
中图分类号 TH7 **文献标识码** A

Effect Analysis of Nearby Defect on MFL in Steel Pipeline

LI Xun-bo¹, LI Xiang¹, CHEN Liang¹, WANG Hai-dong¹, YUAN Tai-wen¹, and HUANG Zuo-ying²

(1. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;
2. School of Electronic and Electric Engineering, Shanghai Jiaotong University Minxing Shanghai 200240)

Abstract The magnetic flux leakage (MFL) method is widely used in-line inspection technique for the evaluation of gas and oil pipelines. The actual status of the defects in the pipeline is very complex. It is very difficult to research the changing rule of magnetic flux leakage field by using physics experiment method. In this paper, the MFL signals obtained during the inspection of steel pipelines has been simulated using 3D finite element analysis. The interaction of the adjacent defects has been studied. The numerical simulations imply that the adjacent defects have significant effects on the character of the MFL signals. The results show that the effect is minimal with the parallel alignment defect, and the effect is maximal with the group defect.

Key words defect; finite element; magnetic flux leakage field; steel pipeline

管道运输是国民经济综合运输的重要组成部分之一。为了防止管道腐蚀穿孔、泄漏、爆管等造成的恶性事故发生, 对管道的无损检测是很重要的。漏磁法检测^[1]是目前管道无损检测的主要手段之一, 它是针对管道类高磁导率的铁磁性材料被磁化后, 在有缺陷处磁力线发生弯曲变形, 并且有一部分磁力线泄漏出缺陷表面, 利用磁性传感器检测该泄漏磁场, 从而可判断缺陷是否存在; 还有可能估计出缺陷的尺寸及深度。采用有限元法对漏磁场进行估算已成为一种必要的手段^[2-4], 并且对缺陷的深度、传感器提离值及外界压力等因素对漏磁场影响的分析起着指导作用^[5-7]。但目前的理论和试验研究主要针对单个缺陷的情况。由于实际工况下钢管的缺陷是较复杂的, 有些缺陷是由多个形状的缺陷组合而成的, 研究各个缺陷产生的漏磁场相互之间是

否有影响, 可以进一步地提高缺陷识别率。

本文介绍了漏磁场的有限元理论, 针对几种相邻的缺陷情况下的漏磁场进行了三维有限元仿真, 并分析了相邻的缺陷之间对漏磁场的影响。

1 漏磁场的有限元分析

漏磁问题可以作为静磁场处理, 用Maxwell方程组表示为:

$$\nabla \times \{\mathbf{H}\} = \{\mathbf{J}_s\} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \{\mathbf{B}\} = 0 \quad (2)$$

式中 $\{\mathbf{H}\}$ 为磁场强度矢量; $\{\mathbf{J}_s\}$ 为施加的电流密度矢量; $\{\mathbf{B}\}$ 为磁通密度矢量。

本构方程表示电磁材料的特性, 是场方程组的补充: (1) 在永磁区域, 本构方程表示为:

$$\{\mathbf{B}\} = [\boldsymbol{\mu}] \{\mathbf{H}\} + \boldsymbol{\mu}_0 \{\mathbf{M}_0\} \quad (3)$$

(2) 在其他区域, 本构方程表示为:

$$\{B\} = [\mu]\{H\} \quad (4)$$

式中 $[\mu]$ 为磁导率矩阵; $\{M_0\}$ 为磁化强度矩阵。

采用磁标量势法求解静磁场问题区域, 可以得到满足式(1)、式(2)和本构方程(3)的解为^[8-9]:

$$\{H\} = \{H_g\} - \nabla \cdot \Phi_g \quad (5)$$

$$\nabla \cdot [\mu] \nabla \cdot \Phi_g - \nabla \cdot [\mu] \{H_g\} - \nabla \cdot \mu_0 \{M_0\} = \{0\} \quad (6)$$

式中 $\{H_g\}$ 为初定的磁场强度矢量; Φ_g 为广义势。

通过变分原理可以得到下列形式的有限元矩阵方程为^[10]:

$$[K^m] = [K^L] + [K^N] \quad (7)$$

$$[K^L] = \int_V (\nabla \{N\}^T)^T [\mu] (\nabla \{N\}^T) dV \quad (8)$$

$$[K^N] = \int_V \frac{\partial \mu_h}{\partial |H|} (\{H\}^T \nabla \{N\}^T)^T (\{H\}^T \nabla \{N\}^T) \frac{dV}{|H|} \quad (9)$$

式中 $\{N\}$ 为单元形函数。相应的载荷矩阵为:

$$[J_i] = \int_V (\nabla \{N\}^T)^T [\mu] (|H_g| + |H_c|) dV \quad (10)$$

式中 $|H_c|$ 为矫顽力矢量。

求解有限元矩阵方程可以得到单元节点的磁标量势, 进而可以求解场域内各点的磁场强度和磁通密度值。

2 相邻缺陷漏磁场的有限元建模

本文采用ANSYS有限元分析软件进行钢管相邻缺陷漏磁场模型的建立和计算。图1所示为一个简化的管道漏磁检测模型结构, 导磁体、永磁体、钢刷和管道构成了完整磁路, 经优化计算后得到的各部件尺寸可以将管道磁化到饱和状态。永磁体材料选用钕铁硼(NdFeB), 它具有高磁能积、高矫顽力、磁性能稳定的特点, 制成的产品磁性强、体积小、重量轻且能达到励磁的功能; 它的矫顽力为872 000 A/m, 相对磁导率为1.075, 钢管材料为X52, 导磁体的材料为低碳钢, 它们的B-H曲线如图2所示。本文假设钢刷的B-H曲线与导磁体的一样。

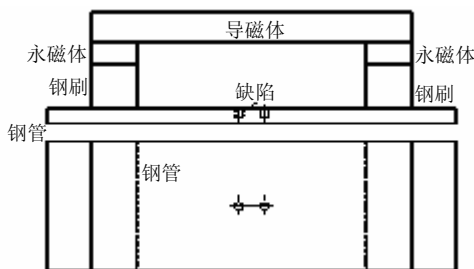


图1 漏磁检测分析模型结构图

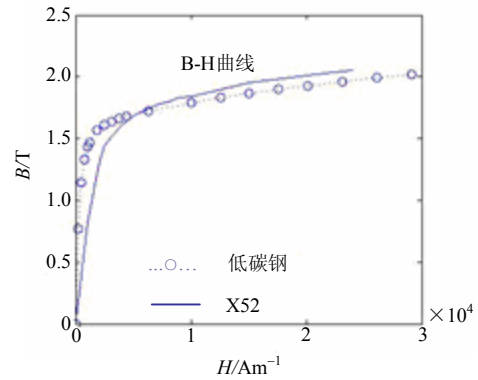


图2 材料的B-H曲线

1个厚12 mm的钢管被永磁铁磁化, 钢管上有2个相邻的圆柱形腐蚀坑, 腐蚀坑的直径为10 mm, 深度为钢管厚度的50%, 坑与坑之间的中心距离为16 mm。2个腐蚀坑的排列方式为: (1) 中心线与磁场方向垂直排列。(2) 中心线与磁场方向平行排列。(3) 中心线与磁场方向呈45°排列。(4) 以上3种形式的组合。

坐标系统定义为: X方向是钢管的轴方向, 也就是磁场的方向; Y方向是钢管的周向; Z方向是钢管的径向。漏磁信号的计算是在钢管表面1 mm处, 无缺陷处的磁通密度是1.8 T。

采用四面体单元将整个分析模型离散化, 为了得到更精确的计算结果, 本文将缺陷附近的网格进行了局部细分, 网格划分后的模型如图3所示。

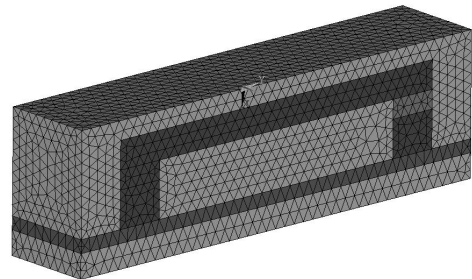


图3 网格划分后的模型

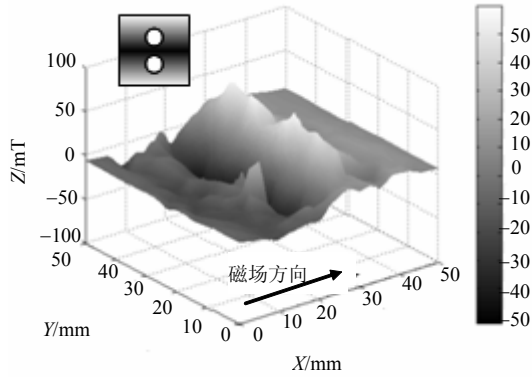
3 计算结果和分析

对于钢管缺陷的检测可以通过三维曲面图和等值线图来进行缺陷的辅助识别。通过上述对4种缺陷的有限元建模, 得到钢管相邻缺陷漏磁有限元的计算结果。对应垂直、平行、45°和组合4种排列方式分别如图4~图7所示。

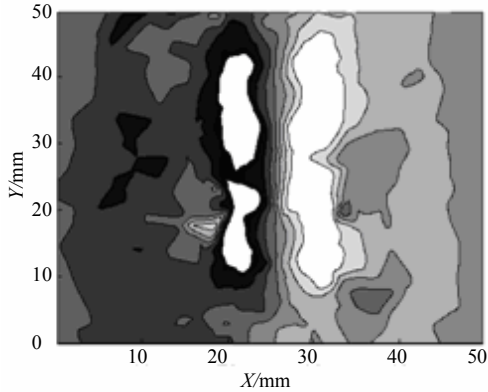
当只有1个腐蚀坑时, 缺陷漏磁场的峰值达到了30 mT; 当相邻缺陷的中心线与磁场方向垂直时, 缺陷漏磁场磁通密度的峰值超过50 mT; 当相邻缺陷的中心线与磁场方向平行时, 缺陷漏磁场磁通密度的峰值接近40 mT; 当相邻缺陷的中心线与磁场方向呈

45°时, 缺陷漏磁场磁通密度的峰值接近50 mT。组合缺陷时, 缺陷漏磁场磁通密度的峰峰值达到了75 mT。

通过计算表明, 当相邻缺陷的中心线与磁场方向垂直时, 对缺陷漏磁信号的影响很大; 当相邻缺陷的中心线与磁场方向平行时, 对缺陷漏磁的影响较小; 当相邻缺陷的中心线与磁场方向呈45°时, 对缺陷漏磁信号的影响介于上述两种情况之间。由此可见, 组合缺陷对漏磁信号的影响最大。

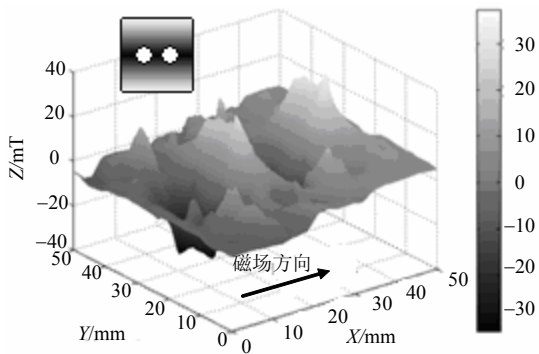


a. 缺陷漏磁场三维图

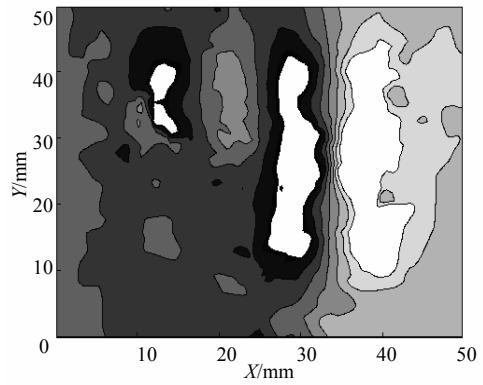


b. 缺陷漏磁场等值线图

图4 中心线与磁场方向垂直排列

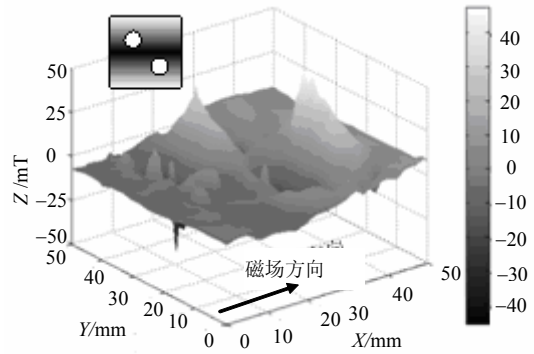


a. 缺陷漏磁场三维图

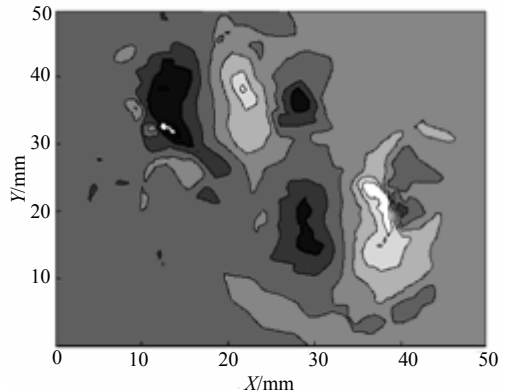


b. 缺陷漏磁场等值线图

图5 中心线与磁场方向平行排列

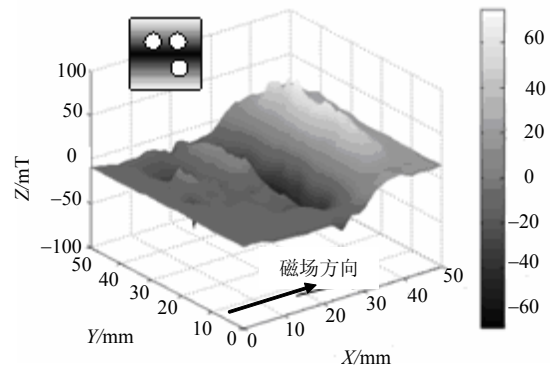


a. 缺陷漏磁场三维图

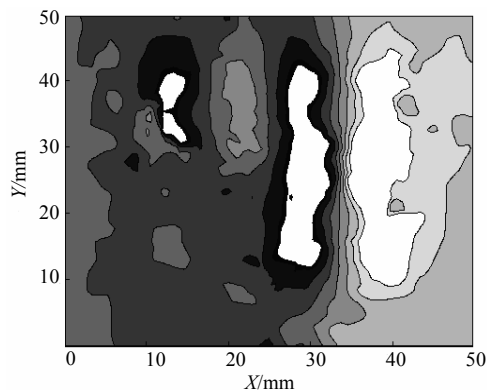


b. 缺陷漏磁场等值线图

图6 中心线与磁场方向呈45°排列



a. 缺陷漏磁场三维图



b. 缺陷漏磁场等值线图

图7 组合缺陷

4 结束语

本文针对实际钢管腐蚀缺陷中缺陷相邻的情况,采用三维有限元方法计算了相邻缺陷之间的漏磁场,并分析了相邻缺陷之间漏磁场的相互影响。计算的结果可以为实际的钢管缺陷识别提供可靠的依据。

参考文献

- [1] 刘贵民. 无损检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 324-325.
LIU Gui-min. Nondestructive testing technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006
- [2] 吴先梅, 钱梦录. 有限元法在管道漏磁检测中的应用[J]. 无损检测, 2000, 4: 147-150.
WU Xian-mei, QIAN Meng-lu. Application of finite-element method to magnetic flux leakage inspection of pipelines[J]. Nondestructive Testing, 2000, 4: 147-150.

- [3] HUANG Z Y, QUE W, CHEN L. 3D FEM analysis in magnetic flux leakage method[J]. NDT&E International, 2006, 39(1): 61-66.
- [4] KATOH M, MASUMOTO N, NISHIO K, et al. Modeling of the yoke-magnetization in MFL-testing by finite elements[J]. NDT&E International, 2003, 36: 479-486.
- [5] MAO W H, CLAPHAM L, ATHERTON D L. Effects of alignment of nearby corrosion pits on MFL[J]. NDT&E International, 2003, 36: 111-116.
- [6] LENONARD S, ATHERTON D L. Calculations of the effects of anisotropy on magnetic flux leakage detector signals[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(3): 1905-1909.
- [7] BABBAR V, SHIARI B, CLAPHAM L. Mechanical damage detection with magnetic flux leakage tools: modeling the effect of localized residual stresses[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(1): 43-48.
- [8] GYIMESI M, LAVERS D, PAWLAK T, et al. Application of the general potential formulation in the ansys®program[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 29: 1345-1347.
- [9] GYIMESI M, LAVERS J D. Generalized potential formulation for 3-D magnetostatic problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(4): 1924-1929.
- [10] 武保剑, 孙开良, 邱 昆. 静磁波变分计算与磁光 Bragg 衍射效率的提高[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(S1): 642-644.
WU Bao-jian, SUN Kai-liang, QIU Kun. Variational approach to magnetostatic waves and improvement of diffraction efficiency for magneto-optic bragg cells[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(S1): 642-644.

编辑 黄 莘

(上接第792页)

- [6] SEPPANEN M S. Operator-paced assembly line simulation[C]//Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. [S.l.]: [s.n.], 2005: 1343-1348.
- [7] HARRELL C R. Simulation modeling using promodel technology[C]//Winter Simulation Conference Proceedings. [S.l.]: [s.n.], 2003, 1: 175-181.
- [8] SU Ping, LU Ye. Combining genetic algorithm and simulation for the mixed-model assembly line balancing problem[C]// Proceedings-Third International Conference on Natural Computation, ICNC 2007: 314-318.
- [9] NASEREDDIN M, MULLENS M A, COPE D. Automated simulator development: A strategy for modeling modular housing production[J]. Automation in Construction, 2007, 16(2): 212-223.
- [10] BAJAJ G, SAYGIN C, GRASMAN S E, et al. Performance evaluation of an auction-based job allocation model for small and medium-sized enterprises[J]. International Journal of Networking and Virtual Organisations, 2006, 3(2): 202-219.

编辑 漆 蓉