DOI:10.11973/fsyfh-202404015

含腐蚀缺陷管道弱磁信号的正演模型

张华斌¹,徐鸿飞²,刘艳军²

(1. 国家官网集团西部分公司,乌鲁木齐 830000;2. 西南石油大学机电工程学院,成都 610500)

摘 要:针对埋地集输管道在非开挖条件下的腐蚀检测难题,结合磁偶极子模型以及应力磁化强度 模型,建立一种含缺陷管道弱磁信号正演模型。通过数值模拟方法研究了腐蚀缺陷磁感应强度波形 特征及离地高度、磁化强度对磁感应强度的影响。结果表明:腐蚀缺陷处 B_x和B_y出现极值特征且 方向相反,B_z出现过零点特征且峰值改变方向;分别讨论了离地高度以及磁化强度对信号的影响。 通过开展现场检测,验证正演模型的准确率,其误差率为11.11%。

关键词: 埋地集输管道;非开挖;腐蚀缺陷;弱磁信号;磁感应强度

中图分类号: TG115.27; TG115.28 文献标志码: A

集输管道长期敷设于地下且处于复杂的内外环 境中。管内运输的油气含酸性介质及固体颗粒,管 外受到十壤介质及其他杂质的侵蚀, 随着运行时间 的增加,集输管道易出现腐蚀缺陷^[1],导致管道产生 穿孔、开裂和泄漏等事故[2-4]。集输管道由于距离短 及管径小等问题,无法进行常规漏磁内检测,且其他 传统检测技术成本较高,设备较复杂。非接触磁检 测技术作为一种新兴无损检测方法,可以实现非开 挖腐蚀检测,具有不受管径及距离限制,不影响管道 运行等优点,因此利用非接触磁检测技术对集输管 道进行腐蚀检测具有重要意义。非接触磁检测技术 最早由俄罗斯科学家 DUBOV^[5-6]在 20 世纪 90 年 代提出,该技术利用铁磁性金属管道在地磁场中自 发磁化,在管道缺陷处产生自漏磁场的磁记忆效 应^[7],通过对管道表面磁场法向分量及切向分量进 行检测,确定缺陷位置^[8]。XU等^[9]根据磁荷理论 建立了材料内部缺陷的自漏磁场计算模型;徐敏强 等^[10]建立了一种非接触磁检测技术机理模型,对矩 形缺陷的自漏磁场进行数值仿真,阐明了缺陷处自 漏磁信号磁场强度切向分量出现极值,法向分量过 零点且发生峰值变化。WANG 等^[11] 采用磁偶极子 模型分析局部应力集中区的自漏磁场分布现象。 WILSON 等^[12]通过测定不同测量环境和无励磁条 件下磁场中铁磁材料表面的切向分量和法向分量, 获得了应力和剩余磁信号间的变化关系。虽然国内 文章编号: 1005-748X(2024)04-0086-06

外已有自漏磁场相关研究,但没有考虑到缺陷处磁 荷的分布情况。

笔者结合磁偶极子理论和应力磁化强度理论, 建立一种含缺陷管道弱磁信号正演模型,通过数值 模拟研究了离地高度及磁化强度对腐蚀缺陷磁感应 强度分布影响,利用油田现场检测数据对数值模拟 结果进行了验证。

1 含缺陷管道弱磁信号正演模型

JILES 等^[13]研究表明,应力对铁磁材料磁化的 作用相当于外磁场强度的作用。可以将应力当作一 种等效磁场带入磁化模型中,得到铁磁性材料在应 力作用下的磁化强度。在内压作用下,管道上的主 要应力为环向应力和轴向应力。因此,为了满足管 道计算要求,应考虑双轴应力效应。基于等效磁场 原理,SABLIK 等^[14]建立了双轴应力下铁磁材料的 磁化理论和模型。根据 J-A 模型及等效应力法,相 关参数选取 KURUZAR 试验数据,建立了应力与 磁化强度的关系,如图 1 所示^[15]。



Fig. 1 Relationship between stress and magnetization

收稿日期:2021-12-26

通信作者:刘艳军(1978-),博士,讲师,从事无损检测及管道 弱磁检测相关工作,13693498308,swpuliuyanjun@126.com

含缺陷管道正演模型如图 2 所示,集输管道表 面设置最常见的壁厚减薄缺陷,长度为 *a*,环向宽度 为γ,缺陷深度为 *c*。依据磁偶极子模型^[16],在缺陷 处会积聚大量的磁荷^[17-19],故在该缺陷的四个壁面 也会积聚磁荷,空间坐标原点在穿过缺陷中心的圆



图 2 含缺陷管道弱磁信号正演模型



形截面中心正上方。为简化计算,进行如下假设:

(1) 地磁场方向沿 *x* 轴方向均匀磁化管道,且 在缺陷壁面上的正负磁荷均匀分布;

(2) 不考虑管道周围其他的磁干扰。

由此可以用公式(1)、(2)得到缺陷面上每一微 元的磁荷量 d。:

$$d_{q(1,2)} = \rho_{\rm m} r \, \mathrm{d} r \, \mathrm{d} \gamma \tag{1}$$

$$d_{q(3,4)} = \rho_{\rm m} r \, \mathrm{d} r \, \mathrm{d} \gamma \tag{2}$$

$$\rho_{\rm m} = \mu_0 M \tag{3}$$

式中: $d_{q(1,2)}$ 表示缺陷面1和2上的磁荷量; $d_{q(3,4)}$ 表示缺陷面3和4上的磁荷量;M表示磁化强度,A/m; μ_0 为真空磁导率,T•m/A。

将磁荷量表达式代入公式(4)、(5),可得到缺陷 微小单元在检测点 P 处产生的磁场强度为:

$$H_{(1,2)} = \left(\mathbf{r} \cdot \int_{-\gamma/2D/2-\epsilon}^{\gamma/2} \int_{-\pi/2D/2-\epsilon}^{D/2} \rho_{\rm m} r \, \mathrm{d}\gamma \, \mathrm{d}r \right) / (4\pi\mu_0 r^3) \quad (4)$$
$$H_{(3,4)} = \left(\mathbf{r} \cdot \int_{-\pi/2D/2-\epsilon}^{a/2} \int_{-\pi/2D/2-\epsilon}^{D/2} \rho_{\rm m} \, \mathrm{d}a \, \mathrm{d}r \right) / (4\pi\mu_0 r^3) \quad (5)$$

$$r_{1} = \left[x - r \cdot \sin(\varphi + \gamma), y - \frac{a}{2}, z - r \cdot \cos(\varphi + \gamma) \right]$$
(6)

$$r_{2} = \left[x - r \cdot \sin(\varphi + \gamma), y + \frac{a}{2}, z - r \cdot \cos(\varphi + \gamma) \right]$$
(7)

$$r_{3} = \left[x - r \cdot \sin\left(\varphi - \frac{\gamma}{2}\right), y - a, z - r \cdot \cos\left(\varphi - \frac{\gamma}{2}\right)\right]$$
(8)

$$r_{4} = \left[x - r \cdot \sin\left(\varphi + \frac{\gamma}{2}\right), y - a, z - r \cdot \cos\left(\varphi + \frac{\gamma}{2}\right) \right]$$
(9)

$$x = h_1 + h_2$$
 (10)

将式(6)~(9)代入式(4)和(5)可得到4个壁面 微元在空间任意位置产生的磁场强度:

$$H_{x} = H_{1x} - H_{2x} + H_{3x} - H_{4x}$$
(11)

$$H_{y} = H_{1y} - H_{2y} + H_{3y} - H_{4y}$$
 (12)

$$H_{z} = H_{1z} - H_{2z} + H_{3z} - H_{4z}$$
(13)

根据磁场强度与磁感应强度之间关系:

$$B = \mu_0 (H + M) \tag{14}$$

由于土壤和空气的磁化强度为 0,因此 P 点产 生的磁感应强度三分量可表达为:

$$B_r = \mu_0 H_r \tag{15}$$

$$B_{\mu} = u_0 H_{\mu} \tag{16}$$

$$B_z = \mu_0 H_z \tag{17}$$

$$B_{\rm sum} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \tag{18}$$

式中: B_x 为缺陷在P点产生的沿x轴方向磁感应强度分量; B_y 为缺陷在P点产生的沿y轴方向磁

感应强度分量; B_z 为缺陷在P点产生的沿 z 轴方向 磁感应强度分量; B_{sum} 为缺陷在P点产生磁感应强 度矢量和。

2 模拟结果分析

根据塔里木油田某集输管道开挖坑数据,设置 模型参数: $a = 160 \text{ mm, c} = 3.4 \text{ mm, } \gamma = 11^{\circ}, D = 508 \text{ mm, } \delta = 20.6 \text{ mm, } \varphi = 0^{\circ}, h_1 = 1 \text{ m, } h = 1 \text{ m, 运行压力为 2 MPa}.$

对含缺陷管道弱磁信号正演模型进行数值 求解,得到腐蚀缺陷处 x、y、z 方向上磁感应强度 分布。从图 3 中可以看出三个方向上的磁感应 强度分布特征为 B_x和 B_y出现极值特征且方向 相反,B_z出现过零点特征且峰值改变方向。后 续将研究离地高度 h、磁化强度对磁感应强度的 影响。

• 87 •



图 3 腐蚀缺陷处 x、y、z 方向上磁感应强度分布 Fig. 3 Distribution of magnetic induction intensity in x, y and z directions at corrosion defects

2.1 离地高度对磁感应强度的影响

为了研究不同离地高度(h)对腐蚀缺陷磁感应 强度分布的影响,利用含缺陷管道弱磁信号正演模 型数值模拟覆土高度 $h_1 = 1$ m,腐蚀缺陷长度 a =0.16 m,缺陷深度 3.4 mm,腐蚀缺陷环向宽度 $\gamma =$ 11°,夹角 $\varphi = 0$ °时,在不同离地高度 h 下的磁感应 强度分布情况,如图 4 所示。为了便于比较分析,对 计算结果进行归一化处理,设置计算结果最大值为 1。可以看出:不同离地高度下磁感应强度的变化趋 势相同,且都在缺陷中心处出现峰值,同时随着提离 高度的增加,磁感应强度整体的增加大幅减小。这 是因为随着离地高度的增加,采集设备距离管道的 垂直距离增加,采集的磁信号强度降低。



图 4 不同离地高度下磁感应强度变化 Fig. 4 Variation of magnetic induction intensity at different ground height conditions

为了进一步研究离地高度与磁感应强度之间的 变化规律,拟合了离地高度与磁感应强度峰值之间 的关系,如图 5 所示。可以看出,在其他参数一定 时,磁感应强度峰值与离地高度之间的拟合关系为 二次函数。

拟合曲线的拟合度为 0.996, 拟合程度较好, 说 明拟合曲线能够解释离地高度与磁感应强度峰值之 间的关系。



height and B_{sum}

2.2 磁化强度对磁感应强度的影响

为了研究磁化强度对腐蚀缺陷磁感应强度分布 的影响,利用埋地集输管道腐蚀缺陷自漏磁场模型 数值模拟覆土高度 $h_1 = 1$ m,离地高度 h = 0.5 m, 夹角 $\varphi = 60^{\circ}$ 时,在不同磁化强度(5000,10000, 15000,20000,25000,30000 A/m)下的磁感应强 度分布情况,如图 6 所示。为了便于比较分析,对计 算结果进行归一化处理,设置计算结果最大值为 1。 从图中可以看出:不同磁化强度的磁感应强度曲线 趋势一致,且均在缺陷中心位置处出现峰值,随着磁 化强度的增加,磁感应强度也均匀增加。由磁荷与 磁化强度之间的关系可知,随着缺陷磁化强度的增 加,缺陷壁面上的磁荷数值也随之增加,磁感应强度 也增加。



图 6 不同磁化强度下磁感应强度变化 Fig. 6 Variation of magnetic induction intensity under different magnetication intensity

为了进一步研究缺陷磁化强度与磁感应强度峰 值之间的变化规律,拟合了缺陷磁化强度与磁感应 强度峰值之间的关系,如图7所示。可以看出,其他 参数一定的情况下,磁感应强度峰值 B_{sum} 与磁化强 度 M 的拟合关系可以表示为:

*B*_{sum} =2.489^{*e*−5} • *M* + 1.123 (19) 拟合曲线的拟合度为 0.999,拟合效果好,说明

• 88 •



Fig. 7 Fitting curve of different M and B_{sum}

拟合曲线能够较好地解释缺陷磁化强度与磁感应强 度峰值之间的线性关系。

3 现场验证

3.1 管道基础信息

- AL 日尼上女旧心学幼	表 1	管道主要信息参数
---------------	-----	----------

Tab. 1 Main information parameters of pipelines

管道信息	参数
运营单位	油气开发部
投入运营时间(年月)	2009-06-28
管道长度/km	6
管道壁厚/mm	20.6
管道外径/mm	508
运行压力/MPa	$2 \sim 3$
设计压力/MPa	12
管道材质	碳钢
管道埋深范围/m	$1.5 \sim 2.0$
输送介质	水
防腐层	3PE 防腐蚀层
近期检测情况	2011 年漏磁内检测
管道维修情况	无
其他信息(并行管道、交叉管道等)	附近一条双金属复合管

3.2 管道弱磁检测

管道弱磁检测过程分为三步:首先使用管线定 位仪对管线走向和管道埋深进行测绘;其次使用 RTK 依据参考点记录每段待测管道的起点终点 GPS 坐标,最后使用弱磁检测设备对管道正上方的 磁信号进行采集。

3.3 开挖验证

被检测管道地势平坦,无明显干扰磁源。利用 弱磁检测设备完成检测,开挖后依据弱磁检测结果 沿着顺流方向每隔 0.1 m 对管道 12 个时钟方向进 行超声测厚,利用C扫描得到缺陷的尺寸为长度为 60 mm,宽度为 11°圆心角弧长,深度为 3.4 mm。

3.4 模型验证

依据现场检测管线建立数值计算模型: $D = 508 \text{ mm}, \delta = 22.6 \text{ mm}, P = 2 \text{ MPa}, 管道长度 L = 10 m;腐蚀缺陷长度 160 mm,缺陷深度 3.4 mm,缺陷位置(圆心角)11°;<math>h_1 = 1.2 \text{ m}, h = 1 \text{ m}$ 。利用第 1 节所述计算模型进行计算。

由图 8 可以看出,缺陷管道实际检测磁感应强 度与理论计算结果在趋势上一致,均满足:(1)管道 轴向 z 的磁感应强度呈峰值状态;(2) x 方向与 y 方向的磁感应强度变化相反,并且在 z 方向磁感应 强度峰值位置横坐标处有零点趋势。



由图 9 分析可得,在管道轴向上方缺陷处磁感 度与理论计算曲线重合度较高,在远离缺陷处

应强度与理论计算曲线重合度较高,在远离缺陷处 重合度很低。其中,理论计算值为464 nT,而实际 检测磁感应强度为522 nT,误差率为11.11%。分 析原因可能为理论计算仅考虑了缺陷处的应力分 布,而忽视了外界一些干扰以及腐蚀缺陷不连续的 影响,也可能是检测设备自身的影响。考虑到实际 检测时,难免受到外界的干扰以及其他因素的影响, 该误差总体在可接受范围,可以为含缺陷管道的弱



磁检测定量化提供依据。

4 结 论

结合应力磁化强度模型和磁偶极子理论建立含 缺陷管道弱磁信号正演模型,进行求解计算,分析离 地高度及磁化强度对腐蚀缺陷磁感应强度的影响, 同时,利用现场检测数据对数值模拟结果进行验证, 得到以下结论。

(1) 腐蚀缺陷处磁感应强度分布特征如下: B_x和 B_y出现过零点特征且方向相反;B_z出现峰 值特征。

(2) 当离地高度增加时,腐蚀缺陷处的 B_x 、 B_y 、 B_z 均衰减且衰减趋势会逐渐减小;当磁化强度增加时,腐蚀缺陷处的 B_x 、 B_y 、 B_z 均增大且增大趋势相 对稳定。

(3) 对塔里木油田所辖 10 km 管道进行检测 后,根据磁感应强度分布特征在全线选取 1 处异常 点进行开挖验证,开挖后用 C 扫描进行壁厚检测, 利用数值模拟特征验证实际检测效果。

(4)实际检测与数值计算结果的误差率为 11.11%,分析原因主要是理论计算仅考虑了缺陷处 的应力分布,忽视了外界一些干扰以及腐蚀缺陷不 连续的影响,也可能是检测设备自身的影响。但误 差在可接受范围,此检测方法可以满足实际需要。

参考文献:

- [1] 黄云,徐建,李云秀.基于有限元法的内部裂纹管道应 力分析[J]. 兵器材料科学与工程,2019,42(4):126-130.
- [2] 封子艳,南蓓蓓,杨志刚,等.不同尺寸双腐蚀缺陷管道 剩余强度研究[J].油气田环境保护,2015,25(3):4-8, 72.
- [3] 郭人毓.大庆炼化原料气外输管道腐蚀检测和评价技术研究[D].大庆:东北石油大学,2015.
- [4] 刘凤艳.基于漏磁内检测的长输油气管道完整性评价 研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.
- [5] DOUBOV A. Diagnostics of metal items and equipment by means of metal magnetic memory[C]// NDT(Non-Destructive Testing)'99 and UK Corrosion' 99. [S. l.]:[s. n.],1999.

- [6] 冷建成,徐敏强,邢海燕.铁磁构件磁记忆检测技术的 研究进展[J].材料工程,2010,38(11):88-93.
- [7] 王丽,冯蒙丽,丁红胜,等.金属磁记忆检测的原理和应 用[J].物理测试,2007,25(2):25-30.
- [8] DUBOV A. The method of metal magnetic memory
 the new trend in engineering diagnostics [J].
 Welding in the World, 2005, 49: 314-319.
- [9] XU K S, QIU X Q, TIAN X S. Theoretical investigation of metal magnetic memory testing technique for detection of magnetic flux leakage signals from buried defect [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2018, 33(1):45-55.
- [10] 徐敏强,李建伟,冷建成,等.金属磁记忆检测技术机 理模型[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(1):16-19.
- [11] WANG Z D, YAO K, DENG B, et al. Theoretical studies of metal magnetic memory technique on magnetic flux leakage signals [J]. NDT & E International, 2010, 43(4): 354-359.
- [12] WILSON J W, TIAN GUI YUN, BARRANS S. Residual magnetic field sensing for stress measurement[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007,135(2):381-387.
- [13] JILES D C. Theory of the magnetomechanical effect
 [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28
 (8):1537-1546.
- [14] SABLIK M J, RILEY L A, BURKHARDT G L, et al. Micromagnetic model for biaxial stress effects on magnetic properties [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1994, 132(1/2/3):131-148.
- [15] 李建伟. 弱磁场下铁磁材料磁机械效应的理论和实验 研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [16] 帅健,于桂杰.管道及储罐强度设计[M].北京:石油 工业出版社,2006.
- [17] 吴德会,刘志天,王晓红,等.表面缺陷的方向性对漏 磁场分布的影响[J].物理学报,2017,66(4):262-272.
- [18] 汤双清,沈洁,陈习坤,等.基于磁荷模型的永磁体空 间磁场的有限元分析与计算[J].三峡大学学报(自然 科学版),2003,25(5):452-455.
- [19] 王朝霞,张卫民,宋金钢,等. 弱磁场作用下的磁偶极 子模型建立与分析[J]. 北京理工大学学报,2007,27 (5):395-398.

A Forward Modeling of Weak Magnetic Signal in Defective Pipeline

ZHANG Huabin¹, XU Hongfei², LIU Yanjun²

(1. State Official Website Group, Western Branch, Urumqi 830000, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Aiming at the problem of corrosion detection of buried gathering and transmission pipeline under trenchless conditions, combined with magnetic dipole model and stress magnetization model, a forward modeling model of weak magnetic signal of defective pipeline was established. The waveform characteristics of magnetic induction intensity of corrosion defects and the effects of ground clearance and magnetization on magnetic induction intensity were studied by numerical simulation. The results show that at the corrosion defect B_X and by had extreme value characteristics and opposite direction, B_Z had zero crossing characteristics and the peak value changed direction. The effects of ground clearance and magnetization on the signal were discussed respectively. Finally, the field test was carried out to verify the accuracy of the forward model, and the error rate was 11.11%.

Key words: buried gathering pipeline; trenchless; corrosion defect; weak magnetic signal; magnetic induction intensity

"重大海洋工程设施装备的腐蚀防护"专题征稿

港口码头、海上平台、海上风电、海底隧道、海底电缆等 重大海洋工程设施是发展海洋强国战略的重要载体,但是其 服役安全却长期遭受环境腐蚀的严重威胁。腐蚀会造成设 施装备的结构损伤、使役寿命缩短,严重的腐蚀还可能引起 突发性灾难事故,甚至影响国家安全。海洋装备设施腐蚀与 防护技术问题,已经成为亟待研究和解决的重大战略问题。 因此,紧密结合国家重大海洋工程设施和装备的需求,解决 海洋环境腐蚀与生物污损领域的关键科学问题,研究海洋环 境下材料失效机制,针对海洋环境腐蚀及污损特征,开发长 效的防腐防污技术显得尤为迫切。鉴于此,《腐蚀与防护》编 辑部特别策划"重大海洋工程装备的腐蚀防护技术"专题,由 中国科学院海洋研究所海洋环境腐蚀与生物污损重点实验 室段继周研究员担任专题主编,现面向海洋工程腐蚀防护的 相关单位、各涉海高校、科研院所及相关行业单位的专家、学 者等征稿,专题拟定于 2024 年 9 月及 11 月出版。

专题主编介绍:

段继周,中国科学院海洋研究所研究员,博士生导师,中 国科学院海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室主任,中国腐 蚀与防护学会副理事长。主要从事海洋环境腐蚀与生物污 损应用基础和控制技术研究工作,主持国家 973 计划课题、 国家自然科学基金、中国科学院 A 类先导专项课题、中国科 学院从 0 到 1 原始创新项目及中广核、中海油项目等几十 项。发现海水环境钢铁锈层内存在硫酸盐还原菌为优势微 生物的腐蚀微生物群落,提出了微生物膜的电活性腐蚀机 理,创新性开展海洋抗菌防污新材料与技术研究工作,相关 工作荣获省部级奖励多项。发表学术论文 160 余篇,参与制 定国家标准 4 项。兼任全国涂料与颜料标准化委员会专家 委员,中国海洋湖沼学会海洋腐蚀与污损专业委员会主任委员,ISO/TC35/WG29(金属涂层的电化学评价技术标准)中国专家委员。

征文范围:

本专题将围绕重大海洋工程设施装备的腐蚀污损机理 及失效机制、新型海洋耐蚀防污材料开发、在役装备腐蚀及 设备部件失效分析与评估、海工装备设施防护新材料与新技 术、海工设施及装备的腐蚀成本及腐蚀管理研究等方面的研 究成果、应用案例、发展动等进行专题发布,或本领域其他新 技术问题讨论。论文形式可为综述、试验研究、现场案例、应 用技术等。

来稿须知

作者请登录材料测试网(www.mat-test.com)投稿,点 击"在线投审稿",进行网上注册并投稿,投稿备注请标明"重 大海洋工程装备的腐蚀防护技术"专题。编辑部将为专题稿 件开通快速通道,加急处理流程,保障论文的时效性。

时间安排

投稿截止时间:2024年6月15日

修改截止时间:2024年7月15日

出版时间:2024年9月15日及2024年11月15日

编辑部联系方式

电话:021-65556775-290 网址:www.mat-test.com Email:cp@mat-test.com 通信地址:上海市邯郸路 99 号 603 室 邮编:200437