

探头参数对瞬变电磁法检测埋地管道腐蚀的影响

于润桥,邓贤远,胡 博,程强强,邹恒财,陈 颖

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063)

摘要:管道长期处于环境恶劣的地下,腐蚀不可避免,每年因腐蚀造成的环境污染、经济损失和人身伤害时有发生,瞬变电磁法可以在不停输、非开挖的状态下对管道实施在役检测。瞬变电磁法剖面测量装置分为多种,每种线圈大小,线圈匝数组组合又不同,本文在理论上分析了常用的中心回线和重叠回线这两种装置的几种组合方式对检测效果的影响,实验证明中心回线装置的检测效果要优于重叠回线装置,增加线圈有效面积可以使测量结果更加准确的结论。

关键词:瞬变电磁法;埋地管道;非开挖;回线装置

中图分类号: TG115. 28 文献标识码: A 文章编号: 1006 - 0707(2012)01 - 0083 - 03

埋地管道作为一种常见的运输方式,在石油、天然气的长输送方面得到的广泛的应用,但是由于长期处于恶劣的地下,受到环境的影响使得管道形成腐蚀缺陷,由此造成的管道泄漏事故时有发生,常规的管道检测方法多采用对管道的阴极保护系统进行检测,属于间接检测,无法准确定量管道腐蚀程度,通常情况下,阴保效果评价在阴保电位 $\leq -0.85\text{ V}$ 有效,达到 -1.25 V 时过保护, $> -0.85\text{ V}$ 失效,且阴保电位测试必须要依靠预先设置的测试桩才能完成,只有在测试桩附近 $1\sim2\text{ m}$ 距离的管道才能检测出,而两个桩之间的距离在 1 km 以上,同时实际检测中很少考虑IR降的影响,因此检测评价意义不大,效果不明显。对管道实施内检测,即使用漏磁通检测法和超声波检测法。漏磁通检测法适用于腐蚀深度为 $20\%\sim30\%$ 壁厚的腐蚀状况检测,要求传感器与管壁紧密接触,由于焊缝、管壁凹凸等因素的影响,难以实现以上要求,信号大小与缺陷之间缺乏准确的对应关系,检测结果产生不确定的误差,且设备昂贵,检测费用高^[11]。超声波检测法要求探头与管壁之间存在耦合剂,存在检测盲区,无法检测到即将穿孔的缺陷^[12],这种检测方式费用高昂,受管道内部形状及堵塞物影响造成设备无法继续检测的情况经常发生,陷在管道中取出也及其困难,并且检测设备受到进出管道口位置的限制,使内检测方法难以实施。瞬变电磁法这一新型的检测方法可以在非开挖的地面上进行检测,不受管径的限制,可实现在役检测,同时可以得到准确可靠的管道壁厚数据,为管道维修更换提供依据。

1 瞬变电磁法测量壁厚原理

瞬变电磁法(transient electromagnetic method,以下简称TEM)是基于物质的导电性差异,利用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲电磁场,利用线圈或接地电极观测二次涡流磁场或电场的方法^[8],如图1所示。

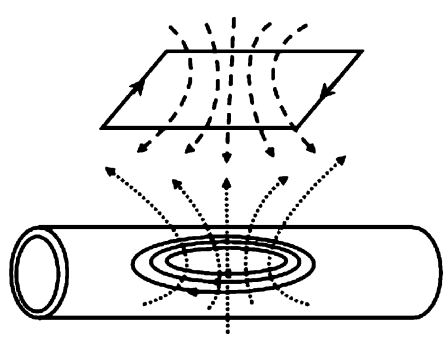


图1 一次场与二次场

由于二次场包含有与管道特性相关的信号,在一次脉冲电磁场的间歇时间里,通过接收线圈接收到的二次磁场,对信号进行提取分离可以得到与管道腐蚀情况有直接关系的信息,从而达到检测管道的壁腐蚀程度的目的。

瞬变电磁法剖面装置常用来探测有限导电体,分为同点装置、偶极装置和大定回线装置。其中同点装置包含重叠回线装置和中心回线装置。对于实际中埋深在 $0.3\sim3\text{ m}$ 之间的金属管道而言,采用多匝小线圈的同点装置是合适的。

发射线圈向地下发送一次脉冲磁场,接收线圈接收到的数据经仪器处理后输出的归一化感应电动势^[2]

可以表示为:

$$\frac{U(t)}{I} = \frac{8\mu_D}{\pi} \left(\frac{a}{h} \right) \cdot \frac{l_T n_T}{\left(1 + \frac{l_T^2}{h^2} \right) \left(2 + \frac{l_T^2}{h^2} \right)} \cdot \frac{l_R n_R}{\left(1 + \frac{l_R^2}{h^2} \right) \left(2 + \frac{l_R^2}{h^2} \right) h} \cdot L(\alpha t) \tag{1}$$

$$L(\alpha t) = 4\alpha \sum_{k=1}^{\infty} e^{-(n_k a)^2 \alpha t} \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{1}{\mu_D \sigma_D \cdot a^2}$$

(3)

$$\sigma_D = \sigma_C - \frac{(a - d)^2}{a^2} (\sigma_C - \sigma_J)$$

(4)

$$\mu_D = \frac{1 + K}{1 - K}$$

(5)

$$K = \left(\frac{\mu_C - \mu_J}{\mu_C + \mu_J} \right) \cdot \frac{\left(1 - \frac{(a - d)^2}{a^2} \right) (\mu_C + \mu_J)}{(\mu_C + \mu_J) - \frac{(a - d)^2}{a^2} (\mu_C - \mu_J)}$$

(6)

其中: U 为接收信号电压; I 为发射电流; a 为管道外径; d 为壁厚厚度; h 为管道中心埋深; l_T 为发射回线边长; n_T 为发射回线匝数; l_R 为接收回线边长; n_R 为接收回线匝数; σ_D 为管道等效电导率; μ_D 为管道等效磁导率; σ_C 为管体电导率; μ_C 为管体磁导率; σ_J 为管内介质电导率; μ_J 为管内介质磁导率。

2 模型计算及效果分析

本试验采用长为 6 000 mm 的专用钢制管道建立试验模型,通过对管道进行加工使其各部分的壁厚不均匀达到模拟腐蚀缺陷的效果。管道模拟腐蚀缺陷剖面图如图 2 所示。

采用 WTEM-1Q II /GPS 双道浅部瞬变电磁勘探系统对本次试验的数据进行采集,回线装置使用重叠回线和中心回线两种方式进行对比研究,每种回线装置又按照不同回线尺寸和匝数的组合进行多次实验分析,每种回线装置又分为不同尺寸和不同匝数进行分析研究,同时还进行不同发射频率条件下的对比研究。试验采用的回线装置如表 1 所示。

将管道均分成 60 等份用 1-60 号点进行标记,两点之间长度为 100 mm。管道埋深为 900 mm,瞬变电磁系统的供电电流为 2 A。使用表 1 所列的六种回线装置分别进行试验,将 TEM 测量的壁厚与超声波测厚仪测量的实际壁厚进行数据误差分析。表 2 为不同回线装置在发射频率为 4 Hz 条件下的管道腐蚀壁厚检

测试验的验证数据。表中的超声测厚为超声波测厚仪实测数据,测量壁厚为应用瞬变电磁技术检测的埋地管道腐蚀剩余壁厚,壁厚单位为 mm。进一步在发射频率为 8 Hz、16 Hz 的条件下检测管道腐蚀壁厚,结合发射频率 4 Hz 条件的数据进行分析得到,95.8% 的测量点的相对误差在 5% 以内,有 81.9% 的测量点相对误差在 3% 以内。这充分说明了瞬变电磁技术对埋地管道腐蚀检测是可行的。

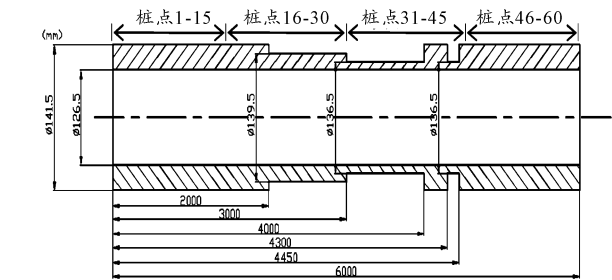


图 2 管道模拟腐蚀缺陷剖面图

图 3 为不同线圈的平均相对误差对比图。从图 3 中的 1 号线圈和 2 号线圈可以看出当线圈匝数相同时,不论采用中心回线装置还是重叠回线装置,平均相对误差都在 4% 以内,但是采用中心回线装置比采用重叠回线装置测量的误差小。3 号线圈与 5 号线圈的平均相对误差对比、3 号线圈与 6 号线圈的平均相对误差对比,可以看出当线圈匝数相同时,中心回线装置的平均相对误差都在 2% 以内,而重叠回线的平均相对误差都大于 2.5%。中心回线为重叠回线装置的变形,具有与重叠回线装置一样的最佳耦合,同时还具有异常幅度大、横向分辨率高等优点。此外,由于中心回线装置接收回线较小,因此可观测磁场的水平分量,相比于重叠回线装置提高了分辨率;而且接收回线可避开金属管道等人为良导体,在良导体分布较多的地区,数据质量优于重叠回线装置^[1]。因此,采用中心回线装置的检测效果要优于重叠回线装置。

表 1 回线装置参数

线圈功能	1 号线圈	2 号线圈	3 号线圈	4 号线圈	5 号线圈	6 号线圈
发射线圈	1 m × 1 m (10 匝)	0.5 m × 0.5 m (10 匝)	1 m × 1 m (10 匝)	1 m × 1 m (20 匝)	0.8 m × 0.8 m (10 匝)	1.2 m × 1.2 m (10 匝)
接收线圈	0.5 m × 0.5 m (40 匝)	0.5 m × 0.5 m (40 匝)	1 m × 1 m (20 匝)	1 m × 1 m (20 匝)	0.4 m × 0.4 m (20 匝)	0.6 m × 0.6 m (20 匝)

表 2 发射频率 4 Hz 的不同回线装置检测效果

测点	超声测量 壁厚/mm	TEM 测量壁厚/mm					
		1 号线圈	2 号线圈	3 号线圈	4 号线圈	5 号线圈	6 号线圈
15	7.23	7.41	7.66	7.67	7.45	7.38	7.32
20	7.15	7.19	7.13	7.42	7.22	7.23	7.04
25	7.09	7.18	7.29	7.10	7.03	7.06	7.19
30	7.36	7.45	6.99	7.28	7.19	7.26	7.40

从图3中3号线圈与4号线圈的平均相对误差对比,可知,当采用同等大小的重叠回线装置,线圈匝数的增加使检测结果更加精确,误差更小。5号线圈与6号线圈的平均相对误差对比,可知,当采用相同匝数、不同大小的中心回线装置时,边长较大的回线装置比边长较小的回线装置取得的检测效果更好。根据法拉利电磁感应定律,增加线圈匝数或者增加线圈面积,都增加了线圈的有效面积,使接收到的信号幅度增加,能分辨的最小精度增大,从而分辨出了更小的壁厚变化,减少了误差。但是有效面积不能太大,增大有效面积会使得线圈电感和电容增加,导致线圈的谐振频率降低,线圈带宽降低,从而对二次场晚期信号的接收,造成接收到的有用信号丢失^[3]。

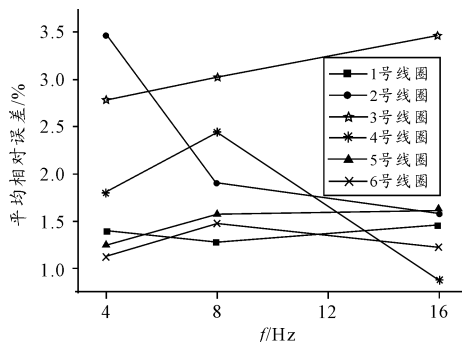


图3 平均相对误差对比图

应用瞬变电磁检测技术对华北油田老南北连通线输油管线进行了管壁腐蚀情况检测,管线直径为355毫米,管线原始壁厚为7.14 mm,输送介质为原油,输送压力为4.0兆帕,埋深1.5 m。并对其中G106国道段石门桥中队向北约435 m的一段管道进行了开挖,在开挖管道处剖开2米左右的防腐层,并用超声测厚仪进行壁厚测量,得到这段管道的平均壁厚为6.73 mm,而使用TEM测量得到的管道壁厚为6.71 mm,相对误差为0.29%,如图4所示。

同时对这条管线另外一处,G106国道段石门桥中队向北约755米的一段管道进行了开挖,计算其相对误差也仅为1.32%。进一步验证了瞬变电磁技术在埋地管道腐蚀检测中的可行性,同时也说明了这一技术的可靠性。

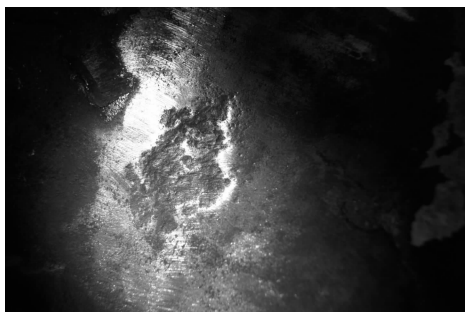


图4 开挖验主管道腐蚀图

3 结论

应用瞬变电磁技术对埋地管道腐蚀进行检测在实际应用中取得了良好的效果,不同的回线装置对检测的影响为:线圈匝数相同时,采用中心回线装置测量的效果比重叠回线装置好;增加线圈匝数或者增加线圈面积,即增加了线圈的有效面积,能更准确的得到测量结果,但是不能太大,那样会造成有用信号的丢失。同时,测量结果与发射频率没有直接的关系,不论在何种频率下都能准确的测量出管道壁厚。

参考文献:

- [1] 刘英. 浅析瞬变电磁法不同回线装置的优缺点[J]. 物探装备, 2009, 19(5): 325-327.
- [2] 石仁委. 埋地管道壁厚的瞬变电磁检测技术研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2007, 24(2): 10-14.
- [3] 谭飞亚. TEM接收线圈的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [4] YU JING-CUN, WANG YANG-ZHOU, LIU JIAN, et al. Time-depth conversion of transient electromagnetic method used in coal mines[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18(4): 546-550.
- [5] 高永才, 李永年, 王绪本等. 瞬变电磁法金属管道腐蚀检测理论初探[J]. 物探化探计算技术, 2005, 2(1): 29-33.
- [6] KUMARI SUDHA, BuLENT TEZKAN, MOHANMMAD IS-RAIL, et al. Combined electrical and electromagnetic imaging of hot fluids within fractured rock in rugged Himalayan terrain[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 74(4): 205-214.
- [7] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 32(4): 1195-1200.
- [8] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.
- [9] JIANG ZHIHAI, YUE JIANHUA, YU JINGCUN. Experiment in metal disturbance during advanced detection using a transient electromagnetic method in coal mines[J]. Mining Science and Technology (China), 2010, 20(6): 861-863.
- [10] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
- [11] 蒋承君, 巨西民. 油气管道检测技术发展和现状[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 34(3): 83-86.
- [12] 刘凯, 马丽敏, 陈志东等. 埋地管道的腐蚀与防护综述[J]. 管道技术与设备, 2007(4): 36-42.

(责任编辑 周江川)