

# 基于磁记忆技术的油气管道缺陷检测研究

罗顺友<sup>1</sup>, 王 鼎<sup>2</sup>, 周晓莹<sup>3</sup>, 杨 毅<sup>3</sup>

(1. 中国石油天然气管道局第三工程分公司, 河南郑州 451450; 2. 中国石油天然气管道局国内事业部, 河北廊坊 065000; 3. 中国石油北京油气调控中心, 北京 100010)

**摘要:** 采用金属磁记忆方法对管道缺陷进行精确测定, 是当前无损检测领域的研究热点和难点。文章介绍了磁记忆检测的优势和原理, 分析了采用磁记忆仪检测油气管道缺陷的结果, 并对磁记忆检测的影响因素进行了研究。检测试验结果表明, 磁记忆检测仪能比较准确地定位管道缺陷; 提高对金属磁记忆检测的影响比较明显, 随着提高值的增加, 磁场信号越来越弱; 扫描速度对检测信号影响较小; 不同的检测姿态对磁记忆检测信号特征值的影响效应存在较大差异, 这对磁记忆检测信号特征量的提取极为不利, 建议开发三维探头进行检测。

**关键词:** 油气管道; 缺陷检测; 金属磁记忆; 无损检测

doi:10.3969/j.issn.1001-2206.2012.05.014

## 0 引言

工程实践证明, 钢质油气管道在长期使用后, 由于金属管壁受到流体冲刷、电化腐蚀、疲劳破坏、自然与人为因素以及管材本身潜在缺陷等影响, 会出现管径变化、机械裂纹和腐蚀穿孔等问题, 最终导致输送效率降低、输送介质泄漏等恶性安全事故发生。开展埋地管道综合检测技术研究, 进行科学有效的检测以及制订综合检测技术与方案, 具有重要意义。

金属磁记忆检测技术是迄今为止在管道早期诊断方面唯一可行的无损检测方法。该方法基于地磁场环境中铁磁性管道受工作载荷作用出现磁畴组织定向和不可逆取向现象, 通过检测应力集中或变形区形成的漏磁场变化即可进行缺陷的预报和检测<sup>[1]</sup>。采用金属磁记忆方法对管道缺陷进行精确测定, 是当前油气管道状态检测领域的研究热点。本文深入分析了磁记忆检测的基本原理与优势, 对磁记忆检测仪用于油气管道缺陷检测进行了试验研究, 对磁记忆检测的性能及检测效果进行了分析; 研究了磁记忆检测仪在检测中的影响因素, 为磁记忆技术在油气储运工程检测中的应用奠定了一定基础。

## 1 磁记忆检测的优势

磁记忆检测法与传统的无损检测方法相比最突

出的优点是可以检测出构件上应力集中区域应力集中的程度, 为检测缺陷的存在和发展、防止灾难性事故的发生、进行结构寿命的早期诊断提供依据。磁记忆检测法是目前对在役设备结构应力—应变状态进行早期检测诊断唯一可行的检测、评价方法。

金属磁记忆检测方法与传统的磁学检测方法相比, 具有一些明显的优点:

(1) 利用地球磁场, 无需专门的磁化设备, 从而使检测设备体积小、质量轻、成本低。

(2) 不需对铁磁性构件和被检设备的表面进行特殊处理, 可以减少工序, 降低劳动强度, 缩短检测工期。

(3) 在检测中可快速确定应力集中区域, 适用于大面积的普查, 可以快速发现可能产生缺陷的部位。

(4) 原理可靠, 特征信号明显, 检测速度快, 适合于在线检测, 去除人为因素, 检测结果准确性高。

(5) 与超声波检测相比, 传感器与被测表面之间不需要填充耦合剂, 因此不存在耦合剂污染的问题。

(6) 检测时探头与被检测工件不接触, 且检测灵敏度高于其他磁性检测方法。

(7) 与漏磁检测相比,磁记忆检测的激励源为大地磁场,因此磁记忆检测不需要专门的磁化设备,并且灵敏度相当高。而漏磁检测需要一个强磁场作为激励源,并且要求能够对被检工件进行饱和磁化,这就决定了漏磁检测设备比磁记忆检测设备要复杂得多。

## 2 磁记忆检测的原理

图1为处于地磁作用下的铁磁工件,在载荷的作用下,其内部会发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向的和不可逆的重新取向,并在应力与变形集中区形成最大的漏磁场  $H_p$  的变化。

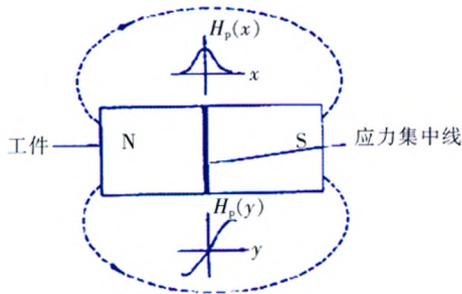


图1 磁记忆检测原理示意

从图1可以看出,漏磁场的水平分量  $H_p(x)$  关于  $y$  轴对称,而垂直分量  $H_p(y)$  关于原点对称且过零值点,因而在  $\sigma_{\max}$  即应力最大位置处有:  $H_{p\text{轴向}} = H_{p\max}$ ,  $H_{p\text{径向}} = 0$ , 即表面漏磁场的切向分量  $H_p(x)$  具有最大值,而法向分量  $H_p(y)$  改变符号且具有零值点。通过检测构件表面的宏观漏磁场即可检测到试件内部应力集中的存在及应力集中的程度。实际中通过漏磁场法向分量  $H_p(y)$  的测定,便可以准确地推断工件的应力集中区。

漏磁场  $H_p$  与机械应力的变化  $\Delta\sigma$  之间的关系为<sup>[2-3]</sup>:

$$\Delta\sigma = -\frac{\mu_0}{\lambda_H R} H_p \Delta z$$

式中  $\Delta\sigma$ ——应力场强度/MPa;

$\mu_0$ ——真空磁导率/(N/A<sup>2</sup>);

$\lambda_H$ ——磁弹性效应的不可逆分量/(A/MPa),它是一个取决于机械应力、外磁场强度和温度的函数,如果测得某钢种在常温下的  $\lambda_H$  值,并测量试件的磁记忆信号后,则可利用上述公式,就可以导出缺陷部位周围的应力场强度;

$R$ ——管道试件的半径/m;

$H_p$ ——漏磁场强度/(A/m);

$\Delta z$ ——试件径向尺寸/m。

## 3 采用磁记忆检测仪检测油气管道缺陷结果分析

金属磁记忆检测仪主要由传感器、数据采集系统及其他辅助部件组成。传感器主要由磁敏传感器、温度传感器、测速传感器等组成,是检测系统的关键部分,将磁场强度信号转换为相应的电压信号。数据采集系统由CPU系统、滤波器、放大器及A/D转换器、显示及键控装置等组成。

为尽可能地贴近输油管道缺陷的实际情况,利用直径为219 mm的无缝钢管加工试验挂片。用管道切割器将2 m的输油管道切割成5段,每段长400 mm,采用线切割和电火花加工工艺方法在试验管道上加工制作不同形状、不同深度和不同方向的人工缺陷,模拟管道的腐蚀坑、裂纹缺陷。缺陷加工完成后对管道试验挂片进行退磁处理,消除加工过程中产生的剩磁。在万能试验机上对试验管道施加125 kN后卸载,然后再次加载,反复上述过程10次,完成试验管道的应力加载。

漏磁场的具体分布见图2和图3。

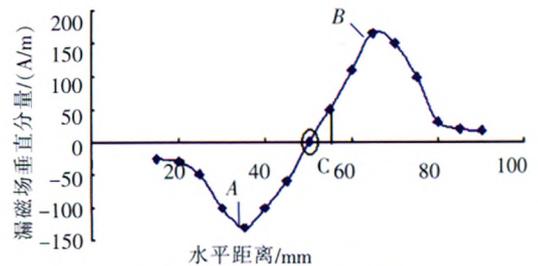


图2 漏磁场垂直分量  $H_p(y)$

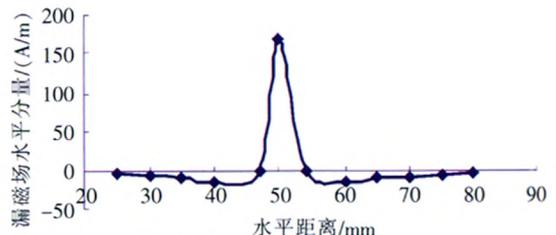


图3 漏磁场水平分量  $H_p(x)$

图中横坐标表示检测的长度,纵坐标表示漏磁场垂直分量  $H_p(y)$ ; C点是试验管道缺陷的中心位置;从检测结果来看,漏磁场的垂直分量  $H_p(y)$  曲线关于缺陷表面中心位置是基本对称的,漏磁场  $H_p$  在缺陷两侧距离缺陷中心15 mm左右的位置出现峰值;峰值大小分别为  $H_{p\min} = -128$  A/m;  $H_{p\max} = 156$  A/m,即图中的A点和B点。图中圆圈位置是

信号  $H_p$  过零值点的位置，与缺陷中心线相差 6 ~ 7 mm；随着与峰值点距离的增加，漏磁场垂直分量迅速减小。而图 3 中的磁场水平分量曲线是关于缺陷位置的轴对称，在缺陷的表面中心位置有极大值，随着与表面中心位置距离的增加，漏磁场垂直分量迅速减小为负值，然后缓慢增大，趋于零。

检测结果表明，磁记忆检测仪能比较准确定位管道缺陷。

#### 4 磁记忆检测的影响因素研究

目前利用智能磁记忆检测仪对管道进行检测，信号识别和缺陷重构是难点，而造成这一难点的是磁记忆检测的影响因素多，影响效应繁杂。因此，研究金属磁记忆检测各因素对检测信号的影响效应对推动磁记忆检测量化研究和缺陷识别具有重要的意义。本文研究了提离值、检测速度及检测姿态对检测信号的影响。

##### 4.1 提离对检测结果的影响

提离对金属磁记忆检测的影响是比较明显的，如图 4 所示，随着提离值的增加，磁场强度法向分量  $H_{pmax}$ 、 $H_{pmin}$  及其梯度  $K_{pmax}$  越来越小，并且开始时减小的速度比较快，随着提离值增大，减小的速度变慢，即磁场强度及其梯度曲线越平缓。 $H_{pmax}$ 、 $H_{pmin}$  和  $K_{pmax}$  在提离值为 4 mm 时开始趋于平缓，并且在 4 ~ 7 mm 之间信号比较明显，提离值大于 7 mm 后信号较弱，不利于检测信号特征值的分析判断，即磁记忆检测过程中的最佳提离范围为 4 ~ 7 mm。

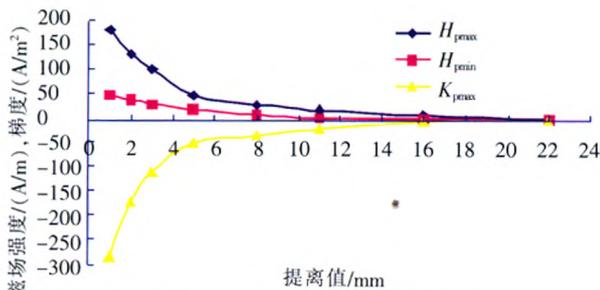


图 4 磁记忆检测信号和随提离值的变化趋势

##### 4.2 扫描速度对检测结果的影响

在其他条件相同的情况下，只是扫描速度不同，使用磁记忆检测仪，对管道试件进行重复检测，检测速度分别设为 10 mm/s、30 mm/s、50 mm/s 和 70 mm/s， $H_{pmin}$ 、 $H_{pmax}$ 、 $K_{pmax}$  的数值变化见表 1。

表 1  $H_{pmin}$ 、 $H_{pmax}$  以及  $K_{pmax}$  随扫描速度的变化关系

速度/(mm/s)	10	30	50	70
$H_{pmin}/(A/m)$	-55	-63	-61	-64
$H_{pmax}/(A/m)$	125	121	120	130
$K_{pmax}/(A/m^2)$	10	11	12	11

从统计的数据可以看到，扫描速度对  $K_{pmax}$ 、 $H_{pmax}$  及  $H_{pmin}$  有一定的影响，但是影响较小；该影响可能与试件表面的粗糙度有关；总的来说，扫描速度对磁记忆检测的效果影响很小。检测速度的确定要依据被测试件表面的状况，要保证检测时传感器与试件表面的距离保持定值。磁记忆检测仪受扫描速度影响较小的原因在于磁记忆检测的信号是试件自身的散射磁场，其检测速度只受试件表面状况以及扫描传感器和信号处理元件的反应速度的影响。

##### 4.3 检测姿态对检测结果的影响

磁记忆管道检测仪在管内运行时，管道走向的水平状态决定了检测仪运行姿态，在不同的爬行状态时，与管道轴向保持垂直的磁记忆检测探头与地磁场水平面的角度必然发生变化，而这种变化必然对磁记忆检测信号产生影响。试验测量并分析了检测姿态对磁记忆检测的影响效应，结果见表 2。

表 2  $H_{pmin}$ 、 $H_{pmax}$ 、 $K_{pmax}$  随检测姿态的变化

管道与水平方向夹角/(°)	0	15	30	45	60
$H_{pmax}/(A/m)$	158	156	152	150	149
$H_{pmin}/(A/m)$	-120	-115	-98	-82	-78
$K_{pmax}/(A/m^2)$	42	38	33	28	25

通过对检测姿态的试验研究和数据分析，发现检测姿态对磁记忆检测的影响效应为： $H_{pmax}$  在水平状态和垂直状态并没有特别显著的变化； $H_{pmin}$  受检测姿态的影响比较明显，在水平状态信号比较稳定，随着角度增加，磁记忆检测信号的稳定特征值  $\Delta H_{pmin}$  逐渐增大； $K_{pmax}$  受检测姿态的影响是随姿态角度的增加，信号越来越弱。

由此可见，不同的检测姿态对磁记忆检测信号特征值的影响效应存在较大的差异，这对磁记忆检测信号特征量的提取极为不利，出现这种情况的主要原因是磁记忆检测探头目前还处于 1 维和 2 维检测，如果能够开发研究 3 维检测探头，就能够提取更多有效的特征量，并对特征量进行筛选，更好地避免姿态角度的影响。

#### 5 结束语

本文研究了金属磁记忆检测的基本机理和检测

# 金属磁记忆技术在埋地金属管道 应力集中区检测中的应用

杨勇, 尹春峰, 姬杰

(中石化股份胜利油田分公司技术检测中心, 山东东营 257000)

**摘要:** 在埋地金属管道检测中, 非开挖状态下如何检测应力集中区是一个亟需解决的问题。金属磁记忆技术可以检测地磁场作用下的埋地金属管道应力集中区, 通过分析检测到的管道表面磁场法向分量及其梯度值可确定应力集中区位置。利用 TSC-4M 金属磁记忆检测仪分别对位于小区占压、林地和穿跨越区域的埋地管道进行了应力检测, 管道应力集中区检测结果与开挖验证结果相符。检测结果表明, 金属磁记忆检测技术可以在非开挖状态下进行埋地金属管道应力集中区检测, 能够对管道进行早期诊断, 检测结果准确可靠。

**关键词:** 埋地管道; 应力集中区; 金属磁记忆; 无损检测

doi:10.3969/j.issn.1001-2206.2012.05.015

## 0 引言

输油气管道在实际工程应用中不可避免地会受到疲劳失效的威胁<sup>[1]</sup>。由于疲劳裂纹大多数位于管道表面或者近表面的应力集中区域, 且管道中存在的腐蚀等微观缺陷也会导致应力集中, 因此实施应力检测不仅可以检出腐蚀等缺陷, 还可以对管道缺陷进行早期预警。

20世纪90年代, 俄罗斯学者杜波夫首先提出利用金属磁记忆效应进行金属材料应力检测<sup>[2-3]</sup>。金属磁记忆检测技术是一种全新的无损检测手段, 该技术主要利用铁磁性金属管道在地磁场中所产生的磁记忆效应, 通过对管道表面磁场法向分量进行检测, 以确定被检管道的缺陷和应力集中区。

信号的特征量, 对磁记忆检测仪用于油气管道缺陷检测进行了试验研究, 对磁记忆检测的性能及检测效果进行了分析; 研究了磁记忆检测仪在检测中的影响因素, 为磁记忆技术在油气储运工程检测中的应用奠定了一定基础。

## 参考文献:

- [1] 王丽, 冯蒙丽, 丁红胜, 等. 金属磁记忆检测原理和应用[J]. 物理测试, 2007, 25(2): 20-30.
- [2] Chechkol I. Using the method of magnetic memory of metal to evaluate the service life of the items of power equipment at the Konakovo

本文利用金属磁记忆技术检测某输油处所辖管道, 结果证明, 该技术是一种行之有效的管道应力状况检测手段, 利用该技术可以分析判断管道的疲劳损伤状态。

## 1 管道应力集中区金属磁记忆检测原理

铁磁性金属材料在应力作用下, 其内部会产生位错形成滑移, 在材料内部产生应力集中。金属材料中的应力集中区在地磁场作用下, 将发生磁畴的自发转动, 形成磁极, 以磁性能的形式来抵消掉部分应力集中带来的弹性能量。即对于铁磁性金属来说, 磁机械效应和磁弹性效应的产生是为了降低体系本身的自由能, 其结果必然会在金属管道表面形成特定的漏磁场, 从而产生磁记忆效应<sup>[4-7]</sup>。

District Power Station[J]. Thermal Engineering, 2002, 49(12): 1028-1031.

- [3] Doubov Anatoli A. Diagnostics of metal items and equipment by means of metal magnetic memory[A]. Proc of ChSNDT 7th Conference on NDT and International Research Symposium [C]. Shantou, China: ChSNDT, 1999: 181-187.

作者简介: 罗顺友 (1974-), 男, 河南郑州人, 工程师, 1998年毕业于西南石油学院, 主要从事石油地面工程施工及管理工作。

收稿日期: 2011-08-29; 修回日期: 2012-06-18

# 基于磁记忆技术的油气管道缺陷检测研究

作者: 罗顺友, 王鼎, 周晓莹, 杨毅

作者单位: 罗顺友(中国石油天然气管道局第三工程分公司, 河南郑州, 451450), 王鼎(中国石油天然气管道局国内事业部, 河北廊坊, 065000), 周晓莹, 杨毅(中国石油北京油气调控中心, 北京, 100010)

刊名: 石油工程建设

英文刊名: Petroleum Engineering Construction

年, 卷(期): 2012, 38(5)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_sygcjs201205014.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_sygcjs201205014.aspx)