

# 非接触式磁力诊断技术 在城市燃气管道上的应用初探

□ 北京市燃气集团有限责任公司特种设备检验所(100035) 江枫  
□ 北京市燃气集团有限责任公司高压管网分公司(100035) 高顺利

## 1 引言

压力管道作为一种承压设备,已经广泛应用于石油、化工、电力等各个工业领域以及城市燃气、供热系统中。由于埋地压力管道具有泄漏和爆炸的潜在危险,世界上的工业发达国家都颁布了有关法规或规范针对埋地压力管道的设计、施工焊接、运行等过程进行严格控制,以确保埋地管道的运行安全。

目前,我国油气长输管道已超过3.5万km,而且还在以每年1 000km~2 000km的速度增加。其中,大部分管线穿越地域广阔,涉及地域类型复杂多变,有些管道已经运行了二三十年,接近使用寿命,已逐步进入事故多发阶段。

城市燃气管道,由于其埋地位置往往位于人口密集区域,其运行的安全性更是与人们的生命财产安全相关,受到全社会的普遍关注。对燃气管道特别是在役燃气管道实施严格而高效的检测具有非常重大的意义。

## 2 管道无损检测技术概述

在役管道检测的主要目的是评价管道本体的结构完整性。检测内容一般包括位置勘测、腐蚀评价、泄漏检测、缺陷检测等方面。

根据检测技术的特点,主要可分为内检测和外检测两大类。内检测是指将检测仪器放在管道内部进行检测,经过多年的发展,管道内检测技术已经非常成

熟。管道内检测器正在向着多样化、尺寸规格系列化、高分辨率以及三维图像可视化的智能化方向发展。外检测是指将仪器放置在管道外部进行检测,同时根据是否需要与管道进行接触,外检测技术又可分为接触式(开挖)检测和非接触式(不开挖)检测技术两种。

接触式管道外检测技术中应用较多的主要还是超声波、磁粉、渗透、射线等一系列常规无损检测技术。此外也有一些新的接触式外检测技术已经得到开发和应用,如超声导波技术、电磁超声技术等。

在非接触式管道外检测技术中,针对管道外防腐层检测的交流电流衰减法(PCM)应用普遍,针对管体的非接触式检测技术主要还是以磁应力原理为基础的相关检测技术应用较多,如金属磁记忆检测技术等。另外,一些新的比如红外成像技术、“NOPIG”技术等也有一定程度的应用。

对各类无损检测技术进行总结和梳理,总体脉络如图1所示。

## 3 非接触式磁力诊断技术介绍

非接触式磁力诊断技术是由金属磁记忆检测技术发展而来,是目前管道无损检测领域中磁应力原理应用的最新体现。它基于维拉里效应(Villari Effect,磁弹性效应),通过获取因管体缺陷导致的管道漏磁场变化信号,检测相应的金属应力变化和几何形变。

该技术及其检测系统最早由俄罗斯研发出来,

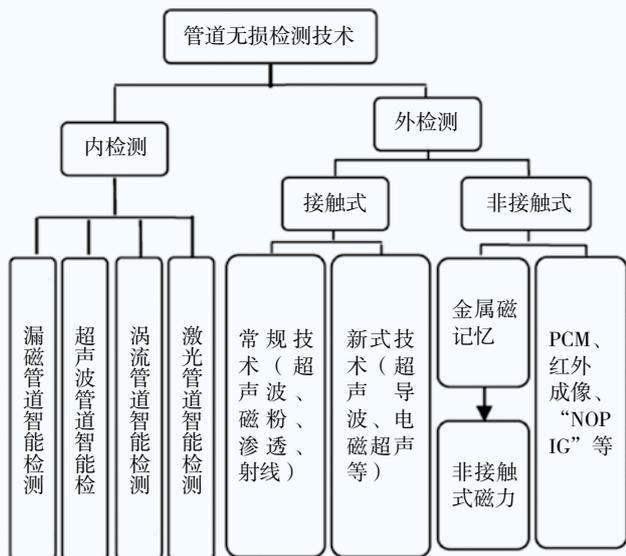


图1 管道无损检测技术分类图示

2010年起在俄罗斯、哈萨克斯坦、沙特阿拉伯等国家的燃气管道和石油管道开始进行实际检测应用。

### 3.1 工作原理

非接触式磁力诊断系统(KMD系统)是通过放置在4个方位上的三分量磁强计,测量恒定磁场(地磁场)磁感应强度的分矢量,来对金属构件的缺陷进行定位和分类。其检测原理如图2。

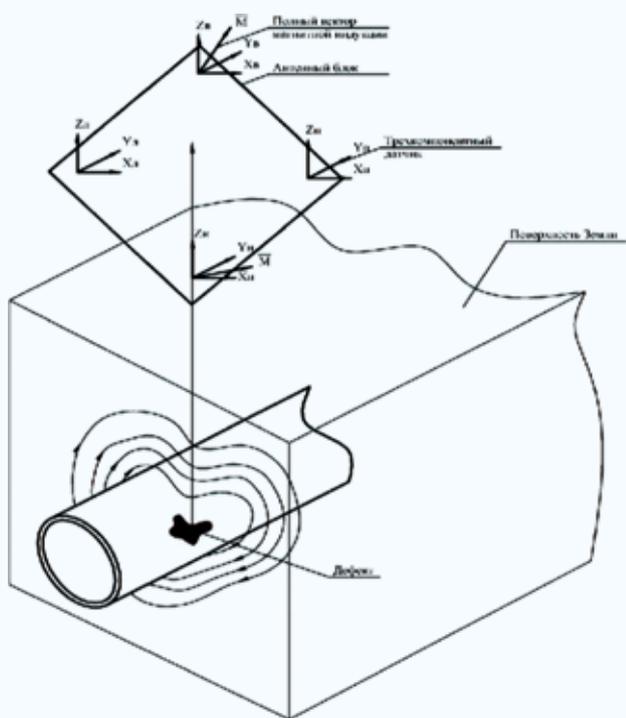


图2 非接触式磁力诊断系统检测原理

检测过程中, KMD系统沿管线采集地磁感应信号,转化为电信号经可视化处理后,在显示屏上实时生成管道的地磁记录图,通过解读地磁记录图中各参数的变化以及与地磁背景值的关系,对管道的整体状态进行诊断,同时找出管道上的异常区段,分析异常区段内磁场的形状和幅度,利用特定的公式计算和评估异常区段的危险程度等级。

### 3.2 评估方法

评估管道异常的危险程度等级时,主要依据的是“综合指标F”。该指标综合了磁场异常长度、异常幅度、磁场矢量分布形状以及管道投产日期、运行压力等多方面数据,利用特定公式计算得出。“综合指标F”所定义的异常危险等级及其技术条件见表1。

表1 管道异常区段危险等级及技术条件

综合指标F	危险等级	管道技术条件	
0.75-1.0	1 (亚临界水平)	良好	管道技术条件符合设计规范; 建议管道运营单位按照相关要求 要求进行日常维护和管理。
0.45-0.75	2 (临界水平)	关注	管道现有异常未达到临界值 (可能是某应力集中区域的 磁场应力变化率超过了允许的 限度); 建议3年内复检。
< 0.45	3 (超临界水平)	危险	管道存在金属腐蚀或缺陷; 建议根据相关规定排除缺陷。

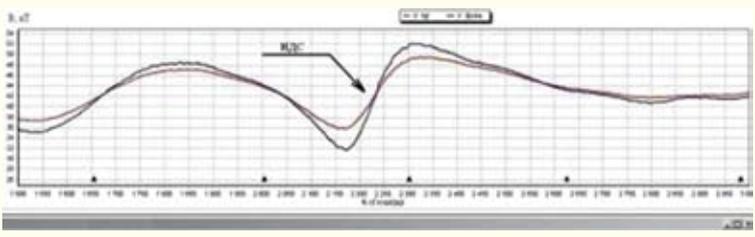
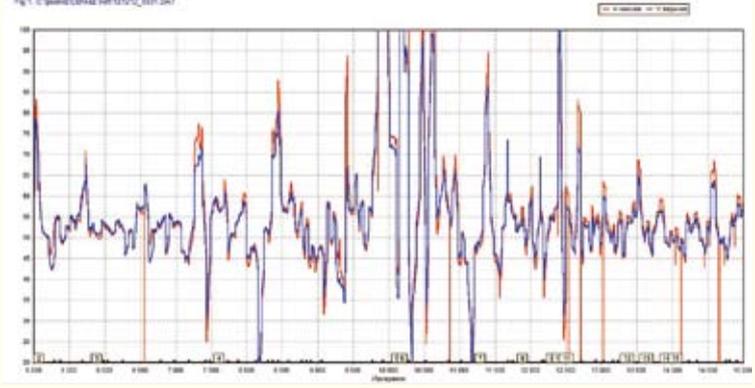
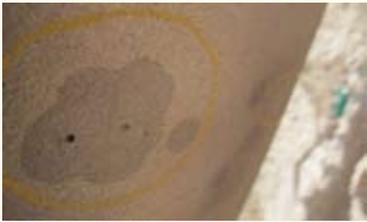
### 3.3 技术适用性

非接触式磁力诊断技术适用于较大管径( $\geq 159\text{mm}$ )和较大工作压力( $\geq 1\text{MPa}$ )的在役埋地管道检测。

在可检测的管道缺陷方面,由于非接触式磁力诊断技术是通过检测管道磁场的磁应力变化来反映缺陷。因此,在非开挖情况下,它能在对在役管道是否处于应力应变状态或存在局部损伤进行判断,从而对管道运行的整体状况进行评价。而对于新建管道(尚未投入运行,管道内没有压力),非接触式磁力诊断技术只能对埋地管道的应力应变状态进行检测。

根据非接触式磁力诊断技术在实际检测中的应用情况,总结了一些典型缺陷的磁力异常信号图形示例如表2。

表2 典型管道缺陷磁力信号示例

缺陷	照片	地磁记录图
应力 应变状态		
几何 形变		
金属 剥离		
局部 损伤		
非法 缺口		

### 3.4 应用特点

作为管道外检测技术中的一种,非接触式磁力诊断技术在检测过程中不需要接触管道,无需停止或更改管道的正常工作状态;在实施检测前,也无需对管道进行繁杂的前期准备工作。

另外,非接触式磁力诊断技术对被检管道的输送介质没有要求,对天然气、输油管道均可实施检测。更重要的是,无论管道工作压力条件如何,非接触式磁力诊断技术对于检测管道的应力应变状态都非常有效,因此对于燃气管道而言具有较大的应用价值。

表3 管道基本信息

	管道NO. I	管道NO. II
类型	干线天然气管道	干线天然气管道
运行时间	1999年	1997年
管径	500mm	500mm
工作压力	1.8MPa	1.6MPa
埋深	2.0/2.2m	1.7m
检测环境	多障碍物(建筑物、道路、树丛、桥梁等)	多障碍物(建筑物、道路、树丛、桥梁等)

## 4 城市燃气管道应用试验

为进一步研究和验证非接触式磁力诊断技术在城市燃气管道上的可行性和适用性,选取了北京市两处天然气管道进行实际应用试验。两处管道的总长10km,基本信息见表3。

### 4.1 试验步骤

试验总体分为6个步骤,每个步骤的名称和主要事项详见表4。

### 4.2 数据记录

两处管道现场采集的所有磁场异常数据汇总和开挖点的地磁记录见表5、表6、图3、图4和图5。

表4 非接触式磁力诊断系统(KMD)试验步骤

试验步骤	主要事项
前期准备	收集待检管道设计、运营以及现场环境和管道走向等必要信息
现场采集	使用寻线器定位管道,记录相应的管道GPS信息 使用KMD系统沿管线采集磁场信号,并将采集的数据实时输入存储设备 采集标准参照俄罗斯“地下燃气管网诊断技术细则(RD12-411-01)”和“非接触式管道诊断技术细则(RD 102-008-2002)”执行
快速分析	对当天采集的数据进行快速分析 找出异常程度最大的点作为开挖校准点
开挖校准	在开挖点进行辅助缺陷检测,包括可视化检测(目测、厚度测量等) 校准分析软件,确定缺陷级别
数据处理	将采集的数据传回分析中心,对所有数据进行最终比对和分析 测定缺陷类型,评定管道缺陷的危险程度等级 根据缺陷等级,制定管道技术条件建议 分析依据参照俄罗斯“非接触式管道诊断技术细则(RD 102-008-2002)”
结果出具	提供管道检测试验结论,提出管道后期运营初步建议 结论涵盖管道各异常点磁力记录图、分析结论、危险等级和初步建议等内容

表5 管道NO.I磁场异常数据记录

异常序号	检测起点	缺陷类型	异常长度(m)	异常幅度(nT)	起点至异常起点的距离(m)	起点至异常中心的距离(m)	起点至异常终点的距离(m)	备注
第1段								
1	起点1	局部损伤	15	3 000	245	252	260	

(续表)

异常序号	检测起点	缺陷类型	异常长度 (m)	异常幅度 (nT)	起点至异常起点的距离 (m)	起点至异常中心的距离 (m)	起点至异常终点的距离 (m)	备注
第2段								
2	起点2	局部损伤	6	2 000	117	120	123	
3	起点2 (1区)	应力应变状态+局部损伤	52	3 500	138	138-190	190	
4	起点2	应力应变状态	18	6 000	329	338	347	
5	起点2	局部损伤	8	6 500	363	367	371	
6	起点2	应力应变状态	10	4 000	540	545	550	
7	起点2	局部损伤	6	2 000	625	628	631	
8	起点2	应力应变状态	10	3 000	643	648	653	
9	起点2 (2区)	应力应变状态+局部损伤	50	3 000	710	710-760	760	
10	起点2	局部损伤	11	5 500	892	898	903	
11	起点2 (3区)	应力应变状态+局部损伤	40	5 400	1 260	1 260-1 300	1 300	
12	起点2	局部损伤	9	4 000	1 396	1 400	1 405	
13	起点2	局部损伤	8	4 000	1 582	1 586	1 590	
第3段								
14	起点3	局部损伤	10	3 500	150	155	160	
15	起点3 (4区)	应力应变状态+局部损伤	84	5 000	186	186-270	270	
16	起点3 (5区)	应力应变状态+局部损伤	42	5 000	399	399-441	441	
17	起点3	应力应变状态+局部损伤	50	3 500	502	502-552	552	
18	起点3 (5区)	应力应变状态+局部损伤	132	4 500	862	862-994	994	
19	起点3	应力应变状态+局部损伤	18	6 000	1 083	1 092	1 101	
20	起点3	应力应变状态	22	4 500	1 178	1 189	1 200	
21	起点3	局部损伤	13	2 700	1 229	1 235	1 242	
22	起点3	局部损伤	8	4 200	1 302	1 306	1 310	
23	起点3	局部损伤	10	5 700	1 330	1 335	1 340	
24	起点3	应力应变状态	40	7 000	1 515	1 535	1 555	
25	起点3 (6区)	应力应变状态+局部损伤	120	9 400	1 570	1 570-1 690	1 690	
26	起点3	局部损伤	15	4 600	1 737	1 744	1 752	
27	起点3	应力应变状态+局部损伤	25	9 000	1 785	1 797	1 810	
第4段								
28	起点4	局部损伤	12	11 500	3	9	15	

(续表)

异常序号	检测起点	缺陷类型	异常长度 (m)	异常幅度 (nT)	起点至异常起点的距离 (m)	起点至异常中心的距离 (m)	起点至异常终点的距离 (m)	备注
29	起点4	局部损伤	8	4 300	25	29	33	
30	起点4	局部损伤	14	6 500	47	54	61	
31	起点4 (7区)	应力应变状态+局部损伤	180	14 500	105	105-285	285	标记为开挖点
32	起点4	应力应变状态+局部损伤	18	5 500	651	660	669	
33	起点4 (8区)	应力应变状态+局部损伤	90	4 500	690	690-780	780	
34	起点4	局部损伤	9	10 600	807	812	816	标记为开挖点
35	起点4	应力应变状态	22	5 500	919	930	941	
36	起点4	应力应变状态+局部损伤	25	4 000	1 042	1 054	1 067	
37	起点4	局部损伤	14	8 000	1 123	1 130	1 137	
38	起点4	应力应变状态	16	3 100	1 259	1 267	1 275	
39	起点4	局部损伤	8	3 500	1 315	1 319	1 321	
40	起点4 (9区)	应力应变状态+局部损伤	66	4 700	1 459	1 459-1 525	1 525	
41	起点4 (10区)	应力应变状态+局部损伤	120	8 000	1 690	1 690-1 810	1 810	
42	起点4	局部损伤	6	8 800	2 020	2 023	2 026	
43	起点4	应力应变状态+局部损伤	16	6 500	2 126	2 134	2 140	

注: 1.第1个起点(基准点)由人为指定,后续起点根据地形情况而定;

2.开挖点的选择,主要依据该处磁场异常程度(异常长度+异常幅度)决定,异常程度相对较大的位置被选为开挖点。

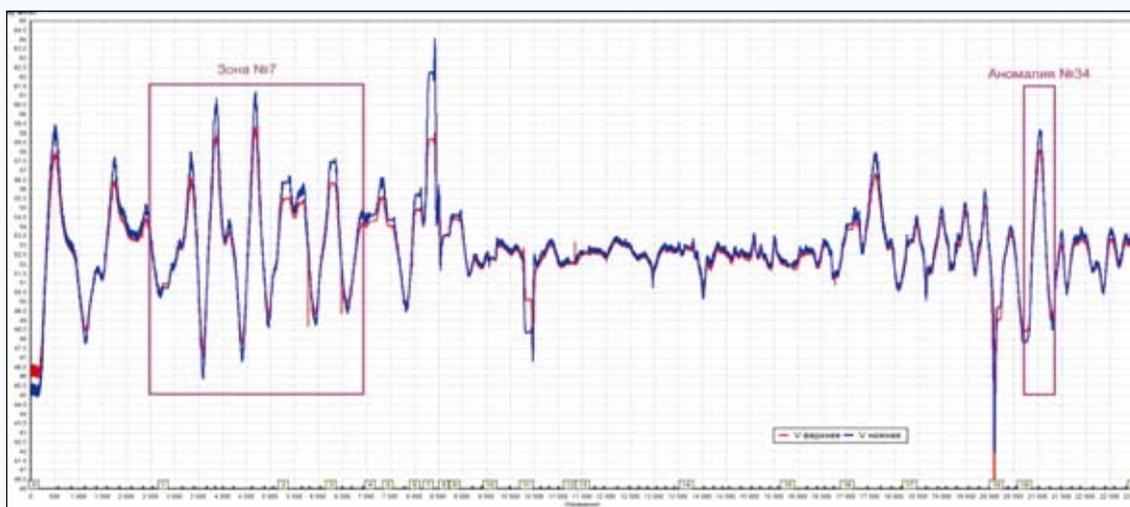


图3 管道NO.I开挖点( NO.31、NO.34异常区)地磁记录图

表6 管道NO.II磁场异常数据记录

异常序号	检测起点	缺陷类型	异常长度 (m)	异常幅度 (nT)	起点至异常起点的距离 (m)	起点至异常中心的距离 (m)	起点至异常终点的距离 (m)	备注
第1段								
44	起点1	应力应变状态	19	7 000	176	185	205	
45	起点1	应力应变状态+局部损伤	30	9 000	230	252	260	
46	起点1	局部损伤	14	6 000	288	293	302	
第3段								
47	起点3	局部损伤	22	10 000	61	72	83	
48	起点3 (1区)	应力应变状态+局部损伤	61	11 000	113	151	174	
第4段								
49	起点4	应力应变状态+局部损伤	28	9 500	127	148	155	
50	起点4	局部损伤	21	7 000	211	220	232	
51	起点4	局部损伤	15	7 000	331	337	346	
52	起点4	应力应变状态	30	6 000	489	506	509	
53	起点4	局部损伤	8	9 000	828	831	836	
第5段								
54	起点5	应力应变状态+局部损伤	19	10 000	25	32	44	
55	起点5	应力应变状态+局部损伤	18	8 000	98	108	116	
56	起点5	应力应变状态+局部损伤	19	8 500	205	211	224	
第6段								
57	起点6	局部损伤	11	8 500	8	11	19	
58	起点6 (2区)	应力应变状态+局部损伤	275	13 000	110	148	385	共标记4个开挖点
第7段								
59	起点7	局部损伤	4	36 500	160	162	164	标记为开挖点
第8段								
60	起点8	局部损伤	9	6 500	134	149	153	
第9段								
61	起点9	局部损伤	8	10 500	7	11	15	
62	起点9	应力应变状态+局部损伤	39	10 000	69	85	108	
63	起点9	局部损伤	12	6 000	251	257	263	

注：1. 第1个起点（基准点）由人为指定，后续起点根据地形情况而定；  
 2. 开挖点的选择，主要依据该处磁场异常程度（异常长度+异常幅度）决定，异常程度相对较大的位置被选为开挖点。

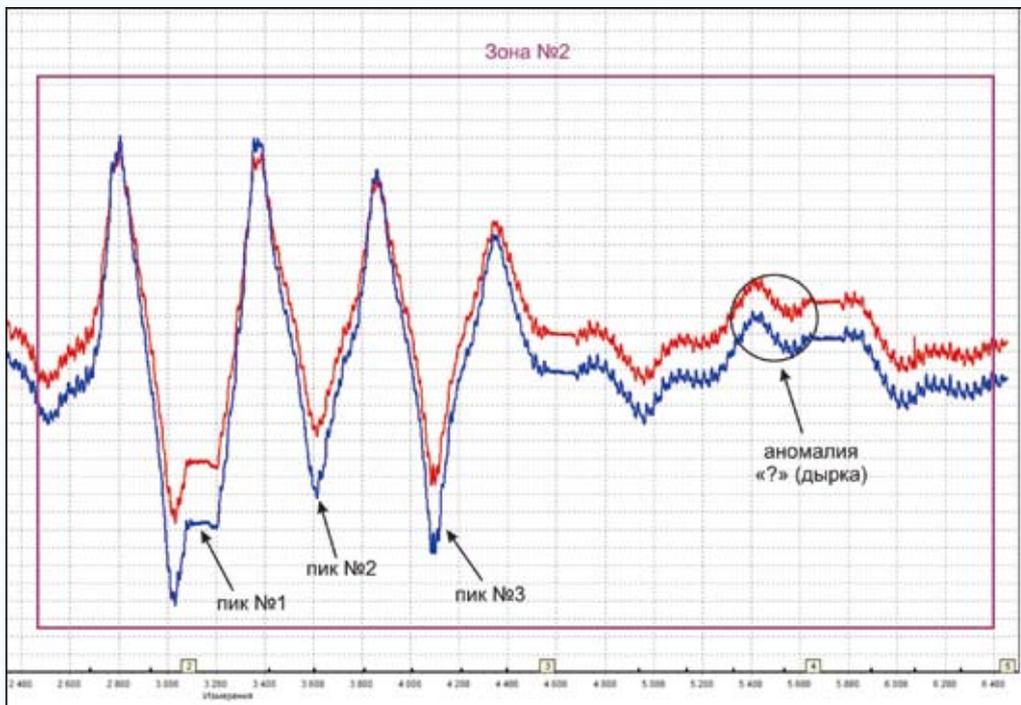


图4 管道NO.II开挖点 ( NO.58异常区 ) 地磁记录图

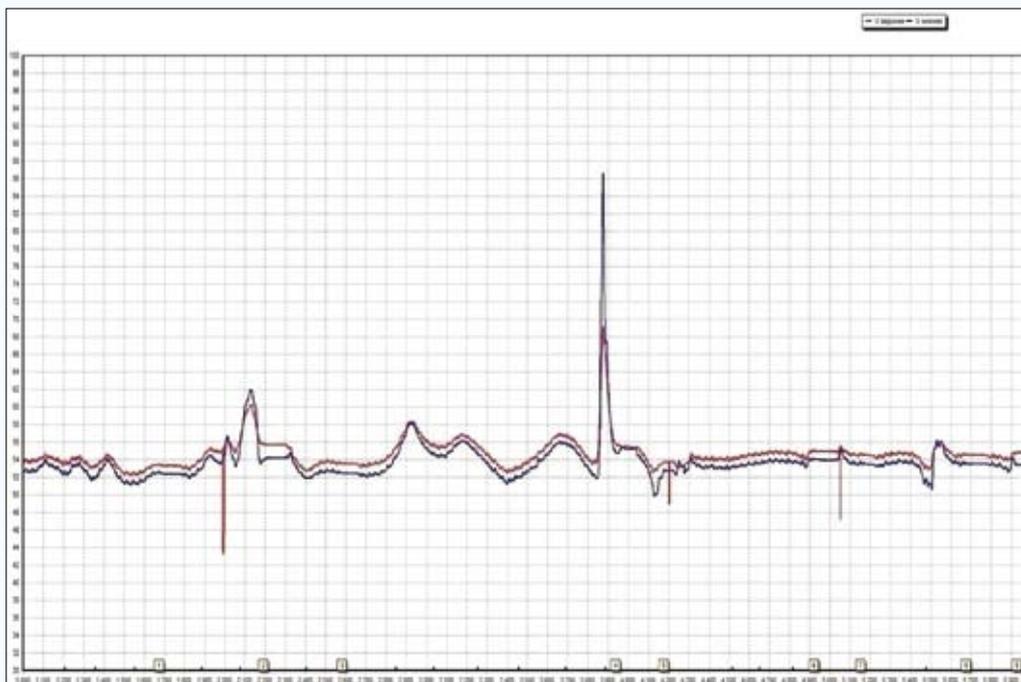


图5 管道NO.II开挖点 ( NO.59异常区 ) 地磁记录图

### 4.3 开挖校准

对采集的数据进行分析和现场复核并根据现场条件，最终在管道NO.I和管道NO.II上确定了3个点作为本次检测应用试验的开挖校准点，其中管道NO.I上1

个点，管道NO.II上2个点。

(1) 开挖坑尺寸

长度：标记中心位置两侧沿管道方向各1m；

宽带：管道左右两侧各1m；

深度：坑底距离管道下表面不少于0.2m。

(2) 辅助检测内容

开挖后的辅助检测项目主要包括：可视化检测（目测）、超声波测厚、管体涡流探伤、硬度测量等。

(3) 管道NO.I开挖辅助检测结果（见表7、图6~图10）

1) 防腐层外表面发现2处局部损伤；

2) 剥离防腐层后，使用涡流探伤仪发现8处应力腐蚀缺陷（应力作用下的金属裂痕）和1处磨痕；

3) 超声波测厚未发现管道壁厚与设计壁厚存在偏差。

(4) 管道NO.II开挖辅助检测结果

1) 防腐层表面完好，未发现破损；

2) 使用涡流探伤未发现管体缺陷；

3) 超声波测厚未发现管体壁厚损失。

4.4 试验结果

根据以上数据和开挖校准结果，本次应用试验的结果情况如下：

表7 管道NO.I开挖点辅助检测结果

缺陷/项目	缺陷位置 (时钟图)	开裂区域尺寸 (mm)	裂纹宽度 (mm)
1	11h24m	120*130	0.3-0.4
2	磨痕		1.5-2.0 (深度)
3	9h-10h	300*50	0.3-0.4
4	3h30m-4h	150*150	0.4-0.7
5	3h-4h30m	400*250	0.3-0.5
6	2h30m-5h	500*100	0.3-0.5
7	2h42m	70*50	0.3-0.4
8	3h12m- 3h42m	150*80	0.3-0.4
9	4h-4h30m	200*300	0.3-0.5
目视检测	2处防腐层损伤 (4*4mm、4*10mm)		
PCM+检测	管道埋深2.5m		
超声波测厚	壁厚7.5mm~7.9 mm, 未检测到内部腐蚀		
中心处坐标	39.846382, 116.563103		

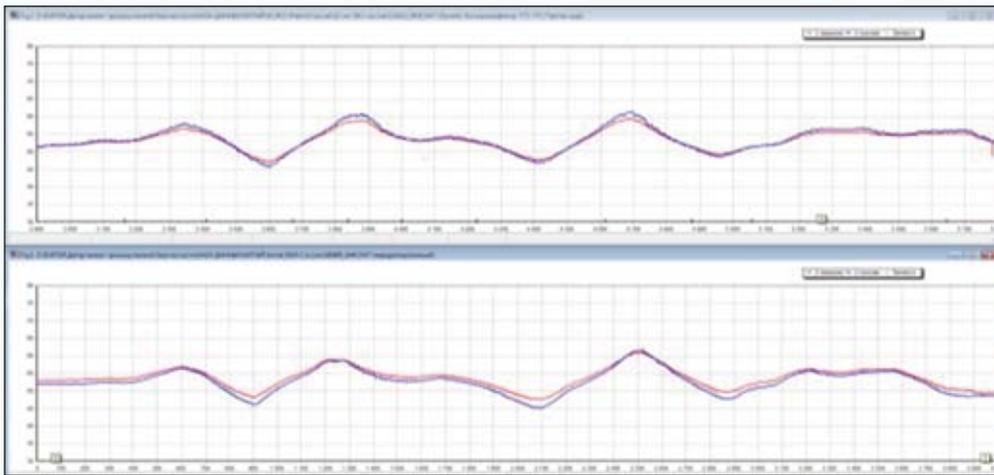


图6 现场检测与复核时磁场异常图示对比（下为复核时磁场异常）

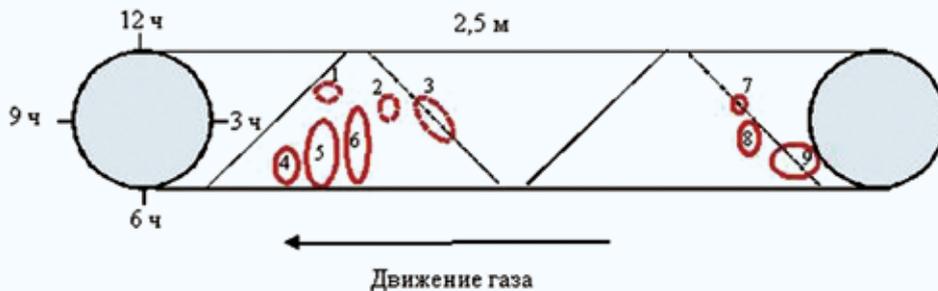


图7 管道NO.I开挖点缺陷分布示意（虚线表示在管道右侧方向）



图8 管道NO.I防腐层缺陷



图9 管道NO.I损伤区域



图10 管道NO.I应力腐蚀裂痕(放大)

(1) 两处管道共发现63处磁场异常区域。其中,管道NO.I有43处,管道NO.II有20处;

(2) 开挖后辅助检测,管道NO.I上存在应力集中区域,所发现的缺陷均属于亚临界水平,当前情况下不会对管道的运营构成威胁;

(3) 开挖后未在管道NO.II上发现缺陷;

(4) 管道NO.I和管道NO.II的整体运行状态均为良好,安全性较高;

(5) 后期建议对管道NO.I每年进行检测,监测其应力集中的发展动态。管道NO.II的下一次检测不应晚于本次检测后3年时间。

## 5 结语

从目前国内外管道检测的实际应用情况来看,内检测技术检测精度较高,但其对管道的应用条件较为

苛刻,且应用成本较高,对管道运行的风险较大。外检测技术,应用方便、成本较低,随着技术发展,其检测精度也在不断提高。

此次在城市燃气管道上的应用试验,验证了非接触式磁力诊断技术的可行性。该技术使用便利,能有效减少管道检测的整体工作量,检测过程不会对管道的正常运行产生任何影响。同时在开挖校准前进行现场复核时所采集的磁场异常信号,与检测时所采集的信号图形高度吻合,也证明了该设备检测数据的重复性较高。

非接触式磁力诊断设备在城市燃气管道上的应用存在一定的适用性。首先它对被检管道有一定的要求,包括管径、压力、周边环境干扰等;另外该设备检出的是管道的异常区段,而不是缺陷的精准位置,且对引起异常的原因无法进行精确的定性,目前只有通过开挖校准才能判断具体的异常类型。

总体来说,非接触式磁力诊断技术是一种可对管道整体运行状态进行评价的非开挖检测技术,能对管道进行定量检测,找出管道上风险较高的区段,适合作为管道内检测技术的有效补充手段,对城市燃气管道中不具备内检条件的管道进行定检、巡检工作。

### 参考文献

- 1 沈功田,景为科,左延田.埋地管道无损检测技术.2006
- 2 宋生奎,宫敬,才建等.油气管道内检测技术研究进展.石油工程建设,2005;31(2):10-14
- 3 刘慧芳,张鹏,周俊杰等.油气管道内腐蚀检测技术的现状与发展趋势.管道技术与设备,2008;5:46-56
- 4 石永春,刘剑锋,王文娟.管道内检测技术及发展趋势.工业安全与环保
- 5 尚兵,李晓松.埋地管道管体腐蚀状况地面检测方法综述.防腐保温技术,2008;16(4):32-34
- 6 沈功田.中国无损检测与评价技术的进展.第17届世界无损检测大会主题报告,2008;30(11):787-793
- 7 黄东岩.基于磁性技术的无损检测方法研究[D].吉林:吉林大学,2012
- 8 刘桂良,陈群志,徐滨士等.金属磁记忆无损检测技术的现状与进展.第六届全国表面工程学术会议,2006:994-997