

电磁涡流在盐穴型储气库中的应用实践

时 飞¹, 王元刚¹, 尚兆辉¹, 谈玉同², 熊 伟³

¹国家管网集团储能技术有限公司, 江苏 镇江

²国家石油天然气管网集团有限公司西北分公司银川输油气分公司, 宁夏 银川

³四川德源兴能科技股份有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年8月4日; 录用日期: 2025年9月8日; 发布日期: 2025年9月25日

摘 要

在盐穴型、枯竭油气藏及含水层三类储气库中, 盐穴型储气库因注采速度快、循环效率高, 成为天然气储运系统中用于调峰与战略储备的关键设施。盐穴型储气库管道因其壁厚大(16 mm)、介质流速低、且采用非标清管阀进行收发作业, 导致传统无损检测技术(如漏磁、超声)难以适用。本文以某储气库为例(壁厚16 mm), 详细阐述了针对性解决方案, 包括采用定制化涡流检测器、优化收发工艺等, 并通过对现场检测数据的分析, 评估了管道内部的金属损失状况、分布规律和腐蚀速率, 并结合开挖实证: 电磁涡流技术能够有效、准确地完成此类复杂工况下管道的内检测, 填补了行业技术空白, 为其下一步在管道内检测中推广应用提供借鉴。

关键词

电磁涡流, 大壁厚, 内检测, 盐穴型储气库

Application of Electromagnetic Eddy Current Technology in Salt-Cavern Gas Storage Facilities

Fei Shi¹, Yuangang Wang¹, Zhaohui Shang¹, Yutong Tan², Wei Xiong³

¹PipeChina Energy Storage Technology Co., Ltd., Zhenjiang Jiangsu

²Yinchuan Oil & Gas Transmission Sub-Company, PipeChina Northwest Company, Yinchuan Ningxia

³Deyuan Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Aug. 4th, 2025; accepted: Sep. 8th, 2025; published: Sep. 25th, 2025

Abstract

Among the three types of natural gas storage facilities—salt cavern, depleted reservoir, and aquifer—

文章引用: 时飞, 王元刚, 尚兆辉, 谈玉同, 熊伟. 电磁涡流在盐穴型储气库中的应用实践[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(3): 508-516. DOI: 10.12677/jogt.2025.473055

salt cavern storage is characterized by its high injection/withdrawal rate and cycling efficiency, making it a critical infrastructure in natural gas storage and transportation systems for peak shaving and strategic reserves. However, the pipelines in salt cavern storage pose significant challenges for conventional non-destructive testing (NDT) techniques (such as magnetic flux leakage inspection and ultrasonic inspection) due to their large wall thickness, low medium flow velocity, and the use of non-standard pigging valves for launching and receiving operations. This paper presents a case (wall thickness is 16 mm) study of a specific salt cavern storage facility and elaborates on tailored solutions, including the adoption of customized eddy current testing tools and optimized pigging procedures. Through analysis of excavation data, the internal metal loss conditions, distribution patterns, and corrosion rates of the pipeline were evaluated. It shows that electromagnetic eddy current technology can effectively and accurately perform internal inspections under such complex conditions, filling a technological gap in the industry and providing a reference for its further application and promotion in pipeline internal inspections.

Keywords

Eddy Current Testing, Thick-Walled, In-Line Inspection, Salt-Cavern Gas Storage

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

储气库主要分为盐穴型、枯竭油气藏型和含水层型三种。盐穴型储气库是天然气储运系统中的关键基础设施，主要用于调峰保供和战略储备。相较于枯竭油气藏和含水层储气库，盐穴型储气库具有注采速度快、循环效率高等优势。盐穴型储气库通常处于高压、高腐蚀性环境，且涉及大壁厚、低流速和非标收发球装置，收发球装置均采用清管阀设计，内检测难度大大增加。目前常用的管道内检测方法有：超声检测、漏磁检测、涡流检测；超声检测在厚壁材料中传播时，能量随深度呈指数衰减，导致深层缺陷回波信号微弱，信噪比降低且超声检测方法只能用于液体管道检测[1]；漏磁检测方法存在两个主要技术限制[2] [3]：一是对大壁厚管道缺陷检出率低，漏磁检测对管道的磁化强度随着壁厚的增加急剧下降，管壁达不到磁饱和状态，则缺陷及特征的检出率降低；二是对收发球阀装置不适用，漏磁检测器一般长度远超清管阀的长度，对非标收发球装置不适用。涡流检测是在管壁上感应产生涡流，不用将管道全部磁化，因此管道壁厚适用范围更广；感生涡流对内表面缺陷检出灵敏度较高，能检测所有导电试件，且一般检测器较小巧轻便，能适用于非标收发球装置。相比漏磁和超声内检测设备，其适用范围更广[4]-[6]。

盐穴型储气库的卤水腐蚀环境易导致局部点蚀[7]，此类缺陷形态对检测技术的近表面分辨能力和高速适应性提出更高要求。电磁涡流检测通过感应涡流响应表面缺陷，不依赖整体磁化，对壁厚变化不敏感，且适用于更宽的速度范围，因此电磁涡流技术更适用于盐穴储气库管道的检测。

某盐穴型储气库由于运行工况不满足内检测要求，建管 14 年未进行内检测，存在较大风险，经过技术比对于 2024 年 12 月采用电磁涡流检测技术顺利完成内检测。

2. 电磁涡流检测原理

电磁涡流检测是一种基于电磁感应原理的无损检测方法，其核心机理在于：当载有高频交变电流的激励线圈靠近导电材料时，会在试件表层感应出闭合旋涡状电流，该涡流场分布受材料电磁特性及结构

完整性的直接影响[8]。根据麦克斯韦方程组[9],材料中的缺陷会扰动涡流路径,导致检测线圈的等效阻抗发生特征性变化,分析探头上的阻抗变化就可以得到缺陷信息,并可以检测出缺陷的大小和位置等信息。其原理见图1。

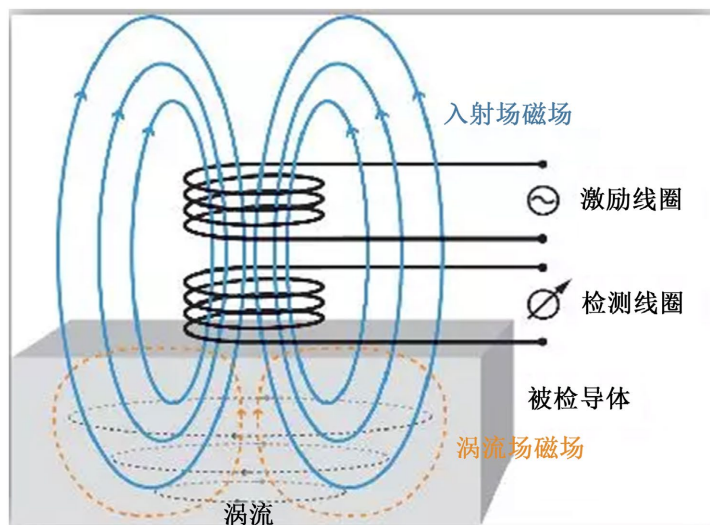


Figure 1. Electromagnetic induction principle

图1. 电磁感应原理图

电磁涡流检测技术具有非接触、高灵敏度、快速高效、便于实现自控等突出优势,无需耦合剂即可实现亚毫米级缺陷检测,特别适用于导电材料的表面及近表面缺陷检测。电磁涡流检测精度受温度和探头提离效应、裂纹深度以及传感器运行速度等因素影响。

3. 电磁涡流技术的现场应用实例

3.1. 项目基本情况

某储气库管线于2010年6月投产,全长2.065 km,输送介质为湿天然气,管材为L360,管线规格为 $\Phi 406\text{ mm} \times 16\text{ mm}$,管道壁厚大,管线设计压力为15 MPa。该储气库管道有以下检测难点,导致建管以来从未进行内检测:

1) 16 mm大壁厚,导致传统漏磁检测磁化穿透管壁能力受限。

2) 收发球装置均为清管阀设计,常规检测工艺适配性不足,改造费用高。运行工况为低压低流量,管道流速无法满足普通检测器的驱动需求。

3) 管道长期未进行清管作业,内部条件不明。

综上,该管道缺乏内腐蚀基础数据,管道存在较大风险。管道长时间工作在高压下,如果不能及时发现并修复其缺陷,将可能导致管道泄漏事故甚至引起爆炸等,造成重大的环境、社会危害和经济损失[10]。

根据以上的检测难点,针对性采取了以下措施:

1) 采用涡流检测器执行内检测,涡流由于其原理特性,不需要将管道全部磁化,不受管道壁厚的影响。

2) 根据清管阀的具体规格,定制设计生产了体积更小、质量更高、长度更短的检测器,且在投送及接受过程中,专门设计了收发球工装,增加发球背压,调整发球工艺,进行控速。

3) 检测前清管,通过发射泡沫清管器和皮碗测径清管器,排除管道内部运行风险点,并采用PIGPRO-TR无源跟球系统对清管器和检测器运行状态进行实时监听。

2024 年 12 月采用了电磁涡流检测技术对该管道进行了内检测, 本次检测不仅填补了该储气库完整性管理的数据空白, 更开创了同类工况下“清管阀收发 + 低流量 + 大壁厚管”组合条件的内检测实践先例。与超声检测和漏磁检测对比, 涡流检测操作简单、成本经济、对表面缺陷检测灵敏度高, 易于实现自动检测, 适用于大壁厚和低流量管道的内腐蚀检测。

检测器顺利通过清管阀并成功完成收球作业, 存储的检测数据完整无缺失, 验证了该检测器对复杂阀体结构的卓越通过性和可靠性, 为后续数据分析提供了高质量原始数据保障。收球后情况详见图 2。



Figure 2. Detector receiving
图 2. 检测器收球后情况

本次内检测检测器总共运行时长 1.2 h, 检测器最大瞬时速度 17.57 m/s, 平均运行速度 0.56 m/s, 全线停球较多, 停球后启动瞬时速度较大。运行速度详见图 3。

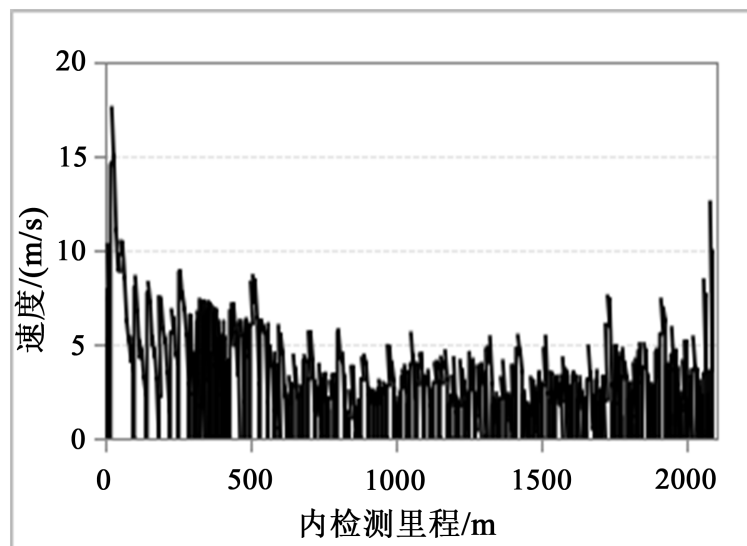


Figure 3. Inspection tool velocity profile
图 3. 检测器运行速度曲线图

在瞬时速度较快时, 管线上的特征和缺陷信号清晰, 信噪比高, 数据质量未受影响。详见图 4、图 5。

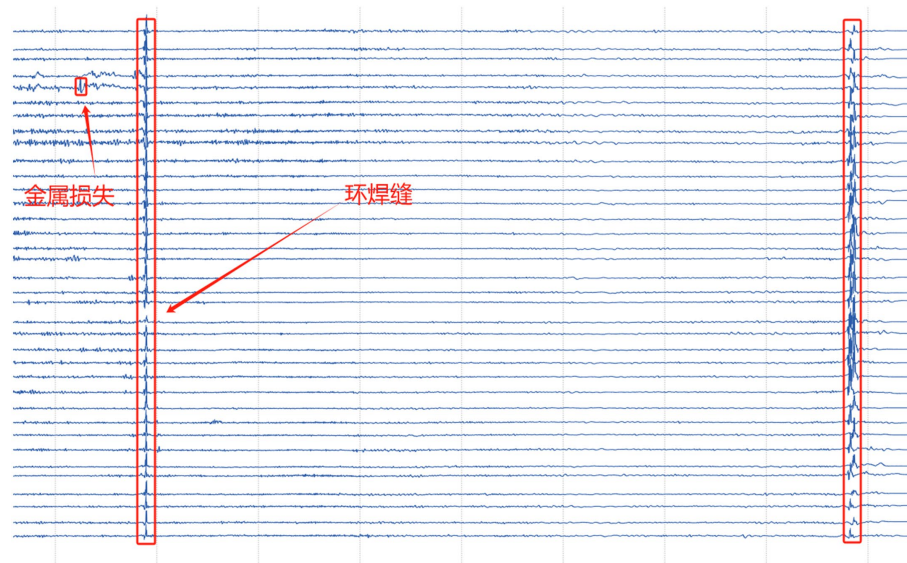


Figure 4. Inspection signal plot
图 4. 检测数据信号图

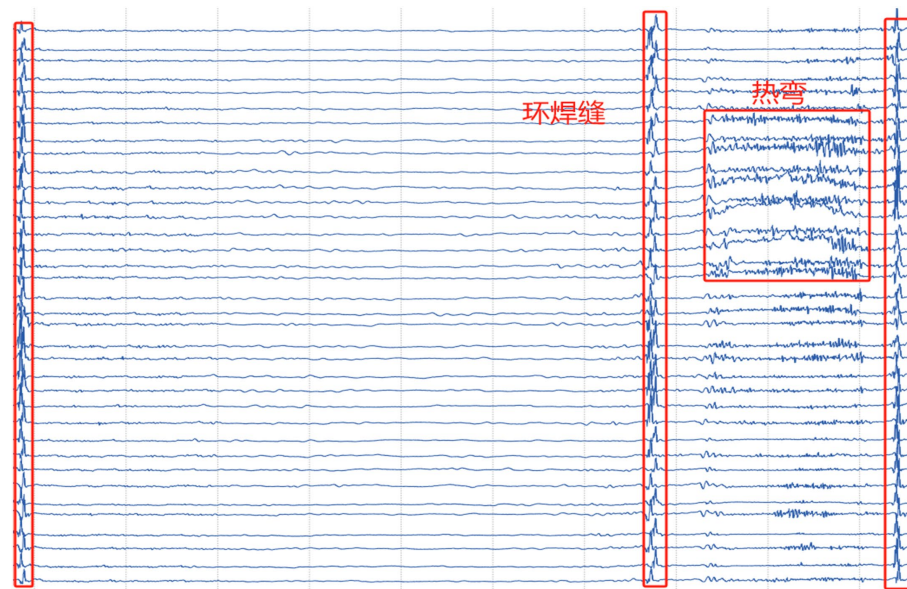


Figure 5. Inspection signal plot
图 5. 检测数据信号图

3.2. 检测结果分析

3.2.1. 内部金属损失分布情况统计

通过对检测数据进行分析,此次共计检测出金属损失 1134 处,最深的内部金属损失深度为 16.3%wt,由表 1 可以看出,98.7%的内部金属损失深度小于 10%wt。

3.2.2. 内部金属损失的分布位置统计分析

本次电磁涡流检测内部金属损失在管道里程上未发现明显集中分布,统计结果见图 6。

由图 7 可以看出,管道低洼处存在多处金属损失,造成这一现象的原因可能是沉积物堆积形成氧浓

差电池，造成分散的局部腐蚀点，或者低洼段长期积液形成稳定的电化学腐蚀环境，导致局部腐蚀明显 [11] [12]。

Table 1. Summary of internal metal loss

表 1. 内部金属损失统计表

缺陷深度范围(%wt)	数量/处	比例
$ML < 5\%$	829	73.1%
$5\% \leq ML < 10\%$	290	25.6%
$10\% \leq ML < 20\%$	15	1.3%
合计	1134	100.0%

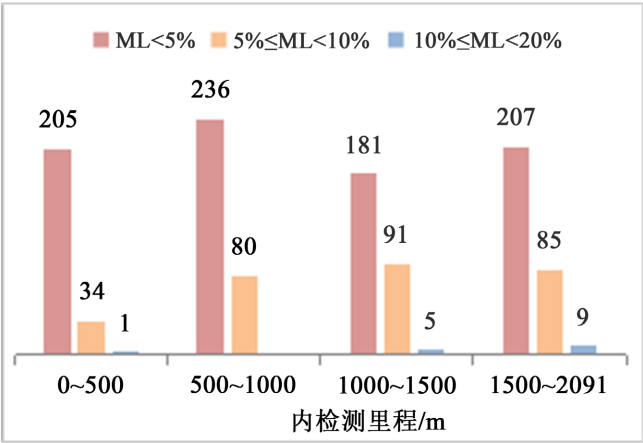


Figure 6. Metal loss distribution vs. distance

图 6. 内部金属损失数量在里程上的分布

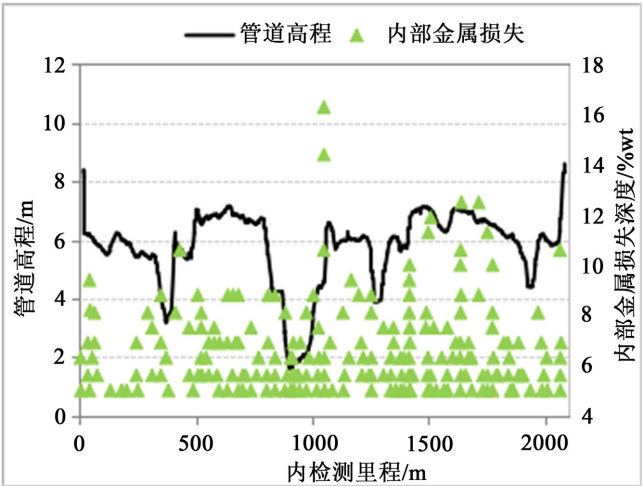


Figure 7. Metal losses ($\geq 5\%wt$) vs. pipe elevation

图 7. 内部金属损失($\geq 5\%wt$)在管道高程上的分布

为了直观地反映内部金属损失在周向上的分布，对内部金属损失的时钟位置进行分析统计，如下图 8。内部金属损失在时钟方位的周向分布上主要集中在 5:00~6:00、6:00~7:00，分布占比 17.2%、10.5%，

内部金属损失在管道底部存在集中分布，符合局部腐蚀和低洼处积液腐蚀特征。

4. 管线评价

4.1. 金属损失评价

本次内检测识别出 15 处深度 $\geq 10\%$ wt 的内部金属损失，按照 SY/T 6151-2022《钢制管道金属损失缺陷评价方法》对内部金属损失缺陷剩余强度进行评价。最大允许操作压力 9.8 MPa，管道强度设计系数取 0.5，经评价本次内检测内部金属损失缺陷均可接受，内部金属损失缺陷最小失效压力为 16.14 Mpa，详见图 9。

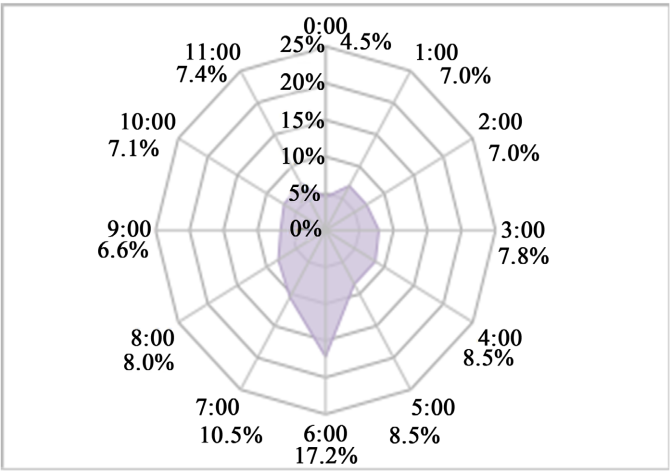


Figure 8. Metal loss distribution vs. circumferential position
图 8. 内部金属损失在周向的分布

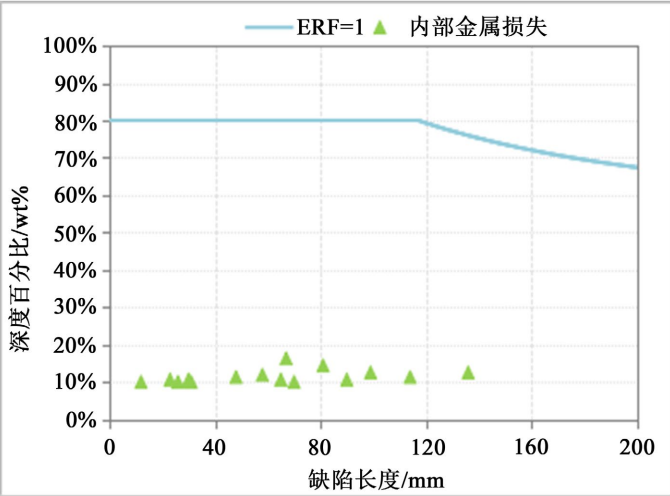


Figure 9. Remaining strength assessment of internal metal loss
图 9. 内部金属损失剩余强度评价

4.2. 内部金属损失腐蚀速率计算

本次内检测识别出 1134 处内部金属损失，内部金属损失全寿命最大增长速率为 0.181 mm/a。详情见表 2。

Table 2. Statistical table of internal metal loss growth rate
表 2. 内部金属损失增长速率统计表

内部金属损失增长速率(mm/a)	内部金属损失增长速率数量/处	占比
0~0.13	1129	99.6%
0.13~0.20	5	0.4%
0.20~0.38	0	0.0%
0.38~0.50	0	0.0%
0.50~1	0	0.0%
≥1	0	0.0%

5. 开挖验证

为了验证数据的准确性，对该管线检测数据中的两处内部金属损失点进行了开挖验证，两处金属损失开挖均实测到有明显壁厚减小，检测概率(POD)和识别概率(POI)均为 100%。长度量化偏差分别为 2 mm 和 1 mm，宽度量化偏差分别为 5 mm 和 2 mm，深度量化偏差分别为 0.39 mm 和 0.02 mm，检测结果满足 GB T 27699 的检测精度指标要求。详情见表 3、图 10、图 11。

Table 3. In-line inspection data VS. excavation data
表 3. 开挖点内检测数据 VS 实测数据

开挖点	峰值深度(%wt)	长度(mm)	宽度(mm)	深度(mm)	周向(h:mm)
1 号内检测量化	8.8	32	55	1.4	10:38
1 号实测	10.53	30	60	1.79	10:45
2 号内检测量化	8.8	29	16	1.4	4:16
2 号实测	8.35	30	18	1.42	4:20

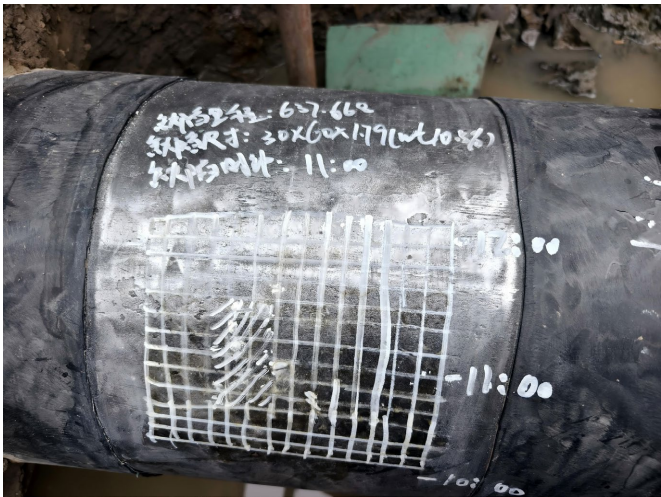


Figure 10. Photo of excavation point 1
图 10. 开挖点 1 现场实测照片

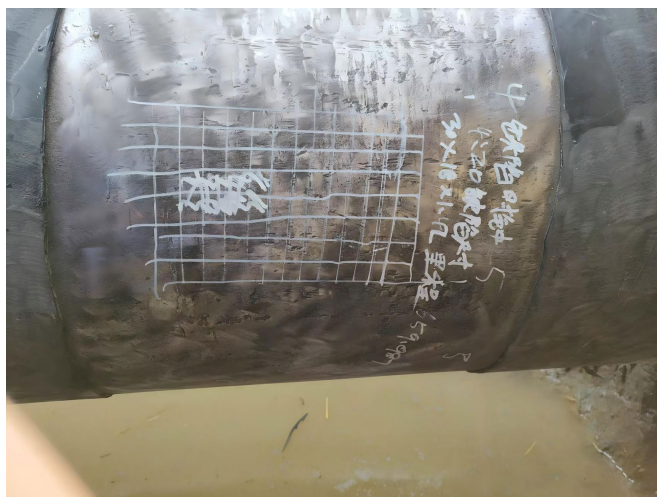


Figure 11. Photo of excavation point 2

图 11. 开挖点 2 现场实测照片

6. 结论

本次电磁涡流内检测技术首次在该储气库复杂工况下的成功应用，为储气库这种特殊管道的完整性管理提供数据支持，填补了行业在该领域的技术空白。

基于电磁涡流检测技术在某盐穴型储气库管道内检测中的实际应用验证，可得出以下结论：电磁涡流检测器适用于大壁厚、低压低流速工况的储气库管线检测，对速度的适应区间较高，且对管道内部金属损失缺陷具有较高的检测灵敏度，能够准确识别和量化管道内部缺陷。为国内盐穴储气库集输管道开展内检测提供技术支持。

参考文献

- [1] 焦靖淇. 基于涡流效应的管道内检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- [2] 燕冰川, 富宽, 张海亮, 等. 环焊缝裂纹型缺陷漏磁内检测牵拉试验研究[J]. 油气田地面工程, 2023, 42(4): 69-75.
- [3] 杨理践, 孙丹, 高松巍. 直流励磁的管道壁厚漏磁检测技术[J]. 无损探伤, 2015, 39(3): 9-12.
- [4] 俞江涛. 基于脉冲涡流技术的小口径管道内检测仿真与实验验证[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [5] 罗清旺. 基于电磁涡流的管道缺陷检测方法研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [6] 李雪辰, 徐滨士, 董世运, 等. 管道内壁缺陷无损检测技术[J]. 无损检测, 2007(10): 603-606.
- [7] 丁志伟, 肖振华, 齐奉忠, 等. 金坛盐穴储气库固井技术研究与应用[J]. 当代化工研究, 2025(3): 152-154.
- [8] 谢崇文, 罗欢, 李潮流. 电磁涡流检测技术在气田集输管道内检测中的应用与分析[J]. 管道技术与设备, 2020(6): 27-30.
- [9] 李兴五. 便携式金属管线电磁波缺陷检测设备研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 长江大学, 2024.
- [10] 丁鹏. 电磁涡流技术在管道内检测中的应用[J]. 石油化工应用, 2024, 43(8): 53-56.
- [11] 都本兰, 任玉波. 管线钢的腐蚀风险分析与防控管理[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 143-154.
- [12] 刘诗桃, 周军, 刘岳龙, 等. 大牛地气田集输管道低洼处腐蚀机理研究[J]. 材料保护, 2024, 57(8): 122-129.