

埋地燃气管道泄漏扩散分析研究

陈 龙

云南中石油昆仑燃气有限公司, 云南 昆明

收稿日期: 2025年6月6日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月15日

摘 要

针对实际埋地燃气管道泄漏时天然气在不同类型土壤(沙土、黏土颗粒)及复杂地下空间(存在其他市政管道)中的迁移扩散规律不明确, 给实际天然气工程管理及维护造成很大困扰。利用室内实验, 系统分析研究了泄漏流量、泄漏口方向、泄漏点与扩散管水平/垂直距离、土壤表面覆盖等因素对扩散行为的影响及特征。分析发现: 泄漏流量是主要驱动因素, 流量增大会显著提升扩散速度、浓度累积范围和最终浓度(远距离测点反应同步明显)。土壤孔隙率是扩散模式的主要驱动因素, 沙土(小孔隙率)中天然气横向扩散范围更大, 但浓度累积较慢; 黏土颗粒(大孔隙率)中扩散速度快但影响范围小, 浓度梯度大。土壤不同类型对泄漏口方向的影响差异很大, 沙土中开口向下可加速扩散并扩大影响范围, 而黏土中开口向下则抑制扩散能力。与此同时, 管道水平距离增加会大幅降低天然气向其它市政管道扩散的速度和浓度累积量; 地表覆盖会阻碍天然气向上扩散, 迫使横向迁移范围扩大, 增加进入邻近密闭空间的风险。研究结果为燃气泄漏事故的预防、监测及应急处置等提供了有效的科学依据。

关键词

埋地燃气管道, 泄漏, 燃气管道泄漏扩散, 地下迁移模拟实验

Research on Leakage and Diffusion Analysis of Buried Gas Pipeline

Long Chen

Yunnan PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: Jun. 6th, 2025; accepted: Aug. 27th, 2025; published: Sep. 15th, 2025

Abstract

The uncertain migration and diffusion patterns of natural gas in various soil types (sand, clay particles) and complex underground environments (including the presence of other municipal pipelines)

during actual buried gas pipeline leaks pose considerable challenges to the management, maintenance, and emergency response of natural gas engineering projects. Through indoor experiments, we systematically analyzed and studied the impact and characteristics of various factors on diffusion behavior, including leakage flow rate, leakage port orientation, horizontal/vertical distance between the leakage point and the diffusion tube, and soil surface coverage. Our analysis revealed that leakage flow rate is the primary driving factor, with increased flow rates significantly enhancing diffusion speed, concentration accumulation range, and ultimate concentration (with notable synchronization at remote measurement points). Soil porosity emerged as the key determinant of diffusion patterns, with natural gas in sandy soil (characterized by low porosity) exhibiting a broader lateral diffusion range but slower concentration accumulation, whereas in clay particles (with high porosity), the diffusion rate is swift but the impact range is limited, resulting in a steep concentration gradient. The influence of soil type on leakage port orientation varies significantly. In sandy soil, a downward-facing leakage port accelerates diffusion and expands the scope of influence, whereas in clay, a downward-facing port inhibits diffusion. Furthermore, an increase in the horizontal distance from the pipeline significantly reduces the speed and concentration accumulation of natural gas diffusion towards other municipal pipelines. Surface cover hinders upward diffusion of natural gas, forcing it to migrate laterally over a broader range and increasing the risk of entering adjacent enclosed spaces. The findings of this research provide a solid scientific basis for the prevention, monitoring, and emergency response to gas leakage accidents.

Keywords

Underground Gas Pipeline, Leakage, Gas Pipeline Leakage Diffusion, Underground Migration Simulation Experiment

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

随着城市化进程的加速,埋地燃气管道作为重要的能源基础设施,其安全运行至关重要。然而,由于腐蚀、外力破坏、施工缺陷等原因,埋地燃气管道泄漏事故时有发生[1][2]。泄漏的天然气在土壤中扩散,可能进入地下空间,如检查井、污水管道、热力管沟等,一旦遇到火源,极易引发爆炸事故,严重威胁人民生命财产安全[3][4]。研究埋地燃气管道泄漏后天然气在土壤及地下空间的迁移扩散规律,对于预防和控制燃气泄漏事故具有重要意义。

目前国内外学者针对埋地燃气管道泄漏扩散问题开展了一系列研究。实验研究方面,Wang 等[4]通过大型实验系统研究了甲烷从地下管道泄漏后的扩散规律以及甲烷在附近密闭空间中的积聚情况。Xie 等[5]进行了全尺寸气体泄漏实验,模拟真实地下管道,研究了气体在土壤中对流和扩散的趋势。朱建禄等[6]建立了一个全尺寸实验系统,研究不同氢气混合比、释放压力和泄漏方向等不同释放条件下掺氢天然气管道的泄漏扩散行为和浓度分布。数值模拟方面,Wang 等[1]通过数值模拟研究了天然气从地下管道真空泄漏到土壤中的扩散行为。Liu 等[1]建立了埋地氢气混合天然气管道泄漏扩散的综合模型,实现了管道流动、渗流和扩散模型的耦合。Zeng 等[7]针对隧道内平行埋地燃气管道的泄漏扩散规律进行了数值模拟研究。Parvini 等[8]建立了气体泄漏后果模型,研究了泄漏气体的释放和运动特性。此外,一些研究还关注了泄漏检测技术。Sun 等[9]研究了基于电阻率法的气体泄漏检测可行性。Zhang 等[10]提出了基于布里渊光频域分析(BOFDA)的多物理场联合检测方法。Lin 等[11]研究了基于声源特征的埋地天然气管道泄漏检测方法。

Zhao 等[12]研究了埋地燃气管道泄漏的基本声波时频参数。

但是现有研究仍存在一些不足。土壤关键性质对扩散的定量影响机制不明晰, 尽管普遍认识到土壤湿度、土壤类型(质地、结构, 如砂土、粘土、壤土)、孔隙度、有机质含量等性质是影响气体扩散的核心参数, 但其定量化影响关系的研究尚不深入和系统化[13] [14]。复杂地下空间结构下的扩散规律认识不足, 对真实世界中复杂的、高度异构化的地下环境下的气体扩散、迁移与积聚机制研究相对滞后[15]。这类环境包括存在多个相互连通或部分连通的相邻密闭空间(如人防工程、地下商场/车库网络、废弃矿井巷道、相互靠近的地下储罐)、贯穿或包裹其中的管廊/管线系统、以及地质非均质性(如透镜体、断层、裂隙带)。泄漏诱发的次生灾害研究严重不足, 对于气体泄漏后可能引发的次生灾害链的研究相对匮乏[16]。除了气体本身的风险(如爆炸、中毒), 尤其缺乏对如土壤结构破坏引起的地面沉降或塌陷(地陷)、承压地下水系统扰动、以及长期生态环境影响等问题的系统探讨。

为更真实地模拟实际泄漏场景, 本课题拟开展埋地燃气管道泄漏气体在多孔介质(土壤)及地下密闭空间中的扩散行为实验研究。通过构建大型实验系统, 模拟不同工况下燃气在土壤中的扩散过程, 以及进入地下密闭空间后的迁移、积聚规律。

2. 埋地天然气管道泄漏扩散实验

2.1. 实验装置

实验使用长 1.5 米、宽 0.9 米、高 0.9 米的铁制土壤箱。采用砂土和黏土两种颗粒作为实验土壤。天然气气源引自中低压燃气管道系统, 中压工况的流量和压力通过罗茨流量计读取, 低压工况流量则由膜式燃气表计量。在纯土壤模拟中, 泄漏管沿土壤箱中轴线插入箱内深度为 0.7 米, 泄漏口距箱底高度为 0.35 米。使用一根直径为 75 毫米的 PVC 管模拟邻近管道, 其垂直安装位置距箱底 0.35 米, 其一端插入土壤箱深度为 0.3 米。该模拟管道上沿长度方向按 3 米间隔布设了四个测量点。

管道入口保持完全敞开状态。土壤箱内的泄漏口位置以及其他模拟市政管道入口(如上述 PVC 管入口)设有压力测点, 使用压差测量仪进行压力计量。泄漏口的具体位置可在土壤箱中轴线上根据实验工况进行调整。

2.2. 实验条件设置

实验设置包含两种基础场景, 一是纯土壤环境: 泄漏点附近无其他市政管道; 二是存在邻近管道: 泄漏点附近存在模拟的市政管道; 在两种场景下均使用沙土和黏土进行土质对比。纯土壤实验, 主要考察泄漏流量(Q)、泄漏口方向、管道压力(P)三个变量的影响; 邻近管道实验, 以 2 组(沙土/黏土)为对照基准, 对比考察, 泄漏流量(Q)、泄漏口 - 扩散管口间距(S)、泄漏口方向、泄漏管 - 扩散管垂直埋深差(ΔH)、土壤表面覆盖条件。具体实验工况详见表 1。

2.3. 实验结果与分析

(1) 土壤中有其他市政管道情况下不同水平距离对扩散的影响

泄漏口与邻近管道开口的水平间距梯度调整为 30/60/90/110 cm, 固定管道压力 0.05 MPa (中压), 泄漏口朝上。沙土与黏土的泄漏流量分别控制为 $7.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 与 $8.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。两种土壤不同水平间距下各测点浓度动态详见图 1, 图 2。

水平间距增大显著延缓各测点响应速率。如图 3, 图 4 所示, 测点 2 的浓度累积速率随水平距离增加而衰减, 且相邻测点间扩散时差梯度性扩大。虽扩散管径较大, 但沿程阻力仍持续消耗压力驱动力, 导致远端逐渐转为依赖密度差扩散。因此, 各点浓度增长率随距离增大而系统性放缓, 直观表现为同点位平衡时间随间距增加显著延长。

Table 1. Specific experimental conditions
表 1. 具体试验工况

场景类型	土壤类型	组别	变量参数	固定/公共参数
无邻近管道	沙土	1	流量 = 0.17 m ³ /h, 压力 = 3000 Pa, 方向 = ↑	天然气
		2	流量 = 0.65 m ³ /h, 压力 = 3500 Pa, 方向 = ↑	
		3	流量 = 0.9 m ³ /h, 压力 = 3500 Pa, 方向 = ↑	
		4	流量 = 7.0 m ³ /h, 压力 = 0.05 MPa, 方向 = ↑	
		5	流量 = 0.9m ³ /h, 压力 = 3500 Pa, 方向 = ↓	
	黏土	6	流量 = 0.65m ³ /h, 压力 = 3300 Pa, 方向 = ↑	氢气
		1	流量 = 0.6m ³ /h, 压力 = 3000 Pa, 方向 = ↑	天然气
		2	流量 = 1.0 m ³ /h, 压力 = 3000 Pa, 方向 = ↑	
		3	流量 = 7.5 m ³ /h, 压力 = 0.05 MPa, 方向 = ↑	
		4	流量 = 1.0 m ³ /h, 压力 = 3000 Pa, 方向 = ↓	
有邻近管道	沙土	1-4	水平距 = 30/60/90/110 cm, 垂直距 = 0 cm	压力 = 0.05 MPa, 流 = 7.2 m ³ /h, 方向 = ↑, 无覆盖
		5	水平距 = 60cm, 垂直距 = 30 cm	
		6	方向 = ↓	
		7	有覆盖	
	黏土	8	压力 = 3000 Pa, 流量 = 1.5 m ³ /h	方向 = ↑, 无覆盖
		1-4	水平距 = 30/60/90/110 cm, 垂直距 = 0 cm	压力 = 0.05 MPa, 流量 = 8.5 m ³ /h, 方向 = ↑, 无覆盖
		5	水平距 = 60 cm, 垂直距 = 30 cm	
		6	方向 = ↓, 流量 = 5.0 m ³ /h	压力 = 0.05 MPa, 无覆盖
		7	有覆盖, 流量 = 8.2 m ³ /h	方向 = ↑, 压力 = 0.05 MPa
		8	压力 = 3000 Pa, 流量 = 2.0 m ³ /h	方向 = ↑, 无覆盖

↑：泄漏口朝上；↓：泄漏口朝下；水平/垂直距：泄漏口与扩散管口的间距。

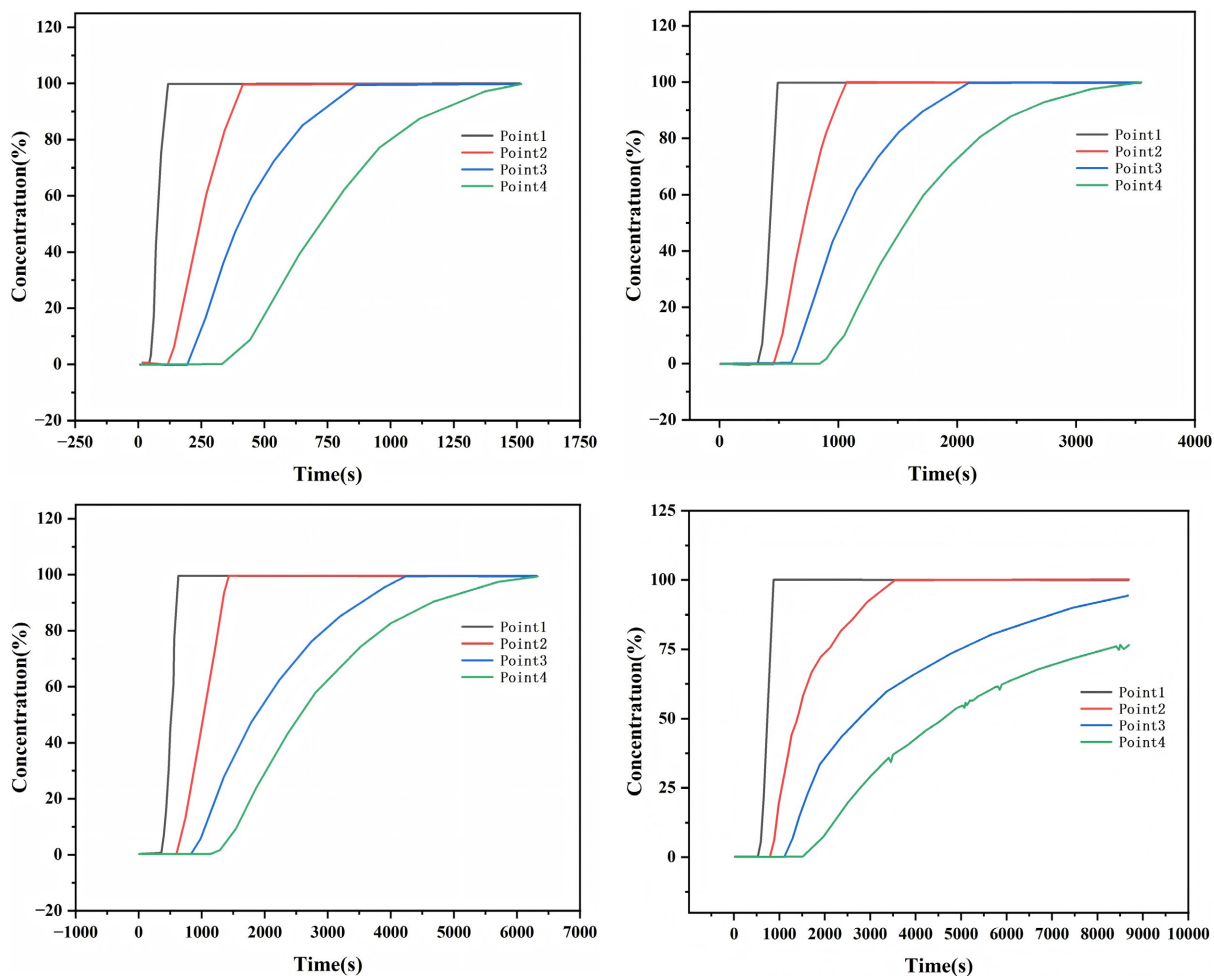


Figure 1. Shows the concentration changes of various measuring points in sandy soil at horizontal distances of 30 cm, 60 cm, 90 cm, and 110 cm

图 1. 水平距离为 30 cm、60 cm、90 cm 和 110 cm 时沙土中各测点浓度变化图

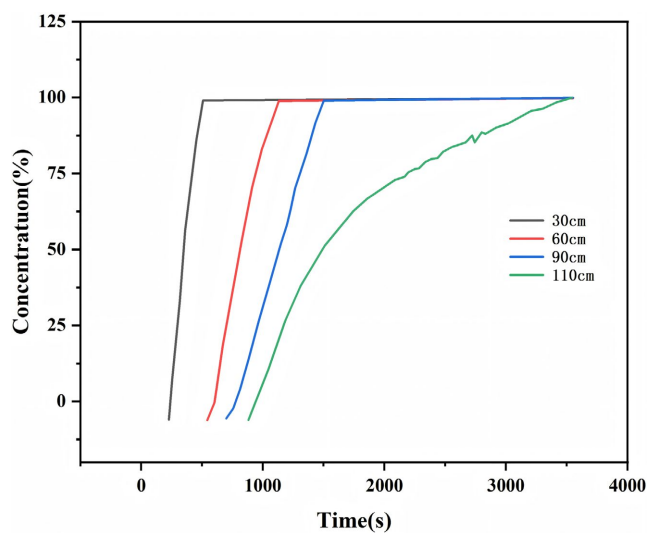


Figure 2. Concentration changes of measuring point 2 in sandy soil at different horizontal distances

图 2. 水平距离不同时沙土中测点 2 浓度变化

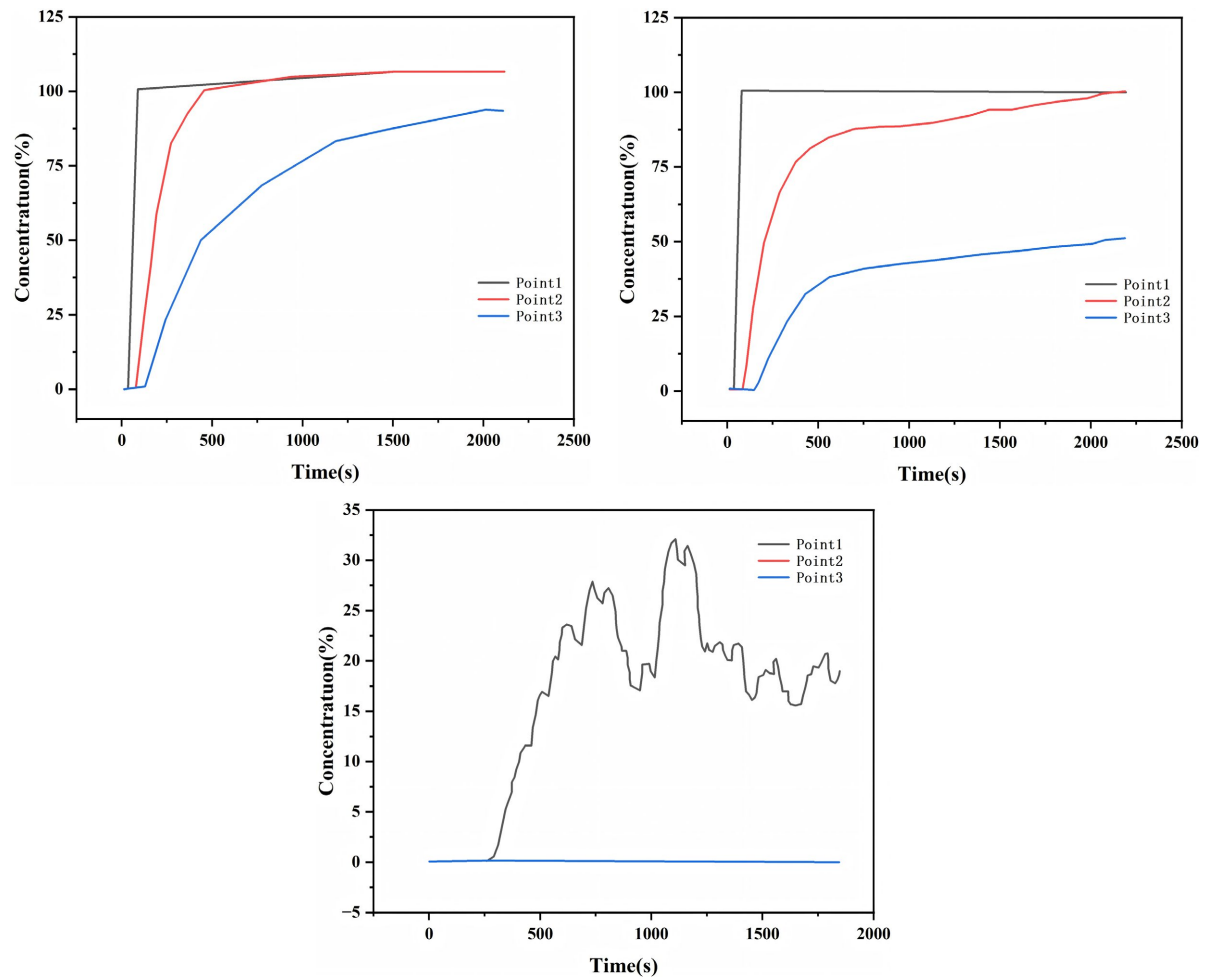


Figure 3. Concentration changes at various measuring points in clay at horizontal distances of 30 cm, 60 cm, 90 cm, and 110 cm
图 3. 水平距离为 30 cm、60 cm、90 cm 和 110 cm 时黏土中各测点浓度变化图

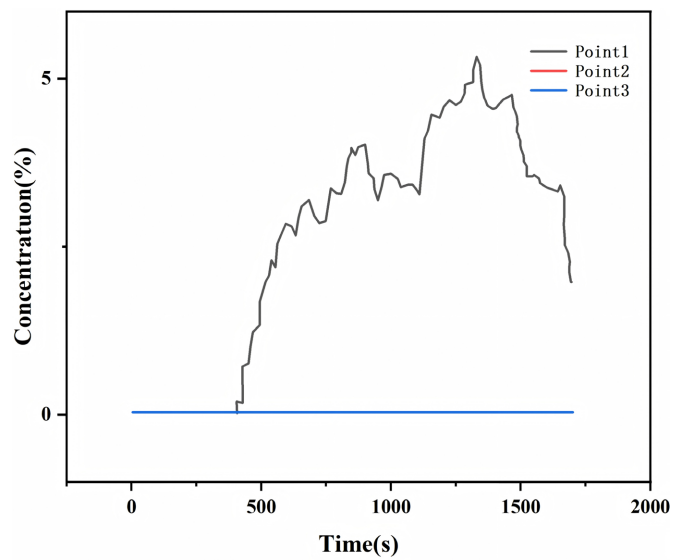


Figure 4. Concentration changes at various measuring points in clay particles at a horizontal distance of 110 cm
图 4. 黏土颗粒浓度各测点位置在水平距离 110 厘米时的浓度变化

水平间距增大显著削弱测点天然气累积速率,与响应延迟呈正相关;当间距增至 90/110 cm 时,累积浓度增速明显衰减。随泄漏口-扩散管水平距离上升,天然气入管扩散能力下降,且距离越大,响应速度越慢、累积速率越低及平衡浓度越低的幅度越大。孔隙率核心影响如下:

小孔隙率(沙土):泄漏口-管口背压上升,削弱初始扩散速率但大幅提升横向扩散范围,致远端测点仍维持高平衡浓度;大孔隙率(黏土):显著加速短距扩散,瞬时对小范围空间威胁上升,但长距扩散能力下降且平衡浓度大幅下降。

(2) 土壤中有其他市政管道情况下不同垂直距离对扩散的影响

实验调控泄漏管埋深(增加 30 cm),使临近管道位于泄漏口正上方(水平间距恒定 60 cm),研究垂直距离变化对扩散规律的影响。沙土和黏土分别保持泄漏流量 $7.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 与 $8.5 \text{ m}^3/\text{h}$,固定管道压力 0.05 MPa、开口向上。两种土壤不同垂直埋深下的测点浓度动态详见图 5,图 6。

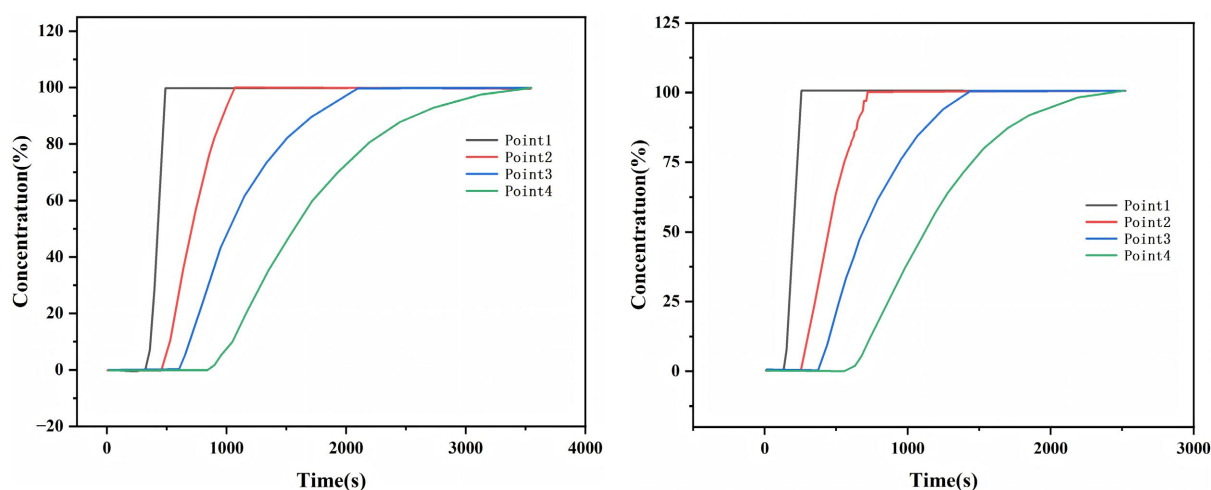


Figure 5. Variations in sand concentration at the 30 cm and 0 cm vertical measurement points

图 5. 沙土各测点位置在垂直高度 30 cm 和 0 cm 处的浓度变化

沙土中埋深增加显著延长测点响应时间,但同步提升浓度累积速率,核心驱动机制为背压升高。

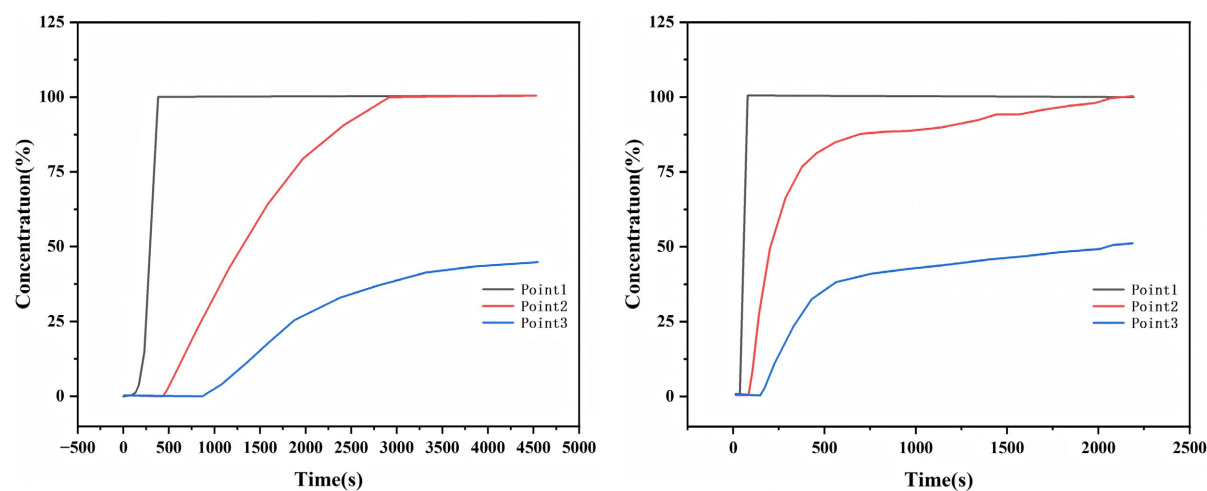


Figure 6. Variations in clay particle concentration at vertical heights of 30 cm and 0 cm

图 6. 黏土颗粒各测点在垂直距离为 30 cm 和 0 cm 处的浓度变化

地表硬化处理(如道路铺设)会抑制天然气向上扩散,促使泄漏气体横向扩散范围随覆盖面积增大而扩张。本实验采用塑料薄膜+覆土模拟硬化层(膜-土间隙严格最小化,避免气体积聚隆起),但箱壁未密封允许边缘扩散。覆盖主要改变地表扩散路径,对竖向迁移影响微弱。工况设置:沙土:覆盖/无覆盖均维持流量 $7.2 \text{ m}^3/\text{h}$;黏土:无覆盖 $8.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 、有覆盖 $8.2 \text{ m}^3/\text{h}$ (微降 3.5%)、固定压力 0.05 MPa 、开口向上。土壤覆盖效应下测点浓度动态详见图 7,图 8。

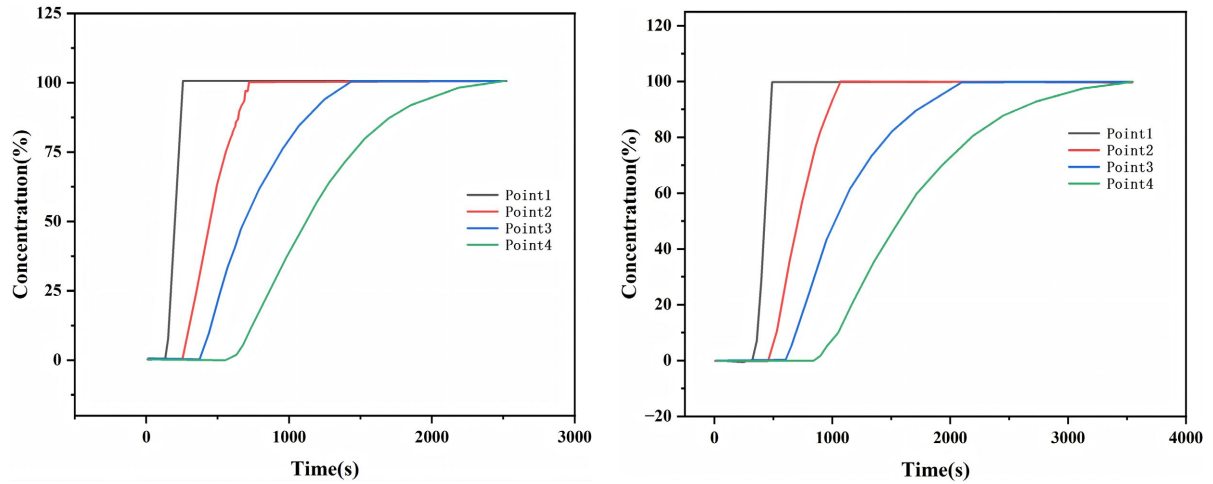


Figure 7. Variations in sand particle concentration at measurement points with and without soil surface cover
图 7. 土壤上方有覆盖和无覆盖时沙土中各测点浓度变化

地表覆盖使各测点响应时间降低、浓度累积速率上升。实测显示:泄漏初始压力 4500 Pa (覆盖后)稳定后降低至 3000 Pa ,扩散管口压力 140 Pa 。覆盖层阻塞向上扩散路径导致土壤背压明显增大(较无覆盖),但响应速率仍略低于开口向下时的泄漏工况。需注意实验误差:扩散管未密封致沙土侵入增加导致管口阻力上升。最终所有测点均达 100%平衡浓度,但因背压增大导致浓度达峰时间显著延长。

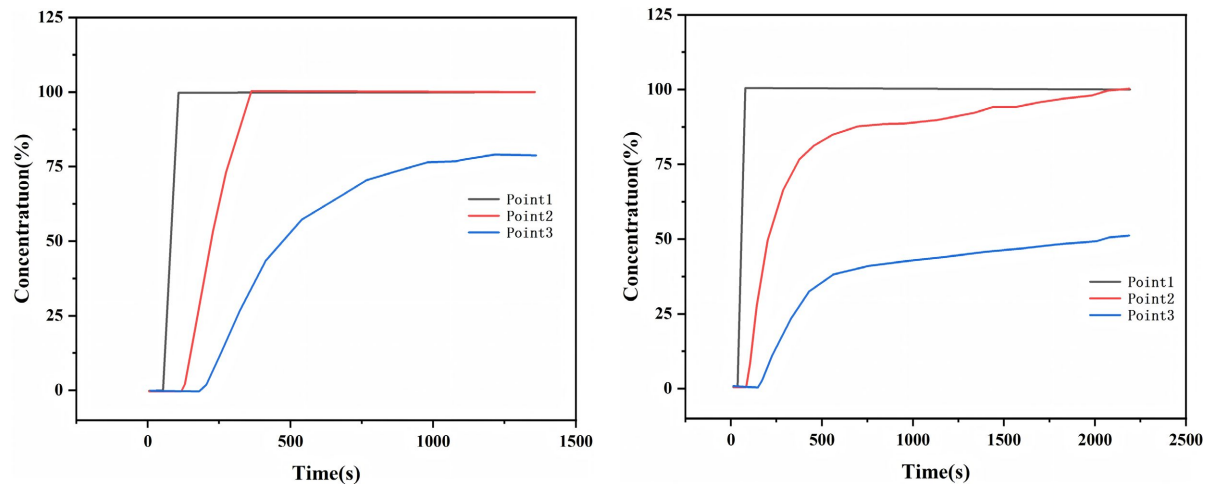


Figure 8. Variations in clay particle concentration at measurement points with no soil surface cover
图 8. 土壤上方无覆盖时黏土颗粒中各测点浓度变化

黏土覆盖使泄漏流量微降($8.5 \rightarrow 8.2 \text{ m}^3/\text{h}$),各测点响应时间均下降。与沙土覆盖显著加速响应的现象不同,黏土中覆盖后:压力异常:泄漏口压力 $130 \text{ Pa} >$ 无覆盖组,但扩散管口压力仅 $1 \sim 2 \text{ Pa}$ (剧烈衰减);

累积速率矛盾：1点累积减少，2/3点累积明显增加；归因可能误差：土壤箱壁面孔洞未密封导致气流扰动。虽响应未加速，但关键远点(3点)因累积速率提升驱动浓度明显增加，最终覆盖使累积浓度上升导致扩散危险性增加。覆盖层通过改变扩散路径，跨介质增强天然气向密闭空间渗透能力。

3. 结论与展望

3.1. 结论

(1) 沙土(低孔隙率)中天然气扩散范围广，易在远距离市政管道内累积高浓度气体，长期泄漏危害更大。黏土颗粒(高孔隙率)中扩散迅速但衰减快，短期内对小范围密闭空间威胁显著。

(2) 泄漏流量增加会一定程度上缩短响应时间，提升浓度累积速度(如沙土中流量从 $0.17 \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $7.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ，测点响应时间从数百秒缩短至数十秒)。泄漏口向下在沙土中可提升扩散效率，但在黏土中会抑制扩散能力。

(3) 地表覆盖会提高土壤内部压力，迫使天然气横向迁移至邻近管道或地下空间。泄漏点与市政管道水平距离超过 90cm 后，天然气扩散能力显著下降(黏土中 110 cm 时测点浓度趋近于 0)。

3.2. 展望

(1) 加强对复杂环境下的泄漏扩散规律研究：模拟多管道交叉、地下综合管廊等实际复杂环境下的气体迁移规律。

(2) 次生灾害预警：探究泄漏诱发的地面塌陷机制，建立灾害预测模型。

(3) 开发基于声学特征的泄漏检测技术：结合实验结果优化泄漏监测技术(如声波/电阻率法)，开发实时预警系统。

(4) 开发更先进的传感器网络和模型：整合管道-土壤-大气耦合模型，提升全链条风险评估精度。

参考文献

- [1] Wang, X., Tan, Y., Zhang, T., Xiao, R., Yu, K. and Zhang, J. (2021) Numerical Study on the Diffusion Process of Pinhole Leakage of Natural Gas from Underground Pipelines to the Soil. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **87**, Article 103792. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103792>
- [2] 魏苹, 张亮, 张聪. 燃气管线探测数据质量检查的程序化实现[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(4): 152-155.
- [3] 刘涛, 彭知军, 郑贺贺, 等. 地下燃气管道泄漏进入建(构)筑物灾害的预防[J]. 城市与减灾, 2024(5): 16-20.
- [4] Wang, X., Hou, T., Gao, W., Yu, K., Zhang, T. and Tan, Y. (2024) Experimental Study on the Diffusion Process of Natural Gas from Buried Pipelines to Underground Confined Spaces. *Natural Gas Industry B*, **11**, 603-615. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2024.09.002>
- [5] 谢昱姝, 吴宗之, 吕良海, 等. 城市管道天然气在土壤中泄漏扩散实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(4): 13-17.
- [6] Zhu, J., Pan, J., Zhang, Y., Li, Y., Li, H., Feng, H., et al. (2023) Leakage and Diffusion Behavior of a Buried Pipeline of Hydrogen-Blended Natural Gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, **48**, 11592-11610. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.185>
- [7] Zeng, F., Jiang, Z., Zheng, D., Si, M. and Wang, Y. (2023) Study on Numerical Simulation of Leakage and Diffusion Law of Parallel Buried Gas Pipelines in Tunnels. *Process Safety and Environmental Protection*, **177**, 258-277. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.06.057>
- [8] Parvini, M. and Gharagouzlou, E. (2015) Gas Leakage Consequence Modeling for Buried Gas Pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **37**, 110-118. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.07.002>
- [9] Sun, B., Zhang, P., Guo, L., et al. (2021) Feasibility Study of Detecting Gas Leakage in Buried Pipeline Based on Resistivity Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **565**, Article 012008.
- [10] Zhang, P., Liu, C., Yao, D., Ou, Y. and Tian, Y. (2022) Multi-Physical Field Joint Monitoring of Buried Gas Pipeline Leakage Based on BOFDA. *Measurement Science and Technology*, **33**, Article 105202.

-
- <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac7bd6>
- [11] Lin, T., Wang, Z., Hu, B., Ji, Y. and Liang, X. (2024) Simulation and Experimental Study of Buried Natural Gas Pipeline Leak Detection Based on Sound Source Characteristics. *Thermal Science*, **28**, 101-113.
<https://doi.org/10.2298/tsci2303131021>
- [12] Zhao, A., Ma, Y., Zhang, T., Zhang, X. and Yuan, H. (2024) Basic Acoustic Wave Time-Frequency Parameters of Buried Gas Pipeline Leakage. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, **15**, 1-12.
<https://doi.org/10.1061/jpsea2.pseng-1656>
- [13] Cho, Y., Smits, K.M., Steadman, N.L., Ulrich, B.A., Bell, C.S. and Zimmerle, D.J. (2022) A Closer Look at Underground Natural Gas Pipeline Leaks across the United States. *Elementa: Science of the Anthropocene*, **10**, Article 00095.
<https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00095>
- [14] Gao, B., Mitton, M.K., Bell, C., Zimmerle, D., Deepagoda, T.K.K.C., Hecobian, A., *et al.* (2021) Study of Methane Migration in the Shallow Subsurface from a Gas Pipe Leak. *Elementa: Science of the Anthropocene*, **9**, Article 00008.
<https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00008>
- [15] Wang, Z., Liu, Y., Liang, H., Xu, Z., Bu, F., Zhang, J., *et al.* (2022) Leakage Analysis and Hazardous Boundary Determination of Buried Gas Pipeline Considering Underground Adjacent Confined Space. *Energies*, **15**, Article 6859.
<https://doi.org/10.3390/en15186859>
- [16] Guo, J., Zhang, Y., Li, Y., Zhang, X., Zheng, J., Shi, H., *et al.* (2024) Model Experimental Study on the Mechanism of Collapse Induced by Leakage of Underground Pipeline. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 17717.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-68824-7>