

引用格式:蒙炳坤,田苗苗,高歌阳,等.基于数值模拟的埋地天然气管道泄漏扩散规律研究[J].延安大学学报(自然科学版),2026,45(1):38-43.[MENG B K,TIAN M M,GAO G Y,et al.Study on leakage diffusion law of buried natural gas pipeline based on numerical simulation[J].Journal of Yan'an University(Natural Science Edition),2026,45(1):38-43.]DOI:10.13876/J.cnki.ydnse.250037

基于数值模拟的埋地天然气管道泄漏 扩散规律研究

蒙炳坤^{1,2,3},田苗苗¹,高歌阳¹,冯孝章¹,郎润祥¹,杜常亮^{1,2,3}

(1.延安大学石油工程与环境工程学院;2.延安市油气高效管输与流动保障工程技术研究中心;
3.陕西省能源大数据智能处理省市共建重点实验,陕西延安716000)

摘要:管道输送作为天然气在陆地上最经济且有效的输送方式,而管道输送过程中天然气泄漏严重影响管道正常运行和管道沿线居民的人身安全。采用Fluent软件设计相应的三维泄漏模型,模拟了11种不同工况条件下,埋地天然气管道泄漏后在土壤中扩散过程。结果表明,泄漏孔径与甲烷扩散速度呈正相关关系;泄漏口朝下时,甲烷浓度最高,因此,大口径埋地天然气管道需实施全周向浓度监测;管道运行压力越大,甲烷扩散的速度越快,扩散的范围也越广;土壤孔隙率越大,甲烷的扩散速度越快,高孔隙率土壤更易形成快速扩散通道,需根据土壤条件制定差异化的泄漏检测方案;浅埋管道表现出更高的泄漏量和安全风险,建议针对不同工程条件(如土壤特性、埋深参数等)制定相应的安全监测方案。该研究为埋地天然气管道的安全运行提供了重要的理论依据和技术支撑。

关键词:埋地管道;天然气;泄漏扩散;数值模拟;影响因素

中图分类号:TE88 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-602X(2026)01-0038-06

随着全球能源结构的转型和城市化进程的加速,天然气作为一种清洁高效的能源,其输送管网规模不断扩大,同时,埋地天然气管道的安全问题也逐步成为大家关注的焦点^[1]。随着管道运行时间的增加,管道老化问题逐渐暴露,其材质性能逐渐下降,管壁变薄、韧性降低,再叠加腐蚀现象、施工过程中遗留的缺陷以及第三方无意或有意的破坏,致使埋地天然气管道泄漏事故频频发生,不仅造成能源浪费和经济损失,更对城市公共安全和生态环境构成严重威胁^[2]。特别是在复杂地质条件和密集城市区域,泄漏的天然气在土壤中的扩散行为具有隐蔽性和不确定性,可能导致相邻密闭空间内天然气的积聚,进而引发爆炸、火灾等灾难性事故。因此,对于埋地天然气管道泄露扩散模拟研究具有重

要的理论 and 实际意义。

关于天然气管道泄漏扩散规律的研究,国内外学者主要借助于强有力的数值模拟手段开展了大量的研究工作^[3-4]。通过建立二维和三维泄露模型研究孔径、压力、管道长度、土壤类型等因素对埋地管道、地上城市天然气管道等泄露扩散的影响^[5-6];模拟厨房、建筑物条件下不同掺氢比、泄漏速率、通风条件和尺寸大小对泄露扩散和扩散特性的影响^[7-9];分析了不同离散格式^[10]、架空含硫天然气^[11]对天然气管道泄露扩散的影响;对城市埋地管道泄露扩散进行模拟,发现下部泄露在土壤和空气中的危险范围最大^[12],障碍物会明显改变天然气的扩散路径,暗沟地区天然气会形成高浓度区^[13];通过Fluent软件分析液化天然气在不同孔径工况下的泄露扩散

收稿日期:2025-04-11

基金项目:延安大学博士科研启动项目(YAU202507669);陕西省大学生创新训练计划项目(S202410719112)

作者简介:蒙炳坤(1992—),男,讲师,博士,主要从事油气长距离管输技术研究。E-mail:bingkunmeng@yau.edu.cn

过程,发现泄露孔径对液池尺寸和液池汽化速率的影响较大^[14]。以上研究为减少计算量,提高计算速度多采用二维模型,其模拟结果与真实泄漏扩散存在显著差异,主要分析特定泄漏工况下天然气的泄露扩散规律,未能全面和系统分析泄漏影响因素对天然气管道泄露的影响,研究结果普适性较低。

本研究基于多物理场耦合理论,采用SolidWorks软件建立三维泄漏扩散模型,运用Fluent软件进行模拟,结合土壤多孔介质特性及天然气物理化学性质,构建埋地天然气管道泄漏扩散的数值模型,系统分析不同泄漏孔径、开口方向、管道压力、土壤条件、管道埋深对天然气管道泄漏扩散的影响,总结埋地管道不同泄露工况下天然气泄漏后爆炸极限。可以最大限度上减少天然气输送管道的事故发生,研究成果不仅为埋地天然气管道的安全设计、运行维护及事故应急提供科学依据,同时也为城市能源安全与环境保护领域的相关研究提供思路。

1 泄漏模型建立

1.1 模型设计

为探究埋地天然气管道小孔泄漏后的扩散行为,构建了一个长、宽、高均为1.5 m的模拟空间。根据目前长输管道的建设情况,本次模拟埋地管道外径和壁厚分别为160、10 mm(图1A)。本次模拟了11种不同工况条件,分析不同影响因素对埋地天然气管道泄漏特征的影响(表1)。

表1 埋地天然气管道小孔泄漏扩散工况表

工况	孔径/mm	泄漏口朝向	泄漏口形状	埋深/m	土壤类型	压力/MPa
1	4	向上		0.75	a	0.50
2	4	向上		0.75	a	1.00
3	4	向上		0.75	a	1.50
4	16	向上		0.75	a	0.50
5	8	向上		0.75	a	0.50
6	4	向上	圆形	0.40	a	0.50
7	4	向上		0.50	a	0.50
8	4	向下		0.75	a	0.50
9	4	向右		0.75	a	0.50
10	4	向上		0.75	b	0.50
11	4	向上		0.75	c	0.50

注:土壤类型a、b、c参数详见表2。

1.2 边界条件

建立的埋地管道泄漏模型中,管道外径为160 mm,泄漏口直径分别为4、8、16 mm,根据小孔泄

漏孔径的大小规定^[15],此类孔径规格符合小孔泄漏的范畴。鉴于泄漏口尺寸较小,能够将泄漏压力近似看作与管道压力一致。该模型的边界条件设定如下:入口设为压力入口,出口设为压力出口。土壤参数设定是建立在土壤为各向同性的多孔介质条件之上,边界条件为内部边界条件,不同土壤类型具体参数设置见表2^[16-17]。

表2 不同泄漏工况下土壤参数设计

土壤类型	土壤粒径/mm	孔隙率	黏性阻力系数/m ⁻²	惯性阻力系数/m ⁻¹
a	0.05	0.43	2.452×10 ¹¹	501 842
b	0.05	0.55	7.302×10 ¹⁰	189 331
c	0.05	0.30	1.089×10 ¹²	1 814 815

1.3 网格划分

采用Ansys 2023 fluent中自带的网格划分功能进行网格划分工作,生成的网格划分情况如图1B所示。采用非结构化网格,在管道和泄漏口处对网格加密。为深入探究网格密度对计算结果产生的影响,选择4种疏密程度各异的网格来实施计算操作。这4种网格在数量上分别为1 155 289、427 083、233 792、173 630,并且其单位网格数依次对应为20、30、40、50。现以工况1作为示例,对这4种网格在天然气泄漏时长达到100 s的时刻,于泄漏口正上方0.75 m位置处监测点I处所测得的甲烷体积分数展开对比分析(其他工况监测位置均为监测点I),结果显示单位网格数量对于计算结果基本无影响(图1C),选用网格数为427 083的网格进行后续计算。

1.4 求解方法

在利用Fluent软件进行求解过程中,采取了一系列关键设置。首先启用能量方程,针对多相流问题运用VOF模型加以处理,离散格式确定为隐式,湍流模型则选用k-epsilon模型。考虑到重力因素的影响,特别将y轴加速度设定为-9.8 m/s²。同时,开启组分输运模型,并勾选入口扩散选项。在初始条件设置方面,土壤环境设定为:泄漏初始土壤中仅存在空气,压力为大气压。在初始化过程中,将空气和甲烷体积分数分别设为100%和0%,初始相对压力设为0 MPa,土壤温度设为300 K。计算参数的设置:计算步长取值0.01 s,模拟目标是呈现管道泄漏后200 s内气体的扩散过程。通过上述参数设置,所构建的模型能够精准模拟天然气在土壤中的泄漏及扩散行为,从而为深入研究管道泄漏扩散规律提供坚实可靠的数据支撑^[18-19]。

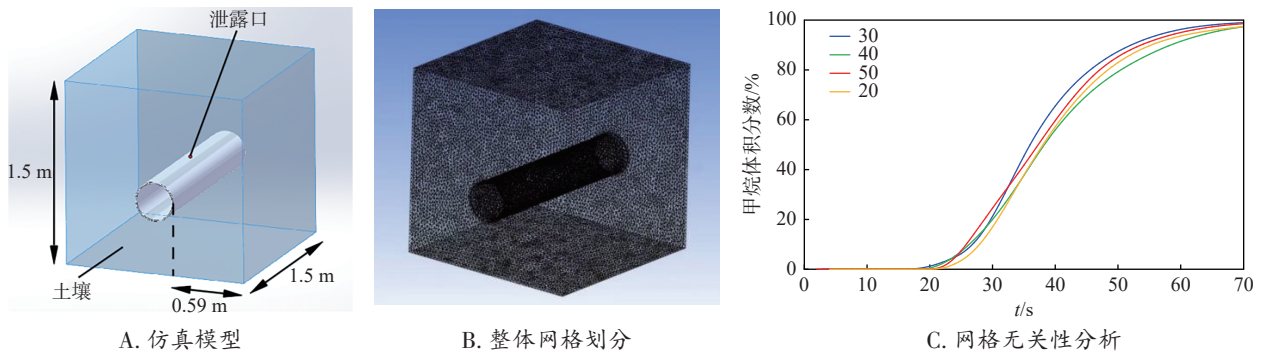


图1 埋地天然气管道泄漏仿真模型、网格划分及网格无关性分析

2 影响因素分析

采用上述模型,管内流体为纯甲烷,模拟得到工况1条件下埋地纯甲烷管道泄漏200 s后甲烷体积分数云图(图2),结果表明,泄漏甲烷大量聚集在

泄漏口周边区域,且甲烷体积分数在管长与管径方向均呈现出对称分布的特性。甲烷体积分数仅在扩散远端有低值($<50\%$),其余区域甲烷体积分数均呈现高值(100%)。

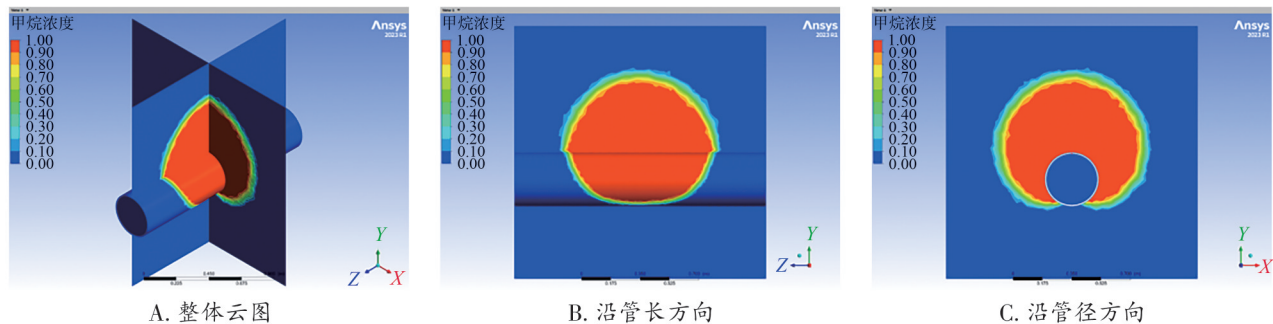


图2 管道泄漏200 s后甲烷体积分数云图

2.1 泄漏口特征

2.1.1 泄漏口孔径

在工况1、工况4及工况5的条件下,保持其他模拟参数不变,分别设置泄漏口孔径为4、8、16 mm。利用上述三维埋地管道泄漏模型,模拟得到甲烷泄漏200 s后监测点处3种泄漏孔径下,甲烷体积分数随时间变化,以及沿管长方向甲烷体积分数

和扩散速度的分布特征(图3)。结果表明,泄漏孔径与甲烷扩散速度成正比。泄漏孔径为16 mm时,发生泄露200 s后甲烷的分布范围显著大于泄露孔径为4、8 mm的情况。因此,埋地甲烷管道发生泄漏时,泄漏孔径越大,相同位置甲烷浓度达到爆炸极限的时间越短,需要维修人员采取更快的反应。

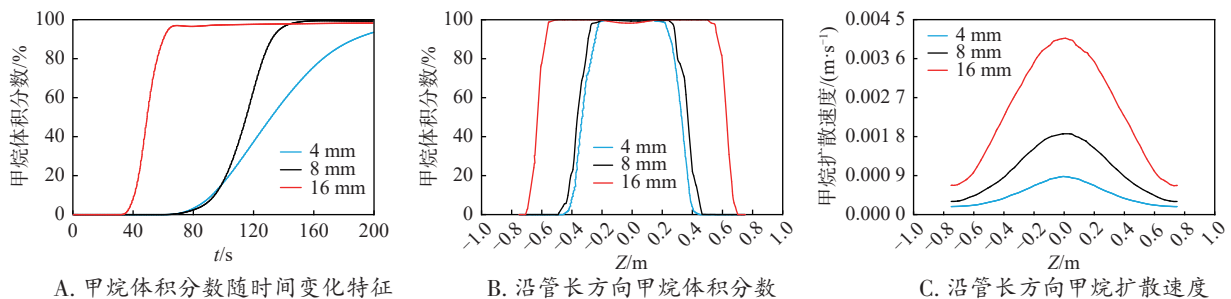


图3 不同泄漏孔径下甲烷体积分数随时间变化特征与沿管长方向甲烷分布特征

2.1.2 泄漏口朝向

在工况1、工况8及工况9的条件下,保持其他模拟参数不变,分别设置泄漏口出口方位为垂直

向上、垂直向下及水平向右,采用上述模型模拟得到埋地管道泄漏200 s后甲烷体积分数云图(图4),模拟结果表明,发生泄露事故时,甲烷高浓度区容

易出现在泄漏出口周围,即泄漏口朝向显著影响甲烷的扩散路径和聚集区域。同时泄漏相同时间的条件下,泄漏口朝下甲烷的浓度最高。因此,建议在埋地天然气管道的安全监测中,构建三维立体化

检测网络,对管道实施全周向浓度监测,尤其对大口径、长距离输送管道,其管径较大,需建立多维度监测体系,避免因单侧监测盲区造成管道泄露事故发生。

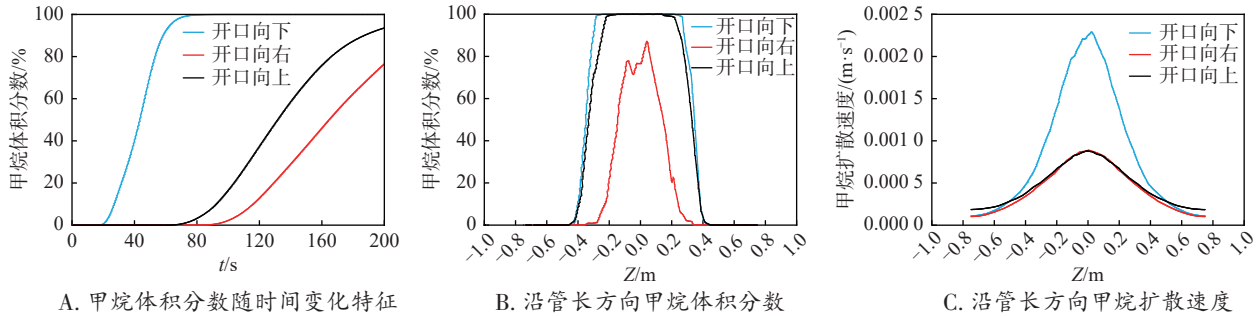


图4 不同泄漏方向甲烷体积分数随时间变化特征和沿管长方向甲烷分布特征

2.2 管道压力

在保持其他模拟参数不变的条件下,选择工况1、2和3,分别将管道压力设置为0.5、1.0、1.5 MPa,采用上述埋地管道泄露模型模拟得到监测点出甲烷体积分数随时间的分布曲线,以及泄露200 s时监测点处沿管长方向甲烷体积分数、扩散速度分布

曲线(图5)。结果显示,管道压力越大,随着扩散时间的增加,甲烷体积分数上升越快,扩散范围越广,扩散速度越快。泄漏相同时间条件下,1.5 MPa压力下的甲烷扩散范围和速度显著高于0.5和1.0 MPa的情况。因此,在高压天然气管道运行中,需制定更严格泄漏监测和应急响应方案。

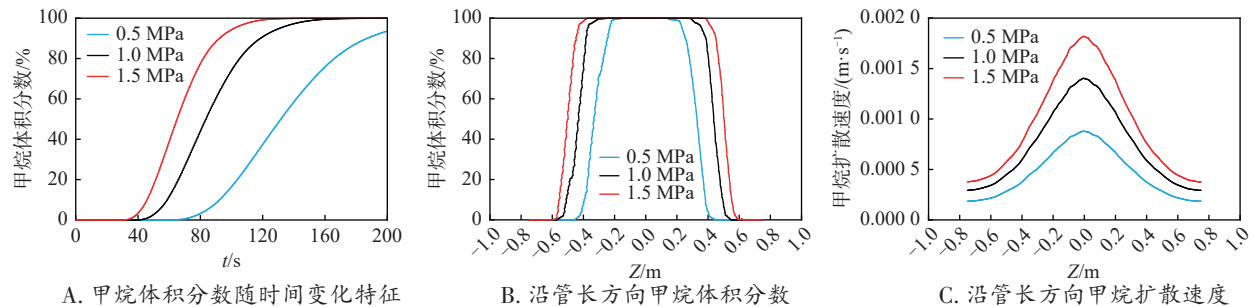


图5 不同管道压力下甲烷体积分数随时间变化特征和沿管长方向甲烷分布特征

2.3 土壤条件

土壤条件对埋地管道泄漏后的甲烷扩散行为具有至关重要的影响,其中土壤孔隙率是影响甲烷扩散的关键因素。为深入探究土壤条件与甲烷扩散行为之间的关联,选择工况1、10和11,保持其他参数不变的条件下,设置土壤孔隙率分别为0.43、0.55和0.30,利用上述模型模拟得到不同土壤孔隙率条件下监测点出甲烷体积分数随时间变化曲线,及泄露200 s后监测点处沿管长方向甲烷浓度、扩散速度分布曲线(图6)。结果显示,土壤孔隙率越大,监测点处甲烷的扩散速度越快,扩散范围越广。主要原因是在土壤粒径不变的条件下,土壤孔隙率与其惯性及黏性阻力系数成反比。因此,在进行埋地管道的设计与建设过程中,必须充分考量土壤条件这一重要影响因素,并且依据不同的土壤状况制定

相应的泄漏监测方案,以此保障管道运行的安全性。

2.4 管道埋深

选择工况5、6和7,保持其他参数不变的条件下,分别将管道埋深设定为0.40、0.50、0.75 m,利用上述模型模拟得到不同管道埋深条件下监测点处甲烷体积分数随时间变化曲线,及泄露200 s后监测点处沿管长方向甲烷浓度、扩散速度分布曲线(图7)。模拟结果表明,管道埋深越深,甲烷扩散速度越小,所以增加管道埋深能够切实有效地削减甲烷的扩散速度、缩小扩散范围并减少泄漏量,进而降低因甲烷泄漏所带来的风险与损失。然而,增加管道埋深会相应提高管道建设成本。因此,在埋地管道设计时,必须综合考量安全性与经济性两方面因素,以此确定最为适宜的管道埋深,实现两者之间的平衡。

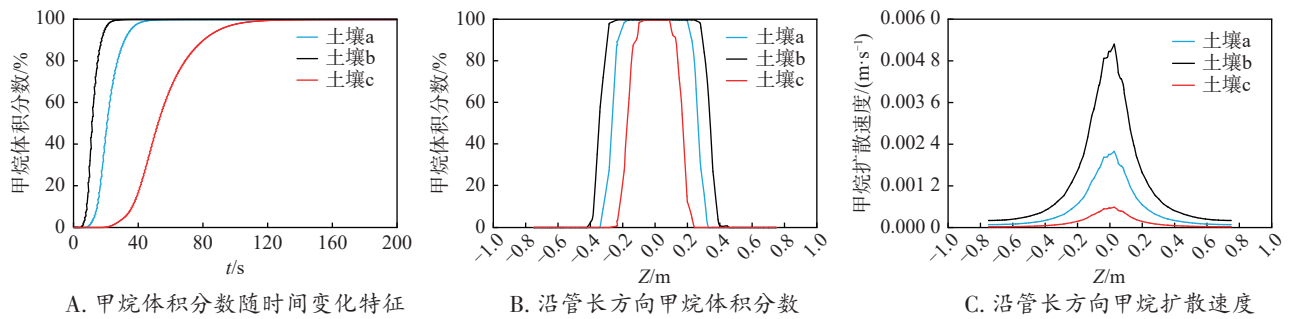


图6 不同土壤条件下甲烷体积分数随时间变化特征和沿管长方向甲烷分布特征

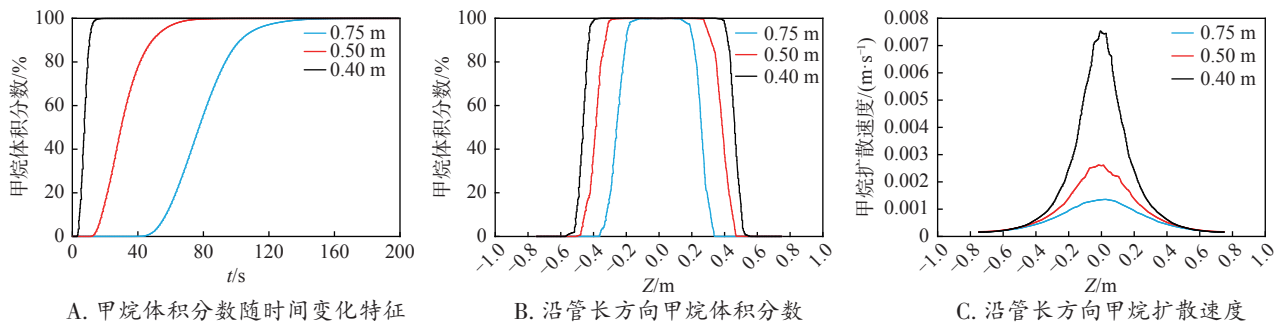


图7 不同埋深条件下甲烷体积分数随时间变化特征和沿管长方向甲烷分布特征

2.5 不同泄漏工况下天然气爆炸极限

通常甲烷的爆炸下限为 4.9%，不同工况 1-11 下，埋地管道泄漏后甲烷体积分数达到甲烷爆炸下限 (4.9%) 的所需的时间分别为 84.0、53.0、42.0、38.0、87.0、3.70、16.2、15.0、13.2、12.0 和 32.0 s，可知工况 6 中甲烷达到爆炸下限的时间最短，而工况 5 中甲烷达到爆炸下限的时间最长，表明管道埋深对于甲烷的扩散具有决定性作用，管道埋深较深时，土壤相对于其他参数而言，对于甲烷的扩散具有明显的抑制作用，甲烷浓度到达爆炸下限的时间显著缩短。因此对于埋深较浅的管道，甲烷泄漏风险更高，因此需要采取更严格的事故应急方案。

3 结论

1) 泄漏孔径与甲烷扩散速度成正比。埋地甲烷管道发生泄漏时，泄漏孔径越大，相同位置甲烷浓度达到爆炸极限的时间越短，需要更快采取相应措施。泄漏口朝下甲烷的浓度最高，对大口径、长距离输送管道，其管径较大，需建立多维度监测体系，避免因单侧监测盲区造成管道泄露事故发生。

2) 管道压力越大，随着扩散时间的增加，甲烷体积分数上升越快，扩散范围越广，扩散速度越快。因此，在高压天然气管道运行中，需制定更严格泄漏监测和应急响应方案。

3) 土壤孔隙率越大，监测点处甲烷的扩散速度

越快，扩散范围越广。在进行埋地管道的设计与建设过程中，必须依据不同的土壤状况制定相应的泄漏监测方案，以此保障管道运行的安全性。

4) 管道埋深越深，甲烷扩散速度越小，增加管道埋深能够切实有效地削减甲烷的扩散速度、缩小扩散范围并减少泄漏量。在埋地管道设计时，必须综合考量安全性与经济性两方面因素，以此确定最为适宜的管道埋深，实现两者之间的平衡。

参考文献:

- [1] 黄雪驰, 马贵阳, 王锡钰, 等. 基于稳定风场的埋地天然气管道泄漏数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(1): 96-101.
- [2] 夏军宝, 黄小美, 林智伟, 等. 埋地燃气管道泄漏流量及扩散规律的实验研究[J]. 煤气与热力, 2016, 36(6): 36-42.
- [3] 王艳芝, 马文礼, 王帅. 气液两相流过 T 型变径-直角弯头耦合管件压降特性的数值模拟研究[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 16-21+30.
- [4] 王帅, 杨成功, 周海, 等. T 型天然气管道掺氢输送流动性数值模拟研究[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 1-8.
- [5] SUBANI N. Hydrogen-natural gas mixture leak detection using reduced order modelling [J]. Applied and Computational Mathematics, 2015, 4(3): 135.
- [6] 张伯扬, 马贵阳, 王凯, 等. 基于 CFD 的埋地天然气管道泄漏扩散数值分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2019, 39(1): 39-43.
- [7] 张贺, 马贵阳. 建筑物条件下埋地天然气管道泄漏扩散数

- 值模拟[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2018, 38(2): 33-39.
- [8]徐春雯, 伊树全, 唐建峰, 等. 基于 CFD 的居民燃气泄漏扩散仿真实验设计与实践[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(12): 119-126.
- [9]钟委, 王雯雪, 汪洪焦, 等. 掺氢天然气在综合管廊中泄漏扩散的数值研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(1): 124-131.
- [10]潘振, 李秉繁, 刘培胜, 等. 不同离散格式下埋地穿越段天然气管道泄漏扩散数值研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1): 194-198.
- [11]高良军, 吴渺渺. 架空含硫天然气管道泄漏扩散数值模拟研究[J]. 中国水运, 2016(3): 31-33.
- [12]程猛猛, 吴明, 赵玲, 等. 城市埋地天然气管道泄漏扩散数值模拟[J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(1): 94-98.
- [13]陈利琼, 赵奎, 许铎, 等. 山区高压埋地天然气管道泄漏扩散的三维模型及危害边界[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(1): 165-175.
- [14]周宁, 钱星伊, 李雪, 等. 孔径对液化天然气泄漏扩散影响的数值模拟[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2025, 37(2): 43-51.
- [15]王雪梅, 谭羽非, 张金冬, 等. 事故通风状态管廊燃气管道泄漏扩散模拟研究[J]. 煤气与热力, 2019, 39(9): 22-28+42-43.
- [16]邓兵兵, 谢昱姝, 邓方, 等. 埋地燃气管道在土壤中小孔泄漏扩散特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(10): 160-166.
- [17]胡玮鹏, 陈光, 齐宝金, 等. 埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏扩散数值模拟[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1118-1127+1136.
- [18]王向阳, 杜美萍, 汪彤, 等. 埋地燃气管道泄漏扩散过程数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 45-50.
- [19]张太亮, 李朝晖, 耿亚君, 等. 天然气集气站场内输气管道小孔泄漏数值模拟[J]. 云南化工, 2020, 47(12): 73-76.
- [责任编辑 张 香]

Study on leakage diffusion law of buried natural gas pipeline based on numerical simulation

MENG Bingkun^{1,2,3}, TIAN Miaomiao¹, GAO Geyang¹, FENG Xiaozhang¹,
LANG Runxiang¹, Du Changliang^{1,2,3}

(1. School of Petroleum Engineering and Environmental Engineering, Yan'an University; 2. Yan'an Engineering Technology Research Center of Efficient Pipeline Transportation of Oil and Gas and Flow Guarantee;
3. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Processing for Big Energy Data, Yan'an 716000, China)

Abstract: Pipeline transportation is the most economical and efficient way to transport natural gas on land. However, natural gas leakage that occurs during the transportation process not only interferes with the normal operation of the pipeline but also poses a serious threat to the lives and safety of residents along the pipeline. In this study, Fluent software was used to design the corresponding three-dimensional leakage model, simulating the diffusion process of buried natural gas pipelines in the soil after leakage under 11 different working conditions. The research results show that the leakage aperture is positively correlated with the methane diffusion rate. When the leakage point is downward, the methane concentration is the highest. Therefore, full-circumferential concentration monitoring is required for large-diameter buried natural gas pipelines. The greater the operating pressure of the pipeline, the faster the methane diffuses and the wider the diffusion range. The greater the soil porosity, the faster the diffusion rate of methane. Soil with high porosity is more likely to form rapid diffusion channels, and differentiated leakage detection plans should be formulated based on soil conditions. Shallow-buried pipelines exhibit higher leakage rates and safety risks. The research results suggest formulating corresponding safety monitoring plans for different engineering conditions (such as soil characteristics, burial depth parameters, etc.). This research provides important theoretical basis and technical support for the safe operation of buried natural gas pipelines.

Key words: buried pipelines; natural gas; leakage diffusion; numerical simulation; influencing factors