

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

天然气、氢气及掺氢天然气埋地管道泄漏研究进展

李倩倩, 雷博涵, 袁旭浩, 任静, 王金华, 黄佐华

(西安交通大学绿色氢能全国重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 在“双碳”目标与能源结构转型的驱动下, 利用天然气管网进行掺氢输送和建设专用纯氢管道已成为氢能大规模储运的核心路径。氢能大规模储运过程中主要通过埋地管道运输。但由于氢分子直径极小、扩散能力远强于甲烷且易引发金属氢脆, 其埋地环境下的泄漏安全风险成为研究的核心瓶颈。本文系统综述了天然气、氢气及天然气掺氢埋地管道当前的理论、实验和模拟研究进展。进展内容主要包括详细对比因氢气与天然气的物性区别带来的差异性埋地泄漏动力学规律, 从实验室缩尺实验到全尺寸埋地泄漏实验的平台建设现状, 高压泄漏气体冲破土壤层形成空腔的力学过程及实验观测结果以及采用计算流体动力学针对各种场景下的泄漏过程的数值模拟研究。最后对现阶段埋地管道研究存在的问题进行了总结, 并在实验数据工况拓展、数值模拟方法及埋地管道场景方面展望了未来的研究方向。

关键词: 天然气; 纯氢; 掺氢天然气; 埋地管道; 泄漏; 土壤类型

中图分类号: TE 832

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-14

Research progress on leakage of underground pipelines transporting natural gas, hydrogen, and hydrogen-blended natural gas

LI Qianqian, LEI Bohan, YUANG Xuhao, REN Jing, WANG Jinhua, HUANG Zuohua

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: Driven by the "dual carbon" goals and the energy transition, utilizing natural gas pipeline networks for hydrogen-blended transmission and constructing dedicated pure hydrogen pipelines have become the core pathways for the large-scale storage and transportation of hydrogen. Hydrogen is primarily transported via underground pipelines during large-scale transmission. However, due to the extremely small diameter of hydrogen molecules, their diffusion capacity far exceeding that of methane, and their tendency to cause hydrogen embrittlement in metals, the safety risks associated with leaks in underground environments have become a key bottleneck in research. This paper provides a systematic review of current theoretical, experimental, and simulation research on natural gas, hydrogen, and hydrogen-blended natural gas underground pipelines. The review primarily covers detailed comparisons of the distinct underground leakage kinetics resulting from the differences in the physical properties of hydrogen and natural gas; the current status of platform development ranging from laboratory-scale experiments to full-scale underground leakage tests; the mechanical processes and experimental observations of

收稿日期: 2026-04-16 修回日期: 2026-06-04

通信作者: 李倩倩(1988—), 女, 博士, 副教授, qianqianli@xjtu.edu.cn

第一作者: 李倩倩(1988—), 女, 博士, 副教授, qianqianli@xjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFE0211500)

引用本文: 李倩倩, 雷博涵, 袁旭浩, 任静, 王金华, 黄佐华. 天然气、氢气及掺氢天然气埋地管道泄漏研究进展[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–14

Citation: LI Qianqian, LEI Bohan, YUANG Xuhao, REN Jing, WANG Jinhua, HUANG Zuohua. Research progress on leakage of underground pipelines transporting natural gas, hydrogen, and hydrogen-blended natural gas[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–14

high-pressure leaked gas penetrating the soil layer to form cavities; and computational fluid dynamics studies simulating leakage processes under various scenarios. Finally, the paper summarizes the current challenges in underground pipeline research and outlines future research directions regarding the expansion of experimental data conditions, numerical simulation methods, and underground pipeline scenarios.

Keywords: natural gas; pure hydrogen; hydrogen-blended natural gas; underground pipeline; leakage; soil type

引 言

在应对全球气候变化及我国“双碳”战略目标的社会背景下,构建以低碳、零碳能源为核心的新型能源体系已经成为全球的共识。天然气作为最清洁的化石能源,其消费规模持续增长,而氢能作为极具潜力的二次能源,正在逐步进入大规模商业化的应用阶段。由于氢能产消两端在地理空间上的不对称性,如何实现高效、经济的长距离输送成为氢能产业发展的核心问题。

目前,建成的天然气管网进行掺氢输运,或建设高压纯氢专用管道,是氢能运输的主要方案。在全球能源转型的背景下,氢能运输管网的需求逐年递增^[1]。据 Energy Institute 统计数据显示,目前全球已经建成的天然气管道总里程已超两百万公里,这一庞大的基础设施建设为能源转型提供了重要支撑^[2],而截止到2023年,全球专用的纯氢管道总里程仅为五千多公里,其中美国占据了约一半,和欧洲共同占据全球氢能运输设施的主导地位^[3]。欧洲31家管道运营商联合发布,计划2030年建成约三万公里的氢能运输管网,其中60%为现有天然气管道改造,40%为新建纯氢管道^[4]。在全球能源转型的大背景下,中国管网基础设施建设也逐步推进,天然气运输管网经过西气东输等国家级战略工程建设,纵贯南北、横跨东西、连通境外的复杂管网格局已经形成。根据国家管网集团报告显示^[5],中国目前的油气长输管道总里程已突破19万公里,天然气管道里程约12万公里,目前我国已建成的纯氢管道里程约500公里,主要分布于辽宁、巴陵、洛阳等工业园区^[6]。

埋地管道是大规模管道输运的主要方式。埋

地管道由于长期处于地下复杂环境中,受到土壤腐蚀、地质变动及第三方施工干扰等威胁。欧洲氢能事故数据库(HIAD 2.0)统计分析显示,事故中材料制造问题和安全组织管理占据主导因素^[7]。此外,美国管道和危险材料安全管理局(Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA)的事故调研数据显示,在过去二十年的管道事故中,外部损伤与腐蚀是导致埋地管道失效的主要因素^[8],如图1所示。当输送介质从传统天然气演变为掺氢天然气或纯氢时,事故演化模式发生了本质改变。氢分子极小的动能直径(0.289 nm)和极高的扩散系数,如表1所示,材料因氢脆效应破裂等,使得其在埋地环境下的泄漏更难以检测,因此对管道安全性和完整性至关重要^[9-14]。由于氢气的爆炸极限范围极广(4% - 75%)且点火能量极低^[15],泄漏气体在土壤多孔介质中聚集或扩散到地表地面后,极易引发火灾或爆炸等灾害。

由于管道腐蚀、机械损伤、自然灾害等因素,导致管道破裂引发的泄漏扩散^[17-18],引发了严重的社会影响。美国联邦能源监管委员会调查数据显示,美国管道泄漏事故平均每年造成17人死亡和1.33亿美元的经济损失^[19]。国内在2013年至2022年间,共发生330起管道安全事故,造成185人死亡和779人受伤^[18]。表2展示了二十一世纪国内外发生的天然气、天然气掺氢、纯氢管道的事故案例,包括了年份、地点、事故类型以及人员伤亡。因此,对相应的埋地管道泄漏扩散特性进行研究,是泄漏后快速检测做出应急响应的关键。

本文聚焦埋地天然气、掺氢天然气、纯氢管道安全,从理论模型、数值模拟以及实验三个方面系统梳理了现有工作,概述了高压管道喷射和中低压

表1 氢气与甲烷物理性质^[16]

Table 1 Physical Properties of Hydrogen and Methane^[16]

气体类型	密度 ρ (kg/m ³)	动力学直径 d_k (nm)	空气中扩散系数 D_{AB} (cm ² /s)	最小点火能量 MIE(mJ)	爆炸极限(空气中)LFL(%)
氢气(H ₂)	0.0899	0.289	0.61	0.017	4.0-75.0
甲烷(CH ₄)	0.7170	0.380	0.16	0.029	5.0-15.0

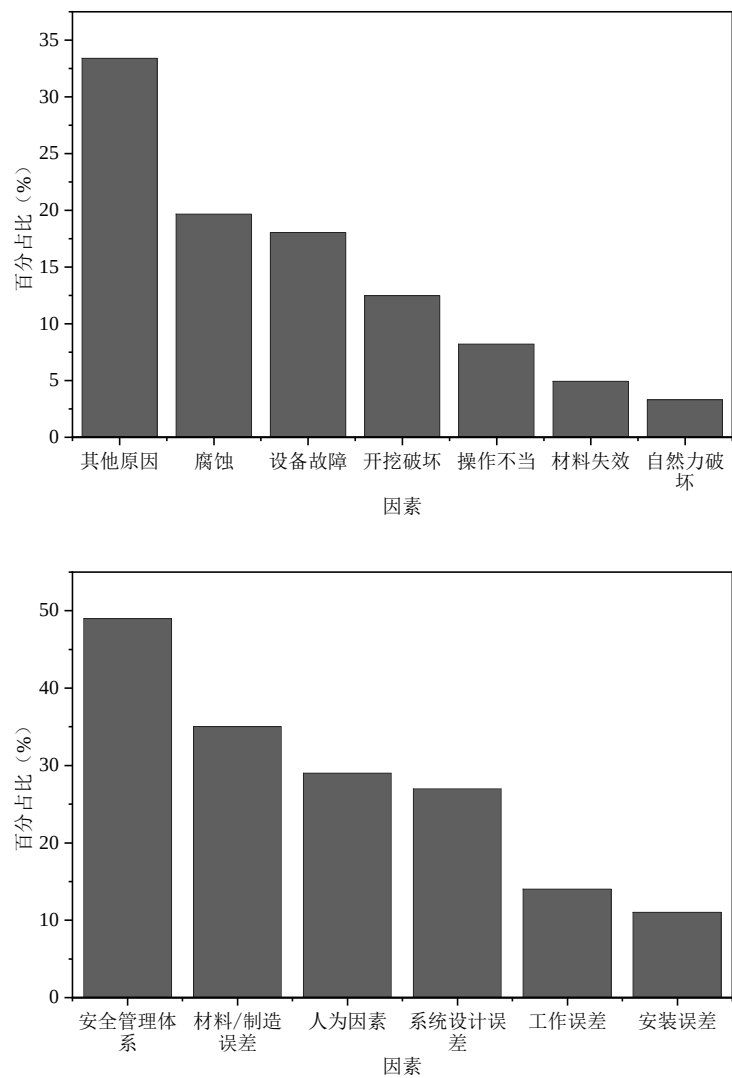


图1 (a) 2005–2020年PHMSA统计管道失效原因统计数据 (b) HIAD 2.0统计纯氢管失效原因统计数据^[7]

Fig. 1 (a)PHMSA statistics on causes of pipeline failures, 2005 - 2020 (b) HIAD 2.0 statistics on the causes of pure hydrogen pipe failures^[7]

表2 二十一世纪天然气、纯氢管道事故案例

Table 2 Case Studies of Natural Gas and Pure Hydrogen Pipeline Accidents in the 21st Century

时间	地点	事故原因	事故后果	死亡人数	受伤人数
2018.06	中国贵州晴隆	天然气管道环焊脆断泄漏 ^[20]	燃爆	8	35
2021.06	中国湖北十堰	天然气管道严重锈蚀破裂	爆炸	26	138
2025.03	韩国蔚山	纯氢管道清洗作业期间氢气泄漏遇不明火源 ^[7]	爆炸	0	2
2014.03	美国纽约	埋地天然气管道泄漏扩散至住宅楼中 ^[21]	爆炸	8	50
2007.10	荷兰南荷兰省	地面沉降导致纯氢管道绝缘接头应力开裂导致泄漏,遇另一条管道焊接被点燃 ^[7]	火灾	0	0
2025.08	湖北恩施	城区内涝治理工程施工,损坏天然气管道泄漏	火灾	0	0
2025.02	中国山东	输氢管道环焊缝裂纹泄漏,采用带压注胶堵漏不当,氢气外泄至排水沟后回燃	闪爆	2	1
2012.06	加拿大哥伦比亚省	天然气管道压力升高致焊缝裂纹开裂泄漏 ^[22]	泄漏燃烧	0	0

管网渗流扩散的研究现状,分析了土壤孔隙结构、压力梯度以及介质组分对扩散输送特性的影响,展

示了现有研究取得的重要成果。本文还指出了目前数值模拟研究方面存在的误区及实际流体力学

条件考虑不足等空白,并提出了未来埋地气体管道安全领域的研究重点和数值模拟技术迭代发展的方向,期望可以为提升管网安全提供理论支撑和工程参考。

1 埋地管道泄漏宏观泄漏率理论模型研究

埋地管道泄漏理论的研究可以追溯到二十世纪八十年代,当时的研究人员主要研究压力容器泄漏速率的理论计算方法,在分析埋地输气管道泄漏

现象的基础上,建立对应的数学模型,经过数值计算对模型进行分析和研究。当前理论以孔径比对失效几何进行区分;引入壁面摩擦与热传导进行修正,打破等熵假设对阻塞流预测能力的束缚;借助非达西渗流理论分析管-土的跨尺度动态相互作用机制,界定了由微孔渗流向宏观“火山口”演变的力学临界阈值。在构建上述理论模型时,介质的物性参数是决定泄漏动力学特征的基础。因此,天然气、掺氢天然气及氢气分子尺度与热力学特性的显著差异(如表3所示)直接导致了泄漏演化规律的不同。

表3 三种介质物性参数与机理分析

Table 3 Analysis of the Physical Properties and Mechanisms of Three Media

物理特性	气体类型	特征数值	泄漏模型构建的机理分析
分子量 $M/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$	甲烷(CH_4)	16.04	氢气分子量极小,相同压力下质量流量下降但体积流量剧增
	掺氢天然气(20%)	13.24	
	氢气(H_2)	2.01	
扩散系数 $D_{AB}/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	甲烷(CH_4)	0.16	氢气扩散系数约是甲烷的3.8倍,显著缩短了地表探测的理论响应时间
	掺氢天然气(20%)	~0.25	
	氢气(H_2)	0.61	
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	甲烷(CH_4)	0.717	纯氢受强浮力主导,扩散路径偏向垂直向上,而非球形扩散
	掺氢天然气(20%)	~0.590	
	氢气(H_2)	0.089	
分子动力直径 $d/(\text{\AA})$	甲烷(CH_4)	3.80	决定在致密土壤中的渗流阻力,小直径使氢气更易穿透孔隙,产生组分偏析
	掺氢天然气(20%)	-	
	氢气(H_2)	2.89	
J-T系数 $u_{J-T}/(\text{K}\cdot\text{MPa}^{-1})$	甲烷(CH_4)	~0.45	决定泄漏点温降幅度,氢气高比热容加剧了降温效应,需在非等温模型中修正
	掺氢天然气(20%)	随掺氢比降低	
	氢气(H_2)	~0.03	

Woodward等人^[23]通过研究工艺容器中液体和气体从孔洞中的泄漏速率,提出了将平均泄漏速率用于气体泄漏流量的计算方法。针对不同管道泄漏孔径,国内学者通过泄漏孔径 d 和管径 D 之比划分了管道泄漏模型,当孔径与管径之比小于等于0.2时,可视作小孔泄漏;当孔径与管径之比在0.2到0.6之间时,视作大孔泄漏;当孔径与管径之比大于等于0.6时,视为管道断裂泄漏^[24]。国外学者普遍认可欧洲输气管道事故数据组织的提议,视为理想气体的等熵过程,由理想气体状态方程概括,定义泄漏孔径小于20 mm为小孔泄漏^[25],泄漏孔径大于20 mm为大孔泄漏^[26],当管道截面完全破裂,视为管道破裂泄漏^[27]。泄漏处流动状态根据管内外压力比值可以分为临界流和非临界流两种状态。

已有研究基于对泄漏孔径的考虑已进行了相关理论模型的发展。Yuhua等^[28]提出了一种适用介

于小孔泄漏与管道完全破裂的泄漏模型。小孔泄漏可采用孔模型计算,且泄漏过程视为稳态;对于大孔泄漏应采用管道模型;而介于两者之间时,当管道压力高于1.5 MPa,90%以上气体在声速流阶段释放,整个泄漏过程的平均释放速率可取稳态泄漏速率的30%进行估算,且压力越高估算越准确。熊兆洪等^[29]基于气体单相渗流理论,结合考虑惯性损失系数的高速非达西渗流模型,建立埋地管道小孔泄漏在土壤中渗流的数学模型。并采用有限体积法对控制方程进行离散,利用三对角矩阵算法与交替方向隐式线迭代法进行数值求解。通过实验获得了适用于地表高渗透率的非达西渗流系数经验公式以及反映泄漏口附近土壤变形影响的压力修正公式。

为了进一步提升理论模型的精度,也有学者考虑了泄漏过程中管壁摩擦的影响。Nouri-Borujerdi

等^[30]重点分析了管道壁面摩擦与能量传递对气体流动特性的影响,研究发现降低入口温度或减少管壁摩擦传热均可提高阻塞流泄漏的质量流量。Young等^[31]提出了快速估算高压气体管道泄漏流量的简化模型,并分为考虑管道壁面摩擦损失导致压降的修正因子,以及忽略摩擦损失时的理论泄漏流量。同时该简化模型的预测值均略高于理论计算值,偏差随泄漏点接近气源而趋近于零,虽然预测值略高,但结果相对保守可靠,适用于相关气体设施的风险管理。

长距离输送燃气过程中通常采用高压管道来降低运营成本。大部分高压管道铺设深度较浅,位于自然表层之下,周围土壤均为土质回填,发生小孔泄漏时,高压气体泄漏可能会冲破土壤,从地下喷射而出。已有实验研究证明高压埋地管道泄漏时地面上会形成火山口喷流,因此认为此处讨论研究的小孔泄漏非达西渗流几乎不会发生在高压埋地管道中。

基于以上理论模型的研究,学者们构建了针对埋地管道的动态计算模型。王大庆等^[32]建立了一个涵盖音速和亚音速泄漏阶段的非稳态泄漏的动态模型,基于初始泄漏流量公式,根据容器内压力、温度、密度等状态参数的实时变化,推导得出泄漏率随时间变化的经验公式。Moloudi等^[33]针对管道失效问题,构建了穿孔及全断裂两类型模型,通过引入描述一维瞬态可压缩流动的无量纲化控制方程组,在欧拉方程框架下开发出一种预测气体泄放速率与质量变化的数值评价方法;研究深入剖析了相对孔径、初始压力比以及管壁摩擦力对动态泄放特性的主导作用,并据此提出了具有普适性的无量纲释放相关式。彭伟等^[34]建立了埋地燃气泄漏的3D模型,系统研究了泄漏孔位置、尺寸、形状以及双孔间距对天然气在土壤中扩散影响。结果表明,泄漏孔是影响扩散速度的主要因素,当双泄漏孔间距越小时,甲烷融合越快,随之竖直扩散速度增加,但泄漏总量随间距增大而变大。该研究最终通过数值模拟数据进行拟合,建立泄漏孔径与泄漏流量之间的经验公式。

综上所述,目前埋地管道泄漏理论模型由单一的经验公式预测逐步演变为涵盖管内泄漏动力学与外部多孔介质运输的复合评价体系,通过引入无量纲关联式对失效模式进行几何定义,并且用控制方程项中耦合壁面摩擦阻、非等温效应和非达西进行

修正,显著提高了模型在一些常规工况下的预测精度。但现有的理论框架在极端及复杂工况下仍存在边界条件失效和多场耦合不足等局限,未来构建涵盖多物理场强耦合机制、具备跨尺度模拟的非稳态动力学模型,是实现埋地管道泄漏精准定量评估的关键。

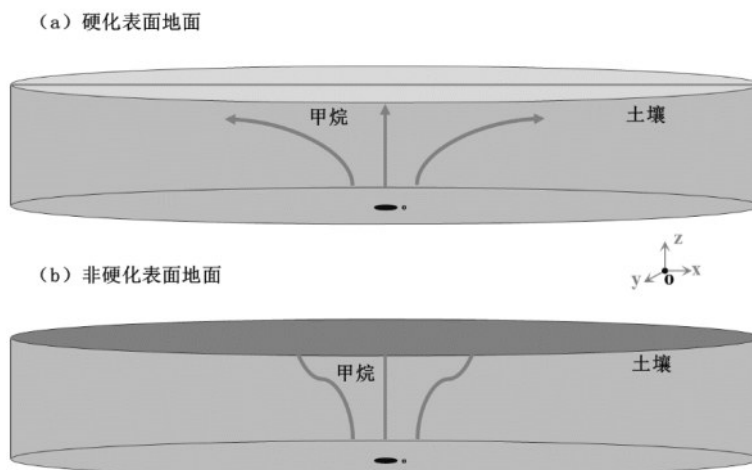
2 埋地管道泄漏扩散数值模拟研究

上述理论模型为埋地管道泄漏特性的定量评价奠定了力学基础。然而,实际的土壤情况具有很高的非均匀性以及多物理场耦合等特性,这使得单靠解析模型往往难以捕捉复杂工况下非稳态扩散。因此计算流体动力学数值模拟成为分析埋地管道泄漏扩散规律的核心手段。埋地管道泄漏扩散数值模拟的研究主要围绕泄漏孔径、运行压力、埋深以及土壤等因素如何影响气体在土壤内泄漏扩散为研究内容,分析气体在土壤内乃至大气泄漏扩散的流通特性,还包括地面条件、障碍物等影响,归纳总结埋地管道泄漏扩散规律。

2.1 埋地管道泄漏土壤内渗流扩散

部分研究认为埋地管道泄漏后的扩散是在土壤内进行渗流扩散,尤其是中低压管道的泄漏。由于天然气管道建设比较成熟,已有关于天然气输送管道的研究较为普遍。Bu等^[35]对埋地天然气管道泄漏过程中土壤与地面条件等因素的作用展开系统的CFD数值模拟研究,几何边界条件如图2所示,分析了硬化与非硬化地面条件下土壤饱和度、土壤孔隙率以及土壤粘性阻力、惯性阻力系数对天然气在土壤中泄漏扩散的影响,以及泄漏瞬时动态和长期扩散规律。研究发现地面是否硬化这一条件对泄漏的质量流量没有影响,但对泄漏后的扩散行为有决定性影响。硬化地面会阻碍泄漏的甲烷到达大气,导致气体在土壤内聚集,形成较大的压力场、更高速的气流区域以及高浓度区域,这揭示了城市路面下泄漏事故具有很强的隐蔽性和高风险。同时还指出了土壤的粘性与惯性阻力系数是控制泄漏率的关键因素,土壤的饱和度与孔隙率主要影响泄漏气体在土壤中的泄漏扩散过程。

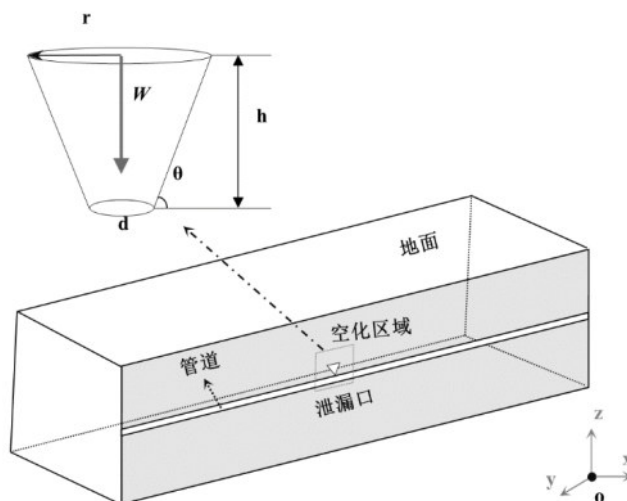
Bezaatpour等^[36]针对埋地天然气管道在复杂土壤中的泄漏扩散行为,通过实际土壤样本数据建立了三维模拟,考虑土壤各向异性、分层结构、变湿度含量以及坡度问题,并采用苏阿维-雷德利希-沉

图2 地表为硬化与非硬化地面物理模型^[35]Fig. 2 Physical models under the conditions of paved and unpaved surfaces^[35]

(Soave-Redlich-Kwong, SRK)真实气体状态方程模拟天然气的泄漏扩散。结果表明,泄漏孔径从10 mm增大至50 mm,泄漏速率增大86.5%;土壤湿度与各向异性对气体扩散路径影响显著,湿润土壤中气体扩散受毛细作用与微孔效应的制约,扩散路径不对称;土壤层的坡度会导致气体锋面沿坡向扩展。该研究考虑了土层的各向异性、分层以及不同的力学和水力性质,采用渗透率张量来分析土体的非均质性质,最后通过非线性回归建立了泄漏率预测方程。刘畅^[37]也针对非均质土壤环境下城镇埋地管道天然气泄漏开展了数值模拟,建立了三维双层非均质土壤模型,深入探讨了泄漏压力、土壤孔隙率、分层特征截面以及地面坡度等因素对甲烷泄漏浓度场分布的影响。研究发现泄漏压力显著提升了甲烷的纵向扩散速率,且在分层土壤中,上层土壤孔隙率较低时,会由于局部阻力差异,反而加速甲烷的纵向泄漏;同时,泄漏的甲烷在土壤中呈现出灯泡状,以及地形坡度导致的扩散非对称性。Bu等^[38]针对中低压埋地天然气管道在腐蚀或第三方破坏下导致的泄漏扩散问题,首次在数值模拟中引入了气体导致土壤空腔形成的土体空化效应,如图3所示,探讨了泄漏气体冲击土体形成的空化区域对气体在土壤内扩散的影响。研究基于三维物理模型,通过标准k- ϵ 湍流模型和多孔介质运输方程,来模拟空化效应下压力场、速度场和气体浓度分布情况。结果表明,空化效应会显著改变气体的扩散特征,当空化高度逐渐增大,压力等值线范围扩大四倍,最大流速显著提高,最远危险范围增加了

38.0%,砂土中拥有最大的扩散半径。传统的较为固定的埋地气体多孔介质扩散模型忽略了高速气流产生的机械冲击力,该研究本质是将泄漏从简单的扩散渗透过程修正为自由喷射与渗透耦合过程,这一改进揭示了实际事故中的危险范围往往大于数值模拟值的原因,拥有很高的工程修正价值。

部分渗流扩散的研究也涉及到高压管道。Bagheri等^[39]采用三维CFD数值模拟结合实验研究了埋地天然气管道在复杂土壤环境中的泄漏速率。该研究没有使用传统的单一变量模型,而是将土壤颗粒细分为粉土、砂土和砾石土三种模型进行分类讨论。研究结果显示,这种分类可以让预测精度高于传统的幂函数模型,并且能将误差控制在10.0%左右。该研究指出,多孔介质的粘性阻力和惯性阻力能快速消耗气体大部分的动能;仅对孔隙率这一变量进行单一研究并不充分,土壤分类和粒径数据对提升风险预测的精度非常重要。该模拟计算中包含了高压工况,补充了长输管道高压工况下泄漏率的空白。同时本研究并没有考虑土壤饱和度,水分会通过改变有效孔隙度,进而影响泄漏率。Xia等^[40]以西气东输埋地高压天然气管道为研究对象,系统研究了箱涵保护这一特殊工程结构下,管道发生泄漏时气体泄漏扩散规律和风险范围。该研究采用真实SRK气体状态方程与理想气体状态方程进行泄漏率的对比,指出真实SRK气体状态方程表征10 MPa高压工况下天然气的泄漏率更为精确。研究表明箱涵的物理保护会显著改变管道泄漏后气体扩散路径,天然气会首先聚集在半封闭的箱涵

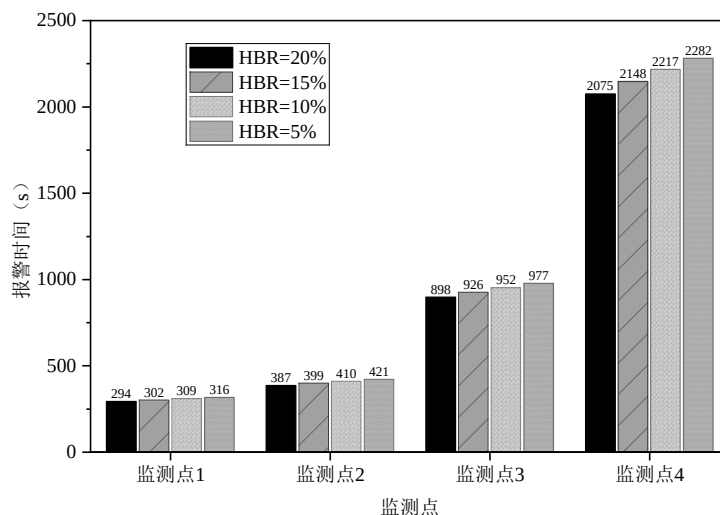
图3 考虑泄漏孔处于土体作用形成圆台状空腔结构^[38]Fig. 3 Considering the leakage hole forming a frustum-shaped cavity under the action of the soil mass^[38]

土壤内,形成高浓度的危险云团;并且会出现长距离导流现象,箱涵会将泄漏点限制在特定路径上,顺着箱涵横向流动,这可能导致泄漏点几十米外仍处于高浓度甲烷区域,这种现象会显著增加地面监测难度,传统的垂直检测手段失效。该研究基于模拟数据,不仅拟合出泄漏率的数学模型,还针对性地构建了危险区域半径预测模型。该研究不同于以往气体在单一多孔介质的扩散,引入实际工程中箱涵回填土这一典型场景研究气体在两种组分的多孔介质中扩散,揭示了半封闭空间而形成的高压气流导流特点。虽然箱涵能抵御一定的外部载荷来保护管道结构,但泄漏后容易导致泄漏气体在箱涵内形成高浓度区域,使得局部风险较高,遇到施工或点火源容易导致爆炸,因此未来应该多关注箱涵内检测和泄压设计及时做出应急方案,来优化箱涵保护。

近年来,伴随着对氢气关注度的提升,越来越多的学者开展了天然气掺氢甚至纯氢管道泄漏的研究。Lu等^[41]对埋地掺氢天然气管道在土壤中的泄漏扩散特性进行了数值模拟研究,着重分析了掺氢比、管道运行压力、土壤孔隙率以及泄漏孔径对气体扩散行为以及地表可燃混合物浓度达到可燃下限所需时间的影响。结果表明,掺氢天然气围绕泄漏孔为中心向外扩散,并且扩散半径随时间增加而逐渐减缓,管道上方浓度显著高于管道下方浓度;掺氢比增大会降低掺氢天然气的可燃下限,但会加速其在土壤中的泄漏扩散,导致泄漏气体更快到达地表达达到可燃下限,如图4所示。同天然气管

道类似,管道运行和泄漏孔径的增大会大大提升泄漏的质量流率,土壤的孔隙率增加,气体在土壤中的扩散阻力减小,三者均显著减小气体泄漏至地表达达到可燃下限的时间。Zhang等^[42]针对中低压条件下埋地纯氢管道小孔泄漏开展三维数值模拟,基于多孔介质模型和标准 $k-\epsilon$ 湍流方程来模拟泄漏孔附近高雷诺数流动过程,描述氢气在多孔介质土壤孔隙中受极强浮力驱动而形成的垂直扩散机理。通过数值模拟量化中低压运行压力、埋深及不同土壤条件下氢气燃爆危险区域,揭示了氢气的高扩散性和浮力效应即使是在中低压泄漏,也能较短时间内穿透土壤层并在泄漏上方的地表形成危险区域。Wang等^[43]针对埋地高压纯氢管道这一场景,模拟纯氢泄漏后在不同土壤条件下的泄漏扩散。研究采用 $k-\epsilon$ 湍流模型,使用真实气体状态方程提高仿真精度,分析压力、孔径、埋深等多种因素对泄漏扩散的影响,并根据土壤粘性阻力和惯性阻力系数分类研究。研究发现,氢气在土壤内的扩散呈现出一个倒锥状,垂直扩散速率显著高于水平方向,泄漏孔径和压力是影响地表危险半径的关键因素,土壤的孔隙率、粘性阻力及惯性阻力系数影响着泄漏气体到达地表的最短时间。研究还指出氢气泄漏在地表形成的危险区域较天然气相比更趋向于垂直性扩散,这一特性使得氢气泄漏难以精准监控,传感器的布置优先置于管线上方,且需要具有极快响应速度来更好的应对氢气极高的扩散速率。

在埋地渗流扩散数值模拟中,三种介质扩散过程都对土壤粘性阻力和惯性阻力系数的阻力效应

图4 掺氢比对监测点报警时间影响^[41]Fig. 4 The Effect of Hydrogen Concentration on Alarm Times at Monitoring Stations^[41]

明显,并且容易受到复杂地况的阻隔或导流作用影响。在天然气向掺氢及纯氢过渡时,扩散的驱动力由单一压力转变为压力和强浮力效应同时驱动;在均质土壤内扩散形态,与空气密度相近的天然气呈现出轴对称灯泡状,而有更低密度的掺氢天然气和氢气表现出更强的垂直扩散机理,呈现高垂直扩散率的倒锥状形态;在动力学特征方面,增大掺氢比会显著降低掺氢天然气的燃爆下限,并且由于氢气极高的扩散系数,能显著降低混合气在多孔介质中的阻力,缩短了气体到达地表时间。此外,高压工况下高速气流会引起空化效应,以及半封闭箱涵内的导流现象,这导致在传统的多孔渗流模型边界失效。

综上,埋地管道泄漏数值模拟已经不再局限于单一多孔介质渗透模型,而是向着土力学与更复杂的工程实际场景综合仿真推进,引入土体空化效应阐明高压射流机械冲击对危险半径的扩张机制,同时探讨了地表硬化、坡度及箱涵保护等特殊边界条件对泄漏扩散的影响,揭示了半封闭空间内气体的聚集规律和长距离导流现象。这一系列向更复杂工况下的研究,提升了预测模型以及关键指标的量化精度。

2.2 埋地管道泄漏与大气多物理场耦合研究

鉴于燃气泄漏后主要风险来源于到达地表后,与空气形成可燃混合物达到可燃下限后发生爆炸而产生危险行为,许多学者继而开展了同时考虑土壤和大气环境等复杂多物理场耦合扩散的数值模拟研究。

已有的大部分研究仍旧主要集中在天然气管道泄漏。官学源^[44]探讨了不同风场对达到爆炸极限的甲烷扩散的影响。结果表明,低风速下,大气对流稀释作用较弱,泄漏气体浓度在泄漏点上方和下风向近距离区域较高,爆燃风险较大;随着风力增强,气云的扩散面积扩大,但强风条件导致高浓度区域显著降低。引入风力对泄漏后气体扩散至大气后的研究,阐明了土壤与大气界面间受风力影响的后扩散形态。叶岩等^[45-46]针对城市埋地天然气管道微小泄漏探测困难的问题,数值模拟研究了甲烷在土壤与大气耦合场中的非稳态扩散规律,不仅对比了分层筑土与不分层筑土两种回填形式工况,还针对土壤多孔介质的渗透特性与大气环境的对流特征,分别建立了不同的物理输运模型。研究结果发现,土壤分层交界面对甲烷的扩散有显著影响,低、中浓度甲烷在透过分层界面时会出现明显的延迟扩散现象,且伴随浓度拐点,但突破交界面后,其扩散速率会迅速攀升。当泄漏时间超过100秒后,分层筑土环境下的甲烷地下扩散速率及大气中甲烷的横向扩展范围均高于均质回填的工况。回填质量直接影响泄漏后的探测,这种对分层回填的物理建模,让模拟结果更加的准确。这和Bu等人^[35]采用数值模拟方法对埋地天然气管道在路面硬化和未硬化条件下泄漏的研究具有一定相似性,都是考虑更加真实的物理场景,对实际工程的指导意义远超理想化的模型。Ebrahimi-Moghadam等^[47]通过构建稳态可压缩湍流模型,对比了地上与埋地两种典型工况下的天然气泄漏扩散特性。研究将土壤视为

多孔介质,基于大量数值模拟数据,由数学公式得到了埋地管道泄漏流量的拟合公式,并指出土壤多孔介质的背压效应显著减小了泄漏速率,且这种抑制作用随孔径增大而增强。在箱涵内的密闭空间中,管道泄漏不仅可能直接造成可燃气体积累和土壤污染等风险,还因空间狭窄而使泄漏扩散规律变得复杂化,增加了监测和预防控制的难度^[48-49]。

Zandi等^[50]对直径200 mm、长6 m、泄漏孔尺寸分别为小孔、大孔、断裂三种情况的地上和埋地管道的天然气泄漏进行了数值模拟。该研究目标了解泄漏后空间(地面和地下)的气体浓度分布。结果表明,在管道三种泄漏压力下,地上气体从泄漏点发出的轮廓呈射流状。相反,地下气体显示出从泄漏点发出的浓度降低的圆形等高线。然而,模拟结果仅来自数值模拟计算,还需要实验验证。作者还提到,在高压泄漏条件下,埋地管道会产生漏斗效应。

在氢能长距离大规模的储运时代,埋地管道泄漏受复杂土壤条件和氢气物理性质的影响极易导致管道劣化泄漏扩散。Zhang等^[51]建立了一个将地下多孔介质土壤层渗透模型与地表大气相耦合的埋地纯氢管道数值模型,重点研究了泄漏孔径、运行压力和土壤类型对浓度场时空分布的影响,深度解析了中低压环境下纯氢管道失效后的气云演变机理。结果表明氢气的扩散并非一个匀速的过程,而是处于一个让局部先饱和后,远端气云才慢慢呈现稳定状态的梯度特征。泄漏点附近氢气浓度在初期即可达到饱和,地表危险区域范围的划定依赖于后期泄漏的长周期性稳态演化。该研究的贡献在于它打破了以往研究中土壤层扩散和大气扩散的两种孤立状态,将地下渗流、地表逃逸、空间积聚的全物理场进行耦合。如果在地表布置高精度探头,利用本研究揭示的对称性浓度模型,结合算法便可理论上推导出泄漏点的精确坐标,为地下氢气泄漏的快速定位以及防护措施提供了定量的理论依据。潘军^[52]针对掺氢天然气搭建了全尺寸埋地泄漏实验平台耦合三维数值仿真,构建了管-土-大气的耦合模型。其研究定量分析了掺氢比对地表气云的重塑影响,指出掺氢天然气在突破土壤约束后的扩散行为具有强烈的垂直偏移趋势,并通过实验对比表明,随着掺氢比的增大,气云在径向范围扩散相对减小,但垂直方向的危险高度显著增加。此外还量化了地表达达到爆炸下限的范围随时间的时空演化特征,为埋地掺氢管道地表危险范围划定提

供了依据。

三类介质在埋地泄漏中均受土壤背压抑制及大气风场剪切的影响,但由于天然气密度与空气相似,其地下浓度分布呈以泄漏点为中心径向对称分布,而掺氢天然气和氢气由于氢气低密度产生的强浮力效应,出现显著的垂直偏移扩散,这导致地表危险高度显著提升,且横向范围相对收缩。深入剖析其影响因素发现,非均质土壤对三种不同介质调制机理不同,氢气极小的分子动力学直径,让其在粘土中的穿透能力远超甲烷,这就导致组分偏析现象非常明显;在运行压力相同情况下,氢气具有更高的体积流量,更容易冲破土层的束缚,直接向大气进行射流扩散。由此可见,天然气泄漏的模拟侧重于土壤障碍对路径的阻隔,而掺氢天然气和氢气泄漏的模拟更关注其介质属性对危险气云形态的演变。

综上,埋地管道泄漏数值模拟已经向土壤耦合大气多物理场进行研究,以更好的揭示介质向多孔介质及大气环境泄漏扩散的规律。这种从理想场景向实际多物理场耦合的演进,为地下泄漏点精确定位提供了理论支撑。此外,已有研究在当前输氢管道建设的筹划阶段重点考虑了氢气比天然气更强的浮力效应,来提高传统模型对危险范围的预测的精度。

3 埋地管道泄漏扩散实验和测量

数学模型和数值模拟为埋地管道泄漏研究提供了理论架构,但实验研究不仅可以直接观测复杂介质中的流场演化,还能为理论模型提供必要的经验修正系数。建立实验台的实验研究注重取得实际效果。实验台包括三种类型:圆柱形实验台、实验室尺度实验台和全尺寸(或野外尺度)实验台。一些研究还将风洞纳入模型,以模拟地面上的气体流动。

Okamoto和Gomi^[53-55]开展了甲烷与空气混合气泄漏的实验研究,探测泄漏的甲烷在地面上的浓度分布。研究证明了理论分析的结果与实验结果吻合。三年后,该团队^[56]将甲烷与空气的混合物更换为氢气进行了相同的实验研究,分析氢气在土壤中的扩散规律。相较于两年前针对甲烷的实验,发现氢气极小的分子直径和极高的质量扩散系数导致氢气在土壤中的垂直扩散速率更高。实验还进一

步研究了土壤饱和度、孔隙率以及埋深对氢气扩散的影响,补充了氢气和甲烷空气混合物在复杂土壤环境中泄漏扩散的对比实验。

Houssin-Agbomson 等^[57]在一条具有 12 mm 泄漏孔的埋地燃气管道上开展了具有行业示范价值的大规模全尺寸的意外泄漏实验,揭示了高压气体在土壤层约束下的真实泄漏喷发行为。研究条件在一米埋深下,最高压力可达 7.8 MPa,介质为天然气和纯氢,方便进行分析对比。实验结果表明,无论是天然气还是氢气,在砂质土壤中,泄漏压力高于 4 MPa 时均会冲破土壤形成火山口;泄漏压力在 1.7 MPa 和 4 MPa 之间时仅观察到土壤隆起且伴随气体排出;而在该实验整个压力工况范围内,土壤为粘土时,不会形成火山口,只观察到隆起现象。实验结果不仅颠覆了传统的稳态多孔介质渗流研究方法,还证明了高压气体泄漏的气流会冲破土壤形成火山口,使得泄漏过程直接演变为大气射流扩散。该研究的重大价值体现在可以通过压力衰减曲线以及地表坑洞的几何尺寸进行精细化测量,为高压埋地管道泄漏数值模拟提供全新的多工况模型数据理论支撑。

Bonnaud 等^[58]基于 Houssin-Agbomson^[57]的全尺寸研究,对其进行了重要的补充和尺度延伸,聚焦于更小尺度的实验。他们对 1 mm 和 4 mm 泄漏孔径开展缩尺实验,释放压力范围为 0.08–0.89 MPa,在沙土和粘土中考虑不同孔径、埋深及含水量的影响进行实验,以此来揭示小孔径泄漏的局部空化,再到达西渗透的力学阈值。实验结果呈现出,当泄漏的动量不足以克服土体覆盖应力和内聚力时,气体将无法强制冲破土壤形成空腔,而是在土壤中进行非稳态扩散。当泄漏动量足以冲破土壤时,形成的火山坑一般由一个紧密的圆锥体和一个圆柱体或角度很小的圆锥体组成,且压力越高,泄漏处的椎体越大。他们还通过浇筑空腔,得到空腔具体几何形状进行分析,为空腔的模型和数值模拟物理模型的构建提供了依据。

Zhu 等^[59]针对埋地条件下的掺氢天然气泄漏搭建了研究其泄漏特性的实验平台,系统分析了从 0% 到 20% 掺氢比下掺氢天然气的泄漏速率和其在土壤内的扩散规律。该实验首先展开了泄漏率的理论验证,由于埋地管道上方土壤阻力的影响,质量流量虽然呈线性下降,考虑到架空管道泄漏流量与埋地管道泄漏实验值之间的误差仅为 6.9%,因此

该研究忽略了泄漏出土壤的阻力效应,采用架空管道泄漏公式计算埋地管道的泄漏流量。在扩散机制方面,从氢气的低密度、高扩散系数对混合气体浓度场的影响展开研究,发现在泄漏渗流过程中,氢气由于分子体积小且扩散能力强,相较于甲烷地表附近能更早的探测到,且在扩散前沿表现出一定的组分偏析特征。随着掺氢比的增加,掺氢天然气的泄漏质量流量有所下降,但体积泄漏率显著上升,这导致了地表爆炸下限(Lower Flammable Limit, LFL)的覆盖范围随掺氢比增加而呈现非线性扩张。掺氢天然气在沙土和粉质粘土中扩散也会表现明显差异,沙土阻力修正系数较小,氢气垂直扩散尤为明显,到达地表时间极短,而粉质粘土阻力较大,气体横向迁移明显,但氢气依旧表现出更强的穿透能力,这是产生明显组分分离的重要原因。在此基础上,Zhu 等^[60]进一步探讨了掺氢天然气泄漏引起的土壤温度场变化及探测技术。研究发现,随着掺氢比的增加,泄漏质量流量会有下降,但掺氢天然气在泄漏口的流速和冷能释放速率提升明显,这表明,氢气较高的恒压比热容,掺氢比提高会使得泄漏口处焦耳-汤姆逊降温效应更显著。并且在泄漏压力为 5.8 MPa 下,30% 掺氢比相较于纯甲烷,土壤的温降效应会高出 35.0%,因此这种剧烈的温度波动可以扩大分布式光纤监测系统的有效探测半径,让基于热感知原理的监测方案在掺氢天然气泄漏检测具有更高的灵敏度和可行性。

此外,还有多位学者从实验精度、数据处理以及实验场景方面进行了测试,以提供更准确、更有价值的实验数据。由于传统实验难以保证恒压环境,晏玉婷^[61]使用高精度双气室测量系统来表征非饱和土壤有效扩散系数,防止测量扰乱。利用该装置通过上游注气与下游监测,分析了土壤孔隙率、孔径及含水率对甲烷扩散的影响。甲烷在复杂土体内的有效扩散系数,由非稳态扩散方程的 Laplace 变换反推得到,其结果通过多组分气体实验进一步验证了空气模型的稳定性。此研究的实验模式,不仅构建多孔介质渗透的数据标尺,也为后续数值模拟的边界条件设定提供了严谨的判定。Wang 等^[62]建立了长 8 米、宽 4 米、埋深 2.5 米的实验平台。压力较低为 0.022~0.039 MPa,泄漏直径 2 和 10 mm,监测时间 8 和 24 小时。从甲烷气体在土壤中的渗流特性的理论分析可以看出,实验数据的处理采用了厄尔贡方程。与许多研究人员不同的是,这是对土

层中瓦斯渗漏现象的正确认识。然而 Wang 等人的实验中提到天然气在土壤中的运移过程是一个高度复杂的物理现象,主要涉及压力梯度驱动的对流和浓度梯度驱动的扩散。对流和扩散概念不适用于土层中的气体渗流过程。这与厄尔贡方程是相矛盾。Liu 等^[63]构建了实验室小尺度模型和全尺寸的场外验证相结合实验。在实验室搭建了经过筛分后的棕壤(粒径 1~500 μm)为多孔介质的测试平台,采用压缩空气作为甲烷的替代介质,利用高精度涡街流量计与压力变送器,获得了 10~50 kPa 运

行压力下、2~4 mm 微小孔径及不同埋深条件的泄漏流体力学数据。在此基础上,通过数值修正建立了针对甲烷的泄漏率估算关联式,并进一步开展了全尺寸野外实验进行检验。实测数据表明,该实验修正模型对泄漏速率及致死/爆炸扩散边界的预测相对误差分别控制在 7.2% 与 15.0% 以内,有效证实了利用小尺度空气替代实验验证真实埋地甲烷泄漏规律的工程适用性。表 4 系统总结了三种介质泄漏的差异性以及关键原因分析。

表 4 三种介质泄漏差异机理分析

Table 4 Analysis of the Mechanisms Behind Differences in Leakage Among Three Types of Media

影响因素	气体类型	工况表现/特征	关键原因分析
主要扩散驱动力	天然气	压力梯度	氢气密度极低,扩散系数是甲烷的 3.8 倍
	掺氢天然气	压力+浮力	
	纯氢	强浮力+高扩散性	
土壤温降效应	天然气	较强	氢气恒压比热容大,焦耳-汤姆逊效应剧烈
	掺氢天然气	随掺氢比增强	
	纯氢	极强	
土壤阻力敏感度	天然气	高	氢气分子动力学直径小,易穿透微小孔隙
	掺氢天然气	中	
	纯氢	低	
地表危险域形态	天然气	扁平/对称	受浮力主导,垂直扩散速率远超水平
	掺氢天然气	垂直偏移	
	纯氢	狭窄垂直带状	
监测难点	天然气	扩散慢,易积聚	组分扩散系数差异导致地表组分分布不均
	掺氢天然气	组分分离导致的浓度波动	
	纯氢	扩散快,传感器需高频响应	

综上,埋地管道泄漏实验研究通过构建多形式实验平台,在动力学角度解析了高压射流引发的土体空化与冲破阈值,实现了稳态渗流向大气射流扩散模型的修正,同时,高精度双气室装置、空气替代及多尺度验证体系,提升了有效扩散系数、尘气模型(Dust-Gas Model, DGM)及泄漏率的预测精度,为数值模拟提供空腔几何尺寸数据和关键物理边界。

4 结论与展望

本文系统梳理了天然气、纯氢及掺氢天然气埋地管道泄漏扩散的演化规律、实验表征及数值模拟研究现状。现有研究已初步构建了从微观孔隙扩散到宏观土体破坏射流的理论框架。具体研究结论总结与展望如下:

1)研究明确了氢气、掺氢天然气相较于天然气具有更强的分子扩散能力和更低的粘度,揭示了其在多孔介质中更易垂直扩散及在受限空间内快速

积聚的风险特征,相关实验研究划定了“渗流扩散”与“冲破形成空腔”的物理边界,证实了高压气体射流对土壤的力学破坏。

2)已有模型一般将土壤视为多孔介质,而忽略了高压泄漏引起的动力学破坏效应。未来可以对这一过程进行动网格数值模拟,探究高压氢气射流导致的土壤冲破机制和空腔几何结构演化过程;

3)受限于安全风险与成本,现有的氢气泄漏数据多源于小尺度实验或通过天然气/空气实验反演。由于氢气的爆炸极限范围宽且点火能量低,简单的介质替代可能导致风险低估。亟需开展全尺寸埋地氢气管道泄漏实验,获取真实的射流形态与浓度场数据,修正并建立适用于氢气/掺氢气体的物理模型相似准则,为数值模拟提供高精度的标定基准。

4)现有研究多基于理想均质土壤,而城镇管网所处的地下环境极为复杂。未来应重点关注非均质分层土壤、地下含水率以及相邻地下设施障碍物

对气体扩散路径的导向作用,各种边界条件对气体地表逸出与地下横向迁移的阻滞效应。

5)纯氢及掺氢比较高的掺氢天然气在多孔介质中的扩散系数较天然气大,从土层扩散到达地表的时间显著缩短。因此,针对氢能管网系统,传统的长周期巡检手段已无法满足应急要求,必须建立基于分布式光纤或高灵敏度电化学氢气传感器的连续监测系统,且仪器的检测频率和响应时间需匹配氢气的高流速特征。在工程实践中,传感器的布置应严格优先置于管道正上方的土层或地表,而非盲目进行大范围的横向径向铺设,从而在保证探测灵敏度的同时大幅优化布线成本。

6)高压纯氢或掺氢天然气管道发生泄漏后,高速气流产生的机械冲击极易引发土体空化效应,形成倒圆台状物理空腔。在定量的风险评估中,不能沿用传统的多孔介质渗流假设模型,这将导致评估的危险半径偏小。应引入空化修正因子,将实际危险半径至少放宽 30% - 40%,以确保高压氢能管网风险边界的可靠性。

符 号 说 明

CFD——计算流体力学

MIE——最小点火能量

LFL——爆炸下限/爆炸极限

SRK——苏阿维-雷德利希-况真实气体状态方程

DGM——尘气模型

J-T——焦耳-汤姆逊(文中指J-T系数)

ρ ——气体密度

d_k ——分子动力学直径

D_{AB} ——气体在空气中的扩散系数

d ——管道泄漏孔孔径

D ——输气管道管径

d/D ——泄漏孔径与管道直径之比

k ——湍流动能

ε ——湍流耗散率

参 考 文 献

- [1] 余晓钟,孙炳清,辜穗,等."一带一路"天然气高质量稳定合作影响因素与对策[J].世界石油工业,2025,32(6):1-10.
Yu X Z, Sun B Q, Gu S, et al. Drivers and strategies of stable, high-quality natural gas cooperation under the Belt and Road Initiative[J]. World Petroleum Industry, 2025, 32(6): 1-10.
- [2] Davenport J, Wayth N. Statistical review of world energy[R]. Energy institute, 2023.
- [3] Bains P, Bennett S, Collina L, et al. Global hydrogen review 2023 [R]. International Energy Agency: Paris, France, 2023.
- [4] van Rossum R, Jens J, La Guardia G, et al. European Hydrogen Backbone: A European hydrogen infrastructure vision covering 28 countries[R]. European Hydrogen Backbone Initiative, 2022.
- [5] «中国天然气发展报告(2024)»预测:今年天然气消费将首超4000亿方[J].化工管理,2024(24):60.
China Petroleum and Chemical Industry Federation. China Natural Gas Development Report (2024) forecasts: natural gas consumption to exceed 400 billion cubic meters for the first time this year[J]. Chemical Enterprise Management, 2024(24): 60.
- [6] 才秀敏.«中国氢能源及燃料电池产业发展研究报告»发布[J].电器工业,2018(12):61-62.
Cai X M. The research report on the development of hydrogen energy and fuel cell industry in China was released[J]. China Electrical Equipment Industry, 2018(12): 61-62.
- [7] Wen J X, Marono M, Moretto P, et al. Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(38): 17082-17096.
- [8] Kaiser S, Erxleben K, Rhode M, et al. Repair welding of in-service hydrogen pipelines - concepts and challenges -[C]// 2024 15th International Pipeline Conference, September 23 - 27, 2024, Calgary, Alberta, Canada. 2024
- [9] Gallon N, Andrews R M, Huising O J C, et al. Hydrogen Pipelines: Design and Material Challenges and Mitigations[R]. ERPG Project 221/2020, 2020.
- [10] Sun Y H, Cheng Y F. Thermodynamics of spontaneous dissociation and dissociative adsorption of hydrogen molecules and hydrogen atom adsorption and absorption on steel under pipelining conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(69): 34469-34486.
- [11] Hoschke J, Roethig M, Tapia-Bastidas C V, et al. Determination of the hydrogen fugacity during cathodic hydrogen charging of X65 D pipeline steel[J]. Corrosion Science, 2025, 243: 112580.
- [12] Campari A, Konert F, Sobol O, et al. A comparison of vintage and modern X65 pipeline steel using hollow specimen technique for *in-situ* hydrogen testing[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 163: 108530.
- [13] Drexler A, Konert F, Sobol O, et al. Enhanced gaseous hydrogen solubility in ferritic and martensitic steels at low temperatures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(93): 39639-39653.
- [14] Jackson R B, Down A, Phillips N G, et al. Natural gas pipeline leaks across Washington, DC[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(3): 2051-2058.
- [15] Najjar Y S H. Hydrogen safety: The road toward green technology [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(25): 10716-10728.
- [16] Crowl D A, Jo Y D. The hazards and risks of hydrogen[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, 20(2): 158-164.
- [17] Calabrese M, Portarapillo M, Di Nardo A, et al. Hydrogen safety challenges: a comprehensive review on production, storage, transport, utilization, and CFD-based consequence and risk assessment[J]. Energies, 2024, 17(6): 1350.
- [18] 孙逸林,郑小强,刘丹秀,等.我国城镇燃气管网生产安全事故统计与宏观规律分析[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2023,45(5):675-680,703.

- Sun Y L, Zheng X Q, Liu D X, et al. Statistics and macrocosmic laws analysis of production safety accidents in china's urban gas pipeline networks[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2023, **45**(5): 675–680, 703.
- [19] Zhang W K, Zhao G H. Leakage and diffusion characteristics of underground hydrogen pipeline[J]. Petroleum, 2024, **10**(2): 319–325.
- [20] 金友平, 帅健, 王文想, 等. 基于重大事故场景的受限空间内燃气泄漏情景模拟及泄爆优化研究[J]. 高压物理学报, 2023, **37**(6): 161–177.
- Jin Y P, Shuai J, Wang W X, et al. Leakage characteristics of flammable gas in confined space and the optimum design of explosion venting: numerical simulation on basis of the major accident[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, **37**(6): 161–177.
- [21] National Transportation Safety Board. Natural Gas-Fueled Building Explosion and Resulting Fire[R]. Washington, D. C.: National Transportation Safety Board, 2015.
- [22] van den Brand D, Kutrowski K H. Safety in European gas transmission pipelines EGIG: European gas pipeline incident data group[C]//Proceedings of the 23rd World Gas Conference. Amsterdam, The Netherlands. 2006: 5–9.
- [23] Woodward J L, Mudan K S. Liquid and gas discharge rates through holes in process vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1991, **4**(3): 161–165.
- [24] 冯云飞, 吴明, 闫明龙, 等. 燃气管道泄漏模型的研究进展[J]. 当代化工, 2011, **40**(12): 1255–1257, 1260.
- Feng Y F, Wu M, Yan M L, et al. Research progress in leakage models for gas pipelines[J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, **40**(12): 1255–1257, 1260.
- [25] Levenspiel O. Engineering Flow and Heat Exchange[M]. Boston, MA: Springer US, 2014.
- [26] Montiel H, Vilchez J A, Casal J, et al. Mathematical modelling of accidental gas releases[J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, **59**(2/3): 211–233.
- [27] Crowl D A, Louvar J F. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications[M]. Upper Saddle River: Pearson Education, 2001.
- [28] Dong Y H, Gao H L, Zhou J E, et al. Evaluation of gas release rate through holes in pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2002, **15**(6): 423–428.
- [29] 熊兆洪, 李振林, 宫敬, 等. 埋地管道小泄漏模型及数值求解[J]. 石油学报, 2012, **33**(3): 493–498.
- Xiong Z H, Li Z L, Gong J, et al. A model for underground pipeline small leakage and its numerical solution[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, **33**(3): 493–498.
- [30] Nouri-Borujerdi A, Ziaei-Rad M. Simulation of compressible flow in high pressure buried gas pipelines[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, **52**(25/26): 5751–5758.
- [31] Jo Y D, Ahn B J. A simple model for the release rate of hazardous gas from a hole on high-pressure pipelines[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, **97**(1/2/3): 31–46.
- [32] 王大庆, 张鹏. 压力容器气体非稳态泄漏模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, **22**(7): 154–158.
- Wang D Q, Zhang P. Non-steady-state gas leakage model for pressure vessel failure[J]. China Safety Science Journal, 2012, **22**(7): 154–158.
- [33] Moloudi R, Abolfazli Esfahani J. Modeling of gas release following pipeline rupture: Proposing non-dimensional correlation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, **32**: 207–217.
- [34] 彭伟, 张俊, 袁宏永, 等. 深埋管道中泄漏孔对燃气泄漏影响的数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, **16**(10): 59–64.
- Peng W, Zhang J, Yuan H Y, et al. Numerical simulation on influence of leakage hole on gas leakage in deep buried pipeline [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, **16**(10): 59–64.
- [35] Bu F X, Chen S Q, Liu Y, et al. CFD analysis and calculation models establishment of leakage of natural gas pipeline considering real buried environment[J]. Energy Reports, 2022, **8**: 3789–3808.
- [36] Bezaatpour J, Fatehifar E, Rasoulzadeh A. CFD investigation of natural gas leakage and propagation from buried pipeline for anisotropic and partially saturated multilayer soil[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **277**: 123940.
- [37] 刘畅. 天然气埋地管道在非均质土壤中的泄漏扩散模拟研究[D]. 荆州: 长江大学, 2021.
- Liu C. Simulation study on leakage and diffusion of natural gas buried pipeline in heterogeneous soil[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2021.
- [38] Bu F X, Lu Q X, Liu R Q, et al. Numerical simulation study on leakage and diffusion of medium and low pressure buried gas pipelines considering soil cavitation effect[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2026, **6**(2): 100364.
- [39] Bagheri M, Sari A. Study of natural gas emission from a hole on underground pipelines using optimal design-based CFD simulations: Developing comprehensive soil classified leakage models[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, **102**: 104583.
- [40] Xia Z H, Xu Z D, Lu H F, et al. Leakage analysis and prediction model of underground high-pressure natural gas pipeline considering box culvert protection[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, **180**: 837–855.
- [41] Lu H C, Guo B L, Chen X H, et al. Numerical investigation on leakage and diffusion characteristics of buried hydrogen-blended natural gas pipelines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, **59**: 1491–1506.
- [42] Zhang Y K, Yang Y L, Wu F R, et al. Numerical investigation on pinhole leakage and diffusion characteristics of medium-pressure buried hydrogen pipeline[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, **51**: 807–817.
- [43] Wang Y J, Sun B C, Zhang L B, et al. Study on the hydrogen leakage and diffusion behavior of long-distance high-pressure buried pure-hydrogen pipelines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, **141**: 212–228.
- [44] 官学源. 埋地天然气管道持续泄漏数值模拟[J]. 当代化工, 2015, **44**(8): 1974–1976.
- Guan X Y. Numerical simulation on continuous leakage of buried natural gas pipelines[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, **44**(8): 1974–1976.
- [45] 叶岩, 王岳. 大气土壤耦合的埋地燃气管道泄漏扩散数值分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, **14**(4): 107–113.
- Ye Y, Wang Y. Numerical analysis on leakage and diffusion of

- buried gas pipeline based on atmosphere-soil coupling[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, **14**(4): 107–113.
- [46] 叶岩, 王岳. 土壤大气耦合埋地管道泄漏扩散的数值分析[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2019, **39**(2): 63–69.
- Ye Y, Wang Y. Numerical simulation of leakage and diffusion of buried pipelines based on soil atmosphere coupling[J]. *Journal of Liaoning Shihua University*, 2019, **39**(2): 63–69.
- [47] Ebrahimi-Moghadam A, Farzaneh-Gord M, Deymi-Dashtebayaz M. Correlations for estimating natural gas leakage from above-ground and buried urban distribution pipelines[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, **34**: 185–196.
- [48] Liu C, Yang M H, Hou Y T, et al. Spatiotemporal evolution of island ecological quality under different urban densities: a comparative analysis of Xiamen and Kinmen Islands, southeast China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **124**: 107438.
- [49] 马梅, 蒋仲安. 隧道内埋地燃气管道泄漏扩散规律研究[J]. *石油与天然气化工*, 2022, **51**(1): 132–137.
- Ma M, Jiang Z A. Study on leakage and diffusion law of buried gas pipeline in tunnel[J]. *Chem. Eng. Gas*, 2022, **51**: 132–137.
- [50] Zandi E, Alemrajabi A A, Emami M D, et al. Numerical study of gas leakage from a pipeline and its concentration evaluation based on modern and practical leak detection methods[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, **80**: 104890.
- [51] Zhang W K, Zhao G H. Leakage and diffusion characteristics of underground hydrogen pipeline[J]. *Petroleum*, 2024, **10**(2): 319–325.
- [52] 潘军. 掺氢天然气埋地管道泄漏扩散行为研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2022.
- Pan J. Study on leakage and diffusion behavior of hydrogen-doped natural gas buried pipeline[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2022.
- [53] Okamoto H, Gomi Y. Empirical research study on diffusion behavior of gas leaks in the ground: Verification by full-scale experiment[J]. *Safety Engineering*, 2009, **48**(5): 306–312.
- [54] Okamoto H, Gomi Y. Empirical research study on diffusion behavior of gas leaks in the ground: The numerical simulation model's applicability verification[J]. *Safety Engineering*, 2010, **49**(1): 38–46.
- [55] Okamoto H, Gomi Y. Empirical research on diffusion behavior of leaked gas in the ground[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, **24**(5): 531–540.
- [56] Okamoto H, Gomi Y, Akagi H. Movement characteristics of hydrogen gas within the ground and its detection at ground surface[J]. *Journal of Civil Engineering and Science*, 2014, **3**(1): 49–66.
- [57] Houssin-Aghomson D, Blanchetière G, McCollum D, et al. Consequences of a 12-mm diameter high pressure gas release on a buried pipeline. Experimental setup and results[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, **54**: 183–189.
- [58] Bonnaud C, Cluzel V, Corcoles P, et al. Experimental study and modelling of the consequences of small leaks on buried transmission gas pipeline[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, **55**: 303–312.
- [59] Zhu J L, Pan J, Zhang Y X, et al. Leakage and diffusion behavior of a buried pipeline of hydrogen-blended natural gas[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, **48**(30): 11592–11610.
- [60] Zhu J L, Wang S L, Pan J, et al. Experimental study on leakage temperature field of hydrogen blending into natural gas buried pipeline[J]. *Applied Energy*, 2024, **359**: 122656.
- [61] 晏玉婷. 管道泄漏后天然气在土壤中扩散过程的研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- Yan Y T. Natural gas transport in soil for gas pipeline leakage[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [62] Wang X M, Hou T L, Gao W X, et al. Experimental study on the diffusion process of natural gas from buried pipelines to underground confined spaces[J]. *Natural Gas Industry B*, 2024, **11**(5): 603–615.
- [63] Liu C W, Liao Y H, Liang J, et al. Quantifying methane release and dispersion estimations for buried natural gas pipeline leakages[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, **146**: 552–563.