

中文引用格式:彭善碧,罗雪. 埋地掺氢天然气管道泄漏扩散数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报,2024,34(3):63-69.

英文引用格式:PENG Shanbi, LUO Xue. Numerical simulation of leakage and diffusion in buried hydrogen-blended natural gas pipeline[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 63-69.

埋地掺氢天然气管道泄漏扩散数值模拟研究*

彭善碧^{1,2}教授,罗雪¹

(1 西南石油大学 土木工程与测绘学院,四川 成都 610500;

2 四川省燃气安全与高效利用工程技术研究中心,四川 成都 610500)

中图分类号:X937

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.03.1904

【摘要】为减少掺氢天然气在输送过程中因泄漏引发的安全问题,基于流体力学及多孔介质理论,采用Fluent软件建立城市埋地掺氢天然气管道泄漏扩散的三维数值模型,分析掺氢比例、泄漏孔径、管道压力、管道埋深和土壤类型等因素对掺氢天然气泄漏量及甲烷、氢气爆炸下限垂直方向上扩散距离的影响。结果表明:掺氢比例越大,掺氢天然气泄漏量越小,甲烷爆炸下限等值线扩散至地表所需时间越长,而氢气则相反;泄漏孔径10 mm时的泄漏量约为孔径5 mm时泄漏量的2倍,泄漏孔径20 mm时的泄漏量约为10 mm时泄漏量的2倍,且泄漏孔径越大,甲烷和氢气的爆炸下限等值线到达地表所需时间越短;管道压力越大,掺氢天然气泄漏量越大且扩散速度越快,危险系数越高;管道埋深1.1 m泄漏量最大,其次为1.4、0.8 m,埋深越浅,甲烷和氢气的爆炸下限等值线到达地表所需时间越短;土壤类型对掺氢天然气的泄漏扩散有重要的影响,土壤类型为粉质砂土时,掺氢天然气泄漏量及扩散速度最大,其次为壤土,最后为黏土。

【关键词】掺氢天然气; 管道; 泄漏扩散; 数值模拟; 泄漏量; 扩散距离

Numerical simulation of leakage and diffusion in buried hydrogen-blended natural gas pipeline

PENG Shanbi^{1,2}, LUO Xue¹

(1 School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China; 2 Sichuan Engineering Research Center for Gas Safety and High-Efficiency

Utilization, Chengdu Sichuan 610500, China)

Abstract: In order to reduce the safety problems caused by leakage of hydrogen-blended natural gas during the distribution, based on fluid mechanics and porous media theory, a three-dimensional numerical model of leakage and diffusion of urban buried hydrogen-blended natural gas pipeline was established by Fluent software. The effects of hydrogen blending ratio, leakage aperture, pipeline pressure, pipeline buried depth and soil type on the leakage of hydrogen-blended natural gas and the vertical diffusion distance of the lower explosion limit of methane and hydrogen were analyzed. The results show that the larger the proportion of hydrogen blending, the smaller the leakage of hydrogen-blended natural gas, and the longer the time it takes for the methane explosion lower limit contour to diffuse to the surface, while the opposite is true for hydrogen. Secondly, the leakage amount is about twice as much as 5 mm when the

leakage aperture is 10 mm. The leakage amount is about twice as much as 10 mm when the leakage aperture is 20 mm. The larger the leakage aperture, the shorter the time required for the lower explosion limit of methane and hydrogen to reach the surface. Thirdly, the greater the pipeline pressure, the greater the leakage of hydrogen-blended natural gas and the faster the diffusion speed, and the higher the risk coefficient. Besides, when the buried depth of the pipeline is 1.1 m, the leakage is largest, followed by 1.4 m and 0.8 m. The shallower the buried depth, the shorter the time required for the lower explosion limit of methane and hydrogen to reach the surface. Finally, the soil type has an important influence on the leakage and diffusion of hydrogen-blended natural gas. When the soil type is silty sand, the leakage and diffusion rate of hydrogen-blended natural gas are the largest, followed by loam and finally clay.

Keywords: hydrogen-blended natural gas; pipeline; leakage and diffusion; numerical simulation; leakage amount; diffusion distance

0 引言

氢能具有来源广、燃烧热值高、能量密度大、零污染、零碳排等优点,有助于解决能源危机、全球变暖 and 环境污染等问题,被誉为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源^[1]。在碳达峰、碳中和背景下,实现氢的高效输送和利用是能源发展的战略需求^[2]。目前,已开展的掺氢天然气输送示范项目大多采用现有的天然气管道输送^[3],但在管道输送过程中,受管道腐蚀、材料老化、第三方破坏等因素影响,难免发生泄漏^[4]。而管道泄漏造成的危害极大^[5],可能带来火灾和爆炸等环境危害以及巨大的经济损失。将氢气与天然气掺混,利用在役的天然气管道等基础设施输送,不仅可以省下巨额的管道建设费用,还可实现大规模、长距离输送氢气^[6]。因此,研究埋地掺氢天然气管道的泄漏扩散特性,有利于为埋地掺氢天然气管道的安全运营和维护提供支撑。

针对掺氢天然气管道泄漏扩散特性,国内外的研究学者采用试验及数值模拟的方法开展了大量研究。WILKENING 等^[7]使用计算流体动力学软件,比较了甲烷和氢气管道在有风和无风条件下泄漏扩散的浓度质量分数分布情况。LOWESMITH 等^[8]通过大规模试验,研究了掺氢天然气在居住房屋内的泄漏积聚行为,发现掺氢比例会影响气体的积聚质量分数。MARANGON 等^[9]基于试验研究,发现掺氢天然气泄漏时存在分散和分层现象。SUBANI 等^[10]通过分析瞬态压力波,得出氢气质量比对掺氢天然气瞬态流动和泄漏流量的影响。贾文龙等^[11]研究了掺氢天然气输送管道阀室在不同风速、氢气体积浓度、泄漏口径及泄漏方向下的泄漏扩散特性,并提出了可燃气体检测器的安装建议。SU Yue 等^[12]采用 Fluent 软件,研究了家用厨房内掺氢天然

气的泄漏和扩散特性,得出泄漏气体的爆炸危险区域、报警响应时间和质量分数分布特点,还分析了掺氢比、泄漏速率、通风条件和尺寸对泄漏和扩散过程的影响。孙齐等^[13]研究了在不同风速以及不同掺氢体积分数下,半敞开式厂房内掺氢天然气的扩散特性,并提出在半封闭场所内传感器的布置方案。

现有研究主要关注有限空间内的掺氢天然气泄漏扩散,而并未考虑埋地掺氢天然气管道的泄漏扩散。鉴于此,笔者拟基于 Fluent 软件建立城市埋地掺氢天然气管道泄漏扩散的三维模型,分析掺氢比例、泄漏孔径、管道压力、管道埋深和土壤类型等参数对掺氢天然气泄漏量和扩散距离的影响特性,以期为埋地掺氢天然气管道的敷设、日常维护等工作提供理论依据。

1 埋地掺氢天然气管道泄漏扩散模型

1.1 模型假设

埋地掺氢天然气管道的泄漏扩散过程十分复杂,为便于模型建立及问题研究,作出如下假设:土壤为各向同性的多孔介质,孔隙中全部充满空气,无水分;掺氢天然气为理想气体,将掺氢天然气简化为氢气、甲烷 2 组分混合物;泄漏气体与土壤只进行无化学反应的组分输运,不进行热量交换;泄漏为稳定连续泄漏,泄漏孔的压力等于掺氢天然气管道的压力。

1.2 物理模型

城市埋地掺氢天然气管道泄漏扩散的物理模型如图 1 所示。模型尺寸为 4 m×4 m×3 m,管道长度 4 m,管道直径 100 mm,泄漏孔位于管道的中间位置,且泄漏方向竖直向上。管道埋深、泄漏孔径及土壤类型视工况而定,工况见表 1,其中,土壤的相关

参数^[14]见表2。

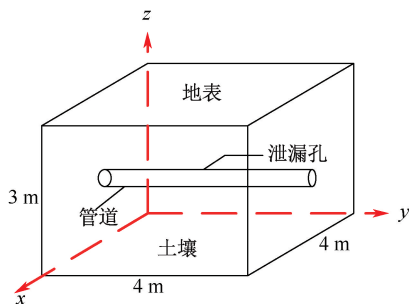


图1 埋地掺氢天然气管道泄漏扩散物理模型

Fig. 1 Physical model of leakage and diffusion of buried hydrogen-blended natural gas pipeline

表1 埋地掺氢天然气管道泄漏扩散模拟工况

Tab. 1 Leakage and diffusion simulation of buried hydrogen-blended natural gas pipeline

案例	掺氢比例/%	泄漏孔径/mm	管道压力/MPa	管道埋深/m	土壤类型
1	0	10	0.4	1.4	壤土
2	10	10	0.4	1.4	壤土
3	20	10	0.4	1.4	壤土
4	10	5	0.4	1.4	壤土
5	10	20	0.4	1.4	壤土
6	10	10	0.2	1.4	壤土
7	10	10	0.3	1.4	壤土
8	10	10	0.4	0.8	壤土
9	10	10	0.4	1.1	壤土
10	10	10	0.4	1.4	粉质砂土
11	10	10	0.4	1.4	黏土

表2 土壤参数和阻力系数

Tab. 2 Soil parameters and resistance coefficients

土壤类别	平均颗粒直径/mm	孔隙率	黏性阻力系数/ m^{-2}	惯性阻力系数/ m^{-1}
粉质砂土	0.50	0.25	2.16×10^{10}	3.36×10^5
黏土	0.01	0.30	2.72×10^{13}	9.07×10^6
壤土	0.05	0.43	2.45×10^{11}	5.02×10^5

1.3 数学模型

埋地掺氢天然气管道的泄漏与扩散遵循连续性方程^[16-17]、动量方程^[18]、能量方程^[18]以及组分输运方程^[19];针对掺氢天然气泄漏扩散的流动特性,采用标准湍流模型^[20]求解湍流方程。此外,由于埋地管道受土壤多孔介质的覆盖作用,需要考虑土壤阻力和孔隙率,因此,数学模型还包括多孔介质模型^[17, 21]。

1.4 初始条件与边界条件

1) 初始条件。在掺氢天然气泄漏前,土壤区域

的流体全部为空气,因此,掺氢天然气的体积分数初始化为0。

2) 边界条件。掺氢天然气管道泄漏孔边界条件为 pressure-inlet,管道壁面边界条件为 wall,除地表边界外的其他土壤边界条件设置为 symmetry,地表边界条件为 pressure-outlet。

1.5 求解方法

利用 Fluent 软件进行求解设置时,采用有限体积法求解控制方程,并选择基于压力求解器的 SIMPLE 算法和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。动量、组分和能量采用二阶迎风格式,湍动能和湍动能耗散率采用一阶迎风格式;并对掺氢天然气非稳态泄漏扩散进行数值模拟计算。

1.6 网格划分及无关性验证

采用非结构性网格划分模型,并对泄漏孔进行网格的局部加密。为选取合适的计算网格数量,且考虑到仿真精度要求等因素,进行网格的无关性验证。在计算域中随机选取一点(2,3,1.8)作为监测点,计算此点在不同网格数量下的甲烷质量分数随时间变化的曲线如图2所示。由图2可知:3种网格数量下甲烷的质量分数随时间的变化趋势一致,当网格数量为837 102和1 231 226时,甲烷质量分数随时间的变化曲线基本重合,平均相对误差为1.5%,即网格数量为837 102时可以保证数值模拟计算结果的精确性。

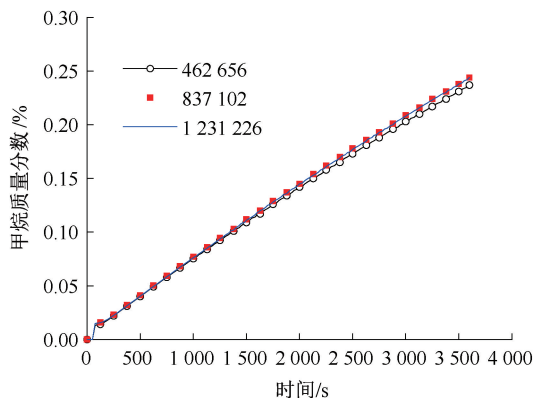


图2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification

2 泄漏扩散数值模拟结果及分析

甲烷爆炸极限为5.0%~15.0%,氢气爆炸极限为4.0%~75.6%,分别以甲烷、氢气爆炸下限垂直方向上扩散的距离和泄漏量为气体危险范围的评价尺度。

2.1 掺氢比例

图3为掺氢比例对掺氢天然气泄漏量的影响,图4为掺氢天然气在不同掺氢比例下爆炸下限竖直方向扩散距离随时间的变化情况。从图3和图4可以看出,掺氢比例增加会降低泄漏口的质量流量,说明掺氢比例增加,泄漏危险性减小。在相同的泄漏时间内,氢气沿竖直方向扩散的距离随掺氢比例的增加而增加,而甲烷则相反。在泄漏扩散初期,氢气扩散速度缓慢,但随着时间增加,扩散速度加快,说明随着时间的增加,氢气扩散范围越大,危险半径就越大。当掺氢比例为0、10%和20%时,甲烷爆炸下限等值线扩散至地表所需时间比氢气爆炸下限等值线扩散至地表所需时间短,且两者的时间差随着掺氢比例的增加而缩短,说明随着掺氢比例的增加,引发爆炸事故的可能性更大且更危险。

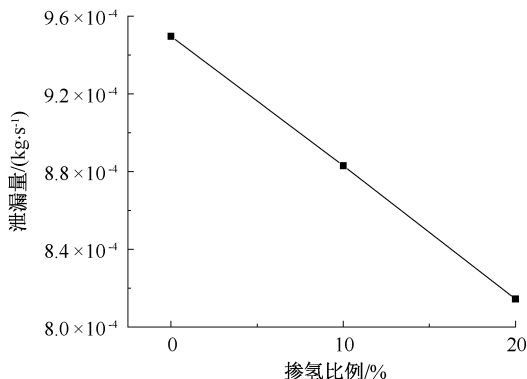
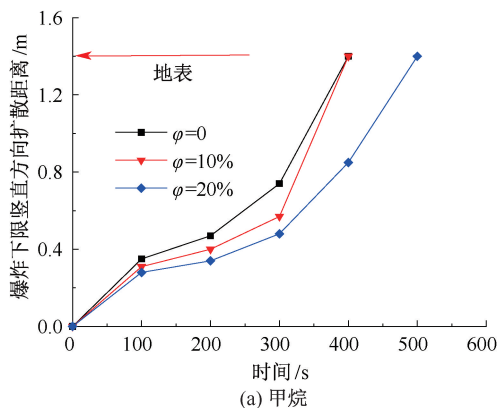


图3 掺氢比例对泄漏量的影响(泄漏时间3 600 s)

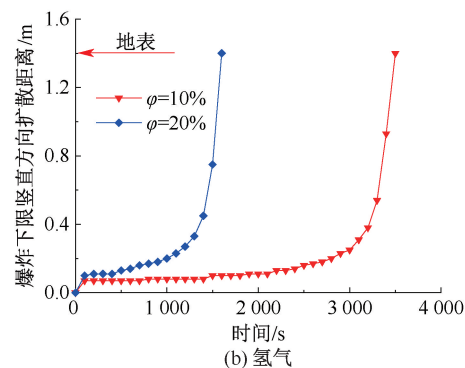
Fig.3 Effect of hydrogen blending ratio on leakage rate (leakage time 3 600 s)

2.2 泄漏孔径

图5为泄漏孔径对掺氢天然气泄漏量的影响,图6为掺氢天然气在不同泄漏孔径下爆炸下限竖直方向扩散距离随时间的变化情况。由图5和图6可知:泄漏孔径10 mm时的泄漏量约为泄漏孔5 mm时泄漏量的2倍,泄漏孔径20 mm时的泄漏量约为泄漏孔10 mm时泄漏量的2倍,说明泄漏孔径对掺氢天然气泄漏量有较大影响,泄漏孔径越大,泄漏量越大。在相同的泄漏时间内,掺氢天然气在竖直方向上扩散的距离随泄漏孔径的增加而增大。当泄漏孔径为5 mm时,氢气扩散速度基本不变,而甲烷扩散速度逐渐增加,另外,甲烷和氢气的爆炸下限等值线扩散至地表所需时间随泄漏孔径的增大而减少,危险系数增加,说明泄漏孔径对埋地掺氢天然气管道泄漏的影响极大,因此,应该重点防范掺氢天然气



(a) 甲烷



(b) 氢气

图4 不同掺氢比例下爆炸下限竖直方向扩散距离

Fig.4 Vertical diffusion distance of lower explosion limit under different hydrogen blending ratios

管道可能产生的面积较大的泄漏孔。

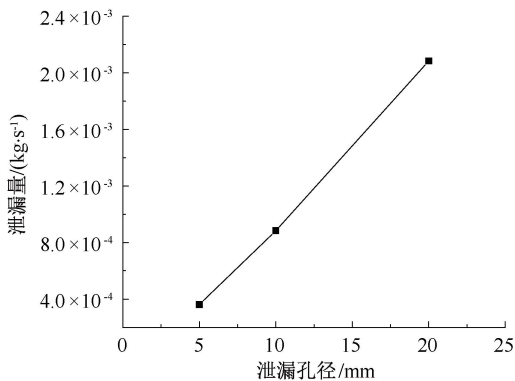


图5 泄漏孔径对泄漏量的影响(泄漏时间3 600 s)

Fig.5 Effect of leakage hole diameter on leakage rate (leakage time 3 600 s)

2.3 管道压力

管道压力对掺氢天然气泄漏扩散的影响十分重要,管道中气体压力随地理位置、输送距离等变化。图7为管道压力对掺氢天然气泄漏量的影响,图8为掺氢天然气在不同管道压力下爆炸下限竖直方向扩散距离随时间的变化情况。由图7和图8可知:

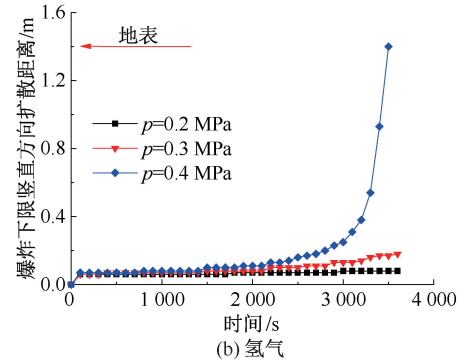
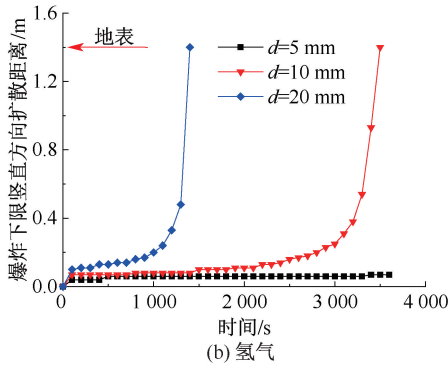
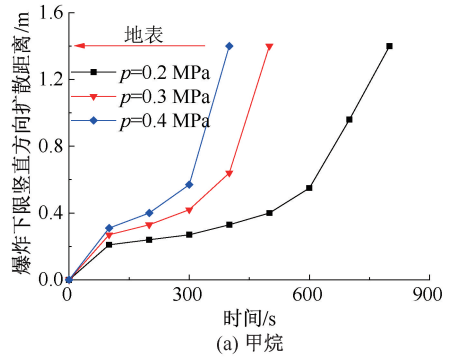
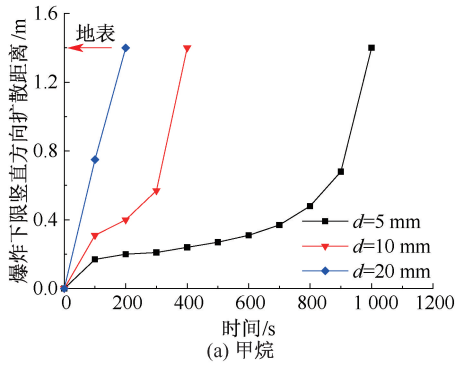


图6 不同泄漏孔径下爆炸下限竖直方向扩散距离

Fig. 6 Vertical diffusion distance of lower explosion limit under different leakage hole diameters

图8 不同管道压力下爆炸下限竖直方向扩散距离

Fig. 8 Vertical diffusion distance of lower explosion limit under different pipeline pressures

掺氢天然气的泄漏量和在竖直方向上扩散的距离随管道压力的增加而增大。在前1200 s内,3种管道压力下氢气的扩散速度基本一致,随着时间增加,管道压力越大,氢气扩散速度也越快,而甲烷泄漏的初始速度随管道压力的增加而增大,因此,甲烷和氢气的爆炸下限等值线扩散至地表所需时间随管道压力的增加而减少。

响,地面负荷和管道稳定性要求等因素会影响管道埋深。从图9可知:管道埋深为0.8 m时,泄漏量最小,而管道埋深为1.1 m时,泄漏量最大,说明管道埋深为1.1 m时的危险系数比埋深为0.8和1.4 m更大。由图10可知:在相同的管道埋深时,甲烷扩散速度大于氢气,甲烷的爆炸下限等值线到达地表所需时间更短。甲烷和氢气的爆炸下限等值线到达地表所需时间随管道埋深的增加而增加,因此,适当增加管道的埋地深度有助于缓解掺氢天然气泄漏扩散的危险性。

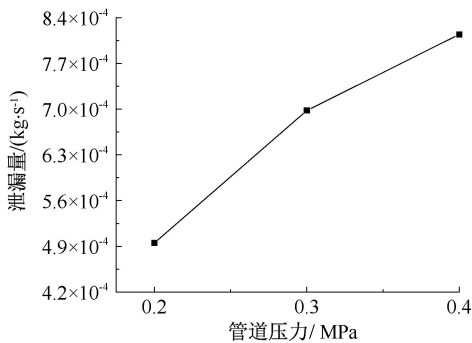


图7 管道压力对泄漏量的影响(泄漏时间3600 s)
Fig. 7 Effect of pipeline pressure on leakage rate (leakage time 3600 s)

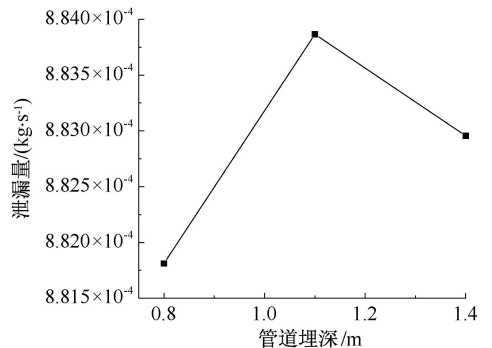


图9 管道埋深对泄漏量的影响(泄漏时间3600 s)
Fig. 9 Effect of pipeline buried depth on leakage rate (leakage time 3600 s)

2.4 管道埋深

管道埋深对掺氢天然气的泄漏扩散有一定影

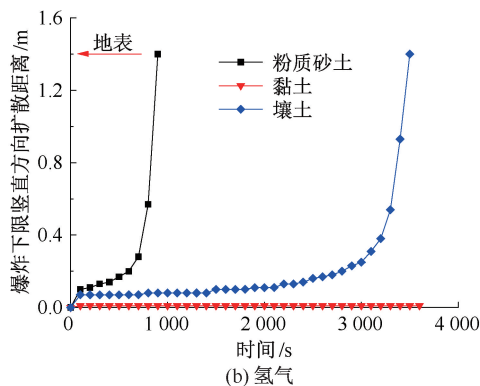
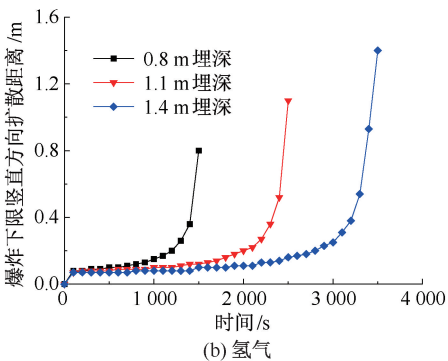
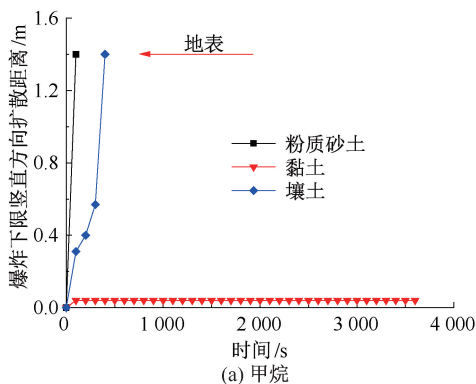
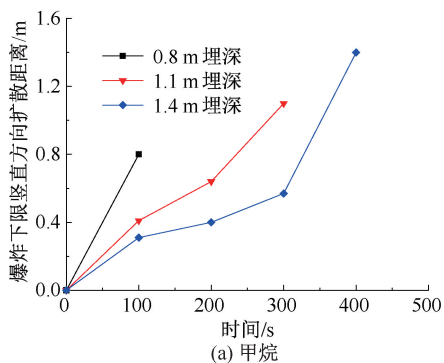


图 10 不同管道埋深下爆炸下限竖直方向扩散距离

Fig. 10 Vertical diffusion distance of lower explosion limit under different buried depths of pipeline

图 11 不同土壤类型下爆炸下限竖直方向扩散距离

Fig. 11 Vertical diffusion distance of lower explosion limit under different soil types

2.5 土壤类型

当土壤类型为粉质砂土、黏土、壤土, 泄漏 1 h 时泄漏孔的泄漏量分别为 2.066×10^{-3} 、 1.162×10^{-5} 、 8.830×10^{-4} kg/s, 说明土壤类型对掺氢天然气的泄漏量有较大影响。由多孔介质模型中黏性阻力系数和惯性阻力系数的计算公式^[17]可知: 土壤平均颗粒直径和孔隙率决定了气体扩散的黏性阻力和惯性阻力, 当土壤为黏土时, 掺氢天然气在黏土中扩散时受到的阻力较大, 因此, 掺氢天然气在泄漏孔附近高度聚集, 高浓度的掺氢天然气对泄漏孔产生较大的反作用力从而抑制泄漏孔的泄漏量。反之, 粉质砂土对掺氢天然气的阻力小, 因此掺氢天然气在粉质砂土中的泄漏量更大, 且在同一泄漏时间内, 其危险范围更大。图 11 为掺氢天然气在不同土壤类型下爆炸下限竖直方向扩散距离随时间的变化情况。由图 11 可知: 在泄漏时间相同的情况下, 掺氢天然气在粉质砂土中竖直方向上扩散的距离最大, 这是因为粉质砂土对掺氢天然气的阻力最小。甲烷和氢气的爆炸下限等值线扩散至地表的时间在粉质砂土中最短, 其次为壤土, 最后为黏土, 说明掺氢天然气在粉

质砂土中泄漏扩散的危险范围最大。因此, 在管道的敷设掩埋阶段, 建议在管道周围敷设黏土, 以此减缓掺氢天然气泄漏的扩散速度, 减少危险区域。

3 结 论

1) 掺氢天然气的泄漏量随泄漏孔径、管道压力增加而增加, 随掺氢比例增加而减少。管道埋深和土壤类型对泄漏量有较大影响, 土壤类型为粉质砂土时泄漏量最大, 壤土次之, 再次为黏土。

2) 甲烷和氢气的爆炸下限等值线到达地表所需时间随泄漏孔径、管道压力的增加而减小, 随管道埋深的增加而增加。甲烷爆炸下限等值线扩散至地表所需时间随掺氢比例的增加而增加, 而氢气则相反。甲烷和氢气的爆炸下限等值线扩散至地表的时间在粉质砂土中最短, 其次为壤土, 最后为黏土。

3) 望该成果可为埋地掺氢天然气管道的敷设、日常维护等工作提供理论依据。下一步可开展埋地掺氢天然气管道的泄漏扩散试验来验证数值模拟结果的有效性。

参 考 文 献

- [1] 李承明. 氢能改变未来[J]. 西部大开发, 2019(7): 40-43.
- [2] 徐东, 刘岩, 李志勇, 等. 氢能开发利用经济性研究综述[J]. 油气与新能源, 2021, 33(2): 50-56.
XU Dong, LIU Yan, LI Zhiyong, et al. A cost-efficiency review of hydrogen energy exploitation[J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(2): 50-56.
- [3] 尚娟, 鲁仰辉, 郑津洋, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展和挑战[J]. 化工进展, 2021, 40(10): 5 499-5 505.
SHANG Juan, LU Yanghui, ZHENG Jinyang, et al. Research status-in-situ and key challenges in pipeline transportation of hydrogen-natural gas mixtures[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(10): 5 499-5 505.
- [4] 李敬法, 苏越, 张衡, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展[J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 137-152.
LI Jingfa, SU Yue, ZHANG Heng, et al. Research progresses on pipeline transportation of hydrogen-blended natural gas[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 137-152.
- [5] 任泽乾. 天然气管道泄漏危害研究[D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2019.
REN Zeqian. Research on leakage hazard of natural gas pipeline[D]. Fushun: Liaoning Petrochemical University, 2019.
- [6] 谢萍, 伍奕, 李长俊, 等. 混氢天然气管道输送技术研究进展[J]. 油气储运, 2021, 40(4): 361-370.
XIE Ping, WU Yi, LI Changjun, et al. Research progress on pipeline transportation technology of hydrogen-mixed natural gas[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(4): 361-370.
- [7] WILKENING H, BARALDI D. CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(13): 2 206-2 215.
- [8] LOWESMITH B J, HANKINSON G, SPATARU C, et al. Gas build-up in a domestic property following releases of methane/hydrogen mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(14): 5 932-5 939.
- [9] MARANGON A, CARCASSI M. Hydrogen-methane mixtures: dispersion and stratification studies[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(11): 6 160-6 168.
- [10] SUBANI N, AMIN N, AGAIE B G. Hydrogen-natural gas mixture leak detection using reduced order modelling[J]. Applied and Computational Mathematics, 2015, 4(3): 135-144.
- [11] 贾文龙, 温川贤, 杨明, 等. 掺氢天然气输送管道阀室泄漏扩散规律研究[J]. 油气与新能源, 2021, 33(5): 75-82.
JIA Wenlong, WEN Chuanxian, YANG Ming, et al. Study on leakage and diffusion of hydrogen mixed natural gas in the valve chamber[J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(5): 75-82.
- [12] SU Yue, LI Jingfa, YU Bo, et al. Numerical investigation on the leakage and diffusion characteristics of hydrogen-blended natural gas in a domestic kitchen[J]. Renewable Energy, 2022, 189: 899-916.
- [13] 孙齐, 李凤, 王一玮, 等. 掺氢天然气管道泄漏扩散规律及监测探头布设方案[J]. 油气储运, 2022, 41(8): 916-923.
SUN Qi, LI Feng, WANG Yiwei, et al. Leakage and diffusion of hydrogen-mixed natural gas pipeline and layout plan of detectors[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(8): 916-923.
- [14] 常欢, 谭羽非, 王雪梅, 等. 城市直埋燃气管道泄漏沿土壤扩散模拟研究[J]. 煤气与热力, 2020, 40(11): 28-34.
CHANG Huan, TAN Yufei, WANG Xuemei, et al. Simulation study on leakage diffusion of urban directly buried gas pipeline along soil[J]. Gas & Heat, 2020, 40(11): 28-34.
- [15] 何乐平, 唐爽, 胡启军, 等. 综合管廊天然气泄漏扩散及监控方法优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(9): 43-50.
HE Leping, TANG Shuang, HU Qijun, et al. Study on natural gas leakage and diffusion in utility tunnels and optimization of monitoring methods[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(9): 43-50.
- [16] 李明高, 李明. ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 8-12.
- [17] 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.
WANG Xiangyang, DU Meiping, WANG Tong, et al. Numerical simulation of leakage of gas from buried pipeline and its diffusion process[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2): 45-50.
- [18] 徐丹. 天然气管道泄漏的数值模拟研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
XU Dan. Numerical simulation of natural gas pipeline leakage[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [19] 周苗. 埋地燃气管道在土壤中的泄漏扩散模拟[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
ZHOU Miao. Diffusion simulation of buried gas pipeline in soil[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2018.
- [20] LI Minghao, CHEN Shuangqing, JIANG Weidong, et al. Numerical simulation analysis of the hydrogen-blended natural gas leakage and ventilation processes in a domestic house[J]. ACS Omega, 2023, 8(38): 34 610-34 628.
- [21] 蒋永清, 任喆, 孙超, 等. 埋地管道泄漏天然气在分层填筑土壤扩散数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(6): 105-109.
JIANG Yongqing, REN Zhe, SUN Chao, et al. Numerical simulation research on diffusion of natural gas leaking from buried pipeline in layered filling soil[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(6): 105-109.