

引文: 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.

HU Weipeng, CHEN Guang, QI Baojin, et al. Numerical simulation of leakage and diffusion of buried pure hydrogen/hydrogen-doped natural gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1118-1127, 1136.

埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏扩散数值模拟

胡玮鹏 陈光 齐宝金 张永海

西安交通大学化学与工程学院

摘要: 为研究纯氢/掺氢天然气在土壤环境中的扩散特性,通过 Fluent 软件建立了三维埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏模型,分析了泄漏口特征、管道埋深、土壤条件、管道压力、掺氢比等因素对埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏的影响。结果表明:在土壤环境中,氢气泄漏后扩散速度相对较慢,主要聚集在泄漏口附近;泄漏孔径越大、泄漏口长宽比越大,氢气泄漏危险性越大;泄漏口位置主要影响氢气泄漏后的分布,对于大管径输氢管道应经常对管道四周进行氢气浓度监测,以避免发生氢气泄漏事故;管道埋深越浅,氢气泄漏量越大,危险性越大;在孔隙率较大、土壤粒径较大的土壤中氢气泄漏扩散较快,需针对不同土壤条件设计不同的输氢监测方案;在掺氢输送过程中,随着掺氢比的增大,同一监测点处混合气体达到爆炸下限所需时间逐渐变短,氢气泄漏的危险性逐步提高。研究成果可为将来纯氢/掺氢管道的安全平稳运行提供理论参考。

(图 17,表 3,参 19)

关键词: 埋地管道; 掺氢天然气; 泄漏扩散; 模拟计算; 影响因素

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)10-1118-10

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.005

Numerical simulation of leakage and diffusion of buried pure hydrogen/hydrogen-doped natural gas pipeline

HU Weipeng, CHEN Guang, QI Baojin, ZHANG Yonghai

School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University

Abstract: In order to study the diffusion characteristics of pure hydrogen/hydrogen-doped natural gas in the soil environment, a three-dimensional leakage model of the buried pure hydrogen/hydrogen-doped natural gas pipeline was established by Fluent software. On this basis, the effects of the characteristics of the leakage port, buried depth of the pipeline, soil condition, pipeline pressure and hydrogen blending ratio on the leakage of buried pure hydrogen/hydrogen-doped natural gas pipeline were analyzed. The results show that: the leaked hydrogen diffuses at a relatively slow rate in the soil environment but gathers near the leakage port. The larger the leakage aperture, the larger the aspect ratio of the leakage port, and the greater the hydrogen leakage risk. Besides, the location of the leakage port will have a main effect on the distribution of leaked hydrogen. For the large hydrogen pipeline, the hydrogen concentration should be monitored around the pipelines to avoid hydrogen leakage accidents. The shallower the pipeline is buried, the more the leaked hydrogen and the greater the risk. As the hydrogen leaks and diffuses faster in soil with large porosity and large particle size, different hydrogen transportation monitoring schemes should be designed for different soil conditions. In the process of hydrogen-doped natural gas transportation, the time required for the mixed gas at the same monitoring point to reach the lower explosive limit becomes shorter with the increase of the hydrogen blending ratio, which increases the risk of hydrogen leakage gradually. Generally, the research results can provide theoretical reference for the safe and stable operation of pure hydrogen/hydrogen-doped pipelines in the future. (17 Figures, 3 Tables, 19 References)

Key words: buried pipeline, hydrogen-doped natural gas, leakage diffusion, simulation calculation, influencing factors

氢能是一种高效、清洁的可再生能源,发展氢能是中国完成“3060 双碳目标”行之有效的方法之一^[1]。世

界上越来越多的国家开始重视氢能的发展,美国、日本、欧盟等先后发布了氢能发展规划^[2-3],中国在 2023 年先

后颁布了多项政策支持氢能发展^[1]。管道运输是长距离氢气输送最经济高效的方法之一,将氢气掺入天然气中,利用现有天然气管道网络进行氢气输送可节省大量新建管道的费用,因此天然气管道纯氢/掺氢输送可能是未来氢气输送的主要手段。目前,国内外已有多条纯氢/掺氢输送的天然气管道建成运行^[4]。氢气密度比空气小,若纯氢/掺氢输送的天然气管道发生泄漏,氢气会迅速扩散。氢气的爆炸极限为4%~75.6%,而点燃氢气所需的最小点火能仅为0.02 mJ,因此,氢气泄漏极易造成安全事故,如2001年大丰化肥厂合碳车间、2011年四川宏泰生化有限公司及2020年美国北卡罗莱纳州一家氢燃料工厂都因氢气泄漏而发生了爆炸事故^[5]。因此,对纯氢/掺氢输送天然气管道泄漏问题的研究极其重要。

目前,国内外已有多名学者对纯氢/掺氢输送的天然气管道泄漏问题进行了研究。万小刚等^[6]将氢气中掺混甲烷,对混合气体的燃爆特性进行了研究,发现随着混合气体中甲烷添加量的增加,其可燃范围逐渐缩小,爆炸危险性逐渐降低。Shu等^[7]进行了一系列的氢气泄漏实验来模拟氢气泄漏事故,并提出了一种简化的氢气扩散预测模型,可以快速计算得到氢气泄漏后的浓度分布。李雪芳等^[8]建立了二维轴对称高压氢气小孔泄漏模型,得到了沿射流中心线方向氢气体积分数的变化情况,并与实验数据进行了比较。余亚波等^[9]通过三维高压舱氢气泄漏扩散模型模拟了燃料电池客车高压仓氢气泄漏后的扩散特性,并给出了氢气浓度传感器的布置方案。孙齐等^[10]通过Fluent软件模拟了架空掺氢天然气管道泄漏,发现风速越大,气体扩散高度越低,更易在水平方向聚集;掺氢比越大,气体扩散高度越低且扩散高度增速减缓,并设计了半封闭场景下掺氢天然气管道的可燃气体监测探头布设方案。贾文龙等^[11]基于Fuller模型与Fick定律建立了掺氢比在0~15%之间的掺氢天然气阀室泄漏扩散数值模型,研究了掺氢比、风速、泄漏孔径、泄漏口方向等因素对掺氢天然气在室内泄漏扩散特性的影响。Okamoto等^[12]建立了埋地天然气管道全尺寸气体泄漏实验平台,总结了天然气在土壤中的扩散特性。Zhu等^[13]建立了埋地掺氢天然气管道泄漏模拟实验平台,得到了不同掺氢比、泄漏压力及泄漏口位置下掺氢天然气在土壤中的扩散数据。Chamindu等^[14]基于大型多孔介质罐与敞口式

风洞搭建了一系列可控实验台,研究了不均匀土壤、土壤含水率、地表大气温度及地表风速等因素对埋地天然气管道泄漏扩散特性的影响。常欢等^[15]建立了城市埋地天然气管道泄漏三维数值计算模型,分析了不同土壤中天然气的扩散特性。Bu等^[16]采用数值模拟方法研究了埋地天然气管道的泄漏扩散特性,提出了通过第一危险时间、最大危险范围及地面危险范围等参数对气体泄漏扩散的有害边界进行评估的方法。Bagheri等^[17]基于CFD方法提出了一套含硫天然气在土壤中扩散的模型,研究了管道压力、漏孔直径、管道直径、土壤孔隙度、土体性质及管壁厚度对天然气泄漏特性的影响。

目前,国内外关于埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏特性的研究较少,氢气具有扩散速度快、爆炸范围宽、起爆能量低的特性,开展氢气泄漏实验成本高且危险性大。因此,采用Fluent软件建立了埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏仿真模型,分析了不同的泄漏口特征(泄漏孔径、泄漏口位置、泄漏口形状)、管道埋深、土壤条件(孔隙率、粒径)、管道压力、掺氢比等因素对埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏特性的影响,以期后续纯氢/掺氢管道的安全输送提供前期支持。

1 泄漏仿真模型

1.1 物理模型

在长、宽、高分别为4 m、4 m、2 m的计算区域内,模拟埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏后氢气的扩散规律。参考目前中国已有的埋地长距离输氢管道,设计该埋地纯氢/掺氢天然气管道外径为400 mm、壁厚为6 mm^[18]。根据该管道的物理模型(图1)进行建模,设置泄漏扩散的20种不同工况(表1、表2),研究不同的泄漏口特征、管道埋深、土壤条件、管道压力、掺氢比等因素对埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏特性的影响。

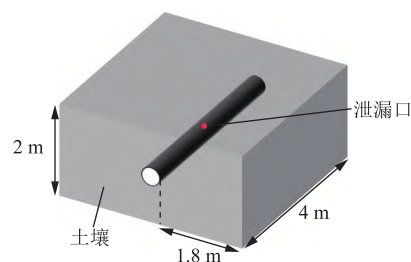


图1 埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏物理模型图
Fig. 1 Physical model of buried pure hydrogen/hydrogen-doped natural gas pipeline leakage

表 1 埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏扩散不同工况表
Table 1 Different leakage and diffusion conditions of buried pure hydrogen/hydrogen-doped natural gas pipelines

工况	孔径或边长(轴向×径向)/mm	泄漏口朝向	泄漏口形状	埋深/m	土壤	压力/MPa	掺氢比
1	10	向上	圆形	1.0	土壤 A	0.40	100%
2	5	向上	圆形	1.0	土壤 A	0.40	100%
3	20	向上	圆形	1.0	土壤 A	0.40	100%
4	10	向下	圆形	1.0	土壤 A	0.40	100%
5	10	向右	圆形	1.0	土壤 A	0.40	100%
6	17.72	向上	正方形	1.0	土壤 A	0.40	100%
7	5×62.8	向上	径向长方形细缝	1.0	土壤 A	0.40	100%
8	62.8×5	向上	轴向长方形细缝	1.0	土壤 A	0.40	100%
9	10	向上	圆形	1.5	土壤 A	0.40	100%
10	10	向上	圆形	0.8	土壤 A	0.40	100%
11	10	向上	圆形	1.0	土壤 B	0.40	100%
12	10	向上	圆形	1.0	土壤 C	0.40	100%
13	10	向上	圆形	1.0	土壤 D	0.40	100%
14	10	向上	圆形	1.0	土壤 E	0.40	100%
15	10	向上	圆形	1.0	土壤 A	0.35	100%
16	10	向上	圆形	1.0	土壤 A	0.30	100%
17	10	向上	圆形	1.0	土壤 A	0.40	50%
18	10	向上	圆形	1.0	土壤 A	0.40	20%
19	10	向上	圆形	1.0	土壤 A	0.40	10%
20	10	向上	圆形	1.0	土壤 A	0.40	0

表 2 埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏扩散不同土壤参数设置表
Table 2 Setting of different soil parameters for leakage and diffusion of buried pure hydrogen/hydrogen-doped natural gas pipelines

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
D	0.01	0.43	6.130×10 ¹²	2 509 213
E	0.10	0.43	6.130×10 ¹⁰	250 921

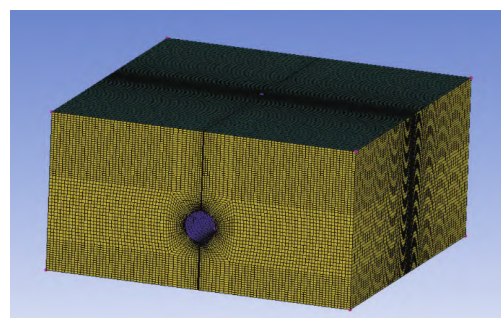
1.2 边界条件

该埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏仿真模型的管道外径为 400 mm,而泄漏口孔径分别为 5 mm、10 mm、20 mm,泄漏口孔径相对较小,属于小孔泄漏类型。因此,在泄漏过程中可认为泄漏压力等同于管道压力。对该模型进行边界条件设置:泄漏口设置为压力入口

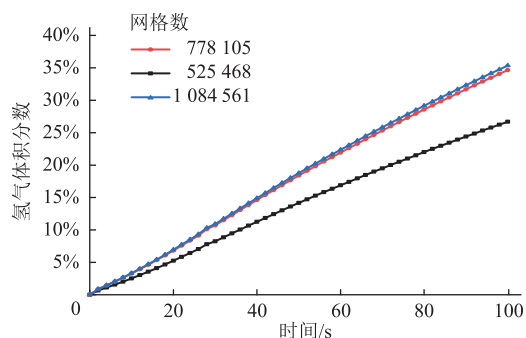
边界条件;模型边界设置为压力出口边界条件;管道壁面设置为壁面边界条件;土壤视为各向同性的多孔介质,设置为内部界面边界条件,在流体域设置中勾选多孔介质模型,对黏性阻力系数、惯性阻力系数及孔隙率 3 种参数进行设置。

1.3 网格划分

采用专业的 CAE 前处理软件 ICEM 进行网格划分。为提高计算速度,采用结构化网格,在泄漏口处和管道周围进行网格加密,网格划分从泄漏口朝外逐渐稀疏(图 2a)。为保证计算结果准确性,选择不同疏密程度的 3 种网格(网格数量分别为 525 468、778 105、1 084 561)进行计算。以工况 1 为例,对比 3 种网格下泄漏 100 s 时泄漏口正上方 0.5 m 处监测点(监测点 I)的氢气体积分数(图 2b)可知,网格数为 778 105 的网格与网格数为 1 084 561 的网格在监测点 I 处的氢气体积分数相差约 2%,此时可视为网格对计算结果几乎无影响。因此,为确保计算速度和计算精度,选用网格数为 778 105 的网格进行后续计算。



(a) 整体网格划分



(b) 网格无关性分析

图2 埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏仿真模型网格划分图
Fig.2 Grid division of leakage simulation model for buried pure hydrogen/hydrogen-doped natural gas pipelines

1.4 求解方法

使用 Fluent 软件进行求解, 启用能量方程, 选用 DES 湍流模型, 求解方程选择 Spalart-Allmaras 方程。考虑重力影响, 开启浮力计算模块。打开组分运输模型并选择入口扩散。设置埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏初始条件: 泄漏开始时, 土壤中仅存在空气, 压力等于大气压, 通过全局初始化的方式对初始时刻土壤环境进行设置; 设置土壤流体域内的空气体积分数为 100%, 氢气和甲烷体积分数为 0, 土壤流体域内的初始相对压力为 0 MPa, 土壤温度为 300 K。计算步长取 0.01 s, 每个步长迭代 200 次内可达到收敛条件, 计算管道泄漏后 900 s 内气体泄漏扩散情况。

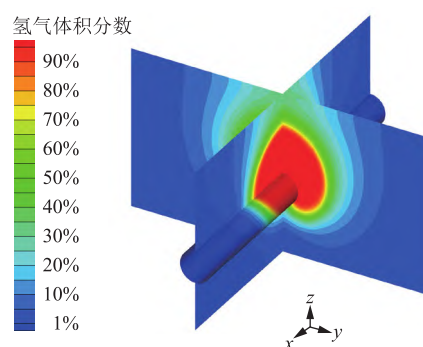
1.5 模型验证

Liu 等^[19]进行了埋地天然气管道泄漏实验, 实验时土壤平均粒径为 0.198 mm, 孔隙率为 0.6; 管道埋深为 60 cm; 管道压力为 0 MPa; 圆形泄漏口直径为 4 mm, 泄漏口朝向为竖直向上。采用与文献 [19] 中实验相同的参数通过上述埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏仿真模型进行模拟, 得到甲烷泄漏速率为 5.026 kg/h, 并与该实验所得的甲烷泄漏速率 4.519 kg/h 进行对比, 二者误差为 11.22%。考虑到实验过程中土壤条件并

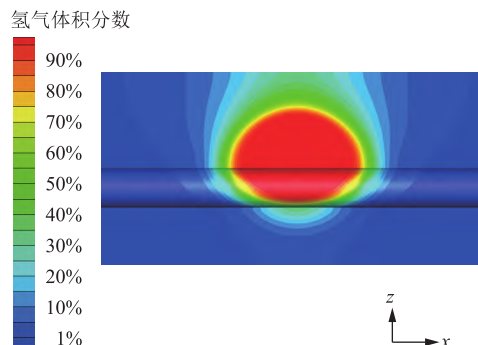
非各项同性、未考虑土壤含水率等多种因素的影响, 上述所建模型具有准确性。

2 影响因素分析

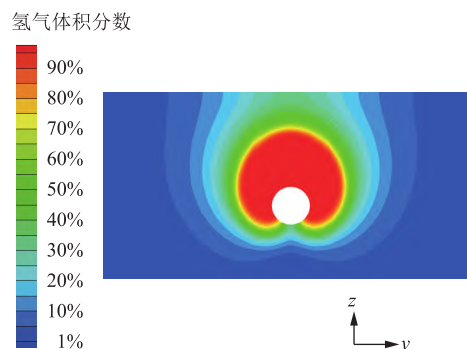
以工况 1 为例, 管道内流体为纯氢, 采用上述模型模拟得到埋地纯氢管道泄漏扩散 300 s 后氢气体积分数云图(图 3)。可见, 埋地氢气管道泄漏时, 由于土壤的阻力作用较大, 氢气在土壤环境中扩散速度相对较慢, 泄漏氢气主要聚集在泄漏口附近, 且泄漏口附近沿管长方向和管径方向氢气体积分数均呈对称分布。



(a) 整体云图



(b) 沿管长方向



(c) 沿管径方向

图3 埋地纯氢管道在工况 1 下泄漏扩散 300 s 后氢气体积分数云图

Fig.3 Hydrogen volume fraction after 300 s leakage and diffusion of buried pure hydrogen pipeline under operating condition 1

2.1 泄漏口特征

2.1.1 泄漏口孔径

选择工况 1~工况 3,在保持其他条件不变的情况下,改变泄漏口孔径分别为 10 mm、5 mm、20 mm,采用上述模型模拟得到 3 种不同泄漏口孔径下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线(图 4)及泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数、扩散速度分布曲线(图 5)。可见,在埋地纯氢管道发生泄漏事故时,泄漏口孔径越大,氢气在土壤中的扩散速度越快,同一位置氢气浓度到达爆炸下限时间越短,土壤中的危险范围越大,发生爆炸事故的风险越高,需要工程人员更快做出反应。

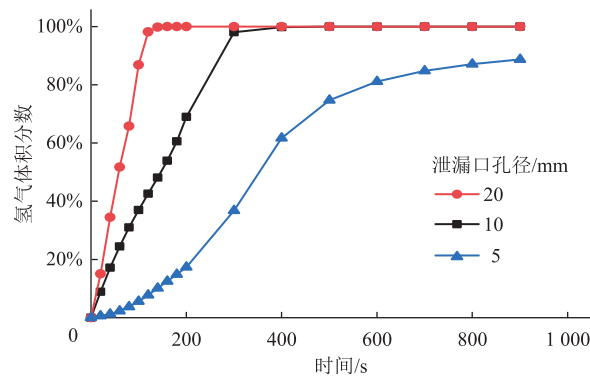
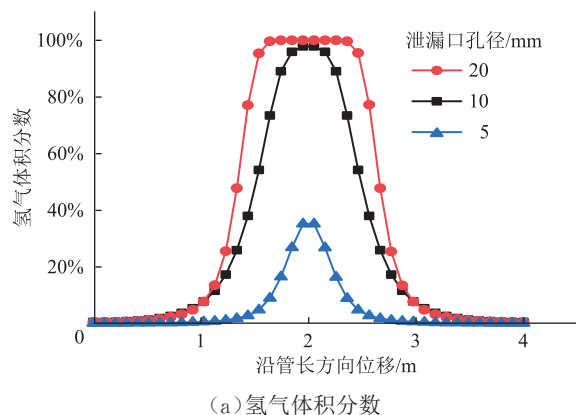


图 4 不同泄漏口孔径下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线

Fig. 4 Variation of hydrogen volume fraction at monitoring point I of buried pure hydrogen pipeline with different leakage apertures with time

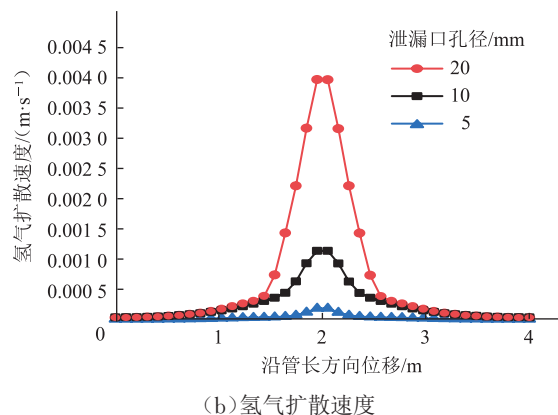


图 5 不同泄漏口孔径下埋地纯氢管道泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数、扩散速度分布曲线
Fig. 5 Distribution of hydrogen volume fraction and diffusion velocity along the pipe length direction at monitoring point I after 300 s leakage of buried pure hydrogen pipeline with different leak apertures

2.1.2 泄漏口朝向

选择工况 1、工况 4、工况 5,在保持其他条件不变的情况下,改变泄漏口朝向分别为向上、向下、向右,采用上述模型模拟得到 3 种不同泄漏口朝向下埋地纯氢管道泄漏 900 s 时氢气体积分数云图(图 6)。可见,泄漏口朝向主要影响氢气泄漏后分布位置,在埋地纯氢管道发生泄漏事故时,氢气在土壤环境中扩散速度较慢,

容易在土壤中聚集,氢气高浓度区域主要分布在泄漏口附近。因此,针对埋地纯氢管道,应注意对管道四周均进行氢气浓度监测,以防止未监测到高氢气浓度的管道一侧,从而导致工程人员未及时进行维护进而造成泄漏爆炸事故。尤其是长距离输氢管道,通常此类氢气管道管径较大,更需做好管道周围氢气浓度的监测。

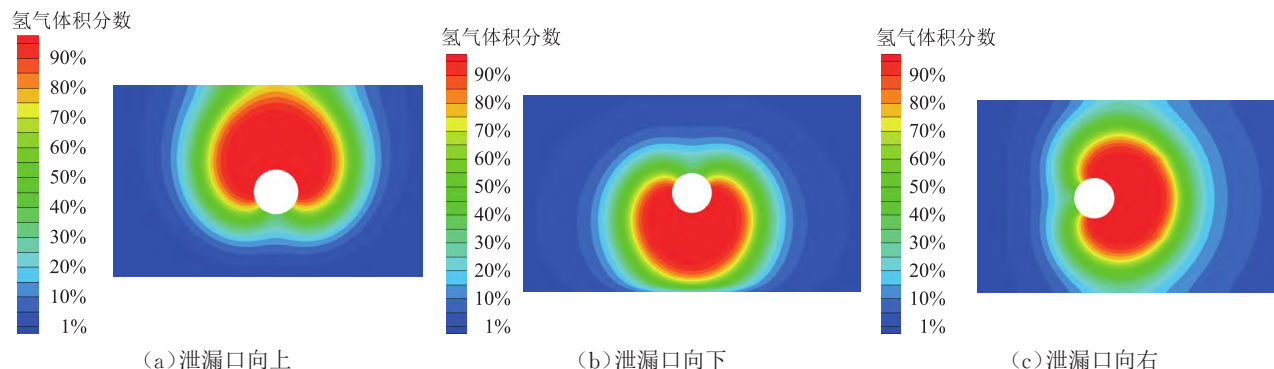


图 6 不同泄漏口朝向下埋地纯氢管道泄漏 900 s 时氢气体积分数云图

Fig. 6 Distribution of hydrogen volume fraction after 900 s leakage of buried pure hydrogen pipeline in different leakage port directions

2.1.3 泄漏口形状

选择工况 1、工况 6~工况 8,在保持其他条件不变及泄漏口面积相同的情况下,改变泄漏口形状分别为圆形、正方形、径向长方形细缝、轴向长方形细缝,采用上述模型模拟得到 4 种不同泄漏口形状下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线(图 7)及泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数、扩散速度分布曲线(图 8)。可见,泄漏 400 s 前同一监测点处氢气体积分数从大到小依次为轴向长方形细缝、径向长方形细缝、正方形、圆形。因此,长方形细缝泄漏口的气体扩散范围更广、扩散速度更快,泄漏后的危险系数更高。泄漏口形状会影响气体在土壤中的扩散特性,埋地管道泄漏后气体泄漏速度相对较慢,气体聚集在泄漏口附近会对后续气体扩散产生反作用,泄漏口长宽比越大,泄漏后泄漏口附近气体分布范围相对越广,聚集气体产生的反作用相对较小,后续气体扩散速度就

更快、范围更广。对比轴向长方形细缝与径向长方形细缝,由于管道弧度的影响,径向细缝与土壤的接触面略小于轴向细缝,聚集气体产生的反作用略大,因此,径向细缝泄漏时气体扩散范围略小于轴向细缝泄漏范围。

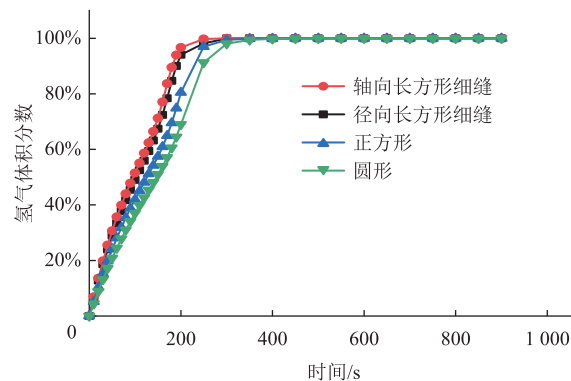


图 7 不同泄漏口形状下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线

Fig. 7 Variation of hydrogen volume fraction at monitoring point I of buried pure hydrogen pipeline with different shapes of leakage port with time

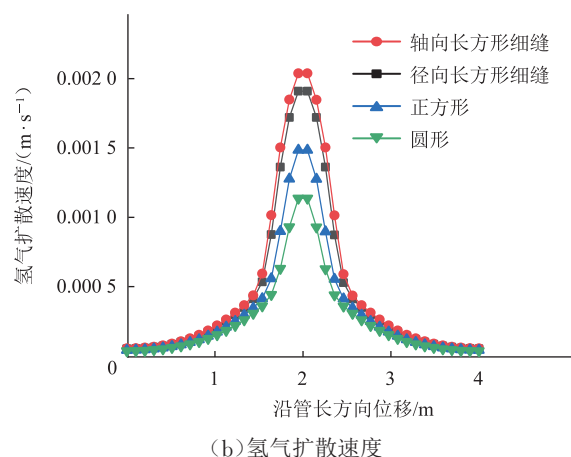
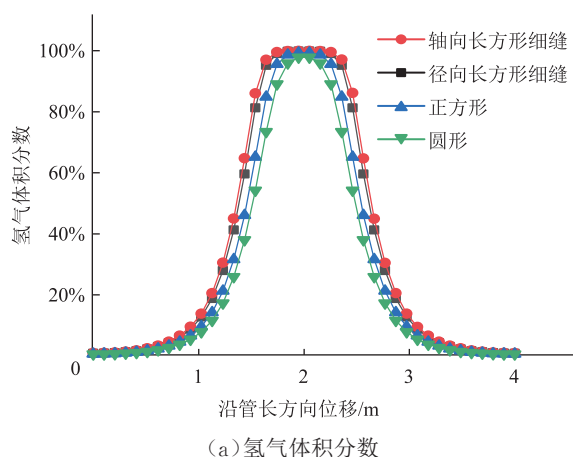


图 8 不同泄漏口形状下埋地纯氢管道泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数、扩散速度分布曲线
Fig. 8 Distribution of hydrogen volume fraction and diffusion velocity along the pipe length at monitoring point I after 300 s leakage of buried pure hydrogen pipelines with different shapes of leakage port

2.2 管道埋深

选择工况 1、工况 9、工况 10,在保持其他条件不变的情况下,改变管道埋深分别为 1 m、1.5 m、0.8 m,采用上述模型模拟得到 3 种不同管道埋深下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线(图 9)及泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数、扩散速度分布曲线(图 10)。可见,泄漏 900 s 内管道埋深 0.8 m 时监测点处氢气体积分数始终大于其他两种工况,管道埋深越深,监测点处氢气体积分数上升越慢。当管道埋深较浅时,氢气会更快扩散到大气与土壤的交界面处,随后氢气逸散到大气中,这会减小土壤中聚集的氢气对后续氢气扩散的反作用,因此,管道埋

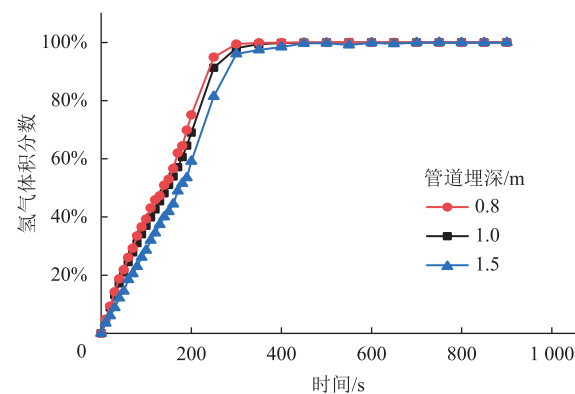
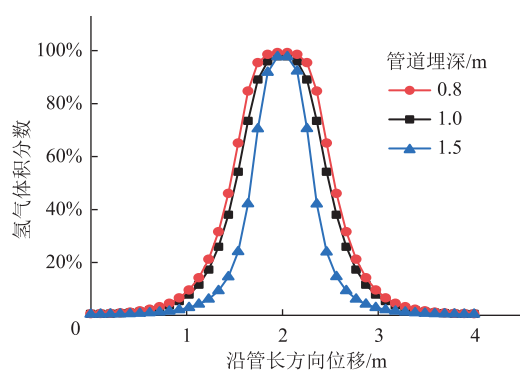
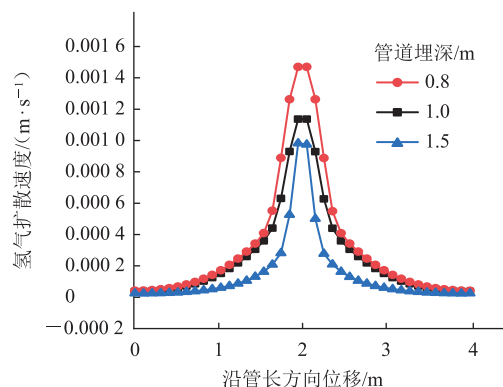


图 9 不同管道埋深下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线

Fig. 9 Variation of hydrogen volume fraction at monitoring point I of buried pure hydrogen pipeline at different burial depths with time



(a) 氢气体积分数



(b) 氢气扩散速度

图 10 不同管道埋深下埋地纯氢管道泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数、扩散速度分布曲线

Fig. 10 Distribution of hydrogen volume fraction and diffusion velocity at monitoring point I along the pipe length direction after 300 s leakage of buried pure hydrogen pipeline at different burial depths

深越浅氢气扩散速度越快,氢气扩散范围越广。加大管道埋深可以减少氢气的扩散速度与范围、氢气泄漏量,有助于减小埋地氢气管道发生氢气泄漏时的危险性,降低泄漏损失,但同时也会增大搭建埋地管道的建设成本。因此,在进行埋地氢气管道的设计时需要综合考虑,选择合适的管道埋深。

2.3 土壤条件

不同土壤条件会对埋地输氢管道泄漏后氢气在土壤中的扩散特性产生影响。土壤的孔隙率、土壤粒径直接影响土壤的惯性阻力系数、黏性阻力系数,进而对气体在土壤中的扩散特性造成影响。

选择工况 1、工况 11、工况 12,在保持其他条件不变的情况下,改变土壤孔隙率分别为 0.43、0.55、0.30,采用上述模型模拟得到 3 种不同土壤孔隙率下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线(图 11)及泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数分布曲线(图 12)。可见,在其他条件相同的情

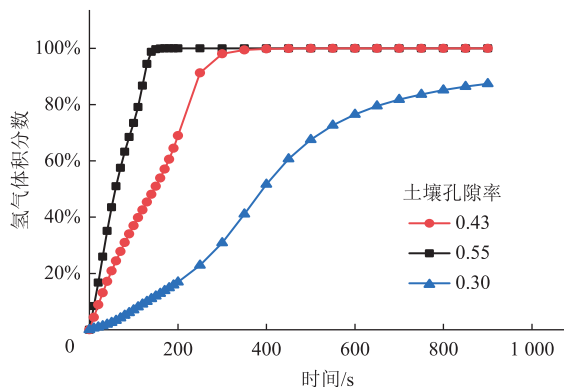


图 11 不同土壤孔隙率下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线

Fig. 11 Variation of hydrogen volume fraction at monitoring point I of buried pure hydrogen pipeline with different soil porosities with time

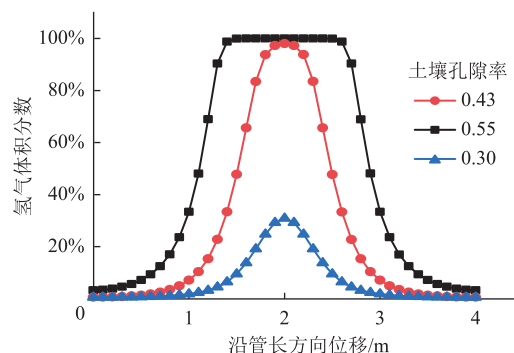


图 12 不同土壤孔隙率下埋地纯氢管道泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数分布曲线

Fig. 12 Distribution of hydrogen volume fraction at monitoring point I along the pipe length direction after 300 s leakage of buried pure hydrogen pipeline under different soil porosities

况下,土壤孔隙率越大,氢气扩散速度越快、扩散范围更广。这是因为在相同土壤粒径的情况下,土壤孔隙率越大,其惯性阻力系数、黏性阻力系数越小。

选择工况 1、工况 13、工况 14,在保持其他条件不变的情况下,改变土壤粒径分别为 0.05 mm、0.01 mm、0.10 mm,采用上述模型模拟得到 3 种不同土壤粒径下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线(图 13)及泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数分布曲线(图 14)。可见,在其他条件相同的情况下,土壤粒径越大,氢气扩散速度越快、扩散范围更广。这是因为在相同土壤孔隙率的情况下,土壤粒径越大,其惯性阻力系数、黏性阻力系数越小。

不同土壤条件对氢气扩散的影响很大,土壤孔隙率、土壤粒径均会影响土壤对氢气扩散的阻力系数。较大的土壤孔隙率和较大的土壤粒径会使土壤的阻力系数更小,氢气在土壤中扩散受到土壤的阻力更小,扩

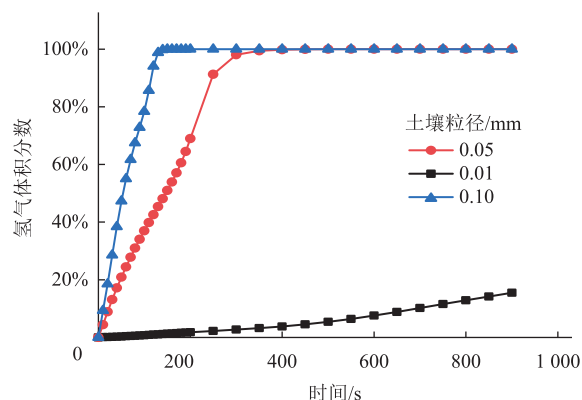


图 13 不同土壤粒径下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线

Fig. 13 Variation of hydrogen volume fraction at monitoring point I of buried pure hydrogen pipeline under different soil particle sizes with time

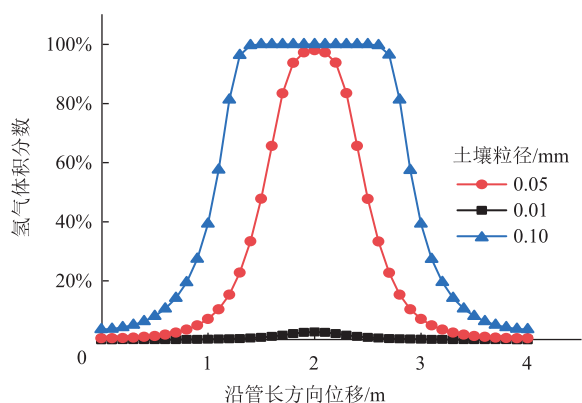


图 14 不同土壤粒径下埋地纯氢管道泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数分布曲线

Fig. 14 Distribution of hydrogen volume fraction at monitoring point I along pipe length direction after 300 s leakage of buried pure hydrogen pipeline under different soil particle sizes

散的速度就更快、范围也更广。因此,在搭建埋地氢气管道时,对于不同的土壤条件需要制定不同的氢气泄漏监测方案。

2.4 管道压力

选择工况 1、工况 15、工况 16,在保持其他条件不变的情况下,改变管道压力分别为 0.4 MPa、0.35 MPa、0.3 MPa,采用上述模型模拟得到 3 种管道压力下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线(图 15)及泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数、扩散速度分布曲线(图 16)。可见,管道压力越大,泄漏口上方监测点处氢气体积分数上升越快,相同时间内氢气扩散范围越广,同一时间同一位置处氢气扩散速度越快。埋地氢气管道的输氢压力越大,在发生氢气泄漏时,氢气爆炸范围越广,危险系数越高,需采用更严格的氢气监测方案。

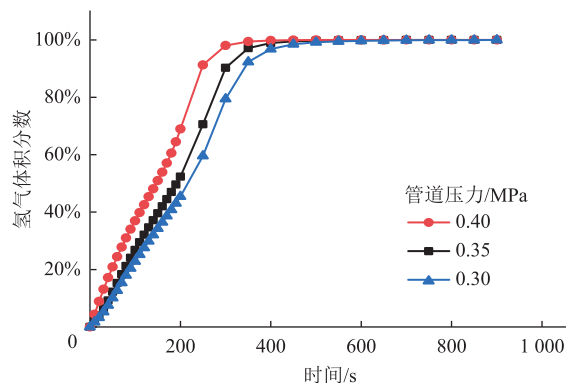
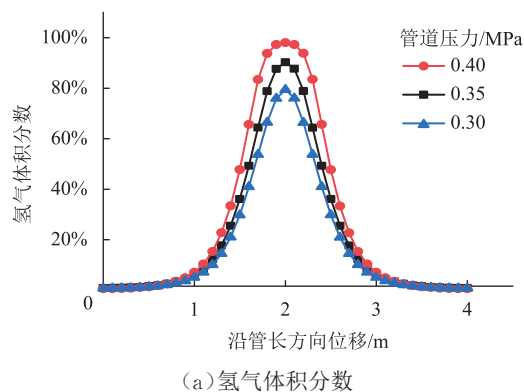
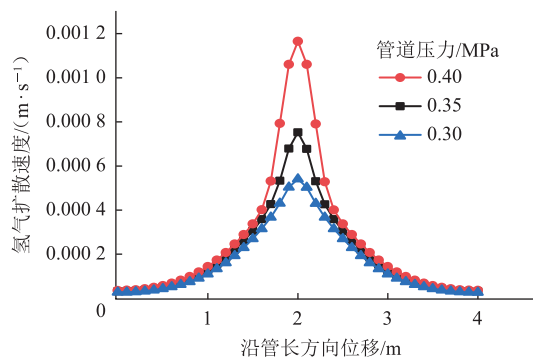


图 15 不同管道压力下埋地纯氢管道监测点 I 处氢气体积分数随时间的变化曲线

Fig. 15 Variation of hydrogen volume fraction at monitoring point I of buried pure hydrogen pipeline with time under different pipeline pressures



(a) 氢气体积分数



(b) 氢气扩散速度

图 16 不同管道压力下埋地纯氢管道泄漏 300 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气体积分数、扩散速度分布曲线

Fig. 16 Distribution of hydrogen volume fraction and diffusion velocity at monitoring point I along the pipe length direction after 300 s leakage of buried pure hydrogen pipeline under different pipeline pressures

2.5 掺氢比

选择工况 1、工况 17~工况 20,保持其他条件不变的情况下,改变管内流体掺氢比分别为 100%、50%、20%、10%、0,采用上述模型模拟得到 5 种掺氢比下掺氢管道泄漏 100 s 内泄漏口正上方土壤与大气接触面处监测点(监测点 II)处的掺氢天然气体积分数随时间的变化曲线(图 17)。可见,埋地掺氢天然气

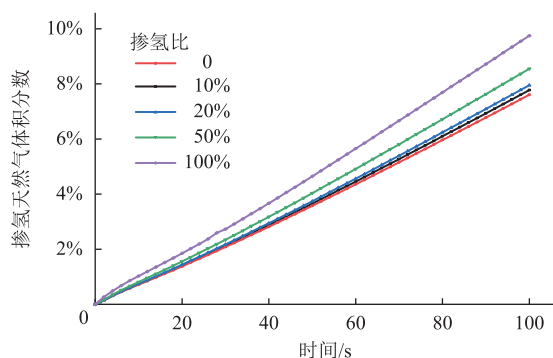


图 17 不同掺氢比下掺氢管道泄漏 100 s 内监测点 II 处的掺氢天然气体积分数随时间的变化曲线

Fig. 17 Variation of volume fraction of hydrogen-doped natural gas at monitoring point II with time within 100 s of hydrogen-enriched pipeline leakage under different hydrogen blending ratios

管道泄漏 100 s 且掺氢比为 0 (不掺氢) 时监测点处气体体积分数最小, 随着掺氢比的增大, 监测点处混合气体的体积分数逐渐增大, 且这种趋势在管道泄漏的 100 s 内始终存在, 表明在甲烷中掺入氢气会加快混合气体扩散速度。对比不同掺氢比下掺氢管道泄漏后掺氢天然气爆炸下限及监测点 II 处掺氢天然气体积分数到达爆炸下限时间 (表 3) 可知, 甲烷、氢气的爆炸下限分别为 4.9%、4%, 在甲烷中掺入氢气会导致掺氢混合天然气爆炸下限不断下降, 同时随着掺氢比的增加, 混合气体的扩散速度逐渐加快, 掺氢天然气管道泄漏后地表处混合气体达到爆炸下限所需时间减少缩短。因此, 在天然气中掺入氢气会增大管道泄漏的危险性。

表 3 不同掺氢比下掺氢管道泄漏后掺氢天然气爆炸下限及监测点 II 处掺氢天然气体积分数到达爆炸下限时间表

Table 3 Lower explosive limit of hydrogen-doped natural gas and time for the volume fraction of hydrogen-doped natural gas at monitoring point II to reach the lower explosive limit after the pipeline leakage under different hydrogen blending ratios

掺氢比	掺氢天然气爆炸下限	到达爆炸下限时间/s
0	4.900%	66.822
10%	4.792%	64.139
20%	4.689%	61.541
50%	4.405%	54.234
100%	4.000%	43.423

3 结论

采用 Fluent 软件建立了三维埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏数值模型, 并分析了泄漏口特征、管道埋

深、土壤条件、管道压力、掺氢比等因素对纯氢/掺氢天然气管道泄漏的影响, 得到以下结论:

埋地纯氢天然气管道泄漏时氢气在土壤中扩散速度较慢, 氢气主要聚集在泄漏口附近, 缓慢向外扩散。泄漏口越大氢气在土壤中扩散速度越快, 扩散范围越广, 更易发生氢气泄漏爆炸事故, 氢气泄漏的危险性就越大; 泄漏口位置主要影响氢气管道泄漏后氢气的分布, 氢气主要聚集在泄漏口附近, 对于大管径输氢管道应对管道四周均进行氢气泄漏监测; 泄漏口长宽比越大, 聚集氢气产生的反作用相对越小, 氢气扩散速度越快, 氢气泄漏的危险性越大。管道埋深越浅越有利于氢气扩散, 管道泄漏后的泄漏量越大, 危险性越大。土壤孔隙率、土壤粒径都会影响土壤对氢气扩散的阻力系数, 土壤孔隙率和土壤粒径越大, 泄漏氢气扩散越快, 需针对不同土壤环境设计不同的氢气监测方案。管道内流体压力越大, 氢气扩散速度越快, 扩散范围越广。掺氢天然气中掺氢比越大, 泄漏气体扩散速度越快, 且由于掺氢天然气的爆炸下限更低, 因此掺氢比越大, 掺氢天然气达到爆炸下限的时间越少, 掺氢管道泄漏的危险性越大, 对掺氢管道更应采用严于天然气管道的管理监测方案。


研究过程中对土壤条件进行了简化, 但现实问题中的土壤环境更为复杂, 如土壤中水分也会对掺氢天然气泄漏扩散产生影响, 未来应考虑更多影响因素, 建立更为复杂的埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏模型。

参考文献:

- [1] 张智, 赵苑瑾, 蔡楠. 中国氢能产业技术发展现状及未来展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 156-165. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.05.017.
ZHANG Z, ZHAO Y J, CAI N. Technological development status and prospect of hydrogen energy industry in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 156-165.
- [2] 陈秋阳, 陈云伟. 国际氢能发展战略比较分析[J]. 科学观察, 2022, 17(2): 1-12. DOI: 10.15978/j.cnki.1673-5668.202202001.
CHEN Q Y, CHEN Y W. Comparative analysis of international hydrogen energy development strategies[J]. Science Focus, 2022, 17(2): 1-12.
- [3] 万燕鸣, 熊亚林, 王雪颖. 全球主要国家氢能发展战略分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(10): 3401-3410. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0132.

- WAN Y M, XIONG Y L, WANG X Y. Strategic analysis of hydrogen energy development in major countries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(10): 3401-3410.
- [4] 刘翠伟,裴业斌,韩辉,周慧,张睿,李玉星,等. 氢能产业链及储运技术研究现状与发展趋势[J]. 油气储运, 2022, 41(5): 498-514. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.05.002.
- LIU C W, PEI Y B, HAN H, ZHOU H, ZHANG R, LI Y X, et al. Research status and development trend of hydrogen energy industry chain and the storage and transportation technologies[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(5): 498-514.
- [5] 邝辰,刘迪,杨昊,于安峰,党文义. 氢气泄漏后燃爆风险研究现状综述[J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(9): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7932.2021.09.001.
- KUANG C, LIU D, YANG H, YU A F, DANG W Y. Review on research status of combustion and explosion risk after hydrogen leakage[J]. Safety Health & Environment, 2021, 21(9): 1-5.
- [6] 万小刚,刘伟,方坦,代鸿超,蔡晓,李倩倩,等. 甲烷添加对氢气燃爆特性的影响[J]. 力学与实践, 2022, 44(4): 786-793. DOI: 10.6052/1000-0879-22-158.
- WAN X G, LIU W, FANG T, DAI H C, CAI X, LI Q Q, et al. Effect of methane addition on hydrogen combustion and explosion characteristics[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(4): 786-793.
- [7] SHU Z Y, LIANG W Q, ZHENG X H, LEI G, CAO P, DAI W X, et al. Dispersion characteristics of hydrogen leakage: comparing the prediction model with the experiment[J]. Energy, 2021, 236: 121420. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121420.
- [8] 李雪芳,毕景良,林曦鹏,柯道友,王雨佳. 高压氢气泄漏扩散数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(12): 2482-2485.
- LI X F, BI J L, LIN X P, KE D Y, WANG Y J. Numerical simulation of high pressure hydrogen release and dispersion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(12): 2482-2485.
- [9] 余亚波,邓亚东. 燃料电池客车高压舱氢气泄漏扩散[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(2): 381-388. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2020.02.020.
- YU Y B, DENG Y D. Hydrogen leakage and diffusion of high voltage cabin of fuel cell bus[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(2): 381-388.
- [10] 孙齐,李凤,王一玮,董绍华,陈林,张行. 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. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.08.006.
- SUN Q, LI F, WANG Y W, DONG S H, CHEN L, ZHANG H. Leakage diffusion law of hydrogen-mixed natural gas pipeline and layout plan of detectors[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(8): 916-923.
- [11] 贾文龙,温川贤,杨明,黄军,吴瑕,李长俊. 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(6): 75-82. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2021.05.014.
- JIA W L, WEN C X, YANG M, HUANG J, WU X, LI C J. Study on leakage and diffusion of hydrogen mixed natural gas in the valve chamber[J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(6): 75-82.
- [12] 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. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.01.007.
- [13] ZHU J L, PAN J, ZHANG Y X, LI Y X, LI H, FENG H, 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. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.185.
- [14] CHAMINDU DEEPAGODA T K K, SMITS K M, OLDENBURG C M. Effect of subsurface soil moisture variability and atmospheric conditions on methane gas migration in shallow subsurface[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 55: 105-117. DOI: 10.1016/j.ijggc.2016.10.016.
- [15] 常欢,谭羽非,王雪梅,肖榕,张兴梅. 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, 42-43. DOI: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2020.11.006.
- CHANG H, TAN Y F, WANG X M, XIAO R, ZHANG X M. Simulation study on leakage diffusion of urban directly buried gas pipeline along soil[J]. Gas & Heat, 2020, 40(11): 28-34, 42-43.
- [16] BU F X, LIU Y, LIU Y B, XU Z, CHEN S Q, JIANG M H, et al. Leakage diffusion characteristics and harmful boundary analysis of buried natural gas pipeline under multiple working conditions[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 94: 104047. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104047.
- [17] BAGHERI M, SARI A. Study of natural gas emission from a hole on underground pipelines using optimal design-based CFD

(下转第 1136 页)

- 望[J]. 油气储运, 2014, 33(9): 913-921. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.09.001.
- SUI Y L, WU H. Current and future applications of automatic welding technology for long-distance oil/gas pipeline in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(9): 913-921.
- [22] 任俊杰, 马卫锋, 惠文颖, 罗金恒, 王珂, 马秋荣, 等. 高钢级管道环焊缝断裂行为研究现状及探讨[J]. 石油工程建设, 2019, 45(1): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2206.2019.01.001.
- REN J J, MA W F, HUI W Y, LUO J H, WANG K, MA Q R, et al. Research status and prospect on fracture behaviour of butt girth welds in high grade steel pipelines[J]. Petroleum Engineering Construction, 2019, 45(1): 1-5.
- [23] 张宏, 吴锴, 刘啸奔, 杨悦, 隋永莉, 张振永. 直径 1 422 mm X80 管道环焊接头应变能力数值模拟方法[J]. 油气储运, 2020, 39(2): 162-168. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.02.005.
- ZHANG H, WU K, LIU X B, YANG Y, SUI Y L, ZHANG Z Y. Numerical simulation method for strain capacity of girth welding joint on X80 pipeline with 1422 mm diameter[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(2): 162-168.
- [24] 蒋庆梅, 张小强, 张弥, 李朝. 中俄东线天然气管道环焊缝断裂韧性的确定[J]. 焊接技术, 2017, 46(9): 82-85. DOI: 10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2017.09.027.
- JIANG Q M, ZHANG X Q, ZHANG M, LI Z. Determination of fracture toughness for girth weld in China-Russia Eastern Natural Gas Pipeline[J]. Welding Technology, 2017, 46(9): 82-85.
- [25] 张振永. 中俄东线 X80 钢级 Φ 1422 mm 管道工程设计关键技术应用[J]. 焊管, 2019, 42(7): 64-71. DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2019.7.007.
- ZHANG Z Y. Application of key technologies in design of X80 Φ 1422 mm pipeline engineering of China-Russia East Natural Gas Pipeline Project[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(7): 64-71.
- (收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2023-08-23; 编辑: 张腾)
-
- 作者简介:** 刘玉卿, 男, 1986 年生, 高级工程师, 2012 年硕士毕业于天津大学船舶与海洋工程专业, 现主要从事油气长输管道线路设计、应力分析与安全评价工作。地址: 河北省廊坊市广阳区和平路 146 号, 065000。电话: 0316-2074544。Email: liu_yuqing@cnpc.com.cn
- 开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

(上接第 1127 页)

- simulations: developing comprehensive soil classified leakage models[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 102: 104583. DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104583.
- [18] 王晓峰, 蒲明, 宋磊, 陈嘉琦, 郭杰, 孙骥妹, 等. 氢气与天然气长输管道设计对比探讨[J]. 油气与新能源, 2022, 34(5): 21-26. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2022.05.004.
- WANG X F, PU M, SONG L, CHEN J Q, GUO J, SUN J S, et al. Analysis on the comparison between hydrogen and natural gas long-distance pipeline design[J]. Petroleum and New Energy, 2022, 34(5): 21-26.
- [19] LIU C W, LIAO Y H, LIANG J, CUI Z X, LI Y X. Quantifying methane release and dispersion estimations for buried natural gas pipeline leakages[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 146: 552-563. DOI: 10.1016/j.psep.2020.11.031.
- (收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-06-30; 编辑: 张雪琴)
- 基金项目:** 国家重点研发计划“氢能技术”重点专项“中低压纯氢与掺氢燃气管道系统事故特征演化及完整性管理”, 2021YFB4001603; 国家重点研发计划项目“质子交换膜燃料电池与氢基内燃机混合发电系统技术-氢基燃料改质、纯化及现场氢源总成”, 2022YFB4003701; 国家自然科学基金资助项目“基于表面张力/压力差驱动的低温推进剂在轨加注过程的气液高效分离机理研究与技术开发”, 52176161。
- 作者简介:** 胡玮鹏, 男, 1998 年生, 在读硕士生, 2021 年毕业于西安交通大学电气工程及其自动化专业, 现主要从事天然气管道泄漏快速仿真预测技术的研究工作。地址: 陕西省西安市长安区思源环北路中国西部科技创新港西安交通大学, 710049。电话: 15877652271。Email: hu1098324138@stu.xjtu.edu.cn
- 开放科学(资源服务)标识码(OSID): 