

综合管廊中掺氢天然气泄漏安全性分析

张成龙¹, 李俊磊¹, 张永海¹, 李璐玲², 段鹏飞², 魏进家¹

(1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安;

2. 深圳市燃气集团股份有限公司, 518049, 广东深圳)

摘要: 为了解掺氢等多因素耦合对管道输送中掺氢燃气泄漏扩散的影响, 针对3种常见燃气输送场景中的地下综合管廊, 从其受限空间易导致燃气云积聚爆燃的特性出发, 考虑不同泄漏方向、掺氢比、管道压力等影响因素, 使用 Fluent 软件对综合管廊内可能出现的泄漏场景进行模拟, 研究了其内部燃气的分布特性, 并对报警探针位置及其间距设置进行了安全性分析。模拟结果表明: 泄漏口朝向会严重影响贴壁燃气分布, 二次流近壁区的燃气积聚更加明显, 在侧壁距顶部 30 cm 处安装探针能有效降低报警延迟; 当掺氢体积分数为 20% 时, 泄漏速度提高了 9.03%, 导致泄漏口近端的燃气积聚加剧而泄漏口远端的风险略微增加; 燃气泄漏 5 s 时的爆炸浓度(燃气摩尔分数大于 4%) 区间距离为 1.54 m, 添加 10%、20% 的氢气可使该距离分别增加 16.2% (1.79 m)、36.4% (2.10 m); 当管道压力增加至 0.8、1.2、1.6 MPa 时, 达到报警浓度的时间分别缩短了 18.9%、28.3%、32.1%。研究可为综合管廊内掺氢天然气的输运安全提供参考。

关键词: 新能源; 氢能安全; 掺氢燃气; 泄漏报警

中图分类号: O641.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202402003 **文章编号:** 0253-987X(2024)02-0022-09

Safety Analysis of Hydrogen-Blended Natural Gas Leakage in Comprehensive Pipe Gallery

ZHANG Chenglong¹, LI Junlei¹, ZHANG Yonghai¹, LI Luling², DUAN Pengfei², WEI Jinjia¹

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shenzhen Gas Corporation Ltd., Shenzhen, Guangdong 518049, China)

Abstract: In order to understand the impact of various coupled factors, such as hydrogen blending, on the dispersion of hydrogen-blended gas leakage in pipeline transportation is studied based on the underground comprehensive pipe galleries in three common gas transmission scenarios. The study starts from the feature that confined space is prone to cause gas cloud accumulation and combustion, with consideration given to factors such as different leakage directions, hydrogen doping ratios, and pipeline pressures, and the simulation of potential leakage scenarios within the comprehensive pipe galleries is conducted using Fluent software. The distribution characteristics of internal gases are examined, and a safety analysis of alarm probe positioning and spacing is performed. The simulation results show that the distribution of gas is significantly influenced by the directions of the leakage port, with a more obvious accumulation of gas observed in the near-wall

region of secondary flows. The installation of probes at a distance of 30 cm from the top of the side walls effectively reduces alarm delays. With a 20% hydrogen blending, the leakage rate increases by 9.03%, leading to an intensification of gas accumulation near the leakage port and a slight increase in risk at the distant end of the port. The explosion concentration range (gas concentration $>4\%$) at 5 seconds of gas leakage is found to be 1.54 m, and the addition of 10% and 20% hydrogen increases this distance by 16.2% (1.79 m) and 36.4% (2.10 m), respectively. Furthermore, as pipeline pressure increases to 0.8, 1.2, 1.6 MPa, the time required to reach the alarm concentration is respectively shortened by 18.9%, 28.3%, 32.1%. Valuable insights for the safe transportation of hydrogen-blended natural gas in comprehensive pipe galleries can be provided by this study.

Keywords: new energy resources; hydrogen safety; hydrogen additive; leak alarm

氢能作为当今世界密切关注的清洁能源,可以预见其未来发展会极大地改变现有的能源结构^[1-2]。2022年3月23日,国家发改委公布了《氢能产业发展中长期规划(2021年—2035年)》,明确了氢的能源属性,指出其是未来国家能源体系的组成部分,要充分发挥氢能清洁低碳的特点,推动交通、工业等用能终端和高耗能、高排放行业向绿色低碳转型。同时,也明确了氢能是战略性新兴产业的重点方向,是构建绿色低碳产业体系、打造产业转型升级的新增长点。然而,氢能作为新能源载体,较大的燃爆危险性和对输运管道的氢蚀作用对其广泛应用造成了极大挑战^[3-4]。为降低氢能利用过程中的泄漏风险^[5],当前工业上多将氢气同天然气掺混输送以降低其危险性^[6],在降低化石能源用量的同时提高了输送效率。

现行掺氢燃气输送的3种常见形式为架空管道、埋地管道及地下管廊。其中架空管道属于无空间约束自由泄漏形式,其输送检漏往往使用负压波结合无人机巡检的方式进行^[7],很少在管道附近布置浓度传感器检漏。这是由于其泄漏过程没有燃气积聚,难以通过浓度基方法进行反演,且有诸如高斯烟羽、AFTOX烟团等成熟解析解模型可以进行泄漏预测^[8],若采用有限元模拟,往往费时费力且很难满足工业需求。对于埋地管道形式,由于其埋地的维护成本较高且稳定性较低,往往很难在周围设置传感器进行检漏,当前工业上多使用巡检车和人工巡检进行检漏。马梅等^[9]对隧道燃气在土壤内的扩散积聚过程进行了模拟,结果表明松土内燃气扩散距离可达15 m左右,且距隧道顶部6 m内为爆炸危险区。钟庆^[10]提出使用电阻率层析成像技术对埋地管道泄漏进行检测,并开展实验对土壤电阻率随燃气浓度的变化进行了分析,结果表明,电阻率的增

大倍数与气体压力呈正相关,与含水率呈负相关。地下管廊作为受限空间内的泄漏场景,由于燃气舱的空间约束,管廊内会出现明显的燃爆风险,其危险性往往高于前2种输送形式。目前,国内外学者已针对管廊内燃气泄漏扩散展开了研究。袁欣然等^[11]搭建实验台,使用 N_2 、 CO_2 气体分别替代燃气和空气进行了泄漏实验,结果表明,在未通风情况下,燃气以波峰波谷形式对称扩散且分层明显,而通风后燃气更容易在泄漏口下风处发生积聚,这一结果从通风角度对燃气探针的检测提供了思路。夏海林等^[12]从管廊的截面形式切入,发现在固定泄漏源条件下,管廊截面面积和燃气扩散速率呈负相关,其宽高比越大,越容易出现燃气积聚而通风效果也越差。Liu等^[13]通过模拟发现管廊内温度与浓度积聚关系不大,风速增大则燃气最大浓度下降,输送距离增大。赵国明等^[14]针对燃气管廊内送风系统开展了模拟,发现相较于常规送风系统,侧送风系统能更好地促进管廊通风,并对现有通风系统进行了优化。韦守朋^[15]通过模拟天然气综合管廊内的泄漏事故,结合通风及充氮抑爆2种方案对燃气舱内燃爆风险的控制进行了分析,结果表明,相较于通风控制,充氮喷头能更有效地降低管廊燃爆风险,且喷头的合理设置距离应在14 m左右,其经济的充氮速率为 $0.5\sim 3.0\text{ m}^3/\text{s}$,这一结果给现行的管廊通风控制提供了新方案。张书豪等^[16]针对管廊内水气共舱条件下燃气泄漏开展了模拟,发现水气共舱条件下甲烷泄漏被明显抑制,在地震等导致管廊外结构破坏的条件下,水气舱的安全性更高。

目前,在综合管廊内燃气扩散的研究文献中,大多聚焦于天然气的泄漏压力、泄漏孔径、泄漏口朝向以及截面等因素对扩散的影响^[17-18],对受限空间内掺氢多组分燃气泄漏相关因素的研究较少,且很少

有考虑多组分气体扩散的情况。本文针对掺氢燃气多组分气体扩散问题,从不同泄漏口朝向、掺氢比等对管廊内燃气扩散和报警延迟角度的影响开展研究,对综合管廊报警器的设置给出了优化思路。

1 物理模型参数

1.1 模型及假设

根据国标 GB 50838—2015《城市综合管廊工程技术规范》,地下综合管廊在结构上可以分为水电综合舱和燃气舱 2 个舱室,如图 1 所示,本文主要针对燃气舱进行泄漏模拟。据现有文献报道,在燃气舱内的泄漏形式中,泄漏源以环焊缝砂眼点蚀及缝隙所导致的小孔泄漏居多,其泄漏尺寸多在 0.1~10 mm 之间;而大孔泄漏和管道破裂一类的结构破坏泄漏几乎不会发生^[19-20]。小孔泄漏模型由于理论成熟且贴合高斯烟羽等^[8]解析模型对泄漏形式的点源要求,对其开展研究得到的实验数据和解析解之间往往有较高契合度,能够对很好地给出扩散过程中的部分特征。因此,本文针对小孔泄漏形式开展研究,并最终确定泄漏孔为方孔,尺寸设置为 10 mm×20 mm。

开展模拟研究需要对泄漏过程进行部分简化,考虑到实际泄漏中的各影响因素,作如下假设:忽略管廊内管道支墩对燃气扩散的影响;假设泄漏过程中各气体组分为理想气体,各组分之间不存在化学反应;假设整个泄漏过程中,小孔泄漏出口为绝热系统^[21],整个过程为等熵泄漏过程。

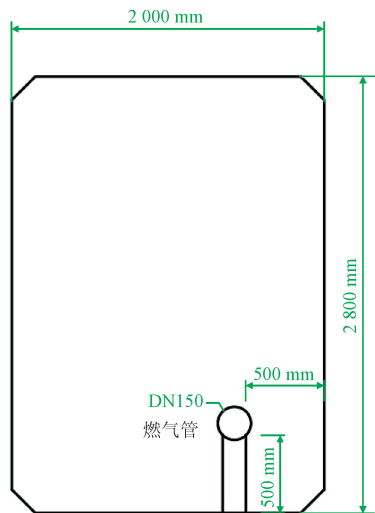


图 1 综合管廊尺寸示意图

Fig. 1 Dimension diagram of integrated pipe gallery

1.2 探针布置

根据国标 18GL502《综合管廊燃气管道舱室配套设施设计与施工》,默认现行探针的间距为 15 m,设置

于管廊顶壁正中位置。在此基础上根据模拟研究结果对探针位置进行优化,调整其水平位置及安装间距。

1.3 模拟参数

1.3.1 控制方程

为模拟管廊中多组分燃气扩散,本文采用多相流中 mixture 模型的变体多组分输运方程进行求解。在计算整体流动连续性、动量、传热的基础上,还需单独对各组分连续性、能量、传热及扩散进行计算,确保各组分符合三大守恒定律且正常随动扩散。

连续性方程可写为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = S_m \quad (1)$$

动量方程可写为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

组分连续性扩散方程可写为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i + R_i + S_i \quad (3)$$

式中: ρ 为密度; $\mathbf{v}$ 为进出单元的速度矢量; S_m 为质量源项; $\bar{\tau}$ 为黏性阻力; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{F}$ 为其他外力; p 为压力; Y_i 为各组分质量分数; $D_{i,m}$ 为湍流扩散系数; μ_t 为涡流黏度; Sc_i 为湍流施密特数; R_i 、 S_i 分别为化学反应源项及其他源项。

1.3.2 模型及网格无关性验证

组分传递及湍流模型是燃气多组分扩散模拟计算的基础,针对天然气泄漏过程,图 2 给出了本文计算模型得到的结果与文献[22-23]中的实验结果对比图,其中纵坐标为燃气报警响应时间 T ,横坐标为距离泄漏点的端面距离 S 。可以看出,随着距离的增大,计

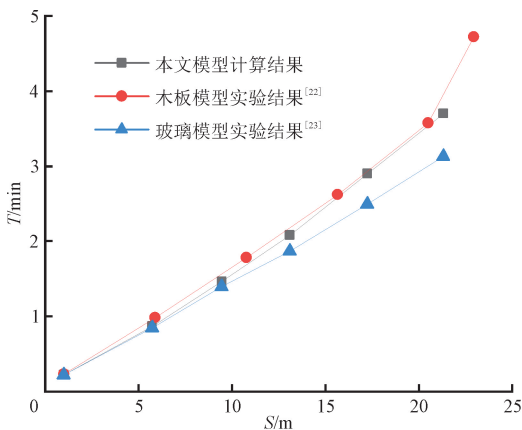


图 2 本文模型计算结果与实验结果验证对比

Fig. 2 Comparison and validation of the results obtained from the computational model in this paper with the experimental results

算模型与实验结果的误差逐渐增大,为保证计算结果精度,管廊模型采用对称模型,总长度设置为 7.5 m。

使用 DesignModeler 软件绘制三维几何模型,采用 Workbench meshing 软件进行网格划分。为确保网格无关性,本文分别使用混合网格和分块网格 2 种方法对目标空气域进行划分,对泄漏口及近壁管面区域做局部加密和 10°曲率修正,选取泄漏出口流速及顶部壁面位置探针浓度进行对照,结果表明,网格数为 1.49×10^6 、 2.37×10^6 时的泄漏流速相差 0.4%。通过综合考虑模拟算力耗费及分块网格跨界点传输精度,最终采用网格数为 2.37×10^6 的混合网格进行计算。本文泄漏口尺寸设置为 10 mm,故对该区域进行 DOI 局部加密,加密尺寸为 2 mm。

1.3.3 边界模型条件设置

考虑到管廊内燃气泄漏涉及大转角变向流动,为更好地描述触壁流动变向时燃气内的涡流发展,本文采用 SST 流动模型开展模拟。流动内泄漏出口处存在高马赫数流动,因此使用压缩性效应还原其泄漏口处的亚膨胀过程。若燃气及空气各组分满足理想气体假设,则可视作可压缩理想气体。实际泄漏过程中还需考虑各燃气组分之间的分层现象,故启用湍流组分浮力设置操作压力,空气密度为 1.205 kg/m^3 。为保证压力速度稳定性,使用 Couple 方法进行求解。组分输送方程中,动量和密度均采用二阶迎风格式。每种泄漏情况均进行 10 s 流动计算,第 1 s 使用 0.01 s 步长计算 100 步,之后再使用 0.1 s 步长计算 90 步。

初始条件如下:假设初始管廊内充满空气,管廊从泄漏口截开使用对称边界计算;环境温度 300 K,压力 101 kPa。

泄漏口条件如下:泄漏口采用压力边界条件,20%掺氢比下分别进行了 0.4、0.8、1.2、1.6 MPa 等 4 种不同入口压力的计算,并对压力进行了压缩性矫正;此外,对 0.4 MPa 压力下 0~100%掺氢比,每次增加 10%掺氢比例进行了计算,本文掺氢比数值均为体积分数。

探针条件如下:根据 GB/T 51274—2017 要求,管廊沿线天然气探测器据舱室顶部不宜超过 30 cm;为研究不同泄漏方向的影响,在管廊 XY 横截面按一定间距设置探针。

2 结果讨论

2.1 不同开口方向对安全性的影响

本小节主要探讨泄漏口不同开口方向对安全性

的影响,通过数值模拟分析了压力 P 为 0.4 MPa、掺氢 20%时,开口朝上、下、左、右 4 个方向泄漏时管廊模型内甲烷(CH_4)摩尔分数分布。

本文选取 13 个监测点分别设置探针,对甲烷和氢气摩尔分数等参数进行监测。图 3 给出了管廊的三维模型和监测点示意图,各点的具体坐标如表 1 所示。

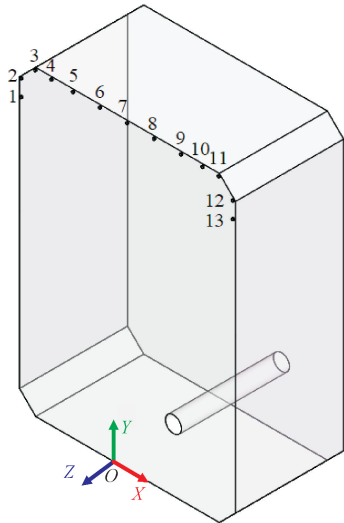


图 3 管廊三维模型及监测点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the model

表 1 监测点具体位置坐标

Table 1 Detection point coordinates

单位:m

监测点	(X, Y)	监测点	(X, Y)
1	(-0.98, 1.10)	8	(0.25, 1.38)
2	(-0.98, 1.25)	9	(0.50, 1.38)
3	(-0.85, 1.38)	10	(0.70, 1.38)
4	(-0.70, 1.38)	11	(0.85, 1.38)
5	(-0.50, 1.38)	12	(0.98, 1.25)
6	(-0.25, 1.38)	13	(0.98, 1.10)
7	(0, 1.38)		

图 4(a)给出了泄漏时间 $t=5\text{ s}$ 时,上侧开口各监测点摩尔分数随 Z 轴的变化趋势。可以看出:各监测点的摩尔分数均沿管道轴向呈现出逐渐降低的趋势,这是因为甲烷在空间快速扩散,导致其动压梯度随距离的增大快速下降;管廊顶壁泄漏口正上方监测点 9 处的燃气摩尔分数明显高于其他监测点,但随着 Z 轴扩散距离的增加,位于管廊侧壁的监测点 12、13 处的摩尔分数明显高于其他监测点;当距离达到 7 m 时,其他监测点摩尔分数降为零,监测点 13 处摩尔分数约为 0.02,处于相对较高水平,这意味

着距泄漏口较远时在监测点 13 处能更快地检测出气体发生泄漏。图 4(b) 为不同 Z 轴截面上的甲烷摩尔分数分布, 为区分位于侧壁上 X 坐标相同的监测点 1、2 和监测点 12、13, X 坐标分别设置为 1、1.15 m。可知在较近的距离里, 管道右侧特别是泄漏口正上方的摩尔分数明显高于其他位置, 但随着扩散距离的增加, 在 $Z \geq 1$ m 后右侧摩尔分数明显高于其他监测点。这是由于射流气体喷出后撞壁由自由空间射流变为有限空间射流, 其射流撞壁后的沿壁流再撞壁形成二次射流导致沿壁流动和脱壁扩散, 加强了射流在空间的扰动积聚, 增大了沿壁的扩散速度, 从而表现出近壁面摩尔分数明显高于其他位置, 特别是上侧开口时位于管道右侧 ($X=0.51$ m 处) 的监测点 12、13 处, 由于离右壁面较近更容易发生积聚。

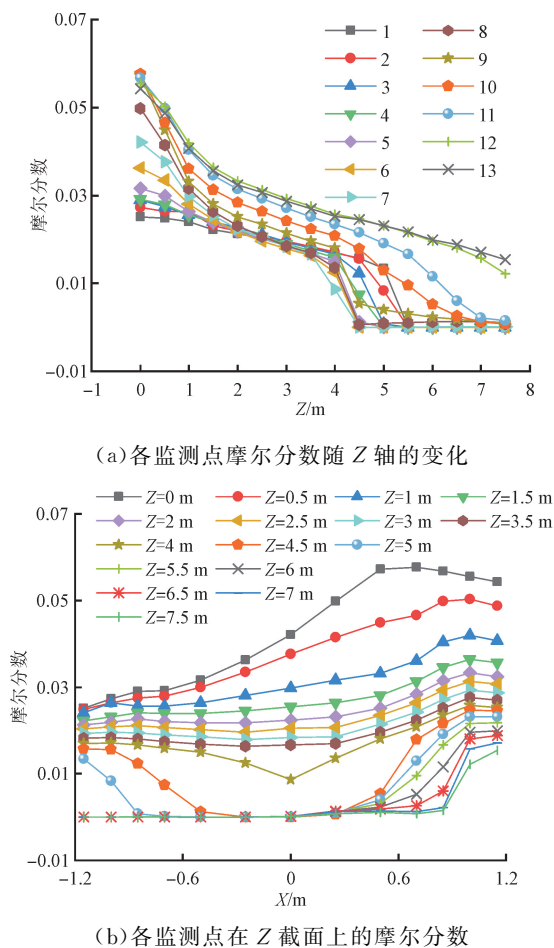


图 4 泄漏 5 s 时上开口各监测点甲烷摩尔分数变化趋势 ($P=0.4$ MPa, 掺氢 20%)

Fig. 4 Trends in methane molar concentrations at the upper port at 5 s ($P=0.4$ MPa, 20% hydrogen blend)

图 5 为不同泄漏口方向在泄漏时间 $t=10$ s 时、 $Z=5$ m 截面处的甲烷摩尔分数分布图。当泄漏口朝上时, 泄漏气体向上喷射, 管廊顶壁为一次射流撞

击面, 由于泄漏点距离右壁面较近, 流体向四周均匀扩散后撞击右壁面形成二次射流, 沿壁流的二次射流撞壁导致右侧特别是近壁面的摩尔分数远远高于其他位置。当泄漏口朝下时, 由于管廊底面为一次射流撞击面, 右壁面为二次射流撞击面, 其一次射流扩散距离很短, 在出口固定的紊流射角下撞壁后整体摩尔分数较为均匀, 但右壁面近壁处摩尔分数仍略高于其他位置。泄漏口朝向为水平向左和向右时, 其二次射流壁面均为下壁面, 因此各监测点摩尔分数较均匀, 且整体呈现出两壁面高中间低的趋势。

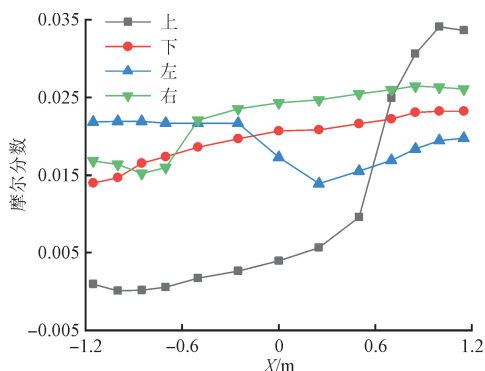


图 5 $t=10$ s、 $Z=5$ m 处不同开口方向的甲烷摩尔分数分布
Fig. 5 Distribution of methane molar concentration at different opening leak times of $t=10$ s and $Z=5$ m

图 6 给出了泄漏时间分别为 5、10 s 时, Z 为 5、7.5 m 截面处各监测点在上、下、左、右 4 个方向的摩尔分数平均值, 可以看出管廊右壁面的甲烷摩尔分数明显高于其他监测点。泄漏时泄漏口的方向很大程度上影响了气体扩散的均匀性, 甲烷摩尔分数在受限空间中呈现出沿管廊长度方向降低, 且近壁侧高于中心区域的趋势。而且, 由于不同泄漏口方向有着不同的二次射流面, 影响并改变了甲烷的扩

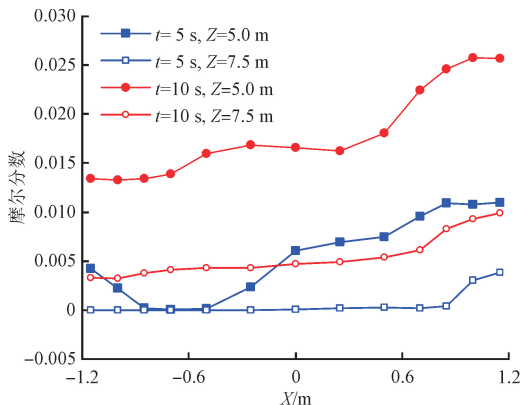


图 6 不同泄漏时间和 Z 截面处的甲烷摩尔分数分布
Fig. 6 Distribution of methane concentrations at different leak times and Z -sections

散方向,使得其在高喷射速度下多积聚在二次流壁面近壁区,而远离该近壁区其他区域的甲烷摩尔分数积聚速度慢,导致达到报警的最低浓度时间长,因此选择恰当的监测点有利于及时探测气体泄漏并发出警告。由于监测点 13 在甲烷摩尔分数监测上有着不小优势,下面将针对监测点 13 讨论甲烷摩尔分数的变化规律。

2.2 掺氢比对安全性的影响

本节通过对泄漏压力为 0.4 MPa 时、不同掺氢比 0%、10%、20% 燃气的情况进行模拟,研究掺氢比对燃气泄漏安全性的影响。图 7 显示了泄漏 5 s 时不同掺氢比下甲烷的摩尔分数,可知随着扩散距离的增大,浓度分布可分为 3 个阶段。第 1 阶段为摩尔分数在 6%~3% 之间,此时不同掺氢比下各监测点的甲烷摩尔分数下降较快,且甲烷摩尔分数差值较大;当掺氢 20%、0% 的燃气泄漏时, Z=0 m 处的甲烷摩尔分数差值为 0.7%,而 Z=2 m 处的差值快速下降到 0.4%;第 2 阶段为摩尔分数在 3%~2.5% 之间,此时各掺氢比下燃气泄漏的甲烷摩尔分数分布近乎均匀,当掺氢 20%、0% 的燃气泄漏时,甲烷摩尔分数差值为 0.3% 左右且变化幅度较小;与掺氢 20% 相比,掺氢 10%、0% 时的甲烷燃气扩散分布分别缩减了 0.5、1 m,这是由于掺入氢气后,混合气体的热值降低(氢气体积热值为 13 MJ/m³,天然气体积热值为 38 MJ/m³),对于原有的传感器,氢气燃烧产生的热在掺氢 10% 时仅为甲烷燃烧热的 1/26,故可选用甲烷摩尔分数作为监测标准;上述结果表明,当管廊内不同掺氢比燃气发生泄漏时,为保证原有泄漏浓度监测的安全性,可以在原有浓度报警器设置的基础上相应地缩短间隔距离,即每提高 10% 掺氢比可缩短 0.5 m 间距以提高其安全性。第 3 阶段为摩尔分数小于 2.5%,此时各掺氢比对燃气浓度的影响差距进一步减小,以掺氢 0% 的泄漏燃气甲烷摩尔分数为基准,7.5 m 处掺氢 10% 的甲烷摩尔分数差值为 0.07%,掺氢 20% 的甲烷摩尔分数差值为 0.1%;由于不同掺氢比例的燃气爆炸浓度区间不同,故选用更低的氢爆炸极限(4%)作为标准;燃气泄漏 5 s 时的爆炸浓度区间尺寸距离(摩尔分数>4%)为 1.54 m,添加 10% 的氢气可使该距离增加 16.2% (1.79 m),添加 20% 的氢气则增大 36.4% (2.10 m),这意味着掺氢会导致近端气体快速积聚,也略微增加了泄漏远端的风险,这与 Melaina 等^[24]得出的结论相同;同时,热值的降低使得监测难度加大,也增大了报警延迟,这是因为氢混合物的

扩散速度会更快,泄漏量也更大,进一步导致较短距离的浓度快速积聚,远距离边缘处的浓度增大。

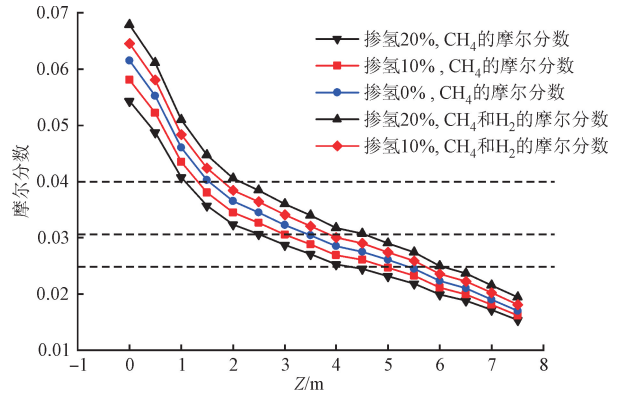


图 7 泄漏 5 s 时不同掺氢比下监测点燃气摩尔分数随 Z 轴的变化

Fig. 7 Trend of concentration at monitoring points with Z-axis for different hydrogen doping ratios at 5 s of leakage

管道开口泄漏速度的计算表达式^[25-26]可写为

$$u = \phi C_D \left(\frac{P_2}{P_a} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{R k T_2}{M} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \tag{4}$$

式中: P_2 为管内压力; P_a 为环境压力; k 为混合物绝热指数; R 为气体常数; T_2 为管内温度; M 为混合物摩尔质量; ϕ 为孔口流速系数,表示实际流速与理论流速之比,一般取值为 0.97~0.98; C_D 为流量系数,亦称泄漏系数。

表 2 给出了掺氢比变化后的等熵指数 k 、摩尔质量 M 以及泄漏口的最大泄漏速度 u 的变化和 $Z=2.5$ m 处监测点 13 达到 1% 报警时间 t 。从表 2 可知,当掺氢 20% 时,最大泄漏速度提高了 9.03%,这表明泄漏燃气的初始速度更快,能让泄漏气体更快地扩散到整个管廊内;在选取甲烷爆炸下限的 20% (即 1%) 作为报警浓度的前提下,不同掺氢比气体泄漏时各点甲烷摩尔分数达到报警浓度的时间差别很小,最大仅为 0.85%,即使在扩散远端区域也无明显区别。

表 2 不同掺氢比下各物性参数、泄漏速度及 Z=2.5 m 处报警时间

Table 2 Physical parameters, leakage rate and alarm time at Z=2.5 m with different hydrogen blending

掺氢比/%	k	$M/$ (kg · mol ⁻¹)	$u/$ (m · s ⁻¹)	报警时间/ s
0	1.317	0.016 0	716.35	0.507 4
5	1.321	0.015 3	730.82	
10	1.324	0.014 6	746.33	0.509 8
15	1.328	0.013 9	763.03	
20	1.332	0.013 2	781.05	0.511 7

图8为不同掺氢比例下、 $Z=7.5$ m处监测点13的总燃气($\text{CH}_4 + \text{H}_2$)摩尔分数分布图。由图8可知,高达50%掺氢比例的气体只产生了略高的气体积聚摩尔分数,但当掺氢比例大于50%时,气体积聚摩尔分数增加显著,尤其是掺氢比例超过70%时更甚,这也验证了气体泄漏量随着掺氢比的增加而大幅度增大这一结论^[27]。较低水平的掺氢比例对摩尔分数的分布影响较小,20%掺氢比例只增加了9.8%泄漏量,而当掺氢比例达到80%这一较高水平时,泄漏量增加了79.7%。

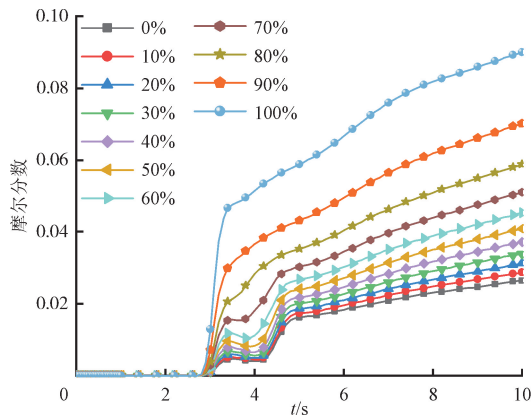


图8 不同掺氢比例下 $Z=7.5$ m处监测点13的燃气摩尔分数随时间的变化

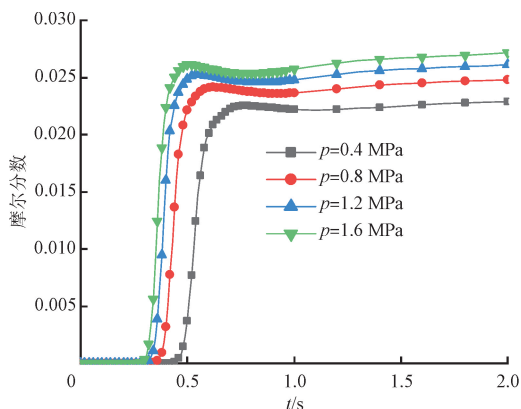
Fig.8 Trend of gas volume concentration at monitoring point 13 with different hydrogen blending over time

2.3 不同压力对安全性的影响

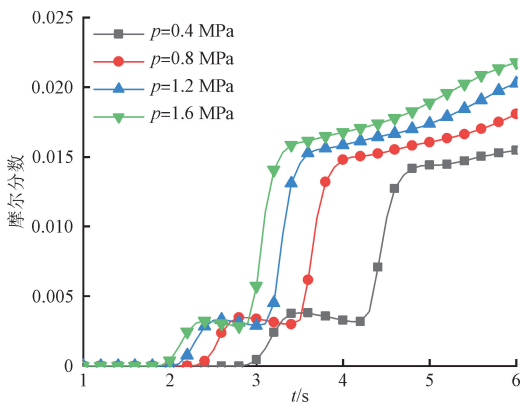
本节主要讨论了掺氢20%、泄漏口朝上时,输送压力分别为0.4、0.8、1.2和1.6 MPa下中高压燃气入廊对安全性影响。

图9给出了不同压力下监测点13在 Z 为2.5、7.5 m处的甲烷摩尔分数随时间的变化,图9(a)、(b)均呈现出混合物气体摩尔分数先快速上升到峰值,然后下降接着再上升的趋势。出现第一个峰值是由于环境介质阻力、推挤体积力和壁面挤压形成扩散锋面,使得前端形成摩尔分数较高的区域,2.5 m处锋面区域扩展速度较快但整个区域较小,而在7.5 m处速度衰减后此区域变大,摩尔分数也相应地表现出如图9(b)所示的阶梯性变化。以图9中泄漏压力 p 为0.4 MPa、监测点13处的气体摩尔分数达到1%作为报警浓度为例,可以得到20%掺氢燃气在 $Z=2.5$ m处监测点的报警时间为0.53 s;而在 $Z=7.5$ m处则为4.49 s。当将压力提高到0.8、1.2、1.6 MPa时, $Z=2.5$ m处的报警时间分别为0.43、0.38、0.36 s,比压力为0.4 MPa时分别缩短了

18.9%、28.3%、32.1%;在 $Z=7.5$ m处的报警时间分别为3.70、3.31、3.08 s,比压力为0.4 MPa时分别降低了17.6%、26.3%、31.4%。



(a) $Z=2.5$ m



(b) $Z=7.5$ m

图9 不同压力下监测点13处甲烷摩尔分数随时间变化

Fig.9 Changes of concentration at monitoring points 13 with time under different pressures

综上所述,不同泄漏口距离下,监测点的摩尔分数与压力的变化规律基本相同。提高管输压力会导致扩散速度加快,虽然能缩短报警时间,但仍应根据不同压力下燃气的泄漏危害评估和后续安全装置的响应时间调整浓度报警器间距。

3 结 论

本文通过对综合管廊的掺氢天然气泄漏过程进行数值模拟,分别研究了泄漏方向、掺氢比、管道压力对泄漏后各位置甲烷摩尔分数的影响,得到如下结论。

(1)在压力为0.4 MPa、20%掺氢比下,中高压管道泄漏时甲烷摩尔分数随扩散距离的增加逐渐降低,不同泄漏方向影响了气体扩散方向进而使摩尔分数分布不均匀。从不同泄漏口方向监测点摩尔分数平均值可以看出,二次流近壁区特别是监测点13

的气体混合物积聚更加明显,可以考虑在管廊内近管道侧壁距顶部 30 cm 处安装报警探测器。

(2)掺氢导致泄漏口近端气体快速积聚,也略微增加了泄漏远端的风险。同时,由于燃气热值降低也加大了监测难度,增大了报警延迟。20%、0 掺氢比下,气体混合物甲烷摩尔分数在近端相差 0.7%,而远端摩尔分数相差仅为 0.3%,达到 1%摩尔分数的报警时间相差 0.85%;掺氢 20%时,最大泄漏速度提高了9.03%,爆炸摩尔分数区间则增大了 36.4%;根据掺氢比的不同,可以在原有掺氢比报警器的基础上相应地缩短安装间距,即每提高 10%掺氢比可缩短0.5 m间距以提高其安全性。

(3)管输压力的提高会导致泄漏速度加快,同时也缩短了各监测点达到 1%报警浓度的时间。

目前,掺氢燃气管道输运仍处于试行阶段,因此还需要大量的实验数据开展经验分析。若能根据实验经验模型对现有的数值模拟扩散方程进行修正,就可以更好地使用数值模拟进行泄漏预测,最终得出更精确的掺氢燃气泄漏降阶模型,从而提高演算速度以扩大其工程应用场景。

参考文献:

[1] 任若轩,游双娇,朱新宇,等. 天然气掺氢输送技术发展现状及前景 [J]. 油气与新能源, 2021, 33(4): 26-32.
REN Ruoxuan, YOU Shuangjiao, ZHU Xinyu, et al. Development status and prospects of hydrogen compressed natural gas transportation technology [J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(4): 26-32.

[2] 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): 5499-5505.
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): 5499-5505.

[3] MORADI R, GROTH K M. Hydrogen storage and delivery: review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(23): 12254-12269.

[4] MA Houyi, CHENG Xiaoliang, LI Guiqiu, et al. The influence of hydrogen sulfide on corrosion of iron under different conditions [J]. Corrosion Science, 2000, 42(10): 1669-1683.

[5] 徐鹏,潘丹丹,袁勋,等. 燃气管道泄漏扩散研究进

展 [J]. 油气储运, 2022, 41(1): 21-28.
XU Peng, PAN Dandan, YUAN Xun, et al. Progress of research on leakage diffusion of gas pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(1): 21-28.

[6] KUCZYNSKI S, ŁACIAK M, OLIJNYK A, et al. Thermodynamic and technical issues of hydrogen and methane-hydrogen mixtures pipeline transmission [J]. Energies, 2019, 12(3): 569.

[7] TAGHVAEI M, BECK S B M, STASZEWSKI W J. Leak detection in pipelines using cepstrum analysis [J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(2): 367.

[8] ARYSTANBEKOVA N K. Application of Gaussian plume models for air pollution simulation at instantaneous emissions [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004, 67(4/5): 451-458.

[9] 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 Mei, JIANG Zhong'an. Study on leakage and diffusion law of buried gas pipeline in tunnel [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2022, 51(1): 132-137.

[10] 钟庆. 埋地燃气管道小孔泄漏侵扰下土体电阻率响应规律研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.

[11] 袁欣然,许淑惠,徐荣吉,等. 综合管廊燃气舱燃气管道泄漏扩散规律研究 [J]. 消防科学与技术, 2019, 38(6): 802-806.
YUAN Xinran, XU Shuhui, XU Rongji, et al. The study of gas leakage and diffusion law on utility tunnel's gas tan [J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(6): 802-806.

[12] 夏海林,邓志辉. 综合管廊截面形式对燃气扩散规律影响研究 [J]. 制冷与空调, 2022, 36(4): 551-555.
XIA Hailin, DENG Zhihui. Influence of cross section form on natural gas leakage and diffusion in natural gas pipeline cabin of utility tunnel [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2022, 36(4): 551-555.

[13] LIU Chengcheng, WANG Deguo, GUO Yanbao, et al. Research on diffusion behaviors of leaked natural gas in urban underground utility tunnels [C]//2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 2076-2081.

[14] 赵国明,田贯三. 燃气管廊内不同通风形式的探究 [J]. 洁净与空调技术, 2020(2): 75-79.
ZHAO Guoming, TIAN Guansan. Study on different ventilation forms in gas pipe gallery [J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2020(2): 75-79.

- [15] 韦守朋. 地下管廊燃气泄漏扩散及控制方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [16] 张书豪, 彭世尼, 杜建梅, 等. 综合管廊水气共舱情况下的燃气泄漏研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S1): 365-370.
- ZHANG Shuhao, PENG Shini, DU Jianmei, et al. Research on gas leakage in water-gas compartment in utility tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 365-370.
- [17] EBRAHIMI-MOGHADAM A, FARZANEH-GORD M, ARABKOOHSAR A, et al. CFD analysis of natural gas emission from damaged pipelines: correlation development for leakage estimation [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 257-271.
- [18] BU Fanxi, LIU Yang, WANG Zhixue, et al. Analysis of natural gas leakage diffusion characteristics and prediction of invasion distance in utility tunnels [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 96: 104270.
- [19] 杨永, 何仁洋, 赵尔冰, 等. 煤气管道穿孔泄漏原因分析及建议 [J]. 管道技术与设备, 2011(6): 47-48, 57.
- YANG Yong, HE Renyang, ZHAO Erbing, et al. Causal analysis of urban gas pipeline corrosion leakage accidents and suggestions [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2011(6): 47-48, 57.
- [20] 李昭阳. 天然气管道入综合管廊的风险评价 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [21] LU Hongfang, HUANG Kun, FU Lingdi, et al. Study on leakage and ventilation scheme of gas pipeline in tunnel [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 53: 347-358.
- [22] 胡敏华. 共同沟天然气管道泄漏报警的模型实验 [J]. 天然气工业, 2006, 26(10): 150-153.
- HU Minhua. Model experiment on the response of alarm detector to natural gas leakage in utility tunnel [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(10): 150-153.
- [23] 胡敏华. 共同沟天然气管道泄漏报警实验研究 [J]. 深圳大学学报(理工版), 2006, 23(3): 211-216.
- HU Minhua. Experimental study on response of alarm detector to natural gas leakage in utility tunnel [J]. Journal of Shenzhen University(Science and Engineering), 2006, 23(3): 211-216.
- [24] MELAINA M W, ANTONIA O, PENEV M. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues [EB/OL]. [2022-11-25]. <https://trid.trb.org/view/1251623>.
- [25] 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.
- [26] DONG Yuhua, GAO Huilin, Zhou Jing'en, 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.
- [27] LOWESMITH B J, HANKINSON G, JOHNSON D M. Vapour cloud explosions in a long congested region involving methane/hydrogen mixtures [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2011, 89(4): 234-247.

(编辑 赵炜 刘杨 李慧敏)