

文章编号: 1007-6735(2025)01-0054-07

DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20231214002

地下综合管廊天然气管道泄漏气体扩散特性研究

刘保东^{1,2}, 廖志华², 李明¹, 蒋歆春², 温海珍², 饶平平¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 南宁城建管廊建设投资有限公司, 南宁 530219)

摘要: 采用双精度 ANSYS Fluent 软件构建地下综合管廊天然气管道泄漏的 CFD 数值模型, 结合南宁市新邕路综合管廊的实际参数, 设置泄漏、进气与排气等条件, 并与实验数据对比验证模型精度。最终定量分析地下管廊内泄漏气体的扩散行为及浓度分布。研究发现, 泄漏初期甲烷在泄露点附近迅速形成高浓度区域, 并在几秒内向管廊上方显著扩散。随着时间的推移, 甲烷浓度逐步在管廊截面上均匀化, 尤其在 50~300 s 范围内, 稀释效应更显著, 最终在长时间尺度下达到稳定分布。监测数据显示, 泄漏口附近监测点浓度上升最快并在 25 s 后保持稳定, 进气口附近的监测点浓度逐渐稳定在约 1.5%, 排气口附近则低于 0.1%。这些结果为定量分析甲烷气体泄漏后的浓度分布、扩散速度及空间扩散范围提供了有效方法, 揭示了泄漏初期和长时间气体浓度的变化规律, 有助于制定更有效的安全控制措施、优化通风设计及应急响应策略。

关键词: 地下综合管廊; 天然气; 泄漏; 扩散; 数值模拟

中图分类号: TU 990.3 文献标志码: A

Leakage gas diffusion characteristics of natural gas pipelines within underground integrated utility tunnels

LIU Baodong^{1,2}, LIAO Zhihua², LI Ming¹, JIANG Xinchun², WEN Haizhen², RAO Pingping¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Nanning City Construction and Management Corridor Construction Investment Co., Ltd., Nanning 530219, China)

Abstract: A computational fluid dynamics (CFD) model for natural gas pipeline leakage in an underground integrated utility tunnel was developed using double-precision ANSYS Fluent, incorporating the actual parameters of the Xinyong Road utility tunnel in Nanning. Leakage, intake, and exhaust conditions were configured, and the model's accuracy was validated by comparing it with experimental data. Quantitative analysis of gas diffusion behavior and concentration distribution was

收稿日期: 2023-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42077435, 42377171); 2022 年南宁市科学研究与技术开发计划项目 (ZC20223242)

第一作者: 刘保东 (1978-), 男, 博士研究生. 研究方向: 环境与能源工程. E-mail: 1027195816@qq.com

通信作者: 饶平平 (1984-), 男, 教授. 研究方向: 城市地下工程智能监测预警研究. E-mail: raopingping@usst.edu.cn

引文格式: 刘保东, 廖志华, 李明, 等. 地下综合管廊天然气管道泄漏气体扩散特性研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(1): 54-60.

Citation: LIU Baodong, LIAO Zhihua, LI Ming, et al. Leakage gas diffusion characteristics of natural gas pipelines within underground integrated utility tunnels[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(1): 54-60.

conducted, revealing that initially methane forms a high-concentration zone near the leakage point, with rapid upward diffusion in the tunnel within seconds. Over time, methane concentration becomes more uniform across the tunnel cross-section, with a noticeable dilution effect from 50 to 300 seconds, eventually achieving a steady distribution on a longer timescale. Monitoring data indicated that the highest concentration rise near the leak, stabilizing after 25 seconds, with intake points stabilizing around 1.5% and exhaust points below 0.1%. These findings provide quantitative insights into methane concentration distribution, diffusion rate, and spatial spread following leakage, highlighting the patterns of initial and long-term gas concentration change. This study supports the development of effective safety controls, optimized ventilation designs, and emergency response strategies.

Keywords: *underground integrated utility tunnel; natural gas; leakage; diffusion; numerical simulation.*

随着城市化的加速, 城市基础设施面临诸多挑战。地下综合管廊建设成为解决城市地下空间利用和综合管线管理问题的重要途径。管廊集中布置了电力、通信、燃气等管线, 优化了城市空间布局, 提高了城市运行效率。天然气因其高效和清洁性, 在城市能源供应中占据重要地位, 但其易燃易爆特性要求输送系统具有极高的安全标准。管廊提供了相对封闭、可控的环境, 能更好地保障天然气管道的安全运行。但由于腐蚀、第三方施工破坏和自然灾害等多种因素的存在, 入廊天然气管道泄漏事件仍有发生的可能性^[1-2]。特别是在地下半封闭空间内发生燃气管道泄漏事件, 会显著增加爆炸事故的风险, 对城市的正常运行产生严重威胁。

为了深入了解和应对这一挑战, 国内外研究人员广泛采用数值模拟和实验方法来研究泄漏天然气的扩散特性。近年来, 计算流体动力学(CFD)的应用在气体扩散特性分析和暴露风险评估的准确性提升方面发挥了显著作用。Zhou等^[3]研究了公用隧道内气体扩散特性并分析了监测气体泄漏的重要性。Liu等^[4]的研究强调了计算流体动力学的应用对于提高气体扩散特性分析准确性和暴露风险评估可靠性的显著作用。Siddiqui等^[5]的研究提出了一种基于CFD的室内风险评估模型, 重点考虑了工业室内环境中持续、小型、未被检测到的有毒气体(氯气)的意外泄漏。Bu等^[6-8]考虑了管道埋地环境对气体泄漏扩散的影响, 借助数值模拟研究了埋地天然气管道泄漏扩散的特性, 实现了在不同埋地条件下的天然气泄漏危害计算。董刚等^[9]对高压燃气管道泄漏扩散过程进行了数值模拟, 结果表明, 天然气受到浮力的影响, 扩

散主要以上升方式为主, 同时风速也与天然气的扩散密切相关。付吉强等^[10]对架空管道泄漏过程进行了稳态和非稳态模拟, 分析了泄漏速度和外部风速对天然气扩散的影响。曹博宇^[11]基于高斯气体扩散理论, 进行了地下燃气管道天然气泄漏扩散的分析, 并研究了初始泄漏速度、温度和风速等因素对天然气扩散的影响。吴欢^[12]利用Fluent软件进行模拟分析, 研究了燃气管道不同泄漏孔形状、方向以及通风方式对天然气扩散的影响, 通过对比不同工况下的模拟结果, 优化了事故通风的方案。

尽管这些研究为理解天然气泄漏的扩散特性提供了重要的理论基础, 但针对地下综合管廊中燃气管道泄露的气体扩散特性和浓度分布规律的研究还相对缺乏。因此, 本文针对地下综合管廊中燃气管道泄露的气体扩散特性和浓度分布规律进行了深入研究, 定量分析了舱内泄露气体的分布规律, 并对泄漏后舱内气体的危险程度进行评估, 为灾害发生后的预警与救援提供理论基础。针对南宁市新邕路综合管廊中燃气舱防火分区9内的天然气管道, 建立了相应的数值分析模型, 不仅提高了对地下综合管廊燃气舱中天然气泄漏扩散过程的理解, 而且为舱室内有害气体控制设计与可燃气体报警器设置的位置、数量等提供理论依据, 进而优化城市基础设施的安全管理措施。

1 研究方法

1.1 物理模型

本研究针对南宁市新邕路综合管廊中燃气舱防火分区9内的天然气管道泄漏工况进行建模。

根据管廊建设图纸和天然气管道的实际铺设情况, 建立了一个长度 180 m、宽度 1.9 m、高度 3.5 m 的燃气舱物理模型。模型中, 天然气管道直径为 0.32 m, 燃气舱的进气口和出风口均为边长 0.74 m 的矩形, 采用泄漏口为 0.2 m 的典型工况进行模拟, 具体尺寸如图 1 所示。

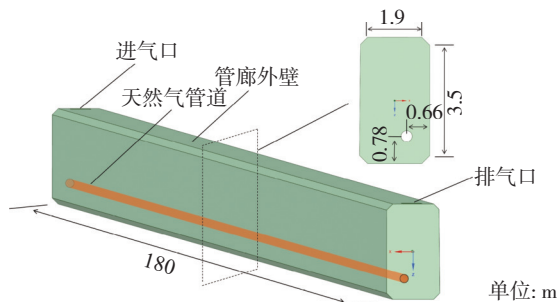


图 1 管廊模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of pipe gallery model

1.2 数学模型

a. 连续性方程。

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; \mathbf{u} 为流体速度矢量, m/s 。

b. 动量方程。

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

式中: p 为压力, Pa ; \mathbf{F} 为外力矢量, N ; $\boldsymbol{\tau}$ 为切应力张量; \mathbf{g} 为重力加速度。

c. 组分输运方程。

$$\frac{\partial(\rho c_f)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u} c_f) = \operatorname{div}[D_f \operatorname{grad}(\rho c_f)] \quad (3)$$

式中: c_f 为组分 f 的体积浓度; D_f 为组分 f 的扩散系数。

d. 标准 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型^[13]。湍动能方程、湍动能耗散率方程、湍流黏性系数及速度梯度引起的湍动能方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \kappa) = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla^2 \kappa + G_\kappa - \rho \varepsilon + S_\kappa \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \varepsilon) = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla^2 \varepsilon + \varepsilon (C_{1\varepsilon} G_\kappa - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) / \kappa + S_\varepsilon \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \kappa^2 / \varepsilon \quad (6)$$

$$G_\kappa = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial u_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} \right) \quad (7)$$

式中: C_μ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 均为湍流常数, $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$; σ_κ 、 σ_ε 均为湍流普朗特

数, $\sigma_\kappa = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$; S_κ 、 S_ε 均为用户定义源项; μ 为流体的分子动力黏度, μ_t 为湍流黏性系数; κ 为湍动能; ε 为湍动能耗散率; G_κ 为湍动能的生成项; μ_i 、 μ_j 为 i 、 j 方向的速度分量。

1.3 边界条件设置与网格划分

采用双精度的 ANSYS Fluent 软件对管廊区域内天然气管道泄漏过程进行了数值模拟。速度压力耦合采用 SIMPLE 算法, 时间离散采用二阶隐式格式。进气口设置为 Velocity-Inlet, 排气口设置为 Pressure-Outlet, 泄漏口设置为 Mass-Flow-Inlet, 管道壁面及管廊壁面均为无滑移恒温壁面。

管道泄漏口位于管道中点, 泄漏孔径为 0.2 m; 进气口为边长 0.74 m 的矩形, 设于管廊顶部, 中心点距管廊顶部起始点 0.95 m, 进气口风速设定为 1 m/s; 排气口为边长 0.74 m 的矩形, 位置与进气口关于管廊顶部中心点对称, 排气口表压为大气压力; 管内压力为 0.5 MPa, 管内温度为 320 K, 环境温度为 300 K, 初始管廊内天然气含量为 0, 泄漏过程为连续泄漏且管内压力保持不变。在管廊内设置 19 个监测点, 对天然气摩尔浓度进行监测, 其中 1~9 号监测点位于管廊进气口一侧, 11~19 号监测点位于管廊出气口一侧, 具体监测点坐标见表 1。

表 1 监测点坐标

Tab.1 Monitoring point coordinates mm

监测点	X	Y	Z	监测点	X	Y	Z
1	0	1000	0	11	0	100000	0
2	0	10000	0	12	0	110000	0
3	0	20000	0	13	0	120000	0
4	0	30000	0	14	0	130000	0
5	0	40000	0	15	0	140000	0
6	0	50000	0	16	0	150000	0
7	0	60000	0	17	0	160000	0
8	0	70000	0	18	0	170000	0
9	0	80000	0	19	0	179000	0
10	0	90000	0				

表面网格最小尺寸为 30 mm, 最大尺寸为 300 mm, 计算模型总网格数为 278450, 最大网格倾斜度为 0.43, 平均倾斜度为 0.20, 满足计算精度要求, 具体网格划分如图 2 所示。

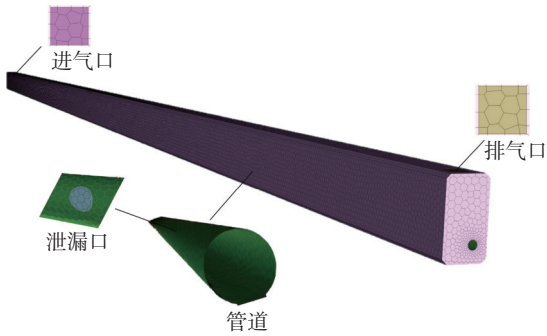


图2 管廊网格示意图

Fig.2 Schematic diagram of pipe gallery grid

2 模型验证

在气体扩散模型的模拟中, 尤其是综合管廊管道意外泄漏的模拟, 模型的性能对于确保气体扩散特性分析的准确性至关重要。通常, 气体扩散模型的验证涉及将模拟结果与实验数据进行比较, 大多数与综合管廊气体泄漏相关的现有实验(特别是旨在验证数值模型的实验)都采用了替代气体^[14-15], 如 CO₂ 等安全气体, 这是因为使用甲烷存在潜在的火灾或爆炸风险。通过将气体扩散模型的预测结果与实验数据进行比较, 研究者能够评估模型在实际应用中的可靠性和准确性^[3,16]。综合考虑模型验证的可行性和实验数据的可用性, 本文利用方自虎等^[17]获得的实验数据验证了本文建立的气体扩散模型的可行性和准确性。

2.1 验证模型

采用双精度的 ANSYS Fluent 软件对方自虎等^[17]的实验进行数值模拟计算。速度压力耦合采用 Simple 算法, 时间采用二阶隐式离散格式, 进气口设置为 Velocity-Inlet, 排气口设置为 Pressure-Outlet, 泄漏口设置为 Mass-Flow-Inlet, 管道壁与管廊壁为无滑移的恒温壁面。

验证模型的尺寸为 10 m×0.15 m×0.15 m, 泄漏点的位置坐标为(0.28, 0, 0), 泄漏的释放流量为 4 L/min, 实验设置了尺寸为 0.01 m×0.01 m 的矩形窗口作为排气口, 排气口表压为大气压力。考虑到甲烷存在潜在的火灾或爆炸风险, 实验使用 CO₂ 作为甲烷的替代气体, CO₂ 气体从直径为 0.02 m 的圆孔泄漏。管内温度取 320 K, 环境温度为 300 K, 初始验证模型内 CO₂ 含量设置为 0, 且气体泄漏过程为连续泄漏且压力不随泄漏过程改变。同时, 实验共使用 49 个气体传感器检测 CO₂ 气体浓度, 传感器沿模型顶部的中心线每隔 0.2 m 均匀布置,

本文建立了与文献 [17] 的实验一致的数值模型, 如图 3 所示。

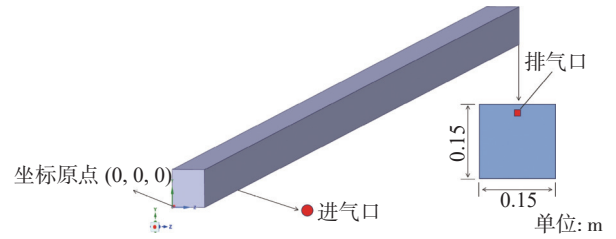


图3 验证模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of validation model

2.2 结果对比

为了定量验证气体扩散模型的有效性, 将本文模型计算得到的 CO₂ 体积分数与文献 [17] 实验中获得的数据进行比较, 图 4 为 CO₂ 在 16 号气体传感器位置的体积分数模拟结果与实验数据的比较。由图可以看出, 气体扩散模型的计算结果与实验数据具有较好的一致性, 随着泄漏后时间的增加, 16 号气体传感器监测得到的 CO₂ 体积分数逐渐增加并趋于稳定, 这与实验所得到的结果一致。同时, 在浓度量值上, 仿真结果与实验数据之间的相对误差小于 10.00%, 最小误差出现在 302 s 时, 仅为 6.55%。图 4 也显示出仿真结果与实验数据之间存在一定的偏差。首先, 测量设备本身的精度限制可能导致数据采集过程中的误差。其次, 实验室环境中的温度和压力波动也可能影响气体扩散的结果。这些因素都可能对气体扩散行为产生影响, 尤其是在长时间的实验中更为明显。综上, 可以得出, 本文的气体扩散模型可以很好地捕捉密闭空间情景下重力驱动气流的扩散行为。因此, 可用于综合管廊场景下气体泄漏和扩散的研究, 且满足精度要求。

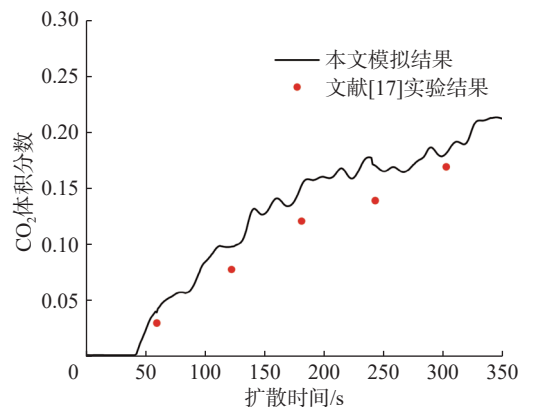


图4 16号监测点结果对比图

Fig.4 Comparison chart of results at monitoring point 16

3 结果分析

本次模拟主要研究甲烷管道气体泄漏在管廊内的扩散特性。

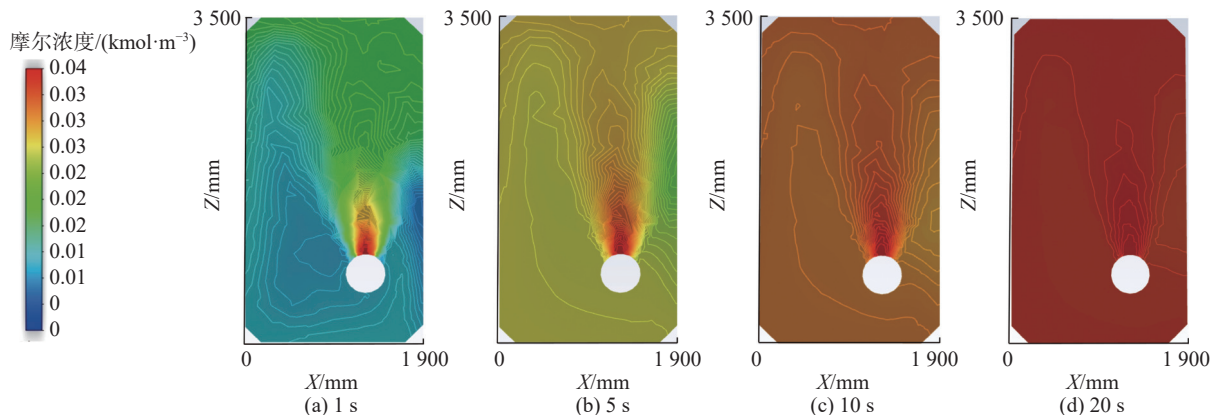


图5 $Y=9000$ 截面上不同泄漏时间的甲烷摩尔浓度分布云图

Fig.5 Cloud map of methane molar concentration distribution at different leakage times at $Y=9000$ plane

在泄漏后的1 s时,甲烷主要集中在泄漏源附近的低区域。至5 s时,高浓度区域显著上升并向外扩展,显示甲烷已开始向上方和周围区域扩散。10 s后,甲烷浓度继续增加并充满整个截面,高浓度区域从管廊底部扩展至接近顶部。至20 s时,甲烷几乎均匀分布在整個截面上,表现出广泛的高浓度区域。

这些现象表明,泄漏发生时,甲烷浓度变化迅速,并且随着时间推移,甲烷逐渐向上扩散,最终影响整个管廊剖面。

图6为甲烷气体在50、200、500、3000 s时, $X=350$ 截面上($Y-Z$ 平面)的摩尔浓度分布云图。

图5为甲烷气体在不同时间节点(1、5、10、20 s)下的 $Y=9000$ 截面上($X-Z$ 平面)摩尔浓度分布云图。随着时间的推移,甲烷浓度从初始的局部高浓度(图5(a))迅速扩散至管廊上方。

观察到气体在泄漏后迅速充满泄漏口周围区域。

在泄漏发生50 s时,甲烷在泄漏源附近形成高浓度区域,气体扩散已占据管廊区域50%以上,甲烷摩尔浓度超过3.5%的范围主要集中在泄漏口周围20 m内。随着时间推移,高浓度区域沿管廊扩散,整体浓度下降。

200 s时,甲烷摩尔浓度沿管廊长度方向的分布更均匀,但泄漏源附近仍为高浓度区,扩散覆盖管廊区域的70%,主要集中在进气口一侧,排气口段管廊区域甲烷摩尔浓度略有降低。500 s后,高浓度区域进一步扩散并减弱,甲烷在管廊中的分布更加均匀。

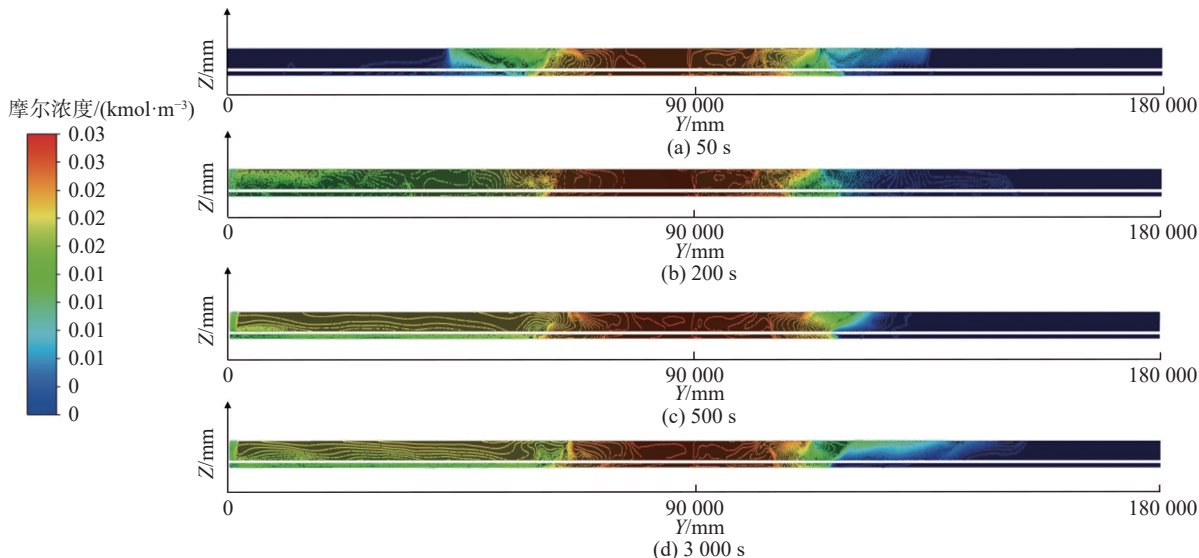


图6 $X=350$ 截面上不同泄漏时间的甲烷摩尔浓度分布云图

Fig.6 Cloud map of methane molar concentration distribution at different leakage times at $X=350$ plane

3000 s时, 甲烷摩尔浓度分布达到相对稳定状态, 泄漏点附近和远端的浓度梯度变得较为平缓。扩散过程表明, 甲烷从高浓度泄漏源开始, 随着时间不断扩散和稀释, 最终在管廊内形成较均匀的混合状态。

进气口引入新鲜空气, 降低了泄漏口附近的甲烷摩尔浓度, 尤其在泄漏初期, 有助于减缓高浓度区域的形成和扩大。排气口通过排出管廊内的气体, 降低总体甲烷摩尔浓度, 尤其在泄漏源附近。长时间后, 排气口帮助实现管廊内气体的均匀分布, 降低事故发生的风险。

图7为各监测点甲烷浓度的变化曲线, 曲线对应不同时间点(10、20、50、200 s)管廊9个位置($Y=10\ 000$ 至 $Y=170\ 000$)的甲烷摩尔浓度变化。

在10 s和20 s时, 靠近泄漏源的位置($Y=90\ 000$ 和 $Y=110\ 000$)甲烷浓度迅速上升, 表明甲烷在泄漏初期迅速扩散。随着距泄漏源距离的增加, 两侧排气口和进气口的正常工作使得两侧浓度上升速度减缓, 因此, 管廊内甲烷浓度随距离增加逐渐稀释。在泄漏发生50 s和200 s后, 所有监测点的甲

烷浓度都有所上升, 但上升速度明显减缓。尤其是在距离泄漏源较远的位置, 由于进气口和排气口保持正常通风换气, 甲烷浓度上升速度更为缓慢。200 s时, 各监测点的浓度曲线趋于平稳, 表明管廊内甲烷形成了一个均匀状态。

这些数据展示了甲烷泄漏后随时间和距离的动态变化过程, 反映出甲烷泄漏后初期浓度迅速上升, 随后逐步趋于稳定和均匀分布的特点。由于进气口不断引入新鲜空气, 稀释了甲烷浓度。随着时间推移, 进气口附近的甲烷与空气达到了准稳态, 最终稳定在1.5%附近; 排气口则通过有效排放保持其附近甲烷浓度在低水平, 靠近排气口的监测点甲烷摩尔浓度曲线始终稳定在0.1%以下。

图7显示的结果强调了通风系统在控制和稀释泄漏气体浓度方面的重要性, 反映出进气口和排气口在泄漏过程中对维持管廊内气体稳定性和安全性的关键作用。

本研究详细分析了甲烷气体在地下综合管廊中的扩散特性, 并观察到甲烷在泄漏点附近会迅速形成高浓度区域。基于这些观察结果, 本文建

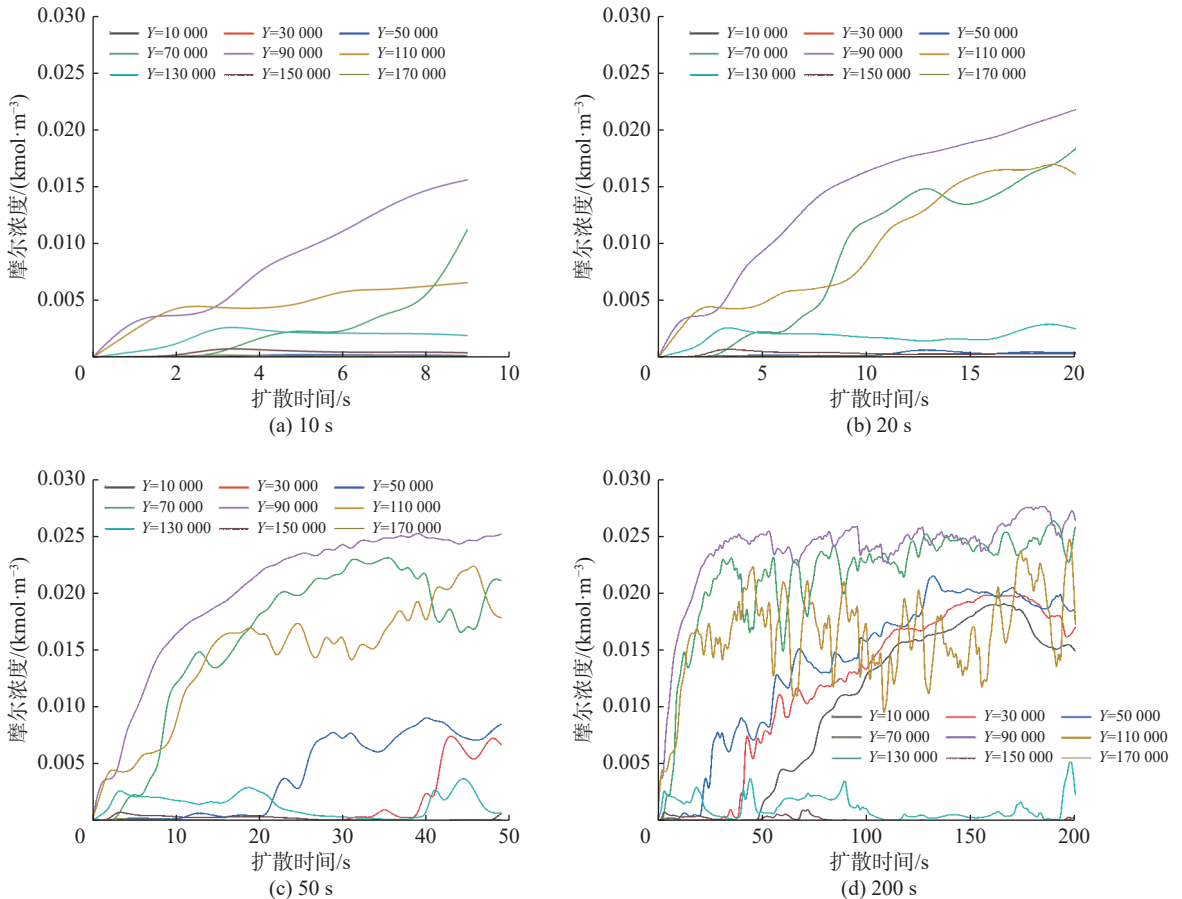


图7 不同时间各监测点处甲烷浓度变化曲线

Fig.7 Methane concentration change curve at each monitoring point at different times

议在管廊的关键位置安装气体警报器,特别是在泄漏源附近以及进气口和排气口区域。

具体而言,根据管廊的长度和复杂程度,以及气体泄漏模拟结果,建议每隔10~15 m设置一个报警器,确保覆盖整个管廊区域,特别是密闭或通风较差的区域。对于特别长或者布局复杂的管廊,需要根据具体情况调整报警器的数量和位置,确保无死角。此外,模拟显示,管廊进气口和排气口附近的甲烷浓度变化较小,建议在这些区域设置额外的监测点,以监控泄漏可能导致的气体扩散,并确保这些区域的空气质量安全。一旦报警器检测到可燃气体浓度超标,立即启动应急预案,包括通知相关人员、启动通风系统和封锁相关区域。

4 结 论

采用数值模拟的方法对管廊燃气舱的天然气泄漏扩散过程进行研究,通过与现有实验数据对比验证了本文模型的有效性,同时定量分析舱内甲烷的浓度分布规律及管廊内甲烷泄漏扩散的浓度范围。结果表明:

a. 在泄漏初期(1~20 s),甲烷浓度变化较大,并迅速形成高浓度区域,呈现向上和向周围快速扩散的趋势;而随着时间的增加,扩散速度逐渐减缓,气体分布趋于均匀。

b. 随着时间的推移,气体浓度分布逐渐均匀化,浓度梯度变得平缓。尤其在200 s时,各监测点的浓度趋向稳定,显示出一个均匀分布的过程。长时间尺度下(如3000 s),气体在初期的快速变化之后,扩散和混合达到动态平衡,最终无明显的高浓度区域。

c. 进气口和排气口在气体泄漏后的扩散过程中起到关键作用。有效的通风系统能够快速稀释泄漏气体,降低事故风险,并帮助气体浓度在长时间尺度下达到相对稳定的分布状态。

d. 在易发生气体泄漏的区域,应安装足够数量的气体报警器,并合理布置报警器位置。及时发现泄漏并启动应急预案,保障人员和设施的安全。合理的报警系统设计能确保全覆盖监测,有效预防和应对气体泄漏事故。

参考文献:

[1] 王雪梅. 入廊天然气管道泄漏扩散模拟与危险性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

- [2] 程猛猛. 城市天然气管道泄漏流场数值分析[D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2014.
- [3] ZHOU K, LI F, CAI H, et al. Experimental and numerical investigation of gas diffusion under an urban underground construction[J]. *Energy and Built Environment*, 2021, 2(4): 436-444.
- [4] LIU X P, PENG Z, LIU X H, et al. Dispersion characteristics of hazardous gas and exposure risk assessment in a multiroom building environment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(1): 199.
- [5] SIDDIQUI M, JAYANTI S, SWAMINATHAN T. CFD analysis of dense gas dispersion in indoor environment for risk assessment and risk mitigation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 209-210: 177-185.
- [6] BU F X, LIU Y, LIU Y B, 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.
- [7] BU F X, LIU Y, CHEN S Q, et al. Analysis and prediction of methane invasion distance considering real ground boundary[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(43): 29111-29125.
- [8] 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.
- [9] 董刚, 唐维维, 杜春, 等. 高压管道天然气泄漏扩散过程的数值模拟[J]. *中国安全生产科学技术*, 2009, 5(6): 11-15.
- [10] 付吉强, 熊新强, 王芸, 等. 架空含硫天然气管道泄漏扩散数值模拟研究[J]. *当代化工*, 2011, 40(10): 1079-1083.
- [11] 曹博宇. 城市燃气管网泄漏诊断及应急研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018.
- [12] 吴欢. 综合管廊燃气舱事故通风方案优化及爆炸危害性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [13] 邹彬, 周军, 薛小兵, 等. 宜兴抽水蓄能电站地下交通洞通风换热效果研究[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(12): 104-107.
- [14] ZHOU K, LI F, CAI H, et al. Estimation of the natural gas leakage source with different monitoring sensor networks in an underground utility tunnel: from the perspectives of energy security[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 254: 111645.
- [15] YAN Y T, DONG X Q, LI J M. Experimental study of methane diffusion in soil for an underground gas pipe leak[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 27: 82-89.
- [16] WANG X M, TAN Y F, ZHANG T T, et al. Diffusion process simulation and ventilation strategy for small-hole natural gas leakage in utility tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 97: 103276.
- [17] 方自虎, 蔺宏, 黄鹄, 等. 管廊内燃气泄漏扩散的模型试验与数值仿真[J]. *工程力学*, 2006, 23(9): 189-192.