

基于 FLUENT 的埋地天然气管道泄漏数值模拟

郭逸文¹, 龚思璠², 王鹏飞^{1*}

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南省特种设备检验检测研究院, 湖南 长沙 410117)

摘要: 为研究埋地天然气管道泄漏扩散影响因素, 建立埋地天然气管道三维模型, 采用 FLUENT 软件模拟研究管道入口压力、泄漏孔尺寸、泄漏孔位置等参数对天然气泄漏量和扩散范围的影响。结果表明: 泄漏孔周围温度等值线呈球形分布, 泄漏的天然气呈球状扩散; 随着管道入口压力及泄漏孔尺寸增大, 天然气泄漏量越大, 扩散范围也越大; 埋地天然气管道向下泄漏时, 天然气扩散范围小于向上泄漏和侧面泄漏的情形。

关键词: 埋地管道; 天然气; 泄露扩散; 数值模拟

中图分类号: X937

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)01-0035-06

Numerical Simulation Buried Natural Gas Pipeline Leakage Based on FLUENT

GUO Yiwen¹, GONG Sifan², WANG Pengfei¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Special Equipment Inspection and Testing Institute, Changsha 410117, China)

Abstract: In order to study the influencing factors of leakage diffusion of buried natural gas pipeline, a three-dimensional model of buried natural gas pipeline is established, and FLUENT software is used to simulate and study the influences of different pipeline inlet pressures, leakage hole sizes, leakage hole locations and other parameters on the amount of natural gas leakage and diffusion range. The simulation results show that the temperature contour around the leakage hole is spherical, and the leaked natural gas spreads spherically; with the increase of the pipeline inlet pressure and the size of the leakage hole, the larger the amount of natural gas leakage, and the larger the natural gas spreading range. When the buried natural gas pipeline is leaking downward, the spreading range is smaller than that of the upward leakage and the lateral leakage.

Keywords: buried pipelines; natural gas; leakage diffusion; numerical simulation

埋地天然气管道是城市的重要基础设施之一, 遍布整个城市, 因此, 确保埋地天然气管道安全、平稳以及高效运行已经成为一项长期的重大任务^[1]。天然气在埋地管道运输过程中, 由于自然因素或人为因素导致管道泄漏, 易引起火灾、爆炸等事故, 造成环境污染、人员伤亡和经济损失^[2]。因此, 研究埋地天然气管道泄漏扩散情况, 对事故的预防及处理具有重要意义。

在埋地管道泄漏研究方面, 国内外学者进行了大量的研究。李又绿等^[3]通过分析高斯(Gaussian)模型^[4]、Sutton模型^[5]和重气模型等常见气体扩散数学模型在模拟天然气管道泄漏扩散过程中的局限性, 建立了适合天然气管道泄漏特点的扩散模型; Hideki Okamoto等^[6]通过实地考察和试验验证, 研究了埋地天然气管道泄漏扩散范围和时间; 李朝阳等^[7]利用计算流体力学(CFD)软件对架空及埋地含硫天然气管道

穿孔泄漏后的甲烷、硫化氢气体的扩散进行研究;刘爱华等^[8]通过试验得出孔隙度和土壤阻力系数等土壤扩散控制方程的关键参数,并运用模拟软件研究管道埋深及泄漏孔径对燃气沿土壤—大气扩散规律的影响;黄雪驰等^[9]考虑障碍物对环境风场的影响,利用 CFD 软件建立天然气管道三维泄漏模型,分析天然气泄漏扩散规律;王江萍等^[10]的研究表明天然气在土壤中流动会引起土壤温度场的变化,且温度场具有一定规律;常欢等^[11]运用 CFD 软件对城市直埋天然气管道泄漏进行模拟,分析得到不同土壤中天然气的扩散速度和质量分数的变化规律;李鹤等^[12]建立埋地输气管道泄漏前、后的二维物理模型和数学模型,并给出相应的边界条件,得到不同工况下管道泄漏后周围土壤温度场的分布情况,该研究对当前广泛应用的光纤传感器的现场应用有一定的指导意义;罗涛等^[13]通过 CFD 软件对不同土壤工况影响下的埋地天然气管道泄漏扩散过程进行仿真模拟,得出天然气扩散规律;刘敏鸿等^[14]针对城镇中压燃气管道与周围土壤地表,研究城镇燃气管道在不同地表和不同泄漏压力下的扩散特征和危害。

当前对天然气泄漏模拟的研究多采用二维模型,主要研究管道泄漏后温度场变化情况和不同土壤、不同地表等因素对天然气扩散的影响.本文建立埋地天然气管道泄漏的三维模型,利用计算流体力学软件 FLUENT 进行数值模拟,探究管道入口压力、泄漏孔尺寸和泄漏孔位置对天然气泄漏量及扩散范围的影响,为天然气管道泄漏扩散研究提供参考。

1 模型建立

1.1 物理模型

1.1.1 几何模型

埋地天然气管道几何模型如图1a所示,模拟区域为 3.0 m×2.5 m×5.0 m 的三维空间,泄漏孔位于距管道入口 2.5 m 处的管道上方.天然气管道外径为 200 mm,管道埋地深度为 1.9 m.采用 Mesh 软件进行网格划分,网格类型为非结构化网格,模型网格划分如图 1b 所示.为提高网格计算精度,对泄漏孔区域网格进行局部加密,所划分的网格基本满足模拟需要。

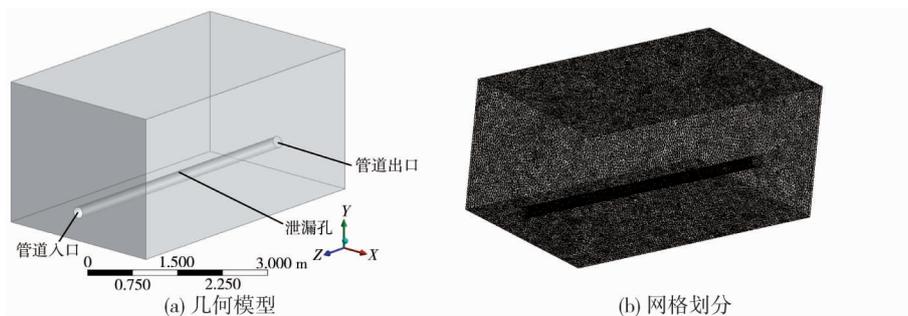


图1 埋地天然气管道几何模型及网格划分

1.1.2 边界条件

假设模型中所有壁面均为绝热壁面.土壤设置为多孔介质区域,均质且各向同性,密度为 2 650 kg/m³,导热系数为 1.8 W/(m·k).天然气组分以甲烷(CH₄)为主,含少量的其他气体,模拟过程中以甲烷为研究对象进行模拟计算^[15].

1.2 数学模型

天然气输送以埋地管道传输为主,土壤颗粒间有发达的孔隙结构,数值模拟过程中将土壤部分视为多孔介质区域,假设在天然气泄漏过程中土壤的空间结构不会改变,泄漏的天然气不会与周围土壤发生化学反应,并忽略气体与土壤之间的传热,只发生传质过程.埋地天然气管道泄漏扩散主要遵循质量守恒定律、能量守恒定律和动量守恒定律。

1.2.1 质量守恒方程

质量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

式中: ρ 为气体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u_x, u_y, u_z 为气体扩散速度 \mathbf{u} 在 x, y, z 方向的分量, m/s .

1.2.2 能量守恒方程

能量守恒方程为^[16]

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla[\mathbf{u}(\rho E + p)] = \nabla[k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\boldsymbol{\tau}_{\text{eff}} \mathbf{u})] + S_h. \quad (2)$$

式中: E 为流体微团的总能, J/kg ; p 为气体压力, Pa ; k_{eff} 为有效热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; h_j 为组分 j 的焓, J/kg ; J_j 为组分 j 的扩散通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $\boldsymbol{\tau}_{\text{eff}}$ 为有效应力张量; S_h 为包含化学反应热及自定义的体积热源项, J .

1.2.3 动量守恒方程

动量守恒方程为^[16]

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \boldsymbol{\tau}. \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量, 且 $\boldsymbol{\tau} = \mu(\nabla \mathbf{u} - \frac{2}{3} \nabla \mathbf{u} \mathbf{I})$, 其中 μ 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; \mathbf{I} 为单元张量.

1.3 扩散模型

泄漏的天然气管道在土壤孔隙中的流动为湍流流动, 属于中等复杂流动, 本文选用 RNG (Re-normalization group, 重整化群) $k-\varepsilon$ 模型进行求解, 该模型适用于模拟复杂度适中的流动现象, 可有效预测天然气在土壤中的流动^[17-18]. 标准 $k-\varepsilon$ 模型对高 Re (雷诺数) 的湍流流动有较好的模拟效果, RNG $k-\varepsilon$ 模型在标准 $k-\varepsilon$ 模型基础上变形, 对低 Re 流动也有较好的模拟效果, 完善了标准 $k-\varepsilon$ 模型对个别复杂流动模拟不精确的不足.

2 数值模拟及结果分析

2.1 泄漏的天然气管道在土壤中扩散特点分析

当泄漏孔直径为 20 mm, 泄漏孔位于管道上方, 管道压力为 0.25 MPa, 埋深为 1.9 m 时, 设置地表温度为 298 K, 底部温度为 292 K, 模拟天然气管道在土壤中泄漏扩散过程. 不同扩散时间下, 泄漏孔附近土壤中天然气质量分数分布如图 2 所示. 由图 2 可知, 管道泄漏孔附近甲烷质量分数不断增大, 甲烷由泄漏孔向土壤中不断扩散, 泄漏孔周围形成甲烷高质量分数区域. 模拟结果表明: 埋地天然气管道在发生泄漏后, 泄漏的甲烷首先接触土壤, 扩散至多孔介质间隙, 甲烷穿过泄漏孔垂直于地面呈轴对称分布, 由高质量分数区向低质量分数区扩散; 在管道左右两侧土壤中, 甲烷质量分数的分布特点一致, 符合现实情况; 随着泄漏时间的增加, 甲烷扩散范围越大.

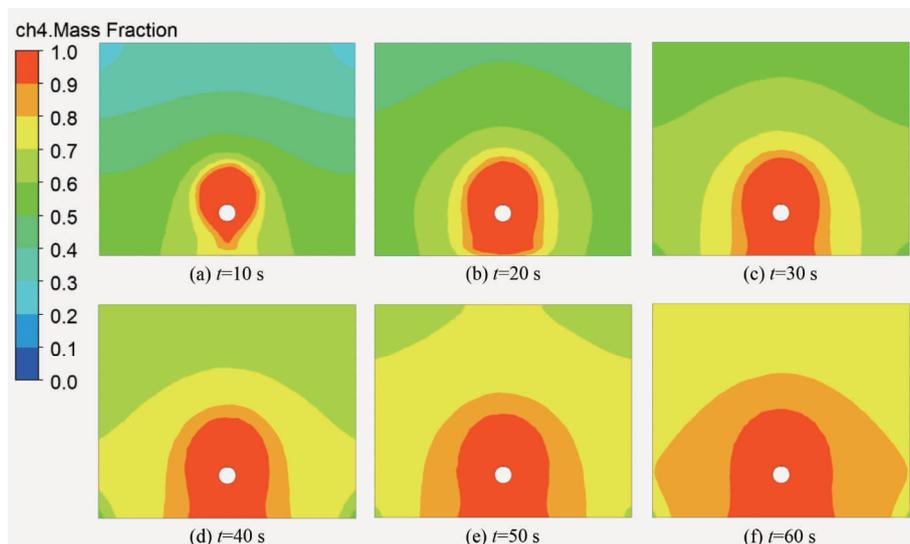


图 2 不同扩散时间下泄漏孔附近的甲烷质量分数分布

天然气泄漏过程中泄漏孔附近土壤的温度变化如图3所示.由图3可知,当埋地天然气管道发生泄漏时,泄漏的天然气引起管道周围土壤温度发生变化,泄漏孔附近土壤的温度上升,从泄漏孔处向四周温度逐渐降低,管道周围土壤温度等值线呈球形分布.

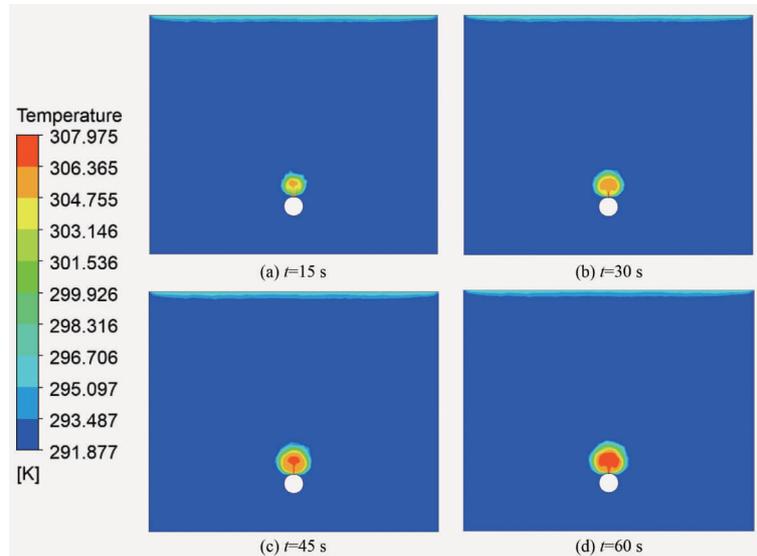


图3 不同扩散时间下泄漏孔附近土壤的温度分布

2.2 影响因素分析

2.2.1 管道入口压力

天然气管道中的气体压力随管道所处地理位置和输送距离等因素而发生变化,本节模拟埋地天然气管道在管道入口不同压力下发生泄漏时,天然气在土壤中的扩散状况.设置管道入口压力为0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6 MPa,统一设置其他边界条件:天然气管道直径为200 mm,泄漏孔直径为20 mm,管道埋地深度为1.9 m,土壤孔隙率为0.45.在管道入口不同压力下,泄漏时间为60 s时,泄漏的甲烷质量分数分布如图4所示.由图4可知,管道入口压力较小时,管道内部与土壤区域的压力梯度较小,甲烷气体泄漏扩散缓慢.相同时间内,随着管道入口压力的增大,甲烷扩散越快,甲烷扩散距离越远.

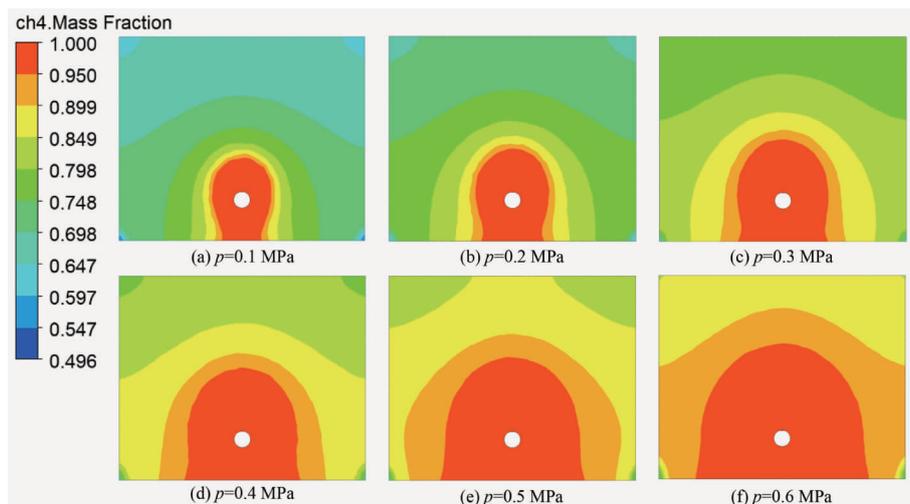


图4 管道入口不同压力下泄漏孔附近的甲烷质量分数分布

2.2.2 泄漏孔尺寸

模拟泄漏孔直径为10,15,20,25 mm情况下埋地天然气管道泄漏状况,统一设置其余边界条件.图5为不同泄漏孔尺寸下天然气泄漏60 s时泄漏孔附近甲烷质量分数的分布变化.由图5可知,相同时间内,泄漏孔孔径越大,甲烷质量分数增长越快,同一区域内甲烷质量分数越高,甲烷扩散距离越远.

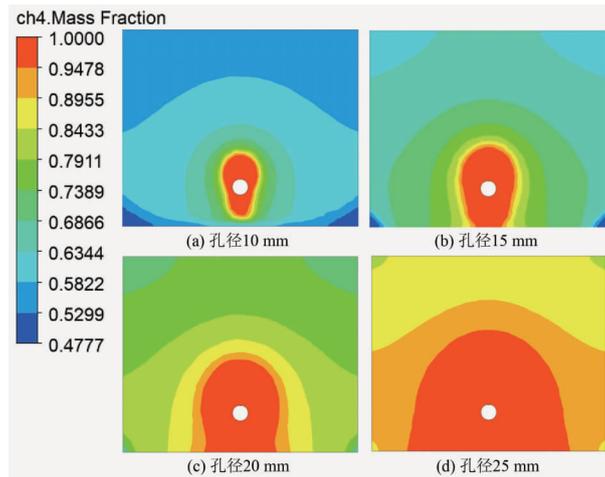


图 5 不同泄漏孔尺寸下泄漏孔附近的甲烷质量分数分布

2.2.3 泄漏孔位置

模拟泄漏孔位置分别在管道正上方、管道正下方以及管道侧面(左侧)时埋地天然气管道泄漏状况,统一设置其余边界条件.图 6 为不同位置的泄漏孔在泄漏发生 60 s 时孔附近的甲烷质量分数分布图.由图 6 可知,泄漏孔位于管道正下方时甲烷的扩散范围比泄漏孔位于管道正上方和侧面时小,这是因为泄漏孔位于管道正下方时,泄漏天然气的初速度朝下,而甲烷密度比空气密度小,两者相互作用使得泄漏孔位于管道正下方时甲烷的扩散速度减慢.

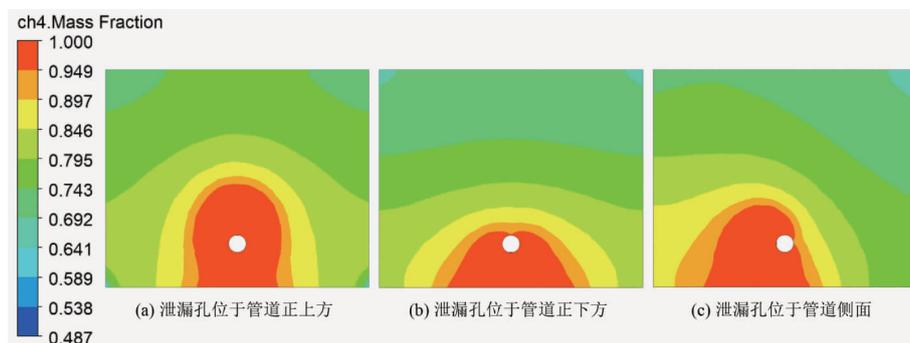


图 6 不同位置泄漏孔附近的甲烷质量分数分布

3 结论

- 1) 埋地天然气管道发生泄漏后,管道周围温度发生变化,温度等值线呈球形分布.
- 2) 埋地天然气管道发生泄漏时,泄漏的天然气主要是呈球状扩散.
- 3) 管道入口压力及泄漏孔尺寸增加,天然气扩散范围及泄漏量增大.
- 4) 管道周围的温度及甲烷质量分数的变化可作为埋地天然气管道泄漏孔定位的依据.

参考文献:

- [1] 朱庆杰,赵晨,陈艳华,等.埋地天然气管道泄漏的影响因素及保护措施[J].环境工程学报,2018,12(2):417-420.
- [2] 王玮,沈功田,任吉林,等.在用埋地管道泄漏监测与检测技术综述[J].中国特种设备安全,2009,25(9):55-58.
- [3] 李又绿,姚安林,李永杰.天然气管道泄漏扩散模型研究[J].天然气工业,2004,24(8):102-104.
- [4] MOHAN M, PANWAR T S, SINGH M P. Development of dense gas dispersion model for emergency preparedness[J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(16): 2075-2087.
- [5] KHRISTENKO Y A, TOMILIN V P, RYAZHSKIY V I. Mathematical model for nonstationary regime of gaseous hydrogen

- outflow from vertical pipelines to atmosphere[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1999, 24(12) : 1171-1176.
- [6] 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.
- [7] 李朝阳,马贵阳,徐柳.架空及埋地天然气管道泄漏扩散数值研究[J].*中国安全生产科学技术*,2011,7(7) :66-69.
- [8] 刘爱华,陈柯,黄检,等.土壤-大气中燃气泄漏扩散规律研究[J].*中国安全科学学报*,2018,28(3) :31-37.
- [9] 黄雪驰,马贵阳,王锡钰,等.基于稳定风场的埋地天然气管道泄漏数值模拟[J].*中国安全生产科学技术*,2016,12(1) : 96-101.
- [10] 王江萍,韩路.基于 Fluent 的天然气管道泄漏传质传热研究[J].*西安石油大学学报(自然科学版)*,2020,35(5) : 108-115.
- [11] 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.
- [12] 李鹤,封辉,池强.埋地天然气管道泄漏温度场模拟[J].*山东化工*,2021,50(5) :145-149.
- [13] 罗涛,马海峰,胡坤,等.埋地燃气管道泄漏气体扩散机理分析[J].*应用力学学报*,2021,38(6) :2405-2410.
- [14] 刘敏鸿,刘成良,翁韦强,等.基于 CFD 埋地燃气管道泄漏三维数值模拟[J].*煤气与热力*,2022,42(5) :11-15.
- [15] 葛岚,吴明,赵玲,等.埋地天然气管道泄漏扩散数值模拟[J].*辽宁石油化工大学学报*,2014,34(5) :19-22.
- [16] 韩策,吴明,赵梁,等.基于 FLUENT 的架空天然气管道泄漏数值模拟[J].*辽宁石油化工大学学报*,2014,34(6) :30-34.
- [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.
- [18] 韩路.埋地天然气管道泄漏扩散的数值模拟研究[D].西安:西安石油大学,2020.