

高含硫天然气管道泄漏 H₂S 扩散规律研究

苏诗漫¹, 王浩丞², 史春艳¹, 刘名名²

(1. 中国石油西南油气田分公司 川东北气矿, 四川 达州 635000;

2. 成都理工大学 能源学院, 成都 610059)

[摘要] 在高含硫天然气管道中, 泄漏事故的风险较高, 一旦事故发生, 将对周围建筑和居民安全构成严重威胁。本研究聚焦于含 5% 硫化氢(H₂S)的天然气管道, 利用计算流体力学方法对水平泄漏扩散进行了数值模拟。特别研究了风速对泄漏口上游建筑各楼层硫化氢体积分数的影响。主要发现包括: (1) 通过在仿真的房屋模型中各楼层设置监测点, 观察到随着楼层增高, H₂S 气团扩散至房间的时间显著缩短。(2) 随着风速的变化, 位于高层(第 11 层至第 24 层)的房间内 H₂S 气团扩散时间随风速的增加而减少。而对于低层(第 1 层至第 10 层)的房间, 在风速低于 9 m/s 时, H₂S 气团扩散时间随风速增加而延长; 但当风速超过 9 m/s 时, 扩散时间随风速增加而缩短。这些结果为高含硫天然气管道泄漏事故的应急响应和安全管理提供了重要参考。

[关键词] 天然气管道; 数值模拟; 泄漏扩散; 硫化氢

[分类号] TE973.6

[文献标志码] A

Study on the H₂S diffusion law of high sulfur gas pipeline leakage

SU Shiman¹, WANG Haocheng², SHI Chunyan¹, LIU Mingming²

1. Southwest Branch Company of Oil Gas Field Northeast Gas Mine Xuanhan Gas Sampling Operation, Dazhou 635000, China;

2. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: High sulfur gas pipelines pose a significant threat of leakage accidents, which can endanger individuals residing in surrounding structures. This study examined the dispersion of horizontal leakage in natural gas pipelines containing 5% hydrogen sulfide (H₂S) through numerical simulations using a computational fluid dynamics approach. The study examined the impact of wind speed on the volume ratio of H₂S on each story of a building upstream of a leakage. Key results showed that (1) a significant reduction in the time taken for H₂S gas mass to diffuse into a room occurs with an increase in story height, as observed through monitoring points installed at each story in the simulated house model. (2) The diffusion time of H₂S air masses in upper floor rooms (from the 11th to the 24th floors) decreased with increasing wind speed. Conversely, the H₂S gas cluster diffusion time in lower

[收稿日期] 2022-10-10。

[基金项目] 四川省区域创新合作基金项目(2023YFQ0111)。

[第一作者] 苏诗漫(1993—), 女, 工程师, 研究方向: 安全环保, E-mail: 398793149@qq.com。

[引用格式] 苏诗漫, 王浩丞, 史春艳, 等, 2024. 高含硫天然气管道泄漏 H₂S 扩散规律研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(1): 130-136.

Su S M, Wang H C, Shi C Y, et al., 2024. Study on the H₂S diffusion law of high sulfur gas pipeline leakage [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(1): 130-136.

floor rooms (from the 1st to the 10th floors) was prolonged with greater wind speeds when the wind speed was lower than 9 m/s; however, the diffusion time became shorter as the wind speed exceeded 9 m/s. These results provide an important reference for emergency response and safety management of high sulfur gas pipeline leakage accidents.

Key words: natural gas pipeline; numerical simulation; leakage diffusion; hydrogen sulfide

天然气管道在国民经济发展中发挥着重要作用。但是经过长时间的使用,管道会发生腐蚀和破坏极易造成天然气泄漏。一旦天然气发生泄漏,不仅会造成巨大的经济损失,而且会严重破坏生态环境甚至会威胁人民群众的生命安全(张俊卿, 2020;王慎铭, 2021)。因此,对天然气管道泄漏问题开展研究工作,具有重要的工程应用价值。

鉴于天然气泄漏问题的严重性,大量的学者对该问题进行了研究。刘延雷等(2008)模拟并研究了氢气和甲烷在垂直方向上的泄漏扩散。董刚等(2009)使用 CFD 方法模拟了开阔环境下高压天然气管道的泄漏扩散过程,其考虑了水平方向来风的风速大小对于垂直方向的泄漏的影响。张宝柱等(2013)以及于洪喜等(2008)使用 CFD 软件 FLUNET 对高含硫天然气管道泄漏扩散过程进行了模拟,其对比了硫化氢和甲烷在风力作用下的扩散状态。黄雪驰等(2017)研究了架空天然气管道泄漏口垂直向下时泄漏压力和风力对泄漏天然气浓度边界的影响。刘凯(2019)模拟了天然气管道泄漏过程中当泄漏孔径,风力和温度发生改变时,焦耳汤姆森效应对天然气管道泄漏过程的影响。付建民等(2014)以及 Stewart (2020)研究了气体泄漏时矩形方孔和圆形方孔对于泄漏速率的影响。不少学者研究了圆柱形和球形障碍物、管架以及地面与射流口的距离对于泄漏扩散的影响(Colombini et al., 2019, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b, 2022a, 2022b)。Nascimento et al. (2021)针对具体的泄漏情况建立了快速的经验模型以准确预测泄漏危险区域的范围。Shen et al. (2022)研究了不同数量和位置的风速入口对靠近不平坦地形气体扩散和流动的影响。Birch et al. (1984)研究了使用一个伪直径代替射流口的实际直径以用亚临界释放方程来描述超临界射流的浓度衰减行为。

上述研究者们主要研究了泄漏过程中风力的影响、不同泄漏方向的影响、泄漏口形状的影响、泄漏温度、泄漏压力的影响以及障碍物的影响。但是研究中缺乏对水平泄漏时逆流方向来风对泄

漏扩散的影响并且缺乏对泄漏口上游的气体扩散情况的研究。因此本文对高压高含硫天然气管道发生水平泄漏时,在逆流来风的影响下泄漏气体对于泄漏口上游建筑的影响展开了研究。

1 控制方程及边界条件

1.1 控制方程

不可压缩粘性牛顿流体的连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, kg/m³; t 为时间, s; u 为速度, m/s; 动量方程的表达式如下:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} = -g \sin \theta - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\lambda u^2}{D} \rho \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度, m/s²; θ 为管道倾角, rad; λ 为沿程阻力系数; D 为管道直径, m; p 为管道气体压力, Pa。

能量方程表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{u^2}{2} + gz \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \left(h + \frac{u^2}{2} + gz \right) \right] = -\rho u \frac{\partial H}{\partial x} \quad (3)$$

式中: H 为单位质量气体向外界放出的热量, J/kg; z 为管道高度, m; h 为气体的焓, J/kg; e 为气体内能, J/kg。

1.2 天然气管道泄漏几何模型与网格划分

计算区域为 103 m × 126.2 m 的矩形。天然气管道模型的直径为 1 m, 距离左端来流段 100 m, 底部处于距离计算区域底面 4.5 m 处的位置。天然气泄漏口在管道的最左端, 孔径为 0.05 m。在天然气管道右侧距离管道 20 m 处为总高度 76.8 m 的 24 层房屋模型, 该房屋模型每层楼高 3.2 m 并且每层的房间中均有 0.4 m 高的窗户和 2.2 m 高的门, 假设窗户和门均为敞开的状态以模拟最坏的情况。计算区域的上方以及每层房屋的门设置为压力出口边界, 计算域左侧的入风口和天然气泄漏口采用速度入口边界条件, 其余部分为无滑移的壁面边界条件, 计算域尺寸以及边界条件示意图如图 1 所示。

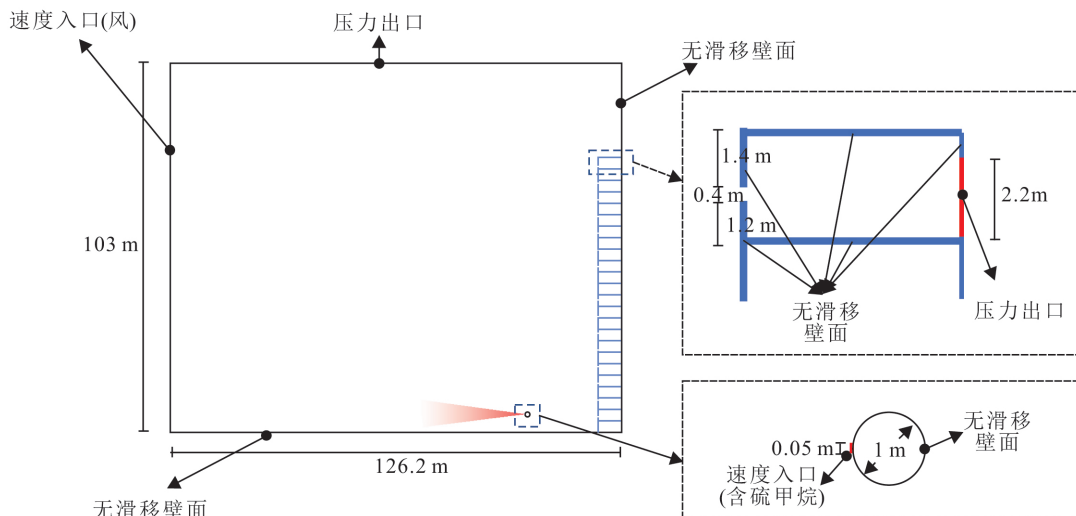


图 1 计算域几何模型尺寸及边界条件图

Fig. 1 Computation domain and boundary conditions

在网格划分时,由于考虑到天然气射流过程中在泄漏口附近为射流的核心区域,因此对泄漏口以及附近区域的网格进行了加密优化。由于房屋模型窗户处高度仅有 0.4 m,因

此也需要对该区域进行加密优化。通过对部分区域进行网格加密,可在保证计算准确度的前提下,提高计算效率,具体网格划分如图 2 所示。

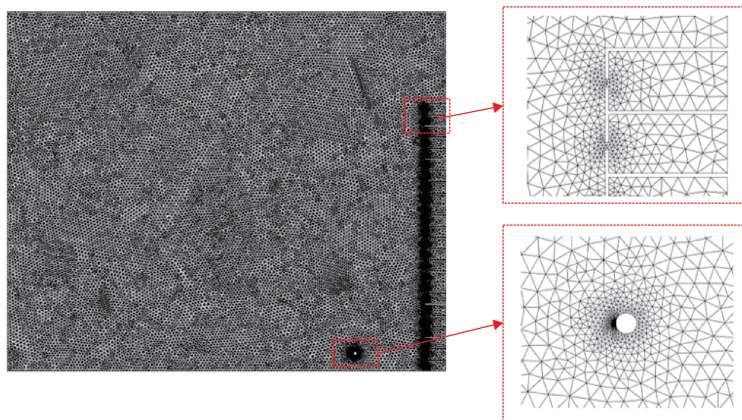


图 2 计算域网格划分示意图

Fig. 2 Computational domain meshing diagram

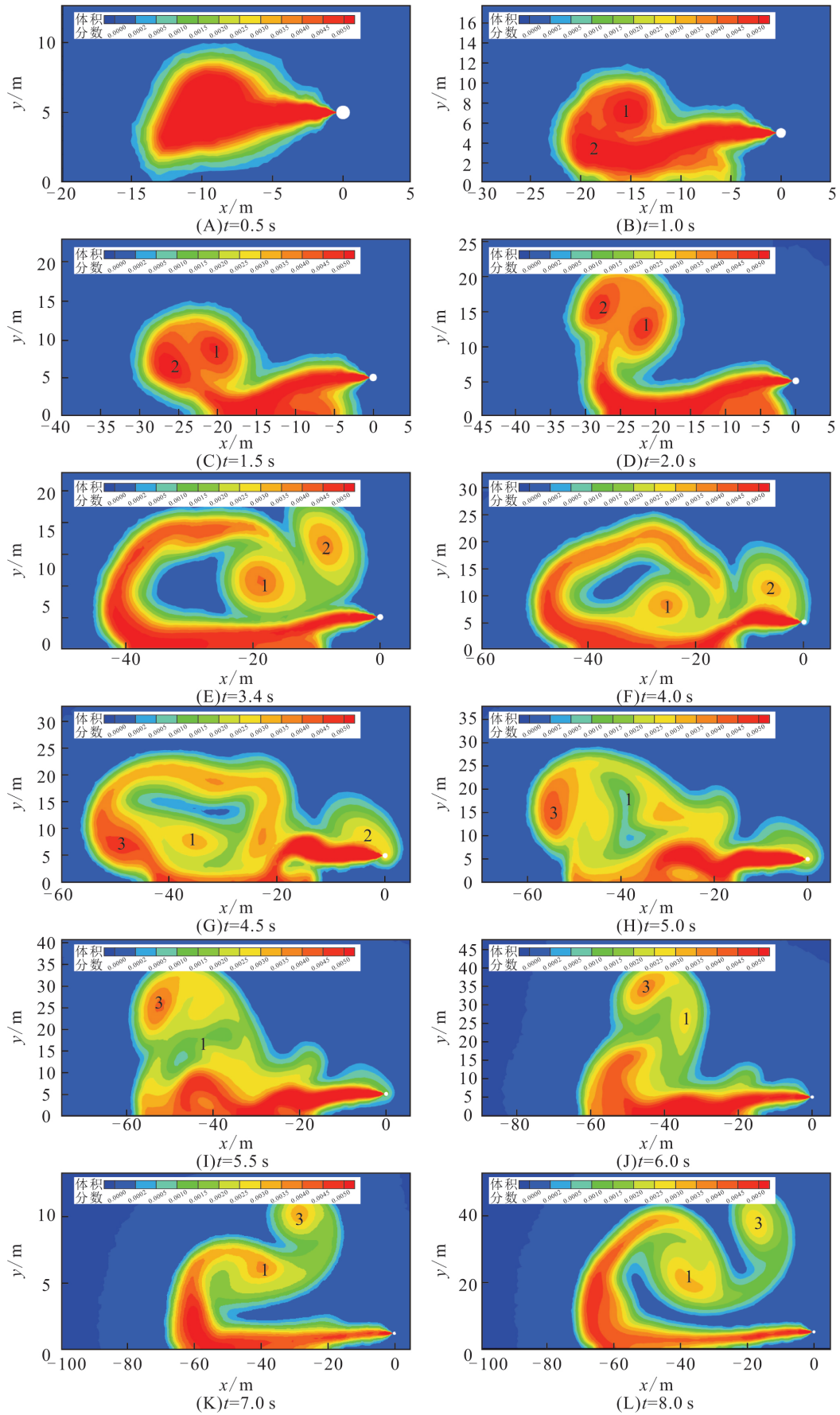
1.3 计算条件设置

计算软件使用自主开发的软件,计算时间类型采用瞬态计算。由于本文泄漏气体考虑为不可以压缩气体,因此求解器选择的是基于压力的求解器而求解方法采用非耦合求解。计算区域内参考压力设置为标准大气压,即 101 325 Pa,重力加速度取值为 -9.81 m/s^2 ,空气密度设置为 1.225 kg/m^3 ,在计算过程中设置风速分别为 6 m/s,9 m/s,12 m/s 和 15 m/s。本文采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型。在组分运输模型中设置泄漏口处

甲烷和硫化氢含量分别为 95%和 5%。为模拟小孔泄漏的情况本文参考张琼雅(2013)文中推导的小孔模型的泄漏速度计算公式,得到泄漏口速度为 418 m/s,而其余边界条件设置按照图 2 所示设置,计算步长设置为 0.001 s。

2 结果分析

图 3 给出了风速为 6 m/s 情况下, H_2S 浓度图。从图 3 中可以发现,在泄漏发生后高速射出的泄漏气体卷吸周围的空气并沿着射流中心向



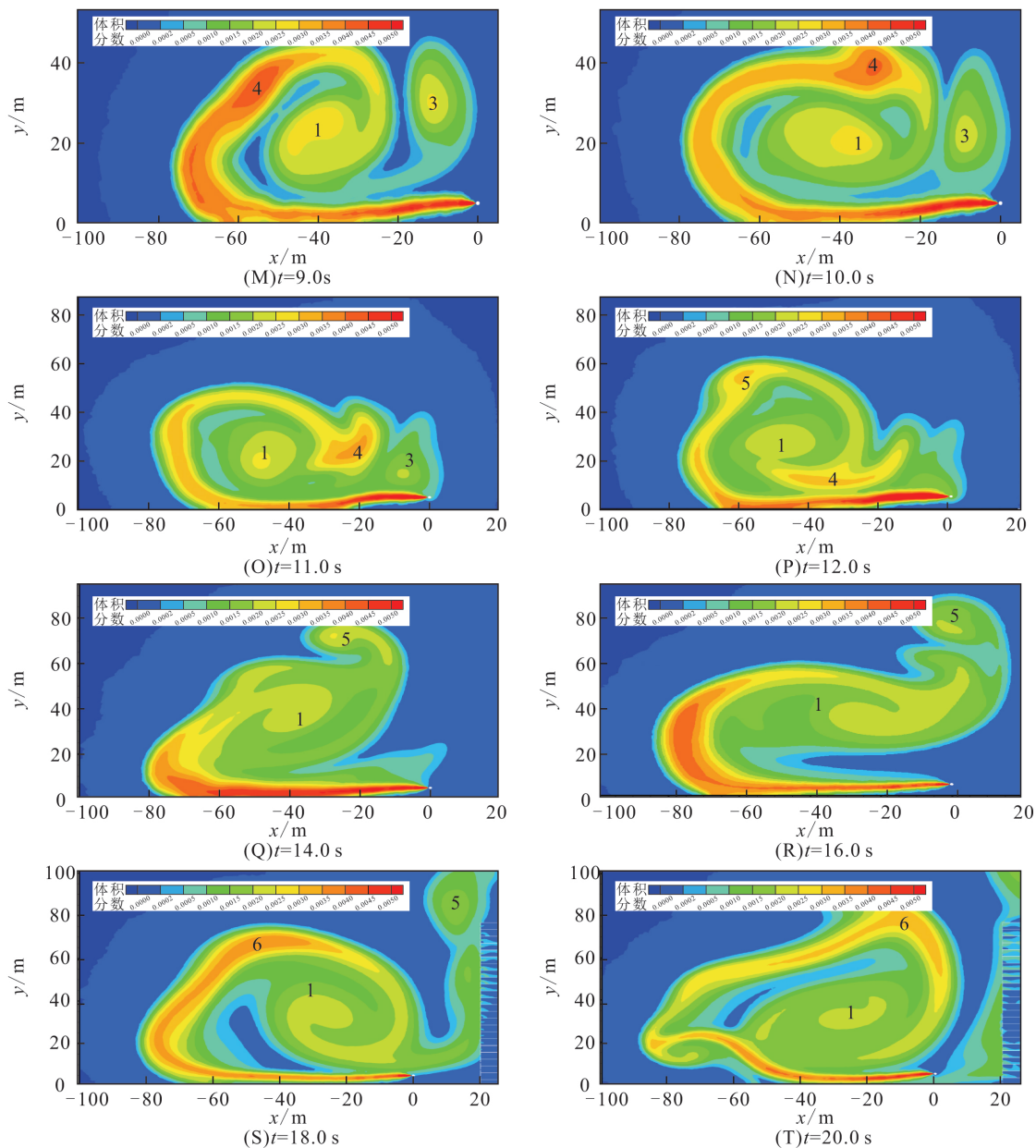


图 3 风速为 6 m/s 时硫化氢泄漏浓度扩散发展图

Fig. 3 Diffusion development diagram of hydrogen sulfide leakage concentration when the wind speed is 6 m/s

下游发展。随着泄漏的发展,由于位于泄漏口下方 5 m 处为地面而上方为开阔的空间,导致泄漏口下侧没有充足的空气和空间以平衡泄漏口上侧的压力,于是泄漏的射流中心向下方倾斜 (Columbini et al., 2020b) 如图 3-A 所示。随后泄漏气体与地面接触在相互作用下使得泄漏向上方偏移并且在沿着射流中心的上下两侧分别形成了两个 H₂S 气团,在图 3-B 中分别标记为 1 和 2。在风力的作用下向上扩散的气体不断调转方向最终与泄漏上游喷口处的气体汇集,如图 3-C~F 所

示。在汇集的过程中, H₂S 气团 2 在融入了喷口处的气体而逐渐消失, H₂S 气团 1 则不断发展形成更大的 H₂S 气体团;射流的气体形成新的 H₂S 气团在图中标记为 3,如图 3-G, H 所示。随着泄漏的继续发展,在环境力的作用下 H₂S 气团 3 经过发展最终融入上游泄漏口处气体并逐渐消失,而 H₂S 气团 1 则继续扩大成更大的 H₂S 气体团。在此过程中,射流气体继续形成新的 H₂S 气团在图中标记为 4 和 5,如图 3-I~P 所示。H₂S 气团 4 融入上游泄漏口处气体,而 H₂S 气团 1 的范围

继续增大, H₂S 气团 5 在环境力的作用下逐渐脱离 H₂S 气团 1 顺着风速方向发展最终扩散至建筑处, 于此同时射流气体继续形成新的 H₂S 气团 6, 如图 3-Q~T 所示。根据风速为 6 m/s 时 H₂S 浓度图随时间的变化, 观察了在逆向风力的作用下泄漏的硫化氢气体是如何影响与泄漏方向相反位置处的建筑的。其他风速情况下, H₂S 浓度扩散过程与风速为 6 m/s 的情况类似。

泄漏的硫化氢气体扩散至建筑物内会对居民造成危害。当硫化氢体积分数高于 0.02% 时, 对于处于该环境下的人而言硫化氢气体会立即引起呼吸道黏膜和眼睛出现强烈的刺激症状, 在 6~8 min 内人会出现急性眼刺激症状, 而长时间的接触会引起肺部水肿(中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 2015)。因此在模型中每层楼的房间内窗户中间处距离窗口处 0.5 m 处设立检测点, 以检测当泄漏发生时各楼层的硫化氢体积分数。调节左侧速度入口的风速分别为 6 m/s, 9 m/s, 12 m/s, 15 m/s 以模拟不同风速的情况, 通过检测点检测的浓度数据, 记录各楼层在不同风速下自泄漏发生开始直到检测点检测到硫化氢体积分数高于 0.02% 时所用的时间为发生危险的时间如图 4 所示。根据图 4 的信息可以看出在这 4 种风速条件下 30 s 内硫化氢体积分数高于 0.02%

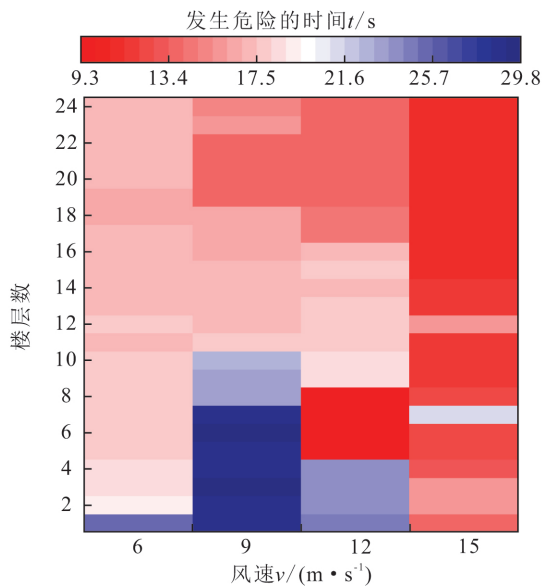


图 4 不同风速下各楼层从泄漏发生到硫化氢体积分数处于危险浓度的时间图

Fig. 4 Time from leakage to the accumulation of a dangerous amount of hydrogen sulfide on each floor under different wind speeds

气体均能够扩散到任意楼层, 并且高楼层相比于低楼层而言能够更快的达到硫化氢危险浓度。风速由 6 m/s 提升至 9 m/s 使得泄漏气体对上层建筑的影响加深而对底层建筑(第 1 层~第 11 层)的影响降低, 而风速从 9 m/s 继续提升至 12 m/s 以及风速从 12 m/s 提升至 15 m/s 时泄漏气体均增大了对各楼层的影响。

3 结论

对高含硫天然气管道发生水平泄漏时, 泄漏过程中硫化氢的扩散过程进行了模拟。通过监测自泄漏发生开始在风速为 6 m/s, 9 m/s, 12 m/s, 15 m/s 情况下, 各楼层硫化氢体积分数达到 0.02% 时的时间, 在计算范围内得出以下结论:

a. 在风力作用下, 泄漏的高含硫天然气能够在短时间内快速扩散至建筑周围, 而且随着楼层增加 H₂S 气团扩散至房间的时间明显加快, 因此当发生泄漏危险时更高楼层的居民更加危险。

b. 随着风速的增加, 高含硫天然气泄漏扩散至建筑周围的时间缩短, 因此风速的增加会加深各楼层的危险程度。

[参 考 文 献]

- 董刚, 唐维维, 杜春, 等, 2009. 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, 5(6): 11-15.
- Dong G, Tang W W, Du C, *et al.*, 2009. Numerical simulations of release and dispersion process from high-pressure natural gas pipeline[J]. Journal of Safety Science and Technology, 5(6): 11-15. (in Chinese)
- 付建民, 赵洪祥, 陈国明, 等, 2014. 裂口几何形态对输气管道小孔泄漏的影响[J]. 天然气工业, 34(11): 128-133.
- Fu J M, Zhao H X, Chen G M, *et al.*, 2014. Impact of a hole's geometrical characteristics on the aperture leakage of natural gas pipelines[J]. Natural Gas Industry, 34(11): 128-133. (in Chinese)
- 黄雪驰, 马贵阳, 杨奇睿, 等, 2017. 天然气管道非稳态泄漏扩散的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 17(1): 183-188.
- Huang X C, Ma G Y, Yang Q R, *et al.*, 2017. Numerical simulation of unsteady leakage and diffusion of the gas pipeline[J]. Journal of Safety and Environment, 17(1): 183-188. (in Chinese)
- 刘凯, 2019. 考虑节流效应的天然气管道泄漏数值模拟[D]. 北京: 中国石油大学(北京).

- Liu K, 2019. The Numerical Simulation of Natural Gas Pipeline Leakage Considering Throttling Effect[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing). (in Chinese)
- 刘延雷, 徐平, 郑津洋, 等, 2008. 管道输运高压氢气与天然气的泄漏扩散数值模拟[J]. 太阳能学报, 29(10): 1252—1255.
- Liu Y L, Xu P, Zheng J Y, *et al.*, 2008. Numerical simulation on the dispersion of hydrogen and natural gas due to high pressured pipeline leakage[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 29(10): 1252—1255. (in Chinese)
- 王慎铭, 2021. 油气田硫化氢危害及安全防护管理[J]. 化工管理, (14): 118—119.
- Wang S M, 2021. Hazard of hydrogen sulfide in oil and gas field and safety protection management[J]. Chemical Enterprise Management, (14): 118—119. (in Chinese)
- 于洪喜, 李振林, 张建, 等, 2008. 高含硫天然气集输管道泄漏扩散数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 32(2): 119—122.
- Yu H X, Li Z L, Zhang J, Zhang Y X, *et al.*, 2008. Numerical simulation of leakage and dispersion of acid gas in gathering pipeline[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 32(2): 119—122. (in Chinese)
- 张宝柱, 侯文祥, 宋永超, 2013. 含硫天然气管道泄漏事故数值模拟与分析[J]. 石油与天然气化工, 42(2): 201—204.
- Zhang B Z, Hou W X, Song Y C, 2013. Numerical simulation and analysis of sulfurous natural gas pipeline leakage accident[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 42(2): 201—204. (in Chinese)
- 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 2015. 硫化氢职业危害防护导则: GBZ/ 259—2014[S]. 北京: 中国标准出版社.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, 2015. Guidelines for protection against occupational hazards of hydrogen sulfide: GBZ/T 259—2014[S]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)
- 张俊卿, 2020. 城市天然气管道泄露危害及预防措施[J]. 中国新技术新产品, (10): 141—142.
- Zhang J Q, 2020. Leakage hazards and preventive measures of urban natural gas pipeline [J]. New Technology & New Products of China, (10): 141—142. (in Chinese)
- 张琼雅, 2013. 城镇天然气管道泄漏扩散的 CFD 模拟及后果分析[D]. 重庆: 重庆大学.
- Zhang Q Y, 2013. CFD Simulation and Effects Analysis of Urban Gas Pipeline Leakage and Diffusion [D]. Chongqing, Chongqing University. (in Chinese)
- Birch A D, Brown D R, Dodson M G, *et al.*, 1984. The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas[J]. Combustion Science and technology, 36(5—6): 249—261.
- Colombini C, Busini V, 2019. Obstacle influence on high-pressure jets based on computational fluid dynamics simulations[J]. Chemical Engineering Transactions, 77: 811—816.
- Colombini C, Carlini L, Rota R, *et al.*, 2020a. Ground interaction on high-pressure jets; Effect on different substances[J]. Chemical Engineering Transactions, 82: 367—372.
- Colombini C, Carminati E, Parisi A, *et al.*, 2022a. Safety evaluations on unignited high-pressure methane jets impacting a spherical obstacle[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 74: 104631.
- Colombini C, Iannantuoni C, Rota R, *et al.*, 2022b. Unignited high-pressure methane jet impacting a cylindrical obstacle; An assessment tool for consequences analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 76: 104593.
- Colombini C, Martani A, Rota R, *et al.*, 2020b. Ground influence on high-pressure methane jets; Practical tools for risk assessment[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 67: 104240.
- Colombini C, Maugeri G, Zanon G, *et al.*, 2021a. Unignited high-pressure methane jet impinging a pipe rack: practical tools for risk assessment [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 69: 104378.
- Colombini C, Pontiggia M, Uguccioni G, *et al.*, 2021b. Ground influence on high-pressure methane jets; Different concentration clouds scenarios[J]. Chemical Engineering Transactions, 86: 541—546.
- Nascimento C A, Luiz A M, Barros P L, *et al.*, 2021. A CFD-based empirical model for hazardous area extent prediction including wind effects[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 71: 104497.
- Shen Z Y, Lang J L, Li M Z, *et al.*, 2022. Impact of inlet boundary number and locations on gas diffusion and flow in a typical chemical industrial park near uneven terrain[J]. Process Safety and Environmental Protection, 159: 281—293.
- Stewart J R, 2020. CFD modelling of underexpanded hydrogen jets exiting rectangular shaped openings[J]. Process Safety and Environmental Protection, 139: 283—296.

(责任编辑: 黄维婷)