



典型可燃气体小孔泄漏危险范围预测模型研究

赵开功 张晓蕾 李长明 陈刚 盖泳伶

引用本文:

赵开功, 张晓蕾, 李长明, 等. 典型可燃气体小孔泄漏危险范围预测模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 281–290.
ZHAO Kaigong, ZHANG Xiaolei, LI Zhangming. Numerical simulation on prediction model of risk range of typical gas release through small holes[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 281–290.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1948>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤炭气化过程数学模型构建的研究进展

Progress on mathematical models construction in coal gasification process

煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4435c3d0-11d0-4d2c-8a84-15ba34f7bdf7>

矿井瓦斯浓度Lagrange-ARIMA实时预测模型研究

Study on Lagrange-ARIMA real-time prediction model of mine gas concentration

煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/98616172-3c0c-47f0-83e5-b4a0ad5f6049>

基于循环神经网络的煤矿工作面瓦斯浓度预测模型研究

Research on prediction model of gas concentration based on RNN in coal mining face

煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/103948b5-8d79-4797-8ccb-4e67a686f21f>

基于瓦斯实时监测的炮掘工作面爆破自动识别与突出危险性预测

Auto-identification of blasting and outburst risk prediction in the blasting driving face based on real-time gas monitoring

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8dcde08d-125d-4f5b-a3c7-4a43547138e0>

基于MPC的瓦斯抽采智能调控模型研究

Research on intelligent control model of gas drainage based on model predictive control

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 82–90 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d060fcdd-85f1-4fc7-bf54-44ecc7e0e642>

导水裂隙带发育高度预测模型对比研究

Comparison of prediction models for the development height of water-conducting fractured zone

煤炭科学技术. 2023, 51(3): 190–200 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0557>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

赵开功, 张晓蕾, 李长明, 等. 典型可燃气体小孔泄漏危险范围预测模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 281–290.

ZHAO Kaigong, ZHANG Xiaolei, LI Zhangming, *et al.* Numerical simulation on prediction model of risk range of typical gas release through small holes[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 281–290.

典型可燃气体小孔泄漏危险范围预测模型研究

赵开功^{1,2}, 张晓蕾^{3,4}, 李长明⁵, 陈刚³, 盖泳伶⁶

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 国家能源投资集团有限责任公司 安全环保监察部, 北京 100011; 3. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012; 4. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083; 5. 国能网信科技(北京)有限公司, 北京 100011; 6. 中国人民解放军 63600 部队, 甘肃 酒泉 732750)

摘要: 为了缓解我国石油资源紧张的现状, 发展合成油工业作为我国石油资源的补充是合理的途径, 而在化工合成中, 大多数反应都需要在加压环境中进行。泄漏是最常见的事故之一, 而现阶段对于加压装置、管道气体泄漏的研究还有待完善。因此, 通过 CFD(计算流体动力学)数值模拟的方法, 以化工合成中常见的气体(H_2 、 CO 、 CH_4)为研究对象, 气体泄漏后危险浓度的范围作为气体泄漏危险范围, 利用 Fluent 软件开展不同工况下气体泄漏扩散模拟, 以研究不同气体、不同泄漏压力、不同泄漏温度以及不同泄漏口直径情况下气体泄漏扩散规律及泄漏危险范围, 并构建泄漏危险范围预测模型。研究表明, 在其他因素不变的条件下, 随着泄漏压力的增大, 气体泄漏危险范围随之增加; 随着气体温度的增大, 气体泄漏危险范围随之明显降低; 随着泄漏口直径的增大, 气体泄漏危险范围随之明显增加。在 3 个变量中, 泄漏口尺寸的增大对于危险范围的扩大最为明显, 当气体泄漏压力由 1 MPa 提高到 2 MPa 时, 3 种气体泄漏危险范围增加 10% 左右; 当气体温度由 300 K 提高到 400 K 时, 3 种气体泄漏危险范围同样增加 10% 左右, 而当泄漏口直径由 2 mm 增加到 3 mm 时, 3 种气体泄漏危险范围增加 50%。通过对于 3 种气体(H_2 、 CO 、 CH_4)数值模拟结果中的泄漏危险范围的长度、宽度数据的定量分析, 并对于参量进行无量纲处理, 最终分别得出 3 种气体(H_2 、 CO 、 CH_4)泄漏危险范围(长度、宽度)的预测模型, 其中泄漏危险范围长度和宽度为压力比和温度比的函数, 预测结果可为泄漏事故救援和应急处理提供参考依据。

关键词: 化工合成; 气体泄漏; 计算流体动力学; 危险范围; 预测模型

中图分类号: TE973

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)03-0281-10

Numerical simulation on prediction model of risk range of typical gas release through small holes

ZHAO Kaigong^{1,2}, ZHANG Xiaolei^{3,4}, LI Zhangming⁵, CHEN Gang³, GAI Yongling⁶

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Department of Safety and Environmental Protection Supervision, CHN Energy, Beijing 100011, China; 3. China Academy of Work Safety, Beijing 100012, China; 4. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 5. CHN Energy Infotech Co., Ltd., Beijing 100011, China; 6. 63600 Troops of PLA, Jiuquan 732750, China)

Abstract: In order to relieve the shortage of petroleum resources, it is a reasonable way to develop synthetic oil industry as a supplement of petroleum resources. In chemical synthesis, most reactions need to be carried out in pressurized environment. Leakage is one of the most common accidents, and the research of gas leakage in pressurizing device and pipeline is still to be improved. Therefore, by CFD numeric-

收稿日期: 2022-11-17 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1948

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074156); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801805); 国家能源集团基金资助项目(10032998IC190047)。

作者简介: 赵开功(1981—), 男, 山东济宁人, 高级工程师, 博士研究生。Tel: 010-58131536, E-mail: smilelevel@163.com

通讯作者: 张晓蕾(1984—), 女, 山西大同人, 高级工程师, 博士研究生。Tel: 010-64954704, E-mail: zhangxl@chinasafety.ac.cn

al simulation method, this paper takes common gases (H_2 , CO , CH_4) in chemical synthesis as the research object, and uses the range of dangerous concentration after gas leakage as the danger range of gas leakage. Fluent software is used to simulate gas leakage and diffusion under different working conditions. In order to study the gas leakage diffusion law and leakage danger range under different gas, different leakage pressure, different leakage temperature and different leakage port diameter, and build the prediction model of leakage danger range. The results show that the danger range of gas leakage increases with the increase of leakage pressure when other factors remain unchanged. With the increase of gas temperature, the danger range of gas leakage decreases obviously. With the increase of the diameter of the leakage port, the danger range of gas leakage increases obviously. Among the three variables, the increase of leakage port size has the most obvious effect on the expansion of the danger range. When the gas leakage pressure increases from 1 MPa to 2 MPa, the danger range of three kinds of gas leakage increases by about 10%. When the gas temperature increases from 300 K to 400 K, the danger range of three kinds of gas leakage also increases by about 10%, and when the diameter of the leakage port increases from 2 mm to 3 mm, the danger range of three kinds of gas leakage increases by 50%. By quantitative analysis of the length and width data of the leakage danger range in the numerical simulation results of three kinds of gases (H_2 , CO , CH_4), and dimensionless treatment of the parameters, the prediction models of the leakage danger range (length and width) of three kinds of gases (H_2 , CO , CH_4) are finally obtained. The length and width of the leakage danger range are functions of pressure ratio and temperature ratio. The prediction results can provide reference for the rescue and emergency treatment of leakage accidents.

Key words: chemical synthesis; gas leakage; CFD; scope of danger; predictive models

0 引 言

能源是国家的重要基础产业, 能源安全是国家安全的重要组成部分^[1-3], 我国是一个缺油、少气, 煤炭资源相对丰富的国家^[4], 随着时代的发展和国民经济的高速增长, 石油消费增速远大于国内石油资源增产的速度, 发展合成油工业作为石油资源的补充是合理的^[5]。各种化工合成工艺所用原料气的有效成分主要是 H_2 、 CO 和 CH_4 , 而在各种工艺中, 大多数都需要在高压环境中进行, 如合成油品所需压力为 2~3 MPa, 合成二甲醚则需要 2~4 MPa 压力^[6], 因此合成装置、运输管道一旦发生泄漏, 造成人员及经济损失不可估量。

数值模拟能够表示参数的变化关系, 使用数值计算方法进行求解, 能够得到过程中的动态模拟结果, 极大地促进了科学研究的发展。刘彦青^[7]在同时考虑瓦斯含量与压力的情况下, 通过数值模拟方法计算得到了使煤层瓦斯涌出量最低的工作面平均推进速度周期为 25~30 d。在高压气体泄漏扩散的研究中, 李伟等^[8]通过流体力学计算软件, 对于高压甲烷储罐的泄漏喷射和扩散过程进行了数值模拟, 通过数值模拟结果, 建立了甲烷容器内压力与破裂口喷射速度的定量公式。在甲烷高压球罐的泄漏研究中, 傅杰^[9]利用 Fluent 软件, 建立了较为准确的高压气体泄漏扩散的数值模型, 并利用该模型探究了甲烷在不同泄漏条件下泄漏口附近以及气体泄漏远端的气体浓度、压力等物理参数的规律。刘延雷等^[10], 通过数值模拟研究了管道内高压氢气、天然气的不同扩散特性, 发现高压的氢气泄漏时产生的危

险气体云团较大, 且高压氢气泄漏时初始的泄漏速度远大于高压天然气泄漏时的初始速度, 在地面附近区域氢气泄漏扩散产生的危险要小于天然气。同样是在天然气管道气体泄漏的研究中, 周伟国等^[11]通过数值模拟, 对管道发生泄漏后泄漏压力、环境风速对于甲烷气体的扩散特性影响进行了研究, 结果表明, 管道内压力越大时, 泄漏口气体速度越大, 气体扩散范围也越大, 当环境风速越大时, 甲烷气体射流的偏转角度越大, 扩散速率也越大。高嵩等^[12], 利用 Fluent 软件研究了高压天然气管道泄漏及其规律, 通过建立的天然气长管道运输模型, 对不同条件下管道泄漏的压力、浓度、速度及危险区域进行了分析, 根据结果对比分析了不同泄漏孔径、不同泄漏压力对于气体泄漏范围的影响。徐坤等^[13]利用 Fluent 软件模拟了在机械通风条件下不同泄漏口方向、位置、泄漏压力等条件下燃气浓度分布特性, 发现泄漏口的方向对于甲烷气体泄漏初期的浓度分布具有重大影响。刘敏鸿等^[14]利用数值模拟方法, 分别研究了天然气在封闭和半封闭小空间内的泄漏扩散规律, 发现天然气在封闭空间泄漏发生爆炸的风险小于半封闭空间。袁裕鹏等^[15]利用 Fluent 软件, 对不同泄漏条件下, 氢气燃料电池仓内氢气泄漏扩散规律进行了探究, 并发现氢气探测报警器适宜安装到空间顶部角落。汪建平^[16]采用数值模拟的方法, 研究了天然气在厨房内泄漏扩散过程, 并且将实验与数值模拟结果进行对比, 验证了数值模拟的准确性。万宇飞等^[17]利用 Fluent 软件, 研究了不同风向条件对于高压 LPG 球形储罐中丙烷泄漏扩散规律的影响, 可为发生泄漏时人员自救及消防救援提供参考。朱

静等^[18]采用数值模拟方法,模拟了天然气在典型住宅内泄漏扩散规律及自然通风对气体扩散的影响,结果表明自然通风可以很好地防止天然气聚集,降低爆炸风险。喻健良等^[19]通过构建高压 CO₂ 管道泄漏扩散数值模型并根据实验结果进行验证,总结出不同大小泄漏孔下 CO₂ 浓度和温度分布规律。周宁等^[20]利用 Fluent 软件,研究了环境温度对于 LNG 泄漏扩散规律的影响,发现环境温度较高时,甲烷扩散最远距离大于环境温度低时。程方明等^[21]利用 FLACS 软件,对储罐内高压天然气非恒定速率泄漏进行了模拟,研究发现风速越大,气体泄漏扩散产生的气云稳定所需的时间越长。陶婧莹等^[22]采用数值模拟的方法,利用高斯烟羽模型对 LNG 泄漏扩散进行研究,发现在泄漏过程中,随着环境风速的增加,危险区域减小;随着大气稳定度的增加,危险区域增加。周宁等^[23]利用 Fluent 软件,对于不同条件下管道内丁烷气体泄漏扩散规律进行了研究,发现气体初始速度越大,自由扩散作用越强,危险范围也越广。张晓蕾等^[24]采用 PHAST 模拟软件,研究了不同工况下风速大小对周围建筑物及人员的热辐射影响,研究发现风速越大,热辐射影响的范围越大。

在上述对于高压气体泄漏的研究中可以发现,由于高压气体泄漏实验危险性较大,实验成本较高,因此许多研究采取了数值模拟的方法,且模拟结果可靠,在之前的大多数研究中,目标气体大多数集中在甲烷和天然气,对于化工合成中常见的气体,如 H₂、CO、CH₄ 在不同泄漏条件下,泄漏规律及危险范围的研究并不充分,且通常轻视小尺寸泄漏口的危险性,因此开展常见可燃气体小孔泄漏扩散研究是十分必要的。

1 不同条件下可燃气体泄漏扩散规律及泄漏危险范围

1.1 CFD 数值模拟参数设置

本次数值模拟选择 CFD 数值模拟方法,CFD (Computational Fluid Dynamics) 全称为计算流体力学,是通过计算机模拟流体的特定情境以得到流体相关参数并进行研究。选用 ICEM 软件进行建模及网格划分,Fluent 软件进行高压气体泄漏的模拟,CFD-POST 软件进行数据后处理。在模拟过程中,求解器选择压力基求解器 Pressure-Based,湍流模型选择考虑可压性影响的双方程 k - ω SST 模型,该模型是一种在工程上得到广泛应用的混合模型,即在近壁面保留了原始 k - ω 模型,在远离壁面的位置

应用了 k - ε 模型^[25],其方程与模型具体如下:

可压缩流体质量、动量、能量和组分守恒方程^[26]可表示为

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = \\ - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] + \bar{\rho} g_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{E}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{u}_j (\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p})) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{\text{eff}} c_p}{P_{\text{ref}}} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} - \sum_m \tilde{h}_m \left(- \frac{\mu_{\text{eff}}}{S_{c,\text{eff}}} \frac{\partial \tilde{Y}_m}{\partial x_j} \right) + \right. \\ \left. \tilde{u}_i \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] + \sum_m R_m H_c \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{Y}_m) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_m) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{S_{c,\text{eff}}} \frac{\partial \tilde{Y}_m}{\partial x_j} \right) + R_m \quad (4)$$

式中: ρ 为密度; x 为空间坐标; u 为速度分量; g 为重力加速度; E 为总能量; c_p 为混合物在恒压下的比热容; P_r 为普朗特数; T 为温度; h 为焓; S_c 为进度变量守恒方程中的源项; Y 为质量分数; R 为火焰前锋平均半径; H 为燃烧热。上标和下标中,上标:~为 LES 过滤后的量,~为 LES 质量加权过滤后的量;下标: i, j, k 为空间坐标索引; m 为气体混合的第 m 个组分; c 为源项在进行变量方程;eff 为有效值。

k 方程和 ω 方程分别是:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \beta^* \rho k \omega \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = \\ \frac{\gamma}{\nu_T} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \beta \omega^2 + 2\rho(1 - F_1) \frac{\sigma_\omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (6)$$

其中: k 为湍流动能; ω 为湍流动能的特定消散,它们分别定义为

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_i \quad (7)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k \beta^*} \quad (8)$$

其中, ε 为湍流动能消散率:

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \quad (9)$$

其中, τ_{ij} 为雷诺应力:

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} \quad (10)$$

式中: t 为时间; p 为动力压强; μ_t 为涡动黏性; δ_{ij} 为克罗内克函数; $\nu_t = \mu_t / \rho$ 为动力涡黏性; $\sigma_k, \beta^*, \sigma_\omega, \gamma, \beta, \sigma_\omega^2$ 为模型系数; F_1 为混合函数^[27]。

组分输运共涉及 3 种气体, 分别为 H_2 、CO 和 CH_4 , 气体密度均为理想气体, 时间属性选择定常流动(稳态)。本次 CFD 数值模拟计算域的边界条件如图 1 所示。

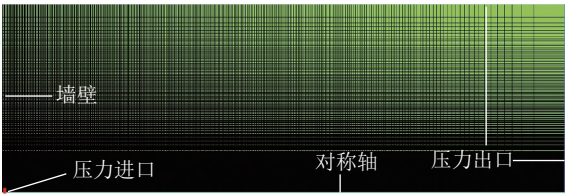


图 1 计算域及其边界条件

Fig.1 Computational domains and boundary conditions

本次 CFD 数值模拟网格独立性检验共选择 3 种网格尺寸, 其网格数量分别为 101 850(high)、71 604 (medium)、46 350(low), 泄漏气体为 H_2 , 泄漏口直径为 3 mm, 泄漏压力为 1 MPa, 气体温度为 300 K。图 2 表示的是中心轴线 H_2 浓度分布曲线, 可见选用中质量网格 (medium) 得到的结果与高质量网格 (high) 十分接近。因此在考虑时间成本并保证结果准确的前提下, 本次 CFD 数值模拟采用中质量 (medium) 网格开展相关研究。

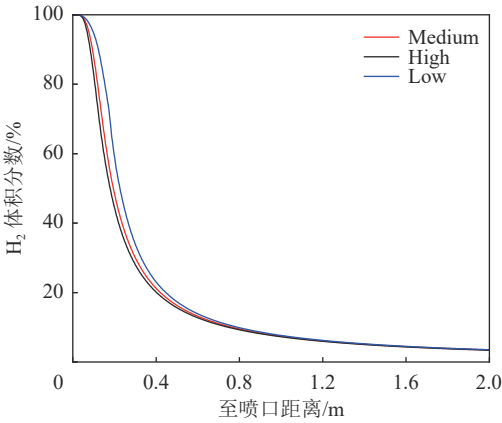


图 2 3 组网格中心轴线处 H_2 浓度分布

Fig.2 H_2 concentration distribution at the central axis of the three groups

1.2 不同条件下可燃气体泄漏扩散规律及泄漏危险范围

如前文所述, CFD 数值模拟共涉及 3 种气体, 分别为: H_2 、CO 和 CH_4 。对于 3 种气体, 其危险浓度即为爆炸极限, H_2 : 4%~75%, CO: 12.4%~75%, CH_4 : 4.9%~16%。

CFD 数值模拟共设置 81 组工况, 泄漏气体分别

为 H_2 、CO 和 CH_4 , 泄漏口直径分别为 2、3、4 mm, 合成油品中低温 F-T 合成所需压力 2~3 MPa^[3], 温度 280 ℃ 以下, 因此工况中, 泄漏压力选定为 1、2、3 MPa, 气体泄漏温度为 300、400、500 K。

1.2.1 不同泄漏压力下可燃气体泄漏扩散规律及泄漏危险范围

通过对 H_2 、CO 和 CH_4 三种气体在不同泄漏压力下气体泄漏浓度分布云图进行对比(图 3), 可以发现:

1) 3 种气体在温度、直径等其他因素不变的条件下, 随着泄漏压力的增大, 气体泄漏危险范围随之明显增加, 其危险范围除轴向长度增长之外, 宽度也有所增大。

2) 对于不同气体, 压力同为 1 MPa 时, H_2 泄漏的危险范围长度与宽度分别为 2.36 m 和 0.316 m, CO 与 CH_4 则仅为 0.23、0.028 m 和 0.67、0.09 m, 可见 H_2 的泄漏危险范围最大; 当泄漏压力从 1 MPa 上升到 2 MPa 时, H_2 泄漏危险范围长度和宽度分别增加了 11% 和 13%, 而 CO 泄漏危险范围长、宽分别增加了 17% 和 11%, CH_4 则分别增加了 9% 和 7%, 可见 H_2 、CO 和 CH_4 三种气体泄漏危险范围均受到气体温度的显著影响。

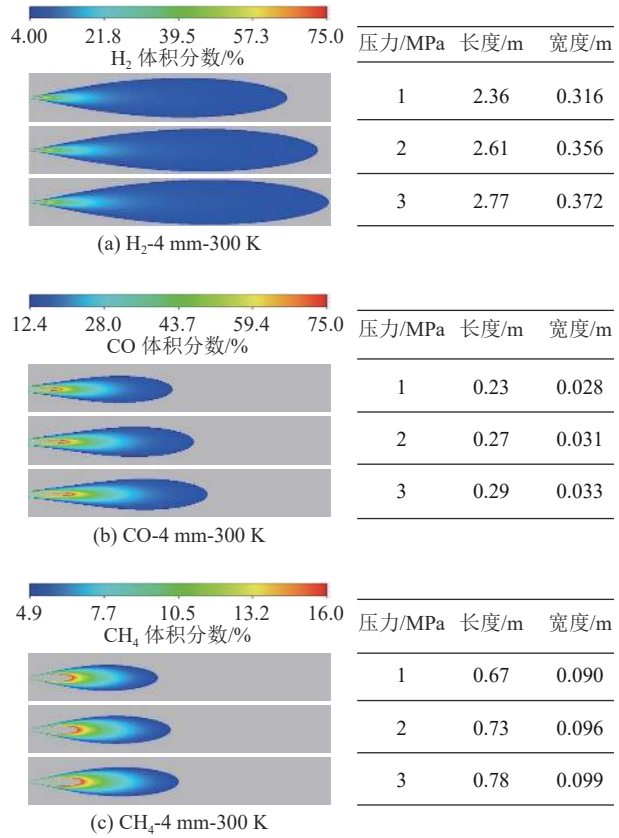


图 3 不同泄漏压力下可燃气体扩散规律及泄漏危险范围

Fig.3 Diffusion mechanism and danger range of combustible gas leakage under different leakage pressure

从图4—图6可以看出,泄漏压力越大,中心轴线浓度越高,如H₂在泄漏压力1 MPa,泄漏口直径

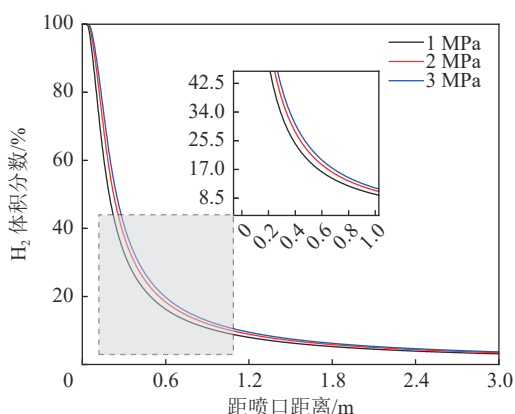


图4 不同泄漏压力下中心轴线H₂浓度分布曲线
(4 mm-300 K)

Fig.4 H₂ concentration distribution of center axis under different leakage pressure (4 mm-300 K)

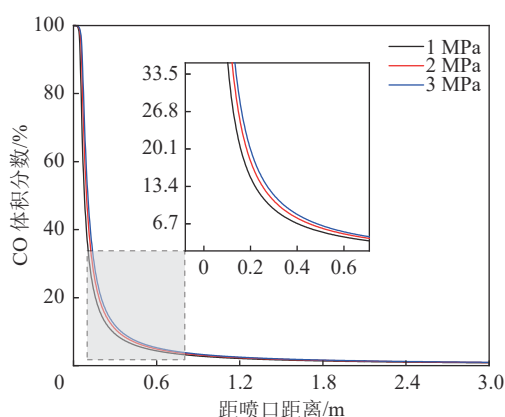


图5 不同泄漏压力下中心轴线CO浓度分布曲线
(4 mm-300 K)

Fig.5 CO concentration distribution of center axis under different leakage pressure (4 mm-300 K)

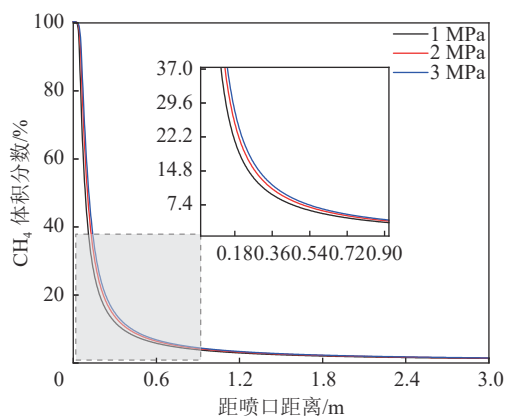


图6 不同泄漏压力下中心轴线CH₄浓度分布曲线
(4 mm-300 K)

Fig.6 CH₄ concentration distribution of center axis under different leakage pressure (4 mm-300 K)

4 mm,泄漏温度300 K时,距泄漏口0.3 m处,体积分数为33%,而当泄漏压力为2 MPa时,同样位置的H₂体积分数则升高到38%。

1.2.2 不同气体温度下可燃气体泄漏扩散规律及泄漏危险范围

通过对H₂、CO和CH₄三种气体在不同泄漏温度下气体泄漏浓度分布云图进行对比(图7),可以发现:

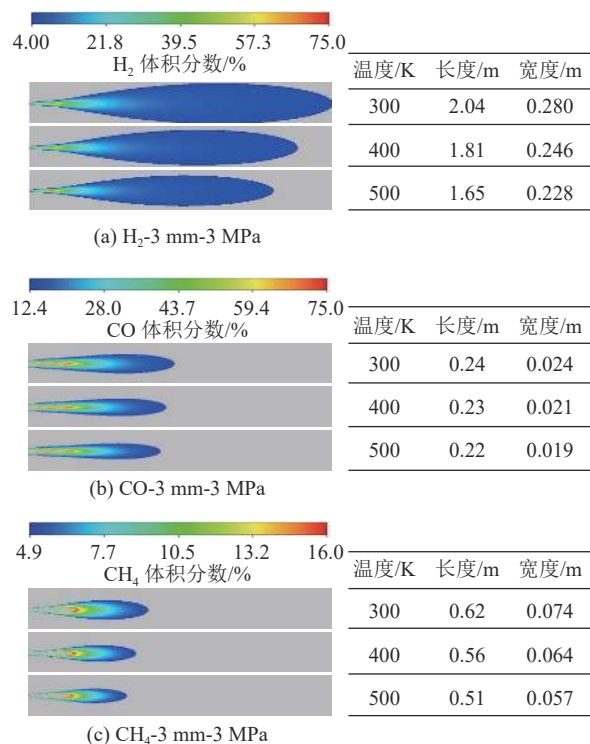


图7 不同泄漏温度下可燃气体扩散规律及泄漏危险范围

Fig.7 Diffusion mechanism and danger range of combustible gas leakage under different leakage temperature

1)3种气体在泄漏压力、直径等其他因素不变的条件,随着气体温度的增大,气体泄漏危险范围随之明显降低,其危险范围除轴向长度减小之外,宽度也有所减小。

2)对于不同气体,温度同为300 K时,H₂泄漏的危险范围长度与宽度分别为2.04 m和0.28 m,CO与CH₄则仅为0.24,0.024和0.62,0.074 m,可见H₂的泄漏危险范围最大;当泄漏温度从300 K上升到400 K时,H₂泄漏危险范围长度和宽度分别降低了11%和12%,而CO泄漏危险范围长、宽分别降低了4.2%和12.5%,CH₄则分别降低了10%和14%。可见H₂、CO和CH₄三种气体泄漏危险范围均受到气体温度的显著影响。

从图8—图10可以看出,气体温度越高,中心轴线浓度越低,如H₂在泄漏温度为300 K,泄漏口直

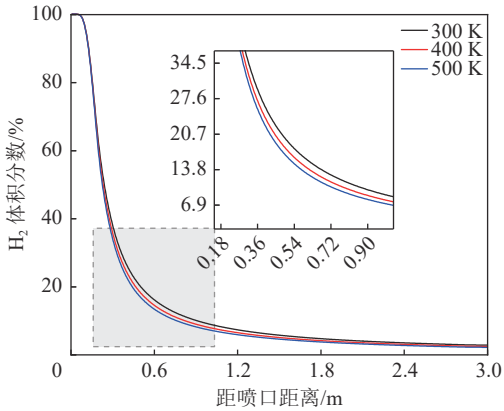


图8 不同气体温度下中心轴线 H₂ 浓度分布曲线 (3 mm-3 MPa)

Fig.8 H₂ concentration distribution of center axis under different leakage temperature (3 mm-3 MPa)

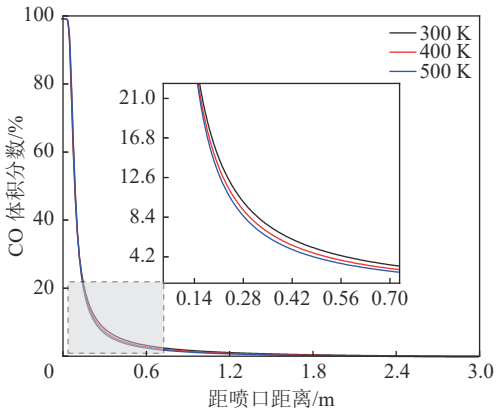


图9 不同气体温度下中心轴线 CO 浓度分布曲线 (3 mm-3 MPa)

Fig.9 CO concentration distribution of center axis under different leakage temperature (3 mm-3 MPa)

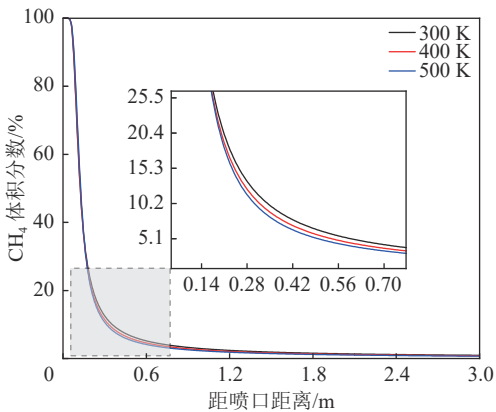


图10 不同气体温度下中心轴线 CH₄ 浓度分布曲线 (3 mm-3 MPa)

Fig.10 CH₄ concentration distribution of center axis under different leakage temperature (3 mm-3 MPa)

径 3 mm, 泄漏压力 3 MPa 时, 距泄漏口 0.3 m 处, 体积分数为 37%, 而当泄漏温度变为 400 K 时, 同样位

置的 H₂ 体积分数为 34%。从图 8—图 10 可以看出, 气体温度越高, 中心轴线浓度越低, 如 H₂ 在泄漏温度为 300 K, 泄漏口直径 3 mm, 泄漏压力 3 MPa 时, 距泄漏口 0.3 m 处, 体积分数为 37%, 而当泄漏温度变为 400 K 时, 同样位置的 H₂ 体积分数为 34%。

1.2.3 不同泄漏口直径下可燃气体泄漏扩散规律及泄漏危险范围

通过对 H₂、CO 和 CH₄ 三种气体在不同泄漏口直径下气体泄漏浓度分布云图进行对比(图 11), 可以发现:

1) 3 种气体在温度、泄漏压力等其他因素不变条件下, 随着泄漏口直径的增大, 气体泄漏危险范围随之明显增加, 其危险范围除轴向长度增长之外, 宽度也有所增大。

2) 对于不同气体, 直径为 2 mm 时, H₂ 泄漏的危险范围长度与宽度分别为 1.11 m 和 0.148 m, CO 与 CH₄ 则仅为 0.14 m, 0.013 m 和 0.62 m, 0.037 m, 可见 H₂ 的泄漏危险范围最大; 当泄漏口直径从 2 mm 上升到 3 mm 时, H₂ 泄漏危险范围长度和宽度分别增加了 49% 和 54%, 而 CO 泄漏危险范围长、宽分别增加了 57% 和 46%, CH₄ 则分别增加了 50% 和

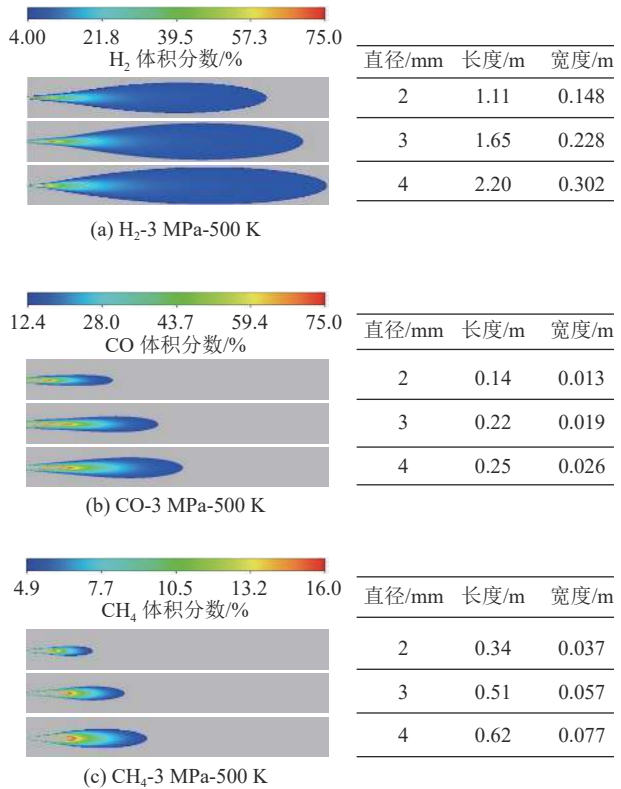


图 11 不同泄漏口直径下可燃气体泄漏扩散规律及泄漏危险范围

Fig.11 Diffusion mechanism and danger range of combustible gas leakage under different diameter of leak hole

54%。可见 H_2 、CO 和 CH_4 三种气体泄漏危险范围均受到泄漏口直径的显著影响。

从图 12—图 14 可以看出, 泄漏口直径越大, 中

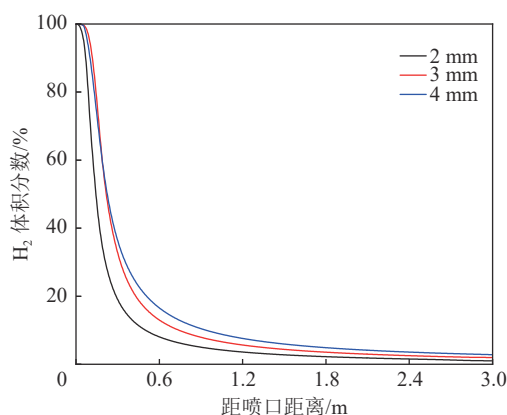


图 12 不同泄漏直径下中心轴线 H_2 浓度分布曲线
(500 K-3 MPa)

Fig.12 H_2 concentration distribution of center axis under different diameter of leak hole (500 K-3 MPa)

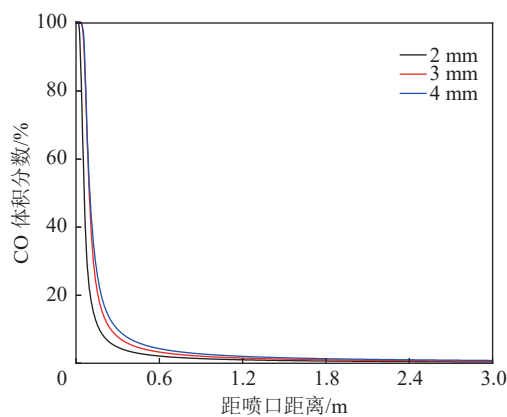


图 13 不同泄漏直径下中心轴线 CO 浓度分布曲线
(500 K-3 MPa)

Fig.13 CO concentration distribution of center axis under different diameter of leak hole (500 K-3 MPa)

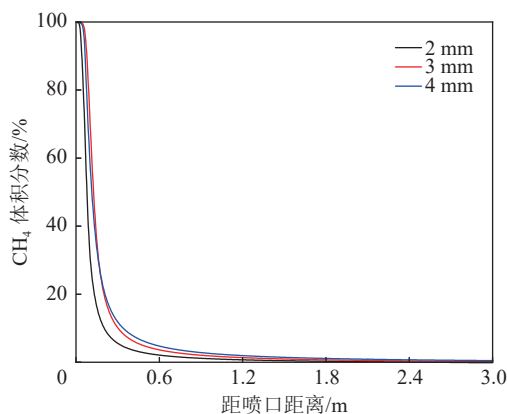


图 14 不同泄漏直径下中心轴线 CH_4 浓度分布曲线
(500 K-3 MPa)

Fig.14 CH_4 concentration distribution of center axis under different diameter of leak hole (500 K-3 MPa)

心轴线浓度越高, 如 H_2 在泄漏口 2 mm, 泄漏温度 500 K, 泄漏压力 3 MPa 时, 距泄漏口 0.3 m 处, 浓度为 19%, 而当泄漏口直径变为 3 mm 时, 同样位置的 H_2 浓度为 33%。

2 可燃气体泄漏危险范围预测模型

本次 CFD 数值模拟共考虑 3 种气体, 分别为 H_2 、CO 和 CH_4 , 并充分考虑泄漏口大小、泄漏压力和泄漏温度后, 根据得到的危险范围, 对每种泄漏气体危险范围的长和宽分别进行拟合, 得出泄漏危险范围定量预测经验公式(图 15—图 20)。对参量进行无量纲处理, 得到的泄漏危险范围定量预测模型为:

对于 H_2 :

$$\text{长度: } L/d = 428 \times (P_0/P_\infty)^{0.14} (T_\infty/T_0)^{0.43} - 0.38 \quad (11)$$

$$\text{宽度: } W/d = 60.82 \times (P_0/P_\infty)^{0.13} (T_\infty/T_0)^{0.44} - 0.83 \quad (12)$$

对于 CO:

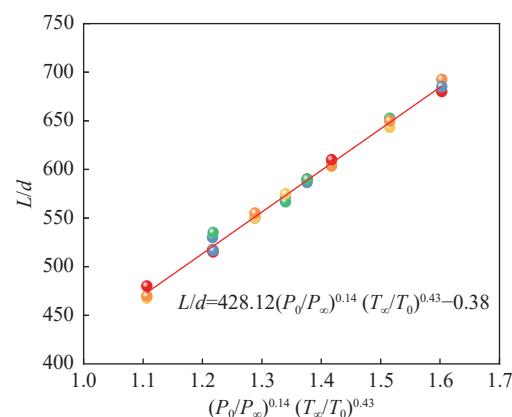


图 15 H_2 泄漏危险范围长度经验公式

Fig.15 Empirical formula of the length of H_2 leakage danger range

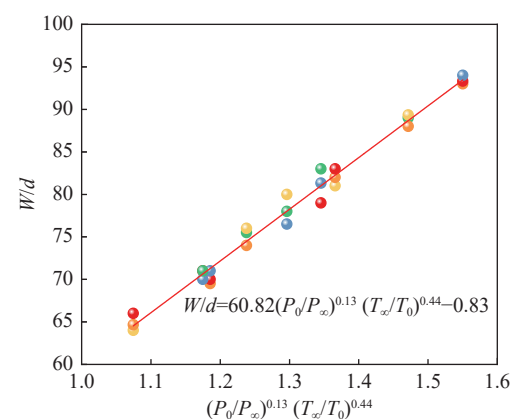


图 16 H_2 泄漏危险范围宽度经验公式

Fig.16 Empirical formula of the width of H_2 leakage danger range

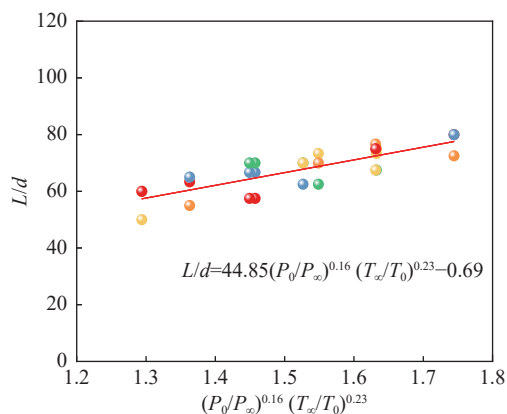


图 17 CO 泄漏危险范围长度经验公式

Fig.17 Empirical formula of the length of CO leakage danger range

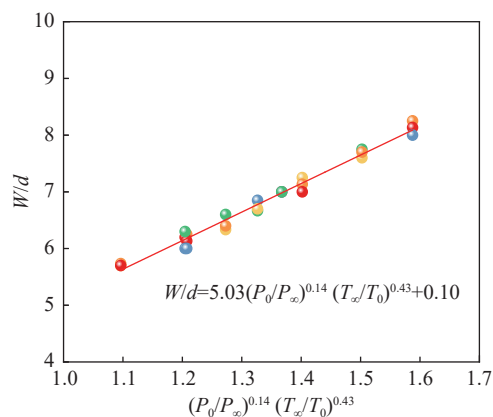
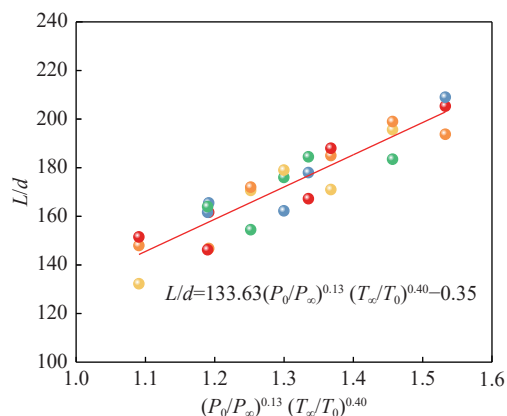


图 18 CO 泄漏危险范围宽度经验公式

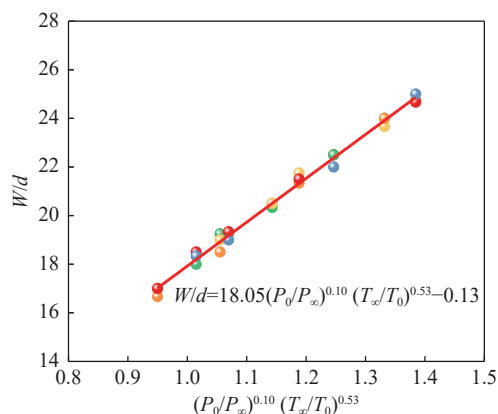
Fig.18 Empirical formula of the width of CO leakage danger range

图 19 CH₄ 泄漏危险范围长度经验公式Fig.19 Empirical formula of the length of CH₄ leakage danger range

$$\text{长度: } L/d = 44.85 \times (P_0/P_\infty)^{0.16} (T_\infty/T_0)^{0.23} - 0.69 \quad (13)$$

$$\text{宽度: } W/d = 5.03 \times (P_0/P_\infty)^{0.14} (T_\infty/T_0)^{0.43} + 0.10 \quad (14)$$

对于 CH₄:

图 20 CH₄ 泄漏危险范围宽度经验公式Fig.20 Empirical formula of the width of CH₄ leakage danger range

$$\text{长度: } L/d = 133.63 \times (P_0/P_\infty)^{0.13} (T_\infty/T_0)^{0.40} - 0.35 \quad (15)$$

$$\text{宽度: } W/d = 18.05 \times (P_0/P_\infty)^{0.10} (T_\infty/T_0)^{0.53} - 0.13 \quad (16)$$

其中: L 为泄漏危险范围长度, m; W 为泄漏危险范围宽度, m; d 为泄漏口直径, m; P_0 为泄漏压力, Pa; P_∞ 为环境压力 (101 325 Pa); T_0 为泄漏气体温度, K, T_∞ 为环境温度, 300 K。

3 结 论

1) 3 种气体随着泄漏压力的增大, 气体泄漏危险范围随之明显增加, 且泄漏压力越大, 泄漏口中心轴线气体浓度越高。

2) 随着泄漏气体温度的增大, 气体泄漏危险范围随之明显降低, 危险范围除轴向长度及宽度均有所减小, 泄漏气体温度越高, 泄漏口中心轴线气体浓度越低。

3) 随着泄漏口直径的增大, 气体泄漏危险范围随之明显增加, 危险范围轴向长度和宽度均有所增大, 且泄漏口尺寸对于可燃气体泄漏危险范围的影响大于泄漏压力和泄漏温度。泄漏口直径越大, 泄漏口中心轴线气体浓度越高。

根据数值模拟得到的危险范围数据, 考虑气体、泄漏口大小、泄漏压力和泄漏温度后, 对每种泄漏气体危险范围的长和宽分别进行拟合, 得出泄漏危险范围预测经验公式。

4) 通过可燃气体泄漏扩散规律和危险范围分析结果, 可为区域救援协同响应和应急资源快速调配提供技术支持, 亦可为重大工业 (危险化学品) 事故救援或城市公共安全事件处置应急指挥辅助决策提供参考依据。

参考文献(References):

- [1] 赵开功, 张晓蕾, 李曼, 等. 基于一体化运营综合能源企业智能应急救援技术研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(5): 235-240.
ZHAO Kaigong, ZHANG Xiaolei, LI Man, *et al.* Research on intelligent emergency rescue technology of comprehensive energy enterprise based on integrated operation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(5): 235-240.
- [2] ZHAO Kaigong, WANG Haiyan, ZHENG Dengfeng. Research on structural similarity design emergency exercise's scenario [J]. Geofluids, 2022: 6590957.
- [3] 赵开功, 方衡. 一体化运营综合能源集团智能应急指挥平台的研究与实现[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(6): 58-64, 71.
ZHAO Kaigong, FANG Heng. Research and implementation of integrated operation integrated energy group intelligent emergency command platform[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(6): 58-64, 71.
- [4] 步学朋, 俞珠峰, 王强, 等. 煤制油化工建设项目技术经济指标与参数研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 120-124.
BU Xuepeng, YU Zhufeng, WANG Qiang, *et al.* Research on technical-economic indexes and parameters of coal to liquid and chemical construction project[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 120-124.
- [5] 唐宏青. 我国煤制油技术的现状和发展[J]. 化学工程, 2010, 38(10): 1-8.
TANG Hongqing. Status and development of coal to oil technique in China[J]. Chemical Engineering, 2010, 38(10): 1-8.
- [6] 徐振刚. 化工合成用煤气化工艺的选择[C]//中国煤炭学会煤化工专业委员会年会暨新型煤化工技术研讨会会议论文集, 2004: 13-18.
- [7] 刘彦青. 动态回采工作面煤壁瓦斯涌出数值计算及现场应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 195-204.
LIU Yanqing. Numerical calculation and field application of gas emission from coal wall in dynamic stoping face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 195-204.
- [8] 李伟, 张奇. 高压气体泄漏喷射和扩散的数值模拟[C]//中国职业安全健康协会2008年学术年会论文集, 2008: 319-325.
- [9] 傅杰. 球罐内气体泄漏扩散特性模拟及可燃区域预测[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
FU Jie. Numerical simulation and combustible region prediction of gas leakage and diffusion in spherical tank[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [10] 刘延雷, 徐平, 郑津洋, 等. 管道运输高压氢气与天然气的泄漏扩散数值模拟[J]. 太阳能学报, 2008, 29(10): 1252-1255.
LIU Yanlei, XU Ping, ZHENG Jinyang, *et al.* Numerical simulation on the dispersion of hydrogen and natural gas due to high pressured pipeline leakage[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(10): 1252-1255.
- [11] 周伟国, 刘东京, 滕卯寅. 高压天然气管道泄漏扩散CFD数值模拟[J]. 管道技术与设备, 2015(5): 5-8.
ZHOU Weiguo, LIU Dongjing, TENG Maoyin. CFD simulation on natural gas leakage and diffusion of high-pressure pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2015(5): 5-8.
- [12] 高嵩, 王茂廷. 高压天然气管道泄漏及事故危害规律研究[J]. 当代化工, 2017, 46(1): 82-85.
GAO Song, WANG Maoting. Study on leakage accident laws and hazards of high pressure natural gas pipeline[J]. Contemporary Chemical Industry, 2017, 46(1): 82-85.
- [13] 陈坤, 林浩, 陈洁, 等. 通风状态下综合管廊燃气管道小孔泄漏扩散模拟研究[J/OL]. 安全与环境学报: 1-11[2023-04-19]. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2022.1480.
CHEN Kun, LIN Hao, CHEN Jie, *et al.* Simulation research on small hole leakage and diffusion of gas pipeline in utility tunnel under ventilation condition [J/OL]. Journal of Safety and Environment: 1-11 [2023-04-19]. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2022.1480.
- [14] 刘敏鸿, 刘成良, 翁韦强, 等. 居民用户天然气泄漏三维数值模拟分析[J]. 煤气与热力, 2022, 42(8): 24-28.
LIU Minhong, LIU Chengliang, WONG Weiqiang, *et al.* Three-dimensional numerical simulation analysis of natural gas leakage in residential users[J]. Gas & Heat, 2022, 42(8): 24-28.
- [15] 袁裕鹏, 崔伟逸, 沈辉, 等. 燃料电池船舶舱内氢气泄漏扩散的数值模拟[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 196-209.
YUAN Yupeng, CUI Weiyi, SHEN Hui, *et al.* Numerical simulation of leakage and diffusion of hydrogen in cabin of fuel cell ship[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(4): 196-209.
- [16] 汪建平, 段卫东, 李春青, 等. 厨房内天然气泄漏扩散过程数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(1): 298-305.
WANG Jianping, DUAN Weidong, LI Chunqing, *et al.* Study on numerical simulation of indoor natural gas leakage and diffusion process[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(1): 298-305.
- [17] 万宇飞, 李立婉, 王文光, 等. 基于Fluent的风向对LPG储罐泄漏扩散规律研究[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(5): 98-103.
WAN Yufei, LI Liwan, WANG Wenguang, *et al.* Influence of wind direction on LPG tank leakage rule with FLUENT software[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2021, 50(5): 98-103.
- [18] 朱静, 綦远磊, 辛培刚, 等. 多因素下居民室内天然气泄漏扩散数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(7): 1013-1016.
ZHU Jing, QI Yuanlei, XIN Peigang, *et al.* Numerical simulation of natural gas leakage and diffusion in residence space under multiple factors[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(7): 1013-1016.
- [19] 喻健良, 刘长远, 闫兴清, 等. 高压超临界CO₂管道泄漏扩散灾害模拟[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1495-1502.
YU Jianliang, LIU Changyuan, YAN Xingqing, *et al.* Simulation research of leakage and diffusion disaster in high-pressure supercritical CO₂ pipelines[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1495-1502.
- [20] 周宁, 陈力, 吕孝飞, 等. 环境温度对LNG泄漏扩散影响的数值模拟[J]. 油气储运, 2021, 40(3): 352-360.
ZHOU Ning, CHEN Li, LYV Xiaofei, *et al.* Numerical simulation on the effect of ambient temperature on leakage and diffusion

- sion of LNG[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(3): 352-360.
- [21] 程方明, 张安邦, 王 焘, 等. 高压天然气非恒定速率泄漏扩散数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(1): 90-95.
- CHENG Fangming, ZHANG Anbang, WANG Tao, *et al.* Numerical simulation study on non-constant rate leakage and diffusion of high-pressure natural gas[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(1): 90-95.
- [22] 陶婧莹, 李兆慈, 郭志超等. LNG泄漏气体浓度和温度扩散过程计算[J]. 低温与超导, 2020, 48(6): 12-19, 25.
- TAO Jingying, LI Zhaoqi, GUO Zhichao, *et al.* Gas concentration and temperature diffusion numerical simulation for LNG leakage[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2020, 48(6): 12-19, 25.
- [23] 周 宁, 王伟天, 陈 兵, 等. 石化管道丁烷气体泄漏扩散数值模拟[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2): 175-182.
- ZHOU Ning, WANG Weitian, CHEN Bing, *et al.* Numerical simulation of butane gas leakage and diffusion in petrochemical pipelines[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(2): 175-182.
- [24] 张晓蕾, 张 洁. 化工厂天然气管道泄漏火灾研究[J]. 能源化工, 2021, 42(1): 66-71.
- ZHANG Xiaolei, ZHANG Jie. Study on fire accident caused by the leakage of the natural gas pipeline[J]. Energy Chemical Industry, 2021, 42(1): 66-71.
- [25] 钱炜祺, 周 宇, 邓有奇, 等. k- ω SST两方程湍流模型参数辨识初步研究[C]//中国力学学会学术大会, 2009: 253.
- [26] 弓 亮. 管道内高压氢气泄漏自燃机理实验与数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- GONG Liang. Experimental and numerical study on the mechanism of spontaneous ignition during high-pressure hydrogen release into a tube [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [27] 闫晓惠, 陈 新, 李华煜. 含收缩段明渠流的三维k- ω SST模拟[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(11): 12-14.
- YAN Xiaohui, CHEN Xin, LI Huayu. 3D k- ω SST modeling of open channel flow with contraction[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2015, 21(11): 12-14.