

中文引用格式:田苗,王伟,晏明海,等. 室外立体停车场氢泄漏扩散特性及危险性分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(7): 176-183.

英文引用格式:TIAN Miao, WANG Wei, YAN Minghai, et al. Analysis on hydrogen leakage diffusion characteristics and risks in outdoor multi-story park[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7): 176-183.

室外立体停车场氢泄漏扩散特性及危险性分析^{*}

田苗¹, 王伟^{**2}副研究员, 晏明海¹, 路欣欣³, 田世祥¹副教授, 张孝春⁴教授

(1 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2 应急管理部上海消防研究所, 上海 200032;

3 四川省消防救援总队, 四川 成都 610037; 4 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广东 广州 510006)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.1040

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2024B1111080002);上海市自然科学基金面上项目资助(24ZR1473000);

贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般 250);上海市社会发展科技攻关项目(22dz1201000)。

【摘要】“双碳目标”助力氢燃料电池汽车(HFCV)产业发展,HFCV安全停放于室外立体停车场是规模化推广的关键,为此,搭建缩尺度实体试验平台,研究停车场封闭条件(封闭、半开放、开放)、泄漏位置、质量流量及孔径对氢气扩散特性的影响。结果表明:停车场开放程度增加,泄漏源处氢气相关指标上升,如中央位置大孔径泄漏且流量为0.18 kg/s时,一至三层氢气最大体积分数依次为21.3%、27%、45.3%,对应氢气体积分数已远超爆炸下限,存在极高燃爆风险;泄漏质量流量增加,氢气体积分数和压力上升、安全风险增大,氢气的泄漏质量流量与体积分数、压力存在明显的正相关关系;同等开放程度下,角落易聚集且墙边扩散情况优于空旷地带,并且扩散过程受空间边界引导,呈现出非均匀的扩散态势;孔径越大,氢气泄漏速率越高。

【关键词】室外立体停车场; 氢燃料电池汽车(HFCV); 氢气泄漏扩散; 扩散特性; 封闭条件; 危险性

Analysis on hydrogen leakage diffusion characteristics and risks in outdoor multi-story park

TIAN Miao¹, WANG Wei², YAN Minghai¹, LU Xinxin³, TIAN Shixiang¹, ZHANG Xiaochun⁴

(1 School of Mining, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, China; 2 Emergency Management Department Shanghai Fire Research Institute, Shanghai 200032, China; 3 Sichuan Fire and Rescue Corps, Chengdu Sichuan 610037, China; 4 School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: The goals of carbon peaking and carbon neutrality support the development of HFCV industry. Safe parking of HFCV in outdoor three-dimensional parking lot is the key to large-scale promotion. Therefore, a scaled-down physical experimental platform was built to investigate the effects of outdoor multi-story parking lot closure conditions (closed, semi-open, open), leakage location, mass flow rate and aperture on hydrogen diffusion characteristics. The experimental results show that as the opening degree of

* 文章编号:1003-3033(2025)07-0176-08; 收稿日期:2025-03-08; 修稿日期:2025-05-12

** 通信作者:王 伟(1987—),男,山东滨州人,博士,副研究员,主要从事新能源火灾防控、高压氢泄漏扩散特性、受限空间燃爆机制等方面的研究。E-mail:wangw8799@163com。

the outdoor multi-story parking lot increases, and the related indexes of helium at the leakage source rise. For example, when the leakage occurs at the center with a large aperture at the flow rate is 0.18 kg/s, the maximum volume fractions of helium on the first, second, and third floors are 21.3%, 27% and 45.3%, respectively. The corresponding hydrogen volume fractions far exceed the lower explosive limit, posing an extremely high risk of combustion and explosion. With the increase of leakage mass flow, both the volume fraction and pressure of helium increase, and the safety risk increases. There is an obvious positive correlation between leakage mass flow rate of helium and volume fraction and pressure. Under the same degree of openness, helium tends to accumulate in corners, and its diffusion along walls is more efficient than that in open areas. The diffusion process is guided by the spatial boundary, showing a non-uniform diffusion trend. In addition, the larger the pore size, the higher the helium leakage rate.

Keywords: outdoor multi-story park; hydrogen fuel cell vehicles (HFCV); hydrogen leakage and diffusion; diffusion characteristics; closed conditions; hazard

0 引言

氢能作为一种替代化石燃料的新型生态友好型能源,越来越受到关注^[1-2],有望缓解温室效应^[3-4],但氢能在利用时存在较大消防安全问题^[5-6]。近年来,停车场内氢燃料电池汽车(Hydrogen Fuel Cell Vehicle,HFCV)氢气泄漏引发的安全事故时有发生,如2019年韩国江陵市某加氢站因储氢罐超压泄放及零部件失效引发氢气泄漏并爆炸,导致2人死亡,6人受伤;2019年挪威奥斯陆某加氢站因螺栓松动致氢气泄漏爆炸事件并造成2人受伤^[7]。所以对停车场内氢气进行相关研究具有重要现实意义。

氢气燃爆极限宽且蔓延速度快,现有研究主要聚焦于氢气泄漏、扩散及燃爆特征^[8-9],尤其是大型设施和复杂环境中高压系统的氢气特性^[10-11]。研究人员通过向受限空间注入氢气或其他轻质气体研究气体扩散特性^[12-14]。RUFFIN^[15]和LI Xuefang^[16]等开展大规模泄漏试验,测试氢气含量和速度分布。MAKAROV等^[17]开展试验,模拟地下采矿空间进行氢气泄漏,并借助计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)模型验证试验数据的准确性。HUSSEIN等^[18]通过模拟燃料电池车氢气泄漏,探究泄漏直径和泄漏方向对可燃云团形成的影响。HOUF等^[19]模拟了新型移动加氢站氢气内部和外部泄漏,分析不同泄漏直径和操作压力对泄漏长度和扩散距离的影响。杨保德等^[20]基于CFD模拟分析氢气泄漏速度和泄漏口直径对扩散的影响。CHOI等^[21]模拟研究停车库中的氢气泄漏易燃区域的时间变化以及泄漏流量和通风对氢气扩散的影响。张静等^[22]分析车库中燃料电池汽车的氢气泄漏特点,指出不同通风速度对氢气扩散行为的影响。WANG Qihua等^[23]通过数值模拟发现,密闭空间墙

壁和角落同时发生泄漏时氢气体积分数更高。刘自亮等^[24]用FLACS软件,模拟埋地输氢管道在半受限空间内的泄漏爆炸事故后果。

当前研究多聚焦于单层或开放式停车场,针对室外立体停车场(简称停车场)这一特定环境的系统性分析较为缺乏,因此,笔者拟在停车场搭建HFCV泄漏试验模型,分析不同封闭条件下氢气扩散特性和危险性,探究孔径大小、泄漏位置与泄漏量对其扩散的影响,以期HFCV推广应用提供基础理论和数据支撑。

1 停车场试验模型

氢气泄漏主要包括湍流射流和扩散过程^[25]。在标准状态下,氦气、氢气的相对密度分别为0.86和0.93,在空气中的扩散系数分别为和 $0.756\text{ cm}^2/\text{s}$ ^[11],且氦气没有燃爆风险,因此,试验采用氦气代替氢气。

1.1 停车场模型搭建

1) 停车场试验模型为上海海昌公园停车场,比例为1:30,停车场尺寸及模型尺寸见表1。停车场分为3层:一层设置为封闭式,二层为半开放式,三层为开放式。停车场的每一层均包括停车位、通道和出入口等。试验模型如图1所示。

表 1 停车场模型及实际尺寸

Table 1 Parking lot model and actual size		
场景	实际尺寸/m×m×m	模型尺寸/m×m×m
停车场	65×31×5	2.17×1.03×0.17
立柱	0.9×0.9×5	0.03×0.03×0.17
停车位	2.4×4.5	0.08×0.15

2) 试验仪器设备包括氦气罐、泄压阀、分体式氦气检测仪、游标卡尺,以及特设的3层停车场模型。氦气罐为试验提供氦气,泄压阀用于调控氦气



图1 停车场模型
Fig.1 Parking lot model

释放速度,分体式氦气检测仪能实时监测氦气体积分数,如图2和图3所示。

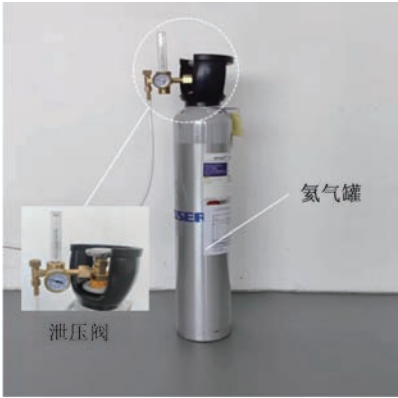


图2 氦气储存系统
Fig.2 Helium storage system

1.2 试验工况及测点布置

图4为传感器布置,其中,M、E和C分别表示每层的中央、边缘和角落3个位置,由于二、三层开放式设计,只设置M和E,一、二、三层的位置通过下标进行层级区分。氢燃料汽车普遍采用压力释放阀(Pressure Relief Valve, PRV)在系统压力超过安全阈值时自动开启泄压,实现近似等质量流率的氦气泄漏。设定氦气质量流量分别为0.18和0.27 kg/s,监测体积分数变化,大、小口径管内径分布为



图3 分体式氦气检测仪
Fig.3 Split helium detector

12.86和6.7 mm。
以M点为基准,沿纵横方向每隔0.5 m布设检测仪,每层监测点 P_1 — P_9 位置如图4所示,泄漏位置、质量流量及孔径等参数设置见表2。试验假设氦气释放形成的气云团仅在停车场内自由扩散,同一场景下其他变量保持一致。

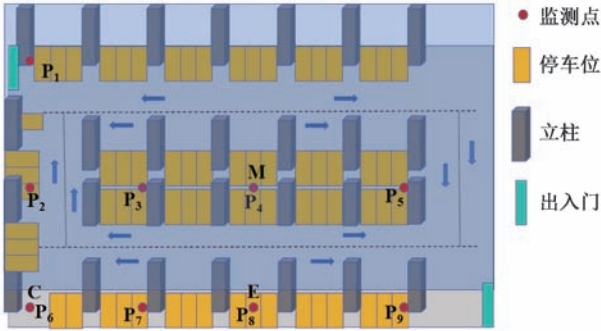


图4 传感器布置
Fig.4 Schematic of sensor arrangement

表2 试验参数设置
Table 2 Experimental parameter setting

试验编号	楼层	位置	质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	孔径/ mm
1	一	M_1	0.18	12.86
2	一	M_1	0.27	12.86
3	一	E_1	0.18	12.86
4	一	E_1	0.27	12.86
5	一	C_1	0.18	12.86
6	一	C_1	0.27	12.86
7	二	M_2	0.18	6.70
8	二	M_2	0.18	12.86
9	二	E_2	0.18	6.70
10	二	E_2	0.18	12.86
11	三	M_3	0.18	6.70
12	三	M_3	0.18	12.86
13	三	E_3	0.18	6.70
14	三	E_3	0.18	12.86

2 封闭停车层内氦气扩散特性及危险性分析

2.1 氦气泄漏位置与流量对扩散影响分析

1) 中央氦气泄漏扩散特性。在 M_1 点不同泄漏质量流量下,各监测点的体积分数随时间变化如图 5 所示。在 0~45 s,氦气上升至停车场天花板,当泄漏质量流量为 0.18 kg/s 时, P_4 处氦气的体积分数迅速升至 21.3%;当质量流量为 0.27 kg/s 时, P_4 处氦气的体积分数在 105 s 内升至 27.8%;在 45~300 s,氦气水平扩散,体积分数随时间逐渐衰减并趋于平稳,且质量流量越大,体积分数下降速度越快。在 300 s 停止供应氦气时,质量流量 0.18 和 0.27 kg/s 对应的 P_4 处体积分数快速下降为 7.4% 和 10.3%。可见:泄漏质量流量越大,近源区体积分数峰值越高、衰减速率越快。等效氢气体积分数

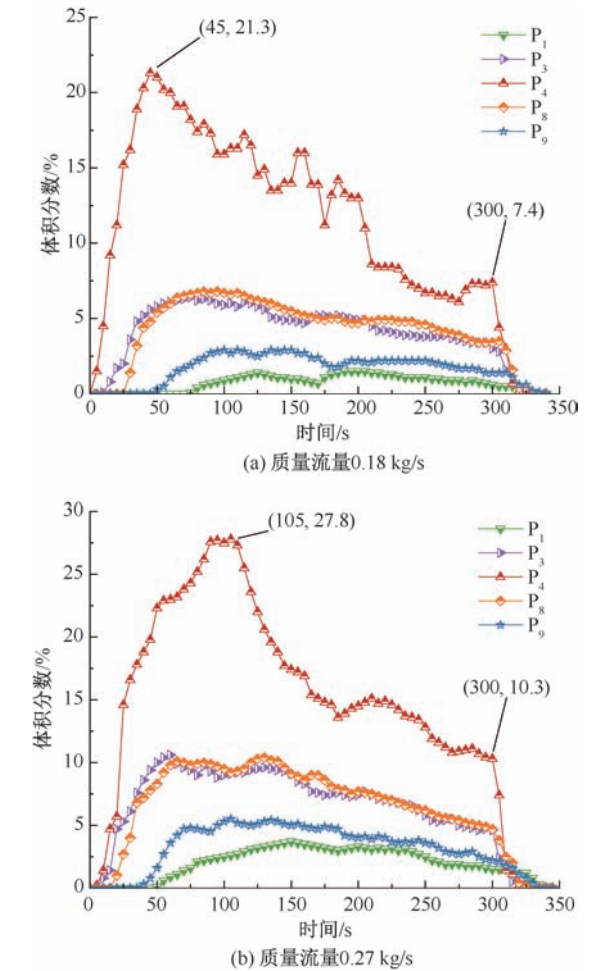


图 5 M_1 点氦气泄漏各监测点体积分数变化
Fig. 5 Variation of helium volume fraction at monitoring points for leakage at point M_1

均超爆炸下限,风险持续时间长。

2) 边缘氦气泄漏扩散特性。在 E_1 点不同泄漏质量流量下,各监测点的体积分数随时间变化如图 6 所示。氦气泄漏后,在质量流量为 0.18 和 0.27 kg/s 工况下, P_6 处的氦气体积分数(分别为 3.1% 和 4.1%)均高于泄漏点正上方 P_8 处(分别为 2.4% 和 3.1%),氦气体积分数随与泄漏点距离增加而递减;在相同空间范围内,角落区域较其他位置更易积聚,也更危险。

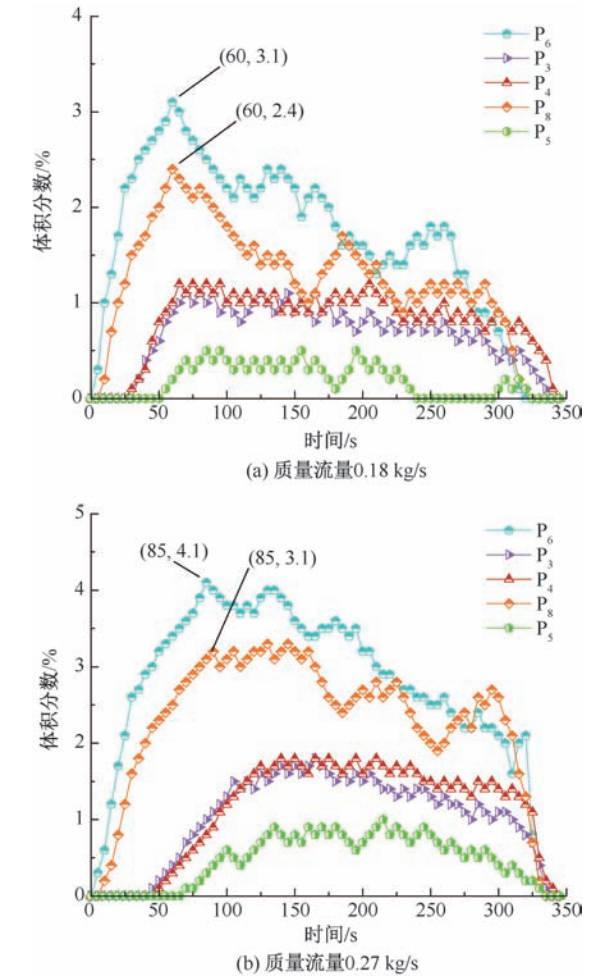
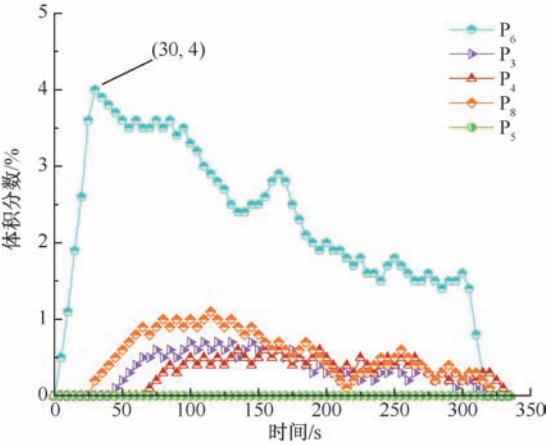


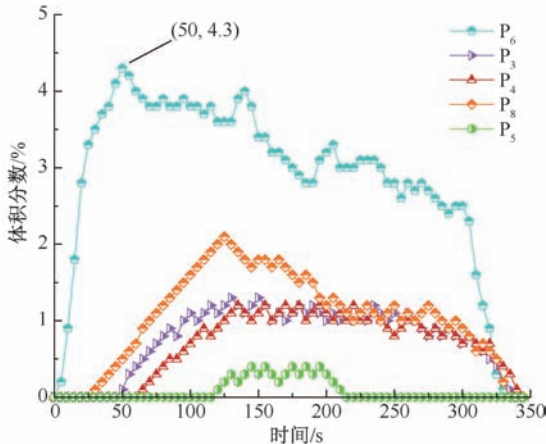
图 6 E_1 点氦气泄漏各监测点体积分数变化
Fig. 6 Variation of helium volume fraction at monitoring points for leakage at point E_1

3) 角落氦气泄漏扩散特性。在 C_1 点不同泄漏质量流量下,各监测点的体积分数随时间变化如图 7 所示。氦气泄漏质量流量为 0.18 和 0.27 kg/s 时, P_6 处的体积分数分别为 4% 和 4.3%,等效氢气体积分数达爆炸下限临界值,高于 P_8 处及离泄漏源更近的 P_3 点,表明氦气因浮力在角落积聚后水平扩散,体积分数随与泄漏点距离的增加而递减;泄漏质量流量越大,平稳阶段体积分数下降幅度越小,且氦

气在角落积聚后沿墙边扩散的速度及体积分数显著优于空旷区域。墙边扩散形成危险带,角落泄漏的燃爆风险隐蔽且持续。



(a) 质量流量0.18 kg/s



(b) 质量流量0.27 kg/s

图 7 C₁ 点氦气泄漏各监测点体积分数变化

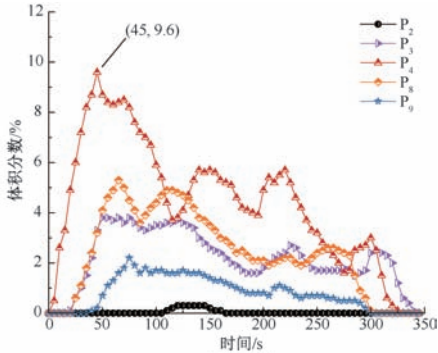
Fig. 7 Variation of helium volume fraction at monitoring points for leakage at point C₁

3 半封闭停车层内氦气扩散特性及危险性分析

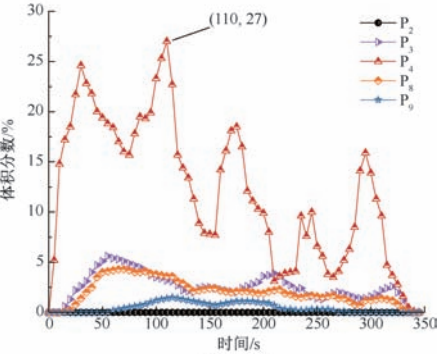
3.1 氦气泄漏位置与孔径对扩散影响分析

1) 中央氦气泄漏扩散特性。质量流量为 0.18 kg/s 时,不同孔径下 M₂ 点泄漏时各监测点体积分数变化如图 8 所示。可以看出,距泄漏源最近的 P₄ 处响应速度最快且体积分数峰值最高,大、小孔径下峰值分别为 27%和 9.6%,等效氢气体积分数均有爆炸风险,其余监测点体积分数则随与泄漏源距离增加而显著降低。

2) 边缘氦气泄漏扩散特性。质量流量为 0.18 kg/s 时,不同孔径下 E₂ 点泄漏各监测点体积分数



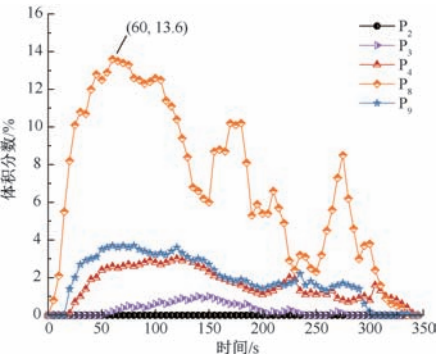
(a) 小孔径



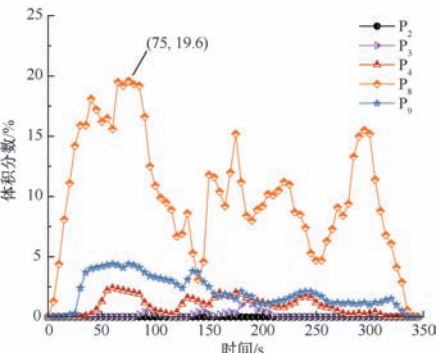
(b) 大孔径

图 8 M₂ 点氦气泄漏各监测点体积分数变化

Fig. 8 Variation of helium volume fraction at monitoring points for leakage at point M₂



(a) 小孔径



(b) 大孔径

图 9 E₂ 点氦气泄漏各监测点体积分数变化

Fig. 9 Variation of helium volume fraction at monitoring points for leakage at point E₂

随时间的变化如图 9 所示。不同泄漏孔径下氢气扩散特征差异显著。小孔径时氢气释放缓慢,泄漏源正上方 P_8 点初期体积分数上升平缓但持续聚集, P_3 点体积分数始终较低;大孔径时释放速度骤增, P_8 点体积分数快速冲高至 19.6% (远超小孔径的 13.6%),等效氢气体积分数超爆炸下限,气云波动显著,点火风险高;气流驱动其向外扩散,进一步扩大危险范围。

4 开放停车层内氢气扩散特性及危险性分析

4.1 氢气泄漏位置与孔径对扩散影响分析

1) 中央氢气泄漏扩散特性。质量流量为 0.18 kg/s 时,不同孔径下 M_3 点泄漏各监测点体积分数随时间的变化如图 10 所示。前 200 s 内 P_4 处氢气体积分数多次出现峰值,大、小孔径下最大峰值分别

为 45.3% 和 6.4%; P_2 、 P_3 、 P_8 、 P_9 等处体积分数递减。 P_4 处氢气体积分数虽随时间下降但仍处高位,且大孔径泄漏时整体气云团体积分数显著高于小孔径。大孔径泄漏时等效氢气峰值 45.3% (爆炸核心区),形成大面积危险。小孔径峰值 6.4% (略超下限),警惕波动风险。

2) 边缘氢气泄漏扩散特性。质量流量为 0.18 kg/s 时,不同孔径下 E_3 点泄漏各监测点体积分数随时间的变化如图 11 所示。 P_8 在试验前 150 s 内体积分数波动显著,大、小孔径泄漏下峰值分别为 21.3% 和 13%。这是由于初期氢气受浮力作用迅速上升至天花板,且随与泄漏点距离的增加而减小;大孔径泄漏时仅 P_8 、 P_9 处氢气体积分数较高,其余监测点极低或无,边缘区域危险性更高,这是因为第三层为全开放空间,大部分氢气迅速排出,仅少量沿边缘流向 P_9 ,流向中心区域的极少。

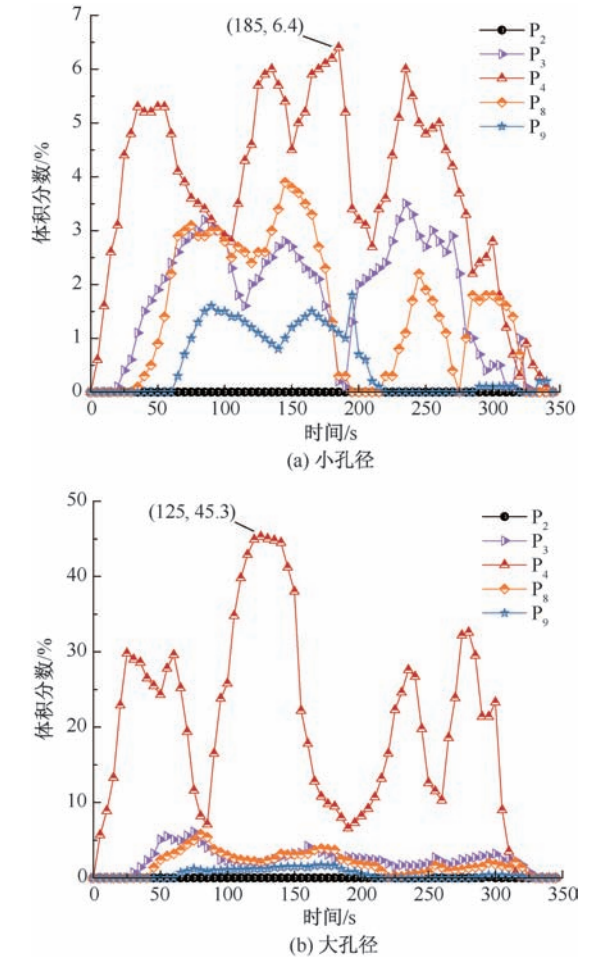


图 10 M_3 点氢气泄漏各监测点体积分数变化
Fig. 10 Variation of helium volume fraction at monitoring points for leakage at point M_3

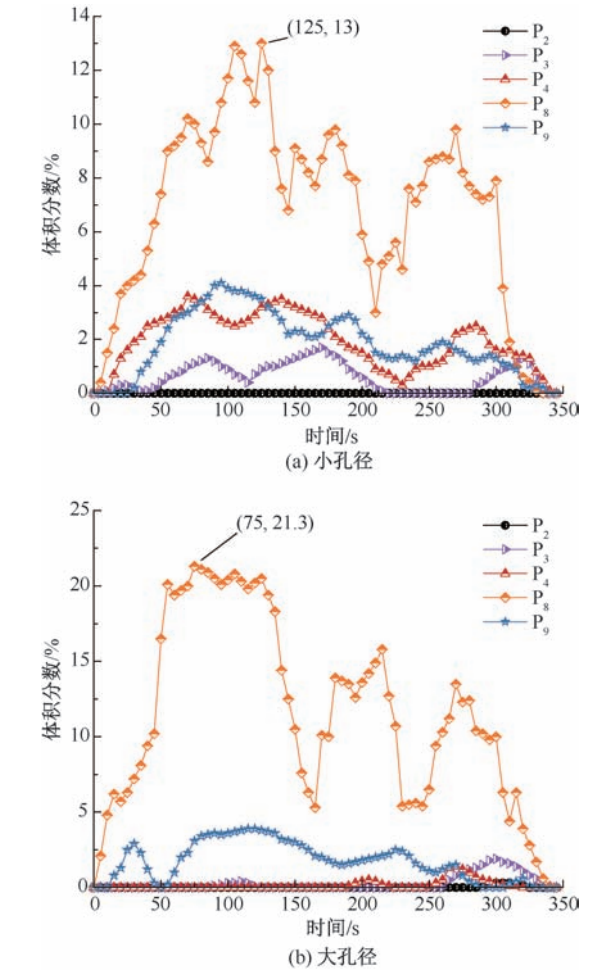


图 11 E_3 点氢气泄漏各监测点体积分数变化
Fig. 11 Variation of helium volume fraction at monitoring points for leakage at point E_3

5 结 论

1) 在封闭停车层 M₁ 位置以 0.27 kg/s 流量泄漏时,氢气体积分数最高达 27.8%,等效氢气体积分数属爆炸高风险区间氢气体积分数随质量流量增大而升高,同径向监测点体积分数趋同,且随着与泄漏源距离增大稳定递减;E₁、C₁ 位置以 0.27 kg/s 流量泄漏时,角落监测点 P₆ 氢气体积分数最高(分别为 4.1%、4.3%),C₁ 泄漏导致墙边 P₈ 体积分数率先上升。泄漏质量流量从 0.18 kg/s 增至 0.27 kg/s 时,M₁ 点近源区体积分数由 21.3% 升至 27.8%。

2) 半封闭停车层 M₂ 位置以 0.18 kg/s 质量流

量泄漏时,小孔径与大孔径下氢气体积分数峰值分别为 9.6% 和 27%,等效氢气体积分数均超爆炸下限。表明孔径显著影响泄漏动态,孔径越大,泄漏速率与体积分数上升速度越快;尽管小孔径泄漏量低,但在半开放环境下,局部体积分数仍可能突破危险阈值。

3) 不同楼层 M 位置大孔径(流量为 0.18 kg/s)泄漏时,封闭层、半封闭层和开放层氢气最大体积分数分布为 21.3%、27% 和 45.3%,泄漏源处体积分数与溢出量同步上升。该结果表明,停车场开放程度显著影响氢气扩散行为,可为氢气在类似空间中的泄漏风险评估提供关键参考。

参 考 文 献

[1] OLIVEIRA A M, BESWICK R R, YAN Yushan. A green hydrogen economy for a renewable energy society[J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2021, 33: DOI:10.1016/j.coche.2021.100701.

[2] EHLERS J C, FEIDENHANS 'L A A, THERKILDSEN K T, et al. Affordable green hydrogen from alkaline water electrolysis: key research needs from an industrial perspective[J]. Acs Energy Letters, 2023, 8(3): 1 502–1 509.

[3] QIAN Jinyuan, WU Jiayi, GAO Zhixin, et al. Hydrogen decompression analysis by multi-stage Tesla valves for hydrogen fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(26): 13 666–13 674.

[4] COOPER J, DUBEY L, BAKKALOGLU S, et al. Hydrogen emissions from the hydrogen value chain-emissions profile an impact to global warming[J]. Science of the Total Environment, 2022, 830: DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.154624.

[5] WANG Xueyan, ZHANG Changshuai, GAO Wei. Risk assessment of hydrogen leakage in diesel hydrogenation process[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(10): 6 955–6 964.

[6] 于溪芮, 何旭, 孔得朋. 基于 Apriori 算法的氢安全事故统计分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 128–134.

[7] YU Xirui, HE Xu, KONG Depeng. Apriori algorithm-based statistical analysis of hydrogen accidents[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 128–134.

[8] 赵明斌. 地下停车场内燃料电池汽车泄漏及爆炸事故的安全分析[D]. 济南: 山东大学, 2021.

[9] ZHAO Mingbin. Safety analysis of hydrogen fuel cell vehicle leakage and explosion accident in an underground parking garage[D]. Ji'nan: Shandong University, 2021.

[10] BIE H Y, HAO Z R. Simulation analysis on the risk of hydrogen releases and combustion in subsea tunnels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(11): 7 617–7 624.

[11] LI Yongjun, WANG Zhirong, SHANG Zheng, et al. Effect of leakage source condition on the unignited hydrogen released issuing through a horizontal realistic pipeline geometry[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 55: 1 090–1 101.

[12] HAJJI Y, BOUTERAA M, BOURNOT P, et al. Assessment of an accidental hydrogen leak from a vehicle tank in a confined space[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(66): 28 710–28 720.

[13] LI Yongjun, WANG Zhirong, SHI Xuemeng, et al. Numerical investigation of the dispersion features of hydrogen gas under various leakage source conditions in a mobile hydrogen refueling station[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(25): 9 498–9 511.

[14] BARLEY C D, GAWLIK K. Buoyancy-driven ventilation of hydrogen from buildings: laboratory test and model validation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(13): 5 592–5 603.

[15] PITTS W M, YANG J C, BLAIS M, et al. Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(22): 17 457–17 469.

[16] CARITEAU B, TKATSCHENKO I. Experimental study of the concentration build-up regimes in an enclosure without

- ventilation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(22): 17 400–17 408.
- [15] RUFFIN E, MOUILLEAU Y, CHAINEAUX J. Large scale characterization of the concentration field of supercritical jets of hydrogen and methane[J]. Springer Netherlands, 1996, 9(4): 279–284.
- [16] LI Xuefang, CHEN Mingjia, WANG Yujie, et al. Measurements of concentration decays in underexpanded jets through rectangular slot nozzles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(20): 9 884–9 893.
- [17] MAKAROV D, SHENTSOV V, KUZNETSOV M, et al. Pressure peaking phenomenon: model validation against unignited release and jet fire experiments[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(19): 9 454–9 469.
- [18] HUSSEIN H, BRENNAN S, MOLKOV V. Dispersion of hydrogen release in a naturally ventilated covered car park[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(43): 23 882–23 897.
- [19] HOUF W G, EVANS G H, EKOTO I W, et al. Hydrogen fuel-cell forklift vehicle releases in enclosed spaces [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(19): 8 179–8 189.
- [20] 杨保德, 崔小东, 李席, 等. 化工企业实验室氢气泄漏模拟分析[J]. 山东化工, 2021, 50(13): 149–151.
YANG Baode, CUI Xiaodong, LI Xi, et al. Simulation of hydrogen leakage in a laboratory of chemical enterprises [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(13): 149–151.
- [21] CHOI J, HUR N, KANG S, et al. A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(19): 8 084–8 091.
- [22] 张静, 黄玉玺, 张巍, 等. 车库燃料汽车氢气泄漏模拟与分析[J]. 太原理工大学学报, 2022, 53(6): 1 068–1 075.
ZHANG Jing, HUANG Yuxi, ZHANG Wei, et al. Simulation and analysis of hydrogen leakage in garage fuel vehicles [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53(6): 1 068–1 075.
- [23] WANG Qihua, ZHAI Chunjie, GONG Junhui, et al. Analytical and numerical predictions of hydrogen gas flow induced by wall and corner leakages in confined space[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(11): 6 848–6 862.
- [24] 刘自亮, 熊思江, 花争立, 等. 埋地输氢管道泄漏爆炸事故后果模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 94–100.
LIU Ziliang, XIONG Sijiang, HUA Zhengli, et al. Simulation analysis on leakage and explosion accident consequence of buried hydrogen pipeline [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(12): 94–100.
- [25] 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.



作者简介: 田苗 (2000—), 男, 贵州江口人, 硕士研究生, 研究方向为高压氢泄漏扩散特性及电池储能。E-mail: tian13668569677@163.com。