

中文引用格式:谭路遥,姚勇征,潘傲澜,等. 加氢机氢气泄漏扩散数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(5): 224-233.

英文引用格式: Tan Luyao, Yao Yongzheng, Pan Aolan, et al. Numerical simulation of hydrogen diffusion from hydrogen dispenser leakage[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(5): 224-233.

加氢机氢气泄漏扩散数值模拟研究*

谭路遥, 姚勇征** 副教授, 潘傲澜, 胡茂炜

(中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

中图分类号: X932

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.0886

基金项目: 北京市科技计划“揭榜挂帅”项目(Z231100003823020); 北京市高层次创新创业人才支持计划科技新星计划项目(20240484576); 中央高校基本科研业务费资助(2024ZKPYAQ05)。

【摘要】 为降低加氢机加注过程中因泄漏引发的事故风险, 利用 Fluent 软件模拟 35 MPa 加氢机氢气泄漏扩散过程, 研究加氢区罩棚结构下氢泄漏扩散特性, 分析泄漏孔径、风速及局部通风等因素对氢气摩尔分数、可燃区域分布的影响。研究表明: 当加氢软管泄漏孔径为 2 mm 时, 不会在罩棚下表面形成可燃区域, 而当泄漏孔径达到 5 或 10 mm 时, 可在罩棚下表面形成可燃区域, 且罩棚下表面摩尔分数最高点在平行于射流中轴线附近。其中, 泄漏孔径为 10 mm, 垂直泄漏方向罩棚下侧摩尔分效呈现高斯分布; 当环境风向垂直于泄漏方向, 风速为 2 或 8 m/s 时, 可有效减少泄漏加氢机附近氢气积聚; 而风速为 5 m/s 时, 在障碍物附近产生涡旋结构, 诱导氢气积聚, 增加燃爆风险; 无环境风条件下, 在加氢区加入风机进行局部通风, 5 或 10 m/s 均可在 2 s 内将流场内氢气云摩尔分数稀释至可燃范围以下, 而 10 m/s 的风机风速对稀释泄漏源前方氢气摩尔分数作用更大。

【关键词】 加氢机; 氢气泄漏; 氢气扩散; 数值模拟; 泄漏孔径; 环境风速; 局部通风

Numerical simulation of hydrogen diffusion from hydrogen dispenser leakage

Tan Luyao, Yao Yongzheng, Pan Aolan, Hu Maowei

(School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reduce accident risks caused by leakage during the refueling process, the hydrogen leakage and diffusion behavior of a 35 MPa hydrogen dispenser was numerically simulated using Ansys Fluent. The characteristics of hydrogen leakage and diffusion under the canopy structure in the refueling zone were investigated. The effects of leakage diameters, ambient wind velocity, and local ventilation on hydrogen concentration distribution and the evolution of flammable areas were analyzed. The results show that when the leakage diameter of filling hose is 2 mm, no flammable area is formed on the underside of canopy. However, when the leakage diameter increases to 5 mm and 10 mm, a flammable area can develop on canopy underside. The location of the highest hydrogen concentration on underside of canopy is concentrated near the axis parallel to the jet direction. Specifically, when leakage diameter is 10 mm, the hydrogen concentration on underside of canopy along vertical leakage direction exhibits a Gaussian distribution. When the ambient wind is perpendicular to leakage direction, wind velocities of 2 m/s and 8 m/s can effectively reduce hydrogen accumulation near the leakage hydrogen dispenser. In

* 文章编号: 1003-3033(2026)05-0224-10; 收稿日期: 2025-12-10; 修稿日期: 2026-02-11

** 通信作者: 姚勇征(1991—), 男, 河北承德人, 博士, 副教授, 主要从事新能源风险防控研究。E-mail: yaoyz@cumt.edu.cn。

contrast, at the wind speed of 5 m/s, a vortex structure was formed near obstacles, leading to hydrogen accumulation and increasing the risk of fire and explosion. Under no ambient wind conditions, local ventilation is provided in the refueling zone. When the ventilation velocity reaches 5 m/s and 10 m/s, the hydrogen cloud concentration within the flow field can be successfully diluted to below the flammable limit within 2 s. Moreover, a ventilation velocity of 10 m/s shows a more pronounced effect in reducing the hydrogen concentrations in front of the leakage source.

Keywords: hydrogen dispenser; hydrogen leakage; hydrogen diffusion; numerical simulation; leakage diameter; ambient wind velocities; local ventilation

0 引言

氢能作为一种清洁、高效的可再生能源,是全球“脱碳时代”的能源新焦点,已被 30 多个经济体纳入能源发展体系^[1-3]。自 2020 年我国提出“碳达峰、碳中和”目标以来,大力推进以氢能为代表的绿色交通体系建设。加氢站是绿色交通建设的重要基础设施,截至 2024 年 6 月,我国(含港澳台地区)建成加氢站 507 座,位居全球首位^[4]。加氢站中加氢机运行压力高,易受氢脆效应、疲劳损伤及人员不当操作影响,导致氢气泄漏发生。加之加氢区多为平顶罩棚,形成受限区域,造成氢气积聚,有扩大成燃爆事故的可能。因此,研究加氢区氢气泄漏扩散特性,有利于减少加注过程中的事故风险,助力加氢站安全运营。

在泄漏扩散规律研究方面,国内外学者多采用数值模拟方法研究泄漏条件、环境因素对氢气泄漏扩散的影响。戴君豪等^[5]采用 Flacs 研究了加氢站长管拖车储氢温度对氢气扩散的影响,发现储氢温度越低,氢射流在撞击隔爆墙后,可燃氢气云达到稳定的时间越长,扩散范围也逐渐增大。Qian Jinyuan 等^[6]采用 Fluent 软件研究了加氢站储氢罐泄漏位置与环境风效应对氢气泄漏扩散影响,发现泄漏位置与障碍物之间越窄,可燃氢气云轮廓越不规则,与泄漏相反的风向可能导致可燃氢气云轮廓增大。在此基础上,Li Xiaojuan 等^[7]进一步研究了可变风速与恒定风速对可燃氢气云轮廓与氢浓度分布影响。Liang Yang 等^[8]针对储氢罐、长管拖车等泄漏场景,研究了泄漏方向、风向及风速等因素对事故后果的影响。大多数学者考虑到试验危险性,采用氦气代替氢气开展缩尺试验研究。Swain 等^[9]通过试验验证了采用氦气代替氢气试验的准确性和可行性。田苗等^[10]搭建了缩尺试验平台,研究停车场封闭条件、泄漏流量、泄漏孔径对氢气扩散的影响。牛奕等^[11]搭建了加氢站缩尺寸试验,利用氦气代替氢气,研究泄漏量、环境风速对氢气泄漏扩散影响。为

降低氢气泄漏引发燃爆事故的可能性,部分学者采用通风技术降低氢气泄漏危险。Tamura 等^[12]采用鼓风机通风降低燃料电池乘用车周围氢气摩尔分数,发现鼓风机风速达到 10 m/s 时,可有效降低车辆周围氢气摩尔分数。Xie Hong 等^[13]使用 Fluent 研究鼓风机对氢燃料电池汽车泄漏降低氢气摩尔分数作用,发现体积流量 740 m³/min 的鼓风机对于 2 000 NL/min 氢气泄漏率稀释作用良好。

综上所述,现有研究多集中于长管拖车、储氢罐泄漏,对加氢机氢气泄漏扩散行为研究较少,且缺乏加氢区构筑物等对气流扩散影响分析。此外,多数学者主要分析环境风速、风向对氢气云稀释作用,对于加氢站泄漏场景,应用局部通风降低氢气泄漏危险性的研究不足。因此,笔者拟以典型高压气态加氢站为研究对象,采用 Fluent 数值模拟软件研究加氢区罩棚结构下氢气扩散行为,分析泄漏孔径、环境风速及机械通风等因素对氢气扩散的影响,以期为加强加氢站建设、日常运维等提供理论依据。

1 加氢机氢气泄漏扩散模型

1.1 物理模型

基于北京市某加氢站实际空间布局,构建加氢站全尺寸模型,计算域大小为 L (长度) $\times W$ (宽度) $\times H$ (高度)=120 m $\times$ 60 m $\times$ 12 m,如图 1 所示。加氢站内主要设备及构筑物如图 2 所示。为减少模型的复杂程度及网格数量,简化加氢站内主要的涉氢设备,针对加氢软管泄漏场景,假设加氢枪连接端的加氢软管发生泄漏,泄漏处等效为圆孔,泄漏位置圆心坐标为(17.78,1.8,92.96)m。在泄漏源正前方,相隔 9.4 m 的位置有一加氢机,该加氢机中心点坐标为(17.58,1.45,102.66)m。另外,在泄漏源斜前方位置还有一罩棚支柱,支柱中心点坐标为(15.38,3.95,102.58)m。

1.2 数值计算模型

氢气泄漏扩散满足质量守恒、动量守恒、能量守

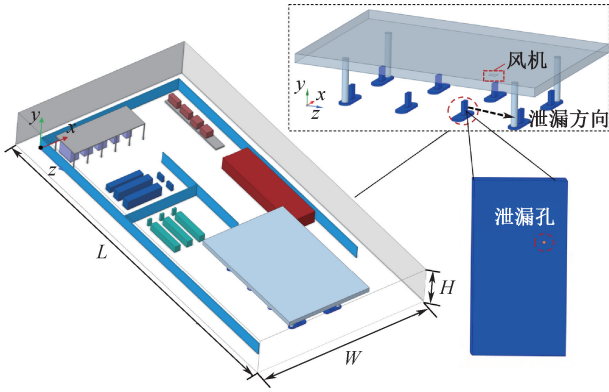


图1 加氢站几何模型

Fig. 1 Geometric model of hydrogen refueling station

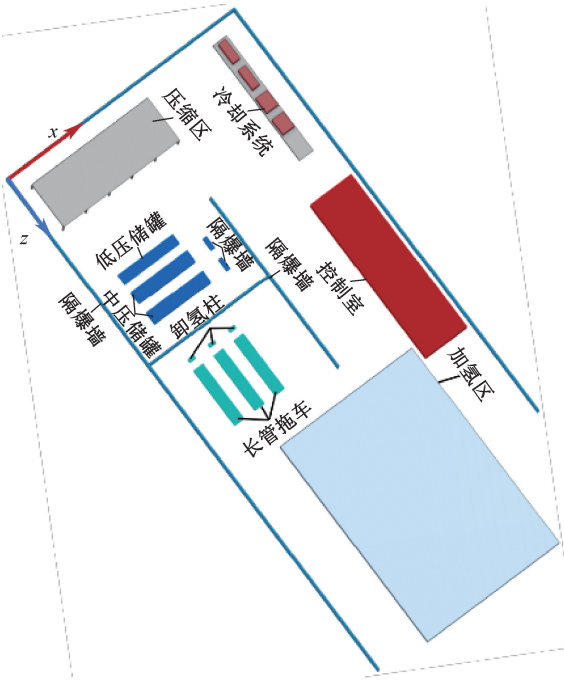


图2 加氢站设备布局

Fig. 2 Equipment layout of hydrogen refueling station

恒,也遵循组分守恒定律^[14]。泄漏扩散过程受到障碍物影响,流动过程复杂,属于湍流流动。由于Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型可较好地预测圆孔射流,因此选择Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型^[15]。此外,采用半隐式压力耦合方程算法,对流项采用二阶迎风格式。

质量守恒方程为:

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

式中: ρ 为流体密度,kg/m³; t 为时间,s; $\mathbf{v}$ 为速度矢量,m/s。

动量守恒方程为:

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

式中: p 为静压,Pa; $\mathbf{g}$ 为重力加速度,m/s²; $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 为应力张量,Pa。

能量守恒方程为:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho E + p)) = \\ \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_n h_n \mathbf{J}_n + (\bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} \cdot \mathbf{v}) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: E 为单位质量流体的能量,J/kg; k_e 为有效传热系数,W/(m·K); T 为流体的热力学温标,K; h_n 为组分 n 的单位质量焓,J/kg; $\mathbf{J}_n$ 为组分 n 的质量扩散通量,kg/(m²·s); $\bar{\boldsymbol{\tau}}_e$ 为有效应力张量,Pa。

组分输运方程为:

$$\frac{\partial (\rho Y_n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_n) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_n \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_n = -\rho \left(D_{n,m} + \frac{\mu_t}{\rho Sc} \right) \nabla Y_n \quad (5)$$

式中: Y_n 为组分 n 的质量分数,%; $D_{n,m}$ 为流体扩散系数,m²/s; 氢气取 6.1×10^{-5} m²/s; Sc 为湍流施密特数,取0.7。

Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型及 k 的控制方程见下式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \\ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \end{aligned} \quad (6)$$

式中: k 为湍流动能,m²/s²; ε 为湍流耗散率,m²/s³; Pr 为 k 的普朗特数,取1.0; G_k 为平均速度梯度产生的湍流动能,kg/(m·s³); G_b 为浮力产生的湍流动能,kg/(m·s³); Y_M 为可压缩湍流中脉动扩张的贡献项,kg/(m·s³)。

ε 的控制方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho C_1 S \varepsilon \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: μ 为流体分子动力黏度,Pa·s; μ_t 湍流黏度,Pa·s; Pr 为 ε 的普朗特数,取1.2; $C_{1\varepsilon}$ 、 C_2 为模型常数,分别取1.44、1.90; C_1 为经验常数,取值范围为0.43~1; S 为平均应变率张量的模,1/s; ν 为湍流运动黏度,m²/s; $C_{3\varepsilon}$ 为浮力相关常数。

为验证以上数值计算模型的准确性,将数值模拟结果与Pitts等^[16]的试验数据对比,如图3所示。由对比结果可知:氢气摩尔分数相差较小,因此,所使用的数值计算模型可准确计算氢气泄漏扩散过程。

1.3 边界条件设置

将泄漏位置设置为质量流量入口,泄漏方向沿

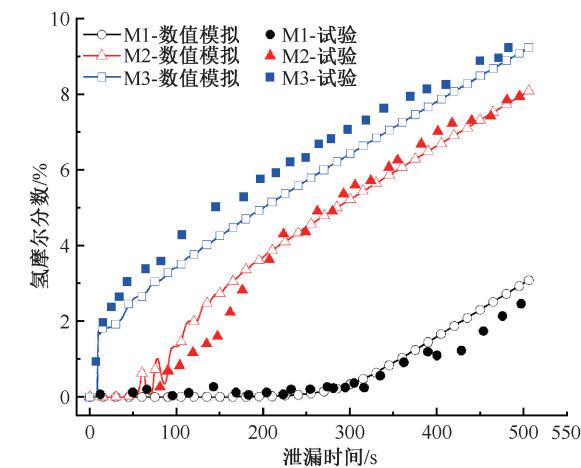


图 3 数值计算模型验证

Fig. 3 Verification results of numerical calculation model

Z 轴正方向。当考虑环境风速时,将加氢站左侧设置为速度入口,其他方向设置为压力出口,加氢站其他不发生泄漏部分均设置为壁面。

由于实际氢气泄漏孔尺寸与加氢站工作单元尺寸差距大,采用泄漏孔实际尺寸建模,将导致网格数量大。其次,高压氢气泄漏到环境中属于欠膨胀射流过程,在泄漏孔外形成马赫盘等复杂激波结构,在计算过程中需采用较小的松弛因子和时间步长^[17]。为简化数值模拟过程,采用 Birch 等^[18]提出的虚喷嘴模型计算激波结构后泄漏氢气的伪直径、质量流量等。

氢气泄漏扩散受泄漏孔径、风速等影响较大,因此,考虑 3 种泄漏孔径,并研究 3 种不同环境风速和 2 种不同局部通风风速的影响,共设置以下 8 种不同泄漏场景,见表 1。

表 1 加氢机泄漏场景设置

Table 1 Scenario setting for hydrogen dispenser leakage

工况序号	泄漏孔径/ mm	泄漏流量/ (kg/s)	等效直径/ mm	环境风速/ (m/s)	环境风向	风机风速/ (m/s)
1	2	0.068 8	23.25	0	—	—
2				2	+X	—
3				5	+X	—
4				8	+X	—
5				0	—	5
6				0	—	10
7	5	0.430 0	58.12	0	—	—
8	10	1.720 3	116.24	0	—	—

1.4 网格独立性验证

为减少网格数量对计算结果的影响,采用非结构化网格划分计算域,共划分 4 组网格,网格数量分别为 2 448 628、2 904 858、3 260 626、4 507 210。在计算域中随机选取 (17.78, 1.8, 95) m 作为监测点,使用上述数值计算模型,得到不同网格数量下监测点的氢摩尔分数变化。网格独立性验证如图 4 所示,当网格数量为 3 260 626 与 4 507 210 时,所对应曲线氢摩尔分数相差较小,考虑到节省计算资源,选择网格数量为 3 260 626 进行后续计算模拟,泄漏孔采用局部面加密,网格尺寸为 0.002 m,泄漏源周围 5 m×5 m×5 m 的位置,采用影响体 (Body of Influence) 加密,加密尺寸为 0.08 m。

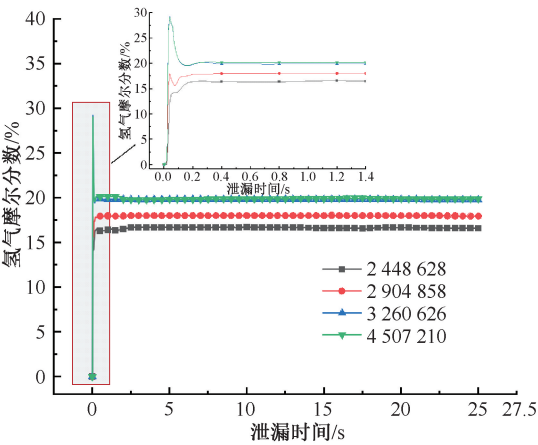


图 4 网格独立性验证

Fig. 4 Grid independence verification

2 氢气泄漏数值模拟结果分析

2.1 泄漏孔径对氢气泄漏扩散影响

在无环境风条件下,选取泄漏孔径 d 为 2、5、10

mm,研究泄漏孔径对氢气泄漏扩散的影响(图 5),泄漏 25 s 后,泄漏孔径 5 与 10 mm 可燃区域可扩大至加氢区范围以外,而泄漏孔径为 2 mm,由于泄漏量较少且氢射流初始动量较小,在撞击前方障碍物

后动量迅速衰减,可燃区域主要位于前侧加氢机和罩棚支柱附近。

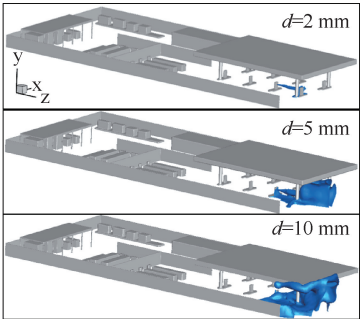


图 5 不同泄漏孔径可燃区域分布

Fig. 5 Flammable areas under different leakage diameters

不同泄漏孔径可燃氢气云体积如图 6 所示,泄漏 25 s 后,泄漏孔径越大,产生可燃氢气云体积越大。 $d=2\text{ mm}$ 共产生可燃氢气云体积 19.39 m^3 , $d=5\text{ mm}$ 产生 296.46 m^3 , $d=10\text{ mm}$ 产生 $1\,155.23\text{ m}^3$ 。泄漏孔径 10 mm 可燃氢气云在 5~10 s 间先呈现下降趋势,10~25 s 重新恢复增长趋势。可燃氢气云“先降后升”趋势是泄漏前期氢射流近场稀释作用与后期罩棚区域氢气积聚所致。

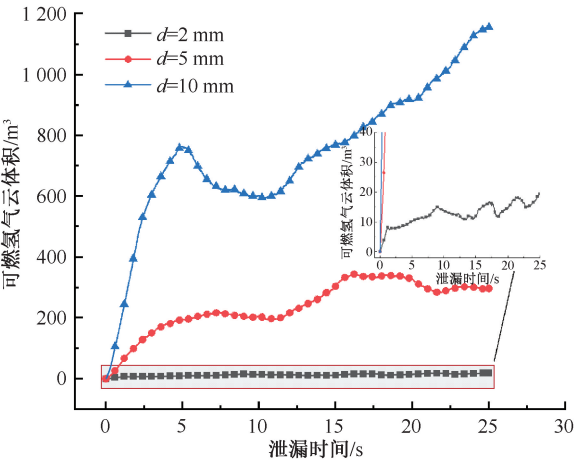


图 6 不同泄漏孔径可燃氢气云体积

Fig. 6 Flammable hydrogen cloud volume under different leakage diameter

泄漏孔径 10 mm 下氢气摩尔分数分布($t=5\sim 10\text{ s}$)如图 7a—图 7c 所示,近场区域由于湍流强度大,氢气浓度被迅速稀释至可燃下限以下,因此,可燃氢气云体积先呈阶段性下降趋势。泄漏孔径 10 mm 下氢气摩尔分数分布($t=15\sim 25\text{ s}$)如图 7d—图 7f 所示,随着泄漏持续进行,泄漏氢气撞击前方加氢机及支柱后,开始向罩棚下扩散并积聚,形成较多的可燃氢气云,另外有部分氢气云扩散到罩棚区域外,不再受罩棚区域限制,持续卷吸空气,致使远

场可燃氢气云体积持续增加。因此, $t=10\text{ s}$ 后可燃氢气云体积呈现上升趋势。

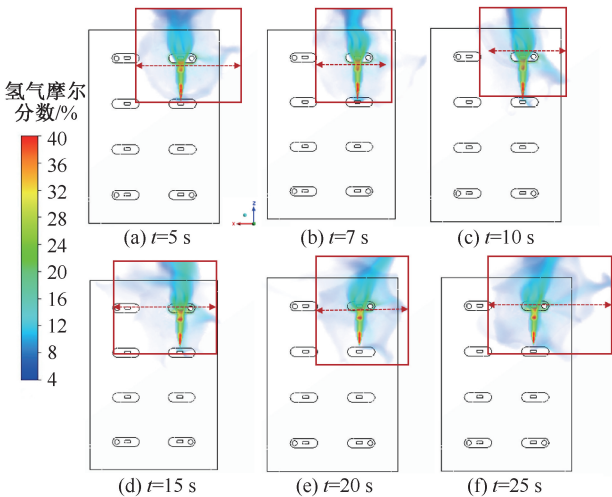


图 7 泄漏孔径 10mm 下氢气浓度分布($t=5\sim 25\text{ s}$)

Fig. 7 Hydrogen concentration distribution for 10 mm leakage diameter ($t=5\sim 25\text{ s}$)

35 MPa 加氢机泄漏后,泄漏氢气在动量主导下快速撞击到前侧障碍物(加氢机与罩棚支柱),射流方向发生偏转,泄漏氢气向罩棚下侧扩散。为研究氢射流撞击障碍物后,罩棚下侧氢气摩尔分数变化,在加氢区罩棚下侧壁面处设置 3 条监测曲线,曲线设置如图 8 所示,曲线坐标见表 2。

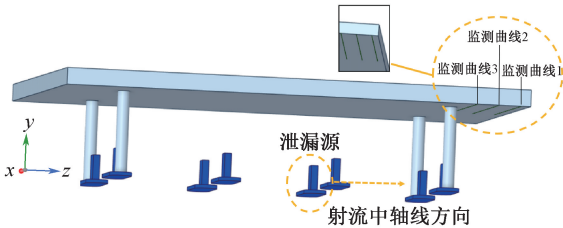


图 8 监测曲线设置

Fig. 8 Monitoring curves setting

表 2 监测曲线坐标

Table 2 Monitoring curves coordinates			m
曲线序号	坐标		
1	(9.5, 7.6, 108)	(24, 7.6, 108)	
2	(9.5, 7.6, 106)	(9.5, 7.6, 106)	
3	(9.5, 7.6, 104)	(24, 7.6, 104)	

泄漏孔径 2 mm,罩棚下侧监测曲线浓度趋势总体呈现出“左侧高-中间次之-右侧低”趋势,并沿射流中轴线方向表现为距泄漏孔越远,氢浓度越低。2 mm 泄漏孔径在扩散过程中,动量较弱,浮力主导作用强。泄漏孔径 2 mm 监测曲线氢气摩尔分数如图 9 所示,氢射流撞击前方加氢机后,动量削减并向

周围扩散。左侧为罩棚支柱,进一步削弱了泄漏氢气动量,氢气在左侧滞留时间久,且积累量大。而右侧无障碍物阻挡,不易在罩棚下侧形成积聚,因此,形成了“左侧高-中间次之-右侧低”的摩尔分数趋势。

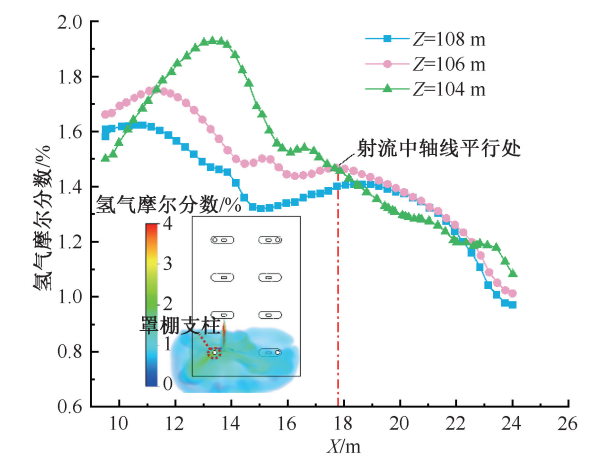


图 9 泄漏孔径 2 mm 监测曲线摩尔分数分布
Fig. 9 Concentration distribution of monitoring curves under a leakage diameter of 2 mm

泄漏孔径 5 mm,罩棚下侧 Z = 106、108 m 摩尔分数分布呈中间高-左边次之-右边低,而 Z = 104 m,则表现为左侧高-中间次之-右侧最低,均表现为沿射流中轴线方向离泄漏孔越远,氢摩尔分数越高。泄漏孔径 5 mm 监测曲线氢气摩尔分数如图 10 所示,5 mm 泄漏孔径形成的氢射流量较大,氢射流在撞击前方加氢机后,仍保持较大动量向前扩散,在浮力作用的共同作用下,泄漏氢气在泄漏源正前方罩棚下积聚,沿壁面向左右两侧横向扩散。因左侧由于罩棚支柱阻碍作用,氢气摩尔分数略高于右侧。

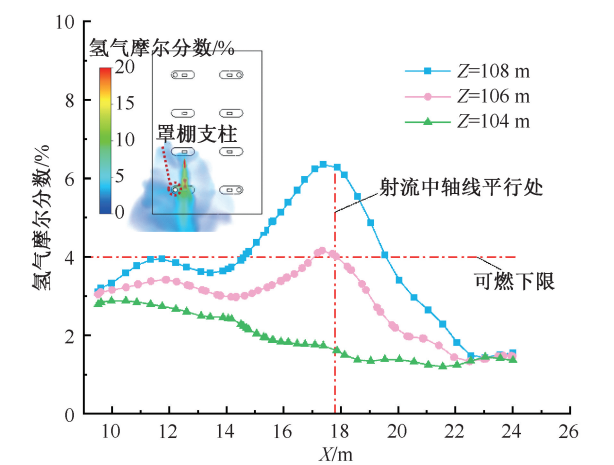


图 10 泄漏孔径 5 mm 监测曲线摩尔分数分布
Fig. 10 Concentration distribution of monitoring curves under a leakage diameter of 5mm

泄漏孔径 10 mm,监测曲线氢气摩尔分数均呈

现高斯分布,且沿射流中轴线方向大致表现为距泄漏孔越远,摩尔分数越高。泄漏孔径 10 mm 形成的氢射流动量远大于前 2 种孔径,受障碍物阻碍作用减小。泄漏孔径 10 mm 监测曲线摩尔分数分布如图 11 所示,氢射流撞击前侧加氢机后,大量氢气在中间罩棚下表面积聚,氢气摩尔分数达到 10% 以上,氢气摩尔分数沿罩棚左右两侧衰减。此外,10 mm 泄漏孔径形成的氢射流,湍流强度大,加速了与周围空气的混合,使罩棚下表面氢气摩尔分数分布趋于均匀。与 d = 2 mm 相比,d = 5 和 10 mm 时,罩棚下侧监测曲线沿射流中轴线方向表现为距泄漏源越远,罩棚下侧氢气摩尔分数越高。这是由于氢射流在撞击前方加氢机后,受动量主导作用大于浮力主导作用,随着氢射流向前扩散,动量逐渐衰减,浮力主导作用增强,氢气开始停滞,使得下游区域氢气摩尔分数高于近源区域。因此,5 和 10 mm 泄漏孔径,沿射流中轴线方向大致表现为距泄漏源越远,罩棚下侧氢气摩尔分数越大。

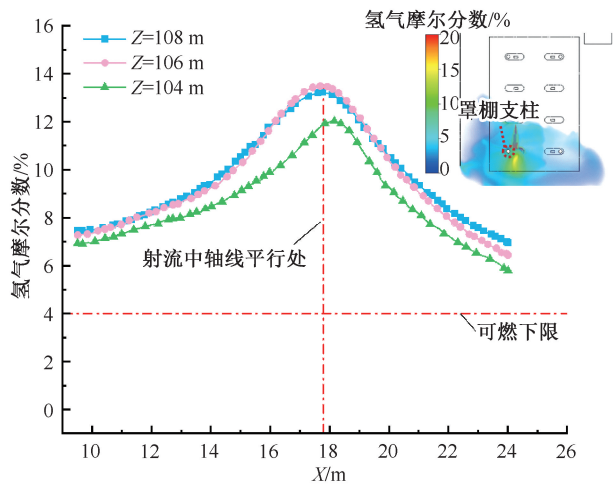


图 11 泄漏孔径 10 mm 监测曲线摩尔分数分布
Fig. 11 Concentration distribution of monitoring curves under a leakage diameter of 10mm

2.2 环境风速对氢气泄漏扩散影响

以 2 mm 泄漏孔径为例,设置垂直泄漏方向的环境风,即沿 X 轴正方向,环境风速大小分别为 2、5、8 m/s,分析不同环境风速对氢气扩散的影响。t = 25 s,不同环境风速作用下可燃区域分布,如图 12 所示。v = 0 m/s,氢射流撞击前方加氢机,在加氢机之间形成可燃区域,还有部分氢气受罩棚支柱阻碍,在罩棚支柱一侧形成了可燃区域。沿 X 轴正方向环境风速为 2 m/s,削弱了氢射流沿 Z 轴方向动量,浮力主导作用增强,可燃区域高度抬升,并向前方加

氢机与罩棚支柱间偏移。当环境风速增大至 5 m/s, 氢气射流在向上扩散过程中, 撞击到前方加氢机, 使可燃区域被前方加氢机限制在一侧, 未继续扩大到前方。沿 X 轴正方向环境风速增大至 8 m/s, 可燃区域的高度上升, 未被前方加氢机限制, 向罩棚支柱一侧倾斜。

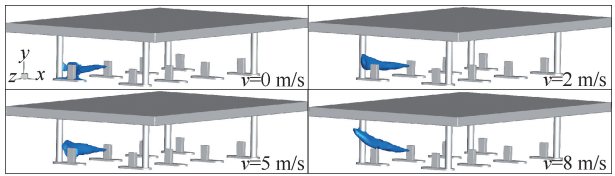


图 12 不同环境风速作用下可燃区域分布
Fig. 12 Flammable areas under different ambient wind velocity

为研究不同环境下的风速, 泄漏源附近气流运动情况, 截取 $t = 25$ s, 泄漏孔横截面 ($X = 17.78$ m) 的不同环境风速作用下流线分布, 如图 13 所示。当沿 X 轴正方向环境风速为 2 m/s 时, 大部分可燃氢

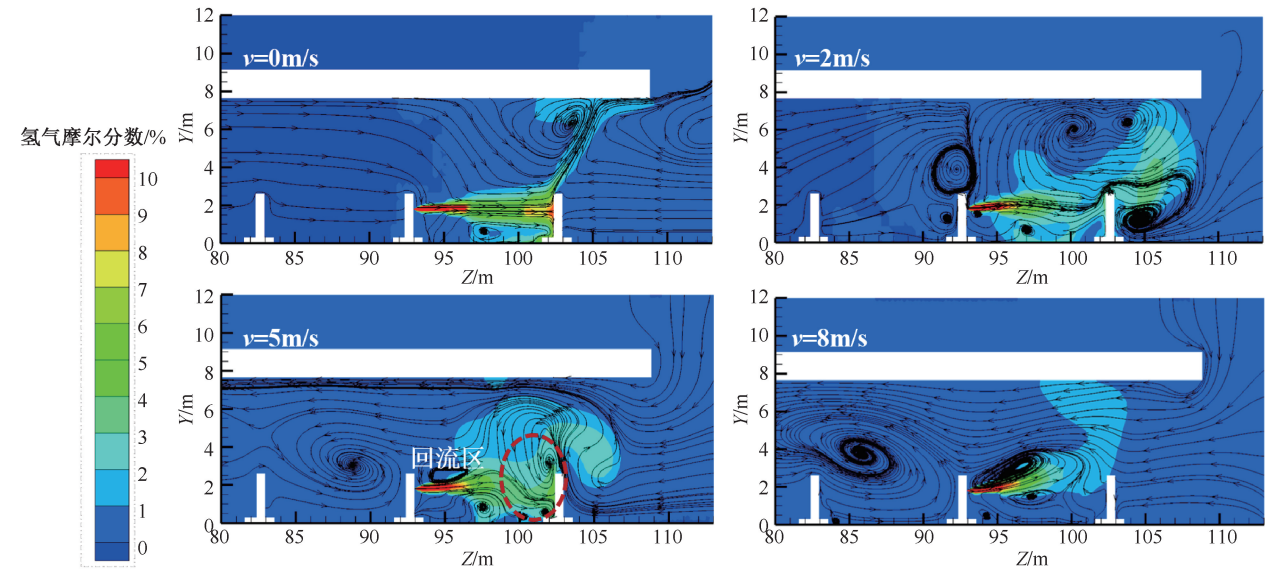


图 13 不同环境风速作用下流线分布 ($X = 17.78$ m)
Fig. 13 Streamline distribution under different ambient wind velocity ($X = 17.78$ m)

2.3 局部通风对氢气泄漏扩散影响

不利的环境风速致使氢气在障碍物附近积聚, 为避免氢气局部积聚, 在加注区罩棚下安装防爆风机, 采用局部通风稀释加注区内可燃区域。风机位于泄漏源与前侧加氢机中部, 为正方形出口 (面积为 1.44 m^2 , $Z = 96.8 \sim 98$ m), 设置局部风速 u 为 5、10 m/s, 泄漏 25 s 后, 启动加注区罩棚下风机。不同局部通风风速作用下可燃区域分布如图 14 所示。当局部通风风速 u 为 5 m/s 时, 风机开启 1 s 后, 即

气云扩散高度超过前方加氢机, 再向罩棚下侧扩散。环境风速为 8 m/s 时, 泄漏氢气沿 Z 轴正方向动量减小较多, 未扩散到泄漏源前侧加氢机处, 而在浮力主导下向上扩散。当沿 X 轴正方向环境风速为 5 m/s 时, 泄漏氢气沿 Z 轴正方向动量被削减后, 扩散高度仍可超过前方加氢机, 与环境风速 2 m/s 相比, 继续向前扩散的氢气较少, 大部分泄漏氢气都积聚在前方加氢机一侧。这是由于在泄漏源前方加氢机处形成回流区, 诱导氢气积聚在泄漏源与前方加氢机之间, 浓度达到可燃下限, 增大了燃爆风险。前方加氢机附近回流区的形成是由于泄漏氢气扩散速度快, 在泄漏源与前方加氢机之间形成负压区。而 5 m/s 的环境风速 (沿 X 轴正方向) 削弱了泄漏氢气沿 Z 轴正方向动量, 在浮力的主导下向上扩散, 与向负压区运动的外界气流相遇, 卷吸外界气流往下运动, 被前方加氢机阻挡后沿加氢机侧壁向上扩散, 形成气流循环, 产生回流区。因此, 沿 X 轴正方向 5 m/s 的环境风速增加了泄漏源前侧加氢机附近的燃爆风险。

$t = 26$ s, 可燃区域分布仅出现在前侧加氢机附近。当风机开启 2 s 后, 即 $t = 27$ s, 流体域内无可燃区域分布。局部通风风速 u 为 10 m/s, 流体域内可燃区域也在风机开启的 2 s 内消失。

为研究局部通风条件下, 泄漏源附近气流运动情况。截取风机开启 2 s 时 ($t = 27$ s), 泄漏孔横截面 ($X = 17.78$ m) 处流线分布, 如图 15 所示。当局部通风风速为 5 m/s, 排出气流向下作用于可燃区域, 与氢气混合后撞击前方加氢机, 改变扩散方向,

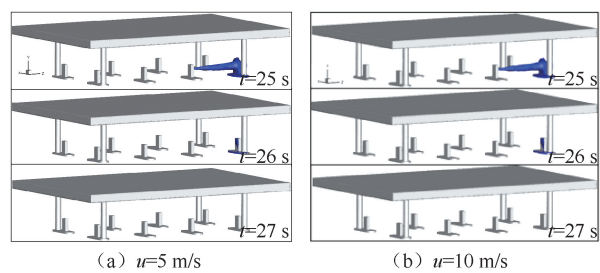


图 14 不同局部通风风速作用下可燃区域分布

Fig. 14 Flammable areas under different local ventilation wind velocity

向罩棚下侧运动,再沿罩棚壁面向外扩散。风机开启 2 s 时,仅有少量摩尔分数 1%~2% 氢气位于加氢机一侧,还有部分积聚在罩棚下侧,气体摩尔分数降低至 1% 左右。而局部通风风速增大至 10 m/s,增强了出风口下方湍流强度,积聚在 2 加氢机之间的气体少于 5 m/s 的情况,氢摩尔分数在 1% 左右,罩棚下侧氢气摩尔分数分布情况相似。因此采用局部通风方式可增强泄漏源附近湍流强度,迅速稀释可燃区域摩尔分数。

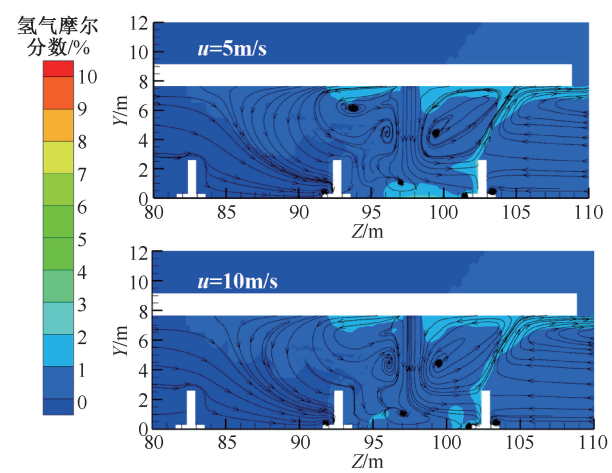


图 15 不同风机风速作用下流线下分布 ($X=17.78$)

Fig. 15 Distribution of streamlines under different local ventilation wind velocity ($X=17.78$)

由图 14 与图 15 可知:局部通风对降低泄漏源附近氢气摩尔分数作用较大。在相同稀释时间内,5 m/s 的风机风速与 10 m/s 的局部通风风速作用下,都存在积聚氢气。为分析不同局部通风风速对加氢机附近氢气摩尔分数分布影响,沿泄漏源前方加氢机竖直方向布置一系列监测点 ($Z=102$ m),位于射流中轴线正前方,监测点布置高度范围为 0.5~2.5 m,间隔为 0.5 m,监测点位置如图 16 所示。 $t=25$ s 泄漏停止,并启动风机。当风速为 5 m/s,监测点 3—监测点 5 由于靠近泄漏源高度,且泄漏氢气在浮力

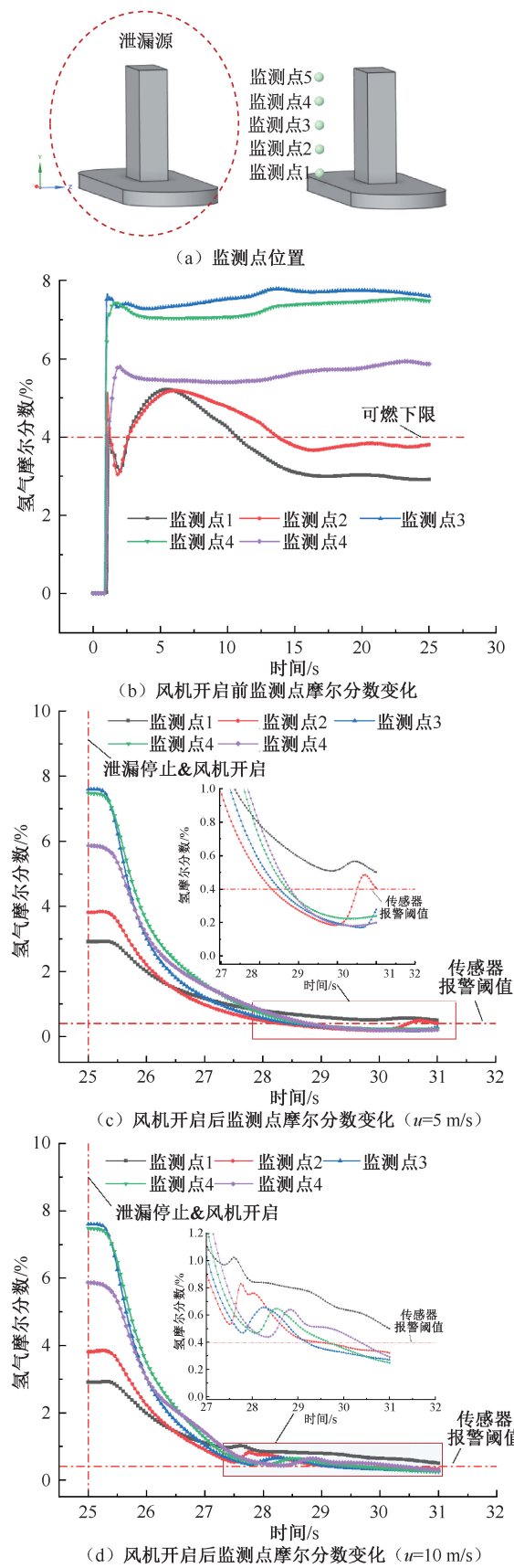


图 16 监测点摩尔分数变化

Fig. 16 Concentration distribution at monitoring points before and after the fan is turned on

作用下向上扩散,导致监测点 3 至监测点 5 摩尔分数高于下侧监测点 1 与监测点 2 摩尔分数。在 $t=25\text{ s}$ 后,监测点摩尔分数均快速下降,在开启风机 6 s 后,即 $t=31\text{ s}$,监测点 3—监测点 5 氢气浓度低于加氢站传感器报警阈值(10% 可燃下限)。当局部通风风速为 10 m/s 时,监测点浓度衰减速度快于 5 m/s 的情况,在 $t=28\text{ s}$ 前,监测点 2—监测点 5 的氢摩尔分数降至 0.5% 左右, $t=31\text{ s}$ 时,监测点 2—监测点 5 摩尔分数均在加氢站传感器报警阈值以下。

3 结 论

1) 在无环境风情况下,5 与 10 mm 泄漏孔径所形成的可燃区域超出加氢区范围,而 2 mm 泄漏孔径形成的可燃区域仅分布在泄漏源与前方加氢机之间。不同泄漏孔径下,罩棚下侧氢摩尔分数分布趋势不同;泄漏孔径为 2 mm 时,不会在罩棚下表面形

成可燃区域;当泄漏孔径增大至 5 与 10 mm 时,垂直泄漏方向下,罩棚下侧表面摩尔分数最高点位于射流中轴线平行处附近;当泄漏孔径为 10 mm 时,罩棚下监测曲线摩尔分数呈现高斯分布。

2) 当泄漏孔径为 2 mm 时,加入垂直泄漏方向环境风速,即沿 X 轴正方向,环境风速为 2 与 8 m/s 可有效减少泄漏源附近氢摩尔分数;而风速为 5 m/s ,在前方加氢机附近产生回流区,诱导了氢气积聚。

3) 无环境风条件下,在加氢区罩棚下安装风机,可加速泄漏源附近氢气摩尔分数稀释。局部通风风速为 5 与 10 m/s 时,风机开启的 2 s ,流场内氢气云摩尔分数均降至可燃范围以下。在相同时间内,风机风速为 10 m/s 时,对流场内氢气云摩尔分数稀释效果更佳,前侧加氢机附近监测点摩尔分数衰减速度更快。

参 考 文 献

[1] Huang Ying, Zhou Yi, Zhong Ruohan, et al. Hydrogen energy development in China: potential assessment and policy implications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 49: DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.176.

[2] Yao Yongzheng, Tan Luyao, Chen Fang, et al. Hydrogen energy industry in China: The current status, safety problems, and pathways for future safe and healthy development[J]. Safety Science, 2025, 186: DOI: 10.1016/j.ssci.2025.106808.

[3] 彭善碧, 罗雪. 埋地掺氢天然气管道泄漏扩散数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 63-69.
Peng Shanbi, Luo Xue. Numerical simulation of leakage and diffusion in buried hydrogen-blended natural gas pipeline[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 63-69.

[4] 2024 中国氢能产业发展半年报[EB/OL]. (2024-07-05). <https://pc.h2cn.org.cn/3vdja5/202407/e38c086f01d3ebf90e2602ea09e95c87.htm>.

[5] 戴君豪, 杨石刚, 方秦, 等. 储氢温度对加氢站泄漏爆炸事故的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(2): 293-300,371.
Dai Junhao, Yang Shigang, Fang Qin, et al. Study on the influence of hydrogen storage temperature on leakage and explosion incidents at hydrogen refueling stations[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(2): 293-300.

[6] Qian Jinyuan, Li Xiaojuan, Gao Zhixin, et al. A numerical study of hydrogen leakage and diffusion in a hydrogen refueling station[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(28): 14 428-14 439.

[7] Li Xiaojuan, Xu Yixiang, Qian Jinyuan, et al. Effect of wind condition on unintended hydrogen release in a hydrogen refueling station[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(7): 5 537-5 547.

[8] Liang Yang, Pan Xiangmin, Zhang Cunman, et al. The simulation and analysis of leakage and explosion at a renewable hydrogen refuelling station[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019,44(40): 22 608-22 619.

[9] Swain M R, Grilloit E S, Swain M N. The application of a hydrogen risk assessment method to vented spaces[M]. Boston: Springer, 2002: 163-173.

[10] 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.
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.

[11] 牛奕, 刘静雨, 房韬. 加氢站氢气泄漏扩散特性的小尺寸实验与模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(5): 130–137.

Niu Yi, Liu Jingyu, Fang Tao. Small-scale experiment and simulation study of hydrogen leakage and diffusion characteristics in hydrogen fueling station[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(5): 130–137.

[12] Tamura Y, Takeuchi M, Sato K. Effectiveness of a blower in reducing the hazard of hydrogen leaking from a hydrogen-fueled vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(35): 20 339–20 349.

[13] Xie Hong, Li Xuefang, Christopher D M. Emergency blower ventilation to disperse hydrogen leaking from a hydrogen-fueled vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(25): 8 230–8 238.

[14] Cui Weiyi, Yuan Yupeng, Tong Liang, et al. Numerical simulation of hydrogen leakage diffusion in seaport hydrogen refueling station[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(63): 24 521–24 535.

[15] Pan Xuhai, Xue Zhenming, Wang Shiqi, et al. Numerical investigation on the effects of smoke barriers on hydrogen dispersion in a full-scale underground garage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 73: DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.012.

[16] Pitts M W, 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-supplemental video materials[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(22): 17 457–17 469.

[17] 黄腾. 大型地下车库内氢气泄漏与扩散研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.

Huang Teng. Study of hydrogen leakage and dispersion in a large underground parking garage[D]. Jinan: Shandong University, 2022.

[18] Birch A D, Hughes D J, Swaffield F. Velocity decay of high pressure jets[J]. Combustion Science and Technology, 1987, 52: DOI: 10.1080/00102208708952575.



作者简介： 谭路遥 （2000—）,女,湖南株洲人,博士研究生,主要研究方向为加氢站氢气泄漏燃爆风险防控等。E-mail:tanluyao3915@126.com。