

隧道内燃料电池汽车氢气泄漏 扩散特性及影响因素

山世玉¹, 耿莉敏¹, 曹鑫鑫¹, 赵卫艳², 黄东¹, 高翌¹, 邢凡杰¹

(1. 长安大学陕西省交通新能源开发、应用与汽车节能重点实验室, 710064, 西安;

2. 质子汽车科技有限公司, 710000, 西安)

摘要: 为研究氢燃料电池汽车在隧道内发生泄漏时氢气扩散特征及影响因素,采用计算流体力学方法,建立了隧道内燃料电池卡车氢气泄漏扩散模型,研究了氢气在隧道内的泄漏扩散过程和分布特性,对比分析了不同车速、泄漏质量流量对氢气扩散过程的影响。结果表明:氢气泄漏初期储氢罐泄漏口处氢气浓度更高,2 s 后非泄漏口一侧氢气浓度更高,且非泄漏口一侧的氢气扩散范围更广,扩散距离更长。汽车低速行驶时,氢气扩散距离和分布范围更大,更容易积聚形成大体积的可燃云团。当车速为 20 km/h 时,4 个储氢瓶同时发生泄漏时,20 s 后氢气可燃云团的体积达到 453.28 m³,随着车速的提高,隧道内气流速度加快,对氢气的稀释作用增强,抑制了氢气的积聚;车速为 100 km/h 时,形成的氢气可燃云团的体积比 20 km/h 下降了 96.8%。氢气泄漏质量流量越大,氢气分布范围越广、扩散距离越长,形成的可燃云团体积也越大。与 1 个直径 2.5 mm 的泄漏孔相比,当 4 个同尺寸的泄漏孔发生氢气泄漏时,形成的可燃云团体积增大了 5.76 倍。

关键词: 燃料电池卡车;氢气泄漏扩散;车速;质量流量;可燃云团

中图分类号: TK91 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202607008 **文章编号:** 0253-987X(2026)07-0077-11

Diffusion Characteristics and Influencing Factors in Case of Hydrogen Leakage from Fuel Cell Vehicles Running in Tunnels

SHAN Shiyu¹, GENG Limin¹, CAO Xinxin¹, ZHAO Weiyan²,
HUANG Dong¹, GAO Zhao¹, XING Fanjie¹

(1. Key Laboratory of Shaanxi Province for Development and Application of New Transportation, Chang'an University,
Xi'an 710064, China; 2. Zhizi Automobile Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: To investigate the hydrogen diffusion characteristics and influencing factors in the event of hydrogen leakage from hydrogen fuel cell vehicles running in tunnels, a hydrogen leakage and diffusion model for fuel cell trucks traveling through tunnels was established using computational fluid dynamics. The diffusion process and distribution characteristics of the leaked hydrogen in the tunnel were studied, and the effects of varying vehicle speeds and leakage mass flow rates on the hydrogen diffusion process were compared and analyzed. The results indicate that while the hydrogen concentration was higher at the leaking orifice of the hydrogen storage tank during the

收稿日期: 2025-10-17。 作者简介: 山世玉(2000—),男,博士生;耿莉敏(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2025SYS-SYSZD-117);西安市重点产业链技术攻关一般项目(24ZDCYJSGG0048);西安市重点产业链技术攻关集群项目(25ZDLJQ00001)。

网络出版时间: 2026-01-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20260126.1342.004>

initial leakage phase, it became higher at the non-leaking orifice after 2 s, where a wider diffusion range and longer diffusion distance were observed. At lower vehicle speeds, hydrogen diffused over greater distances and covered a broader area, facilitating the accumulation of large-volume combustible clouds. Specifically, for a simultaneous leak from four hydrogen storage tanks at a vehicle speed of 20 km/h, the volume of the combustible cloud reached 453.28 m³ after 20 s. As the vehicle speed increased, the enhanced airflow in the tunnel promoted hydrogen dilution and suppressed its accumulation; at a vehicle speed of 100 km/h, the volume of the formed combustible cloud was reduced by 96.8% compared to that at 20 km/h. Furthermore, it was found that higher hydrogen leakage mass flow rates resulted in more extensive distribution ranges, longer diffusion distances, and larger volumes of combustible clouds. Compared to a single leaking orifice with a diameter of 2.5 mm, the volume of the combustible cloud was 5.76 times larger when four orifices of the same size leaked simultaneously.

Keywords: fuel cell trucks; hydrogen leakage and diffusion; vehicle speed; leakage mass flow rate; combustible clouds

氢气作为一种来源多样化的清洁能源,是未来能源系统的重要组成部分,在生物医疗^[1-2]、化工生产^[3]、能源存储^[4]、公路交通^[5]、航空航天^[6]等领域均有应用。燃料电池汽车以氢气作为燃料来源,与传统汽车相比,其能量转化效率高^[7],可达到60%以上。目前,车载储氢方式主要有:高压气态压缩储氢、低温液态储氢、固态吸附储氢、液态有机载体储氢等,其中高压气态储氢方式技术成熟,成本较低,是目前主流的车载储氢方式。氢气作为一种轻质、易扩散且具有高可燃性的气体,其泄漏扩散情况受多种因素影响,尤其在空间狭长且通风不良的隧道环境下,不当操作可能导致严重的安全事故。

近年来,一些学者们针对燃料电池汽车在小型密闭空间,例如车库、加氢站、隧道等不同应用场景下的泄漏扩散情况开展了研究^[8-13]。不同环境条件会影响氢气扩散,开放空间下,大气温度影响氢气的浓度分布^[14-15]。Liu等^[16]研究了开放空间下风速对氢气泄漏安全距离的影响,环境风会稀释可燃云团;而在密闭条件下,强制通风对通风效果有明显改善^[17]。Gitushi等^[18]对氢燃料电池船舱内氢气泄漏过程进行了数值模拟,结果表明:无通风条件下,泄漏初期可燃云团因流动受限而扩散缓慢;通风条件下,泄漏数秒后可燃云团趋于稳定,加强通风有助于缩小可燃区域,尽管高泄漏速率会形成更大体积的可燃区域,但高速通风可使氢气浓度降至低于检测下限。Tang等^[19]基于多组分相变三维瞬态模型,研究了液氢在空旷区域、车库和隧道3种典型环境中的扩散特性,结果显示:空旷区域虽然可燃云团体积最大,达到1 133 m³,但扩散危险距离较短;隧道

空间限制显著,在1.5 m高度以下的危险距离最远可达26.8 m。宋珂等^[20]对车库内氢气泄漏问题进行了研究,发现氢气泄漏爆炸产生的超压与环境温度和通风条件相关,增大通风体积流量、通风口面积和高度可以降低爆炸风险。Wang等^[21]采用数值模拟方法对加氢站中车载氢气泄漏过程进行了模拟,研究了泄漏直径、顶部配置和点火位置对氢气扩散、燃烧的影响,发现大部分可燃气云堆积在天花板顶部,燃烧造成的热辐射危害有限,但产生的超压对物体和生物会造成显著伤害。

综上所述,受限空间内氢气泄漏扩散过程受多种因素综合影响,现有研究多聚焦于静态泄漏场景,缺乏公路隧道等半封闭大型受限场景中车辆在行驶状态下氢气动态泄漏扩散过程的系统分析,难以反映车辆实际运行条件下氢气泄漏扩散风险演化特征。本文采用计算流体动力学(CFD)方法,建立了单向双车道200 m长度的隧道模型,研究了氢燃料电池重卡在20~100 km/h的5种不同车速、0.092 6~0.370 4 kg/s的4种不同泄漏质量流量条件下氢气的泄漏扩散过程,对比了车速和泄漏量对隧道内氢气摩尔分数、可燃氢气最远扩散距离和氢气可燃云团体积的影响,分析了氢气泄漏后在储氢箱体与隧道空间内的分布规律。

1 模型建立

在构建模型时,为专注于隧道场景下燃料电池卡车氢气泄漏后的传输与扩散现象,并减少计算复杂性,对模型做出如下假设:

(1)氢气及混合气体均为理想气体;

(2) 气体组分间不发生化学反应;

(3) 考虑重力影响,重力加速度为 9.81 m/s^2 ;

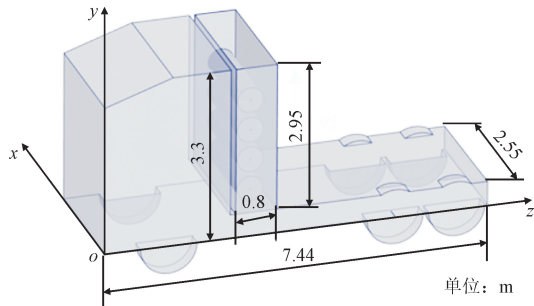
(4) 不考虑环境温度影响,泄漏时,气体与环境温度均为 300 K ,且与外界无热量交换,压力为 101325 Pa ;

(5) 以虚喷嘴直径代替实际泄漏口直径,氢气泄漏质量流量恒定。

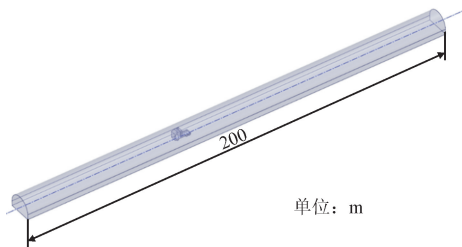
1.1 几何模型

本文基于某款氢燃料电池半挂牵引车,构建了由驾驶室、底盘和储氢瓶组成的车载储氢系统模型,重点分析储氢罐及相关组件,简化了轮胎与底盘下次要结构的设计细节。简化后的氢燃料电池卡车几何模型如图 1(a)所示。驾驶室为有斜角的几何体,长、宽、高分别为 2.43 、 2.55 、 2.95 m 。底盘为正六面体,长、宽、高分别为 7.44 、 2.55 、 0.35 m 。储氢箱为正六面体,长、宽、高分别为 0.80 、 2.55 、 2.95 m 。储氢罐简化成直径为 0.5 m 、长为 1.8 m 的圆柱体,4 个储氢罐在储氢箱体内自下而上排列,泄漏口位于储氢罐侧面中心点位置,泄漏口为圆形。

隧道模型选择了最常见的单向两车道架构,如图 1(b)所示,隧道横截面下部为 $11 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 的矩形,上部为直径为 11 m 的半圆,隧道长度为 200 m 。



(a) 燃料电池牵引车模型



(b) 隧道模型

图1 氢气泄漏仿真几何模型

Fig.1 Geometric model of hydrogen leak simulation

1.2 数值模型

燃料电池卡车储氢系统氢气泄漏扩散过程属于常温常压下单相多组分气体扩散问题,且本研究不

涉及组分间的热传递及化学反应,描述该问题需依赖于以下 CFD 控制方程体系。

(1) 连续性方程。由于本研究不涉及相变所带来的源项,因此方程可简化为

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

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; u_x 为 x 方向的速度; u_y 为 y 方向的速度; u_z 为 z 方向的速度。

(2) 动量守恒方程。在惯性参考系中,方程表示为

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

式中: $\mathbf{u}$ 为速度; p 为静压; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量; $\rho \mathbf{g}$ 为重力体积力; $\mathbf{F}$ 为外部体积力及其他源项。

(3) 能量守恒方程。氢气的泄漏扩散过程涉及可压缩性流动,需满足以下方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u}(\rho E + p)] = \\ \nabla \cdot [k_{\text{eff}} \Delta T + \boldsymbol{\tau}_{\text{eff}} \mathbf{u} - h_{\text{H}_2} \mathbf{J}_{\text{H}_2} - h_{\text{air}} \mathbf{J}_{\text{air}}] + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

式中: h_{H_2} 为氢气的焓; h_{air} 为空气的焓; $\mathbf{J}_{\text{H}_2}$ 为氢气的扩散通量; $\mathbf{J}_{\text{air}}$ 为空气的扩散通量; k_{eff} 为有效热传导系数; E 为总能量,即混合气体的动能与势能之和; S_h 为黏性作用下化学能、机械能向热能转化产生的体积热源项。由于本研究的氢气泄漏扩散场景中,不考虑系统与外界的能量交换与热能转换,因此 $\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}$ 和 S_h 两项均为 0。

(4) 组分输运方程。每种组分的局部质量分数 Y_i 通过求解组分 i 的对流-扩散方程预测,该方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

式中: Y_i 为组分 i 在混合物中的质量分数; $\mathbf{v}$ 为扩散组分的速度; R_i 为组分 i 经由化学反应产生的净生成速率; S_i 为组分 i 通过离散相和用户自定义源项生成的速率。

(5) 湍流模型。本研究采用的湍流模型为 RANS 方法中的 Realizable $k-\epsilon$ 模型,通过基于时间平均的湍流运动方程,描述湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 的输运特性,其中湍动能控制方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{k} \bar{\mathbf{u}}) = \\ \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\bar{\mathbf{u}}$ 为平均速度; μ 为分子黏度; μ_t 为湍流黏度;

G_k 为剪切产生的湍动能; G_b 为浮力效应; Y_M 为压缩湍流的耗散项; σ_ϵ 为湍动能的普朗特数。

湍流耗散率控制方程为

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\epsilon\mathbf{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: σ_ϵ 为耗散率的普朗特数; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为经验常数。

(6) 虚喷嘴模型。喷射射流根据其喷射压力与大气压力的比值, 在泄漏口处会形成 3 种状态: 欠膨胀射流、临界流和亚声速射流^[22]。虚喷嘴模型是一种用于模拟复杂流动的简化方法, 目前主流的喷嘴模型有 Thring 模型^[23]、Birch1987 模型^[24]、Molkov 模型^[25]等。Birch1987 模型计算简洁高效, 对高压下圆形喷孔射流有很好的针对性。因此, 本研究采用 Birch1987 模型计算储氢罐泄漏口流动参数, 考虑从泄漏口到虚喷嘴间的能量、动量守恒方程

$$\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 \quad (7)$$

$$\rho_2 u_2^2 A_2 = \rho_1 u_1^2 A_1 + (p_1 - p_2) A_1 \quad (8)$$

式中: A 为喷嘴截面积; 下标 1、2 分别代表泄漏口、虚喷嘴。

由式(7)、(8), 求得虚喷嘴处的速度与直径

$$u_2 = u_1 + \frac{p_1 - p_2}{\rho_1 u_1} \quad (9)$$

$$d_2 = \frac{p_1 u_1 d_1}{\sqrt{\rho_2 (p_1 - p_2 + \rho_1 u_1^2)}} \quad (10)$$

假设压力为 35 MPa 的储氢罐内氢气经直径为 2.5 mm 的泄漏口泄漏, 其质量流量为 0.092 6 kg/s。由式(9)和式(10), 采用 Birch1987 虚喷嘴模型计算得到的虚喷嘴直径为 29.98 mm, 速度为 2 236 m/s。因此, 本研究假定虚喷嘴直径为 30 mm。

1.3 边界条件与网格无关性验证

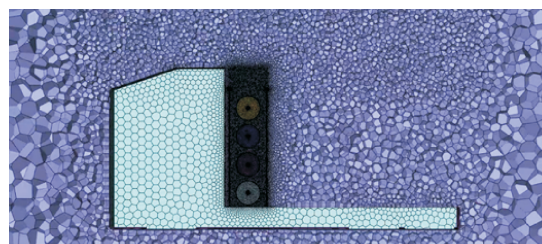
本研究选用压力基求解器进行数值求解。采用 PISO 算法模拟验证过程进行瞬态求解, 动量方程、能量方程、湍动能和湍流耗散率采用二阶迎风差分格式。计算域内的初始压力为标准大气压, 初始温度为 300 K。表 1 是本文涉及的边界条件设置。

表 1 边界条件设置

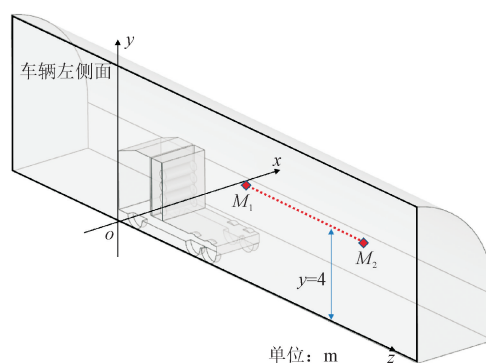
Table 1 Boundary condition settings

区域	边界条件
氢气泄漏口	质量流量入口
隧道入口	速度入口
隧道出口	压力出口
车辆表面、地面及隧道壁面	壁面

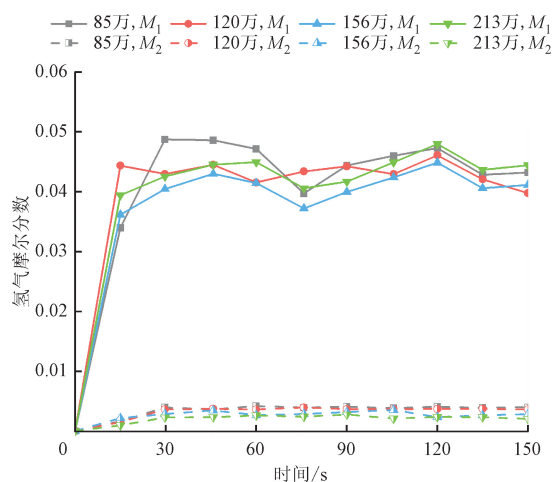
为提高仿真精度, 如图 2(a)所示在泄漏口及可能出现复杂流动的区域进行梯度网格加密, 保证在泄漏口附近及氢气主要扩散方向等关键区域的网格质量。如图 2(c)所示, 选取数量分别为 85 万、120 万、156 万和 213 万的网格进行无关性验证。以图 2(b)所示 M_1 、 M_2 采样点处氢气摩尔分数作为评价指标, 可见当网格数为 156 万时, 模型已可以准确反映氢气扩散后的浓度变化, 且所有网格质量在 0.25 以上, 无单元扭曲和负体积网格, 网格质量满足计算要求。



(a) 网格加密



(b) 无关性验证采样点位置



(c) 监测点氢气摩尔分数

图 2 网格优化设计

Fig. 2 Optimized grid design

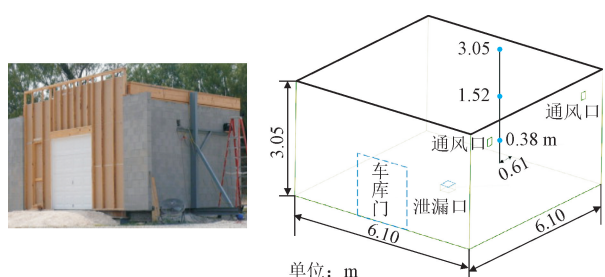
1.4 模型验证

采用 Pitts 等^[26]研究的密闭车库内氢气泄漏扩散实验结果验证本文模型和求解方法的有效性,详细的实验参数设置如表2所示,实验车库场景如图3(a)所示。根据实验中设置的传感器位置,在模型中设置了3个监测点,其中500 s内氢气泄漏实验与仿真计算结果对比如图3(b)所示,可见该方法对氢气泄漏场景的计算结果与实验数据保持较高的一致性。表3对比了各点在500 s时氢气体积分数仿真结果与实验数据的相对误差。可见3个监测点氢气体积分数相对误差均在3.7%以内,证明本研究建立的氢气泄漏扩散模型具有较高的精度。

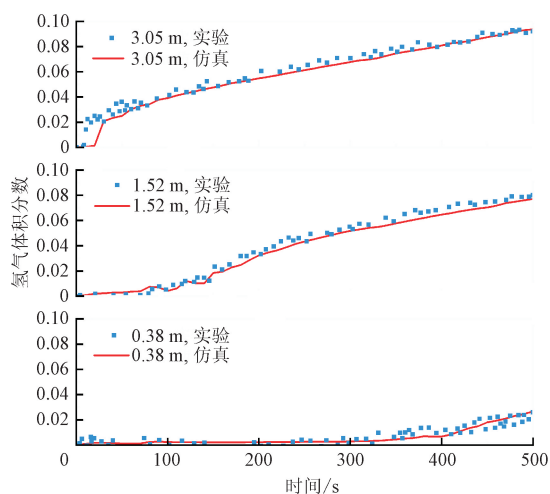
表2 密闭车库实验参数设置

Table 2 Closed garage test parameter settings

实验参数	数值及状态
氢气泄漏速率/(L·min ⁻¹)	956
氢气泄漏持续时间/s	506
是否停有汽车	否
传感器高度/m	0.38, 1.52, 3.05



(a) 实验车库场景及尺寸^[26]



(b) 不同监测点位仿真与实验结果的对比

图3 实验车库模型验证

Fig. 3 Experimental garage model validation

表3 500 s时仿真与实验结果的相对误差

Table 3 Relative error between simulation and experiment at 500 s

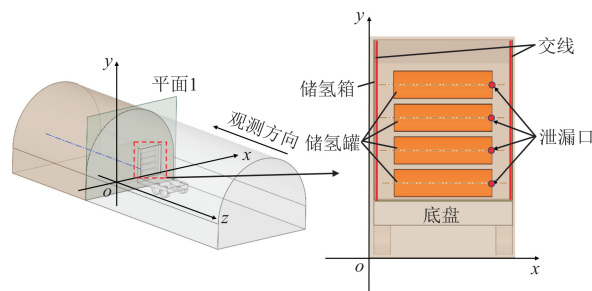
监测点位/m	氢气体积分数		相对误差/%
	实验结果	仿真结果	
0.38	0.025 88	0.026 78	3.4
1.52	0.080 11	0.077 12	3.7
3.05	0.091 94	0.093 68	1.9

2 结果分析

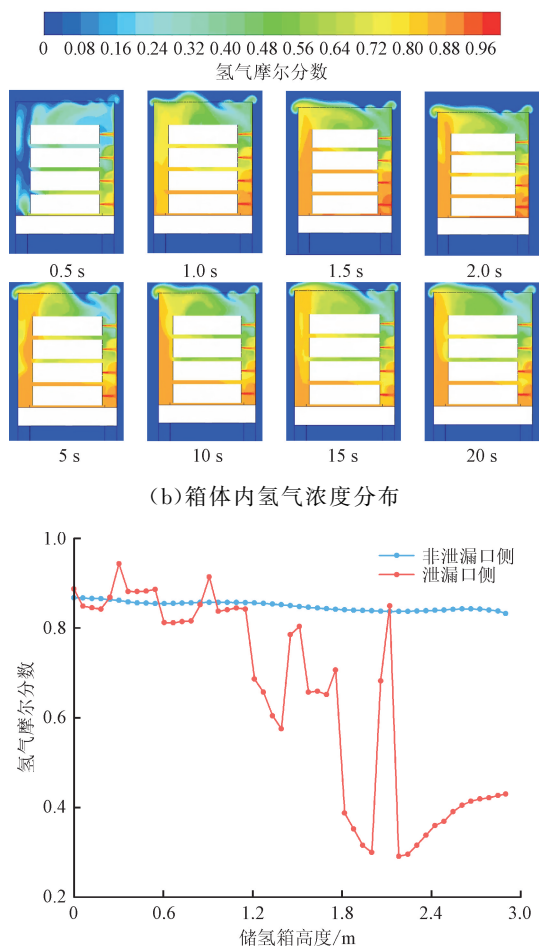
2.1 隧道内燃料电池卡车氢气泄漏扩散过程

设定氢燃料电池重卡的行驶速度为60 km/h、氢气泄漏质量流量为0.370 4 kg/s,仿真分析了不同时刻氢气在储氢箱体内部和隧道中的泄漏扩散过程。

氢气从泄漏孔喷出后,首先会扩散至储氢箱体内部。如图4(a)所示平面1是经过储氢罐中轴线的 xy 平面,泄漏口位于储氢罐右侧面中心点。平面1与储氢箱侧面的交线由红实线表示。图4(b)是4个储氢箱全部泄漏后不同时刻氢气在储氢箱体内部的浓度分布情况。氢气以射流形式自泄漏口喷出,在储氢箱内形成高浓度区,此时动量和浮力是决定氢气泄漏扩散的主导因素^[27-28]。泄漏初期射流动量主导扩散,使氢气沿泄漏方向传播,遇箱体壁面形成旋流并沿间隙向箱体另一侧和顶部扩散。0.5 s时泄漏侧的氢气浓度较高,氢气射流动能促使其在箱体内部快速扩散,箱体内部氢气高浓度范围逐渐增大,1.5 s后非泄漏侧氢气浓度明显升高。图4(c)是氢气泄漏20 s时,箱体两侧边界位置的氢气浓度分布。由图可知,泄漏20 s时非泄漏侧的垂直浓度梯度变化较为平缓,从箱体底部到顶部的氢气摩尔分数从0.867缓慢降至0.832。在泄漏侧,垂直方向氢气浓度梯度差异明显,4个泄漏口喷出的高速氢气射流在储氢箱高度0.3、0.9、1.5和2.1 m处形成了4个氢气浓度峰值,对应的氢气摩尔分数分别为0.943、0.913、0.879和0.865,箱体底部的氢气浓度最高。



(a) 观测平面示意图



(c) 箱体两侧氢气垂直浓度分布曲线

图 4 储氢箱内氢气浓度分布

Fig. 4 Hydrogen concentration distribution in the storage tank

图 5 为不同时刻氢气在隧道内扩散分布云图。图中展示了氢气在发生泄漏后形成的可燃云团范围,可见氢气从箱体扩散至隧道之后与周围空气混合,其分布范围和扩散距离不断增大。泄漏第 15 s,泄漏氢气量与可燃云团边缘被稀释氢气量达到动态

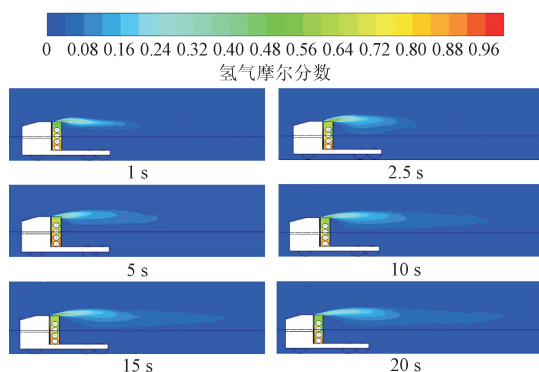
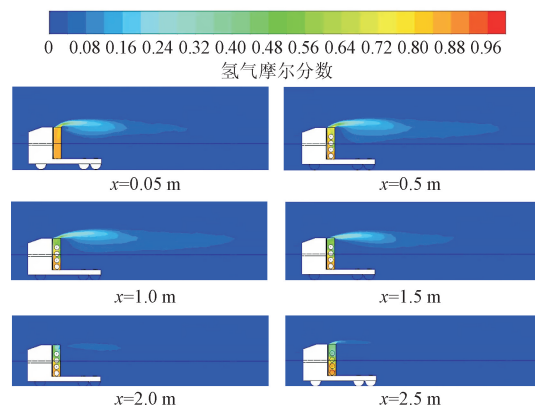


图 5 隧道内不同时刻下氢气浓度分布

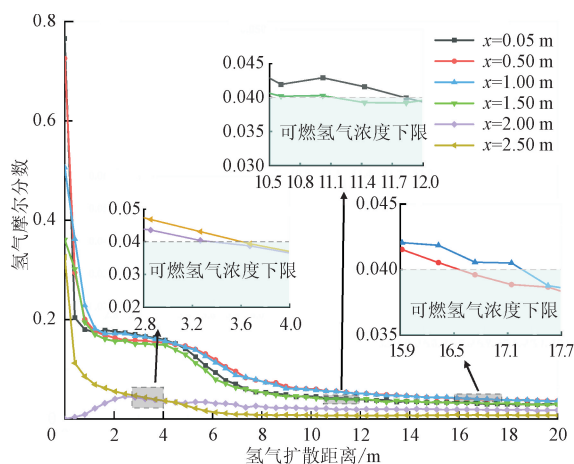
Fig. 5 Hydrogen concentration distribution at different times inside the tunnel

平衡,氢气在车辆后方形成了相对稳定的浓度分布区域,之后可燃云团分布范围变化不大。

选取 x 为 0.05、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m 6 个 yz 平面进行实验。图 6(a) 为泄漏第 20 s 时不同车辆截面的氢气浓度分布。从中可见, $x = 2.5$ m 截面处氢气扩散量最少,氢气从箱体扩散至隧道后浓度很快降低至安全范围,基本没有产生可燃云团。在 $x = 1.0$ m 截面处,氢气离开箱体后形成的可燃云团范围最大,且扩散距离最远。对比 $x = 0.05$ m、 $x = 0.5$ m、 $x = 1.0$ m (非泄漏侧) 和 $x = 1.5$ m、 $x = 2.0$ m、 $x = 2.5$ m (泄漏侧) 的氢气浓度分布情况,可见非泄漏侧的氢气扩散距离更远,分布范围更大。图 6(b) 显示了氢气泄漏 20 s 时,不同平面处氢气摩尔分数的变化规律。氢气从箱体内部泄漏至外部时,在 $x = 0.05$ m 平面和 $x = 1.0$ m 平面处摩尔分数较高,分别为 0.604 和 0.550;而在 $x = 2.0$ m 平面和 $x = 2.5$ m 平面处较低,分别为 0.082 和 0.067。氢气在空气中可燃的摩尔分数下限为 0.04, 通常认为此处



(a) 不同截面的氢气浓度分布



(b) 不同截面的氢气扩散距离

图 6 隧道不同截面的氢气浓度分布

Fig. 6 Hydrogen concentration distribution across different cross-sections of the tunnel

为可燃氢气最大扩散距离。在 $x = 0.05 \sim 2.5$ m 的 6 个平面上,可燃氢气最大扩散距离分别为 11.83、16.73、17.55、11.42、3.67 和 3.37 m,可见 $x = 1.0$ m 平面处扩散距离最大,因此下文均选取该截面分析氢气扩散情况。

2.2 车速对氢气泄漏扩散的影响

为了研究车速对隧道中氢气泄漏扩散的影响,选取车速为 20、40、60、80、100 km/h。参考风洞实验原理,在车辆静止的情况下,通过对隧道中的空气流速进行设定来模拟车辆在不同速度下的行驶状态,设置空气流动方向与车辆行驶方向相反。

当 4 个储氢罐同时发生泄漏,氢气泄漏质量流量为 0.370 4 kg/s,第 20 s 时不同车速下的氢气浓度分布见图 7。由图可知:当车速为 20 km/h 时,氢气最容易积聚,扩散距离和分布范围最大;随着车速的提高,氢气扩散范围逐渐缩小,浓度下降,纵向传播距离明显缩短。车速提高后隧道内的气流速度加快,对氢气的稀释作用增强,抑制了氢气的积聚。

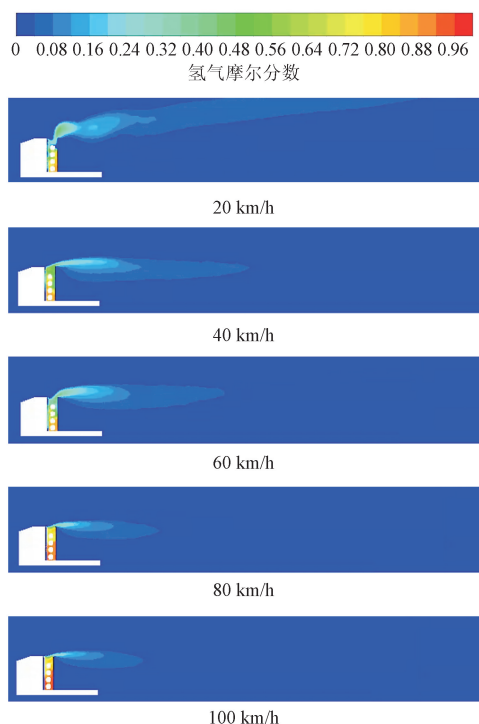
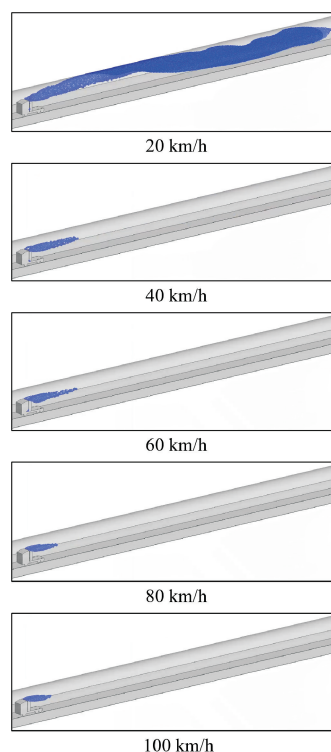


图 7 隧道内不同车速下的氢气浓度分布

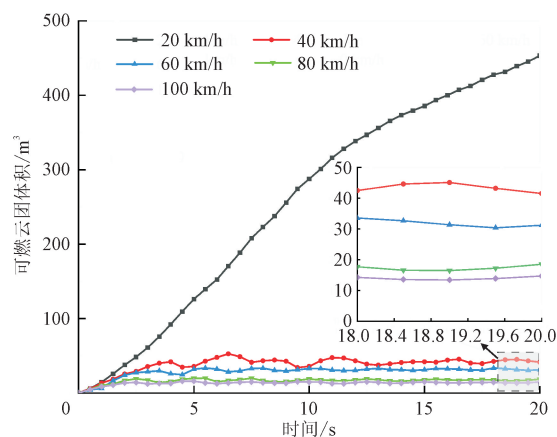
Fig. 7 Hydrogen concentration distribution at different vehicle speeds inside the tunnel

图 8(a)显示了氢气泄漏第 20 s 时隧道内可燃云团的分布范围及形状特征。当车速为 20 km/h 时,氢气在车辆后方及隧道顶部大范围积聚,可燃云团体积最大;在车速达到 40 km/h 及以上时,可燃云团分布明显缩小,仅在车辆后方形成尾流,没有在隧道内大范围扩散。这表明车速越高,氢气积聚能力

减弱,越容易被稀释。图 8(b)显示了不同车速下氢气可燃云团体积随时间的变化趋势。在 20 km/h 车速条件下,车辆行驶时产生的气流扰动现象较弱,氢气可燃云团体积快速增长,至 20 s 时达到 453.28 m³。随着车速的提高,氢气可燃云团的体积明显下降。在泄漏第 20 s 时,不同车速下氢气可燃云团的绝对体积和相对体积见表 4。当车速从 20 km/h 提高到 100 km/h,氢气可燃云团的绝对体积下降了 96.8%。与车速 20 km/h 形成的氢气可燃云团相比,车速为 40、60、80 和 100 km/h 下,氢气可燃云团的相对体积分别为 9.2%、5.9%、4.1% 和 3.2%。



(a) 不同车速下氢气可燃云团分布范围



(b) 不同车速下的氢气可燃云团体积变化

图 8 不同车速下的氢气可燃云团分布

Fig. 8 Distribution of hydrogen flammable clouds at different vehicle speeds

表4 不同车速下氢气可燃云团体积

Table 4 Volume of hydrogen flammable clouds at different vehicle speeds

车速/(km·h ⁻¹)	氢气可燃云团体积/m ³	相对体积
20	453.28	1.000
40	41.52	0.092
60	31.20	0.059
80	18.52	0.041
100	14.70	0.032

在泄漏车辆后方设置 P_1 和 P_2 两个监测点,研究车速对不同扩散距离下的氢气浓度的影响。图 9(a) 是 P_1 和 P_2 监测点示意图,选择 $x=1$ m 平面, P_1 和 P_2 分别位于车辆后方距储氢箱后壁面 5 m 和 10 m 的位置,两个监测点的离地高度均为 4 m。图 9(b) 和图 9(c) 分别展示了在不同车速下,监测点 P_1 和 P_2 处的氢气浓度变化曲线。由图 9 可知:泄漏持续 4 s 后,氢气逐渐在区域内扩散均匀,浓度趋于稳定。车速为 20 km/h 时, P_1 和 P_2 监测点处的稳定氢气浓度最低,这是由于低速时氢气受浮力作用向顶部扩散,积聚在隧道顶部,因此在监测点处的氢气浓度反而较低。车速在 60 km/h 时,监测点的稳定氢气浓度最高,在泄漏后第 20 s, P_1 监测点氢气摩尔分数为 0.141, P_2 监测点氢气摩尔分数为 0.058。

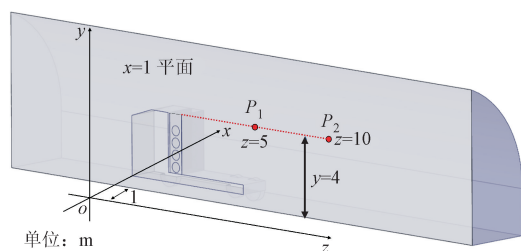
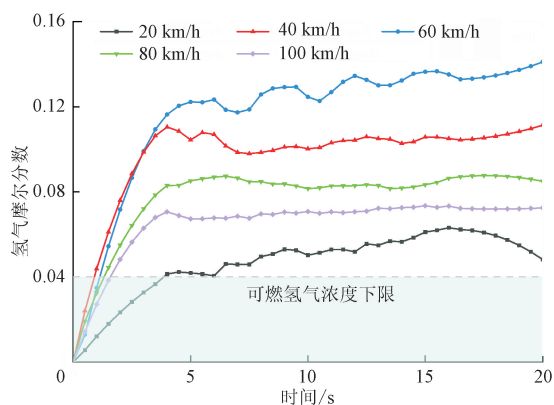
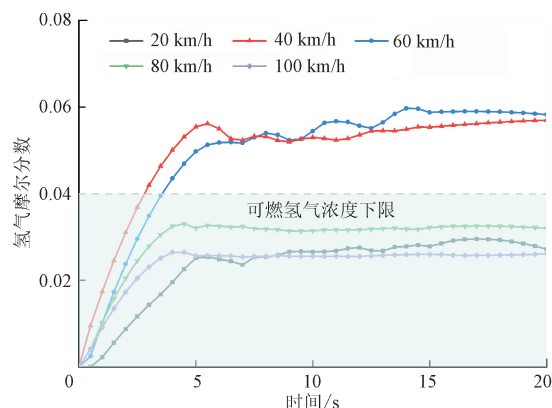
(a) P_1 、 P_2 监测点位置(b) P_1 监测点氢气浓度(c) P_2 监测点氢气浓度

图9 监测点处氢气浓度随车速变化曲线

Fig. 9 Hydrogen concentration variation curve at monitoring points with respect to vehicle speeds

2.3 泄漏质量流量对氢气泄漏扩散的影响

在隧道内氢燃料电池重卡行驶速度为 60 km/h 条件下,研究了氢气泄漏质量流量对氢气扩散的影响,通过改变泄漏口的数量实现对氢气泄漏质量流量的控制。表 5 为不同泄漏质量流量时,4 个储氢瓶泄漏口的开闭情况,对应的氢气泄漏质量流量分别为 0.092 6、0.185 2、0.277 8、0.370 4 kg/s。

表5 储氢瓶泄漏口开闭情况

Table 5 Status of hydrogen storage tank leakage port opening and closing

泄漏质量 流量/(kg·s ⁻¹)	储氢瓶 1 泄漏口	储氢瓶 2 泄漏口	储氢瓶 3 泄漏口	储氢瓶 4 泄漏口
0.092 6	开启	关闭	关闭	关闭
0.185 2	开启	开启	关闭	关闭
0.277 8	开启	开启	开启	关闭
0.370 4	开启	开启	开启	开启

图 10 展示了不同泄漏质量流量 Q 下的氢气扩散分布情况。在 0.092 6 kg/s 的低泄漏质量流量下,氢气扩散速率与空气稀释速率基本平衡,氢气扩散范围很小。随着氢气泄漏质量流量增大,氢气浓度增长快于空气稀释速率,导致氢气扩散范围持续扩大,车辆后方的纵向传播距离延长,氢气云团体积不断增大。

不同氢气泄漏质量流量下,泄漏第 20 s 时隧道内氢气可燃云团分布特征见图 11(a)。氢气泄漏后,可燃云团在车辆后方呈尾流状分布,随着泄漏质量流量增加,可燃云团尾流长度逐渐增加,扩散范围显著增大。受到车辆行驶时气流扰动的限制作用,

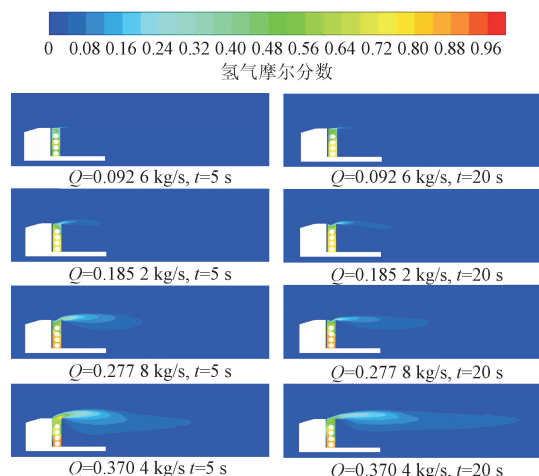
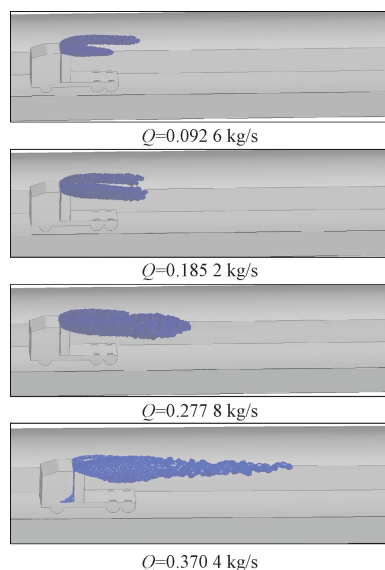
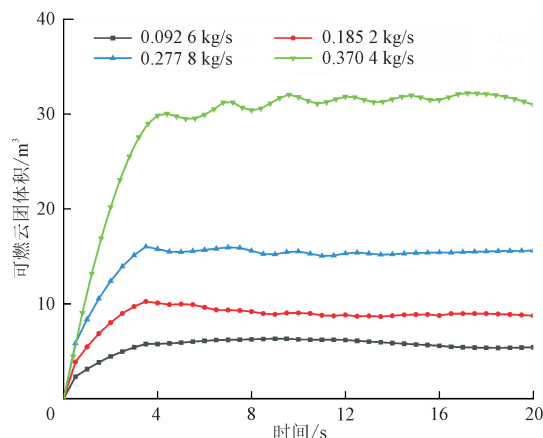


图 10 隧道内不同泄漏质量流量下的氢气浓度分布
Fig. 10 Hydrogen concentration distribution in tunnels at different leak mass flow rates

氢气主要沿隧道纵向扩散,垂直方向扩散不明显。在不同泄漏质量流量下,氢气可燃云团体积随时间的变化见图 11(b)。泄漏质量流量越大,泄漏初期体积增长速率越快,泄漏 4 s 后,可燃云团体积趋于稳定,泄漏质量流量越大,稳定后的可燃云团体积越大。不同泄漏质量流量下,可燃云团体积均随时间表现出先快速增长、然后趋于稳定的发展过程。表 6 展示了第 20 s 时不同泄漏质量流量下氢气可燃云团体积及其相对体积。由表可知:氢气泄漏质量流量越大,形成的可燃云团体积也越大;与质量流量 0.0926 kg/s 相比,当氢气泄漏质量流量为 0.3704 kg/s 时形成的可燃云团体积增大了 5.76 倍。



(a)不同泄漏质量流量下的氢气可燃云团范围



(b)不同泄漏质量流量下的氢气可燃云团体积变化

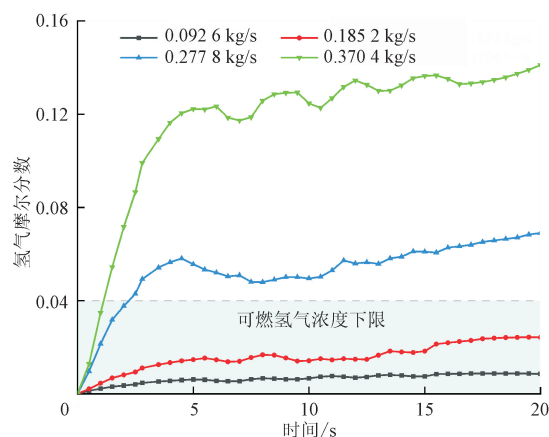
图 11 隧道内不同泄漏质量流量下的氢气可燃云团分布
Fig. 11 Distribution of hydrogen combustible clouds at different leak mass flow rates inside tunnels

表 6 不同泄漏质量流量下的氢气可燃云团体积

Table 6 Volume of hydrogen flammable clouds at different leak mass flow rates

泄漏量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	氢气可燃云团体积/ m^3	相对体积
0.0926	5.42	1.00
0.1852	8.74	1.61
0.2778	15.60	2.89
0.3704	31.20	5.76

图 12 展示了不同泄漏质量流量下 P_1 和 P_2 监测点的氢气浓度分布特征。泄漏持续 4 s 后,区域内氢气浓度逐渐稳定。泄漏质量流量越高,监测点氢气浓度越高。泄漏质量流量为 0.0926 kg/s 和 0.1852 kg/s 时, P_1 和 P_2 监测点的氢气浓度均未达到爆炸下限。泄漏质量流量为 0.2778 kg/s 时,仅 P_1 监测点氢气浓度达到爆炸下限。泄漏质量流量为 0.3704 kg/s 时, P_1 和 P_2 监测点的氢气浓度均达到爆炸下限。



(a) P_1 监测点氢气浓度

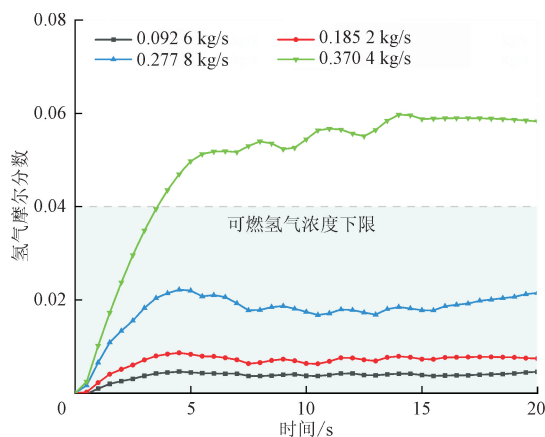
(b) P_2 监测点氢气浓度

图12 不同监测点处氢气浓度随泄漏质量流量的变化

Fig. 12 Hydrogen concentration at different monitoring points as a function of leak mass flow rate

3 结 论

本文对氢燃料电池卡车在隧道内发生氢气泄漏扩散问题进行了模拟计算,分析了氢气在储氢箱体内和隧道中的泄漏扩散过程,研究了车速、泄漏质量流量对氢气泄漏扩散的影响,得出的主要结论如下。

(1) 氢气以射流形式自泄漏孔喷出,在动量主导下迅速扩散至储氢箱体内非泄漏口侧。其中,泄漏口侧氢气浓度在垂直方向上出现明显梯度分层;非泄漏口侧浓度分布均匀,氢气摩尔分数极差仅为0.035。氢气在 $x=1.0$ m 截面处的泄漏扩散范围最大,当车速为 60 km/h、氢气泄漏质量流量为 0.3704 kg/s 时,氢气最远扩散距离达到 17.55 m。

(2) 车速较低时,浮力主导氢气扩散,由于氢气的密度远低于空气,因此氢气主要在隧道顶部聚集。随着车速的提高,浮力效应被抑制,空气动力学效应主导氢气扩散,会在车辆后方形成尾流区。车速为 20 km/h 时,氢气泄漏后最易积聚,扩散距离最远。车速提高后隧道内气流加快,增强对氢气的稀释,可燃云团体积逐渐缩小。当车速提高到 100 km/h 时,20 s 后氢气可燃云团的体积下降了 438.58 m^3 。

(3) 当氢气泄漏质量流量较低时,氢气扩散速率与空气稀释速率趋于平衡,氢气扩散范围较小。随着泄漏质量流量的增大,氢气扩散范围更大,车辆后方形成的可燃云团体积呈现出非线性增长的趋势。泄漏质量流量为 0.3704 kg/s 时形成的可燃云团体积是 0.0926 kg/s 时的 5.76 倍。

参考文献:

- [1] Buttner W, Rivkin C, Burgess R, et al. Hydrogen monitoring requirements in the global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(11): 7664-7671.
- [2] Hirano S I, Ichikawa Y, Sato B, et al. Hydrogen is promising for medical applications [J]. Clean Technologies, 2020, 2(4): 529-541.
- [3] Liu Wenguo, Zuo Haibin, Wang Jingsong, et al. The production and application of hydrogen in steel industry [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(17): 10548-10569.
- [4] Uesato H, Miyaoka H, Ichikawa T, et al. Hybrid nickel-metal hydride/hydrogen battery [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(8): 4263-4270.
- [5] Han Weiqun, Zhang Guofang, Xiao Jinsheng, et al. Demonstrations and marketing strategies of hydrogen fuel cell vehicles in China [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(25): 13859-13872.
- [6] Cecere D, Giacomazzi E, Ingenito A. A review on hydrogen industrial aerospace applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(20): 10731-10747.
- [7] 蔡赛杰, 朱昊宁, 张卓, 等. 运行参数对质子交换膜燃料电池堆耐久性影响的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(5): 1-11.
Cai Saijie, Zhu Haoning, Zhang Zhuo, et al. Experimental study on the impact of operating parameters on the durability of proton exchange membrane fuel cell stacks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(5): 1-11.
- [8] 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): 7617-7624.
- [9] Gong Liang, Wang Haoyu, Yang Wen, et al. Effect of the leakage mass flow rate and ignition time on the explosion characteristics of hydrogen leaked from hydrogen-powered train in tunnel [J]. Safety Science, 2025, 184: 106762.
- [10] Zhang Tao, Jiang Yiming, Wang Shiqi, et al. Numerical study on the flow characteristics of pressurized hydrogen leaking into the confined space through different shaped orifices [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(83): 35527-35539.
- [11] Kang Yong, Ma Shuye, Song Bingxue, et al. Simula-

- tion of hydrogen leakage diffusion behavior in confined space [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 53: 75-85.
- [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):28710-28720.
- [13] Chauhan A, Liu Hengrui, Mohammadpour J, et al. Towards safer hydrogen refuelling stations: insights from computational fluid dynamics on LH₂ leakage [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2024, 90: 105355.
- [14] Kim D M, Lee H J. Estimation of flammable region through experimental observation of liquid hydrogen cloud leaked under various atmospheric conditions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 61: 1199-1211.
- [15] Cui Shaoqi, Zhu Guoqing, He Lu, et al. Analysis of the fire hazard and leakage explosion simulation of hydrogen fuel cell vehicles [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 41: 101754.
- [16] Liu Yuanliang, Liu Zhan, Wei Jianjian, et al. Evaluation and prediction of the safe distance in liquid hydrogen spill accident [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 146: 1-8.
- [17] Kim J, Kim Y, Park B, et al. The effect of natural ventilation through roof vents following hydrogen leaks in confined spaces [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 50(Part A): 1395-1405.
- [18] Gitushi K M, Blaylock M L, Klebanoff L E. Hydrogen gas dispersion studies for hydrogen fuel cell vessels II: fuel cell room releases and the influence of ventilation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(50):21492-21505.
- [19] Tang Xin, Pu Liang, Shao Xiangyu, et al. Dispersion behavior and safety study of liquid hydrogen leakage under different application situations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(55): 31278-31288.
- [20] 宋珂, 贾瑞丽. 车库内氢气泄漏爆炸数值模拟 [J]. *安全与环境学报*, 2025, 25(5): 1920-1927.
- [21] Song Ke, Jia Ruili. Numerical simulation of hydrogen leakage and explosion in a garage [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2025, 25(5): 1920-1927.
- [22] Wang Fangnian, Xiao Jianjun, Kuznetsov M, et al. Deterministic risk assessment of hydrogen leak from a fuel cell truck in a real-scale hydrogen refueling station [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 50 (Part A): 1103-1118.
- [23] Deng Jun, Fan Yucheng, Wang Caiping, et al. Advances in hydrogen leakage jets for hydrogen storage systems [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 93: 585-606.
- [24] Ricou F P, Spalding D B. Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961, 11(1):21-32.
- [25] Birch A D, Hughes D J, Swaffield F. Velocity decay of high pressure jets [J]. *Combustion Science and Technology*, 1987, 52(3): 161-171.
- [26] Molkov V, Makarov D, Bragin M. Physics and modeling of under-expanded jets and hydrogen dispersion in atmosphere [J]. *Physics of Extreme State of Matter*, 2009, 2009: 143-145.
- [27] 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): 17457-17469.
- [28] 闫兴清, 戴行涛, 喻健良, 等. 高压氢气泄漏射流研究进展 [J]. *化工进展*, 2023, 42(3): 1118-1128.
- Yan Xingqing, Dai Xingtao, Yu Jianliang, et al. Research progress of high-pressure hydrogen leakage and jet flow [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(3): 1118-1128.
- [29] Yang Fuyuan, Wang Tianze, Deng Xintao, et al. Review on hydrogen safety issues: incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(61): 31467-31488.

(编辑 杜秀杰)