

氢燃料电池汽车在风洞试验中的氢泄漏扩散分析

马天才^{1,3}, 景秀辉^{1,3}, 李田田^{1,2}, 黄倍铭¹, 谢娇娇¹, 庞加斌^{1,2}

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 3. 同济大学碳中和研究院, 上海 200092)

摘要: 采用数值模拟方法, 研究氢燃料电池汽车在发生氢泄漏情况下, 氢气在风洞内部的流动扩散规律与分布情况。当风洞模拟汽车以 80 km/h 行驶工况时, 车底部泄漏的氢气紧贴着汽车表面向后移动进入汽车的尾流区, 氢气浓度随着离汽车尾部距离的增加而降低。从收集口进入流道内的氢气集中在中、底部, 具有明显的浓度梯度, 经过风扇区后变得均匀; 10 s 后车底泄漏的氢气又重新回到试验段, 与车底正在泄漏的氢气汇合, 造成整个区域氢气浓度的持续升高。由于风洞流道拐角导流片的存在, 流道内测的氢气浓度升高的更快。当风洞模拟汽车怠速工况时, 泄漏的氢气大多在试验段内流动扩散, 流道内几乎检测不到氢气。受试验段内气流扰动的影响, 汽车两侧的氢气呈现出不对称分布, 顶部的氢气集中在车左侧。根据数值模拟结果给出了氢浓度传感器的安装位置建议。

关键词: 汽车风洞; 氢燃料电池汽车(HFCVs); 氢泄漏; 数值模拟

中图分类号: TK91

文献标志码: A

Analysis of Hydrogen Leakage and Diffusion in Vehicle Wind Tunnel Based on CFD

MA Tiancai^{1,3}, JING Xiuhui^{1,3}, LI Tiantian^{1,2}, Huang Beiming¹, XIE Jiaojiao¹, PANG Jiabin^{1,2}

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Institute of Carbon Neutrality, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the rapid development of hydrogen fuel cell vehicles (HFCVs), it is possible for hydrogen fuel cell vehicles to be tested in wind tunnels. In this paper, the flow diffusion law and distribution of hydrogen in wind tunnel under the condition of HFCV leak were studied by numerical simulation. When the wind tunnel simulates the driving condition of the HFCV at 80 km/h, the leaking hydrogen moves against the surface of the car and into the

wake area. The hydrogen concentration decreases with increasing distance from the car. The hydrogen entering the flow channel from the collecting port is concentrated in the middle and bottom, with an obvious concentration gradient, and becomes uniform after passing through the fan section. After 10s, the hydrogen leaking from the bottom of the car returned to the test section and merged with the hydrogen leaking from the car, resulting in a continuous increase in the concentration of hydrogen in the entire area. The concentration of hydrogen inboard path increases faster than outboard path due to the deflectors at the corner of the channel. When the wind tunnel simulates the idling condition, the leaking hydrogen mostly diffuses in the test section and almost no hydrogen is detected in the flow channel. Affected by airflow disturbance in the test section, the hydrogen on two sides of the vehicle presents an unsymmetrical distribution, the hydrogen at the top is concentrated on the left side of the HFCV. Finally, according to the numerical simulation results, the installation position of the hydrogen sensors is suggested.

Keywords: wind tunnel; hydrogen fuel cell vehicles (HFCVs); hydrogen leakage; numerical simulation

近年来, 氢燃料电池汽车因其零污染排放、续航里程长、能量转换效率高等优点受到各国广泛关注^[1-2]。但是, 氢燃料电池汽车的商业化进程比较缓慢, 除了电堆成本与使用寿命问题外, 氢安全问题也是限制燃料电池汽车发展的重要因素之一^[3]。由于氢气本身具有易燃、易爆、易扩散的特性, 保障安全是燃料电池汽车大规模普及和推广运营的基础。汽车风洞能够模拟测试各种行车环境中遇到的空气阻力、噪声、冷热情况, 再配合相关设备可进一步模拟天气环境和日照辐射, 风洞测试是汽车外形设计、整车热管理开发过程中必不可少的环节^[4]。但是, 由

收稿日期: 2023-11-30

第一作者: 马天才(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为氢燃料电池系统集成与开发。

E-mail: matiancai@tongji.edu.cn

于氢燃料电池汽车是新兴事物,大多数已运营的风洞在设计阶段并未考虑氢安全问题,因此氢燃料电池汽车在风洞中测试也存在安全隐患。

目前,关于氢安全的研究主要集中在氢气的扩散与泄漏特性、燃烧与爆炸、产生超高压现象的分析^[5-6]。这些研究多以危险易发场景——地下停车场^[7-9]、车库^[10-11]、隧道^[12-13]、加氢站^[14-16]等为研究对象,展开试验或模拟,对氢气的流动特性、浓度分布深入分析。当高压氢气泄漏时,根据气源与周围大气之间的压力比,泄漏射流在泄漏出口可分为3种流动状态^[5,17]:①亚音速射流,特征为气体在出口处已充分膨胀;②临界状态射流,特征为出口速度达到当地声速;③欠膨胀射流,特征为气流进入大气环境后进一步膨胀加速。由公式(1)判断临界压力比^[18]:

$$\frac{P_{cr}}{P_a} = \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

式中: P_{cr} 为临界压力; P_a 为外部环境大气压力; γ 为绝热指数,氢气的 γ 为1.4。故求得氢气的临界压力为0.19 MPa。目前车用燃料电池电堆减压前的管道压力大于0.19 MPa,储氢罐的压力更是达到35 MPa或70 MPa,远高于氢泄漏临界压力值,且高压泄漏时形成欠膨胀射流。欠膨胀射流包括复杂的激波、马赫盘、外部压缩波、反射波等结构,常被简化成欠膨胀流动区、初始卷吸和加热区、射流发展区、射流充分发展区四个等效区域^[19]。但从全局的氢浓度分布研究来看,针对近场射流急剧变化的气动特性进行建模过于复杂,因此一种名为“虚喷嘴”(notional nozzle)的简化方法得到了广泛应用。虚喷嘴模型假设等效出口气体流量与实际出口气体流量相等,虚喷嘴出口压力等于环境的压力,进而就可适用经典亚音速自由射流模型。Birch等人^[20-21]基于质量和动量守恒最先建立较为完善的虚喷嘴模型,但将射流的温度近似等于大气温度;Ewan等人^[22]在Birch模型的基础上进一步提出将射流的温度等于射流从停滞状态到实际喷嘴的等熵膨胀得出的温度;Schefer等人^[23]使用Abel-Nobel状态方程来计算实际气体性质。Molkov等人^[24]在Schefer模型的基础上应用能量守恒方程代替动量守恒方程,以避免虚喷嘴模型出现超音速。

氢气以亚音速释放相关的研究较为成熟,在缓慢泄漏状态下,亚音速浮力射流的数学积分表达由Houf等人^[25]提出:

$$\frac{\partial}{\partial S} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho u r dr d\phi = \rho_{\infty} E \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho u^2 \cos \theta r dr d\phi = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho u^2 \sin \theta r dr d\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} (\rho_{\infty} - \rho) g r dr d\phi \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho u (y - y_{\infty}) r dr d\phi = 0 \quad (5)$$

式中:圆形浮力射流从原点出发,与水平面夹角为 θ_0 ;S为射流轴坐标,与水平面夹角为 θ ;垂直于射流S轴的径向距离设为r坐标,在射流法向截面上绕S轴的方位角设为 ϕ ;u为局部时均射流速度; ρ 为局部时均射流密度; ρ_{∞} 为周围空气密度;y为射流中氢的局部时均质量分数; y_{∞} 为周围空气中氢的质量分数;E为射流中环境流体夹带的局部速率。射流在已经建立流动区域内的氢浓度场、速度场和密度梯度沿径向的分布符合高斯概率分布,射流的轴向分布符合双曲线衰减规律^[26-28]。

轻质气体以一定的流量在密闭空间向上泄漏时,存在两种经典的气动模式^[5]:填充盒模型(filling box model)和渐暗盒模型(fading up box model)。填充盒模型下,泄漏口以低压、低动量释放,在到达顶部天花板之前转化为羽流,并在顶部因混合不够均匀发生浓度分层。填充盒模型最早由Baines和Turner通过研究盐溶液在水中的流动开发^[29]。渐暗盒模型则是高压、高初始动量的泄漏模式,喷嘴泄漏的氢气在接触天花板时不会变成羽流,即以非零动量撞击到天花板,此情况泄漏气体在顶部与周围气体混合较为充分。渐暗盒情况下,爆炸云几乎均匀地形成一个更大体积空间,比填充盒情况更危险^[30]。

前文描述的“填充盒”理论模型通常用于预测相对较小的密闭空间内泄漏引起的浓度积聚,但并不适用于描述地下停车场、隧道等大型密闭空间中氢浓度分布特性,因为在大型密闭空间中释放的气体混合物层中的氢气浓度分布是不均匀的^[7,8,31],且实际情况中,存在阻挡物、不同外部风向等多种影响因素^[14,32]。计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术的发展给解决这类问题提供了有力的工具。通常,以连续性方程、动量方程、能量方程和组分输运方程作为计算域的控制方程,将控制方程离散化并通过数值方法(有限元、有限体积法等)求解。其中,氢气在空气中的扩散属于单相双组分非反应扩散问题,可用下式表示^[33]:

$$\frac{\partial(\rho c_{h_2})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} c_{h_2}) = \nabla(D_{h_2} \text{grad}(\rho c_{h_2})) \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho c_{\text{air}})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} c_{\text{air}}) = \nabla(D_{\text{air}} \text{grad}(\rho c_{\text{air}})) \quad (7)$$

式中: c_{H_2} 、 c_{air} 分别为氢气、空气的体积浓度; D_{H_2} 、 D_{air} 分别为氢气、空气的扩散系数。Hussein 等人^[34]基于 CFD 研究了停车场中 700 bar 车载储氢瓶发生氢泄漏的情况,讨论了泄漏直径和泄漏方向角度对可燃云形成的影响。对于直径 3.34 mm 泄漏直径可在不到 20 s 的时间内导致整个停车场大部分空间形成可燃云,然而直径为 0.5 mm 泄漏直径情况下可燃范围小到可忽略不计;他们推荐泄放角度为 30°或 45°,这可使氢气远离车身,而 0°的向下释放则会使车门和乘客逃生路线被可燃云短暂包围。Patel 等人^[35]基于 CFD 模拟了氢气通过面积为 0.046 5 m² 泄漏口以 0.02 m/s 速度在半密闭空间内的释放,并分析了通风口的配置;他们认为单通风口配置是无效的,门和屋顶通设置多通风口在引出、稀释氢气方面更有效。Lee 等人^[36]研究了燃料电池调压室内的氢泄漏特征,在湍流模型方面,他们对比了 Realizable $k-\epsilon$ 与 SST $k-\omega$ 模型,发现 SST $k-\omega$ 模型精度更好,计算出的数据更接近实验结果。近年来,大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 凭借其可较好的捕获湍流波动和涡旋而逐渐兴起,如 Huang 等人^[37]在研究大型密闭空间地下停车场的氢扩散、Stella 等人^[38]在分析密闭空间氢扩散的分层时,都应用了 LES 湍流模型,但其缺点是占用计算机资源较大,所以未得到大规模应用。

在模型验证方面,多数学者是基于前人的实验数据进行间接验证,而并未用自己的模型场景进行实验测试验证^[11,33,35-36]。这一方面是因为涉氢的实验较为危险,进行相关实验的条件比较苛刻;另一方面是氢浓度传感器的精度较低且波动较大,使得仿真结果难以复现。一个比较安全的方式是用氦气代替氢气进行实验。Zhao 等人^[9]用氦气测试密闭空间中的氢燃料电池汽车泄漏情况;他们还进一步将氦气传感器数据输入给神经网络模型训练预测泄漏点位置。Shu 等人^[31]在环境舱内用氦气进行实验,研究泄漏流量、环境温度、环境湿度对氢气泄漏的影响。Chen 等人^[39]用氦气代替氢气测试了一个缩比的停车场模型内燃料电池汽车氢释放,气体传感器被用来测量沿地面和天花板的氦浓度。

综上所述,目前针对复杂环境大空间内氢气泄漏扩散的研究以数值模拟为主,实验研究极少,而研究场景集中于地下停车场、车库等半密闭空间,未见风洞中氢泄漏扩散的相关研究。本文以上海地面交通工具风洞中心的整车热环境风洞为研究对象,重建三维风洞的全尺寸模型,基于计算流体力学辅

助的手段研究氢燃料电池汽车发生氢泄漏后氢气在风洞中的扩散规律以及分布情况,分析了汽车在 80 km/h 行驶和怠速两种工况下氢气在风洞内的时空演变特性,并给出了氢浓度传感器的安装位置建议。

1 模型建立

1.1 几何模型与网格

本文研究氢燃料电池汽车在风洞测试过程中意外氢泄漏后氢气在风洞中的扩散行为以及浓度分布,重点在于风洞内部的流场构建,而对燃料电池汽车本身以及车载供氢系统进行简化。图 1(a)为热环境风洞简化示意图,气流循环过程如下:风机为动力来源,气流从风机出口首先进入主扩散段,在主扩散段内,气流的速度降低、压力升高,从而降低能量损失;从主扩散段进入第三拐角前会经过加热器,此为热环境风洞的温控部件;经过第四拐角后会通过整流器来减少气流旋涡以及低频脉动;经过整流器梳理、均匀后的气流进入收缩段,气流加速后从喷口流出;汽车测试的空间为试验段,气流经过燃料电池汽车后从收集口再次进入风道内,流经第一拐角和第二拐角后最后回到风机区被再次吸入喷出,完成一个循环。在第二拐角上部存在引入新风口用于外界新鲜空气的引入,试验段连接压力平衡口,用于保持内部压力稳定。此外,若测试汽车的怠速模式,气流在进入第四拐角之前会向上走入旁通风道,进而从喷口顶部的旁通口流出。热环境风洞计算域整体尺寸长宽高约为 45 m×18 m×9 m。图 1(b)显示了简化了的燃料电池汽车模型以及泄漏口位置,泄漏口位于车底部,泄漏方向垂直于地面,为 1 cm×1 cm 的方孔,离地高度 0.32 m;泄漏口位于喷口射流的中心线上,距风洞喷口 3.4 m、距试验段墙壁 6.4 m。

本研究使用商业软件 STAR-CCM+ 对建模域进行网格划分,采用六面体元素的形式离散化,并在喷口射流区、尾流区、风扇区、拐角区等气动特性变化较大的区域进行加密,如图 2 所示。网格的尺寸对 CFD 仿真精度有重要影响,为验证网格独立性,在试验段氢浓度梯度剧烈变化的关键区域设置测量点 A、B、C、D,采用 77 万、183 万、268 万、349 万网格求解泄漏量为 0.003 kg/s 下的稳态氢气体积分数,结果如图 3 所示。268 万网格结果与 349 万网格结果相差不大,氢气体积分数绝对误差小于 0.1%,氢体积分数值相对误差小于 6.5%。综合考虑计算机资源与误差,故使用 268 万网格的设置方案。

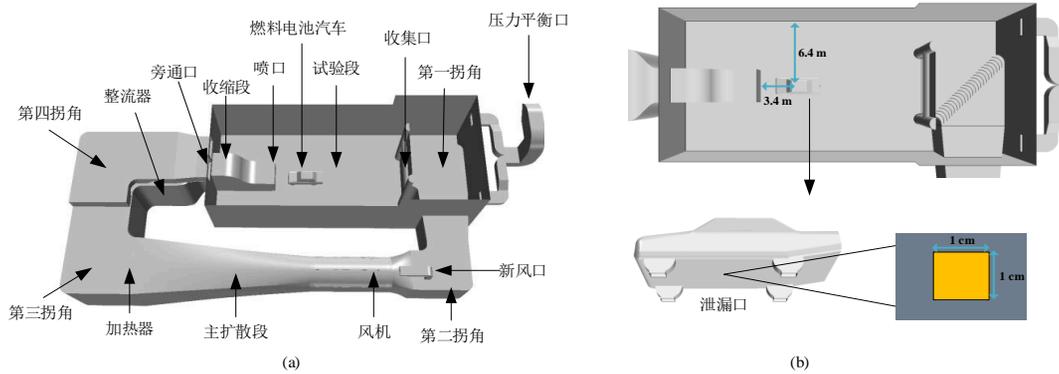


图1 几何模型:(a) 风洞三维模型;(b) 氢泄漏位置

Fig.1 The geometry model: (a) 3D model of wind tunnel; (b) Position of hydrogen leakage

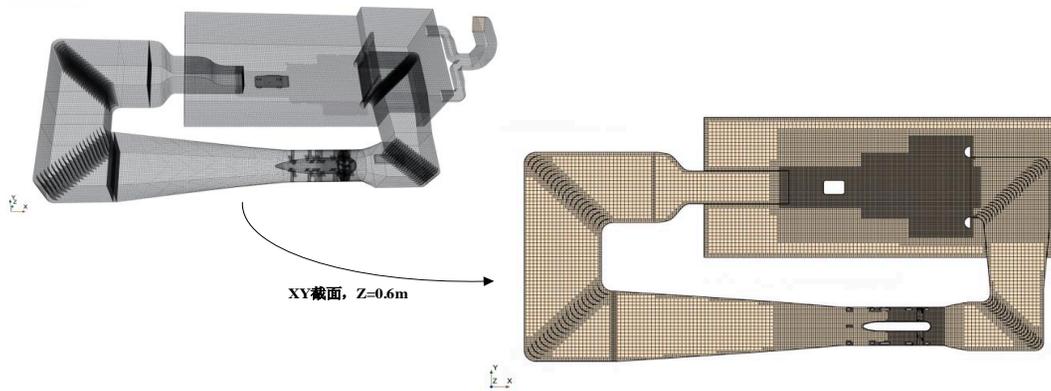


图2 网格总览和加密区

Fig.2 General view of numerical mesh and refine area

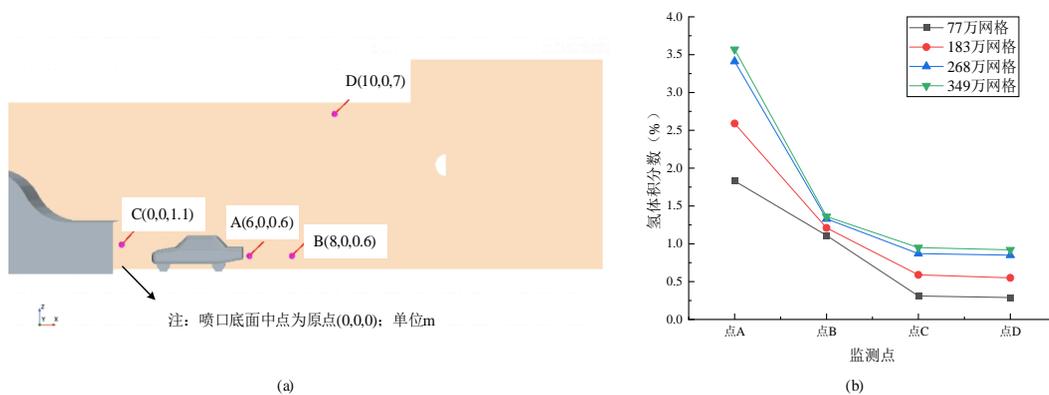


图3 (a)测量点位;(b) 网格无关性验证

Fig.3 (a) Measuring point position; (b) Grid independence validation

1.2 数学模型

为了模拟氢气扩散流动和识别浓度聚集区域,应用质量守恒方程、动量守恒方程和组分方程。质量守恒方程和动量守恒方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i(\rho - \rho_0) \quad (9)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; x_i 为笛卡尔坐标; u 为速度分量; τ_{ij} 为应力张量分量; p 为压力;最后一项是浮力项,其中 g_i 是重力加速度矢量, ρ_0 是参考密度。

氢的组分方程为^[7]:

$$\frac{\partial(\rho y_m)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j y_m + F_{m,j}) = S_m \quad (10)$$

式中: y_m 是氢气的质量分数; $F_{m,j}$ 为 x_j 方向上的扩散通量,定义为^[7]

$$F_{m,j} = -\rho(\alpha_m + \alpha_t) \frac{\partial y_m}{\partial x_j} \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho uk) = P_k - \beta^* \rho \omega k + \nabla((\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k) \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla(\rho \omega u) = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \nabla((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega) + 2\rho(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \nabla \omega \quad (13)$$

式中: α 为 $k-\omega$ 模型对应的常数; S 为应变率; F_1 是混合函数; β^* 、 β 、 σ_k 、 σ_ω 和 $\sigma_{\omega 2}$ 均为常数。

为了简化连续方程与动量方程中浮力项之间的耦合,在模拟中忽略了气体的可压缩性效应^[7]。具体来说,密度是由式(10)计算的氢的质量分数更新的,不受压力变化的影响。空气-氢混合物的密度为:

$$\rho = \varphi_{H_2} \rho_{H_2} + (1 - \varphi_{H_2}) \rho_{air} \quad (14)$$

式中: φ 表示体积分数,由质量分数计算得到。忽略温度的影响,假定氢气和空气的密度在常温下为常数。简化成不可压缩气体是因为本文研究重点的是泄漏远场的风洞大范围全局的氢浓度变化,而不是泄漏口近场附近,对大范围全局的氢浓度长期演变有主要影响的是泄漏流量而不是泄漏速度^[7];相比于风洞喷口高速强制气流的影响,车底泄漏口自身因密度变化产生的扩散效应对全局的氢浓度影响很小。并且本研究中氢气泄漏率相对较小,气体压缩的影响也是较小的。所以本文数学模型的简化对于研究全局可燃区域的时间演变是可行的,这种不可压缩气体的简化在国内外关于地下停车场^[7]、燃料电池车内部^[32]以及隧道^[40]氢扩散的先前研究中也得到过应用。

1.3 CFD设置与验证

本文所建立模型的环境压力为标准大气压101 kPa,环境温度恒定为300 K。风扇运转采用参考坐标设定,运转稳定后试验段喷口的出口流速为80 km/h,为风洞测试常用的风速。风洞压力平衡口与外界标准大气压相连,应用压力出口边界。本文研究的氢气自身高扩散特性、低密度上浮特性在风洞高速气流裹挟下的特殊行为表现,为了简化模型以及限定研究边界,忽略风洞的尾气排出以及新风进入。首先经过稳态计算至残差小于 10^{-3} ,且流场稳定,喷口流速稳定在80 km/h后,开始释放氢气,并启用隐式非稳态模型。一般情况下高压储氢罐泄漏

式中: α_m 为分子扩散系数, α_t 为湍流扩散系数,由湍流模型求得。一些研究表明,SST $k-\omega$ 湍流模型在风洞CFD仿真方面的精度比 $k-\epsilon$ 模型更高^[41-42],并且在氢气扩散方面SST $k-\omega$ 模型预测的氢气质量分数结果更接近实验数据^[36]。所以,本研究采用SST $k-\omega$ 湍流模型,其表达式如下^[36]:

是超音速的,可能会冲击地面,使得近场氢浓度计算变得复杂,前文也提到大空间氢浓度长期演变主要影响的是泄漏流量而不是速度,采取质量流量出口设置可有效的简化计算。

本文设置氢气在燃料电池汽车底部以0.003 kg/s流量恒定释放,已足够体现扩散规律细节,泄漏量与Huang等人^[37]的设置的地下停车场氢泄漏一致,小于李方语^[10]设置的0.004376 kg/s,略大于Li等人^[11]设置的0.00138 kg/s。隐式非稳态计算步长为0.01 s,最大内部迭代5次,总物理时间60 s。以0.003 kg/s流量泄漏60 s,相当于流失了一个常规35 MPa储氢瓶6%~9%的储氢量,也足够在风洞大空间体现氢流动扩散规律趋势。同样,工况设置怠速工况下的氢泄漏,模型求解使用商用CFD软件STAR-CCM+。

由于大型风洞进行氢气实验验证较为困难,故通过相同的数学模型模拟,以Malakhov等人^[43]关于通风廊道氢气泄放的实验进行间接验证。实验条件为^[43]:通风速度6.5 m/s,泄放孔直径4.572 mm,泄放压力2 bar。计算结果如图4所示,由图可见趋势规律与实验结果一致,绝对氢浓度误差在1%左右,误差的主要原因是实际实验中氢气与大气进行热交换,而模型是理想化绝热过程。此外,实验的空间较小,出口处的压力突变影响较大。而风洞的近似恒温、空间大且关注的是全局氢浓度,按流量出口计算泄漏更合适^[7],所以此模型应用在风洞中精度会更好。

为了更好地研究风洞内氢气的浓度分布情况,共设置18个氢浓度监测点位(见图5)。监测点1~7为流道中的关键位置,监测点位于流道的中心。其中,监测点1用来观察泄漏刚进入风道的情况;监测点2、5用于观察进过拐角导流片的氢气浓度的变化;监测点3位于风机前、监测点4位于加热器前,这是考虑到风机、加热器为电器部件,而静电、电弧、电

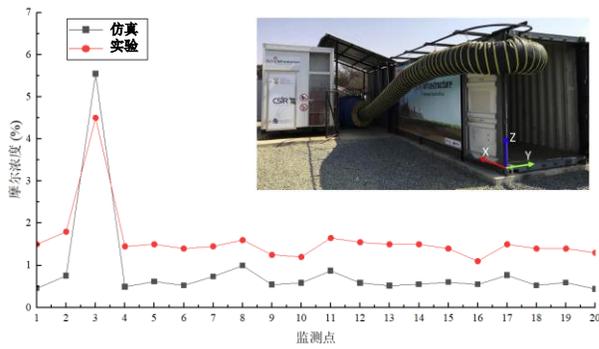


图 4 模拟与试验结果对比

Fig.4 Comparison of simulation and test results

火花均有可能引燃氢气;监测点 6 用于观察整流器

对氢气的影响;监测点 7 则是监测喷口处氢浓度,喷口气流氢浓度将直接影响试验段内的氢分布;氢气密度低,极易上浮至顶部,故在试验段顶部设置监测点 8~18,其中监测点 8、9、10、12、13、15、16、18 位于试验段 4 个角落以及边侧,用于监测气体流动较弱区域氢气的流动情况,监测点 11 位于电器件阳光模拟器附近,监测点 14 用于分析收集口外形对氢气流动的影响,监测点 17 位于收集口上方的流动“死区”,监测氢气是否会在此聚集。所有监测点以喷口底部的中点作为坐标原点,顺应喷口气流方向为 X 轴正方向、气流左为 Y 轴正方向,垂直向上为 Z 轴正方向。18 个监测点的具体坐标见表 1。

表 1 风洞氢浓度监测点空间坐标

Tab.1 Coordinates of hydrogen concentration monitoring points in wind tunnel

单位: m

监测点 1 (X, Y, Z) (14.47, 0, 2.25)	监测点 2 (X, Y, Z) (19.13, -6.46, 2.25)	监测点 3 (X, Y, Z) (15.08, -12.83, 2.25)	监测点 4 (X, Y, Z) (-14.53, -12.83, 2.25)	监测点 5 (X, Y, Z) (-18.99, -6.43, 2.25)
监测点 6 (X, Y, Z) (-11.32, 0, 2.25)	监测点 7 (X, Y, Z) (0, 0, 1.10)	监测点 8 (X, Y, Z) (-6.64, 5.96, 6.02)	监测点 9 (X, Y, Z) (-6.64, -5.96, 6.02)	监测点 10 (X, Y, Z) (4.00, 5.96, 6.02)
监测点 11 (X, Y, Z) (4.00, 0, 6.02)	监测点 12 (X, Y, Z) (4.00, -5.96, 6.02)	监测点 13 (X, Y, Z) (14.08, 5.96, 8.96)	监测点 14 (X, Y, Z) (14.08, 0, 8.96)	监测点 15 (X, Y, Z) (14.08, -5.96, 8.96)
监测点 16 (X, Y, Z) (22.10, 5.96, 8.96)	监测点 17 (X, Y, Z) (22.10, 0, 8.96)	监测点 18 (X, Y, Z) (22.10, -5.96, 8.96)		

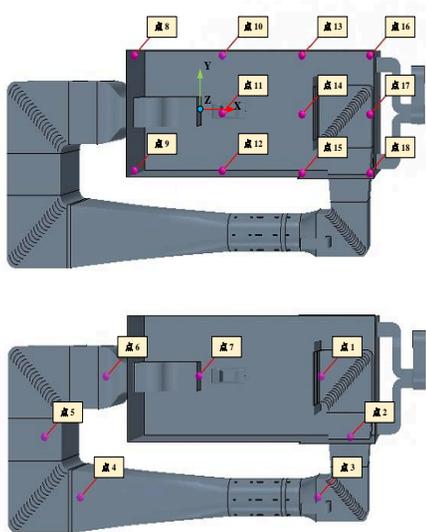


图 5 风洞氢浓度监测点位置

Fig.5 Position of monitoring point for hydrogen concentration in wind tunnel

2 仿真结果与讨论

2.1 汽车行驶模式下氢泄漏

风洞的车辆高速行驶工况是通过车轮底部的传

动转鼓和车前方喷口高速射流实现的,风洞喷口出风模式下的喷口平均风速达 80 km/h。图 6 显示了以喷口中心所作的 XZ 截面上氢气体积分数,可以看到由于汽车底部垂直向下泄漏的氢气初速度较小,受横向高速气流的影响,氢气紧贴着汽车表面向后移动。随后氢气脱离汽车表面后进入汽车的尾流区,氢气浓度随着离汽车尾部距离的增加而降低,0.8 s 后氢气进入了收集口,这也意味氢气离开试验段进入了风洞的内部流道当中。在图 6(b)中可以看到车尾部的氢气出现了形态的突变(画圈处),由先前的浓度梯度形式分布变得混合。这是因为前段氢气在低压的尾流区受扰动较小,一旦离开低压区域,周围的气体涌入,氢气浓度迅速下降同时变得混合均匀。图 6(c)显示了 37 s 时的氢气浓度分布,这里并不是指 37 s 氢气才在风洞运行一圈,只是在当前体积分分数云图分辨率下的一种显示。事实上,根据监测点的数据(见图 8),在车底泄漏的氢气约 10 s 就运行完了一圈又重新回到了试验段。这里列出图 6(c)和图 6(d)主要是为了说明浮力的影响,即氢气在风洞流道中的流动受浮力影响,逐渐贴于顶部,优先于喷口顶部流出。随着时间推移、氢泄漏量的不断积累,才在喷口的全区域均能检测到氢气。

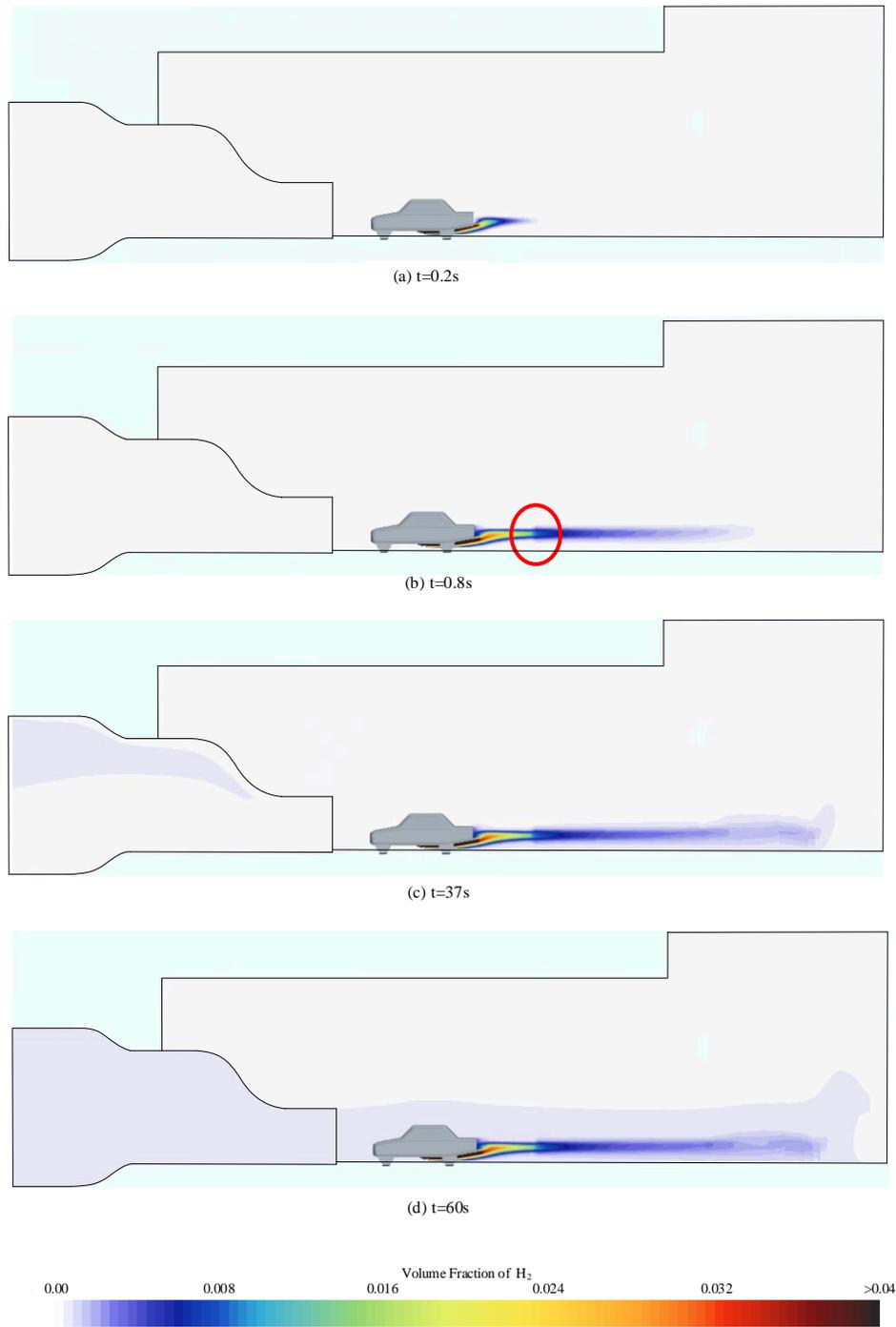


图6 XZ截面的氢体积分分数云图(Y=0 m)

Fig.6 Hydrogen volume fraction in XZ section (Y=0m)

一般来说,人员活动区域仅在试验段,并不包括风洞的庞大流道结构。事实上,流道内的高速风机、加热器、电缆等设备器件极容易成为氢气的引爆点,了解氢在风洞流道内部的流动扩散情况十分有必要。在Z=0.62 m处截取XY平面,分别作t=1 s、t=10 s、t=23 s和t=60 s的氢气体积分数云图,为了方便观察规律,云图分辨率最大氢浓度设为2%,如

图7所示。在图7(b)可以看到氢气在经过风扇区后变得更加分散,这是风扇高速旋转的扰动造成的,会使得氢气分布变得更加均匀。在图7(c)可以明显看到流道内侧的氢浓度高于外侧,这是因为在四个拐角处存在导流片,内侧的氢气相比于外侧会更快的流过拐角,类似于操场的跑道。车辆的左侧(驾驶员视角)的气流正是来自于流道的内侧,所以会优先监

测到氢气浓度的聚集。随着时间的推移,区域内氢气总量不断增加,整个风洞流道均能监测到氢气;在

试验段氢气随高速气流流动,在车周围形成氢包层,并在车身两侧区域向外散开,如图7(d)所示。

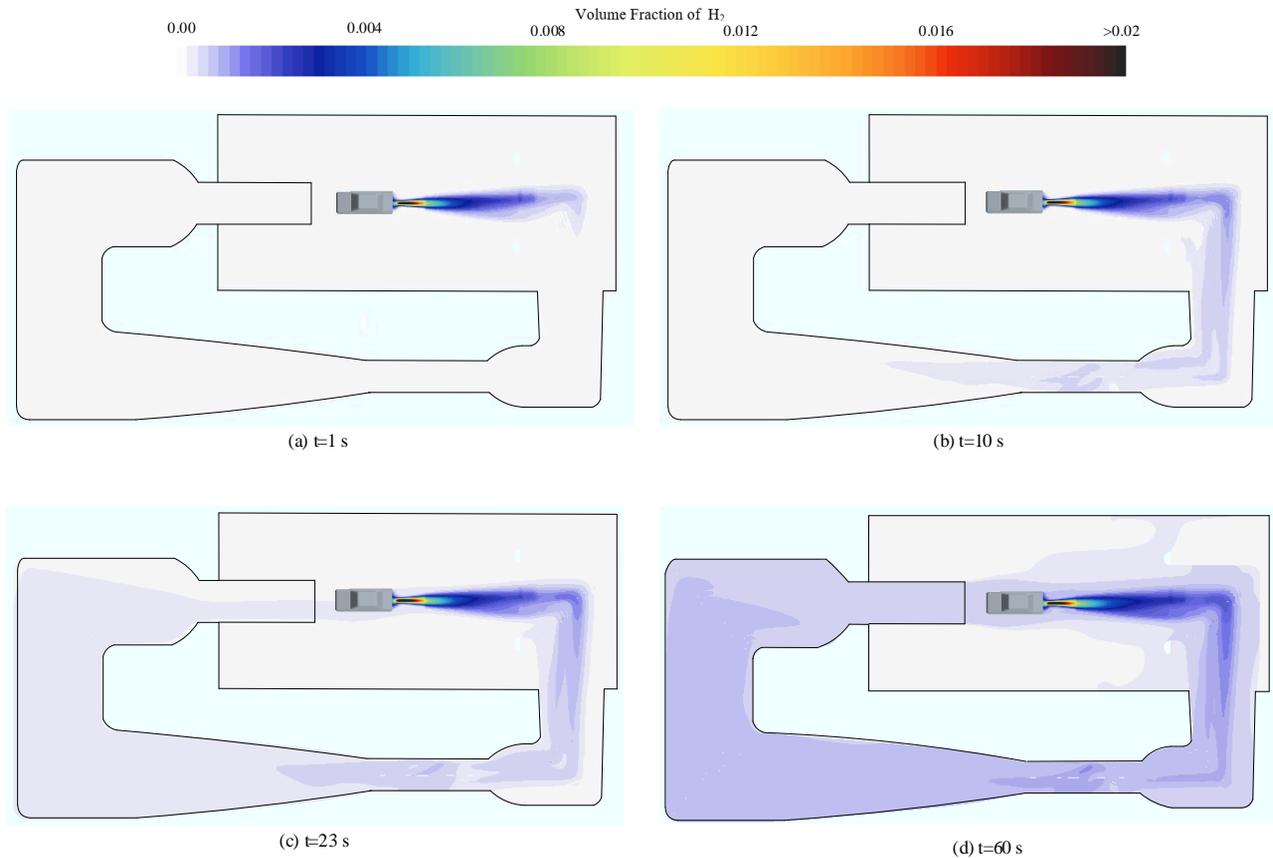


图7 XY 截面的氢体积分数 ($Z=0.62\text{ m}$)

Fig.7 Hydrogen volume fraction in XY section ($Z=0.62\text{ m}$)

为了更精确的分析氢气在整个泄漏过程中的扩散规律,以风洞18处监测点的数据作折线图,各监测点位置与坐标详见图5和表1,其中监测点1~7均位于风洞流道中,其数据作图8(a);监测点8~18均位于试验段顶部,其数据作图8(b)。

由图8(a)可以看出,所有监测点的氢浓度总体趋势均随着时间增大。刚开始泄漏时,最先监测到氢气的不是距离汽车尾部最近的监测点1,而是监测点3,这是因为泄漏点水平高度低,距地面0.32 m,但流道内监测点位于流道正中间,距地面高度2.25 m。氢气受风洞气流的裹挟,距离泄漏点最近的监测点1无法第一时间监测到流道底部的氢气;随着氢气在流动中受浮力的影响,氢气向流道的中、上部蔓延,监测点2和3开始能监测到氢气,流道更往后的监测点3监测到的浓度更大。但是监测点3为风扇的吸入区,气流扰动较大,也是监测点3数据波动较大的原因。经过风扇搅动后的氢气具有较好的均匀度,所以位于风扇后的监测点4、5、6、7具有较好

的规律性。监测点4最先出现氢浓度的激增,随后是监测点5、6、7;且监测点4、5、6、7的氢体积分数依次减小,说明泄漏的氢气在流动过程中浓度不断降低。喷口处的监测点7在泄漏开始后约10s出现氢浓度的大幅上升,意味着泄漏的氢气已经绕完风洞一圈,又重新回到了试验段。监测点1在约11s才开始出现氢浓度的明显上升,说明监测点1监测到的是喷口的氢气,而不是汽车底部直接泄漏的氢气。在20s后,除了监测点3,其余监测点均呈现出氢体积浓度的线性上升。由于风洞体积庞大,在泄漏开的第60s,所有监测点的氢体积浓度均低于氢气的爆炸下限4%。

图8(b)的监测点均位于试验段的顶部,可以看到大多数监测点在10s后才有所变化,这说明这些监测点监测的是来自喷口的氢气,而不是第一时间汽车底部泄漏的氢气。监测点14最先监测到氢气,也是全时间段保持着所有试验段监测点里最高的氢浓度值。这与监测点14的位置有关,其位于收集口

中部的正上方,来自喷口的气体绝大部分被收集口收集进入流道中,也有小部分气体流到收集口的上方,如图9所示。监测点12、15的氢浓度仅次于监测点14,其数值明显高于其他监测点。这是因为监测点12和15位于流道的内侧,因为拐角导流片的存在使得内侧的氢气浓度升高的更快。事实上,监测点9、12、15的氢体积浓度均高于监测点8、10、13,印证了前文对流道内外侧氢浓度分布不均的分析。监测

点8、9、16、18位于试验段的4个角落,处在流动的“死区”,其氢浓度趋势并不像监测点12、14、15那样具有接近线性上升的趋势,而是振荡式的缓慢上升,这意味着氢气是通过扩散到达4个角落,而不是强制流动。总体来说,试验段顶部氢体积浓度在1 min后最高值也不到0.03%,明显低于图8(a)流道内的氢体积浓度,说明实际运用中氢浓度传感器放置于流道中的检测效果要好于放置于试验段顶部。

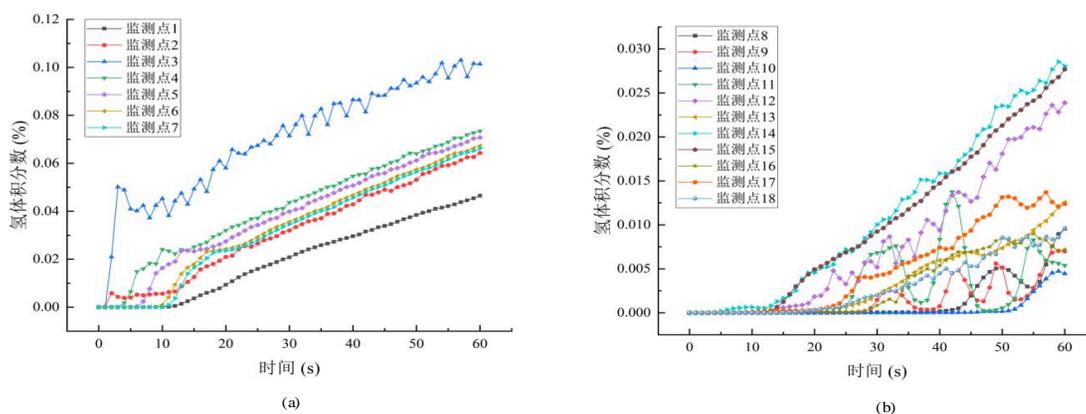


图8 风洞不同位置氢体积分数(喷口出风模式)

Fig.8 Hydrogen volume fractions at different locations in wind tunnel (nozzle out mode)

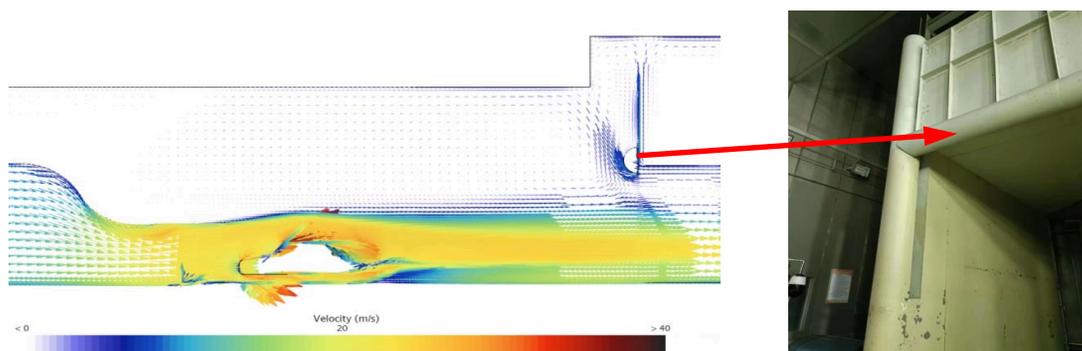


图9 喷口出风模式下XZ截面矢量图(Y=0 m)和收集口

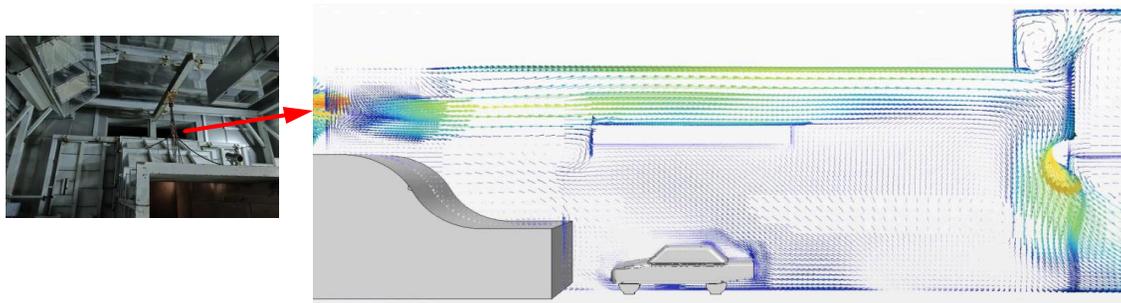
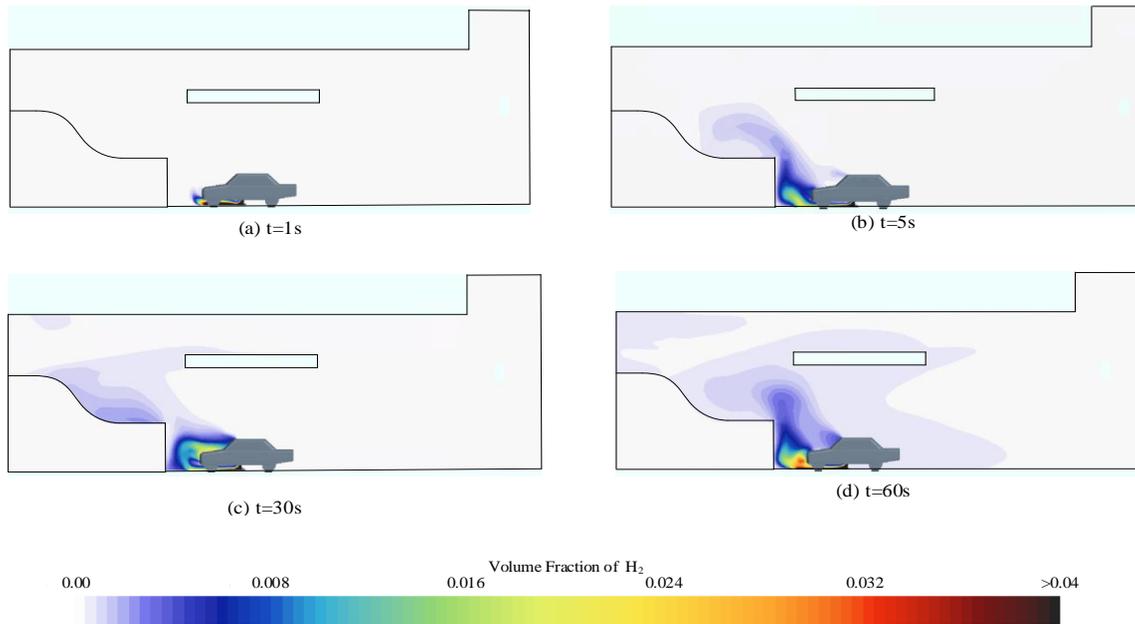
Fig.9 XZ section (Y=0 m) vectors in nozzle out mode and collector

2.2 汽车怠速模式下氢泄漏

在模拟汽车的怠速模式下,风洞喷口关闭,气流从位于喷口顶部的2个旁通口流出,流经阳光模拟器进入收集口,从而绕过汽车,如图10所示。实际汽车附近达不到完全静风环境,可以看到小部分气流经收集口后撞击地面,又往后回流到了汽车附近。这也解释了图11的氢浓度演变过程,即氢气刚开始泄漏会沿着车身底部向车头移动(图11(a)),随后向上漂浮(图11(b));氢气在上部遇到旁通出口的气流裹挟,向后移动(图11(c))。在氢气移动的过程中,其浓度不断降低,距离泄漏点越近的区域氢浓度越高。随着氢气的持续泄漏,试验段内氢气的总量变

多,危险区域也在变大。可以看到氢气极易流过阳光模拟器表面,而阳光模拟器内含有大量电线,工作时发热量也较大,是风洞关于氢安全重点防范的设备。

图12则反映出XY截面上的氢体积分数。由于旁通模式下试验段底部气体流动并无稳定的流场,所以氢浓度分布较为杂乱。以人坐在车里正视前方的视角进行前、后、左、右方位的描述,总体来说,氢气先向车头的右前方流动,随后向车头的左侧以及车后部扩散,并在试验段喷口的两侧的角落形成了氢气聚集区域。汽车左右流场并不均匀,存在一股气流直接推动氢气至喷口的右侧角落,但扩散后的

图10 旁通出风模式下XZ截面($Y=0\text{ m}$)矢量图和旁通口Fig.10 XZ section ($Y=0\text{ m}$) vectors in bypass out mode and bypass outlet图11 XZ截面($Y=0\text{ m}$)的氢体积分数Fig.11 Hydrogen volume fraction in XZ section ($Y=0\text{ m}$)

氢气优先在试验段左半部分聚集,如图12(d)。

将18处监测点的数据做成图13折线图。在图13(a)中,只有喷口附近的监测点7监测到大量的氢气,这是回流的空气推动车底泄漏的氢气往车前部分移动造成的。流道内部的监测点1~6监测的氢气体积及其微小可以忽略不计,这说明怠速模式下,一旦车底氢气泄漏,氢气主要聚集在试验段,几乎不进入流道。图13(b)显示了试验段内氢气随时间的扩散以及分布情况。从扩散行为来看,从泄漏开始,位于汽车顶部的监测点11最先出现氢气体积浓度的上升,这是氢气受向上的浮力以及试验段气流综合影响的结果。随后位于右侧的监测点10在5s后开始出现氢体积浓度的上升,这说明存在一股流向车右侧的气流,与图12所示的结果一致。但是在15s后,监测点9和12的数据值开始领先于其他监测点,并

保持最高体积浓度至最后。这说明在试验段的顶部存在流向左、前方的气流,强烈影响氢气的扩散。位于试验段后部的监测点17反应最慢,在11s后才开始监测到氢气。这意味试验段后部分区域的流场相对静止,这也是位于后部的监测点16、17、18均反应较慢的原因。从数据的波动特征也可以看出,位于试验段前端监测点8、9、10、11、12数据波动较大,说明受气流的扰动较大,而位于试验段后半部分的监测点13~18的数据浓度数值较小,但呈现出稳定上升的过程,说明区域气流速度小且较为规律。需要注意的是位于收集口后方的区域,距离泄漏点最远且由于收集口特殊结构的影响形成了与外部隔绝的局部静风区,虽然氢气难以直接流入,但也意味主动稀释操作下里面的氢气难以通过现有流场结构排出。

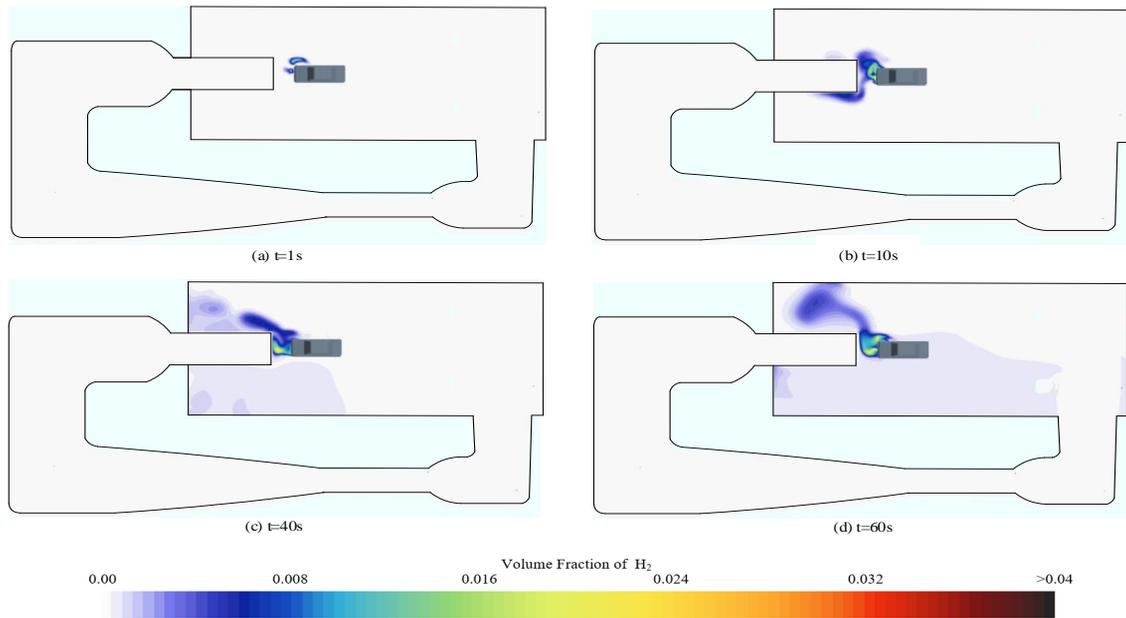


图 12 XY 截面 ($Z=0.62\text{ m}$) 的氢体积分数
Fig.12 Hydrogen volume fraction in XY section ($Z=0.62\text{ m}$)

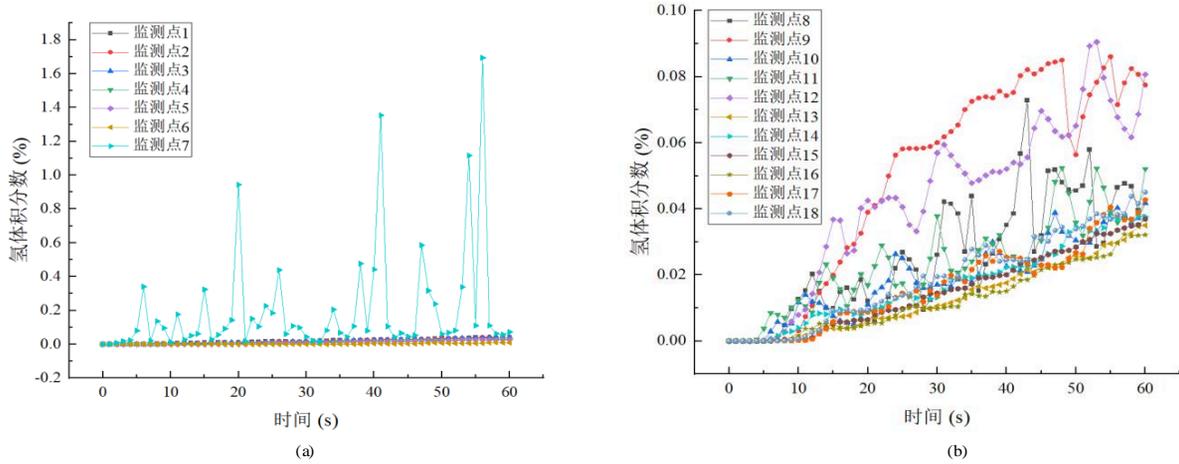


图 13 风洞不同位置氢体积分数(旁通出风模式)
Fig.13 Hydrogen volume fractions at different locations in wind tunnel (bypass out mode)

考虑到氢气密度小,在空气中浮力较大,极易在顶部聚集,而试验段是测试人员频繁进出活动的场所,且顶部高温的阳光模拟器可能存在裸露电线,所以怠速模式下研究氢气在试验段顶部流动聚集的情况十分有必要。将试验段顶部的面作为监测面,怠速模式下分别取 20 s、60 s 时刻作氢气体积浓度分布图,如图 14。顶部的流动并不规律,受旁通出口气流的影响(图 10),氢气会优先在试验段左前部聚集,但浓度并不高,不超过 0.1%,大部分氢气还是停留在底部(图 11(d)),这也意味着传统在顶部布置氢浓度传感器的策略并不适合。此外,怠速工况下的氢气泄漏要比汽车行驶工况危险,因为单讨论浓度上升,

怠速模式氢气仅仅在试验段这部分空间内持续扩散,会形成较大的可燃云团,而行驶工况,整个风洞流道大空间都是氢气流动的区域,即稀释的空间更大。

2.3 氢浓度传感器布置

根据前文所讨论的氢气在风洞不同工作模式下的流动扩散规律,发现氢气聚集情况不同于传统的静态大空间,在仅仅在顶部设置氢浓度传感器的方式无法满足风洞特殊流场的预警需求。

(1) 行驶模式(喷口出风):由图 6 可以看出,在汽车的尾流区的设置氢气浓度传感器的检测效果最好,因为在强气流下,低初始动量的氢气会紧贴车

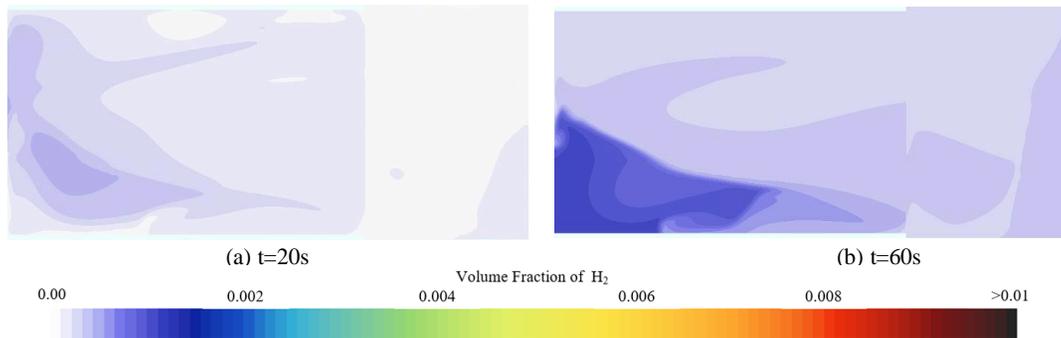


图14 试验段顶部氢体积分数(怠速模式)

Fig.14 Hydrogen volume fraction at the top of test section (idle mode)

身进而被裹挟带至汽车后方,所以本案例在汽车后方尾流区距地面0.5~1 m高度布置可以最先检测到氢气,1 s内即可检测到1%的氢体积浓度。考虑到试验段布置设备可能影响测试的流场,若在风洞的流道内布置传感器,应在收集口位置离地不同高度布置多个传感器阵列,因为在风洞喷口气流的影响下,氢气分布会在不同高度形成明显的浓度梯度,而不同车型、不同泄漏位置又会影响到氢泄漏的高度,所以单传感器难以满足。

(2) 怠速模式(旁通出风):不同于喷口出风,怠速模式下在车前方布置氢气浓度传感器效果最好,因为内部的流场会推动气流往车前移动,如图10、图11;以本案例的0.003 kg/s的情况,20 s可检测到1%的氢体积浓度(车前的监测点7)。试验段顶部布置传感器的效果较差,因为试验段顶部的氢气浓度上升较慢,以图13(b)的曲线预估,10min后顶部才能测到1%的氢体积浓度,但是此时车身附近氢气体积浓度值早已超过4%的安全底线。由于怠速模式本身就是模拟车静风状态,并不需要考虑传感器设备对流场的影响,所以建议在车身前部两侧布置多个可移动式的传感设备。

3 结论

本文重建了上海地面交通工具风洞中心的整车热环境风洞模型,通过数值模拟的方法分析了风洞测试汽车行驶工况和怠速工况两种情况下的氢气扩散行为以及氢浓度的时空演变过程,主要结论如下:

(1) 在汽车行驶工况下,受喷口横向高速气流的影响,氢气紧贴着汽车表面移动至车尾部脱离,氢气浓度随着离汽车尾部距离的增加而降低;流经风扇之前的氢气流具有明显的浓度梯度,但氢气经过

风扇区受风扇高速旋转扰动的影响,会变得分布均匀;泄漏开始后约10 s氢气绕完风洞一圈,与车底正在泄漏的氢气汇合,造成整个区域氢气浓度的持续升高。氢气在流道的流动过程中,流道内侧的氢浓度高于外侧。

(2) 在汽车怠速工况下,泄漏的氢气大多在试验段内流动扩散,流道内几乎检测不到氢气。试验段内尽管气流的流速很小,但流动并不规律,汽车底部泄漏的氢气被气流搅乱,在车的两侧呈现出不对称分布。试验段内车身附近的氢气首先在左前范围聚集,然后逐渐向车右后方部分扩散;试验段顶部的氢气则倾向于在车左上方的角落聚集。

(3) 汽车行驶工况下的氢浓度传感器应考虑在车后尾流区布置,若在流道中布置应在不同高度形成的阵列,以应对氢气浓度的分层;在怠速工况,受风洞流场的影响,氢浓度传感器应优先在车前方两侧布置,而试验段顶部的氢浓度传感器难以起到及时预警效果。

(4) 氢气在车底以0.003 kg/s的速率泄漏60 s后,无论在汽车行驶工况还是怠速工况,本文所设监测点的氢气体积浓度均未达4%的可燃下限,达到4%的高浓度范围仅局限在车底泄漏出口很小的范围内,这既有风洞体积庞大、气流促进稀释的客观因素,也有本案例设置的泄漏时间、泄漏量的主观影响因素。未来需要更多的研究,识别不同氢泄放流量、时间、泄放角度下的氢浓度聚集特征以保障风洞的安全。

参考文献:

- [1] RASUL M G, HAZRAT M A, SATTAR M A, *et al.* The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022,

- 272: 116326.
- [2] AMINUDIN M A, KAMARUDIN S K, LIM B H, *et al.* An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48 (11) : 4371.
- [3] ABOHAMZEH E, SALEHI F, SHEIKHOLESAMI M, *et al.* Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 72(3):104569.
- [4] 赵丰,孙津鸿,牟连嵩,等. 汽车环境风洞试验能力综述[J]. *装备环境工程*,2021,18(10):104.
Zhao F, Sun J H, MU L S, *et al.* Introduction for the test ability of automotive CWT [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021,18(10):104.
- [5] YANG F, WANG T, DENG X, *et al.* Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(61): 31467.
- [6] LI H, CAO X, LIU Y, *et al.* Safety of hydrogen storage and transportation: An overview on mechanisms, techniques, and challenges[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 6258.
- [7] 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): 8084.
- [8] XIN J, DUAN Q, JIN K, *et al.* A reduced-scale experimental study of dispersion characteristics of hydrogen leakage in an underground parking garage [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(44): 16936.
- [9] ZHAO M, HUANG T, LIU C, *et al.* Leak localization using distributed sensors and machine learning for hydrogen releases from a fuel cell vehicle in a parking garage [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 46(1): 1420.
- [10] 李方语. 地下车库氢气泄漏扩散及气流组织研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
LI F Y. Study on hydrogen leakage diffusion and air distribution in underground garage [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.
- [11] LI Y, JIANG J, YU Y, *et al.* Numerical simulation of dispersion and distribution behaviors of hydrogen leakage in the garage with a crossbeam [J]. *Journal of the Society for Computer Simulation*, 2019, 95(12): 1229.
- [12] 朱浩然,张欣,田颖,等.隧道中车载供氢系统液氢泄漏扩散过程分析[J]. *中国汽车*,2022(08):34.
ZHU H R, ZHANG X, TIAN Y, *et al.* Analysis of liquid hydrogen leakage and diffusion process of vehicle mounted hydrogen supply system in tunnel[J]. *China Auto*, 2022(8):34.
- [13] ZHANG J, PAN Y, NI Y, *et al.* Computational fluid dynamics simulations of hydrogen jet fires inside a tunnel[C]// Science and Engineering Research Center. Proceedings of 2019 2nd International Conference on Sustainable Energy, Environment and Information Engineering (SEEIE 2019). Atlantis Press, 2019:228. DOI:10.2991/seeie-19.2019.53.
- [14] QIAN J, LI X, GAO Z, *et al.* A numerical study of hydrogen leakage and diffusion in a hydrogen refueling station [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45 (28) : 14428.
- [15] LIU K, HE C, YU Y, *et al.* A study of hydrogen leak and explosion in different regions of a hydrogen refueling station[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48 (37) : 14112.
- [16] 余永哲. 加氢站高压氢气意外泄漏与扩散的数值模拟研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
YU Y Z. A numerical study of the accidental leakage and diffusion law of high pressure hydrogen in hydrogen refueling station [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2023.
- [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 T. Study of hydrogen leakage and dispersion in a large underground parking garage [D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [18] 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.
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.
- [19] 项玉霞. 高压欠膨胀氢气泄漏与扩散模型及试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
XIANG Y X. Leakage and diffusion model and test research of high pressure underexpanded hydrogen [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [20] BIRCH A D, BROWN D R, DODSON M G, *et al.* The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas[J]. *Combust Sci Technol* 1984;36:249.
- [21] BIRCH A D, HUGHES D J, SWAFFIELD F. Velocity decay of high pressure jets [J]. *Combust Sci Technol* 1987; 52:161.
- [22] EWAN B C R, MOODIE K. Structure and velocity measurements in underexpanded jets[J]. *Combust Sci Technol* 1986;45:275.
- [23] SCHEFER R W, HOUFF W G, WILLIAMS T C, *et al.* Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007;32: 2081.
- [24] MOLKOV V, MAKAROV D, BRAGIN M. Physics and modelling of under-expanded jets and hydrogen dispersion in atmosphere [J]. *Institute of Problems of Chemical Physics Russian Academy of Sciences*, 2009: 146. <https://www.researchgate.net/publication/285667636>.
- [25] HOUF W, SCHEFER R. Analytical and experimental investigation of small-scale unintended releases of hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(4): 1435.

- [26] PITTS W M. Effects of global density ratio on the centerline mixing behavior of axisymmetric turbulent jets [J]. *Exp Fluids* 1991, 11: 125.
- [27] GEBHART B, HILDER D S, KELLEHER M. The diffusion of turbulent buoyant jets [J]. *Advances in Heat Transfer*, 1984, 16: 1.
- [28] CHEN C, RODI W. Vertical turbulent buoyant jets—a review of experimental data [M]. Oxford: Pergamon Press; 1980.
- [29] BAINES W. D, TURNER J S. Turbulent buoyant convection from a source in a confined region [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1969, 37: 51.
- [30] DENISENKO V P, KIRILLOV I A, KOROBTSSEV S V, *et al.* Hydrogen-air explosive envelope behavior in confined space at different leak velocities [C]//Third International Conference on Hydrogen Safety, 2009. <https://conference.ing.unipi.it/ichs2009/images/stories/papers/194.pdf>.
- [31] SHU Z, LIANG W, ZHENG X, *et al.* Dispersion characteristics of hydrogen leakage: comparing the prediction model with the experiment [J]. *Energy*, 2021, 236 (14): 121420.
- [32] LI Y, HOU X, WANG C, *et al.* Modeling and analysis of hydrogen diffusion in an enclosed fuel cell vehicle with obstacles [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(9): 5745.
- [33] 焦明宇. 燃料电池卡车供氢系统氢气泄漏扩散仿真分析研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- JIAO M Y. Research on simulation analysis of hydrogen leakage and diffusion in hydrogen supply system of fuel cell truck [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [34] 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): 23882.
- [35] PATEL P, BAALISAMPANG T, ARZAGHI E, *et al.* Computational analysis of the hydrogen dispersion in semi-confined spaces [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 176: 475.
- [36] LEE J, CHO S, CHO H, *et al.* CFD modeling on natural and forced ventilation during hydrogen leaks in a pressure regulator process of a residential area [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 161:436.
- [37] HUANG T, ZHAO M, BA Q, *et al.* Modeling of hydrogen dispersion from hydrogen fuel cell vehicles in an underground parking garage [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(1): 686.
- [38] GIANNISSI S G, TOLIAS I C, MELIDEO D, *et al.* On the CFD modelling of hydrogen dispersion at low-Reynolds number release in closed facility [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(57): 29745.
- [39] CHEN M, ZHAO M, HUANG T, *et al.* Measurements of helium distributions in a scaled-down parking garage model for unintended releases from a fuel cell vehicle [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(41): 22166.
- [40] AHN H J, JUNG J H, HUR N, *et al.* The numerical simulation of hydrogen diffusion for the hydrogen leakage in tunnel [J]. *Journal of Computational Fluids Engineering*, 2010, 15(2): 47.
- [41] 刘哲恺, 梁德慧, 付乐天, 等. 基于CFD仿真的二方程湍流模型选取与风洞实验结果相关性分析 [C]// 中国汽车工程学会年会论文集. 上海: 中国汽车工程学会, 2020: 6.
- LIU Z K, LIANG D H, FU L T, *et al.* Correlational analysis between turbulence models based on CFD simulation and wind tunnel experiment results [C]// Proceedings of the Annual Conference of the Chinese Society of Automotive Engineers. Shanghai: Chinese Society of Automotive Engineers, 2020: 6.
- [42] 杨朋瑞, 王铁进. 汽车风洞流场控制方法的CFD研究 [C]// 2019年全国工业流体力学会议论文集. 北京: 中国力学学会流体力学专业委员会, 2019: 7.
- YANG P R, WANG T J. CFD research on flow field control method of automobile wind tunnel [C]// Proceedings of the 2019 National Conference on Industrial Fluid Dynamics. Beijing: Fluid Mechanics Professional Committee of the Chinese Society of Mechanics, 2019: 7.
- [43] MALAKHOV A A, AVDEENKOV A V, DU TOIT M H, *et al.* CFD simulation and experimental study of a hydrogen leak in a semi-closed space with the purpose of risk mitigation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15): 9231.