

通风系统对地下车库内氢气泄漏扩散影响的数值模拟研究

戴君豪¹, 杨石刚¹, 杨 亚², 方 秦¹

(1. 陆军工程大学国防工程学院, 南京 210007; 2. 63983 部队, 无锡 214000)

摘 要: 以地下车库和丰田 Mirai 二代车型为对象, 利用 FLACS 软件模拟地下车库内氢燃料电池汽车发生意外泄漏的情况, 研究通风方案、通风口朝向及换气次数的影响规律, 研究结果表明: 吊顶与通风系统协同作用能完全将车库内可燃气体排出, 氢气去除效率最高; 上排风的氢气去除效率高于其他通风口朝向; 当换气次数为 24 次/h, 等效化学计量云体积峰值较无通风时下降 22.5%, 可燃气体排出时间较 12 次/h 缩短 43.4%, 进一步提高换气次数对可燃气体排出效果提升有限。

关键词: 氢气; 通风; 数值模拟; 地下车库; 氢燃料电池汽车; 泄漏扩散

中图分类号: TK91

文献标志码: A

0 引 言

氢能源汽车因其环保优势和能源多样性, 正逐渐成为未来清洁能源交通的重要组成部分。地下车库在缓解地面交通压力和解决停车难题方面发挥着重要作用, 随着氢能源汽车技术的不断发展和普及, 将会有越来越多的氢能源汽车进入地下车库。然而, 氢气的易燃易爆特性使得氢气泄漏引发的安全问题也备受关注。特别是在地下车库等封闭空间中, 存在氢气积聚并引发爆炸的巨大潜在风险。因此, 在推进氢能源汽车发展的同时须改进地下车库通风和排气系统, 以确保氢气及时排出, 从而保障人员和车辆的安全。因此, 研究地下车库通风系统不同参数对氢气泄漏扩散的影响, 对于提高地下车库的安全性以及改进相关应急响应措施具有重要意义。

早期针对地下车库内通风系统的研究, 重点在于降低车库内汽车尾气所含的有毒有害气体浓度^[1-2]。然而, 伴随地下车库内火灾和爆炸事故的日益增多, 地下车库通风系统的研究方向逐渐转向排烟系统的优化设计^[3-5], 以提高排烟效率和经济性。如今, 随着氢能源汽车数量的递增, 越来越多的学者开始将目光投向氢能源汽车在地下车库的停放安全^[6-8], 以及通风系统如何应对氢能源汽车可能产生的泄漏风险^[9]。莫凡等^[9]利用 Fluent 建立带有机械通风系统的地下车库几何模型, 并探讨通风系统对氢气扩散的影响, 研究表明, 机械通风系统能够有效排除氢气, 但未进一步分析通风系统参数对氢气扩散的具体影响; 黄腾等^[8]利用 Fluent 研究了不同通风口布局对地下车库氢气浓度分布的影响, 研究结果表

明, 将通风口布置在车库角落能够更有效地降低氢气浓度, 但该研究未考虑车库顶部横梁对氢气分布的影响; 戴君豪等^[10]利用 FLACS 对带有横梁的地下车库内燃料电池汽车氢气泄漏引发的爆炸事故后果进行了深入分析, 研究结果表明, 横梁的存在会导致氢气在局部区域的聚集, 从而增加爆炸风险, 需对地下车库的结构设计和通风系统进行进一步优化。此外, 现行规范对地下车库通风系统的要求主要关注排风和排烟, 对于氢气等可燃气体的处理考虑较少。然而, 烟雾与氢气在地下车库内的扩散特性存在显著差异。氢气扩散主要受泄漏源的压力、孔径和位置的影响^[11], 扩散速度快且易在受限空间顶部积聚; 烟雾扩散受气流、温度梯度和障碍物影响^[12-13], 能见度降低且可能携带有毒物质。因此, 现行规范中对通风系统的要求是否够快速有效排除氢气泄漏产生的可燃气体云, 仍需进一步研究。

鉴于上述研究的不足, 本文利用 FLACS 对地下车库内氢气泄漏扩散进行数值模拟研究, 结合相关规范, 着重分析通风方案、通风口朝向和换气次数的影响, 以期对制定和改进地下车库通风相关规范提供科学依据, 从而更好地保障地下车库和人员的安全。

1 数值模型

1.1 湍流模型

FLACS 使用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。该模型是一个求解湍流动能及其耗散率的涡旋黏性模型, 通过求解两个独立的运输方程实现封闭^[14]:

收稿日期: 2025-02-06

基金项目: 国家重点研发计划(2020TFB20103300); 江苏省自然科学基金(BK20180081)

通信作者: 杨石刚(1985—), 男, 博士、副教授, 主要从事结构抗爆和防灾减灾方面的研究。youngshg@126.com

湍流动能 k 的运输方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \mu_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

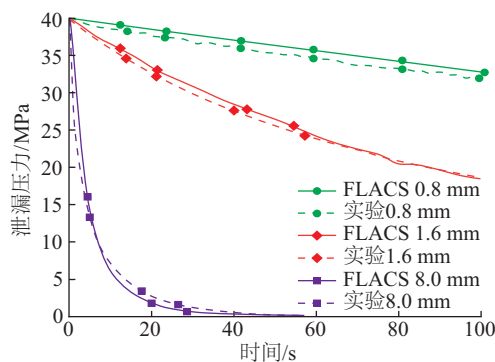
耗散率 ε 的运输方程为:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon \mu_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

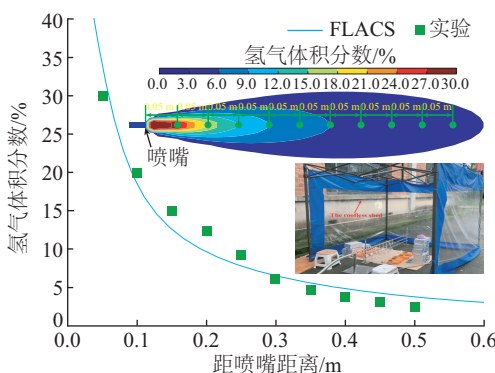
式中: μ_t ——湍流黏度; G_k ——平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项; G_b ——浮力引起的湍流动能 k 的产生项; Y_M ——湍流扩张贡献项; σ_k —— k 对应的 Prandtl 值; σ_ε —— ε 对应的 Prandtl 值; S_k 、 S_ε ——自定义源项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ ——经验常数。

1.2 模型验证

利用 Tanaka 等^[15]开展的储氢罐泄漏实验对 2.2 节参数设置中随时间更新的虚喷嘴模型进行验证。储氢罐容积为 250 L, 储氢压力 40 MPa, 泄漏孔径分别为 8.0、1.6 和 0.8 mm。如图 1a 所示, 实验测量结果与虚喷嘴模型计算结果对比误差并不大。因此, 在后续模拟计算中将使用该模型的输出结果作为输入条件, 从而简化计算过程, 提高计算效率。此外, 为验证 FLACS 软件对氢气泄漏扩散过程数值计算的准确性, 利用



a. 储氢罐内压力随时间变化



b. 沿射流中心线浓度变化

图1 氢气泄漏模型验证

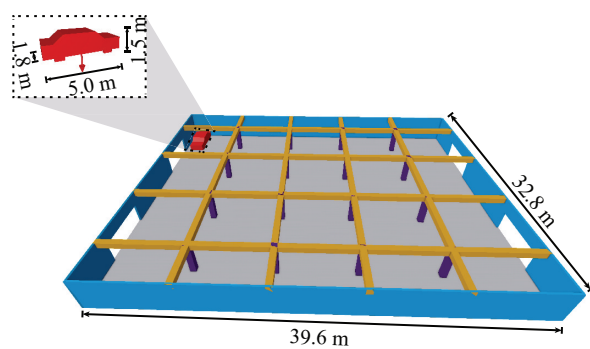
Fig. 1 Verification of hydrogen leakage model

弓亮等^[16]所做实验进行验证, 喷嘴压力为 0.5 MPa, 泄漏孔径为 2 mm, 数值计算结果与实验结果对比见图 1b, 二者吻合较好, 验证了 FLACS 软件的有效性。

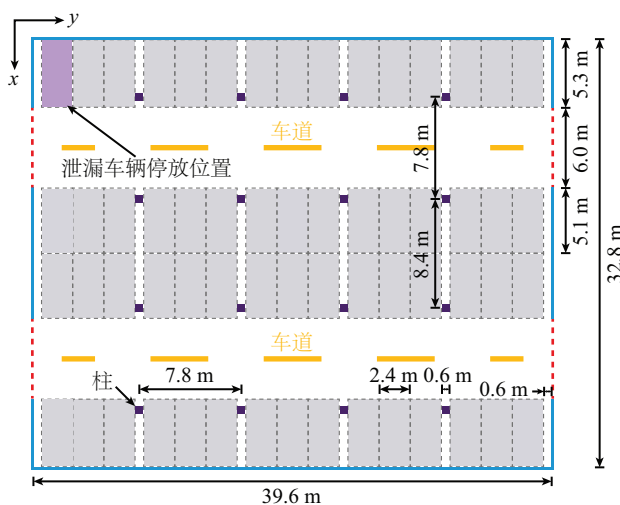
2 几何模型与网格划分

2.1 几何模型

地下车库及车辆的几何模型如图 2a 所示。车库模型依据 JGJ 100—2015《汽车库建筑设计规范》^[17]进行设计, 车辆模型则参照丰田 Mirai 二代车型的尺寸, 地下车库平面布局如图 2b 所示。在之前的研究中发现, 当氢燃料电池汽车停放在车库角落时, 氢气容易在角落处聚集且难以消散, 从而增加了燃爆风险^[10]。因此, 在分析通风系统的影响时, 重点考虑氢燃料电池汽车停放在车库角落位置的情境。



a. 地下车库及泄漏车辆几何模型



b. 地下车库平面布局

图2 地下车库几何模型与车库平面布局

Fig. 2 Geometric model and floor plan of underground parking garage

2.2 参数设置

考虑单个储氢容积为 64 L、储氢压力为 70 MPa 的储氢罐发生意外泄漏的情况, 泄漏孔径设置为 5 mm, 氢气温度设置为 15 °C。大气压设置为 0.1 MPa, 大气温度设置为 20 °C, 为合理简化数值模拟并减少计算时间, 本文选用虚喷嘴模型

对欠膨胀射流进行简化,将其等效为具有相同质量流量从“虚喷嘴”处发生的低压泄漏过程,以更好地关注高压氢气泄漏后气云的宏观变化。根据 FLACS 用户手册的建议,使用“Ewan-Moodie”虚喷嘴模型,并选用 Abel-Noble 真实气体状态方程代替理想气体状态方程,泄漏速率设置为沿时间变化,流量系数设置为 0.85。当储氢罐内压力降至大气压时,泄漏终止。由虚喷嘴模型计算得到的泄漏时间为 25.5 s,扩散过程时长设置为 200 s,以充分体现可燃气云从初始泄漏状态逐步发展至稳定扩散状态的全过程。通风口类型设置为 suction,可燃气云将经由通风口被抽离车库。通风口风速由式(3)计算得出^[18]:

$$V = \frac{Q}{n \cdot S \cdot 3600 \cdot k} \quad (3)$$

式中: V ——通风口风速, m/s; Q ——地下车库总体通风量, m³/h; n ——排风口数量; S ——通风口面积, m²; k ——折减系数,百叶窗取 0.8。

2.3 网格划分及无关性验证

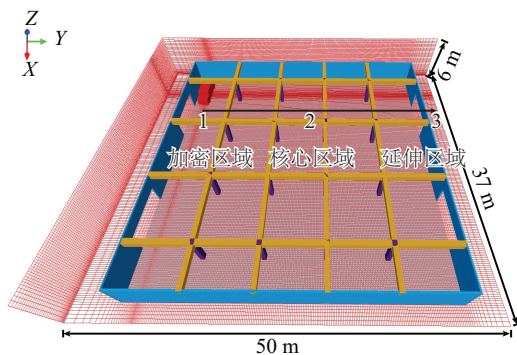
在 FLACS 用户手册中^[14], V_{Q8} 和 V_{Q9} 被定义为真实气云等效化学计量比的可燃气云体积,单位为 m³,是用来定量评价气体泄漏危险性的重要参数。对于通风情况良好的场景,可用 V_{Q9} 表示空间内的等效化学计量云体积;而对于地下车库此类受限空间,使用 V_{Q8} 表示空间内的等效化学计量云体积,能够更好地反映受限空间内潜在的爆炸风险程度。

等效化学计量云体积(V_{Q8})可由式(4)计算得出:

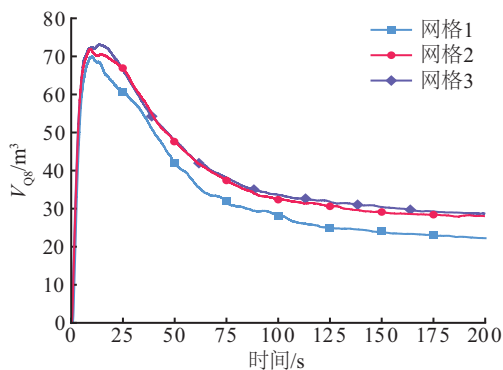
$$V_{Q8} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i (V_e(\phi_i) - 1)}{\max[(V_e(\phi) - 1): \phi_{LFL} \leq \phi \leq \phi_{UFL}]} \quad (4)$$

式中: V_i ——控制体积中对流体流动开放的体积, m³; ϕ ——等效当量比; ϕ_{LFL} ——可燃下限的等效当量比; ϕ_{UFL} ——可燃上限的等效当量比。

为消除网格尺寸对氢气泄漏扩散结果的影响,在进行网格划分前需进行网格无关性验证。以无通风工况为例,图 3a 显示了用于模拟泄漏扩散的网格划分,将整个计算区域分为加密区域、核心区域和延伸区域。车库内划分为核心区域,采用均匀网格,并对泄漏孔附近进行局部加密。车库外划分



a. 网格划分



b. 网格数量对 V_{Q8} 的影响

图3 网格划分与无关性验证

Fig. 3 Mesh generation and independence verification

为延伸区域,网格按照 1.25 倍比例扩大的形式进行延伸,以减少计算时间。不同网格参数如表 1 所示,由此计算得到的等效化学计量气云体积如图 3b 所示。可看出,网格数量的进一步增加对模拟结果的影响较小。综合考虑计算精度和计算效率,选择网格 2 进行泄漏扩散模拟。

表1 网格参数

Table 1 Mesh parameters

网格	核心区域 网格尺寸/m	加密区域 网格尺寸/m	网格数量/ 10 ⁴
1	0.40	0.20	45
2	0.20	0.10	126
3	0.15	0.08	236

2.4 工况设置

表 2 总结了本文模拟的工况,用以分析通风管道布局、通风口朝向以及换气次数的影响。工况 1 为无通风系统的泄漏场景。工况 2~5 中设置了 4 种不同的通风方案,并在车库右下角处布置了机械补风口,每条通风管道均匀布置 5 个通风口,均位于梁窝中心位置,如图 4a 所示。其中方案 1 在车库中央区域上方设置通风管,方案 2 在车库通道中央区域上方设置通风管,方案 3 在车库车位上方横梁间均设置通风管。在部分高档住宅及商场的地下车库中,增设吊顶已成为提升空间品质的常见做法。方案 4 在方案 3 的基础上,在车库通道上方设置吊顶,以分析通风系统和吊顶协同作用的影响。实际施工中通常将风口位置布置在风管两侧、风管下方、风管上方和风管顶部两侧,如图 4b 所示。在方案 4 的基础上,工况 5~8 分析了不同通风口朝向的影响。对于向上和向下通风,每个通风口尺寸为 0.6 m×0.6 m,对于侧排风和顶部侧排风,两侧通风口尺寸为 0.6 m×0.3 m。根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736—2012)^[19],对于可能突然释放有害或易燃气体的场所,换气次数不得低于

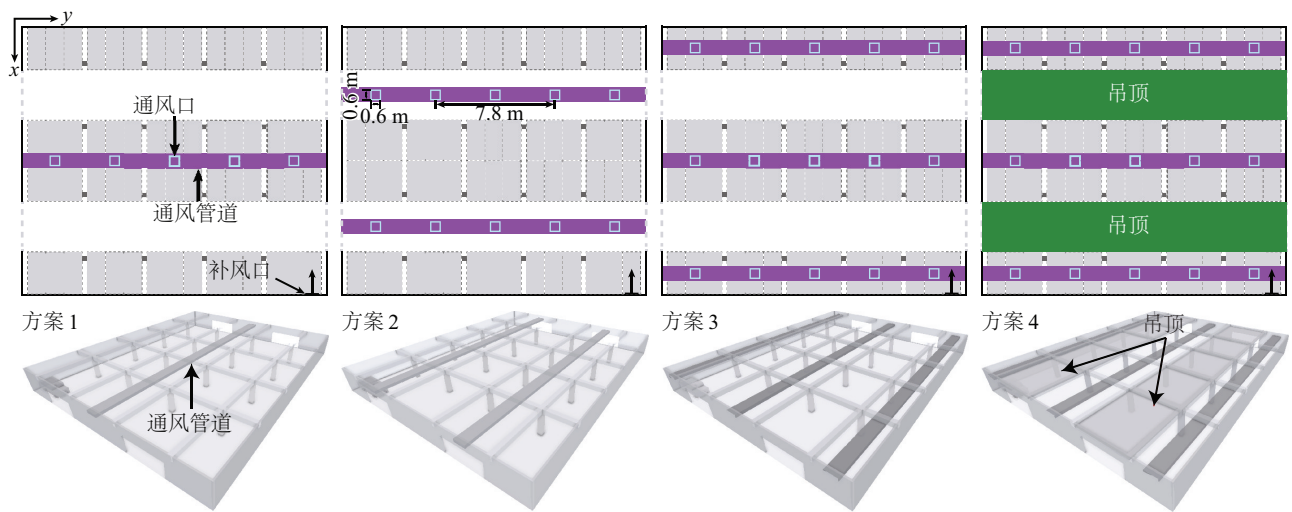
12 次/h。因此,工况 5 和工况 9、10 对比了换气次数分别为 12、24 和 36 次/h 的场景,以分析是否需进一步增大事故通风量。所有工况均假设通风系统与可燃气体监测报警系统联动,氢气泄漏后通风系统迅速启动。

表 2 模拟工况

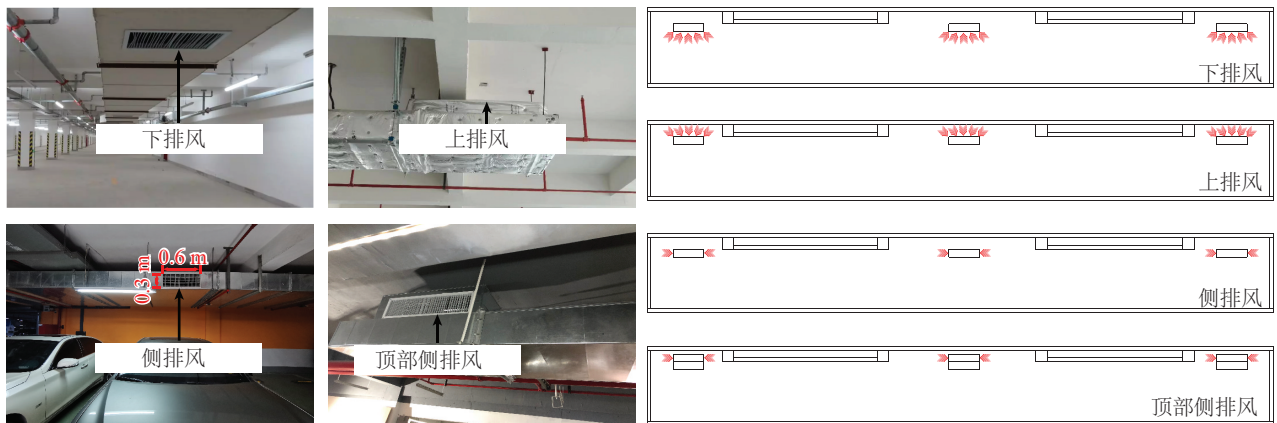
Table 2 Simulation conditions

工况	有无通风	通风方案	通风口朝向	换气次数/(次/h)	通风量/(m ³ /h)	通风口数量	通风口速度/(m/s)
1	无						
2	有	1	上排风	12	47520	5	9.2
3	有	2	上排风	12	47520	10	4.6
4	有	3	上排风	12	47520	15	3.1
5	有	4	上排风	12	47520	15	3.1
6	有	4	下排风	12	47520	15	3.1
7	有	4	侧排风	12	47520	15	3.1
8	有	4	顶部侧排风	12	47520	15	3.1
9	有	4	上排风	24	95040	15	6.1
10	有	4	上排风	36	142560	15	9.2

注:当层高<3 m 时,按实际高度计算换气体积;当层高≥3 m 时,按 3 m 有效层高计算通风量^[19]。



a. 不同通风方案



b. 不同通风口朝向

图 4 不同通风方案与通风口朝向

Fig. 4 Different ventilation schemes and vent orientations

3 无通风下氢气泄漏扩散过程

图5展示了地下车库内无通风系统时的氢气扩散过程。在动量主导阶段,高压氢气具有很高的动能,在撞击地面后会在泄漏源附近形成一个较高浓度的核心区域,并开始沿地面向四周扩散。在动量和浮力共同主导阶段,一部分氢气受到车库墙壁阻挡后向车库顶部扩散,使得靠近墙壁区域的氢气浓度迅速升高。另一部分氢气在动量和浮力共同作用下沿地面向周围空旷区域扩散,并与周围的空气混合形成可燃燃气云。在混合过程中,可燃燃气云的浓度分布并不均匀,在动量主导区域,氢气浓度较高,而在浮力主导区域,氢气浓度较低。随着动量的逐渐消失,可燃燃气云的扩散最终进入浮力主导阶段,并向车库顶部扩散。由于车库顶部横梁的阻碍,可燃燃气云开始在横梁间聚集,其扩散速度受到明显减缓,并形成显著的浓度梯度。当可燃燃气云厚度超过横梁高度时,超出部分气云将绕过横梁继续向上扩散,并逐渐被周围空气稀释。随着时间的推移,可燃燃气云厚度逐渐与横梁高度趋于一致,不同横梁间的浓度差异变大(泄漏车辆上方的横梁间的浓度显著大于周围横梁间浓度)。总体而言,横梁的存在致使车库顶部可燃燃气云的浓度分布呈现出均匀的态势。倘若无法将横梁间气云有效排出,爆炸的风险将会持续存在。因此,必须采取有效的通风举措来规避此类情况的出现。

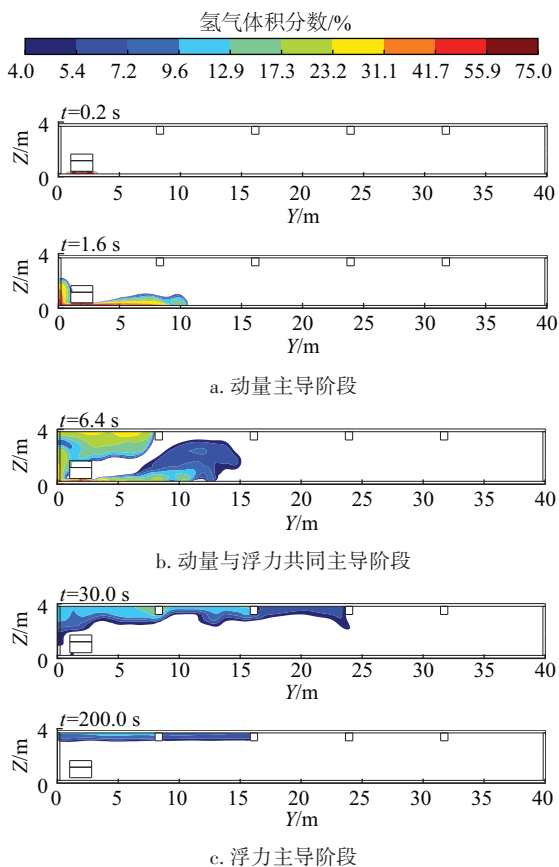


图5 可燃燃气云扩散过程

Fig. 5 Dispersion process of flammable gas cloud

4 通风系统影响因素分析

4.1 通风方案

图6a展示了不同通风方案对车库顶部最大可燃燃气云面积的影响。最大可燃燃气云面积为可燃燃气云在其运动和扩散过程中所涉及到的最大区域。在无通风的情况下,最大可燃燃气云面积高达 352.1 m^2 ,表明缺乏通风措施会导致可燃燃气云大量积聚,存在极大的安全隐患。随着方案1~3中通风管道数量的增加以及均匀布置,气流分布的均匀性增强,对可燃燃气云的排出效果更为显著。在方案4中,通过安装吊顶增加物理阻隔和优化气流组织,通风效率进一步提高。可燃燃气云面积减至 171.4 m^2 ,降幅达 51.3%,有效提高了车库内的安全性。

图6b展示了无通风及不同通风方案下 V_{08} 的时间变化曲线。在无通风的情况下, V_{08} 峰值高达 72.4 m^3 ,随着通风方案的改进, V_{08} 峰值逐渐降低。方案3和方案4的 V_{08} 峰值均下降至 60.4 m^3 (降幅约为 20%),表明通风管道数量的增加和合理布置有助于减少可燃燃气云的积聚。在泄漏约 75 s 后,无通风情况下的 V_{08} 曲线下降趋势极为缓慢,反映出可燃燃气云的自然扩散和消散过程非常微弱且效率极低。方案1~3的 V_{08} 曲线有轻微的下陷趋势,但斜率较小,说明可燃燃气云受横梁阻挡,排出仍较缓慢。方案4的 V_{08} 曲线在 75 s 后继续较为明显地下滑,并在 106.2 s 时降至 0。这表明,通过合理布设通风管道并安装吊顶结构,减少了横梁下方的气流涡旋和低速区域,增强了对可燃燃气云的引导作用,使其能够沿着预定的气流路径更有效地排出,体现出该方案在泄漏终止后对可燃燃气云的排出具有更强的持续性和彻底性。

泄漏 200 s 后,无通风以及不同通风方案下的可燃燃气云浓度分布如图6c所示。与无通风管道的泄漏场景相比,设置通风管道的方案可显著缩小可燃燃气云范围,且通风方案的不同对可燃燃气云的分布产生了显著影响。对于方案1,其所能影响的范围有限,仅通风口上方的可燃燃气云被有效排出,仍有较多可燃燃气云聚集在横梁区域。在方案2中,可燃燃气云的分布范围有所减小,浓度也有所降低,但在角落处仍存在一定程度的聚集。方案3进一步优化了通风管道的分布,仅在通风管道间的一处横梁间有少量聚集。而方案4展现了最优的排放效果,实现了可燃燃气云的完全排出。因此,在设计通风方案时,不仅需考虑初期快速排出可燃燃气云以降低风险,更需关注在较长时间范围内维持稳定有效的排出效果,确保车库内可燃燃气云能够被持续、充分地清除。

引入氢气去除效率作为定量标准以评估不同通风方案的优劣,其定义如式(5)所示。

$$\varphi = \frac{v_0 - v_i}{v_0} \quad (5)$$

式中: v_0 ——车库内通风系统未启动时的可燃燃气云体积, m^3 ; v_i ——不同通风条件下可燃燃气云体积, m^3 。

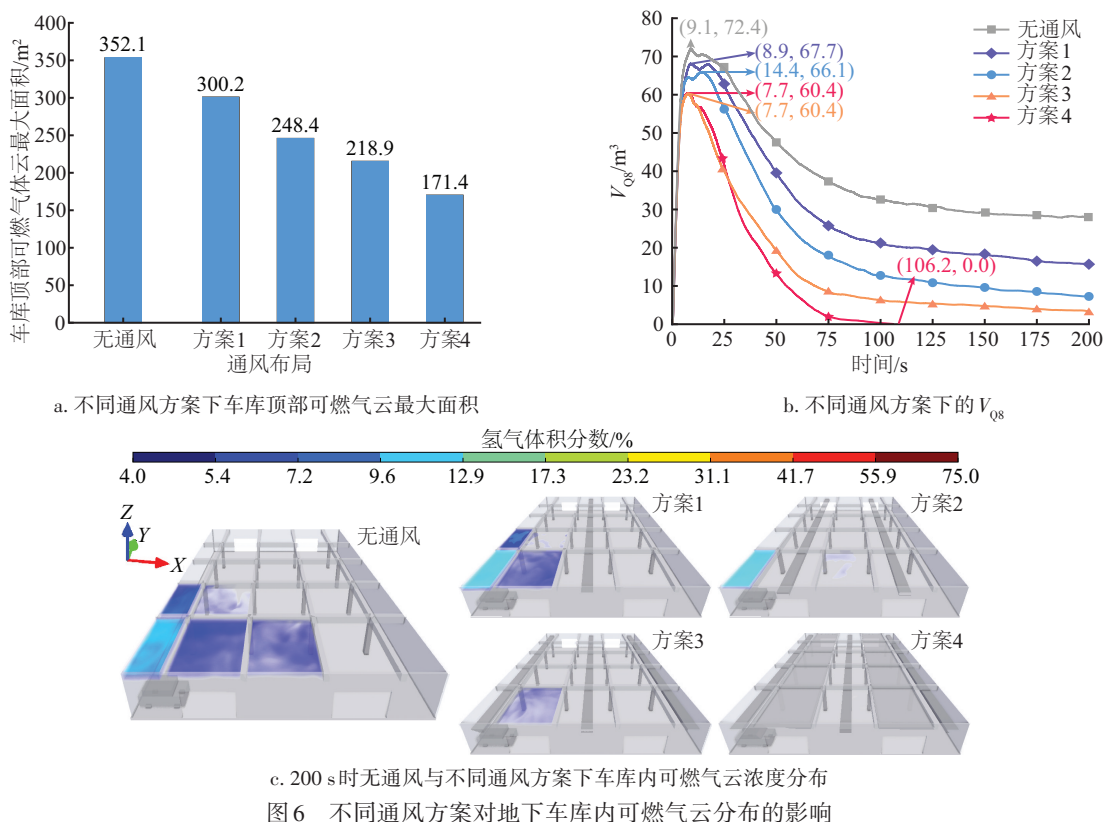


Fig. 6 Effect of different ventilation schemes on flammable gas cloud distribution in underground parking garage

图 7 呈现了不同通风方案下氢气去除效率随时间变化曲线,方案 1 在初始阶段效率较低,随着时间推移,其增长较为缓慢。表明一条通风管道的布局在排出可燃燃气云方面能力有限,效率提升较为困难。方案 2 的效率增长速度相对较快,这表明两条通风管道均匀布置的方案在提升氢气去除效率方面有一定优势。方案 3 在初始阶段的可燃燃气云去除效率显著高于方案 1 和方案 2。这说明 3 条通风管道均匀布置极大地增强了通风系统的效能,可燃燃气云的排出速度加快。然而,氢气去除效率在后期增长趋势变缓,反映出该方案所产生的气流模式在后期无法有效排出横梁间的可燃燃气云。方

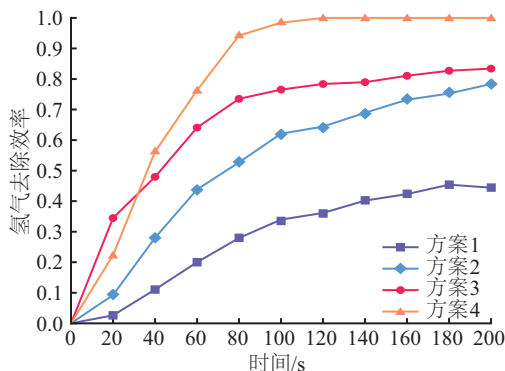


图 7 不同通风方案下氢气去除效率随时间的变化

Fig. 7 Hydrogen removal efficiency for different ventilation schemes over time

案 4 与方案 3 在初始阶段效率相近,但在初始阶段呈现出更为陡峭的上升趋势,且率先清除了车库内所有可燃燃气云。凸显了合理的方案对于提高氢气去除效率的重要性。

4.2 通风口朝向

通风口的朝向直接决定了气流的流动路径和波及范围,从而影响地下车库氢气排出的效率与效果。不同通风口朝向影响下的可燃燃气云速度矢量分布如图 8 所示。当通风口朝上时,产生的吸力会在车库顶部形成较强的抽吸作用,促使气流向上流动,将上方及周边区域的可燃燃气云快速排出车库。下排风则主要作用于车库底部,对靠近地面的气流和可燃燃气云产生直接影响。它能够有效清除积聚在底部的气体,但对于上方和水平方向较远位置的可燃燃气云,其抽吸效果相对有限。侧排风会在水平方向产生较强的气流运动,这有利于快速抽吸通风管道两侧区域的可燃燃气云,形成较为快速的侧向流动。但对于垂直方向上的可燃燃气云,其直接作用较弱。顶部侧排风形成的气流兼具向上和向两侧的特点。这种复合气流能在垂直和水平方向上同时发挥作用,特别是对于车库顶部的可燃燃气云。

不同通风口朝向下的 V_{Q8} 曲线和氢气去除效率随时间的变化过程如图 9 所示。不同通风口朝向的 V_{Q8} 峰值相较于无通风状况呈现出显著的下落态势,但不同通风口朝向之间的 V_{Q8} 峰值差距相对较小,说明在可燃燃气云快速发展阶段,不同

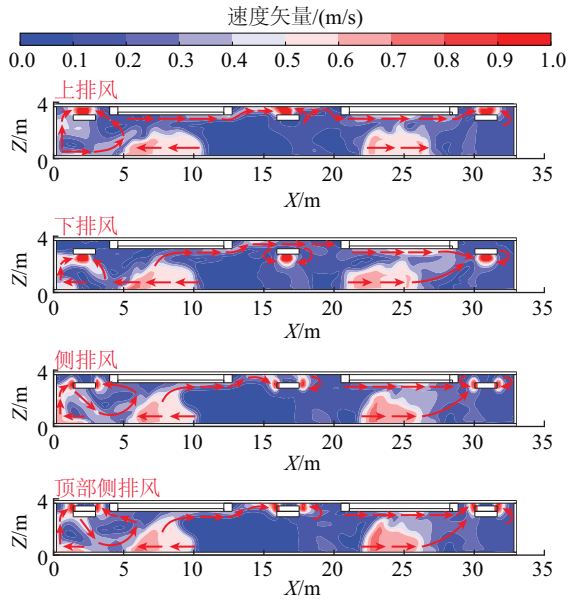
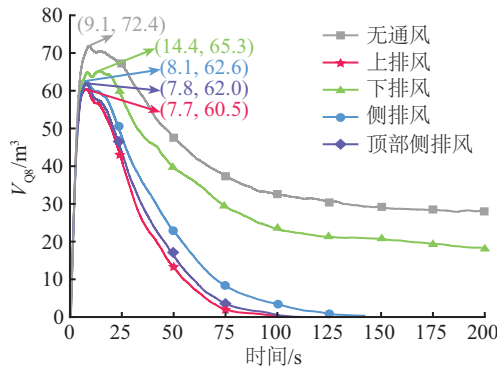
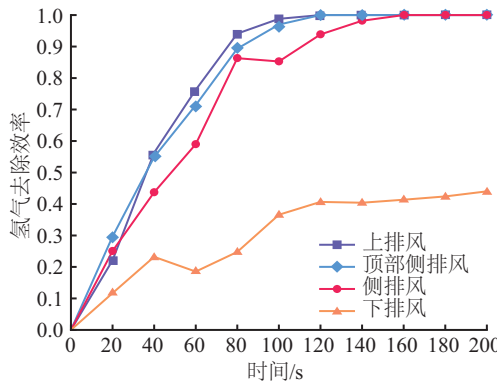


图8 不同通风口朝向对速度矢量的影响

Fig. 8 Effect of different vent orientations on velocity vectors

a. 不同通风口朝向下 V_{Q8} 

b. 不同通风口朝向下氢气去除效率随时间的变化

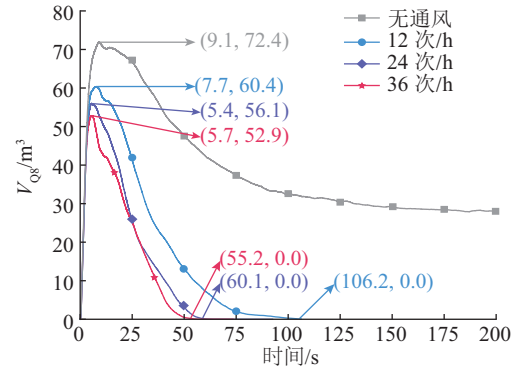
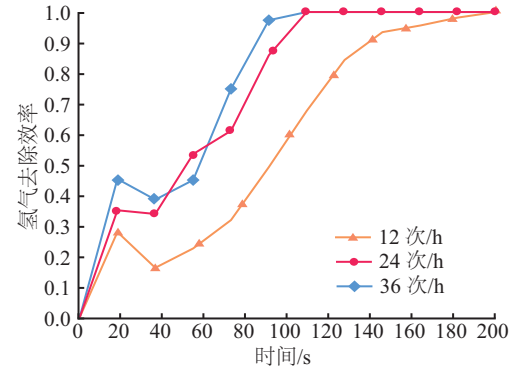
图9 不同通风口朝向对 V_{Q8} 和氢气去除效率的影响Fig. 9 Effect of different vent orientations on V_{Q8} and hydrogen removal efficiency

通风口朝向排出氢气的效果虽有差异,但并非十分显著。在泄漏后期,通风口朝向的差异显著影响了可燃气云的动态变

化。下排风在一定程度上降低了车库内的可燃气云体积,但其无法将可燃气云完全排出车库。所以,下排风的氢气去除效率曲线上升较为平缓,200 s 时的氢气去除效率最低,仅为 0.44。其余 3 种位置均能完全排出车库内可燃气云,氢气去除效率曲线也呈现出较为陡峭的上升趋势。其中,上排风用时最短,且与其他通风口位置的氢气去除效率曲线对比中,明显高于其他位置。综上,上排风在这 4 种通风口朝向中,对于车库内气流和可燃气云的排出表现最为出色。

4.3 换气次数

不同换气次数下 V_{Q8} 随时间的趋势如图 10a 所示。随着换气次数的增加, V_{Q8} 峰值逐渐降低。换气次数分别为 12、24 和 36 次/h 时, V_{Q8} 峰值较无通风时分别下降 16.6%、22.5% 和 26.9%。当换气次数从 12 次/h 增至 24 次/h, V_{Q8} 曲线降至 0 的时间缩短 43.4%;而当换气次数进一步提高到 36 次/h 时, V_{Q8} 曲线降至 0 的时间仅缩短 8.2%。说明换气次数的增加显著提高了对可燃气云的驱散和排出能力,但持续增加换气次数,对通风效果的提升有限。通过对图 10b 中氢气去除效率曲线的分析也能印证这一点,换气次数为 24 和 36 次/h 的氢气去除效率曲线呈现出较为相近的走势和数值分布。需要注意的是,随着换气次数的不断增加,将出现一些负面效应,如能耗的急剧增加、噪音水平的升高以及对通风设备的更高

a. 不同换气次数下的 V_{Q8} 

b. 不同换气次数下氢气去除效率随时间的变化

图10 不同换气次数对 V_{Q8} 和氢气去除效率的影响Fig. 10 Effect of different air change rates on V_{Q8} and hydrogen removal efficiency

要求。因此,大幅提高换气次数在实际应用中并非总是最优的选择。规范中指出对可能突然释放有害或易燃气体的场所中,换气次数不得低于 12 次/h,但从安全性、气体稀释效果等角度考量,将地下车库通风量提升至 24 次/h 能更好地降低地下车库的燃爆风险。

5 结 论

本文利用 FLACS 软件对地下车库内氢气泄漏事故进行数值模拟,揭示氢气在车库角落位置的扩散规律,分析不同通风管道布局、通风口朝向和换气次数的除氢效率,以及对可燃气体云范围和体积的影响。主要结论如下:

1) 地下车库通风系统未开启时,氢气泄漏后受车库墙壁阻挡向顶部扩散,又因横梁阻碍在横梁间聚集,需采取有效通风举措来降低爆炸风险。

2) 通过均匀布置通风管道,可显著提升氢气去除效率。吊顶结构与通风管道协同设计方案,能将车库内可燃气体云完全排出,可燃气体云面积降幅达 51.3%, V_{08} 峰值下降约 20%。

3) 上排风、侧排风以及顶部侧排风均可将可燃气体云完全排出,其中上排风用时最短,氢气去除效率最高。而下排风无法完全排出可燃气体云,200 s 时通风效率仅为 0.44,氢气去除效率最低。

4) 随着换气次数增加, V_{08} 峰值逐渐降低。换气次数为 24 次/h, V_{08} 峰值较无通风时下降 22.5%,可燃气体云排出时间较通风量为 12 次/h 缩短 43.4%,但进一步增加换气次数,对可燃气体云排出效果提升有限。

[参考文献]

- [1] NIRVAN G, HAGHIGHAT F, WANG L, et al. Contaminant transport through the garage: house interface leakage [J]. *Building and environment*, 2012, 56: 176-183.
- [2] GIL-LOPEZ T, SANCHEZ-SANCHEZ A, GIMENEZ-MOLINA C. Energy, environmental and economic analysis of the ventilation system of enclosed parking garages: discrepancies with the current regulations [J]. *Applied energy*, 2014, 113: 622-630.
- [3] WANG H L, WANG Z C, XUE Y, et al. Experimental investigation and numerical modeling for induction fans [J]. *Journal of building engineering*, 2023, 69: 106201.
- [4] 张亚琴, 孙亮亮, 袁艳平, 等. 基于烟囱效应的 PVT 降温/地下空间通风复合系统特性研究 [J]. *太阳能学报*, 2019, 40(12): 3372-3380.
ZHANG Y Q, SUN L L, YUAN Y P, et al. Composite system characteristics research of PVT cooling/underground space ventilation based on stack effect [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2019, 40(12): 3372-3380.
- [5] 姚丽萍, 陈震寰, 李明生, 等. 太阳能烟囱强化地下空间自然通风特性的研究 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(6):

184-190.

- YAO L P, CHEN Z H, LI M S, et al. Study on characteristics of natural ventilation strengthened by solar chimney in underground space [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(6): 184-190.
- [6] LYU H, HU Y Q, SHEN Y H, et al. Numerical study of hydrogen leakage, diffusion and explosion in the parking garage under closed and natural ventilation conditions [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2024, 83: 210-225.
- [7] 王桂芸, 胡辰树, 刘光辉, 等. 车库内不同车型燃料电池汽车氢泄漏仿真模拟 [J]. *太阳能学报*, 2024, 45(10): 48-53.
WANG G Y, HU C S, LIU G H, et al. Numerical simulation of hydrogen leaking from fuel cell vehicles of different types in garage [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(10): 48-53.
- [8] HUANG T, ZHAO M B, BA Q X, 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): 686-696.
- [9] MO F, LIU B, WANG H R, et al. Study on hydrogen dispersion in confined space with complex air supply and exhaust system [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2022, 47(67): 29131-29147.
- [10] DAI J H, YANG S G, YANG Y, et al. Research on the consequences of hydrogen leakage and explosion accidents of fuel cell vehicles in underground parking garages [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2024, 77: 1296-1306.
- [11] YANG N N, DENG J, WANG C P, et al. High pressure hydrogen leakage diffusion: research progress [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2024, 50: 1029-1046.
- [12] QIAN C H, DING H Y, XIE J H, et al. A review on the transport law and control method of fire smoke from energy storage system in tunnels [J]. *Journal of energy storage*, 2023, 73: 108929.
- [13] CHEN J F, LIU J J, TIAN X L, et al. Study on the effect of obstacles on smoke diffusion and airflow structure in subway stations [J]. *Building and environment*, 2023, 242: 110553.
- [14] FLACS-CFD v22.2 User's Manual [EB/OL]. https://www3.gexcon.com/files/packages/flacs-users-manual-26.1.pdf?_gl=1*tfllj*_gcl_au*MTgwNTkxMjYzMy4xNzc5NDUwNTkx.
- [15] TANAKA T, AZUMA T, EVANS J A, et al. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2007, 32(13): 2162-2170.
- [16] GONG L, YANG S N, HAN Y F, et al. Experimental

- investigation on the dispersion characteristics and concentration distribution of unignited low-temperature hydrogen release [J]. Process safety and environmental protection, 2022, 160: 676-682.
- [17] JGJ 100—2015, 汽车库建筑设计规范[S].
- JGJ 100—2025, Code for design garage buildings[S].
- [18] 王汉青. 通风工程[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2018: 227-228.
- WANG H Q. Ventilation works [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2018: 227-228.
- [19] GB 50736—2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].
- GB 50736—2012, Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings[S].

NUMERICAL SIMULATION OF VENTILATION SYSTEM EFFECTS ON HYDROGEN LEAKAGE AND DISPERSION IN UNDERGROUND PARKING GARAGE

Dai Junhao¹, Yang Shigang¹, Yang Ya², Fang Qin¹

(1. National Defense College of Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

2. 63983 Troop of PLA, Wuxi 214000, China)

Abstract: This study employed FLACS software to simulate hydrogen leakage scenarios involving a Toyota Mirai Gen II fuel cell vehicle in underground parking garages, to systematically investigate the impacts of ventilation scheme, vent orientation, and ventilation rate. Results indicate that the combined action of the suspended ceiling and ventilation system completely removes the flammable gas clouds, achieving the highest hydrogen removal efficiency. Upward-exhaust ventilation is more effective than other orientations. At a ventilation rate of 24 air changes per hour (ACH), the peak equivalent stoichiometric cloud volume is 22.5% lower than that for no ventilation, and the cloud removal time is 43.4% shorter than that at 12 ACH. Further increases in ventilation rate provide limited enhancement in flammable cloud evacuation efficiency.

Keywords: hydrogen; ventilation; numerical simulation; underground parking garage; hydrogen fuel cell vehicle; leakage and dispersion