

燃料电池车辆前舱氢泄漏安全研究

李青曼¹ 刘峰² 王鹤天² 施俊² 胡淇超² 梁晓燕¹

1. 上海捷氢科技股份有限公司；2. 上海嘉定区消防救援支队

摘要：当燃料电池乘用车车辆发生氢泄漏时，由于其涉氢空间较小，氢气聚集后易达到爆燃体积浓度。为评估燃料电池乘用车的氢泄漏安全性，本文针对某燃料电池MPV车型进行了前舱的氢泄漏试验，采集了测点的氢浓度，并建立了CFD氢泄漏仿真模型。结果表明，采用CFD稳态仿真的氢浓度结果与试验一致，且随着氢泄漏量的增大，无法完全逸散而累积在空间内的氢气越多。空间内的最大氢气浓度与氢泄漏量呈线性关系，可推断针对本文的MPV车型，其前舱内的安全极限泄漏量约11 L/min，否则其前舱内累积的氢浓度会有爆燃风险。分析还得到前舱内氢浓度主要分布于2/3以上的高度内，在此布置逸散口的效果更好。以上分析结果可以为燃料电池车辆的爆燃防控设计提供参考。

关键词：燃料电池乘用车；氢泄漏；氢安全；数值模拟

0 前言

21世纪，氢能进入快速发展阶段，以氢气作为能源载体的燃料电池车近几年，加速了从科研到商业化的转变。目前，燃料电池在重卡、轻卡物流车、叉车等商用车领域的应用有较快的增长。随着氢能产业链的完善、基础建设的发展及成本的下降等，未来燃料电池也可能在乘用车推广应用，目前上海曾尝试投放燃料电池网约车，多家车企也曾推出过燃料电池乘用车样车。

在燃料电池车市场应用推广的同时，氢的安全使用不可忽视。氢气的密度小，易扩散，在储存和使用时容易泄漏。同时，氢气点燃后燃烧速度快，能量大，易产生爆炸事故，氢气的爆炸体积浓度范围很宽，为4% vol ~ 75% vol，也有一些文章对车载用氢的安全控制方面开展了研究。由于目前燃料电池的应用车型是以重卡、客车等商用车为主，有不少文章针对商用车等大型车辆进行了氢气的泄漏和扩散研究，提出了一定的氢安全设计指导。但相比于大型车辆，乘用车的空间较小，涉氢部件空间占比较大，其前舱、乘员舱底部、行李箱空间都有分布，若发生氢气的泄漏，在狭小空间内容易发生聚集使氢气达到爆燃浓度。故燃料电池车用车的涉氢空间需要有更好的氢气疏散设计。

本文以某燃料电池MPV为研究对象，对其前舱空间内的泄漏疏散安全性开展试验及仿真研究。

1 氢泄漏试验

以某MPV车型为试验对象，测试氢气在空间内泄漏后的聚集浓度状态。此车型的燃料电池系统位于前舱，系统的大部分氢气管路均位于前舱底部或者后方，泄漏点易发生在管路接口处，故本试验选在前舱底部管路聚集处设置氢泄漏点，泄漏口直径为4 mm，调节设备压力使排氢流量达到0.6 L/min，模拟实际中的泄漏状态。

氢气的密度比空气小，在1个标准大气压下，氢气的密度为0.0899 g/L，泄漏的氢气会向空间的上方逸散并聚集，故选择在前舱空间上方布置氢浓度传感器，可以测试到空间中最大的氢气浓度，传感器布点如图1



图1 前舱氢浓度传感器布点示意

基金项目：消防救援局科技计划项目（2022XFZD09）

所示。从排氢开始的时刻,用浓度传感器实时记录测试点的氢浓度变化,采样时间间隔为1 s。

各测点的浓度变化如图2所示,排氢约20 s后,各个测试点的氢浓度快速达到峰值,在随后的300 s内存在波动,但平均值基本不变,可认为舱内的浓度分布达到平衡。其中测试点3和4的浓度基本相同,平均浓度约0.6% vol,测试点2的平均浓度约0.5% vol,测试点1平均浓度约0.3% vol。

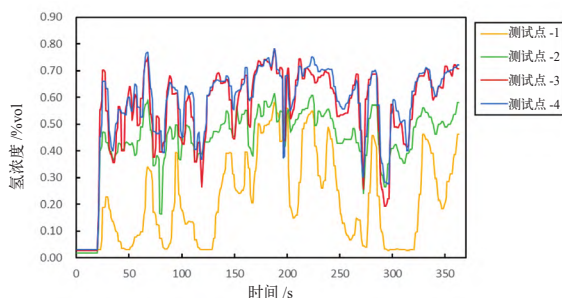


图2 氢浓度传感器采集数据

2 仿真建模

本文根据以上试验对象和测试条件建立氢气浓度分布CFD仿真模型,通过仿真进行试验对标,校正模型仿真准确性,为车辆氢安全评估及设计提供指导。

2.1 几何模型

如3图所示,燃料电池系统位于前舱空间内,空间坐标的 X 轴平行于车辆行驶方向, X 轴负向为车辆行驶方向, Y 轴平行于车身左右方向, Z 轴为竖直方向。

建模时需要对几何数模进行处理。提取前舱的内部壁面作为包络边界,省略前舱内的一些小型零件,比如线束、传感器等。燃料电池系统中结构复杂的零件需要进行简化处理,使表面平滑,这样便于后续网格的划分。

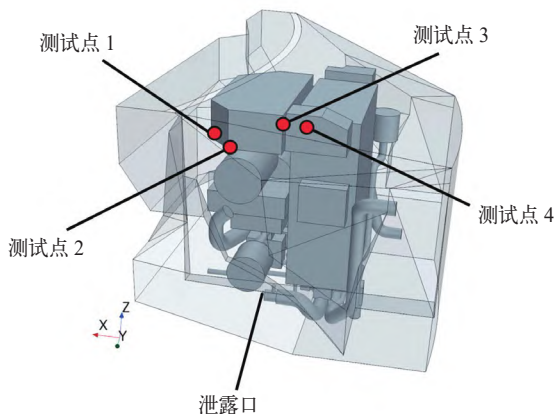


图3 前舱及燃料电池系统几何模型

2.2 网格模型

采用多面体网格进行划分,对泄露口出口处的网格进行加密。计算域内生成网格约185万个。生成的网格如图4所示。

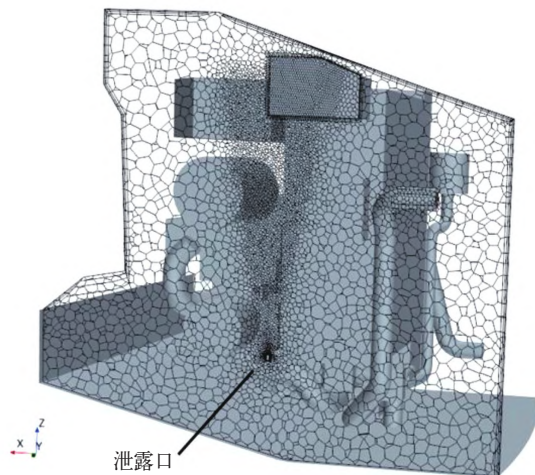


图4 网格剖面示意

2.3 仿真条件

采用CFD软件进行氢气泄漏扩散的模拟分析,设置条件如下:

- (1) 采用多组分模型,设置氢气与空气混合气体。
- (2) 氢气泄漏时为射流状态,气体急速膨胀,属于可压缩流动,气体密度变换遵循理想气体状态方程。
- (3) 湍流模型采用适合计算复杂射流和混合流的Realizable $k-\epsilon$ 模型。
- (4) 考虑重力影响,方向沿 Z 轴竖直向下,参考密度为空气密度1.29 g/L。
- (5) 泄露口处设置质量流量入口条件,泄漏方向竖直向上。
- (6) 由于试验时传感器布线使前舱盖有缝隙,故舱盖边缘设置为大气边界,表压为0 Pa。
- (7) 前舱下方非密闭区域,与外界连通,设置为大气边界,表压为0 Pa。
- (8) 初始状态下计算域内仅有空气。
- (9) 在仿真模型中,设置与试验对应的4个测试点,对氢气的浓度进行监测,浓度的单位为% vol。
- (10) 采用稳态进行计算,迭代至1000步,4个测试点的氢浓度数据开始稳定,认为计算达到收敛。

3 模拟结果

3.1 测试点氢浓度验证

计算达到稳定后,测试点3位置的浓度最高,接

近 0.55% vol, 其余 3 个测试点浓度基本相同接近 0.5% vol。测试点 3 与泄漏点处的距离最近, 故浓度分布最高, 与其余几个测点存在浓度梯度。除测试点 1 外, 其余 3 个测点的浓度与仿真值基本相同。另外, 以上仿真采用稳态求解, 虽不体现浓度随时间波动变化特点, 但对于稳态平均浓度的预测有一定准确度, 可对氢安全的设计提供参考, 如图 5 所示。

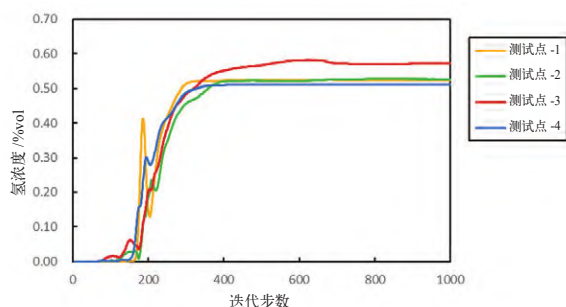


图5 测点氢浓度仿真收敛曲线

3.2 氢气浓度分布

泄漏初期, 氢气来不及向外界逸出, 空间内氢气泄漏量大于逸出量, 从而使空间内的氢气积累, 浓度升高; 当泄漏量与逸出量达到平衡, 空间中的氢气浓度也达到稳定不再上升。由于半开放空间内的氢浓度在泄漏一段时间后不再随时间变化, 故本文可采用稳态计算的方法得到最终的浓度分布图。如图 6 所示, 从浓度体积分布云图中可以看出, 稳定状态下, 正对泄漏口上方的区域浓度最大, 与周围存在浓度差, 沿竖直方向分布。空间内的氢气浓度有明显的分层现象, 氢气聚集在空间的顶部, 整体浓度较高, 氢气向顶部四周扩散, 充满舱内的上层空间。当氢气扩散至顶部与外

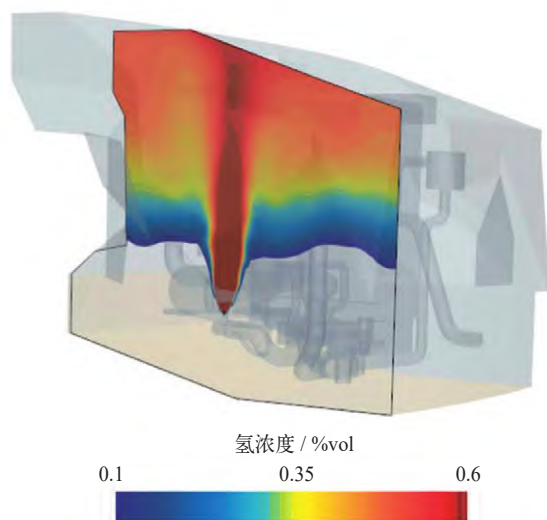


图6 前舱氢浓度分布云图

界的缝隙出, 可逸散至外界, 而空间底部氢气浓度很低, 氢气基本不会从底部的开放空间内逸出。

3.3 氢浓度安全极限评估

在当前流量下, 空间内的氢浓度最大约 0.55% vol, 氢的燃烧爆炸体积浓度范围在 4% vol ~ 75% vol 之间, 若舱内的氢气泄漏流量更大, 则有可能使空间内的氢气体积浓度达到危险范围, 采用以上计算方法仿真了不同氢气泄漏流量下的浓度分布, 见表 1。

表1 不同氢泄漏量下的仿真结果

泄漏流量 (NL/min)	测试点最大浓度	空间中的氢含量 (kg)
0.6	0.54%vol	1.58E-04
1.2	0.82%vol	2.29E-04
2.4	1.3%vol	3.44E-04
7.2	2.6%vol	6.81E-04

随着泄漏量的增大, 空间内累积的氢气增多, 最大氢浓度也逐渐接近爆燃区间。如图 7 所示, 可以看出泄漏量与舱内最大浓度呈线性关系, 可以推测当舱内泄漏量约 11.5 NL/min 时, 最大浓度可达到 4% vol。虽然此时空间内的累积的氢气仅 1 g, 却足以使空间的氢浓度达到爆燃危险区间。

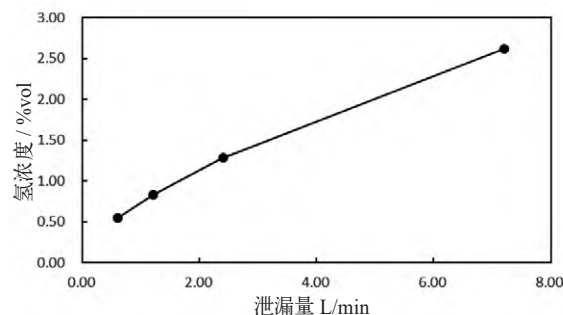


图7 最大氢浓度与泄漏流量的关系曲线

如图 8 所示, 通过仿真云图可以统计氢浓度在空间高度方向上的分布状态。由图 9 可看出, 在各个氢泄漏量下的浓度分布具有相同的特点。前舱空间总高约 0.85 m, 0.3 m 以下基本没有氢气; 0.3 ~ 0.6 m 内, 氢气浓度明显上升; 0.6 m 以上氢气浓度达到最大且基本不变。故前舱 1/3 以下高度基本没有氢气, 氢气基本集中在 2/3 以上高度的空间内。乘用车前舱空间为半开放空间, 一般发动机下方、进气格栅等有开口与外界大气相通, 仅假设上方盖板处有少量缝隙开口。故前舱主要开口位置均集中于下方, 而氢气易在空间上方集中导致难以从前舱的开口空间处疏散出去。随着泄漏量的增大, 空间内的氢浓度很容易进入爆燃范围。

根据以上分析结果, 为使燃料电池车辆满足氢气

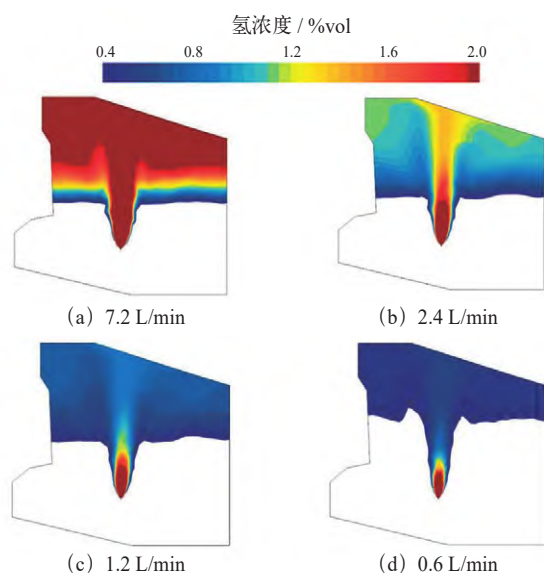


图8 不同泄漏量下的氢浓度分布图

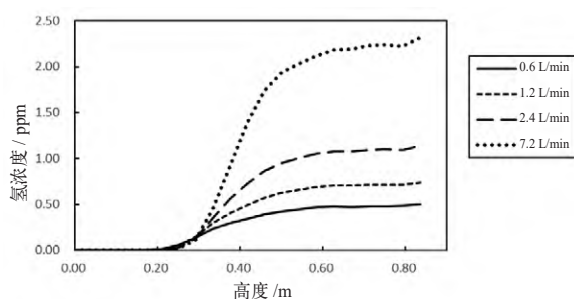


图9 氢浓度沿空间高度的分布

爆燃安全范围要求,除了主动控制减少氢的泄漏量外,建议在涉氢空间上部设计氢气自由逸散口,逸散口的布置至少需要在整体高度的2/3以上,可减少氢气在空间内的聚集程度,被动提升氢安全性能。

4 结语

本文针对某燃料电池MPV车型进行了前舱的氢泄漏试验,并建立了对应的半开放空间的氢气逸散仿真模型,根据模型计算了氢气在前舱内部泄漏的浓度分布情况,并从氢气爆燃安全浓度限制的角度对氢安全设计提供一定参考。

(1) 对于半开放空间,氢气泄漏一段时间后浓度可达到稳定平衡状态,故采用CFD软件进行氢泄漏逸散的稳态分析。在与试验相同的泄漏量条件下,仿真分析得到的测点处,氢浓度与测试结果基本一致。可认为本文采用的简化假设分析方法具有一定可靠性。

(2) 半开放空间最大氢浓度与氢泄漏量呈线性关系。针对本文的燃料电池MPV车型,可推测当舱内泄漏量约11.5 NL/min时,最大浓度达到4% vol,此时空间内的氢气仅1 g,却容易集中聚集于前舱上部的小范围空间,使舱内最大体积浓度进入氢气的爆燃范围内。

(3) 根据氢浓度在空间高度的分布状态看出,氢气主要聚集在前舱2/3以上高度的空间内,1/3以下高度基本没有氢气。而前舱的底部和进气格栅虽有开口,但位置靠下,处于无氢气或低浓度氢气处,空间内的氢气难以靠自身于外界浓度差逸散出去。故涉氢空间设计逸散口的至少需要在整体高度的2/3以上。

参考文献

- [1] 王建建,胡辰树.我国氢燃料电池专用车发展现状与趋势分析[J].专用汽车,2021(4): 51-55.
- [2] 张新建.燃料电池汽车车载氢系统安全性分析[J].时代汽车,2019(2): 98-100.
- [3] 欧阳云瀚,裴冯来,李海洋.受限空间内燃料电池汽车氢泄漏安全保障研究[J].汽车与新动力,2022,5(1): 30-34.
- [4] 胡中强,邓亚东,李景利,等.燃料电池城市客车氢气泄漏扩散研究[J].数字制造科学,2019(4): 271-275.
- [5] 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].北京交通大学,2022.
- [6] 王秋波,齐巍,张筱璐,等.燃料电池客车氢气泄漏位置对扩散特性的影响规律研究[A].中国汽车工程学会年会论文集(2)[C].天津市,2021: 200-206.
- [7] 吴迪,文醉.基于通风安全的燃料电池发动机舱内氢泄漏量评价研究[J].北京汽车,2021(2): 22-23.
- [8] 高源,陈朝刚.通风压力及泄露位置对燃料电池汽车氢气小孔泄露的影响[J].同济大学学报:自然科学版,2021,49(12): 1771-1777.
- [9] 柯道友,毕景良,李雪芳.氢气泄漏过程的理论模型计算及CFD模拟[J].化工学报,2013,64(9): 3088-3095.
- [10] 余照.氢泄漏与扩散数值仿真研究[D].长沙:国防科学技术大学,2008.