

引用格式: 雷蕾, 周军, 李卓言, 等. 氢气站气体泄漏事故后果模拟分析[J]. 南方能源建设, 2025, 12(3): 1-9. LEI Lei, ZHOU Jun, LI Zhuoyan, et al. Simulation and analysis of gas leakage in hydrogen station [J]. Southern energy construction, 2025, 12(3): 1-9. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-410.

氢气站气体泄漏事故后果模拟分析

雷蕾[✉], 周军, 李卓言, 李少华, 刘燕

(中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

摘要: [目的] 氢气泄漏会迅速扩散与周围空气混合形成可燃蒸气云, 有可能引发燃烧和爆炸事故, 对这一过程进行数值模拟可简单高效地帮助工程设计及现场工作人员合理降低风险。[方法] 利用 Fluent 计算流体动力学软件针对“德令哈 PEM 电解水制氢示范工程项目”各涉氢设施, 如氢气、氧气放散口、20 MPa 高压管束和 2.8 MPa 大容量储罐, 在环境风速、环境温度条件下发生连续性泄漏事故后果进行模拟分析。[结果] 结果表明: (1) 氢气、氧气放散口不会使制氢厂房之外的区域产生氢气燃爆风险或形成富氧环境, 主要的潜在危险是明火、电火花等点火源诱发火灾, 建议设置静电消除装置, 并尽可能将氧气回收利用; (2) 针对高压管束和储罐, 两者的不同之处表现为高压管束氢气泄漏速度快而储罐泄漏时间长, 建议在建造防护墙的情况下进一步加装热成像型氢气探测报警装置, 限定人员出入并禁止作业人员携带火种、非防爆电子设备进入危险区域。[结论] 以上氢气在不同场景的泄漏与扩散规律, 为项目实施阶段氢气泄漏安全预警系统设计以及降低风险提供了很好的理论支持。

关键词: 氢气站; 连续性泄漏; 扩散; Fluent

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-410

文章编号: 2095-8676(2025)03-0001-09

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-410

中图分类号: TK91



论文二维码

Simulation and Analysis of Gas Leakage in Hydrogen Station

LEI Lei[✉], ZHOU Jun, LI Zhuoyan, LI Shaohua, LIU Yan

(North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: [Objective] In case of hydrogen leakage, it can quickly diffuse and mix with the surrounding air, forming a combustible vapor cloud, which may cause combustion and explosion accidents. Numerical simulation of this process can effectively help engineers and workers reduce risks. [Method] Using Fluent computational fluid dynamics software, simulation and analysis were conducted on various hydrogen-related facilities of the "Delingha PEM Water Electrolysis for Hydrogen Production Project", such as H₂ release ports, O₂ release ports, 20 MPa high-pressure tube bundles, and 2.8 MPa large-capacity storage tanks, to evaluate the consequences of continuous leakage incidents under environmental wind speed and temperature conditions. [Result] The results indicate that: 1) the H₂, O₂ release ports do not pose a risk of hydrogen explosion or create an oxygen-rich environment outside the hydrogen production plant. The main potential hazards are ignition sources such as naked fire and sparks that could trigger fires. It is recommended to install static elimination devices, and, whenever possible, recycle oxygen; 2) Regarding the high-pressure tube bundles and storage tanks, the differences are that the hydrogen leakage rate of high-pressure tube bundles are fast, and the leakage time of the storage tanks is long. It is recommended to install thermal imaging hydrogen detection and alarm devices in conjunction with the construction of protective walls, limit access for personnel, and prohibit operators from carrying ignition sources and non-explosion-proof apparatus into hazardous areas. [Conclusion] The patterns of hydrogen leakage and diffusion across different scenarios offer strong theoretical support the design of the hydrogen leakage safety warning system during the project implementation phase and for risk reduction.

Key words: hydrogen station; continuous leakage; diffusion; Fluent

收稿日期: 2024-12-02 修回日期: 2025-02-13

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司科技项目“绿氢制备和储存系统安全影响分析及优化研究”(DG2-J05-2023)

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着《“十四五”新型储能发展实施方案》^[1]出台,我国能源转型持续推进,东北、华北、西北、西南等地区风光氢储一体化项目大力发展,产业热度空前^[2-4]。需要警惕的是,依据《氢气站设计规范》(GB 50177—2005)^[5],氢气站供氢站的生产火灾危险性类别为“甲”类。典型的氢气事故情景包括意外泄漏、点燃(或自燃)、燃烧和爆炸等。事故初期,氢气从储罐、管道及其他储存系统意外泄漏,迅速扩散与周围空气混合,在一定的区域内形成易燃混合气团,存在燃烧和爆炸的风险,最终可能引发重大灾害性事故。由于氢气泄漏实验研究成本高、危险系数大^[6],对氢泄漏燃爆事故进行数值模拟是一种更为经济高效的研究手段,能够为氢泄漏安全预警系统以及防火、阻火、防爆安全系统设计提供理论依据与指导。

国内外利用 Fluent^[7-8]、PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool)^[9]、FLACS (Flame Accelerate Simulator)^[10]、OpenFOAM (Field Operation and Manipulation)^[11]和 ALOHA^[12]等软件对各种氢气事故场景进行研究,其中以 Fluent 使用最为广泛。例如,谢乐源等^[13]对加氢站 40 MPa 高压储氢罐阀泄漏事故进行模拟,研究了站内空间和布局、环境温度和湿度对氢气扩散的影响;Wang 等^[14]对加氢站 70 MPa 储氢罐在不同环境风作用下的喷射、扩散进行模拟,根据可燃云分布提出风险缓解措施;Jiao 等^[15]对比模拟了燃料电池汽车氢气供应系统在开放空间和封闭空间发生泄漏的情况,最终得到泄漏率、风速、风向及通风口对安全的影响;辛杰^[16]针对氢气在地下车库中的泄漏扩散进行计算,对比了不同泄漏方向、泄漏位置情况下地下车库内氢浓度时空分布及演化;陈慧超^[17]以氢燃料汽车在隧道口泄漏为背景,运用 Fluent 分析了氢气泄漏速度、泄漏时期、泄漏位置对氢气爆炸产生的压力及温度影响;Gao 等^[18]对氢燃料电池汽车运输船氢气泄漏展开模拟研究,重点分析了泄漏孔、通风口位置如何影响车辆间隙氢气扩散规律。总结发现,当前氢气泄漏模拟研究主要集中在氢气加注和应用环节,制氢站相关研究

较少。

为此,本文选用 Fluent 对“德令哈 PEM 电解水制氢示范工程项目”展开研究,重点模拟氢气放散口、氧气放散口、高压管束和氢气储罐 4 个事故易发生场景,分析气体的泄漏、扩散特性,最终对绿氢制备、储存系统安全性进行评价并给出相应的建议。

1 模型构建及参数设置

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)是流体力学的一个分支,是指利用数值方法分析和求解流体在流动和化学反应过程相关问题的方法。本文模拟以 CFD 为理论基础,使用 Ansys SCDM 进行几何前处理工作,随后选用 Fluent Meshing 快速生成 poly-hexcore 网格,在 Fluent 中完成模拟计算并进行后处理帮助分析。

1.1 危险源辨识

德令哈制氢站厂区围墙内用地面积 11 534 m²,四周设置 2.5 m 高非燃烧实体围墙。总平面布置大体分 3 个区域,如图 1 所示,自西向东依次为管理区、制氢区、加氢区。管理区主要布置 1 栋综合楼和 1 间传达室;制氢区主要布置有制氢车间、电气楼(变、配电室联合建筑)、储氢罐;加氢区主要布置有压缩机区域(预留)、长管拖车停车位(预留)、长管拖车充装区。

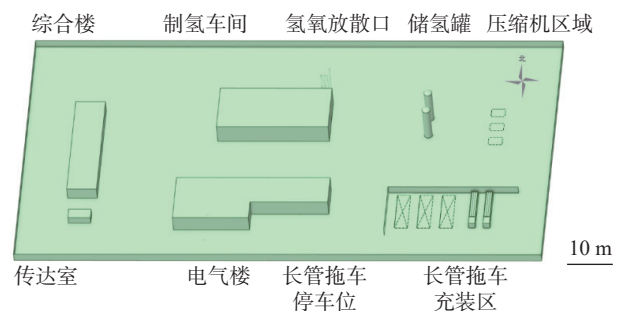


图 1 德令哈厂区布置图

Fig. 1 Plant layout of "Delingha PEM Water Electrolysis for Hydrogen Production Project"

德令哈制氢站制氢规模不低于 600 Nm³/h, 设置 3 套出力不低于 200 Nm³/h 的 PEM 电解水制氢系统以及 1 套 600 Nm³/h 氢气纯化装置, 氢气出口纯

度 99.999%, 出口压力 2.8 MPa; 设置 2 台水容积 50 m^3 氢气缓存罐, 以保证系统平稳运行, 缓存压力 2.8 MPa, 项目预留氢气压缩及充装系统场地。对该厂区进行预先危险性分析, 制氢车间和氢气缓存罐区是重大危险、有害因素的重点防范部位。制氢设备工作或启停过程中, 放散口长时间向外排放氢气、氧气, 高压管束和储氢罐作为氢气的储运设备, 分别具有压力高、储量大的特点, 存在阀门等连接处密封不良等风险, 可能造成气体泄漏。基于此, 本文选取氢气放散口、氧气放散口、高压管束和储氢罐展开泄漏、扩散行为模拟分析。

1.2 放散口几何模型、网格划分及参数设置

制氢车间设 8 个氢气放空管道(带阻火器), 尺寸分别为 $\Phi 133 \times 5 \text{ mm}$ 、 $\Phi 14 \times 2 \text{ mm}$ 、 $\Phi 32 \times 3 \text{ mm}$ 、 $\Phi 108 \times 4 \text{ mm}$ 、 $\Phi 32 \times 3 \text{ mm}$ 、 $\Phi 14 \times 2 \text{ mm}$ 、 $\Phi 108 \times 4 \text{ mm}$ 、 $\Phi 25 \times 3 \text{ mm}$ 。管口高出屋顶 3.5 m, 符合 GB 50177—2005^[5]。为了模拟上风侧最大尺寸放散口($\Phi 133 \times 5 \text{ mm}$)氢气排放以及可燃气云分布情况, 建立相应的几何模型, 总计算域为 $1523 \text{ mm} \times 1523 \text{ mm} \times 2500 \text{ mm}$, 放散口做网格加密处理, 共划分 129924 个网格, 如图 2(a)所示。德令哈常年主导风向西北风, 平均风速 2.2 m/s, 模型左侧和后方边界选择“Magnitude and Direction”速度定义方法设置速度入口, 1.56 m/s(蓝色网格); 其余边界为压力出口(红色网格)。该放散口连接气液处理器不合格氢气排空, 连续释放, 以 50% 负荷即 $300 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 计算氢气排空速度为 6 m/s, 远小于 GB 50177—2005^[5] 规定的氢气在不锈钢管中流速限值 25 m/s, 由此设放散管口为速度入口。以上边界条件湍流强度设 1%, 水力直径设 10 m。

工作条件根据德令哈气象站多年实测气象资料确定, 年平均气温 4°C , 气压 70.88 kPa。模拟过程中气体处理为理想气体。氢气释放后呈非稳定流动, 选择瞬态压力基求解器进行计算, 开启重力选项和全浮力影响项。开启能量方程、组分输运和 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 其中 k 表示湍流动能、 ϵ 表示湍流耗散率, 对应方程能够准确预测圆孔射流的涡耗散分布, 同时为高压力梯度、分离梯度、再循环流、旋转以及边界层特性等问题提供更精准的预测^[19]。壁面函数选择可扩展壁面函数。求解方法采用压力速度耦合 SIMPLE 方法, 动量以及能量方程开启二阶迎风差格

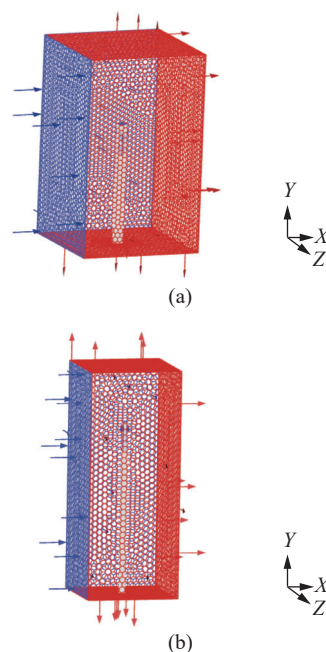


图2 氢气(a)和氧气(b)放散口计算流场网格划分及边界设定

Fig. 2 Computational flow field mesh dividing and boundary settings of (a) the H_2 release ports and (b) the O_2 release ports

式。德令哈项目使用 PEM 电解槽水电解制氢, 冷设备启动 1 h 后氧中氢达标, 因此设总计算时长为 3600 s, 时间步长取 0.1 s。

电解槽正常工作情况下, 副产氧生产速率为 $300 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。为了确保安全生产, 防止因氧气泄放、积存引起的着火事故发生, 氧气设备及管道内的冷凝水排放单独设置 $\Phi 14 \times 2 \text{ mm}$ 、 $\Phi 108 \times 4 \text{ mm}$ 氧气排水水封排至室外。本文就较大放散口模拟 24 h 泄放氧气浓度分布情况, 时间步长取 1 s。总计算域为 $1600 \text{ mm} \times 1600 \text{ mm} \times 4000 \text{ mm}$, 共划分 117100 个网格, 示于图 2(b)中。边界设定及模拟参数与氢气放散口设置相同。特别注意, 放散口设速度入口, 氧气流率为 5.3 m/s, 初始时刻流体域设 23.15 wt% O_2 和 75.52 wt% N_2 , 代替直接设置空气。

1.3 高压管束几何模型、网格划分及参数设置

高压气态储运技术成熟、成本低, 是当前应用最为广泛的氢储运技术。德令哈项目拟选用 20 MPa、 3600 Nm^3 高压管束进行氢气输运, 由 9 个大容积无缝高压钢瓶组成。钢瓶外径 559 mm, 最小壁厚 16.5 mm, 瓶长 10.47 m, 单只水容积 2.135 m^3 。简化长管拖车的止回阀、金属软管、充装接口等细节建

立长管拖车几何模型。假设氢气长管拖车尾部的装卸阀门故障失效,泄漏孔径按《危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定方法》(GB/T 37243—2019)^[20]标准设为中孔 25 mm。以长管拖车充装区域围墙及地面为边界建立长方体流场区域, 14.798 m×16.000 m×10.000 m, 总网格数 231 276, 如图 3 所示。车辆、围墙以及地面边界条件设为壁面(黑色网格), 其余边界设定和环境条件设置同 1.2 小节。初始时刻, 高压管束内氢气压力设 20 MPa, 体积分数 100%。根据 GB/T 37243—2019 附录 E, 探测系统 A 级, 联锁切断系统 A 级, 相应的泄放时间为 600 s, 以此为模拟时长, 时间步长设 0.1 s。

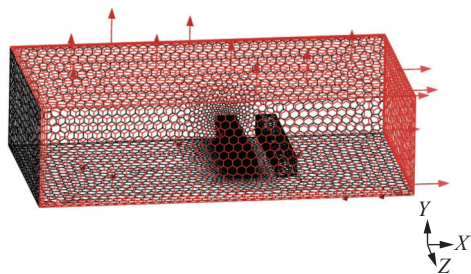


图 3 高压管束计算流场网格划分及边界设定

Fig. 3 Computational flow field mesh dividing and boundary settings of the high-pressure tube bundles

1.4 储罐几何模型、网格划分及参数设置

德令哈项目共安装 2 台固定立式储罐 $\Phi 2464 \times 32$ mm, 高 13.546 m, 水容积各 50 m³, 工作压力 2.8 MPa。对于立式储氢容器, 与顶部泄漏相比, 侧底部泄漏对人员危险区域的危险性更大^[21-22]。假设 1 号储罐 N1 进气口发生连续泄漏, 以进气口连接管道公称尺寸为泄漏孔径, 即 32 mm, 该处网格进行加密处理。1 号储罐北侧距离围墙 30.56 m, 南侧距离长管拖车充装区 21.25 m, 西侧与制氢车间相隔 26.99 m, 东侧与压缩机区域间隔 15.99 m, 在此范围内以工程设计划定区域为界建立长方体流场区域, 18.063 m×23.000 m×15.000 m, 总网格数 290 223, 如图 4 所示。地面以及储氢罐边界条件设为壁面(黑色网格), 其余边界设定和环境条件设置同 1.2。初始时刻, 1 号储氢罐内氢气压力设 2.8 MPa, 体积分数 100%, 总模拟时长 600 s, 时间步长 0.1 s。

本文模拟结果均已完成网格无关性验证。

2 模拟结果分析

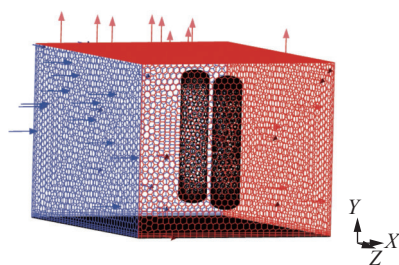


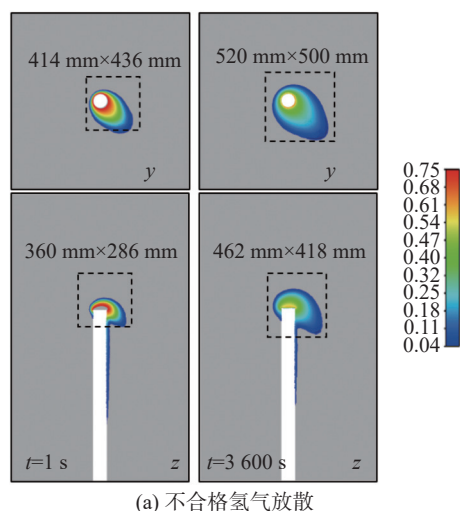
图 4 储罐计算流场网格划分及边界设定

Fig. 4 Computational flow field mesh dividing and boundary settings of the storage tanks

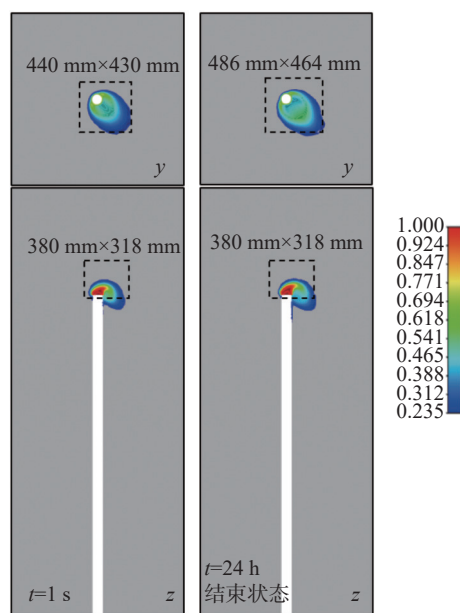
2.1 放散口模拟结果分析

图 5(a) 和 (b) 分别是氢气放散口泄放 1 s、3600 s 对应时刻的氢气分布云图, 所示平面包括过放散口中心的 xy 截面和 xz 截面, 氢气可燃浓度范围 4% ~ 75%。可以看出, 氢气扩散主要受到环境风的影响, 向东南方向扩散较快, 随着时间的延长, 3600 s 时, 氢气可燃浓度范围在放散口附近 500 mm×520 mm 范围内, 此区域位于制氢房屋面上方, 未扩散到其他区域, 即电解槽启动初期不合格氢气的排放不会使制氢厂房之外的区域产生氢气燃爆风险。根据《职业卫生名词术语》GBZ/T 224—2010^[23] 规定, 空气中氧的体积分数 > 23.5% 的环境为富氧环境, 当氧气浓度超过 70% 的时候, 属于高纯度氧气, 会对人体产生危害, 即“氧中毒”, 图 5(c)、图 5(d) 所示制氢过程中氧气不回收、直接连续排放产生的富氧浓度范围, 对比 1 s 和 24 h 云图情况看出, 氧扩散同样主要受环境风影响向东南方向扩散较快, 放散口富氧区域由开始的 380 mm×318 mm 逐渐扩大至 486 mm×464 mm, 此区域位于制氢房屋面上方, 未扩散到其他区域, 即电解槽运行期间氧气的排放不会使制氢厂房之外的区域产生富氧环境。

结合图 1 所示布置图进行分析, 氢气放散口位于屋顶 3.5 m 以上位置、氧气放散口高出氢气放散口 1.5 m, 横向距离为 6 m, 因此判断氢氧放散互不相混且远离人群。主要的潜在危险是发生火灾, 可能的诱因有明火、电火花等点火源, 或发生机械冲击, 有粒子存在的氧气高流速造成系统中不相容材料着火, 以及使用未经批准或未经认证与氧一起使用的零部件和润滑剂等。为避免此类情况的发生, 在工程设计时严格遵守标准, 使用脱油、脱脂、防火材料, 参考《氢气使用安全技术规程》(GB 4962—2008)^[24]



(a) 不合格氢气放散



(b) 氧气放散

图5 氢、氧放散口气体扩散云图(y, z视图)

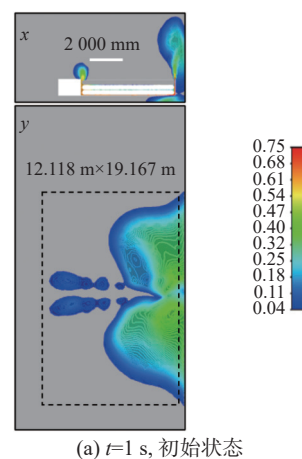
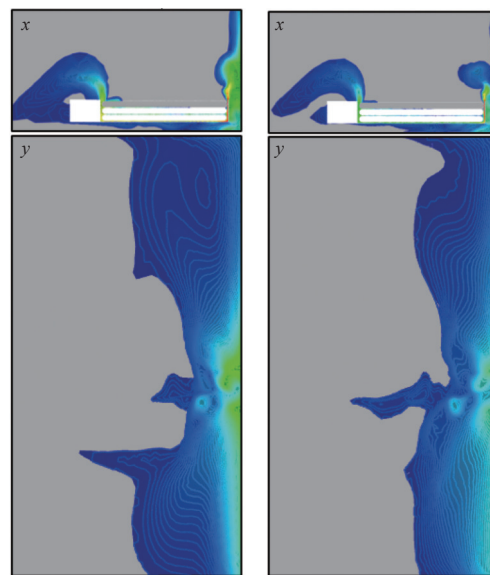
Fig. 5 The diffusion contours of the H_2 , O_2 release ports (y, z view)

设置静电消除装置,同时远离点火源。此外建议将氧气回收利用,不仅从源头上避免了富氧环境的产生,而且提高了项目整体经济性。

2.2 高压管束模拟结果分析

高压管束储氢压力高达 20 MPa,模拟计算得到初始时刻气体冲出泄漏孔的流速为 1152 m/s,属于超声速流。该模拟的另一个特点是气体扩散过程遇到的障碍众多且情况复杂,无法通过已有研究中的障碍物与泄漏孔距离远近和相对位置^[25]来判断气体扩散情况。图6展示了不同时刻高压管束泄漏孔周

围氢气扩散云图,x视图过泄漏口中心做yz截面得到,y视图为地面平面或过泄漏口中心的xz截面。 $t=1$ s时,氢气在高压管束四周扩散开来,扩散高度接近 10 m,横向覆盖区域 12.118 m×19.167 m,受长管拖车挡限制,在车底、车辆内部、尤其是角落聚积了高浓度的氢气,极易发生氢气燃爆事故。 $t=5$ s,氢气云继续扩大,蔓延至整个长管拖车停车位(预留)和长管拖车充装区,影响达到最大; $t=10$ s,氢气云范围缩小;经过 60 s,泄漏速度已降为 0.5 m/s,高压管束泄漏口仍保持较高氢气浓度;待切断系统响应时(600 s),氢气扩散已在极小可控范围内。总体来看,高压管束氢气泄漏开始阶段速度快,及时发现并采取措施对防范氢气燃爆有重要意义,结合模拟结果分析,高压管束氢气泄漏检测响应时间最好控制在 10 s 以内,GB/T 50493—2019^[26]要求在长管拖车卸

(a) $t=1$ s, 初始状态(b) $t=5$ s, 影响范围最大状态(c) $t=10$ s

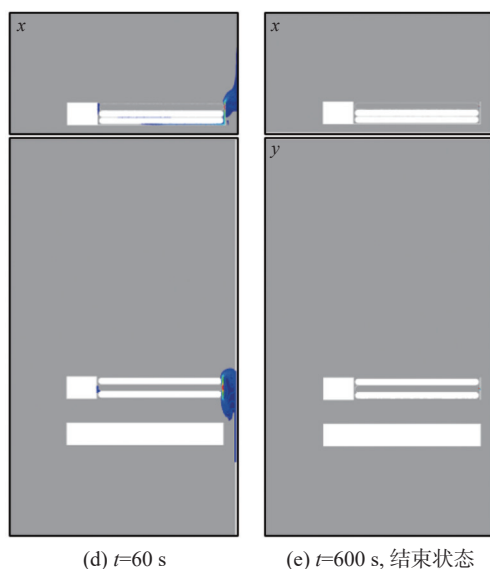


图 6 高压管束中孔泄漏氢气扩散云图随时间的变化 (x、y 视图)

Fig. 6 The diffusion contours of the hydrogen leakage from the middle hole of the high-pressure tube bundles over time (x, y view)

气柱上方 2.0 m 内设置氢气探测器, 报警值为 25%LEL, 这影响了早期探测的有效性, 建议依据《汽车加油加气加氢站技术标准》(GB 50156—2021)^[27] 设置热成像型火灾报警探测器, 与氢气探测器、噪声性探测器和火焰检测器组合探测方案^[28], 全方位、超快响应预警。另外, 受防护墙影响, 氢气仅在长管拖车停车位(预留)和长管拖车充装区扩散, 区域内燃爆风险高。刘亚朝等^[29] 也建立了 20 MPa 长管拖车连续泄漏模型, 得到类似结论——氢气在相对开阔的区域不易发生大范围的氢气积聚, 而在防火墙内侧、长管拖车底部等喷射受限的区域积聚。为降低燃烧、爆炸风险, 建议限定人员出入该区域并禁止作业人员携带火种、非防爆电子设备进入。

2.3 储罐模拟结果分析

氢气储罐具有时间长、储量大的特点, 可能发生的气体泄漏情况多由管道、阀门等元件损坏造成。图 7 展示了储罐进气口泄漏氢气扩散云图随时间的变化。 z 视图过泄漏口中心做 xy 截面得到, y 视图过泄漏口中心做 xz 截面得到。 $t=1$ s 时, 泄漏速度高达 1 070 m/s, 西侧超出安全区域, 蔓延至厂区道路。随着时间的推移, 氢气泄漏速度以及氢气燃烧爆炸范围缩小。600 s 联锁切断系统响应时, 储罐内压力降为 263.99 Pa, 氢气泄漏速度为 53.12 m/s, 仅泄漏口附

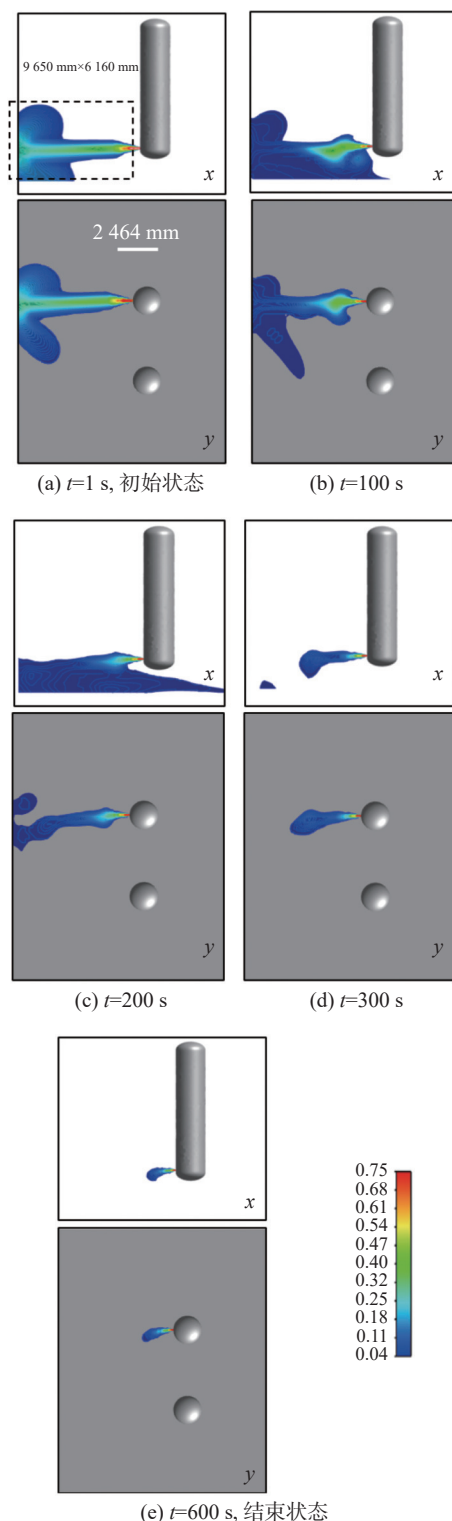


图 7 储罐进气口泄漏氢气扩散云图随时间的变化 (y、z 视图)

Fig. 7 The diffusion contours of the hydrogen leakage from the inlet mouth of the storage tanks over time (y, z view)

近存在危险。与高压管束对比分析, 主要有 3 点不同: (1) 储罐周围无遮挡导致影响范围更大; (2) 储罐

压力小于高压管束因而初始泄漏速度较小;(3)储罐氢气含量多使得影响时间更长。此处建议在储罐划定区域西侧建立防护墙,阻挡其扩散至厂区道路甚至制氢车间,同时设置明显的禁火标志,从源头上尽可能降低风险。

泄漏发生后,及时有效地检测和预警可以防止事故的恶化,若以上事故发生,可实行“热区”“暖区”“冷区”分区管理^[30]。

3 结论

德令哈制氢一体站厂区制氢车间放散口、高压管束、储罐存在氢气泄漏及蒸气云爆炸事故风险,本文针对各涉氢设施在环境风速、环境温度下的氢气泄漏、扩散行为进行模拟,结合相关标准分析得到以下结论:

1) 氢气可燃浓度范围在放散口附近 500 mm×520 mm 范围内,此区域位于制氢厂房屋面上方,不会使制氢厂房之外的区域产生氢气燃爆风险;制氢过程中氧气不回收、直接连续排放产生的富氧浓度范围处于氧气排放口附近 486 mm×464 mm 范围内,不会使制氢厂房之外的区域产生富氧环境。氢、氧放散口主要的潜在危险是明火、电火花等点火源诱发火灾,或高流速氧气造成系统材料着火,相应的防范措施是在工程设计时严格遵守标准使用脱油、脱脂、防火材料,设置静电消除装置,远离点火源,同时建议将氧气回收利用;

2) 20 MPa 高压管束和 2.8 MPa 氢气储罐均属于压力容器,气体泄漏初始流速分别达到 1152 m/s、1070 m/s。对比而言,高压管束氢气泄漏受长管拖车挡扳限制,在车底、车辆内部聚积了高浓度的氢气,整个泄漏过程大概经过了 60 s,随后风险缩小至泄漏孔附近;储罐影响时间更长,600 s 连锁切断系统响应时,氢气仍以 53.12 m/s 的速度向外泄漏。针对上述 2 个潜在的氢气泄漏空间,建议增加防护墙,区域内加装热成像型氢气探测报警装置,张贴明显醒目的安全提示和警告标识,限定人员出入并禁止作业人员携带火种、非防爆电子设备进入危险范围内。

参考文献:

[1] 国家发展改革委,国家能源局.“十四五”新型储能发展实施方案 [EB/OL]. (2022-01-29) [2025-01-10]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/22/5680417/files/41a50cec48e84cc>

4adfca855c3444f6b.pdf.

National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Implementation plan for the development of new energy storage during the 14th five-year plan period [EB/OL]. (2022-01-29) [2025-01-10]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/22/5680417/files/41a50cec48e84cc4adfca855c3444f6b.pdf>.

[2] 刘友葵. 风光水氢储一体互补的再生能源制造系统 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊 1): 9-16 DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.002.

LIU Y K. Wind-solar-water-hydrogen-storage integrated complementary renewable energy manufacturing system [J]. Southern energy construction, 2022, 9(Suppl.1): 9-16. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.002.

[3] 张丝钰, 张宁, 卢静, 等. 绿氢示范项目模式分析与发展展望 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(3): 89-96. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.009

ZHANG S Y, ZHANG N, LU J, et al. Analysis and development outlook on the typical modes of green hydrogen projects [J]. Southern energy construction, 2023, 10(3): 89-96. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.009

[4] 张力, 刘海洋, 段德萱, 等. 交能融合背景下的高速公路光储充一体化发展路线展望 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 86-94. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.09.

ZHANG L, LIU H Y, DUAN D X, et al. Prospects for the development path of highway PV-Storage-Charging integration under the background of transportation and energy integration [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 86-94. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.09.

[5] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 氢气站设计规范: GB 50177—2005 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.

Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Design code for hydrogen station: GB 50177—2005 [S]. Beijing: China Planning Press, 2005.

[6] 李雪芳. 储氢系统意外氢气泄漏和扩散研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.

LI X F. Dispersion of unintended subsonic and supersonic hydrogen releases from hydrogen storage systems [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.

[7] SALVA J A, TAPIA E, IRANZO A, et al. Safety study of a hydrogen leak in a fuel cell vehicle using computational fluid dynamics [J]. International journal of hydrogen energy, 2012, 37(6): 5299-5306. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.12.046.

[8] XIAO J S, XU N F, LI Y Z, et al. CFD simulation and ANN prediction of hydrogen leakage and diffusion behavior in a hydrogen refuelling station [J]. International journal of energy research, 2024, 2024(1): 8910533. DOI: 10.1155/2024/8910533.

- [9] KWON D, CHOI S K, YU C. Improved safety by crossanalyzing quantitative risk assessment of hydrogen refueling stations [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2022, 47(19): 10788-10798. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2021.12.211](#).
- [10] 李静媛, 赵永志, 郑津洋. 加氢站高压氢气泄漏爆炸事故模拟及分析 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2015, 49(7): 1389-1394. DOI: [10.3785/j.issn.1008-973X.2015.07.026](#).
- LI J Y, ZHAO Y Z, ZHENG J Y. Simulation and analysis on leakage and explosion of high pressure hydrogen in hydrogen refueling station [J]. *Journal of Zhejiang University (engineering science)*, 2015, 49(7): 1389-1394. DOI: [10.3785/j.issn.1008-973X.2015.07.026](#).
- [11] 付佳佳, 王昌建, 秦俊, 等. 氢气喷射火的大涡模拟 [J]. *燃烧科学与技术*, 2013, 19(5): 473-477. DOI: [10.11715/rskxjs.R201301028](#).
- FU J J, WANG C J, QIN J, et al. Large eddy simulation of hydrogen jet fire [J]. *Journal of combustion science and technology*, 2013, 19(5): 473-477. DOI: [10.11715/rskxjs.R201301028](#).
- [12] 孟凌杰, 蔡喜洋, 乔都助. 氢气管束车事故危险性分析及应急对策研究 [J]. *化工安全与环境*, 2024, 37(1): 27-31, 34.
- MENG L J, CAI X Y, QIAO D Z. Hazard analysis and emergency response research on hydrogen pipe bundle vehicle accidents [J]. *Chemical safety & environment*, 2024, 37(1): 27-31, 34.
- [13] 谢乐源, 杨孟飞, 吴宗义, 等. 基于情景模拟的加氢站泄漏事故演变分析 [J]. *化工安全与环境*, 2024, 37(1): 16-22.
- XIE L Y, YANG M F, WU Z Y, et al. Evolution of hydrogen refueling station leakage based on scenario simulation [J]. *Chemical safety & environment*, 2024, 37(1): 16-22.
- [14] WANG L, LYU X F, ZHANG J Y, et al. Analysis of hydrogen leakage behavior and risk mitigation measures in a hydrogen refueling station [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2024, 83: 545-552. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2024.08.167](#).
- [15] JIAO M Y, ZHU H R, HUANG J L, et al. Numerical simulation of hydrogen leakage and diffusion process of fuel cell vehicle [J]. *World electric vehicle journal*, 2021, 12(4): 193. DOI: [10.3390/wevj12040193](#).
- [16] 辛杰. 受限空间氢气泄漏扩散特性及其浓度时空分布研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023. DOI: [10.27517/d.cnki.gzkju.2023.001874](#).
- XIN J. Research on the leakage and dispersion characteristics of hydrogen and the spatiotemporal distribution of hydrogen concentration in confined space [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023. DOI: [10.27517/d.cnki.gzkju.2023.001874](#).
- [17] 陈慧超. 基于 FLUENT 公路隧道内氢能汽车泄漏爆炸数值模拟 [J]. *安全与健康*, 2023(10): 62-67.
- CHEN H C. Numerical simulation by FLUENT of hydrogen-powered vehicle leakage and explosion in highway tunnel [J]. *Safety & health*, 2023(10): 62-67.
- [18] GAO Y, LIU H, HOU Y P. Effects of leakage location and ventilation condition on hydrogen leakage during shipping of fuel cell vehicles [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2024, 54: 1532-1543. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.12.095](#).
- [19] 邹婉盈. 加氢站高压氢气泄漏事故及多米诺效应分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2022. DOI: [10.27151/d.cnki.ghnlu.2022.002559](#).
- ZOU W Y. Analysis on high pressure hydrogen leakage accident and domino effects in hydrogen refuelling station [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022. DOI: [10.27151/d.cnki.ghnlu.2022.002559](#).
- [20] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定方法: GB/T 37243—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination method of external safety distance for hazardous chemicals production units and storage installations: GB/T 37243—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [21] 金星. 加氢站高压储氢容器气体泄漏扩散定量计算方法研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2021. DOI: [10.26939/d.cnki.gbghu.2021.000370](#).
- JIN X. Study on quantitative analysis of gas leakage and diffusion of high pressure hydrogen storage containers in hydrogen refueling station [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021. DOI: [10.26939/d.cnki.gbghu.2021.000370](#).
- [22] SUN R F, PU L, YU H S, et al. Modeling the diffusion of flammable hydrogen cloud under different liquid hydrogen leakage conditions in a hydrogen refueling station [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2022, 47(61): 25849-25863. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2022.05.303](#).
- [23] 中华人民共和国卫生部. 职业卫生名词术语: GBZ/T 224—2010 [S]. 北京: 人民卫生出版社, 2010.
- Ministry of Health, PRC. Terms of occupational health: GBZ/T 224—2010 [S]. Beijing: The People's Health Press Co., Ltd, 2010.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 氢气使用安全技术规程: GB 4962—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical safety regulation for gaseous hydrogen use: GB 4962—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [25] 郑津洋, 刘延雷, 徐平, 等. 障碍物对高压储氢罐泄漏扩散影响的数值模拟 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2008, 42(12): 2177-2180. DOI: [10.3785/j.issn.1008-973X.2008.12.025](#).
- ZHENG J Y, LIU Y L, XU P, et al. Numerical simulation of

- obstacle influence on leakage and diffusion of hydrogen due to high-pressure storage tank failure [J]. *Journal of Zhejiang University (engineering science)*, 2008, 42(12): 2177-2180. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2008.12.025.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准: GB/T 50493—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of combustible gas and toxic gas detection and alarm for petrochemical industry: GB/T 50493—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 汽车加油加气加氢站技术标准: GB 50156—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard of fuelling station: GB 50156—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [28] LI X L, HAO Y M, WU F, et al. Numerical simulation of leakage jet flame hazard of high-pressure hydrogen storage bottle in open space [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2024, 62: 706-721. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.088.
- [29] 刘亚朝, 李少鹏, 赵洪祥. 计算流体力学模拟高压储氢设施泄漏后果 [J]. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 2023, 62(1): 103-110. DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202112013.
- LIU Y Z, LI S P, ZHAO H X. Computational fluid dynamics simulation of leakage consequences of high pressure hydrogen storage facilities [J]. *Journal of Xiamen University (natural science)*, 2023, 62(1): 103-110. DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202112013.
- [30] 范力. 定量风险分析在氢气长管拖车风险评价中的应用 [J]. *上海煤气*, 2023(4): 5-8. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4709.2023.04.002.
- FAN L. Application of quantitative risk analysis in risk assessment of hydrogen tube trailers [J]. *Shanghai gas*, 2023(4): 5-8. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4709.2023.04.002.

作者简介:



雷蕾

雷蕾 (第一作者, 通信作者)

1992-, 女, 高级工程师, 博士, 主要从事氢能领域科学研究工作 (e-mail) leil@ncpe.com.cn。

(编辑 徐嘉铨)