

厦门大学学报(自然科学版) Journal of Xiamen University(Natural Science) ISSN 0438-0479,CN 35-1070/N

《厦门大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目:	基于 CFD 技术的高压储氢设施泄漏后果模拟		
作者:	刘亚朝,李少鹏,赵洪祥		
收稿日期:	2021-12-14		
网络首发日期:	2022-04-25		
引用格式:	刘亚朝,李少鹏,赵洪祥.基于	CFD 技术的高压储氢设施泄漏后果模拟	
	[J/OL]. 厦门大学学报(自然科学版).		

https://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20220425.1226.002.html



www.cnki.net

网络首发:在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国 学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。

基于 CFD 技术的高压储氢设施泄漏后果模拟

刘亚朝,李少鹏[∞],赵洪祥

(中国石化工程建设有限公司,北京 100101)*通信作者 lisp@sei.com.cn

摘要 加氢站、油氢合建站作为重要的氢能基础设施已进入快速发展阶段,其安全问题也受到社会的广泛关注。本研 究采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)技术,在某油氢合建站建设项目中,使用 1:1 模型建模, 选择有代表性的事故场景,研究油氢合建站内高压储氢设施泄漏后发生扩散、喷射火、气云爆炸等事故的影响,结合 现行标准规范的要求和数值模拟的结果,提出有针对性的风险防控措施,有利于提升油氢合建站的本质安全水平及应 急响应能力并对加氢站标准的补充完善提供依据。

关键词 加氢站;油氢合建站;高压储氢设施;计算流体力学;1:1模型;风险防控措施 中图分类号 X932 文献标志码 A DOI:10.6043/j.issn.0438-0479.202112013

CFD simulation of leakage consequences of high pressure hydrogen storage facilities

LIU Yazhao, LI Shaopeng[⊠], ZHAO Hongxiang

(Sinopec Engineering Incoperation, Beijing 100101, China)

Abstract As an important hydrogen energy infrastructure, hydrogen refueling stations (HRS) and gasoline-hydrogen refueling joint stations (GHRJS) have been developed rapidly, and their safety issues have also received widespread attention from the society. In this study, a real size model of GHRJS is built by CFD, and representative accident scenarios are selected to study the diffusion, jet fire, and cloud explosion after hydrogen leakage from the high pressure storage facility. Risk prevention and control measures are proposed based on current standards and simulation results. Conclusions in this study are conducive to improving the intrinsic safety level and emergency response capabilities of GHRJS. It also provides a basis for the improvement of codes and standards for HRS.

Key words hydrogen refueling station; gasoline-hydrogen refueling joint station; high pressure hydrogen storage facility; computational fluid dynamics; real size model; risk prevention and control measure

伴随着化石能源的日渐枯竭,许多国家和地区部署制定了发展新能源的战略规划,并加大新型清 洁能源的研发力度。氢气是一种二次能源,因其具有热值高、无碳排放、可再生等优点而受到青睐。 我国己将发展氢能列入国家能源战略,2019 年氢能被写入《政府工作报告》。在此背景下,各大汽 车厂商如奔驰、宝马、丰田等加大在该领域的研发投入,已推出多款氢燃料电池乘用车。目前,氢燃 料汽车大多在短途运输、市政等领域使用,制约其市场化和规模化的重要因素是加氢基础设施的发展 滞后。根据《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》,2025 年和 2030 年中国加氢站(包括油氢合建 站)将分别建成 300 和 1500 座,10 年间年复合增速达 31.1%,到 2050 年加氢站数量将达1 万座,行 业产值达 12 万亿元^[1]。

氢在具备上述优点和发展潜力的同时,还有易泄漏、扩散快、点火能低、爆炸极限宽的危险特性。另外,加氢站、油氢合建站内储氢设施的高压力又会加剧该危险^[2]。因受限于消费市场和服务半

收稿日期: 2021-12-14

网络首发时间: 2022-04-25 17:58:36 网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20220425.1226.002.html

径等因素,加氢站、油氢合建站的选址通常不会距离城市核心区域太远,所以氢气在储存和运输等环 节的安全问题受到社会的广泛关注。目前氢安全课题的研究领域主要包括:氢的扩散、燃烧与爆炸机 理;氢与金属材料的相容性;氢风险评价等^[3]。

在氢风险评价领域,评价方法可分为快速风险评级(rapid risk ranking, RRR)和量化风险评价(quantitative risk assessment, QRA)^[3]。RRR为定性分析方法,主要基于检查表等工具和专家经验,将分析所得的结果与风险基准进行对比以确定风险是否能够被接受。该方法由于量化程度低,主观性强,因此多用于风险场景的初步筛查。QRA 是目前氢风险评价的主流方法,评估过程更为复杂,得益于其对场景发生概率和后果严重性的综合考虑,可以得到某一场景的具体风险值,包括个人风险和社会风险,指导确定外部安全距离和风险防控措施的制定。

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术具有高准确度、低成本等优势,被广泛应用于量化风险评价中。当前 CFD 技术在高压储氢研究领域主要有两个研究方向,一是氢事故后果 机理研究,包括高压氢气泄漏自燃、激波的形成与传播、爆燃爆轰、爆燃转爆轰(DDT)等;二是事 故后果仿真,通过在模型中假设场景,计算事故影响程度和范围。文献[3]指出当前 CFD 技术面临的 主要挑战之一为真实几何形状建模及事故缓解措施的评估。

FLACS 软件由 GEXCON 公司开发,是目前进行扩散、火灾和爆炸安全分析领域的重要商业软件 之一。国内外学者使用 FLACS 软件已开展大量氢风险评价。Middha 和 Vyazmina 等^[4-7]开展了一系列 氢泄漏、扩散、燃烧、爆炸等试验研究,证明 FLACS 软件可用于氢安全研究。Kim 等^[8]使用 FLACS 软件模拟韩国某加氢站的爆炸场景,研究了储氢区、制氢区、加氢区等不同区域的事故后果。顾蒙 等^[9]在 FLACS 软件中搭建某油氢合建站的三维模型,模拟场景为高压储氢瓶组和加氢机泄漏,研究 單棚形状、风向、风速对氢气泄漏的影响规律。

KFX 软件最早由 ComputIT 公司联合挪威科技大学和挪威科技工业研究院共同研发,该软件融合 了工业流体和燃烧问题领域先进的技术以及广泛的国际经验,其中的涡耗散理论适用于解决湍流燃烧 问题。尽管目前暂未发现 KFX 软件用于氢风险评价相关研究,但本研究认为但该软件在燃烧及其防 控措施的计算方面有一定的优势,因此氢气的喷射火后果模拟使用 KFX 软件。

本研究以真实的油氢合建站为工程背景,构建 1:1 模型,并分别采用 FLACS 和 KFX 这两款 CFD 商业软件对高压储氢设施泄漏的后果进行模拟计算,以期研究结果能为油氢合建站的工程设计和安全 运行提供理论参考。

1.油氢合建站模型构建

图 1 为某油氢合建站工艺流程示意。氢气管束车(长管拖车,操作压力为 20 MPa,此处是表压,下同)将高纯度氢气送至油氢合建站,使用软管将氢气管束车与卸气柱连接进行卸气。氢气经过 70 MPa 压缩机撬增压后,通过顺序控制盘分别分配至 45 MPa 储氢瓶组和 90 MPa 储氢罐。该油氢合建站设计为 70 MPa 压力级别的氢燃料汽车加注氢气。



图 1 某油氢合建站工艺流程示意 Fig.1 Schematic diagram of the process flow of an oil-hydrogen refueling station

图 2 为某油氢合建站 1:1 模型。主要设备和设施有①罩棚(车辆加油、加氢的主要场所,罩棚下 设置加油机、加氢机);②站房(设置营业室、配电间、更衣间等功能性房间);③长管拖车(操作 压力为 20 MPa,站外制氢,氢气通过长管拖车输送至油氢合建站);④防火墙(参照《加氢站技术 规范(2021 年版)》,氢气长管拖车卸气端应设耐火极限不低于 4.00 h 的防火墙,高度不得低于长 管拖车的高度,长度不应小于 0.5 倍与 1.5 倍氢气长管拖车车位数之和与单个长管拖车车位宽度的乘 积^[10]);⑤45 MPa 储氢瓶组;⑥90 MPa 储氢罐;⑦70 MPa 压缩机撬(布置于箱柜内)。另外,油 氢合建站内还设置压缩机冷却水机组、加氢机冷冻液机组、氮气钢瓶、氢气放散模块等辅助设施。



① 單棚; ②站房; ③长管拖车; ④防火墙; ⑤45 MPa 储氢瓶组; ⑥90 MPa 储氢瓶组; ⑦70 MPa 压缩机撬.

图 2 某油氢合建站 1:1 模型 Fig.2 The 1:1 model of an oil-hydrogen refueling station

本研究在某油氢合建站建设项目中,使用 1:1 模型建模,选择有代表性的事故场景,研究油氢合 建站内高压储氢设施发生泄漏、喷射火、气云爆炸等事故影响,以期为科学制定油氢合建站的风险防 控措施提供参考和依据。

2. 泄漏场景构建

图 3 为高压储氢设施泄漏事件树。根据持续时间不同可将氢气泄漏分为瞬时泄漏和连续泄漏。瞬时泄漏为高压储氢容器突然破裂造成氢气在短时间内完全释放的过程,其原因可能是过度充装造成超压,充装速度过快等原因导致的过热,设备制造缺陷等。其伤害后果包括:物理爆炸的超压和抛射物对人员和设备造成伤害;瞬间释放的大量氢气被点燃后,在开敞空间内形成闪火或火球,在受限空间

内可能进一步发展为气云爆炸。连续泄漏是氢气沿孔洞的持续释放,其原因可能是进出气管线脱落、 仪表接口泄漏、安装缺陷等。如果在泄漏发生后立即点燃,泄漏位置附近可形成氢气射流火焰,热辐 射是主要的伤害形式。如果泄漏持续一段时间后发生延迟点燃,事故后果为闪火或火球,如该区域拥 塞程度较高,则可能演变为气云爆炸。

本研究认为连续泄漏为氢气泄漏的主要形式,因为:1)高压储氢容器满足"未爆先漏"的要求, 并设置压力报警和联锁等多层保护;2)氢气在充装过程中伴有温升,配套设置冷却设施、温度报警 及联锁保护;3)设备制造过程层层把关,出厂前有多项承压实验。所以高压储氢容器发生瞬时泄漏 的可能性较低,后续研究主要考虑由进出气管线脱落、仪表接口泄漏、安装缺陷等原因导致的氢气连 续泄漏。



图 3 高压储氢设施泄漏事件树 Fig.3 Event tree of leakage from high pressure hydrogen storage facilities

长管拖车是典型的高压储氢设施,目前为加氢站、油氢合建站输送氢气的长管拖车操作压力一般为 20 MPa,相比于其他高压储氢设施,长管拖车发生泄漏的风险更大,因为除了常规的设备制造、安装等原因可能导致泄漏外,长管拖车需要频繁连接软管进行装卸作业,软管发生破裂的事故时有发生。2020 年 7 月 30 日,东莞巨正源科技有限公司在氢气充装过程中金属软管突然断裂造成氢气泄漏,发生火灾,正在充装作业的 2 台高压管束车的管道、阀门等附件损坏^[11]。

本研究模拟场景为长管拖车在进行卸气作业时发生脱扣或软管断裂。结合设备厂家提供的技术参数、设备管口方位图等资料确定泄漏孔径、泄漏方向(假设在"防甩脱"设施作用下泄漏方向维持相对固定)、释放源高度等。泄漏模拟场景说明如下:泄漏孔径为 12.5 mm (1/2 寸),操作压力为 20 MPa,泄漏方向为 5 个,释放源高度为 1 200 mm,每个气瓶的容积为 18 m³,其中的氢气密度为 14.77 kg/m³ (30 ℃,20 MPa),总质量为 265 kg。泄漏方向示意见图 4。



图 4 泄漏方向示意 Fig.4 Illustration of leakage direction

3.模拟过程

采用快速网格工具划分网格,并对泄漏孔口附近的网格进行加密,最终网格数量为 1 024 000, 通过亚网格算法保证模型与网格的良好匹配。

湍流模型选择 k-ε 模型,速度与压力耦合计算采用 SIMPLE 算法,默认选取自适应时间步长和自适应库朗数,根据不同场景设置初始、边界等输入条件,风速和大气稳定度等参数根据油氢合建站所在地主导气象条件确定。选择氢气的体积浓度、速度矢量等参数作为输出结果。由于泄漏孔径较小, 泄漏模型选择稳态模型,输入泄放压力和温度,计算泄放速率。模拟过程首先建立风场,待风场稳定 后再发生泄漏,降低空气湍流对氢气扩散过程的影响。计算过程中实时监测速度、压力、氢气浓度等 参数,浓度场稳定后可停止计算,提高计算效率。

由于本研究旨在服务工程应用,所以研究重点为高压氢气泄漏后的宏观影响,如安全距离、作用 时间等,对于泄漏孔口附近的微观流场,模拟过程通过计算等效泄漏孔径、等效速度、等效温度和等 效密度等参数进行简化处理。

4.模拟结果与风险防控措施探讨

4.1 扩散

氢气在常温常压下的爆炸下限为体积分数 4%,在小于 4%的位置认为即使有点火源也不会发生火 灾、爆炸事故,因此本研究选择体积分数 4%作为衡量扩散后果严重程度的标准。图 5 为泄漏方向①~ ⑤不同时刻氢气体积分数 4%范围。氢气在压力作用下喷射而出,喷射过程中动能逐渐降低,而后在 空气浮力和风的作用下扩散、稀释。模拟结果表明,泄漏发生后,氢气体积分数达 4%的范围不断变 大,10 s 左右达到稳定,如果没有人员干预,随着长管拖车压力逐渐降低,该范围将缓慢缩小,直到 为零。

对比泄漏方向①~⑤在泄漏发生后 10 s 的氢气体积分数 4%范围,方向③、④、⑤朝向相对开阔 的区域,不易发生大范围的氢气积聚。而泄漏方向①和②分别朝向防火墙和地面,氢气的喷射受到限 制,在防火墙内侧、长管拖车底部等区域积聚,如果有静电等火源,可能发生气云爆炸事故,造成更 严重的后果。



图 5 不同泄漏方向在泄露后 1 和 10 s 时氢气体积分数达 4% 的范围 Fig.5 4% Hydrogen range of different leakage directions ①~⑤ at 1 and 10 s

泄漏发生后,及时有效的早期检测和预警可以防止事故的恶化。本研究在长管拖车泄漏场景中对 氢气泄漏检测的有效性进行分析,按照 GB/T 50493—2019^[12],要求在长管拖车卸气柱上方 2.0 m 内设 置氢气探测器,报警值为 25% 爆炸下限(LEL)。模拟结果表明,对于泄漏方向③、④、⑤,在卸 气柱上方 2.0 m 水平面氢气体积分数均未达到 25% LEL,即氢气探测器无法有效检测和预警。图 6 为 泄漏方向①和②卸气柱上方 2.0 m 水平面 25% LEL 氢气体积分数范围和速度矢量,说明对于泄漏方向 ①和②,将氢气探测器布置于卸气柱上方 2.0 m 水平面 25% LEL 氢气体积分数范围内,均可以有效检 测和预警。综合以上分析,如果仅按照 GB/T 50493—2019 的要求在释放源上方 2.0 m 布置氢气探测器,对于不同的泄漏场景,其早期探测的有效性必然受到影响。结合高压储氢设施压力较高的特点, 氢气泄漏后往往能显著改变周围环境的声压级,另外,高压氢气泄漏后,在逆焦耳-汤姆逊效应、摩 擦静电点火、扩散点火、瞬时绝热压缩、机械撞击等因素的共同作用下易自燃^[2]。因此对于开敞空间 的氢气设备,本研究建议采用氢气探测器、噪声型探测器和火焰检测器的组合探测方案,有助于发现 早期泄漏并及时预警。





4.2 喷射火

油氢合建站内高压氢气设施大多露天单层布置且相对分散,除长管拖车底部、压缩机撬内部等受限区域,氢气发生大规模积聚的可能性较低。另外,有研究表明,61.98%的氢气燃爆事故找不到点火源^[13],国内外学者普遍认为是发生了氢气自燃。尽管目前对氢自燃的机理还没有明确的结论,但是高压氢气泄漏后在没有点火源的情况下会发生自燃已成为大家的共识。因此喷射火是高压氢气泄漏后的重要事故形式,周边设备在喷射火直接炙烤下强度降低,可能导致事故后果进一步扩大。

本研究采用 API 579《适用性评估》(Fitness-For-Service, FFS)^[14]中不同过火温度下不同材料可能呈现的特征作为喷射火热辐射的破坏标准,如表 1 所示。长管拖车尾部发生喷射火时,主要考虑对邻近设备 90 MPa 储氢罐的影响,该设备为钢制材料,对于 730 ℃以上的过火温度,短时间的热辐射影响就有可能造成设备强度降低直至损坏。图 7 为泄漏方向①喷射火的不同温度范围,可以看出730 ℃影响范围已覆盖邻近的 90 MPa 储氢罐。

通常,现场人员接到火警后,实施切断、泄压、连接消火栓等一系列操作的时间大多在 15 min 以上,根据模拟结果,邻近设备在高温影响下发生损坏的风险较大。因此建议油氢合建站内高压储氢 设施设置自动冷却喷淋或遥控水炮,以确保发生事故时消防冷却系统的迅速响应与减灾。

Tab.1 Possible characteristics of different materials at different temperatures					
热影响分区	暴露温度 t/℃	材料	呈现特征		
Ι	<i>t</i> ≤35	无	无		
П	35< <i>t</i> ≤65	一般	 1)设备表面有烟熏痕迹 2)表面涂料、塑料等无损坏 		
III	65 <i>≤t</i> ≤205	乙烯基、醇酸树脂涂料	鼓泡、变黑		
		塑料	烧黑、熔化		
		铅锡焊料	熔化		
IV	205 <i>≤t</i> ≤425	有机材质覆层	鼓泡或烧毁		
		塑料、橡胶	熔化或烧黑		
		电缆覆层	烧毁		
		金属合金等	弹簧受热软化, 仪表、阀门等无法继续使用; 铝合金弯曲		
V	425≤ <i>t</i> ≤730	非金属材料	烧毁,铝熔化、银焊点熔化		
		照明灯玻璃	变形或熔化		
		钢结构	表面形成氧化层		
VI	t>730	铜或铜合金	熔化		
		锌	氧化呈白色颗粒或蒸发		
		钢结构	可能发生变形		

衣1 个问过火温度下个问材料可能呈现的特征	表1 不同过火温质	下不同材料	可能呈现的特征
-----------------------	-----------	-------	---------



(c) 730 ℃以上

图 7 泄漏方向①喷射火的不同温度范围 Fig.7 Different temperature ranges of jet fire in leakage direction ①

(b) 425 ℃以上

4.3 气云爆炸

(a) 205 ℃以上

根据前述分析,泄漏方向③、④、⑤朝向相对开阔的区域,不易发生大范围的氢气积聚。而泄漏 方向①、②氢气可能在防火墙内侧、长管拖车底部等区域聚集,发生延迟点燃导致气云爆炸的风险较 高。扩散计算结果表明,泄漏发生后,体积分数 4%的范围在 10 s 左右达到稳定,因此提取泄漏方向 ①、②在 10 s 时的气云进行爆炸后果模拟。该气云边界氢气体积分数为 4%,即爆炸下限 LEL,所以 在气云范围内点火理论上均可成功点燃,为模拟气云爆炸的最大后果,本研究选择在5个不同位置点 火以确定最大事故后果场景,点火点位置见图 8。



图 8 点火点位置示意 Fig. 8 Location of ignition point

为评估气云爆炸对长管拖车尾部防火墙以及站房的影响,在防火墙表面和站房迎爆面设置泄压板 以监测超压值的变化,相比于监测点,泄压板能够得到墙面不同位置平均压强随时间的变化规律。图 9为长管拖车尾部防火墙及站房迎爆面泄压板设置情况。



(a) 长管拖车尾部防火墙



图 9 泄压板设置情况 Fig. 9 Settings of pressure relief plate

图 10 为防火墙泄压板超压值与时间的关系。防火墙受到的超压形式主要为负压,且负压绝对值 高达 69 kPa,这主要是因为防火墙距离爆源中心较近,爆炸冲击波遇到墙体反射造成。



图 10 防火墙泄压板超压值与时间的关系 Fig.10 Overpressure value of the fire wall pressure relief plate at different times

图 11 为站房迎爆面 1 和 2 泄压板超压值与时间的关系。迎爆面 1 爆炸冲击波超压形式主要为正压,迎爆面 2 为负压,这与站房朝向与相对于爆源中心的位置有关。从超压绝对值看,迎爆面 1 受到的爆炸冲击波超压最大值为 10 kPa 左右,迎爆面 2 为 8.5 kPa 左右。当爆炸冲击波超压值为 6.9~13.8 kPa 时会造成建筑物中石棉板粉碎,钢板和铝板起皱,紧固失效,木板固定失效、吹落^[15],因此在该超压影响下,站房结构可能发生局部毁坏,内部人员受到伤害。



图 11 站房迎爆面泄压板超压值与时间的关系 Fig.11 Overpressure value of pressure relief plate on explosion face of the station at different times

图 12 为爆炸冲击波的"绕射"效应,从俯视和侧视两个视角均观察到爆炸冲击波从防火墙侧面和顶部绕过墙体。在工程中,如需使用隔离墙降低爆炸冲击波对站内脆弱目标的影响,首先隔离墙的强度应满足爆炸荷载的要求,另外,设计过程需考虑爆炸冲击波的"绕射"效应,评估隔离墙的高度和长度是否能够最大限度避免爆炸冲击波绕过隔离墙对墙后脆弱目标造成破坏。



图 12 爆炸冲击波"绕射"效应 Fig.12 The diffraction effect of the explosion shock wave

5.结 论

本研究使用某油氢合建站建设项目中的 1:1 模型进行建模开展数值模拟研究,相关成果可为油氢 合建站内风险防控措施的制定提供参考。主要研究结论有:

1.结合扩散模拟结果及高压储氢设施的特点,建议采用氢气探测器、噪声型探测器和火焰检测器 的组合探测方案,以及时有效的发现早期泄漏并预警。

2.发生喷射火时,邻近设备在高温影响下发生损坏的风险较大,建议油氢合建站内高压储氢设施 设置自动冷却喷淋或遥控水炮,确保发生事故时消防冷却系统的迅速响应与减灾。

3.隔离墙对扩散和喷射火有较好的防护作用,由于距离爆源中心较近以及爆炸冲击波的"绕射"效 应,如需使用隔离墙保护站内脆弱目标,应满足爆炸荷载要求并考虑爆炸冲击波"绕射"的特点。

参考文献:

- [1] 中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书(碳中和战略下的低碳清洁供氢体系) [EB/OL]. [2019-06-29]. http://h2cn.org.cn/.
- [2] 沈晓波, 章雪凝, 刘海峰. 高压氢气泄漏相关安全问题研究与进展[J]. 化工学报, 2021, 72 (3): 1217-1229.
- [3] 郑津洋, 刘子亮, 花争立,等. 氢安全研究现状及面临的挑战[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 106-115.
- [4] MIDDHA P, HANSEN O R, STORVIK I E. Validation of CFD-model for hydrogen dispersion [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(6): 1034-1038.
- [5] MIDDHA P, HANSEN O R, GRUNE J, et al. CFD calculations of gas leak dispersion and subsequent gas explosions: validation against ignited impinging hydrogen jet experiments [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 179(1): 84-94.
- [6] MIDDHA P, ICHARD M, ARNTZEN B. Validation of CFD modelling of LH2 spread and evaporation against large-scale spill experiments
 [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(3): 2620-2627.
- [7] VYAZMINA E, JALLAIS S. Validation and recommendations for FLACS CFD and engineering approaches to model hydrogen vented explosions: effects of concentration, obstruction vent area and ignition position [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(33): 15101-15109.
- [8] KIM S, LEE H J, PARK J H, et al., Effects of a wall on the self-ignition patterns and flame propagation of high-pressure hydrogen release through a tube [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 2049-2056.
- [9] 顾蒙, 王全国, 王溪舸,等. 油氢合建站氢气泄漏扩散模拟及影响因素分析[J]. 消防科学与技术, 2020, 39 (1):123-126.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部 GB 50516-2010, 加氢站技术规范(2021年版)[S]. 2021.
- [11] 广东省应急管理厅. 广东省应急管理厅关于东莞巨正源科技有限公司"730"氢气充装发生泄漏起火事故的通报. 粤应急函〔2020〕

 $326~{\ensuremath{\exists}}\xspace[EB/OL].$ [2020-08-04]. http://www.ichemsafe.com/info/3629.html.

[12] 住房和城乡建设部 GB/T 50493-2019, 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准[S]. 2019.

- [13] XU B P, WEN J X, DEMBELE S, et al. The effect of pressure boundary rupture rate on spontaneous ignition of pressurized hydrogen release [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(3): 279-287.
- [14] API 579-2016, Fitness-For-Service [S]. 2016.
- [15] 国家安全生产监督管理总局 AQ/T 3046-2013, 化工企业定量风险评价导则[S]. 2013.