

主编约稿

氢能制—储—运安全与应急保障技术现状与发展趋势

张来斌*, 胡瑾秋, 张曦月, 肖尚蕊

中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249

* 通信作者, zhanglb@cup.edu.cn.

收稿日期: 2021-04-09

中国工程院重大咨询项目(2020-ZD-023) 和国家自然科学基金资助(52074323) 联合资助

摘要 氢能零污染、零碳、无次生污染, 是公认的清洁能源, 被誉为 21 世纪最具发展前景的二次能源, 也是实现“碳达峰、碳中和工作”最富成效的技术方案之一, 氢能将成为我国能源体系的重要组成部分。然而氢能在制备、储运以及利用等环节, 基础设施关键零部件较多、系统复杂、用材特殊, 我国对氢能制—储—运安全与应急保障技术仍缺乏系统性研究, 落后于产业发展安全保障现实需求。本文系统性辨识了氢能源在制备、存储、输运以及供应等领域基础设施的安全现状、风险因素及面临的技术挑战, 从事故风险演化与灾变机理、安全评估与完整性、安全检测与监测预警、以及事故应急与保障机制等方面提出技术需求与发展建议, 为完善我国氢能制—储—运安全与应急保障技术体系提供参考。

关键词 氢能制—储—运; 故障模式; 风险因素; 监测预警; 安全与应急保障; 完整性

Research status and development trends of safety and emergency guarantee technology for production, storage and transportation of hydrogen

ZHANG Laibin, HU Jinqiu, ZHANG Xiyue, XIAO Shangrui

College of Safety and Marine Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Hydrogen (if manufactured with renewable energy) has zero pollution, zero carbon and no secondary pollution, is recognized as a clean energy carrier. It is known as the most promising secondary energy source in the 21st century, which also becomes one of the most effective technical solutions to achieve “carbon peaking and carbon neutralization”. Hydrogen will become an important part of China’s energy system. However, there are numerous complicated systems, components, and hazardous materials used in the infrastructure during preparation, storage, transportation, processing and utilization of hydrogen. There is still a lack of systematic research on the safety and emergency guarantee technology of hydrogen production, storage and transportation in China, which lags behind the practical requirements of safety guarantee for industrial development.

In this paper a systemic identification of safety status, risk factors and the technical challenges during preparation, storage, transport and supply infrastructure of hydrogen is carefully studied. The technical requirements and development planning are proposed including but not limited to the failure and accident mechanisms, safety and integrity assessment, safety inspection, monitoring and early warning, and the accident emergency and safeguard mechanism. It provides a theoretical basis for improv-

引用格式: 张来斌, 胡瑾秋, 张曦月, 肖尚蕊. 氢能制—储—运安全与应急保障技术现状与发展趋势. 石油科学通报, 2021, 02: 167-180

ZHANG Laibin, HU Jinqiu, ZHANG Xiyue, XIAO Shangrui. Research status and development trends of safety and emergency guarantee technology for production, storage and transportation of hydrogen. Petroleum Science Bulletin, 2021, 02: 167-180. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.02.014

ing the safety and emergency support technology system of hydrogen production, storage and transportation in China.

Keywords hydrogen production, storage and transportation; failure modes; risk factors; monitoring and early warning; safety and emergency protection; integrity

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.02.014

0 引言

随着世界能源需求的不断增长和化石能源引起的环境污染问题日益严峻, 新能源的开发与利用成为世界关注的热点。

2020年9月22日, 国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话, 指出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”。在2020年12月16日至18日北京举行的中央经济工作会议上, 国家主席习近平发表重要讲话, 部署2021年经济工作, 将“做好碳达峰、碳中和工作”确立为2021年的八项重点任务之一。

氢能零污染、零碳、无次生污染, 是公认的清洁能源, 被誉为21世纪最具发展前景的二次能源, 是实现“碳达峰、碳中和工作”最富成效的技术方案之一。氢能在解决能源危机、全球变暖及环境污染等问题方面将发挥重要作用, 并将成为我国能源体系的重要组成部分^[1-2]。预计2030年, 可用于氢能的氢气产能可达1000亿 m^3/a , 成为我国新的经济增长点和新能源战略的重要组成部分^[3-4]。预计2050年氢能可在我国能源体系中占比约10%, 氢气需求量约 $6000 \times 10^4 \text{ t}$, 年经济产值超过10万亿元; 将建设加氢站1000座以上, 10000万kW燃料电池发电厂, 3000 km以上氢气长

输管道, 交通运输、工业等领域氢能普及应用, 制造1000万辆燃料电池运输车辆, 燃料电池车(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)产量520万辆/年, 固定式发电装置2万套/年, 燃料电池系统产能550万套/年, 加氢站网络构建完成, 具有完善的氢燃料基础设施及基于氢能的分布式功能系统^[5]。

然而氢能产业链基础设施具有关键零部件多、系统复杂、用材特殊、加工条件严苛等特点(如图1所示), 我国相关核心技术和自主化设备研发技术较为薄弱。相对于FCEV、加氢站及相关产业的快速发展, 我国对氢能制—储—运安全技术的系统性研究相对匮乏, 落后于产业发展的现实需求, 尚不具备支撑产业安全、健康快速发展的能力^[6]。

氢气易燃易爆、燃烧范围宽(4%~75%)、点火能量低、扩散系数大且易对材料力学性能产生劣化影响, 在制备、储存、运输、加注和使用过程中均具有潜在的泄漏和爆炸危险^[7-8]。许多国际研究机构在氢能安全保障领域开展了一些前沿技术研究, 如澳大利亚麦考瑞大学的可持续能源研究中心(MQ-SERC)成立了氢安全研究方向, 开展了氢燃料电池汽车安全评价技术研究^[9], 并为国际新能源企业提供氢能应用安全方面的知识与技术咨询服务^[10]。日本横滨国立大学与龙野机电等企业共同开展了氢燃料汽车加油机安全距离



图1 氢能制—储—运关键基础设施

Fig. 1 Critical infrastructure of hydrogen energy production-storage-transportation

计算方法、加氢汽油发动机风险比等系列研究^[11-12]。日本国家先进工业科学技术研究所安全与可持续科学研究中心对加氢站(Hydrogen Refueling Station, HRS)运行过程中人的生命风险进行了定量评估,计算了3种事故情景的风险:分配器周围外部管道的氢气泄漏、蓄能器连接管道的氢气泄漏和加氢站压缩机/连接管道的氢气泄漏^[13]。

英国奥斯特大学成立了氢安全工程与研究中心(Hydrogen Safety Engineering and Research Centre, HyS-AFER),并陆续开展了氢气安全应用的数值模拟研究。首次制定了氢气安全模拟的最佳实践指南(Best Practice Guidelines, BGP),其涵盖了扩散、着火和爆炸等一系列现象^[14-15]。欧洲氢气安全委员会(EHSP)在澳大利亚举行的第八届国际氢气安全会议(ICHHS 2019)上讨论了从氢事件事故数据库(HIAD 2.0)中吸取的经验教训,并介绍了其制定的安全规划指南^[16-17]。该数据库是公开的,目的是促进提高氢安全意识,鼓励用户从他人的经验中获得氢安全相关知识。为进一步发展和传播氢安全知识以及协调氢安全领域的研究活动提供便利,欧盟成立国际氢安全协会“HySafe”,作为氢安全研究、教育和培训中心,促进氢安全知识的国际协调、发展和传播。与此同时,美国能源部西北太平洋国家实验室和美国化学工程师协会(AIChE)联合成立氢安全中心(Center for Hydrogen Safety, CHS)^[18],通过制定全面的安全指导和教育材料,确保氢作为可持续能源载体的安全使用,并为全世界的技术解决方案提供论坛。Barilo在发表的文章中也系统性阐述了美国能源部(DOE)燃料电池技术计划项目针对氢能研究、开发和示范、设计和制造、部署和运作等产业中氢能安全、规范和标准等方面取得的成功经验^[19]。

相比之下,我国氢能安全技术研究基础薄弱,氢能安全技术研究主要集中在氢燃料电池安全、氢/液氢泄漏与扩散行为、涉氢设备材料失效特性等基础领域^[20-21],研究力量分散、深度仍待加强。文献^[7]从氢泄漏与扩散、氢燃烧与爆炸、氢与金属材料相容性及氢风险评价等方面,系统总结了国内外氢安全研究面临的挑战,并对我国氢安全的发展提出了建议。

本文围绕氢能产业链中的重要生产环节与关键基础设施,系统性分析了我国氢能基础设施面临的风险因素以及安全保障技术瓶颈,从事务风险演化与灾变机理、安全评估与完整性、安全检测与监测预警,以及事故应急与保障机制等方面提出技术需求与建议,如图2所示,为完善我国氢能制—储—运安全与应急保障技术体系提供参考。

1 氢能制备基础设施安全现状及面临挑战

氢原子本身并不存在于自然界中,其倾向依附于化学化合物(例如水分子)、碳水化合物(糖、生物质)以及碳氢化合物(石油、天然气、沼气)等物质中的氧和碳原子。为了将氢从这些化合物中分离,可通过不同的途径制氢,例如电解/光解水制氢,利用生物质热物理化学法或生物转化途径转换制氢,以及针对化石燃料通过化学重整制氢。

通过化石燃料燃烧产生的氢气称为“灰氢”,这种类型的氢气约占当今全球氢气产量的95%。由水制氢的途径需要提供大量电能以通过电解将水分子裂解而将氢与水分离。如果使用可再生能源如风能、太阳能、海洋能等产生电力(碳排放为零),那么产生的氢是清洁的,也就是“绿氢”。“蓝氢”也由化石燃料产生而

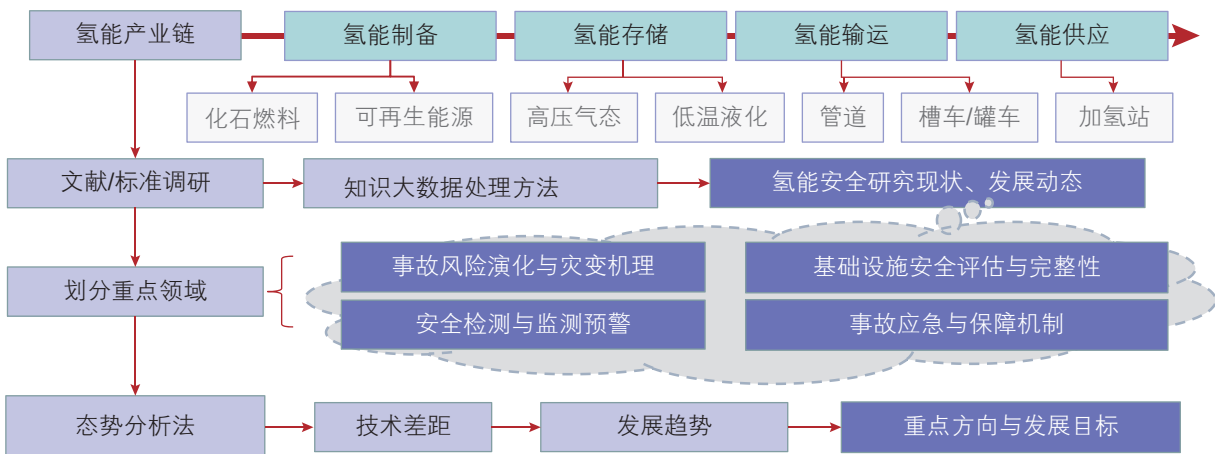


图2 氢能产业链关键基础设施风险因素与技术瓶颈分析

Fig. 2 Risk factors and technical bottleneck analysis of key infrastructure of hydrogen energy industry chain

来,但主要来源是天然气,并同时将二氧化碳副产品捕获、利用和封存(CCUS),从而实现碳中和。“蓝氢”是一种必要的技术过渡,有助于为绿色氢经济做好准备。随着时间的推移,制氢面临的挑战将是实现无碳或碳中和(绿色或蓝色氢)的技术替代。

(1)重大事故风险演化与灾变机理

在“灰氢”制备过程中,当前主要以石化燃料化学重整为主(占比80%),其中高温高压及氢能制取工艺流程风险因素复杂,容易导致反应容器完整性失效,进而引发危化品泄漏、火灾、爆炸等灾难性事故(见表1所示)。例如2020年1月广东省某重整装置发生爆燃事故^[22],200名消防员赶赴现场处置。事故原因是预加氢反应进料/产物换热器E202A-F与预加氢产物/脱水塔进料换热器E204AB间的压力管道(250P2019CS-H)90°弯头因腐蚀减薄破裂(爆裂口约950 mm×620 mm),内部带压(2.0 MPa)的石脑油、氢气混合物喷出后与空气形成爆炸性混合物,因喷出介

质与管道摩擦产生静电火花引发爆燃。

在“绿氢”制备过程中,电解水和光解水是目前理论上最理想的技术,但仍处于研究阶段,并集中于可再生能源等绿色制氢新技术、能源优化、国产制氢装备等方面的研究,在此方面存在的新兴安全风险仍缺乏系统性研究,与之相关的安全技术研究处于相对空白状态。本文对可再生能源制氢过程中基础设施设施的故障模式与风险因素进行了分析,如表2所示,对装备关键故障模式、退化与失效机理以及安全风险的系统性认知将是未来研究的重点。

在“蓝氢”的制备过程中,有两个关键环节,即“天然气制氢+碳捕获与储存(CCS)”。与“绿氢”相比,“蓝氢”具有两个明显的优势:电力需求较低,融入了碳捕获与储存(CCS)技术,这也是“蓝氢”与“灰氢”的不同之处。天然气制氢环节包括蒸汽重整、部分氧化、CO₂重整、催化裂解等主要技术^[37],其中面临的风险与“灰氢”制备过程相近。然而在CCS环

表1 制氢过程事故模式与风险因素分析

Table 1 Analysis of accident modes and risk factors in hydrogen production process

事故模式	风险因素
火灾危险性	<ul style="list-style-type: none"> · 由于制备的原材料(甲烷、天然气、重油、煤)均是可燃、易燃物质,有火灾爆炸危险 · 氢能制取所使用的化学反应除了会产生氢气外,还会产生一些附加产物,例如CO、CO₂等。这些产物常通过火炬点燃的方式销毁,需要动火作业,存在较高火灾风险 · 受到电力供应、天然气资源等各种条件限制氢气纯度不够高,易形成易燃混气
泄漏、爆炸危险性	氢能制取工艺流程较多,设备设施复杂,需要经过由气态到液态再到气态的多种状态转化,一旦管道或容器的安全监测及预警技术不到位易发生泄漏事故,加之工厂的环境温度较高,极易引发爆炸

表2 可再生能源制氢过程故障模式与风险因素

Table 2 Failure modes and risk factors in renewable energy hydrogen production process

故障模式	风险因素
设备本体腐蚀	压力容器材质与工艺介质可能发生化学反应,即压力容器本体材质腐蚀速率过快,其寿命远达不到设计寿命规定,导致容器在使用过程中腐蚀过快,出现泄漏,甚至爆炸等恶劣安全事故
裂纹、焊缝撕裂	压力容器使用过程中可能出现由未知因素导致的内部应力变化,出现容器壳体裂纹、管口根部焊缝撕裂、法兰垫片损坏泄漏等问题
冲蚀磨损	水电解制氢设备的气液出口存在严重的冲蚀磨损现象,且随着设备产气量的增大,磨损现象变得更严重
制氢机故障	在制氢过程中,氢气的分子小,一旦隔膜出现问题,氢分子将向氧室渗透,就会引起氢气纯度下降和制氢设备的极大危险
风力发电机故障	<p>叶片故障:叶片长期暴露在空气中,叶片表面往往会出现腐蚀、磨损等问题,从而导致风机的工作效率明显下降,引发一系列的故障^[34]</p> <p>齿轮箱故障:齿轮箱长期运行后,由于长时间摩擦将会导致内部温度急剧升高,进而降低润滑剂作用效果,从而导致机组载荷交替及工作速度发生改变</p> <p>电机故障:长期处于潮湿环境下,电机系统极易出现机械短路断路、轴承磨损过热等故障,并导致设备停机</p>
光伏阵列设备故障	常见的有电池板短路、开路,阴影故障和电池板老化故障等,进而引发电压扰动等异常工况 ^[35]

节，学者们关注的主要风险聚焦在CO₂地质封存阶段，研究的问题大致可以分为两类：一是潜在CO₂泄漏引发的健康安全环境风险；二是与地质封存场所相关的安全性问题^[36]。CCS环节安全风险问题详见表3所示。

(2)安全检测与监测预警

在天然气等化石能源重整制氢过程的安全监测预警方面，存在异常工况多样且有效样本稀少、设备性能及原料性质变化引起数据“噪声”干扰等问题，易引发大量误报警及延迟报警，如图3所示。同时，操作调节频繁且与异常工况耦合互扰，急需增强早期监测预警能力，针对突发事件提高实时分析、集中研判能力。因此，大规模集中制氢系统风险实时评估与早期预警成为氢能制备基础设施安全保障的关键技术挑战。

风电等可再生能源的随机性、不稳定性、波动性较大，而水电解制氢设备对电能质量的稳定性要求较高。频繁的电力波动会对设备的运行寿命及氢气的纯度质量造成影响，急需有效、精准、低成本、智能化的设备运行监测诊断及寿命动态预测技术、环境危险

气体的智能检测监测设备以及制氢设施缺陷检测技术与智能化装备，如图4所示。

(3)关键设施安全评估及结构完整性

氢能生产过程中器件易发生腐蚀与损坏，涉氢设施与材料的失效机理、损伤扩展机理以及缺陷定量评估尚缺乏完备的理论依据与实验支撑条件。涉氢设备、材料和部件的安全可靠性测试评估方法和检测认证手段缺乏，涉氢设备、管线、阀门、储氢罐等的缺陷评估标准与完整性管理体系急需包括实际应用过程的所有事故场景。

(4)事故应急与风险控制

最具前景的PEM电解制氢，其设备简单、占地面积小、应用条件灵活且装运方便(可以设计成可移动款式，搭建分布式制氢站点)，非常适合在大城市、临时场景、独立的产业园区中使用。然而我国社区与人口特点与国外社区布局具有显著差异，国外标准无法直接应用，我国分布式制氢站的风险防控与应急处置需结合我国自身国情特点，如图5所示。现场应急处置关键参数(氢气泄漏扩散浓度的分布、人员疏散范围、疏散路径等)急需结合我国城镇布局进行科学量

表3 CCS环节安全风险问题

Table 3 Safety and risk hazards during CCS stage

关注的主要风险类型	具体风险因素
CO ₂ 泄漏引发的健康安全环境风险	例如，在CO ₂ 地下封存环节，CO ₂ 经由某些不确定因素可能发生缓慢而持续的泄漏，如果泄漏的CO ₂ 在低凹区域积累到一定浓度，可能危害人员或生态健康；CO ₂ 在地下运移可能对上层水质、土壤以及其他能源矿区等资源环境造成污染
地质封存的安全性问题	例如，CO ₂ 在地下储层的运移行为、注入井和泄漏井的完整性问题、储层的断裂以及盖岩完整性问题等
CCS技术其他风险	CO ₂ 高压运输过程风险、CCS选址与封存过程操作安全问题、污染物监测与预警等

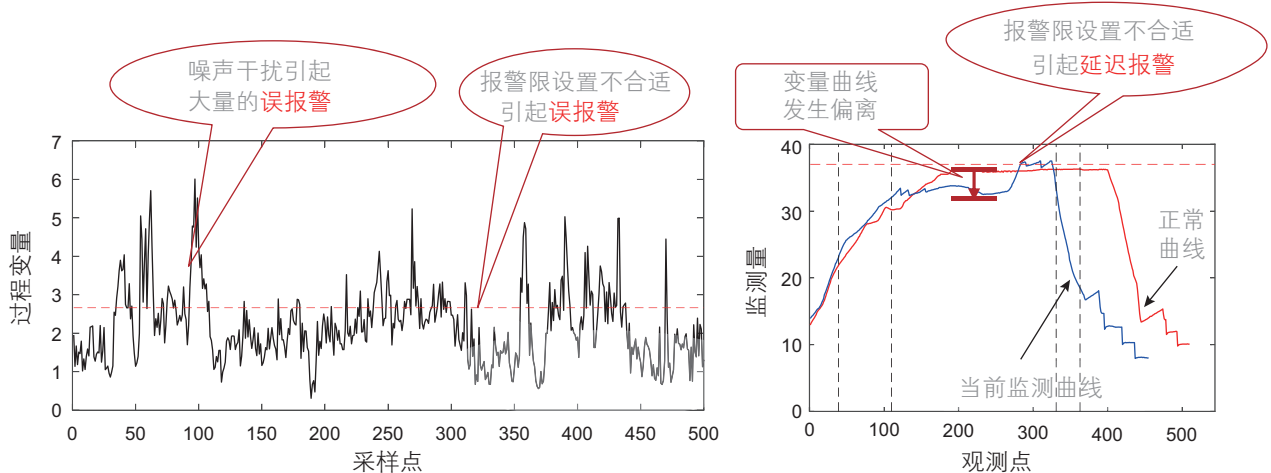


图3 异常工况及安全监测预警面临的挑战

Fig. 3 Challenges faced by abnormal working conditions and safety monitoring and early warning

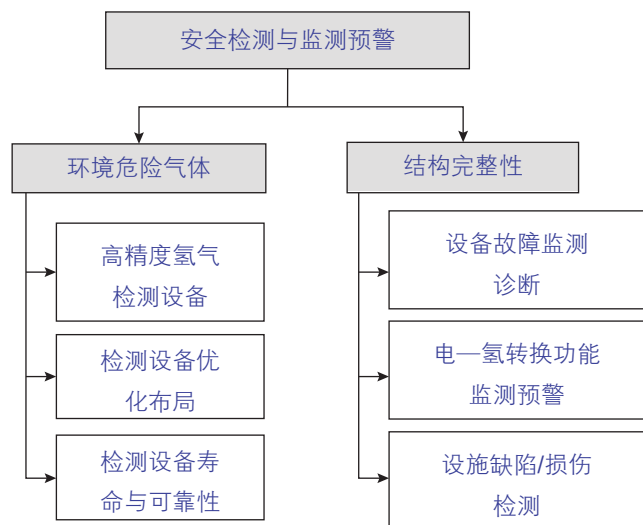


图4 环境危险气体的检测及制氢设施缺陷检测技术与智能化装备

Fig. 4 The detection and monitoring and the defect detection technology and intelligent equipment of hydrogen production facilities of environmental dangerous gases

化, 目前仍缺乏多源灾害场景应急疏散过程中对人员风险的系统认知。

2 氢能源存储基础设施安全现状及面临挑战

高效利用氢能源的关键在于氢气的储运, 同时它也是影响氢能向大规模方向发展的重要因素。氢

气储存的主要途径为氢气经由压缩或液化的纯氢储存、地下储存氢、储氢合金(金属氢化物)储存, 以及转化成天然气等燃料气后管网输运或储存, 见表4所示。

(1) 重大事故风险演化与灾变机理

典型储氢过程中存在的风险因素如表5所示。其中: 储氢设施内胆腐蚀和氢脆、疲劳、氢气渗透等问题将造成设施局部塑性下降, 裂纹拓展速度增快, 甚至会严重影响储氢设施的服役寿命并引发泄漏事故。针对氢气泄漏机理与扩散行为, 如氢气突发泄漏与扩散机理研究仍面临挑战, 包括泄漏口形状、障碍物、氢浓度梯度及空气浮力对氢泄漏扩散的影响规律; 泄漏模型优化及峰值压力预测方法; 多处泄漏时不同氢射流之间的相互作用与影响等问题^[7]。

(2) 安全检测与监测预警

氢在受限空间内泄漏后, 易发生氢气的积聚, 形成可燃氢气云。氢燃烧范围宽, 点火能量低, 若泄漏后被立即点燃会形成射流火焰(氢喷射火)。因此, 氢能源的分布式存储急需不断发展复合检测监测技术、远程自动监测与安全大数据分析技术。另一方面, 氢能存储形式多样、环境与条件苛刻, 安全操作与及时预警难以得到有效保障, 急需形成氢能存储安全信息“智能采集—高效传输—快速融合—智慧决策—早期预警”一体化技术, 见图6所示。

(3) 关键设施安全评估及结构完整性



图5 社区结构特点不同对搭建分布式制氢站点的安全保障提出更高的要求

Fig. 5 The different characteristics of community structure put forward higher requirements for the safety of distributed hydrogen production stations

表4 氢气储存方式优缺点分析

Table 4 Analysis of advantages and disadvantages of hydrogen storage

储氢技术	优点	缺点
气态储氢	技术成熟, 成本低	密度低, 体积比容量小, 安全隐患较高
液态储氢	密度高, 体积比容量大, 储运简单	制冷能耗大, 成本高, 易挥发
固态储氢	体积比容量大, 可提纯氢气	储氢材料质量重, 储—放氢存在约束, 成本高

表 5 典型储氢过程中存在的风险因素

Table 5 Risk factors for typical hydrogen storage processes

典型过程	风险因素
存储过程	<ul style="list-style-type: none"> · 内胆腐蚀和氢脆：特别是当存储的氢气含有腐蚀性杂质时，问题更为突出；氢脆一旦形成会使得钢瓶的储存安全性能降低，最终导致氢气泄漏，造成火灾发生 · 疲劳：存储系统需要重复装载氢气，对容器的疲劳寿命要求高，但金属内胆的抗疲劳性能不足 · 在高压情况下，金属内胆的复合材料容器也存在氢气渗透问题：氢气在快速充装过程中会出现显著升温，对复合材料的树脂黏合剂产生影响，从而导致其出现剥离现象，使得容器承载能力及使用安全性降低
装卸过程	<ul style="list-style-type: none"> · 储氢罐多次重复利用，产生细微裂缝或磕碰摩擦，极易发生爆炸 · 在氢气装罐的过程中，含杂质比如含氧量稍高的氢气会留在储氢罐中，几次往复后若不及时检查余气，储氢罐中的氢气纯度会降低，致使氢气不纯而形成易燃混合气体
压力级制转变	<ul style="list-style-type: none"> · 为了实现快速充装，氢气储存压力级制正在从 35 MPa 向 70 MPa 发展 · 临氢零部件、管路和储罐长期暴露在高压氢气环境中，高强度钢的抗氢脆性能也随着强度的增大而下降，造成局部塑性下降，裂纹拓展速度加快，疲劳寿命变短
液化过程	<ul style="list-style-type: none"> · 氢气在零下 253 °C 的临界温度下进行液化储存，一旦周围保温层破坏使得环境温度升高，会导致储存容器内部的液化氢快速气化，瞬间产生强大的压力，发生爆炸

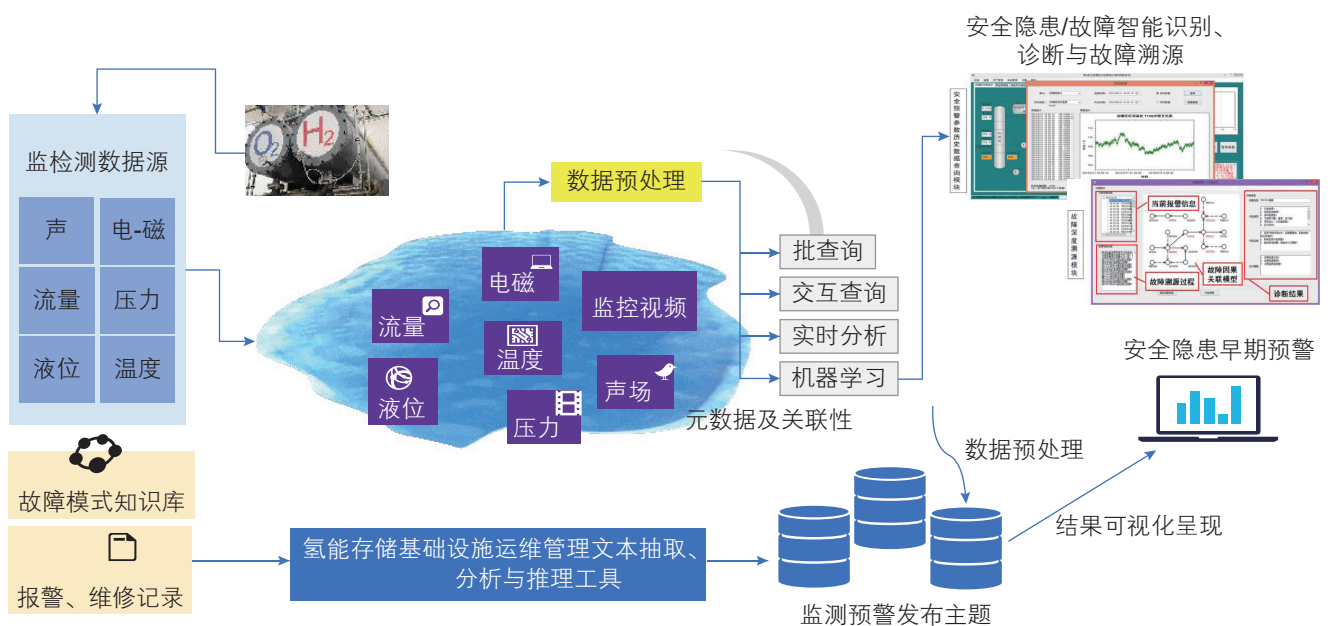


图 6 氢能存储安全信息“智能采集—高效传输—快速融合—智慧决策—早期预警”一体化技术架构

Fig. 6 “Intelligent acquisition-efficient transmission-fast fusion-intelligent decision-early warning” integrated technical framework for safety information of hydrogen energy storage

金属材料长期在氢环境下工作，会出现性能劣化的现象，严重威胁氢系统的服役安全。我国已陆续建立了氢气储存输送系统安全相关标准，但相比国际及美国标准的系统性及完备性(见表 6 所示)我国行业与企业标准仍需要不断完善。

国际首个氢能系统定量风险评价工具^[23-25]“Hy-RAM”集成了与氢安全相关的最先进、经验证的科学和工程模型及数据。该工具包提供了一种标准方法，用于氢燃料和储存基础设施定量风险评估(QRA)和后

果分析，其包含 9 种类型的氢气系统设备故障的一般概率、氢气点火的一般概率以及热流和压力对人和结构影响的概率模型。

在氢能存储关键设施安全评估及结构完整性领域，主要面临的挑战包括：需加强与完善氢与储氢材料之间的相容性试验，建立适用于我国国产装备的氢气存储设施安全及完整性评估标准；评估模型的准确性、氢系统结构失效/泄漏频率等方面的有效数据、变工况下储氢设施动态安全评估理论体系等。

表 6 氢气储存输送系统安全相关标准

Table 6 Safety Standards of hydrogen storage and delivery systems

国际及美国标准(部分)	我国标准(部分)
· 国际标准 ISO 11114-4: 2017《移动气瓶——气瓶及瓶阀材料与盛装气体的相容性》	· GB/T34542.2—2018《氢气储存输送系统——第2部分:金属材料与氢环境相容性试验方法》
· 美国标准 ASMEBPVC-VIII-3 KD-10《临氢容器的特殊要求》	· GB/T34542.3—2018《氢气储存输送系统——第3部分:金属材料氢脆敏感度试验方法》
· 美国标准 AN-SI/CSA CHMC 1—2014《金属材料与高压氢气环境相容性试验方法》	
· 美国标准 ASTM G142—98(2016年修订)《高压或高温条件下金属材料与氢环境相容性的标准试验方法》	

(4) 事故应急与风险控制

2020年—2050年氢能产业成为我国产业结构的重要组成部分,氢能存储(含便携移动式)设施将深入城市中心等人群居住密集区。一旦发生突发事件,将造成严重后果并产生危害公共安全的衍生事故,对城市居民日常生活带来极大风险。目前仍缺乏对氢泄漏等事故的全过程性研究,需重点加强对储氢设施破坏形式、泄漏、扩散、燃烧或爆炸全过程的事故演变规律研究,应急维抢修风险计算模型与评估方法研究,以及建立全方位、立体化、智能化的氢能存储设施安全与应急保障支撑体系。

3 氢能源输运基础设施安全现状及面临挑战

国际上氢气输运方式包括长管拖车气态输运、液氢罐车输运和管道输运等,如表7所示。2019年,美国、韩国、挪威分别在氢输运、加注等过程发生了氢安全事故,导致当地宣布暂停加氢站运营,引发了业界对氢能利用安全技术研究的重视与关注。

(1) 重大事故风险演化与灾变机理

利用已有相对完善的天然气管道设施,掺入一定比例的氢气进行传输^[29],已成为欧美各国的研究热点,为传统油气行业参与氢能产业、获得效益增长点提供

表 7 氢气输运方式及优缺点分析

Table 7 Advantage and disadvantage analysis of different hydrogen transportation types

运氢技术	优点	缺点
长管拖车运输	技术成熟,运输灵活	运输量小,压力高(20~70 MPa),不适合远距离运输
液氢槽车运输	容量高,适于中等距离运输	液化成本及能耗高,压力高,易爆
管道运输(含依托天然气管网的氢气与天然气混输)	运输容量大,适用于较远距离运输	一次性投资高,需防范氢脆现象

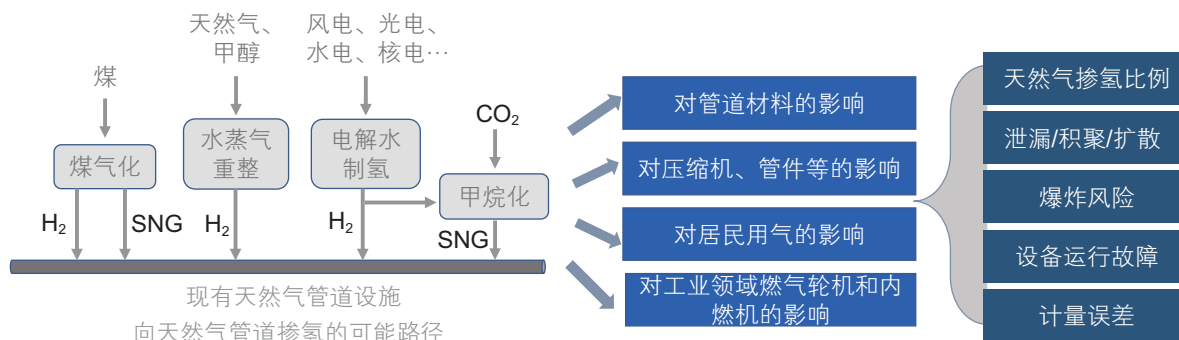


图 7 管道掺氢输运风险因素及挑战

Fig. 7 Risk factors and challenges of hydrogen-doped pipeline transportation

了宝贵机遇。我国在此领域的研究尚未覆盖各项风险因素(如图7所示),安全保障技术缺少相应的标准规范。面临的主要挑战包括:掺氢后对管道材料、压缩机和管件等附属设施的影响,对居民、燃气轮机和内燃机等下游用户的影响,对管道泄漏与运行安全的影响等风险及其演化与灾变机理缺乏科学系统的认知。

(2) 安全检测与监测预警

长管拖车气态输运、液氢罐车输运过程中,交通状况、人员操作及周边环境多变,突发事件具有随机性。智能化检测技术多集中于搭建远程车载监测设备、5G通信以及对数据的低层次统计分析,缺乏对新型运输装备故障模式、人员违章操作等安全隐患的智能预警与风险溯源。

管道施工过程中需加强对掺氢管道焊缝、无损检测的管理,适当加大埋深,开展穿越公路、铁路、街道时套管加设排气管等风险控制技术与装备研究。运营时需加强对管道泄漏的实时在线检测,建立掺氢天然气泄漏早期预警与应急保障体系。

在氢能输运基础设施安全检测与监测预警领域面临的主要挑战包括:已有安全监控系统以信号监测为主,缺乏逻辑分析推理能力;智能化程度低,过多依赖案例支撑,案例少,智能化水平低;故障发生后,过多依赖专家经验,现实是企业一般缺少相关的专家;缺少相关的失效数据支撑,氢能设施备品备件管理难度大;设备安全监管覆盖不足,高危区域设备人员检查不便,设备运行状态监督面临难题。

(3) 关键设施安全评估及结构完整性

将可再生能源制得的氢气掺入现有的天然气管线

进行输送,能够大幅度地节约管道建设成本,但材料与掺氢天然气之间的相容性需要系统深入地评估。国内已开展了一些重要的探索性研究,例如赵永志等^[26-27]总结了掺氢天然气与配送管道、长距离输送管道及管网其他设备(储存设备、动设备)的相容性,认为对长距离高压输送管道的影响程度主要取决于管道操作压力和掺氢比例。蒙波^[28]针对掺氢天然气高压输送管道的安全性问题进行研究,得到了X70、X80管线钢在不同掺氢比例下的力学性能劣化规律。然而在此领域仍然面临的主要挑战包括:临氢环境下裂纹萌生和扩展机理;氢环境与材料相容性数据库的完善(氢环境包括氢气环境和掺氢天然气环境,材料包括金属材料和非金属材料);零部件材料和制造工艺对其抗氢脆性能的影响;国际统一的氢与材料相容性试验标准、掺氢天然气储输标准等^[29]。

对于在运行的天然气管道掺氢,不同管道的服役年限、材料等都会对掺氢比例有不同影响,对已有设施和下游用户的影响也不同,应建立适应不同场景的掺氢可行性的评估标准和评估方法。对于新建的天然气管道,尤其是中低压管道,在设计时可以考虑掺氢。从设计源头就把掺氢的影响考虑在内,如在管道材料选择时考虑耐氢脆的低合金钢,对掺氢比例耐受范围进行模拟和评估。在上述领域面临的主要挑战包括:急需典型氢应用场景下(高压氢气输运、液氢输运、掺氢天然气输运等)氢事故的QRA评估方法;形成氢系统综合风险评价方法,以及氢能输运基础设施服务网络重大危险源辨识方法;构建风险量化计算与评价指标体系,同时建立有效的事故缓解方法和应急安全



图8 氢能输运协同应急与智慧决策关键技术

Fig. 8 Key technology of coordinated emergency response and intelligent decision making for hydrogen energy transportation

响应机制等。

(4) 事故应急与风险控制

氢能输运事故处置应急不仅需要专业的维抢修队、管道及罐车抢修设备,同时需要社会依托资源的协助,在此领域急需建立氢能输运协同应急与智慧决策大数据平台及相应的关键技术支撑,如图8所示。

4 氢能源供应基础设施安全现状及面临挑战

截止2019年底,全球已建成432座加氢站,其中欧洲177座,亚洲178座,北美74座^[30]。以气氢加氢站为主,加注压力多为70 MPa,液氢加氢站约占30%。建站方式正由单一加氢站向加氢/加油(气)、加氢/充电等合建站方向发展。目前氢能源供应标准法规仍有待完善,试验能力基础欠缺。加氢站建设及运营规范、70 MPa IV型氢瓶标准等还有待完善。

(1) 重大事故风险演化与灾变机理

在密闭空间下,氢气的燃烧速度约为天然气和汽油的7倍,氢气比其他燃料更容易发生爆燃甚至爆轰。氢燃料电池汽车最大的潜在风险是在密闭的车库内氢气发生缓慢泄漏,逐渐累积导致着火或爆炸。司戈^[31]指出以下4种失效会产生严重的氢泄漏事故:①燃料管路或元件的密封失效;②探测氢和切断氢管路的传感系统失效;③储氢瓶上的流量阀失效;④控制燃料电池氢流量的计算机程序失效。因此,结合氢燃料电池的应用场景,氢气在隧道、地下停车场、社区车库等受限空间的泄漏扩散规律仍有待深入研究。

另一方面,我国已建立的车用氢能安全法规标准在科学性和完整性等方面仍需进一步发展和提升。目前我国FCEV相关的标准制定由国家标准化委员会下

设的若干标准技术委员会负责,主要涵盖整车标准、燃料系统、基础设施、通用基础等方面。这些标准以借鉴、参考、翻译国外标准为主,缺乏足够的实验数据和必要的安全技术研究支撑^[6]。因此,急需围绕我国氢能的应用场景特点,开展不同工况下的氢能应用安全风险评估、测试、以及标准规范研制等研究工作。

(2) 安全检测与监测预警

我国应急管理部天津消防研究所等单位开展了加氢站事故风险与消防安全技术研究^[32],对加氢站氢泄漏、火灾、爆炸风险进行了梳理分析,并提出了加氢站不同区域的消防安全措施和未来发展方向。中国石化等单位对氢燃料电池汽车加氢站相关标准进行了分析^[33],针对我国加氢站建站模式、等级划分、平面布置、管道铺设、压缩机设置、建筑及安全设施等问题,对我国加氢站设计与建设标准的制定提出了合理化建议。

加氢站是建设氢能社会的重要环节之一,其安全问题一直受到全社会的高度关注。针对我国加氢站建站的实际情况,建设FCEV与加氢站设备设施检测数据、设备运维管理数据管理与分析中心,研发基于人工智能、大数据的智能诊断技术,建设智能诊断系统,实现氢能供应基础设施健康监测、设备生命周期健康评估、故障预警实时提示、加氢站安全隐患智能视频监控及预防维护优化决策,成为氢能安全、高效、可靠应用领域急需解决的关键技术,如图9所示。

(3) 关键设施安全评估及结构完整性

我国目前尚不具备国外普遍使用的FCEV供氢系统装备的产业化能力,国外供氢系统压力普遍是70 MPa,由于技术和制造能力限制,我国FCEV用氢压力为35 MPa。35 MPa供氢压力极大降低了FCEV的

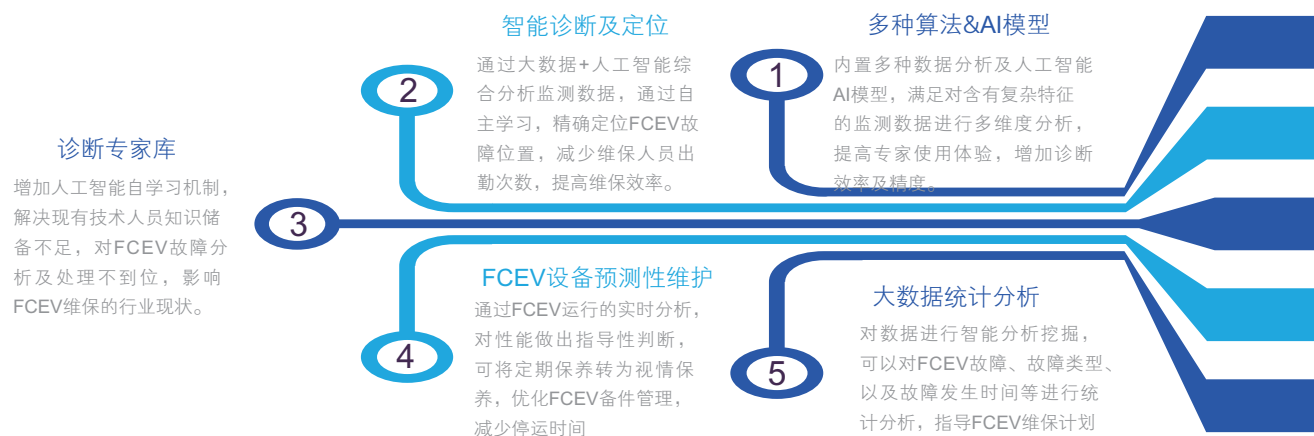


图9 FCEV与加氢站设备设施安全检测与监测预警关键技术发展趋势

Fig. 9 Development trend of key technologies for safety detection, monitoring and early warning of FCEV and hydrogenation station equipment and facilities

行驶里程，增加了氢气的储存运输成本，未来采用 70 MPa 系统是必然趋势，急需建立可靠的检验测试方法和相应的标准体系。我国已有一些企业成立了试验中心开展相关的研究工作，例如，长城氢能已建设燃料电池试制车间、燃料电池试验中心、储罐试制车间、储罐安全性试验中心、70 MPa 加氢站、理化试验室。在储氢安全性、燃料电池、系统性能、整车性能等领域具备先进的检测能力。未来急需更多的产—学—研联合科研机构共同研发针对加氢站关键涉氢设备、材料和部件的安全可靠性测试方法和检测认证体系，涵

盖燃料电池安全、整车安全、储氢罐安全以及全生命周期安全与完整性保障体系。

(4)事故应急与风险控制

加氢站突发事故具有复杂性、不确定性、随机性等特点，需要建立合理、有效的应急预案和人员疏散方案，对加氢站泄漏等突发事故及其次生衍生的风险进行科学预测与防控。实现由氢气泄漏单一灾害的应急向灾害链复杂演变及其协同应急技术转变，为城市氢能供应安全风险防控与应急提供基础理论、方法、模型、分析软件和应急决策支持系统。

表 8 氢能产业链不同环节安全保障技术需求和难点

Table 8 Technical requirements and difficulties of safety assurance in different stages of hydrogen energy industry chain

安全保障领域	氢能制备	氢能储存	氢能运输	氢能供应
重大事故风险演化与灾变机理	★ ★	★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★
安全检测与监测	★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★
实时风险感知与智能预警	★ ★	★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★
关键设施健康状态及结构完整性	★ ★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★	★ ★
事故预防与控制	★ ★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★
应急技术及装备	★ ★	★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★
安全标准化与保障机制	★	★ ★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★

注：(热点/难点：★ ★ ★；热点/非难点：★ ★；一般：★)

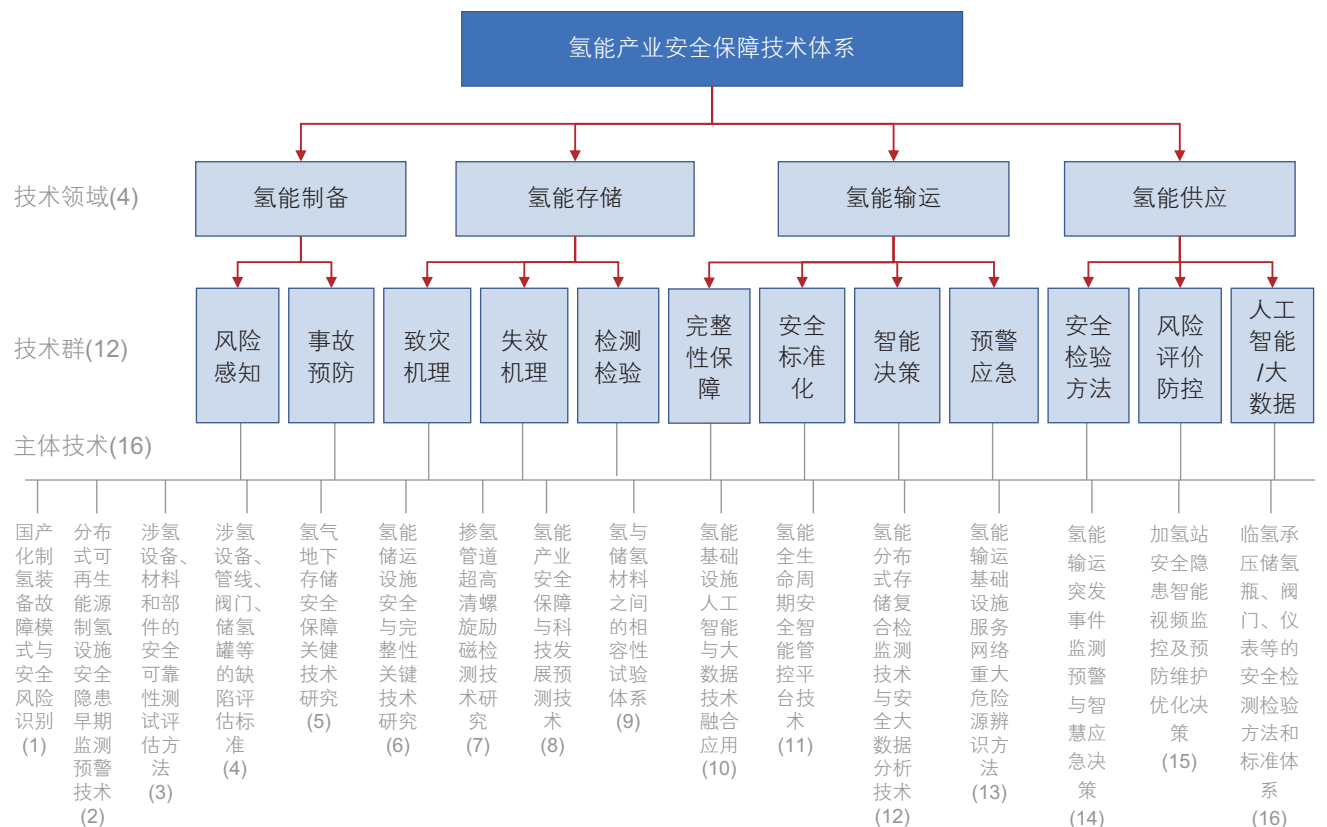


图 10 氢能产业安全保障技术体系发展建议

Fig. 10 Development suggestions of safety guarantee technology system for hydrogen energy industry

5 技术需求分析与发展建议

综合上述对氢能源在制备、存储、输运以及供应等领域基础设施的安全现状、风险因素及面临的技术挑战等系统性辨识,本文进一步从事事故风险演化与灾变机理、安全评估与完整性、安全检测与监测预警,以及事故应急与保障机制等方面提出技术需求与发展建议,如表8所示,可见在氢能产业不同环节和生命周期中,技术需求和难点分布也各有侧重点。例如,在氢能制备领域,关键设施健康状态及结构完整性、事故预防与控制是难点和热点问题。而在氢能储存领域,安全检测与监测、关键设施健康状态及结构完整性、事故预防与控制,以及安全标准化与保障机制成为难点和热点问题。

针对氢能产业链不同环节安全保障技术需求和难点,提出氢能产业安全保障技术体系发展建议如图10所示,包含4大技术领域,12项主体技术群,以及16项关键技术,并将各项关键技术与国际研究现状进行技术水平对标,见图11所示,其中有5项技术与国外存在差距,包括:涉氢材料、部件等的安全可靠测试评估方法、氢能分布式存储复合检测监测技术等;5项技术与国际同步发展,包括:氢能储运设备设施安全与完整性管理技术等;6项技术国际领先水平,包括:氢能输运过程突发事件监测预警与智慧应急决策等技术。

根据上述技术需求分析,提出我国2020年——2035年期间在氢能制—储—运安全与应急保障技术发展建议,如表9所示。2020年——2025年期间,重点开展支撑能力建设,包括:氢能安全研究与总体



图 11 我国氢能安全保障技术与国际技术水平对标

Fig. 11 China's hydrogen energy safety technical planning and international technical standards

表 9 我国 2020 年——2035 年期间在氢能制—储—运安全与应急保障技术发展建议

Table 9 Development suggestions for hydrogen energy production-storage-transportation safety and emergency support technology in the Period of 2020–2035 in China

时间	发展阶段	任务与目标
2020 年——2025 年	支撑能力建设	<ul style="list-style-type: none"> · 总体规划设计, 加大科技投入 · 国家氢能安全重点实验室 · 修订与完善氢能安全标准体系
2025 年——2030 年	机理与技术装备研究	<ul style="list-style-type: none"> · 氢能“制储运”事故与风险演化机理 · 安全应急与风险防控技术与装备 · 氢能全生命周期安全智能管控平台技术
2030 年——2035 年	融合应用与保障体系研究	<ul style="list-style-type: none"> · 氢能基础设施人工智能与大数据技术融合应用 · 氢能基础设施本体安全与完整性保障体系

规划设计, 加大科技投入, 规划国家氢能安全重点实验室, 开展氢能安全标准体系的修订与完善。2020年—2025年期间, 重点开展氢能制—储—运关键设施安全机理与技术装备研究, 包括: 氢能“制储运”事故与风险演化机理, 安全应急与风险防控技术

与装备, 以及氢能全生命周期安全智能管控平台技术研发。2020年—2025年期间, 重点开展融合应用与保障体系研究, 包括: 氢能基础设施人工智能与大数据技术融合应用, 以及开展氢能基础设施本体安全与完整性保障体系等研究。

参考文献

- [1] 李争, 张蕊, 孙鹤旭, 等. 可再生能源多能互补制—储—运氢关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2020, 35(23): 225–241. [LI Z, ZHANG R, SUN H X, et al. Review on key technologies of hydrogen generation, storage and transportation based on multi-energy complementary renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(03): 446–462.]
- [2] 陈长聘, 周克仲. 燃料电池迅速发展给氢能产业带来的机遇与挑战[J]. 氯碱工业, 2004, (3): 1–4. [CHEN C P, ZHOU K Z. The rapid development of fuel cell brings opportunities and challenges to hydrogen energy industry[J]. Chlor-Alkali Industry, 2004, (3): 1–4.]
- [3] 中投顾问. 2021—2025年中国氢能行业投资分析及前景预测报告[M], 中投产业研究院. [Zhong Tou Gu Wen. Report on investment analysis and prospect forecast of China hydrogen energy industry (2021–2025) [M], The ZhongTou Academy of Industry Economy Research]
- [4] 丁振森, 王佳, 姚占辉, 等. 多视角下中国氢能与燃料电池电动汽车发展研究[J]. 中国汽车, 2020, (09): 32–37. [DING Z S, WANG J, YAO Z H, et al. Research on the development of hydrogen energy and fuel cell electric vehicles in China from different perspectives[J]. China Auto, 2020, (09): 32–37.]
- [5] 中国产经新闻网. 着眼“氢”时代 中国燃料电池前景广阔[EB/OL]. [2019–04–13]. <http://www.cien.com.cn/2019/0413/59320.shtml>. [China Sankei News Network. Focus on the “hydrogen” era, China’s fuel cell has a bright future[EB/OL]. [2019–04–13]. <http://www.cien.com.cn/2019/0413/59320.shtml>.]
- [6] 曹湘洪, 魏志强. 氢能利用安全技术研究与标准体系建设思考[J]. 中国工程科学, 2020, 22 (5): 144–151. [CAO X H, WEI Z Q. Technologies for the safe use of hydrogen and construction of the safety standards system[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 144–151.]
- [7] 郑津洋, 刘自亮, 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. [ZHENG J Y, LIU Z L, HUA Z L, et al. Research status-in-situ and key challenges in hydrogen safety[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 106–115.]
- [8] AYVAZ M, AYVAZ S, AYDIN İ. A novel method for determining effects of fire damage on the safety of the Type I pressure hydrogen storage tanks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(44): 20271–20283.
- [9] FOORGINEZHAD S, MOHSENI-DARGAH M, FALAHATI Z, ABBASSI R, RAZMJOU A, ASADNIA M. Sensing advancement towards safety assessment of hydrogen fuel cell vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2021, 489(31): 229450.
- [10] https://www.mq.edu.au/research/research-centres-groups-and-facilities/secure-planet/centres/sustainable-energy-research-centre/_nocache.
- [11] HIRAYAMA M, SHINOZAKI H, KASAI N, OTAKI T. Comparative risk study of hydrogen and gasoline dispensers for vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, \ 43(27): 12584–12594.
- [12] HIRAYAMA M, ITO Y, KAMADA H, KASAI N, OTAKI T. Simplified approach to evaluating safety distances for hydrogen vehicle fuel dispensers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(33): 18639–18647.
- [13] TSUNEMI K, KIHARA T, KATO E, KAWAMOTO A, SABURI T. Quantitative risk assessment of the interior of a hydrogen refueling station considering safety barrier systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(41): 23522–23531.
- [14] TOLIAS I C, GIANNISSI S G, VENETSANOS A G, et al. Best practice guidelines in numerical simulations and CFD benchmarking for hydrogen safety applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(17): 9050–9062.
- [15] SAFFERS J B, MOLKOV V V. Hydrogen safety engineering framework and elementary design safety tools[J]. International Journal of Hydrogen Energy. 2014, 39(11): 6268–6285.
- [16] CRISTINA G M, PAPANIKOLAOU E, BARALDI D, et al. HIAD – Hydrogen incident and accident database [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(22): 17351–17357.
- [17] THOMAS J, PAUL A, INAKI A, et al. Achievements of the EC network of excellence HySafe[J]. International Journal of Hydrogen Energy. 2011, 36(3): 2656–2665.
- [18] Center for Hydrogen Safety: www.aiche.org/CHS.
- [19] BARILO N F, WEINER S C, JAMES C W. Overview of the DOE hydrogen safety, codes and standards program part 2: Hydrogen and fuel cells: Emphasizing safety to enable commercialization[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(11): 7625–7632.
- [20] TANG X, PU L, SHAO X, et al. Dispersion behavior and safety study of liquid hydrogen leakage under different application situations[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(55): 31278–31288.

- [21] WANG K, ZHANG X, MIAO Y, et al. Dispersion and behavior of hydrogen for the safety design of hydrogen production plant attached with nuclear power plant[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(39): 20250–20255
- [22] 李京祥, 文勇, 王品. 新形势下建设“一专多能”综合性应急救援队伍的研究[J]. *化工管理*, 2021, (01): 13–15. [LI J X, WEN Y, WANG P. Research on constructing a comprehensive emergency rescue team with “one specialty and many abilities” under the new situation[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2021, (01): 13–15.]
- [23] GROTH K, HECHT E. HYRAM: A methodology and toolkit for quantitative risk assessment of hydrogen systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11): 7485–7493.
- [24] Sandia’s HyRAM toolkit to assess hydrogen risk now available[J]. *Fuel Cells Bulletin*, 2016, 5: 9–10
- [25] LAFLEUR A C, MUNA A B, GROTH K M. Application of quantitative risk assessment for performance-based permitting of hydrogen fueling stations[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11): 7529–7535.
- [26] 赵永志, 张鑫, 郑津洋, 等. 掺氢天然气管道输送安全技术[J]. *化工机械*, 2016, 43(01): 1–7. [ZHAO Y Z, ZHANG X, ZHENG J Y, et al. Safety technology for pipeline transportation of hydrogen-natural gas mixtures[J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2016, 43(01): 1–7.]
- [27] 赵永志, 蒙波, 陈霖新, 等. 氢能源的利用现状分析[J]. *化工进展*, 2015, 34(09): 3248–3255. [ZHAO Y Z, MENG B, CHEN L X, et al. Utilization status of hydrogen energy[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(09): 3248–3255.]
- [28] 蒙波. 含氢天然气高压输送管道材料性能劣化及失效后果研究[D]. 浙江大学, 2016. [MENG B. Investigation on material property degradation and failure consequence of the high-pressure natural gas/hydrogen blends pipeline[D]. Zhejiang University, 2016.]
- [29] 宋鹏飞, 单彤文, 李又武, 等. 天然气管道掺入氢气的影晌及技术可行性分析[J]. *现代化工*, 2020, 40(7): 5–10. [SONG P F, DAN T W, LI Y W, et al. Impact of hydrogen into natural gas grid and technical feasibility analysis[J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(7): 5–10.]
- [30] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1659506320027129641&wfr=spider&for=pc>.
- [31] 司戈. 氢能源应用的消防安全初探[C]. 2010 中国消防协会科学技术年会论文集. [SI G. Preliminary study on fire safety of hydrogen energy application[C]. 2010 CFPA Annual Meeting on Fire Science and Technology.]
- [32] 陈晔, 刘暉亚, 纪超. 加氢站事故风险与消防安全技术研究[C]. 2019 中国消防协会科学技术年会论文集. [CHEN Y, LIU X T, JI C. Study on accident risk and fire safety technology of hydrogen filling station [C]. 2019 CFPA Annual Meeting on Fire Science and Technology.]
- [33] 张旭. 氢燃料电池汽车加氢站相关标准分析与建议[J]. *现代化工*, 2020, 40(02): 1–6. [ZHANG X. Analysis on corresponding standards of hydrogen refueling station for fuel cell vehicles and suggestions[J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(02): 1–6.]
- [34] 蔚恒, 牛素玲. 风力发电机组故障诊断技术研究[J]. *现代工业经济和信思化*, 2021, 11(02): 151–152. [YU H, NIU S. Research on Fault Diagnosis Technology of Wind Turbine[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2021, 11(02): 151–152]
- [35] 崔艺梦. 光伏阵列故障诊断方法研究[D]. 华北水利水电大学, 2020. [CUI Y. Research on fault diagnosis method of photovoltaic array[D]. North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.]
- [36] 宣亚雷. 二氧化碳捕获与封存技术应用项目风险评价研究[D]. 大连理工大学, 2013. [XUAN Y L. Study on risk assessment of carbon capture and storage technology application project[D]. Dalian University of Technology, 2013.]
- [37] 陈英杰. 天然气制氢技术进展及发展趋势[J]. *煤炭与化工*, 2020, 43(11): 130–133. [CHEN Y. Technical progress and development trend of hydrogen production from natural gas[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2020, 43(11): 130–133.]

(编辑 马桂霞)