



## 论 文

## 基于地质条件的大规模储氢科学问题与研究框架

梅生伟<sup>1</sup>, 李耀强<sup>2</sup>, 徐能雄<sup>3</sup>, 师莉<sup>4</sup>, 叶继红<sup>5</sup>, 雷华阳<sup>6</sup>, 刘晓丽<sup>7</sup>, 陈来军<sup>1\*</sup>

1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084

2. 中国盐业集团有限公司, 北京 100055

3. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083

4. 中国科学院理化技术研究所低温工程学重点实验室, 北京 100190

5. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 徐州 221116

6. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350

7. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084

\* E-mail: chenlaijun@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2024-12-04; 接受日期: 2025-05-14; 网络版发表日期: 2025-09-15

国家重点研发计划项目(编号: 2023YFB4005500)资助

**摘要** 氢能是保障我国能源安全和构建清洁能源体系的最佳能源载体之一, 其中储氢环节作为氢气生产与应用之间的桥梁, 对于氢能产业的发展具有至关重要的作用. 目前, 我国年产氢气已逾5000万t, 其中绿氢产业正在高速发展. 盐穴、矿洞等地下空间是宝贵的空间资源, 研究安全高效的大规模地质储氢技术是我国的重大需求. 本文聚焦于大规模地质储氢的低成本、大空间、高安全问题, 提出储氢地下洞室安全服役时存在的主要挑战、科学问题和技术路线, 在此基础上分别从地质空间优选、抗氢新材料研发、洞室结构设计、循环储释调控和地质储氢验证平台等5个领域论述具体的关键技术, 阐述盐穴、矿洞、油气藏、含水层等4类地质储氢验证平台的具体实施方案. 最后, 围绕大规模地质储氢的安全性和未来发展进行总结和展望.

**关键词** 氢能技术, 大规模地质储氢, 储氢技术挑战, 科学问题, 关键技术

## 1 引言

当前全球能源结构正经历着从依赖传统化石燃料向利用可持续清洁能源转变的关键时期. 氢能源以其可再生、清洁和高效的特质, 凭借其较长的调节周期和较大的储存能力, 在促进可再生能源的有效利用和电网的峰值调节等方面扮演着关键角色. 预计到2060年, 我国对氢气的需求预计将大幅上升, 从当前的

$3342 \times 10^4$  t逐渐增至 $1.3 \times 10^8$  t<sup>[1]</sup>, 在终端能耗中占比达29%. 随着氢气需求量的大幅增长和产业化条件的日趋成熟, 氢能已成为未来能源发展的热点. 目前, 我国氢气产能和年产量均居世界第一, 大规模储氢则相对落后<sup>[2]</sup>. 近年来, 全球加速推进氢能制-储-运-用全链条技术研发<sup>[3]</sup>, 储氢技术作为氢气“制”和“用”之间的重要桥梁, 是推动氢能产业发展的关键技术. 为此, 国家发展和改革委员会、国家能源局联合发布的《氢能产业

引用格式: 梅生伟, 李耀强, 徐能雄, 等. 基于地质条件的大规模储氢科学问题与研究框架. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 1540–1552  
Mei S W, Li Y Q, Xu N X, et al. Scientific issues and research framework for large-scale underground hydrogen storage (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 1540–1552, doi: 10.1360/SST-2024-0315

发展中长期规划(2021–2035年)》(以下简称《规划》)<sup>[4]</sup>明确提出,要发挥氢能“大规模、长周期储能”优势,探索盐穴、废弃矿井等地质储氢方式,以支撑可再生能源跨季节调峰与跨区域调配.规划特别强调,到2030年需形成“清洁能源制氢及供应体系”,而地质储氢技术是实现这一目标的核心基础设施.此外,国家能源局在《规划》解读中强调,地质储氢不仅能缓解可再生能源消纳压力,还可通过“多能并储”模式(如氢能+压缩空气储能)提升盐穴综合利用效率,这与江苏金坛盐穴压缩空气储能项目的成功经验形成技术协同.政策层面对储氢技术创新的持续倾斜(如国家重点研发计划专项支持),凸显其在构建新型能源体系中的战略支点作用.行业研究进一步验证了地质储氢的必要性.《中国氢能技术发展研究报告2024》指出,随着2030年后绿氢供应比例快速提升(预计2035年占比超50%),地质储氢将成为解决绿氢季节性供需失衡的核心手段.报告测算,若采用盐穴储氢技术,单腔体储氢量可达200万m<sup>3</sup>以上,平准化储氢成本(LCOH)较高压罐储氢降低30%~40%,显著提升了经济可行性.

当前,氢气的地面储存受限于空间和经济成本因素,导致储氢量普遍较小.为了使氢能更好地助力实现“碳达峰”和“碳中和”目标,必须采取切实可行的策略来实现大规模氢气储存的目标.相较于高压、液态和固态储氢技术,地质储氢在成本、规模和存储周期上具备显著优势,受到业界广泛关注<sup>[5–8]</sup>.根据地下储氢地质结构的不同,地质储氢的方式主要有空间型和孔隙型,前者主要指盐穴、矿洞,后者主要指枯竭油气藏、含水层<sup>[9–11]</sup>.

从20世纪50年代起,美国、英国、法国、德国等国便开展了地质储氢研究,如表1所示.在含水层方面,1956年法国天然气公司(Gas de France)首次进行了含有50%~60%纯度氢气的城镇燃气的地质储存<sup>[12]</sup>;在枯竭油气藏方面,阿根廷Diadema和奥地利Sun Storage储气库采取了天然气掺氢技术,通过将一定体积比例的氢气掺入天然气中形成掺氢天然气,然后将其注入枯竭油气藏进行储存<sup>[13]</sup>;在矿洞方面,瑞典皇家理工学院构建了小型矿洞储氢实验平台,但尚未开展大规模工程实践<sup>[14]</sup>.与上述3种地质空间相比,盐穴储氢是发展最为成熟的一种技术,德国于1971年首次成功利用盐穴储存了50%~60%纯度的氢气<sup>[15]</sup>,而英国Sabic Petroleum公司在1972年建成的Teesside储氢库于盐穴中实

表 1 国外地下储氢项目

Table 1 Overview of underground hydrogen storage projects overseas

| 所在地 | 项目名称        | 储存类型 | 储气纯度               |
|-----|-------------|------|--------------------|
| 美国  | ClemensDome | 盐穴   | 95% H <sub>2</sub> |
|     | Moss Bluff  | 盐穴   | 95% H <sub>2</sub> |
|     | Spindletop  | 盐穴   | 95% H <sub>2</sub> |
| 英国  | Teesside    | 盐穴   | 95% H <sub>2</sub> |
| 德国  | Kiel        | 盐穴   | 60% H <sub>2</sub> |
|     | Ketzin      | 含水层  | 62% H <sub>2</sub> |
| 法国  | Beynes      | 含水层  | 50% H <sub>2</sub> |
| 捷克  | Lobodice    | 含水层  | 50% H <sub>2</sub> |
| 奥地利 | Sun Storage | 枯竭气藏 | 10% H <sub>2</sub> |
| 阿根廷 | Diadema     | 枯竭气藏 | 10% H <sub>2</sub> |

现了95%纯度氢气的储存,储氢约760 t<sup>[16]</sup>.美国也建成了ClemensDome, MossBluff和Spindletop 3座盐穴储氢库<sup>[17]</sup>.这4座盐穴储氢设施均储存了纯度超过95%的清洁氢气,主要用于化工产业.最近,随着多个国家陆续制定并实施国家氢能发展计划,地下盐洞储氢设施的选址研究和可行性分析也在提速,目前有超过20个相关项目正在建设或计划中<sup>[18]</sup>.

目前,我国尚未在地质储氢领域开展工程实践,但在储存天然气和压缩空气方面积累了丰富的工程经验.在2007年,中国石油公司完成了金坛盐穴储气库的建设,标志着亚洲首个盐穴储气项目的成功落地.经过十几年的建设和运行,仅金坛地区就建成了60余口盐穴储气库,年工作气量近20亿m<sup>3</sup>,在区域调峰和应急采气中起到了关键作用<sup>[19]</sup>.2022年5月,全球首个非补燃盐穴压缩空气储能电站在江苏金坛投入商业运行,功率为60 MW,存储容量为300 MWh,目前已累计调度956次,调峰电量3.85亿kWh<sup>[20]</sup>.随着我国绿色氢能产业的快速增长,对大规模地下储氢技术的研究变得尤为紧迫.

大规模地质储氢技术涉及氢能、地质、电力、能源、材料、土木和采矿等多个学科交叉,其研究还需攻克诸多技术瓶颈:(1) 地下大规模储氢空间储氢适用性评价与选址问题;(2) 高压临氢材料研发与评价问题;(3) 储氢洞室结构优化设计问题;(4) 循环储释条件下储氢洞室服役安全性评价与调控问题;(5) 地质储氢试验平台集成建设与试验研究问题.

对于上述问题,国内外相关机构已经开展了一系

列研究。在地下储氢空间选址方面, 20世纪70年代以来, 以美英法等为代表的西方国家陆续开展了盐穴、矿洞、枯竭油气藏及含水层4类典型地下空间储氢适用性的理论研究与工程实践, 在盐穴储氢方面积累了较为丰富的理论与工程经验<sup>[21,22]</sup>; 国内在地下储气库(天然气、压缩空气)建设方面开展了卓有成效的理论研究与工程实践。在高压临氢材料方面, 日本九州大学开展了金属抗氢脆性能的研究并开发出抗氢脆钢<sup>[23]</sup>, 中国科学院理化技术研究所和首钢集团研发了抗氢脆金属材料并成功应用于包头-临河输氢工程, 韩国全北国立大学开展了聚合物基阻氢涂层的研究<sup>[24]</sup>, 中国石油大学开发了陶瓷抗氢涂层材料<sup>[25]</sup>。在储氢洞室结构设计方面, 国内外众多机构已开展了高压氢环境下盐岩/围岩(试件尺度)力学性能演化规律试验研究, 瑞典皇家理工学院构建了小型矿洞储氢实验平台, 利用传统弹性力学方法对洞室受力机理进行分析<sup>[26]</sup>; 中盐金坛公司在盐穴造腔、声呐测腔和盐穴建库等领域实现了多项国际技术首创<sup>[27]</sup>。在储释氢过程对洞室及周边地质的影响评价和运行调控方面, 荷兰Gasunie公司、美国国家能源技术实验室等机构针对洞室运行致力于风险管控、泄漏监测和环境影响等初期评估<sup>[28]</sup>; 中国盐业集团有限公司和清华大学建成的金坛盐穴压缩空气储能电站, 面对高频注采及大流量工况已安全储释950余次, 储库稳定性和密封性完好, 为储氢洞室调控提供了一定的技术基础。在大规模地质储氢工程实践方面<sup>[29]</sup>, 目前国外有美国Spindletop, Clemens, Moss Bluff和英国Teesside盐穴储氢库(纯氢)长期运行, 德国、捷克和法国有地下含水层储存富含氢气(50%~62%)煤气的案例, 奥地利建成了氢气/甲烷混合物的小型油气藏存储平台, 瑞典和芬兰正在开展岩石矿洞储氢试验研究。

当前, 我国在地质储氢领域面临国际技术封锁, 难以借鉴国外经验。同时, 现有的天然气/压缩空气储库设计与调控技术并不能完全适用于地质储氢。因此, 结合我国地质条件, 开展大规模地质储氢技术研发与工程实践显得尤为迫切。有鉴于此, 国家重点研发计划项目“基于地质条件的大规模储氢关键技术及试验验证”于2024年立项。该项目围绕大规模地质储氢所面临的安全、空间和成本等问题, 开展“地质评价-材料研制-洞室设计-安全调控-示范验证”全链条技术研究。本文在该项目主体研究内容的基础上明晰大规模地质储

氢的主要挑战 and 关键科学问题, 构建大规模地质储氢技术的研究框架, 并详细阐述大规模地质储氢研究的关键技术。本研究旨在为我国大规模氢气储存的基础科学探索和工程应用方面提供参考, 助力我国氢能产业高质量发展。

## 2 大规模地质储氢的挑战与关键科学问题

地质储氢研究主要面临两大挑战: 一是地质储氢库服役环境复杂, 临氢材料腐蚀严重, 如何防范氢气泄漏风险? 由于储氢地质具有不确定性高、隐蔽性强和变异性强的特征, 因此氢气对不同地质空间的封闭性要求高。同时氢气具有分子小、活性高、渗透强的特点, 使得其中的物化生反应机理复杂, 容易导致金属材料氢脆、腐蚀失效及洞室围岩腐蚀泄漏(图1)。其可能发生的风险主要包括: 氢气分子渗透至金属晶格导致材料韧性下降而引起的高压氢脆与应力腐蚀开裂, 地下卤水或含水层中的硫酸盐还原菌代谢产生 $H_2S$ 加速金属腐蚀, 聚合物密封材料在高压氢环境中发生溶胀和渗透率上升从而导致密封失效等。二是高频循环释氢条件下如何保障储氢洞室安全服役? 地下腔体如盐穴等可能存在腔体畸变、断层活化和围岩失稳的多源灾害风险, 使得盐穴安全服役困难(图2), 而矿洞等也存在岩体劣化、衬砌失效和层间削弱的灾害风险, 油气藏和含水层盖层也存在循环压力下产生微裂隙而导致氢泄漏的风险。同时, 储氢库释氢速率和压力波动范围等参数对洞室长期稳定性的影响机制尚不明晰, 亟需开展相关研究。

根据大规模地质储氢存在的上述两个主要挑战, 我们提炼出其中如下的关键科学问题。

(1) 多场多相耦合条件下氢气与洞室及管道材料物-化-生反应机理。大规模地下储氢洞室和管道材料实际服役环境复杂, 同时受到不同岩土体、地下水环境、微生物群落和临氢环境以及循环周期受力等多场(应力场、渗流场、化学场、温度场)多相(气相、液相、固相、生物相)耦合(渗流场-应力场耦合、化学场-温度场耦合、渗流场-化学场耦合、应力场-化学场耦合)因素的影响, 氢气与洞室及管道材料渗透行为和反应机理、腐蚀破坏等机制尚不明确, 因此, 探明物-化-生反应机理对大规模地下储氢的安全性至关重要, 是亟待解决的关键科学问题。

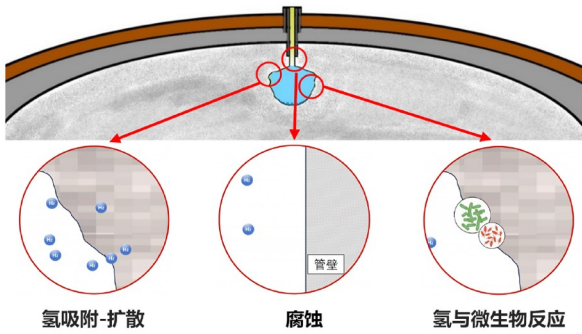


图 1 (网络版彩图) 临氢材料面临挑战

Figure 1 (Color online) Challenges faced by hydrogen-exposed materials.

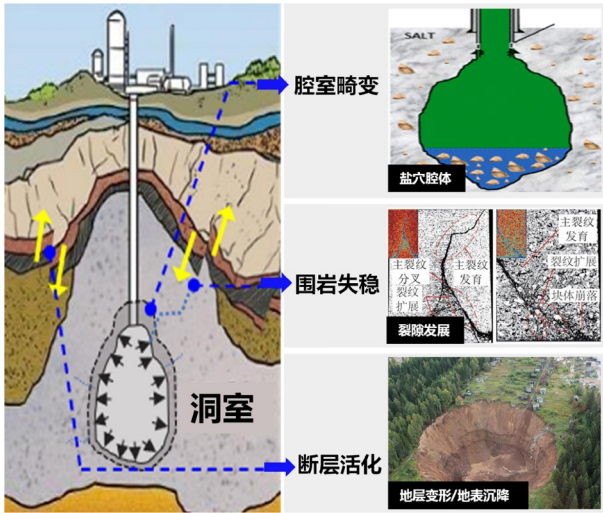


图 2 (网络版彩图) 储氢洞室(盐穴)服役安全性挑战

Figure 2 (Color online) Challenges to the service safety of hydrogen storage caverns (salt caverns).

(2) 循环储释作用下储氢洞室服役性能演化规律与系统调控机制。储氢洞室在服役过程中承受高频循环储释交变压力作用, 同时面临氢气异常泄漏、围岩失稳、断层活化及地面塌陷等多源灾害风险, 循环储释过程的调控参数对洞室长期服役性能劣化的影响机理不清, 因此, 探明循环储释作用下储氢洞室服役性能演化规律与系统调控机制, 是亟待解决的关键科学问题。

### 3 大规模地质储氢的技术研究框架

针对大规模储氢所面临的安全、空间和成本问

题, 以两个关键科学问题为牵引, 攻克地质空间优选、抗氢材料研发、洞室结构设计、循环储释调控等方面的关键技术瓶颈, 建设地质大规模储氢验证平台并开展试验研究, 总体技术路线如图3所示。

针对多场多相耦合条件下氢气与洞室及管道材料物-化-生反应机理问题, 选取我国典型地下盐穴、矿洞、枯竭油气藏、含水层工程实例, 结合现有地质资料, 采用地质探测技术, 查明不同拟选场地工程地质特征, 通过围岩力学性能测试的方法, 揭示不同地质条件储氢库圈闭机理; 利用3维裂隙网络仿真的方法, 分析枯竭油气藏作为储库时氢气迁移通道特征, 研究氢气在油气地层裂缝网络中的迁移扩散规律, 揭示不同裂缝网络条件下枯竭油气藏的密封机理; 开展地下盐穴围岩物理力学性质试验, 研究盐岩自愈性, 分析储氢库原位应力和塑性区分布规律。通过氢渗透试验、服役工况模拟试验和有限元仿真等手段, 研究储氢洞室、注采管道相关金属及非金属材料与氢的相互作用机理及力学性能演化规律, 建立物-化-生反应模型, 为设计满足高压临氢腐蚀的金属、非金属和新型阻氢渗透防腐材料, 大规模高压地下储氢选址、工程实施方案选材用材提供重要依据和理论支撑。

针对循环储释作用下储氢洞室服役性能演化规律与系统调控机制问题, 探究基于储氢洞室服役阶段的高频储释作用, 开展交变压力作用下围岩力学耦合特性单元试验, 揭示围岩损伤断裂及蠕变特征; 开展不同储释压力、储释速率、储释次数等因素下洞室围岩的蠕变和疲劳试验, 建立循环储释作用下的围岩长期力学性能劣化模型; 通过大型地质模型试验, 揭示储氢洞室围岩力学性能劣化分布特征及演化规律; 结合高性能数值分析计算方法, 揭示储释运行参数对储氢洞室服役性能的影响机制, 为储氢洞室运行调控技术研究提供关键理论基础。

### 4 大规模地质储氢的核心关键技术

研究安全高效的大规模地质储氢技术是我国的重大战略需求, 围绕大规模地质储氢所面临的安全、空间、成本等问题, 遵循机理探究/特性分析→理论突破→流程设计→仿真验证→系统/设备发→示范建设→运行测试的研究思路, 逐级递进开展研究。根据前述, 其核心可归纳为5个关键技术问题: (1) 地下大规模

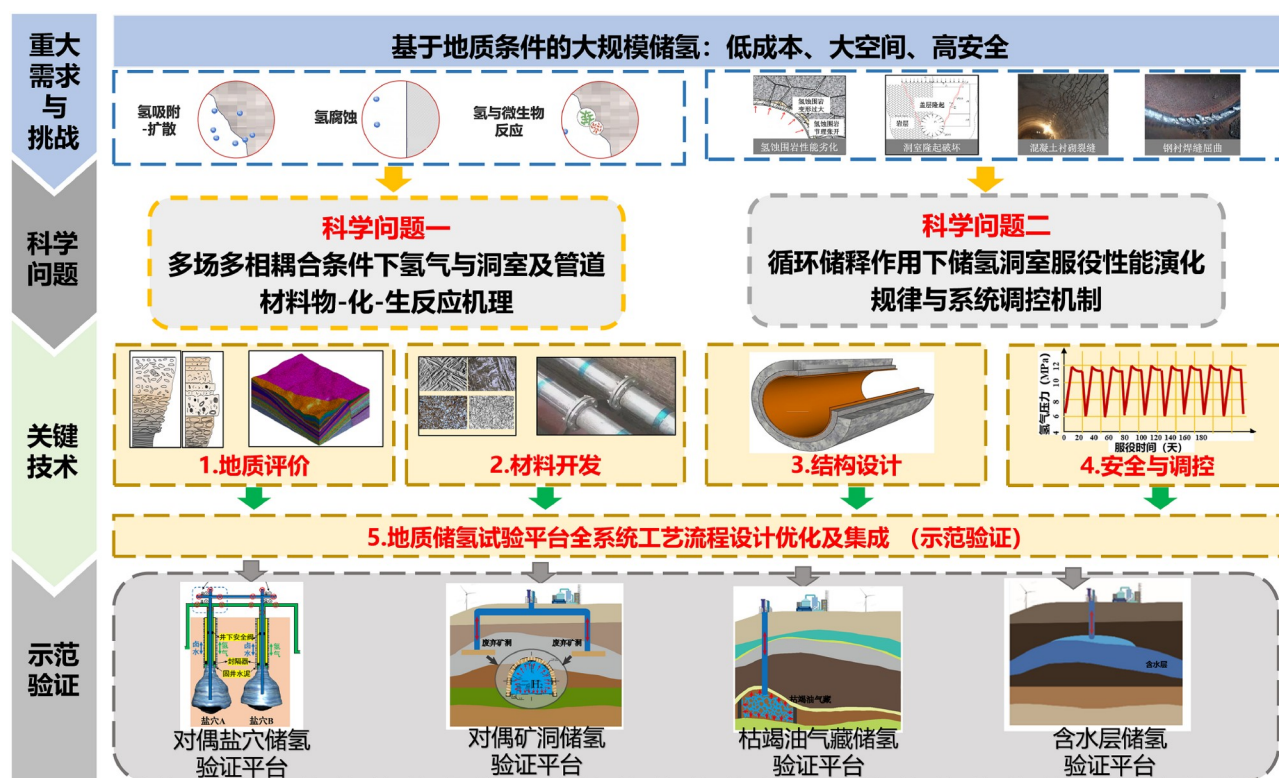


图3 (网络版彩图)总体技术路线

Figure 3 (Color online) Overall technical roadmap.

储氢空间储氢适用性评价与选址技术; (2) 复杂工况下储氢洞室材料、金属材料、非金属材料、同种材料及异种材料连接、密封及评价技术; (3) 储氢洞室结构形态参数设计及监测管理一体化技术; (4) 循环储释条件下储氢洞室服役安全性评价及调控技术; (5) 地质储氢试验平台全系统工艺流程设计优化及集成技术。

#### 4.1 不同地质条件地下空间储氢适用性与优选方法

氢气因其独特的小分子特征, 在不同地质存储条件下均具有极强的逃逸性, 实现大规模、长周期地下储氢, 对拟选库址区域尺度和库库尺度的稳定性及密封性均具有极高要求。建库地质条件是决定地下储氢库成败的关键因素, 但其自身却具有高度的隐蔽性、不确定性和非均匀性, 因此需要精确查明建库区地质条件, 实现地下储氢空间的地质透明化表征, 厘清储氢库库址区地质特征, 综合评价不同地质条件地下空间储氢适用性, 实现地下储氢库的科学选址。

具体地, 首先选取具备大规模地下储氢潜力的地

下盐穴、矿洞巷道、枯竭油气藏及含水层等典型场地, 收集分析地质资料, 基于地质调查、模型试验与数值模拟等手段, 对比分析盐穴、矿洞、油气藏及含水层等潜在储氢空间的地质密封圈闭特征, 开展临氢岩层氢渗特性试验、节理裂隙氢气逃逸迁移试验、储氢过程数值模拟, 研究不同地质条件储氢空间密封机理。其次基于拟选库址区地层地质条件, 从区域尺度、场地尺度与工程尺度, 梳理影响储氢库稳定性与密封性的地质因素, 开展地应力测量和断层透水性测试, 分析不同地层岩性组合下储库围岩应力和塑性区分布特征, 揭示多尺度断层工况下储库围岩应力分布特征和地质构造、地震活动性、地层岩性、储盖层结构、水文地质条件、地球化学作用等地质因素的影响机制, 明确不同地质条件对地下储氢空间稳定性与密封性的影响。接下来综合考虑不同地质条件储氢库工作特点, 分析工作载荷下密封失效概率及储释效率, 建立失效概率数据库; 对多场景、多工况不同地质条件地下空间的氢气泄漏进行瞬态仿真, 研究包含泄漏-扩散-燃

爆的氢气事故全链条发展过程失效风险评价, 结合储氢库储量、储释效率以及储库稳定性和密封性, 建立不同地质条件地下空间储氢适用性评价指标体系。最后针对枯竭油气藏地层裂缝网络结构、地下盐穴空腔结构、矿洞巷道内衬-垫层-围岩结构, 形成多层次地下储氢库工程地质精细化勘察技术; 构建融合多尺度地质结构特征与物理力学属性的3维地质模型, 实现多尺度地质体透明化表征, 结合储氢库适用性评价指标体系及其对储氢安全性的影响规律, 利用人工神经网络、模糊综合评价等方法, 形成储氢库库址优选技术。

#### 4.2 洞室和管道材料中氢吸附-迁移-扩散规律、反应机理及应对措施

大规模地下储氢洞室、管道材料连接和密封技术对防范高压氢气泄漏、腐蚀和保障储氢安全至关重要。地下储氢环境中, 洞室围岩材料处于复杂的物理-化学-生物环境, 多因素影响下围岩、金属、非金属材料的稳定性、抗氢渗透性会发生改变。材料间的连接密封方式在高压临氢环境中会出现失效, 因此需要研发同种材料、异种材料连接技术, 提出洞室、管道材料密封评价标准, 最终保障储氢洞室用材料连接密封的可靠性与安全性。

具体地, 首先是储氢洞室围岩材料与氢相互作用机理, 通过建立洞室围岩材料氢物-化-生作用模型, 揭示矿物质、介质与氢相互作用机制、腐蚀机理和矿物地球化学反应机制。其次是分析储氢洞室、输氢管路、井筒等金属材料氢吸附-迁移-扩散及腐蚀规律, 研究高压临氢环境下金属材料的力学行为、性能退化程度和演化规律, 优化炼钢、轧钢、热处理等工艺参数, 降低材料内部夹杂物等缺陷数量和尺寸, 提出改善金属材料抗氢性能的可行性生产工艺。接下来是阻氢渗透防腐非金属材料力学行为演变规律及机理, 针对金属普遍存在的高压氢脆难题, 设计、制备阻氢渗透防腐涂层材料, 探明氢储释过程近工况(基于聚合物复合涂层的氢渗透、黏结强度, 研究温度、压力、湿度)下, 涂层材料的力学强度、应力分布、结合强度、渗透率演化等力学行为, 揭示阻氢和防腐机理。最后开发适用于高压临氢环境下、周期性高疲劳载荷等耦合作用下的焊接工艺和热塑性非金属复合输氢管道(TCP)及接头技术, 优选螺纹结构关键参数; 对氢储释前后密封材料的力学性能进行测试, 分析劣化演变规

律和失效机制; 筛选适用于储氢库现场工艺条件下的氢气检测敏感技术, 建立高压氢气泄漏监测系统, 形成适用于多因素耦合高压临氢环境下连接及密封技术。

#### 4.3 地下储氢洞室受力机理与结构设计

洞室结构关系着运营期储氢洞室长期稳定性和密封能力, 储释运行参数决定着氢气储释效率及洞室畸变特征。在高频循环注氢-采氢条件下, 洞室围岩主要表现为疲劳损伤累积特征, 岩体内部微裂隙在反复应力作用下逐渐萌生、扩展; 而在长时间恒压储氢条件下, 围岩以缓慢蠕变变形为主, 表现出逐渐的塑性形变。高压氢环境下的物-化-生耦合作用导致储氢洞室力学特征退化、结构受力机理不清, 且氢气独特的储释特性对洞室稳定性的影响机制尚不明确。因此, 需要分析地下储氢洞室结构参数与布局对储氢洞室长期稳定性和密封性的影响, 最终提出基于风险评估模型的地下储氢洞室结构设计优化方法, 形成适用于氢渗漏的地下储氢洞室监测管理一体化系统。

首先, 开发高压氢环境下的盐岩力学特性测试系统和原位储氢试验系统, 结合实时CT扫描技术分析氢蚀盐岩微观裂缝演化特征, 研究不同条件下氢蚀对盐岩损伤和断裂的影响, 建立蠕变损伤模型和物-化-生耦合的破坏力学模型。通过数值模拟研究不同因素对盐穴储氢洞室的影响, 确定高风险区域, 揭示盐穴储氢洞室力学特征与劣化机理。其次, 建立红外热成像孔隙结构测试系统, 厘清氢蚀对围岩孔隙/裂隙的影响, 构建围岩力学性能演化模型。提出“抗内压、阻渗漏、防氢蚀”的复合式衬砌结构体系, 设计围岩-喷射混凝土-渗漏监测系统-防水层-混凝土衬砌-滑移层-钢衬-阻氢涂层复合式封存结构, 研究其在储氢环境下的损伤累积规律。采用声发射、DIC (digital image correlation)和SEM (scanning electron microscopy)等监测手段分析宏观层间损伤累积规律, 开发适用于矿洞储氢洞室循环储释条件下的围岩累积损伤分析程序, 评估循环储释下结构与围岩劣化失稳特征, 建立矿洞储氢衬砌结构与围岩相互作用力学响应机制。接下来, 建立盐穴储氢洞室腔体-井筒一体化三维仿真数值模型及矿洞储氢洞室压力上限解析方程, 结合地质勘探资料形成结构稳定性高、密封性强的腔体形态、选址标准及布局方案, 完成盐穴和矿洞储氢洞室腔体结构

参数与布局优化. 最后, 构建热-流-固-湿多场作用下地下储氢洞室稳定性风险评估模型, 基于盐穴储氢洞室力学特征与劣化机理、矿洞储氢衬砌结构与围岩相互作用力学响应机制, 开发集地质条件精准复现、结构参数实时优化与洞室形态全景展示的标准化仿真程序, 形成地下储氢洞室风险评估模型与结构设计优化方法.

#### 4.4 储释氢过程对洞室和周边地质的影响评价及运行调控

循环储释条件下储氢洞室面临着气体泄漏、溶腔过度收敛、地表异常沉降(塌陷)、库群破坏等多种类型的工程风险, 若对循环储释条件下储氢洞室服役安全性评价不准确、不及时或者调控方式不当, 则可能对储氢库及地质环境安全带来灾难性后果. 因此, 需要研究循环储释条件下储氢洞室密封性及对周边地质环境影响的评价方法, 建立基于整体安全性能的储释氢运行调控技术, 最终实现储氢洞室服役运行的智能决策和可靠调控.

首先, 开展洞室围岩的多工况蠕变试验, 结合相应表征手段及灰色关联理论提出不同循环储释下围岩蠕变及疲劳特性, 揭示交变压力下洞室围岩力学性能演化规律及劣化机理; 建立洞室围岩性能劣化的损伤本构模型, 动态仿真再现循环储释作用下洞室围岩裂纹萌生、扩展、贯通的全过程, 明确循环储释作用下储氢洞室围岩特性演化规律及机理. 其次, 运用透明岩土技术和PIV (particle image velocimetry)监测手段, 实现对洞室界面关键特征参数的动态长期监测. 综合大型3维地质力学模型试验和连续-非连续数值仿真模拟, 建立稳定系数与质条件、循环储释次数、储释压力等因素之间的关联关系, 形成基于位移速率评判准则的储氢洞室稳定性分析理论. 接下来, 通过自主研发洞室岩体高压氢渗透性能可视化物理模拟试验装置和气-液-固耦合数值分析方法, 开展循环储释下氢气渗漏模拟分析, 明确多源灾害条件下洞室密封层渗漏位置、渗漏规模及分布特征, 建立基于灾变理论的地下储氢洞室氢气渗漏分析模型, 形成循环储释条件下储氢洞室密封性能及评估技术. 随后, 基于循环储释条件下储氢洞室-围岩-库址场地灾变链传播机制, 确定地质环境灾害的发生规模及影响范围, 开发多层次-多阶段-多尺度耦合的工程安全性能评价管理系统, 正

确评估储释氢过程对周边地质的影响. 最后, 基于高性能数值仿真、现场实测反演分析、小样本智能学习等手段, 综合分析水文地质、工程地质条件、循环储释速率、储释次数、储释压力等不同运行控制参数对系统安全服役性能的影响, 提出储氢洞室-围岩-库址场地系统灾害的控制策略、控制原则和控制时机, 形成基于密封-围岩-地质环境整体安全性能的储释氢过程系统调控技术.

#### 4.5 基于地质条件的储氢验证平台建设及试验

盐穴、矿洞、枯竭油气藏及含水层具有不同的地质特点, 地质储氢工程面临地质优选及改造难题. 我国目前尚无地质储氢工程实践, 亟需针对不同地质条件(盐穴、矿洞、枯竭油气藏和含水层), 提出储氢库相关设备选型与集成方法, 建设储氢验证平台, 开展循环储释氢试验, 研发工艺流程自动化控制技术, 完善安全防控系统, 最终形成我国大规模地质储氢全系统工艺技术体系, 为我国地质储氢提供先导工程示范.

首先, 需要评估不同地质体储氢的适用性, 进行制-储-释氢全流程工艺参数设计及优化, 构建地质储氢安全运行监测系统, 综合考虑全流程运行成本, 提出盐穴、矿洞、气藏、含水层储库等不同地质条件储氢平台的优选建造方案. 其次, 优化设计井管及井筒参数, 制备具有抗氢脆、耐腐蚀、耐高压、耐疲劳特性的地面管道、井下管材及工具, 发展井筒氢气气密性测试及井筒无损检测技术, 形成完整的钻井及井筒工艺. 接下来, 经过地质优选, 完成4类地质储氢试验平台集成建设. 最后, 开展循环储释服役性能评价及调控技术验证, 完成循环储释氢性能试验研究. 研发氢气泄露监测专用设备及方法, 监测分析盐穴、矿洞、含水层及枯竭油气藏4类储氢验证平台运行过程中的系统泄漏率演化特性. 采用InSRA (interferometric synthetic aperture radar)、气体示踪、微震、光纤等多种监测手段对循环储释下储氢平台状态进行监测, 构建“地面-井筒-地下”三位一体监测系统, 监测盐穴、矿洞、气藏、含水层储氢平台的储释运行过程中各系统状态参数, 基于多元数据融合技术构建3维数字孪生模型, 开发一套具有参数实时获取和“预报-预警-预演-预案”功能的地质储氢监测管理一体化技术平台, 实现储氢平台全生命周期安全运维.

## 5 地质储氢验证平台建设构想

开展基于地质条件的储氢验证平台建设及试验是针对我国大规模地质储氢实践空白开展的先导示范工程, 可以提供验证与集成创新应用平台, 是实现我国大规模地质储氢技术的工程示范应用的基础. 本文提出了4类地质储氢平台建设构想, 如图4所示.

### 5.1 大型对偶盐穴储氢平台

在4类地质空间中, 盐穴利用技术最为成熟, 也最有望实现大规模地质储氢产业化. 由于氢气的特殊性, 在进行储释循环时不能直接排入大气, 而大规模的下游应用目前尚不具备应用场景. 为此, 本文创造性地提出了对偶盐穴储氢的方案, 如图5所示, 利用两个地下洞穴内氢气的相互置换开展循环储释氢试验, 攻克防氢腐蚀设备及管道制备工艺难题, 突破大规模地下储氢工程稳定性与密闭关键技术.

储氢库计划建设在江苏金坛茅兴矿区, 该区地下岩盐层具有以下特点: (1) 岩盐层埋深适中, 地层平缓, 构造较简单, 远离断层; (2) 岩盐层发育, 岩盐质量好, 盐层120 m; (3) 顶板质量好, 泥岩岩性较致密, 厚度大, 全区稳定分布. 对偶盐穴储氢平台计划建设2口储氢盐穴, 每个盐穴容积为 $10\text{万m}^3$ , 每口储氢盐穴钻取1口氢气注采井和1口排卤井. 具体地, 在相隔200 m距离新建两口盐穴注采井, 采用二开井身结构, 选用ZJ30钻机及配套设备, 以直井作业方式钻井; 分别打定向井到底部作为排卤井, 通过注气排卤将卤水经由排卤井排出. 利

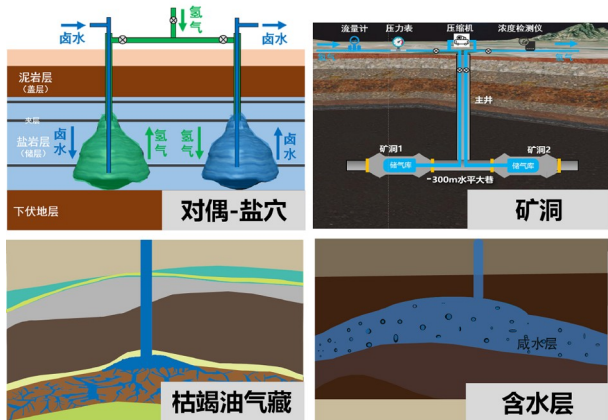


图4 (网络版彩图)4类储氢验证平台

Figure 4 (Color online) Four types of hydrogen storage verification platforms.

用卤水作为动力源, 通过“注氢排卤”和“注卤采氢”的操作工艺, 驱替氢气的注入与采出, 实现上百次的循环储释氢试验, 验证盐穴储氢的密封性, 研究储释循环下盐穴的力学特征和变化规律.

与一般的盐穴储氢试验验证平台方案相比, 本方案具有以下优势.

(1) 相比于单一腔体盐穴的试验方案, 本方案在安全性和成本上均具有优势. 采用对偶盐穴来实现氢气的循环储释, 无需像单腔体盐穴一样考虑大量氢气的来源、频繁注入和采出问题, 能够节省成本和避免大量用氢引起的安全问题. 同时, 由于将饱和卤水用于占据储氢洞穴一部分空间, 剩下空间用于储存氢气, 可最大程度上保障项目安全同时减少氢气用量, 提高试验的经济性. 此外, 该方案的氢气使用量循序渐进, 确保整体方案的安全可控. 在循环试验完成后, 会逐步

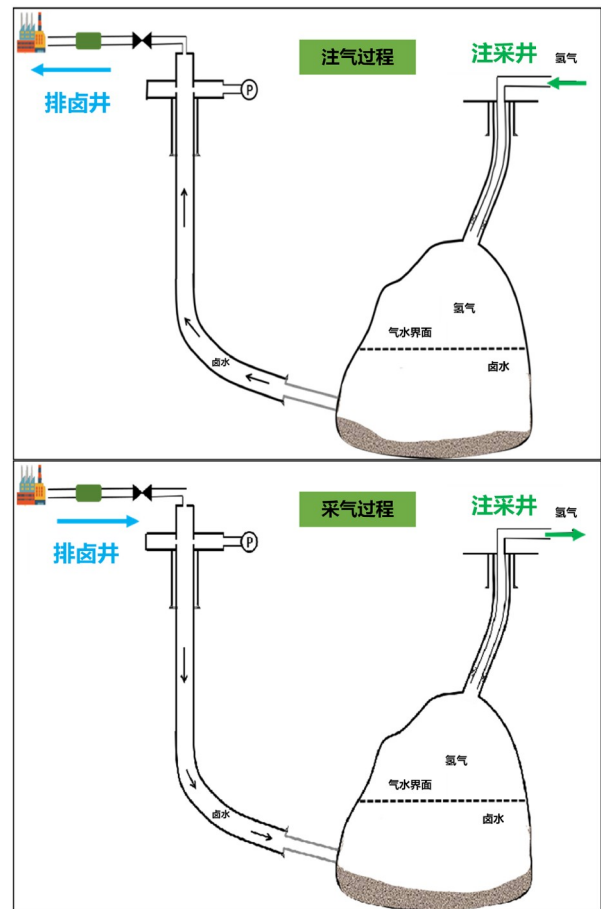


图5 (网络版彩图)储氢库注气采气过程示意图

Figure 5 (Color online) Schematic diagram of hydrogen storage reservoir injection and extraction process.

扩大到最大容积 $10\text{万m}^3$ 的水容积循环, 为工程项目实施作准备。

(2) “注氢排卤”和“注卤采氢”使得每个腔体内的卤水与氢气形成动态恒压。对偶盐穴通过注氢排卤工艺, 在地下盐层形成两个相邻的腔室, 这样的设计允许在注水溶腔过程中产生的卤水被有效排出并储存于地下, 利用地上卤水存储设备产生的压力驱动注采过程, 从而实现整个储氢过程的恒压运行。这种恒压运行对维持储氢系统的稳定性和安全性至关重要, 减少了压力波动可能带来的风险。而在试验时, 通过控制排卤井阀门和泵组, 也可以实现不同交变压力范围下氢气的无垫底气释释。

(3) 相比较于单井的同心管柱井身结构, 对偶洞穴储氢验证平台采用“一口洞穴两口井”方式, 为氢气和卤水提供单独流动的通道, 可提高注采频率, 在较短时间内实现多次注采循环试验。此外, 对偶盐穴的设计还提高了储氢的效率和灵活性。两个腔室可以独立操作, 这为储氢和取氢提供了更大的操作空间, 不仅提高了储氢的响应速度, 也使得整个系统能够更好地适应不同规模的储释氢需求变化。

## 5.2 小型矿洞储氢验证平台

矿洞储氢利用山东鄂庄煤矿废弃的矿洞作为储氢空间, 该平台拥有 $1\text{万m}^3$ 的水容积和 $12\text{ MPa}$ 的储氢压力, 通过在煤矿工业广场安装氢气压缩系统, 并通过主井布置输氢管道, 实现了氢气的有效输送和储存。在 $-300\text{ m}$ 处水平大巷两头设置永久性封闭墙, 构建了一个 $1\text{万m}^3$ 的巷道密闭空间。这个空间经过多层衬砌技术和结构加固方法处理, 以增强其结构稳定性和气密性。通过气密性试验, 初步验证了矿洞储氢库的可行性。

矿洞储氢的优势在于其巨大的空间潜力和较低的改造成本。废弃矿洞通常具有较大的空间, 可以存储大量的氢气, 而且由于矿洞已经存在, 因此不需要进行大规模的挖掘工作, 这大大降低了储氢设施的建设成本。此外, 矿洞的地质结构通常较为稳定, 这为储氢提供了一个安全的环境。

## 5.3 微型油气藏储氢验证平台

枯竭油气藏储氢平台利用河北冀东油田已经开采完毕的油气藏作为储氢空间, 通过改造老井布设储氢

井管系统, 并进行完井密封, 将老井改造成储氢库注采井。同时, 将周边老井改造为监测井, 采用 $12\text{ MPa}$ 压力注入1万余标方的氢气, 随后将注入井密封。通过进行浅层水、微地震、断层密封性、盖层密封性监测, 验证枯竭油枯竭油气藏储氢的可行性。枯竭油气藏储氢的优势在于其良好的天然密封性和已有的基础设施, 其良好的地质结构为储氢提供了一个安全的环境。此外, 由于油气藏已经进行了长期的开采, 因此已经具备了一定的基础设施, 如井筒和管道, 这可以减少储氢设施的建设成本。枯竭油气藏储氢还可以利用现有的油气开采技术, 如注水和注气技术, 来管理和控制储氢过程。

## 5.4 微型含水层储氢验证平台

含水层储氢平台利用地下含水层作为储氢介质, 通过在特定地质条件下注入氢气, 实现氢气的长期储存。计划基于3维地震、测井、钻井等地质资料, 在山东德州选出安全性良好的储气圈闭空间, 建立微型含水层储氢验证平台。通过向目标层位布设储氢井及监测井并管系统, 并采用氢气压缩机, 通过改造后的注采井筒向储气圈闭区注入 $10^4\text{ m}^3$ 氢气, 达到气库运行压力。含水层储氢的优势在于其广泛分布和良好的渗透性, 能够提供较大的储氢容量和较好的气体流动性。含水层通常具有良好的天然密封性, 这有助于防止氢气泄漏。此外, 含水层储氢还可以利用现有的水资源管理技术, 如地下水抽取和注入技术, 来管理和控制储氢过程。

## 6 储氢安全性分析及对策

由于氢的物理性质、地下特殊的构造和密封空间性, 整个空间容易形成氢气聚集, 在地下洞穴储存的氢存在发生泄漏概率, 进而产生严重事故后果。氢气泄漏是地下储氢面临的主要安全风险之一, 需要在盐穴井筒和洞室衬砌中采用多道密封屏障和实时压力监测的方法, 以防范氢气逸散造成环境危害。同时, 循环压力可能会诱发围岩失稳和断层活化, 需要利用微震监测和变形观测手段对围岩稳定性进行实时评估, 加强围岩加固和控制注采速率等措施来确保储氢库的长期运行安全。针对地下洞穴储氢过程中的氢泄漏、扩散、燃爆风险全链条安全问题, 开展系统安全风险评估与

风险控制技术研究, 开发氢安全监测预警系统平台, 对整个地下空间储氢系统长期安全稳定运行十分重要. 具体分析对策如下.

(1) 地下空间储氢系统风险评估. 围绕地下空间储氢系统建设使用典型场景, 需综合运用多种量化风险评估技术(如FMEA (failure mode and effects analysis), HAZOP (hazard and operability study)和PSA (probabilistic safety assessment)等), 识别影响系统安全的关键设备与关键环节, 分析失效事故概率及危害度, 从而实现对系统安全风险的量化分析评估. 深化对氢气泄漏路径和灾害形成机制的理解至关重要, 特别是要针对覆盖层、井筒、地面管线、输送站等关键节点构建泄漏风险评估模型, 进而发展出一套完整的风险评估框架, 并制定出系统的优化建议.

(2) 地下储氢库井筒运行期动态监测与分析. 针对井筒的稳定性监控, 需要周期性地对井筒内的关键部件, 如套管、接箍、密封等进行细致的检查, 以识别裂缝、空泡、腐蚀、位移和应变等问题; 同时, 通过声波检测、电磁检测等技术手段, 确保能够持续监控井筒的完整性; 检测评价高压氢、高氯环境、 $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 和多种微生物等苛刻腐蚀环境下的井筒及集输管道系统的运行状态. 建立并实施全周期的监测机制, 能够实时监控储气设施的安全性和运行状况, 从而为储气库的科学规划、高效运作和安全作业提供坚实的支持.

(3) 地下空间储氢安全风险控制技术研究. 根据地下空间面临的主要氢泄漏安全事故风险, 根据地面输送布局和地下空间构造, 建立3维模型进行典型泄漏工况下的仿真计算, 探究不同泄漏口径、泄漏压力、泄漏流量下氢气泄漏后的时空浓度分布, 掌握不同泄漏故障发生后的氢气泄漏扩散特点, 开展基于氢气泄漏扩散行为分析的氢泄漏事故监测点位布置设计和专用安全设备设施布置设计, 从而降低氢气泄漏事故的安全危害.

(4) 氢安全监测预警系统平台开发. 开展氢气泄漏快速监测预警系统研究, 开发氢安全监测预警平台和人机交互界面, 利用各类传感器实时对氢气泄漏进行监测, 一旦监测到氢气泄漏事故, 通过机器学习算法等, 对氢气泄漏源辅助定位, 同时具备连锁启动通风、喷淋等专属安全设施的功能, 为地下空间安全用氢提供技术手段保障.

(5) 针对氢泄漏、地质灾害等作出安全评估. 在具体开展过程中, 针对储氢库特点, 构建氢气泄漏的数学模型和模拟工具, 预测氢气在不同条件下, 不同风险区域的泄漏扩散行为, 包括泄漏速率、扩散范围及其对外在环境的潜在影响. 在工程设计阶段, 考虑利用先进的氢气泄漏检测技术, 包括地面实时监测传感器、气体分析仪、自动报警系统和沉降监测系统, 以及地下微地震监测系统、气体示踪剂等技术, 结合数字化手段, 以便及时发现和响应. 同时, 在建造安装阶段, 会对可能发生氢气泄露的仪器设备或操作流程进行优化, 例如, 在下入管柱、井下工具之前会在地面进行单独的氢气气密封测试, 确保合格之后再下入地下, 下入之后会再进行一次整体的气密封测试. 进行整体气密封测试时, 也会在天然气储气库氮气气密封测试工艺的基础上, 进行氢气密封性测试. 在试运行阶段, 进一步应用数字化自控技术, 对各个风险点和环节保持全天候24 h监测. 在盐穴储氢库库址区关键处设置地质灾害监测设备, 实时监控地面沉降、地面塌陷等地质灾害. 利用微地震监测技术, 观测分析生产活动中所产生的微小地震事件, 监测储氢库地质体盐岩的稳定状态, 建立预警系统, 及时预报潜在的地质灾害.

## 7 结论

本文综合分析了大规模地质储氢技术的发展现状和面临的主要挑战, 明确了地质储氢在推动中国能源结构转型和实现“双碳”目标中的重要作用. 首先概述了氢能的发展现状和储氢技术的重要性, 随后详细讨论了大规模地质储氢在设计和建造过程中面临的挑战、关键科学问题、研究方案及重点研究内容, 最后分析其安全性问题.

大规模地质储氢技术的发展不仅需要地质学、材料科学、化学和环境工程等多学科的交叉合作, 还需要政策和资金的持续支持. 尽管目前存在一些技术难题, 但随着科技的不断进步和经验的积累, 地质储氢, 特别是盐穴储氢, 有望成为我国能源体系中的重要组成部分, 对于推动盐穴储氢技术的商业化和规模化应用具有重要的现实意义. 因此, 未来的研究应重点关注以下几个方面: 一是开展跨学科研究, 深入理解氢气在储库中的迁移机制及与岩体的相互作用, 为地质储氢库的科学选址和洞室结构设计提供指导; 二是开

发新型抗氢材料和改进井筒设计, 以提高井筒的密封性和稳定性; 三是研发基于数字孪生的地质储氢库的监测和智能运行维护技术, 确保其长期安全运行; 四是制定相应的标准和规范, 如储氢库地质选址规范、储氢库建设与运营风险评估标准等, 指导地质储氢库的建设和运营; 五是探索地质储氢库与天然气储气库、压缩空气储能电站及二氧化碳捕集与封存的协同

利用技术, 实现多能的耦合利用, 提升综合能源利用效率。通过这些努力, 可以有效地克服当前的技术难题, 促进地质储氢技术的发展, 为实现清洁、高效、可持续的能源供应作出更大的贡献。随着技术的成熟和成本的降低, 地质储氢有望在未来的能源领域发挥更加重要的作用, 为全球能源转型和环境保护提供强有力的支持。

## 参考文献

- 1 Hu J, Zhang Y, Zhu W T, et al. China hydrogen energy industry insights and digital development report (in Chinese). Beijing: Editorial Department of *Process Industry*, 2023 [胡静, 张翼, 朱文婷, 等. 中国氢能行业洞察与数字化发展报告. 北京: 《流程工业》编辑部, 2023]
- 2 Wang L, Jin Z J, Lv Z Y, et al. Advances and prospects in underground hydrogen storage (in Chinese). *Earth Sci*, 2024, 49: 2044–2057 [王璐, 金之钧, 吕泽宇, 等. 地下储氢研究进展及展望. 地球科学, 2024, 49: 2044–2057]
- 3 International Energy Agency. The Future of Hydrogen. Report. Paris: IEA, 2019
- 4 National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Medium and Long-Term Plan for Hydrogen Energy Industry Development (2021–2035) (in Chinese). Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, 2022 [国家发展改革委, 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021–2035年). 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2022]
- 5 Zhou Q F, Zhang J F. Underground hydrogen storage technology: A review (in Chinese). *Petroleum New Energy*, 2022, 34: 1–6 [周庆凡, 张俊法. 地下储氢技术研究综述. 油气与新能源, 2022, 34: 1–6]
- 6 Abdalla A M, Hossain S, Nisfindy O B, et al. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Convers Manage*, 2018, 165: 602–627
- 7 Zhang Y Y, Zhao J, Lu X L, et al. Progress in liquid organic hydrogen storage materials (in Chinese). *Chem Ind Eng Progress*, 2016, 3: 6 [张媛媛, 赵静, 鲁锡兰, 等. 有机液体储氢材料的研究进展. 化工进展, 2016, 35: 6]
- 8 Liu M Z, Shi K K, Zhao Q, et al. Research progress of solid hydrogen storage materials (in Chinese). *Chem Ind Eng Progress*, 2023, 42: 4746–4769 [刘木子, 史柯柯, 赵强, 等. 固体储氢材料的研究进展. 化工进展, 2023, 42: 4746–4769]
- 9 Sambo C, Dudun A, Samuel S A, et al. A review on worldwide underground hydrogen storage operating and potential fields. *Int J Hydrogen Energy*, 2022, 47: 22840–22880
- 10 Liu C W, Hong W M, Wang D C, et al. Research progress of underground hydrogen storage technology (in Chinese). *Oil Gas Storage Trans*, 2023, 42: 841–855 [刘翠伟, 洪伟民, 王多才, 等. 地下储氢技术研究进展. 油气储运, 2023, 42: 841–855]
- 11 Yan W, Leng G Y, Li Z, et al. Progress and challenges of underground hydrogen storage technology (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2023, 44: 556–568 [闫伟, 冷光耀, 李中, 等. 氢能地下储存技术进展和挑战. 石油学报, 2023, 44: 556–568]
- 12 Zivar D, Kumar S, Foroozesh J. Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *Int J Hydrogen Energy*, 2021, 46: 23436–23462
- 13 Hematpur H, Abdollahi R, Rostami S, et al. Review of underground hydrogen storage: Concepts and challenges. *Adv Geo Energy Res*, 2023, 7: 111–131
- 14 Pei M, Petäjäniemi M, Regnell A, et al. Toward a fossil free future with HYBRIT: Development of iron and steelmaking technology in Sweden and Finland. *Metals*, 2020, 10: 972
- 15 Zapf D, Staudtmeister K, Rokahr R B, et al. Salt structure information system (InSpEE) as a supporting tool for evaluation of storage capacity of caverns for renewable energies-rock mechanical design for CAES and H<sub>2</sub> storage caverns. In: *Proceedings of the 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. San Francisco, 2015. 3071–3077
- 16 Liebscher A, Wackerl J, Streibel M. Geologic storage of hydrogen-fundamentals, processing, and projects. In: *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*. New York: John Wiley & Sons, 2016. 629–658
- 17 Chemical Weekly Group. Air Liquide commissions world's largest hydrogen storage facility in US. *Chem Weekly*, 2017, 62: 184–184
- 18 Zhang B, Lv B L, Wu Y H, et al. Overview and trends of salt cavern gas storage worldwide (in Chinese). *China Well Rock Salt*, 2021, 52: 21–24 [张博, 吕柏霖, 吴宇航, 等. 国内外盐穴储气库发展概况及趋势. 中国井矿盐, 2021, 52: 21–24]

- 19 Ba J H, Kang Y P, Jiang H T, et al. Current status and prospects of old cavity utilization in domestic salt cavern gas storage (in Chinese). *Petrochem Appl*, 2020, 39: 1–5+19 [巴金红, 康延鹏, 姜海涛, 等. 国内盐穴储气库老腔利用现状及展望. *石油化工应用*, 2020, 39: 1–5+19]
- 20 First Anniversary of the Jintan Salt-Cavern Compressed Air Energy Storage Plant. Empowering China's Dual-Carbon Goals. *China Salt Ind*, 2023, 13: 22–2327 [金坛盐穴压缩空气储能电站运行一周年. 助力实现“双碳”目标. *中国盐业*, 2023, 13: 22–23]
- 21 Pan B, Yin X, Ju Y, et al. Underground hydrogen storage: Influencing parameters and future outlook. *Adv Colloid Interface Sci*, 2021, 294: 102473
- 22 Reitenbach V, Ganzer L, Albrecht D, et al. Influence of added hydrogen on underground gas storage: A review of key issues. *Environ Earth Sci*, 2015, 73: 6927–6937
- 23 Wang Y, Sharma B, Xu Y, et al. Switching nanoprecipitates to resist hydrogen embrittlement in high-strength aluminum alloys. *Nat Commun*, 2022, 13: 6860
- 24 Yuan S, Zhang S, Wei J, et al. Materials selection, design, and regulation of polymer-based hydrogen barrier composite coatings, membranes and films for effective hydrogen storage and transportation: A comprehensive review. *Int J Hydrogen Energy*, 2024, 91: 555–573
- 25 Wan H, Cai Y, Zhao B, et al. Investigation of carbide precipitates as hydrogen traps and their role in hydrogen embrittlement susceptibility of twinning-induced plasticity steel. *Corrosion Eng Sci Tech*, 2022, 57: 464–473
- 26 Tarkowski R. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renew Sustain Energy Rev*, 2019, 105: 86–94
- 27 Zhou H, Li Z Y, Xu J H, et al. Analysis and prospects of power generation by coupling renewable energy with salt cavern hydrogen storage technology in China (in Chinese). *Energy Storage Sci Technol*, 2022, 11: 4059–4066 [周晗, 李正宇, 徐俊辉, 等. 我国可再生能源与盐穴氢储能技术耦合发电的分析与展望. *储能科学与技术*, 2022, 11: 4059–4066]
- 28 Seyed H Y, Remco G, Joris K, et al. Techno-economic analysis of developing an underground hydrogen storage facility in depleted gas field: A Dutch case study. *Int J Hydrogen Energy*, 2023, 74: 28824–28842
- 29 Huang K, Zhang W Y, Wang F X, et al. Current status and investigation suggestions for underground space energy storage development worldwide and in China (in Chinese). *China Geology*, 2024, 51: 105–117 [黄宽, 张万益, 王丰翔, 等. 地下空间储能国内外发展现状及调查建议. *中国地质*, 2024, 51: 105–117]

## Scientific issues and research framework for large-scale underground hydrogen storage

MEI ShengWei<sup>1</sup>, LI YaoQiang<sup>2</sup>, XU NengXiong<sup>3</sup>, SHI Li<sup>4</sup>, YE JiHong<sup>5</sup>, LEI HuaYang<sup>6</sup>, LIU XiaoLi<sup>7</sup> & CHEN LaiJun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>2</sup> China National Salt Industry Group Co., Ltd., Beijing 100055, China

<sup>3</sup> School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

<sup>4</sup> Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

<sup>5</sup> School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

<sup>6</sup> School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300350, China

<sup>7</sup> School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Hydrogen energy is one of the best energy carriers to ensure China's energy security and build a clean energy system. Hydrogen storage technology, as an important bridge between hydrogen production and utilization, is one of the key technologies to promote the development of the hydrogen energy industry. China's annual hydrogen production has exceeded 50 million tonnes, with the green hydrogen industry undergoing rapid development. Underground spaces such as salt caverns and mines are valuable spatial resources, and the research on safe and efficient large-scale underground hydrogen storage technology is a significant demand for China. This study focuses on the main challenges, scientific issues, and technical routes in the safe service of high-frequency storage and release in large-scale geological hydrogen storage underground cavities. Based on this, it discusses the specific key technologies from five areas: geological space selection, development of anti-hydrogen new materials, cavity structural design, cyclic storage and release regulation, and geological hydrogen storage verification platform. It details the specific implementation plan for the dual salt cavern verification platform. Finally, this essay provides a summary and outlook on the safety and future development of large-scale geological hydrogen storage.

**hydrogen energy technology, large-scale underground hydrogen storage, challenges in hydrogen storage technology, scientific issues, key technologies**

doi: [10.1360/SST-2024-0315](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0315)