

## ◀ 清洁能源与储能 ▶

## 盐穴储氢技术的发展现状与挑战

张博轩<sup>1</sup>, 郭思宇<sup>2</sup>, 郭铠毅<sup>1</sup>, 丁梓敬<sup>1</sup>, 邹玉芝<sup>1</sup>

(1. 浙江海洋大学石油化工与环境学院, 浙江 舟山 316022;

2. 徐州工程学院土木工程学院, 江苏 徐州 221018)

**摘要** 在“双碳”战略背景下, 氢能成为能源转型的重要组成部分, 而氢能的大规模与高效存储是亟需解决的关键问题。高压气态储氢、固体储氢、低温液态储氢以及有机液体储氢等人工介质储氢技术由于规模较小、单位储氢成本较高, 难以解决大规模储氢的成本问题。地质储氢技术由于储能容量大、储存周期长、安全性高等优点, 成为满足氢气储存需求的有效解决方案。其中盐穴储氢技术因其储量大、密封性好、成本低等优势, 成为大规模储氢的理想场所。盐穴造腔包括选址、钻井、溶腔、注气排卤等多个阶段, 每个阶段都对工艺技术有着极高的要求。盐穴储氢技术在国外已经相对成熟, 除英美目前正在运营的4座储氢库外, 其他欧美各国也在积极开展盐穴储氢项目。我国在盐穴储氢领域正处于从试点向规模化应用过渡的关键阶段, 平顶山市正在建设亚洲首个深地盐穴大规模储氢项目, 引起业界的广泛关注与研究。由于勘探和地下储层改造技术的限制, 导致我国适合地质储氢的盐穴结构较为稀缺。未来盐穴储氢技术需要聚焦微生物化学反应、井筒完整性管理、盐岩蠕变等问题, 推动技术成熟与成本下降。

**关键词** 盐穴储氢 地质储氢 储氢成本 微生物 井筒完整性 盐岩蠕变

## 1 前言

在“双碳”目标背景下, 氢能以清洁无碳、绿色高效等特点, 成为能源转型的重要组成部分, 建筑、交通等领域的低碳化进程都离不开氢能的使用<sup>[1]</sup>。目前, 人口快速增长引起的能源紧缺和环境污染等问题日益严重, 伴随国家多项能源政策的出台, 我国已明确将氢能纳入新型储能体系<sup>[2]</sup>, 以支持氢能产业的发展和产业创新<sup>[3]</sup>。储氢技术不仅仅是上承制氢和下接氢能综合利用的重要环节, 更是氢能源大规模、长距离、低成本储运的关键<sup>[4]</sup>。

在大力发展氢能的过程中, 如何实现氢气大规模与高效存储是亟需解决的关键难题。目前市场上主要的储氢方式包括依赖于人工介质或容器的高压气态储氢、固体储氢、低温液态储氢和有机液态储氢等方式<sup>[5]</sup>, 以及基于地下含水层、枯竭油气藏、地下盐穴等自然形成的巨大地质构造进行的地质储氢方式。

## 2 现有储氢技术分析

### 2.1 人工介质储氢

人工介质储氢技术依赖于物理或化学手段制造能够储存氢气的高强度容器或化学介质, 这种方

式主要利用耐压氢气瓶、化学合成的固态氢化物以及易吸附氢原子的钌镍合金等人工制造的空间来储存氢能源, 如高压气态储氢、固体储氢、低温液态储氢以及有机液体储氢。其特点是规模较小、单位储氢成本较高、储氢周期较短, 所以难以解决大规模储氢的成本问题。

高压气态储氢的原理是利用压缩机将氢气压缩至高压状态, 随后存储在专门设计的高压容器中, 这种氢气储存方式适应范围广、技术成熟<sup>[6]</sup>。虽然高压气态储氢具有较高的能效, 但其能耗和成本较为昂贵。为维持储氢所需的高压环境和防止泄漏、爆炸等安全隐患发生, 所以对设备和材料是有严格要求的。

固体储氢技术是将氢气与金属氢化物、化学氢化物等固体储氢材料结合<sup>[7,8]</sup>, 在需要时通过加热或化学反应释放氢气的技术。固体储氢技术的优势包括能量密度高、安全性高、运输方便、技术前景广阔, 但是其吸附材料的制造工艺相对复杂<sup>[9,10]</sup>, 某些

**作者简介:** 张博轩, 浙江海洋大学石油化工与环境学院油气储运工程专业在读本科生。E-mail: 3561099393@qq.com

化学吸附储氢材料,如  $\text{NaAlH}_4$  的合成成本高且合成过程具有危险性,从而限制了其应用。

低温液态储氢技术是将氢气冷却至约  $-252^\circ\text{C}$ ,使其转变为液态氢并进行储存的技术。由于液态氢的体积密度较高、沸点极低,因此在大规模存储和运输过程中被保存在专门设计的真空绝热容器内。尽管该方法能够实现长时间和高密度的液态氢存储,但也面临一些挑战,如氢气冷却过程需要消耗大量能量,且存储液态氢的容器制作和维护成本极高<sup>[11,12]</sup>。同时,液氢在运输过程中也存在爆炸和泄漏等安全隐患<sup>[13]</sup>。

有机液体储氢技术是以不饱和的碳氢液体有机化合物作为氢气载体对氢气进行储存<sup>[14]</sup>,通过与氢气发生可逆的加氢反应实现氢的存储,并在需要时借助脱氢反应释放氢气<sup>[15,16]</sup>。其缺点是成本较高以及脱氢反应通常需要在高温下进行,这可能导致催化剂失去活性,从而消耗大量的能量。

## 2.2 地质储氢

地质储氢技术主要依托现有的地下天然地质结构,用于大规模、低成本的氢气储存。这项技术因其具有储能容量大、储存周期长、安全性高等优点,成为满足氢气储存需求的有效解决方案。诸如含水层、枯竭油气藏、盐穴等<sup>[17]</sup>这些天然地质构造都具有储存大量氢气的能力。

含水层储氢技术是把地下含水层作为储氢空间。含水层通常由多孔的砂岩构成,在储氢过程中,氢气被注入地下含水层,由于氢气密度低,会自发渗透到含水层的孔隙和裂缝中,从而实现储氢<sup>[18]</sup>。但是,由于含水层地质条件复杂以及氢气分子微小,氢气泄漏的风险不可忽视。因此,在含水层建立安全可靠的地下储氢设施,离不开地下结构良好的封闭性和稳定性<sup>[19,20]</sup>。

枯竭油气藏储氢是利用现有科技手段对已枯竭或者开采完的油气田进行改造和加工,使其成为储存氢气的场所。油气田本身具有天然的储存空间和覆盖岩层结构,借助已有的结构,可以综合降低建设成本,实现氢气的储存。但是,油气田中的原油、天然气、水等流体具有不同的物理和化学特性,这会影响到加工效率、储层的流动性以及氢气的高效储存<sup>[21]</sup>。

盐穴储氢是利用天然的盐穴(如岩盐层)或人工溶解盐层形成的空洞来大规模储存氢气的技术。盐层因其优异的结构稳定性和极高的密封性,为氢气提供一个安全、封闭且稳定的储存环境,从而有效防止氢气泄漏,并能够在高压条件下进行储存。然而,盐穴造腔包括选址、钻井、溶腔、注气排卤等多个阶段,每个阶段都对工艺技术有着极高的要求。图1为盐穴储氢示意图<sup>[22]</sup>。

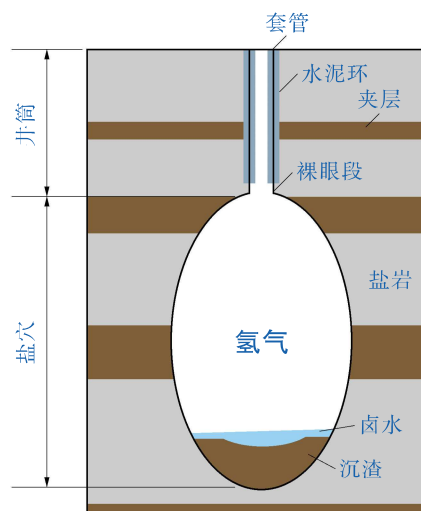


图1 盐穴储氢示意图

盐穴储氢相较于其他储氢方法具有以下3个优点:①盐穴对垫层气的需求因其深度而异,但是所需的垫层气比例远低于枯竭油气藏储层和含水层<sup>[23]</sup>;②盐穴储氢在化学稳定性和抗菌性方面表现优越,对周围环境的影响较小,更符合可持续发展战略的要求<sup>[24]</sup>;③盐岩的低渗透性和化学惰性可以有效防止氢气泄漏和反应。综上所述,盐穴的这些特性使其成为大规模储氢的理想场所。

## 3 盐穴储氢技术应用现状

### 3.1 国外盐穴储氢现状

盐穴储氢技术在国外已经经过多年的研究与发展,技术相对成熟,表1为国外地下储氢库概况<sup>[25]</sup>。

位于英国 Teesside 的储氢库由3个盐穴组成,建造时间最早,现已运行50年,拥有超过  $2 \times 10^4 \text{m}^3$  的储存容量,能够存储纯度约为95%的氢气,主要用于石油化工行业。Teesside 是英国首个推动绿色氢能作为能源来实现脱碳的项目,该项目促进了氢能基础设施的进一步发展,并为其他地区的类似项目提供了宝贵经验和成功案例。

美国得克萨斯州拥有3个盐穴储氢库,其中Clemens Dome是全球最大的氢气储存设施之一。该地区沿海以及州内的盐岩资源,为盐穴储氢设施的建设奠定了坚实基础。随着国际氢能产业链不断发展,得克萨斯州的盐穴储氢库项目不断扩展与完善,未来有望在全球能源储存和分配体系中占据关键地位<sup>[26]</sup>。

除了英美目前正在运营的4座储氢库以外,其他欧美各国也在积极开展盐穴储氢项目,计划在地下盐穴中储存氢气,以解决能源供给中的间歇性问题。波兰矿产资源较为丰富,Tarkowski<sup>[27]</sup>认为,Łeba Elevation、Polish Lowlands等地区的盐岩矿床适合用于盐穴储氢。罗马尼亚的采盐业有着悠久的历史,因此被认为未来非常有潜力将盐穴用于地下氢储存。Iordache等<sup>[28]</sup>在HyUnder项目研究中指出,Ocna Mures、Targu Ocna、Ocnele Mari和Cacica等四个地点是潜在的储氢场所。Lemieux等<sup>[29]</sup>认为,加拿

大Ontraio省南部拥有丰富的石油和天然气储层、深层咸水层以及盐穴资源,这些条件使该地区成为理想的地下储氢地点。他们还强调,储氢库的建设应该充分利用现有设施,从而提高效率和降低经济成本。德法等国也计划通过盐穴来大规模储氢,Le Duigou等<sup>[30]</sup>认为,位于法国的Valence盆地等地区是具有地质储氢潜力的。Kumari等<sup>[31]</sup>指出,澳大利亚为解决碳排放和环境等问题,预计在未来几十年将对其能源系统进行根本转变。能源系统的转变,需要持续发展和完善清洁能源产业,在众多清洁能源中,氢能尤为重要,其大规模储存环节不可忽视。虽然澳大利亚尚未建成盐穴储氢设施,但是澳大利亚的盐层广泛分布,特别是西澳大利亚,为氢气的储存提供了良好的地质条件<sup>[32]</sup>。位于西澳大利亚的Advale盆地、Canning盆地、Officer盆地等地区具备合适的地质结构和丰富的能源,被认为适合建造储氢设施<sup>[33]</sup>。

表1 国外地下储氢库

国家/地区	储氢库名称	建造时间	盐腔体积/ $10^4\text{m}^3$	深度/m	工作压力/MPa
美国	Clemens Dome	1983年	58	930	7.0~13.5
美国	Moss Bluff	2007年	56.6	1200	5.5~15.2
美国	Spindletop	2014年	>58.00	1340	6.8~20.2
英国	Teesside	1972年	21	365	4.5
英国	Aldbrough	未来	3300		
德国	Hypos	未来			
德国	InSpEE	未来			
法国	HyPster	未来	4.84		
法国	Terega	未来	33		
欧盟	HyUnder	未来	40		
丹麦	Green	未来	0.66	1370	
丹麦	Hydrogen	未来	0.66	1370	
丹麦	Hub	未来	0.66	1370	
荷兰	HyStock	未来	0.66	1200	
荷兰	LSES	未来	140		

### 3.2 我国盐穴储氢现状

相比于国外盐穴储氢项目,我国在盐穴储氢领域正处于从试点向规模化应用过渡的关键阶段。目前,中国平煤神马集团正在平顶山市叶县仙台镇北庞庄村建设亚洲首个深地盐穴大规模储氢项目,预计将在2025年6月完成 $150 \times 10^4 \text{m}^3$ (标准状态)氢气注气排卤,2025年9月完成盐穴储氢中试<sup>[34]</sup>。该集团若充分开发盐腔储氢项目,储存容量可达 $200 \times$

$10^8 \text{m}^3$ ,可满足我国整个中东部的氢气存储需求。

我国的盐穴资源丰富、储量大且埋深适宜,如金坛盐穴、中国石化江汉盐穴、泰安盐穴等地区。而且杨春和院士<sup>[35]</sup>认为金坛已经实现储存天然气和压缩空气,以后会努力尝试储存氢能等,形成一种广义的能源储存。未来很有可能会运用先进地球物理勘探技术定位潜在盐穴,开发建设出更多的地下储氢库。

盐穴储氢对于中国“双碳”战略具有重要意义,随着叶县等项目的成功落地和技术迭代,以及相关政策的大力支持,我国的盐穴储氢将成为未来能源体系的重要组成部分,为实现碳中和目标提供有力的支撑。

#### 4 盐穴储氢技术面临的挑战

##### 4.1 微生物化学反应

微生物代谢是盐穴储氢中的难题之一。尽管高盐环境可以通过增加渗透压、改变酶活性等多种机制来抑制大多数微生物的生长,但是一些耐盐性和喜盐性微生物(如嗜盐菌),能够通过积累特定的高渗透性化合物来调节细胞内的渗透压、保持水分并抵抗盐分的影响。地下构造中氢的存在可能触发耗氢微生物的生长,这些微生物会影响氢气的纯度,减少氢气的含量。尤其是硫酸盐还原菌,它可以在盐水环境中繁殖,其代谢产物如硫化氢会对金属材料造成腐蚀,导致氢脆和应力腐蚀并产生裂纹,显著影响盐穴储氢系统的安全运行<sup>[36,37]</sup>。产甲烷菌可以吸收氢气与二氧化碳生成甲烷,这意味着它会消耗盐穴中的氢气,并且由于系统中甲烷浓度的升高,对周围环境造成极大危险<sup>[38]</sup>。这些微生物极大地影响了盐穴储氢系统的安全、储氢的含量,在系统的设计、管理与运行中,需要特别关注微生物的活动,并采取有效措施来控制微生物的生长和代谢过程。

##### 4.2 井筒完整性

图2为井筒示意图<sup>[39]</sup>。井筒完整性是保障盐穴储氢设施安全稳定运行的关键因素<sup>[40]</sup>,井筒完整性破坏的主要因素是氢脆和井筒内外部的金属材料(套管、管道)腐蚀。

###### 4.2.1 氢脆

金属材料的脆裂程度与其强度、氢气纯度和所承受的应力大小密切相关<sup>[41]</sup>。对于需储存大规模、高纯度氢气的设施而言,这无疑对井筒的抗氢脆能力提出了严峻挑战。

传统钢材可以通过加热脱氢或者真空退火的方法来降低其中的氢含量,加入钒、锰、铜等元素也可改善其性能,钒通过细化晶粒来提高强度,锰有助于脱氧以提高强度,铜可以提高钢材的耐腐蚀性。还可以利用高速喷射的丸子对金属表面进行轰

击,并植入能够抵消外部拉压应力的残压层表面,使氢脆的可能性降低<sup>[42]</sup>。

高强度钢,如 API5L X70 和 X80,这类钢材采用了微合金化和热处理技术,主要用于石油和天然气等流体气体输送<sup>[43-45]</sup>。在建设设施前,应综合考虑储氢的容量、压力等因素,合理选择不同的材料。通常来说,强度越高的金属材料,其氢脆敏感性越高<sup>[46,47]</sup>。由此可见,优化合金成分、改善微观结构、采取适当防护措施合理解决氢脆问题是安全储氢的关键<sup>[48]</sup>。

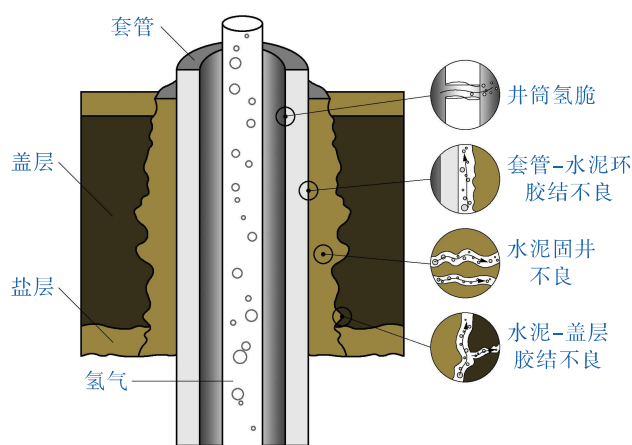


图2 井筒示意图

###### 4.2.2 化学腐蚀

井筒内外部腐蚀是由井下含硫矿物、有机物的腐烂和水解反应产生的  $H_2S$  和  $CO_2$  等气体引起的。 $H_2S$  与金属材料反应时,会释放氢气并诱发套管、水泥环氢脆开裂<sup>[49]</sup>。二氧化碳会与水泥硬化后的混凝土发生化学反应,生成降低其抗压强度的碳酸钙,碳化程度的提高使钢筋逐渐失去保护,进而诱导腐蚀<sup>[50,51]</sup>。

盐岩矿床的主要成分是氯化钠,氯离子能够对金属表面的钝化膜进行局部腐蚀与破坏,随着氯离子的不断扩散,最终引发点蚀现象<sup>[52]</sup>。当电解质接触到两种不同的金属材料时,井筒中的钢管、井壁等金属材料会形成电偶电池,从而使得电化学反应中相对活泼的金属加速腐蚀。同时,由于井筒中的水分和盐分可以促进电流的流动,使得电偶腐蚀更加明显<sup>[53]</sup>。

综上所述,井筒内外部的腐蚀速率受温度、压力、氢气浓度、pH 值以及金属材料本身特性等多种

因素影响。深入了解和控制这些因素,对于盐穴储氢库的建设和安全运行至关重要<sup>[54,55]</sup>。

### 4.3 盐穴岩石力学行为

#### 4.3.1 围岩渗透

氢气具有相对分子质量小、黏度低、扩散能力强等特点<sup>[2]</sup>,在高温高压条件下,氢气分子可以渗透进入金属的晶格中,形成金属氢合金。在低温或者常温下,氢气分子的扩散能力强,可以在金属的晶格中自由扩散,形成氢离子和氢原子,并进一步与金属原子相互作用。

盐穴储氢设施建设需要特别关注腔体的气密性<sup>[56]</sup>。在高压环境下,随着地下腔体内氢气压强的增大,盐岩和围岩微观结构发生变化,这会影晌腔体的体积和形状发生变动,局部区域压力增大,造成岩层裂缝扩大,引发氢气泄漏<sup>[57]</sup>。围岩的特性对于地下工程的设计与施工至关重要,其稳定性直接影响地下工程的安全性。而渗透性对于盐穴储氢设备来说更是至关重要,其主要受岩石类型、孔隙度、温度以及盐穴周围压力等因素影响。围岩内部的孔隙和裂隙为氢气自由扩散提供了通道,尤其是在高温、高压环境下,氢分子进入围岩后,会从高压区流向低压区,在孔隙中发生溶解,并沿着岩石裂缝扩散,这一过程直接影响盐穴储氢系统的密闭性和氢气长期存储的安全性。

岩心渗透率的测量方法可分为两种:稳态法和非稳态法。稳态法适用于渗透率测试范围在 $10^{-12}$ ~ $10^{-17}$ m<sup>2</sup>的岩心,采用如式(1)所示的 Darcy 公式计算渗透率<sup>[58]</sup>:

$$k = \frac{2p_0\mu Lq}{A(p_{up}^2 - p_{down}^2)} \quad (1)$$

式中: $k$ 为渗透率; $p_0$ 、 $p_{up}$ 、 $p_{down}$ 分别为大气压、上游压力和下游压力; $A$ 、 $L$ 分别为测试试样的横截面积和长度; $q$ 为通过试样的体积流量; $\mu$ 为测试介质的动力黏度。

非稳态法则适用于渗透率测试范围在 $10^{-18}$ ~ $10^{-22}$ m<sup>2</sup>的岩心,测试介质采用氮气,见式(2)<sup>[58]</sup>:

$$\begin{cases} k = \chi \frac{\delta\mu L}{A} \left( \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \right) \\ \chi = - \frac{d[\ln(\Delta p/p_0)]}{dt} \\ \Delta p = p_{up} - p_{down} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $p_0$ 为脉冲压力; $\Delta p$ 为上下游压力差; $V_1$ 、 $V_2$ 分别为上、下游压力室体积; $\delta$ 为介质压缩系数; $\chi$ 为上下游压差随时间的变化系数。

#### 4.3.2 岩石蠕变

盐岩具有优异的蠕变特性,表现为长期应力作用下,岩石发生不可逆的变形。与其他岩石相比,盐岩的蠕变速率较快,随着时间推移,盐岩会自动填充孔隙和裂缝,防止氢气泄漏。盐岩的蠕变过程主要包括三个阶段:①初期蠕变阶段,在较低应力下,盐岩变形速度快;②稳态蠕变阶段,随着应力增加,盐岩的变形速度逐渐稳定;③加速蠕变阶段,当应力进一步增加,盐岩进入加速变形阶段<sup>[59]</sup>。盐岩的蠕变特性主要与外部应力状态、温度、时间等因素有关<sup>[60-62]</sup>。

不同的应力对于盐岩蠕变行为的影响各不相同<sup>[63]</sup>。王军保等<sup>[64]</sup>的研究表明,在单轴压缩蠕变试验中,盐岩的蠕变应变和其稳态率随轴向应力的增大而非线性增大。

在相同的应力状态下,温度对盐岩蠕变的影响也是至关重要的。娄尔标等<sup>[65]</sup>的研究结果表明,随着温度升高,盐岩在蠕变阶段的蠕变速率会呈现增加趋势,加速盐岩蠕变过程并增加其流动性,高温还会让盐岩的微观结构变得更加松散,降低其强度并与应力的变化共同作用,影响盐穴储氢系统的稳定性。

## 5 总结与讨论

盐穴储氢作为一种大规模、安全、长期的储氢技术,近年来在全球范围内得到了广泛关注。但与此同时,盐穴的稀缺性、氢气的反应性、高昂的维护成本等也成为盐穴储氢发展的限制因素。

① 适合作为地质储氢场所的盐穴结构较为稀缺。受到勘探和地下储层改造技术的限制,中国仅有少数地区拥有满足改造使用基本要求的盐穴空腔,这严重限制了盐穴储氢技术的大规模推广应用,阻碍其在氢能储存领域充分发挥潜力。

② 生化反应对氢气资源造成的消耗难以避免。地下微生物引发的生化反应不仅直接减少了储存的氢气量,降低了储氢系统的有效储能容量,还会带来一系列衍生问题。例如,产生的硫化氢等气体具有腐蚀性,会对盐穴内部的储存设备以及管道

等基础设施造成损害,缩短设备使用寿命,增加维护成本与安全风险。

③ 高昂的维护成本使得盐穴储氢成为“奢侈品”。地下围岩长期对盐穴腔壁施加压力引发岩石蠕变,导致盐穴的形状和体积逐渐改变,造成盐穴失稳。为了减缓岩石蠕变,往往需要改变注采工作制度或者利用井筒注入改造流体稳固盐穴壁面,这无疑大幅推高了维护成本。同时在修复施工期间盐穴的使用效率大幅下降,影响了盐穴储氢库的经济效益。

不过,随着全球对清洁能源的需求增加,盐穴储氢技术必将得到进一步发展。未来,盐穴储氢技术需要重点攻克微生物化学反应、井筒完整性管理、盐岩蠕变等问题,相信随着技术的不断进步和成本的降低,盐穴储氢有望在全球范围内得到更广泛的应用。

#### 参考文献:

- [1] 邹才能,薛华庆,熊波,等.“碳中和”的内涵、创新与愿景[J].天然气工业,2021,41(8):46-57.
- [2] 王灿,李浩,张洪秩,等.全球温控目标对我国氢能发展的影响评估[J].技术经济,2023,42(2):121-132.
- [3] 张俊法,曾大乾,陈诗望,等.地下储氢技术现状及在中国加快发展的可行性[J].世界石油工业,2024,31(4):114-119.
- [4] 李敬法,李建立,王玉生,等.氢能储运关键技术研究进展及发展趋势探讨[J].油气储运,2023,42(8):856-871.
- [5] 高金良,袁泽明,尚宏伟,等.氢储存技术及其储能应用研究进展[J].金属功能材料,2016,23(1):1-11.
- [6] 李菊峰,王璇,郭勇,等.氢能发展的意义及储氢技术现状[J].化学工程与装备,2023(1):205-206.
- [7] 张四奇.固体储氢材料的研究综述[J].材料研究与应用,2017,11(4):211-215.
- [8] 刘木子,史柯柯,赵强,等.固体储氢材料的研究进展[J].化工进展,2023,42(9):4746-4769.
- [9] 陈学迪.Pd基催化剂的设计及其催化有机液体储氢材料脱氢性能研究[D].武汉:中国地质大学,2023.
- [10] 钱鑫,陈义武,刘超,等.固体储氢材料研究进展及展望[J].现代化工,2024,44(3):74-78.
- [11] 刘春荣.贵金属化合物/CoB混合催化剂对NaBH<sub>4</sub>水解放氢性能的影响[D].西安:长安大学,2017.
- [12] 胡永康.浅谈不同储氢方式的优缺点及发展趋势[J].科教导刊(电子版),2018(1):296.
- [13] 郭志钊,巨永林.低温液氢储存的现状及其存在问题[J].低温与超导,2019,47(6):21-29.
- [14] 叶子.全球氢能产业发展趋势浅析[J].石油石化绿色低碳,2024,9(2):12-18.
- [15] 黄青.有机液体储氢技术现状及其脱氢催化研究进展[J].广东化工,2024,51(19):94-96.
- [16] 伊立其,郭常青,谭弘毅,等.基于有机液体储氢载体的氢储能系统能效分析[J].新能源进展,2017,5(3):197-203.
- [17] 张来斌,胡瑾秋,肖尚蕊,等.深部地下空间储能安全与应急保障技术现状与发展趋势[J].石油科学通报,2024,9(3):434-448.
- [18] 王浩,徐俊辉,陆佳敏,等.大规模地质储氢工程现状及应用展望[J].中国地质,2025,52(1):180-204.
- [19] 周庆凡,张俊法.地下储氢技术研究综述[J].油气与新能源,2022,34(4):1-6.
- [20] 张玥.含水层地下储氢圈闭完整性评价研究[D].大庆:东北石油大学,2023.
- [21] 胡超,付星辉,何卉,等.浅谈我国地下盐腔储氢发展可能[J].中国井矿盐,2023,54(2):20-23.
- [22] 杨春和,王贵宾,施锡林,等.中国大规模盐穴储氢需求与挑战[J].岩土力学,2024,45(1):1-19.
- [23] 潘松圻,邹才能,王杭州,等.地下储氢库发展现状及气藏型储氢库高效建库十大技术挑战[J].天然气工业,2023,43(11):164-180.
- [24] 于春生,彭良儒,蒋琪,等.稠油油藏SAGD开发后腔体储氢潜力数值模拟[J].天然气工业,2024,44(8):178-190.
- [25] 纪文栋,万继方,贺育贤,等.中国盐穴储氢关键技术现状及展望[J].石油钻探技术,2024,52(4):158-166.
- [26] 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[J].中国地质,2024,51(1):105-117.
- [27] TARKOWSKI R.Perspectives of Using the Geological Subsurface for Hydrogen Storage in Poland[J].International Journal of Hydrogen Energy,2017,42(1):347-355.
- [28] IORDACHE I,SCHITEA D,GHEORGHE A V,et al.Hydrogen Underground Storage in Romania,Potential Directions of Development,Stakeholders and General Aspects[J].International Journal of Hydrogen Energy,2014,39(21):11071-11081.
- [29] LEMIEUX A,SHARP K,SHKARUPIN A.Preliminary Assessment of Underground Hydrogen Storage Sites in Ontario,Canada[J].International Journal of Hydrogen Energy,2019,44(29):15193-15204.
- [30] LE DUIGOU A,BADER A-G,LANOIX J-C,et al.Relevance and Costs of Large Scale Underground Hydrogen Storage in France[J].International Journal of Hydrogen Energy,2017,42(36):22987-23003.
- [31] KUMARI W G P,RANJITH P G.An Overview of Underground Hydrogen Storage with Prospects and Challenges for the

- Australian Context[J].*Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 231: 212354.
- [32] AFTAB A, HASSANPOURYOUZBAND A, NADERI H, et al. Quantifying Onshore Salt Deposits and Their Potential for Hydrogen Energy Storage in Australia[J].*Journal of Energy Storage*, 2023, 65: 107252.
- [33] AMIRTHAN T, PERERA M S A. Underground Hydrogen Storage in Australia: A Review on the Feasibility of Geological Sites[J].*International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(11): 4300-4328.
- [34] 中国新闻网河南.平煤神马深地盐穴大规模储氢项目在河南叶县开工[EB/OL].(2024-11-18).<http://www.ha.chinanews.com.cn/news/zx/2024/1118/56924.shtml>.
- [35] 王鹏,郑明阳,杨春和.建设盐穴多能并储的格局[J].*中国盐业*, 2021(19): 8-9.
- [36] TACKIE-OTOO B N, HAQ M B. A Comprehensive Review on Geo-Storage of H<sub>2</sub> in Salt Caverns: Prospect and Research Advances[J].*Fuel*, 2024, 356: 129609.
- [37] NAVAID H B, EMADI H, WATSON M. A Comprehensive Literature Review on the Challenges Associated with Underground Hydrogen Storage[J].*International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(28): 10603-10635.
- [38] PANFILOV M. Underground Storage of Hydrogen; In Situ Self-Organisation and Methane Generation[J].*Transport in Porous Media*, 2010, 85: 841-865.
- [39] 王敏聪,侯磊,王雪婷,等.地下空间储氢技术研究进展与应用展望[J].*油气储运*, 2025, 44(6): 601-620.
- [40] 张智,宋闯,冯潇霄,等.井筒屏障完整性及其优化设计——以CO<sub>2</sub>吞吐井为例[J].*石油钻采工艺*, 2019, 41(3): 318-328.
- [41] 祁文娟,宋仁国,祁星,等.7050 铝合金氢致附加应力与氢脆[J].*中国有色金属学报*, 2015, 25(5): 1185-1192.
- [42] 朱永强,宋维,李雨霞,等.输氢管线钢防止氢脆研究进展[J].*表面技术*, 2022, 51(11): 126-137, 163.
- [43] 王海燕.X80 级管线钢串列双丝多层焊的试验研究和数值分析[D].青岛:中国石油大学(华东), 2015.
- [44] 冯群涛,徐峰涛,牛志磊,等.管线钢 API 5L X80 焊接工艺试验[J].*中国石油和化工标准与质量*, 2014, 34(1): 242-243.
- [45] 洪良.厚规格 X80 管线钢微观组织控制及力学性能研究[D].郑州:郑州大学, 2017.
- [46] 赵茜,邢云颖,王修云,等.天然气管道掺氢输送相容性研究现状[J].*材料导报*, 2024, 38(12): 132-138.
- [47] 李松杰,王成铎,孙玉福,等.高强度延迟断裂敏感性评价研究现状[J].*铸造技术*, 2017, 38(8): 1785-1788.
- [48] 石荣建,杜智煜,庞晓露.高强抗氢脆钢的设计与工程化实践[J].*金属世界*, 2023(5): 7-13.
- [49] DU Xianli, DAI Xiaojuan, LI Zhaochuan, et al. Corrosion Analysis and Anti-Corrosion Measures of Oil Casing of Sulfur Content Gas Wells: A Case Study of Daniudi Gas Field in the Ordos Basin[J].*Energy Reports*, 2021, 7: 1280-1292.
- [50] YOU Xujia, HU Xiang, HE Pingping, et al. A Review on the Modelling of Carbonation of Hardened and Fresh Cement-Based Materials[J].*Cement & Concrete Composites*, 2022, 125: 104315.
- [51] 马世豪.海洋钢筋混凝土结构内掺型阻锈剂阻锈性能研究[D].青岛:青岛理工大学, 2016.
- [52] 樊冰,任永苍,罗金恒,等.石油管材在含氯离子介质中的腐蚀研究进展[J].*石油管材与仪器*, 2024, 10(5): 13-18.
- [53] 王建军,付太森,薛承文,等.地下储气库套管和油管腐蚀选材分析[J].*石油机械*, 2017, 45(1): 110-113.
- [54] PERERA M S A. A Review of Underground Hydrogen Storage in Depleted Gas Reservoirs: Insights into Various Rock-Fluid Interaction Mechanisms and Their Impact on the Process Integrity[J].*Fuel*, 2023, 334: 126677.
- [55] 于振国.三元复合驱井筒结垢腐蚀机理及影响因素研究[D].大庆:东北石油大学, 2022.
- [56] 杨永飞,尚振骁,秦朝中,等.地下大规模储氢的挑战与发展前景[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(6): 95-104.
- [57] FANG Jiangyu, MA Hongling, YANG Chunhe, et al. Airtightness Evaluation of Compressed Air Energy Storage (CAES) Salt Caverns in Bedded Rock Salt[J].*Journal of Energy Storage*, 2024, 102: 114100.
- [58] 陈祥胜,李银平,施锡林,等.深部地层长岩心侵蚀渗流装置研发与试验研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2019, 38(11): 2254-2262.
- [59] 杨春和,王同涛.深地储能研究进展[J].*岩石力学与工程学报*, 2022, 41(9): 1729-1759.
- [60] 马文群.层状岩盐洞室的流变变形和稳定性分析[D].天津:河北工业大学, 2011.
- [61] 杨恒林,陈勉,金衍,等.复合盐层套管外挤压力动态变化规律研究[J].*石油钻探技术*, 2006, 34(5): 21-23.
- [62] 李世远,李扶摇,杨柳,等.复合盐膏层界面错动的变形机理及数值模拟研究[J].*石油科学通报*, 2019, 4(4): 390-402.
- [63] 陈晔磊.炭质板岩本构模型建立及隧道工程应用研究[D].成都:西华大学, 2022.
- [64] 王军保,刘新荣,宋战平,等.基于反 S 函数的盐岩单轴压缩全过程蠕变模型[J].*岩石力学与工程学报*, 2018, 37(11): 2446-2459.
- [65] 娄尔标,刘洪涛,李宁,等.盐岩蠕变力学特性分析[C]//中国材料研究学会.中国材料大会 2021 论文集.2021: 158-165.

(编辑 张峰)

## Development Status and Challenges of Salt Cavern Hydrogen Storage Technology

Zhang Boxuan<sup>1</sup>, Guo Siyu<sup>2</sup>, Guo Kaiyi<sup>1</sup>, Ding Zijing<sup>1</sup>, Zou Yuzhi<sup>1</sup>

(1.School of Petrochemical and Environment, Zhejiang Ocean University, Zhoushan Zhejiang 316022;

2.School of Civil Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou Jiangsu 221018)

**[Abstract]** Under of the "dual carbon" strategy, hydrogen energy has become an important part of energy transition, while the large-scale and efficient storage of hydrogen energy is a key issue that urgently needs to be addressed. Artificial medium hydrogen storage technologies such as high-pressure gaseous hydrogen storage, solid hydrogen storage, cryogenic liquid hydrogen storage and organic liquid hydrogen storage are difficult to solve the cost problem of large-scale hydrogen storage due to their small scale and high unit hydrogen storage cost. Geological hydrogen storage technology has become an effective solution to meet the demand for hydrogen storage due to its advantages such as large energy storage capacity, long storage period and high safety. Among them, salt cavern hydrogen storage technology has become an ideal solution for large-scale hydrogen storage due to its advantages such as large storage capacity, good sealing performance and low cost. The cavity construction of salt cavern involves multiple stages such as site selection, drilling, cavity dissolution, and gas injection and brine displacement. Each stage has extremely high requirements for process technology. Salt cavern hydrogen storage technology has become relatively mature abroad. Besides the four hydrogen storage facilities currently in operation in the UK and the US, other European and American countries are also actively carrying out salt cavern hydrogen storage projects. China is currently at a crucial stage of transitioning from pilot projects to large-scale applications in the field of salt cavern hydrogen storage. Pingdingshan City is building Asia's first large-scale deep underground salt cavern hydrogen storage project, which has attracted extensive attention and research interest from the industry. Due to limitations in exploration and underground reservoir modification technologies, salt cavern structures suitable for geological hydrogen storage are relatively scarce in China. In the future, salt cavern hydrogen storage technology needs to focus on issues such as microbial chemical reactions, wellbore integrity management and salt rock creep, so as to promote technological maturity and cost reduction.

**[Keywords]** salt cavern hydrogen storage; geological hydrogen storage; hydrogen storage cost; microorganisms; wellbore integrity; salt rock creep

### · 能源链接 ·

#### 我国制氢技术从“灰氢主导”到“绿氢突围”

在中国丰富的可再生资源背景下,绿氢制取展现出巨大的潜力,预示着广阔的发展前景。以光伏、风电为主要能源的绿氢产业,作为战略性新兴产业,其不断发展和技术革新对于保障经济社会、环境能源等多领域的绿色低碳转型至关重要,为“双碳”目标的实现提供了坚实支撑。

中国在可再生能源制氢领域已形成规模化集群优势。截至2024年底,可再生能源制氢产能超 $12 \times 10^4$ t。新疆库车、宁夏宁东等电解水制氢项目的投产,标志着碱性电解槽技术逐步实现工业化实证验证。与此同时,质子交换膜(PEM)电解槽关键技术取得实质性突破,海水电解制氢中试装置实现试运行,为沿海地区海上绿氢供应提供了创新方案。相关技术有望推动绿氢生产成本持续下降,逐步接近与灰氢竞争的经济性拐点。(供稿 舟丹)