

◀低碳减碳▶

doi:10.11911/syztjs.2024055

引用格式: 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.

Ji Wendong, WAN Jifang, HE Yuxian, et al. Key technologies and prospect of salt cavern hydrogen storage in China [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(4): 158-166.

中国盐穴储氢关键技术现状及展望

纪文栋¹, 万继方¹, 贺育贤², 李景翠¹, 刘伟³, 孙鹏⁴

(1. 中能建数字科技集团有限公司, 北京 100044; 2. 长江大学机械工程学院, 湖北荆州 434023; 3. 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 4. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘 要: 随着中国“双碳”目标的推进, 传统化石能源正向可再生清洁能源转型。氢能具有来源广、能量密度高和高效清洁等特点, 已成为未来重要的能源构成。盐穴的气密性优势明显, 且盐与氢气不发生反应, 是地下大规模储氢的首选。为聚焦中国盐穴储氢技术研究和未来发展, 分析了储氢地质类型及特征, 详细阐述了盐穴储氢研究进展和国外运营现状; 围绕盐穴储氢技术, 深入剖析了大尺寸钻完井、盐穴造腔及形态控制、腔体密封性评价、井筒完整性检测及评价、管材腐蚀及氢脆控制等关键技术; 总结了近年来各国制定的相关氢能政策和战略目标, 结合我国盐穴储氢未来发展的机遇和挑战, 对盐穴储氢地质选择和评估、大尺寸井筒完整性、盐穴造腔形态控制和密封性检测、氢能和盐业有机协同发展进行了展望, 以期推进氢能规模化应用与产业链发展。研究结果为中国盐穴储氢发展和规划提供了技术参考。

关键词: 盐穴储氢; 造腔; 腔体密封; 井筒完整性; 发展方向

中图分类号: TE245

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)04-0158-09

Key Technologies and Prospect of Salt Cavern Hydrogen Storage in China

Ji Wendong¹, WAN Jifang¹, HE Yuxian², LI Jingcui¹, LIU Wei³, SUN Peng⁴

(1. China Energy Digital Technology Group Co., Ltd., Beijing, 100044, China; 2. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control(Chongqing University), Chongqing, 400044, China; 4. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China)

Abstract: With the advancement of China's carbon peaking and carbon neutrality ("dual carbon") goals, traditional fossil energy is being transformed into renewable and clean energy. Hydrogen energy, characterized by wide sources, high energy density, and high efficiency and cleanliness, has become an important energy component in the future. Salt caverns have especially obvious advantages in terms of gas tightness, and salt does not react with hydrogen, making them the first choice for large-scale underground hydrogen storage. In order to focus on the research and future development of salt cavern hydrogen storage technologies in China, the geological types and characteristics of hydrogen storage were analyzed and the research progress of salt cavern hydrogen storage and its current situation in foreign operations were discussed. In view of the salt cavern hydrogen storage technologies, the key technologies such as large-size drilling and completion, salt cavern cavity creation and morphology control, cavity sealing evaluation, wellbore integrity testing and evaluation, and control of tubing corrosion and hydrogen embrittlement were analyzed. The relevant hydrogen energy policies and strategic goals formulated by various countries in recent years were summarized. Combining the opportunities and challenges for the future development of salt cavern hydrogen storage in China, the prospects were provided for the geological selection and evaluation of salt cavern hydrogen storage, integrity of large-size wellbore, morphology control of salt cavern cavity creation and sealing detection, and organic synergistic development of hydrogen energy and salt, with a view to advancing the large-scale application of hydrogen energy and the development of industrial chain. The results of the study can provide a reference for the development and planning

收稿日期: 2023-11-22; 改回日期: 2024-06-24。

作者简介: 纪文栋 (1985—), 男, 山东潍坊人, 2006 年毕业于山东大学土木工程专业, 2012 年获中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业博士学位, 正高级工程师, 主要从事承压气储能储气库研究。E-mail: yin-wen@163.com。

通信作者: 万继方, wanjifang@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“周期性荷载及温度作用下盐穴氢气储库围岩损伤与渗透演化机制研究”(编号: 52074046)资助。

of salt cavern hydrogen storage in China.

Key words: salt cavern hydrogen storage; cavity creation; cavity sealing; wellbore integrity; development direction

全球能源体系正处于从化石能源向可再生清洁能源过渡的重大转型期,氢能作为一种可再生的清洁高效能源,具有调节周期长、储能容量大的优势,将在可再生能源消纳、电网调峰等领域发挥重要作用^[1-2]。氢气具有来源广、能量密度高和可氢-电互换的优势,已广泛应用于交通、工业、电力和建筑等领域。截至 2060 年,我国氢气年需求量将显著增加,由目前的 $3\,342\times 10^4\text{ t}$ 逐渐增至 $1.3\times 10^8\text{ t}$,在终端能耗中占比达 29%。随着氢气需求量大幅增长和产业化条件日趋成熟,氢能已成为未来能源发展热点^[3-5]。储氢技术作为氢气“制”和“用”环节之间的重要桥梁,是推动氢能产业发展的关键技术^[6]。

目前,地面氢气储存受制于储存空间和成本,储氢规模普遍不大,若要充分发挥氢能对实现“碳达峰”、“碳中和”的贡献,则应采取有效措施完成大规模储氢任务^[7]。地下储氢在储量和综合成本方面均具有显著优势,受到业界广泛关注。根据地下储氢地质结构不同,地下储氢的方式主要有人工地下空间和天然多孔岩石,前者主要指盐穴、废弃矿井,后者主要指枯竭油气藏、含水层^[8]。美国 and 英国已证明盐穴地下储氢具有可行性^[9-13],枯竭油气

藏、含水层和废弃地下矿坑/矿井中地下储氢的可行性问题仍有待研究。鉴于我国目前缺乏盐穴储氢工程实践,但在盐穴天然气储库、盐穴压缩空气储库领域工程经验颇丰,为盐穴储氢库的建设奠定了理论基础,积累了工程经验。笔者系统总结了国外盐穴储氢库的发展现状和建设情况,综合研究分析了盐穴储氢关键技术,并结合我国盐穴储氢发展机遇和挑战,展望了未来盐穴储氢的发展。

1 地下盐穴储氢发展概况

1.1 储氢地质类型

地下储氢的载体可以是岩洞,也可以是多孔介质地层^[14-15],包括枯竭油气藏、含水层、硬岩洞室、废弃矿井和盐穴等 5 种类型,这 5 种类型地质储库的优缺点如表 1^[16]所示。相较于其他地下储氢库,盐穴不仅渗透性低、蠕变性好、损伤恢复性好、易开挖及溶解水,并且盐与氢气不发生反应,盐穴储氢库在一年内可完成多个注入和采出周期,因此可以在调峰和短时间储能需求中发挥关键作用,使盐穴成为地下大规模储氢的最佳选择^[17-21]。

表 1 不同地质类型储氢库对比^[16]
Table 1 Comparison of hydrogen storage reservoirs of different geological types^[16]

类型	优点	缺点	应用现状
枯竭气藏	存储容量巨大; 分布广,地层构造清晰; 地层中的剩余气可以用作缓冲气	氢可能与地下矿物和流体发生反应; 储氢可能触发耗氢微生物的生长; 储氢库的应力场会发生变化,影响密封性; 垫底气比例高,收效率可能低	尚无商业储氢案例, 有天然气储气库案例
含水层	地层密封性相对好; 工程造价相对较低; 适宜地区潜在的库容大	勘探难度大,选址受限; 盖层要求较高,需要不透水地层; 需采取注浆等措施提高储能效率; 地层不存在原生气体,垫底气比例高	欧洲有少量天然气+ 氢气混合储气库案例
硬岩洞室	硬岩地层分布广泛,选址相对较易; 洞穴自稳性好,变形小,库容稳定; 运行压力区间大; 注采速度快,适合多循环注采; 垫底气比例要求低	建库造价相对较高,经济性较差; 存储容积有限; 施工工艺复杂,技术难度较大	尚无储氢案例
废弃矿井	废弃矿井分布多样,选址灵活; 垫底气比例可能低; 利用旧矿井,建设成本较低	地质特性可能不适合长期储存; 废弃矿井的安全性难以有效保证	尚未储氢案例
盐穴	盐岩渗透性小,密封性良好; 损伤自愈合性好,气体渗漏风险低; 地下工程相对简单、技术较成熟; 建库经济性好,造价相对较低; 注采效率高,速度快适合调峰,垫底气通常30%	蠕变性较强,长期运行体积收缩较大; 氯离子作用下,高压氧腐蚀; 注采压力区间小; 盐岩地层分布相对较少,选址受限	有储氢成功实例

1.2 盐穴特征

盐岩是海水或湖水中溶解的盐类沉积物在地壳运动和地质变化作用下形成的,具有溶解性好和易碎性的特点。盐穴是将地下盐岩层中的盐溶解、采出后形成的空腔,通常具有很低的渗透性,但是盐岩结晶边界形成的网状结构容易受到应力作用导致其被破坏及裂缝生成与成长,这在一定程度上导致盐岩渗透率数量级增大^[22-26]。盐穴通常来源于新造盐穴或废弃老腔改造,二者相比,在满足密封性前提下,废弃老腔改造更具经济性。

在欧美地区,建库的地层一般为盐丘或厚盐层,这些岩盐地层构造完整、厚度大、夹层少、品位好,并且水溶造腔的技术及行业标准较成熟。大型盐丘厚度可达500 m以上,在没有人工控制措施的情况下可以建造直径达100 m、高度为数百米的洞穴,盐腔库容可达 $100\times 10^4\text{ m}^3$ 。

我国盐矿资源丰富,盐矿区有近200处,主要分布在青海、江西、江苏、山东、云南、河南和湖南等地^[27]。盐矿资源呈现出东部为海盐,西部为湖盐,中部为井矿盐的基本规律。盐岩层地质条件以陆相层状盐岩为主,并且一般为薄互层层状构造,存在夹层多、盐岩品位低、不溶物含量高,造成腔体建腔的速度比较慢、腔体几何形态控制比较难、建成腔体的体积比较小等问题^[28-33]。我国薄层状盐岩中的天然气储存腔体的体积一般在 $20\times 10^4\text{ m}^3$ 左右,地质构造如图1所示。

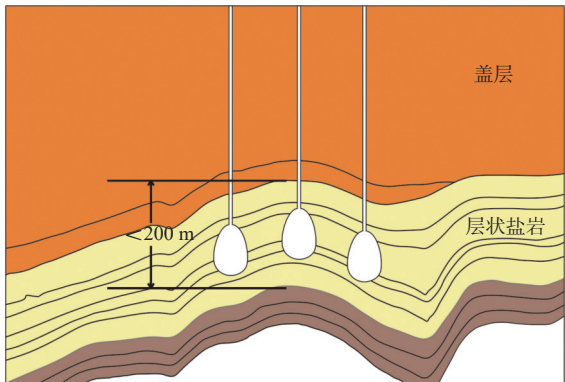


图1 国内层状盐层的地质构造

Fig.1 Layered salt layer structure in China

1.3 盐穴储氢研究分析

目前,各国学者围绕盐穴储氢技术进行了积极探索^[34-35]。I. Iordache、A. Le Duigou、A. Lemieux、R. Tarkowski 等人^[4, 36-38]对罗马尼亚、法国、加拿大及波兰潜在的盐穴储氢库库址进行了分析。D. G. Caglayan 等人^[39]通过分析认为,欧洲具有在层状盐

层和盐丘中储存84.8 PW·h氢气的技术潜力,其中陆上盐穴占27%。Liu Wei 等人^[40]对江苏金坛现存盐腔地下储氢的可行性进行了分析。盐穴储氢研究表明,地下大规模盐穴高效储氢技术发展潜力巨大,已成为各国抢占能源转型的制高点。

盐穴储氢工程实践方面,现阶段国际上共有5座典型的盐穴储氢库,且4座处于运营状态(见表2^[41])。1972年,英国在Tesside创建了盐穴储氢库群,连续运营了50年之久,目前处于安全运营状态。另外3座盐穴型储氢库均在美国得克萨斯州,腔体埋深在800~1 500 m,以致密且稳定的盐岩作为围岩和盖层,储氢库注入和采出速度快,但建造成本高,受制于盐丘地质条件,其容积和数量有限。其中,Spindletop储氢项目于2014年投产,储氢能力以储电量计算超过120 GW·h。上述盐穴储氢的经验表明,氢气可以长时间安全地存储在地下盐穴中^[42]。

表2 国际盐穴储氢项目进展^[41]

Table 2 Progress of international salt cavern hydrogen storage projects^[41]

国家/地区	储氢库名称	建库时间	气体组成	盐腔体积/ (10^4 m^3)	深度/ m	工作压力/ MPa
美国	Clemens Dome	1983	H ₂	58.00	930	7.0~13.5
	Moss Bluff	2007	H ₂	56.60	1 200	5.5~15.2
	Spindletop	2014	H ₂	>58.00	1 340	6.8~20.2
英国	Tesside	1972	H ₂	21.00	365	4.5
	Aldbrough	未来	天然气、H ₂	3 300.00		
德国	Hypos	未来	H ₂			
	InSpEE	未来	H ₂			
欧盟	HyUnder	未来	H ₂	40.00		
法国	HyPster	未来	H ₂	4.84		
	Terega	未来	H ₂	33.00		
丹麦	Green Hydrogen Hub	未来	H ₂	0.66	1 370	
	HyStock	未来	H ₂	0.66	1 200	
荷兰	LSES	未来	H ₂	140.00		

2 盐穴储氢关键技术

2.1 大尺寸井眼钻完井技术

储氢库的注采井兼具周期性循环注气、采气功能,且最大调峰注采气量远大于常规储气库生产气井的工作气量,需要提高储氢能力和注采效率,以

实现高效大规模的氢能存储。与常规储气库相比,盐穴储氢库最显著的区别是井筒尺寸大。储氢库的井眼尺寸更大,周期性注采对井筒长期气密封性、钻完井、注采完井工艺要求更高^[43]。

典型大尺寸盐穴储氢库 Clemens 和 Moss 的井身结构分别如图 2(a)和图 2(b)所示。Clemens 储氢库表层套管和生产套管直径分别为 914.4 和 508.0 mm,造腔内外管直径分别为 273.1 和 406.4 mm。该盐穴储氢库最大半径达 75 m,最大注入速率达 153 400 m³/h。Moss 盐穴储氢库表层套管和生产套管直径分别为 914.4 和 339.7 mm,造腔内外管柱直径分别为 177.8 和 273.1 mm,循环系统的淡水注入速度控制在 5 292~6 426 L/min,淡水由环空中注入,从造腔内管排出。

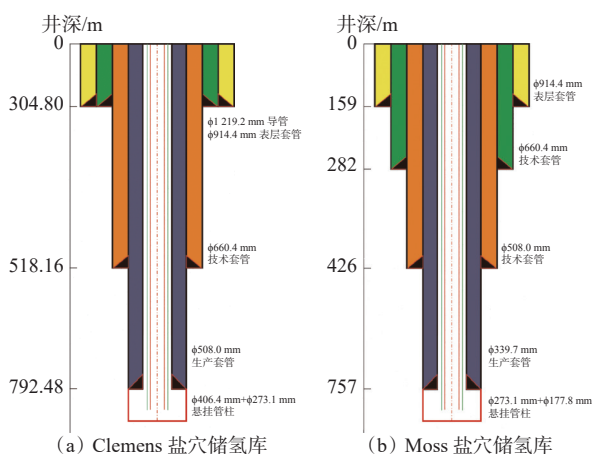


图 2 盐穴储氢库 Clemens 和 Moss 的井身结构

Fig.2 Casing programs for salt cavern hydrogen storages Clemens and Moss

盐穴储氢库的大尺寸井筒建设涉及地质、钻井完井、造腔和气库运行管理等领域。首先,需要精确的地质勘探和地质建模,以确定井眼的最佳位置和钻井路径;其次,钻井过程中需要克服盐层蠕变和井壁不稳定性等井下复杂情况,这对钻头、钻井液和钻探设备提出了更高的要求;此外,井筒的完整性和稳定性需要采用高效的完井技术和材料,以确保井筒能够承受长期的温压变化,以及钻探过程中可能遇到的地层变形;最后,安全和环保问题也是亟待解决的挑战,包括防止盐穴偏溶失稳、气体泄漏和井壁失稳等问题。因此,盐穴储氢库的大尺寸井筒建设需要多学科的协同合作和高度专业化的技术支持,以确保项目的成功实施和长期运营。

2.2 造腔及形态控制技术

盐穴造腔普遍采用单井油垫水溶法^[44]。施工

时,根据设定的盐穴腔体容量和形状,采用正/反循环方式,并配合精细的管柱/油垫提升操作,从而最大程度地控制盐穴形状。

正循环是将清水从中心管注入,经井下导向装置流入到井底,经过腔内的溶蚀作用后,饱和或者近饱和的卤水从造腔内管和造腔外管之间的环空返出,构成密封的循环回路。反循环水(卤水)的流动方向与正循环完全相反,淡水出口与盐穴腔体的顶部相邻,可保证腔体上部围岩的溶解效果,随后在浓度差和重力的作用下,低浓度的卤水从出口向腔体周围散布,达到浓度交换的目的。采用该方法建造的腔体顶部及侧面盐岩溶蚀迅速,且排卤管出口排出的均为高浓度卤水。

为确保盐穴腔体的稳定性,需要定期检验腔体形态,以控制形态稳定。经过长期的研究与实践,广泛采用以超声波为测量手段的检测技术,使用声纳检测仪检测腔体的方法被广泛接受^[45-47]。腔体形态的评价是在造腔作业的不同阶段进行检测,旨在为调整造腔工艺参数提供依据。注采气生产运行阶段检测的主要目的是评估腔体的容积。

2.3 腔体密封性评价技术

盐穴建库过程中必须密切关注腔体的密封性,以保证储氢库未来的正常使用和运行,密封性检测是评估腔体密封性的关键^[48-53]。盐穴腔体密封性影响因素如表 3^[54]所示。

现阶段,国外盐穴腔体密封性检测方法主要有 2 种:一种是北美地区 API 推荐应用的腔体密封性检测方法,主要存在氮气消耗量大、界面测量仪器特殊、测试结果单一、评价结果不准确等问题;一种是广泛用于欧洲地区的、Geostock 推荐的腔体密封性检测方法,但该方法测试时间长、成本高、现场可操作性差、难以确定泄漏位置。我国在研究借鉴上述 2 种方法的基础上,充分考虑国内盐层及井腔的实际情况及特点,采用盐穴腔体密封性测试方法(简称 CSCT 方法),测试盐穴中的参数(如注入饱和卤水体积、气体泄漏量等),根据气井井底压力计算方法和气体状态方程进行计算。该方法克服了国外 2 种方法各自的缺点,具有现场操作性强、试压费用低和评价结果准确合理等优势^[55]。

2.4 井筒完整性检测及评价技术

井筒完整性检测是为了明确套管、注采管柱和封隔器等工具失效的具体方位及种类,对井筒完整性建立全面而准确的认识^[56-57]。井筒完整性失效的类型较多,常见的类型有管柱腐蚀、穿孔、开裂、脱

表 3 盐穴腔体密封性影响因素^[54]

Table 3 Evaluation of factors affecting sealing of salt cavern cavity^[54]

影响因素	影响程度	产生不利影响的因素
井筒管柱及固井质量	高	生产套管腐坏, 非气密扣, 未到盐层或下管的距离不达标; 注采管柱、封隔器、安全阀等配件寿命较短, 存在质量隐患和问题; 生产套管固井效果不理想, 特别是与套管鞋邻近的区域
盐腔压力	高	造腔时, 若腔体压力超标, 便会直接影响腔体特别是腔体脖颈处; 气库运行压力超标, 影响了腔体尤其是腔体脖颈部位; 气库运行压力不足, 使得腔顶垮塌, 尤其是生产套管鞋部岩盐出现脱落问题
盖层及夹层密封性	较高	盖层岩性不理想, 受高压的影响, 微孔隙、微孔洞或微裂隙贯通; 盖层突破压差达不到(深1 000 m处盖层突破压差需大于9.0 MPa); 夹层中有裂缝或大规模的溶洞; 岩盐层启动压力梯度不足, 在0.05 MPa/m以下; 24 h内腔内气体漏失量在2.8 Nm ³ 以上
岩盐蠕变	低	盐穴井口密封的时间过长, 放压不及时
卤水热膨胀	低	盐穴井口密封的时间过长, 放压不及时
岩盐溶解	低	造腔时, 生产套管鞋部出现溶解现象
岩盐渗透性	低	能够降低岩盐蠕变和卤水热膨胀所致的腔内升压现象, 有利于提升气库密封性能

扣及丝扣密封失效和封隔器坐封失效等(见图3)。因此, 要求井筒完整性检测必须具备定位、识别泄漏点和不受气体及腐蚀性流体影响等特点。

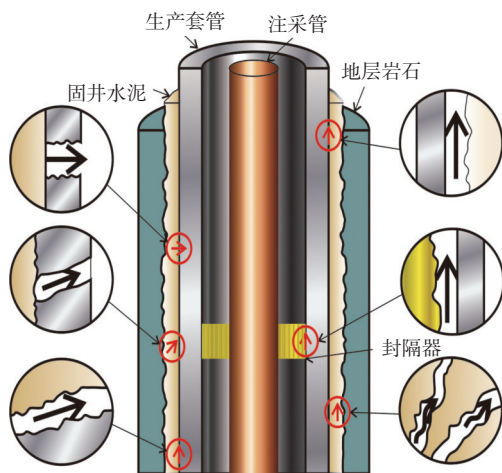


图 3 井筒潜在的泄漏点

Fig.3 Potential leakage points of wellbore

常用的各种井筒完整性检测方法具有各自的优缺点。检测能力方面, 电磁腐蚀探伤只能用于泄漏点孔径较大的情况; 机械坐封试压法需要逐段封隔测试, 不适用于深井环境; 预置分布式光纤检测方法可实时监测气井动态; 声波检测法对井底及地表附近的噪声干扰较为敏感, 且其检测性能由微温差测井传感器灵敏度及泄漏程度决定; 同位素示踪、截面流量检测及螺旋测井等方法应用范围较小^[58]。若仅用一种方法, 无法确定井筒完整性失效的主要原因; 基于井下声波与温度测井技术和分布式光纤

检测技术, 能够有效检测井筒的完整性^[59]。

2.5 管材的腐蚀及氢脆控制技术

井下管柱是储氢库井内的主要流体通道, 对保障储氢库平稳注采、防止氢气漏失至关重要。盐穴储氢库建设与运营过程中, 井下管柱与高压氢气长期直接接触, 并承受着频繁注采所产生的交变应力, 极易发生腐蚀失效^[60-61]。同时, 盐腔底部积聚了大量不溶沉淀物, 这些沉淀物孔隙中充满了卤水, 导致储存的氢气始终处于湿润的状态, 造成氢气对材料的腐蚀增强。

盐穴储氢库服役时, 井下管柱面临的腐蚀失效主要包括以下几种形式:

1) 点蚀^[62]。与其他盐穴储气库相似, 盐穴储氢库井底常存在富含氯化钠、氯化钙及氯化镁的残留卤水。井底管柱在高浓度 Cl⁻ 环境中长期暴露时, 极易诱发电化学腐蚀, 造成点蚀穿孔。由于井下地层温度高, 卤水还可能以蒸汽形式随氢气进入井身中部或顶部, 并遇冷凝结、吸附和析晶, 从而大面积吸附在管柱内壁引发严重点蚀。

2) 微生物腐蚀^[63]。微生物腐蚀是由井底微生物引发的腐蚀失效形式, 广泛存在于油气井内, 常见的微生物包括硫酸盐还原菌(SRB)、产甲烷菌等。当储氢库内含有硫酸盐或有机物质时, SRB 可以消耗氢气并产生硫化氢, 通过阴极去极化等机理腐蚀套管。产甲烷菌尽管不会直接导致金属腐蚀, 但研究发现可促进 SRB 腐蚀。这些微生物引发的腐蚀为局部腐蚀, 这主要与大多数微生物不会形成

连续的腐蚀膜有关。

3) 氢脆断裂^[64]。与天然气储气库显著不同的是, 储氢库内部为高压氢气, 氢分子极易在管柱表面吸附、裂解成氢原子并向内部缺陷处扩散。当局部富集氢浓度超过临界值时, 便可能引发氢脆断裂。储氢库井内管柱氢脆形式不仅包括氢致塑性损失, 还包括氢致滞后开裂、氢致不可逆损伤(如氢鼓泡)等。研究表明^[50], 井内管柱氢脆由材料、环境和外力等 3 方面因素共同主导, 其涉及的机制包括氢压、氢致界面解离和氢促进局部塑性变形等。

鉴于储氢库井下环境具有高压、多介质、强腐蚀和周期变化特征, 储氢库井内管柱选材既要考虑点蚀、微生物腐蚀, 也要尽可能降低氢脆风险, 要求更为苛刻。目前, 针对点蚀和微生物腐蚀, 常采用添加缓蚀剂、表面涂层等方法对管柱进行防护。而针对氢脆问题, 由于强度和氢脆抵抗力的倒置关系, 一般选用低氢脆敏感性的低钢级管材制备管柱。然而, 目前国内外储氢库建库经验较少, 可供参考的储氢库井内管柱选材数据和防腐技术仍十分有限, 未来亟需研究管柱材料特性、服役环境、耐蚀性能的内在关联, 研发管材的腐蚀及氢脆一体化控制技术, 解决储氢库井内管柱防腐难题。

3 中国地下盐穴储氢前景

氢能可以解决可再生能源消纳的问题, 对“双碳”减排目标的实现具有巨大的辅助作用, 未来发展潜力巨大^[65-66]。地下储氢是推动氢能从“制氢”到“用氢”发展的关键环节, 受到各国极大关注。

3.1 国际盐穴储氢蓬勃发展

2020 年, 美国能源部发布《氢能计划发展规划》, 明确提出了开发大规模储氢设施^[67]; 同年, 发布了包含氢能储存的报告《储能大挑战路线图》^[68]。欧洲氢能组织发布的《为实现欧洲绿色协议的 2×40 GW 绿氢行动计划》指出, 预测到 2030 年, 欧洲对氢能的利用将大幅增加, 预计利用量将增加至 665 TW·h, 较 2015 年增长超过一倍。同时, 欧洲在层状盐岩及盐丘中预计能够储存 84.8 PW·h 氢气。美国能源部可再生能源实验室与艾塞尔能源公司参与了科罗拉多州的风能-氢能示范项目, 用以验证压缩氢气储能的可行性。伍德麦肯兹能源咨询公司的研究表明, 预计到 2030 年, 澳大利亚、德国和日本等国家将实现太阳能制氢的成本与传统能源形式相当, 而盐穴储氢将是极好的选择。

3.2 中国盐穴储氢机遇

近年来, 国家和省市地方陆续制定了一系列政策支持氢能产业发展, 推动“双碳”目标的实现^[69]。国务院发布的《新时代的中国能源发展 2020》白皮书强调了加快发展绿色氢能产业的重要性。为了实现这一目标, 需要加快推进绿氢产业链的全过程, 包括绿氢生产、储存、运输和利用等环节, 同时还需加强相关技术装备的研发和引进。意味着我国的氢能产业发展即将提速, 储氢的发展前景不可估量。

《中国氢能源及燃料电池产业白皮书(2019)》预计, 到 2050 年, 氢能在我国所有能源中的占比将达 10%。这意味着, 届时我国将需要接近 $6\,000\times 10^4\text{ t}$ 的氢气, 并为该产业带来超过 10 万亿元的年经济产值。目前, 我国已经成为全球最大的制氢国家, 展现了强劲的制氢实力, 氢气年产量约为 $3\,300\times 10^4\text{ t}$ 。2022 年 3 月, 发改委、国家能源局发布了《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》, 正式确定了氢能在我国能源结构中的作用和地位, 同时也第一次提出了氢能储存规模化应用场景的总体规划, 为中国氢能产业的发展指引了明确的方向。

3.3 中国盐穴储氢面临的难题

我国开展盐穴储氢的研究起步较晚, 现阶段即使是利用盐穴作为天然气储气库的数量也相对较少, 并且盐穴主要为陆相盐湖沉积盐层, 腔体体积较小, 且地下氢能储存方面经验匮乏, 与欧美等发达国家相比, 我国盐穴储氢库的建设数量和建设技术水平尚存在着明显的差距, 许多新的难题和挑战需深入研究。

盐穴储氢难题主要包括以下方面: 选择盐穴储氢地质条件的基础理论和评估方法不成熟, 难以保证储氢的可行性和安全性; 缺乏井下管柱/工具防腐和防氢脆等技术、氢气泄漏检测及定位技术, 难以保证盐穴储氢库可靠运行。氢气易泄漏、扩散和爆炸, 需要详细规划与统筹考虑大规模盐穴储氢对环境的影响和社会接受度问题。

4 结论与建议

1) 我国盐穴储氢正处于起步阶段, 面临着许多新的技术挑战, 需要多方协同发力, 建立与我国国情相适应的盐穴储氢发展机制, 助力实现“双碳”愿景。

2) 建议加强盐穴储氢的地质勘查和风险评估, 开展储层和盖层地质完整性、封存条件、储氢能力

分析。

3) 建议加快开展盐穴储氢井筒完整性研究,完善腔体密封性检测标准和评价体系,为盐穴储氢大气量注采安全运行提供全面保障。

4) 建议加大对盐穴储氢产业集群的规划、政策和资金支持,促进盐产业与氢能产业的有机协同发展。

参 考 文 献

References

- [1] 韩利, 李琦, 冷国云, 等. 氢能储存技术最新进展 [J]. 化工进展, 2022, 41(增刊1): 108-117.
HAN Li, LI Qi, LENG Guoyun, et al. Latest research progress of hydrogen energy storage technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(supplement 1): 108-117.
- [2] 孙德强, 张俊武, 吴小梅, 等. 我国氢能产业发展现状、挑战及对策 [J]. 中国能源, 2022, 44(9): 27-35.
SUN Deqiang, ZHANG Junwu, WU Xiaomei, et al. Development status, challenges and countermeasures of hydrogen energy industry in China[J]. Energy of China, 2022, 44(9): 27-35.
- [3] 张智, 赵苑瑾, 蔡楠. 中国氢能产业技术发展现状及未来展望 [J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 156-165.
ZHANG Zhi, ZHAO Yuanjin, CAI Nan. Technological development status and prospect of hydrogen energy industry in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 156-165.
- [4] TARKOWSKI R. Underground hydrogen storage: characteristics and prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 105: 86-94.
- [5] 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. “双碳”目标下我国低碳清洁氢能进展与展望 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 635-642.
LIU Wei, WAN Yanming, XIONG Yalin, et al. Outlook of low carbon and clean hydrogen in China under the goal of “carbon peak and neutrality” [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 635-642.
- [6] SAMBO C, DUDUN A, SAMUEL S A, et al. A review on worldwide underground hydrogen storage operating and potential fields[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(54): 22840-22880.
- [7] 邹才能, 熊波, 薛华庆, 等. 新能源在碳中和中的地位与作用 [J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 411-420.
ZOU Caineng, XIONG Bo, XUE Huaqing, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 411-420.
- [8] 刘翠伟, 洪伟民, 王多才, 等. 地下储氢技术研究进展 [J]. 油气储运, 2023, 42(8): 841-855.
LIU Cuiwei, HONG Weimin, WANG Duocai, et al. Research progress of underground hydrogen storage technology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 841-855.
- [9] 闫伟, 冷光耀, 李中, 等. 氢能地下储存技术进展和挑战 [J]. 石油学报, 2023, 44(3): 556-568.
YAN Wei, LENG Guangyao, LI Zhong, et al. Progress and challenges of underground hydrogen storage technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(3): 556-568.
- [10] KING M, JAIN A, BHAKAR R, et al. Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the potential underground storage capacity in India and the UK[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 139: 110705.
- [11] WAN Mingzhong, JI Wendong, WAN Jifang, et al. Compressed air energy storage in salt caverns in China: development and outlook[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2023, 9(1): 54-67.
- [12] 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.
PAN Songqi, ZOU Caineng, WANG Hangzhou, et al. Development status of underground hydrogen storages and top ten technical challenges to efficient construction of gas reservoir-type underground hydrogen storages[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(11): 164-180.
- [13] LEMIEUX A, SHKARUPIN A, SHARP K. Geologic feasibility of underground hydrogen storage in Canada[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(56): 32243-32259.
- [14] PAN Bin, YIN Xia, JU Yang, et al. Underground hydrogen storage: influencing parameters and future outlook[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, 294: 102473.
- [15] WAN Jifang, SUN Yangqing, HE Yuxian, et al. Development and technology status of energy storage in depleted gas reservoirs[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2024, 11(1): 29.
- [16] OLABI A G, WILBERFORCE T, RAMADAN M, et al. Compressed air energy storage systems: components and operating parameters: a review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 34: 102000.
- [17] 姜德义, 蒋昌奇, 陈结, 等. 盐岩巴西劈裂损伤愈合特性实验研究 [J]. 工程科学学报, 2020, 42(5): 570-577.
JIANG Deyi, JIANG Changqi, CHEN Jie, et al. Experimental study of the self-healing property of damaged salt rock by Brazilian splitting[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(5): 570-577.
- [18] 李建君, 陈加松, 刘继芹, 等. 盐穴储气库天然气阻溶回溶造腔工艺 [J]. 油气储运, 2017, 36(7): 816-824.
LI Jianjun, CHEN Jiasong, LIU Jiqin, et al. Re-leaching solution mining technology under natural gas for salt-cavern gas storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(7): 816-824.
- [19] 曹仟妮, 贾孟硕, 李博达, 等. 面向盐穴大规模储氢商业模式的副产氢供应链管理决策 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(12): 2019-2032.
CAO Qianni, JIA Mengshuo, LI Boda, et al. Decisions of a byproduct hydrogen supply chain for a business model of large-scale hydrogen storage[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2023, 63(12): 2019-2032.
- [20] RAZA A, ARIF M, GLATZ G, et al. A holistic overview of underground hydrogen storage: influencing factors, current understanding, and outlook[J]. *Fuel*, 2022, 330: 125636.
- [21] 骆正山, 欧阳长风, 王小完, 等. 盐穴储气库注采管柱内腐蚀速率预测模型研究 [J]. 表面技术, 2022, 51(6): 283-290.
LUO Zhengshan, OUYANG Changfeng, WANG Xiaowan, et al. Research on prediction model of internal corrosion rate in injection and production string of salt cavern gas storage[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 283-290.
- [22] VANDEGINSTE V, JI Yukun, BUYSSCHAERT F, et al. Mineralogy, microstructures and geomechanics of rock salt for underground gas storage[J]. *Deep Underground Science and Engineering*, 2023, 2(2): 129-147.

- [23] MAHMUD W M. Impact of salinity and temperature variations on relative permeability and residual oil saturation in neutral-wet sandstone[J]. *Capillarity*, 2022, 5(2): 23–31.
- [24] 郑雅丽, 完颜祺琪, 邱小松, 等. 盐穴地下储气库选址与评价新技术[J]. *天然气工业*, 2019, 39(6): 123–130.
ZHENG Yali, WANYAN Qiqi, QIU Xiaosong, et al. New technologies for site selection and evaluation of salt-cavern underground gas storages[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(6): 123–130.
- [25] LI Jingcui, WAN Jingcui, LIU Hangming, et al. Stability analysis of a typical salt cavern gas storage in the Jintan Area of China[J]. *Energies*, 2022, 15(11): 4167.
- [26] 彭芬, 张宝, 杨鹏程, 等. 库车山前超深巨厚致密砂岩纵向细分层改造技术[J]. *石油钻探技术*, 2024, 52(2): 187–193.
PENG Fen, ZHANG Bao, YANG Pengcheng, et al. Vertical subdivision layer stimulation technology for ultra-deep and super-thick tight sandstone in Kuqa piedmont[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(2): 187–193.
- [27] 曹烨, 邱国玉, 邹振东. 中国盐矿资源概况及其产业形势分析[J]. *无机盐工业*, 2018, 50(3): 1–5.
CAO Ye, QIU Guoyu, ZOU Zhendong. Analysis on salt mine resources and its industrial situation in China[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2018, 50(3): 1–5.
- [28] 刘继芹, 刘玉刚, 陈加松, 等. 盐穴储气库天然气阻溶造腔数值模拟[J]. *油气储运*, 2017, 36(7): 825–831.
LIU Jiqin, LIU Yugang, CHEN Jiasong, et al. A numerical simulation for the solution mining under natural gas of salt-cavern gas storage[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(7): 825–831.
- [29] 李文婧, 姜源, 单保东, 等. 盐穴储气库注采运行时温效应对腔体稳定性的影响[J]. *石油学报*, 2020, 41(6): 762–776.
LI Wenjing, JIANG Yuan, SHAN Baodong, et al. Time-temperature effect on cavity stability during gas injection and production in gas storage with salt caves[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(6): 762–776.
- [30] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(24): 4409–4417.
YANG Chunhe, LIANG Weiguo, WEI Donghou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(24): 4409–4417.
- [31] 朱华银, 王粟, 张敏, 等. 盐穴储气库全周期注采模拟: 以 JT 储气库 X1 和 X2 盐腔为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(3): 367–377.
ZHU Huayin, WANG Su, ZHANG Min, et al. Cyclic injection-production simulation of salt cavern gas storages: a case study of X1 and X2 salt caverns of JT Gas Storage[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(3): 367–377.
- [32] JIANG Yujing, CHEN Lugen, WANG Dong, et al. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of soft rock with different water contents under dynamic disturbance[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2024, 11(1): 36.
- [33] 石悦, 郭文朋, 徐宁, 等. 采卤老腔改建盐穴储气库关键技术及应用[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(5): 134–139.
SHI Yue, GUO Wenpeng, XU Ning, et al. Key technology and application of reconstruction of existing brine extraction caverns into salt cavern gas storage[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(5): 134–139.
- [34] 王敏生, 姚云飞. 碳中和约束下油气行业发展形势及应对策略[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(5): 1–6.
WANG Minsheng, YAO Yunfei. Development situation and countermeasures of the oil and gas industry facing the challenge of carbon neutrality[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(5): 1–6.
- [35] 张荣达, 张庆斌, 高睿. 氢储能电站运营的模式优选与激励机制[J]. *西南石油大学学报(社会科学版)*, 2024, 26(3): 9–17.
ZHANG Rongda, ZHANG Qingbin, GAO Rui. Operation mode optimization and incentive mechanism of hydrogen energy storage power station[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Social Sciences Edition)*, 2024, 26(3): 9–17.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] CAGLAYAN D G, WEBER N, HEINRICHS H U, et al. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(11): 6793–6805.
- [40] LIU Wei, ZHANG Zhixin, CHEN Jie, et al. Feasibility evaluation of large-scale underground hydrogen storage in bedded salt rocks of China: a case study in Jiangsu Province[J]. *Energy*, 2020, 198: 117348.
- [41] HEMATPUR H, ABDOLLAHI R, ROSTAMI S, et al. Review of underground hydrogen storage: concepts and challenges[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2023, 7(2): 111–131.
- [42] 纪钦洪, 于广欣, 黄海龙, 等. 海上风电制氢技术现状与发展趋势[J]. *中国海上油气*, 2023, 35(1): 179–186.
JI Qinhong, YU Guangxin, HUANG Hailong, et al. Present status and developing trend of offshore wind-to-hydrogen technology[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(1): 179–186.
- [43] 袁光杰, 张弘, 金根泰, 等. 我国地下储气库钻井完井技术现状与发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(3): 1–7.
YUAN Guangjie, ZHANG Hong, JIN Gentai, et al. Current status and development suggestions in drilling and completion technology of underground gas storage in China[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(3): 1–7.
- [44] 郑雅丽, 邱小松, 赖欣, 等. 盐穴储气库地质体完整性管理体系[J]. *油气储运*, 2022, 41(9): 1021–1028.
ZHENG Yali, QIU Xiaosong, LAI Xin, et al. Integrity management system for geological body of salt-cavern gas storage[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(9): 1021–1028.
- [45] 练章华, 牟易升, 张强, 等. 超深气井油管气密封检测应力分析及防控措施[J]. *石油钻采工艺*, 2018, 40(3): 324–329.
LIAN Zhanghua, MOU Yisheng, ZHANG Qiang, et al. Analysis and control measures on the air tightness detecting pressure of tubing in ultra-deep gas wells[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2018, 40(3): 324–329.

- [46] WAN Jifang, MENG Tao, LI Jinlong, et al. Energy storage salt cavern construction and evaluation technology[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2023, 9(3): 141–145.
- [47] MATOS C R, CARNEIRO J F, SILVA P P. Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 21: 241–258.
- [48] 卢雪梅. 氢气地储成西方国家储能研究热点[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1240.
- LU Xuemei. Hydrogen storage has become a research hotspot for energy storage in western countries[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1240.
- [49] SAINZ-GARCIA A, ABARCA E, RUBI V, et al. Assessment of feasible strategies for seasonal underground hydrogen storage in a saline aquifer[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(26): 16657–16666.
- [50] ZIVAR D, KUMAR S, FOROOZESH J. Underground hydrogen storage: a comprehensive review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(45): 23436–23462.
- [51] 敖海兵, 陈加松, 胡志鹏, 等. 盐穴储气库运行损伤评价体系[J]. 油气储运, 2017, 36(8): 910–917.
- AO Haibing, CHEN Jiasong, HU Zhipeng, et al. Study on the damage assessment system of salt-cavern gas storage[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(8): 910–917.
- [52] REITENBACH V, GANZER L, ALBRECHT D, et al. Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(11): 6927–6937.
- [53] CHEN Dongxu, WANG Laigui, VERSAILLOT P D, et al. Triaxial creep damage characteristics of sandstone under high crustal stress and its constitutive model for engineering application[J]. *Deep Underground Science and Engineering*, 2023, 2(3): 262–273.
- [54] 袁光杰, 班凡生, 万继方. 盐穴储库造腔工程技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2020.
- YUAN Guangjie, BAN Fansheng, WAN Jifang. Cavity engineering technology of salt cavern reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.
- [55] 袁光杰, 申瑞臣, 袁进平, 等. 盐穴储气库密封测试技术的研究及应用[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 119–121.
- YUAN Guangjie, SHEN Ruichen, YUAN Jinping, et al. Study and application of tightness testing technology for salt cavern gas storage[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 119–121.
- [56] EBIGBO A, GOLFIER F, QUINTARD M. A coupled, pore-scale model for methanogenic microbial activity in underground hydrogen storage[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 61: 74–85.
- [57] 吴俊霞, 伊伟锴, 孙鹏, 等. 文23储气库封堵井完整性保障技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 57–62.
- WU Junxia, YI Weikai, SUN Peng, et al. Integrity assurance technologies for plugged wells in Wen 23 Gas Storage[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(5): 57–62.
- [58] 张波, 胥志雄, 高文祥, 等. 深层气井生产管柱完整性检测技术总结及评价[J]. 天然气与石油, 2020, 38(5): 49–57.
- ZHANG Bo, XU Zhixiong, GAO Wenxiang, et al. Summary and evaluation of integrity detection technology for production string in deep gas well[J]. *Natural Gas and Oil*, 2020, 38(5): 49–57.
- [59] LI Jingcui, WAN Jifang, WANG Tingting, et al. Leakage simulation and acoustic characteristics based on acoustic logging by ultrasonic detection[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2022, 6(3): 181–191.
- [60] 黄运华, 陈恒, 赵起越, 等. 高强度低合金钢中纳米析出相对腐蚀行为影响的研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(3): 321–331.
- HUANG Yunhua, CHEN Heng, ZHAO Qiyue, et al. Influence of nanosized precipitate on the corrosion behavior of high-strength low-alloy steels: a review[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(3): 321–331.
- [61] YU Junwei, LIN Tianhao, LI Jialin, et al. Construction of PAN-based activated carbon nanofibers for hydrogen storage under ambient pressure[J]. *Capillarity*, 2023, 6(3): 49–56.
- [62] 高嘉珮, 彭冲, 牛梦龙, 等. 多氢酸酸化反应特征及动力学[J]. 石油学报, 2019, 40(2): 207–214.
- GAO Jiapeng, PENG Chong, NIU Menglong, et al. Acidification characteristics and kinetics of multi-hydrogen acid[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(2): 207–214.
- [63] CAI Rui, GUI Jie, LI Mingxing, et al. Corrosion reason analysis of 13Cr110 tubing in an injection and production well of the Suqiao Gas Storage Group[J]. *International Journal of Photoenergy*, 2021, 2021: 6639179.
- [64] UGARTE E R, SALEHI S. A review on well integrity issues for underground hydrogen storage[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2022, 144(4): 042001.
- [65] 徐硕, 余碧莹. 中国氢能技术发展现状与未来展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(6): 1–12.
- XU Shuo, YU Biying. Current development and prospect of hydrogen energy technology in China[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology(Social Sciences Edition)*, 2021, 23(6): 1–12.
- [66] 陆佳敏, 徐俊辉, 王卫东, 等. 大规模地下储氢技术研究展望[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(11): 3699–3707.
- LU Jiamin, XU Junhui, WANG Weidong, et al. Development of large-scale underground hydrogen storage technology[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(11): 3699–3707.
- [67] 魏凤, 任小波, 高林, 等. 碳中和目标下美国氢能战略转型及特征分析[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1049–1057.
- WEI Feng, REN Xiaobo, GAO Lin, et al. Analysis on transformation and characteristics of American hydrogen energy strategy under carbon neutralization goal[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(9): 1049–1057.
- [68] 刘大正, 崔咏梅, 赵飞. 新型储能商业化运行模式分析与发展建议[J]. 分布式能源, 2022, 7(5): 46–55.
- LIU Dazheng, CUI Yongmei, ZHAO Fei. Operating mode analysis and developmental suggestions of new energy storage in commercial application scenarios[J]. *Distributed Energy*, 2022, 7(5): 46–55.
- [69] 孙旭东, 赵玉莹, 李诗睿, 等. 我国地方性氢能发展政策的文本量化分析[J]. 化工进展, 2023, 42(7): 3478–3488.
- SUN Xudong, ZHAO Yuying, LI Shirui, et al. Textual quantitative analysis on China's local hydrogen energy development policies[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(7): 3478–3488.