

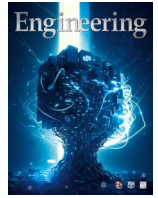


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Large-Scale Energy Storage—Review

中国深部地下空间储能的理论和技术挑战

杨春和^a, 王同涛^{a,*}, 陈海生^b

^a State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

^b Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 November 2021

Revised 22 May 2022

Accepted 17 June 2022

Available online 30 August 2022

关键词

能源储备

深部储能

层状盐岩

盐穴

岩石力学

摘要

可再生清洁能源高效利用和保障传统能源平稳供给是我国能源结构升级转型和能源安全的重大战略需求。深部储能是利用深部地下空间实施大规模能源储备,实现清洁能源高效利用、石油战略储备和天然气保安调峰的重要手段。盐岩地层是大规模储能的理想地质体,我国盐岩资源丰富,储能空间严重不足。与国外盐丘型盐岩相比,我国盐岩地层为典型湖相沉积的层状盐岩,具有厚度薄、杂质含量高和夹层多等特征。在这种地层中进行大规模能源储备需要解决系列关键科学和技术难题,主要包括:①低渗介质多场多相耦合条件下多尺度渐进破坏机理;②深部大型地下储能渗漏灾变机理;③深部地下储能库群的长期性能演化机理;④层状盐岩多尺度渗透性试验技术;⑤深部大型储能库群智能建造与长期功能保障技术。这些关键科学和技术难题的解决可以为我国在盐岩地层中实施大规模深部储能提供理论基础和技术保障。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

能源消费低碳化转型发展是中国应对内外部新形势、新挑战的共同要求。2015年,习总书记在巴黎气候大会上,代表中国政府向国际社会承诺“中国将在2030年左右CO₂排放达峰并争取尽早达峰,2030年单位国内生产总值CO₂排放比2005年下降60%~65%,非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右”[1]。自2017年起,国家推动能源系统低碳改革的政策力度逐渐加大,已初步形成了煤炭、电力、石油、天然气、新能源全面发展的供给体系[2]。图1给出了2015—2019年中国主要能源品种消费量和CO₂减排量[3],表明煤炭作为我国能源消费的主体地

位保持不变,但是其在能源消费占比呈现出逐年降低的趋势。以天然气和非化石能源构成的清洁能源比例增加显著。例如,清洁能源的比例已经由2015年的17.9%增加到2019年的23.3%。其中,非化石能源(风能、太阳能、地热能和水电等)占比从2015年的11%增加到2019年的15.3%。图1也显示我国CO₂减排量呈现出逐渐增加趋势,与非化石能源消费比例增加呈现出正相关关系。可见调整能源消费结构,增加清洁能源消费比例是我国现阶段和今后很长时间内的主要目标和任务。

加快非化石清洁能源的利用,是全球能源发展的大趋势,也是我国能源发展的优先方向。截至2019年,全球可再生能源装机总容量达到 2.537×10^9 kW,在电力总装机

* Corresponding author.

E-mail address: ttwang@whrsm.ac.cn (T. Wang).

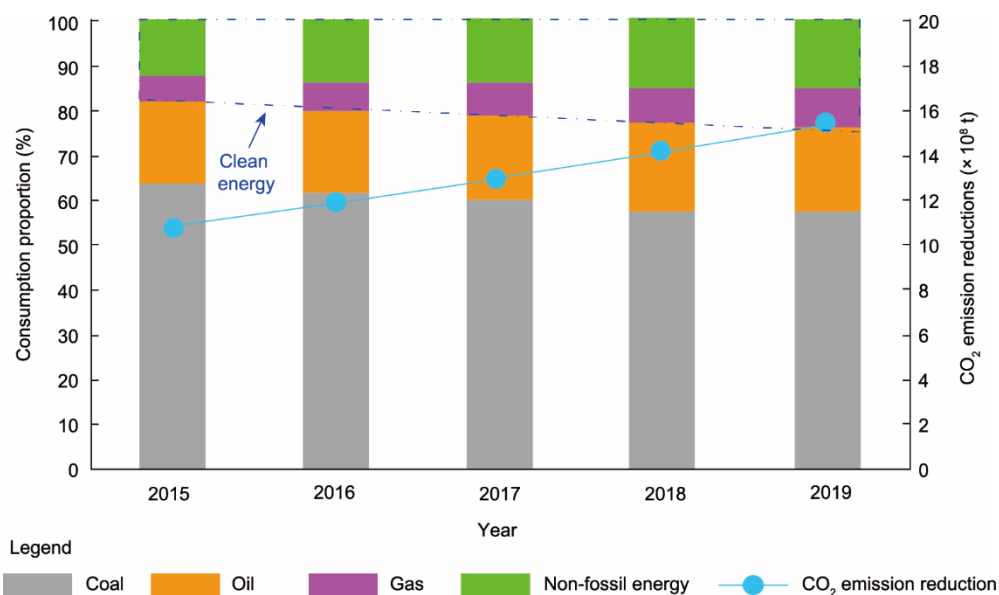


图1. 2015—2019年中国主要能源品种消费量及CO₂减排量[3]。

中占比34.7%，较2018年增长了1.4%，其中72%由风能和太阳能装机容量贡献[3]。2019年，中国15.3%的能源是由风能和太阳能提供，总装机容量达到 2.42×10^8 kW，“十三五”期间，装机年均增长率约为12% [3]。由于风能和太阳能等具有典型的地域性和不能连续稳定供给等天然劣势，给电网稳定性运行带来了一系列的挑战，制约了可再生能源的快速发展。图2给出了2015—2019年中国弃风弃光量。弃风弃光量是指风能和太阳能发电功率超过最大输电功率和负荷消耗功率之和的功率。弃风弃光量在2016年到达最大值，随后逐年递减，但是总量还是比较大。例如，2019年弃风弃光总量约为 2.15×10^{10} kW·h，相当于同年三峡发电量的22% [3]。为了提高可再生能源利用效率，亟需建立相应的大型储能设施，包括抽水蓄能、压气蓄能（CAES）、液流电池和储氢等[4]。其中，抽水蓄能需要具备相应的地质结构以实现势能 and 电能的转换[5]。CAES利用可再生能源产生的富余电能将空气压缩存入大型地下空间，在用电高峰时刻利用压缩空气（或者加入燃气）驱动汽轮机发电，实现可再生能源的连续平稳供给[6]。液流电池采用电池组将充足的电能转换为化学能进行存储，受限于环保和成本，液流电池可以提供的储能规模有限[7]。国外亦有利用深部盐矿采空区开展液流电池储能的相关实验报道[8]，为利用液流电池大规模储能提供了思路。

氢能是清洁能源发展的终极目标，是解决能源可持续发展最为有效的途径，各国政府基于不同的发展背景积极布局氢能产业[9]。氢能与其他能源相比具有以下4个方面的优势：

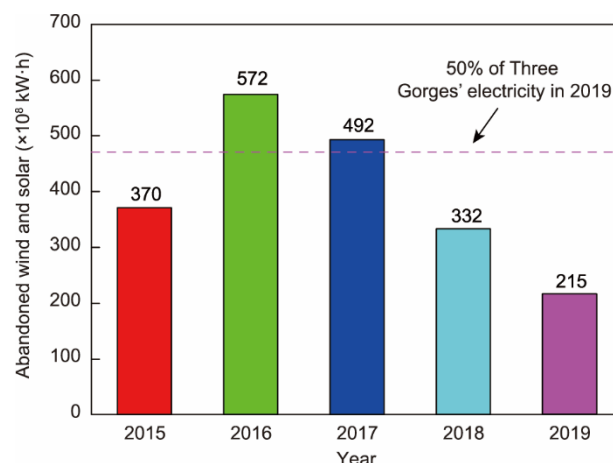


图2. 2015—2019年中国弃风弃光能量量[3]。

(1) 来源广。氢气获取途径包括煤制氢、石油裂解制氢和电解水制氢等，尤其是通过电解水（海水）大规模制氢不产生其他污染环境物质。

(2) 热值高。1 kg 氢气燃烧释放出来的热量是相同质量煤炭的4.87倍、天然气的3.94倍。

(3) 无污染。氢气燃烧后的产物为H₂O，环境友好。

(4) 应用场景丰富。氢能可以广泛应用于汽车、航空航天、发电等，同时氢气还可以作为化工原料。

1970年，美国首先提出“氢经济”概念。奥巴马政府随后发布《全面能源战略》，特朗普政府将氢能和燃料电池作为美国能源发展战略的重点[10]。2003年10月，日本在《第一次能源基本计划》中首次阐述了“氢能社会” [11]。2019年，日本政府发布了最新修订的《氢燃料电池战略路线图》，将氢能利用上升到国家战略高度[12]。

2019年,中国首次将“推动充电、加氢等设施建设”写入政府工作报告,明确了我国在氢能生产、储存、运输和加注等方面的发展规划和布局[13]。根据《中国氢能及燃料电池产业白皮书》,2030年中国氢气需求量在终端能源体系中占比5%,年需求量为35 Mt;2050年氢能将在中国终端能源体系中占比10%,年需求量为60 Mt [14]。氢气分子量相比于天然气更小,意味在氢气存储过程中需要更多的空间且存储空间具有更好的密封性。以35 Mt为例,30 MPa压力存储大约需要 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的存储空间,这给氢能大规模利用带来了挑战。利用深部地下盐穴储氢已经在海外进行相关实验[15],为大规模氢能储备提供了新途径。

石油被称为“工业血液”,在世界能源消费中占有举足轻重的地位。20世纪90年代,我国从石油净出口国变为石油净进口国家,石油进口量保持较快的增长速率。2019年,我国石油表观消费量达到了714 Mt,其中进口量为514 Mt,对外依存度达到72%。我国石油进口通道主要包括海上油气通道、东北油气进口通道、西北油气进口通道和西南油气进口通道,其中海上油气进口通道是我国石油进口的主要来源,约占70%。石油不仅是“工业血液”,更是一种战略物质,其供给受到国际政治、经济环境影响较为强烈。因此,国际能源组织(IEA)要求其成员国需储备可供90天消费的石油储备以保证石油供给安全[16]。中国石油战略储备(SPR)起步较晚且以地面存储为主。与利用深部地下空间(即盐穴)存储石油相比,地面储罐主要具有以下缺点:

(1) 经济性差。根据美国经验,地面储罐存储1桶(1桶=158.98 L)原油成本约为15~18美元,在硬岩洞约为30美元,在深部地下盐穴约为1.5美元[17]。

(2) 安全性差。石油具有易燃易爆的特征,火灾等隐患巨大,例如,1989年黄岛油库火灾[18]、2011年日本地震诱发千叶县地面储罐火灾[19]等。同时,地面储油罐也是军事打击和恐怖袭击的主要对象,例如,2020年11月24日沙特阿美石油公司地面储油罐遭到巡航导弹袭击[20]。

(3) 占地面积大。以建设5 Mt地面石油储备库为例,大约需要2000亩(1亩 $\approx 667 \text{ m}^2$)土地,且在距离油库一定范围内不能从事人员密集型生产和活动。

天然气作为一种清洁能源,具有良好的经济性和环保性,是替代石油的一种过渡能源。自2017年“气化中国”战略实施以来天然气消费在中国呈现出爆发式增长[21]。2019年,中国天然气表观消费量达到了 $3.067 \times 10^{11} \text{ m}^3$ [22],其中进口天然气为 $1.345 \times 10^{11} \text{ m}^3$,占比43.8%。我

国天然气进口通道主要包括西北通道、东北通道、东南通道和西南通道[23],以长输管道作为主要输送方式,其中东南通道是以海运液化天然气(LNG)为主。

同时,我国天然气主产区在西南和西北地区,而天然气主要消费区在中东部地区,且消费量随季节性变化大,大规模天然气存储是保证长输管道天然气平稳供给的关键。目前我国大规模天然气储备主要包括地下油气藏型储气库、盐穴储气库和LNG储罐。根据国际惯例,储备工作气量达到年消费量的15%左右才能保证天然气使用安全[24]。我国天然气储备严重滞后天然气产业发展需求,导致大规模“气荒”在我国屡次发生[25]。2018年国家能源局印发的《2018年能源工作指导意见》中明确指出到2030年地下储气库形成有效工作气量 $3.50 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和建立天然气储备制度[26]。2020年国家发展和改革委员会发布《关于加快推进天然气储备能力建设的实施意见》,指出我国储气基础设施建设滞后、储备能力不足等问题凸显,成为制约天然气安全稳定供应和行业健康发展的突出短板[27]。因此,加快地下储气库建设是确保我国能源安全的重大战略需求。

通过上述分析可知:利用深部地下空间进行大规模能源储备是国际能源储备的主要方式,尤其是在盐岩地层中进行能源储备更是能源的主流存储方式[4,28-29],是我国能源结构升级转型和能源安全的迫切需求。本文首先对利用深部地下空间进行石油、天然气、压缩空气、液流电池和氢能等能源储备的现状进行分析,并对它们发展趋势进行预测;其次,结合中国层状盐岩地层地质特征和能源储备需求对利用层状盐岩建设深部储能库存在的三个关键科学问题和两个技术难题进行总结和凝练,为深部储能提供研究方向。对这些关键科学和技术难题开展研究并取得突破,可以为我国后期利用深部地下盐岩地层实施大规模能源储备提供基础理论和技术指导。

2. 深部储能类型与现状

2.1. 石油

石油储备方式主要包括地面储罐、盐穴和硬岩洞,其中利用盐穴进行原油储备是世界上石油储备主要方式。美国石油战略储备库主要包括Bryan Mound、Big Hill、West Hackberry、Bayou Choctaw,共计盐穴60口、累计储存石油达到7.13亿桶[30]。这些石油储备量不仅保证了美国能源安全,也为奠定了美国对国际油价定价中的主导地位。

德国储备油品主要包括原油、汽油、柴油和重油,其

中原油主要储备在地下盐穴中, 约7300万桶[31]。目前法国的石油战略储备为1.84亿桶, 相当于85天的消费量。法国石油储备库由一个地下盐穴库和遍布全国的地上油库组成。我国的石油战略储备主要储存在地面储罐中, 并计划利用地下空间进行石油战略储备[32]。

2.2. 天然气

利用深部地下空间进行天然气储备一直是国际上通用的储备方式, 主要包括衰竭油气藏、盐穴、含水层和废弃矿坑等。图3展示了截至2018年年底全球深层地下储气库类型及其关键参数[33]。全球共有利用深部地下空间建成的储气库662座, 总工作气量达到 $4.21 \times 10^{11} \text{ m}^3$ [33]。盐穴型储气库占到储气库总数的15%、工作气量占比8%, 而提供的调峰气量占比26% [33]。盐穴储气库这种快速调峰能力对愈发灵活多变的天然气市场供应具有很强的适用性, 得到越来越多国家和地区的重视。

截至2019年年底, 我国累计建成储气库25座, 工作气量约为 $1.50 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 其中衰竭油气藏型储气库22座、盐穴储气库三座。储气库工作气量约占天然气消费量(2019年)的5%左右, 距离保安调峰所需的15%消费量仍具有较大差距。同时, 我国储气库分布区域性较强。中东部地区是中国经济最发达区域之一, 对天然气等能源消费需求旺盛。该区域缺乏建设地下储气库所需的衰竭油气藏和含水层等地质构造, 但是具有丰富的盐矿资源, 主要的

盐矿包括江苏金坛、淮安, 湖北潜江、云应和河南平顶山等。目前已经建成投产的盐穴储气库为金坛盐穴储气库, 在该区域盐穴储气库分别隶属国家石油天然气管网集团有限公司、中国石化集团公司和中国盐业集团有限公司等企业, 累计已经建成投产盐穴40余个、工作气量超过 $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

2.3. 压气蓄能

以风能、光能和潮汐能等为代表的清洁能源具有典型的地域性和不能持续供给的天然劣势, 大规模储能是实现清洁能源高效利用的关键。图4给出了压气蓄能工作原理示意[6]。压气蓄能是将清洁能源产生的富余电能通过压缩空气转换为势能, 在用电高峰时释放出势能转换为电能, 以平衡电网供给。

由于压缩空气能量密度较小, 实现大规模储能需要储存空间大。深部地下空间是理想的储存场所, 具有体积大、可以承受压力高等优点[34–35]。目前, 世界上有两座压气蓄能电站, 均是利用深部地下盐穴作为压缩空气储存场所[15]。第一座为德国Huntorf压气蓄能电站, 于1978年建成投产, 设计调峰能力为290 MW、2 h或者60 MW、8 h [36]。第二座压气蓄能电站位于美国阿拉巴马州McIntosh市, 于1991年建成投产, 设计调峰能力为110 MW、26 h [36]。我国目前调峰方式主要为抽水蓄能, 利用深部地下空间建设压气蓄能电站仍然还在起步阶段。

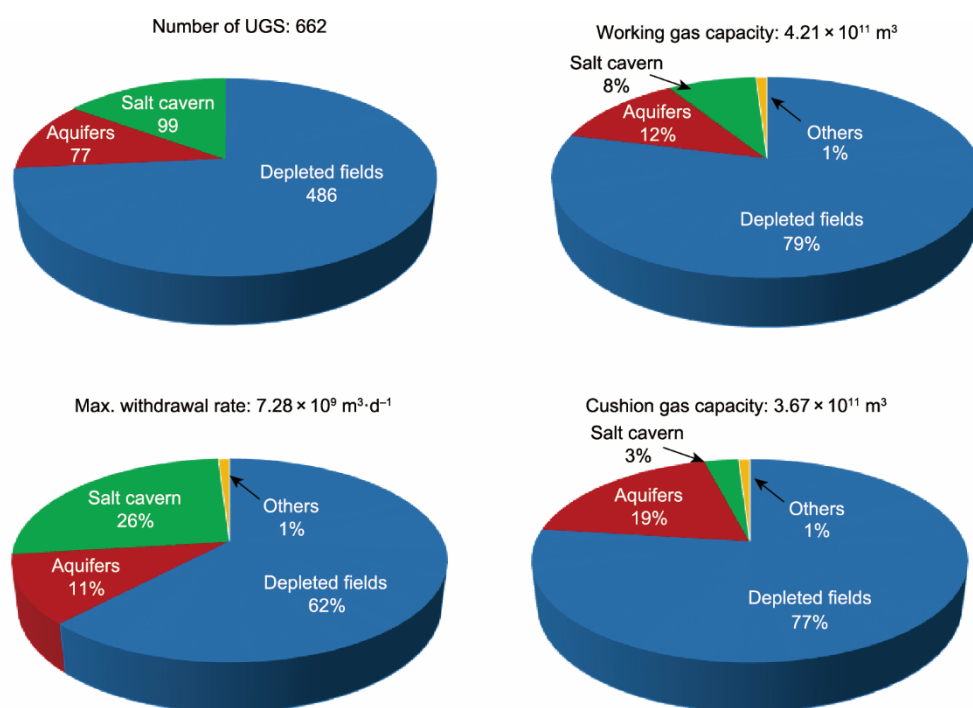


图3. 截至2018年年底全球利用深部地下空间建设储气库类型及其关键参数[33]。UGS: 地下储气库。

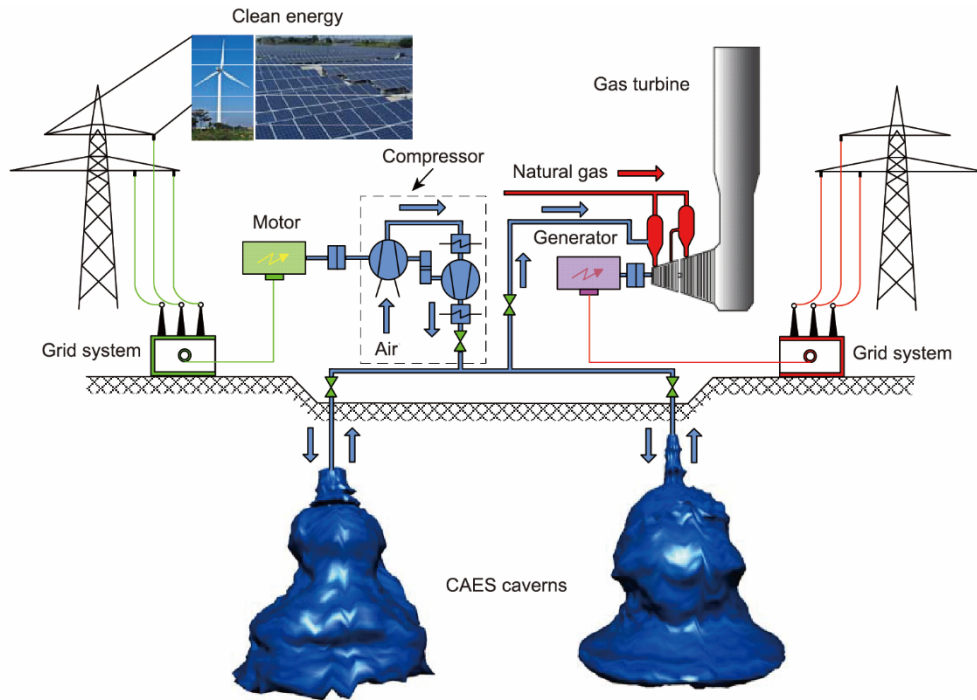


图4. 压气蓄能工作原理示意[6]。

金坛盐穴压缩空气储能项目是我国首个利用深部地下空间储能项目，一期容量规模为60 MW/300 MW·h [37]。

2.4. 氢能

图5给出了氢能源“产供储销”示意图。氢能大规模地下储备是整个氢能产业中不可或缺的一环。目前，利用盐穴建成的氢气储能库有四座，主要包括英国 Teesside (1972)、美国 Clemens (1983)、Moss Bluff (2007) 和 Spindletop (2017) [15,38]。这些氢气储能库主要是针对工业用途，尚未用于能源储备和电力调峰。英国帝国化学工业公司于1972年在 Teesside 地区建造了三座用于氢能源储备的盐穴[15]。1983年，康菲石油公司在美国得克萨斯州的 Clemens 盐丘中建造了一个容积为 $5.8 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的盐穴用于存储氢气[15]。2007年，Praxair 公司利用美国 Moss Bluff 地区一个体积为 $5.66 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的盐穴进行氢气存储，用于向得克萨斯和路易斯安纳州的化工厂提供原料。虽然利用盐穴进行氢气储存的案例不多，但是这种方法在安全性和经济性方面具有巨大优势，很多学者已经开展了大量相关的研究[39–41]，利用盐穴进行氢气储存将会成为深部地下空间储能领域的下一个研究热点。

2.5. 液流电池

液流电池是由 Thaller 等于1974年提出的一种电化学储能技术是利用正负极电解液分开、各自循环的一种高性能蓄电池[42]，具有使用领域（环境）广、循环使用寿命

长的特点，但是能量密度低，大规模储能需要大量储存空间。2017年，德国能源企业 Ewe Gasspeicher GmbH 宣布在德国西北部利用地下盐穴建造全球最大液流电池（图6）的项目取得进展[43]。两个中型盐穴构成的蓄电系统储存的电量就足够为柏林这样的大城市供电一小时，预计盐穴电池系统会在2023年年底投入运行。这为资源化利用深部地下空间进行能源储备提供了新思路。

3. 深部储能关键理论与技术研究难点

与国外盐丘型盐岩相比，我国盐岩地层为典型湖相沉积的层状盐岩[44–47]，具有以下三个方面的先天不足。①盐岩层厚度薄。我国层状盐岩主要是湖相沉积，厚度普遍在200 m以下，如江苏金坛、山东菏泽和广东三水等盐矿。这导致储能库体积偏小，一般在 $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 左右，而国外盐丘型盐岩厚度一般可以达到500 m、单个盐穴体积可以达到几十万立方米甚至上百万立方米[48–49]。②盐岩杂质含量高，夹层与盐岩层交替出现。我国盐岩杂质含量较高，一般可以达到20%以上[29,50]，造腔过程中杂质和夹层碎胀后堆积在腔底，不溶物体积一般可以达到整个溶腔体积的40%以上，导致成腔效率低。同时，由于高杂质含量和夹层交替出现导致采用水溶法造腔过程中腔体形状差、造腔事故频发，制约了造腔效率。③盐岩矿藏一般分布在地堑式或者半地堑式断陷盐岩盆地（盐盆）中，盐

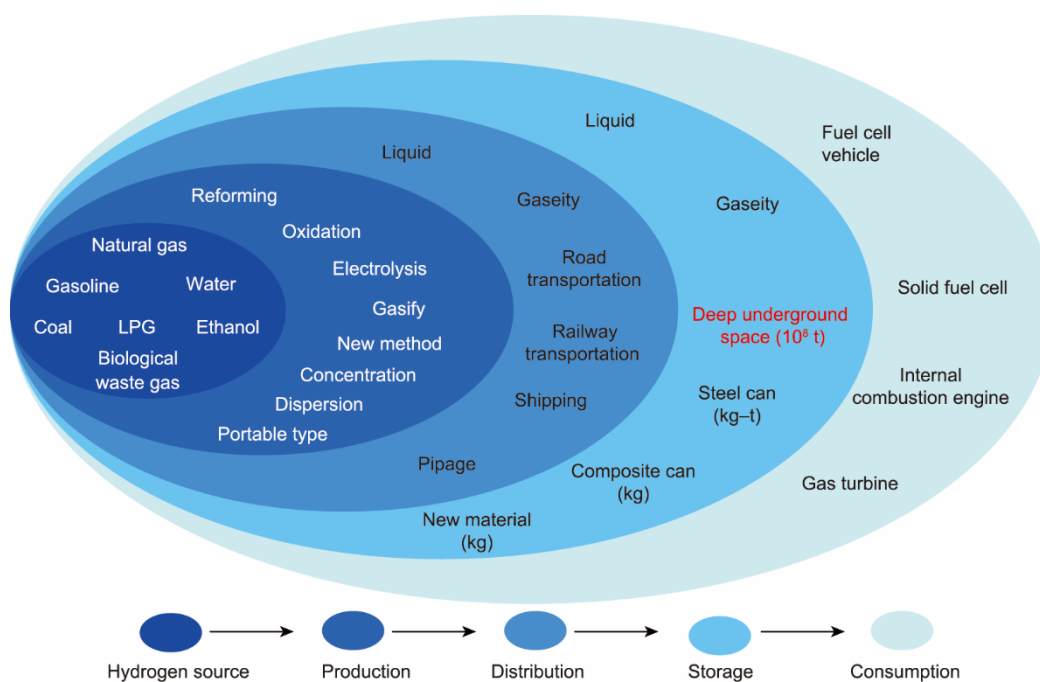


图5. 氢能源“产供储销”示意图。LPG: 液化石油气。

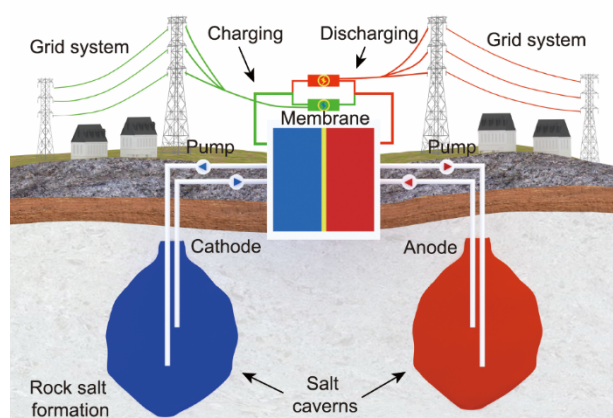


图6. 盐穴液流电池结构示意图。

盆中间厚度大、四周逐渐尖灭或者被控盆断层隔断，中间区域发育形成了一系列的次级地质断层[44,51]。同时，这些断层出现不同程度的错动，一般盐盆中间区域下沉、边缘区域抬升。断层作为一种特殊的地质结构，具有渗透率高、孔隙度大和破坏强度低等特点，不具有天然气存储能力，是深部地下盐穴储能库发生泄漏的潜在通道。

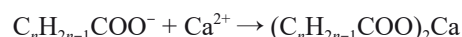
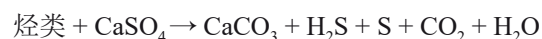
图7给出了我国层状盐岩地层中建设深部储能库需要解决的理论和技術难题的示意图，可知深部地下盐穴储能的研究难点可以分为以下5个方面：①开发考虑多场、多相耦合影响的储能库群围岩体的多尺度渐进破坏和表征方法；②了解大型深部地下空间储能库群的渗漏灾变演化规律；③了解大型深部地下空间储能库群的长期性能演化机

理；④开发地下深层盐穴储能智能建造技术；⑤保障大型深部地下空间储能的长期功能。

3.1. 多场多相耦合条件下围岩体多尺度渐进破坏规律及其表征方法

在利用深部地下盐穴储能过程中，盐穴围岩体将会受到化学侵蚀、温度变化和应力变化等多种因素作用，可能会发生纳米级微裂隙连通、米级围岩开裂和千米级的断层活化等多尺度破坏，同时这些围岩劣化随着时间变化而变化。准确描述围岩体在多场多相耦合条件下的多尺度渐进破坏是深部地下盐穴储能库储能介质优选、储能库优化设计和安全运行的基础。

储能介质种类比较多，包括石油、天然气、压缩空气、氢气和电解液等，而盐穴储能库围岩类型包括盐岩、泥岩和硬石膏等。在储能时的高温、高压作用下，储能介质可能会与围岩体发生化学反应，劣化围岩体物理力学性能。研究[52-53]表明在利用盐穴存储原油过程中，可能会发生以下化学反应：



上述化学反应进展较缓慢，基本上不会对储能库围岩体发生明显的弱化作用，同时化学反应产生的 $(\text{C}_n\text{H}_{2n-1}\text{COO})_2\text{Ca}$ 对围岩体中的孔隙起到一定的堵塞作用，有利于储能库的密封性。

利用卤水置换盐穴储能库中的石油等储能介质时，将

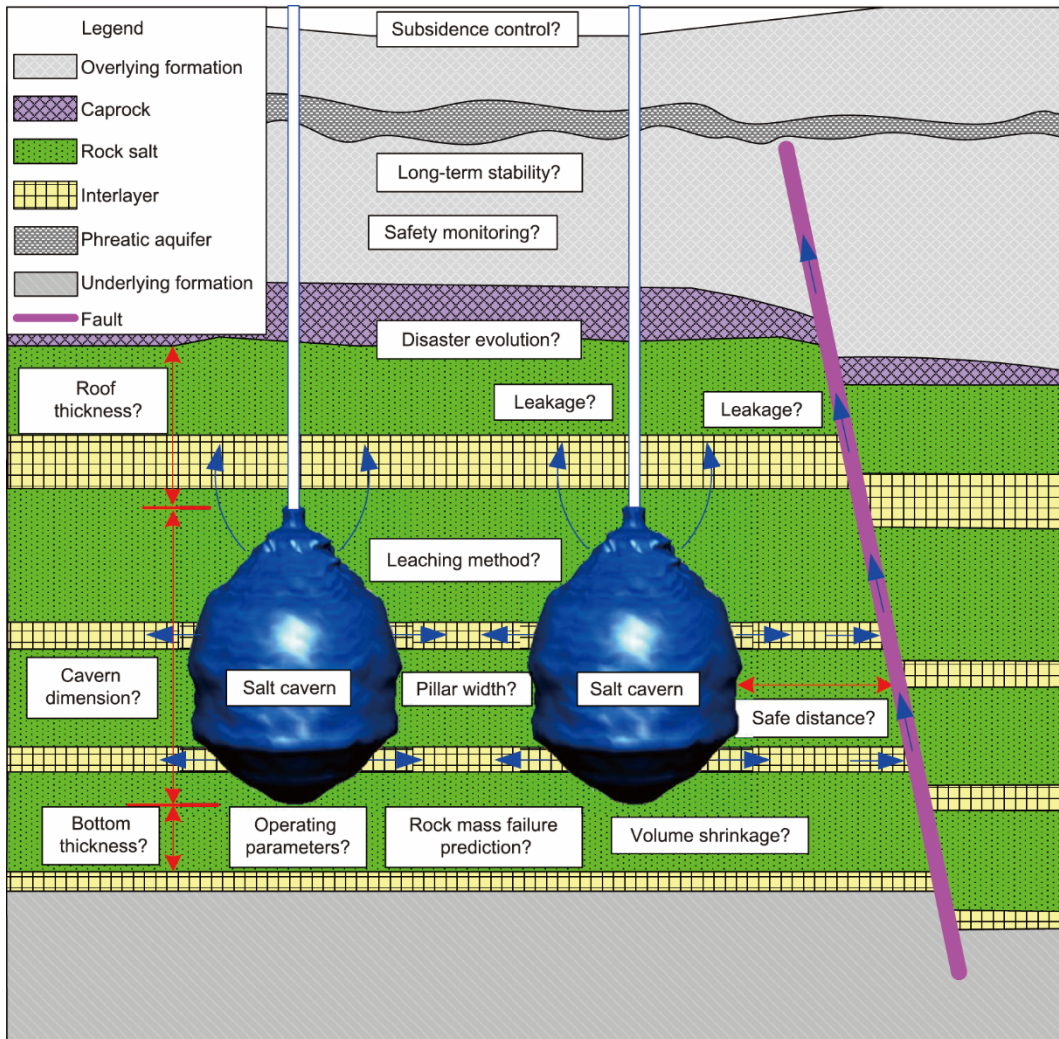
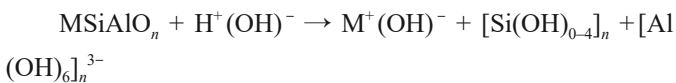


图7. 深部大型盐穴储能库面临的系列关键科学和技术难题。

会发生以下化学反应[52]:



上述化学反应会导致储能库围岩中的泥岩夹层发生吸水膨胀,甚至瓦解,将会显著降低围岩强度和增加其渗透率。

已有的研究表明:在利用盐穴进行储氢时,特定温度和压力条件下,氢气将会与盐穴围岩中矿物质发生化学反应,将会增加盐穴围岩的渗透率和降低围岩强度。同时,还会产生有毒的 H_2S 气体[39]。因此,利用深部地下盐穴储能过程中要充分考虑化学腐蚀影响。

盐岩的物理力学性能参数对温度和应力的变化敏感。图8给出了应力状态和温度对盐岩物理力学参数变化影响的规律[54],可知盐岩弹性模量随着温度和围压的增加而增加,屈服强度对围压的增加不敏感而随着温度的增加而降低[54]。同时,实验结果也表明温度对盐岩扩容破坏影

响较为显著,轴向承载能力随着温度的增加而显著降低(图9)[54],体积应变随着温度的增加而显著增加。这表明温度和应力对盐岩物理力学参数影响较为显著,在描述和预测盐岩力学性能参数变化时需要重点考虑。

盐岩单三轴力学实验表明:盐岩破坏过程中,首先是在试样内部微裂隙起裂(微米)、扩展(毫米)和连通(厘米),导致试样破坏失去承载能力[55-56]。如何准确量化这个不同尺度破坏临界应力值并指导实际盐穴储能库工程设计目前还存在较多的挑战。盐穴储能库围岩破坏也存在这种渐进多尺度现象。2012年8月3日,美国路易斯安娜州Bayou一个盐穴发生大面积垮塌,在地面形成一个面积巨大的落水坑。Bérest[57]分析认为,盐穴下部围岩发生强度破坏造成腔壁片帮,进而带动盐丘边缘软弱地质构造发生大尺寸的滑移侵入盐穴,引起上部超过1000 m的上覆地层发生整体滑移垮塌,最终引起地表塌陷。

通过上述分析可知,深部地下空间储能过程中盐岩破

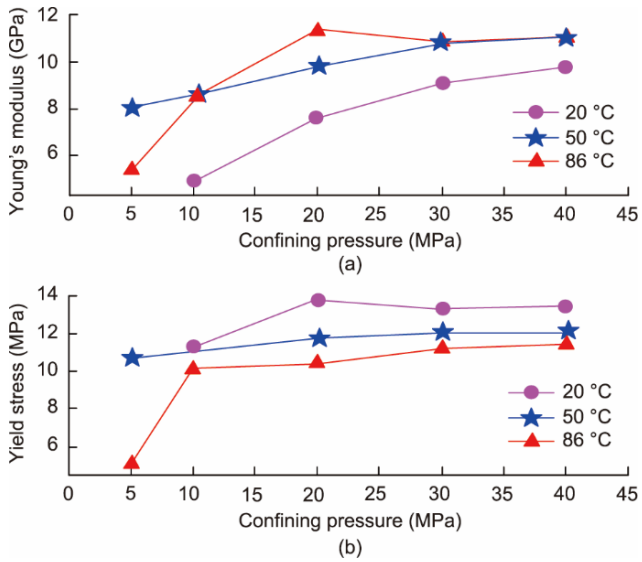


图 8. 应力状态和温度对盐岩杨氏模量 (a) 和屈服应力 (b) 的影响 [54]。

坏受到化学腐蚀、温度场、应力场和时间等的多种因素影响，且破坏过程表现出较强的尺度效应。已有的研究主要集中在石油、卤水等介质与盐岩及夹层等的相互作用[52, 58–60]，未涉及氢气和压缩空气等储能介质。因此，形成的结论和认识较为零散、具有一定的片面性和局限性。同时，研究仅限于实验室小尺度规模上，未考虑尺度效应的影响。因此，开展多相耦合条件下围岩体多尺度渐进破坏规律及其表征方法是深部储能过程中需要重点研究的基础理论之一。

3.2. 深部大型地下空间储能渗漏灾变演化规律

不同储能介质（石油、天然气、压缩空气和氢气）分子尺寸和黏滞系数差别较大，在高内压作用下储能介质向围岩体中不断运移渗漏可能会导致围岩体发生微裂缝、连

通已有孔隙和强度降低，甚至诱发地质断层活化，引发灾变。例如，美国堪萨斯州 Hutchinson 盐穴储气库天然气沿着完井管柱发生泄漏（图 10），沿着倾斜的上惠灵顿页岩层运移到浅部地层[61]，高压天然气导致上覆地层破裂，最终在距离盐穴储气库 10 km 外地区发生爆炸[61]。对于该次事故渗漏灾变演化过程及其临灾条件的识别仍然不明确，如何预测和调控深部地下空间储能过程中类似事故的发生尚需进一步研究。

利用盐矿采空区建设盐穴储气库和储油库已经在全世界范围内得到了较为广泛的推广和应用，确保储库的密封性是关键[61–66]。Hou [66]通过对盐岩试样钻孔附近渗透率变化规律进行研究发现：钻孔造成盐岩损伤区的渗透率比原始渗透率增加 10^5 倍以上。Chen 等[67]建立了等效边界气体渗流模型，对天然气沿着盐穴储气库围岩中的软弱夹层渗流规律进行了研究。Xiong 等[65]利用数值模拟方法研究了天然气沿着非盐夹层中的渗流规律。Wang 等[62]通过建立天然气沿着非盐岩夹层渗流计算模型，研究了夹层渗透率、夹层倾角等因素对盐穴储气库密封性影响规律。通过上述文献调研发现已有关于深部储能库渗漏灾变方面的研究主要针对盐穴储气库，储能介质仅为天然气且研究的体系性较差，未能够考虑不同储能介质和储库围岩体的相互作用以及多场多相的影响[62, 65–67]。例如，甲烷分子直径为 0.38 nm，而氢分子直径为 0.2 nm，意味着氢分子可以在孔隙和渗透率更小的围岩体中发生渗漏。同时，高压储能介质渗漏运移过程中，随着距离地表距离降低可能会导致地层破裂和断层活化，造成灾难性的后果，而在这方面的研究目前还处在空白状态。在深部地下空间储能过程中储能介质的注采荷载将会导致储库围岩发生劣化、渗透率增加，进一步增加储库的泄漏风险。因

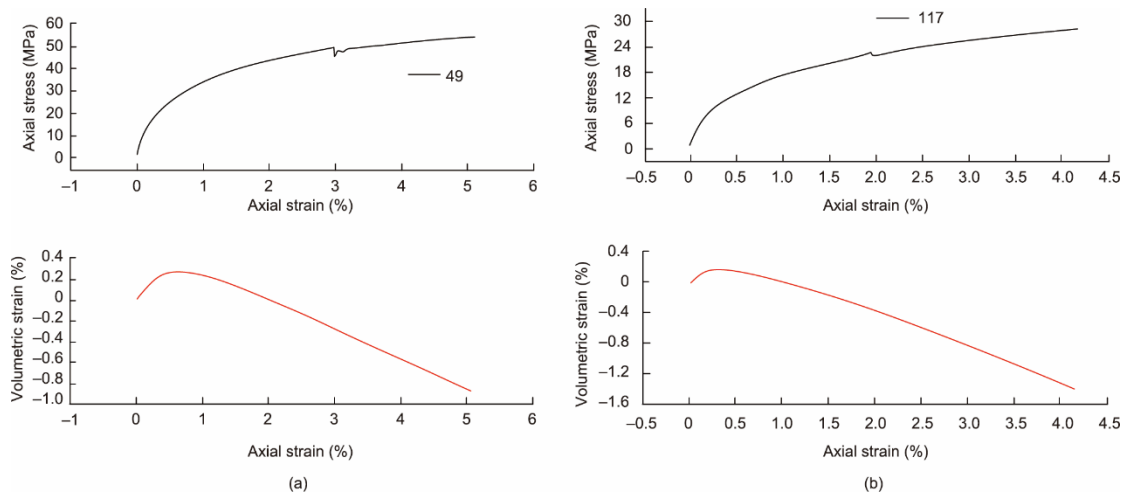


图 9. 不同温度条件下盐岩三轴扩容破坏曲线。(a) 20 °C；(b) 86 °C。49 和 117 是样本编号 [54]。

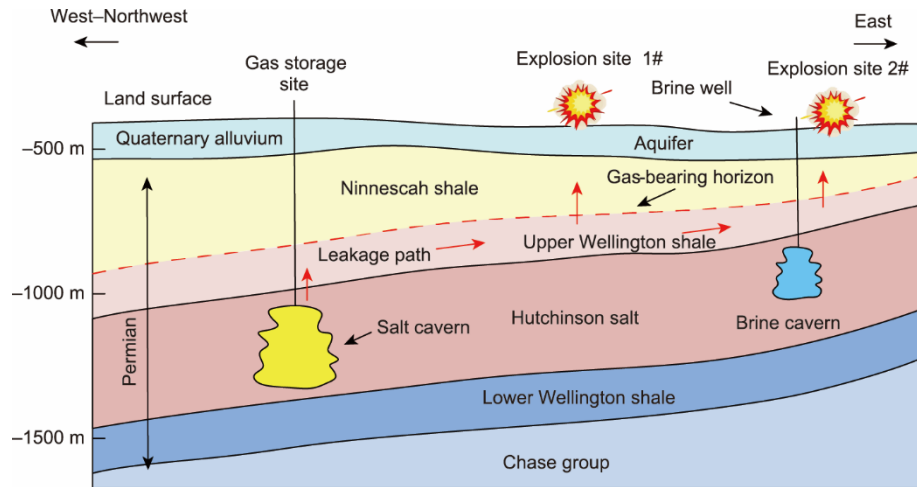


图 10. 美国堪萨斯州 Hutchinson 盐穴储气库泄漏示意图[61]。

此，建立多场多相耦合条件下储能介质在围岩体中的渗漏和致裂理论模型，给出储能介质长期渗漏运移规律，量化储能围岩体渗漏破坏的临界梯度、渗漏途径、渗漏量及渗透范围等关键参数，揭示出深部储能库群渗漏灾变机理是我国实施深部地下空间储能所必须要解决的关键基础性问题 and 研究难点。

3.3. 深部地下空间储能库群长期性能演化机理

我国用于深部地下空间储能盐穴的体积一般可以达到几十万立方米、高度达到 100 多米且腔体形态规则性较差 (图 11 [68])，同时需要承受储能介质压力和相态变化等综合影响，导致储能库性能逐渐劣化、安全性降低，给准确预测储能库长期性能及其劣化规律带来严峻挑战。通过对已有盐穴储油 (气) 库事故进行统计，长期功能失效造成

的事故占比 70%。如何确保深部储能库长期性能和揭示出储能库功能劣化灾变机理是深部储能亟需解决的基础理论难题。

采矿形成的地下盐穴具有尺寸大、形状复杂等特征 (图 11)，且在用作能源储备库过程中还需要承受储能介质注采等荷载的影响，如何确保深部地下空间的长期性能充满挑战。例如，2015 年，声纳探测发现江苏金坛盐穴储气库某盐穴顶部出现了较为显著的垮塌，垮塌体长度约为 200 m，厚度约为 2~4 m，垮塌区域体积达到 3300 m³，直接威胁到了该储气库的安全[69]。

同时，大规模储能需要建设储能库群，如何预防和调控单库失效破坏时对库群性能的影响是另外一个亟需解决的难题。上述挑战和难题也一直是岩土工程和能源储备领域的研究难点和热点问题。Staudtmeister 和 Rokahr [70]对

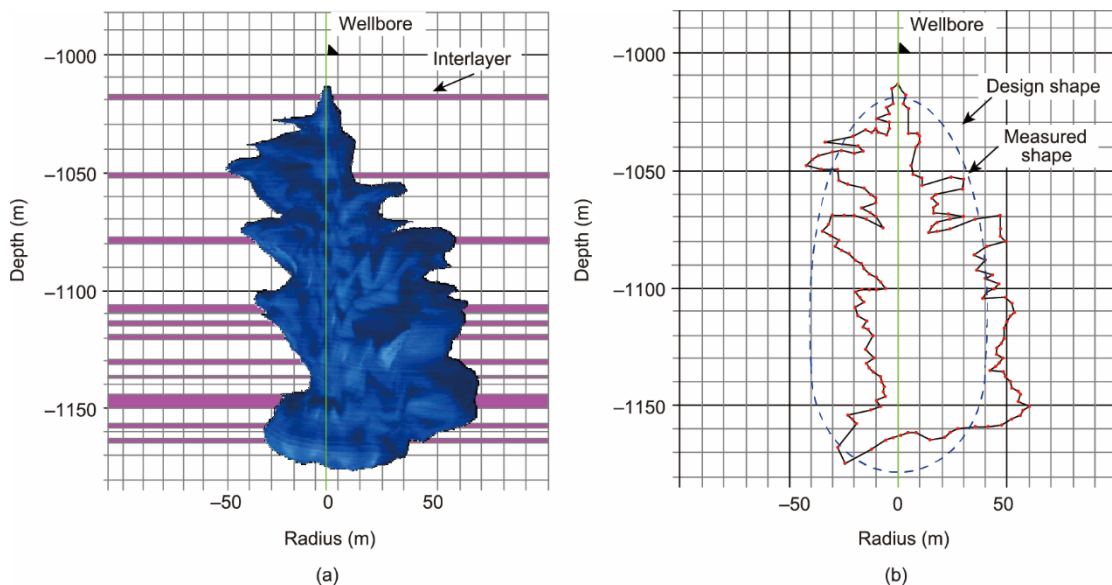


图 11. 我国深部储能盐穴体积大、形状复杂。(a) 3D 形状和 (b) 2D 形状[68]。

地下盐穴储气库设计过程及关键参数进行了系统的归纳,认为他们提出的设计方法可以满足盐穴运行中长期稳定性要求,并利用数值模拟计算对其提出计算参数进行了验证。Langer 和 Heusermann [71]认为盐穴作为地下危险废弃物存放场所,其力学稳定性和完整性尤为重要。他们认为准确描述围岩特征(地质条件、应力条件和本构方程)是评价盐穴稳定性的控制因素。Bérest [72]通过对已有盐穴储气库事故进行分析,认为盐穴在破坏时既表现出脆性破坏特征又表现出塑性破坏特征,在稳定性评价时需要综合考虑上述破坏特征。Yang 和他的团队[4,44,55,73-74]和 Wang 等[75]通过对中国盐岩进行系统实验并结合现场监测数据提出以变形量、体积收缩率、塑性区、等效应变和剪胀安全系数为指标的盐穴储气库稳定性评价指标体系,对邻近老腔、邻近断层和密集群腔等盐穴储气库稳定性进行评价和运行参数优化,有效地指导了现场生产。

上述研究主要集中在盐穴储气库,对我国深部地下空间储能的实施具有参考和借鉴意义,以下三个方面的研究仍需要进一步加强:

第一,深部地下空间储能库群功能演化与灾变孕育机理。建立库群长期性能评价的理论和物理模拟模型,研究运行参数对库群性能劣化的影响规律,优化出相应的运行参数。研究建立单库功能失效后对库群整体功能影响的灾变预测模型;研究单库失效影响范围、程度及灾变孕育过程,揭示出库群相互作用机理,形成库群长期性能评价与灾害预测的理论体系。

第二,深部地下空间储能库群全生命周期功能评价体系。研究建立深部地下空间储能库群功能劣化的连续-非连续仿真方法,揭示深部地下空间储能库群围岩与介质相互作用的渐进破坏过程。研究现场地表变形、渗漏及溶腔体积收缩规律与灾变特征,建立以地表沉降、渗漏、体积收缩和稳定性等为指标的深部地下空间储能库群全生命周期功能评价体系。

第三,深部地下空间储能库群灾变风险评估与调控理论。研究在单因素和多因素影响条件下深部地下空间储能库群的失效破坏模式、识别方法以及不同破坏模式间的内在关联性,分析库群围岩可靠度对不同随机因素的敏感性。研究深部地下空间储能库群主要致灾风险因子的时空响应特性,分析孕灾机理、致灾机制与储能库形状、运行参数和地质条件等因素之间的动态耦合关系。

3.4. 深部储能库智能建造关键技术

我国盐岩矿藏地质复杂,已有盐穴溶腔建造技术主要针对地质条件较好的金坛盐岩地层[76-82],形成的建造

技术不具有代表性并且存在腔体规则性差(图12)和盐岩地层利用效率低等问题。同时,溶腔建造在盐穴储能库建设过程中耗时最长,直接决定着腔体形状和体积,是盐穴储能库领域研究的热点[83]。

Brouard 等[83]对造腔过程中卤水与盐穴围岩热交换过程进行了分析,认为换热过程有利于抑制盐穴体积收缩。Zemke 等[84]对造腔过程中产生的卤水注入深部卤水层中的可行性进行了分析。Yang 及其团队[77,85-86]对水溶造腔过程中夹层垮塌控制、腔体形态预测、不溶物堆积形态预测和水平井多步法造腔等进行了研究。Sedace 等[87]根据盐丘型盐岩水溶造腔过程中腔体开展规律开发完成相应的造腔模拟软件。

因此,如何高效、快速地在我国层状盐岩地层中建造大型储能库是我国深部地下空间储能实施过程中必须解决的关键技术难题,需要开展以下三个方面的研究工作:

第一,层状盐岩高效水溶造腔理论。建立层状盐岩地层水溶造腔过程中盐腔内卤水流动和传质理论模型,给出正、反循环造腔条件下卤水流动和浓度特征。建立水溶造腔过程中层状盐岩中不溶物杂质下落和堆积预测模型,研究不同造腔参数对腔底不溶物堆积形态的影响规律,明确影响腔底堆积物形态的主要因素。在此基础上,构建层状盐岩高效水溶造腔理论体系。

第二,建立盐岩水溶造腔仿真模拟系统。发展盐岩溶解和不溶物堆积预测模型的高效求解算法,开发完成适用于我国层状盐岩的水溶造腔软件平台。研发水溶造腔流场、浓度场室内观测系统和盐腔形态三维探测成像系统,搭建大型盐岩水溶造腔仿真模拟实验系统,实现对盐岩水溶造腔全过程的精确模拟和反演。

第三,复杂地层高效智能水溶造腔工艺。针对盐层薄、杂质含量高和局部存在高品位盐岩“甜点”地层等复杂地质条件,提出小间距对井、水平井多步法和非对称式造腔等方法,研究建立不同造腔方法的理论模型,明确影响造腔效率的主控因素,形成针对复杂地层高效、智能水溶造腔工艺。

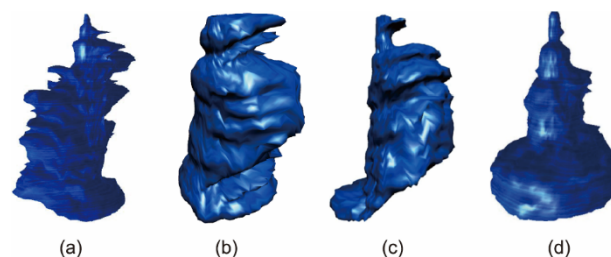


图12. 金坛盐穴储气库典型腔体三维形态。(a) #1; (b) #2; (c) #3; (d) #4。

3.5. 深部大型储能库群长期功能保障技术

深部地下空间储能库使用寿命长、储能介质易燃易爆，确保储能库长期功能（可用性、密封性、稳定性和安全性）是深部储能库在我国得以实施的基础和前提。图13给出了典型盐穴储气库体积收缩过大的案例[88]，体积收缩率达到30%以上，严重降低了储气库的调峰能力。国内已有长期功能保障技术主要针对盐穴储气库，如声呐测腔、地表沉降监测和微地震监测等。An等[89]通过对声呐监测发现金坛盐穴储气库A盐穴体积收缩较大，分析认为腔体不规则导致测量误差是造成该腔体体积收缩较大的主要因素。Li等[90]在对盐岩储气库地表沉降监测数据进行分析的基础上，利用弹性无限域内球型空洞受力收缩原理建立了盐穴储气库区地表沉降预测理论模型，并推导出相应的解析解。Wei等[91]对利用微地震监测盐穴储气库运行安全的可行性进行了分析，认为微地震监测可以实现对盐穴稳定性的实时监测，具有较好的精度。Wang等[92]通过微地震监测验证了金坛盐穴储气库提高上限运行压力的可行性。

目前，针对利用盐穴进行储能库群长期功能保证的技术研究尚处在起步阶段，无法回答如何保障储能库长期功能和安全等关键问题。建议开展以下三个方面的研究工作：

(1) 深部地下空间储能库群体积收缩抑制理论与技术。研究注采频率、压力和时间等对体积收缩的影响规律，建立体积收缩预测理论模型，给出不同地质条件下抑制深部地下空间储能库群体积收缩的主控因素。研究开发抑制盐穴体积收缩的运维技术，为盐穴储能库长期功能保

障提供支撑。研究提出基于体积收缩、腔周变形、应力分布等指标的深部储能库长期可用技术规范。

(2) 深部地下空间储能库群长期地表沉降监测与临灾评估。研究深部地下空间储能库群围岩与介质长期耦合作用下多尺度破坏的地表沉降规律。研究运行参数、腔体形状、储库布局等方法减缓岩层变形和地表沉降的机理。研究建立基于水准法和干涉合成孔径雷达（InSAR）等技术[93]的深部地下空间储能库群地表沉降长期自动化监测网，建立地表塌陷灾害评估模型，提出地表沉降安全阈值。

(3) 深部地下空间储能库群长期安全微地震和示踪剂监测技术。研究微地震信号与深部地下空间储能库群围岩破坏之间的对应关系，建立基于微地震监测的储能库群安全评价与预警系统。研究示踪剂浓度及分布位置与储能介质渗透和储库渗漏之间的耦合关系，建立示踪剂浓度监测与储能库密封性预警系统，实现对储能库灾变发生、发展和临灾等全过程的监测和预警。

4. 结论与建议

综上所述，深层地下空间储能是最有效、最经济的大规模储能方式之一，是中国大规模储能的主要发展方向。通过对中国深层地下空间储能的背景、类型和现状的分析，以及对中国深层地下储能关键理论和技术问题的研究，我们得出以下结论：

(1) 深部地下空间储能是未来能源储备发展的重要方向，是解决传统石油战略储备、天然气调峰保安、可再生

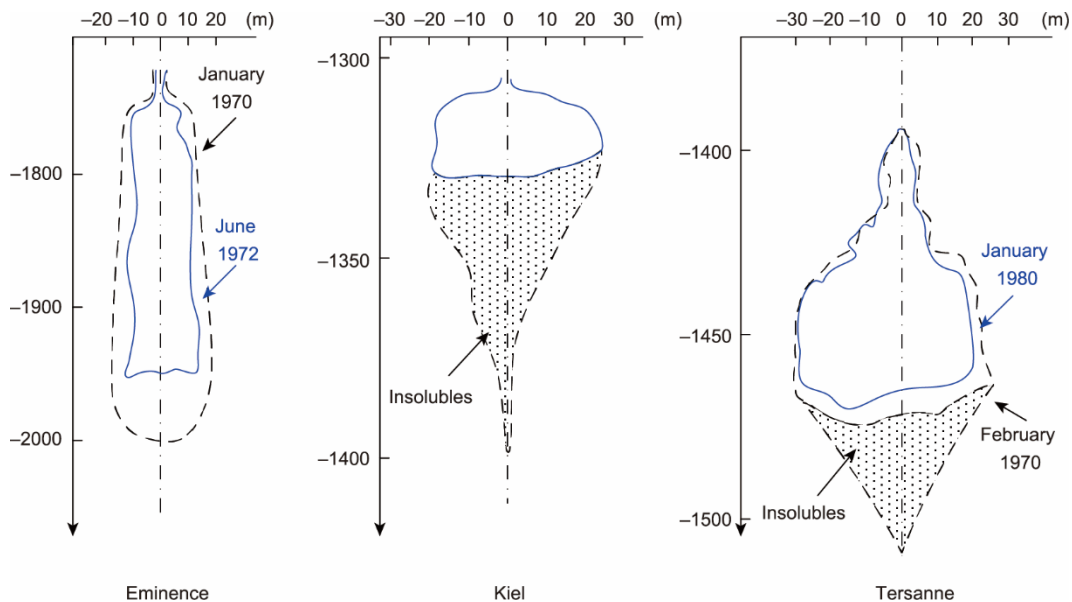


图13. 盐穴储气库体积收缩过大。黑点表示沉渣[88]。

能源持续供给和未来能源（氢能）大规模高效利用的必由之路。大力发展深部地下空间储能是实现中国“碳中和”和能源结构升级转型的关键。

(2) 盐岩具有物性稳定、渗透率低、损伤自修复、易溶于水 and 分布广等特征，是大规模能源储备的理想地质体。目前全世界已经有超过 10 亿桶石油和 $3.3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 天然气存储在盐穴中。利用盐岩地层储能是今后中国实施大规模能源储备的优先发展方向。

(3) 中国盐岩地层为典型湖相沉积的层状盐岩，具有厚度薄、杂质含量高和夹层多等特征，在这种地层中进行大规模能源储备是一个世界性难题。我国盐岩资源分布位置优越，大规模储能效益显著，积极开展深部地下空间储能过程中基础理论和关键技术研究意义重大。

(4) 利用中国层状盐岩进行大规模能源储备亟需解决低渗介质多场耦合条件下多尺度渐进破坏、储能库渗漏灾变和长期功能劣化等关键理论研究，同时需要开展层状盐岩多尺度渗透率测试、储能库智能建造和长期功能保障等系列关键技术研究，为我国后期实施大规模能源储备提供理论和技术保障。

致谢

作者感谢国家自然科学基金(42072307)、湖北省杰出青年基金(2021CFA095)、中国工程院战略性研究咨询项目(HB2022B08)和中国科学院战略性优先发展研究计划(XDPB21和XDC10020300)的资助。作者衷心感谢美国内华达大学雷诺分校 Mackay 地球科学与工程学院 Jaak J Daemen 教授对本文提出的建设性建议和审阅。

Compliance with ethics guidelines

Chunhe Yang, Tongtao Wang, and Haisheng Chen declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] China Xinhua News Network Corporation. [President of Xi Jinping attended and delivered an important speech at the opening ceremony of the Paris Climate Change Conference] [Internet]. Beijing: China Xinhua News Network Corporation; 2015 Dec 1 [cited 2021 Jan 15]. Available from: http://www.xinhuanet.com/world/2015-12/01/c_1117309626.htm. Chinese.
- [2] NetworkPeoples. [Unswervingly advancing the Energy Revolution in depth—thoroughly studying and implementing Xi Jinping’s important discussion on the energy revolution] [Internet]. Beijing: Peoples Network; 2017 Jun 13 [cited 2021 Jan 15]. Available from: <http://opinion.people.com.cn/n1/2017/06/13/c1003-29334715.html>. Chinese.
- [3] China Renewable Energy Engineering Institute. China renewable energy development report 2019. Beijing: China Water Power Press; 2020.
- [4] Yang C, Wang T, Li Y, Yang H, Li J, Qu D, et al. Feasibility analysis of using abandoned salt caverns for large-scale underground energy storage in China. *Appl Energy* 2015;137:467–81.
- [5] Bayazit Y, Bakis R, Koc C. A study on transformation of multi-purpose dams into pumped storage hydroelectric power plants by using GIS model. *Int J Green Energy* 2021;18(3):308–18.
- [6] Wang T, Yang C, Wang H, Ding S, Daemen JJK. Debrining prediction of a salt cavern used for compressed air energy storage. *Energy* 2018;147:464–76.
- [7] Kim H, Rutqvist J, Ryu D, Choi B, Sunwoo C, Song W. Exploring the concept of compressed air energy storage (CAES) in lined rock caverns at shallow depth: a modeling study of air tightness and energy balance. *Appl Energy* 2012; 92:653–67.
- [8] [Construction of maximum liquid flow battery by using underground salt cavern] [Internet]. Beijing: China Finance Network; 2017 Nov 27 [cited 2021 Jan 15]. Available from: <http://finance.china.com.cn/roll/20171127/4449737.shtml>. Chinese.
- [9] Zhao Q, Zheng J. Overview of hydrogen development policies of major global countries in 2019. *Global Sci Tech Econ Outlook* 2020;35(4):11–20. Chinese.
- [10] International Petroleum Economics. [Focus on the hydrogen economy] [Internet]. Beijing: Sohu; 2017 Oct 30 [cited 2021 Jan 15]. Available from: https://m.sohu.com/a/201234297_611338. Chinese.
- [11] Matsuo Y, Endo S, Nagatomi Y, Shibata Y, Komiyama R, Fujii Y. A quantitative analysis of Japan’s optimal power generation mix in 2050 and the role of CO₂-free hydrogen. *Energy* 2018;165(B):1200–19.
- [12] OFweek hydrogen energy. [The Japanese government announces the schedule of hydrogen energy promotion and application to promote hydrogen energy utilization in Japan] [Internet]. Beijing: nengyuanjie; 2019 Mar 14 [cited 2021 Jan 15]. Available from: <http://www.nengyuanjie.net/article/24714.html>. Chinese.
- [13] Sohu. [Hydrogen energy included in government Work Report of China for the first time] [Internet]. Beijing: Sohu; 2019 Mar 18 [cited 2021 Jan 15]. Available from: https://www.sohu.com/a/302100209_120046996. Chinese.
- [14] White paper on hydrogen and fuel cell industry in China. Beijing: People’s Daily Publishing House; 2019.
- [15] Crotagino F, Huebner S. Energy storage in salt caverns/developments and concrete projects for adiabatic compressed air and for hydrogen storage. In: *Proceedings of SMRI Spring 2008 Technical Conference*; 2008 Apr 28–29; Porto, Portugal; 2008.
- [16] Li B. European Union strategic petroleum reserve model. *SINOPEC Mon* 2007; 9:48–50. Chinese.
- [17] Zhang W. United States: increase oil reserve capacity [Internet]. Beijing: Economic Daily; 2012 Mar 31 [cited 2021 Jan 15]. Available from: http://paper.ce.cn/jrb/html/2012-03/31/content_201041.htm. Chinese.
- [18] Song G. The explosion accident of Huang Dao tank farm and its lessons. *Petrol Refin Technol* 1991;2:48–54. Chinese.
- [19] PhoenixNet. [The quake sparked a fire at an oil tank storage facility in Ichihara, Chiba prefecture] [Internet]. Hong Kong: PhoenixNet; 2011 Mar 11 [cited 2021 Jan 15]. Available from: <http://news.ifeng.com/c/7fZQpYOW3VP>. Chinese.
- [20] [Saudi Aramco was attacked, cruise missiles hit oil storage tanks and fireballs of black smoke billowed out] [Internet]. Beijing: Sina; 2020 Nov 25 [cited 2021 Jan 15]. Available from: http://k.sina.com.cn/article_6435187353_17f912a9900100sd3w.html. Chinese.
- [21] [“Gasification Of China” boosts industrial development, and the trillion-level market of natural gas industry is being opened] [Internet]. Beijing: Sohu; 2018 Jan 19 [cited 2021 Jan 15]. Available from: https://www.sohu.com/a/217720565_733755. Chinese.
- [22] [NDRC: China’s apparent natural gas consumption in 2019 was 306.7 billion m³ with an increase of 9.4%] [Internet]. Shanghai: HuitongFinanceNet; 2020 Jan 21 [cited 2021 Jan 15]. Available from: <https://news.fx678.com/202001211712312281.shtml>. Chinese.
- [23] Ma H. Russia and central Asian exporting gas to China has caused both joy and concern. *SINOPEC Mon* 2020;1:76–9. Chinese.
- [24] Ding G. Demand and challenges for underground gas storages in China. *Nat Gas Ind* 2011;31(12):90–3. Chinese.
- [25] Qiu B, Wang J, Li C. The countermeasures on guaranteeing the sustainable supply of nature gas in China. *Urban Dev Stud* 2018;25(7):1–6. Chinese.
- [26] [Issuance of the Guidelines on Energy Work in 2018] [Internet]. Beijing: National Energy Administration of China; 2018 Feb 26 [cited 2021 Jan 15]. Available from: http://zfxgk.nea.gov.cn/auto82/201803/t20180307_3125.htm. Chinese.

- [27] National Development and Reform Commission of China. [Opinions on accelerating the construction of natural gas storage capacity] [Internet]. Beijing: Sina; 2020 Apr 14 [cited 2021 Jan 15]. Available from: <http://finance.sina.com.cn/wm/2020-04-14/doc-irrcuyvh7651860.shtml>. Chinese.
- [28] Yang C, Li Y, Chen F. Bedded salt rock mechanics and engineering. Beijing: Science Press; 2009. Chinese.
- [29] Yang C, Zhou H, Li Y. Failure mechanism and protection of salt caverns for large-scale underground energy storage. Beijing: Science Press; 2014. Chinese.
- [30] Office of Fossil Energy and Carbon Management. SPR storage sites [Internet]. Washington, DC: US Department of Energy; 2019 Dec 31 [cited 2021 Jan 15]. Available from: <https://www.energy.gov/fecm/strategic-petroleum-reserve-4>.
- [31] Wang N. [Petroleum reserves and the characteristics of petroleum reserves of major countries in the world] [Internet]. Beijing: Zhihu; 2019 Dec 21 [cited 2021 Jan 15]. Available from: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/98492240>. Chinese.
- [32] [National petroleum reserve] [Internet]. Beijing: Baidu; c2021 [cited 2021 Jan 15]. Available from: <https://baike.baidu.com/item/%E5%9B%BD%E5%AE%B6%E7%9F%B3%E6%B2%B9%E5%82%A8%E5%A4%87/12719361?fr=aladdin>. Chinese.
- [33] Underground gas storage in the world—2019 status. Report. Rueil Malmaison: CEDIGAZ; 2019.
- [34] Albawab M, Ghenai C, Bettayeb M, Janajreh I. Sustainability performance index for ranking energy storage technologies using multi-criteria decision-making model and hybrid computational method. *J Energy Storage* 2020; 32: 101820.
- [35] Diezmartínez CV. Clean energy transition in Mexico: policy recommendations for the deployment of energy storage technologies. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;135:110407.
- [36] Jafarizadeh H, Soltani M, Nathwani J. Assessment of the Huntorf compressed air energy storage plant performance under enhanced modifications. *Energy Convers Manag* 2020;209:112662.
- [37] Jiangsu Provincial Regulatory Office of the National Energy Administration. [Jiangsu Jintan salt cavern compressed air energy storage power generation national demonstration project is expected to be connected to the grid in 2021] [Internet]. Beijing: Polaris Energy Storage Network; 2020 Jul 13 [cited 2021 Jan 18]. Available from: <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20200713/1088400.shtml>. Chinese.
- [38] Tarkowski R. Underground hydrogen storage: characteristics and prospects. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;105:86–94.
- [39] Fu P, Luo S, Xia Y, Li G, Ban F. Research on status and difficulties of hydrogen underground storage technology. *China Well Rock Salt* 2020; 51(6): 19–23. Chinese.
- [40] Pinto JSR, Bachaud P, Fargetton T, Ferrando N, Jeannin L, Louvet F. Modeling phase equilibrium of hydrogen and natural gas in brines: application to storage in salt caverns. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46(5):4229–40.
- [41] Caglayan DG, Weber N, Heinrichs HU, Linßen J, Robinius M, Kukla PA, et al. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45(11):6793–805.
- [42] Thaller LH, Zimmerman AH, To GA. Flooded utilization and electrochemical voltage spectroscopy studies on nickel electrodes. *J Power Sources* 2003; 122(1):85–94.
- [43] Han H, Mei S, Wang G, Chen L, Han Y, Zhu C, et al. Salt cavern battery energy storage technology and development prospects. *J Glob Energy Interconnect* 2018;1(3):313–21. Chinese.
- [44] Wang T, Yang C, Ma H, Daemen JJK, Wu H. Safety evaluation of gas storage caverns located close to a tectonic fault. *J Nat Gas Sci Eng* 2015;23:281–93.
- [45] Wang J, Liu X, Song Z, Shao Z. An improved Maxwell creep model for salt rock. *Geomech Eng* 2015;9(4):499–511.
- [46] Meng T, Hu Y, Fang R, Fu Q, Yu W. Weakening mechanisms of gypsum interlayers from Yunying salt cavern subjected to a coupled thermo-hydro-chemical environment. *J Nat Gas Sci Eng* 2016;30:77–89.
- [47] Kang Y, Chen J, Jiang D, Liu W, Fan J. Summary on damage self-healing property of rock salt. *Rock Soil Mech* 2019;40(1):55–69. Chinese.
- [48] Park B, Eghartner BL, Herrick C. Numerical expansion analyses of the strategic petroleum reserve in Bayou Choctaw Salt Dome, USA. Report. Albuquerque: Sandia National Laboratories; 2009 Feb. Report No.SAND2009-0951C.
- [49] Eghartner BL, Sobolik SR. Analysis of cavern stability at the Bryan Mound SPR site. Report. Albuquerque: Sandia National Laboratories; 2009 Apr. Report No.SAND2009-1986.
- [50] Ban F, Yuan G, Wan J, Peng T. The optimum interwell distance analysis of two-well-horizontal salt cavern construction. *Energy Sources* 2021; 43(23): 3082–100.
- [51] Liu W, Chen J, Jiang D, Shi X, Li Y, Daemen JJK, et al. Tightness and suitability evaluation of abandoned salt caverns served as hydrocarbon energies storage under adverse geological conditions (AGC). *Appl Energy* 2016; 178: 703–20.
- [52] Zhang N. Research on surrounding rock permeability and mechanical properties of crude oil storage caverns in bedded rock salt and the cavern safety evaluation [dissertation]. Chongqing: Chongqing University; 2019. Chinese.
- [53] Zhang N, Yang C, Shi X, Wang T, Yin H, Daemen JJK. Analysis of mechanical and permeability properties of mudstone interlayers around a strategic petroleum reserve cavern in bedded rock salt. *Int J Rock Mech Min* 2018;112: 1–10.
- [54] Ma H. Study on feasibility of rock salt underground gas storage in ultra-deep formation [dissertation]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences; 2010. Chinese.
- [55] Wang T, Yang C, Ma H, Li Y, Shi X, Li J, et al. Safety evaluation of salt cavern gas storage close to an old cavern. *Int J Rock Mech Min* 2016;83:95–106.
- [56] Lyu C, Liu J, Ren Y, Liang C, Zeng Y. Mechanical characteristics and permeability evolution of salt rock under thermal–hydro–mechanical (THM) coupling condition. *Eng Geol* 2022;302:106633.
- [57] Bérest P. Subsidence, sinkholes and craters above salt caverns. In: SMRISpring Meeting, 2008 Apr 28–29; Porto, Portugal; 2008.
- [58] Jiang D, Zhang J, Chen J, Ren S, Yang C. Research on softening law of insoluble interlayer during salt cavern building. *Chinese J Rock Mech Eng* 2014;33(5):865–73. Chinese.
- [59] Shi X, Li Y, Yang C, Qu D, Yang H, Ma H. Collapse control technology for interbeds in solution mining for oil/gas storage in multi-interbedded salt formation. *Chinese J Geot Eng* 2011;33(12):1957–63. Chinese.
- [60] Meng T, Hu Y, Fang R, Kok J, Fu Q, Feng G. Study of fracture toughness and weakening mechanisms in gypsum interlayers in corrosive environments. *J Nat Gas Sci Eng* 2015;26:356–66.
- [61] Bérest P, Réveillere A, Evans D, Stower M. Review and analysis of historical leakages from storage salt caverns wells. *Oil Gas Sci Technol* 2019;74:27.
- [62] Wang T, Yang C, Yan X, Ma H, Shi X, Daemen J. Equivalent permeability model for sealing evaluation of natural gas storage cavern in bedded rock salt. *Curr Sci* 2015;108(4):723–9.
- [63] Yuan G, Tian Z, Yuan J, Wang P, Ma Y. Influence factors of sealing property of salt cavern gas storage. *Nat Gas Indus* 2008;28(4):105–7. Chinese.
- [64] Liu W, Muhammad N, Chen J, Spiers CJ, Peach CJ, Jiang D. Investigation on the permeability characteristics of bedded salt rocks and the tightness of natural gas caverns in such formations. *J Nat Gas Sci Eng* 2016;35(A):468–82.
- [65] Xiong J, Huang X, Ma H. Gas leakage mechanism in bedded salt rock storage cavern considering damaged interface. *Petro* 2015;1(4):366–72.
- [66] Hou Z. Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities. *Int J Rock Mech Min* 2003;40(5): 725–38.
- [67] Chen W, Tan X, Wu G. Research on gas seepage law in laminated salt rock gas storage. *Chinese J Rock Mech Eng* 2009;28(7):1297–304. Chinese.
- [68] Wang T, Yang C, Li J, Li J, Shi X, Ma H. Failure analysis of overhanging blocks in the walls of a gas storage salt cavern: a case study. *Rock Mech Rock Eng* 2017;50(1):125–37.
- [69] Wang T, Yang C, Chen J, Daemen JJK. Geomechanical investigation of roof failure of China’s first gas storage salt cavern. *Eng Geol* 2018;243:59–69.
- [70] Staudmeister K, Rokahr RB. Rock mechanical design of storage caverns for natural gas in rock salt mass. *Int J Mech Min Sci Geomech Abstr* 1997;34(3–4): 300.e1–13.
- [71] Langer M, Heusermann S. Geomechanical stability and integrity of waste disposal mines in salt structures. *Eng Geol* 2001;61(2–3):155–61.
- [72] Bérest P. The mechanical behavior of salt and salt caverns. In: Proceedings of the ISRM International Symposium EUROCK 2013; 2013 Oct 23–26; Wroclaw, Poland. Richardson: OnePetro; 2013. p. 17–30.
- [73] Yang C, Wang T, Qu D, Ma H, Li Y, Shi X, et al. Feasibility analysis of using horizontal caverns for underground gas storage: a case study of Yunying salt district. *J Nat Gas Sci Eng* 2016;36(PtA):252–66.
- [74] Yang C, Wang T, Li J, Ma H, Shi X, Daemen JJK. Feasibility analysis of using closely spaced caverns in bedded rock salt for underground gas storage: a case study. *Environ Earth Sci* 2016;75(15):1138.
- [75] Wang T, Ao L, Wang B, Ding S, Wang K, Yao F, et al. Tightness of an underground energy storage salt cavern with adverse geological conditions. *Energy* 2022;238(C):121906.
- [76] Li J, Shi X, Yang C, Li Y, Wang T, Ma H, et al. Repair of irregularly shaped salt cavern gas storage by re-leaching under gas blanket. *J Nat Gas Sci Eng* 2017; 45:848–59.

- [77] Li J, Shi X, Wang T, Yang C, Li Y, Ma H, et al. A prediction model of the accumulation shape of insoluble sediments during the leaching of salt cavern for gas storage. *J Nat Gas Sci Eng* 2016;33:792–802.
- [78] Wang Y, Zhou D, Deng L, Fu Y, Guan D. Study on improving the solution-mining processes of salt cavern gas storage and field application of the improved process technology. *J Southwest Petro Univ* 2018; 40(5): 147–53. Chinese.
- [79] Wang J, An G, Shan B, Wang W, Jia J, Wang T, et al. Parameter optimization of solution mining under nitrogen for the construction of a gas storage salt cavern. *J Nat Gas Sci Eng* 2021;91:103954.
- [80] Xiao N, Liang W, Zhang S. Feasibility analysis of a single-well retreating horizontal cavern for natural gas storage in bedded salt rock. *J Nat Gas Sci Eng* 2022;99:104446.
- [81] Jiang D, Li Z, Liu W, Ban F, Chen J, Wang Y, et al. Construction simulating and controlling of the two-well-vertical (TWV) salt caverns with gas blanket. *J Nat Gas Sci Eng* 2021;96:104291.
- [82] Zheng Y, Zhao Y, Ding G, Wu Z, Lu S, Lai X, et al. Solution mining technology of enlarging space for thick-sandwich salt cavern storage. *Pet Explor Dev* 2017; 44(1):139–45.
- [83] Brouard B, Bérest P, Couteau J. Influence of the leaching phase on the mechanical behavior of salt caverns. *Int J Rock Mech Min* 1997;34(3–4):26e1–15.
- [84] Zemke J, Stöwera M, Borgmeier M. Injection of brine from cavern leaching into deep saline aquifers: long-term experiences in modeling and reservoir survey. *Dev Water Sci* 2005;2005(52):403–12.
- [85] Wang T, Yang C, Shi X, Ma H, Li Y, Yang Y, et al. Failure analysis of thick interlayer from leaching of bedded salt caverns. *Int J Rock Mech Min* 2015;73: 175–83.
- [86] Yang J, Li H, Yang C, Li Y, Wang T, Shi X, et al. Physical simulation of flow field and construction process of horizontal salt cavern for natural gas storage. *J Nat Gas Sci Eng* 2020;82:103527.
- [87] Sedaee B, Mohammadi M, Esfahanizadeh L, Fathi Y. Comprehensive modeling and developing a software for salt cavern underground gas storage. *J Energy Storage* 2019;25:100876.
- [88] Bérest P, Brouard B. Safety of salt caverns used for underground storage: blow out; mechanical instability; seepage; cavern abandonment. *Oil Gas Sci Technol* 2003;58(3):361–84.
- [89] An G, Wang B, Wang C, Chen C, Lu Z, Shi Z, et al. Analysis on the reason for the higher volume shrinkage of Cavity A of Jintan salt-cavern gas storage. *Oil Drill Product Tech* 2020;42(4):507–12. Chinese.
- [90] Li Y, Kong Q, Shi X, Li S, Yang B, Yang C. Viscoelastic model of surface subsidence of salt cavern storage and its application. *Rock Soil Mech* 2017; 38(7):2049–58. Chinese.
- [91] Wei L, Jing G, Xu G, Wang F, Li X, Liu B. Application of microseismic monitoring technology in underground gas storage. *Nat Gas Ind* 2018;38(8):41–6. Chinese.
- [92] Wang T, Li J, Jing G, Zhang Q, Yang C, Daemen JJK. Determination of the maximum allowable operating pressure for a gas storage underground salt cavern—a case study of Jintan, China. *J Rock Mech Geotech Eng* 2019;11(2): 251–62.
- [93] Castellazzi P, Schmid W. Interpreting C-band InSAR ground deformation data for large-scale groundwater management in Australia. *J Hydrol Reg Stud* 2021; 34:100774.