

· 专题一:石油矿业安全领域学科发展(矿业与安全工程) ·

盐矿水溶造腔及溶腔综合利用研究进展

陈 结^{1, 2*} 姜德义^{1, 2} 刘 伟^{1, 2} 黄国栋^{1, 2} 范金洋^{1, 2}

1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044
2. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044

[摘 要] 由于盐岩具有孔隙度低、渗透率低、损伤自恢复等特性,其水溶开采后的溶腔不仅可以用来存储石油、天然气、压缩空气、CO₂ 等介质,甚至还可以作为中低放核废料的处置场所。因此盐穴综合利用被认为是战略能源储备、废弃物处置及推动可再生能源大规模调峰的重点研究方向。本文对当前国内外盐岩物理力学性质和溶腔利用现状进行了总结,探讨了未来溶腔综合利用可能发展的趋势和面临的挑战,分析了我国层状盐岩造腔技术体系及溶腔综合利用难点与现状,并对未来工作进行了展望。

[关键词] 盐穴;水溶造腔;综合利用;大规模储能

盐岩是一种特殊的地质材料,是由石盐组成的矿物集合体。石盐的主要成分是 NaCl,属于晶体矿物。盐岩的结构致密、孔隙度低、渗透性低,具有良好的流变性质及独特的水溶开采及损伤自愈合特性^[1, 2]。因此被国内外学者公认为是进行地下油气储备工程建设、压气蓄能电站建设、有害废物地质处置库建设及 CO₂ 地质封存等最适合的地质母岩之一^[2-7],其主要利用情况见图 1。

20 世纪 60 年代起,欧美国家就开始在地下盐穴中开展石油、天然气储存的相关研究并取得成功。以美国为例,目前美国几乎全部的战略石油均储存在墨西哥沿岸大型盐丘中建设的 63 个地下盐穴中,足以支撑美国 100 天的石油供给^[8]。我国关于利用地下盐穴进行油气储存的研究与工程建设起步相对较晚,但是发展迅速。基于我国的战略能源储备需求,我国在 20 世纪末开始了地下盐穴储气库的可行性研究,并在 2007 年将我国第一座盐穴天然气储库—金坛储气库建成投产。目前,我国关于在地下盐岩中建设储库工程的相关理论和技术均已取得长足的进步,基于我国盐岩成层状沉积的特点,建立了适用于我国层状盐岩的造腔技术体系,提出了我国盐矿采卤用腔一体化理念,并积极探索在盐穴中开



陈结 重庆大学资源与安全学院教授,博士生导师。国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金获得者,重庆市青年拔尖人才。主要研究方向为盐矿水溶开采及溶腔综合利用,研究成果为我国盐矿开采及溶腔能源储库建设提供了重要的理论与技术支持。承担十余项国家级科研项目,曾获教育部科技进步奖一等奖、重庆市科技进步奖一等奖等多项省部级奖励。

展压气蓄能等先导项目,在消除地质环境安全隐患的同时实现对地下盐穴的综合利用^[9]。本文中主要介绍了盐岩的物理力学性质、国外盐岩地下溶腔利用已有工作进展、我国开展盐岩地下储库工程的优势与挑战、我国层状盐岩造腔技术体系、我国盐矿综合利用现状,并讨论了盐矿水溶造腔及溶腔综合利用未来的研究方向。

1 盐岩的物理力学性质

石盐等矿物在一定地质作用下集中沉积逐渐形成盐岩矿藏,其主要成分为 NaCl。由于 NaCl 晶体易溶于水,因此盐岩开采时主要采用水溶开采的方式。盐岩水溶开采过程中会在地下盐层中形成一个充满卤水的大型溶腔,在上世纪美国和苏联开启了

收稿日期:2021-06-30;修回日期:2021-12-16

* 通信作者;Email: jiechen023@cqu.edu.cn

本项目受到国家自然科学基金项目(52022014)的资助。

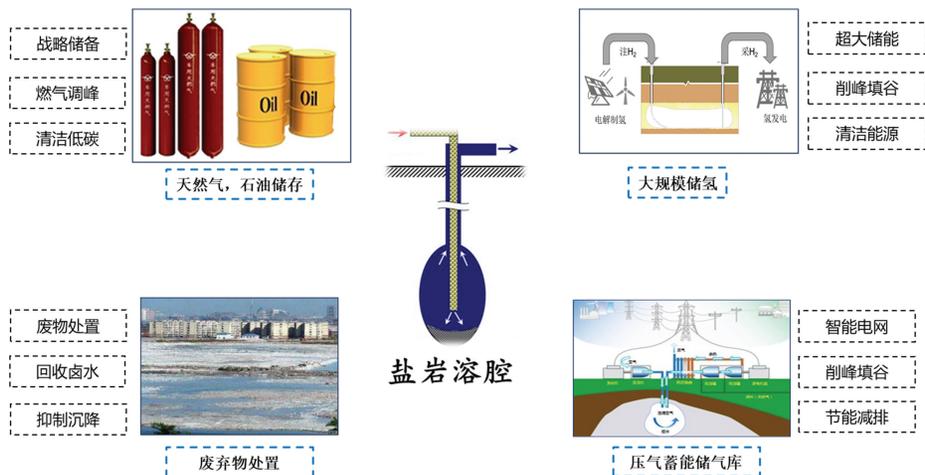


图1 盐穴溶腔综合利用示意图

在地下盐岩溶腔中进行石油天然气储存的工程建设,从而引起了各国研究人员对盐岩力学性质的广泛关注。早期的盐岩力学研究主要集中在短期强度和变形特性方面,如:Hunsche等介绍了在盐岩基础力学性质方面开展的研究工作,通过基础力学试验得到了盐岩抗压强度、弹性模量等力学参数^[10]。Li等人对盐岩/夹层和层状复合岩样进行了单三轴压缩试验,实验表明层状盐岩具有盐岩大变形与夹层脆性破坏的双重性质^[11]。Wang等人通过单、三轴蠕变试验,发现盐岩具有明显的非线性特征、且与应力水平和蠕变时间有关^[12]。Hunsche等、Cristescu等学者开展了一系列的盐岩蠕变实验^[13, 14],得到了盐岩在不同温度和不同应力条件下的蠕变曲线。上述研究表明盐岩的力学性质能够满足在地下溶腔中储备石油天然气的稳定性要求。

地下盐腔的密闭性也是科研人员在地下盐穴储气库建设过程中重点关注的一个方面。De Las Cuevas使用三种不同的方法对纯盐岩(西班牙)的孔隙度进行了测试,试样的总孔隙率为0.97%~3.09%,并将孔隙分为宏观孔隙、微观孔隙和亚孔隙^[15]。Stormont和Daemen测试了盐岩的渗透率,发现在未受工程扰动的条件下盐岩的渗透率低至 10^{-21} m^2 ,并指出盐岩的渗透性可完全满足储气库运营的密闭性要求^[16]。此外,类似于人类皮肤划伤后可以愈合,盐岩中的损伤裂纹在一定的条件下也可以愈合,从而使损伤盐岩的力学性质和渗透性得到修复,这种性质被称为盐岩的损伤自愈合特性。Yin等研究表明损伤盐岩的渗透率可以恢复到未损伤盐岩的渗透率水平^[17]。

总之,由于盐岩具有可水溶开采、蠕变特性好、渗透性低以及损伤自愈合等优良特性,被国内外学者公认为能源储存、放射核废料永久性处置最理想的介质之一。

2 国外盐岩地下溶腔利用开展的工作

在盐岩地下溶腔利用方面,美国和欧洲国家开展的工作较早,目前已经在石油天然气储备、压气蓄能电站建设、废弃物处置、氢气储存等方面进行了成功的应用。石油储备方面,美国战略石油储备全部储存在地下盐腔中,德国、法国、俄罗斯、加拿大等国也均在盐岩中建有石油储库。天然气储存方面,当前全世界地下盐穴储气库共有111座(总工作气量超过320亿立方米),其中欧洲60座,北美47座,中国3座,约占全球储气库数量的17%^[18, 19]。压气蓄能方面,目前只有德国和美国成功实施,德国于1978年首次利用Huntorf盐腔建立了一座290 MW的压气蓄能电站,至今稳定运行近40年有余;美国也于1991年在阿拉巴马州的McIntosh建立了一座功率为110 MW盐腔压气蓄能电站,至今运行稳定^[20]。废弃物处置方面,目前主要利用地下盐腔进行有害化工废物及放射性废物的处置^[21],英国于1959年在曼彻斯特市南部利用Holford盐矿的废弃溶腔储存碱渣废物及其他盐化泥状物,美国则使用废弃盐腔用来处置油田废物。20世纪60年代起,德国和美国相继把盐岩视为核废料地质处置的母岩之一,并于1986年和1999年相继建成了地下盐穴核废料处置库^[22]。储氢方面,德国最早把50%~60%比例的氢气与甲烷混合形成人造煤气,以8~10 MPa的储存压力将其存储在一个32 000 m³的盐

穴中。美国康菲石油公司和普莱克斯公司在位于德克萨斯州的 2 个地下盐穴中则以纯氢气的形式直接进行存储^[23]。除了上述的已成功应用的地下盐岩储备工程,研究人员还在对利用盐穴进行液化天然气(LNG)、丁烷、氮气、超临界二氧化碳储存的可行性上开展了相关研究^[24]。总之,盐腔已成为能源储存或废物地下处置的重要场所。

3 我国开展盐岩地下储库工程的优势与挑战

我国是世界上井矿盐资源最丰富的国家,总储量在 1.3 万亿吨左右^[25]。在四川、云南、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、山东、河南、河北等地均有储量极丰的地下盐矿资源^[26]。进入本世纪以来,我国仍然不断发现特大或巨大型盐矿资源,例如,研究人员分别于 2009 年和 2015 年在河北、河南两省发现了远景储量超过 800 亿吨的特大型盐岩矿藏,这些盐岩矿藏厚度在一百米至几百米之间,并且都具有较高的品位^[27, 28]。这些丰富的盐矿资源为我国在地下盐岩中开展大规模储备工程建设奠定了基础。

然而,我国在地下溶腔利用方面也存在明显的挑战。与国外的盐丘型构造不同,我国的盐岩多为湖相沉积的层状构造,具有盐层薄、夹层多、杂质高等特点^[29]。一方面,夹层和杂质的存在严重影响围岩的力学性质和孔渗特性,对储库的安全性构成威胁;另一方面,由于夹层大多不易溶解,在储库运营期间可能会发生夹层垮塌,造成套管砸弯等事故,导致油气泄漏,甚至引发人员伤亡。因此国内学者对层状盐岩的力学性质及孔渗特性开展了广泛研究。例如,李银平等针对我国层状盐岩开展了单三轴压缩试验及剪切试验,得到了层状盐岩的相关力学参数,并建立了层状盐岩体的三维 Cosserat 介质扩展本构模型^[30]。刘伟等针对我国金坛、云应盐矿的含界面盐岩试样的渗透率开展了测试试验,测试结果显示盐岩和夹层交界面的渗透率在 $10^{-17} \sim 10^{-18} \text{ m}^2$ 范围。基于这些实验数据通过数值模拟手段研究了含有夹层的地下盐穴天然气储库的稳定性和密闭性^[31, 32],相关结果表明,通过前期地质筛选、调节溶腔形状、工作气压等方式,可以保证层状盐岩中储气库运营的安全运营。我国在层状盐岩中建设的第一座盐穴储气库——金坛盐穴储气库自 2007 年投入运营以来一直保持安全稳定运行,这也有力的说明了我国在层状盐岩建设储库工程的可行性。

4 我国层状盐岩造腔及用腔现状

4.1 我国层状盐岩造腔技术体系

除了上述我国层状盐岩盐穴储库安全性方面存在挑战,层状盐岩水溶造腔也面临着较大难题。在欧美国家的盐丘型构造或巨厚盐层中,造腔时多使用单井造腔技术。具体而言,单井造腔技术是指通过地表钻井的方式向同一井眼同时安装同心的技术套管、中间管和中心管,通过中心管注入清水,并利用中间管和技术套管之间的环空排出卤水,从而在地下盐层中形成腔体空间。由于造腔过程中清水进入溶腔后的流场规律及卤水的浓度场差异,采用单井造腔技术形成的溶腔多为竖直的梨形腔体。但是在含有夹层的盐岩中采用单井造腔技术进行造腔时,一方面夹层的存在会扰乱腔体内的流场,造腔过程中盐岩腔体会出现不规则扩展,进而可能诱发腔体畸形,导致造腔体积小,达不到设计目标;另一方面由于受到夹层垮塌的影响,可能造成腔体内管柱损毁,导致阻溶剂在造腔外管大量漏失,从而引发井下事故,造成污染并降低造腔效率。

为了解决我国层状盐岩中造腔及腔体形态控制方面的难题,姜德义教授团队在长期的研究摸索中提出了针对我国层状盐岩的造腔技术体系^[33-34],其主要内容为根据目标矿井所在区域的地质条件,分别选用单井造腔技术、双直井造腔技术和水平连通井组造腔技术进行腔体建造,如图 2~图 4 所示。单井造腔技术形成的腔体如图 2 所示,该技术主要适用于少夹层的较厚盐层,目前在中石化盐穴储气库被广泛应用,单井溶腔时间在 4~7 年,存在造腔速度慢等缺点。双直井造腔技术主要用来解决单井造腔技术在我国夹层层数较多的地下盐岩中造腔时面临的腔体畸形问题。如图 3 所示,在单井造腔技术的基础上增加一个辅助井,通过在两个井筒中清水卤水的反复循环,提高造腔速率和增加腔体容积,实现多夹层盐岩中造腔时的腔体形态控制。水平连通井组造腔技术则用来解决单井造腔技术在我国薄盐层中所造腔体容积小、成腔难的问题。我国盐层厚度小于 100 m 的区域占盐矿总资源的 50% 以上,单井水溶造腔技术造腔速度慢、事故多、对盐层厚度要求高,在薄盐层中适应性有限。如图 4 所示,水平连通井组造腔技术则基于两井之间连通的水平井,通过控制注水方向、流量、油垫、两口距等关键参数对腔体形态进行控制,最终建造出一个水平方向的巷道式卧式腔体,该技术可以克服单井造腔的缺点,

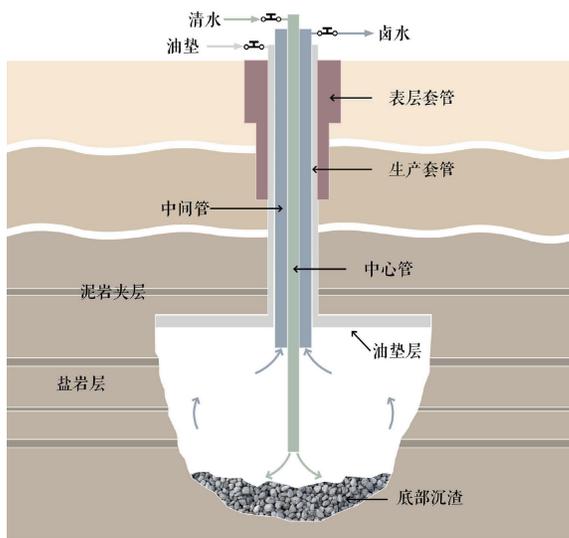


图2 单井造腔技术示意图

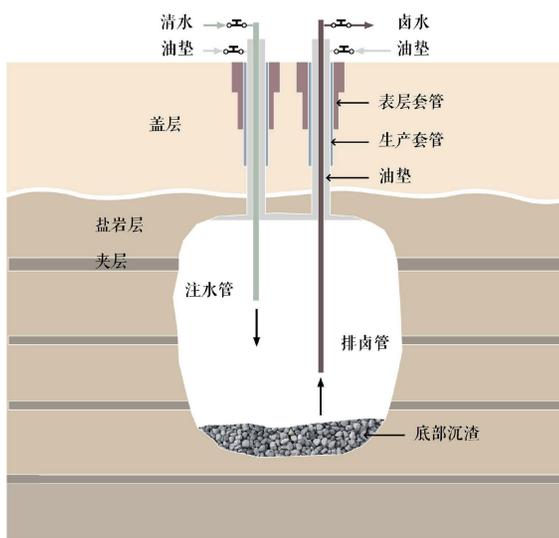


图3 双直井造腔技术示意图

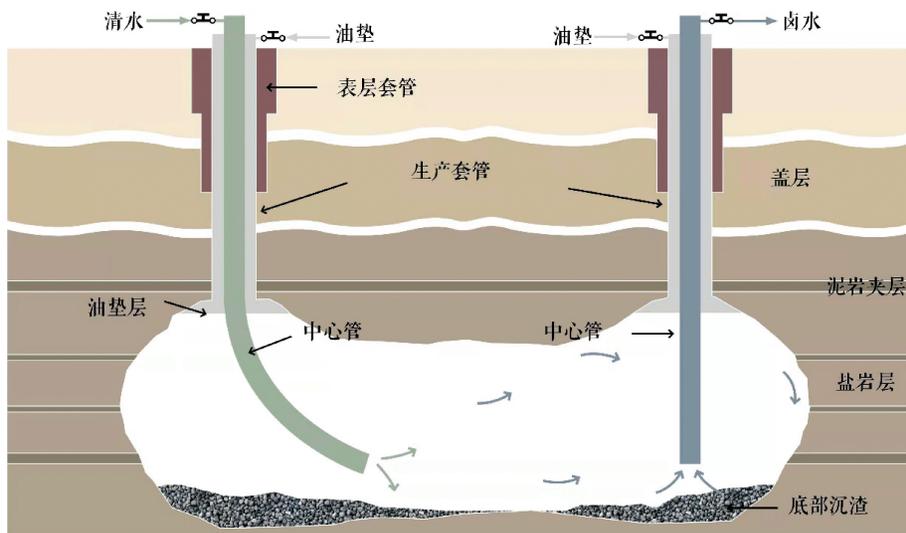


图4 水平连通井组造腔技术示意图

在薄盐层中建造出一个形态好、库容大的腔体，这一方法目前仍处于试验阶段，有望在5年内投入生产。通过在建腔前期对目标盐层的盐层厚度、组分、夹层含量、盐层分布等情况的调研分析，选用不同的造腔技术，可以有效解决我国层状盐岩中造腔及腔体形态控制方面的难题。

4.2 我国盐矿综合利用现状

中国是盐矿开采历史最悠久的国家之一，早在2000年前的秦代，李冰为蜀守时已采用钻井汲卤煎盐方法开采利用今四川省双流、成都一带的卤水矿，这种钻井技术约在12世纪前传到西方各国，为世界文明做出了贡献。在20世纪90年代以前，我国的盐矿水溶开采主要注重的是卤水的浓度与回采率，少有关注溶腔的形状发展，这使得畸形腔体较多，后

续的使用困难重重。直到上世纪90年代，随着我国石油天然气储备需求不断增加，鲜学福院士、李晓红院士、杨春和院士、姜德义教授^[35-38]等学者开展了我国利用地下盐腔进行油气储备的可行性研究，改变了传统只采盐不用腔的单一思路，提出了盐岩采卤造腔一体化新方向，在消除盐岩地质矿山隐患的基础上，变废为宝，实现了地下溶腔的综合利用。

在科研人员及工程技术人员的共同努力下，我国地下盐腔综合利用发展迅速。中国石油西气东输管道公司和中盐金坛公司在2000年开始建设我国第一座盐穴储气库—金坛盐穴储气库，该初期库已经于2007年正式投入使用，至今已经过50多轮的注采循环，累计采气量达35亿立方米^[39]，满足了长三角地区800多万户家庭调峰燃气需求。2016年

和 2018 年,中石化和港华金坛盐穴储气库也相继建成投产。目前淮安、平顶山、云应、丰县等地也开始进行废弃盐穴溶腔改造储气库前期工作,预计建成后的腔体规模将超过 200 个,总工作气量有望达到 80 亿 m^3 。除此之外,我国还在地下盐腔石油储备、压气蓄能电站建设、废物充填等方面也开展了广泛研究,例如江苏井神盐化公司将碱渣回填到废弃的地下盐穴中,湖北双环盐厂利用废弃盐腔处置卤水净化产生的钙镁泥,中盐金坛公司与清华大学合作的 60 MW 盐穴非补燃压缩空气蓄能电站也已经处于工程阶段。

5 未来工作

(1) 盐矿水溶造腔方面

目前,在盐矿水溶造腔方面所面临的难题主要是现有水溶造腔工艺在造腔速度上较慢,建设一个符合油气储存库容需求的溶腔周期在 3~5 年左右,很难满足当前国家战略能源储备建设进度要求。基于此,开展后退式高压浸没射流造腔等新方法的研究,通过高压水射流技术加速清水和卤水的扩散速度,增加清水影响范围,提高腔体建设速度,是未来盐矿水溶造腔方面的重点方向。

(2) 盐腔综合利用方面

我国是世界上采盐历史最悠久的国家,采盐历史接近 2000 年。经过长年累月的开采,在地下形成了数以万计的废弃溶腔,仅以当前产量计算每年新增的空间就达到了 2 000 万 m^3 。2018 年,重庆大学姜德义教授主持的《盐矿废弃溶腔综合利用的基础研究》受到了国家自然科学基金委重点项目的资助,指出过去采卤形成的废弃溶腔是我国宝贵的地下空间资源,基于我国存在大量废弃溶腔的国情,提出在区别于油气储备专用溶腔的前提下,挖掘废弃溶腔进行能源储备、废弃物处置等多种功能所蕴藏的巨大经济价值和环保价值。

参 考 文 献

- [1] Liu W, Chen J, Jiang DY, et al. Tightness and suitability evaluation of abandoned salt caverns served as hydrocarbon energies storage under adverse geological conditions (AGC). *Applied Energy*, 2016, 178: 703—720.
- [2] 杨春和, 李银平, 屈丹安, 等. 层状盐岩力学特性研究进展. *力学进展*, 2008, 38(4): 484—494.
- [3] Yang CH, Wang TT, Qu DA, et al. Feasibility analysis of using horizontal caverns for underground gas storage: a case study of Yunying salt district. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36: 252—266.
- [4] Li JL, Xu WJ, Zheng JJ, et al. Modeling the mining of energy storage salt caverns using a structural dynamic mesh. *Energy*, 2020, 193: 116730.
- [5] Soubeyran A, Rouabhi A, Coquelet C. Thermodynamic analysis of carbon dioxide storage in salt caverns to improve the Power-to-Gas process. *Applied Energy*, 2019, 242: 1090—1107.
- [6] 谢凌志, 周宏伟, 谢和平. 盐岩 CO_2 处置相关研究进展. *岩土力学*, 2009, 30(11): 3324—3330.
- [7] Mortazavi A, Nasab H. Analysis of the behavior of large underground oil storage caverns in salt rock. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2017, 41(4): 602—624.
- [8] 陈结. 含夹层盐穴建腔期围岩损伤灾变诱发机理及减灾原理研究. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [9] Shi XL, Liu W, Chen J, et al. Geological feasibility of underground oil storage in Jintan salt mine of China. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 2017: 1—11.
- [10] Hunsche U. Result and interpretation of creep experiments of rock salt// *Proceeding of the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt*. Trans Tech Publications, 1984: 159—167.
- [11] Li YP, Liu W, Yang CH, et al. Experimental investigation of mechanical behavior of bedded rock salt containing inclined interlayer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 69: 39—49.
- [12] Wang JB, Liu XR, Song ZP, et al. An improved Maxwell creep model for salt rock. *Geomechanics and Engineering*, 2015, 9(4): 499—511.
- [13] Hunsche U, Schulze O. Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt// *The Mechanical Behavior of salt of the 3rd Conference*. Germany: Trans Tech Publications, 1993: 237—248.
- [14] Cristescu ND. A general constitutive equation for transient and stationary creep of rock salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(2): 125—140.
- [15] de Las Cuevas C. Pore structure characterization in rock salt. *Engineering Geology*, 1997, 47(1/2): 17—30.
- [16] Stormont JC, Daemen JJK. Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1992, 2(29): 325—342.
- [17] Yin HW, Yang CH, Ma HL, et al. Study on damage and repair mechanical characteristics of rock salt under uniaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(3): 659—671.
- [18] 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(1): 21—24.
- [19] 完颜琪琪, 安国印, 李康, 等. 盐穴储气库技术现状及发展方向. *石油钻采工艺*, 2020, 42(4): 444—448.

- [20] 李仲奎, 马芳平, 刘辉. 压气蓄能电站的地下工程问题及应用前景. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(s1): 2121—2126.
- [21] 丁国生, 谢萍. 地下盐穴处理核废料的方法. 地下空间与工程学报. 2006, 2(6): 1068—1071.
- [22] 刘新荣, 钟祖良. 用于核废料处理的岩盐溶腔力学特性. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(10): 77—81, 91.
- [23] 付盼, 罗森, 夏焱, 等. 氢气地下存储技术现状及难点研究. 中国井矿盐, 2020, 51(6): 19—23.
- [24] 郑雅丽, 赖欣, 邱小松, 等. 盐穴地下储采技术. 盐科学与化工, 2021, 304(1): 7—14.
- [25] 曹焱, 邱国玉, 邹振东. 中国盐矿资源概况及其产业形势分析. 无机盐工业, 2018, 50(3): 1—5.
- [26] 林耀庭, 何金权. 四川省岩盐矿产资源研究. 四川地质学报, 2003, 3: 154—159.
- [27] 周强, 柯峰, 秦璐. 43 亿吨岩盐矿现身河南濮阳. 地质勘查导报, 2010-12-11(01).
- [28] 李永振, 王洪涛. 冀中能源: 瞄准盐矿开发项目. 中国煤炭报, 2009-12-25(02).
- [29] Hao TS, Geng YD, Chen YD. Experimental investigation on mechanical behaviours of salt rock containing brittle-hard interlayers. Rock and Soil Mechanics. 2019, 38(11): 3119—3126.
- [30] 李银平, 杨春和. 层状盐岩体的三维 Cosserat 介质扩展本构模型. 岩土力学, 2006(4): 509—513.
- [31] Liu W, Zhang, ZX, Chen J, et al. Feasibility evaluation of large-scale underground hydrogen storage in bedded salt rocks of China: a case study in Jiangsu province. Energy, 2020(198): 117348.
- [32] 刘伟, MUHAMMAD N, 李银平, 等. 盐岩渗透特性的试验研究及其在深部储气库中的应用. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 1953—1961.
- [33] 姜德义, 李晓康, 陈结, 等. 层状盐岩双井流场浓度场试验及数值计算. 岩土力学, 2019, 40(1): 165—172, 182.
- [34] 易亮, 姜德义, 陈结, 等. 小井间距双井水溶造腔模型试验研究. 地下空间与工程学报, 2017, 13(s1): 155—161, 169.
- [35] 刘新荣, 鲜学福, 马建春. 三轴应力状态下岩盐力学性质试验研究. 地下空间, 2004, 24(2): 153—155, 165.
- [36] 陈剑文, 杨春和, 高小平, 等. 盐岩温度与应力耦合损伤研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1986—1991.
- [37] 杨春和, 马洪岭, 施锡林, 等. 复杂地质条件下层状盐岩储气库建设技术与应用. 湖北省: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013-11-09.
- [38] 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. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4409—4417.
- [39] 完颜祺琪, 安国印, 李康, 等. 盐穴储气库技术现状及发展方向. 石油钻采工艺, 2020, 42(4): 444—448.

Research Progress of Solution Mining and Comprehensive Utilization of Salt Cavern

Chen Jie^{1,2*} Jiang Deyi^{1,2} Liu Wei^{1,2} Huang Guodong^{1,2} Fan Jinyang^{1,2}

1. State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, Chongqing University, Chongqing 400044

2. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044

Abstract Since salt rock has the characteristics of low porosity, low permeability, and self-healing from damage, the cavern after water-soluble mining can not only be used to store oil, natural gas, compressed air, CO₂, and other media, but also can be used as the disposal site of medium and low-level nuclear waste. Therefore, the comprehensive utilization of salt cavern is considered as the key research direction for strategic energy reserves, waste disposal, and promotion of large-scale peak shaving of renewable energy. In this paper, the physical and mechanical properties of salt rock and the current situation of solution cavities utilization in the world are summarized, the possible development trend and challenges of the comprehensive utilization of salt cavern in the future are discussed, the difficulties and current situation of the technology system of solution mining and the comprehensive utilization of solution cavities in China are analyzed, and the future work projects.

Keywords salt cavern; solution mining; comprehensive utilization; large-scale energy storage

(责任编辑 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: jjchen023@cqu.edu.cn