

doi: 10.12029/gc20190304

郭朝斌, 王志辉, 刘凯, 李采. 2019. 特殊地下空间应用与研究现状[J]. 中国地质, 46(3): 482-492.

Guo Chaobin, Wang Zhihui, Liu Kai, Li Cai. 2019. The application and research progress of special underground space[J]. Geology in China, 46(3): 482-492(in Chinese with English abstract).

特殊地下空间应用与研究现状

郭朝斌, 王志辉, 刘凯, 李采

(中国地质科学院, 北京 100037)

摘要:特殊地下空间定义为在空间形态、结构、分布等方面具有特殊属性的一类地下空间,根据空间形成方式和属性将特殊地下空间分为天然存在和人为活动形成的两类。在总结天然气地下储存、二氧化碳地质封存、压缩空气储能、废液深井回注以及放射性废料处置等工程应用现状的基础上,分析特殊地下空间应用前景,提出随着特殊地下空间研究的不断深入,应因地制宜探索不同类型特殊地下空间开发利用方法和发展模式,促进地下空间的高效利用。

关键词:特殊地下空间;探测评价;储能;储气

中图分类号:P 64 文献标志码:A 文章编号: 1000-3657(2019)03-0482-11

The application and research progress of special underground space

GUO Chaobin, WANG Zhihui, LIU Kai, LI Cai

(Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract:Special underground space (SUS) is defined as a kind of underground space with special properties in terms of spatial form, distribution and structure. According to the source, SUS is classified into two types: naturally existent space and human-induced one. The special properties and the suitable engineering applications of different SUS types are described in this paper. In addition, the status and prospects of natural gas underground storage, carbon dioxide geological storage, compressed air energy storage, deep-well waste reinjection and radioactive waste disposal are briefly analyzed. With the development of SUS research, it is necessary to explore different SUS development and utilization methods and modes according to local conditions, which can promote the efficient use of underground space.

Key words: special underground space; exploration and utilization; energy storage; gas storage

About the first author: GUO Chaobin, male, born in 1989, doctor, associate researcher, majors in thermal engineering; E-mail: guochaobin123@hotmail.com.

Found support: Supported by China Geological Survey Program (No. DD20179611), and CAGS Research Fund (No. JYYWF20180301, YWF201903, YYWF201735).

收稿日期:2019-01-07;改回日期:2019-05-23

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20179611)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(JYYWF20180301, YWF201903, YYWF201735)联合资助。

作者简介:郭朝斌,男,1989年生,博士,助理研究员,主要从事特殊地下空间探测与应用方面研究;E-mail:guochaobin123@hotmail.com。

1 引言

随着人口不断增加,工业化、城市化进程的加快使人们享受着越来越多生活便利的同时,也使环境问题变得越来越突出,人们对空间、资源、能源的需求逐步增大(林良俊等, 2017)。地下空间是不可再生的战略性国土空间资源,许多世界发达国家早已把地下空间同地表土地一样,作为一种重要的国土资源加以充分开发利用。在地下空间中,有一类天然或由人为活动形成的洞穴、相对圈闭含水层等在空间分布、结构、形态等方面存在特殊性质的地下空间。这类地下空间根据成因具有恒温、恒压、稳定性等特性,在大规模物质储备、能源储存、废物处置等方面具有得天独厚的优势。例如,岩腔、圈闭结构含水层等特殊地下空间可为城市智能电网的建设、清洁可再生能源的快速发展及城市紧急备用电源亟需的大规模储能提供地下储库。

基于地下空间的形成方式以及所具有的特殊属性对特殊地下空间进行分类整理,对已有在物质储备(地下水库、地下油库、地下天然气储气库),能源储存(压缩空气储、含水层储热)以及废物处置(废水回注、温室气体处置)等工程应用现状进行总结,并对应用前景进行简要分析,对于因地制宜开展特殊地下空间应用具有重要意义。

2 地下空间概念及分类

2.1 概念

广义的地下空间(Underground Space, US)是指在地球表面以下的土层或岩层中天然形成或经人工开发而成的空间(童林旭, 2004)。目前关注广泛且研究较多的城市地下空间(Urban Underground Space, UUS),是指城市范围内地下岩层或土层中天然形成或经人工开发形成的地下空间。特殊地下空间(Special Underground Space, SUS)是指在空间形态、分布、结构等方面具有特殊属性的地下空间。特殊属性如在盐岩矿产开采后形成的盐腔,具有超低的渗透率($\leq 1 \times 10^{-18} \text{m}^2$)、低孔隙度($< 0.5\%$)、良好塑性、损伤自愈合、可水溶开采等性质。相比较其他岩石,盐岩具有更为致密的结构、更良好的封闭性能,是石油天然气储存、压缩空气储能的理想储库。在背斜结构或者由封

闭性断层形成的圈闭含水层,如果具有良好结构完整性以及较低渗透率的上覆层和下伏层,可用于进行二氧化碳地质封存、含水层压缩空气储能以及废液回注等用途。

城市地下空间与特殊地下空间的关系如图1所示。广义的地下空间根据空间属性可分为常规地下空间(如地铁、隧道、综合管廊等)与特殊地下空间两大类。城市地下空间根据城市范围进行划分,包含大部分常规地下空间和部分特殊地下空间(例如城市行政范围内盐穴、含水层等地下空间)。

2.2 分类及应用

根据特殊地下空间形成起源分为两类,即天然存在和由人为活动形成的空间。特殊地下空间应用示例如图2和表1所示(Bartel et al., 2016)。

(1)天然存在的洞穴和岩石孔隙空间

天然存在的空隙介质可以分为两类。主要的一类是可溶的沉积岩(岩盐、石膏、石灰岩、白云岩等)在地下水溶蚀下产生的空洞,不同溶穴的规模相差十分悬殊,大的溶洞长达数千米,而小的溶孔直径仅几毫米。另一类是岩石孔隙空间(孔隙介质),如含水层、透镜体等。较为典型的孔隙空间是含水层,它作为地下空间开发利用主要对象之一,已经得到越来越多的重视,具有储能(含水层储热)(张森琦等, 2018)、储气(天然气、二氧化碳)等功能。圈闭结构的含水层如图3所示。

(2)人为活动形成的特殊地下空间

由人为活动(主要指采矿)产生的一类特殊地下空间,如矿区在采矿过程中产生大量生产系统所

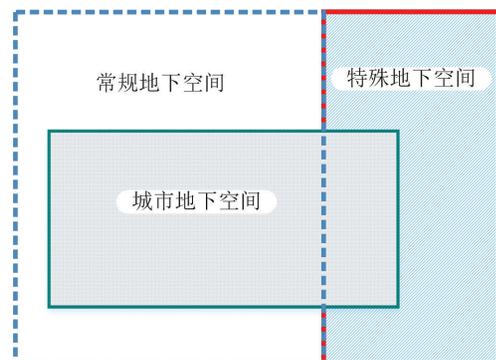


图1 特殊地下空间与城市地下空间关系

Fig.1 The relationship between special underground space and urban underground space

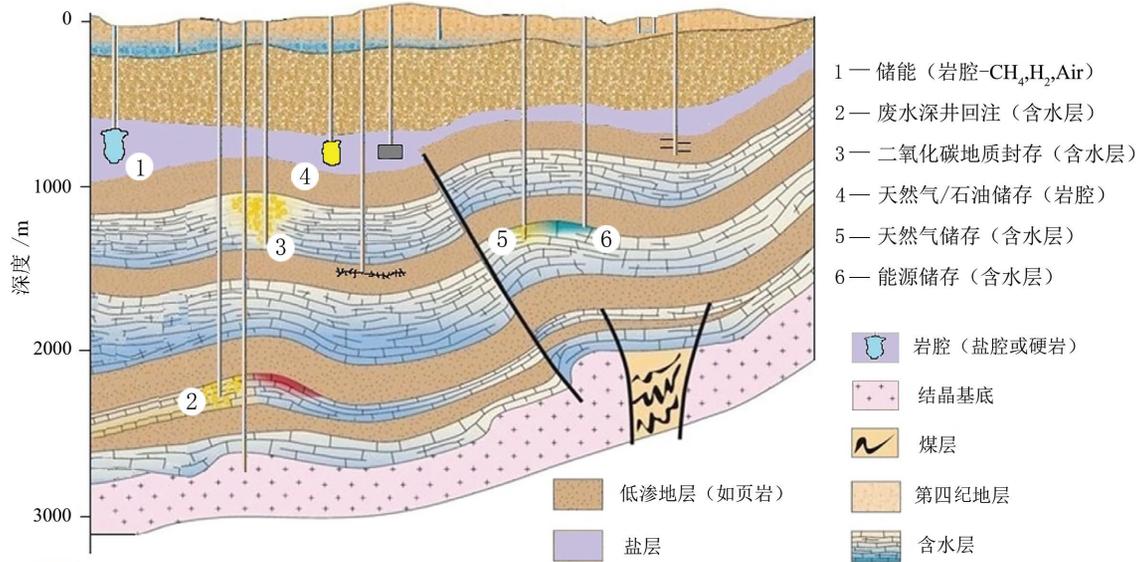


图2 特殊地下空间应用示例(据 Bartel et al., 2016 修改)
Fig.2 Applications of special underground space (modified from Bartel et al., 2016)

表 1 特殊地下空间分类及应用
Table 1 Classifications and application of special underground space

类别	特殊性质	应用
天然形成	花岗岩 空隙(硬岩) 孔隙(含水层、废弃油气藏)	围岩致密、低渗透率 围岩稳定 特定埋深;圈闭结构(背斜结构或封闭断层,上覆层、下伏层完整且低渗透率)
人为活动形成	金属矿 非金属矿(煤矿) 非金属矿(盐岩)	围岩致密 围岩稳定 围岩致密;低孔隙度和渗透率
		放射性废料处置 旅游开发;矿山博物馆;文化遗产 天然气储气库;二氧化碳地质封存;压缩空气储能;废水回注 地下储库;地下实验室 地下博物馆;抽水蓄能;地下实验室 天然气储气库;压缩空气储能;核废料处

用的空间(井筒、巷道、硐室)和原始矿产所占据的空间(采空区)。根据矿产属性可分为金属矿和非金属矿。金属矿根据开采方式不同,可分为已垮落非密实空间和未垮落空间。图4所示为尖山矿区井巷-矿体和地表实体模型(陈三明等, 2013)。

非金属矿主要指煤矿和盐矿。盐岩是一种物理力学性质较为特殊的沉积岩,从1916年第一个关于盐穴储气库的专利诞生,到1959年美国建成了第一座盐穴储气库,盐穴就在能源储备、废物处置中扮演着极其重要的角色。截至2015年,全世界盐腔大约715口,欧美国家占绝大部分,如美国、加拿大、德国、法国、英国、波兰等。

截至2016年底,根据采出煤炭总量估算煤矿采空区地下空间约140亿m³,经过长时间的盐矿开采

形成空间估算为2.5亿m³,其他金属和非金属潜在可利用空间约15亿m³。合计现有人为活动形成的特殊地下空间约157.5亿m³(谢和平等, 2018)。

2.3 特殊地下空间探测

盐腔、采空区等与围岩在电性、密度和弹性特征存在差异,因此可以利用地球物理探测技术对这些特殊地下空间进行探测、监测和评价。目前,地球物理探测技术在特殊地下空间领域应用可以分为以下几个方面:一是对特殊空间分布范围和周边地质条件的调查,如影响盐腔或采空区封闭性的断裂构造调查;二是对盐腔或采空区形态特征和体积容量探测;三是对压缩空气、碳储和油气运移和泄露的监测。例如,单孔声波成像技术能够获得钻孔周边高精度的地层结构和构造特征,相比其他方

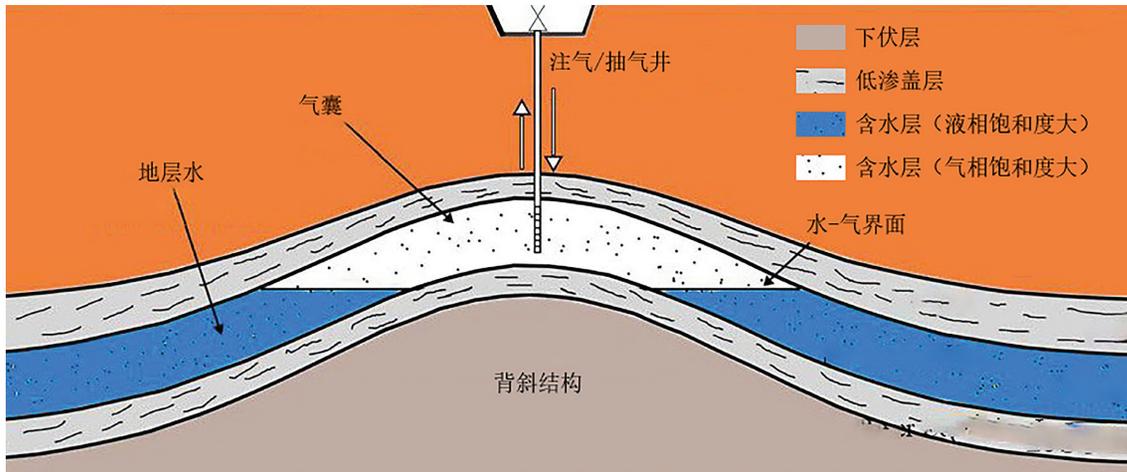


图3 圈闭结构含水层示意图(以压缩气体储能为例,据 Wang et al., 2017 修改)
 Fig. 3 Schematic diagram of confined structural aquifer
 (exemplified by compressed gas energy storage, modified from Wang et al., 2017)

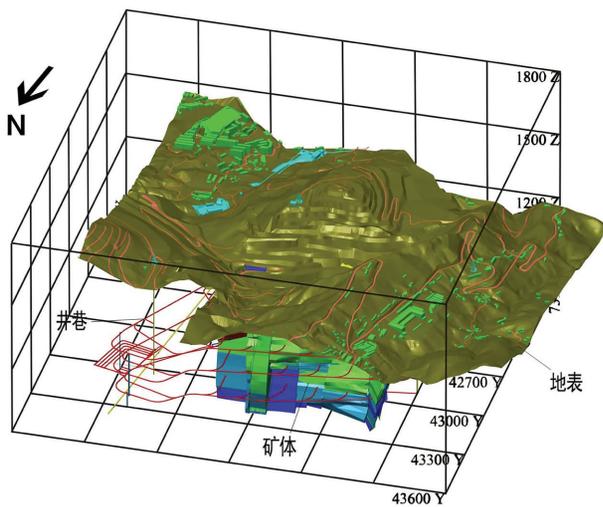


图4 尖山矿区井巷-矿体-地表实体模型
 Fig. 4 Model of shaft roadway, orebody and surface in the
 Jianshan mining area

法,声波探测技术在获取盐腔内部精细结构方面具有不可替代的作用(Patterson et al., 2008)。实际探测时,仪器发射源向钻孔井壁周围发出声波,当声波遇到不同的声波阻抗界面时会产生反射,利用接收到的反射波经数据处理后即可获得盐腔内部结构和周围地质信息(图5)。由于盐矿具有相对较高的速度和较低的衰减特征,因此利用声波可以探测距离钻孔数百英尺范围内盐腔内部精细结构,这对于溶解以开采的洞穴和开发利用盐腔具有重要的意义。

3 应用现状及前景

常见工程应用根据特殊地下空间的储存处置功能及其适用性包括天然气地下储存、二氧化碳地质封存、压缩空气储能、废液深井回注以及放射性核废料处置等。

3.1 天然气地下储存

将天然气储存在地下空间(地下储气库)中是目前最主要的天然气储存方式和调峰手段,根据统计(Zhang et al., 2017),国内外现已运行716座地下储气库,总工作气量为 $3.9 \times 10^{10} \text{ m}^3$,根据储气库类型分为油藏型、气藏型、盐穴型和含水层型,工作气量及比例如图6所示(张刚雄等, 2017),储气库数量及区域分布如表2所示(Zhang et al., 2017)。根据中国石油勘探开发研究院廊坊分院数据,国内目前具有25处地下储气库,其中盐穴型1处。

未来调峰需求量大,发展前景广阔。根据预测,2030年全国天然气消费量将达到 $4000 \times 10^8 \text{ m}^3$,对外依存度将超过40%,按照国际平均水平12%测算,调峰需求量将达到 $480 \times 10^8 \text{ m}^3$,我国现有地下储气库调峰设施仅 $180 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下储气库建设需求大(张刚雄等, 2017)。

目前地下储气库方面面临的挑战主要是库址资源少,建库技术难度大,安全运维压力大等。国内建成的储气库中,油气藏型储气库占总数的90%以上,主要分布于中国北方油气聚集区,在南方地

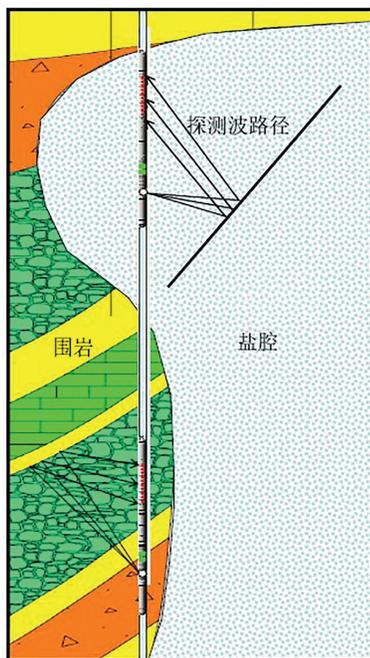


图5 利用声波测井探测盐腔内部结构和周围地质条件示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the salt chamber internal structure and surrounding geological conditions detected by acoustic logging

区建设的储气库以盐穴储气库为主,工作气量小,规模小,含水层型没有建成实例,储气库类型单一(丁国生等, 2015)。需在有条件地区开展含水层地下储气库专项研究和系统先导试验,探索含水层地下储气库建库的相关技术和经验(张刚雄等, 2017)。李国韬等(李国韬等, 2018)通过地下水文学研究评估含水层储气库盖层密封性。另外,常规储气库选择天然气作为垫层气来保持储气库的压力、防止水体侵入,此部分气体占储气库总量的30%~70%,但正常情况下不能被抽出利用。因此利用其他气体作为垫层气的研究可节省成本,国内外已有将二氧化碳(胡书勇等, 2018)、烟道气、 N_2 等作为垫层气的初步研究。

3.2 二氧化碳地质封存

二氧化碳地质储存(CO_2 Capture and Storage, CCS)或二氧化碳地质利用储存(CO_2 Capture, Utilization and Storage, CCUS)是指将从集中排放源中分离得到的二氧化碳,注入到地下深处具有适当封闭条件的地下空间中隔离起来(李琦等, 2016)。根据所选储存空间的不同,可划分为深部咸水层、

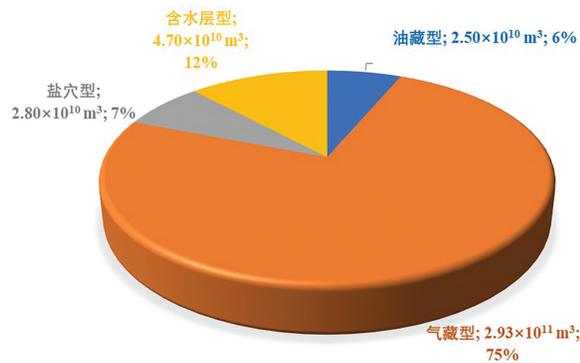


图6 不同类型储气库工作气量
Fig. 6 Working gas volumes of different gas reservoirs

表2 储气库数据统计

Table 2 Statistics of natural gas storage facility

区域	储气库数量	有效储气量 /($10^8 m^3$)	全球有效 储气量比例/%
美洲	481	1490	37.9
欧洲	150	1104	28.1
亚洲	21	48	1.2
独联体	50	1190	30.2
其他	14	103	2.6

不可开采煤层以及废弃油气藏等类型,如图7所示(Edenhofer et al., 2013)。根据 CO_2 封存状态(分子状态、溶解状态及化合物状态)可将分为构造封存、残余气相封存、溶解封存以及矿物封存等类型(李光等, 2016; 杨文慧等, 2016)。

国内外开展了众多的二氧化碳地质封存项目,包括利用二氧化碳提高石油产量、提高煤层气采收率等,不同储气库类型典型项目工程如表3、图8所示。国内针对深部咸水层二氧化碳地质封存开展了示范,神华集团于2010年5月在鄂尔多斯开工建设深部咸水层二氧化碳地质封存示范项目(王永胜, 2018)。

目前的在 CO_2 储气库方面的研究聚焦于不同类型储气库封存机理研究、储气量评估、安全稳定性评价等方面。例如,在含水层、深部不可开采煤层等储气库方面,研究以 CO_2 运移机理,与水、油、岩石及生物的热力学效应,力学影响,化学反应以及生物方面的影响(李光等, 2016; 李小春等, 2016)。理论计算及数值模拟方法常用来进行储气库场地适宜性评估、储气量的评价以及安全稳定性评价等方面(凌璐璐等, 2013; 雷宏武等, 2015; Li et al., 2016;

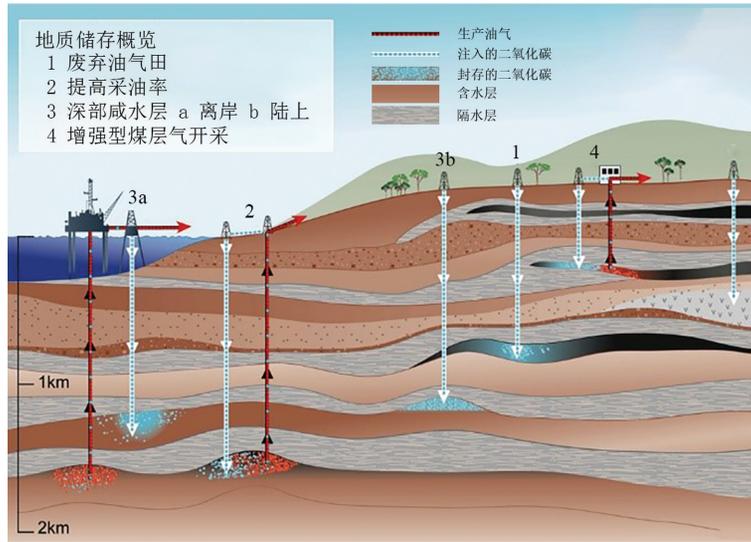


图7 二氧化碳地质封存示意图(据Edenhofer et al., 2013修改)

Fig.7 Schematic diagram of carbon dioxide geological sequestration (modified from Edenhofer et al., 2013)

表3 不同储气库代表项目工程
Table 3 Representative projects of different storage reservoir types

储气库类型	项目名称及国家
咸水层	Sleipner(挪威)、In Salah(阿尔及利亚)、鄂尔多斯(中国)
枯竭油气田	Otway Basin(澳大利亚)、West Pearl Queen(美国)

刁玉杰等, 2016)。

3.3 压缩空气储能

压缩空气储能(Compressed air energy storage, CAES)是指利用压缩空气作为储能介质,压缩机消耗能源(一般指电能)压缩空气后储存在储气库中,在发电时释放高压空气驱动透平发电,如图9所示(张新敬等, 2012)。CAES在装机容量上可达到几百兆瓦,规模仅次于抽水储能,便于大规模的商业化的应用和推广。在技术上较为成熟且其技术发展前景广阔,这些优势使CAES有望成为一种重要的储能手段。

储气库是CAES系统重要的组成部分,根据储气库的类型可将CAES系统分为3类。(1)储气罐储能系统,即将高压空气储存在地表或地下人造储气罐中,该类储能系统由于储气罐储气量和成本的原因,规模较小,一般小于10 MW规模。(2)地下岩石洞穴(如盐洞、废气油气田或坚硬岩洞)储能系统,此类系统利用地下岩石洞穴或人工开挖的洞穴作为储气库,规模较大,德国Huntorf电站(290 MW)

和美国McIntosh电站(110 MW)均属于此类储能系统。(3)地下含水层储能系统(Compressed air energy storage in aquifers, CAESA),将广泛分布地下的含水层作为储气库进行储能,可减少储能系统对地质条件的限制,储能规模与岩石洞穴储能类型相近,目前在试验、示范工程阶段,无实际商业运行工程。

在CAES技术发展过程中出现了众多示范工程及实际工程,其中岩腔CAES电站最具代表性的为德国Huntorf电站及美国McIntosh电站。中国的空气压缩储能技术起步较晚,尚无实际运行的商业CAES站(McLarnon et al., 1989; 张新敬, 2011)。

1969年,德国计划在盐腔中建立CAES系统以满足大规模储能的需求,Huntorf地区拥有众多利用盐腔储存天然气的工程,为该CAES电站的建立积累了大量的地质资料与操作经验,1975年开始建造,于1978年宣布成功商用(Crotogino et al., 1980)。Huntorf电站以两个盐洞为储气库进行储能,其技术参数如表4所示。Huntorf电站整体运行效率为42%(Crotogino, 2006; Budt et al., 2016),平均启动可用率和可靠率分别为90%和99%(Succar et al., 2008)。

在Huntorf电站成功运行13年后,1991年,基于美国能源部CAES相关的研究,美国Alabama州建立以盐洞为储气库的CAES电站(Arsie et al.,

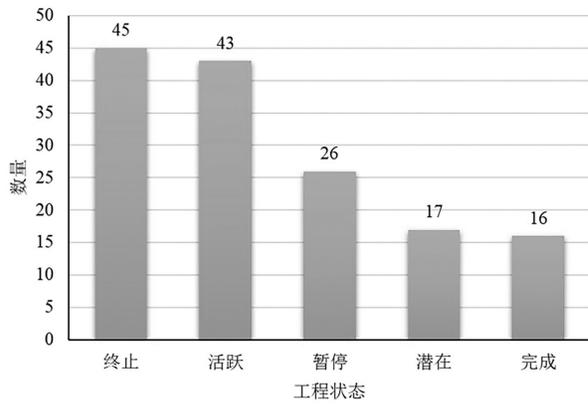


图8 2018年二氧化碳地质封存项目基本情况
Fig.8 Carbon dioxide geological sequestration projects in 2018

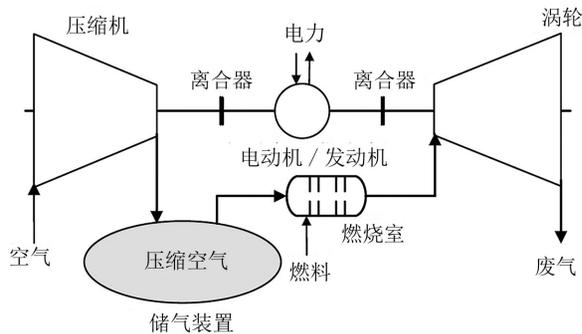


图9 压缩空气储能示意图
Fig.9 Schematic diagram of compressed air energy storage

2007; Succar et al., 2008; Budt et al., 2016)。由于增加了压缩热回收利用装置, McIntosh 电站的整体运行效率得到提高, 为 54% (Budt et al., 2016), 压缩过程和膨胀过程平均启动可靠率分别为 91.2% 和 92.1%, 运行可用率分别为 96.8% 和 99.5% (Davis et al., 2006; Succar et al., 2008)。

在含水层压缩空气储能系统中代表“示范工程”为 Iowa 项目。美国爱荷华州 CAES 项目 (Iowa Stored Energy Park, 以下简称 ISEP-CAES 电站) 是一个具有创新性的能源储存项目, 计划储能规模为 270 MW, 前期投资约为 4 亿美元, 原计划于 2015 年开始为爱荷华州得梅因市提供储能服务。项目于 2006 年开启, 在经历 8 年的规划调查后, 于 2011 年 7 月 28 日由于经济性原因暂停实施。根据场地调查结果, 场地砂岩背斜结构中可用空间体积小, 非均质性较高及相对低的渗透率使得选择的场地不

表 4 德国 Huntorf 和美国 McIntosh 电站技术参数
Table 4 Power station parameters of Huntorf in Germany and McIntosh in the United States

参数	德国 Huntorf 电站	美国 McIntosh 电站
透平功率/MW	290	110
透平空气流速/(kg/s)	417	154
压缩机空气流速/(kg/s)	108	96
盐腔数量	2	1
盐腔体积/m ³	140000+170000= 310000	560000
盐腔埋深/m	650~800	459~807

符合储能要求 (Heath et al., 2013)。ISEP-CAES 电站原计划储能规模为 270 MW, Moridis et al. 利用数值模拟方法根据场地数据建立模型, 模拟结果表明当前场地可提供约 65 MW 级别的储能规模, 相对应的经济分析表明 65 MW 储能规模在当前经济条件下处于亏损状态, 建议在进行更多注气试验前暂停项目。

在储气库方面的研究主要分为对地表储气罐、地下洞穴和地下含水层的研究。地表储气罐作为储气库进行储能多集中在小规模储能系统的设计。2014 年, 清华大学、中国科学院理化技术研究所和中国电力科学研究院联合完成了以储气罐进行储气的 500 kW 压缩空气储能实验系统, 该系统通过冷热电三联供形式, 使得非补燃 CAES 系统效率达到 33.3% (薛小代等, 2016)。地下含水层作为进行 CAES 的储气库受到越来越多的重视 (Guo et al., 2016)。目前限制中国 CAES 技术推广的主要因素之一是缺少地下储气库 (一个 100 MW 的 CAES 电站需要 100000 m³ 的储气装置)。地下含水层分布广泛, 作为天然气地下储存的介质被广泛应用。如果采用地下含水层作为 CAES 的储气库, 一方面减少地质条件的限制, 另一方面在经济方面比岩腔具有一定的优势。国际上在这方面的研究起步阶段, 国内相关研究成果较少 (Mouli-Castillo et al., 2019)。

3.4 废液深井回注

2000 年以来, 城市生活污水年均增长 4.33%, 其中危险废物产生量年均增长率达 11.1%。据不完全统计, 2015 年危险废物产生量达 4220 万 t, 现有地表处置能力仅能使约 80% 的危险废物无害化, 远不能

满足实际需求日益累积,易成为潜在环境安全隐患,急需在地下开辟新的容量空间,安全有效地容纳和处置废物,使其远离人类居住环境。

废液深井回注是指通过深井(通常为地下1500~3000 m)将处理后的废液注入到深部咸水层中进行处置。由于废液的密度通常比注入层咸水密度高,注入后不会像CO₂一样向上浮动并且聚集在盖层底部随地势往更高处移动,所以废液注入后向上泄露的风险相对更小。实际上,深部地下处置废液在发达国家并不是近几年才兴起的,美国利用深部无利用价值的咸水层处理固体废物已有数十年的历史。他们以保护地下淡水(饮用水)为根本目的,制定了联邦法规对境内所有灌注井进行分类管理。若以注入井的注入深度区分,除已被废止的第四类井外,仅第五类井的灌注位置在地下饮用含水层之上,其余灌注井,包括处理工业废液(危险性 & 非危险性)及市政污水的第一类井、处理油气生产废液的第二类井、处理岩盐及铀矿开采废液的第三类井以及用于CO₂地质封存的第六类井,其灌注深度为地下1500~3000 m的不可利用的咸水含水层,通常与埋藏最深的地下淡水(饮用水)含水层相隔上千米。特殊的灌注井身结构设计使穿透地下淡水含水层部分的多层隔离措施防止了高浓度有害废液进入这些淡水含水层,自1974年美国颁布联邦地下灌注控制法规以来,废液深部灌注处置在美国没有发生过一起污染淡水含水层的事件。据美

国环境保护署(EPA)统计(图10),截止2017年,全美共有第一类废物灌注井817口,其中137口灌注井处置危险性废液,680口处理非危险性废液。

3.5 放射性核废料处置

放射性核废料因具有放射性高、毒性大、半衰期长等环境危害,其安全处置是世界各国、也是中国亟需解决的重要问题,国际上公认的安全处置高放废物的处置方式之一为深部地下空间处置(徐国庆, 2002; 秦爱芳等, 2013)。深部空间地质处置是指将放射性核废料埋藏在深500~1000 m的地质体中,使其与生物圈隔离。瑞典、芬兰和法国等国已建立了较为完善的场址探测和评价技术体系,确定了处置库场址,开展了系统的处置工程技术研究,根据各自的处置概念和处置条件,初步建立了硐室开挖、处置容器制备、废物体及缓冲材料运输和安装等工程技术。中国在高放废物处置库选址和场址评价方面取得了一定进展,从2000年开始,进行了较为系统的水文地质、工程地质和地球化学环境地质方面的调查与研究,但总体上还处于处置技术研究工作的前期阶段。

目前在深部特殊处置空间方面,研究集中于致密花岗岩、泥岩和盐岩等围岩类型(郑金栋等, 2013)。其中,目前研究较多的为致密花岗岩类岩石,花岗岩地质体规模大、孔隙度小、渗透系数低、含水量较小以及抗辐射性等特殊性质,是阻滞核素性能较好的岩体空间。但同时,花岗岩也存在围岩有一定的裂隙,可

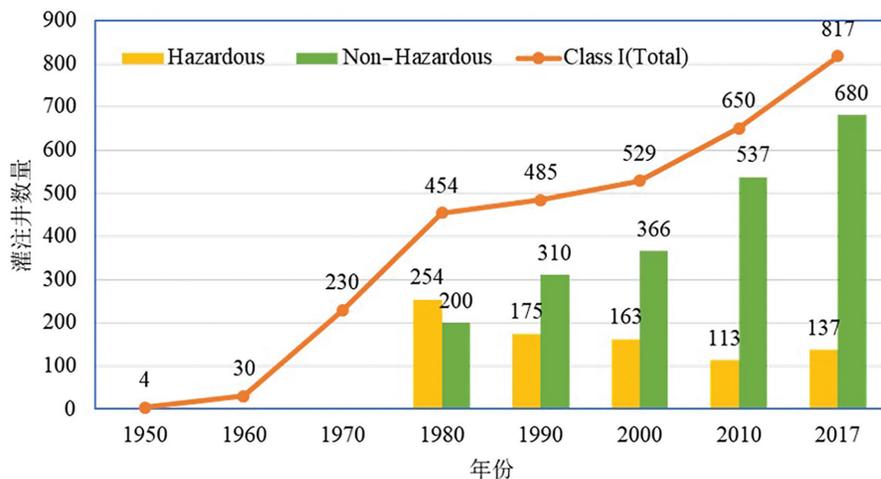


图10 美国第一类井数量

Fig.10 Number of Class I wells in the United States

能导致核素随地下水迁移,并且裂隙规模以及导水能力评价难度大等缺点(王驹,2016;凌辉等,2018)。在处置库场址深部空间精细探测、处置库工程建造技术、处置库万年尺度长期安全评价等方面能力薄弱,尚未建立系统的理论和技术体系。

4 结 语

特殊地下空间由于在空间形态、分布、结构等方面具有特殊性质,在物质能源储存、废物处置等方面具有广泛的工程应用。目前美国、德国等发达国家研究相对成熟,例如天然气地下储存、二氧化碳地质封存、废液深井回注等方面具有多项工程应用,在含水层压缩气体(空气或氢气)储能、核放射性废料处置等方面不断开展深入研究,国内相关研究起步晚,在盐腔方面应用(油气地下储存)发展相对成熟,关停煤矿采空区、圈闭结构含水层等方面的研究逐渐开始。随着社会经济的不断发展,特别是清洁能源在电网中比例的逐渐增加,特殊地下空间具有广阔的发展前途。在加强理论研究的基础上,应根据实际地质条件因地制宜开展特殊地下空间应用。

References

- Arsie I, Marano V, Moran M, Rizzo G, Savino G. 2007. Optimal management of a wind/CAES power plant by means of neural network wind speed forecast[C]/European Wind Energy Conference and Exhibition. The European Wind Energy Association (EWEA).
- Bartel S, Janssen G. 2016. Underground spatial planning—Perspectives and current research in Germany[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 55(1): 112–117.
- Chen Sanming, He Yuzhou, Luo Wenmin, Gao Yang, Cao Yanchao, Yang Xian, Zheng Youzhi. 2013. Block model and reserves estimation of panzhihua iron deposit based on 3D geological modeling[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 33(4): 610–615 (in Chinese with English abstract).
- Crotogino F. 2006. Compressed air storage[C]/Internationale Konferenz" Energieautonomie durch Speicherung Erneuerbarer Energien.
- Crotogino F, K Mohmeyer, R Scharf. 2001. Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation[C]/Spring 2001 Meeting. Orlando, Florida, USA.
- Crotogino F, Quast P. 1980. Compressed-air storage caverns at Huntorf[C]/ISRM International Symposium—Rockstore 80. International Society for Rock Mechanics,
- Davis L, Schainker R. 2006. Compressed air energy storage (CAES): Alabama electric cooperative mcintosh plant—overview and operational history[C]/Electricity storage association meeting: energy storage in action.
- Diao Yujie, Zhang Senqi, Li Fucheng, Gao Shiwang, Wang Xiaolong, Jia Xiaofeng. 2016. Site selection for offshore CO₂ geological storage and its suitability evaluation: A case study of Yuhuan[J]. *Power Plant Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 46(3): 844–854 (in Chinese with English abstract).
- Ding Guosheng, Li Chun, Wang Jieming, Xu Hongcheng, Zheng Yali, Wanyan Qiqi, Zhao Yanjie. 2015. The status quo and technical development direction of underground gas storages in China[J]. *Natural Gas Industry*, 35(11): 107–112 (in Chinese with English abstract).
- Edenhofer O, K Seyboth. 2013. Intergovernmental panel on climate change (IPCC) [J]. *Encyclopedia of Energy Natural Resource & Environmental Economics*, 26(2): 48–56.
- Guo Chaobin, Keni Zhang, Cai Li. 2016. System design and optimization of compressed air energy storage in aquifers[J]. *Journal of Tongji University (natural science)*, 44(7): 1107–1112.
- Heath J E, Bauer S J, Broome S T, Dewers T A, Rodriguez M A. 2013. "Petrologic and petrophysical evaluation of the Dallas Center Structure, Iowa, for compressed air energy storage in the Mount Simon Sandstone." In, Medium: ED; Size: 89 p. Albuquerque, NM (United States): Sandia National Laboratories (SNL—NM).
- Hu Shuyong, Hu Xinrui, Li Yongkai, Ma Junxiu. 2018. Feasibility analysis about taking CO₂ as cushion gas for gas storage rebuilt upon depleted gas reservoirs[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 8(5): 56–59 (in Chinese with English abstract).
- Lei Hongwu, Li Jiaqi, Xu Tianfu, Wang Fugang. 2015. Numerical simulation of coupled thermal–hydrodynamic–mechanical (THM) processes for CO₂ geological sequestration in deep saline aquifers at Ordos Basin, China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 45(2): 552–563 (in Chinese with English abstract).
- Li Guang, Liu Jianjun, Liu Qiang, Ji Youjun. 2016. Review on geological storage of carbon dioxide[J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 3(4): 41–48 (in Chinese with English abstract).
- Li Guotao, Liu Zaitong, Liu Ning. 2018. Evaluating sealing capacity of UGS caprocks using Geohydrology[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 41(3): 90–94(in Chinese with English abstract).
- Li Qi, Song Ranran, Kuang Dongqin, Lu Xutao, Li Xiaochun. 2016. Status and advances of abandoned process of wells for CO₂ geological storage[J]. *Advances in Earth Science*, 31(3): 225–235

- (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaochun, Yuan Wei, Bai Bing. 2016. A review of numerical simulation methods for geomechanical problems induced by CO₂ geological storage [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 37(6): 1762–1772 (in Chinese with English abstract).
- Li C, Maggi F, Zhang K, Guo C, Gan Y, El-Zein A, Pan Z, Shen L. 2019. Effects of variable injection rate on reservoir responses and implications for CO₂ storage in saline aquifers[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*.
- Lin Liangjun, Li Yamin, Ge Weiya, Hu Qiuyun, Li Xiaozhao, Li Yun, Meng Hui, Zhang Lizhong, Yang Jianfeng. 2017. General ideas for urban geological survey in China and key theory and techniques[J]. *Geology in China*, 44(6): 1086–1101 (in Chinese with English abstract).
- Ling Lulu, Xu Yaqin, Wang Yongsheng, Zhang Keni. 2013. Application of numerical simulation to pilot project of CO₂ geological sequestration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 34(7): 2017–2022 (in Chinese with English abstract).
- Ling Hui, Wang Ju, Tang Zhenping, Luo Hui, Chen Weiming. 2018. The site selection and safety assessment for geological disposal of high level radioactive waste in granite[J]. *Journal of University of South China(Science and Technology)*, 32(5): 38–43 (in Chinese with English abstract).
- M Budt, Wolf D, Span R, Yan J. 2016. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments[J]. *Applied Energy*, 170(170): 250–268.
- McLarnon F R, Cairns E J. 1989. Energy storage[J]. *Annual Review of Energy*, 14(1): 241–271.
- Moridis G, King M, Jansen J. 2007. Iowa stored energy park compressed– air energy storage project: Compressed– air energy storage candidate site selection evaluation in Iowa: Dallas Center feasibility analysis[R]. In Iowa Stored Energy Plant Agency by The Hydrodynamics Group, 46.
- Mouli–Castillo J, Wilkinson M, Mignard D, McDermott C, Haszeldine R S, Shipton Z K. 2019. Inter– seasonal compressed– air energy storage using saline aquifers[J]. *Nature Energy*, 4(2): 131–139.
- Patterson D, Tang X M, Ratigan J. 2008. High– resolution borehole acoustic imaging through a salt dome[J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 27(1): 319.
- Qin Aifang, Zhao Xiaolong, Wang Haitang. 2013. Coupled thermo– hydro– mechanical properties in field near nuclear waste repository[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 9(5): 1201–1207 (in Chinese with English abstract).
- Succar S, Williams R H. 2008. Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, and Applications for Wind Power[R]. Princeton Environmental Institute Report.
- Tong Linxu. 2004. Underground space introduction[J]. *Underground Space*, 24(1): 133–136 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ju. 2016. Ecological disposal of high level radioactive waste: Key scientific issues and progress in China[J]. *Science & Technology Review*, 34(15): 51–55 (in Chinese with English abstract).
- Wang B, Sebastian B. 2017. Pressure response of large– scale compressed air energy storage in porous formations[J]. *Energy Procedia*, 125:588–595.
- Wang Yongsheng. 2018. Research of the environmental risk assessment of CO₂ capture and aquifer geologic storage project in china Shenhua coal to oil [J]. *Environmental Engineering*, 36(2): 21–26 (in Chinese with English abstract).
- Xu Guoqing. 2002. Preliminary determination for research on geological disposal of high–level radioactive waste in China in the period of 2000–2040[J]. *Uranium Geology*, 18(3): 160–167 (in Chinese with English abstract).
- Xue Xiaodai, Mei Shengwei, Lin Qiyong, Chen Laijun, Chen Ying. 2016. Energy internet oriented non– supplementary fired compressed air energy storage and prospective of application[J]. *Power System Technology*, 40(1): 164–171 (in Chinese with English abstract).
- Xie Heping, Liu Jianzhong, Gao Mingzhong, Zhang Ruixin, Zhou Hongwei, Liu Zhiqiang. 2018. Development and Utilization of Underground space[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Yang Wenhui, Shi Qingsan. 2016. A review of carbon dioxide geological storage potential evaluation[J]. *West– China Exploration Engineering*, 28(6): 174–176 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Gangxiong, Li Bin, Zheng Dewen, Ding Guosheng, Wei Huan, Qian Pinshu, Li Chun. 2017. Challenges to and proposals for underground gas storage (UGS) business in China[J]. *Natural Gas Industry*, 37(1): 153–159 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xinjing. 2011. Investigation on Compressed Air Energy Storage System[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Science (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xinjing, Chen Haisheng, Liu Jinchao, Li Wen, Tan Chunqing. 2012. Research progress in compressed air energy storage system: A review[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 1(01): 26–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G, Li B, Zheng D, Ding G, Wei H, Qian P, Li C. 2017. Challenges to and proposals for underground gas storage (UGS) business in China[J]. *Natural Gas Industry B*, 4(3): 231–237.
- Zhang Senqi, Yan Weide, Li Dunpeng, Jia Xiaofeng, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Fu Lei, Wu Haidong, Zeng Zhaofa, Li Zhiwei, Mu Jianqiang, Cheng Zhengpu, Hu Lisha. 2018. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in

- Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 45(6): 1087–1102 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jindong, Han Wenyan, Cui Pengfei. 2013. An overview of the surrounding rocks of the nuclear waste mudstone disposal repository [J]. *Science & Technology Information*, 23: 206 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈三明, 何玉州, 罗文敏, 高阳, 曹艳超, 杨贤, 邓友志. 2013. 基于地质三维模拟的攀枝花铁矿块体模型储量估算[J]. *桂林理工大学学报*, 33(4): 610–615.
- 刁玉杰, 张森琦, 李甫成, 郜时旺, 王晓龙, 贾小丰. 2016. 典型电厂海洋CO₂地质储存场地选址适宜性评估[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46(3): 844–854.
- 丁国生, 李春, 王皆明, 胥红成, 郑雅丽, 完颜祺琪, 赵艳杰. 2015. 中国地下储气库现状及技术发展方向[J]. *天然气工业*, 35(11): 107–112.
- 胡书勇, 胡欣芮, 李勇凯, 马俊修. 2018. 枯竭气藏型储气库CO₂作垫层气的可行性研究[J]. *油气藏评价与开发*, 8(5): 56–59.
- 雷宏武, 李佳琦, 许天福, 王福刚. 2015. 鄂尔多斯盆地深部咸水层二氧化碳地质储存热-水动力-力学(THM)耦合过程数值模拟[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 45(2): 552–563.
- 李光, 刘建军, 刘强, 纪佑军. 2016. 二氧化碳地质封存研究进展综述[J]. *湖南生态科学学报*, 3(4): 41–48.
- 李国韬, 刘在同, 刘宁. 2018. 通过地下水文学研究评估含水层储气库盖层密封性[J]. *天然气勘探与开发*, 41(3): 90–94, 104.
- 李琦, 宋然然, 匡冬琴, 卢绪涛, 李小春. 2016. 二氧化碳地质封存与利用工程废弃井技术的现状与进展[J]. *地球科学进展*, 31(3): 225–235.
- 李小春, 袁维, 白冰. 2016. CO₂地质封存力学问题的数值模拟方法综述[J]. *岩土力学*, 37(6): 1762–1772.
- 林良俊, 李亚民, 葛伟亚, 胡秋韵, 李晓昭, 李云, 孟晖, 张礼中, 杨建锋. 2017. 中国城市地质调查总体构想与关键理论技术[J]. *中国地质*, 44(06): 1086–1101.
- 凌辉, 王驹, 唐振平, 罗辉, 陈伟明. 2018. 花岗岩高放废物地质处置库选址与安全评价[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 32(5): 38–43.
- 凌璐璐, 许雅琴, 王永胜, 张可霓. 2013. 数值模拟在CO₂地质封存示范项目中的应用[J]. *岩土力学*, 34(7): 2017–2022, 2030.
- 秦爱芳, 赵小龙, 王海堂. 2013. 核废料处置库近场热-水-力耦合性状[J]. *地下空间与工程学报*, 9(5): 1201–1207.
- 童林旭. 2004. 地下空间概论(一)[J]. *地下空间*, 24(1): 133–136.
- 王驹. 2016. 高水平放射性废物地质处置:关键科学问题和相关进展[J]. *科技导报*, 34(15): 51–55.
- 王永胜. 2018. 中国神华煤制油深部咸水层二氧化碳捕集与地质封存项目环境风险后评估研究[J]. *环境工程*, 36(2): 21–26.
- 谢和平, 刘见中, 高明忠, 张瑞新, 周宏伟, 刘志强. 2018. 特殊地下空间的开发利用[M]. 北京:科学出版社.
- 徐国庆. 2002. 2000–2040年我国高放废物深部地质处置研究初探[J]. *铀矿地质*, 18(3): 160–167.
- 薛小代, 梅生伟, 林其友, 陈来军, 陈颖. 2016. 面向能源互联网的非补燃压缩空气储能及应用前景初探[J]. *电网技术*, 40(1): 164–171.
- 杨文慧, 师庆三. 2016. 二氧化碳地质储存潜力评价综述[J]. *西部探矿工程*, 28(6): 174–176.
- 张刚雄, 李彬, 郑得文, 丁国生, 魏欢, 钱品淑, 李春. 2017. 中国地下储气库业务面临的挑战及对策建议[J]. *天然气工业*, 37(1): 153–159.
- 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 贾小丰, 张盛生, 李胜涛, 付雷, 吴海东, 曾昭发, 李志伟, 穆建强, 程正璞, 胡丽莎. 2018. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. *中国地质*, 45(6): 1087–1102.
- 张新敬. 2011. 压缩空气储能系统若干问题的研究[D]. 中国科学院研究生院(工程热物理研究所).
- 张新敬, 陈海生, 刘金超, 李文, 谭春青. 2012. 压缩空气储能技术研究进展[J]. *储能科学与技术*, 1(1): 26–40.
- 郑金栋, 韩文艳, 崔鹏飞. 2013. 核废料泥岩处置库围岩综述[J]. *科技信息*, 23(23): 206.