

引用格式: 杨雪雯, 任灏, 廖泽球, 等. 压缩空气储能地下人工洞室研究现状与展望 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 54-64. YANG Xuewen, REN Hao, LIAO Zeqiu, et al. Research status and prospect of underground artificial rock caverns for compressed air energy storage [J]. Southern energy construction, 2024, 11(4): 54-64. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.06.

压缩空气储能地下人工洞室研究现状与展望

杨雪雯[✉], 任灏, 廖泽球, 王金玺, 贾斌

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 压缩空气储能 (Compressed Air Energy Storage, CAES) 是 1 种可大规模储存电力能源的技术, 其规模仅次于抽水蓄能, 储气装置是其重要的组成部分。国内外已投入商业运行的压气储能电站的储气装置多为盐穴、废弃矿坑等天然地质构造, 大规模长时压缩空气储能有赖于更具经济性及广泛适用性的储气装置。[方法] 人工地下洞室储气库较大程度上摆脱了压缩空气储能电站对于特殊地质条件的依赖, 成为大规模建设长时压气储能电站的有力支撑, 但国内外相关研究成果较少, 摸清国内外研究现状, 总结其他行业先进经验, 理清该领域亟待突破的难题, 对于大规模建设压气储能电站具有重要意义。[结果] 压气储能电站地下人工洞室与天然气储气库及水电输水隧洞等常规人工洞室运行特点有较大不同, 目前对于该领域尚缺乏成熟的设计方法与规程规范, 有诸多关键技术仍有待解决, 文章对压气储能电站地下人工洞室的特点及重点研究内容进行了梳理。[结论] 创新是自主建设压缩空气储能电站地下硬岩储气库的唯一出路, 在安全的前提下兼顾经济性并突破, 该技术对丰富我国储能发电技术, 完善新型电力系统具有重大的现实意义, 若该技术发展成熟, 可为我国新型电力系统的构建提供强大的保障。

关键词: 压缩空气储能; CAES; 地下人工洞室; 大规模储能技术; 安全性与经济性

中图分类号: TK02; F426.61

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)04-0054-11

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.06

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Research Status and Prospect of Underground Artificial Rock Caverns for Compressed Air Energy Storage

YANG Xuewen[✉], REN Hao, LIAO Zeqiu, WANG Jinxi, JIA Bin

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Compressed air energy storage (CAES) is a technology for storing electrical energy on a large scale, only second to pumped storage in terms of scale. The gas storage device is an important component of CAES. The gas storage facilities of compressed air energy storage power plants that have been put into commercial operation domestically and abroad are mostly natural geological structures such as salt caverns and abandoned mines. Large-scale, long-term compressed air energy storage requires more economical and widely applicable gas storage facilities. [Method] Artificial underground cavern gas storage facilities largely freed compressed air energy storage power plants from the reliance on specific geological conditions, becoming a strong support for the large-scale construction of long-term compressed air energy storage power plants. However, there were few research achievements in this field domestically and internationally. Understanding the research status at home and abroad, summarizing advanced experiences from other industries, and clarifying the challenges that need to be addressed urgently in this field had significant implications for the large-scale construction of compressed air energy storage power plants. [Result] There are significant differences in the operating characteristics between artificial underground caverns in compressed air energy storage power plants and conventional artificial caverns such as natural gas storage facilities and hydroelectric water conveyance tunnels, and there is a lack of mature design methods and regulations for this field, with many technological challenges still awaiting resolution. This paper reviews the characteristics and key research contents of

收稿日期: 2023-10-17 修回日期: 2023-11-26

基金项目: 中国能源建设股份有限公司科技项目 (CEECE2021-KJZX-04); 中国能源建设集团有限公司工程研究院科技项目 (CEECEI-KJ-2022-W01); 中国能建广东院科技项目 “高压地下洞室关键技术” (EV10321W)

underground artificial caverns in compressed air energy storage power plants. [Conclusion] Prioritizing safety, considering cost-effectiveness and fostering innovation provide a guarantee for the independent development of the underground hard rock gas storage facilities for compressed air energy storage power plants. This technology holds practical significance in enriching China's energy storage and power generation experiences, and improving new power systems. If this technology matures, it can provide strong support for the construction of a new power system in China.

Key words: compressed air energy storage; CAES; underground artificial caverns; large-scale energy storage technology; safety and cost-effectiveness

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

压缩空气储能(Compressed Air Energy Storage, CAES)是1种可大规模储存电力能源的技术,主要包括发电机、压缩机、燃烧室、储气室、膨胀机和电动机等关键部件,分为储能与释能两个过程^[1-2]。储能过程,利用电力驱动压缩机压缩空气,将高压空气存储于储气室中;释能过程,储气室中的高压空气驱动膨胀机做功进行发电^[3]。压缩空气储能目前仍属于1种新型储能技术,据中关村储能产业技术联盟(CNESA)统计^[4],截至2021年底,压缩空气储能在全球新型储能装机规模中的占比为2.3%,压缩空气占中国新型储能累计装机占比为3.2%。相比于传统的抽水蓄能技术,压缩空气储能具有单位造价低,装机规模大,选址受限较小,建设周期短,对环境影响小等优点,是仅次于抽水蓄能电站具有大规模推广应用前景的储能技术。

储气装置做为压缩空气储能电站的重要组成部分,不仅是保证系统安全、稳定运行的关键环节,也是影响电站经济性的重要因素。根据应用场景的不同,储气装置可分为地下式、地上式和水下式^[5]。小规模压气储能电站可采用地上式钢制储罐作为储气装置,对于大规模压气储能电站,储气所需空间可达十万甚至百万立方米级别,若采用地上式储气罐,占地过大且成本过高,储气装置则宜采用地下式^[6-7]。地下储气装置主要可利用已开采的地质洞穴、天然形成的含水岩层、已开采或专门挖掘的盐溶洞^[8-9]、在坚硬岩石中人工挖掘的地下洞穴等结构^[10]。目前国内外已建的压气储能电站多利用天然的地质构造,但这些地质构造往往可遇而不可求,这使得电站项目的选址和大规模建设受到很大的制约。对于有建设需求但无盐岩、咸水层、废弃矿坑^[11]等特殊地质

条件的地区,在坚硬岩石中人工开挖地下洞室作为地下储气库成为1条重要的途径。若该技术发展成熟,可实现大规模压缩气体储能电站的建设,从而为我国新型电力系统的构建提供强大的保障^[12]。

1 国内外 CAES 地下人工洞室建设现状

1.1 国外建设现状

1.1.1 瑞典 Skallen 试验储气库

自20世纪80年代中期以来,有衬砌岩石洞室(Lined Rock Cavern, LRC)概念在瑞典兴起,并于2002年建成了用于高压下天然气储存的LRC试验储气库。气库埋深115 m,洞室容积4万m³,最高内压在20~25 MPa之间。储气库形式为垂直的圆柱体,高52 m,直径36 m,顶部为半球形,底部为弧形,采用混凝土衬砌,人工爆破开挖,洞室周围岩体主要为片麻岩^[13],如图1所示。与压缩空气储能电站储气库相比天然气储气库充放气频率较低。

1.1.2 日本 CAES 电站

日本于2001年建成了上砂川町压缩空气储能示范项目^[14],输出功率为4 MW。储气库利用废弃的煤矿巷道,巷道直径6 m,长57 m,埋450 m,容积约1 600 m³,最大内压8 MPa,隧道内衬为0.7 m厚的混凝土。衬砌为分块式混凝土预制块,混凝土块之间设置接缝填充物,分块式混凝土层外侧为回填混凝土层,内衬由3层3 mm厚的丁基橡胶和尼龙加强网组成。此外,日本还在神冈进行了采用水幕密封无衬砌洞室的示范研究项目^[15]。

1.1.3 韩国 CAES 电站试点项目

韩国在2011年建设了1个100 m深的CAES电站试验储气库,如图2所示,洞室围岩岩性主要为灰岩,储气库为圆柱形隧洞式,内径5 m,洞室运行期内压力范围为5~8 MPa,采用混凝土衬砌,两条洞室

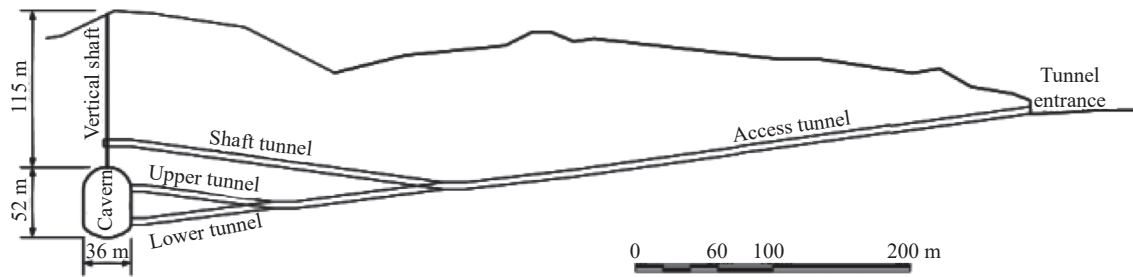
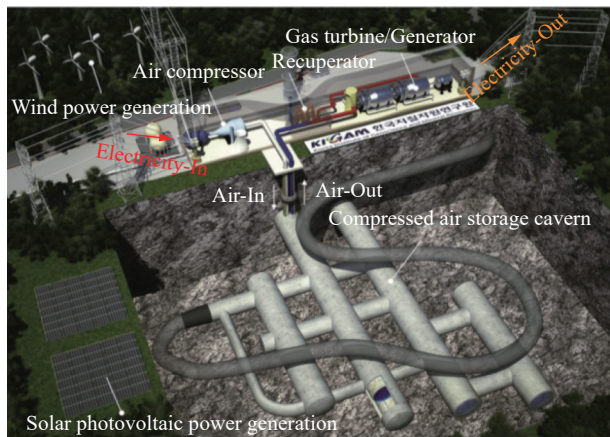
图 1 瑞典 LRC 示范厂储气库和通道布置图^[13]Fig. 1 Layout of gas storage cavern and access tunnels at the Sweden LRC demo plant^[13]

图 2 韩国试验储气库布置图

Fig. 2 Layout of test gas storage in South Korea

分别采用丁基橡胶板和 300 mm 厚钢板密封, 该研究项目探寻了在相对较浅的深度采用混凝土内衬洞室的可能性^[16]。

1.1.4 美国 Soyland 压气储能项目

美国也对硬岩洞室储气的可行性进行了较多的研究与尝试。于 1981 年启动了 Soyland 压气储能项目, 拟利用硬岩洞室作为储气构造物。洞室位于埋深 600 m 的硬质白云岩中, 洞室容积 24.5 万 m^3 , 由一系列平行隧洞组成, 全长 1 830 m, 计划储存压力 5.86 MPa。该项目最终因选址区岩性不合适及电力

需求下降而取消。

1.2 国内建设现状

国内曾有机构开展了压缩空气储能电站相关的国家课题研究, 拟于内蒙古自治区建设示范项目, 地下洞室容积 10 万 m^3 , 最高内压 10 MPa, 但因经济性等原因尚未开展建设^[17]。

为了验证浅埋地下储气库的可行性, 国内某研究团队在平江抽水蓄能电站某条位于花岗岩地层的勘探平硐中建造了一座浅埋硬岩试验库。试验库埋深 110 m, 净空容积 28.8 m^3 , 在设计压力为 10 MPa 的条件下, 进行了几次完整的压缩空气充放循环试验。研究了长期高压循环储气条件下围岩结构的安全性和密封材料的密封性能^[18]。

我国目前已投入运行的 CAES 电站多采用盐穴储气库, 尚无利用人工开挖地下洞室作为储气库的压缩空气储能电站投入运行。

各个项目人工地下洞室概况汇总如表 1 所示。

2 CAES 地下人工洞室特点及应用前景

2.1 CAES 地下人工洞室特点

不同于天然气储气库及水电输水隧洞等常规人工洞室, 压缩空气储能电站是通过不断循环充放气来进行储能调峰, 利用低谷电能将空气压缩到储气

表 1 地下人工洞室项目概况

Tab. 1 Overview of the underground artificial cavern projects

项目名称	结构形式	密封层形式	埋深/m	最高内压/MPa	储气容积/ m^3
瑞典Skallen储气库	大罐式	钢板	115	25	400 000
日本CAES电站	隧洞式	丁基橡胶和尼龙加强网	450	8	1 600
韩国CAES电站	隧洞式	丁基橡胶/钢板	100	8	—
美国Soyland压气储能项目	隧洞式	—	600	5.86	245 000
平江试验库	隧洞式	玻璃钢/橡胶/钢板	110	10	28.8

库,用电高峰时再释放压缩空气发电,从而实现电网削峰填谷调节能力和新能源消纳能力。快速的压缩和减压循环可能导致显著的温度波动,因此储气库内气体的温度和压力处于相互影响、循环变动的状态,衬砌及围岩承受循环气压与温度荷载的双重作用^[19-20]。且在电站运行期间,压力循环的次数很高,天然气储存通常每年1个循环,在某些情况下,每年预计20个循环^[21],而CAES电站可以按日循环运行,即每年365个循环,在电站50a的使用寿命中,总循环次数接近2万次。

CAES 电站地下储气库的密封性也是其成败的关键,密封层主要有钢衬密封层及高分子材料密封层两大类。在电站运行期间密封材料也会受温度和压力循环变化所产生的疲劳效应的影响,密封层自身的应力应变以及随围岩的协调变形都需要进一步研究。国外对于密封材料的研究报道比较有限,国内学者对于不同材料的力学性能及耐久性进行了一些初步的探索。

在水利水电工程领域,一般认为超过150m水头的引水隧洞即为高压引水隧洞,而压缩空气储能储气库运行期间内压高达10MPa及以上,相当于1000m及以上的水头,如此高内压若按照水利水电工程引水隧洞的设计思路完全由衬砌承担,不论从经济性和技术性角度都是难以实现的,因此总结相关行业先进技术,在安全的大前提下兼顾经济性并突破创新是自主建设CAES电站地下硬岩储气库的唯一出路。

2.2 CAES 地下人工洞室应用前景

伴随着电力行业的发展和可再生能源的大规模应用,大规模长时储能技术越来越成为国家科技创新和产业支持的焦点,当前应用较多的主要有抽水蓄能、压缩空气储能、化学储能、飞轮储能等,而压缩空气储能是目前唯一能与抽水蓄能相媲美的大规模长时物理储能技术,对解决风能、光能等可再生能源的间歇性和不稳定性问题具有重要意义。

目前世界范围内已经建造的CAES电站储气库大部分都是在盐岩条件下建造的,少量利用已开采完的贮气和贮油的地质洞穴或废弃采矿巷道^[22],盐穴、矿洞经过勘探后可直接用于储存压缩气体,盐穴、废弃矿坑等天然地质构造储气规模大、开发成本低,然而依赖于特殊地质和地理条件;金属材料储气装

置密封性好、能够灵活安装布置,但储气规模较小,对于装机规模较大的压缩空气储能系统,地面储罐存储成本高昂,且占地面积极大。人工开挖的地下洞室具有广泛的场地选择空间,许多国内外的技术团队已经对人工硬岩洞室作为压缩空气储能电站的储气装置进行了较多的研究和尝试^[23-25],因此积极研究开发人工地下洞室等新型储气形式,摆脱压缩空气储能系统对地理条件的依赖,促进其大规模推广应用势在必行,且挖掘新的人工地下洞室为压缩空气储能电站选址靠近风能和太阳能等能源中心、统筹汇集送端新能源电力、优化配套储能规模、减少输电线路建设成本等提供了更多的可能性^[26-27]。大规模地下人工储气洞室势将成为长时压缩空气储能电站的核心装置。

3 CAES 地下人工洞室重点研究内容

3.1 CAES 地下人工洞室选址

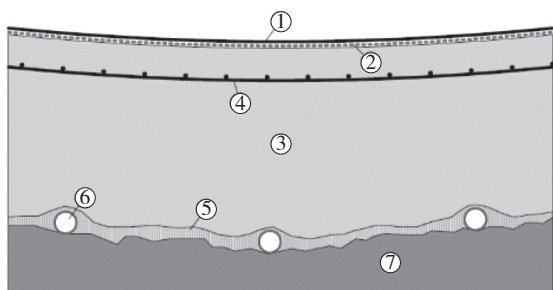
人工地下储气库是压气储能电站的重要组成部分,且投资占比较大,厂址的地层条件直接影响到人工洞室的结构设计从而影响到电站建设的经济性和可行性。理论上讲,陆地上的任何地方都可以建设地下储气库,但兼顾建设技术可行性和经济性的条件下,适合建设压气储能电站的区域及地层是有限的,这也是大规模压缩空气储能电站发展缓慢的主要原因之一。通过何种标准筛选出满足建库要求的厂址范围,如何对拟选厂址建库的适宜性进行判别成为电站建设的首要环节及关键问题。

3.2 CAES 地下人工洞室应力应变过程分析

3.2.1 CAES 地下人工洞室结构形式

目前国内业界采用的储气库结构形式多参照瑞典于20世纪90年代提出的LRC典型断面^[13],即由储气库内腔向外依次为钢衬(密封层)、滑动层、混凝土衬砌层、钢筋网、排水系统、围岩,如图3所示。且近年来已基本达成普遍共识,即基于水电站高压引水隧洞中围岩承担绝大部分内压的设计理念^[28-30],围岩是承载内压的主体,衬砌只承担小部分内压,其主要作用是密封和传递荷载。因此提高衬砌厚度或提高混凝土衬砌中钢筋的用量对于提高衬砌的承载能力意义不大^[31]。混凝土衬砌裂缝不可避免地会产生,因此钢筋网片的作用主要为避免混凝土衬砌产生贯穿性裂缝,同时限制裂缝宽度的开展,从而保证

衬砌的完整性。滑动层主要作用是减小钢衬(密封层)与围岩之间的摩擦,同时为钢衬(密封层)提供防腐保护。排水系统的主要作用是降低外水压力,有利于钢衬(密封层)在检修工况下的抗外压稳定。



注：①—钢衬；②—滑动层；③—混凝土层；④—焊接钢筋网；⑤—混凝土喷层；⑥—排水系统；⑦—围岩。

图 3 CAES 储气库断面结构示意图^[32]

Fig. 3 Schematic diagram of sectional structure of CAES gas storage^[32]

隧洞式和大罐式是目前储气库两大主流结构类型。隧洞式储气库由 1 条或多条相互平行的隧洞组成,大罐式储气库形似 LRC 储气库,拱顶和底部呈半球形,中部为圆柱体,两种结构形式各有利弊:隧洞式储气库施工技术较为成熟,施工交通洞洞线短,施工进度及施工质量较易把控,但地下部分占地较大,且主体储气库部分衬砌材料用量及洞室开挖工程量相对较大;大罐式储气库施工难度较大,施工交通洞洞线长,施工进度及施工质量较难把控,但地下部分占地小,且主体储气库部分衬砌材料用量及洞室开挖工程量相对较小。国内有学者^[33-35]已经针对不同结构形式储气库对于上覆岩体的稳定性及洞周应变分析的影响开展了相关研究并取得了初步的研究成果,但对两种结构形式的设计可靠性及工程经济性的综合性分析比较成果仍较少。

3.2.2 CAES 地下人工洞室埋深

由于洞室埋深越大,洞室区的地应力越大,相同内压对围岩的损伤作用越小,因此洞库埋深的增加有助于减小围岩在运行过程中的损伤程度^[36]。但另一方面,储气库埋深越大,造价越高,因此需要兼顾工程安全与经济性,寻找科学的平衡点。水利水电工程领域主要采用挪威准则(上抬准则)和最小地应力准则(水力劈裂准则)来确定高压引水隧洞的埋深和线路。挪威准则是经验准则,其原理是要求隧洞上覆岩体重量不小于洞内水压力^[30];最小地应力准则是建立在“岩体在地应力场中存在预应力”的基

础上的,由于水工隧洞主要依靠围压防止渗漏水,对于高压引水隧洞,围岩在承担大部分内水压力的同时还应保证防渗效果,因此高压隧洞以 3 次应力场不出现拉应力为设计准则,以防止水力劈裂及产生大量漏水。而压气储能洞室采用内衬密封,若依然按照以上两个准则控制洞室埋深,计算结果会偏于保守,经济性会较差,因此需要考虑适当突破传统水工引水隧洞的埋深设计准则,探索新的设计理念与方法以兼顾安全性与经济性。

3.3 CAES 地下人工洞室密封层

CAES 系统将多余的能量以高压空气的形式存放在地下洞室中,若高压空气发生泄露,储存的能量就会损失,因此保证洞室的密封性也是成败的关键。密封层材料及其空气渗透计算理论不成熟也是制约人工内衬洞室发展的主要因素之一^[37]。密封材料主要有钢材及高分子材料两大类。最早的天然气储气库采用钢衬作为密封层,但天然气储气库与 CAES 系统洞室运行条件有很大差异,虽然钢衬作为密封层被认为材料本身不透气,但在频繁的充放气循环条件下其自身的力学特性能否满足要求仍有待进一步研究;且大规模高压地下洞室钢材的用量会提高电站的建设成本,影响电站项目的经济性。采用何种设计准则来解决钢衬外压失稳的问题及长期抗疲劳性能的问题,直接决定了工程的安全与效益。和钢衬密封层相比,高分子材料密封层具有可变形性大、成本低等优势,但高分子材料是透气材料,根据 Allen 等^[38]的研究,每天 2% 的空气泄漏率就能造成他所研究的储气库 1 a 上百万的经济损失,因此,高分子材料的渗透系数取值、气库运行时高分子材料密封层的空气泄漏量及其主要影响因素、密封层的受力状态等都是需要重点关注的问题。

4 国内外 CAES 地下人工洞室研究现状

4.1 CAES 地下人工洞室选址

针对地下人工洞室选址的问题目前国内业界学者已基本达成共识,即选择花岗岩、玄武岩、大理岩等岩石强度高、变形模量大的硬岩地层广泛分布的区域建设储气库对于结构安全性及工程经济性是有利的。在区域地质图中选择单轴饱和抗压强度 $R_c > 60 \text{ MPa}$ 的坚硬岩区域作为人工洞室选址的主要目标区,在此基础上,地层构造简单、岩层厚度大且

产状平缓、构造裂隙间距大、组数少的地区更优。岩溶发育、存在有害气体或有地热异常的地层分布的区域、存在区域性断裂带的地区、节理裂隙发育的地区是选址时应规避的不利因素,应考虑避开大型断裂带 5 km 以上,避开实测断层和性质不明的推测断层 200 m 以上^[39],且拟建储气库区域地震烈度不宜大于 8°。

此外,交通运输方便,整体地势平坦,地形坡角小于 15°的区域更有利于洞室的布置及施工组织。储气库所在区域的水文地条件也应给予足够的重视,由于检修期间钢板衬砌的稳定性由外压控制,且地势平坦的地区地下水降排水问题较难解决,因此对于有衬砌内衬洞室,选择地下水相对贫乏的地区对结构安全性及项目经济性更有利。

另有学者提出了层次分析法,利用两两比较判断矩阵得到各个指标的权重值,形成了硬岩储气洞室选址综合评价体系^[40]。地下人工洞室选址关键因素汇总如表 2 所示。

表 2 地下人工洞室选址关键因素汇总表
Tab. 2 Summary of key factors for the site selection of underground artificial caverns

关键因素	条件
岩性	花岗岩、玄武岩、大理岩等硬岩地层
围岩类别	I、II 类
岩体单轴饱和抗压强度	>60 MPa
地震烈度	不宜超过 8°
与断层的位置关系	距离 200 m 以上
与大型断裂带的位置关系	距离 5 km 以上
与地面厂址的位置关系	直线距离不宜超过 2 km
地形坡角	<15°

4.2 CAES 地下人工洞室应力应变过程分析

4.2.1 CAES 地下人工洞室结构形式

Zimmels 等^[25]使用 FLAC 软件对圆形断面隧洞式储气洞室在不同水平构造应力、不同内压(4~8 MPa)及不同洞室间距工况下围岩的塑性区进行了探讨,储气库系统由一系列相互平行的圆形断面隧洞组成,探究了保证合适的洞室间距的条件下采用圆形断面隧洞群作为人工地下储气库的可行性。

夏才初等^[32, 34]采用 Abaqus 有限元软件对隧洞

式和大罐式两种洞室形式及不同断面形式的隧洞式(包括马蹄形及圆形断面)储气库的围岩稳定性及密封性进行了研究,并从塑性区和洞周应变两个方面进行了对比分析,其中塑性区能较好地反映围岩受力的危险区域,洞周应变是密封材料选择的基础数据。研究结果表明各洞型洞室在一定的支护措施下都具有可行性,从衬砌受力及洞周应变的角度比较,同样埋深条件下,圆形断面隧洞式洞室及大罐式洞室更优,且在所有模型中,大罐式洞室的最大洞周应变最小。对于圆形断面隧洞式洞室,同样埋深条件下,改变洞径对开挖及充气引起的围岩塑性区的范围影响不大,主要体现在对洞周应变的影响,洞径越大,最大洞周应变越大。

蒋中明等^[36, 41]采用 FLAC3D 软件,结合二次开发的 FISH 累积损伤模型对斜墙式、直墙式、罐式截面等不同断面形式隧洞式储气库的围岩损伤特性进行了研究,斜墙式和直墙式顶拱均为圆弧,底部为平滑曲线,侧墙分别为斜式和直立式,罐式截面顶拱和底部均为圆弧,侧墙为直立式。研究结论表明罐式截面储气库围岩竖直方向的损伤深度以及损伤区内损伤程度大于斜墙式与直墙式,并在隧道式洞型选择上推荐了斜墙式洞型。

4.2.2 CAES 地下人工洞室埋深

Kim 等^[42]曾给出 1 个简单的抗抬破坏计算模型来探讨储气库的埋深(如图 4 所示)。他们假设岩体破坏路径是竖直延伸至地表的,且岩体服从线性 Mohr-Coulomb 准则,当总的上抬力超过洞室上覆岩体重量 W 与破坏面处抗剪力之和时,地面隆起发生。总上抬力由洞室内压 P 和地下水对储气库洞室及覆盖岩体的浮力 F_b 组成。破坏面上的抗剪力被认为是由黏聚力和摩擦角提供的阻力之和。在设计压气储能地下洞室时,总向下力与总向上抬升力之比应大于规定的安全系数。但其计算模型并没有充分考虑岩体的实际破坏路径的影响。

抗拔锚板由于其方便、实用和经济等特点被广泛应用于输电线路杆塔、电视通讯塔等高耸结构和其他承受上拔荷载作用的建筑结构中。匡根林等^[43]尝试利用成熟的锚板抗拔承载力理论,对地下高压储气洞室岩石覆盖最小厚度的计算进行了初步的尝试和探讨(如图 5 所示)。其假定储气洞室上部围岩

5 结论

本文对压缩空气储能人工地下洞室国内外研究现状进行了简要介绍,基本理清了压气储能人工地下洞室建设及设计过程中需要重点关注的问题,笔者认为以下几个方面仍需开展进一步的研究工作:

1) 大罐式和隧洞式储气洞室从结构安全角度均具备可实施性,从工程经济性角度孰优孰劣尚无定论。

2) 众多学者对不同材料的密封层进行了探究,对成本较低的高分子密封层及低渗透混凝土密封层进行了初步的讨论,但目前的研究成果多为有限元分析计算,且对于高分子材料,考虑混凝土衬砌开裂等缺陷引起的局部破坏问题仍值得关注,而随着压气储能电站规模的日趋增大,储气库运行期内压已突破 10 MPa 达到 18 MPa 甚至更高,仅采用低渗透混凝土作为密封层的可靠性有待进一步研究。

3) 洞室的埋深直接影响到气库的安全性及经济性,行业内尚缺乏 1 套成熟的设计理论及设计方法,且也无相关国家标准或行业规范可依,如何实现结构安全可靠性及工程经济性的平衡仍是该领域亟待解决的问题。

此外,目前相关研究多处于起步研究阶段以及试验示范阶段,实测数据仍然较少,理论成果缺少气库运行期间实测数据的验证。希望本文可以为该领域今后的研究工作提供思路与方向。

参考文献:

- [1] 袁照威,杨易凡.压缩空气储能技术研究现状及发展趋势[J].南方能源建设,2024,11(2):146-153. DOI: 10.16516/j.cec.2024.2.14.
YUAN Z W, YANG Y F. Research status and development trend of compressed air energy storage technology [J]. Southern energy construction, 2024, 11(2): 146-153. DOI: 10.16516/j.cec.2024.2.14.
- [2] 夏晨阳,杨子健,周娟,等.基于新型电力系统的储能技术研究[J].内蒙古电力技术,2022,40(4):3-12. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0058.
XIA C Y, YANG Z J, ZHOU J, et al. Research of energy storage technology based on new power system [J]. Inner Mongolia electric power, 2022, 40(4): 3-12. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0058.
- [3] 万明忠,杨易凡,袁照威,等.大容量压缩空气储能关键技术[J].南方能源建设,2023,10(6):26-33. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003.
WAN M Z, YANG Y F, YUAN Z W, et al. Key technologies of large-scale compressed air energy storage [J]. Southern energy construction, 2023, 10(6): 26-33. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003.
- [4] 中关村储能产业技术联盟.储能产业研究白皮书[EB/OL].(2022-04-26)[2023-11-13].<http://www.esresearch.com.cn/>.
CNESA. Energy storage industry research white paper [EB/OL]. (2022-04-26)[2023-11-13]. <http://www.esresearch.com.cn/>.
- [5] 郭丁彰,尹钊,周学志,等.压缩空气储能系统储气装置研究现状与发展趋势[J].储能科学与技术,2021,10(5):1486-1493. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0356.
GUO D Z, YIN Z, ZHOU X Z, et al. Status and prospect of gas storage device in compressed air energy storage system [J]. Energy storage science and technology, 2021, 10(5): 1486-1493. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0356.
- [6] BUDT M, WOLF D, SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage: basic principles, past milestones and recent developments [J]. Applied energy, 2016, 170: 250-268. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.108.
- [7] OLDENBURG C M, PAN L H. Porous media compressed-air energy storage (PM-CAES): theory and simulation of the coupled wellbore-reservoir system [J]. Transport in porous media, 2013, 97(2): 201-221. DOI: 10.1007/s11242-012-0118-6.
- [8] 完颜祺琪,丁国生,赵岩,等.盐穴型地下储气库建库评价关键技术及其应用[J].天然气工业,2018,38(5):111-117. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.05.013.
WANYAN Q Q, DING G S, ZHAO Y, et al. Key technologies for salt-cavern underground gas storage construction and evaluation and their application [J]. Natural gas industry, 2018, 38(5): 111-117. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.05.013.
- [9] 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. DOI: 10.3321/j.issn.1000-6915.2005.24.002.
YANG C H, LIANG W G, WEI D H, 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. DOI: 10.3321/j.issn.1000-6915.2005.24.002.
- [10] 蒋中明,黄毓成,刘澜婷,等.平江浅埋地下储气实验库力学响应数值分析[J].水利水电科技进展,2019,39(6):37-43. DOI: 10.3880/j.issn.10067647.2019.06.006.
JIANG Z M, HUANG Y C, LIU L T, et al. Numerical analysis of mechanical response of Pingjiang shallow underground pilot cavern for compressed air storage [J]. Advances in science and technology of water resources, 2019, 39(6): 37-43. DOI: 10.3880/j.issn.10067647.2019.06.006.
- [11] 赵同彬,刘淑敏,马洪岭,等.废弃煤矿压缩空气储能研究现状与发展趋势[J].煤炭科学技术,2023,51(10):163-176. DOI: 10.12438/cst.2023-0131.
ZHAO T B, LIU S M, MA H L, et al. Research status and development trend of compressed air energy storage in abandoned coal mines [J]. Coal science and technology, 2023,

- 51(10): 163-176. DOI: [10.12438/cst.2023-0131](https://doi.org/10.12438/cst.2023-0131).
- [12] 杨春和, 王同涛. 深地储能研究进展 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(9): 1729-1759. DOI: [10.13722/j.cnki.jrme.2022.0829](https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2022.0829).
YANG C H, WANG T T. Advance in deep underground energy storage [J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2022, 41(9): 1729-1759. DOI: [10.13722/j.cnki.jrme.2022.0829](https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2022.0829).
- [13] GLAMHEDEN R, CURTIS P. Excavation of a cavern for high-pressure storage of natural gas [J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2006, 21(1): 56-67. DOI: [10.1016/j.tust.2005.06.002](https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.06.002).
- [14] YOKOYAMA H, SHINOHARA S, KATO Y. Demonstrative operation of pilot plant for compressed air energy storage power generation [J]. *Japan electric power civil engineering association, JEPOC journal*, 2002, 300: 151-154 (in Japanese).
- [15] SHIDAHARA T, NAKAGAWA K, IKEGAWA Y, et al. Demonstration study for the compressed air energy storage technology by the hydraulic confining method at the Kamioka testing site [R]. Tokyo: Central Research Institute of Electric Power Industry, 2001.
- [16] KIM H M, RUTQVIST J, RYU D W, et al. 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 [J]. *Applied energy*, 2012, 92: 653-667. DOI: [10.1016/j.apener-gy.2011.07.013](https://doi.org/10.1016/j.apener-gy.2011.07.013).
- [17] 夏才初, 张平阳, 周舒威, 等. 大规模压气储能洞室稳定性和洞周应变分析 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(5): 1391-1398. DOI: [10.16285/j.rsm.2014.05.013](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2014.05.013).
XIA C C, ZHANG P Y, ZHOU S W, et al. Stability and tangential strain analysis of large-scale compressed air energy storage cavern [J]. *Rock and soil mechanics*, 2014, 35(5): 1391-1398. DOI: [10.16285/j.rsm.2014.05.013](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2014.05.013).
- [18] 蒋中明, 刘澧源, 李双龙, 等. 压气储能平江试验库受力特性数值研究 [J]. *长沙理工大学学报 (自然科学版)*, 2017, 14(4): 62-68. DOI: [10.3969/j.issn.1672-9331.2017.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9331.2017.04.010).
JIANG Z M, LIU L Y, LI S L, et al. Numerical study on mechanical characteristics of the Pingjiang pilot cavern for compressed air energy storage [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 14(4): 62-68. DOI: [10.3969/j.issn.1672-9331.2017.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9331.2017.04.010).
- [19] LIANG J, LINDBLOM U. Analyses of gas storage capacity in unlined rock caverns [J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 1994, 27(3): 115-134. DOI: [10.1007/BF01020306](https://doi.org/10.1007/BF01020306).
- [20] PERAZZELLI P, ANAGNOSTOU G. Design issues for compressed air energy storage in sealed underground cavities [J]. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 2016, 8(3): 314-328. DOI: [10.1016/j.jrmge.2015.09.006](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.09.006).
- [21] RUTQVIST J, KIM H M, RYU D W, et al. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns [J]. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2012, 52: 71-81. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2012.02.010](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.010).
- [22] 何秋德, 陈宁, 罗萍嘉. 基于压缩空气蓄能技术的煤矿废弃巷道再利用研究 [J]. *矿业研究与开发*, 2013, 33(4): 37-39, 65. DOI: [10.13827/j.cnki.kyyk.2013.04.005](https://doi.org/10.13827/j.cnki.kyyk.2013.04.005).
HE Q D, CHEN N, LUO P J. Research on reuse of abandoned roadway in coal mine based on the compressed air energy storage technology [J]. *Mining research and development*, 2013, 33(4): 37-39, 65. DOI: [10.13827/j.cnki.kyyk.2013.04.005](https://doi.org/10.13827/j.cnki.kyyk.2013.04.005).
- [23] KIM H M, RUTQVIST J, KIM H, et al. Failure monitoring and leakage detection for underground storage of compressed air energy in lined rock caverns [J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 2016, 49(2): 573-584. DOI: [10.1007/s00603-015-0761-7](https://doi.org/10.1007/s00603-015-0761-7).
- [24] KIM H M, RUTQVIST J, JEONG J H, et al. Characterizing excavation damaged zone and stability of pressurized lined rock caverns for underground compressed air energy storage [J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 2013, 46(5): 1113-1124. DOI: [10.1007/s00603-012-0312-4](https://doi.org/10.1007/s00603-012-0312-4).
- [25] ZIMMELS Y, KIRZHNER F, KRASOVITSKI B. Design criteria for compressed air storage in hard rock [J]. *Energy & environment*, 2002, 13(6): 851-872. DOI: [10.1260/095830502762231313](https://doi.org/10.1260/095830502762231313).
- [26] 蒋中明, 唐栋, 李鹏, 等. 压气储能地下储气库选型选址研究 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 6-16. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.002).
JIANG Z M, TANG D, LI P, et al. Research on selection method for the types and sites of underground repository for compressed air storage [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(3): 6-16. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.002).
- [27] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(25): 1-9. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.25.001](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.25.001).
ZHANG L Y, YE T L, XIN Y Z, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(25): 1-9. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.25.001](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.25.001).
- [28] 苏凯, 伍鹤皋, 周创兵. 内水压力下水工隧洞衬砌与围岩承载特性研究 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(8): 2407-2412, 2452. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7598.2010.08.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7598.2010.08.010).
SU K, WU H G, ZHOU C B. Study of combined bearing characteristics of lining and surrounding rock for hydraulic tunnel under internal water pressure [J]. *Rock and soil mechanics*, 2010, 31(8): 2407-2412, 2452. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7598.2010.08.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7598.2010.08.010).
- [29] 周亚峰, 苏凯, 伍鹤皋. 水工隧洞钢筋混凝土衬砌外水压力取值方法研究 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(增刊 2): 198-203, 210. DOI: [10.16285/j.rsm.2014.s2.059](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2014.s2.059).
ZHOU Y F, SU K, WU H G. Study of external water pressure estimation method for reinforced concrete lining of hydraulic tunnels [J]. *Rock and soil mechanics*, 2014, 35(Suppl.2): 198-

- 203, 210. DOI: [10.16285/j.rsm.2014.s2.059](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2014.s2.059).
- [30] 侯靖, 胡敏云. 水工高压隧洞结构设计中若干问题的讨论 [J]. *水利学报*, 2001, 32(7): 36-40. DOI: [10.3321/j.issn:0559-9350.2001.07.006](https://doi.org/10.3321/j.issn:0559-9350.2001.07.006).
HOU J, HU M Y. Discussion on some problems in design of high pressure tunnel for hydro projects [J]. *Journal of hydraulic engineering*, 2001, 32(7): 36-40. DOI: [10.3321/j.issn:0559-9350.2001.07.006](https://doi.org/10.3321/j.issn:0559-9350.2001.07.006).
- [31] 蒋中明, 甘露, 张登祥, 等. 气压储能地下储气库衬砌裂缝分布特征及演化规律研究 [J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(1): 110-119. DOI: [10.11779/CJGE20221165](https://doi.org/10.11779/CJGE20221165).
JIANG Z M, GAN L, ZHANG D X, et al. Distribution characteristics and evolution laws of liner cracks in underground caverns for compressed air energy storage [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2024, 46(1): 110-119. DOI: [10.11779/CJGE20221165](https://doi.org/10.11779/CJGE20221165).
- [32] 夏才初, 周舒威, 周瑜, 等. 压缩空气储能的地下岩石内衬洞室关键技术 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2021.
XIA C C, ZHOU S W, ZHOU Y, et al. Key technology of underground rock-lined cavern for compressed air energy storage [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2021.
- [33] 张秀钊, 李林耘, 杨玉琴, 等. 考虑需求响应与储能系统的联合调峰优化策略 [J]. *内蒙古电力技术*, 2022, 40(4): 68-73. DOI: [10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0067](https://doi.org/10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0067).
ZHANG X Z, LI L Y, YANG Y Q, et al. Joint peak shaving optimization strategy considering demand response and energy storage system [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2022, 40(4): 68-73. DOI: [10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0067](https://doi.org/10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0067).
- [34] 周舒威, 夏才初, 张平阳, 等. 地下气压储能圆形内衬洞室内压和温度引起应力计算 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(11): 2025-2035. DOI: [10.11779/CJGE201411008](https://doi.org/10.11779/CJGE201411008).
ZHOU S W, XIA C C, ZHANG P Y, et al. Analytical approach for stress induced by internal pressure and temperature of underground compressed air energy storage in a circular lined rock cavern [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2014, 36(11): 2025-2035. DOI: [10.11779/CJGE201411008](https://doi.org/10.11779/CJGE201411008).
- [35] 王其宽, 张彬, 王汉勋, 等. 内衬式高压储气库群布局参数优化及稳定性分析 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 1123-1131. DOI: [10.13544/j.cnki.jeg.2020-305](https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-305).
WANG Q K, ZHANG B, WANG H X, et al. Optimization and stability analysis of layout parameters of lined high-pressure gas storage caverns [J]. *Journal of engineering geology*, 2020, 28(5): 1123-1131. DOI: [10.13544/j.cnki.jeg.2020-305](https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-305).
- [36] 蒋中明, 秦双专, 唐栋. 气压储能地下储气库围岩累积损伤特性数值研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(2): 230-238. DOI: [10.11779/CJGE202002003](https://doi.org/10.11779/CJGE202002003).
JIANG Z M, QIN S Z, TANG D. Numerical study on accumulative damage characteristics of underground rock caverns for compressed air energy storage [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2020, 42(2): 230-238. DOI: [10.11779/CJGE202002003](https://doi.org/10.11779/CJGE202002003).
- [37] 叶斌, 程子睿, 彭益成. 气压储能洞室气密性影响因素分析 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2016, 44(10): 1526-1532. DOI: [10.11908/j.issn.0253-374x.2016.10.008](https://doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.2016.10.008).
YE B, CHENG Z R, PENG Y C. Analysis of influence factors on air tightness of underground cavern for compressed air energy storage [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(10): 1526-1532. DOI: [10.11908/j.issn.0253-374x.2016.10.008](https://doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.2016.10.008).
- [38] ALLEN R D, DOHERTY T J, KANNBERG L D. Summary of selected compressed air energy storage studies [R]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 1985. DOI: [10.2172/5872515](https://doi.org/10.2172/5872515).
- [39] 彭威, 商浩亮, 纪文栋, 等. 压缩空气储能电站人工洞室选址关键流程 [J]. *电力勘测设计*, 2023(6): 46-49. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.06.009](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.06.009).
PENG W, SHANG H L, JI W D, et al. The key process of artificial chamber location of compressed air energy storage power station [J]. *Electric power survey & design*, 2023(6): 46-49. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.06.009](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.06.009).
- [40] 金维平, 彭益成. 硬岩地区压缩空气储能工程地下储气洞室选址方法研究 [J]. *电力与能源*, 2017, 38(1): 63-67. DOI: [10.11973/dlyny201701015](https://doi.org/10.11973/dlyny201701015).
JIN W P, PENG Y C. Underground gas storage cavern location method for compressed air energy storage engineering in hard rock area [J]. *Power & energy*, 2017, 38(1): 63-67. DOI: [10.11973/dlyny201701015](https://doi.org/10.11973/dlyny201701015).
- [41] 蒋中明, 李小刚, 万发, 等. 气压储能遂昌地下储气库结构应力变形特性数值研究 [J]. *长沙理工大学学报 (自然科学版)*, 2021, 18(3): 79-86. DOI: [10.3969/j.issn.1672-9331.2021.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9331.2021.03.011).
JIANG Z M, LI X G, WAN F, et al. Numerical study on stress and deformation characteristics of structure of underground gas storage for CAES in Suichang [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 18(3): 79-86. DOI: [10.3969/j.issn.1672-9331.2021.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9331.2021.03.011).
- [42] KIM H M, PARK D, RYU D W, et al. Parametric sensitivity analysis of ground uplift above pressurized underground rock caverns [J]. *Engineering geology*, 2012, 135-136: 60-65. DOI: [10.1016/j.enggeo.2012.03.006](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.03.006).
- [43] 匡根林, 许萍. 锚板抗拔理论在地下储气洞室中的应用 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(5): 67-71. DOI: [10.3969/j.issn.1672-1144.2018.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-1144.2018.05.012).
KUANG G L, XU P. Application of anchor plate uplift capacity theory in the underground gas storage cavern [J]. *Journal of water resources and architectural engineering*, 2018, 16(5): 67-71. DOI: [10.3969/j.issn.1672-1144.2018.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-1144.2018.05.012).
- [44] 徐英俊, 夏才初, 周舒威, 等. 基于极限分析上限定理的气压储能洞室抗隆起破坏准则 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(10): 1971-1980. DOI: [10.13722/j.cnki.jrme.2022.0018](https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2022.0018).
XU Y J, XIA C C, ZHOU S W, et al. Anti-uplift failure criterion

- of caverns for compressed air energy storage based on the upper bound theorem of limit analysis [J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2022, 41(10): 1971-1980. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0018.
- [45] 夏才初, 赵海斌, 梅松华, 等. 埋深对压气储能内衬洞室稳定性影响的定量分析 [J]. *绍兴文理学院学报*, 2016, 36(9): 1-7. DOI: 10.16169/j.issn.1008-293x.k.2016.09.00.
- XIA C C, ZHAO H B, MEI S H, et al. Quantitative analysis of impact of cover depth on stability of a lined rock cavern for compressed air energy storage [J]. *Journal of Shaoxing University*, 2016, 36(9): 1-7. DOI: 10.16169/j.issn.1008-293x.k.2016.09.00.
- [46] JOHANSSON J. High pressure storage of gas in lined rock caverns [D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2003.
- [47] STILLE H, JOHANSSON J, STURK R. High pressure storage of gas in lined shallow rock caverns-results from field tests [C]//Anon. *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, Delft, Netherlands, August 29-31, 1994. Rotterdam: A. A. Balke-ma, 1994: 689-696. DOI: 10.2118/28115-MS.
- [48] HORI M, GODA Y, ONISHI H. Mechanical behaviour of surrounding rock mass and new lining structure of air-tight pressure cavern [C]//Anon. 10th ISRM Congress, Sandton, South Africa, September 8-12, 2003. Johannesburg: [s. n.], 2003: 529-532.
- [49] ISHIHATA T. Underground compressed air storage facility for CAES—G/T power plant utilizing an airtight lining [J]. *News journal, international society for rock mechanics*, 1997, 5(1): 17-21.
- [50] 周瑜, 夏才初, 周舒威, 等. 压气储能内衬洞室高分子密封层的气密与力学特性 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(12): 2685-2696. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0937.
- ZHOU Y, XIA C C, ZHOU S W, et al. Air tightness and mechanical characteristics of polymeric seals in lined rock caverns (LRCs) for compressed air energy storage (CAES) [J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2018, 37(12): 2685-2696. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0937.
- [51] 夏才初, 徐英俊, 王辰霖, 等. 基于非稳态渗流过程的压气储能洞室空气渗漏率计算 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(7): 1764-1773, 1793. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1385.
- XIA C C, XU Y J, WANG C L, et al. Calculation of air leakage rate in lined cavern for compressed air energy storage based on unsteady seepage process [J]. *Rock and soil mechanics*, 2021, 42(7): 1764-1773, 1793. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1385.

作者简介:



杨雪雯

杨雪雯(第一作者, 通信作者)

1993-, 女, 工程师, 硕士, 主要从事水工结构、水利水电工程、压缩空气储能研究工作 (e-mail) yangxuewen@gedi.com.cn。

任灏

1980-, 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水工结构、岩土工程以及海洋工程研究工作 (e-mail) renhao@gedi.com.cn。

廖泽球

1964-, 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事电力工程水工结构工程研究工作 (e-mail) liaozequi@gedi.com.cn。

王金玺

1987-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水工及海工结构设计与研究工作 (e-mail) wangjinxi@gedi.com.cn。

贾斌

1988-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事储能、火力发电等工作 (e-mail) jiabin@gedi.com.cn。

项目简介:

项目名称 高压地下洞室关键技术研究(EV10321W)

承担单位 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

项目概述 项目主要对国内外人工地下储气洞室技术调研; 研究高压洞室衬砌结构方案及构造措施, 围岩稳定验算方法, 高压气体循环荷载下缝隙张开度、钢衬疲劳及围岩损伤分析, 用以指导压缩空气储能电站人工地下洞室设计相关工作。

主要创新点 (1)总结气库围岩稳定分析研究现状, 在此基础上, 采用基于刚体极限平衡理论的解析方法分析气库顶板稳定安全系数; (2)建立钢衬-混凝土衬砌接触传力模型, 模拟气压-温度同时作用的情况, 分析充气-储气-放气过程中钢衬的应力状态; (3)从围岩稳定、钢衬应力与疲劳寿命等多个角度对各个方案开展比较研究, 推荐优选方案。

(编辑 孙舒)