

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.002

压气储能地下储气库选型选址研究

蒋中明^{1,2}, 唐栋^{1,2}, 李鹏³, 李毅^{1,4}

- (1. 长沙理工大学 水利工程学院, 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410114;
3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410014;
4. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410114)

摘要: [目的]地下储气库选型选址是大规模压气储能电站规划设计的首要问题。[方法]通过对比分析现有文献,总结了4种地下储气库的优缺点,分析了我国适合建造地下岩穴储气库的硬岩地层分布范围及特点。基于我国第一个压气储能地下储气实验库的实验成果论证了硬岩岩穴地下储气库建设关键技术的可行方案;最后,以广东省为例探讨了大规模压气储能电站地下储气库的规划选址方法。[结果]研究成果表明:盐岩洞穴和硬岩洞穴是大规模压气储能电站的优选地下储气库类型;在我国光伏能和风能电站规划及建设集中的地区,适合建设硬岩洞穴储气库的各种岩石地层有分布广泛。[结论]我国广泛的各类硬岩分布解决了间歇性能源富集地区修建大规模压气储能电站选址困难的问题,试验研究也表明了硬岩地层优良的力学特性有助于解决地下储气库变形稳定性及密封性等关键技术问题。总之,我国现阶段建设压气储能电站地下储气库在技术上是可行的。

关键词: 压气储能; 储气库类型; 规划选址; 选址方法; 选址流程

中图分类号: TK02

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)03-0006-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Selection Method for the Types and Sites of Underground Repository for Compressed Air Storage

JIANG Zhongming^{1,2}, TANG Dong^{1,2}, LI Peng³, LI Yi^{1,4}

- (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China;
3. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China;
4. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: [Introduction]The selection of types and sites of underground repository for compressed air storage is one of the most important issues of large scale compressed air energy storage (CAES) plant planning. [Method]The advantages and disadvantages of 4 types of underground repository for compressed air storage were concluded based on comparison of analyzing literatures published domestic and oversea. The geology characteristics and distribution region of the suitable hard stratum for construction of underground rock cavern were also analyzed. The technology feasibility of rock cavern for compressed air storage was validated by the in-situ experiment results obtained from the first pilot repository for CAES in China. Sites planning method of underground repository for large scale CAES plant was studied taking Guangdong province for example. [Result]Rock caverns built in salt and hard rock stratum are the most feasible types of the underground cavern for CAES plant and hard rock stratum widely exists in most windy and solar energy abundant area in China. [Conclusion]Wide distribution of the suitable stratum for underground cavern construction in intermittent energy generation area solves the difficult problem of site selection for large scale CAES plant. Experiment data indicates that good quality of the rock mass is helpful for the solution of key problems such stability and sealing of underground cavern. All in all, it is feasibility in technology at the present stage in China.

Key words: compressed air energy storage; types of underground repository for CAES; site planning; site selected method; site selection process

收稿日期: 2019-06-01 修回日期: 2019-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目“压气储能电站地下储气库围岩多场耦合损伤特性及稳定性研究”(51778070); 中国电力建设股份有限公司科技计划项目“压缩空气蓄能电站高压密封地下储气库建设关键技术研究”(GW-KJ-2012-26)

压缩空气蓄能(Compressed Air Energy Storage, 以下简称为 CAES)是一种利用压缩空气作为介质来储存富余电能的新技术。压缩空气储能电站的主要作用是调节电力峰谷和改善电力品质, 它具有有效

率高、占地面积小、运行方式灵活、投资和运行费用较少等优点^[1-2]。利用压缩空气储能的基本思想在20世纪40年代初被提出^[3],其工作原理是利用用电低谷时的富余电力将空气压缩并储存在储气设备中,在用电高峰期再将压缩空气释放出来推动透平发电。对于微小型压缩空气储能电站,压缩空气的储气设备一般采用地面钢罐(管);对于大规模压气储能电站(100 MW以上)来说,由于储能所需的容积可达十万立方米,甚至百万立方米级别,因此其储气设备一般采用地下储气库^[3]。地下储气库可以是地下开挖的岩穴,也可是孔隙率大的地下含水层^[3-4]。根据现有文献,岩穴地下储库分为盐岩洞穴、硬岩洞穴两种^[2]。根据岩石的强度和硬度大小,盐岩归属于软岩范畴,因此盐岩洞穴实质上是一种软岩洞穴。

理论上讲,地球上的任何地层都可以建成地下储气库,然而从建设技术可行性和经济性角度出发,适合建设压气储能电站的岩石地层是有限的。这也是自1978年第一座压气储能电站 Huntorf 和1991第二座压气储能电站 McIntosh 运行以来,大规模压缩空气储能电站发展缓慢的主要原因之一。盐岩地层的最大优点是盐岩洞穴的天然密封性好和建设成本低,且围岩具有开挖损伤自愈等优点。盐岩洞穴也具有岩石强度低、洞穴稳定性差及流变特性等显著缺点。因此,盐岩洞穴储气库都采用深埋的方式来解决高压运行条件下的安全稳定性问题。硬岩洞穴地下储气库最大优点是洞穴围岩稳定性好,可浅埋;其不足之处是密封技术难度高,建设成本相对较高。随着地下空间开发技术进步,大规模地下空间开挖成本大幅度降低、建设工期缩短以及高压气体地下密封技术出现,通过洞穴浅埋方案解决高压地下储库面临的技术和经济问题越来越成为可能^[5]。

近年来风能、太阳能等新能源在我国得到了大规模开发和利用。由于风能、太阳能等新能源发电的波动性和随机性,大规模新能源并网给电力系统的安全稳定运行和电能质量带来了严峻挑战,实际运行中存在大量弃风和弃光现象,使得新能源的利用率长期处于较低的水平^[6-7]。大规模储能技术应用是实现新能源安全、高效和经济利用的必然途径。我国对压缩空气储能系统的研究开发起步比较晚,且大多集中在理论和小型实验层面,但随着电

力储能需求的快速增加,大规模压缩空气储能相关技术的研究在我国日益受到重视。拟建大规模压缩空气储能电站区域是否存在适合于修建大型地下储气库的地质构造是储气库建设的关键所在。本文结合我国地下储气库可选地质构造的分布情况研究,以广东省压气储能电站区域选址为例,探索压气储能地下储气库选型选址方法和流程,以期为大规模压气储能电站的建设提供技术支持。

1 地下储气库选型研究

现有的文献大多将大规模压气储能电站地下储气库分为即盐岩洞穴、硬岩洞穴、废弃矿洞和孔隙介质含水层四种类型^[8]。这四种类型的储气库优缺点对比如表1所示。

表1 不同类型地下储气库特点比较

Tab. 1 Comparison of different types of underground cavern

类型	主要优点	主要不足
盐岩洞穴	<ul style="list-style-type: none"> ① 盐岩渗透性小,天然密封性好; ② 盐岩具有损伤自愈性,渗漏风险小; ③ 造腔工艺简单、技术难度小; ④ 建库经济性好,造价相对较低。 	<ul style="list-style-type: none"> ① 自稳性较差,长期运行收缩变形大; ② 压缩空气含盐量高,腐蚀性强; ③ 运行压力区间小,空间利用率低; ④ 盐岩地层分布普遍性差,选址受限。
硬岩洞穴	<ul style="list-style-type: none"> ① 硬岩地层分布广泛,选址容易; ② 洞穴自稳性好,变形小,库容稳定; ③ 运行压力区间大,空间利用率高; ④ 洞穴断面型式多(隧洞、竖井、洞室),建库适应性强。 	<ul style="list-style-type: none"> ① 建库造价相对较高,经济性较差; ② 需要单独设置密封结构层,且密封技术难度大; ③ 施工工艺复杂,技术难度较大。
废弃矿洞	<ul style="list-style-type: none"> ① 开挖工程量小,地面设施可利用原有设施,经济性好,造价相对较低; ② 利用原有洞穴进行扩挖,工程施工技术难度小; ③ 运行压力区间大,空间利用率高; ④ 洞穴断面型式多(隧洞、竖井、洞室),建库适应性强。 	<ul style="list-style-type: none"> ① 可行选址有限; ② 洞穴自身稳定不足,多存在地面沉降问题; ③ 需要单独设置密封结构层,且密封技术难度大; ④ 存在地下水污染及有害气体治理等问题。
含水层	<ul style="list-style-type: none"> ① 储气库密封性相对好; ② 工程造价相对较低; ③ 一般情况下合适库址处潜在库容大。 	<ul style="list-style-type: none"> ① 适合地层勘探难度大,选址受限; ② 地质条件要求较高,需不透水盖层; ③ 需采取注浆等措施提高储能效率。

盐岩洞穴储气库由于其具有密封性和经济性好等显著优点而在国内外被作为首选的地下高压储气库。然而作为压缩空气储能电站的储气库来说,盐岩洞穴的不足之处也很鲜明。Huntorf 压气储能电站的运行经验表明^[9],储存在盐岩储气库中的空气盐分含量高,对压缩空气管道及机组的腐蚀性强,工程建设需要特别注意管道及机组的防腐蚀问题。更为关键的问题是,适合建库的盐岩地层分布范围有限,在有建库需求的地区可能根本不存在盐岩地层,因此限制了盐岩洞穴储气库压气储能电站的发展。

新开挖硬岩洞穴储气库的最大优点是适合建库的硬岩岩石类型多,且地层分布广泛,在有建库需求的地区一般都存在满足建库条件的各类硬岩地层,因此,硬岩洞穴储气库的选址相对容易。相对于其他类型的储气库而言,新开挖硬岩洞穴储气库的最大缺点是其建库成本相对较高,同时需要设置专门的密封结构层防止高压气体渗漏。采用浅埋和增大电站运行压力区间的方式可以降低电站的建设成本,进而改善岩穴地下储气库一次性投资经济指标。

为提高岩穴地下储气库的经济性,国内外都在积极探索利用改造废弃矿洞建设地下储气库的可行性^[9-10]。我国作为矿产资源大国,在各种金属矿、非金属矿的开采过程中形成了数亿立方米的开采空间,大量的矿井已因资源的枯竭而报废。这些废弃矿井和巷道经过改造后具有作为地下储气库的潜力^[10]。利用废弃矿井建设压气储能电站的地下储气库能降低投资成本。储气库在运行过程中具有承受的压力高和压力变化频繁等特征,可以改造作为压气储能电站地下储气库的废气煤矿矿井的埋深一般较深。目前,国内外对于利用废弃矿井建造地下储气库的研究埋深均在 500 m 级。

煤矿矿井在空间分布上具有分布不规则,巷道分布连续性差,分布范围大等特点,同时矿井及巷道在几何尺度上还具有断面小、空间狭长、内表面积大等特征。加之煤系地层具有岩体结构相对破碎、岩体质量较差、抗压强度低、变形模量小等特点,因此,废弃煤矿矿井及巷道利用存在诸多问题需要深入研究,例如:(1)稳定性不足,存在巷道坍塌和地面沉陷等问题;(2)埋深大带来的地下水处理难度大以及地下水污染环境等问题;(3)存在煤

矿瓦斯等有害气体处置问题等等。

对于大规模的废弃金属矿来说,其伴生岩层的岩体质量相对较好、抗压强度高,变形模量大,巷道及竖井的稳定性较高,改造的技术难度和相关环境问题相对较小,因此更适合于改造成为压气储能电站的地下储气库。

含水层地下储气库将压缩空气储存在地下含水层孔隙介质中。利用含水层孔隙介质作为储气空间相比于其他大规模储能技术在经济性方面具有优势^[11]。含水层储气库的最大不足是储气库的可控制性和可预测性较差,可适合做储气库的含水层勘探难度大,同时还存在含水层渗透性较低时限制了系统的注采规模;渗透性较高时容易引起空气和压力的损失,降低系统可持续时间等问题^[12]。

当对压气储能电站进行区域规划时,地下储气库的类型选择宜根据区域地质条件、是否存在可以利用的废弃矿井或含水层等情况,从技术和经济角度进行对比分析后进行决策。从现有技术角度,盐岩洞穴和硬岩洞穴两种型式的储气库相关研究成果更丰富一些。

2 岩穴储气库候选地层分析

岩穴地下储气库的候选地层主要包括盐岩地层和各种硬岩地层。

2.1 盐岩地层

盐岩地层因具有非渗透性好、密封性好以及被水溶蚀之后易开采等优点被广泛认为是地下高压储气库的理想建库地层。盐穴储气库对库址要求很高,对构造完整性、盐岩品位和分布、盖层密封性等均有特殊要求。此外,为提高建设效益,地下储气库的容积规模都较大,因此盐岩洞穴储气库需要建设在地下较厚的盐层或盐丘中。欧美地区因其盐岩地层构造完整、夹层少、厚度大、物性好而大量采用了盐穴地下储气库,目前国外共有 45 座盐穴储气库在运行,占储气库总数的 11.7%^[13]。

我国盐穴储气库建库地质条件以陆相层状盐岩为主,与国外盐丘建库相比,我国在建与拟建盐穴储气库多为层状盐层储气库,含盐地层盐岩品位低、夹层多、水不溶物含量高,导致盐腔造腔速度慢、腔体形态难以控制、成腔效率低等问题^[14-15]。目前,我国唯一投入运行的盐穴储气库为金坛地下天然气储气库,楚州、平顶山、云应等盐穴天然气

看,在我国建设硬岩岩穴地下储气库的压气储能电站选址基本不存在工程地质条件方面问题,可以较为容易地找到适用于建设地下储气库的各种硬岩地层。

3 硬岩洞穴储气库实验研究—湖南平江实验库简介

利用硬岩地层建设浅埋地下储气库在国内外均有研究^[18]。例如韩国学者就石灰岩地层建设高压地下储气库的可行性进行了大量的理论与数值分析研究^[19-21]。花岗岩在我国分布广泛,是压气储能浅埋地下岩穴储气库的理想岩层之一。为全面了解高压条件下花岗岩洞穴稳定性、变形特性及建库可行性,中国电建中南勘测设计研究院有限公司和长沙理工大学联合在湖南平江抽水蓄能电站的勘探平洞内建造了国内第一个浅埋衬砌岩穴地下储气实验库。

该实验库位于平江抽水蓄能电站地下厂房勘探平洞(PD4)内。勘探平洞内围岩主要由花岗岩和花岗片麻岩组成,部分洞段花岗伟晶岩脉较发育,洞室围岩结构面整体发育较弱。

实验库的几何尺寸及试验系统组成如图3所示。实验库埋深约110 m,长5 m,内径2.9 m。实验库围岩为完整性好的花岗岩,其实测抗压强度在78 MPa~130 MPa之间,弹性模量在47 GPa~50 GPa之间。储气库内设置混凝土衬砌(如图3所示),其作用一是为密封层施工提供平滑的表面;二是将密封层传来的高压压力传递给围岩。衬砌表面设置密封层。在实验库进口端部设置堵头承担高压压缩空气(设计最大压力10.0 MPa)的推力。

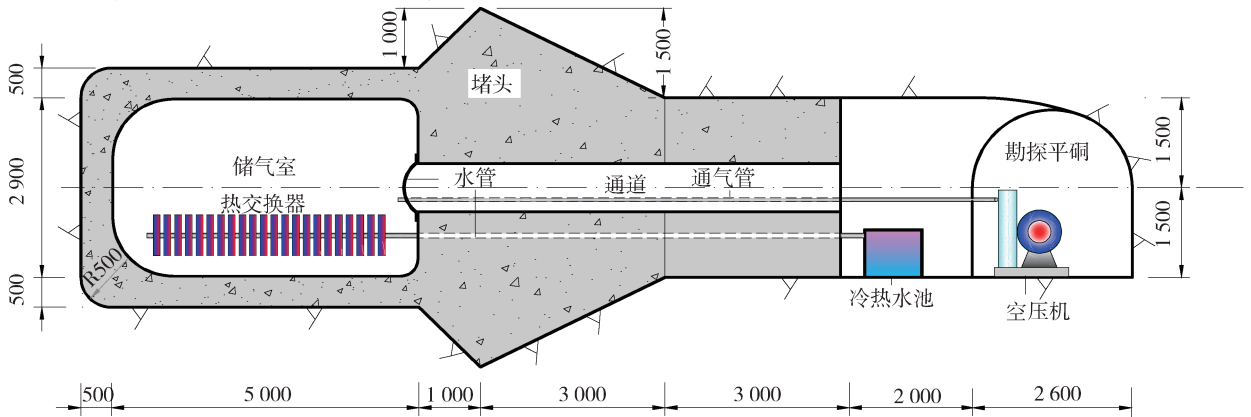


图3 实验库系统示意图(单位: mm)

Fig. 3 Test system of the pilot cavern(Unit: mm)

现场压气储能试验始于2018年7月31日8:00,终于2018年8月10日22:40。试验共进行11次循环。试验最大压力达到9.7 MPa,试验时间在8月4日;试验过程最长储气时间约7 h,试验时间在8月9日。每次压气循环的最大压力统计如表2所示。实际压气实验过程中储气室压缩空气压力变化过程如图4所示。

储气库内压缩空气压力在围岩中几乎引起了同步变形。洞顶和边墙围岩(衬砌与围岩接触部位)的位移变化全过程线如图5所示,其中在8月5日放气试验阶段因仪器故障未获得测量数据,完整实测数据共10组。压缩空气最大压力为9.7 MPa时,边墙最大径向位移值约0.37 mm,洞顶最大径向位移约为0.16 mm。由此可见,岩石质量好的情况下,储气库洞壁处围岩的变形量很小,对防止密封结构层的开裂有利。

表2 最大压力统计表

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P_{max}	6.17	8.12	8.03	9.70	8.54	4.14	4.25	4.24	4.09	4.18	8.71

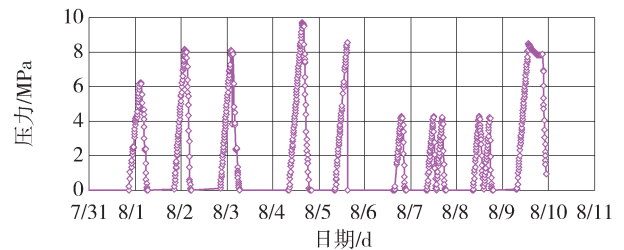


图4 储气室压力过程线

Fig. 4 Pressure process in the cavern during the test

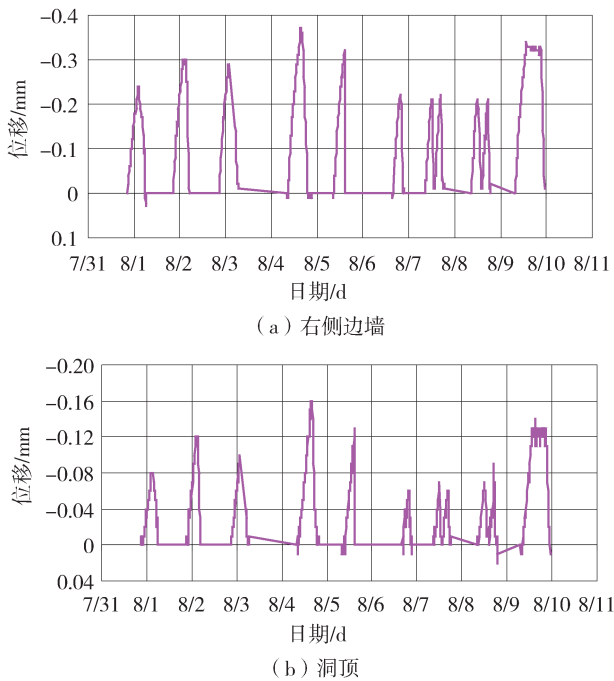


图5 洞周径向位移全过程线

Fig. 5 Radial displacement process on the cavern wall

图6为多点位移计M36-3钻孔中的几个典型测点在8月9日试验过程中的位移变化过程线。测点M36-3-1位于洞周围岩表面处;测点M36-3-3距离洞壁表面3.35 m,测点M36-3-5距离洞壁表面10.35 m。在内压作用下,洞壁处的围岩变形最大;距离洞壁越远,变形量越小。测点M36-3-5在试验过程中几乎没有产生新的附加变形,表明8.71 MPa的内压对超过距离洞壁10.0 m位置的围岩变形几乎不产生影响。

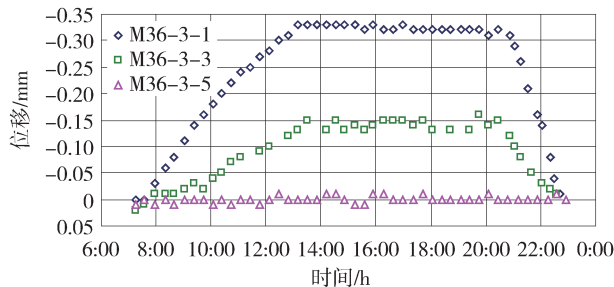


图6 不同位置径向位移对比

Fig. 6 Comparison of displacements at different location

实验成果表明:当地下岩穴储气库建造在围岩质量好的岩层中时,围岩变形量小,变形影响范围都有限,洞室结构安全性好,因此,在花岗岩地层中建设浅埋地下岩穴储气库是完全可行的。

4 岩穴储气库规划选址研究—以广东省为例

压气储能电站地下储气库的最大运行压力一般为7 MPa~10 MPa,部分电站的最高运行压力可达20 MPa。因此,运行压力大是地下岩穴储气库的显著特点之一。同时,压气储能电站一般采用一天内完成一个充气储能和放气发电的日循环运行方式,因此作为储气装置的地下储气库所承受的荷载变化频率高,储气库围岩及密封层结构的疲劳损伤效应强。为保证储气库密封结构的安全可靠性,地下储气库围岩变形及密封结构层开裂控制标准也较高,其目的是防止岩体过大变形对密封层结构开裂性能的影响,进而确保地下储气库的密封性。由此可见,压气储能电站能否成功建设的关键在于拟建电站地区是否存在适合于建造地下储气洞室的地层。尽管地下硬岩型岩穴储气库的修建造价比盐穴储气库高,但是盐穴储气库的建设需要存在盐层厚度大、且分布稳定的盐丘或盐层。这种特殊地质构造在我国仅仅存在于少数地方,在光伏能和风能丰富或用电需求量大而需建压气储能电站的地区则往往缺乏这类盐岩地质构造。为此,下文以广东省为例,从光伏能、风能以及广东地区的地层特点出发,探索压气储能电站地下岩穴储气库的选址方法。

4.1 选址影响要素

压气蓄能电站建设的主要目的:一是调节电力峰谷,二是改善电力品质。调节电力峰谷是为了缓解电力市场昼夜谷峰差异,调节电网在时空上的用电平衡。改善电力品质主要是为了提高风力发电和光伏发电等间歇性电源的不稳定性质,同时还存储大量电网供电高峰时段的弃风弃光电力。压气储能电站的建设目的是决定储气库区域选址的首要因素,而地下储气库的受力特征则决定其能否成功选址的关键因素。总体上,影响储气库选址的主要因素包括:

- 1) 是否是电力负荷中心或存在峰、谷用电量差。
- 2) 是否分布有光伏或风力能源等间歇性能源。
- 3) 区域地震、地质构造史及构造运动情况。
- 4) 工程地质及水文地质条件。
- 5) 是否存在可利用废弃洞穴。
- 6) 交通条件。

4.2 选址原则

岩穴地下储气库工程选址需满足安全可靠、技术可行性、经济合理性三大基本原则。在遵循岩穴地下储气库选点原则的同时,岩穴地下储气库选址规划还需重点考虑以下几点:

1) 储气库应尽量靠近电力使用负荷中心。储气库靠近负荷中心可以保证电站具有便利的接、送电条件。同时还需满足选点所在地峰谷用电量差别大,有富余电能供给且电价差别明显。

2) 储气库应尽量靠近间歇性电力供给地区。当压气蓄能电站系统与新型可再生能源如风电、光伏发电等相结合时,则应根据可再生能源所在位置确定选点位置,选点应尽可能靠近风电场、光伏发电厂,以降低电能传输损耗。

3) 储气库应选择在区域地质构造稳定,且无区域性的断裂带的地区,且拟建储气库区域地震烈度不宜大于8度。

4) 储气库应尽量选择在工程地条件。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。围岩质量高,变形能力小及强度高(I、II类围岩)。避免在岩溶发育、采空区、有害气体及地热异常的地层。

5) 储气库应具有良好的水文地条件。采用水封方式密封高压气体的储气库位置应具有丰富、稳定的地下水源。选择衬砌密封的地下储气库则需要布置在地下水相对贫乏的地区。

6) 岩穴地下储气库应优先考虑存在可利用废弃洞穴地区,降低建库工程造价。

7) 储气库宜选在交通条件便利的地区。良好的交通条件便于建筑材料,机组设备的运输,为电站建设奠定良好的外部基础。

4.3 选址规划流程

压气储能电站的规划大体分为两种类型:一是电力峰谷调节型;二是电力品质改善型。由于适合于建设硬岩洞穴型储气库的岩层类型多,在广东地区分布广泛,因此,当根据电力负荷调节需要建设电力峰谷调节型压气储能电站时,在技术角度上,地下储气库选址基本不存在地质条件限制因素,如果埋深足够大,总能找到适合建库的地层。然而,从经济角度看,适合建设储气库的岩层埋深过大在经济上将不具可行性,毕竟储能电站建设的首要任务是获取必要的经济效益。压气储能电站地面设施

占地规模相对较小,因此,电站规划选址一般可不考虑该因素的影响。地下储气库选址规划流程如图7所示。

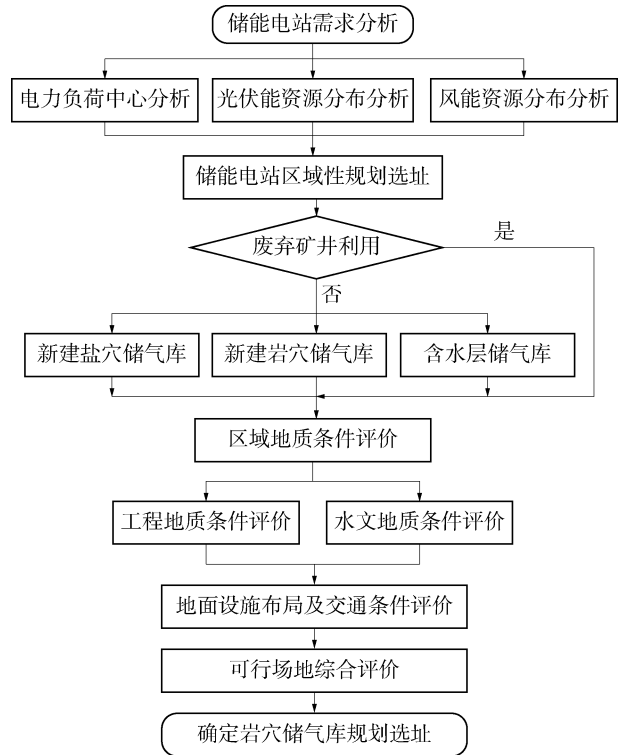


图7 岩穴洞库规划选址流程图

Fig. 7 Site selection chart for planning of underground cavern

如图7所示,压气储能电站地下岩穴储气库规划选址流程如下:首先,根据电网调峰的需求或间歇性电力组成情况论证建设储能电站的必要性;其次,分析区域电网中的电力负荷中心等级或可利用间歇性光伏能和风能的分布和容量大小,初步确定压气储能电站区域性规划选址;第三,进行规划选址区域内废弃矿井调查与可利用性评价;第四,确定压气储能电站场地下储气库类型;第五,电站场址区域地质条件评价,筛选出远离大断裂、地质构造活动带及地震烈度低的候选场址;第六,候选场址地层工程地质及水文地质条件评价;第七,根据储能电站地面设施布局地形要求和交通运输条件,进一步具体化地下储气库的候选地址,确定可行规划选址;最后,综合评价可行规划选址的各项经济及技术指标,按优先等级确定岩穴地下储气库建设的具体场址。

4.3.1 调峰型储能电站储气库规划选址示例

广州市是广东地区最大电力负荷中心之一,

在市区内基本不具备抽水蓄能电站条件, 压气储能电站是唯一可行的 100 MW 级大规模储能电站。根据现有的地质调查成果, 广州市内没有发现可以建造盐岩洞穴和含水层地下储气库的合适地层, 也没有可利用的大型废气矿井, 因此新建岩穴地下储气库是现阶段的唯一选择。图 8 为广州市硬岩地层分布图。由图 8 可知, 广州市行政区划内的佛岗、增城和新兴等地广泛分布有埋藏较浅花岗岩和砂岩地层, 这两种地层是新建地下岩穴储气库的理想地层。从区域地质构造角度上, 上述三地均无大的断裂带通过, 地震烈度为 7 度区。因此, 上述三地是广州市 100 MW 级大规模储能电站选址的首选。

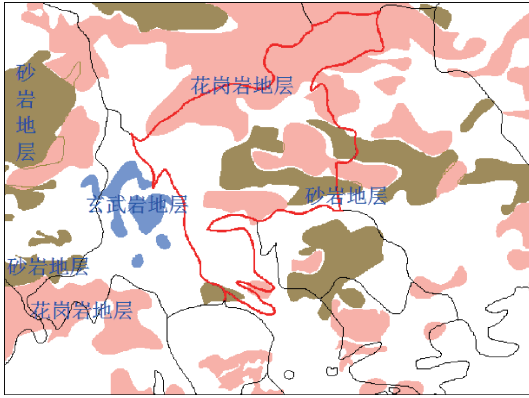


图 8 广州市地质图

Fig. 8 Geologic map of Guangzhou city

4.3.2 电力品质改善型储气库区域性规划选址示例

1) 依据间歇性能源的分布初步确定压气储能电站的需求规划选址。广东风能蕴藏量丰富, 粤西北及沿海一带及岛屿风速大, 风力发电可装机容量达 6 GW^[18]。年均风速大于 8 m/s 区域主要分布如图 9 所示。广东省也是中国光资源最丰富的地区之一, 年太阳总辐射量在 4.2 GJ/m² ~ 5.4 GJ/m² 之间, 全省年平均日照时数 1 745.8 h, 年均日照小时数大于 >2 700 h 分布区域如图 10 所示。作为改善电力品质的压气储能电站规划布局, 应尽可能考虑多种间歇性能源的综合利用。通过对比分析后可知: 广东省内年均日照小时数大于 >2 700 h 分布区域, 且年均风速大于 8 m/s 地区(如图 11 所示)主要有: 韶关西南部、韶关南部、韶关、广州东北部、清远西北、茂名东北, 湛江中部、潮州东南部等地区。这些地区都属于压气储能电站布局的优先优选地区。

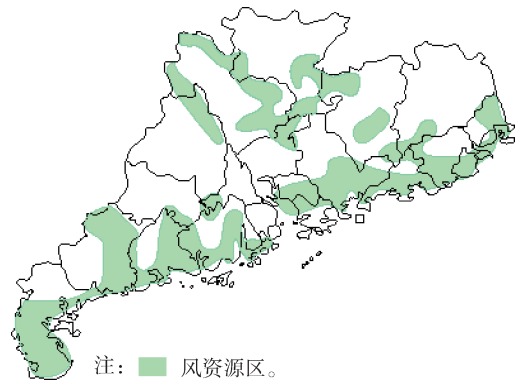


图 9 风能分布图(风速 >8 m/s)

Fig. 9 Distribution of wind energy (velocity >8 m/s)

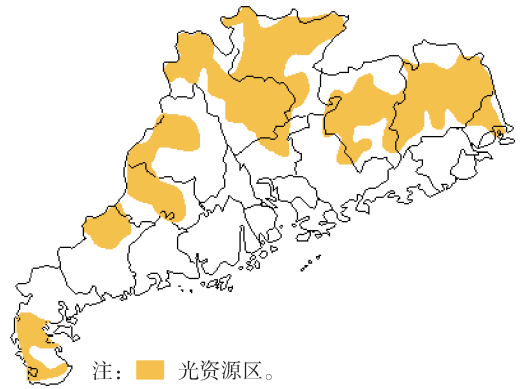


图 10 年均日照小时分布图(>2 700 h)

Fig. 10 Distribution of annual sunshine hours (>2 700 h)

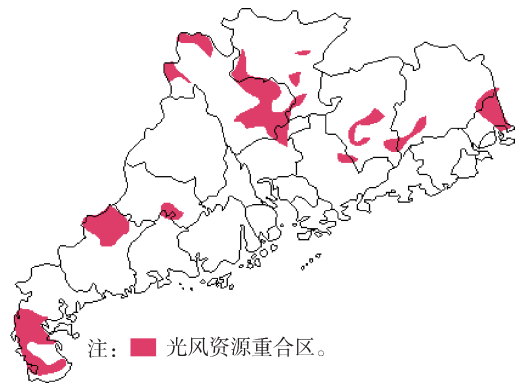


图 11 风光能源分布叠合区

Fig. 11 Superposition area of wind energy distribution

2) 依据地震条件论证压气储能电站按需求确定的规划选址可行性。广东省地震烈度主要划分为八度(0.20 g)、强七度(0.15 g)、七度(0.10 g)和六度(0.05 g)等 4 个区域, 如图 12 和图 13 所示。八度区主要分布在徐闻南部和潮汕地区的东部, 占广东省土地面积约 1.72%; 强七度区主要分布在徐闻

北部、阳江南部和潮汕中东部,占广东省土地面积约3.73%;七度区主要分布在广东省沿海一带,覆盖了汕头、潮州、惠州、深圳、东莞、广州、中山、珠海、茂名、湛江等城市的全部或部分,形成一条从东至西连续分布的0.10 g沿海条带区,占广东省土地面积约26.47%;六度区主要分布在0.10 g沿海条带区以北的全部区域,占广东省土地面积约68.08%。按照拟建储气库区域地震烈度不宜大于8度的原则,广东省98%以上的地区建设地下储气库均不受地震条件的影响。在上述根据风能和光伏能分布综合确定的规划选址中,由于潮州东南部地区地震烈度在八度或八度以上,因此该区不适宜建设压气储能电站地下储气库。

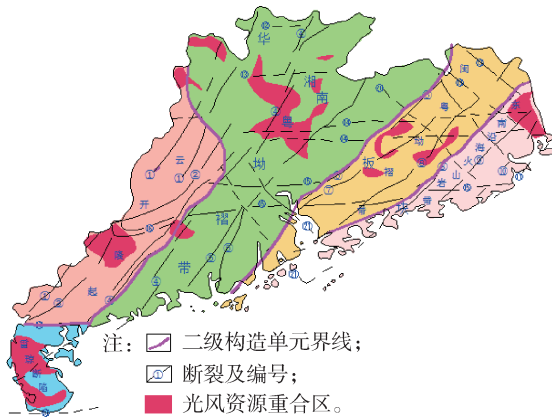


图12 广东省主要地质构造

Fig. 12 Main geologic structure of Guangdong province

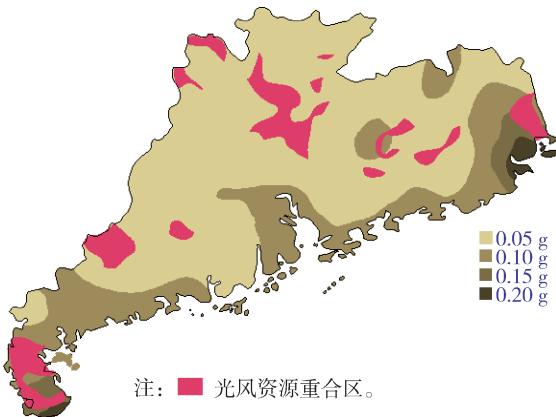


图13 广东省地震动峰值加速度区划图

Fig. 13 Block plan of seismic peak ground acceleration in Guangdong province

3) 依据区域宏观地质条件进一步论证需求规划选址的可行性。广东地区岩浆岩、变质岩和碳酸岩等岩性组广泛分布,包括各期侵入岩和喷出岩,多

为坚硬—较坚硬层状、块状岩体,干抗压强度47.66 MPa~181.03 MPa。各种砂岩等变质岩抗压强度12.7 MPa~265.0 MPa之间。灰岩、白云质灰岩等碳酸岩为坚硬—较坚硬层状岩体,抗压强度一般在61.6 MPa~123.2 MPa之间,岩溶发育弱—中等。广东地区广泛分布的硬岩岩组及其良好的抗压强度,为新建岩穴地下储气库提供了很好的工程地质条件。在满足地质构造和地震烈度要求的候选规划选址中,韶关西南部、韶关南部、韶关、广州东北部、清远西北、茂名东北,湛江中部均分布有大量浅埋和地表出露的花岗岩或砂岩等硬岩地层,如图14所示。因此,这些候选规划区域选址都是可行的。

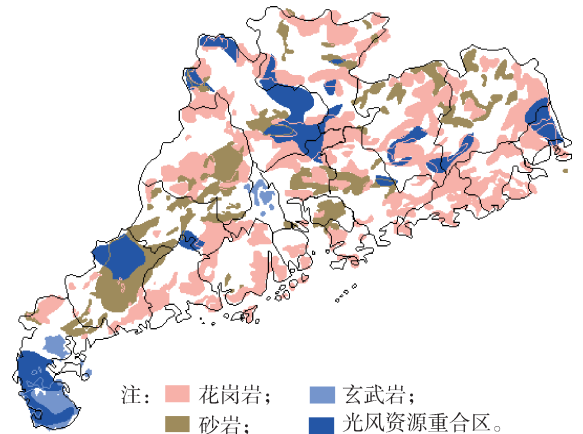


图14 广东省硬岩地层分布图

Fig. 14 Distribution of hard rock stratum in Guangdong province

4) 依据间歇性能源的装机规模及能源分布几何中心位置确定电站的可行规划选址。结合间歇性风能和光伏电站的规划和实际装机规模大小,按间歇性能源的分布几何中心位置确定电站的初选规划选址。按几何中心位置确定电站的初选规划选址可以减小电力传输线路距离,最大程度提高电站效益。

5) 依据场地地质勘探成果,最终确定地下储气库的位置。压气储能电站规划选址确定后,应对可行的拟选场址进行地质勘探,然后结合工程及水文地质条件的勘探成果,确定地下储气库的具体位置。

5 结论

地下储气库选型选址问题是压气储能电站建设规划需要解决的首要问题之一。尽管大规模压气储

能电站建设规划选址的范围与抽水蓄能电站相比要广泛得多,但是从技术经济合理性角度来看,地下储气库类型和位置的确定仍然受到诸多因素的影响。获得的一些认识如下:

1)对比分析了压气储能四种地下储气库类型的优缺点,结合我国地层分布条件,提出了盐岩和硬岩洞穴是我国现阶段建设大规模压气储能电站的优选地下储气库类型。

2)对我国境内各种硬岩地层分布的研究表明,大规模压气储能电站地下储气库建设所需的硬岩在我国分布范围广泛,电站规划选址较容易。

3)平江压气储能地下岩穴储气实验库的现场试验成果表明,花岗岩地层中采用浅埋地下储气库的方式在安全及技术上是可行的。

4)分析归纳了压气储能电站地下储气库选址的影响因素,提出了地下储气库选址的具体原则和规划选址流程,并以广东省为例进行了压气储能电站规划选址的示范研究,提出了适合于建设压气储能电站地下储气库的区域选址建议。

参考文献:

[1] 余耀,孙华,许俊斌,等.压缩空气储能技术综述[J].装备机械,2013(1):68-74.
YU Y, SUN H, XU J B, et al. Technical review of compressed air energy storage (CAES) [J]. Equipment Machinery, 2013 (1): 68-74.

[2] 张新敬,陈海生,刘金超,等.压缩空气储能技术研究进展[J].储能科学与技术,2012,1(1):26-40.
ZHANG X J, CHEN H S, LIU J C, et al. Research progress in compressed air energy storage system: a review [J]. Energy Storage Science and Technology, 2012, 1(1): 26-40.

[3] 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.

[4] OLDENBURG C M, PAN L. 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.

[5] 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.

[6] 王骏. 新能源发展研究 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(12): 1-7.
WANG J. Discussions on new energy development [J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(12): 1-7.

[7] 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.
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.

[8] 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.

[9] CROTOGINO F, MOHMEYER K U, SCHARF R. Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation [C]//Solution Mining Research Institute. Spring 2001 Meeting, Orlando, Apr. 15-18, 2001. Florida, USA: Solution Mining Research Institute, 2001.

[10] 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.
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 R&D, 2013, 33(4): 37-39+65.

[11] ALLEN R D, DOHERTY T J, FOSSUM A F. Geotechnical issues and guidelines for storage of compressed air in excavated hard rock caverns: PNL-4180 [R/OL]. Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1982. <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/5437632-Pqfu9J/>.

[12] GUO C, ZHANG K, LI C, et al. Modeling studies for influence factors of gas bubble in compressed air energy storage in aquifers [J]. Energy, 2016(107): 48-59.

[13] 杨伟,王雪亮,马成荣.国内外地下储气库现状及发展趋势[J].油气储运,2007,26(6):15-19+64.
YANG W, WANG X L, MA C R. Current status and development trend of underground gas storage at home and abroad [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26(6): 15-19+64.

[14] 颜頄琪,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.
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.

[15] 颜頄琪,冉莉娜,韩冰洁,等.盐穴地下储气库库址地质评价与建库区优选[J].西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(1):57-64.
WANYAN Q Q, R L, HAN B J, et al. Study on site selection and evaluation of underground gas storage in salt cavern [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2015, 37(1): 57-64.

[16] CARRANZA-TORRES C, DONALD F. Geomechanical analysis of the stability conditions of shallow cavities for Compressed Air Energy Storage (CAES) applications [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2017, 3(2):

- 131-174.
- [17] 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.
- [18] ZIMMELS Y, KIRZHNER F, KRASOVITSKI B. Design criteria for compressed air storage in hard rock [J]. *Energy & Environment*, 2002, 13(6): 851-872.
- [19] KIM H, RUTQVIST J, JEONG J, et al. Characterizing excavation damaged zone and stability of pressurized lined rock caverns for underground compressed air energy storage [J]. *Rock Mech. Rock Eng.*, 2013, 46(5): 1113-1124.
- [20] KIM H, RUTQVIST J, KIM H, et al. Failure monitoring and leakage detection for underground storage of compressed air energy in lined rock caverns [J]. *Rock Mech. Rock Eng.*, 2016, 49(2): 573-584.
- [21] KIM H, RUTQVIST J, RYU D, et al. 2012, 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.
- [22] 邓锋. 广东风能资源及风力发电的前景 [J]. *科技广场*, 2011(3): 210-212.
DENG F. Guangdong wind energy resources and the prospect of wind power [J]. *Science Mosaic*, 2011(3): 210-212.

作者简介:



JIANG Z M

蒋中明(通信作者)

1969-, 男, 重庆璧山人, 长沙理工大学水利工程学院教授、博士生导师。主持和参与国家自然科学基金(面上和重点项目)、科技支撑计划及各类重大工程科技项目40余项, 其中国家级5项; 主要科研成果获省部级三等奖3项; 发表科研论文80余篇, 其中SCI、EI检索40余篇, 2篇论文入选科技部“领跑者5000—中国精品科技期刊顶尖学术论文”; 获授权发明专利12项。目前主要从事压气储能、石油与天然气等能源大规模地下储存技术开发及安全评价方面的研究工作(e-mail) zzmjjiang@163.com。

唐栋

1988-, 男, 湖南衡阳人, 长沙理工大学水利工程学院讲师, 武汉大学水利水电工程博士, 主要从事水工结构及岩土工程安全评价方面的研究(e-mail) tangdong@csust.edu.cn。

李鹏

1987-, 男, 山西长治人, 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司高级工程师, 中南大学土木工程专业博士, 主要从事压缩空气储能、工程(水利、水环境、洞库、砂石)信息化、岩土工程勘察设计及监控(e-mail) 491003275@qq.com。

李毅

1988-, 男, 湖南长沙人, 长沙理工大学水利学院副教授, 硕士生导师, 武汉大学水工结构工程博士, 主要从事水电与岩土工程多场多相耦合理论研究工作(e-mail) liyi0217@163.com。

项目简介:

项目名称 国家自然科学基金面上项目“压气储能电站地下储气库围岩多场耦合损伤特性及稳定性研究”(51778070)

承担单位 长沙理工大学

项目概述 针对压缩空气储能电站地下储气库围岩多场耦合损伤特性及稳定性等科学问题, 开展温度应力同步循环作用下的耦合损伤演化特性试验研究, 揭示气渗条件下的围岩渗流传热机理及多重循环荷载作用下的累积损伤演化规律, 构建地下储气库非等温非达西渗流应力耦合损伤模型以及动态热-力学边界数学模型, 进而利用数值仿真手段揭示地下储气库围岩的多场耦合损伤特性及稳定性变化规律, 并提出储气库内压缩空气的负温形成条件与围岩负温控制方法, 为压缩空气储能电站大规模地下储气库建设与运行提供理论和技术支持。

主要创新点: ①揭示空气渗流条件下裂隙岩体的渗流非同步传热机制, 建立裂隙岩体非等温渗流传热的体积对流换热模型; ②探明温度和应力协同作用下的花岗岩损伤演化机理, 揭示温度和应力频繁循环作用下的累积损伤规律, 建立损伤累积数学模型; ③建立包含LTNE效应、体积换热效应、损伤累积效应的裂隙岩体非等温非达西渗流力学损伤耦合模型, 提出能反映储气库围岩和压缩空气之间换热互馈关系的动态热力学边界处理方法。

(责任编辑 郑文棠)