

# 压缩空气含水层储能系统设计及可行性分析

郭朝斌<sup>1</sup>, 张可倪<sup>1</sup>, 李 采<sup>2</sup>

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100875)

**摘要:** 采用数值模拟方法,以3 MW 储能规模为例,建立水平地层埋深800 m、渗透率 $0.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 的压缩空气地下含水层储能模型,对初始气囊及系统循环过程中压力、气相饱和度、系统循环次数等参数进行分析。结果表明:经历完整一次循环后,地层中压力和气相饱和度变化较小;随着循环的继续,地层中可供储能释能循环的有效气相体积缓慢减少;周循环过程压力变化范围较大,对储能系统要求较高。含水层作为储气库进行压缩空气储能具有可行性,应根据实际地质条件进行相应系统设计。

**关键词:** 压缩空气储能; 含水层; TOUGH2; 数值模拟

**中图分类号:** TK02

**文献标志码:** A

## Subsurface System Design and Feasibility Analysis of Compressed Air Energy Storage in Aquifers

GUO Chaobin<sup>1</sup>, ZHANG Keni<sup>1</sup>, LI Cai<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Institute of Geo-environmental Monitoring, Beijing 100875, China)

**Abstract:** A concept model for compressed air energy storage system in aquifer (at a depth of 800 m and with a permeability of  $0.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ) was designed and investigated through numerical simulations. The pressure variation, gas plume evolution and system cycle times during the formation of initial gas bubble and system daily cycle were analyzed. The modeling results show that there is a small change in pressure and gas saturation after each daily cycle. However, the total effective gas volume in gas bubble decreases with cycle continuing. Make-up gas should be injected into gas bubble during daily cycle or carry out another gas bubble injection after cycle is ceased. The comparisons of daily cycle and weekly cycle scenarios indicate that weekly cycle needs higher requirement for system. Aquifers as storage tank for compressed air energy storage is feasible and should be designed according to the specific geological conditions.

**Key words:** compressed air energy storage; aquifers; TOUGH2; numerical simulation

压缩空气储能是基于燃气轮机的储能技术,其原理是将燃气轮机的压缩机和涡轮机分开,在储能时,用电能驱动压缩机将空气压缩并存储于储气容器内,在释放能量时,高压空气从储气室释放进入燃烧室助燃,燃气膨胀驱动涡轮做功发电<sup>[1]</sup>。

但是,大规模的储能系统需要特殊的地质条件来建造大型储气库,如岩石洞穴、盐洞、废弃矿井等,这大大限制了压缩空气储能的应用范围<sup>[2]</sup>。地下水含水层作为二氧化碳地质封存和天然气地下储存的介质被广泛应用,证实含水层可以对气体进行有效储存<sup>[3]</sup>,而且含水层分布广泛。国外一些初步研究和试验也表明含水层可以作为压缩空气储能的“储气库”,如果采用地下含水层作为“储气库”,就可以大大地减少压缩空气储能所受到的地质条件限制。

选择地下含水层作为压缩空气储能的储气库,主要针对地下部分进行压缩空气储能系统设计。地下系统部分主要包括初始气囊的形成以及储能释能的循环,利用数值模拟的方法对初始气囊的形成及系统储能释能循环过程中压力、气相饱和度等进行分析。

## 1 研究现状与进展

压缩空气储能的第1个专利于1949年在美国问世,经历了长达半个世纪的实践和探索,由于受地质条件及其他一些因素的限制,一直没有被广泛应用。目前世界上两大成功压缩空气储能电厂在技术方面积累了丰富的经验<sup>[2,4-7]</sup>。已经运行的压缩空气储能电站都是采用洞穴,其气密性好,最为合适。而如果没有合适的天然洞穴,需要人工改造或者建造

收稿日期: 2015-09-08

基金项目: 上海市科委项目(13dz1203103); 中央高校基本科研业务费专项资金(2015KJJC17)

第一作者: 郭朝斌(1989—), 博士生, 主要研究方向为多相流体数值模拟。E-mail: cugbgcb@163.com

通讯作者: 张可倪(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为多相流体数值模拟。E-mail: keniz@tongji.edu.cn

储气库的话,成本将大大增加.1980年美国能源部在美国开展过一个广泛的压缩空气储能研究计划,该研究计划在美国伊利诺伊州的匹兹菲尔德开展了向某含水层注入和抽提空气的试验来验证利用含水层进行压缩空气储能的可行性<sup>[8]</sup>.试验结果确认空气注入到含水层中可形成一个大的气囊,并可以一定速率将空气抽出进行发电.近年,美国爱荷华州市政公用设施联合协会提出一个压缩空气储能项目,该项目直接和爱荷华州的一个风电厂配合,其空气储存介质选择地下含水层,这是迄今为止第1个采用孔隙含水层储存空气的项目,由于储能规模和经济性方面的因素,该项目处于暂停状态.

近年来国内外对于压缩空气储能相关的研究主要集中在储气库的选择、新型储能系统的优化以及储能效率、经济性分析等方面.关于含水层压缩空气储能的研究以基本物理过程、存储机制和利用数值模拟选择缓冲气为主.胡贤贤等<sup>[3]</sup>对当前国内外含水层压缩空气储能技术进行了总结,包括项目、技术概况以及经济成本的分析等.Kushnir等<sup>[9]</sup>基于达西定律及部分假设前提下建立了在含水层中进行压缩空气储能的数学模型,并通过解析求解,对地层参数、钻孔完井程度等进行了敏感性计算,分析这些参数对压力波动的影响.最近,美国劳伦斯伯克利国家实验室的Oldenburg等<sup>[10]</sup>提出一种利用CO<sub>2</sub>作为储能缓冲气体的方法,当CO<sub>2</sub>从气相过渡到超临界相的时候,它比空气具备更大的压缩性能.另外,该实验室的科学家通过构建模型对地下水及两相流方面进行耦合模拟,包括研究开发对含水层和钻孔流动耦合的多相流数值模拟方法及模拟软件等<sup>[11]</sup>.

我国的空气压缩储能技术起步较晚,目前尚无实际运行的商业压缩空气储能站<sup>[2,12]</sup>.2009年,中国科学院工程热物理研究所国际上首次提出并开始研发具有完全自主知识产权的超临界压缩空气储能系统.国内第1个兆瓦级示范装置于2011年初在中科院工程热物理研究所开工建设,于2013年通过专家组验收.Guo等<sup>[13]</sup>通过数值模拟方法研究渗透率对压缩空气地下含水层蓄能过程中初始气囊形成过程的影响,表明存在合适范围渗透率利于系统循环的继续.目前限制我国压缩空气储能技术推广的主要因素之一是缺少大容量的储气装置(一个100 MW的储能电站需要10万立方米的储气装置).

## 2 压缩空气地下含水层储能地下部分系统设计

与传统地下岩洞压缩空气储能系统相同,在发

电较多阶段进行空气压缩储能,用电高峰阶段释放压缩空气进行发电,所不同的是选择地下含水层作为储气库,如图1所示.

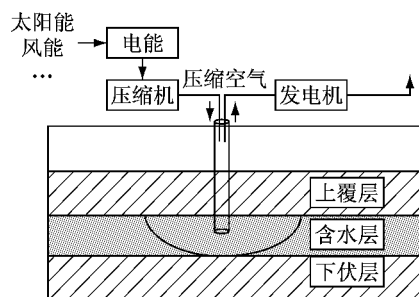


图1 压缩空气地下含水层储能系统设计示意图

Fig.1 Schematic of compressed air energy storage system in aquifer

压缩空气含水层储能地下系统主要包括初始气囊的形成及后续储能释能循环2个阶段.在开始循环前,需要注入大量的缓冲气体形成初始气囊,该部分缓冲气体主要有2个作用:一是为抽气过程提供较快的压力支持;二是在抽气的过程中防止抽取出液态水,影响系统发电.参考现有成熟的天然气储存工程,不同地质结构对于初始气囊的形成具有重要的影响,地质结构中背斜更有利于气体的封存.如果在实际场址选择中,考虑选择水平含水层作为储气库,将大大扩大压缩空气含水层储能的应用范围.因此,在本文中以水平含水层作为储气库进行系统设计.

在初始气囊形成后,进行系统储能释能循环.在压缩空气含水层储能中,系统循环可设计为日循环或周循环.以日循环周期为例进行研究,储能规模设定为3 MW.单次循环过程中,储能阶段的注气量和释能阶段抽气量相同.根据德国洪托夫电站运行时间周期,设计循环过程如图2所示.在储能阶段,如太阳能、风能发电较多时,设计储能时长为12 h,注气速率为 $2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在用电高峰时期释能发电3 h,抽气速率为 $8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ,中间系统处于关闭阶段.

## 3 模型建立与分析

### 3.1 模型建立

采用TOUGH2-EOS3/MP模拟器<sup>[14]</sup>进行压缩空气地下含水层储能系统的模拟研究.TOUGH2是美国劳伦斯伯克利国家实验室开发的用于地下多相流体运移如地热、二氧化碳地质封存、天然气水合物等的模拟器,被世界众多研究机构广泛使用.

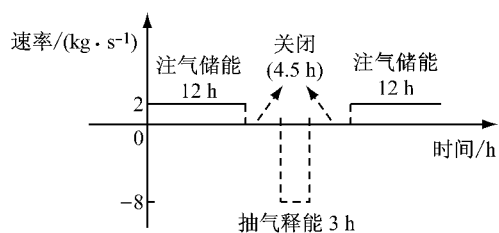


图 2 日循环周期设计示意图

Fig.2 Schematic of daily cycle design

建立理想化基本模型,选择平面半径为 2 km 的研究区域并进行剖分,形成如图 3 所示的网格.注入目标层位于模型中部,厚 50 m,主要地层参数如表 1 所示.初始条件根据重力平衡计算得到,地温梯度假设为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ,边界条件为第 1 类边界条件.压缩空气注入参数如表 2 所示.

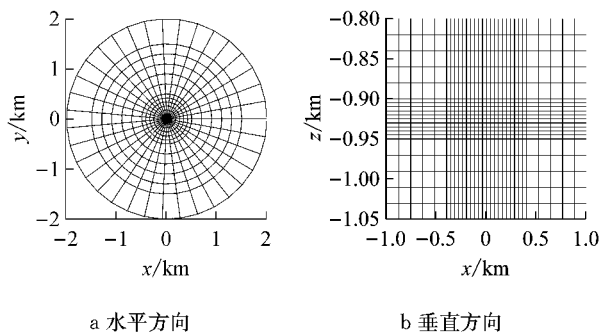


图 3 基本模型模拟范围网格剖分示意图

Fig.3 Model domain and mesh discretization

表 1 模型主要地层参数

Tab.1 Properties of the basic model

地层参数	数值
注入层厚度/m	50
模型顶部埋深/m	800
孔隙度	0.20
渗透率/ $\text{m}^2$	$0.50\times 10^{-12}$
地层颗粒密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$2.60\times 10^3$
地层压缩系数/ $\text{Pa}^{-1}$	$1.00\times 10^{-10}$
饱和地层导热系数/ $(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	2.51
毛细压力( $P_{\text{cap}}$ )和相对渗透率( $k_r$ ) 计算函数	Van Genuchten 方程

表 2 模型主要注入参数

Tab.2 Injection parameters of the basic model

参数名	参数值
初始气囊输入速率/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	10
初始气囊注入时间/d	20
循环过程注气速率/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	2
循环过程抽气速率/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	8

### 3.2 结果分析

对模拟结果的分析主要集中于对地层中气饱和度和、地层压力(注入点与监测点)、储能系统循环时间等的分析.

#### 3.2.1 压力分析

图 4 所示为初始气囊形成过程中注入点( $r=0.5\text{ m}$ )及两处不同监测点位置压力随时间变化图.在注入点附近,压力在瞬间注气后急剧增大,然后随着注气的逐渐稳定,压力趋于平稳.监测点 1 处( $r=23.0\text{ m}$ )压力变化趋势平缓,在较远距离的监测点 2 处( $r=142.7\text{ m}$ ),压力随着注气逐渐增加,增速减缓.

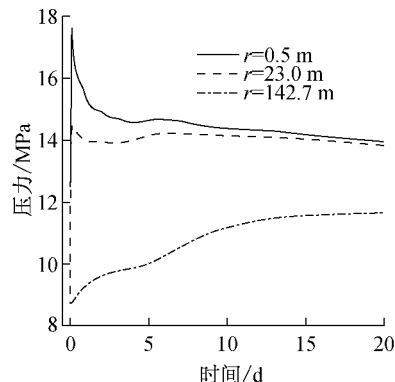


图 4 初始气囊形成过程中不同位置压力变化图

Fig.4 Pressure variation of three locations during the formation of initial gas bubble

在储能释能循环过程中,以 1 600~1 660 h 的 3 个具体循环为例,分析注入点及两处监测点压力变化过程,如图 5 所示.一次完整的储能释能循环包括注气储能、停注、抽气释能、停注 4 个阶段,图中黑色实线表示注入点压力在一次完整循环过程中的变化.在状态点 1 开始注气储能,持续 3 h 到达状态点 2,压力逐渐增大;状态点 2 到状态点 3 为停注 4.5 h 阶段,压缩空气驱替地下水向四周运移,压力逐渐减小;在状态点 3 到状态点 4 的释能阶段,随着连续的抽气,压力骤降,降速约  $0.8\text{ MPa}\cdot\text{h}^{-1}$ ;之后进入地层恢复阶段,对应图中状态点 4 到状态点 5,此时周围地层压力高于注入点压力,地下水驱替压缩空气

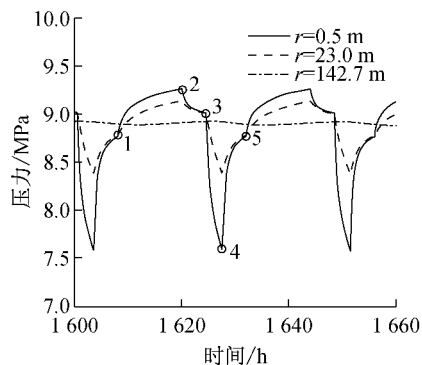


图 5 循环过程中压力变化图

Fig.5 Pressure variation during three detail cycles (1 600~1 660 h)

向井孔附近运移,压力逐渐恢复.监测点1处( $r=23.0\text{ m}$ )压力变化趋势与注入点相同,在较远距离的监测点2处( $r=142.7\text{ m}$ ),其压力无明显变化.

系统循环中的抽气注气过程压力的影响主要集中在井孔附近,不同的注气量,其压力影响范围不同,但总体压力影响范围较小.在开始定量注入后,井孔及周围地层压力积聚增大,如果注气速率较大,则瞬时注入压力会超过地层破裂压力,导致地层不稳定.为避免瞬时压力积聚较大,同时保证相同量压缩空气注入,在初始气囊形成过程中,可分阶段地逐

渐增大注气速率进行注入.

### 3.2.2 气相饱和度变化分析

图6所示为对应一次完整循环过程中地层气相饱和度分布变化图.以井孔下部气相饱和度  $S_g=0.2$  晕下边缘位置为例,图6a中循环开始时气相饱和度和晕的下边缘位于 $-923.2\text{ m}$ ,在开始注气后,井孔附近气相增加,晕的下边缘到达 $-928.0\text{ m}$ ,如图6b所示.在抽气过程结束后,晕的下边缘上升到 $-922.0\text{ m}$ ,如图6c所示.在该次循环结束后晕的下边缘恢复到 $-923.2\text{ m}$ 左右的位置.

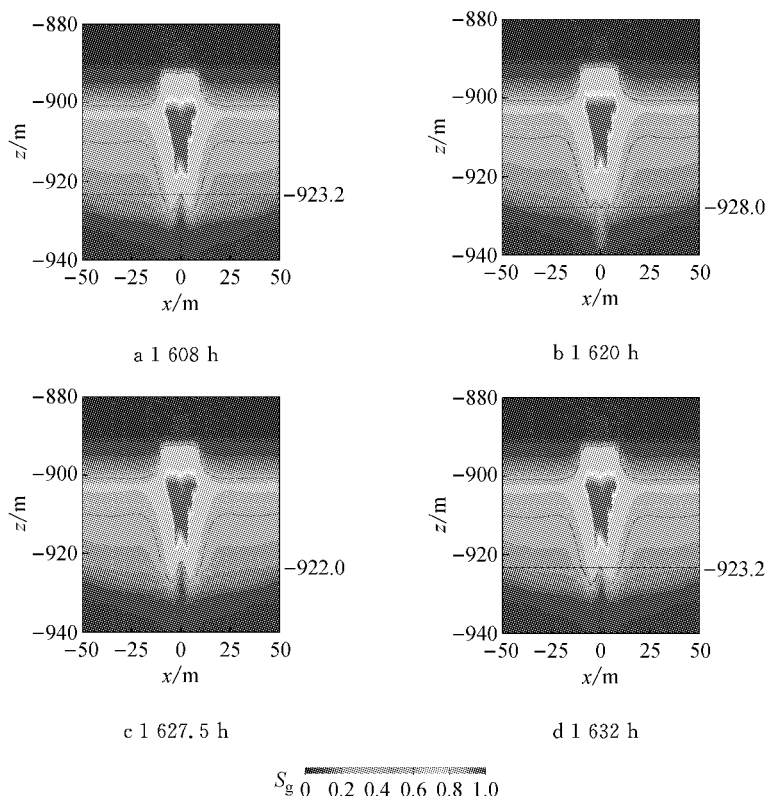


图6 循环过程中气相饱和度晕图

Fig.6 Compressed air plume evolution during one cycle of injection and production

这表明在经历完整一次循环后,地层中气相饱和度变化较小,结合压力变化分析结果,随着循环的继续,地层中可供储能释能循环的有效气相体积缓慢减少.

### 3.2.3 系统循环时间分析

随着循环的继续,初始气囊中气体向四周运移,且气囊边缘处气体逐渐溶解于水中,有效气体减少,当减少到无法满足循环时,循环结束.能量随着循环的继续不断损失,初始气囊中气体可供系统持续循环的次数称为系统循环次数.

基本模型中系统可循环111.79 d.为使系统可持续循环,设计2种方法补充含水层中有效气体:一

种方法为在日循环注气过程中多注入一定量气体;另一种方案为在地层中有效气体不足时,进行另一次气囊的注入,从而维持系统可持续循环.对2种方案进行模拟分析,在日循环过程注气补充方案中,设计不同注气速率(基本模型中注入速率为  $2\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ),如图7所示,从  $2\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  增大到  $6\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .随着注气速率的增大,单次初始气囊可供系统循环次数呈对数形式增大,当增大到一定程度后,系统循环次数增量减小.这是因为在循环进行过程中,补充过量的气体导致注入点与四周压力产生较大压力差,能量损失较大,导致地层中可利用气体达到饱和后不再增加.

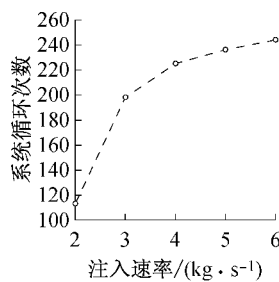


图 7 相同初始气囊不同循环注气速率对应系统循环次数  
Fig.7 System cycle time variation with daily make-up injection under the same initial gas bubble

另一种方法为在循环停止后补充与初始气囊相同量的压缩空气,模拟结果如图 8 所示.从图中可以看出,初始气囊可供循环次数最大,补充气囊可供循环的次数差异不大,约为 97 次.初始气囊比补充气囊系统循环次数大的原因是因为初始气囊形成过程中其气相半径较小,气体损失较少,当补充气囊注入后,地层中气体单位时间损失量达到稳定.如图 9 所示,在相同循环次数下,补充气囊的井底气相饱和

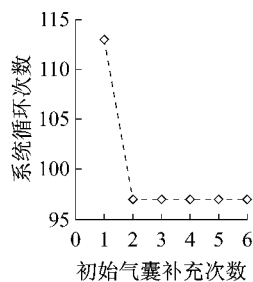


图 8 初始气囊补充次数与系统循环次数(每次补充气囊后的循环次数)关系

Fig.8 System cycle time variation with make-up gas bubble formation (System cycle times in this figure mean the cycle times after one gas bubble formed)

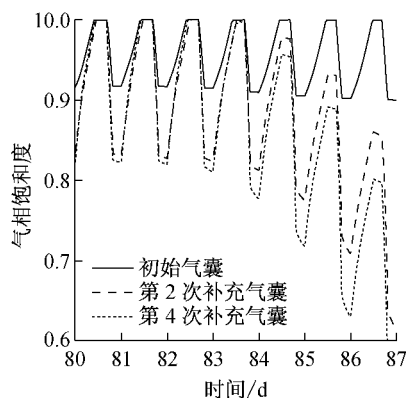


图 9 不同补充气囊下井底气相饱和度变化图

Fig.9 Gas saturation variation under different makeup gas bubble conditions

度低于初始气囊的井底饱和度.

### 3.2.4 含水层压缩空气储能周循环系统设计

在实际应用中,储能释能可根据需要进行周循环,如周六日储能,周一到周五用电高峰期间释能,根据此循环周期情景,设计如表 3 所示的压缩空气地下含水层储能周循环系统.与日循环系统设计类似,每周的注气量与抽气量相同.

表 3 压缩空气地下含水层储能周循环系统设计参数

Tab.3 Parameters of the weekly cycle in compressed air energy storage system in aquifer

项目	周六~周日	周一~周五
每天储能时间/h	12	0
注气速率/(kg·s <sup>-1</sup> )	5	0
每天释能时间/h	0	3
抽气速率/(kg·s <sup>-1</sup> )	0	8

对比日循环和周循环情景模式下井底压力变化,如图 10 所示.周循环模式下储能阶段发生在周末,故循环开始阶段压力积聚大于日循环模式,释能初始阶段最高压力和最低压力高于日循环模式,随着释能过程逐天降低,在结束阶段最高压力和最低压力均小于日循环过程.整个周循环过程压力变化范围较大,对地面发电设备需求较高.

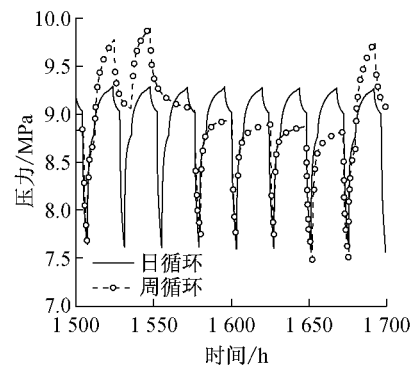


图 10 周循环与日循环压力变化对比图

Fig.10 Pressure variation of weekly cycle and daily cycle

## 4 结语

以地下含水层作为储气库进行压缩空气储能系统的设计,考虑地下系统部分中初始气囊的形成及系统储能释能的循环过程.利用数值模拟方法对系统过程中压力、气相饱和度及系统循环次数进行分析,结果证实了含水层作为储气库进行压缩空气储能的可行性.基本模型中,初始气囊可供系统循环 111.79 d,利用 2 种方式对气囊的进行补充可使得系统循环继续.对日循环和周循环情景模式进行模型

对比分析,结果表明周循环情景模式下压力变化范围相对日循环大,地面配套设备要求相应提高.采用地下含水层作为储气库,不仅在地质条件上更容易获得,且成本还可以进一步降低.含水层压缩空气储能还有大量的基础问题需要探讨,包括不同参数对系统储能规模及效率等影响的研究.

### 参考文献:

- [1] 姜楠. 退役矿井在可再生能源开发中再利用的研究与思考[J]. 可再生能源, 2014, 32(6): 896.  
JIANG Nan. Study on recycling of ex-service mine shaft in developing renewable energy [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(6): 896.
- [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.  
ZHANG Xinjing, CHEN Haisheng, LIU Jinchao, *et al.* Research progress in compressed air energy storage system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2012, 1(1): 26.
- [3] 胡贤贤, 张可霓, 郭朝斌. 压缩空气地下咸水含水层储能技术[J]. 新能源进展, 2014, 2(5): 390.  
HU Xianxian, ZHANG Keni, GUO Chaobin. Compressed air energy storage using saline aquifer as storage reservoir [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2(5): 390.
- [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 Porous Media, 2013, 97(2): 201.
- [5] Zhuang X Y, Huang R Q, Liang C, *et al.* A coupled thermo-hydro-mechanical model of jointed hard rock for compressed air energy storage [EB/OL]. [2015-06-30]. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/179169>.
- [6] Cleary B, Duffy A, O'Connor A, *et al.* Assessing the benefits of compressed air energy storage on the 2020 Irish Power System[C]//Proceedings of the 48th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Dublin: IEEE, 2013: 1-6.
- [7] Crotagino F, Mohmeyer K, Scharf R. Huntorf CAES: more than 20 years of successful operation[C]//Solution Mining Research Institute Meeting. Orlando: Solution Mining Research Institute, 2001.
- [8] Allen R D, Doherty T J, Kannberg L D. Summary of selected compressed air energy storage studies[R]. Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1985.
- [9] Kushnir R, Ullmann A, Dayan A. Compressed air flow within aquifer reservoirs of CAES plants [J]. Transport Porous Media, 2010, 81(2): 219.
- [10] Oldenburg C M, Pan L. Utilization of CO<sub>2</sub> as cushion gas for porous media compressed air energy storage [J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2013, 3(2): 124.
- [11] Pan L. T2Well/ECO2N Version 1.0: multiphase and non-isothermal model for coupled wellbore-reservoir flow of carbon dioxide and variable salinity water [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011.
- [12] McLarnon F R, Cairns E J. Energy storage [J]. Annual Review of Energy, 1989, 14(1): 241.
- [13] Guo C, Zhang K, Li C. Influence of permeability on the initial gas bubble evolution in compressed air energy storage in aquifers[C]// Proceedings of the TOUGH Symposium 2015. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2015.
- [14] Zhang K, Wu Y, Pruess K. User's guide for TOUGH2-MP: a massively parallel version of the TOUGH2 code [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.