

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.02.006

# 盐岩水平储气库的相似模拟建腔和长期稳定性分析

刘建平<sup>1,2</sup>, 姜德义<sup>1</sup>, 陈 结<sup>1</sup>, 刘新荣<sup>1</sup>

(1.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044;2.西南科技大学 环境与资源学院,四川 绵阳 621010)

**摘 要:**利用地下盐穴作为油气储库是一种常见的方法。但由于中国地下盐矿层状盐岩居多,特点是单层厚度薄,不溶物含量高,因此单井造腔腔型控制难度大,造腔速度慢。根据双井对流建腔方法,通过实验模拟建造的水平盐穴为模型基础,依据湖北云应地区盐矿地质条件和盐岩的物理力学性质,数值模拟其在不同埋深情况下建造后腔体长期运行体积收缩情况。通过实验发现采用双井对流造腔方法建设储气库是可行的,腔体的形状可以通过流量和油液分界面来控制。对地下盐岩水平储气库的岩石长期蠕变模拟发现,水平储气库随着埋深越大相同蠕变期内条件下腔体的体积收缩率和腔体周边塑性变形区体积也越大,同时使用寿命也越短。

**关键词:**盐岩、储气库、建腔、稳定性

中图分类号:TU45

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)02-045-07

## Similar experimental construction and long-term stability analysis of horizontal salt caverns

LIU Jianping<sup>1,2</sup>, JIANG Deyi<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>1</sup>, LIU Xinrong<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control,Chongqing University, Chongqing 400030,P.R.China; 2. School of Environment and Resource ,Southwest University of Science and Technology,Mianyang 621010, Sichuan, P.R.China)

**Abstract:** Using underground salt cavern for oil and gas storage is a common practice. Due to the characteristics of underground salt mines in China, which are rich in bedded salt rock, thin in terms of thickness and combined with high volume of insoluble non-salt rock, the shape control of single-well cavern construction is inevitably difficult and the construction takes a long time. Using experimental simulation construction of the horizontal salt cavern as a basic model, and taking the geological and physically mechanical conditions of salt caverns in Yunying, Hubei province into consideration, we numerically simulated the long-term rock creep effect under different buried depths with the twin-well cavern construction method. The simulation results show that the construction method is applicable, and the shape of cavern can be controlled through flow and fluid interface. It's also found during the same time in which rock creep takes effect, the deeper the cavern is buried, the higher the shrinkage rate of the cavern is, and the larger the plastic deformation zone around cavern becomes, which finally result in the shorter service

收稿日期:2016-09-02

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2009CB724606);国家自然科学基金资助项目(51074198);国家创新研究群体基金(50921063);中央高校基本科研业务费(CDJXS11241182,CDJZR10240017)。

Supported by National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program)(2009CB724606), the National Natural Science Foundation of China(51074198), Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China(50921063) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(CDJXS11241182,CDJZR10240017)。

作者简介:刘建平(1978-),男,重庆大学博士研究生,主要从事岩土工程力学与安全工程方面的研究,(E-mail)52148197@qq.com。

life of the salt cavern for horizontal gas storage.

**Keywords:** salt rock; horizontal salt cavern; cavity construction; stability

盐岩矿藏在世界各地分布广,规模大,具有构造和水文地质条件简单以及盖层隔水性好等特点<sup>[1-3]</sup>。50年代初期,美国和欧洲一些国家开始用盐岩溶腔存储 LPG 和其他轻烃,而世界上第一座盐丘储气库是1959年由苏联建成的。之后地下盐穴储气库在世界范围内得到广泛的应用和发展,到2005年世界上有100余座在运行<sup>[4-7]</sup>。中国对盐穴储气库的研究始于1999年,随着西气东输战略工程的实施,作为一线工程2001年开始了建设天然气地下储气库工程的可行性的研究,确定了江苏金坛作为国内首个盐穴储气库建库目标库址;到2010年上半年第一批储气库完成造腔形成了 $3.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的调峰能力,另外西气东输工程的二线工程云应储气库也正在进行可行性论证<sup>[8-11]</sup>。但中国的盐岩矿床多是湖相沉积矿,含有泥岩夹层、石膏夹层、钙芒硝夹层,与国外的盐丘型盐岩矿床相比具有夹层数目多,单层盐岩矿层薄的特点。夹层的存在使得造腔形状控制比较难,造出的型腔不规则使得其力学稳定性差、蠕变快、型腔体积缩小过快、使用寿命短<sup>[12-13]</sup>。因此利用盐岩矿床中纯度较高厚度较大的矿层建造水平储气库是一种较好的方案。双井或多井连通井对流法源于中国自贡<sup>[14]</sup>。1895年自流井盐矿床已广泛地采用岩盐井间的自然溶通,采用两井或多井的采卤技术,即从一口井注水,在另一口邻井中采卤,以提高盐岩矿床的开采率。1968年中国首次在应城盐矿试验压裂连通法水溶开采获得成功。1971年自贡长山盐矿水力压裂连通井距达191.6m的两口井。水平钻井技术最早应用于石油钻井行业,20世纪90年代,盐岩钻井水溶开采行业,引用水平钻井技术实现两井对接连通,并逐步推广应用。然而与储气库建设不同,采用双井或多井连通对流法采卤制盐建造的盐腔多成山丘状。因此,笔者首先采用相似原理模拟建造双井连通水平储气库,然后测量其几何形状,构建储气库模型并通过FLAC<sup>3D</sup>验证其在实际运行过程中的稳定性。

## 1 水溶建腔实验

双井连通建造水平储气库在工业上的应用鲜见报道,未找到已建成的水平储气库的几何模型,因此需要通过相似水溶建腔实验进行获得。

### 1.1 相似原理

根据姜德义等<sup>[15-16]</sup>提出的水溶建腔相似理论,在溶解建腔过程中,影响盐岩水溶建腔的参数有,几何尺寸 $l$ ,造腔的时间 $t$ ,盐岩的密度 $\rho$ ,盐岩的溶解速率 $\omega$ ,流体的流速 $v$ ,溶液的质量浓度 $c$ ,温度 $C$ ,注水流量 $q$ ,扩散系数 $D$ ,则其关系式为

$$f(l, t, \rho, \omega, v, c, C, q, D) = 0. \quad (1)$$

各参量的量纲分别为 $[l] = [L]$ ,  $[t] = [T]$ ,  $[\rho] = [M][L]^{-3}$ ,  $[\omega] = [M][L]^{-2}[T]^{-1}$ ,  $[v] = [L][T]^{-1}$ ,  $[c] = [M][L]^{-3}$ ,  $[C] = [\Theta]$ ,  $[q] = [L]^3[T]^{-1}$ ,  $[D] = [L]^2[T]^{-1}$ 。

其中有4个基本量纲 $(L, M, T, \Theta)$ ,  $r=4$ ,  $L$ 为长度量纲,  $M$ 为质量量纲,  $T$ 为时间量纲,  $\Theta$ 为温度量纲。由 $\pi$ 定理,则有5个独立的相似判据 $\pi$ 。选取 $l[L]$ ,  $t[T]$ ,  $\omega[ML^{-2}T^{-1}]$ 和 $C[\Theta]$ 为量群,则

$$\pi_1 = \frac{\rho}{l^\alpha t^\beta \omega^\chi C^\delta} = \frac{ML^{-3}}{L^\alpha T^\beta [ML^{-2}T^{-1}]^\chi \Theta^\delta}, \quad (2)$$

为无量纲,所以 $\chi=1, \beta=1, \alpha=-1, \delta=0$ ,即

$$\pi_1 = \frac{\rho l}{t\omega}. \quad (3)$$

同理:

$$\pi_2 = \frac{vt}{l}, \pi_3 = \frac{cl}{\omega t}, \pi_4 = \frac{qt}{l^3}, \pi_5 = \frac{Dt}{l^2}. \quad (4)$$

取原型为 $p$ ,模型为 $m$ ,相似比用 $K$ 表示,几何相似比为

$$K_l = l_p / l_m. \quad (5)$$

其他参数相似比类似,则其相似比的关系为

$$\frac{K_\rho K_l}{K_l K_\omega} = 1, \frac{K_v K_l}{K_l} = 1, \frac{K_c K_l}{K_l K_\omega} = 1, \frac{K_q K_l}{K_l^3} = 1, \frac{K_D K_l}{K_l^2} = 1. \quad (6)$$

## 1.2 实验材料

水平储气库是在矿床中盐岩纯度较高,杂质含量少的矿层中建造。由于国内盐矿大多采用水溶采卤法,大块盐岩样品很难获得,因此采用巴基斯坦天然水晶盐岩作为模拟水溶建腔的实验材料,巴基斯坦天然盐岩的溶解特性和密度和国内地下层状盐岩相近<sup>[17-18]</sup>。

## 1.3 实验模型

两个模型相似的充要条件是相似判据不变,单值条件相似。所以为了保证两个系统相似,必须满足如下条件:

- 1)原型和模型的几何条件相似;
- 2)在研究过程中具有显著意义的物理常数成比例;
- 3)两个系统初始条件相似;
- 4)研究期间,两个系统边界条件相似。

根据相似判据可以进行相似比的确定,假设现场储气库腔体长度为 100 m 左右,而实验试件的最大长度为 0.2 m,预计水平腔长度为 0.1 m。所以根据现场腔体尺寸和实验试件尺寸的具体情况选取几何相似比  $K_l = 1000$ 。考虑到地下岩穴造腔是在一定的地温下进行的,根据温度对溶解速率的影响,40 ℃时溶解速率约为常温的 1.33 倍,设常温下天然盐岩的溶解速率为  $a$ ,所以有

$$K_\omega = 4a/3a = 1.33. \quad (7)$$

实验盐岩与国内地下盐岩的密度接近,取相似比 1,其他相似比根据关系式(6)得到

$$K_\rho = 1, K_T = 1, K_c = 1, K_v = 1.33, K_D = 1333.3, K_l = 750, K_q = 1333333.3. \quad (8)$$

## 1.4 实验设计

在实验过程中,先将 200 mm × 100 mm × 50 mm 的盐岩实验试件烘干,再用 6 mm 的钻头在相距 100 mm 的位置分别钻出两个孔,然后用切割机在底面将两孔连通并形成 20 mm 深的槽,清理干净后,如图 1 所示。将石蜡和松香按 1:1 的比例熔融,倒入一个铁盒中,在底部形成约 5 mm 厚的熔融液,然后将实验试件的开槽面向下放入铁盒中,冷却。如此即可形成双井连通的水平造腔模型,然后连接水路和油路,并测试其密闭性。

在本次模拟双井对流建造水平储气库的实验中,采用的造腔方法为注水井保持低油位,出卤井高油位。当清水通过注水井进入盐腔后迅速上浮至盐腔顶部,然后不断溶解顶部和两侧的盐岩同时向出卤井运移,然后逐渐下沉混合腔体中的卤水最后通过出卤井排出。当需要提升油位时,关掉注水井的阀门,打开出卤井,将两根外裹绝缘层的金属棒两头切开,并行固定,一头徐徐放入出卤井中,一头连接欧姆表,当阻值明显下降时即在刚卤水中,此位置即是出卤井油位,测量金属棒进入的深度即可得到油位高度。实验过程中每隔 10 min 测量一次出卤的盐度。实验系统剖面如图 2 所示。

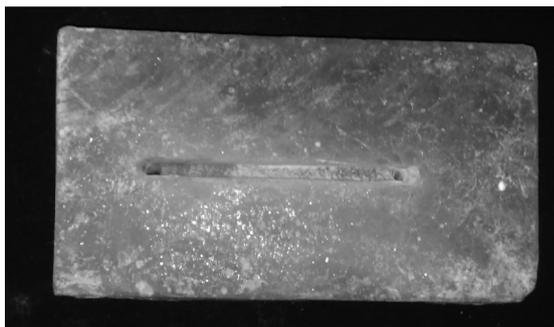


图 1 盐岩试件图

Fig.1 The cavity shape

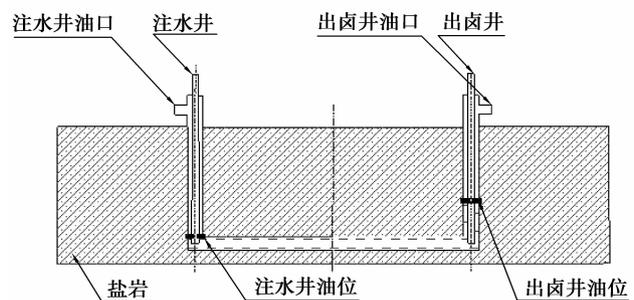


图 2 实验系统剖面图

Fig.2 Profile of the experimental system

由于实验试件厚度较薄,因此仅提升 3 次出卤井油位。水平建腔过程中不溶物不像单井法造腔那样集中在底部,因此不需要建槽期,为控制腔体形状可分为建底,扩容和收顶 3 个阶段。同时由于水平建腔初期溶解面积大,因此注水流量不需要明显减小。在造腔过程中由于注水井油位比较低,清水上浮过程会将注水

井周边的盐岩溶解,注水井的保护油因为浮力的原因流向出卤井的保护油层中,因此表 1 中注水井油位仅标示第一次设置的油位,而出卤井油位也仅表示每次调整的油位,实际实验过程中注水井的油位会逐渐提高,而出卤井的油位会稍微降低。根据相似比例以及模型的实际情况,具体实验参数如表 1 所示。

表 1 试验 1 模型造腔参数表  
Table 1 Parameters for cavity building

时间/min	流量/ (mL · min <sup>-1</sup> )	注水井 管位/mm	出卤井 管位/mm	注水井 油位/mm	出卤井 油位/mm
40	2	60	60	50	50
70	2	60	60	—	40
30	2	60	60	—	30

## 1.5 实验结果分析

### 1.5.1 卤水质量浓度分析

通过实验对排出的卤水每隔 10 min 进行一次测量,得到质量浓度曲线图,如图 3 所示。通过质量浓度曲线图可以看出,双井连通水平建腔法卤水在建腔初期就能很快的达到较高的质量浓度,这是因为水平造腔初期溶解面积比单井造腔法大;质量浓度达到一定程度后增速变缓并趋于水平,表明注水流量与溶解速度接近一个平衡,高质量浓度的卤水也保护下部盐岩不会过度溶解。

### 1.5.2 容腔形状分析

通过上述实验后,将盐岩试件沿径向用切割机切开,并测量腔体尺寸,如图 4 所示。通过测量盐腔长约 120 mm,高约 30 mm,成长条面包状,其中出卤井端略大于注水井端。将其按照前述相似比放大,画出几何模型用于 FLAC<sup>3D</sup> 仿真软件使用。

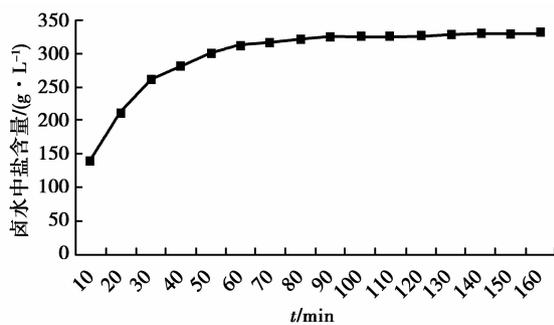


图 3 出卤井质量浓度曲线图

Fig.3 Concentration-time curves

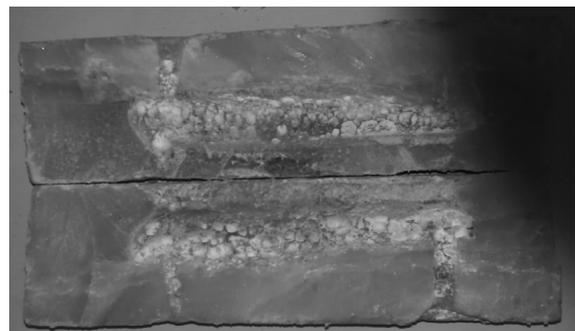


图 4 腔体剖面图

Fig.4 The cavity shape

## 2 数值仿真实论及模型

层状盐岩的蠕变破坏性是影响地下储气库稳定性的重要因素。利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件,采用 cpow 模型能较好的反应含有夹层特征的岩盐储库运营期的长期蠕变变形的特征,分析层状岩盐中的水平储库的稳定性。

### 2.1 仿真背景

根据我国现有盐岩地下储库的工程地质条件,结合实验内容及研究目的,采用 FLAC<sup>3D</sup> 建立了三维模型。湖北云应地区是我国在建具有较大规模、较多盐岩储库的能源储备基地,云应盐岩矿床类型属古代陆相沉积硫酸盐—岩盐矿床。成矿时为早第三纪。含矿层位为早第三系云应群膏盐组第三段。云应群岩性自下而上可分为三组:红色岩组,膏盐组和泥灰岩组组成,盐岩矿层分段密集,与硬石膏岩、钙芒硝岩互层组成“盐群”。每个“盐群”有 1~27 层盐,各盐群厚度一般为 2~7 m,最薄为 0.38 m,最厚为 30.12 m;盐岩埋深 500~1 100 m 之间。结合相似建腔实验和盐岩矿床实际情况建立了如下储库模型,储库的埋深分别取 600, 800, 1 000 m。

### 2.2 几何模型

将前述几何模型导入 FLAC<sup>3D</sup>中,计算出体积为  $4.273 1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。模型单元类型选择岩土工程中常用的四面体单元,为了便于对腔体附近的破坏情况进行比较详细的了解,对腔体附近的单元进行了加密,如图 5 所示。

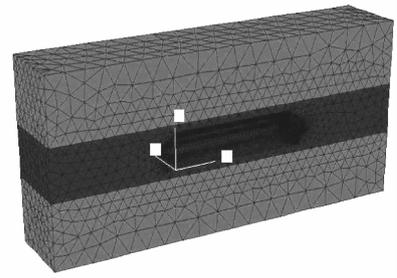


图 5 腔体模型及网格划分图  
Fig.5 The meshing of cavity model

### 2.3 参数赋值

根据国内外储气库的建设经验,储气库的运行内压一般为地层竖向压力的一半,盐岩储库上覆岩层平均重度取  $20.7 \text{ kN/m}^3$ ,依此计算,盐岩储库内压分别对应为 6.24, 8.48, 10.4 MPa。参考国内外盐岩的力学特性,最终确定长期流变计算的参数如表 2 所示。腔体是建在盐岩层中,而围岩由红色岩组、膏盐组和泥盐组构成,这些盐层细小而密集,可以将其视为复合岩层以方便数值计算和收敛。

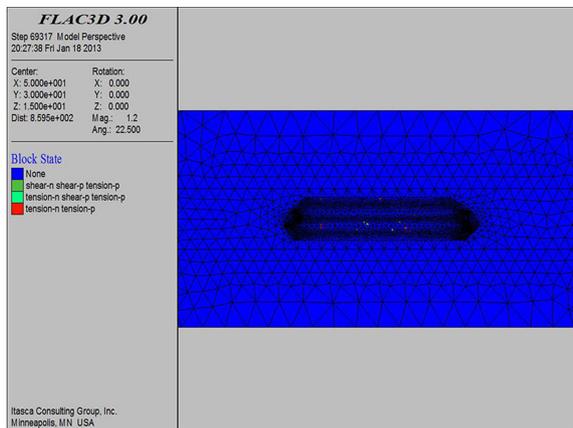
表 2 弹塑性及蠕变计算参数表

Table 2 Calculating parameters of elastic and creep

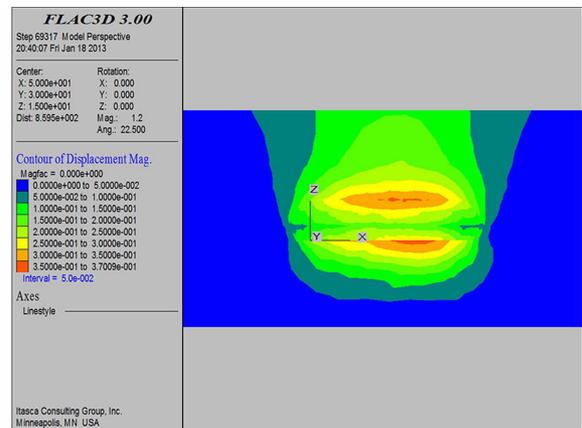
类型	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比	粘聚力/ MPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	蠕变参数 A	蠕变参数 n
盐岩	2 124	2	3,87	0.27	3,55	28,5	$6,4 \times 10^7$	2,6
围岩	2588	2	5.1	0.29	3,1	42	$5,0 \times 10^7$	3,0

## 3 模型计算与结果分析

由于储气库左右对称,可以选取 1/2 模型进行计算,得到盐岩储库腔体壁位移等色图及腔体周围围岩破坏区分布图,如图 6 所示。



(a) 600 m埋深 10 a后年塑形破坏图



(b) 600 m埋深 10 a后腔体周围塑性区分布图

图 6 位移等色图和围岩破坏分布图

Fig.6 Cavity displacement isochromatic graph and pastic damage area profile

将不同埋深的储库的腔体体积收率和围岩塑性区体积随时间变化的规律分别绘制成曲线图 7 和图 8。

从图 7 可以看出,盐岩储库腔体体积减少量随着流变年限的增加而增大;在相同的年限盐岩储库腔体体积减少量随着埋藏的深度的增加而增加。600 m 埋深的储气库 10 a 腔体收缩率仅为 3.3%, 30 a 收缩率也仅为 4%。而埋深 1 000 m 的盐岩储库腔体体积 10 a 内体积就减小了 37.2%。从图 8 可以看出随着流变年限的增加,盐岩储库腔体塑性区的体积也不断增加,而且增大趋势成上抛物线状。600, 800, 1 000 m 流变 10 a

后的塑性区体积分别为 521.5, 47 793, 180 490 m<sup>3</sup>。

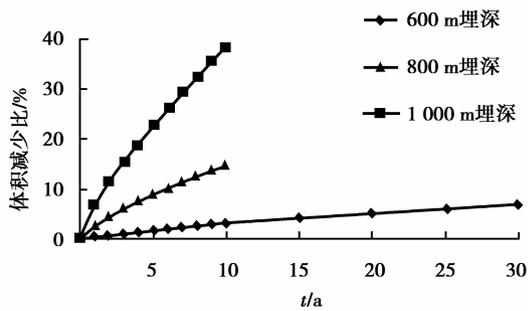


图 7 不同埋深盐岩溶腔体积减少曲线图

Fig.7 Loss of salt rock cavern cavity volume curve in different buried depths

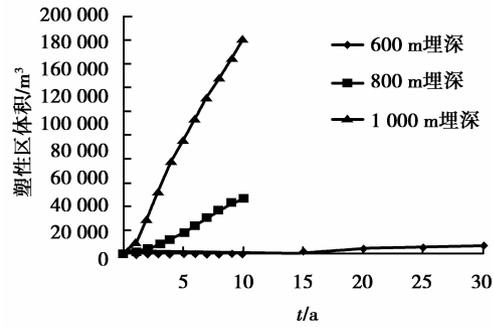


图 8 不同埋深盐岩溶腔塑性区体积曲线图

Fig.8 Plastic volume curve of salt rock cavern cavity in different buried depths

## 4 结 论

1) 盐岩双井连通水平储气库模拟建腔方法可以通过将盐砖钻孔切槽并用熔融石蜡和松香密封形成造腔的 U 回路;可以保持注水管和出卤管的位置,仅提升出卤井油位控制腔形得到长条面状的盐腔,在这个过程中注水井的油位会随着盐岩的溶解而上升,而出卤井的油位会略微下降。

2) 双井连通水平储气库建造法的初期卤水质量浓度上升快,有利于下游制盐企业的利用,同时成腔速度也更快,相比单井造腔法单个储气库的体积也更大。

3) 通过借鉴姜德义、邱华富等的溶解造腔相似理论,双井连通水平储气库模拟建造实验也能很好使用。

4) 通过 FLAC<sup>3D</sup> 仿真发现水平储气库的体积收缩率随着埋深的增加而增加,随着运营时间的增加而增加,塑性区的体积也随着时间的增加而增加成上抛物线趋势。

5) 双井连通水平造腔溶腔体积比较大,适合建造在某一盐岩单层厚度大的矿床中。结合存储压力以及体积收缩率,矿床在 600~1 000 m 深度可能是适合的,当然由于盐岩的成分复杂,存储地质条件千差万别,因此对于某一确定条件的储库建设,可结合本文内容以及所在地地质条件进行设计和复核。

## 5 展 望

通过上述研究可以得到双井水平连通造腔在型腔控制和长期运行时可行的,国内目前的盐岩储库都是单井循环造腔,但对于中国湖相沉积的多夹层的盐岩矿床来说单井穿越夹层造腔腔体形状不容易控制,层间的气密性也需要长时间的论证,双井连通水平建腔优势明显。目前双井对流水平造腔的难点主要在于采用水利压裂法连通对盐岩有破坏作用,而石油定向钻的成本较高。同时,本文受试件尺寸限制,油位提升次数少。双井对流水平造腔的工艺值得进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] Sears G F, Jessen F W. Controlled solution mining in massive salt[J]. Society of Petroleum Engineers, 1966, 6(2): 115-125.
- [2] Jessen F W. Salt dissolution under turbulent flow conditions. Solution mining Research Institute file 70-0004-SMRI, 1970.
- [3] Fuenkajorn K, Archeeploha S. Estimation of cavern configurations from subsidence data[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, 70(1): 53-61.
- [4] Ehgartner B L, Park B Y. Sensitivity of Storage Field Performance to Geologic and Cavern Design Parameters in Salt Domes[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2010.
- [5] Remson D R, Dommers O B, Jessen F W. Techniques for developing predetermined shaped cavities in solution mining[C]// Rau J L ed. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Symposium on Salt. Cleveland, OH: [s.n.], 1965: 297-310.

- [6] 任松, 李小勇, 姜德义, 等. 盐岩储气库运营期稳定性评价研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5):1465-1472.  
REN Song, LI Xiaoyong, JIANG Deyi, et al. Evaluating stability of salt rock gas storage during operation period[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5):1465-1472. (in Chinese)
- [7] 陈结, 姜德义, 刘春, 等. 盐穴建造期夹层与卤水运移相互作用机理分析[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(7): 107-113.  
CHEN Jie, JIANG Deyi, LIU Chun, et al. Analysis on the relationship of interlayer and brine migration in salt cavern construction period[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(7): 107-113. (in Chinese)
- [8] 任涛. 夹层赋存特征对层状盐岩力学特性及储库长期稳定性影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.  
REN Tao. Study on the effect of interlayer occurrence characters on the mechanical properties of mold layered salt rock and the long-time stability of storage[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [9] 万玉金. 在盐层中建设储气库的形状控制机理[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 130-132.  
WAN Yujin. Shape-controlling mechanism of gas storage building in salt beds[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 130-132. (in Chinese)
- [10] 刘艳辉, 李晓, 李守定, 等. 盐岩地下储气库泥岩夹层分布与组构特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3627-3633.  
LIU Yanhui, LI Xiao, LI Shouding, et al. Distribution and structural fabric features of mudstone interlayer of rock salt in underground gas storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3627-3633. (in Chinese)
- [11] 李银平, 刘江, 杨春和. 泥岩夹层对盐岩变形和破损特征的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2461-2466.  
LI Yinping, LIU Jiang, YANG Chunhe. Influence of mudstone interlayer on deformation and failure characteristics of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2461-2466. (in Chinese)
- [12] 刘健, 宋娟, 张凤伟. 多随机因素作用下储气库套管运行期安全性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3721-3728.  
LIU Jian, SONG Juan, ZHANG Fengwei. Safety analysis of casing of gas storage influenced by stochastic factors during operation period[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12):3721-3728. (in Chinese)
- [13] 刘成伦, 徐龙君, 鲜学福. 长山岩盐动溶的动力学特征[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(4): 58-71.  
LIU Chenlun, XU Longjun, XIAN Xuefu. The dynamic characteristics of Changshan salt in dynamic state[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 2000, 23(4): 58-71.(in Chinese)
- [14] 任松, 陈结, 姜德义, 等. 能源地下储库造腔期流场相似实验[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(5): 2315-2322.  
REN Song, CHEN Jie, JIANG Deyi. Similar experiments of the flow field in cavity construction period of underground energy storage[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 2012, 35(5): 2315-2322. (in Chinese)
- [15] 姜德义, 邱华富, 易亮, 等. 大尺寸型盐造腔相似试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1746-1755.  
JIANG Deyi, QIU Fuhua, YI Liang, et al. The similar experimental study on the cavity construction using the large-size moulded salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1746-1755. (in Chinese)
- [16] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.  
YANG Junjie. Similarity theory and structure model test[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005. (in Chinese)
- [17] 杨骏六, 杨进春, 邹玉书. 岩盐水溶特性的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 1997(2): 74-80.  
YANG Junliu, YANG Jinchun Zhou Yushu. Experimental study on the water-soluble characteristics of rock salt[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 1997(2): 74-80. (in Chinese)
- [18] 刘建平, 姜德义, 陈结, 等. 一种盐岩相似材料的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3660-3664.  
LIU Jianping, JIANG Deyi, CHEN Jie. Experimental research on a similitude material of rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3660-3664. (in Chinese)