

中国盐岩能源地下储存可行性研究

杨春和¹, 梁卫国¹, 魏东吼², 杨海军²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中石油西气东输管道分公司 储气库项目部, 北京 100027)

摘要: 选定我国江苏金坛盐矿为示范工程, 通过深部盐岩的力学及蠕变试验, 研究了深部盐岩的变形规律, 建立了深部盐岩溶腔的腔体变形三维计算模型。结合示范工程的具体地质条件, 对深部地下盐岩溶腔的洞形、稳定性及长期稳定性进行了数值模拟, 研究了不同压力下溶腔容积的变化规律。通过现场储气库压腔试验, 验证了计算分析采用的参数合理性。研究结果表明, 从地下工程稳定性方面来看, 利用我国盐岩实施能源储备是可行的。

关键词: 岩石力学; 盐岩; 岩石蠕变; 洞型优化

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)24-4409-09

INVESTIGATION ON POSSIBILITY OF ENERGY STORAGE IN SALT ROCK IN CHINA

YANG Chun-he¹, LIANG Wei-guo¹, WEI Dong-hou², YANG Hai-jun²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Gas Storage Project Department, West-East Pipeline Company, PetroChina Company Limited, Beijing 100027, China)

Abstract: As an example of a salt mining, the laws of deformation of salt rock in depth are investigated by the mechanics and creep experiment of salt rock. The 3D computational model of the deformation analysis of cavity for salt rock is proposed. The optimization of cavity, stability, and long-term stability are studied on the basis of the in-situ geological conditions; and the change laws of the volume of cavity are studied under different inside pressures. The results show that the scheme of energy storage in salt rock is acceptable in China.

Key words: rock mechanics; salt rock; rock creep; optimization of cavity

1 引言

能源储备是国家国民经济持续稳定发展的重要保障, 由于地下储备具有安全及经济两大特点, 国际上 60% 的能源战略储备选址在地下。地下能源储存一般放置在盐岩、非渗透性岩层以及多孔隙岩层中。而盐岩具有非常低的渗透特性(渗透系数小于 10^{-20} m^2)与良好的蠕变行为, 能够适应储存压力的变化(因使用过程中压力将发生变化); 其力学性能较为稳定(损伤与损伤自我恢复), 能够保证储存洞

库的密闭性^[1], 且盐岩溶解于水的特性使盐岩洞库的施工更加容易、经济。因此, 国际上公认为盐岩体是能源(石油、天然气)储存的最理想的介质。据统计, 世界上 90% 的能源(石油、天然气)储存库建在盐岩介质或报废的盐矿井中。正是由于盐岩地下能源储存具有这样巨大的工程应用背景, 近 50 a, 特别是近 20 a 来, 美国、加拿大及欧洲部分国家的能源部门集中了大量的人力、物力与财力对盐岩(储存库)的力学特性进行了专项研究。第一次盐的讨论会(symposium)于 1962 年在美国举行, 会议专门讨论了盐岩储存库的储存技术^[2-11], 从此以后定期召开

收稿日期: 2005-03-10; 修回日期: 2005-07-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50434050, 50334060); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412704)

作者简介: 杨春和(1962-), 男, 博士, 1999 年于美国内华达大学采矿工程系地质工程专业获博士学位, 现任研究员, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: chyang@whrsm.ac.cn。

盐岩的讨论会议。

文[12~18]对盐岩的强度、变形特性做了大量的室内、室外试验研究工作。虽然研究工作者已从不同的角度,研究不同的载荷条件下的盐岩力学特性,初步建立了考虑盐岩的损伤、变形与渗透之间关系的盐岩本构模型,然而,我国盐岩的赋存特点和欧美国家有很大的不同,这些模型无论在理论上还是工程应用中均很难直接运用到我国盐岩石油储库中。Cristesco 从经典弹-粘塑性理论出发,分析盐岩剪胀现象,从而分析盐岩蠕变损伤^[19,20]过程。邱贤德(2003)通过对盐岩的蠕变和微观结构分析认为:盐岩的蠕变与损伤演化特征和 NaCl 含量的高低、结晶的尺寸大小等因素密切相关。余海龙等(1994)通过实验室相似材料试验,研究盐岩溶腔的稳定性,得到了溶腔围岩应力分布规律和溶腔极限跨距等重要参数。梁卫国、赵阳升等(2003)在理论分析的基础上,建立了岩盐水溶开采的数学模型,并对溶腔的变形进行了相应的数值模拟分析。对于新建地下储库而言,通过优化分析合理的储库大小、体型、储库的间距以及溶腔的先后顺序来提高洞穴整体的稳定性,达到既保证安全又经济的目的。

2 深部盐岩力学特性试验

2.1 盐岩层的基本力学特性研究成果

以江苏金坛盐岩层的可储性,岩芯取自盐矿茅 11 井和茅 10 井,埋深 900~1 200 m,采用中国科学院武汉岩土力学研究所最新研制的高温高压岩石蠕变伺服试验机对岩芯开展了实验室单轴、三轴压缩和蠕变试验。试验结果表明,盐岩的弹性模量为 18.5~21.8 GPa。无论是单轴还是三轴压缩试验的结果都表明,金坛盐岩具有明显的塑性硬化和扩容行为,试验过程中的典型试验曲线如图 1,2 所示。

三轴蠕变试验,围压为 5~20 MPa。从试验结果看,金坛盐岩具有良好的蠕变行为。围压对蠕变的影响表现在:围压越大,进入稳态蠕变和加速蠕变的时间越晚,第 II 阶段越明显,越不容易进入加速蠕变阶段。轴向压力也将对蠕变曲线产生影响,即轴向压力越大,应变率越大,进入 II,III 蠕变阶段的时间就越早;第 II 阶段经历的时间越短,即第 II 阶段不明显,岩石试样越容易进入加速蠕变阶段,如图 3 所示。

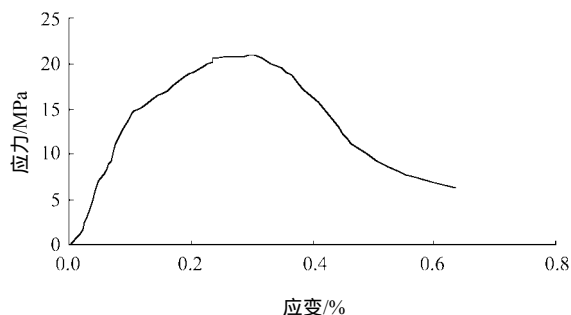


图 1 金坛盐岩典型单轴压缩应力-应变曲线

Fig.1 Curve of typical uniaxial stress-strain of Jintan salt rock sample

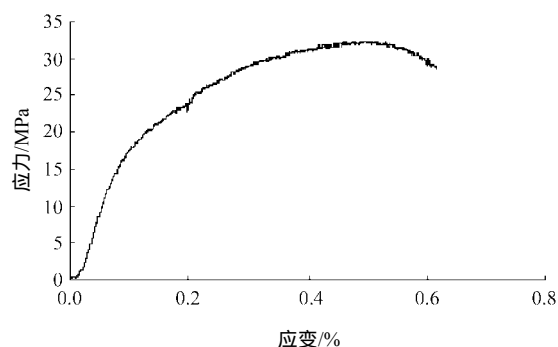


图 2 金坛盐岩典型三轴压缩偏应力-应变曲线(围压 σ_x , σ_y , σ_z 分别为 5, 10, 20 MPa)

Fig.2 Curve of typical triaxial stress-strain of Jintan salt rock sample (surrounding pressures σ_x , σ_y , σ_z are 5, 10, 20 MPa, respectively)

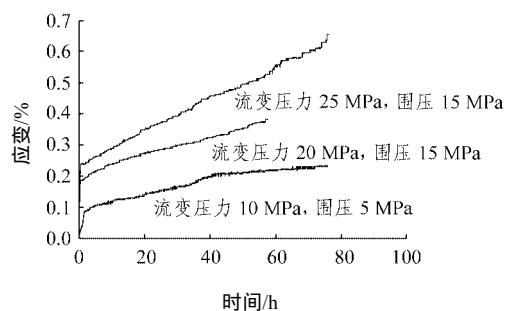


图 3 盐岩不同围压三轴轴偏蠕变应变-时间曲线

Fig.3 Curves of creep strain-time under different confining pressures of salt rock

2.2 金坛新建储库腔体优化的初步结果

由于盐岩储气库长期变形和洞型及其应力分布密切相关,为获得较好的储气库洞型,数值计算时,将洞型设计为不同长、短轴比的椭球腔、梨形腔,计算建模如图 4 和表 1 所示。通过比较静力计算所得的最大位移、洞室的塑性区半径来确定最优的储库洞型。相同储库体积在不同洞型时的塑性区半

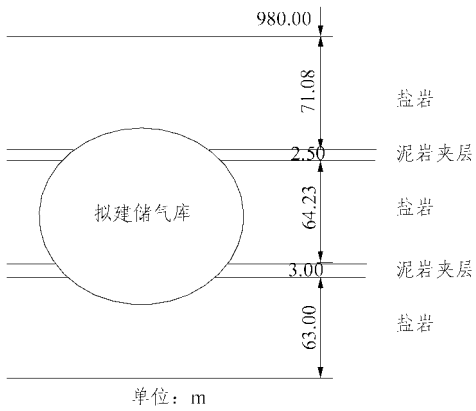


图 4 金坛盐岩储库布置及岩层分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of energy storage distribution and rock strata of Jintan salt rock

表 1 不同洞型静力计算洞周最大位移分布表

Table 1 Distribution of maximum displacement of ellipse cavity under static loading

洞型	腔体体积 /(10 ⁴ m ³)	洞周最大位 移/mm	短轴与长 轴比	长轴 /m	短轴 /m
椭球腔	25	46.3	3/7	70.0	30.00
		54.0	4/7	56.0	32.00
		61.8	5/7	49.0	35.00
		52.4	3/7	75.0	32.14
	30	57.7	4/7	61.5	35.00
		66.5	5/7	51.8	37.00
		53.6	3/7	80.0	34.28
		65.9	4/7	66.5	38.00
	40	74.2	5/7	57.4	41.00
		220.0			
梨形腔	30	130.0			
	40	103.0			

径如表 2 所示。从腔体优化的角度看：椭球腔是最好的，其塑性区的比较见图 5。

表 2 不同洞型体塑性区的范围

Table 2 Plastic area in the different ellipse cavities

洞型	体积/(10 ⁴ m ³)	塑性区半径/m
椭球腔(长短轴比 3/7)	30	9
梨形腔	30	19

2.3 储气库腔体合理间距

由于单个储气库的容量有限和调峰能力的不足，通常在一个盐矿要建设 2 个或是更多的储气库群。在建设多个储气库时，合理的储气库间距确定是必须考虑的。

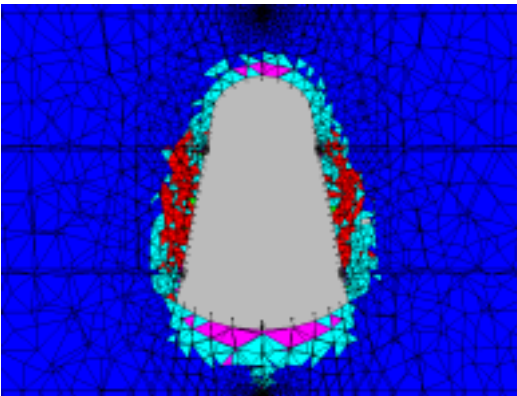
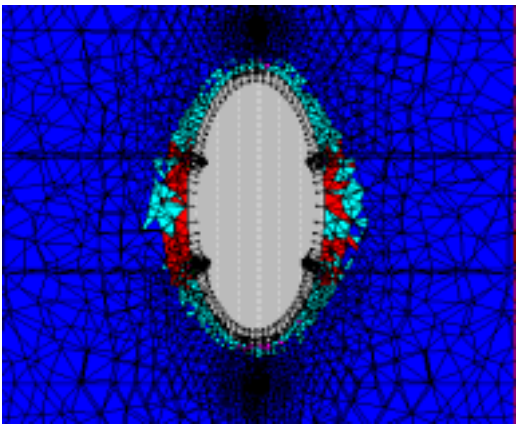


图 5 金坛盐岩储库相同体积不同形状时的塑性区特征

Fig.5 Characteristic of plastic area in the same volume with different shapes

以上述 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 长短轴比为 3/7 的椭球腔为例，通过对其开挖洞周形成的塑性区分析得知，其洞周形成的塑性区半径约为 9 m，考虑到开挖一般会在围岩中由外及里地形成较为明显的塑性破坏区，中等程度扰动区，轻微扰动区 3 部分，假设每一层的厚度大约与塑性破坏区相当，由此确定单个腔体开挖受影响的范围为 27 m，则该洞型的两腔体的边界合理间距应在 54 m 以上，如表 3 所示。

表 3 腔体塑性区半径和两腔体边界合理间距

Table 3 Plastic area of cavity and reasonable space of two-cavity boundary

腔体形状	体积 /(10 ⁴ m ³)	塑性区半径 /m	两腔边界合理间距 /m
椭球腔(长短轴比 3/7)	30	9	54
球形腔	30	17	102
梨形腔	30	19	114

3 地下盐岩溶腔流变特性研究

由于盐岩系重结晶，在地质岩体中具有较强的

表 6 不同内压下洞周最大位移和洞体积与原体积比值
Table 6 Ratio of maximum volume with original volume and maximum displacement with different inner pressures

内压/MPa	30 a 后洞周最大位移/m	30 a 后洞体积与原体积比值近似值/%
5.5	8.051	69.9
10.0	5.538	79.0
16.0	2.596	90.4

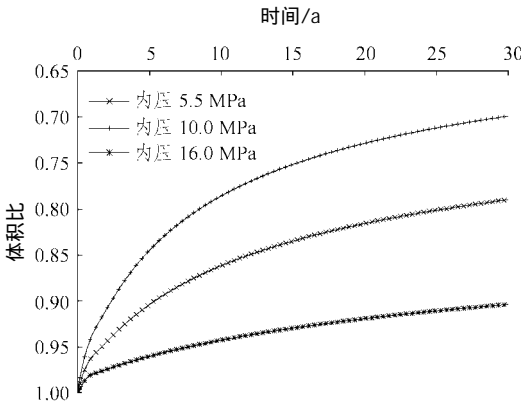


图 8 不同内压下体积变化时程曲线

Fig.8 Time-history curves of volume change with different inner pressures

升到 16.0 MPa , 采气由 16.0 MPa 降至 5.5 MPa , 计算工况以 40 d 为一周期注采循环 , 工作年限为 10 a。内压另一周期性变化以 339 d 为一周期, 173 d 注气, 166 d 采气, 注气工况由 5.5 MPa 升到 16.0 MPa , 采气由 16.0 MPa 降至 5.5 MPa , 计算工况以 339 d 为一周期注采循环, 工作年限为 10 a。

图 9~11 给出了 40 d 为一周期 A 点(图 7 所示)位移变化与时间关系、速率以及储库体积变化与时间关系。图 12~14 给出了 339 d 为一周期 A 点位移变化与时间关系、速率以及储库体积变化与时间关系。

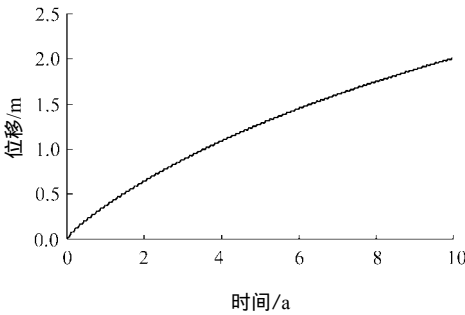


图 9 A 点位移变化时程曲线(压力变化周期 40 d)

Fig.9 Time-history curve of displacement for point A (pressure change period of 40 days)

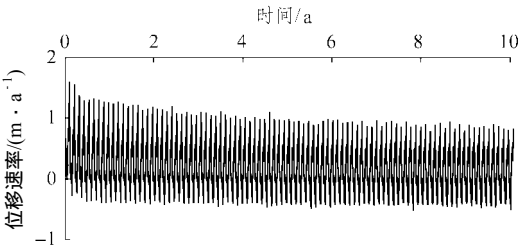


图 10 A 点位移速率变化时程曲线(压力变化周期 40 d)

Fig.10 Time-history curve of the change ratio of displacement for point A (pressure change period of 40 days)

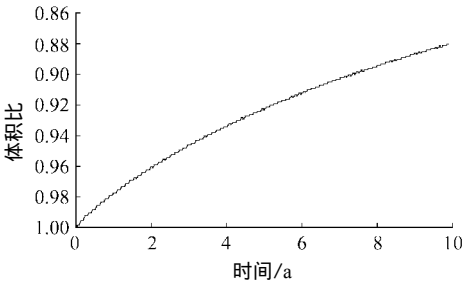


图 11 腔体体积变化曲线(压力变化周期 40 d)

Fig.11 Variation curve of the change of volume (pressure change period of 40 days)

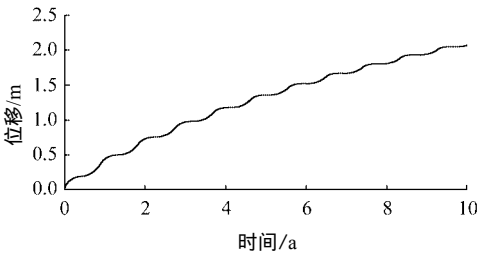


图 12 A 点位移变化时程曲线(压力变化周期 339 d)

Fig.12 Time-history curves of displacement for point A (pressure change period of 339 days)

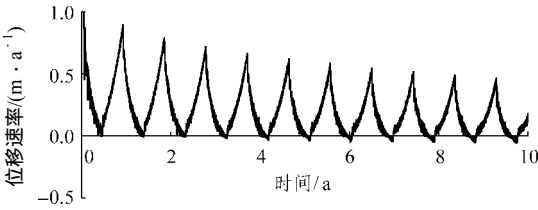


图 13 A 点位移速率变化时程曲线(压力变化周期 339 d)

Fig.13 Time-history curve of the change ratio of displacement of point A (pressure change period of 339 days)

储库内压周期性变化时, 位移呈现周期性变化, 位移速率瞬间呈现剧烈周期性变化, 其变化速率峰值与荷载变化速率关系密切, 而不随长期流变速率衰减呈现出明显衰减规律, 洞内压力周期性变化对洞周位移变化速率影响明显。比较不同内压周期循环可知, 周期较长时, 位移变化速率峰值和振幅减小。

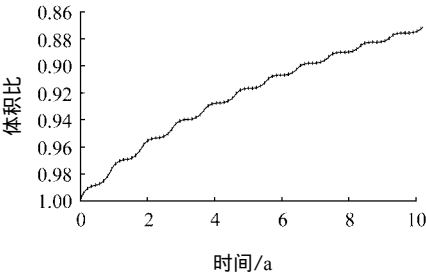


图 14 腔体体积变化曲线(压力变化周期 339 d)
Fig.14 Variation curves of the change of volume (pressure change period of 339 days)

5 废弃盐矿的长期可储性研究成果

冲洗完成一个新的储气库腔体需要数年的时间，本文探讨在金坛盐矿现有采空盐穴中挑选出比较好的腔体建设储气库。为此，在现场对已有盐矿采空区进行了腔体边界测试，提供了两组双腔采空区资料，据提供的老采空区进行了数值模拟研究。图 15，16 分别为两组采空区现场声纳测试剖面图。

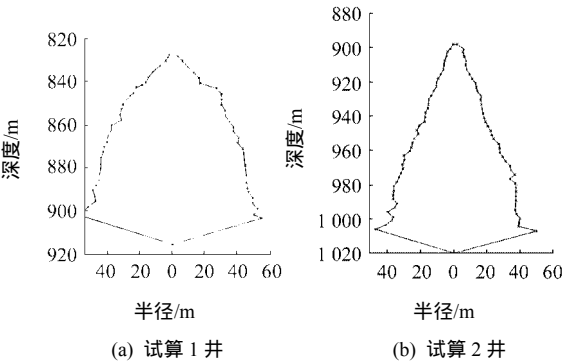


图 15 试算 1 井、2 井剖面图
Fig.15 Geological sections for wells No.1 and No.2

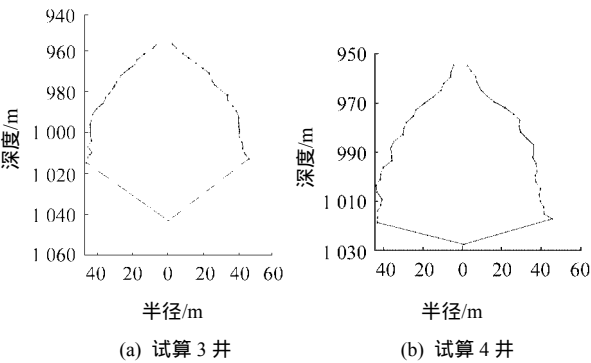


图 16 试算 3 井、4 井剖面图
Fig.16 Geological sections for wells No.3 and No.4

通过对试算 1 井、2 井的静力分析和流变计算分析，两腔所形成的塑性区已完全大面积连通，两腔之间实测的实体可能就是严重的破坏区和剥落下

来形成的部分堆积区。流变计算分析表明，在试算 1 井充气内压为 5.5 MPa、2 井内压升至 16.0 MPa 时，试算 1 井 30 a 后的体积减小量增大 3%，显示由于两腔距离太近，两腔之间存在压差的情况下相互会形成较明显的影响。

通过对试算 3 井、4 井的静力分析(见表 7)，洞周所形成的塑性区未形成连通实体，显示在当前空腔受力状态下，双腔基本保持稳定，流变计算结果显示，双腔在不同内压条件下，双腔未形成明显的相互影响。

表 7 试算 3 井和 4 井不同内压下的 30 a 后最大位移和洞形体积变化

Table 7 Maximum displacements and volume changes under different inner pressures for wells No.3 and No.4				
试算 3 井内压 /MPa	试算 4 井内压 /MPa	30 a 后最大位移/m	试算 3 井 30 a 后腔体体积与原体积比值/%	试算 4 井 30 a 后腔体体积与原体积比值/%
5.5	5.5	6.510	89.17	89.39
5.5	10.0	6.466	88.87	93.21
5.5	16.0	6.326	88.74	96.54
10.0	10.0	4.695	92.51	92.77
10.0	16.0	4.575	92.32	96.98
16.0	16.0	2.880	95.63	96.53

6 老腔储气库试压研究

为了验证选取的计算参数的正确性，对选定的金坛盐矿西 1 及西 2 井进行了气体压腔研究。根据声纳测井资料，西 1、西 2 两井的腔体形状尺寸如下：西 1 井腔体呈梨形状，腔体高度为 53.9 m(深 959.5 ~ 1 013.4 m)，最大半径 52.6 m，顶板盐层厚度 26.5 m，测算最大容积为 $15.59 \times 10^4 \text{ m}^3$ ；西 2 井近似梨形状，腔体高度 70 m(深 937.4 ~ 1 007.4 m)，最大半径 44.4 m，顶板盐层厚度 11.9 m，测量容积 $15.94 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

6.1 腔体试压方法及过程

由于盐岩特殊的力学特性(强流变性)、以及盐岩洞穴建造的长期性，在开挖以后腔体结构及其内部应力变化非常复杂，通常只能借助于数值模拟的方法来进行其收敛变形及稳定性评价，但由于问题的复杂性，所获得结果的准确性和可信度有待商榷。因此，在国外，对于盐穴地下储库，在投入使用前或使用一段时间后，均要进行腔体变形及密封性的现场实地测量。其测量的方法对液体储库与气体储

库有所不同：

(1) 液体储库测量方法

基于洞室本身的不规则性、以及声纳测试精度较低的局限性，对液体储库收敛体积变形的测试，更多的采用卤水排出测量法。在合理的时间范围内，通过测量在超过限定内压后排出地表的卤水量，来确定储库腔体的变形大小、及其与时间的关系。一般而言，卤水的排放量大小与以下几方面因素有关：

洞室自身收缩；来自于周围岩体热传导而导致的卤水体积膨胀；后续的盐岩淋滤；腔体内压力变化(升高或降低)；任何其他原因导致的淡水入侵。

在实际操作中，测试分为：成腔之后的流量测量法和建腔过程中的井管测量法。

成腔之后(或运营过程中)的测量法，是在井口设定限压阀，当腔体由于变形收缩而压力升高时，限压阀开启排出井管中的卤水，当压力回降至设定压力时自行关闭。通过一段时间的卤水排出量测量，可以获得在一定常内压条件下，储油库洞室蠕变收敛变形与时间的关系，从而获得该条件下洞室的收敛变形特性，指导相邻洞室的运营管理。

有研究人员认为，盐岩洞室实际上从建井建槽开始就产生变形，因此，建议在洞室淋滤，建造伊始就进行洞室收敛变形的测量。该方法如同排出法，在管串安装完成、开始淋滤建腔始，将一潜水泵下至相当于将来储库运行最小压力深度处，一旦由于腔体收敛变形而液面升高，则启动潜水泵将其排出地表。记录在整个建腔过程中卤水排出量和时间关系，则可获得盐岩腔体在初期的蠕变变形特征以及预测将来在一定压力下的收敛变形。同时，可以验证储库设计中所应用的蠕变本构及相关参数。

(2) 气体储库测量方法

为提高测量精度，可用声纳法和激光测量法用于储气库测量，但其应用仍然处于发展阶段。而实用的测量方法仍旧是基于通用气体状态方程的温度测量法。而且该方法仅能对较大收敛变形进行比较精确的测量，即

$$PV = mZRT \quad (1)$$

式中： P 为气体压力(Pa)， R 为气体常数(J/(kg·K))， m 为气体质量(kg)， Z 为气体压缩系数， T 为气体温度(K)， V 为气体的体积。

随着反复注采循环次数的增加，腔体中气体质量的确定误差也越来越大。因此，关于腔体中气体的实际质量，还可用另外的两种方法来确定。

求差方法

以气体状态方程为基础，根据前后两次排放气体的体积及压力温度变化，可以精确计算出其中气体的质量及体积。

由于数学方法的简单化以及测量的误差，与液体储库相比，气体储库腔体变形的收缩量更难精确测量。

氢气示踪法

将一定量的氢气注入气体储库中，将其与储库中气体混合，抽出一定量混合气体，用色谱分析的方法测量其中氢气含量，根据气体均匀混合原理，在已知注入氢气质量的基础上，可以精确计算出气体储库中原储存气体的质量。

6.2 金坛盐矿老腔现场试压方法(液体测量法)

金坛盐矿两老腔西1、西2井，由于相距很近，且将来计划同采同注。因此，一方面为试压检验腔体的致密性，另一方面监测两腔体之间的相互影响，利用液体测量的方法，对两腔体同时进行了试压监测。具体方法及过程为：

(1) 同时向西1、西2井注入饱和盐水，使两口井的压力差控制在1.5 MPa之内；西1井注入盐水的密度为1.20 g/cm³，使西1井的井口压力达到4.4 MPa，折合到腔顶处压力为15.64 MPa，停止注入；西2井注入盐水密度为1.20 g/cm³，当西2井井口压力达到4.5 MPa时，折合到腔顶处压力为15.43 MPa，停止注入；以上升压过程均每10 min记录一次。

(2) 关井稳压12 h，且每30 min记录一次，如果在12 h之内西2井的压降在0.5 MPa之内视为合格；继续向环空内注入盐水，使井口压力再增加0.8 MPa，折合到盐腔顶部压力为16.23 MPa，折合到盐腔底部压力为18.23 MPa，稳压30 min，如果压降小于0.5 MPa，则试压合格。

试压的基本数据：钻头直径 ϕ 215 mm，钻深931.70 m， ϕ 244.5 mm 套管鞋位于置931.20 m处， ϕ 127 mm 钻杆下深931.43 m，腔体试压盐水密度为1.20 g/cm³，腔内为饱和盐水，钻杆与套管环空容积24.53 m³，盐层顶924.00 m，盐腔顶936.00 m，腔底1 104.00 m。表8为西2井具体试压过程记录。

6.3 腔体蠕变变形反演

腔体蠕变变形：根据理论分析，卤水盐腔排放卤水测井过程中，卤水排出量由如下几部分组成：

$$\Delta V = \Delta V_C + \Delta V_T + \Delta V_L + \Delta V_D \quad (2)$$

表 8 西 2 井试压过程记录表

Table 8 Records of cavity pressure test for well Xi-2

时间/h	腔顶压力 /MPa	注入量 /m ³	排放量 /m ³	备注
0.0	10.93	0	0	开始
6.0	15.43	460	0	达到目标
25.0	15.43	0	0	稳压 19 h
26.0	16.23	49	0	继续加压
26.5	16.23	0	0	稳压 0.5 h
36.5	10.93	0	520	泄压放排

式中： ΔV 为卤水排出总量； ΔV_C 为盐岩蠕变而引起的体积变形； ΔV_T 为盐水热膨胀产生的体积变形，且 $\Delta V_T = \alpha V_0 \Delta T$ ($\alpha = 4.5 \times 10^{-4}$ ，为饱和卤水的等温扩散系数，单位 $1/K$ ； V_0 为腔体体积)； ΔV_L 为腔体继续淋滤产生的体积变形，且 $\Delta V_L = -0.085 V_0 \cdot \left(\frac{C_2}{\rho_2} - \frac{C_1}{\rho_1} \right)$ (C ， ρ 分别为卤水的浓度和密度，密度单位 kg/m^3)； ΔV_D 为压力降低而导致的体积膨胀，且 $\Delta V_D = -k V_0 \Delta P$ (k 为饱和卤水的压缩系数，且 $k = 2.8 \times 10^{-5} \text{ bar}$)。

根据本次西 2 测井试压实际情况，测井时间较短，从试压开始到结束总共 37 h，最后泄压排卤时间仅 10 h，且试压测井采用(近)饱和卤水，因此，对式(2) ΔV_L 中不作考虑，即 $\Delta V_L = 0$ ，则有

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta V_C + \Delta V_T + \Delta V_D = \\ &= \Delta V_C + 4.5 \times 10^{-4} \times 159\,449 \times [0.03 \times (37/24)] - \\ &= 2.8 \times 10^{-5} \times 159\,449 \times (-53) = 520.0 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

由此可得，由于盐岩蠕变而导致的腔体变形量为 $\Delta V_C = 380.15 \text{ m}^3$ 。

蠕变速率反演：由声纳测井结果可知，西 2 井腔体为近似纺锤体，其沿铅垂方向对称剖面形状及尺寸如图 17 所示。

按照此剖面计算的纺锤体体积为 $200\,860.52 \text{ m}^3$ ，而声纳实测锤体体积为 $159\,449 \text{ m}^3$ ，约为模型体积的 79.38%。其中，20.62% 部分为实际腔体表面的不规则性，以及腔体底部不溶物的堆积所占用，因此在数值模拟和计算中利用该近似模型尺寸是合理的。

这样，蠕变速率的反演也以该模型为基础。根据下式可计算出泄压排卤过程中腔体的蠕变速率为 $2.36 \times 10^{-5}/h$ ，因此有

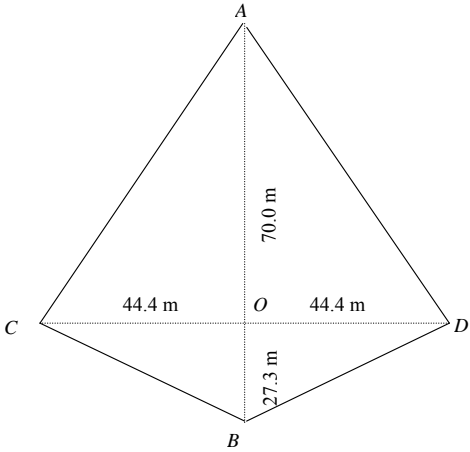


图 17 西 2 井腔体近似剖面形状尺寸
Fig.17 Approximate section and size of well Xi-2 salt cavity

$$\begin{aligned} \Delta V_C &= 200\,860.52 - \\ &= \frac{1}{3} \pi [R(1 - 2\dot{\epsilon}t)]^2 [H(1 - 2\dot{\epsilon}t)] \end{aligned}$$

这一结果与实验室实测的 5 ~ 10 MPa 应力差作用下盐岩的蠕变速率 $2 \times 10^{-5}/h$ 相接近。因此，本次测井试验，不仅完成了腔体的密封耐压性测试，而且也从实际中验证了该盐岩腔体的稳态蠕变率参数与试验结果(图 2)的一致。

7 结 语

通过对示范工程的盐岩力学特性分析、地下溶腔稳定性及容积变化预测，可以得到如下初步结论：

- (1) 与国外的盐岩相比，我国盐岩层的强度较低，蠕变试验结果表明：金坛盐矿盐岩具有较强的流变特性，盐穴储气库在运行期间存在流变，并引起储气库的体积减少，盐岩的流变特征将直接影响到储库服务年限内的溶腔体积变化。
- (2) 通过对不同洞形的储气库的进行静力和流变数值模拟计算分析，同体积椭球腔优于和梨形腔，在以自重应力为主的盐岩层中，长短轴比为 3/7 椭球腔优于长短轴比为 4/7 和 5/7 椭球腔。
- (3) 盐穴中储气库腔体的腔底、腔顶及腔周夹层位置出现了较为明显的应力集中，静力计算和流变的分析的结果显示在该位置也出现了比其他部位大的位移，储气库腔体的危险位置应集中在腔底、腔顶及夹层位置。
- (4) 对于单个独立腔体，其体积减少在初期 5 ~ 10 a 内比较明显，以后逐渐趋于平稳。

(5) 洞内压力周期性变化时, 洞周位移呈现周期性变化, 洞周位移速率呈现较明显的周期性变化, 而不随长期流变速率衰减呈现出明显衰减规律。

(6) 对金坛盐矿西 1、西 2 老腔进行了试压和放排的结果表明, 西 1、西 2 老腔密封性好, 可以耐压 15.43 MPa, 在储气库运行管理中, 可以参照该极限值进行气体储存。

(7) 根据西 2 井的放排卤水量, 反演腔体盐岩蠕变速率为 $2.36 \times 10^{-5}/\text{h}$, 该值与实验室实测的 5 ~ 10 MPa 应力差作用下盐岩的蠕变速率 $2 \times 10^{-5}/\text{h}$ 相接近。在老腔储库运行管理的数值模拟中, 采用上述实测的盐岩蠕变速率参数是合理可行的。

参考文献(References):

- [1] Schulze T, Popp H K. Development of damage and permeability in deforming rock salt[J]. Engineering Geology, 2001, 61(2/3): 163–180.
- [2] Munson D. Constitutive modeling of salt behavior—state of the technology[A]. In: Wittke W ed. Proceedings of the 7th International Congress on Rock Mechanics[C]. Balkema: A. A. Rotterdam, 1993. 127–134.
- [3] Chan K S. A damage mechanics treatment of creep failure in rock salt[J]. International Journal of Damage Mechanics, 1997, 6: 122–152.
- [4] Hunsche U. Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt[A]. In: Proc. of the 3rd Conference of Mechanical Behavior of Salt[C]. [s. l.]: Trans. Tech. Publications, 1993. 237–247.
- [5] Hou Z. Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 725–738.
- [6] Berest P, Bergues J, Brouard B, et al. A salt cavern abandonment test[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(3): 357–368.
- [7] Cristescu N. Constitutive equation for rock salt and mining applications[A]. In: Proc. the 7th Int. Symp. on salt[C]. Kyoto Japan: Elsevier, 1992. 105–115.
- [8] Hansen F D, Mellegard K D, Senseny P E. Elasticity behavior of salt[A]. In: Hardy H R J, Langer M, ed. Proc. of the 1st Conf. of the Mechanical Behavior of Salt[C]. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech. Publ., 1984. 71–83.
- [9] Herrmann W, Wawersik W R, Lauson H S. Creep curves and fitting parameters for southeastern New Mexico bedded salt[R]. Sandia Rep.: SAND, 1980.
- [10] Hunsche U. Determination of the dilatancy boundary and damage up to failure for four types of rock salt at different stress geometries[A]. In: Habib P, Hardy H R, Ladanyi B, et al ed. Proc. of the 4th Conf. on the Mechanical Behavior of Salt[C]. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech. Publ., 1996. 163–174.
- [11] Cristescu N. Evaluative damage in rock salt[A]. In: Habib P, Hardy H R, Ladanyi B, et al ed. Proc. of the 4th Conf. on the Mechanical Behavior of Salt[C]. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech. Publ., 1996. 131–142.
- [12] Langer M. Use of solution—mined caverns in salt for oil and gas storage and toxic waste disposal in Germany[J]. Engineering Geology, 1993, 35(2): 183–193.
- [13] Munson D E. Constitutive model of creep in rock salt applied to underground room closure[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1997, 34(3): 233–247.
- [14] Peach C J. Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks[Ph. D. Thesis][D]. Netherlands: University of Utrecht, 1991.
- [15] Peach C J. Deformation dilatancy and permeability development in halite/anhydrite Composites[A]. In: Ghoreychi M, Berest P, Hardy H R J, et al ed. Proc. of the 3rd Conf. on the Mechanical Behavior of Salt[C]. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech. Publ., 1996. 153–166.
- [16] Till P, Hartmut K. Evaluation of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(B3): 4 061–4 078.
- [17] Yang C H, Daemen J J K, Yin J H. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(2): 233–242.
- [18] 杨春和, 陈 锋, 曾义金. 盐岩蠕变损伤关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1 602–1 604. (Yang Chunhe, Chen Feng, Zeng Yijin. Investigation of creep damage constitutive theory of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1 602–1 604. (in Chinese))
- [19] Chan K S, Munson D E, Bonder S R, et al. Cleavage and creep of rock salt[J]. Acta Materialia, 1996, 44(9): 3 553–3 565.
- [20] Chan K S, Fossum A F, Munson D E. A damage mechanics treatment of creep failure in rock salt[J]. International Journal of Damage Mechanics, 1997, 6(2): 121–151.