

文章编号: 1000-7598-(2007) 01-0057-06

盐岩储气库最佳采气速率数值模拟研究

陈 锋, 杨春和, 白世伟

(中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 由于已采盐矿存在着大量的采卤溶腔群, 对采卤溶腔群进行改造作为天然气储存库使用, 能有效缩短储气库的建设周期, 并消除采卤溶腔对环境带来的不利影响。基于盐矿地质资料、盐岩的力学试验及本构关系分析, 对作为西气东输储气库使用 4 口采卤溶腔群进行了研究, 通过三维数值模拟方法研究了该溶腔群在不同采气速率下盐腔周的应力状态和体积变形规律, 并通过分析, 对该溶腔群的最佳采气速率得出了有益的结论。

关 键 词: 盐岩; 采卤溶腔; 储气库; 蠕变; 采气速率

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Investigation on optimized gas recovery velocity of natural gas storage in salt rock layer by numerical simulation

CHEN Feng, YANG Chun-he, BAI Shi-wei

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: There are large numbers of brine-extracted caverns which can be reconstructed as the nature gas storage in the exploited salt mine. It can availably shorten the construction time of natural gas storage and eliminate the disadvantaged effect of brine-extracted caverns to the environment. Based on the geological data of the salt mine and the mechanical behavior of salt rock, the four brine-extracted caverns which will be reconstructed to the nature gas storages are studied by the three-dimensional numerical simulation. The stress state around the caverns and the volume convergence law of the caverns are studied under the various gas recovery velocities. The better conclusion about the optimized gas recovery velocity of natural gas storage is obtained by the research.

Key words: salt rock; brine-extracted cavern; natural gas storage; creep; gas recovery velocity

1 概 述

由于盐岩具有良好的密封性、低渗透性和损伤自愈合性, 使得深部地下盐矿成为世界各国能源储存(石油、天然气)的一种主要介质。法国的 Tersanne、Etrez 储气库, 英国的 Kiel、Hornsea 储气库, 德国 100 多个的储存库, 及美国的 Eminence 储气库和数百个储油库都选择在密封性很好的地下深部盐丘或盐层中^[1-4]。在我国, 能源储存已越来越受到国家和政府的重视。在天然气工程中, 由于城市使用天然气具有小时、日、月及冬夏季不均衡性, 而气源的产气却不能随用气的不均衡同步供给, 为调节这种不均衡性, 则需要在大城市附近建立储气库, 保证天然气的稳定供应。

西气东输工程中, 为调节对上海天然气的不均

衡性, 提高供气的可靠性, 拟在江苏金坛盐矿建立地下洞穴型储气库^[5]。由于在盐矿新建一个储气库的时间周期为 3~5 年, 考虑到西气东输工程对上海供气的时间紧迫性, 拟采用盐矿的已有溶腔进行改造, 完成储气库的建设。通过对盐矿现有溶腔容积大小、盐层顶底板厚度、溶腔距离的测试与筛选, 初步选定了 4 口溶腔进行改造, 以达到储气要求, 完成储气库的建设。本文主要对盐矿盐岩的力学特性及其本构关系进行研究, 采用三维数值模拟方法研究了盐岩溶腔群在不同采气速率下溶腔的应力状态和体积变形规律, 针对实际储气库的运行工况, 得出了有益的结论。

2 盐岩蠕变特性及其本构关系

作者对盐岩蠕变规律进行了大量的研究^[6-10],

收稿日期: 2005-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(No.50374064, No.50434050); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No.2002CB412704)。

作者简介: 陈锋, 男, 1974 年生, 博士, 主要从事盐岩力学特性、岩土工程数值模拟、岩土体稳定性分析等研究工作。E-mail: fchen@whrsm.ac.cn

分析盐岩蠕变的特性。盐岩的蠕变过程一般包括 3 个阶段：即瞬态蠕变、稳态蠕变和可能出现的加速蠕变，如图 1 所示。相比较于稳态蠕变和加速蠕变，盐岩的瞬态蠕变很小，一般只有较短时间的瞬态蠕变，很快过渡到稳态蠕变。在盐岩体的实际工程中，盐岩体的蠕变变形不允许进入加速蠕变阶段，因此，盐岩本构关系中着重研究稳态蠕变特性是合适的。

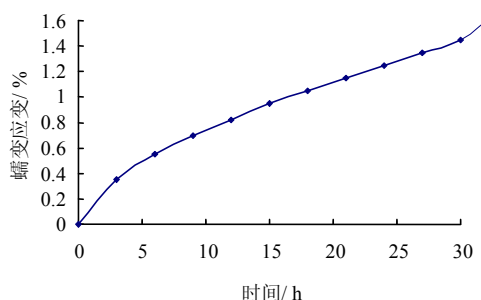


图 1 围压 4 MPa, 轴压 12 MPa 盐岩蠕变曲线
Fig.1 The creep curve of salt rock under confining pressure of 4 MPa and axial pressure of 12 MPa

针对盐岩流变特性及其本构关系国内外学者进行了大量的研究。王贵君等^[11]分析了盐岩蠕变损伤的过程，提出了“损伤增速界限”的概念，建立了一种能反映盐岩流变损伤的本构模型。刘绘新等^[12]研究了四川地区盐岩蠕变规律。考虑盐岩体不同变形机理的本构模型，其模型很复杂，参数众多。HOU Zheng-meng^[13]等提出了考虑盐岩位错机理、硬化、软化及损伤和损伤恢复的 Hou/Lux 本构模型。Munson 等^[14]根据盐岩位错滑移理论建立了针对不同温度、不同应力条件下的 M-D 本构模型。在盐岩蠕变试验中，变形测量往往很难区分出其变形是由哪一种变形机理造成的，其变形量是整个盐岩试样各种机理、因素综合作用的体现。在这些本构模型应用中，虽然模型中考虑了各种机理作用，但材料参数拟合却是对综合变形量的拟合。在数值模拟分析中，由于复杂的本构模型参数众多，也只有模型研究者本人或其研究小组能够应用得很好，其推广应用具有很大的局限性。实际工程中，使用简单的本构模型，采用合适的参数，往往也能够获得理想的数值模拟结果。DURUP^[15]等人对经典的盐岩本构模型进行了研究，在不考虑温度的影响下，两参数的幂指数本构模型与多参数模型一样能对试验数据拟合得很好。本文数值模拟研究中选用盐岩幂指数本构模型来描述盐岩的稳态蠕变率。在盐岩幂指数本构模型中，采用 Mises 流动准则，盐岩稳态蠕变率的表达式为

$$\dot{\epsilon}_{ij}^s = \frac{3}{2} A q^{n-1} S_{ij} \quad (1)$$

式中：A, n 为材料参数； $q = \sqrt{3J_2}$ ， $J_2 = 1/2 S_{ij} S_{ij}$ 为应力偏量第二不变量。

3 盐矿溶腔群建模

根据金坛盐矿的地质资料，盐岩层顶面高程为 940 m，底面高程为 1 080 m，盐岩层厚度为 140 m，盐岩中分别含有 4 层泥岩层，其厚度分别为 2, 3, 2, 4 m，具体见图 2。计算模型选取盐岩层上覆泥岩层 400 m，盐岩层 140 m，盐岩层下泥岩 100 m，共计 640 m，底面为 600 m×600 m。上覆 540 m 厚泥岩层转化为上覆荷载作用于模型的上表面，计算区域下表面、立方体 4 侧面均向垂直于表面的法向简支约束，单元类型采用四面体单元。

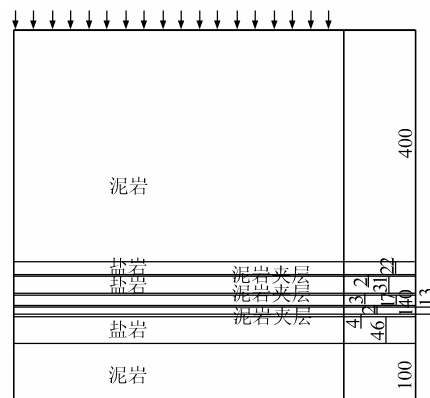


图 2 计算模型图
Fig.2 The analyzed model sketch

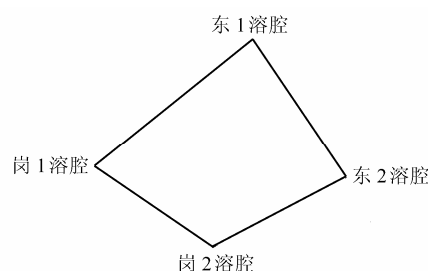


图 3 溶腔平面分布图
Fig.3 The relative location of the salt cavern

通过对金坛盐矿已有溶腔进行初选，确定东岗群腔的 4 口溶腔，分别为东 1 溶腔、东 2 溶腔、岗 1 溶腔、岗 2 溶腔，拟将其改为西气东输的保安储气库，4 口溶腔井口平面位置布置如图 3 所示。通过对该溶腔群进行声纳测量，确定了 4 口溶腔的基本形状及主要尺寸数据，其基本形状均为梨形，腔体高度由 53.7~61.8 m 不等，腔顶顶板盐岩厚度由

5.9~19.9 m 不等, 最大半径为 41.9~46.1 m 不等。根据测试所得腔体形状特征数据, 采用三维数值模拟软件完成了该溶腔群的网格剖分图, 图 4 为整体网格剖分图, 图 5 为 4 口溶腔网格剖分图。

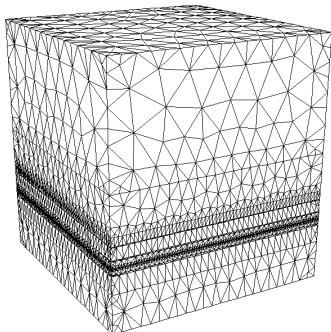


图 4 模型整体网格图

Fig.4 The entire mesh of the analyzed model

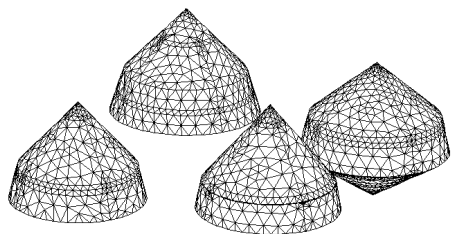


图 5 溶腔网格图

Fig.5 The mesh of the salt cavern

4 计算参数和计算工况

通过该盐矿盐岩大量的三轴压缩试验, 盐岩单轴抗压强度较低, 横向变形能力较大, 盐岩的变形模量与单轴抗压强度的比值与一般的岩石如砂岩、页岩等的变形模量与单轴抗压强度的比值相比, 要小 1~2 个数量级, 表 1 为该盐矿部分盐岩试样的试验结果, 通过盐岩的试验结果, 求得盐岩 $c = 1.25 \text{ MPa}$, $\phi = 30^\circ$, 与国外的盐岩相比, 该盐矿盐岩强度较低。通过对不同围压下盐岩的蠕变试验, 盐岩的蠕变率较高, 介于 $(2.5 \sim 5.0) \times 10^{-5} \text{ h}$ 之间。图 6 为该盐岩典型的盐岩的蠕变试验结果曲线, 基于对盐矿盐岩大量试验数据的分析与拟合, 计算中选取盐岩的流变参数为 $n = 3.5$, $A = 5.86 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-3.5} \text{ yr}^{-1}$ 。

根据该盐矿拟定储气库的运行工况, 其运行压力介于 6.5~14.5 MPa 之间, 运行过程共分为 4 个阶段: 即注气加压阶段、恒定高压阶段、采气降压阶段、恒定低压阶段。为分析采气降压阶段储气库的体积变形规律, 模拟了 9 种不同的采气速率, 分别为以 0.3, 0.4, 0.5, 0.55, 0.6, 0.63, 0.65, 0.68,

0.7 MPa/d 的采气速率, 腔体内压为由 14.5 MPa 降至 6.5 MPa, 溶腔群内各腔体内压同步降压, 表 2 为计算方案表。

表 1 盐岩试样三轴试验结果表

Table 1 The triaxial experiment results of salt samples

盐岩编号	弹模 / GPa	围压 / MPa	最高轴压 / MPa
25-5	20.8	15	43.9
10-5	18.5	5	21.9
		5	23.5
11-56	21.1	10	27.4
		20	31.9
8-4	21.8	20	42.9
		25	48.4

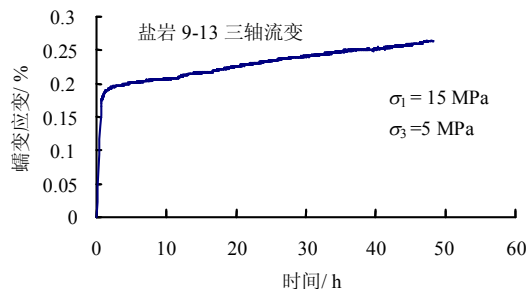


图 6 盐岩蠕变试验曲线

Fig.6 The creep curve of salt rock in Jingtian salt mine

表 2 计算方案表

Table 2 The analyzed schemes under different conditions

计算方案	初始内压 / MPa	最终内压 / MPa	降压速率 / MPa · d ⁻¹	降压时间 / d
方案 1	14.5	6.5	0.3	26.7
方案 2	14.5	6.5	0.4	20
方案 3	14.5	6.5	0.5	16
方案 4	14.5	6.5	0.55	14.5
方案 5	14.5	6.5	0.6	13.3
方案 6	14.5	6.5	0.63	12.7
方案 7	14.5	6.5	0.65	12.3
方案 8	14.5	6.5	0.68	11.8
方案 9	14.5	6.5	0.7	11.4

5 计算结果分析

5.1 应力场分析

图 7~图 10 分别给出了以 0.7 MPa/d 的采气速率降至 6.5 MPa 时东 1、东 2、岗 1、岗 2 溶腔群, 最大、最小主应力分布图, 由图可看出, 腔周最大、最小主应力值均为负值 (压应力), 未出现拉应力, 且东 1、东 2、岗 1、岗 2 溶腔群主应力的最小值为 5.2 MPa, 略低于 6.5 MPa 内压。溶腔群在采气过程中腔周不会出现拉应力。

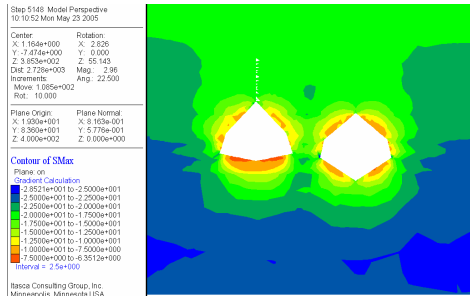


图7 东1、东2剖面最大主应力分布图

Fig.7 The maximal principal stress of the Dong1 and Dong2 caverns' profile

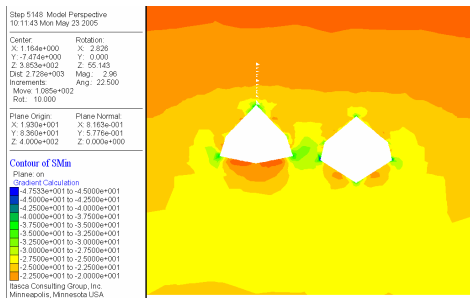


图8 东1、东2剖面最小主应力分布图

Fig.8 The minimal principal stress of the Dong1 and Dong2 caverns' profile

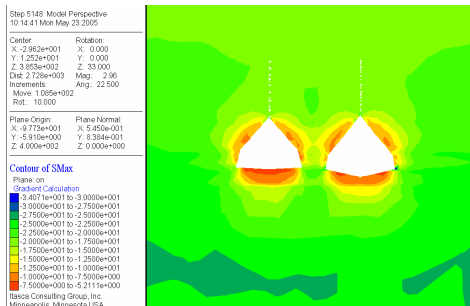


图9 岗1、岗2剖面最大主应力分布图

Fig.9 The maximal principal stress of the Gang1 and Gang2 caverns' profile

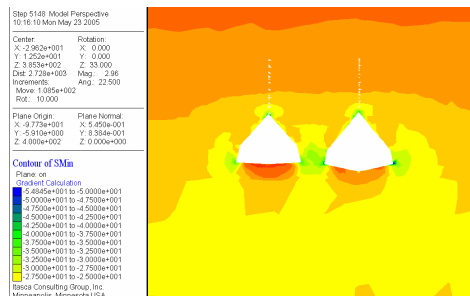


图10 岗1、岗2剖面最小主应力分布图

Fig.10 The minimal principal stress of the Gang1 and Gang2 caverns' profile

5.2 体积减少规律分析

图11~图14为两组溶腔群不同腔体的体积减少规律,由图可以看出,其体积减少规律受降压速率和时间影响,在相同降压时间时,降压速率越快,

溶腔体积减少越多。以降压速率0.3 MPa/d为例,内压降至6.5 MPa时,东1腔体的体积减少量为0.231%,东2腔体的体积减少量为0.232%,岗1腔体的体积减少量为0.248%,岗2腔体的体积减少量为0.284%,岗2腔体的体积减少量最多,其次为岗1。

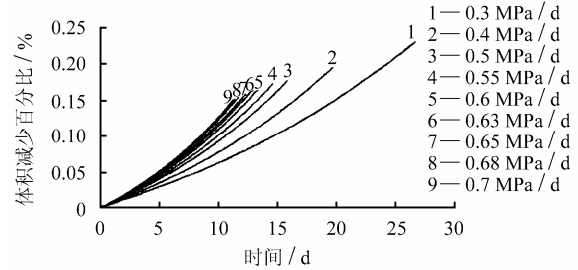


图11 东1腔体不同降压方案下体积减少曲线

Fig.11 The volume convergence law of Dong1 cavern under different gas recovery velocities

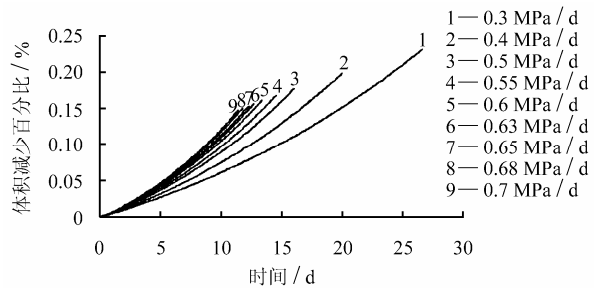


图12 东2腔体不同降压方案下体积减少曲线

Fig.12 The volume convergence law of Dong2 cavern under different gas recovery velocities

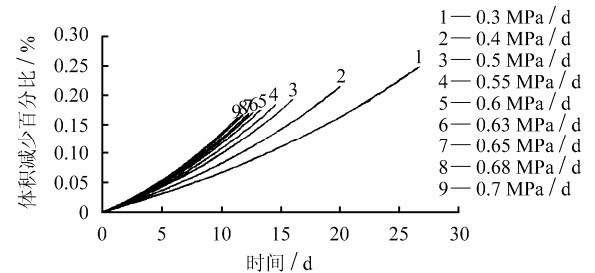


图13 岗1腔体不同降压方案下体积减少曲线

Fig.13 The volume convergence law of Gang1 cavern under different gas recovery velocities

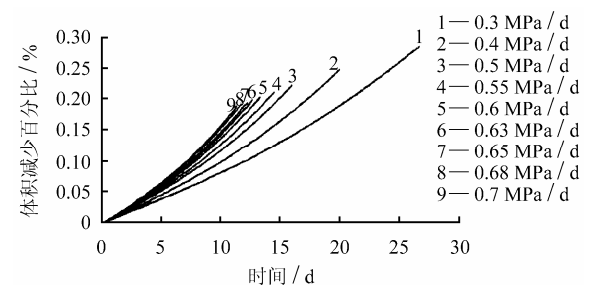


图14 岗2腔体不同降压方案下体积减少曲线

Fig.14 The volume convergence law of Gang2 cavern under different gas recovery velocities

5.3 体积减少速率分析

根据德国克劳斯塔大学的研究报告^[16], 为保证储气库的长期使用寿命, 每一循环周期下(一年)的体积应变不应超过 3%, 则平均每天的体积减少不应超过 0.008 2%。根据储气库的运行 4 个阶段降压的规律, 在降压采气阶段的体积变化速率最大, 其次为恒定低压阶段。依据数值模拟的结果, 恒定低内压 6.5 MPa 时体积缩小速率平均为 0.004 5%/d, 按保守计算, 设定降压时间占一个运行周期的 1/3 时间(实际降压时间一般低于这个时间), 其余时间段的体积缩小率按 0.004 5%计算, 则降压阶段的体积变化速率不超过 0.015 %/d, 则可保证整个储气库运行周期内平均每天的体积减少不超过 0.008 2%。因此, 取 0.015 %/d 的平均体积缩小速率为降压阶段的体积缩小率的上限值。

图 15~图 18 为各个腔体在不同降压方案下的体积减少速率曲线。

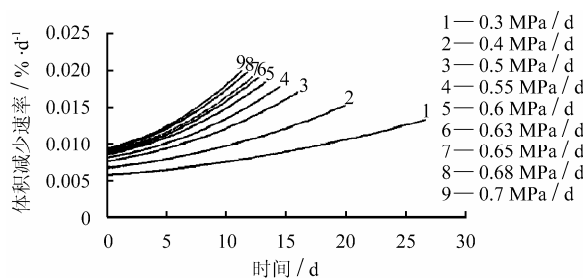


图 15 东 1 腔体不同降压方案下体积减少速率曲线
Fig.15 The volume convergence velocity law of Dong1 cavern under different gas recovery velocities

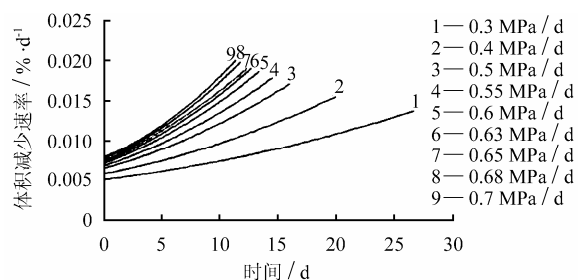


图 16 东 2 腔体不同降压方案下体积减少速率曲线
Fig.16 The volume convergence velocity law of Dong2 cavern under different gas recovery velocities

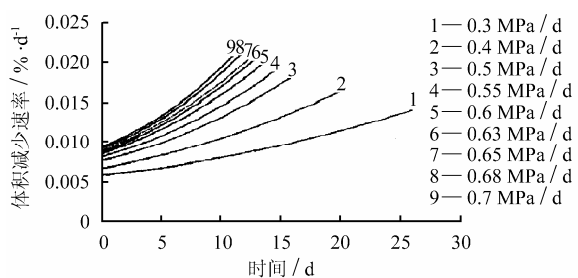


图 17 岗 1 腔体不同降压方案下体积减少速率曲线
Fig.17 The volume convergence velocity law of Gang1 cavern under different gas recovery velocities

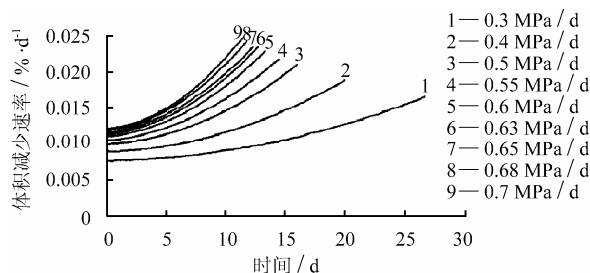


图 18 岗 2 腔体不同降压方案下体积减少速率曲线
Fig.18 The volume convergence velocity law of Gang2 cavern under different gas recovery velocities

图 19~图 22 为各个腔体体积缩小速率与降压速率关系曲线, 体积减少速率随降压速率增加近似线性增加。根据各个腔体体积减少速率数据, 岗 2 腔体的体积变化速率最高, 当降压速率达到 0.60 MPa/d 时, 该腔体降压阶段的日平均体积缩小率为 0.015 3%/d。其余腔体在降压速率达到 0.7 MPa/d 时, 体积缩小速率分别为: 东 1 腔体 0.013 4%/d、东 2 腔体 0.012 9%/d、岗 1 腔体 0.014 3%/d, 均未超过 0.015 %/d。据此, 建议储气库的最大采气降压速率应小于 0.55 MPa/d。

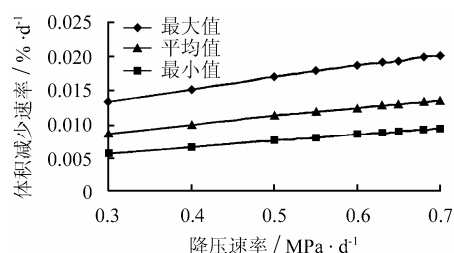


图 19 东 1 腔体体积减少速率与降压速率关系曲线
Fig.19 The volume convergence velocity vs. the gas recovery velocity of the Dong1 cavern

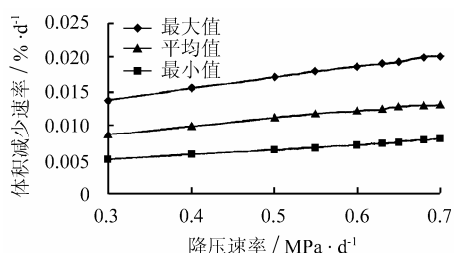


图 20 东 2 腔体体积减少速率与降压速率关系曲线
Fig.20 The volume convergence velocity vs. the gas recovery velocity of the Dong2 cavern

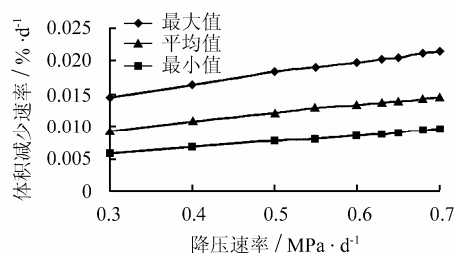


图 21 岗 1 腔体体积减少速率与降压速率关系曲线
Fig.21 The volume convergence velocity vs. the gas recovery velocity of the Gang1 cavern

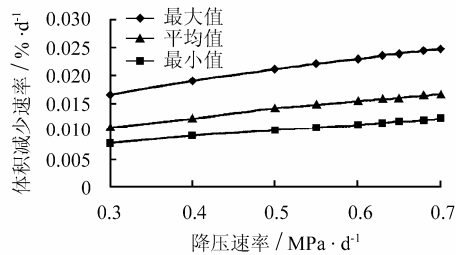


图 22 岗 2 腔体体积减少速率与降压速率关系曲线
Fig.22 The volume convergence velocity vs. the gas recovery velocity of the Gang2 cavern

6 结 论

基于对盐矿溶腔群地质资料、盐岩力学特性进行系统地研究,采用三维数值模拟方法对溶腔群作为储气库运行的不同采气降压工况进行了研究。数值模拟结果显示,在盐腔群以不同速率的采气过程中,盐岩溶腔群腔周不会出现拉应力,通过对溶腔群在不同采气速率下的蠕变体积变形规律分析,针对溶腔群的最佳降压采气速率得出了有益的结论。

参 考 文 献

- [1] Reinhard ROKAHR, Kurt STAUDTMEISTER. The assessment of the stability of a cavern field in bedded salt with the help of the new hannover dimensioning concept[A]. **The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Third Conference**[C]. France: Trans Tech Publications, 1993. 533—544.
- [2] Karl Heinz Lux. Some results of case history studies with respect to the mechanical behavior of existing caverns[A]. **The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Second Conference**[C]. Germany: Trans Tech Publications, 1984. 581—604.
- [3] Pierre Berest, Duc Nguyen Minh. Deep underground storage cavities in rock salt: interpretation of in-situ data from French and foreign sites[A]. **The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the First Conference** [C]. America: Trans Tech Publications, 1981. 555—572.
- [4] Robert L. THoms, Richard M. Gehle. Survey of existing caverns in U.S. salt domes[A]. **The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Second Conference**[C]. Germany: Trans Tech Publications, 1984. 703—717.
- [5] 杨春和, 陈锋. 金坛盐矿已有溶腔可用性评估研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005. 85—123.
- [6] YANG Chun-he, Daemen J K, YIN Jian-hua. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 36(2): 336—341.
- [7] 杨春和, 殷建华, Daemen J J K. 盐岩应力松弛效应的研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 1999, 18(3): 262—265. YANG Chun-he, YIN Jian-hua, Daemen J J K. Salt rock behavior stress relaxation creep[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(3): 262—265.
- [8] 杨春和, 陈锋, 曾义金. 盐岩蠕变本构关系研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(11): 1 602—1 604. YANG Chun-he, CHEN Feng, ZENG Yi-jin. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(11): 1 602—1 604.
- [9] CHEN Feng, YANG Chun-he, BAI Shi-wei. Investigation on creep behavior of salt rock and creep pressure on oil casing in deep stratum[A]. **Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS**[C]. Japan: Onhishi&Aoki(eds), 2004. 861—864.
- [10] 曾义金, 杨春和, 陈锋, 等. 深井石油套管盐膏岩层蠕变挤压应力计算研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(4): 595—598. ZENG Yi-jin, YANG Chun-he, CHEN Feng, et al. Numerical analysis of creep pressing stress of casing in deep salt rock stratum[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 595—598.
- [11] 王贵君. 一种盐岩流变损伤模型[J]. **岩土力学**, 2003, 24(增): 81—84. WANG Gui-jun. A constitutive creep-damage model for saline rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 81—84.
- [12] 刘绘新, 张鹏, 盖峰. 四川地区盐岩蠕变规律研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(9): 1 290—1 294. LIU Hui-xin, ZHANG Peng, GAI Feng. Study on creep rule of salt rock in Sichuan region[J]. **Chinese Journal of Rock and Mechanics and Engineering**, 2002, 21(9): 1 290—1 294.
- [13] HOU Zheng-meng, WU Wen. A damage and creep model for rock salt as well it's validation[J]. **Chinese Journal of Rock and Mechanics and Engineering**, 2002, 21(9): 1 797—1 804.
- [14] Darrell E. Munson. Extension of the M-D model for treating stress drops in salt[A]. **The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Third Conference** [C]. France: Trans Tech Publications, 1993. 31—44.
- [15] DURUP G GAZ de France, XU J Sofregaz. Comparative study of certain constitutive laws used to describe the rheological deformation of salts[A]. **The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Third Conference**[C]. France: Trans Tech Publications, 1993, 75—83.
- [16] 候正猛. 金坛地下储气库 15 口采卤溶腔稳定性评价技术服务报告[R]. 德国: 克劳斯塔大学, 2004. 18—25.