

盐岩非线性蠕变损伤本构模型及其工程应用

陈卫忠¹, 王者超¹, 伍国军¹, 杨建平¹, 张保平²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中国石油勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要: 盐岩以其良好的流变、低渗透率及损伤自我恢复等特性, 是目前国内外公认的能源、废弃物贮存和高放射废物地质处置的首选介质。结合金坛储气库盐岩三轴蠕变的研究成果, 建立盐岩三维蠕变损伤的本构方程和损伤演化方程, 并将建立的本构方程编制成有限元计算程序, 模拟金坛储气库在注采过程中的蠕变和损伤演化的影响范围。研究成果对金坛储气库的运行压力设计具有一定的参考意义。

关键词: 岩石力学; 盐岩; 非线性蠕变; 损伤; 本构方程; 储气库

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)03 - 0467 - 06

NONLINEAR CREEP DAMAGE CONSTITUTIVE MODEL OF ROCK SALT AND ITS APPLICATION TO ENGINEERING

CHEN Weizhong¹, WANG Zhechao¹, WU Guojun¹, YANG Jianping¹, ZHANG Baoping²

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

2. Langfang Branch, Exploration and Production Research Institute, SinoPec Corporation, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: Rock salt is considered as a potential medium for energy storage, nuclear waste deposit for its excellent creep, low permeability and damage recovery behaviors. Based on laboratory creep test results of rock salt, nonlinear creep constitutive model and damage evolution equation are suggested. The developed constitutive model and damage evolution equation are programmed by FEM; and comparison between laboratory data and numerical results are given. Furthermore, the numerical code is applied to the simulation of creep and damage behaviors of underground salt caverns during natural gas injection and pumping. The creep damage evolution zones of the caverns are obtained from the numerical analysis. The achievements from the research work can provide references to the design of Jintan Underground Gas Storage.

Key words: rock mechanics; rock salt; nonlinear creep; damage; constitutive equation; gas storage

1 引言

盐岩以其良好的流变、低渗透率及损伤自我恢复的特性, 是目前国内外公认的能源、废弃物贮存和高放射废物永久处置的首选介质。盐岩强度与其偏应力有关, 应力路径对其强度影响较大, 盐岩的

强度随温度增加而降低。近些年来, 很多学者应用损伤力学模型来进一步准确地表征盐岩的强度特征。如 C. J. Peach 和 C. J. Spiers^[1]以及 J. C. Stormont 等^[2~4]研究盐岩在扩容区和非扩容区的应力、变形特征及盐岩在扩容应力区微裂隙的产生和扩展对盐岩总应变的影响规律, 并建立相应的力学模型, 据此获得盐岩的压缩极限、扩容发生条件等。众多学

收稿日期: 2006 - 06 - 19; **修回日期:** 2006 - 09 - 28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50434050); 中国科学院重大方向性项目(c150501)

作者简介: 陈卫忠(1968 -), 男, 博士, 1990年毕业于山东矿业学院采矿工程专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

者通过一系列的试验来研究盐岩和夹泥盐岩在不同温度和轴向压力下的蠕变特性，并提出不同地域的盐岩稳定蠕变速率上、下界限，应力路径，应力历史等对蠕变断裂的影响。N. D. Cristescu^[5]提出可描述盐岩初始蠕变和稳态蠕变的模型。

随着研究的深入，人们将黏塑性理论引入到盐岩力学性质的研究中。在 WIPP(waste isolation pilot plant) Room_D 的现场数据的分析中，J. Jin 和 N. D. Cristescu^[6]提出 Gorleben 盐岩的初始蠕变阶段的弹黏性模型，给出屈服函数和黏塑性势能，并充分考虑模型数值计算的适用性。I. P. Munteanu 和 N. D. Cristescu^[7]将模型的适应范围扩展到稳态蠕变阶段，提出盐岩的非关联弹塑性本构模型。S. Heusermann 等^[8]考虑到盐岩的扩容，利用 LUBBY 2 模型研究盐岩的应变硬化和时间硬化。

在国内，周时光等^[9]开展盐岩单轴刚性试验研究，得到盐岩的应力-应变全过程曲线，并研究循环加卸载及不同加载速率条件下盐岩的力学性质。杨春和和吴益明^[10]通过对单轴、三轴盐岩应力路径的应力松弛与蠕变试验结果分析、研究应力状态及加载路径对盐岩时间相关性特征的影响。研究结果表明：盐岩稳态蠕变率仅是应力状态的函数，与加载历史无关，初始蠕变极限可表示为稳态蠕变率的线性函数，盐岩的应力松弛具有围压相关性。陈卫忠等^[11]应用指数模型研究金坛废弃盐岩溶腔作为储气库的长期稳定性研究。梁卫国和赵阳升^[12]进行盐岩的单轴压缩，间接拉伸及变角剪切试验，得到盐岩的强度曲线方程。

盐岩的蠕变损伤是由于内部新裂纹的产生和裂纹的不断扩展而产生的，盐岩的蠕变损伤表现为变形与时间效应的耦合，蠕变变形发展到一定的量值后，其蠕变变形的速率表现为和时间及累积变形密切相关的特点。图 1 为实验室盐岩三轴蠕变试验所

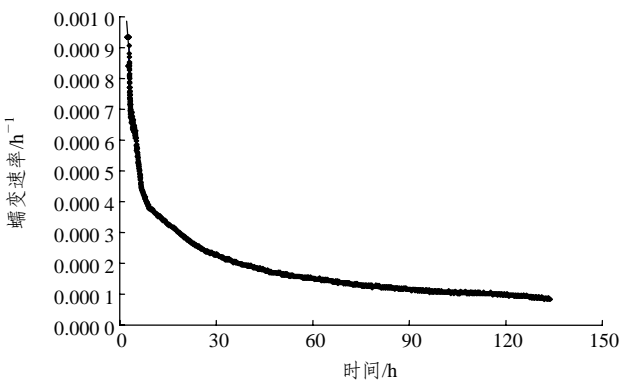


图 1 盐岩蠕变速率曲线(偏应力为 25 MPa)

Fig.1 Creep velocity ratio curve of rock salt(deviatoric stress is 25 MPa)

得到的盐岩蠕变速率曲线(偏应力为 25 MPa)。本文将结合“西气东输”金坛储气库盐岩三轴蠕变试验的成果，研究盐岩的非线性蠕变损伤的机制，并将建立的盐岩蠕变损伤本构方程应用于分析金坛废弃盐腔的长期稳定性分析，研究成果为工程的设计和储库的运行提供必要的依据。

2 盐岩非线性蠕变损伤力学模型

实内试验结果表明：盐岩的蠕变速率不仅与时间相关，而且还与累积蠕变变形密切相关，盐岩的非线性蠕变是其内部结构在蠕变过程中的综合表现，盐岩非线性蠕变损伤机制可更好地解释盐岩蠕变过程中所显现的非线性变形特征。

本文以 Burgers 模型为基础，在蠕变本构关系的推导中考虑到蠕变对黏滞系数的影响，损伤的影响。假定盐岩在非线形蠕变过程，其黏滞系数和累积黏性应变呈现负指数关系，则改进的 Burgers 模型来描述盐岩的蠕变特性时，其元件构成如图 2 所示。

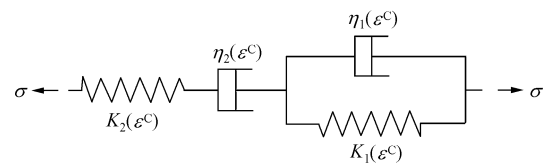


图 2 盐岩的蠕变损伤模型(一维模型)

Fig.2 Creep damage model of rock salt(one-dimensional model)

模型中元件的系数在蠕变过程中随着黏性应变的增加不断衰减，即弹簧的刚度及黏壶的黏滞系数与黏性应变 ϵ^c 的函数。盐岩蠕变损伤演化方程为

$$D = 1 - e^{-m\epsilon^c} \tag{1}$$

式中： m 为材料常数， ϵ^c 为蠕变应变。

根据图 2 中的 Burgers 模型，可推导出盐岩在一维条件下的蠕变方程为

$$\epsilon^c = \frac{\sigma}{K_2(\epsilon^c)} + \frac{\sigma}{\eta_2(\epsilon^c)}t + \frac{\sigma}{K_1(\epsilon^c)} \left(1 - e^{-\frac{K_1(\epsilon^c)}{\eta_1(\epsilon^c)}t} \right) \tag{2}$$

由式(1)可得到三维条件下的蠕变方程，盐岩的总应变可写为

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^c \tag{3}$$

根据实验室三轴蠕变试验的结果可拟合得到金坛不同深度盐岩层的蠕变参数, 不同岩盐层的偏应力值及其蠕变参数结果如表 1 所示。试验结果和拟合结果的对比如图 3, 4 所示。图 5 为盐岩试验所得蠕变速率曲线与修正的 Burgers 模型及其与国内外常用的指数模型比较。研究表明, 采用非线性蠕变模型可更好地反映试验过程中所体现的蠕变速率变化过程, 对于评价储库经历不同的注采过程具有十分重要的实用意义。

表 1 不同岩盐层的偏应力值及其蠕变参数

Table 1 Deviatoric stresses and creep parameters for rock salts

井位编号	S_1^0/MPa	G_2^0/MPa	$\eta_2^0/(\text{MPa} \cdot \text{h}^{-1})$	G_1^0/MPa	$\eta_1^0/(\text{MPa} \cdot \text{h}^{-1})$
2#	25.0	1 234	247 804	3 307	24 750
3#	30.0	1 409	271 403	1 671	21 158
7#	30.0	1 307	242 822	1 549	20 690
8#	25.0	669	296 580	2 041	20 727
12#	26.5	1 733	193 370	1 826	23 904

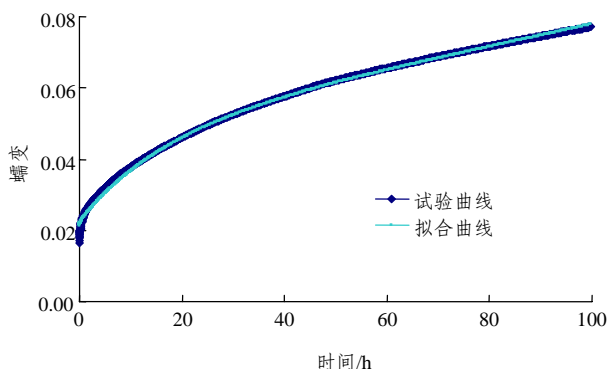


图 3 2#井盐岩层试件试验和拟合曲线

Fig.3 Comparison curves of creep strain between laboratory data and developed model for rock salt from well No.2

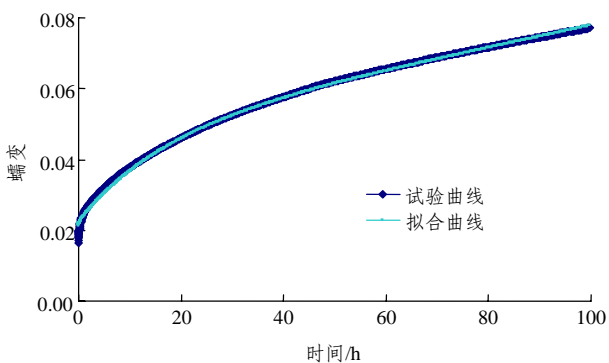


图 4 3#井盐岩层试件试验和拟合曲线

Fig.4 Comparison curves of creep strain between laboratory data and developed model for rock salt from well No.3

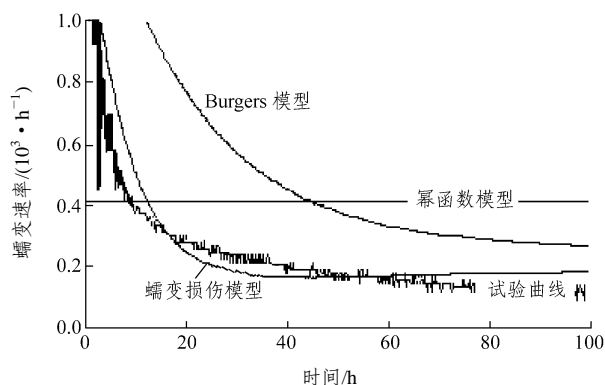


图 5 2#井盐岩层试件蠕变速率对比曲线

Fig.5 Comparison of creep velocity ratio curves between laboratory data and developed model for well No.2

3 工程应用

3.1 工程简介

金坛盐矿位于“西气东输”输气管线长江三角洲苏南地区, 镇江市以南 50 km 左右, 距“西气东输”管道丹阳分输站 32 km, 距南京 100 km, 地势平坦, 埋深适中, 多为 800~1 200 m, 地层平缓, 构造简单, 断层封闭性好, 且断层都在盐岩体边部, 对盐岩层建库无影响; 盐岩分布范围大, 约为 60.5 km², 厚度大, 一般为 100 m 以上, 最厚约 200 m; 盐层含盐率高, 主体部位可达 84.76%~93.76%, 夹层少, 厚度小, 利于溶离建造地下溶腔; 直接顶底板均为含钙芒硝、含膏泥岩或致密泥层, 厚度大, 抗压强度大, 分布稳定, 封闭性好。

本文选择直溪桥盐矿的三口盐井作为研究对象, 分别为西 1#井、西 2#井和西 3#井。其中西 1#, 2#井溶腔已经成形, 而西 3#井正在开采之中。经过综合地质评价和利用可行性分析, 具备建造盐岩储气库的基本条件。

图 6 是西 1#井腔体声纳测量结果, 测量结果显示溶腔基本呈梨状分布, 其埋深为 900~1 000 m, 腔体体积均为 1.5×10⁵ m³。盐层顶板余厚分别为 26.5, 11.9 m, 符合天然气储存的基本要求, 但储库的间距较小, 岩层基本力学参数如表 2 所示。

3.2 数值计算模型

根据储库的分布特征和埋深, 数值分析模型取距离地表 525~1 425 m 的岩体进行分析, 数值分析计算范围内的岩体以泥岩、泥质夹层及盐岩层为主。根据岩层分布特征和溶腔形态所建立的有限元计算模型的横剖面 and 纵剖面如图 7 所示。其中, 横剖面埋深约为 1 000 m。为说明方便, 3 个腔体按横剖面

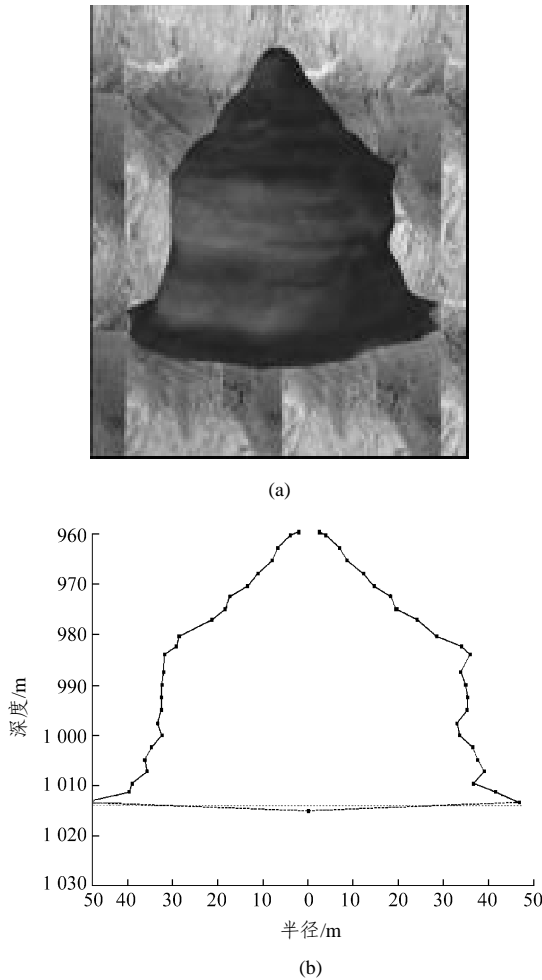


图 6 西 1#井腔体声纳测量结果
Fig.6 Field sonar measurement results of cavern shape for west well No.1

表 2 岩层基本力学参数

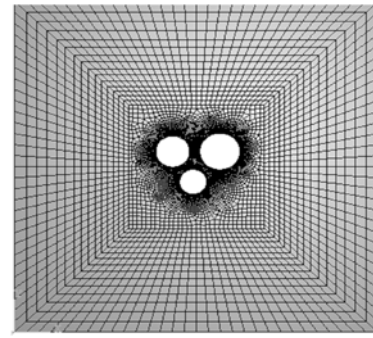
Table 2 Basic mechanical parameters of rocks

岩层	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
泥岩	10	0.27	1.0	35
盐岩	18	0.30	1.0	30
夹层	4	0.30	0.5	30

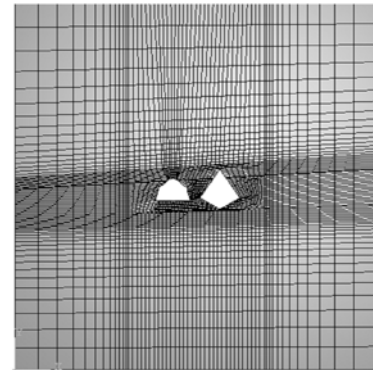
直径大小分布命名为西 1#井、西 2#井和西 3#井。数值计算网格如图 7 所示。

西 1#~3#井的泥岩、夹层和盐岩的力学参数如表 2 所示。由于本文研究的金坛储气库已经被废弃近 10 a 时间，为真实地反映储库的蠕变变形和损伤演化特征。储库的内压在采盐的过程中保持卤水压力为 12 MPa，计算中假定注气时最大的工作压力为 14 MPa，注气时间为 3 个月，采气的时间为 3 个月，抽采后储气库的最低工作内压为 7 MPa。储库内压的工作压力如图 8 所示。

3.3 计算结果



(a) 西 1#，3#井横剖面



(b) 西 1#，2#井纵剖面图

图 7 数值计算网格

Fig.7 Numerical meshes for calculation

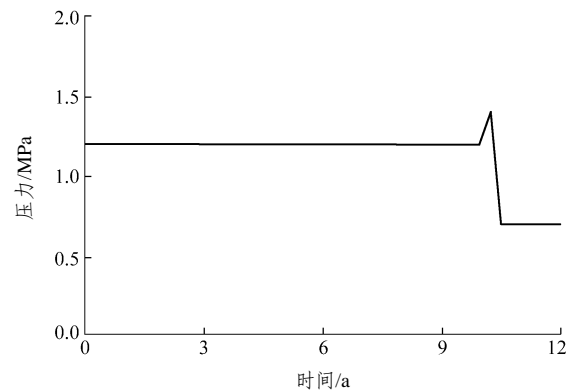


图 8 储库运行压力曲线

Fig.8 Operating gas pressures of salt cavern

(1) 储库围岩的变形特性

盐岩溶腔围岩先经历 10 a 卤水的静水压力作用，储气库使用前先将卤水置换成天然气，并在 3 个月注气达到峰值压力，接着进入抽气的高峰并在 3 个月降至储气库的最低工作压力 7 MPa，在此阶段低位运行。储气库在经历这样一个复杂的注采过程中，溶腔横剖面蠕变应变变化过程如图 9 所示。计算结果表明，储气库在降压采气阶段，储库围岩将产生较大的黏性变形。

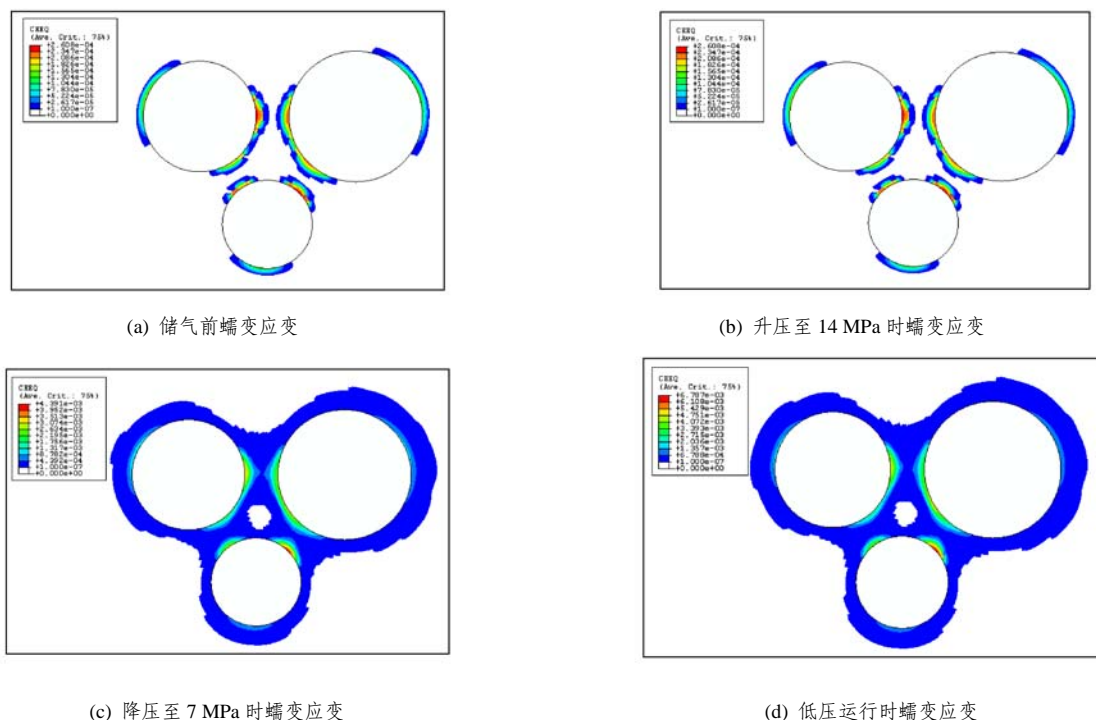


图 9 溶腔横剖面蠕变应变变化过程

Fig.9 Variation of creep strain of transverse profile in different operating stages

(2) 损伤演化特征

数值模拟结果表明, 在盐岩储气前及储气、抽气期内均发生不同程度的损伤现象, 主要产生在溶腔腔壁。溶腔期间损伤值较小, 分部较为均匀; 储气升压过程中, 损伤发展较为缓慢, 甚至不发展; 抽气降压过程是损伤发展速度较快的阶段, 这时出现损伤区转移过程; 由于 4 个溶腔的间距较小且岩柱的偏应力水平相对其他位置都要大一些, 因此随着时间的变化, 溶腔之间岩柱的损伤区尤其明显; 最后低压运行时期, 损伤发展较为缓慢。西 1[#]井和西 2[#]井盐腔经历一个注采循环后的损伤演化过程, 西 1[#], 2[#]井经历一个注采循环后的损伤演化区如图 10 所示。

(3) 应力场分布特征

溶腔过程中腔体周围产生一定的应力集中, 在盐岩溶腔储气、抽气过程中, 由于溶腔内压力发生较大的变化, 腔体围岩的应力也产生相应的变化。图 11 为横剖面溶腔经历一个注采循环后最大和最小主应力云图。计算结果表明: 盐腔在溶腔和废弃的 10 a, 由于溶腔内有饱和卤水的静水压力作用, 且压力保持在 12 MPa 不变, 溶腔围岩主应力并没有产生很大的变化。溶腔储气期间由于注采作用而产生较大的围岩应力变化。抽采过程中, 储库的压力降低, 围岩的流变速度则相应地增大。

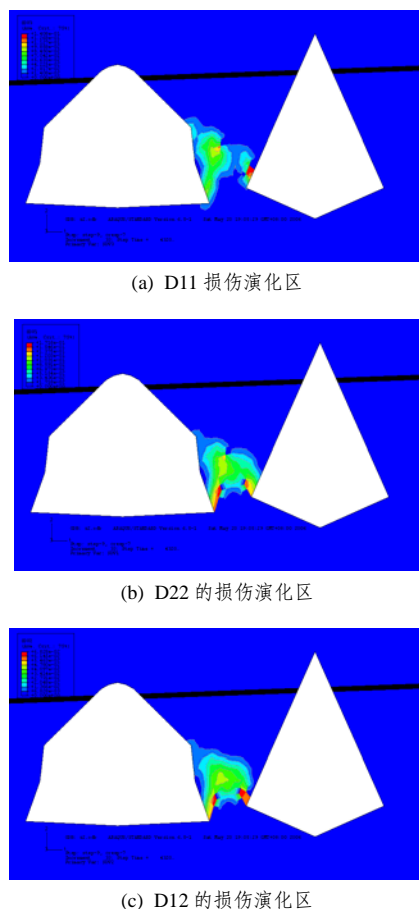


图 10 西 1[#], 2[#]井经历一个注采循环后的损伤演化区
Fig.10 Damage zones of salt cavern after an injecting and pumping cycle for west wells No.1 and No.2

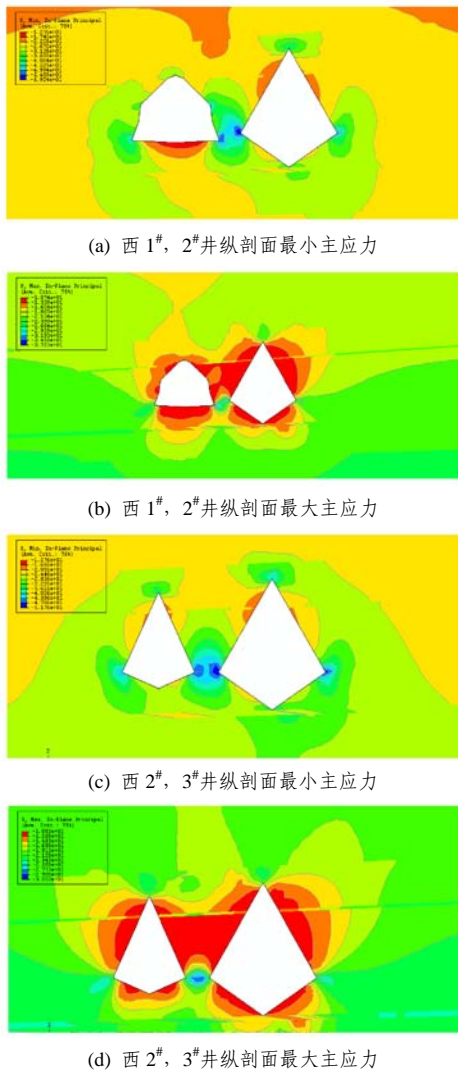


图 11 西 1[#]~3[#]井纵剖面溶腔结束时应力云图(单位: MPa)

Fig.11 Nephograms of principal stresses for longitudinal profiles of west wells No.1 - 3(unit: MPa)

4 结 论

本文通过盐岩的室内试验, 利用损伤力学和岩石流变学理论, 提出盐岩的非线性蠕变损伤模型, 主要研究结论: (1) 根据不同应力水平下的三轴蠕变试验的研究成果, 提出基于 Burgers 模型的盐岩非线性蠕变损伤本构方程和损伤演化方程。研究成果表明: 非线性蠕变损伤本构模型可更好地反映盐岩蠕变过程的速率变化特征。(2) 将本文提出的盐岩损伤非线性蠕变模型所得到的蠕变速率与常用的 Burgers 模型、指数模型和实验室三轴蠕变所得的蠕变速率进行对比分析, 结果表明: 本文所建模型可更真实地吻合试验数据。(3) 将本文所建的非线性蠕变损伤模型应用“西气东输”金坛储气库的盐腔稳定性分析。研究成果表明: 由于盐岩间距较小, 因此将在岩柱部位产生较大的蠕变, 只有保证相邻

腔体同注同采, 才能保证储库的长期稳定性。

参考文献(References):

- [1] PEACH C J, SPIERS C J. Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock[J]. *Tectonophysics*, 1996, 256(1/4): 101 - 128.
- [2] STORMONT J C. In-situ gas permeability measurements to delineate damage in rock salt[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(7): 1 055 - 1 064.
- [3] POPP T, KERN H. Ultrasonic wave velocities, gas permeability and porosity in natural and granular rock salt[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, 23(3): 373 - 378.
- [4] HUNSCHE U, HAMPEL A. Rock salt — the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository[J]. *Engineering Geology*, 1999, 52(3): 271 - 291.
- [5] CRISTESCU N D. A general constitutive equation for transient and stationary creep of rock salt[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(2): 125 - 140.
- [6] JIN J, CRISTESCU N D. An elastic/viscoplastic model for transient creep of rock salt[J]. *International Journal of Plasticity*, 1998, 14(1): 85 - 107.
- [7] MUNTEANU I P, CRISTESCU N D. Stress relaxation during creep of rocks around deep boreholes[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2001, 39(7): 737 - 754.
- [8] HEUSERMANN S, ROLFS O, SCHMIDT U. Nonlinear finite-element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY 2 constitutive model[J]. *Computers and Structures*, 2003, 81(8): 629 - 638.
- [9] 周时光, 阳友奎, 李晓东. 岩盐力学特性的刚性试验研究[J]. *西南工学院学报*, 1994, 9(2): 42 - 46.(ZHOU Shiguang, YANG Youkui, LI Xiaodong. Experimental study on rock salt mechanics properties by stiff machine[J]. *Journal of Southwest Institute of Technology*, 1994, 9(2): 42 - 46.(in Chinese))
- [10] 杨春和, 吴益明. 应力水平及加载路径对盐岩时效的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 270 - 275.(YANG Chunhe, WU Yiming. Stress level and loading path effect on time-dependent properties of salt rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(3): 270 - 275.(in Chinese))
- [11] 陈卫忠, 伍国军, 戴永浩, 等. 废弃盐穴地下储气库稳定性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(4): 848 - 854.(CHEN Weizhong, WU Guojun, DAI Yonghao, et al. Stability analysis of abandoned salt caverns used for underground gas storage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(4): 848 - 854.(in Chinese))
- [12] 梁卫国, 赵阳升. 岩盐力学特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 391 - 394.(LIANG Weiguang, ZHAO Yangsheng. Testing study on mechanical property of thenardite rock salt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 391 - 394.(in Chinese))