

文章编号: 1000-7598-(2006)06-0945-05

盐岩储气库蠕变损伤分析

陈 锋, 杨春和, 白世伟

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 中国矿业大学, 北京 100083)

摘 要: 通过对盐岩本构关系的实验研究, 对 Norton Power 盐岩蠕变本构模型引入损伤变量, 在损伤等效应力中引入考虑偏应力和围压影响的函数, 建立了一种能反映盐岩蠕变和加速蠕变的本构模型。通过对某盐矿盐岩实验数据进行拟合, 获得了本构模型的参数, 理论曲线与实验曲线吻合得较好。通过三维数值模拟方法, 应用该本构模型对某盐矿天然气储存库进行了数值模拟研究, 探讨了该盐矿盐岩储气库最低内压工况下, 腔周损伤区的扩展、变形规律及最长持续运行时间。研究结果表明: (1) 盐岩本构模型在盐岩加速蠕变期具有较好的数值稳定性; (2) 在最低运行压力下, 腔周盐岩进入加速蠕变期后, 储气库损伤区的扩展速度非常快, 储气库最危险部位位于腔体顶部; (3) 腔周盐岩进行加速蠕变期后, 盐岩的腔体体积收敛变形主要表现为损伤蠕变体积收敛, 稳态蠕变体积收敛趋于稳定; (4) 该盐矿盐岩储气库在该压力下最长持续运行时间约为 3 个月。

关 键 词: 盐岩; 储气库; 蠕变; 损伤

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Investigation on creep damage of natural gas storage in salt rock layer

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

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. China University of Mining and technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the mechanical test and the Norton Power law of salt rock, a new constitutive law of salt rock is presented. The new constitutive law can embody the steady creep and the accelerative creep of salt rock by importing the damage variable. The damage equivalent stress is the function of confining pressure and deviatoric stress in the new constitutive law. The parameters of the constitutive law were obtained by simulating the experimental data of salt rock in some salt mine. The theoretic results accord with the experimental results. By the three-dimension numerical method, the new constitutive law is programmed. The natural gas storage in the salt mine is analyzed by the new constitutive law. The evolvement law of damage bound and the displacement law around the natural gas storage is studied under the minimal natural gas storage pressure. The continuous operating time of the natural gas storage is also analyzed under the pressure. The study indicates that: (1) The presented constitutive law has good numerical stability during the accelerative creep. (2) The extension of the damage bound around the storage is very fast after the salt rock around the storage enter the accelerative creep phase under the minimal operating pressure. The most dangerous position of the storage is the top. (3) The steady volume convergence becomes steady and the damage creep volume convergence develops very fast after the salt rock around the storage enter the accelerative creep phase. (4) The continuous operating time of storage can't exceed three months under the minimal pressure.

Key words: salt rock; gas storage; creep; damage

1 前 言

随着社会经济的发展, 天然气在越来越多的大中城市家庭和工业中得到应用, 为调节天然气使用的不均衡性, 需要在大中城市附近建立大量的天然

气储气库。盐岩由于具有非常低的渗透特性与良好的蠕变特性, 能够保证储存硐库的密封性, 其力学性能较为稳定, 能够适应储存压力的变化, 是国内外公认的天然气储存及高放射废物处置的首选介质。

收稿日期: 2005-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50374064, 50434050), 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2002CB412704), 中国科学院岩土力学重点实验室开放基金资助项目 (No. Z000508)。

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

近年来,人们也对盐岩的力学特性特别是流变特性开展了大量的研究。Szczepanik^[1]等通过盐膏蠕变过程的声发射现象,首次从试验角度研究了盐岩蠕变的损伤过程,Chan K S.^[2]从盐岩位错理论(M-D)建立了盐岩蠕变损伤理论,Cristescu N D.^[3]从经典弹-黏-塑性理论出发,分析盐岩剪胀现象,从而分析盐岩蠕变损伤过程。本文基于 Norton Power 盐岩蠕变本构模型,引入损伤变量,建立了一种能反映盐岩损伤及加速损伤的本构模型,并应用于天然气储存库的数值模拟研究中。

2 盐岩蠕变损伤特性及试验研究

作者曾根据大量单轴及三轴蠕变的试验结果^[4~6],分析盐岩蠕变损伤的特性,图 1 为典型的盐岩蠕变曲线。由图可见,在一定的荷载下,在经历一段初始蠕变后,由于盐岩晶体和微裂隙可能产生位错而滑动,初始蠕变损伤会得到扩展而产生新的损伤,如果损伤不超过某界限值,宏观上就表现出盐岩的稳态蠕变,其一般具有较长的时间;随着时间进一步增加,当损伤积累或蠕变发展到一定程度时,初始微裂隙的扩展会引起宏观裂纹产生,蠕变进入加速阶段。盐岩蠕变率经历了一个从逐渐减少至保持相对稳定,到逐渐增加直至破坏的过程。盐岩的蠕变-失稳过程,即微细观损伤扩展而发展成宏观损伤-裂隙的过程,也就是盐岩的损伤演化过程。

通过对储存库盐岩试样进行了大量的试验研究可知,盐岩的蠕变损伤演化过程与盐岩的偏应力和围压相关。图 2 为盐矿盐岩在相同偏应力 21.5 MPa 下不同围压下的蠕变曲线,由图看出,在相同偏应力下,随着围压的不断减少,盐岩的蠕变速率不断增加。图 3 为盐矿盐岩在相同围压 5.4 MPa 下不同偏应力的蠕变曲线,由图看出,随着偏应力不断增大,盐岩的蠕变速率不断增加。盐岩的蠕变损伤分析必须有表征偏应力和围压影响的函数。

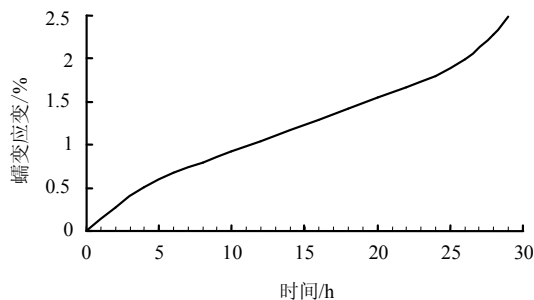


图 1 典型盐岩蠕变曲线

Fig.1 The typical creep curve of salt rock

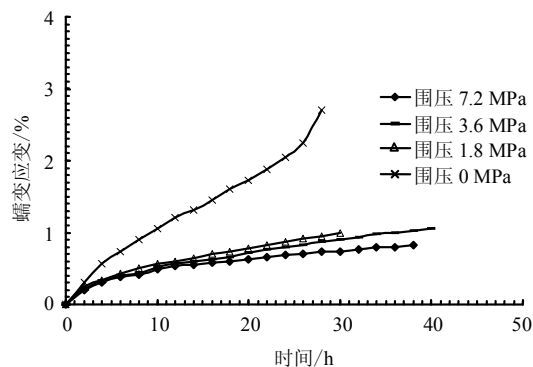


图 2 相同偏应力 21.5 MPa 盐岩蠕变曲线

Fig.2 The creep curve of salt rock under the same deviatoric stress (21.5 MPa)

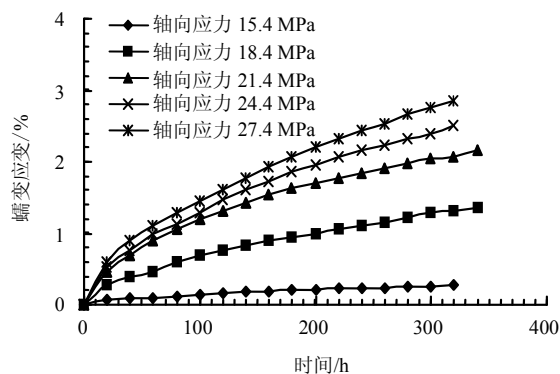


图 3 围压 5.4 MPa 不同轴压下蠕变曲线

Fig.3 The creep curve of salt rock under the same confining pressure (5.4 MPa)

3 盐岩蠕变损伤本构模型的建立

在盐岩的蠕变变形中,其蠕变由 3 阶段组成,在总蠕变量中,初始蠕变量值很小,因此,在实际工程中仅考虑稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段的损伤是合理的,当损伤或蠕变发展到一定阶段,蠕变进入加速阶段。总蠕变率由下式表述。

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_s + \dot{\varepsilon}_d \quad (1)$$

式中 ε_s 为稳态蠕变分量; ε_d 为损伤引起的蠕变分量。

DURUP^[7]等人对 Lemaitre、Norton Power、Transient Power、Munson-Dawson 等经典盐岩本构模型对同一盐岩试验数据进行了拟合,结果显示这些模型均能较好地匹配试验数据。相比较 Munson-Dawson 模型具有 15 个试验材料参数, Norton Power 仅有 2 个参数,易从试验数据求得,文中选用 Norton Power 模型描述盐岩的稳态蠕变率。Norton Power 本构模型中,盐岩蠕变由 Mises

应力 $q = \sqrt{3J_2}$ ($J_2 = 1/2 S_{ij} S_{ij}$ 为应力偏量第二不变量) 激活, 其稳态蠕变率由下式计算:

$$\dot{\varepsilon}_{cr}^s = A_1 q^n \quad (2)$$

式中 A_1 , n 为材料参数。

根据 Mises 应力定义及蠕变流动法则, 盐岩稳态蠕变率的张量形式为

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^s = \dot{\varepsilon}_{cr}^s \frac{\partial q}{\partial S_{ij}} = \dot{\varepsilon}_{cr}^s \frac{3}{2} \frac{S_{ij}}{q} \quad (3)$$

根据 Carter^[8]等人对损伤蠕变分量的表述方法, 取损伤蠕变率为

$$\dot{\varepsilon}_{cr}^d = A_2 \left(\frac{q}{1-D} \right)^n \quad (4)$$

式中 A_2 为材料参数, D 为损伤变量。

损伤蠕变分量的张量形式为

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^d = \dot{\varepsilon}_{cr}^d \frac{\partial q}{\partial S_{ij}} = \dot{\varepsilon}_{cr}^d \frac{3}{2} \frac{S_{ij}}{q} \quad (5)$$

假设当盐岩的损伤达一界限值^[9](“损伤加速界限”) D_a , 损伤和蠕变进入加速阶段, 扩展 Kachanov^[10]的损伤演化方程, 取损伤演化率为

$$\dot{D} = \left[\frac{\sigma^*}{B(1-D)(1 - < D - D_a >)} \right]^r \quad (6)$$

式中 B 、 r 为材料参数; σ^* 为损伤等效应力, $(x) = \begin{cases} x & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$ 式中 (x) 为开关函数。

基于前述试验研究, 盐岩蠕变损伤是围压和偏应力相关的函数, 在损伤等效应力引入表征偏应力和围压影响的函数, 取

$$\sigma^* = q \left[C_0 + C_1 \left(\frac{q}{\sigma_0} \right) \right] \quad (7)$$

式中 C_0 , C_1 为材料常数, $\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ 。

通过对某盐矿拟建储气库区域盐岩进行了大量的蠕变试验研究, 对盐矿盐岩的试验数据, 采用最小二乘法对建立的本构模型的参数进行了拟合, 获得了盐岩体的蠕变损伤本构模型材料参数为 $A_1 = 3.15 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-3.5} \text{ yr}^{-1}$, $n = 3.5$, $A_2 = 6.3 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-3.5} \text{ yr}^{-1}$, $B = 32.0$, $C_0 = 0.47$, $C_1 = 1.2$, $r = 3.0$, $D_a = 0.12$ 。图4为盐岩多级蠕变试验数据与模型拟合曲线的比较, 该蠕变试验曲线是在围压 8 MPa, 偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 分别为 12 MPa、18 MPa、24 MPa 下完成的。由于盐岩有别于其它的岩石, 通过该盐矿的多组盐岩岩样进行蠕变试验, 相同条件下其蠕变速率较为接

近, 盐岩的蠕变特性所表现出来的离散性远小于其他的岩石, 通过该实验数据拟合的盐岩蠕变损伤本构模型的参数对该盐矿盐岩参数具有一定代表性。

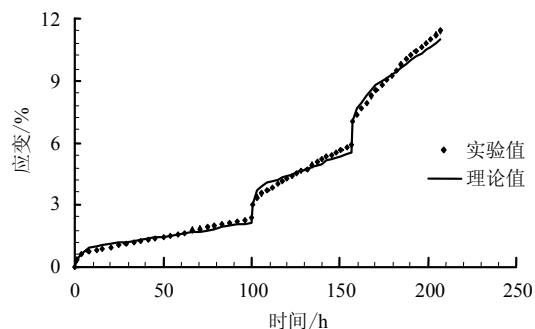


图4 模型计算分级加载蠕变曲线与试验结果的比较
Fig.4 The comparison between the modeling creep curve and the test curve

3 天然气储存库计算模型

FLAC^{3D} 软件是由美国 Itasca 咨询公司根据 Cundall 等人提出的显式有限差分法而开发的有限差分软件, 其在岩土工程中获得了广泛的应用。该软件对于用户进行材料本构模型的二次开发留下了接口, 用户可通过 VC++ 对本构模型进行编程, 并编译成动态链接库为软件所调用。采用 VC++ 编程方法对上述建立的盐岩蠕变损伤本构模型进行了开发, 嵌入到岩土工程数值分析软件 FLAC^{3D} 中, 用于对盐岩及盐岩腔体的蠕变损伤分析。对于盐岩体的损伤过程, 当其损伤变量达到一较高值时, 可以认为盐岩体已完全损伤, 程序中设定损伤变量的极限值为 0.9。

由于 FLAC^{3D} 中没有预设球体或椭球体的模型, 笔者根据某盐矿待建储气库腔体形状, 通过 FISH 语言, 对软件所生成的模型进行节点坐标调整, 达到要求的储气库形状, 完成了储气库腔体三维网格模型。图5为拟分析盐岩腔体储气库剖面形状, 其上部为一半椭球体, 下半底部为一半球体。腔体中心深度位于地层 1 100 m 处, 计算区域地层深度 600 m~1 465 m 即 865 m 高度的范围, 模型水平面区域范围为 600 m×600 m, 上覆 600 m 厚度岩层的重量转化为荷载作用于模型上表面, 其余边界面为法向位移约束边界。设定储气库腔体内压为其运行的最低内压 6 MPa, 分析盐岩储气库在该压力下的损伤演化规律。由于所选区域为轴对称的, 选取 1/4 腔体进行分析, 图6为盐岩储气库腔体网格剖分图。

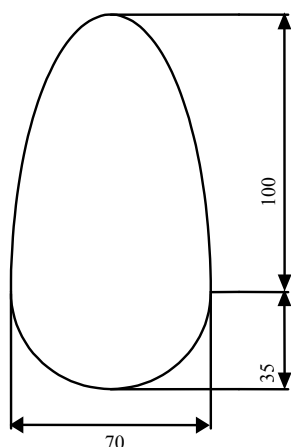


图 5 储气库腔体形状图

Fig.5 The shape of the natural gas storage

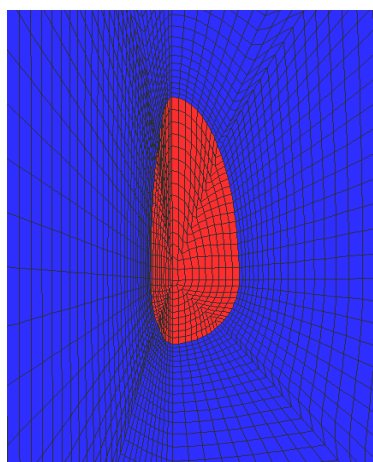


图 6 计算区域网格图

Fig.6 The mesh for the modeling region

4 计算结果分析

图 7~图 9 为储气库腔体在内压 6 MPa 压力下, 0.5 年、1 年、1.5 年、2 年、2.5 年、3 年时腔周正剖面损伤变量等色线图分布, 该图显示, 随着时间的进程, 盐岩储气库腔体损伤区逐渐扩展, 进入加速损伤的范围不断扩展且扩展速度较快, 显示了该本构模型能有效反映盐腔进入加速蠕变期的损伤扩展规律, 具有较好的数值稳定性。针对储气库的特点, 缩短其在低压下运行时间, 能有效延缓储气库腔周损伤区的扩展范围和延长储气库的使用寿命, 保证储气库运营期内的安全运行。

图 10 为 1.5 年内腔顶、腔底及最大水平半径处损伤变量变化曲线, 该图显示, 腔顶损伤发展速率最快, 其在 0.24 年约 3 个月即开始进入加速蠕变期, 其次为腔底, 最后为腔腰。在均一盐层中的储气库, 其危险部位应首先出现在腔顶, 易对腔顶套管出现

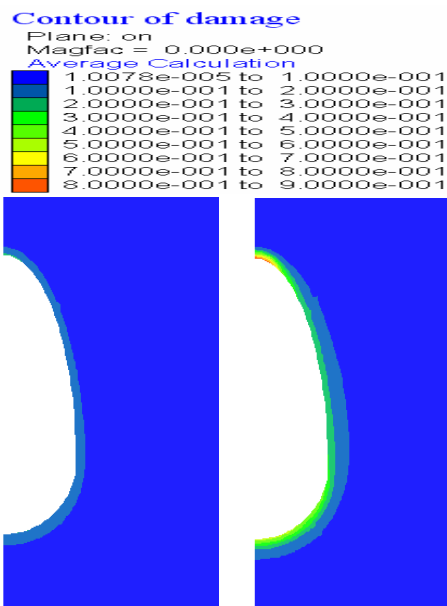


图 7 0.5 年 (左)、1 年 (右) 腔周损伤区等色图

Fig.7 Damage contours around the gas storage after six months (left) and after twelve months (right)

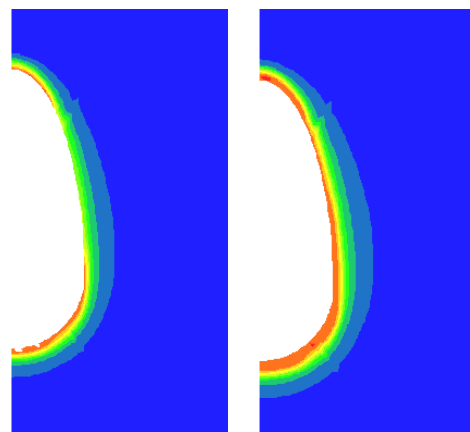


图 8 1.5 年 (左)、2 年 (右) 腔周损伤区等色图

Fig.8 Damage contours around the gas storage after eighteen months (left) and after twenty-four months (right)

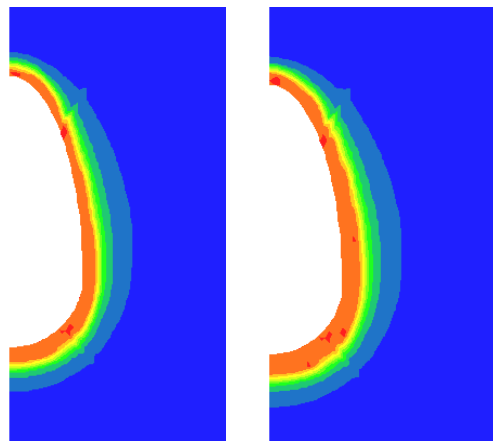


图 9 2.5 年 (左)、3 年 (右) 腔周损伤区等色图

Fig.9 Damage contours around the gas storage after thirty months (left) and after thirty-six months (right)

不利影响。在储气库的运行中,其最低压力和最低压力下连续运行时间也应受到限制,以该盐矿拟建储气库的运行压力范围为 6 MPa~14.5 MPa 为例,其在低压 6 MPa 下运行,腔周围岩偏应力较高,为保证该储气库的长期安全使用,其连续在该低压下运行不宜超过 3 个月,之后应进行充气提高腔内压,减小围岩偏应力,保证储气库腔周盐岩蠕变能保持在稳态蠕变期内。

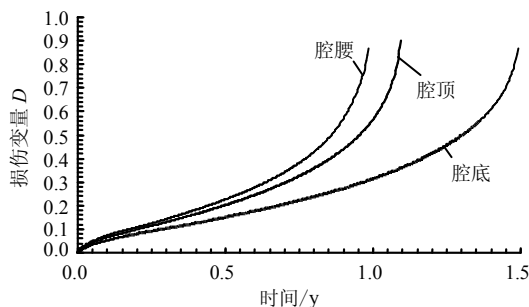


图 10 腔周损伤变量演化曲线

Fig.10 The damage evolvement curve around the gas storage

图 11 为 2 年内储气库腔体体积减少规律(体积减少量与初始腔体体积的比值),在初始阶段,腔体稳态蠕变体积变形远大于损伤蠕变体积变形,随着腔周损伤区的扩展,腔体稳态蠕变体积变形趋于稳定,腔体损伤蠕变发展很快,约在 1.6 年时刻超过稳态蠕变体积变形。盐岩储气库腔体在低压下后期进入加速蠕变期体积变形主要表现为损伤蠕变变形。

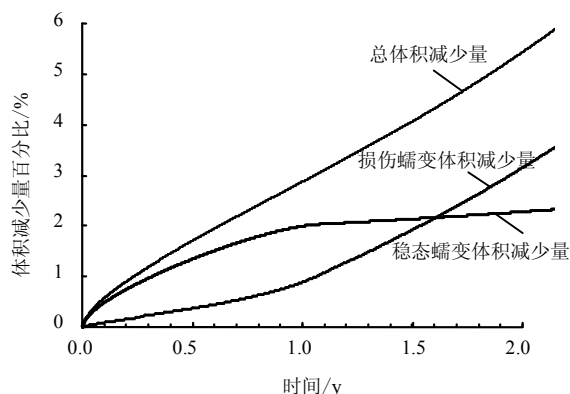


图 11 储气库腔体体积变形规律

Fig.11 The volume convergence law of the gas storage

5 结 论

针对盐岩的稳态蠕变与加速蠕变的过程,本文提出的盐岩蠕变损伤本构模型能很好地模拟盐岩的

蠕变变形过程,同时具有参数简单,易从试验数据拟合的特点,通过在盐岩储气库三维数值模拟中的运用,验证了本构模型在盐岩加速蠕变期具有较好地数值稳定性。针对盐岩储气库的特点,采用该本构模型对盐岩储气库腔体在低压连续运行工况下腔周损伤区扩展、低压运行时间及体积变形规律进行了探讨,并得出了有益的结论。

参 考 文 献

- [1] Szepepanik S D Time-dependent acoustic emission studies on potash[A]. In: Roegies D ed. Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science[C]. Rotterdam: A.A. Balkema, 1991. 471—479.
- [2] Chan K S. A damage mechanics treatment of creep failure in rock salt[J]. **International Journal of Damage Mechanics**, 1997, 6(1): 122—152.
- [3] Cristescu N D. Time-effects on the uniaxial compaction of powers[A]. In: Proc 6th Int. Symp. on Plasticity and Its Current Application[C]. Alaska: Neat Press Fulton, 1997. 303—304.
- [4] Yang Chunhe, Daemen J K, Yin jinha. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 36(2): 336—341.
- [5] 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, Jaemen J J K. Salt rock behavior stress relaxation creep[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(3): 262—265.
- [6] 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-jing. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(11): 1 602—1 604.
- [7] DURUP G GAZ de France, XU J Sofregaz. Comparative study of certain constitutive laws used to describe the rheological deformation of salts. The mechanical behavior of salt proceedings of the third conference, 1993. 75—83.
- [8] Carter NL, Russell J E. Modified Mechanical equation of state for rock salt[A]. Langer, The mechanical behavior of salt proceedings of the second conference[C]. Clausthal. Trans tech publications, 1984. 409—430.
- [9] 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.
- [10] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 清华大学出版社. 1997. 59—63.