

应力因素下的岩盐卸荷扩容试验研究

姜德义¹, 范金洋¹, 陈 结¹, 任 松¹, 倪俊杰²

(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. 重庆市合川区煤炭工业管理局, 重庆 400044)

摘 要: 通过开展围压卸载试验, 研究不同三轴应力状态下围压卸载对岩盐试件扩容特征的影响, 以及扩容与卸载形式之间的关系。研究发现, (1) 围压卸载时岩盐的体积扩容量与偏应力存在较为明显的对数关系; (2) 卸载的初始围压对岩盐的扩容影响几乎不存在; 轴压增大能够促进岩盐的扩容, 使加速扩容点前移, 且加速扩容点对应的偏应力与轴压的增加呈线性关系; (3) 岩盐的膨胀系数(即横向应变与纵向变形的比值)随着偏应力的增大, 呈现先线性增加后指数增加的趋势。

关 键 词: 岩盐; 围压卸载; 膨胀特性; 轴压效应; 扩容特征

中图分类号: TU452

文献标识码: A

Test study of unloading capacity expansion characteristics of salt rock under stress factors

JIANG De-yi¹, Fan Jin-yang¹, CHEN Jie¹, REN Song¹, NI Jun-jie²

(1. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Coal Industrial Management Bureau in Hechuan District of Chongqing, Chongqing 400044, China)

Abstract: Through the confining pressure unloading experiments, the dilatation characteristics of salt rock under different triaxial stress states unloading pressure, and the relationship between dilatation and unloading method are researched. The results show that: (1) There is a logarithmic relationship between volumetric expansion of capacity and deviatoric stress during unloading confining tests. (2) Initial confining pressure value hardly effects the dilation of salt rock. The growth of axial pressure can promote the dilation, and make the accelerated-expansion-point appear forward. Meanwhile, the corresponding deviatoric stress linearly increases with the axial pressure. (3) With the increase of deviatoric stress, the expansion coefficient of salt rock (ratio of lateral strain to longitudinal deformation) will increase linearly at the beginning; and then exponentially.

Key words: salt rock; confining pressure unloading; expansion characteristics; axial pressure effect; dilatation

1 引 言

岩石的变形特性是岩石的重要的力学特性。研究表明, 地下工程诸如隧道、地下硐室的失稳都伴随着岩体的膨胀(扩容)现象, 研究岩石的扩容特征有助于揭示地下构造的失稳破坏规律。岩盐构造作为石油、天然气及高放核废料地下储存、存放的理想场所之一^[1-2], 其开发利用中也伴随着岩石的扩容现象。目前建造盐穴普遍采用单井油垫对流法水溶开采^[3], 开采中流动的卤水不断地溶蚀腔体内壁, 使腔壁围岩在水平方向逐渐卸压产生变形, 导致扩容现象。由于我国的盐矿地质赋存条件复杂,

夹层众多, 建腔过程中腔体形状的控制难度较大, 局部产生的应力集中对岩盐力学性质和储库腔体的稳定性具有较大的影响^[4-6]。因此, 需要研究岩盐的扩容, 从岩体膨胀的角度预测和评估建腔期盐穴构造的安全可靠性。

自 20 世纪 50 年代起, 人们已经开始对岩石(体)的膨胀作用开展了研究。最早 Bridgman^[7]和 Matsushima^[8]、Handin 等^[9]分别通过单轴和三轴试验观察了皂石、大理岩辉绿岩、花岗岩和白云岩等的非弹性体积变化。Lama 等^[10]针对岩石在承受应力下体积的膨胀性研究后认为可视膨胀性为岩石在承受应力下其内部裂隙开张或是延伸的指标。靖洪

文等^[11]采用首创性“0 围压单轴试验”对粉砂岩和泥岩试样全应力-应变过程中的体积应变进行了测试和分析,证实应力-非弹性体积应变曲线在峰后破坏的初始阶段一般是线性的,且峰后强度的降低主要受体积变形的影响。

由于工程建设的需要,国内外开展了一系列岩石卸荷方面的试验研究。陈旦熹等^[12]通过大理石压剪变形试验研究,证实了应力路径对岩石的变形特征具有显著的影响。Hudson^[13]将完整的应力-应变曲线与地下洞室的开挖致使岩体卸荷破坏的过程联系起来。李天斌等^[14]对玄武岩在卸载状态下的变形破坏特性进行了试验研究,表明试样破坏时卸荷方向的扩容比较强烈。陈剑文等^[15]针对岩盐储气库密闭性分析开展试验研究和理论分析,提出采用压缩-扩容边界分析岩盐储气库的密闭性。王学斌等^[16]通过 FLAC 数值模拟表明随着岩石扩容角的增大,剪切带变宽,破坏区变大。

虽然很多学者已进行了卓有成效的研究,但针对岩盐的扩容特征开张的研究尚不多见,卸荷条件下的岩盐扩容研究亦不完善。建腔过程中岩盐围岩的应力变化是一个复杂的过程。为使试验方案简单,利于实施,本文基于所受竖向应力基本保持不变,横向压力逐渐减小这一工况下的盐穴围岩。选择不同的轴向压力和初始围压开展试验研究,研究特一工况的腔体围岩在造腔过程中的扩容损伤状况。

2 试验条件及方法

2.1 试验条件

本文试验采用取自巴基斯坦喜马拉雅山区天然岩盐。埋深较深(深 800~1 000 m),呈白色或浅红色,其中 NaCl 纯度较高,基本在 96%以上,另含有不能溶解的杂质成分。试样按照岩石力学试验相关标准和规范,手工加工成标准的 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 岩盐圆柱试样。

试验在煤矿灾害动力学与控制国家重点试验室进行,加载试验采用三轴高温岩盐试验机,加载试验机及岩盐试样见图 1。

2.2 试验方案设计

为了减少杂质对岩盐损伤演化的影响,较好地分析应力卸载因素对岩盐扩容演化的影响,保证岩盐试样岩性的稳定可靠,降低其离散性,选择颜色尽量一致、含杂质成分尽量相近,裂纹长度、数量和大小差异较小的岩盐试件进行加工。加工完成的试件的端面平整度尽量保证在 $\pm 0.02\text{ mm}$ 以内,以减小端部效应。

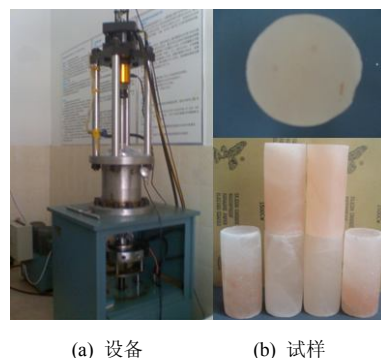


图 1 试验设备和试件样品图

Fig.1 Test instrument and manufactured salt samples

腔体围岩处于三轴应力状态,研究建腔过程中围岩竖向地应力不变,围压逐渐减小情况下的扩容特征。试验方案为(1)加载段:以加载速率为 0.05 MPa/s 的速率,加围压至预定值;加载速率为 0.2 kN/s ,加轴压至预定值。(2)卸载段:保持轴压不变,以不同的卸载速率,逐步降低围压至目标值 0。

(3)选取围压和卸载速率:A 组选择 10、15、20 MPa 三个不同初始围压(轴压均采用 25 MPa);B 组选取 20、25、30、35 MPa 不同轴压(围压都选择 15 MPa)开展试验。所有试验均采用 0.005 MPa/s 的卸载速率开展试验。

3 试验结果分析

3.1 卸围压试验的岩盐扩容特征

卸载试验前从回转应力的角度说明研究卸载路径下岩石扩容的必要性,体积回转是指岩石在应力作用下体积有压缩转变为膨胀状态的临界过程。本次以深度 1000 m 左右埋深盐井出发制定试验方案。本身处于地下工况条件下,岩盐处于三向受力状态,即加载过程已经完成^[17],后文分析中将加载阶段引起应变暂时忽略不计,设定此时变形量为 0。图 2 为围压 5 MPa 三轴试验扩容和卸载试验扩容的偏应力-应变关系。为了具有对比性,将三轴试验 10 MPa 偏应力下的体应变同样假设为 0。卸载围压试验是一个偏应力增加的过程,相比于加载,都是单调有效加载路径^[18]。卸载试验出现回转时回转应力为 10 MPa,即试验由加载段转为卸载段即体积出现膨胀,发生体积回转现象。三轴加载是体积的缓慢压缩逐渐转变为体积膨胀(回转应力为 18 MPa 左右)。随着偏应力的增加,卸载试验能够产生更大的变形,更强烈的扩容。

岩盐在试验条件下的卸荷扩容特征基本一致。卸荷初始阶段,轴向变形和径向变形都不大,基本

呈线性，体应变也呈线性，即稳定扩容。当围压卸载达到一定值时，轴向应变和径向应变均加速增加，应力-应变关系呈光滑的“凹”形曲线，体应变也表现为加速增加。该阶段加速扩容，直至卸载结束。

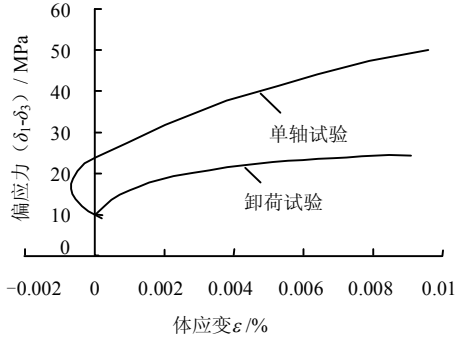


图 2 三轴试验和卸载试验应力-应变关系

Fig.2 Curves of deviatoric stresses vs. volumetric strains

经过观察和分析处理，针对单个试验具有以下 2 个特征：

(1) 偏应力关系特征

由图3可见，偏应力与卸载下的扩容变形之间存在很好的对数关系：

$$\sigma_p = m \lg_a (\varepsilon_d + \varepsilon_{d0}) + n \quad (1)$$

式中： σ_p 为偏应力； ε_d 为体应变， ε_{d0} 为加载段后岩盐的初始压缩量有微小差的相近的参数。将常对数底转换为自然对数底：

$$\sigma_p = m' \ln (\varepsilon_d + \varepsilon_{d0}) + n \quad (2)$$

式中： m 为拟合常数，与材料和轴向应力有关，它直接影响对数曲线的凹曲度，影响扩容加速点的位置； n 为另一常数，与试验开始的初始偏应力接近； m' 为转换对数底之后的常数。若定义压缩变形量为 0，则 $\varepsilon_{d0} = 0$ ，

$$\sigma_p = m' \ln (\varepsilon_d + \psi) + n \quad (3)$$

式中： ψ 为微量差，以初始围压 15 MPa、轴压 25 MPa、15 °C 试验结果的拟合曲线如图 3 所示，拟合相关系数达 0.994 8，效果较好。

(2) 扩容速率特征

试验卸载按照围压对时间的匀速降低进行，偏应力匀速增加。初始阶段，由于围压较大、偏应力较小，扩容速度缓慢、体积膨胀的速度较慢，时间内体积的膨胀基本呈缓慢的线性增长。当围压效应退化到一定程度，扩容值渐渐增大，扩容速度出现明显加速现象。偏应力与体应变图中，标出各个曲线由初始稳定扩容转变为加速扩容的临界应力值，

为了降低稳定扩容与加速扩容间分界点判断的主观性。笔者认为，超过初始扩容速率数值的 10 % 为加速扩容的开始，此点暂定义为加速扩容点。

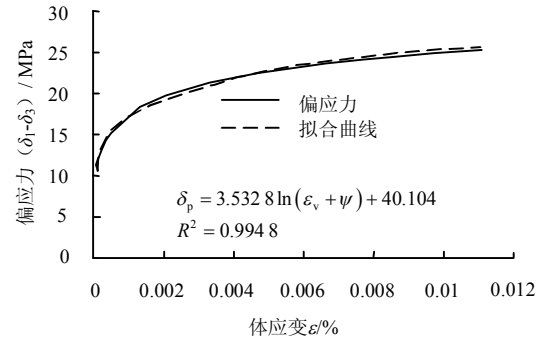


图 3 偏应力与体应变关系曲线

Fig.3 Curves of deviatoric stresses vs. volumetric strains

扩容变形速率 ε 定义为时间的偏导数：

$$\varepsilon = \frac{\partial \varepsilon_d}{\partial t} \quad (4)$$

由于前期缓慢扩容阶段的趋势与常规的指数关系有较大偏差，将其拟合入后期指数加速扩容的效果较差，所以采用分段拟合。通过拟合得到扩容速率与时间的关系式：

$$\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial t} = \begin{cases} at, & \left(0 \leq t \leq \frac{\sigma_{lj} - \sigma_{p0}}{v} \right) \\ p e^t + q, & \left(t \geq \frac{\sigma_{lj} - \sigma_{p0}}{v} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中： σ_{lj} 为临界状态应力（偏应力）； t 为时间； σ_{p0} 为初始偏应力； a 、 p 为拟合的线性斜率； v 为卸载速率； q 为拟合的平移常数。

以初始围压为 15 MPa、轴压为 25 MPa、15 °C 试验结果为例，变形速率与时间的关系拟合曲线如图 4 所示，效果较佳。

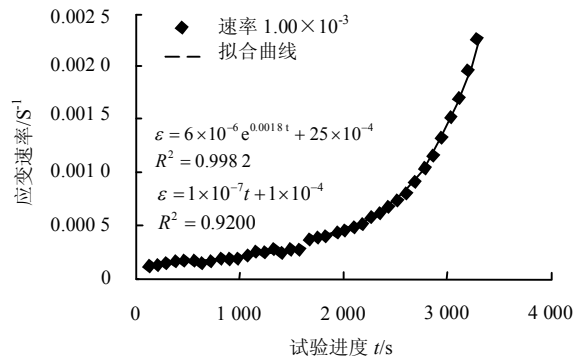


图 4 时间与体应变变形率的关系拟合曲线

Fig.4 Fitting curves of time and volumetric strain rates

应力是影响岩石变形的最根本的因素, 由试验方案可知

$$\sigma_p = \sigma_{p0} + \nu t \quad (6)$$

将式 (5) 结合式 (6), 消去时间 t 可得

$$\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial t} = \begin{cases} a \left(\frac{\sigma_{ij} - \sigma_{p0}}{\nu} \right), & (0 \leq \sigma_p \leq \sigma_{ij}) \\ p e^{\frac{\sigma_{ij} - \sigma_{p0}}{\nu}} + q, & (\sigma_p \geq \sigma_{ij}) \end{cases} \quad (7)$$

3.2 岩盐扩容的围压效应和轴压效应

3.2.1 围压效应表现

图 5 为不同初始围压下的岩盐的偏应力和体应变的关系。观察发现, 初始围压的差异对岩盐的扩容存在一定程度的影响。围压的存在限制了岩盐产生变形的微裂隙生长和晶粒间的相对滑移, 围压对于岩盐的变形具有明显的控制作用, 当围压大于 $(\sigma_1 - \sigma_{ij})$ 时, 其围压效应将明显减弱。当围压进一步增大时, 变形率可近似看作与围压无关。

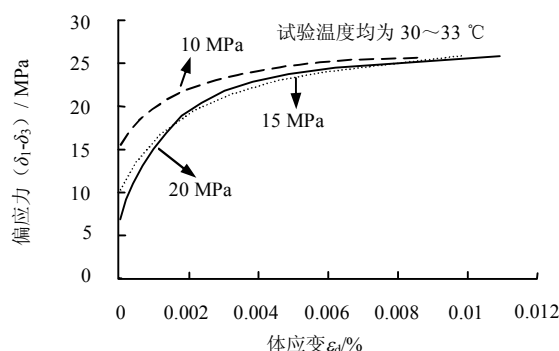


图 5 不同初始围压下的偏应力与体应变曲线

Fig.5 Curves of deviatoric stresses and volumetric strains under different initial confining stresses

根据图 4 的原则找出临界应力可以发现, 25 MPa 轴向压力时不同初始围压下临界围压或偏应力 (10 MPa 曲线对应扩容加速点的纵坐标为 17.8 MPa; 15 MPa 时为 17.4 MPa, 20 MPa 时为 17.1 MPa) 仅发生微小降低, 基本不发生变化, 初始围压只使试验的时间长度延长, 扩容的幅度增加。

图 6 为初始围压为 15 MPa、不同轴压的卸载偏应力与体应变的关系。将不同围压对应的临界点 (20 MPa 曲线对应纵坐标 14.2 MPa, 25 MPa 时为 17.4 MPa, 30 MPa 时为 21.6 MPa, 35 MPa 时为 25 MPa) 按照发生加速扩容的临界应力为纵坐标, 此时对应的轴向压力为横坐标绘制成简图, 如图 7 所示。随着轴向压力提高, 岩盐的扩容加速点近似呈

线性增加, 即随着围压卸荷的进行, 加速扩容会提前出现, 这样的关系和岩盐的三轴抗压强度与围压的线性关系基本一致。

$$\sigma_{ij} = k\sigma_1 + \sigma_d \quad (8)$$

式中: k 为拟合的线性斜率, 与材料有关的常数, 该系数与三轴抗压强度和围压之间的线性关系的斜率存在一定关系; σ_1 为试验的轴向压力; σ_d 为拟合常数, 表示某一轴压下的卸载加速点偏应力, 与单轴条件下的回转应力 (临界应力) 有关。

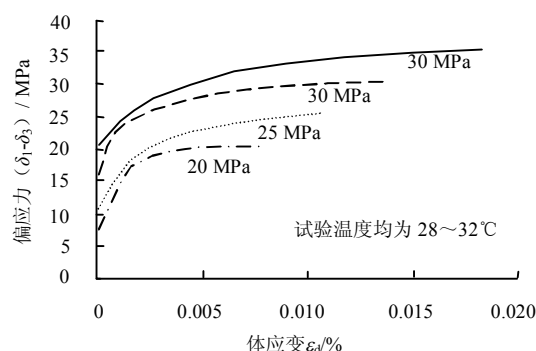


图 6 不同初始围压下的偏应力与体应变曲线

Fig.6 Curves of deviatoric stresses and volumetric strains under different axial presses

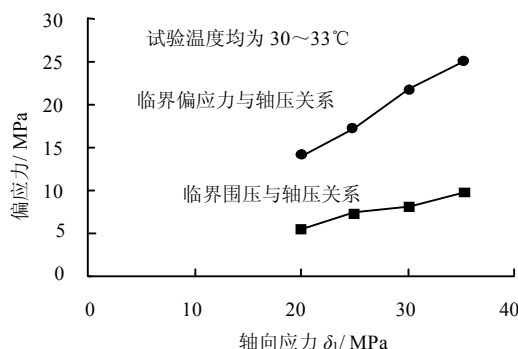


图 7 临界应力与轴向压力关系

Fig.7 Curves of critical stresses and axial stresses

3.3 扩容过程岩盐的膨胀特性

泊松比是材料横向应变与纵向应变的比值, 反映材料横向变形的弹性常数。由于卸载试验中试件处于较高的应力作用下, 试件全过程基本全部处于塑性阶段。本文将塑性阶段的横向应变与纵向应变称为膨胀系数。膨胀系数反映了材料在受力之后向垂直方向扩张的能力, 由于各个试验趋势大体一致所以仅选取 1 组试验参数, 并根据膨胀系数的变化速度间隔选取数据, 将某一试验不同时期的泊膨胀系数及相关参数列表, 表内数据为温度 15 °C 时试验所得, 见表 1。

表 1 膨胀系数变化表
Table 1 Expansion coefficients

试验进度 /s	围压 /MPa	轴向变形 /%	膨胀系数
30	14.85	0.001	0.032
250	13.75	0.008	0.039
500	12.50	0.017	0.048
750	11.25	0.028	0.058
1 000	10.00	0.042	0.072
1 250	8.75	0.068	0.093
1 500	7.50	0.102	0.123
1 750	6.25	0.156	0.173
2 000	5.00	0.232	0.249
2 250	3.75	0.333	0.364
2 500	2.50	0.459	0.539
2 750	1.25	0.617	0.819
2 950	0.25	0.775	1.175

观察表 1 发现, 在 1 000 s 之前, 即围压从 15 MPa 降至 10 MPa 左右时, 膨胀系数变化非常缓慢, 试件的轴向变形也较小, 但其比径向变形较明显; 在 1 000 s 之后, 围压由 10 MPa 降至 0 时, 膨胀系数加速变大, 试件的轴向变形和径向变形都比较大, 径向变形明显于轴向变形, 膨胀作用十分显著, 力学中应力始终是控制变形的关键因素。本次设计的试验是轴向压力保持不变, 围压逐渐减小。试验中膨胀系数出现上述原因是围压在 15 MPa 至 10 MPa 时还保持一个较大的压力, 试件的变形受到围压的束缚, 轴向和径向变形都较小, 同时偏应力也较小, 试件以轴向变形为主, 膨胀系数较小。当围压由 10 MPa 降至 0 时, 其束缚作用减弱, 轴向和径向变形都达到较大的值, 同时偏应力值也较大, 试件径向速度较大, 变形值甚至超过轴向变形, 膨胀系数较大。膨胀系数反映试件变形的特性, 试验中膨胀系数由小变大的, 并加速变大, 这个加速增加的起点也恰好对应试件的临界状态, 扩容速率上开始出现加速扩容, 也间接的说明了加速扩容点的存在。

4 结 论

(1) 岩盐在围压卸载方式下比常规加载方式下提前出现体积回转。卸围压方式下岩盐的偏应力与体积应变存在显著的对数关系。扩容速率与时间存在线性和指数复合关系, 经过不同条件的验证, 各个试件都符合这样的规律。

(2) 初始围压的大小对岩盐卸围压方式下岩盐的扩容特征影响甚微, 但在降低过程中, 当围压大于临界应力时具有抑制作用, 此时的轴向变形、径向变形及体应变变化缓慢, 当围压小于该值时扩容变形逐渐指数增大。

(3) 较大的轴压对扩容的促进作用较为明显, 使扩容速率加快, 也使缓慢扩容和加速扩容的临界点应力增大。临界偏应力与轴压之间为线性关系, 与围压和强度之间的线性关系相似。

(4) 随着扩容程度的加深, 膨胀系数逐渐增加, 临界状态之后膨胀系数加速变大, 膨胀特性也增强, 导致其损伤加剧。

参 考 文 献

- [1] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼. 中国岩盐能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4409—4417.
YANG Chun-he, LIANG Wei-guo, WEI Dong-hou. Investigation on possibility of energy in salt rock in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(24): 4409—4417.
- [2] THOMS R L, GEHLE R M. A brief history of alt cavern use[C]//Proceedings of the 8th World Salt Symposium. [S.l.]: Elsevier, 2000: 207—214.
- [3] 王清明. 盐类矿床水溶开采[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [4] 杨春和, 李银平, 陈锋, 等. 湖北省云应盐矿能源地下储备地质可行性关键技术研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [5] YANG C H, LI Y P. Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock numerical analysis of cavern stability in deep bedded salt rock formations[C]//Proceedings of 41st U.S. Rock Mechanics Symposium and 50th Anniversary. [S.l.]: Curran Associates, 2006: 915—921.
- [6] 李银平, 刘江, 杨春和. 泥岩夹曾对岩盐变性特征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 Yin-ping, LIU Jiang, YANG Chun-he. Influence on mudstone interlayer on deformation and failure characteristics of salt rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2461—2466.
- [7] BRIDGMAN P W. Volume changes in the plastic stages of simple compression[J]. *J. Appl. Phys.*, 1949, 20: 1241—1251.
- [8] MATSUSHIMA S. On the flow and fracture of igneous rocks and on the deformation and fracture of granite under high confining pressure[M]. Kyoto: [s.n.],

- Prevention Res. Inst. Kyoto Bull, 1960.
- [9] HANDIN J, HAGER R V, FRIEDMAN M, et al. Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: Pore pressure effects[J]. **Bull Am Assoc Petrol Geol**, 1963, 47(5): 717—755.
- [10] LAMA R D, VUTUKURI V S. Handbook on mechanical proper ties of rocks[M]. Clausthal, Gemany: Trans Tech Publication, 1978.
- [11] 靖洪文, 李世平, 牟彬善. 零围压下掩飾的剪胀性能的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(1): 19—22.
- JING Hong-wen, LI Shi-ping, MOU Bin-shan. Zero ambient pressure hide the dilatancy properties test[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 1998, 27(1): 19—22.
- [12] 陈旦熹, 戴冠一. 三向应力状态下大理岩压缩变形试验研究[J]. 岩土力学, 1982, 3(1): 27—44.
- CHEN Dan-xi, DAI Guan-yi. Three to stress state marble compression test [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1982, 3(1): 27—44.
- [13] HUDSON J A. 岩石力学原理[J]. 岩石力学与工程学报, 1989, 8(3): 252—258.
- HUDSON J A. Rock mechanics principle[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1989, 8(3): 252—258.
- [14] 李天斌, 王兰生. 卸荷状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 321—327.
- LI Tian-bin, WANG Lan-sheng. Unloading state basalt deformation failure characteristics of the experimental research[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1993, 12(4): 321—327.
- [15] 陈剑文, 杨春和, 郭印同. 基于岩盐压缩—扩容边界理论岩盐储气库密闭性分析研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2009, 28(增刊 2): 3302—3308.
- CHEN Jian-wen, YANG Chun-he, GUO Yin-tong. Study of sealability of cavern for natural gas storage in deep salt formation based on compaction-dilatancyboundary of salt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**. 2009, 28(Supp.2): 3302—3308.
- [16] 王学滨, 潘一山. 基于梯度塑性理论的岩样单轴压缩扩容分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 721—724.
- WANG Xue-bing, PAN Yi-shan. Dilatation analysis of rock specimen under uniaxial compression based on grandient-dependent plasticity[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(5): 721—724.
- [17] 王金安, 谢和平. 岩石断裂面的各向异性分形和多重分形研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 16—21.
- WANG Jin-an, XIE He-ping. On anistropic fractal andmultifractal properties of rock fracture surface[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(6): 16—21.
- [18] 郭印同, 杨春和, 付建军. 岩盐三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 725—730.
- GUO Yin-tong, YANG Chun-he, FU Jian-jun. Salt three axis the unloading mechanics characteristic test research[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 725—730.