

# 盐岩渗透特性的试验研究及其在深部 储气库中的应用

刘 伟<sup>1</sup>, MUHAMMAD Nawaz<sup>2</sup>, 李银平<sup>1</sup>, SPIERS C J<sup>2</sup>, 杨春和<sup>1</sup>, 马洪岭<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 乌德勒支大学 地球科学系 HPT 实验室, 荷兰 乌德勒支 3793)

**摘要:** 为给深部盐岩地层(1 500 m)中所建天然气储库的稳定性和密闭性评价提供科学指导, 针对取自江苏金坛的不同杂质含量盐岩试样, 在荷兰乌德勒支大学 HPT 实验室开展了在三轴压缩条件下的瞬态法渗透率测试研究, 揭示盐岩的变形特征与渗透率演化规律。试验研究表明: 在围压 20 MPa 的常温测试条件下, 随着偏应力从 0~40 MPa 递增, 损伤后的低含泥盐岩的渗透率从  $10^{-16} \text{ m}^2$  逐渐下降至  $10^{-21} \text{ m}^2$  以下, 而损伤后的高含泥盐岩的渗透率则平均高出前者 1~2 个量级, 推测表明损伤后的盐岩在加载下裂纹闭合、孔隙减小、逐渐压缩密实, 进而渗透率快速降低, 同时也表明外载压密作用对纯盐岩的裂纹压缩闭合、甚至损伤修复作用更显著。根据试验成果, 并利用 H. Alkan 等<sup>[1]</sup>建立的盐岩压缩-扩容边界线对位于 1 500~2 000 m 深部的盐岩地层中的球形腔体的围岩应力状态分析显示, 围岩几乎都位于扩容边界以下的安全区域, 由此推知: 即使在储气库低压运行条件下, 围岩中较难发生扩容而导致密闭性失效事件发生, 腔体的密闭性能极好。该研究为深部盐穴储气库的可行性和密闭性评价提供有利支撑。

**关键词:** 岩石力学; 深部盐岩地层; 储气库; 渗透特性; 瞬态法; 压缩闭合; 压缩-扩容边界

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2014)10-1953-09

## EXPERIMENTAL STUDY OF PERMEABILITY OF SALT ROCK AND ITS APPLICATION TO DEEP UNDERGROUND GAS STORAGE

LIU Wei<sup>1</sup>, MUHAMMAD Nawaz<sup>2</sup>, LI Yinping<sup>1</sup>, SPIERS C J<sup>2</sup>, YANG Chunhe<sup>1</sup>, MA Hongling<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. High Pressure and Temperature Laboratory, Faculty of Earth Sciences, Utrecht University, Utrecht 3793, Netherlands)

**Abstract:** In order to provide reliable data for evaluating the integrity of gas storage caverns constructed in deep salt formations(1 500 m), experiments have been conducted to assess the effect of deformation on the permeability of the impure salt rock samples from Jiangsu province, China. The transient method of step-decay of Argon gas was used in conjunction with the conventional triaxial compression tests with the samples incrementally deformed and the permeability measured at the same time. The tests were performed at room temperature and at the effective confining pressures of 20 MPa in Utrecht University, Netherlands. It was found that the permeability of relatively pure salt samples decreased from  $10^{-16} \text{ m}^2$  to below  $10^{-21} \text{ m}^2$  with the increasing of differential stress(0-40 MPa), presumably due to the crack closure and the porosity reduction. The

**收稿日期:** 2013-12-30; **修回日期:** 2014-04-01

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41472285); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51304187, 51104108)

**作者简介:** 刘 伟(1986-), 男, 2009年毕业于中国石油大学(北京)石油天然气工程学院土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事深部岩石力学及工程应用方面的研究工作。E-mail: guarenliuwei@126.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2014.10.002

permeability of the samples with high impurity content was 1–2 orders higher than that of the pure salt rock, which was interpreted to be due to the more effective compaction occurred in the pure salt. Using the concept of dilatancy boundary, the stress state around the spherical storage caverns in the deep subsurface is analyzed; and it is found that the stress state in the rock wall remained completely in the non-dilatant field (region of compression). It could be deduced that even under low-pressure conditions of cavern operation, dilatancy would not easily occur in the cavern walls, implying the high sealing integrity of deep storage cavern in salt rock.

**Key words:** rock mechanics; deep salt rock formations; gas storage; permeability properties; transient method; compaction; compression-dilatancy boundary

## 1 引言

我国战略原油仅有 40 d 的储备量,远低于联合国建议的 90 d 的标准,更远远低于美国(168 d)、日本(200 d)等发达国家的标准。而天然气储备仅占年消耗量的 3%,也远低于国际上年消费总量 15%~20% 的标准。因此,加快建立充足的油气资源储备,对我国经济社会稳定、国防安全等都有重大的战略意义。

盐岩具有低孔隙度、低渗透率、流变性、损伤自修复、可水溶开采和高度战略安全性等优良特性,被誉为油气最佳储存介质,欧美国家近一半的油气资源都储存在盐岩地层中<sup>[1]</sup>。近年来,随着我国在深部盐穴能源储库的研究和建设步伐的加快,在东部的江苏省金坛市已有 15 口天然气盐穴储库投入使用,在湖北应城、潜江,江苏淮安,河南平顶山,湖南衡阳等地也正在开展深部盐穴储库的先导性论证<sup>[2]</sup>。

随着较浅盐矿(<1 000 m)渐趋殆尽以及研究的深入,盐穴储气库逐渐向深部发展成为必然趋势。我国在 1 500~2 500 m 深度的盐矿资源丰富,如潜江 1 800~2 400 m、淮安 1 500~1 700 m、平顶山 1 700~2 500 m 等<sup>[3]</sup>。因此,在我国的西气东输和川气东送沿线及支线具备建造大型深部盐穴储库的巨大潜力,若该地质层段的盐岩能得到有效利用,将大力推进我国能源战略储备事业的快速发展。超深地层(本文特指 1 500~2 500 m)的储气库具有非常独特的优势:压力高、储气量大;盐层一般较厚,可建造大体积盐腔;此外,可更有效地阻隔犹如地震、爆炸、火灾等对储库的影响。但机遇与挑战并存,随着深度的增加,更高建造成本、高温高压、深部腔体密闭性和稳定性等问题也亟须面对。

在众多影响因素中,密闭性是盐穴储气库最为重要的技术指标之一,常常成为储气库成败的关键。尽管盐岩属于极低渗介质,但在受到损伤扰动,或

富含杂质时,渗透率将会升高数个量级<sup>[4-7]</sup>。腔体形成后,围岩一定范围内岩体的强度和稳定性会受到影响,一般将该范围称为损伤扰动区(excavation disturbed zones, EDZ)<sup>[8]</sup>。在 EDZ 内,当出现较高的偏应力时,盐岩晶界发生错动、张开、滑移,导致出现较高的渗透率和过快变形,进而产生对腔体稳定性和密闭性不利的影

响。针对盐丘型构造中盐岩(NaCl 质纯,常常高达 99%)的渗透特性,国外已经取得较为丰富的研究成果。C. J. Spiers 和 N. L. Carter<sup>[9]</sup>研究了干燥与潮湿盐岩渗透特性,并给定了各自的压缩-扩容边界;U. Hunsche<sup>[10]</sup>对比分析了不同矿区盐岩的压缩-扩容边界的异同;H. Alkan 等<sup>[11]</sup>利用声发射和声波测试技术对 Asse 盐岩开展了常规三轴压缩下的渗透率测试研究,并指出最小主应力和应力路径是影响压缩-扩容边界主要的 2 个因素,而气压对扩容边界影响反而很小;O. Schulze 等<sup>[12]</sup>系统开展了盐岩的损伤与渗透特性研究,揭示了很多关于渗透演化内在机制的特性。以往的研究涉及的地层深度均较浅(一般 <1 000 m),且几乎都是针对纯盐岩(NaCl 含量 >95%)的渗透结果。在国内针对盐岩的渗透特性,尤其是室内和现场试验开展的非常少,对盐岩的测试一般参考煤岩、泥岩等测试手段。我国深部(<1 500 m)盐岩储量更为丰富,但盐岩一般为层状结构或含杂质盐岩,其渗透特性和渗透机制的研究还处于起步阶段;此外,盐岩属于低渗介质(完整状态下渗透率  $10^{-21} \text{ m}^2$ ),对测试的方法和测试精度均有极高的要求,国内针对煤岩、砂岩、泥岩等的常规方法和测试设备难以满足其测试要求。因此,亟待对此类盐岩开展研究,为深部盐穴储气库的建造及运行提供科技支撑。

本文针对我国盐岩含杂质的赋存特点,与荷兰乌德勒支大学 C. J. Spiers 团队合作,采用瞬态法开展了不同组分盐岩的渗透特性试验,获取了盐岩渗透的渗透率及并揭示了其演化规律。最后,结合国际上广泛采用的盐岩压缩-扩容边界的有关理论与

本文测试结果，对我国深部地层条件下的储气库的围岩稳定性和密闭性给出了分析和评价。

## 2 瞬态法

### 2.1 渗透测试方法

渗透率测试常用的 3 种方法<sup>[13]</sup>是：(1) 稳态法，该方法是在岩芯两端施加一个流体压差，待渗流达到稳定流动时，测定流量与时间，并采用达西公式计算岩芯的渗透率；对于低渗介质该方法达到稳态所需时间极长。(2) 周期加载法，该方法是在岩芯一端施加随时间正弦变化的孔隙流体压力，测试岩芯另一端在此周期加载下的流体压力的变化，进而换算求得渗透率。(3) 瞬态气测法，又叫脉冲法，该方法利用气压在孔隙介质中的衰减规律计算渗透率，由于无需等待渗流场达到稳态，故耗时远远短于稳态法，且测试精度较高，非常适用于致密低渗岩石的渗透率测试。盐岩在未有损伤或压缩密实状态下，渗透率低至  $10^{-21} \sim 10^{-22} \text{ m}^2$ ，流动趋于静止，常规测试方法及常规仪器难以准确测得其渗透率。H. J. Surtherland 和 S. P. Cave<sup>[14]</sup>首次将瞬态法用于对盐岩的渗透率测试，并给出了相关的注意事项、试样前处理方式和详细的测试步骤。鉴于瞬态法的独特优点和对盐岩测试的经验可循，本文采用该方法对盐岩渗透率开展测试。

### 2.2 瞬态法原理

瞬态法是 W. F. Brace 和 R. J. Martin<sup>[15]</sup>提出的，其原理为：测试前，将岩芯放于上、下压力室之间，并在上、下压力室同时施加相等的恒定气压，然后给上压力室施加一个脉冲压力。在压差作用下气体产生渗透(压差  $\Delta P_0 = P_{\text{上}} - P_{\text{下}}$ )，上压力室的气压  $P_{\text{上}}$  会逐渐衰减，而下压力室的气压  $P_{\text{下}}$  会逐渐上升，直到两端压力达到新的平衡；然后利用气体衰减规律计算渗透率。关于瞬态法的测试原理及测试方法，W. F. Brace 等<sup>[16-17]</sup>给出了更详细的介绍。

### 2.3 渗透率计算

采用气体对盐岩、泥岩等低渗介质开展测试时，将会出现一些异于常规渗透的特殊的物理现象，比如滑脱效应<sup>[18]</sup>。气体分子由于在孔径壁处的流速不为 0，进而使得气测渗透率高于液测渗透率；当孔径尺寸与分子自由程接近时，这一微观机制就易于表现出来。因而，采用气测法时，一般需对渗透率采用 Klinkenberg 公式进行修正<sup>[19]</sup>。

盐岩骨架致密，孔隙结构尺寸非常小，致使滑

脱效应不可忽略。克氏渗透率  $K$  小于其气测渗透率  $K_g$ ，若不采用克氏公式修正，得出的渗透率比实际渗透率要高。周宏伟等<sup>[18]</sup>给出的测试数据表明，气测渗透率比绝对渗透率高 30% ~ 50%；C. J. Peach 等<sup>[19]</sup>也明确指出：气压是影响克氏效应的重要因素，当气压相对较高时，滑脱效应就不明显。这是因为滑脱效应是气体特有性质，当气压越高时气体的性质越趋近于液体，故滑脱效应的影响会随气压升高而逐渐变弱。

J. Walder 和 A. Nur<sup>[17]</sup>指出，气体在岩芯内的衰减符合以下规律：

$$\Delta P(t) = (\Delta P_0)e^{-\alpha t} \quad (1)$$

式中： $\Delta P(t)$  为  $t$  时刻气压差(MPa)， $t$  为测试时间(s)， $\alpha$  为由给定试样和试验条件确定的常数( $\text{s}^{-1}$ )：

$$\alpha = K \frac{A}{l} \frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} \frac{1}{\mu \beta} \quad (2)$$

式中： $K$  为渗透率( $\text{m}^2$ )； $A$  为试样横截面积( $\text{m}^2$ )； $l$  为试样长度(m)； $V_1, V_2$  分别为试样上、下端压力室的容积( $\text{m}^3$ )； $\mu$  为氩气常温时的动力黏度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )； $\beta$  为氩气的压缩系数( $\text{Pa}^{-1}$ )。

进而得出瞬态法渗透率的计算公式<sup>[19]</sup>：

$$K = \frac{d}{dt} \left[ \ln \left( \frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right) \right] \frac{l}{A} \frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} \mu \beta \quad (3)$$

## 3 试验设计及测试

### 3.1 试验准备

我国适用于造腔的盐岩均为湖相沉积构造，盐岩中一般含有较多的杂质(硬石膏、钙芒硝、泥岩、有机质等)，其物理力学性质与纯盐岩具有显著的差异<sup>[20]</sup>。本次测试选取了 2 种最具代表性的盐岩：低杂质盐岩和高杂质盐岩。岩芯取自江苏金坛近 1 000 m 深处。为尽可能地减少损伤，试样采用钢锯切屑+细砂纸手工打磨制成，高约 85 mm、直径约 49 mm。加工好的典型试样如图 1 所示。Salt-3 为透明晶体状，晶粒大小 5 ~ 12 mm，晶界分明，局部灰黑色为泥岩杂质，杂质含量 < 5%；Salt-4 为灰黑色，盐岩晶粒 5 mm 左右，局部为钙芒硝、泥岩类杂质，呈团块状和带状分布，杂质含量 25%。

### 3.2 试验开展

本次渗透试验在荷兰乌德勒支大学 HPT(high pressure and temperature)实验室开展。考虑到为深部地层(本文暂考虑 1 500 ~ 2 000 m；地应力高达 34.5 ~ 46.0 MPa)中的能源储库服务，储气库的运行

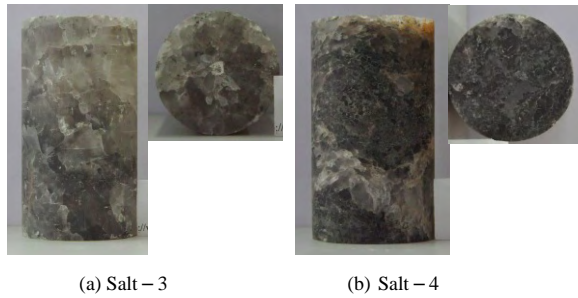


图 1 低含泥盐岩与高含泥盐岩典型试样

Fig.1 The typical salt samples of low impurities and high impurities

压力一般为地层压力的 1/3 ~ 4/5，故本次试验围压设为 20 MPa。为了揭示盐岩在不同偏应力下的渗透演化规律，试验中偏应力(轴压与围压差值)设为 0 ~ 40 MPa，该范围可基本包含 1 500 ~ 2 000 m 深度内储气库任意工况下的围岩偏应力状态。

采用性质稳定的氩气(Ar)作为测试气体，上、下压力室的平均压力 1.5 MPa，该压力足以减小滑脱效应的影响，故未对测试结果再作克氏修正。岩芯在套钻取芯、应力释放、试样加工等工序下，必然造成晶界错动、张开，进而造成不可避免的损伤，其效果类似于造腔及低压运行下腔体围岩损伤区(EDZ)。为消除损伤对渗透率的影响，先将试样在静水压力(5 ~ 20 MPa)下压缩 24 ~ 48 h，促使晶间张开裂隙闭合，同时测试相应的渗透率。

## 4 试验结果及分析

### 4.1 低含泥盐岩试验结果分析

#### 4.1.1 测试结果

低含泥盐岩的渗透率测试结果表明，初始阶段(静水压力 5 MPa)盐岩的渗透率高达  $10^{-16} \text{ m}^2$ ，而随着静水压力增大到 20 MPa 时已经下降了几倍；当偏差应力达到 20 MPa 时，渗透率就已经超出测量精度( $10^{-21} \text{ m}^2$ )。整个加载过程中渗透率的下降不少于 5 个量级。典型低含泥盐岩渗透率测试结果及曲线分别如表 1 和图 2 所示。图 2 中，测试步数超过 4 步时，渗透率已经低于仪器精度下限，未测出数据，用虚线表示。

#### 4.1.2 渗透特性分析

##### (1) 渗透率演化特征

从表 1 和图 2 可见，在初始阶段盐岩的渗透率高达  $10^{-16} \text{ m}^2$ ，如此高的渗透率即便对于油气储集层，一般也只能算作低渗油藏，而作为储气库围岩则极难满足密封性能要求，充分说明盐岩的损伤极

表 1 典型低含泥盐岩渗透率测试结果(Salt-3)

Table 1 Experimental permeability results of typical low impurities salt rock(Salt-3)

围压 $P_c/\text{MPa}$	偏应力/ MPa	轴向应变/ %	体应变/ %	渗透率/ $\text{m}^2$
5	0	—	—	$1.46 \times 10^{-16}$
5	0	—	—	$1.47 \times 10^{-16}$
20	0	0.000	0.000	$6.00 \times 10^{-17}$
20	10	0.286	-0.090	$1.29 \times 10^{-17}$
20	20	0.677	-0.232	$< 10^{-21}$
20	30	2.317	-0.617	$< 10^{-21}$
20	40	6.508	-1.019	$< 10^{-21}$
20	0	—	—	$< 10^{-21}$
5	0	—	—	$< 10^{-21}$

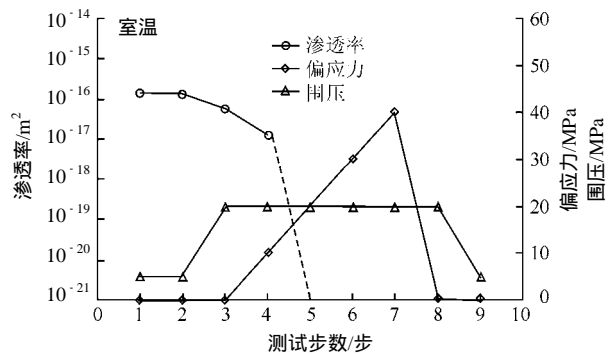


图 2 典型低含泥盐岩渗透率测试结果曲线(Salt-3)

Fig.2 Curves of experimental results of permeability for the typical low impurities salt rock(Salt-3)

其严重。随着加载时间和静水压力的增加，张开和错动的晶界得到充分的压实闭合，盐岩渗透率呈逐渐降低趋势。在围压 20 MPa、偏应力 10 MPa 时，其渗透率已经低至  $1.29 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ，下降了 1 个量级；而在超过偏应力 10 MPa 后，渗透率便已超出测试精度( $10^{-21} \text{ m}^2$ )，表现出不渗透的优良特性。这表明，当偏应力达到 10 MPa 后，对渗透起决定作用的那些连通的裂隙已经闭合或呈相互孤立，且盐岩结构也变得更为密实，进而导致渗透在岩芯中几乎不发生。在卸载阶段，当卸去偏应力，仅保留 5 MPa 的较低静水压力时，盐岩仍表现出不渗状态( $< 10^{-21} \text{ m}^2$ )，该值仍比最初加载时 5 MPa 静水压力下的渗透率低 5 个量级以上。

从整个应力路径下的渗透率测试结果可得出 2 个重要结论：盐岩的损伤对低渗特性将造成重要破坏，使其渗透率增加近 5 个数量级，极大地降低了盐岩的密闭性能。但加压可促使损伤裂隙闭合或连通中断，促使盐岩孔隙度减小、结构致密特性回复，从而恢复低渗特性；损伤盐岩的压缩属于典

型的不可逆变形、具有非弹性和变形恢复迟滞效应。因此，即便卸去压力，渗透率也并未回到损伤前的高值状态；卸载后，应变恢复(晶界因卸载而重新滑移、错动、张开)过程远滞后于应力，短期内难以恢复到损伤时的状态，即短期不会出现渗透率又很高的情形。这对工程是极为重要的，这就是说在储气库运行期间，若不得不紧急采气时，仅从密闭性角度而言，由于盐岩良好的应变时滞性，围岩的渗透率短期内可能不会出现急剧升高的现象。即便如此，该过程仍必须严格控制采气周期并及时注气升压。

(2) 低渗特征

偏应力在 10 ~ 40 MPa 变化时，渗透率均低于  $10^{-21} \text{ m}^2$ ，盐岩表现出几乎不渗透的优良性质。含有较少杂质时，盐岩的低渗特性并未受到显著影响。与以往研究不同的是，当偏差应力较高时(30 ~ 40 MPa)，盐岩并未出现预想的渗透率激增突变现象，即盐岩的应力状态还没进入扩容区。这从表 1 中的体应变也可见，即便处于 40 MPa 的较高偏应力时，试样的体应变  $\epsilon_v$  仍处于下降状态(压缩)。该特性对于确保深部盐穴储气库围岩的密闭性是极为有利的，对此，后文将做详细探讨。

4.2 高含泥盐岩试验结果分析

高含泥盐岩的渗透率测试结果表明，初始阶段(静水压力 5 MPa)盐岩的渗透率高达  $10^{-15} \text{ m}^2$ (高出低含泥盐岩 1 个量级)，而静水压力增大到 20 MPa 时便下降了约 50 倍；在 20 MPa 的静水压力下，渗透率反而升高了近 6 倍。此后，随着偏应力增加，渗透率逐渐下降，但基本维持在  $10^{-19} \text{ m}^2$  量级。整个加载过程中渗透率下降近 4 个量级。典型高含泥盐岩渗透率测试结果及曲线分别如表 2 和图 3 所示。

表 2 典型高含泥盐岩渗透率测试结果(Salt-4)

Table 2 Experimental results of permeability of typical high impurities salt rock(Salt-4)

围压 $P_c$ / MPa	偏应力 / MPa	轴向应变 / %	体应变 / %	渗透率 / $\text{m}^2$
5	0	-	-	$1.11 \times 10^{-15}$
20	0	-	-	$2.02 \times 10^{-18}$
20	0	0.000	0.000 0	$1.16 \times 10^{-17}$
20	10	0.219	- 0.054 9	$3.55 \times 10^{-18}$
20	10	0.381	-	$1.80 \times 10^{-18}$
20	20	0.656	- 0.046 5	$2.92 \times 10^{-19}$
20	30	1.404	- 0.140 0	$3.93 \times 10^{-19}$
20	40	3.017	- 0.421 0	$4.24 \times 10^{-19}$
20	0	-	-	$4.02 \times 10^{-19}$
5	0	-	-	$8.19 \times 10^{-19}$

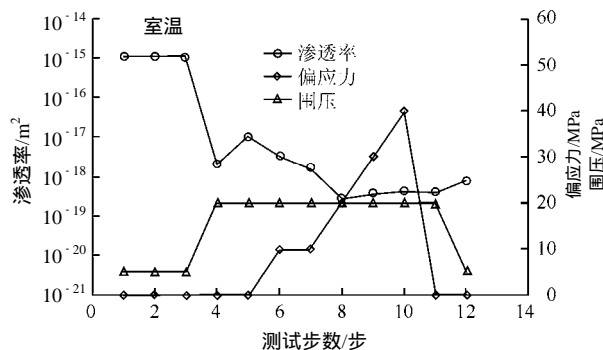


图 3 典型高含泥盐岩渗透率测试结果曲线(Salt-4)

Fig.3 Curves of experimental results of permeability for the typical high impurities salt rock(Salt-4)

(1) 渗透率演化特性

从表 2 和图 3 可见，高含泥盐岩对压缩的敏感性也较为明显，当静水压力为 5 MPa 时，盐岩的渗透率高达  $1.11 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ，密封性能极差；而当静水压力达到 20 MPa 时，渗透率就低至  $2.02 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ，渗透率下降了近 500 倍，说明静水压力作用可有效促使岩芯内部裂隙压密、闭合，进而使岩芯恢复其低渗特性。当进入偏应力状态加载时，渗透率随偏应力的增加先较快降低而后缓慢升高，且基本维持在  $10^{-19} \text{ m}^2$  量级。在卸载阶段，静水压力为 20 MPa 时，渗透率仍低至  $4.02 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ，未出现明显变化；但当静水压力低至 5 MPa 时，渗透率的值却有所升高(升至  $8.19 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ )。

武志德等<sup>[21]</sup>研究表明，含杂质盐岩在压实较好情况下渗透率低至  $10^{-21} \text{ m}^2$ ，这与本测试的结果有一定的差异。这可能是因为杂质成分及其与盐岩晶粒的胶结方式不同造成的。但从本文中 2 种盐岩的渗透率演化关系可以看出，高含泥盐岩对压力的敏感性更强，在静水压力从 5 ~ 20 MPa 这一过程渗透率下降近 500 倍(低含泥盐岩仅有 2.5 倍)。渗透率的下降主要是因为裂隙闭合、喉道减少，进而使气体渗透空间减小所致。含杂质高的盐岩在应力释放、制样时产生的损伤程度应高于低杂质盐岩，产生的碎裂也更严重，进而表现出更高的损伤渗透率。因此，在静水压下的压密敏感性也更强烈。从细观角度而言，泥质颗粒细小、一般随机分布于盐岩晶界之间；含杂质较多时，极有可能改变了晶界的物理力学性能，一定程度上降低了盐岩晶界间的压实重结晶性能。这从 2 种岩芯卸载时渗透率不同表现也可看出：高含泥盐岩的渗透率有所升高，说明闭合的裂纹中又有部分重新张开。由此可断定，杂质含量越高的盐岩，其弹性后效性质也越低。因此，要确保其渗透率能维持在较低数值，高于纯盐岩时的

运行压力是较有必要的。

### (2) 低渗特性与变形特性

高含泥盐岩的渗透率在损伤严重条件下高达  $10^{-15} \text{ m}^2$ ，但压缩下渗透率的下降极为迅速，渗透率较快地就达到  $10^{-18} \text{ m}^2$ 。当偏应力在 0~20 MPa 内变化时，随偏应力的增加，渗透率随偏应力的增加也下降得较快；偏差应力在 20~40 MPa 内变化时，渗透率随偏差应力的增加反而呈小幅度增加，这可能是由于压实效应与新损伤产生同时作用的结果。当偏差应力达到 40 MPa 时，渗透率仍未发生突然增加，即未出现扩容现象。从表 2 中体应变也可看出：偏差应力达到 40 MPa 时，体应变仍处于缓慢下降过程，即岩芯还处于进一步压缩过程之中。高含泥盐岩的渗透率比低含泥盐岩的渗透率高 1~2 个量级，说明杂质的存在对渗透率可能产生不利的影响。这可能是因为，杂质的存在一方面改变了盐岩晶界性质，使裂纹完全压缩闭合压密效果的难度加大；另一方面杂质本身发生的脆性破坏使岩芯内部产生了更多微裂隙。

### 4.3 小结

高含泥盐岩的渗透率高出低含泥盐岩较多，且压缩密实性能也不及后者。对比表 1, 2 发现，当达到相同偏应力时，低含泥盐岩的轴向应变(6.5%)远大于高含泥盐岩的 2 倍(3%)，即后者变形能力更差，性能偏于硬脆。从渗透演化规律而言，2 种岩芯的渗透率均满足储气库运行的密闭性要求，且纯度(更低渗透率)越高的盐岩越好；然而，低含泥盐岩的变形速率明显高过高含泥盐岩，对应腔体的体积收缩速率也较快，稳定性和安全性必然受到一定的影响。腔体应该避免出现过快的蠕变速率和过大的体积收缩，由此可见，高含泥盐岩未必是不利地层。还应综合考虑多重因素，以便做出合理的评判。

## 5 扩容边界的讨论与应用

### 5.1 盐岩的压缩-扩容边界

若将盐岩在不同围压下的扩容起始点在应力空间链接起来，则可以得到一条反映盐岩扩容起始点随应力状态变化的关系曲线，该曲线被称为压缩-扩容边界(compression dilatancy boundary, CDB)。对于盐岩这种结晶类岩石，渗透率和扩容之间存在即为紧密的内在联系，扩容一旦发生，表明试样内部微裂隙出现稳定发展和贯通，具体相应特征<sup>[13]</sup>可由图 4 加以体现。从图 4 可见，在 CDB 内侧，盐

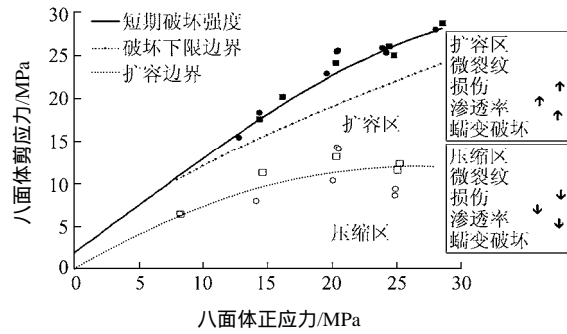


图 4 盐岩处于压缩区、扩容区渗透特性差异表征<sup>[13]</sup>

Fig.4 The permeable characteristics of salt rock in compacted region and dilated region<sup>[13]</sup>

岩的微裂隙压缩闭合、孔隙度和渗透率都极低，仅发生塑性变形；而在 CDB 外侧，盐岩裂隙、孔隙增多、相互贯通，渗透率随偏应力增加而快速升高，即渗透率发生突变<sup>[11-12]</sup>。

扩容边界可用于反映盐岩渗透率突变激增的临界判据。因此，在国外盐穴储气库的设计主要参考盐岩的损伤扩容性质，扩容边界已成为判定盐穴渗透稳定性和密闭性的重要判据<sup>[8-12]</sup>。

由于盐岩本身物理力学性质及试验条件的差异，不同学者给出了不同的压缩-扩容边界函数，最常见的形式<sup>[11]</sup>为

$$f(\sigma_m, \tau_{oct}) = \tau_{oct} + \psi \sigma_m^2 + \zeta \sigma_m \quad (4)$$

式中： $\psi, \zeta$  为拟合参数； $\sigma_m, \tau_{oct}$  分别为八面体正应力和八面体剪应力，且有

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (5)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{0.5} \quad (6)$$

式中： $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  为应力空间的三向主应力。

对于常规三轴压缩试验：

$$\sigma_2 = \sigma_3 = P_c \quad (7)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1 - P_c \quad (8)$$

式中： $\Delta\sigma$  为偏差应力。

由此可得

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}\Delta\sigma + P_c \quad (9)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{0.5} =$$

$$\frac{1}{3}[\Delta\sigma^2 + \Delta\sigma^2]^{0.5} = \frac{\sqrt{2}}{3}\Delta\sigma \quad (10)$$

从式(9)，(10)可见，压缩扩容边界完全可由围

压和偏应力确定。将本文 2 种岩芯在各测试阶段对应的应力点绘制在应力空间( $\sigma_m, \tau_{oct}$ )中,同时给出了 C. J. Spiers 等<sup>[9-12]</sup>各矿区盐岩的压缩-扩容边界线,得到不同矿区盐岩扩容边界与本文测试点如图 5 所示。

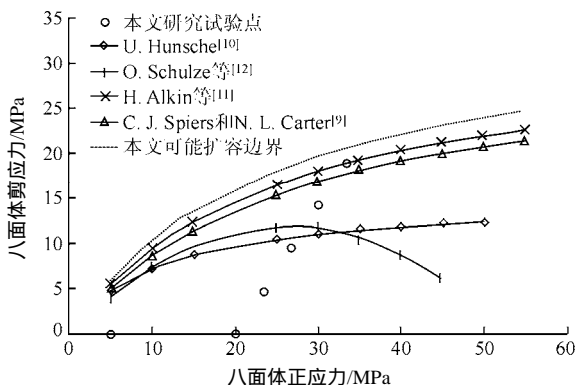


图 5 不同矿区盐岩扩容边界与本文测试点<sup>[9-12]</sup>

Fig.5 The compression-dilatancy boundaries of different salt mineral and the testing points in study<sup>[9-12]</sup>

从图 5 可以看出,不同盐岩的扩容边界线是不相同的,这主要是因为各矿区盐岩本身物理力学特性以及试验条件是不同的。本文研究未能测到盐岩完整的扩容边界,但从( $\sigma_m, \tau_{oct}$ )应力空间的已有应力点的发展情况来看,过高的偏应力还是较为危险的。本研究的应力点(见图 5)在偏应力达到 30 MPa 时已经突破了 U. Hunsche 等<sup>[10, 12]</sup>所给定的扩容边界,偏应力 40 MPa 时恰好落在了 H. Alkan 等<sup>[11]</sup>给定扩容边界线上,该扩容边界也是目前为止位于最上侧、八面体剪应力值最高的一条扩容边界线。

然而,本研究中 2 种典型盐岩在偏应力达到 40 MPa 时,渗透率仍然处于极低渗状态( $10^{-19} m^2$ ),盐岩仍未进入扩容状态(这对密闭性是极好的性质),故本次研究的盐岩所对应的压缩-扩容边界应当位于 H. Alkan 等<sup>[11]</sup>给定的 CDB 之上(见图 5 中虚线)。对比发现,H. Alkan 等<sup>[11]</sup>给定的测试条件与本文试验条件较为接近,同时出于近似研究及安全考虑,将该扩容边界线借用为本次盐岩的压缩-扩容边界来研究盐岩的渗透演化规律。

### 5.2 地下盐岩储库密闭性算例分析

在深部,盐层一般厚度较大,适合于建造大体积腔体,由于盐岩良好的蠕变行为,地应力状态一般接近于静水压力状态<sup>[22]</sup>。为了保持腔体具有较好的密闭性和稳定性,常常将盐腔建造成球形或者近似球形以消减应力集中的影响。图 6 为球形腔体围

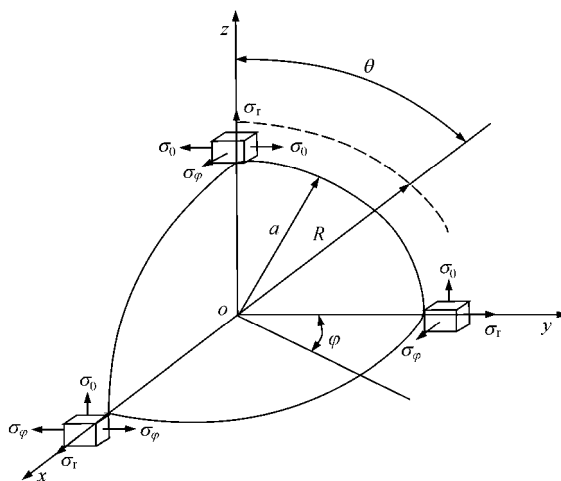


图 6 球形腔体围岩应力示意图<sup>[22]</sup>

Fig.6 The stress diagram in rock wall of spherical cavern<sup>[22]</sup>

岩应力示意图<sup>[22]</sup>。井文君等<sup>[22]</sup>给出了深部盐穴球形腔体的围岩在静水压力条件下应力表达式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_0 + (p - \sigma_0) \left(\frac{R}{r}\right)^3 \\ \sigma_\theta &= \sigma_0 - \frac{1}{2}(p - \sigma_0) \left(\frac{R}{r}\right)^3 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $\sigma_0$ 为初始地应力值; $p$ 为腔体运行气压; $R$ 为腔体半径; $r$ 为围岩的腔心距; $\sigma_r, \sigma_\phi$ 与 $\sigma_\theta$ 为围岩的 3 个主应力,由对称性可知,在静水压力场中有 $\sigma_\phi = \sigma_\theta$ 。

选取了中心深度为 1 500, 1 750 和 2 000 m 三种深度下的腔体作为本次算例。地层密度取  $2.3 \times 10^3 kg/m^3$ ,初始地应力采用静水压力状态;腔体半径  $R$  一般可达 40 ~ 50 m,忽略腔体段垂向地应力值的变化,最低运行压力( $P$ )取地层压力的 40%。表 3 给出了围岩中距离腔体中心的不同距离时的应力值。

表 3 腔体围岩的应力值  
Table 3 Values of stress in rock wall

腔体深度/ m	地应力/ MPa	内压/ MPa	腔中心距 $r/R$	$\sigma_m$ / MPa	$\tau_{oct}$ / MPa
2 000	46	18.4	1.0	46	19.51
			1.2	46	11.29
			1.4	46	7.11
			1.6	46	4.76

低压运行下围岩中易于产生较高的偏应力,极有可能导致体积过快收缩和较大的损伤扰动区(EDZ),一般被认为是稳定性和密闭性最不利的工况。采用 H. Alkan 等<sup>[11]</sup>给出的结果(安全考虑)作为



本文盐岩的扩容边界，并在图 7 中将 3 种深度下腔体围岩从腔体壁(1.0R)到 1.6R 范围内的应力在  $(\sigma_m, \tau_{oct})$  平面内绘制出来。

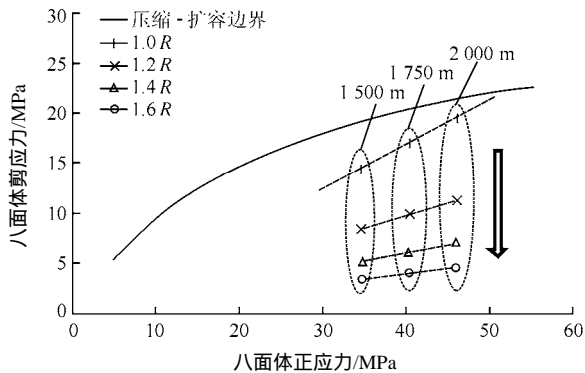


图 7 腔周围岩应力在  $(\sigma_m, \tau_{oct})$  应力空间的位置

Fig.7 The stress state of the rock wall in the stress-space of  $(\sigma_m, \tau_{oct})$

从图 7 可见，3 种深度下的腔体围岩应力均位于扩容边界内侧的压缩区，该区域内的围岩均位于安全状态，渗透率未发生突变，仅有 2 000 m 腔体的腔壁(1.0R)较接近扩容边界。还可看出，对于同一深度的腔体，随着离腔壁距离增加，八面体剪应力值迅速减小，当距离达到 1.2R 时，应力点就迅速退回到离 CDB 较远的更安全的位置。由此可以推测，若围岩中出现扩容，则扩容区应当位于腔壁周围，且随着向围岩内部延伸而迅速退回到压缩区。从表 3 还可见，随着向围岩内部延伸应力状态很快地趋近于静水压力状态。因此，可借鉴该特性作为设计相邻腔体的矿柱距离的判据之一。此外，对于不同深度的腔体而言，在相同的内压比例下(指内压所占地应力比例相同，而非绝对值)，深度越深则腔壁应力离扩容边界越近，就越容易发生扩容而引起渗透突变，这从图 7 中 1.0R 右端延长线的发展趋势也可看出。这也充分说明，对于越深的储气库，单按地应力比例所确定的下限压力值往往偏低，还需充分结合扩容发展趋势综合确定合理的运行内压下限值。就整体而言，当围岩的腔中距达到 1.2R 左右时，围岩就能处于较高的安全状态了。这对于正确认清气体在围岩中的渗透范围、合理确定内压下限和安全矿柱距离都具有重要的参考价值。

### 6 结 论

通过对 2 种组分典型盐岩采用瞬态法开展了渗透试验，获得了盐岩在常规三轴压缩状态下的渗透

演化规律。并结合盐岩的扩容理论，对深部盐穴储气库围岩的稳定性和密闭性给出了分析，得出以下几点有益的结论：

- (1) 瞬态法具有耗时短、精度高等优点，特别适用于开展诸如盐岩一类的低渗试验。
- (2) 损伤盐岩的渗透率高达  $10^{-15} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$ ，但压缩密实后其渗透率下降 2~3 个量级；高含泥盐岩比低含泥盐岩对压缩的敏感性更强，说明前者压缩性更大。
- (3) 泥质含量对渗透率和低渗特性恢复有重要影响：低含泥盐岩在压缩密实条件下的渗透率低于  $10^{-21} \text{ m}^2$ ，变形回复特征明显；而高含泥盐岩在压缩较好的状态下渗透率低至  $10^{-19} \text{ m}^2$ ，但变形能力及压缩闭合性能均不及前者。
- (4) 2 种盐岩在偏差应力高达 40 MPa 时，均未发生所谓的扩容现象，说明对于超深盐穴储气库而言，围岩进入扩容所需的偏应力值很高，这对于提升超深盐岩储库的密闭性极为有利。
- (5) 结合超深地层球形腔体中的围岩应力状态，利用本次实验结果和 H. Alkan 等<sup>[11]</sup>扩容边界对 3 种深度下腔体围岩分析表明，围岩均位于 CDB 内侧压缩区的安全位置，其安全性随腔中距的增大而迅速增加，随盐层深度增加而逐渐下降。以此给定了确定内压下限和安全矿柱距离的新方法。

### 参考文献(References)：

[1] HUNSCH U. Fracture experiments on cubic rock salt samples[C]// Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal-Zellerfeld :Translation Technology Publications ,1984 : 169 – 179.

[2] 李银平, 杨春和, 罗超文, 等. 湖北省云应地区盐岩溶腔型地下能源储库密闭性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12) : 2 430 – 2 436.(LI Yinping, YANG Chunhe, LUO Chaowen, et al. Study of sealability of underground energy storage in deep salt formation in Yunying area, Hubei province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12) : 2 430 – 2 436.(in Chinese))

[3] 杨春和, 李银平, 井文君, 等. 中石化中东部地区盐穴储气库选址研究[R]. 武汉：中国科学院武汉岩土力学研究所, 2011.(YANG Chunhe ,LI Yinping ,JING Wenjun ,et al. The site selection of salt rock gas storage in central-east China of Sinopec[R]. Wuhan : Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Sciences , 2011.(in Chinese))

[4] PEACH C J. Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks[Ph. D. Thesis][D]. Ultraiectina , Holland : Utrecht University , 1991.



- [5] STORMONT J C , HOWARD C L , DAEMEN J J K. Changes in rock salt permeability due to nearby excavation[C]// Proceedings of Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science. Rotterdam : Balkema , 1991 : 899 – 907.
- [6] STORMONT J C , DAEMEN J J K. Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts , 1992 , 29(4) : 325 – 342.
- [7] STORMONT J C. In situ gas permeability measurements to delineate damage in rock salt[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts , 1997 , 34(7) : 1 055 – 1 064.
- [8] ALKAN H. Percolation model for dilatancy-induced permeability of the excavation damaged zone in rock salt[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2009 , 46(4) : 716 – 724.
- [9] SPIERS C J , CARTER N L. Microphysics of rock salt flow in nature[C]// Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behaviour of Salt. Montreal : Translation Technology Publications , 1996 : 115 – 128.
- [10] HUNSCHE U. Determination of the dilatancy boundary and damage up to failure for four types of rock salt at different stress geometries[C]// Proceedings of The Fourth Conference on The Mechanical Behavior of Salt. Montreal : Translation Technology Publications , 1996 : 163 – 174.
- [11] ALKAN H , CINAR Y , PUSCH G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2007 , 44(1) : 108 – 119.
- [12] SCHULZE O , POPP T , KERN H. Development of damage and permeability in deforming rock salt[J]. Engineering Geology , 2001 , 61(2-3) : 163 – 180.
- [13] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 东营 : 中国石油大学出版社 , 2003 : 102 – 103.(QIN Jishun, LI Aifen. Reservoirs petrophysics[M]. Dongying : China University of Petroleum Press , 2003 : 102 – 103.(in Chinese))
- [14] SUTHERLAND H J , CAVE S P. Argon gas permeability of New Mexico rock salt under hydrostatic compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts , 1980 , 17(5) : 281 – 288.
- [15] BRACE W F , MARTIN R J. A test of the law of effective stress for crystalline rocks of low porosity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts , 1968 , 5(5) : 415 – 426.
- [16] BRACE W F , WALSH J B , FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. Journal of Geophysics Research , 1968 , 73(2) : 2 225 – 2 236.
- [17] WALDER J , NUR A. Permeability measurement by the pulse-decay method : effects of poroelastic phenomena and non-linear pore pressure diffusion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts , 1986 , 23(3) : 225 – 232.
- [18] 周宏伟, 何金明, 武志德. 含夹层盐岩渗透特性及其微观结构特征[J]. 岩石力学与工程学报 , 28(10) : 2 068 – 2 073.(ZHOU Hongwei, HE Jinming, WU Zhide. Permeability and meso-structure characteristics of bedded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2009 , 28(10) : 2 068 – 2 073.(in Chinese))
- [19] PEACH C J , SPIERS C J , ZWART H J. The influence of fluid-rock interaction on the rheology of salt rock and on ionic transport in the salt[R]. [S. l.] : European Atomic Energy Community Publication , 1982.
- [20] 吴文, 侯正猛, 杨春和. 盐岩中能源(石油和天然气)地下储存库稳定性评价标准研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2005 , 24(14) : 2 497 – 2 505.(WU Wen, HOU Zhengmeng, YANG Chunhe. Investigation of evaluating critical of stability for energy(petroleum and natural gas) storage caverns in rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2005 , 24(14) : 2 497 – 2 505.(in Chinese))
- [21] 武志德, 周宏伟, 丁靖洋, 等. 不同渗透压力下盐岩的渗透率测试研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2012 , 31(增2) : 3 740 – 3 746.(WU Zhide, ZHOU Hongwei, DING Jingyang, et al. Research on permeability of rock salt under different permeability pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2012 , 31(Supp.2) : 3 740 – 3 746.(in Chinese))
- [22] 井文君, 程林, 杨春和, 等. 基于可靠度方法的盐岩地下储气库腔体收缩风险分析[J]. 岩石力学与工程学报 , 2012 , 31(增2) : 3 673 – 3 680.(JING Wenjun, CHENG Lin, YANG Chunhe, et al. Volume shrinkage risk analysis of salt rock cavern gas storage based on reliability method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2012 , 31(Supp.2) : 3 673 – 3 680.(in Chinese))