

# 湖北省云应地区盐岩溶腔型地下能源储库 密闭性研究

李银平<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1</sup>, 罗超文<sup>1</sup>, 屈丹安<sup>2</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. 中国石油天然气股份有限公司 西气东输管道分公司储气库项目部, 北京 100027)

**摘要:** 着眼于我国深部盐岩能源地下储备可行性分析, 针对湖北省云应盐矿盐岩层薄、富含不可溶或难溶夹层的沉积特点, 开展该地区层状盐岩构造中能源储库密闭性综合研究。其一是层状盐岩体中盐岩-硬石膏界面力学特性室内试验研究, 包括直剪试验、间接拉伸试验和界面微观分析试验。结果表明, 层状盐岩体中盐岩-硬石膏界面具有较强的黏结力, 不是一个弱面, 这十分有利于盐岩溶腔的密闭性和稳定性。其二是现场盐岩层钻孔高压压水试验, 对盐岩层渗透的规律性、盐岩的封闭性以及围岩的承载能力开展研究。综合层状盐岩室内和现场试验的成果表明: 湖北省云应地区层状盐岩构造满足盐岩溶腔型地下能源储库的密闭性要求。

**关键词:** 岩石力学; 层状盐岩; 能源地下储存; 高压压水试验; 界面; 密闭性

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2007)12-2430-07

## STUDY ON SEALABILITY OF UNDERGROUND ENERGY STORAGE IN DEEP SALT FORMATION IN YUNYING AREA, HUBEI PROVINCE

LI Yinping<sup>1</sup>, YANG Chunhe<sup>1</sup>, LUO Chaowen<sup>1</sup>, QU Dan'an<sup>2</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. West-to-East Gas Pipeline Company Gas Storage Project Department, PetroChina Company Limited, Beijing 100027, China)

**Abstract:** For the feasibility analysis of the energy storages in deep salt formation in China, a comprehensive analysis of the sealability of salt caverns as oil/gas storages in the Yunying salt mine in Hubei Province is proposed. In the salt mine, the salt layers are usually intersected by many indissoluble or slightly soluble interlayers. Considering these sedimentary characteristics, a series of experiments concerning the sealability of the salt storages are carried out. The experiments, i.e. direct shear test, Brazilian test and microscopic test, on the mechanical properties of the interfaces between salt and anhydrite layers show that the salt and anhydrite layers have been bonded perfectly, and the salt/anhydrite interfaces are actually not weak as expected. This unique feature benefits definitely the stability and sealability of the salt storage caverns. To further investigate the permeability, the sealability and the loading capacity of the bedded salt rocks, an in-situ high water pressure test on a borehole in the bedded salt formation is performed recently. From the in-door and in-situ experiments, a conclusion can be drawn that the bedded salt formation in the Yunying salt mine satisfies completely the sealability

**收稿日期:** 2007-09-12; **修回日期:** 2007-10-02

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50774076, 50434050); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412704); 科技部国际科技合作计划项目(2007DFB60100)

**作者简介:** 李银平(1969-), 男, 博士, 1991年毕业于浙江大学工程力学系, 现任副研究员, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: ypli@whrsm.ac.cn

requirement of the energy storage caverns.

**Key words:** rock mechanics; bedded salt rocks; energy storage in depth; high water pressure test; interface; sealability

## 1 引言

盐岩由于具有孔隙度低、渗透率小、损伤自恢复和塑性变形能力大等优良特性,被认为是石油、天然气地下储备和高放射性废物深埋置的理想场所。我国盐岩矿藏分布范围广,盐岩层的基本特点是盐岩分层多,单层厚度薄,盐岩体中一般含有众多夹层(如硬石膏层、泥岩层和钙芒硝层等)<sup>[1, 2]</sup>。在这种特殊的条件下,储存库的稳定性和密闭性等关键问题的研究在国内外尚无成熟的理论可借鉴。本文着眼于深部盐岩能源地下储备可行性分析,针对湖北省云应盐矿盐岩层薄、富含不可溶或难溶夹层的沉积特点,开展了该地区层状盐岩构造中能源储库密闭性综合研究。

目前,着眼于盐岩构造中盐岩溶腔稳定性分析,国内外对层状盐岩体的力学特性开展一系列试验研究,如 U. Hunsche 和 A. Hampel<sup>[3]</sup>、吴文等<sup>[4, 5]</sup>、杨春和等<sup>[6~8]</sup>通过试验开展了盐岩的静、动力力学特征,蠕变特性及温度效应的研究。最近,针对湖北省云应盐矿层状盐岩的赋存特点,李银平等<sup>[1]</sup>和 W. G. Liang 等<sup>[9]</sup>开展了盐岩、硬石膏泥岩和含泥岩盐岩 3 种典型试样的单轴压缩及三轴压缩试验,分析了 3 种试样的变形和破坏特征,结果表明:泥岩夹层对盐岩体的变形和破坏特性有明显影响,单轴压缩或低围压情形下,强度高于盐岩的泥岩夹层却先于盐岩出现横向拉伸破坏;此外还观察到应力-应变曲线的“应力跌落”现象,并结合互层盐岩体 Cosserat 介质扩展模型<sup>[10, 11]</sup>分析了盐岩和泥岩夹层力学特性的不匹配对复合岩体变形和破坏特性的影响,解释试验观察到的现象,进一步揭示了复合体的变形和破坏机制。陈锋等<sup>[12]</sup>则开展了层状盐岩的流变试验,结果表明硬石膏泥岩的稳态蠕变率只有盐岩的 1/5~1/20,层状盐岩的蠕变主要由盐岩层控制。

然而,针对层状盐岩构造中能源地下储库密闭性分析的研究相对较少。一般来讲,沉积岩体的层间界面由于相邻层岩石物性的差异往往是一个弱面。在储库运行条件下,界面的张开或者滑移将导致储存油气的泄漏,因此,在层状盐岩构造中开展地下能源储库建设可行性分析中,储库密闭性论证

是关键问题之一。笔者所在研究组开展了湖北省云应地区层状盐岩构造中能源储库密闭性综合试验研究。试验研究分为两部分:室内层状盐岩-硬石膏界面力学特性研究和现场钻孔高压压水试验。本文首先对层状盐岩界面力学特性试验研究进行综述,并介绍最近在云应盐矿现场开展的钻孔高压压水试验,最后对湖北省云应地区盐矿能源地下储库的密闭性进行综合分析。

## 2 层状盐岩界面力学特性试验

对于层状盐岩介质而言,界面的力学特性对其变形破坏特征以及对层状盐岩构造地下储库溶腔的密闭性和稳定性都有着显著的影响。已进行的压缩试验<sup>[1]</sup>和流变试验<sup>[12]</sup>表明:湖北省云应盐矿层状盐岩试样在压缩试验中没有出现沿界面的滑动。为了深入了解界面的力学特性,笔者所在研究组开展了一系列试验,如层状盐岩直剪试验<sup>[13]</sup>、巴西劈裂(间接拉伸)试验<sup>[14]</sup>以及界面微观分析试验<sup>[2]</sup>。

### 2.1 直剪试验

直剪试验<sup>[13]</sup>的层状岩石试样来自湖北省云应盐矿。为了解层状盐岩的抗剪强度,除对层状盐岩中盐岩和硬石膏交界层面进行直剪试验外,为便于分析比较,还对纯盐岩和纯硬石膏试样进行了试验。

由于直剪试验的标准试样是边长为 150 mm 的立方体或直径不小于 150 mm 的圆柱体。将所取到的直径为 75~90 mm 的圆柱状岩芯切割成 100~120 mm 长的圆柱体。层状盐岩直剪试样加工过程中保证盐岩与硬石膏的交界层面位于圆柱体试样中间。

本次直剪试验的法向力分别为 5, 10, 20 和 30 kN,然后施加剪切荷载直至试样破坏。通过回归分析分别得到层状盐岩、盐岩和硬石膏的抗剪强度。试验的重要发现是:盐岩-硬石膏交界层面处的抗剪强度参数  $c$ ,  $\varphi$  值分别为 4.08 MPa, 45.9°,与盐岩和泥岩试样的强度参数  $c$ ,  $\varphi$  值相差并不大,甚至还略强,这说明湖北省云应盐矿深部层状盐岩中盐岩和泥质硬石膏的交界层面具有较强的黏结力,不是一个弱面,这十分有利于盐岩溶腔的密闭性和稳定性,对于在深部层状盐岩构造中开展能源储备是非常有利的。

## 2.2 间接拉伸试验

在层状盐岩层中建设储库，当储库内压较大或者承受循环变化内压时，可能会导致界面张开从而引起储存介质的渗漏，因此层状盐岩体中夹层和盐岩层界面的抗拉强度是一个很关键的力学特性参数。虽然已开展的压缩试验<sup>[1]</sup>和直剪试验<sup>[13]</sup>都表明湖北省云应地区深部层状盐岩体的界面不是一个弱面，但是都没有界面抗拉试验<sup>[14]</sup>来得直接。

分别对云应盐矿的盐岩劈裂试样(8个)、泥岩劈裂试样(8个)和岩盐与泥岩交界层面位于劈裂圆盘试样中心的层状盐岩劈裂试样(5个)进行了巴西劈裂试验。从试验结果可知，云应盐矿盐岩的平均抗拉强度为 1.041 MPa，而泥岩的平均抗拉强度为 2.194 MPa。泥岩和盐岩的巴西劈裂试验的破坏形式与普通岩石的破坏形式相同，均由圆盘试件的中心附近开始破裂，最后裂成两个半圆形。

层状盐岩劈裂试样的破坏形式虽然与普通岩石的破坏形式相同，但是劈裂面并没有沿着盐岩和泥岩的交界层面，而是产生在交界层面一侧盐岩部分，这说明层状盐岩中盐岩和泥岩的交界层面具有较强的黏结力，其抗拉强度大于盐岩的抗拉强度。

## 2.3 界面微观分析试验

为了从微观角度来解释交界层面具有一定的黏结力的原因，杨春和等<sup>[2]</sup>开展了层状盐岩交界面微观电镜扫描试验。采用中国地质大学(武汉)JSM-35CF 扫描电子显微镜对层状盐岩中盐岩和泥岩交界层面处进行电镜扫描。

层状盐岩中的交界层面有几种情况：一种是交界面较为清晰明显，另一种是交界面不明显，而是一个渐变的区域。交界层面明显情形电镜扫描图片见图 1。从图中可知，层状盐岩中盐岩和硬石膏交界层面较为清晰处，盐岩颗粒粒径大，呈厚板块状，颗粒间距较大；泥质硬石膏颗粒粒径小，呈块状、条带状，颗粒间距较小。在交界层面处，泥质硬石膏和盐岩的颗粒是相互嵌入紧密结合在一起的，盐岩颗粒较大的直接嵌入泥质硬石膏小颗粒群体中，而泥质硬石膏颗粒小的则填入盐岩颗粒间的缝隙中，两种颗粒形成锯齿状咬合胶结在一起。另外，从电镜图片可知，在交界层面不明显处，盐岩颗粒和泥岩颗粒形成混合情况，其颗粒间的胶结和排列方式均发生变化，泥岩颗粒和盐岩颗粒没有明显的界面，盐岩颗粒间填充有泥质矿物集合体。说明层状盐岩中盐岩和泥岩交界层面不是一个软弱的结构面，而是盐岩和泥岩颗粒相互咬合、混合并重新排列和胶结的一个渐变层，这就从微观物理的角度说明了层间界面具有较高强度的原因。

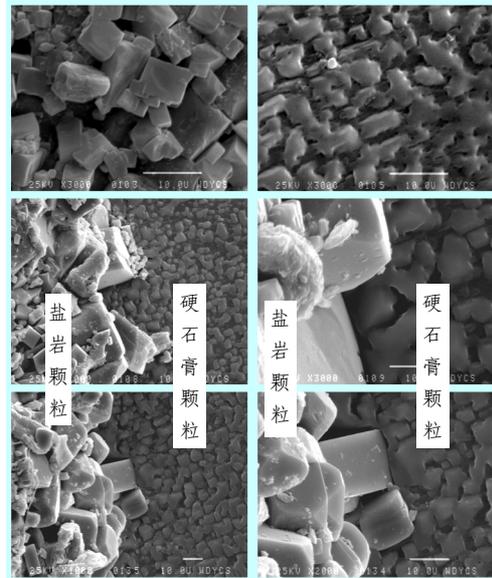


图 1 交界层面电镜扫描图片<sup>[2]</sup>

Fig.1 SEM photos of salt/anhydrite interfaces<sup>[2]</sup>

## 3 现场高压压水试验及密闭性综合分析

为了解云应地区盐岩渗透的规律性、封闭性以及围岩的承载能力，笔者所在研究组在云应盐盆 1099# 勘探孔进行了现场测试，获得 6 段不同深度的实测成果。

### 3.1 各测段岩性

选择的 6 段(每段深 2.5 m)不同深度的岩体及附近岩体的岩性如下：

(1) 测段 1(723.89~726.39 m)：722.30~723.57 m 为灰黑色含泥状盐岩；723.57~723.76 m 为灰色泥质钙芒硝盐；723.76~724.47 m 为层状或条带状灰黑色含钙芒硝块状盐岩；724.47~724.74 m 为灰色泥质硬石膏；724.74~724.93 m 为灰黑~白色含石膏块状盐岩；724.93~725.11 m 则为灰色含盐泥质硬石膏；725.11~726.39 m 为灰色钙芒硝质条带状盐岩。

(2) 测段 2(711.64~714.14 m)：710.72~710.86 m 为灰色泥质硬石膏岩，顶部见少量巨晶钙芒硝；710.86~711.27 m 为灰白色含硬石膏块状盐岩；711.27~711.42 m 为灰色硬石膏质条带状盐岩；711.42~712.91 m 为白~灰黑色含硬石膏块状盐岩；712.91~713.03 m 为灰色含盐泥质硬石膏岩；713.03~713.61 m 为灰白色含硬石膏块状盐岩；713.61~714.14 m 则为为灰色含盐泥质硬石膏岩。

(3) 测段 3(702.67~705.17 m)：701.34~701.71 m

为灰色含盐泥质钙芒硝岩; 701.71~702.58 m 为灰~白色含钙芒硝块状盐岩; 702.58~702.91 m 为灰色含盐泥质钙芒硝岩; 702.91~703.21 m 为灰白色含硬石膏块状盐岩; 703.21~703.49 m 为灰色含盐泥质钙芒硝岩, 硬石膏呈层状; 703.49~703.74 m 为灰白色含硬石膏块状盐岩; 703.74~704.23 m 为灰色硬石膏条带状盐岩; 704.23~704.61 m 为灰色硬石膏条带状盐岩, NaCl 含量较高; 705.17~705.17 m 则为灰色含盐泥质钙芒硝岩。

(4) 测段 4(654.07~656.57 m): 650.99~651.43 m 为灰色泥质硬石膏; 651.43~654.15 m 为灰黑~白色含泥块状盐岩, 含少量钙芒硝、泥质于局部富集; 654.15~654.25 m 为灰色泥质钙芒硝岩; 654.25~654.77 m 为灰黑~白色含钙芒硝块状盐岩; 654.77~655.00 m 为灰色盐岩-钙芒硝盐; 655.00~656.57 m 则为灰黑~白色含钙芒硝块状盐岩。

(5) 测段 5(605.74~608.24 m): 605.30~605.50 m 为灰色泥质钙芒硝岩; 605.50~607.25 m 为灰白~灰黑色含钙芒硝块状盐岩; 607.25~607.50 m 为灰色含盐泥质钙芒硝盐; 607.50~607.85 m 为灰色钙芒硝-团块状盐岩; 607.85~608.24 m 为灰色泥质钙芒硝岩。

(6) 测段 6(551.33~553.83 m): 550.10~550.41 m 为灰色泥质钙芒硝盐; 550.41~551.00 m 为灰~白色含泥块状盐岩, NaCl 含量高; 551.00~551.80 m 为灰色含盐泥质钙芒硝盐, 盐岩呈团块状; 551.80~552.17 m 为灰白色含钙芒硝块状盐岩; 552.17~552.57 m 为灰色泥质钙芒硝盐; 552.57~552.78 m 为灰黑色钙芒硝质条带状盐岩; 552.78~553.83 m 为灰色含盐泥质钙芒硝盐。

总而言之, 各测段为典型层状盐岩层, 富含泥质硬石膏和泥质钙芒硝夹层, 且部分夹层中含块状盐岩, 而多数盐岩层中则含硬石膏和钙芒硝组分, 基本上是呈现相互嵌套岩层特点。

## 3.2 测试方法和原理简介

### 3.2.1 试验装置

测试采用单管双塞循环式试验方法<sup>[15]</sup>, 见图 2。根据试验要求, 试验时地面的最高水压为 20 MPa, 试验按不同压力级别进行。

试验步骤如下:

(1) 确定压裂段: 根据钻孔地质资料和合同要求选择压裂段。

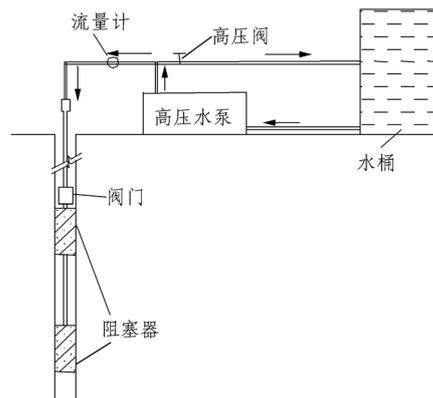


图 2 高压压水试验装置示意图

Fig.2 Sketch of high water pressure test apparatus

(2) 座封: 采用两个可膨胀的特制橡胶封隔器, 通过钻杆将其放置到选定的压裂段, 加压使封隔器膨胀座封于孔壁上, 形成承压空间(压裂段 2.5 m), 此时的压裂段压力为 0。

(3) 注水加压: 通过钻杆和液压泵对压裂段注水加压(此时封隔器内保持原来的压力不变), 裂隙面承受逐渐增强的水压作用。

(4) 稳压: 试验段在注水时, 达到某一级压力值后让压力保持稳定, 压力稳定后, 读流量表的初值, 保持压力不变至少 5 min, 再读流量表的值; 接着进行下一级压力下的测试。重复上述过程, 获得不同压力下的流量值。

(5) 解封: 压裂完毕后, 通过钻杆推动推拉阀, 使封隔器内液体通过钻杆排出, 此时封隔器恢复原状, 即封隔器解封。

### 3.2.2 透水率计算

测段透水率的单位为吕荣(1 Lu=1 L/(min·MPa·m)), 1 Lu 的定义为: 当测段压力为 1 MPa 时, 每米测段的压入流量为 1 L/min。

测段透水率采用最大压力阶段的压力值( $P_3$ )和流量值( $Q_3$ )按下式计算:

$$q = Q_3 / (LP_3) \quad (1)$$

式中:  $q$  为透水率(Lu),  $L$  为压力试段长度(m)。

### 3.2.3 渗透系数的计算

渗透系数按相关规程<sup>[15]</sup>推荐的计算公式来计算:

$$k = Q \ln(L/r) / (2\pi HL) \quad (2)$$

式中:  $k$  为岩体的渗透系数(m/d),  $Q$  为压入流量(m<sup>3</sup>/d),  $H$  为试验水头(m),  $r$  为钻孔半径(m)。

上述公式是假定渗流服从达西定律，且为水平放射流，影响半径为  $R = 1\text{ m}$  的前提下推导出来的。由于本次压水为高压压水(高压段的测试曲线为非线性)，因此在计算试验段岩体渗透系数时，均采用测段 1 压力和流量计算岩体的渗透系数。

### 3.3 测试成果及分析

#### 3.3.1 测试结果

测段 1 的压水测试结果见表 1(表中测段压力值均加上了静水压力)，其流量与压力关系见图 3(a)。其他 5 个测段的流量与压力关系见图 3(b)~(f)。透水率采用最大压力阶段的压力值和流量按式(1)计算得出。

表 1 测段 1 测试结果

Table 1 Test results of measuring segment 1

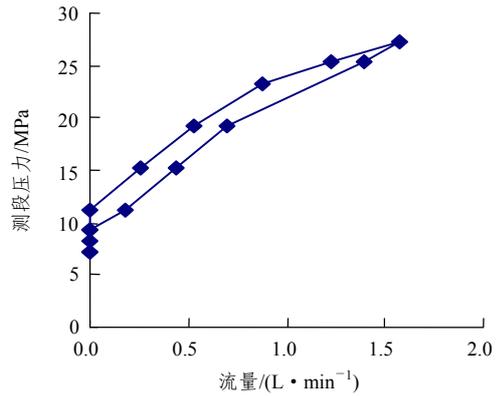
测段压力 /MPa	流量 / $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	透水率 /Lu	渗透系数 / $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
7.25	0.000	0.000	0
8.25	0.000	0.000	0
9.25	0.000	0.000	0
11.25	0.000	0.000	0
15.25	0.262	0.007	$5.69 \times 10^{-8}$
19.25	0.524	0.011	$9.02 \times 10^{-8}$
23.25	0.873	0.015	$1.24 \times 10^{-7}$
25.25	1.222	0.019	$1.60 \times 10^{-7}$
27.25	1.571	0.023	$1.91 \times 10^{-7}$
25.25	1.396	0.022	$1.83 \times 10^{-7}$
19.25	0.698	0.015	$1.20 \times 10^{-7}$
15.25	0.436	0.011	$9.49 \times 10^{-7}$
11.25	0.175	0.006	$5.15 \times 10^{-7}$
9.25	0.000	0.000	0
7.25	0.000	0.000	0

#### 3.3.2 测试结果分析

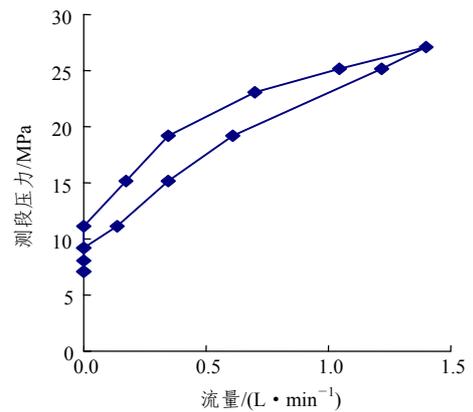
试验结果表明：

(1) 钻孔围岩在地面试验压力小于 4 MPa 时，围岩的渗透系数为 0。

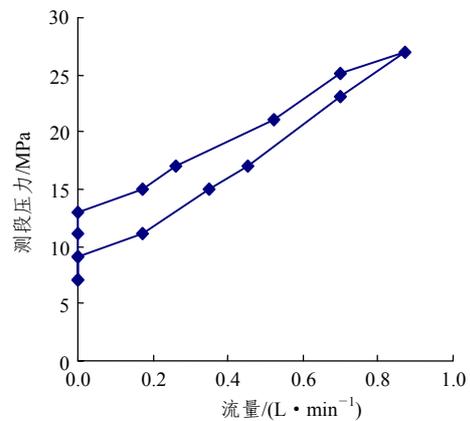
(2) 试验压力大于 4 MPa 时，透水率随压力增大而增大，与压力近似呈线性关系。这是因为随着压水压力的增加，岩体中地应力的抵抗力减弱，盐岩中的微裂隙张开度逐渐增大，所以透水率随压力增大而增大。



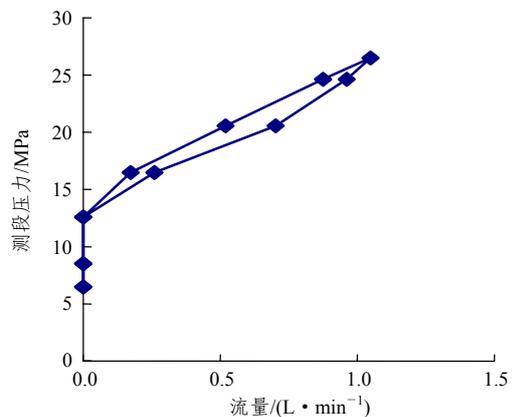
(a) 测段 1



(b) 测段 2



(c) 测段 3



(d) 测段 4

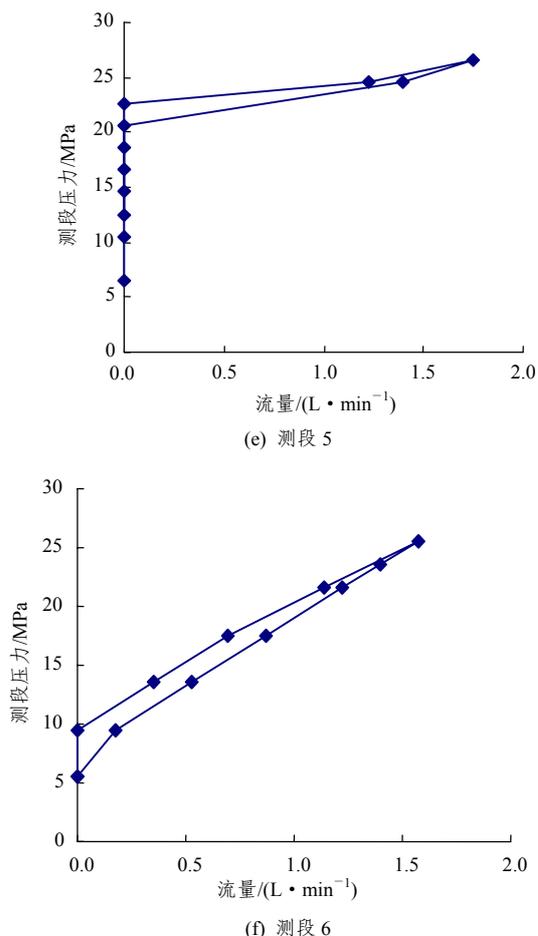


图 3 各测段流量与压力关系图

Fig.3 Relation between flow and pressure for six measuring segments

(3) 在相同压力值时, 降压过程中的透水率值比升压过程中相对应的值要大。这是因为经过一个加压过程的作用, 微裂隙产生了一定扩张, 岩体渗透性增大, 而微裂隙在压力降低时, 又没有及时恢复到原来状态, 致使透水率值相对略大。

(4) 盐岩层在 20 MPa 的地面试验压力条件下, 岩体的透水率最大值为 0.027 Lu(渗透系数为  $2.22 \times 10^{-9}$  m/s), 最小值为 0.013 Lu(渗透系数为  $1.03 \times 10^{-9}$  m/s)。即使 6 个测段的地面压力值达到 20 MPa, 压力与渗透量仍然基本成线性关系, 这表明试验段钻孔围岩均没有发生开裂, 也表明了钻孔围岩的密闭性很好。

### 3.4 层状盐岩层密闭性综合分析

层状盐岩构造中储库溶腔的密闭性良好与否决定于层间界面在储库运行条件下是否会张开和滑移。为此开展了拟建储库密闭性综合试验研究, 试验分为室内和现场两部分。

为了了解层状盐岩界面的力学特性, 先后开展

了层状盐岩直剪试验和间接拉伸试验。剪切试验表明, 层状盐岩体中盐岩夹层界面具有较强的抗剪强度, 不低于泥质硬石膏和盐岩, 甚至还弱强, 不是一个弱面; 层状盐岩界面间接拉伸试验中也同样发现界面抗拉强度甚至高于盐岩的抗拉强度, 劈裂一般不发生在界面处, 而是在靠近界面的弱侧——盐岩层中。层状盐岩的这一特殊界面力学特性对于在深部层状盐岩构造中开展能源储备是非常有利的, 十分有利于地下盐岩溶腔的密闭性和稳定性。为了进一步揭示界面黏结性好的微观机制, 笔者开展了层状盐岩界面微观分析试验。微观扫描照片说明了层状盐岩中盐岩和泥岩交界层面不是一个软弱的结构面, 而是盐岩和泥岩颗粒相互咬合、混合并重新排列和胶结的一个渐变层。

现场高压压水试验表明, 即使地面试验压力达到 20 MPa(试验段压力还要加上水柱压力), 各试验段的压力与渗透量仍然保持线性关系, 且渗透率极低, 钻孔围岩没有发生开裂。而一般能源储库运行压力为 6~20 MPa, 例如江苏金坛储气库的压力为 6.5~14.5 MPa, 因此当储库运行压力控制在一定范围时, 拟建储库密闭性完全可以得到保证。

结合前期开展的层状盐岩变形破损及时效特性试验与理论研究成果<sup>[1, 9~12]</sup>, 认为在进行层状盐岩中硐室稳定性和密闭性分析时, 可以将由盐岩层和泥岩层交替组成的层状盐岩视为一种复合介质。该复合介质黏结良好, 储库密闭性取决于盐岩层和泥岩层的渗透特性, 当硐室尺寸远大于盐层厚度时, 可将层状盐岩体视为横观各向同性材料。作者等正是基于这一特点, 建立了层状盐岩体的复合介质本构模型。

## 4 结 论

着眼于我国深部盐岩能源地下储备可行性分析, 针对湖北省云应盐矿盐岩层薄、富含不可溶或难溶夹层的沉积特点, 开展了该地区层状盐岩构造中能源储库密闭性综合试验研究。试验研究分为两部分: 室内层状盐岩体盐岩-硬石膏界面力学特性研究和现场钻孔高压压水试验。直接剪切试验、间接拉伸试验和界面微观分析试验表明, 层状盐岩体中盐岩-硬石膏界面具有较强的黏结力, 并不是一个弱面, 这十分有利于盐岩溶腔的密闭性和稳定性; 通过现场盐岩层钻孔高压压水试验, 对盐岩层的渗透规律性、盐岩的封闭性以及围岩的承载能力开展

研究。在地面压力小于 4 MPa 的条件下, 钻孔围岩的渗透系数为 0; 当试验的地面压力达到 20 MPa 时, 围岩的渗透系数最大值仅为  $2.22 \times 10^{-9}$  m/s; 即使是 6 个测段的地面压力值均达到 20 MPa, 压力与渗透量仍基本成线性关系。这些都表明试验钻孔处岩层的密闭性非常好。综合层状盐岩室内和现场试验的成果表明: 湖北省云应地区满足盐岩溶腔型地下能源储库的密闭性要求, 这是在湖北省云应盐矿实施盐岩溶腔型能源地下储库建设可行性论证中一个非常重要和关键的结论。

### 参考文献(References):

- [1] 李银平, 刘江, 杨春和. 泥岩夹层对盐岩变形和破坏特征的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 461 - 2 466.(LI Yinping, LIU Jiang, YANG Chunhe. Influence of mudstone interlayer on deformation and failure characteristics of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 461 - 2 466.(in Chinese))
- [2] 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储性关键技术研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.(YANG Chunhe, LI Yinping, CHEN Feng, et al. Research on key technology of energy storage in bedded salt rocks of Yunying salt mine[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.(in Chinese))
- [3] 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.
- [4] 吴文, 徐松林, 杨春和, 等. 盐岩的冲击特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 613 - 3 620.(WU Wen, XU Songlin, YANG Chunhe, et al. Testing studies on response behaviour of rock salt to impacting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 613 - 3 620.(in Chinese))
- [5] 吴文, 徐松林, 杨春和, 等. 岩盐冲击过程本构关系和状态方程研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 367 - 372.(WU Wen, XU Songlin, YANG Chunhe, et al. Investigation on constitutive relationship and equation of state for rock salt under impact loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 367 - 372.(in Chinese))
- [6] 杨春和, 白世伟, 吴益民. 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, BAI Shiwei, WU Yimin. 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))
- [7] 杨春和, 高小平, 吴文. 盐岩时效特性试验研究与理论分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(6): 764 - 766.(YANG Chunhe, GAO Xiaoping, WU Wen. Experiment studies and theoretical analysis of time-dependent properties of rock salt[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2004, 23(6): 764 - 766.(in Chinese))
- [8] 杨春和, 陈锋, 曾义金. 盐岩蠕变损伤关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1 602 - 1 604.(YANG Chunhe, CHEN Feng, ZENG Yijin. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1 602 - 1 604.(in Chinese))
- [9] LIANG W G, YANG C H, ZHAO Y S, et al. Experimental investigation on mechanical properties of bedded salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(3): 400 - 411.
- [10] 杨春和, 李银平. 互层盐岩体的 Cosserat 介质扩展本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 226 - 4 232.(YANG Chunhe, LI Yinping. Expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4 226 - 4 232.(in Chinese))
- [11] 李银平, 杨春和. 层状盐岩体的三维 Cosserat 介质扩展本构模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 509 - 513.(LI Yinping, YANG Chunhe. Three-dimensional expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 509 - 513.(in Chinese))
- [12] 陈锋, 李银平, 杨春和, 等. 云应盐矿蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 3 022 - 3 027.(CHEN Feng, LI Yinping, YANG Chunhe, et al. Experimental study on creep behaviors of rock salt in Yunying salt mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3 022 - 3 027.(in Chinese))
- [13] 李银平, 杨春和, 刘江, 等. 湖北云应盐矿深部层状盐岩直剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1 767 - 1 772.(LI Yinping, YANG Chunhe, LIU Jiang, et al. Influence of mudstone interlayer on deformation and failure characteristics of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1 767 - 1 772.(in Chinese))
- [14] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩短期强度和变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 3 104 - 3 109.(LIU Jiang, YANG Chunhe, WU Wen, et al. Experimental study on short-term strength and deformation properties of salt rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3 104 - 3 109.(in Chinese))
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. SL31 - 2003 水利水电工程钻孔压水试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL31 - 2003 Code of high water pressure test for water resources and hydropower engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2003.(in Chinese))