

两种不同沉积类型界面盐岩力学特性试验研究

姚院峰, 杨春和, 纪文栋, 马洪岭, 宗显雷

(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)

摘要: 金坛含盐系为一套浅湖相 - 泻湖相 - 蒸发岩相成盐构造, 由机械沉积与化学沉积作用共同形成; 潜江含盐系湖盆环境为常年性较深水分层盐湖, 主要在深水、缺氧、静水环境下以机械沉积形成, 因此 2 种沉积类型界面并不相同。针对 2 种不同沉积类型界面盐岩, 分别进行单轴、三轴压缩及剪切试验研究, 深入分析试验过程中盐岩力学特征变化情况及其力学含义, 同时对试样破坏特性进行对比分析。研究发现: 2 种界面盐岩试样都表现出较好的延性特征, 未发生崩溃式破坏; 裂纹集中分布于界面处, 纯盐岩段均少见裂纹生成, 与金坛盐岩试样相比, 潜江盐岩界面对试样变形的限制作用更突出; 2 种界面盐岩试样剪切峰值应力与纯盐岩相当, 说明界面剪切破坏由盐岩的力学特性决定。研究成果对进一步深入研究我国不同地域层状盐岩地下储气库选址与建设具有一定参考意义。

关键词: 岩石力学; 盐岩; 沉积类型; 交界面; 单轴压缩; 剪切试验; 三轴压缩; 破坏机制

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)02 - 0265 - 08

EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL PROPERTY OF TWO TYPES OF SEDIMENTARY SALT ROCK WITH INTERFACE

YAO Yuanfeng, YANG Chunhe, JI Wendong, MA Hongling, ZONG Xianlei

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Jintan bedded salt rock caused by mechanical and chemical deposition actions is structured under shallow lacustrine-lagoon facies-evaporite rock facies geological environments. However, Qianjiang bedded salt rock, whose lake basin environment is perennial deep water bedded salt lake, is formed by mechanical deposition action under the deep-water lake, oxygen lack and calm water environments. So, the interfaces between these two types of salt rocks are different. According to the characteristics of interfaces between Jintan and Qianjiang salt rocks, the uniaxial compression tests, shear tests and triaxial compression texts are carried out to investigate the interfaces of typical Jintan and Qianjiang salt rock specimens; and the complete stress-strain curves and their mechanical significations are deeply analyzed. Simultaneously, the specimens failure characteristics are also investigated. It is shown that: (1) Both of the two kinds of salt rock specimens present good ductility and the collapse failures don't occur. (2) The cracks are generated mainly around the interfaces. The interface of Qianjiang salt rock plays a prominent role in limiting the deformation of the samples compared with the Jintan's. (3) The peak shear stresses of both interface salt rocks are almost equal to the pure salt rock's, which indicates that the shear failure of interface salt rocks is decided by the mechanical behavior of pure salt rock. The results could provide some references for selection and construction of gas storages.

Key words: rock mechanics; salt rock; types of deposition; interface; uniaxial compression; shear test; triaxial compression; failure mechanism

收稿日期: 2011 - 07 - 08; **修回日期:** 2011 - 09 - 22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724602, 2009CB724603)

作者简介: 姚院峰(1982 -), 男, 2004年毕业于同济大学地下建筑工程系地质工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: yyfdjl82@163.com

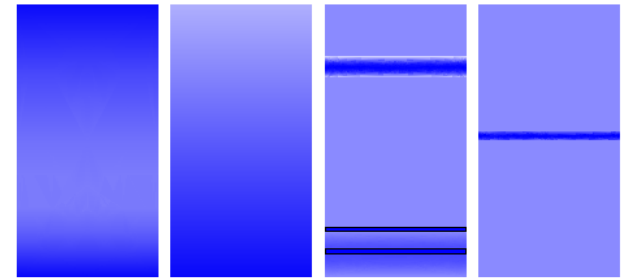
1 引言

随着我国能源储备计划的实施,2007年在江苏金坛废弃盐岩溶腔中成功建造了天然气储气库,并顺利投入运营。目前,湖北潜江、云应等地已陆续开展储气库可行性前期论证工作。

与国外盐丘不同,我国盐岩大部分为层状,即具有明显的沉积韵律,且具有埋藏浅、岩层薄、夹层多、品位低等特点^[1]。同时,不同地域的盐岩沉积环境不同,导致盐岩的力学特性不尽相同。以江苏金坛、湖北潜江盐岩为例,金坛含盐系赋存于下第三系始新统阜宁组四段地层中,属新生代早第三纪始新世中、晚期沉积,为一套浅湖相-泻湖相-蒸发岩相成盐构造,由机械沉积与化学沉积共同作用形成,埋深800~1 200 m^[2]。因此,金坛盐岩地层中呈现大量过渡状岩性,盐岩交界位置因波浪作用、化学沉积及扩散作用呈波浪渐变状,交界面不明显。而潜江组盐岩段形成于下第三系潜江组二段,湖盆环境为常年性较深水分层盐湖,主要在深水、缺氧、静水环境下形成,无波浪作用,其界面平坦,横向厚度几乎一致^[3],且主要由机械沉积形成,埋深为1 800~2 200 m,因此其交界面明显,一般为纯泥岩夹层,夹层~盐岩段由于沉积扩散作用存在局部过渡带,潜江盐岩交界面以单一薄层面、互层为主,交界层面稳定而明显。江苏金坛和湖北潜江两地典型含界面盐岩试样见图1(图中,上排为试样照片,下排为素描图;JH代表潜江盐岩试样,其余代表金坛盐岩试样;下同)。

在国外,U. Hunsche等^[4-8]针对盐岩开展了大量单轴试验、三轴压缩试验以及剪切试验,获得了盐岩短期强度特征及变形特性,并证实了盐岩是一种变形大、强度低的软岩。由于国外盐岩基本为海相沉积,而由湖相沉积形成的含夹层及含泥质盐岩鲜见,因此针对此类盐岩的研究较少。在国内,杨春和等^[9-13]针对层状盐岩开展了大量的系统研究工作,为我国能源地下储备奠定了坚实的基础。李银平等^[14-17]针对潜江、云应层状盐岩开展了剪切、单轴压缩、三轴压缩等系列试验,研究表明,强度较高泥岩夹层先于盐岩层发生横向拉伸破坏,夹层与盐岩层胶结面不是一个弱面;并利用Cosserrat介质扩展模型对层状盐岩力学特性影响进行了分析。

以上研究都是针对纯盐岩或明显层状盐岩,都没有考虑不同沉积环境对盐岩力学特性的影响。本



(a) 34-2 试样 (b) 45-1 试样 (c) JH-51 试样 (d) JH-36 试样

图1 2种含界面盐岩试样及素描图

Fig.1 Typical samples and sketches of Jintan and Qianjiang salt rocks with interface

文针对金坛和潜江2种不同类型盐岩交界面的特殊性,对这2种含界面盐岩试样进行单轴压缩、直剪试验、三轴压缩试验,深入分析了由试验得到的应力-应变曲线变化规律及其力学含义,同时对试样破坏特性进行了对比分析。本文研究成果可为深入研究金坛、潜江盐岩破坏机制及我国战略盐岩储气库稳定性研究提供参考。

2 试样制备及试验装置

2.1 试样制备

本次试验所用金坛盐岩试样取自江苏金坛市金坛石盐矿区茅资1井,埋深800~900 m,此深度范围内为拟建储气库埋深,属下第三系阜宁组四段,以灰色盐岩为主,普遍含泥,其次含钙芒硝,具明显的年韵律;潜江盐岩取自潜江油田王储1井,埋深为1 800~2 100 m,分布于15,16韵律层。

由于盐岩试样取样不易,且含有过渡界面的完整岩心更少见,因此,两地各选取2个试样进行单轴压缩试验,其中,金坛地区每个试样都由2类岩性构成:一类为灰白色、有光泽且纯度较高盐岩段;另一类为含有机质、泥质且纯度较低的盐岩,呈灰~黑褐色,局部具土状光泽。潜江地区试样由灰白色、有光泽的盐岩段及泥质夹层段构成,试样编号及参数见表1。

2.2 试验装置及试验方法

表 1 试样编号及参数

Table 1 Numbers of specimens and parameters

试样编号	深度/m	高度/mm	直径/mm	质量/kg	密度/(g·cm ⁻³)	试验条件
34-2	876.55~877.08	199.2	99.0	3.328	2.172	单轴
45-1	887.37~887.82	200.2	99.8	3.338	2.132	
46	888.43~888.83	197.2	99.9	3.370	2.180	10 MPa
50	893.49~893.98	201.9	98.6	3.340	2.170	20 MPa
89-1	961.69~961.79	117.2	101.5	2.036	2.147	20 kN
89-3	961.85~961.96	108.0	100.3	1.871	2.192	40 kN
89-4	961.95~962.05	109.1	100.7	1.970	2.268	60 kN
89-5	962.06~962.17	110.4	101.0	2.001	2.263	80 kN
JH36	1 875.08~1 875.42	194.6	98.6	3.307	2.225	单轴
JH-51	1 885.48~1 885.91	198.9	99.6	3.454	2.230	
JH-49	1 884.61~1 885.05	199.3	99.7	3.598	2.312	20 MPa
JH-98	1 908.89~1 909.16	199.7	99.8	3.541	2.265	10 MPa
JH331	2 088.54~2 088.75	111.1	102.6	2.125	2.316	20 kN
JH332	2 090.55~2 091.81	105.8	103.6	2.045	2.294	40 kN
JH264	2 042.63~2 042.99	105.4	102.0	1.955	2.270	60 kN
JH309-3	2 072.56~2 072.82	101.1	102.2	1.747	2.108	80 kN

注：20, 40, 60, 80 kN 为直剪试验法向力；10, 20 MPa 为三轴压缩试验围压。

2.2.1 压缩试验

压缩试验在中国科学院武汉岩土力学研究所自主研发的 XTR01 岩石多功能试验仪上进行，传感器设置与数据采集系统见图 2。

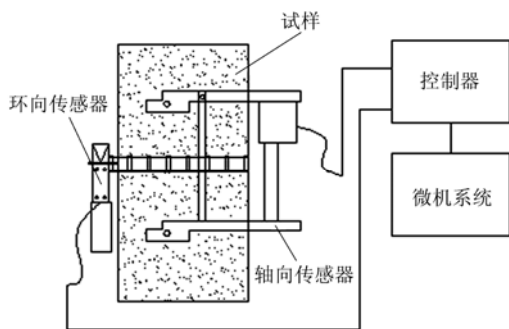


图 2 传感器设置与数据采集系统

Fig.2 Sensors setup and data collection system

试样加载方式为轴向位移加载，加载速率为 0.2 mm/min，试验在室温下进行。试验过程中，由轴向传感器测得轴向应变 ϵ_1 ，环向链式传感器测得环向应变 $\epsilon_2 = \epsilon_3$ 。取微元体 $dv = dx dy dz$ ，则变形后微元体体积增量(略去高阶小量)为

$$\Delta dv = (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) dv \tag{1}$$

因此，小变形下试样的体积应变为

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \epsilon_1 + 2\epsilon_3 \tag{2}$$

为了更好地分析界面处裂纹分布及试样的力学特性，试验中并不将试样压缩至完全破裂，仅当轴向应力达到峰值并有明显下降时即终止试验，这更有利于研究储气库的稳定性及密闭性。

2.2.2 剪切试验

剪切试验在中国科学院武汉岩土力学研究所自主研发的 RMT-150C 试验机上进行，该试验机为数字控制式电液伺服控制试验机。

试验的法向应力 σ_n 、剪切应力 τ 分别按下式计算：

$$\sigma_n = \frac{P}{A} \tag{3}$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \tag{4}$$

式中： P 为法向力， A 为盐岩试样横截面积， Q 为试样剪切力。

试验基本步骤为：将浇筑好的混凝土试样固定在剪切盒中，并调试好试验数据采集系统；按 1 kN/s 的速度施加法向力至预定值；保持法向力恒定，按照水平剪切位移控制模式施加剪切荷载，位移加载速率为 0.01 mm/s；随剪应变增加剪应力逐渐达到残余强度时终止试验。

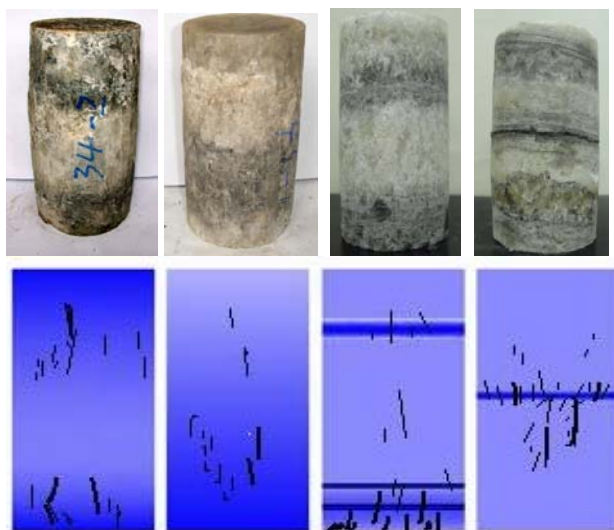
3 试验结果及分析

3.1 单轴压缩试验

3.1.1 试样破坏特征

试验完成拆下试样后发现：(1) 并没有明显的贯穿整个试样的断裂面，裂纹主要是集中在含泥、含杂质以及交界位置处，并且裂纹主要是张拉裂纹，没有出现剪切裂纹，这是由于试样的抗拉强度较低，以张拉为主^[18]。(2) 试验结束后试样整体性较好，仍具有很好的承载能力和稳定性。(3) 盐岩段除靠近界面位置处零星分布有拉裂纹外，其他区域少见裂纹，试样裂纹分布见图 3。

由图 3 可知：34-2 试样裂纹主要分布于界面两侧，靠泥质盐岩段裂纹分布较密集，中部较纯盐岩段几乎没有明显裂纹；45-1 试样裂纹主要分布于泥质盐岩段，有一组呈羽状裂纹；JH-51 试样由于端部为泥质夹层，同时由于试样加工过程中端



(a) 34-2 试样 (b) 45-1 试样 (c) JH-51 试样 (d) JH-36 试样

图3 单轴压缩后含界面盐岩试样及素描图

Fig.3 Typical samples and sketches of Jintan and Qianjiang salt rocks with interface after uniaxial compression

部泥质已发生部分损伤破坏，试验后其端部边缘有块状脱落发生，试样破坏主要发生于端部泥质夹层段，顶部界面位置及中部零星分布有少量裂纹；JH-36 试样裂纹主要集中于中部夹层附近，分布大量密集细小裂纹，其下部盐岩段有部分裂纹分布。

由此可见，单轴压缩下金坛界面盐岩试样破坏主要是由于含泥、含杂质盐岩段以及交界位置处产生拉裂纹。这主要是因为含泥、含杂质盐岩段与盐岩段相比具有一定的脆性特征，在压缩作用下局部产生脆性拉裂纹，进而导致此部分环向应变迅速增大，使得界面位置处应变不协调；而盐岩段具有良好的延性，对含泥、含杂质段有约束作用，因此距交界面较近处盐岩也可见少量拉裂纹。潜江界面盐岩中，同一承载面上泥岩夹层、盐岩强度明显不等，随单轴压缩应力增大，低强度部分将逐渐产生屈服弱化，承载力降低，从而使未屈服材料的弹性应变增大，实际应力增大，最终导致交界面部位出现大量拉裂纹，也就是说，由于泥质夹层的存在，在压缩应力作用下，夹层部位环向变形能力远远小于盐岩段，导致夹层两侧一定区域盐岩处于三向应力状态，限制夹层两侧盐岩环向变形，产生应力集中。

3.1.2 应力 - 应变曲线

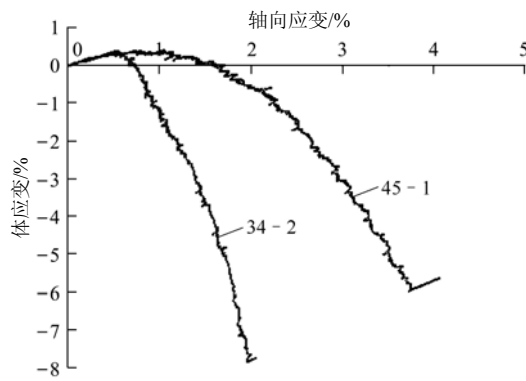
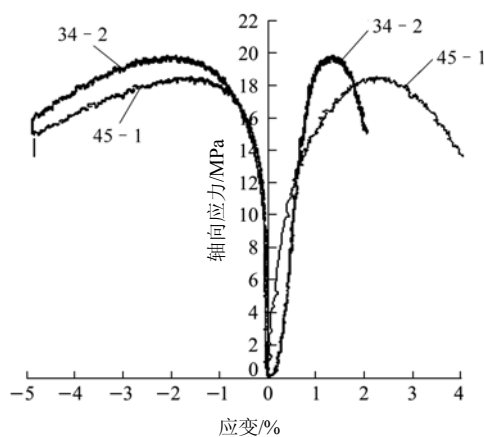
3.1.2.1 两种界面盐岩共性分析

在单轴压缩荷载作用下，当轴向应力较低，试样变形以弹性变形为主时，岩石试样的应力 - 应变

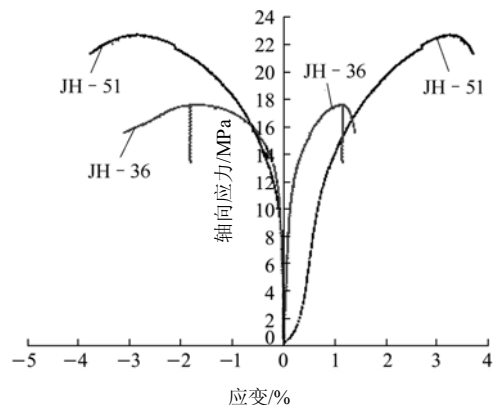
曲线一般表现为直线段，且岩石轴向变形很小。但对于金坛、潜江含界面盐岩，其应力 - 应变曲线特征具有以下共同特点：

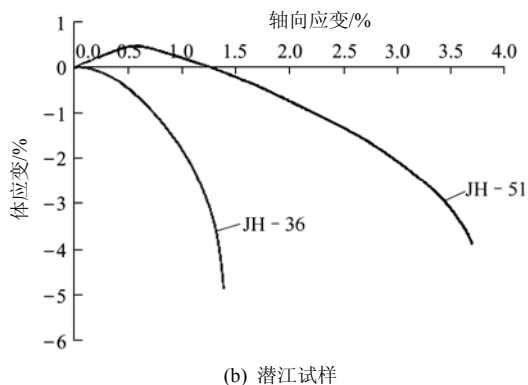
(1) 单轴压缩下，2 种界面盐岩试样都表现出较好的延性特征，压缩应力峰值所对应的轴向应变可达 1%~3%；2 种界面盐岩试样峰值曲线较光滑，没有明显的尖角，应力也呈缓慢下降状态。2 种试样单轴压缩试验曲线如图 4 所示。

(2) 较低应力水平下，轴向应变增加速率较快，而横向应变增加速率较慢，横向应变几乎呈直线。这是由于试样颗粒在较小偏应力作用下产生轴向的



(a) 金坛试样





(b) 潜江试样
图 4 2 种试样单轴压缩试验曲线
Fig.4 Test curves of Jintan and Qianjiang salt rocks with interface under uniaxial compression

压密，却不足以产生足够的应力使得盐岩晶粒产生滑移。当轴向应力增大至 8~10 MPa 时，上述线性关系就变为非线性，横向变形增加明显；此后直至峰值应力前，变形主要为扩容变形，即为试样内部晶粒和晶粒界面的滑移以及微裂纹的扩展所产生的不可逆变形，表现在试验曲线上为横向应变不断偏离应力主轴。

(3) 当应力达到峰值后，环向应变的增加速率迅速增大，明显大于轴向应变的增加速率。这是因为应力达到峰值后，试样内部产生宏观破坏裂纹，其尺寸远远大于扩容屈服段的微裂纹尺寸，表现在试验曲线上为环向应变及体应变迅速增大。

2 种盐岩试样在单轴压缩下的相关力学参数见表 2。其中，弹性模量及泊松比所对应的应力水平为应力 - 应变曲线的直线段(4~8 MPa)，即在屈服应力之前。

表 2 单轴压缩下 2 种界面盐岩试样的力学参数
Table 2 Mechanical parameters of two salt rocks with interface under uniaxial compression

试样编号	峰值应力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
34-2	20.16	1.630	0.184
45-1	18.76	2.080	0.212
JH36	22.74	2.754	0.260
JH51	17.65	2.672	0.235

值得注意的是，2 种不同类型界面盐岩应力 - 应变曲线均较平缓，即使达到峰值后，曲线也未出现一般岩石的突然下坠现象，笔者认为这是由于盐岩晶粒及晶界的滑移及微裂纹的生成呈局部化，局部化的晶界滑移被周边晶界限制，表现在宏观上即为曲线较平缓。正是由于这种局部晶界滑移的相互限

制，盐岩试样在单轴压缩下也具有很好的延性，这种稳定性也是一般岩石所不具备的，非常有利于盐岩储气库的稳定性与密闭性。

3.1.2.2 两种界面盐岩差异分析

单轴压缩下，盐岩破坏方式及应力 - 应变曲线受多种因素的影响，如试样矿物成分及其分布特点、均匀性、试样尺寸、试样加工过程中的外表层损伤破坏等。以上因素共同决定了单轴压缩过程中试样初始裂纹生成区域及扩展方式，这对试样的应力 - 应变关系及破坏方式有重要作用。2种界面盐岩差异性分析如下：

(1) 金坛界面盐岩

对于 34-2 试样，过渡界面分布于试样的上部以及中下部位，试样扩容点对应的应变约为 0.6%，裂纹集中分布于界面偏泥质段，应力达到峰值后坠落明显。对于 45-1 试样，界面位于试样中部，试样扩容点对应的应变约为 1%，应力达到峰值后坠落较缓慢，裂纹集中分布于界面偏泥质段，盐岩段也有少量裂纹，笔者认为此段裂纹并非初始裂纹，为试样达到峰值后产生的裂纹。

2 种试样应变产生上述差异的原因为：34-2 试样的初始裂纹扩展存在 2 个区域，都位于界面偏含泥段，导致试样脆性特性较强；而 45-1 试样仅中部区域 1 个初始裂纹扩展区，其脆性特征不如 34-2 试样，表现在应力 - 应变曲线上即为 34-2 试样的扩容发生较早，峰值后应力坠落较明显。由此可见，含泥质盐的脆性比纯盐岩强，但其总体力学特性接近于纯盐岩。

(2) 潜江界面盐岩

JH-36 试样的界面位于中上部，厚度约 1 cm，其底部分布有 2 个泥质界面，厚度约 0.5 cm。由于盐岩颗粒粒径一般为 0.5~1.0 cm，试样加工过程中难免对外表层颗粒造成损伤破坏，试样压缩后底部有明显颗粒脱落现象，且裂纹集中于底部，中上部界面仅有少量张拉裂纹。这说明试样的单轴压缩特性是由底部的界面段力学特性决定的。试样几乎没有扩容转折点，用能量的观点讲，即能量在试样端部界面段集中释放。

JH-51 试样界面位于中部，厚度约 0.5 cm，裂纹集中分布于界面两侧，盐岩段几乎没有裂纹产生，试样扩容应变为 0.6%，峰值应变约为 3.5%。这是由于中间硬夹层的存在，相当于起到了试验压头的端部摩擦作用，也就是与试样尺寸减半后的单轴压

缩效果接近。

可见泥质夹层对限制盐岩的变形起到了一定的作用。因此，合理选择储气库所处地层深度，对抑制储气库低压运行下体积收缩、提高储气库服役期限有重要影响。

3.2 三轴压缩试验

由于盐岩试样埋深大，试样获取成本极高，盐岩颗粒最大粒径接近 3 cm，单轴、三轴压缩试验必须采用 $\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 试样。因此，符合试验要求的盐岩试样本身已较难得，含夹层的盐岩就更为稀缺。仅针对金坛、潜江含夹层盐岩试样，选取 4 个试样进行围压 10, 20 MPa 下的三轴压缩试验。由于试样较少，不足以全面反应其力学特性，但对于分析不同类型夹层的三轴压缩下基本力学特性及破坏特点有一定作用。

3.2.1 应力 - 应变曲线特征

2 种含夹层盐岩三轴压缩试验曲线如图 5 所示，由图 5 可知：

(1) 三轴压缩下，潜江含硬质夹层盐岩 JH - 49 试样(围压 10 MPa)、JH - 98 试样(围压 20 MPa)的强度特性明显强于金坛含泥质盐岩 46 试样(围压 10 MPa)、50 试样(围压 20 MPa)。相同轴向应变下，潜江试样对应偏应力明显高于金坛试样 20%~40%。

(2) 围压对 2 种含夹层盐岩力学特性有明显影响，围压越大，相同轴向应变下其偏应力越大，从已有的试验结果可知，潜江试样对围压效应似乎更敏感，这有待于进一步的研究验证。

(3) 2 种含夹层盐岩试样在试验量程范围内均未出现软化破坏情况，表现出良好的加工硬化效果，其应变达 20%后，仍具有良好的承载能力，这与纯盐岩的三轴压缩试验曲线特性基本相似。

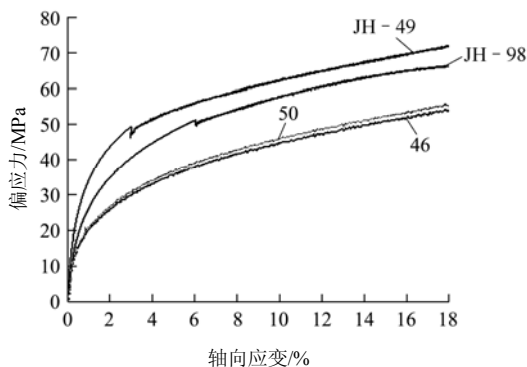


图 5 金坛、潜江含夹层盐岩三轴压缩试验曲线
Fig.5 Test curves of Jintan and Qianjing salt rocks with interface under triaxial compression

3.2.2 试验完成后试样特征

试验完成后拆下试样，发现金坛含泥盐岩试样整体呈鼓状，因为压头的摩擦限制作用，两端侧向变形小，中部变形大，且变形均匀，未发现含泥段有明显差异变形。整个试样表面未见明显裂纹产生，试样的整体性较好。

潜江含夹层盐岩同样保持了很好的整体性，试样表面少见纵向裂纹，仅在局部相对较厚泥质夹层中部出现横向裂纹，但均为间断分布，未贯通。相对其他部位，较厚泥质夹层部位试样侧向变形明显较小。值得注意的是，JH49 试样泥质夹层较薄的位置，其夹层和周围盐岩浑然一体，没有裂纹及差异变形。三轴压缩试验后 2 种界面盐岩试样照片如图 6 所示(由于金坛 50 试样卸载时发生漏油，试样拆下后损坏，此处未给出图片)。

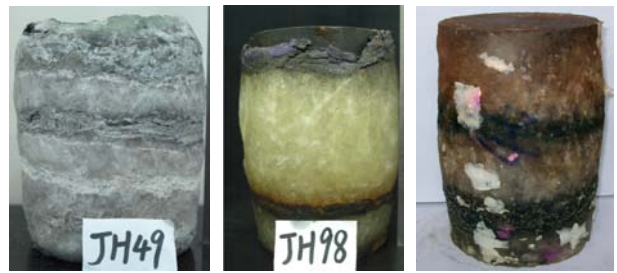


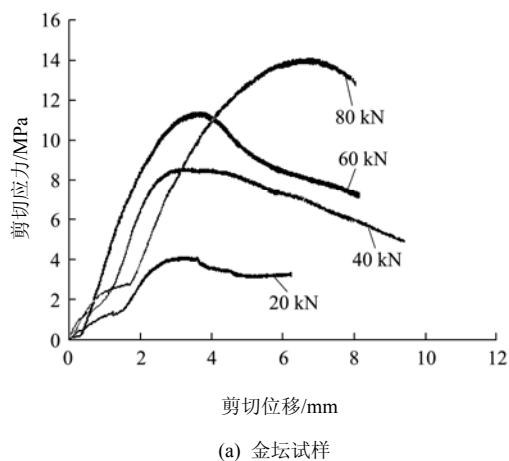
图 6 三轴压缩后含界面盐岩试样照片
Fig.6 Photos of typical samples of Jintan and Qianjiang salt rocks with interface after triaxial compression

3.3 剪切试验

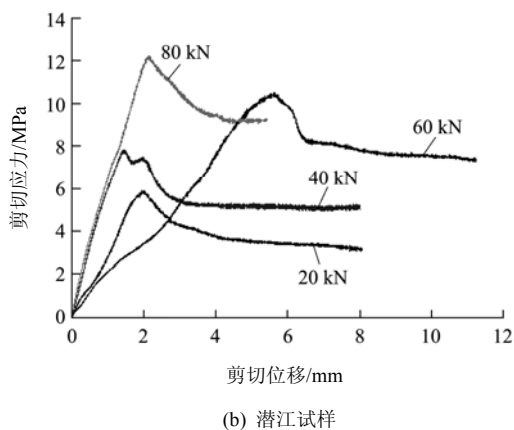
2 种界面盐岩剪切应力与剪切位移关系曲线如图 7 所示，由图 7 可知：

(1) 加载初期，潜江界面盐岩剪切斜率较金坛界面盐岩大，也就是说，潜江界面盐岩的界面剪切模量较大。加载过程中，潜江界面盐岩剪切曲线线性较强，其力学特性更接近于弹性(个别试样未将剪切面准确置于交界面处，剪切试样见图 8，其剪切特性表现出盐岩的特点)，相反，金坛界面盐岩剪切曲线呈圆弧状，说明其剪切过程中的力学非线性。

(2) 金坛界面盐岩极限抗剪强度对应的剪切位移一般为 3~7 mm，且整条曲线都较平缓，应力峰值处曲线圆润平滑，峰值强度不突出；潜江界面盐岩极限抗剪强度对应的剪切位移一般为 1~3 mm，且峰值处曲线明显突变。但二者的剪切应力峰值基本相当，这可能是由于两者交界面的强度特性决定于盐岩的力学特性，即在剪切过程中，总是交界层面处盐岩颗粒先发生破坏。



(a) 金坛试样



(b) 潜江试样

图 7 剪切应力 - 剪切位移关系曲线

Fig.7 Shear stress-shear displacement curves



(a) 潜江试样



(b) 金坛试样

图 8 2 种含界面盐岩直剪试样

Fig.8 Typical samples of Jintan and Qianjiang salt rocks with interface for shear tests

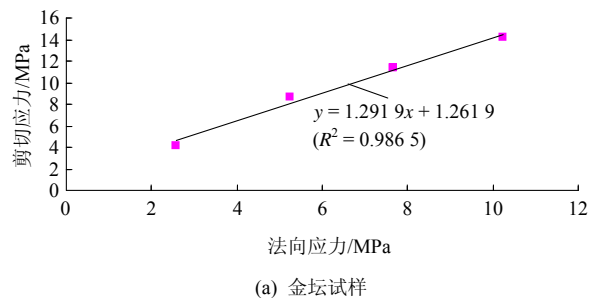
(3) 直剪试验的试样抗剪强度一般可用莫尔 - 库仑定律表述, 具体公式如下:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (5)$$

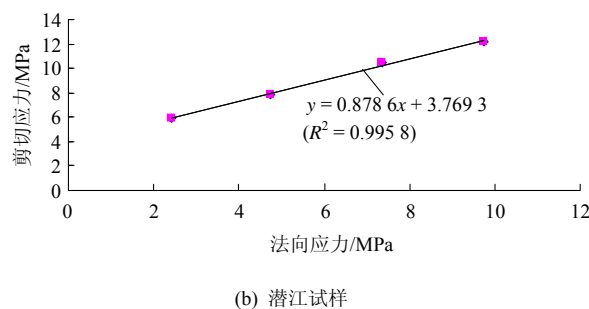
式中: c , φ 分别为破坏面上的黏聚力和摩擦角。

利用试验所得数据绘出强度曲线, 并得出金坛

界面盐岩的 c , φ 值分别为 1.26 MPa, 52.3°, 潜江界面盐岩的 c , φ 值分别为 3.77 MPa, 41.3°。抗剪强度曲线见图 9。



(a) 金坛试样



(b) 潜江试样

图 9 抗剪强度曲线

Fig.9 Curves of shear strength

4 结 论

以我国储气库的选址和建设为背景, 分别针对金坛、潜江 2 种不同沉积类型的界面盐岩开展了单轴压缩、三轴压缩和剪切试验, 对比分析了 2 种界面盐岩的力学特性及破坏特点, 主要结论如下:

(1) 单轴压缩下, 2 种界面盐岩试样都表现出较好的延性特征, 其峰值应力对应的轴向应变可达 1%~3%, 扩容点对应的围压为 8~10 MPa, 且峰值曲线较光滑, 没有明显的尖角, 应力呈缓慢下降状态, 未发生崩溃破坏。

(2) 单轴压缩下, 2 种盐岩试样的力学特性与界面的分布位置、界面特点有直接关系, 裂纹主要分布于界面处, 盐岩段均少见裂纹生成。金坛含泥质盐岩较纯盐岩脆性特征更明显, 潜江盐岩界面对试样变形的限制作用突出。

(3) 三轴压缩下, 应力 - 应变曲线特征与纯盐岩类似, 轴向应变达到 20%后试样仍未表现出弱化、破坏特性。金坛含泥盐岩侧向变形均匀, 未见明显裂纹; 潜江含泥盐岩在厚夹层部位盐岩体侧向变形明显较小, 且在夹层中部有横向间断裂纹分布, 但较薄夹层与周围盐岩浑然一体, 未见明显裂纹及较大变形。

(4) 根据剪切试验求得金坛、潜江界面盐岩 c 值分别为 1.26, 3.77 MPa, 说明潜江交界面黏结强度较金坛高, 并不比纯盐岩强度低, 但 2 种界面盐岩试样剪切峰值应力与盐岩相当, 说明界面剪切破坏由盐岩的力学特性决定。

(5) 潜江泥质夹层对盐岩变形有一定的限制作用, 因此合理地选择储气库所处地层深度, 对抑制储气库低压运行下体积收缩、提高储气库服役期限及经济效益有重要作用。

参考文献(References):

- [1] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(YANG Chunhe, LIANG Weiguo, WEI Donghou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(in Chinese))
- [2] 魏长青, 徐农隆. 金坛盆地茅兴段含盐地层沉积特征[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(3): 13 - 14.(WEI Changqing, XU Nonglong. Maoxing block saliferous strata sedimentary characteristics, Jintan[J]. Block Coal Geology of China, 2004, 16(3): 13 - 14.(in Chinese))
- [3] 张永生, 杨玉卿, 漆智先, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境[J]. 古地理学报, 2003, 5(1): 29 - 35. ZHANG Yongsheng, YANG Yuqing, QI Zhixian, et al. Sedimentary characteristics and environments of the salt-bearing series of Qianjiang formation of the paleogene in Qianjiang sag of Jiangnan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2003, 5(1): 29 - 35.(in Chinese))
- [4] HUNSCH U. Fracture experiments on cubic rock salt samples[C]// The 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal-zellerfeld: Trans. Tech. Publications, 1984: 169 - 179.
- [5] HUNSCH 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 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal-zellerfeld: Trans. Tech. Publications, 1996: 163 - 174.
- [6] HUNSCH U, HAMPEL A. Rock salt—the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository[J]. Engineering Geology, 1999, 52(3/4): 271 - 291.
- [7] SKROTZKI W. An estimation of the brittle to ductile transition in salt[C]// The 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal-zellerfeld: Trans. Tech. Publications, 1984: 381 - 388.
- [8] LAJTAI E Z, CARTER B J, DUNCAN E J S. An echelon crack-arrays in potash salt rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1994, 27(2): 89 - 111.
- [9] 杨春和, 高小平, 吴文. 盐岩时效特性实验研究与理论分析[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))
- [10] 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))
- [11] LIANG W, YANG C, ZHAO Y, et al. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(3): 400 - 411.
- [12] 吴文, 徐松林, 杨春和, 等. 盐岩的冲击特性实验研究[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))
- [13] LI Y P, YANG C H, QIAN Q H, et al. Experimental research of deformation and failure characteristics of laminated salt rock[C]// Proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behaviors of Salt. London: Taylor and Francis Group, 2007: 103 - 108.
- [14] 李银平, 蒋卫东, 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, JIANG Weidong, LIU Jiang, et al. Direct shear tests for layered salt rocks Yunying salt mine in Hubei Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1 767 - 1 772.(in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 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. Experiment study on short-term strength and deformation properties of salt rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup.1): 3 104 - 3 109.(in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 22 - 23.(YOU Mingqing. The mechanical behavior of rock[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 22 - 23.(in Chinese))