

文章编号: 1000-7598 (2013) 03-0645-08

# 含倾斜夹层盐岩体变形与破损特征分析

刘 伟<sup>1</sup>, 李银平<sup>1</sup>, 尹栋梁<sup>2</sup>, 杨春和<sup>1,3</sup>, 杜 超<sup>3</sup>, 展旭财<sup>1</sup>, 张桂民<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, 武汉 430071; 2. 中国石油化工股份有限公司天然气川气东送管道分公司 金坛储气库项目部, 江苏 金坛 213200; 3. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 为了研究含倾斜非盐夹层盐岩体的变形与破损特性, 开展了含倾斜夹层盐岩试样的单轴、三轴压缩试验, 并结合复合岩体破坏的理论分析, 探讨了界面黏结应力的变化规律及其影响因素, 揭示了倾斜层状盐岩体变形与破坏特征及其机制。研究表明, 倾斜夹层对盐岩体的变形与破损具有显著影响。夹层各部破损形式与其所处位置有关; 裂纹在界面处最先萌生、进而扩展到夹层和盐岩层; 试验观察到盐斑的穿晶断裂现象并揭示了其力学机制; 夹层厚度影响着盐岩体整体性能和破损特性, 相对于薄夹层、中厚夹层更容易形成宏观裂纹; 围压作用减少了夹层不同部位的破裂形态差异及界面黏结应力差异。该结果为含地层倾角盐岩矿区储气库的造腔优化及其稳定性、密闭性分析提供了理论参考, 建议造腔前应优选地质层段, 以同时满足稳定性和密闭性要求。

**关 键 词:** 倾斜夹层; 破坏特征; 界面; 黏结应力; 夹层厚度; 密闭性

**中图分类号:** TU 454

**文献标识码:** A

## Analysis of deformation and fracture characteristics of salt rock with tilted interlayer

LIU Wei<sup>1</sup>, LI Yin-ping<sup>1</sup>, YIN Dong-liang<sup>2</sup>, YANG Chun-he<sup>1,3</sup>, DU Chao<sup>3</sup>, ZHAN Xu-cai<sup>1</sup>, ZHANG Gui-min<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Jintan Gas Storage Project Department, Sichuan-to-East Natural Gas Transmission Pipeline Branch Company of SinoPec, Jintan, Jiangsu 213200, China; 3. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to reveal the deformation and failure characteristics of salt rock with tilted unsalted interlayer, uniaxial and triaxial compression experiments are carried out. With failure mechanism analysis of stratified rock mass, the variation and impact factors of bonding stresses are investigated; and the failure characteristics and mechanisms of tilted layered salt rock are revealed. The research indicates that tilted interlayer obviously affects the deformation and failure characteristics of rock samples. The failure patterns are related to the position of interlayer. Cracks initiate near interface firstly and then expand to interlayer and salt rock. Trans-granular fracture is observed and its mechanism is revealed. The overall performance of salt rock and characteristics of cracks are influenced by the thickness of interlayer; comparing with thin interlayer salt rock, macro crack tends to appear in the middle thick interlayer more easily. Confining pressure reduces the morphological difference of cracks in different positions of interlayer and the difference of bonding stresses on interface. The analytical result provides an important reference for the study of the cavern construction optimization and stability and tightness research of the salt caverns in the salt rock mineral area with stratum inclination. What's more, optimizing the geological section to meet the demand of stability and tightness simultaneously is recommended before cavern construction.

**Key words:** tilted interlayer; failure characteristics; interface; bonding stresses; thickness of interlayer; tightness

## 1 引 言

盐岩由于具有蠕变性能好、渗透性低、损伤自修复等优良特性, 被国内外公认为油气储存的理想场所。而我国盐岩主要为层状分布, 难溶夹层(如

硬石膏层、泥岩层和钙芒硝层等)多。因此, 与国外建造于巨型“盐丘”中的储库相比, 我国储库的建造、稳定性、密闭性等关键问题尚无完整的理论体系和成熟可鉴的经验<sup>[1]</sup>。目前, 国内外对层状盐岩的力学特性开展了一系列研究。Hunsche 等<sup>[2-5]</sup>通过

收稿日期: 2012-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51274187); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(No. 2009CB724602, 2009CB724603)。

第一作者简介: 刘伟, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事层状岩体力学特性及钻井工程研究。E-mail: guarenliuwei@126.com

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。杨春和等<sup>[6-8]</sup>构建了互层盐岩体 Cosserat 介质二维、三维本构模型,并开展了一系列层状盐岩体的力学试验,揭示了其变形和破坏机制,解释了众多试验现象。

以往的层状盐岩研究主要针对水平层状盐岩体开展,但在应城、淮安和平顶山等地钻遇了较多含倾斜夹层盐岩,倾角在  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  之间。鲜学福等<sup>[9-11]</sup>发现:随着倾角、岩体本身及界面性质的变化,倾斜层状岩体对隧道、地下厂房等地下工程的稳定性和变形破坏具有较大的影响。因此,为保证深部储库的稳定性和密闭性,极有必要开展倾斜层状盐岩体的研究。此外,层状盐岩体的界面间由于两相材料力学性能不匹配,存在层间剪应力,常常是裂纹最先萌生、扩展的地方<sup>[12]</sup>,这对储气库运营期间的密闭性具有重要影响。以往的研究主要集中于储气库整体稳定性的分析,因此,对界面处裂纹的萌生和扩展及其对整体的影响就显得尤为必要。本文以平顶山盐矿区倾斜层状盐岩为研究对象,对盐岩岩芯试样开展了单轴压缩和常规三轴压缩试验。分析了含倾斜夹层盐岩的强度和破坏特性,并重点分析了裂纹的萌生和扩展特性。最后,结合层状岩体破坏机制,求解了界面黏结应力,理论上解释了试验中观察到的现象。

## 2 试验概况

试验仪器采用 MTS815FlexTestGT 材料试验机,试验机可以进行静力学试验、动力学试验、常温常压试验、高温高压试验;加载过程中可进行渗透、弹性波、声发射等试验。试验机的最大轴向压缩荷载为 4 600 kN,最大轴向行程为 100 mm,最大围压为 140 MPa,温度控制范围为室温 $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ;控制方式包括轴向加载、围压加载、孔隙水加载任意组合的联合控制方式。

由于盐岩遇水溶解,故采用干式锯磨法,制样及操作规程遵循《水利水电工程岩石试验规程》<sup>[13]</sup>。试样取自河南平顶山盐矿区,埋深为 1 100 $\sim 1 800$  m,由于盐岩试样有不同含量的泥质,呈灰白色或灰褐色粗粒状;试验采用的试样中,夹层类型根据厚度不同分为中厚夹层型( $>10$  mm)和薄夹层型( $<5$  mm),均呈倾角  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$  的倾斜构造。试样典型照片见图 1。大地坐标系与局部坐标系的关系如图 2 所示,并将夹层自身不同高度区域划分为 3 个部位:上部、中部、下部。



图 1 岩样典型照片

Fig.1 Typical photos of rock core samples

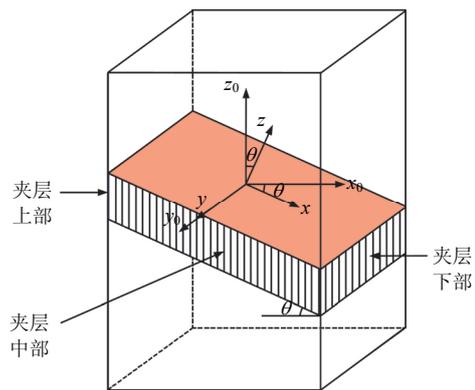


图 2 夹层位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of interlayer

## 3 单轴压缩试验分析

### 3.1 单轴试验典型曲线

限于取样困难,单轴试验选取的含倾斜夹层试样均为中厚夹层型盐岩(厚度 10 $\sim 20$  mm)。图 3 为 3 种岩样的单轴试验曲线,3 种试样的力学性能不同:纯盐岩的强度最低,含泥盐岩和含夹层盐岩的强度较高。夹层和泥质的存在提高了盐岩的强度和刚度。

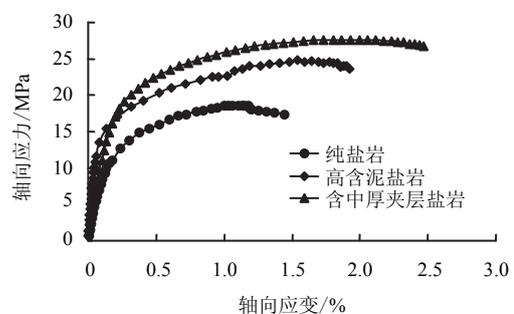


图 3 3 种试样典型应力-应变曲线

Fig.3 Typical stress-strain curves of three rock samples

### 3.2 夹层破裂形态分析

李银平等<sup>[8]</sup>研究表明:在含水平夹层的盐岩体中,本身强度较盐岩高的夹层沿轴向首先劈裂破坏,

然后裂纹扩展到盐岩层部分,带动盐岩层张拉破坏。与此对比发现,含倾斜夹层盐岩体与含水平夹层盐岩体的破损形态及裂纹扩展特征有一定的差别。含倾斜夹层的盐岩由于倾角的存在,使界面处变形和破坏模式变得更为复杂。夹层的上部、中部和下部具有不同的破裂形态(如图 4 所示):①在夹层的上部和下部出现众多竖向劈裂纹,即上部和下部表现出张拉破裂特性,裂纹贯穿整个夹层,在上、下两侧盐岩中延伸一定距离后尖灭;在夹层的中部出现了倾斜的裂纹,即中部表现出剪切破裂的特性;②夹层上部、下部的破损程度明显高于中部位置,发生了明显的剥离掉落现象,试验后在夹层截面上观察到平行  $xoz$  平面的裂纹多于平行  $yoZ$  平面的裂纹(见图 5(d));③夹层位置从上→中→下,裂纹形态经历了:竖直裂纹(逐渐变缓)→倾斜裂纹(逐渐变陡)→竖直裂纹的变化过程,说明随着位置的变化,夹层破裂形态经历了劈裂→剪切→劈裂的过渡,这主要与夹层不同位置的应力状态有关,后文将做详细分析。

### 3.3 裂纹萌生、扩展分析

岩体的破裂过程可表述为裂纹的萌生、扩展和贯通。对于复合层状材料,裂纹的萌生位置和扩展模式直接决定了岩体的最终破裂形态。试验后试样的裂纹在界面附近与其他位置有一定的差别。如图 5 所示,裂纹在界面处倾角变小、曲折明显、张开度极小,向上、下延伸很小距离(约 2~5 mm)后倾角突然增大、张开度亦变大;该现象在夹层的中部界面最为明显。交互层状岩体由于层间力学属性不同,极有可能在界面处引起拉应力的出现,使得在界面附近裂纹最先萌生,裂纹进一步向界面两侧岩体中扩展,从而引起宏观裂纹的出现,最终引起岩体的破坏<sup>[12, 14-15]</sup>。由于盐岩与夹层的力学性能不同,界面处的应力-应变状态极为复杂,倾角的存在还使界面处存在剪切应力。因此,单轴压缩试验条件下,界面就成为拉剪裂纹优先萌生和扩展的位置。借鉴朱维申等<sup>[16-17]</sup>的分析方法,夹层界面裂纹萌生和扩展过程可通过图 6 来加以表述,图 6(a)为界面处萌生的一系列微裂纹,方向和长度各不相同;图 6(b)随着加载进行,微裂纹向夹层和盐岩中扩展,某些角度适宜的裂纹扩展成经典翼型裂纹,在裂纹尖端形成拉应力集中区,引起张裂隙的形成;图 6(c)在中厚夹层型盐岩体中,上、下界面的裂纹极有可能相互贯通,形成宏观裂纹;由于微裂纹可能多条同时萌生、扩展,也有可能形成平行裂纹,见图 5(b)。界面附近为剪性裂纹,故为倾斜状,张开度小;其

余部位为张性裂纹,故较为陡立且张开度较大。



(a) 夹层底部破裂 (b) 夹层中部破裂 (c) 夹层顶部破裂

图 4 夹层不同位置典型破裂模式

Fig.4 Typical fracture patterns of interlayer in different positions



(a) 上部裂纹转折

(b) 下部裂纹转折

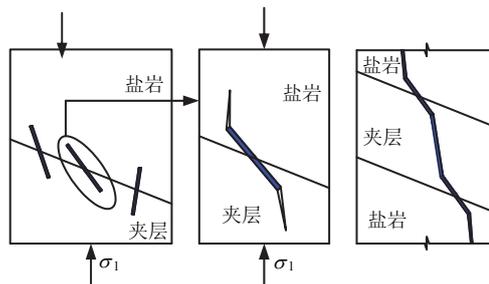


(c) 中部裂纹转折

(d) 夹层截面裂纹图

图 5 夹层不同位置裂纹转折及夹层截面裂纹

Fig.5 Deflection of cracks in different positions and cross-section cracks of interlayer



(a) 微裂隙萌生

(b) 张裂隙形成

(c) 宏观裂纹形成

图 6 界面裂纹萌生、扩展示意图

Fig.6 Schematic diagrams of initiation and expansion of fracture near interface

### 3.4 穿晶断裂现象

#### 3.4.1 形态描述

有部分试样含有较大的纯白色盐岩斑状晶粒(直径约为 10~20 mm),其周围介质为泥岩或泥盐颗粒混合物,晶粒顶部或底部均位于界面附近(见

图7)。在试验中发现,裂纹贯穿盐斑发生穿晶断裂,而不是沿与裂纹几乎平行的晶界的沿晶断裂。破坏后裂纹贯穿晶斑中部,呈约90°陡立,路径较平直,局部呈曲折状。



图7 穿晶断裂  
Fig.7 Trans-granular fracture

### 3.4.2 机制及意义

将晶斑及其附近裂纹可能出现的部位划定为4种情况:泥-盐混合体中、盐斑晶粒中、纯泥岩中、盐斑-他体胶结面。谢和平<sup>[18]</sup>指出:岩石是一种粗晶粒多相结晶材料,内部包含大量裂隙和孔洞,而岩石的损伤和破裂就源于这些微缺陷的扩展。岩石的分形模型可分为穿晶断裂、沿晶断裂、沿晶-穿晶耦合断裂。对于岩石类材料,晶粒间黏结力一般低于晶粒本身的强度,使得岩石更容易发生沿晶断裂,因此,一般认为,盐岩试样的强度低于其内部单个晶斑的强度。分形几何断裂理论计算结果还表明,岩石的穿晶断裂比任何一种沿晶断裂和沿晶-穿晶断裂均要消耗更多的能量,其发生的可能性也是最低的。在图7中,对于晶斑及其附近区域,要发生图中所示的穿晶断裂最基本的条件就是盐岩晶粒自身强度是最低的,而盐-泥颗粒胶结极为紧密。上述分析表明,对应平顶山地区的层状盐岩,纯盐岩抗拉强度相对较低,泥岩颗粒与盐岩颗粒及泥岩与盐岩的胶结是非常紧密的,强度较高,这就为保证该地区储库稳定性和密闭性提供了有利条件。

## 4 三轴压缩试验分析

### 4.1 三轴试验曲线

本次三轴试样分别为薄夹层含泥盐岩体、中厚夹层盐岩体、含泥盐岩,图8为该3种岩样在围压10 MPa下的应力-应变曲线。含夹层试样数量极为有限,其他围压试验下无含中厚夹层型盐岩试样。

从图8的 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线可知,夹层的存在提高了岩体的强度,但中厚夹层型盐岩体出现峰值,表明已发生明显的破坏,脆性较为显著;而薄夹层型盐岩体和含泥盐岩应变硬化现象显著,延性较为明显,说明夹层厚度对试样的强度、整体性质、破裂形态

均有一定影响。

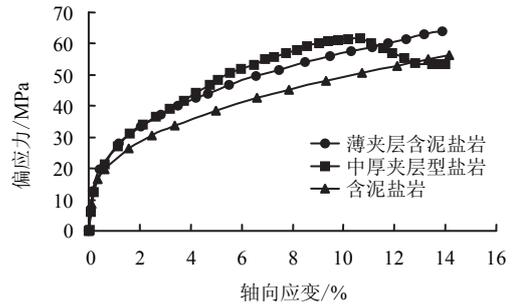


图8 10 MPa围压下3种岩石试样典型应力-应变曲线  
Fig.8 Typical stress-strain curves of three rock samples under confining pressure of 10 MPa

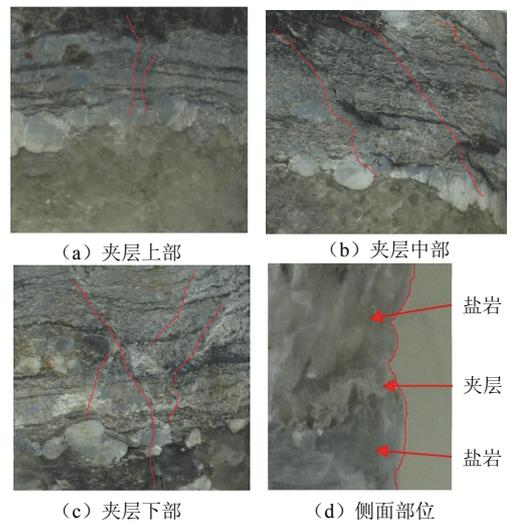


图9 中厚夹层不同位置典型破裂及薄夹层内凹  
Fig.9 Typical fracture models of middle thickness interlayer in different positions and shrinkage of thin interlayer

### 4.2 夹层破裂特征分析

由于夹层与盐岩之间的物理力学性能不匹配,在界面处或夹层中极有可能产生渗透裂隙,盐岩本身具有蠕变性能好、损伤自我修复的性能,产生渗透通道的可能性极小。因此,关于深部储气库密闭性的研究重点在于界面处及夹层破裂形态的分析。以上三轴压缩试验表明,薄夹层型盐岩体与中厚夹层型盐岩体具有不同的破裂形态和裂纹扩展模式,以下分别加以分析。

#### 4.2.1 薄夹层型盐岩体

盐岩三轴压缩下一般呈膨胀破坏。本次试验中,薄夹层型盐岩体或薄夹层型含泥盐岩体为膨胀破坏,且含泥质多的试样强度相对较高。三轴压缩后,试样侧面凹凸不平,盐质多的部位侧向变形较大,泥质多的部位侧向变形相对较小,如图9(d)所示,沿着薄夹层呈现明显的内凹,紧邻处的盐岩变形也较远端盐岩小,说明夹层约束了盐岩的侧向变形。

试验表明，极薄夹层对裂纹的萌生和扩展影响不明显，侧面无明显裂纹形成；此外，岩体的整体变形较大，延性较为明显，破坏由盐岩本身性能控制。

#### 4.2.2 中厚夹层型盐岩体

中厚夹层存在的情况下，岩体的轴向和侧向变形均较薄夹层型岩体小。夹层相对硬脆，由于要约束盐岩的侧向变形，相当于在界面及其附近受到了盐岩对其的等效围压和剪应力作用，使夹层的围压作用降低了，故夹层界面中较易先出现裂纹发生破坏；约束作用随着离界面距离增加而减弱，因此，夹层裂纹表现出不规则的锯齿形倾斜裂纹。而盐岩由于受到夹层对其的约束锚固作用，相当于在界面及其附近受到了等效围压和剪应力作用，侧向变形明显减小，破坏强度明显提高了。因此，中厚夹层盐岩的破坏均由界面应力状态及夹层性能所控制。对比分析表明，夹层越厚，对盐岩的侧向变形约束作用越明显。与薄夹层型试样不同的是，界面及夹层中出现宏观裂纹，盐岩中裂纹不明显。说明夹层越厚，越易形成宏观裂纹。从图 9 可见，与单轴压缩试验对比还发现，夹层不同位置的裂纹均为倾斜状，且裂纹宽度明显减小，均表现剪切破坏形态，但中部的裂纹倾角略小于顶部和底部；此外，界面处裂纹偏转也明显减弱。这说明，围压的存在降低了夹层不同位置破裂形态的差异。

#### 4.3 讨论

以上分析表明，夹层的厚度越小，对盐岩的变形约束作用越小，整体的延性越明显，但在界面处形成显著裂纹的可能性也越小；夹层的厚度越大，对盐岩的变形约束作用越大，整体的脆性越明显，但在界面及其附近形成显著裂纹的可能性也越大。因此：①在造腔前极有必要对造腔地层进行最优化设计，使厚、薄夹层的总数量和总厚度适宜，筛选出同时满足稳定性要求和密闭性要求的最佳层段；②对于薄夹层型盐岩体，由于其变形和破坏主要由盐岩控制，不必过于担心该处会产生渗透裂纹；③中厚夹层或更厚的夹层，界面及其附近产生渗透裂纹的可能性相对较大，应重点分析该处应力-应变关系及变形破损特性。此外，深部储气库建造过程中，腔壁及其一定范围内的岩体将发生两个显著改变：①应力状态由三向转变为二向、甚至单向应力状态，使岩体增加向临空区破坏的风险；②盐岩和夹层在界面处力学性能不匹配增加界面处产生裂隙的风险。尤其是对于含倾斜夹层储库的溶腔顶板附近，该位置处于压拱底部，容易产生拉应力区，倾斜夹层的存在又增加了层间滑移的可能性，因此，后期研究应密切关注溶腔顶部附近倾斜夹层对腔顶密闭

性和套管鞋稳定性的影响。

### 5 理论分析

考虑到层状盐岩作为一复合岩体的力学性能，界面复杂的应力及变形关系使得裂纹极有可能在界面处最先萌生和扩展<sup>[19]</sup>，而裂纹的形态和特性又直接影响了储库的密闭性和渗透路径的性能，因此，分析界面处的变形及破损特性已成为储库密闭性分析的关键问题。鲜学福<sup>[9]</sup>针对由不同物理学属性交互而成的复合层状岩体，考虑层间协调关系构建了反映层面力学特性的黏结约束应力表达式。考虑到倾斜层状盐岩体的复合岩体力学特性，利用相同的分析方法，构建了考虑层间变形约束作用的层面黏结应力表达式。对于大地坐标  $Z_0X_0Y_0$  下的倾斜层状盐岩，利用坐标转换求得界面位于局部坐标  $zxy$  下的界面黏结应力表达式<sup>[9]</sup>；左边转换关系如图 2 所示： $x$ 、 $z$  轴绕  $y$  轴旋转  $\theta$  角度， $y$  轴固定不变。

大地坐标下的应力矩阵为

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{x_0} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_0} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z_0} \end{pmatrix} \quad (1)$$

用 A 代表夹层，夹层界面处黏结约束应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zA}^* &= i\sigma i^T \\ \sigma_{xA}^* &= -k_1 k \sigma k^T + (1+k_2) j \sigma j^T - k_3 i \sigma i^T \\ \sigma_{yA}^* &= (1+k_2) k \sigma k^T - k_1 j \sigma j^T - k_3 i \sigma i^T \\ \tau_{zxA}^* &= k_4 i \sigma j^T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

用 B 代表夹层，盐岩界面处黏结约束应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zB}^* &= i\sigma i^T \\ \sigma_{xB}^* &= k_1 k \sigma k^T + (1-k_2) j \sigma j^T + k_3 i \sigma i^T \\ \sigma_{yB}^* &= (1-k_2) k \sigma k^T + k_1 j \sigma j^T + k_3 i \sigma i^T \\ \tau_{zxB}^* &= k_5 i \sigma j^T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中：未列出的应力分量均为 0； $i$ 、 $j$ 、 $k$  分别为关于坐标转换的单位矩阵；5 个材料参数的表达式<sup>[9]</sup>如下所示：

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{2E_A E_B (\mu_B - \mu_A)}{(E_A + E_B)^2 - (E_A \mu_B + E_B \mu_A)^2} \\ k_2 &= \frac{E_A^2 (1 - \mu_B^2) - E_B^2 (1 - \mu_A^2)}{(E_A + E_B)^2 - (E_A \mu_B + E_B \mu_A)^2} \\ k_3 &= \frac{E_A^2 (\mu_B^2 + \mu_B) - E_B^2 (\mu_A^2 + \mu_A) + E_A E_B (\mu_B - \mu_A)}{(E_A + E_B)^2 - (E_A \mu_B + E_B \mu_A)^2} \\ k_4 &= \frac{2E_A (1 + \mu_B)}{E_A (1 + \mu_B) + E_B (1 + \mu_A)} \\ k_5 &= \frac{2E_B (1 + \mu_A)}{E_A (1 + \mu_B) + E_B (1 + \mu_A)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $E_A$ 、 $E_B$  分别为夹层、盐岩的弹性模量;  $\mu_A$ 、 $\mu_B$  分别为夹层、盐岩的泊松比。

需要指出的是: 式 (2)、(3) 反映的是岩体界面整体的应力状态, 由于具体试验情况和边界条件, 应力状态在局部会有所变化, 对此不可忽略。设夹层与盐岩的弹性模量和泊松比分别为:  $E_A = 20.0 \text{ MPa}$ 、 $E_B = 9.5 \text{ MPa}$ 、 $\mu_A = 0.18$ 、 $\mu_B = 0.33$ , 取夹层倾角  $\theta = 20^\circ$ 。可求得 5 个材料参数为  $k_1 = 0.013$ ,  $k_2 = 0.337$ ,  $k_3 = 0.231$ ,  $k_4 = 1.408$ ,  $k_5 = 0.592$ 。

对于单轴压缩下, 比如对于轴压  $\sigma_1 = 10 \text{ MPa}$ , 围压  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  的情形, 利用式 (1)~(3) 求解了局部坐标下的界面夹层中的黏结应力, 结果如下:

$$\sigma_A^* = \begin{pmatrix} \sigma_{zA}^* & \tau_{zxA}^* & 0 \\ \tau_{xzA}^* & \sigma_{xA}^* & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{yA}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8.83 & -3.21 & 0 \\ -3.21 & -0.48 & 0 \\ 0 & 0 & -2.05 \end{pmatrix} \quad (5)$$

由式 (5) 可知: 在局部坐标下, 对于夹层界面处,  $x$ 、 $y$  方向都产生了黏结拉应力,  $x$  方向还出现了剪切应力, 因此, 在夹层界面处极有可能首先萌生拉剪裂纹, 进而向上、下两端扩展, 这与李银平<sup>[12]</sup>的分析是一致的。在  $x$ 、 $y$  方向, 由于  $\sigma_{xA}^* = 0.48 \text{ MPa} < \sigma_{yA}^* = 2.05 \text{ MPa}$  (拉应力), 因此, 裂纹更易沿着平行于  $zox$  平面的方向扩展, 这与单轴压缩试验的结果是一致的, 图 4(d) 中平行  $xoz$  平面方向裂纹规模大于平行  $yoz$  平面方向。考虑到具体试验条件和边界条件的差异性, 在本试验中试样的夹层上部和下部的侧表面区域, 为满足侧表面剪应力为 0 的面力边界条件,  $\tau_{zxA}^*$  将迅速衰减为 0, 与中部剪应力影响较大的情形相比, 这两个部位的应力状态近似于水平夹层盐岩体, 更易发生劈裂破坏。

对于三轴压缩下, 比如轴向应力  $\sigma_1 = 15 \text{ MPa}$ , 围压  $\sigma_2 = \sigma_3 = 5 \text{ MPa}$  的情形。求解了局部坐标下界面黏结应力, 并再将其转换到大地坐标下的应力状态为

$$\sigma_A^{**} = \begin{pmatrix} \sigma_{z_0A}^* & \tau_{z_0x_0A}^* & 0 \\ \tau_{x_0z_0A}^* & \sigma_{x_0A}^* & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{y_0A}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 14.84 & 0.47 & 0 \\ 0.47 & 3.70 & 0 \\ 0 & 0 & 3.05 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\sigma_B^{**} = \begin{pmatrix} \sigma_{z_0B}^* & \tau_{z_0x_0B}^* & 0 \\ \tau_{x_0z_0B}^* & \sigma_{x_0B}^* & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{y_0B}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15.16 & -0.47 & 0 \\ -0.47 & 6.30 & 0 \\ 0 & 0 & 6.95 \end{pmatrix} \quad (7)$$

由式 (6)、(7) 可知, 三轴压缩下, 在界面

处夹层对盐岩的黏结约束作用依然存在, 表现为使盐岩的横向围压增加, 但其增幅明显小于单轴压缩情形, 且黏结应力  $y$  方向改变程度稍大 (对于夹层  $\sigma_{y_0A}^*$  降低了 40%), 这说明围压下  $x$ 、 $y$  方向的协调依然是不一致的, 且围压作用降低了岩层间的应力差异, 这将使得层间变形不协调得到弱化。此外, 夹层约束黏结剪应力值较小, 即使考虑剪应力的边界条件, 也不会造成夹层的 3 个部位出现较大的应力差异, 因此, 三轴压缩下夹层 3 个部位的破损差异明显减小。

为了进一步分析围压的作用, 计算了轴压不变、围压  $\sigma_2 = \sigma_3 = 10 \text{ MPa}$  的情形, 并将其转到大地球坐标下的应力状态为

$$\sigma_A^{**} = \begin{pmatrix} \sigma_{z_0A}^* & \tau_{z_0x_0A}^* & 0 \\ \tau_{x_0z_0A}^* & \sigma_{x_0A}^* & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{y_0A}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 14.95 & 0.16 & 0 \\ 0.16 & 9.58 & 0 \\ 0 & 0 & 9.28 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\sigma_B^{**} = \begin{pmatrix} \sigma_{z_0B}^* & \tau_{z_0x_0B}^* & 0 \\ \tau_{x_0z_0B}^* & \sigma_{x_0B}^* & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{y_0B}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15.05 & -0.16 & 0 \\ -0.16 & 10.42 & 0 \\ 0 & 0 & 10.72 \end{pmatrix} \quad (9)$$

可见, 随着围压的增加, 盐岩与盐岩的应力差异随之减小, 界面变形不协调程度进一步弱化。可预见的是, 随着围压的进一步增加, 盐岩与夹层的应力差异及夹层不同部位破损形态的差异将进一步减小。由于深部储库围岩均处于三向应力状态, 且夹层不同部位会造成应力状态的差异, 由以上分析可知, 优选应力状态改变最小、夹层各部位应力差异最小的腔体形状, 有利于提高储气库的稳定性和密闭性。

## 6 结论及展望

(1) 倾斜夹层的存在, 对盐岩体的变形和破损具有显著的影响, 使得夹层的上、中、下部表现出不同的破裂形态。

(2) 夹层界面是裂纹最先萌生和扩展的部位, 该处拉剪裂纹端部张性裂纹的扩展引起了裂纹路径转折; 夹层不同部位的应力状态造成了不同部位破损特性的差异。

(3) 与薄夹层相比, 中厚夹层对盐岩体的变形约束作用更大, 但岩体脆性更明显, 更易形成宏观裂纹。建议在造腔前可据此优选最佳地质层段, 以同时满足稳定性和密闭性要求。

(4) 单轴和三轴压缩下盐岩体的破损特性差异

较大,围压的存在有效地降低了夹层与盐岩界面处的应力差异,并使得夹层各个部位的破损差异也大幅降低,且围压越大,该效应越明显。

(5) 利用复合层状岩体理论,构建了含倾斜夹层盐岩体由于约束协调作用下的界面应力关系;结果表明,含倾斜夹层时,界面处于较复杂的三向应力状态。结合具体试验条件,利用该理论合理解释了试验中的众多现象:如夹层不同部位的破损差异,压剪裂纹形成机制,夹层截面上平行  $zox$  面的裂纹数量更多,单轴、三轴压缩下的破损特性差异等。

与水平夹层情况相比,倾斜夹层对夹层自身以及临近盐层变形破损的影响是不可忽视的,对于在平顶山等盐矿区的倾斜盐层中开展油气地下储库建设,不可避免地要考虑层面倾角的影响。后期将进一步开展储库长期运行过程中倾斜夹层面处的变形和破裂分析及其对储库稳定性和密闭性的影响,特别关注溶腔顶板附近倾斜夹层破损对储库密闭性的影响。

### 参考文献

- [1] 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):2430—2436.  
LI Yin-ping, YANG Chun-he, LUO Chao-wen, et al. Study of sealability of underground energy storage in deep salt formation in Yun-Ying area, Hubei province[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2430—2436.
- [2] HUNSCHE U. Fracture experiments on cubic rock salt samples[C]//The First Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech. Publications, 1984: 169—179.
- [3] 吴文.盐岩的静、动力特性试验研究与理论分析[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2002.
- [4] 杨春和,曾义军,吴文,等.深层盐岩本构关系及其在石油钻井工程中的应用研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(10):1678—1682.  
YANG Chun-he, ZENG Yi-jun, WU Wen, et al. Constitutive relationship of deep salt rock and its application to petroleum drilling engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1678—1682.
- [5] 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 Chun-he, GAO Xiao-ping, WU Wen. Experiment studies and theoretic analysis of time dependent properties of rock salt[J]. **Journal of Liaoning Technical University**, 2004, 23(6): 764—766.
- [6] 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):4226—4232.  
YANG Chun-he, LI Yin-ping. The expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4226—4232.
- [7] 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 Yin-ping, YANG Chun-he. Three-dimensional expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 509—513.
- [8] 李银平,刘江,杨春和.泥岩夹层对盐岩变形和破损特征的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2463—2466.  
LI Yin-ping, LIU Jiang, YANG Chun-he. Influence of mudstone interlayer on deformation and failure characteristics of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2463—2466.
- [9] 鲜学福,谭学术.层状岩体破坏机制[M].重庆:重庆大学出版社,1989.
- [10] 任伟中.节理围岩特性及其锚固效应模型试验研究[J].地球科学——中国地质大学学报,1997,22(6):660—664.  
REN Wei-zhong. Research on anchoring effect of jointed rockmass around an underground opening under excavation by model testing[J]. **Earth Science—Journal of China University of Geosciences**, 1997, 22(6): 660—664.
- [11] 刘卡丁,张玉军.层状岩体剪切破坏面方向的影响因素[J].岩石力学与工程学报,2003,21(3):335—339.  
LIU Ka-ding, ZHANG Yu-jun. Influence factors on shear failure orientation of layered rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(3): 335—339.
- [12] LI Y P, YANG C H. On fracture saturation in layered rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(6): 936—941.
- [13] 长江水利委员会长江科学院. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,2001.

- [14] MCCONAUGHY D T, ENGELDER T. Joint initiation in bedded clastic rocks[J]. **International Journal of Structural Geology**, 2001, 23(2-3): 203-221.
- [15] COOKE M M L, SIMO J A, UNDERWOOD C A, et al. Mechanical stratigraphic controls on fracture patterns within carbonates and implications for groundwater flow[J]. **International Journal of Sedimentary Geology**, 2006, 184(3-4): 225-239.
- [16] 朱维申, 陈卫忠, 申晋. 雁形裂纹扩展的模型试验及断裂力学机制研究[J]. **固体力学学报**, 1998, 19(4): 355-360.  
ZHU Wei-shen, CHEN Wei-zhong, SHEN Jin. Simulation experiment and fracture mechanism study of propagation of echelon patten cracks[J]. **Acta Mechanica Solida Sinica**, 1998, 19(4): 355-360.
- [17] 李银平, 王元汉, 陈龙珠, 等. 含预制裂纹大理岩的压剪试验分析[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26(1): 120-124.  
LI Yin-ping, WANG Yuan-han, CHEN Long-zhu, et al. Experimental research on pre-existing cracks in marble under compression[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 120-124.
- [18] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. **防灾减灾工程学报**, 2003, 23(4): 1-8.  
XIE He-ping, GAO Feng, ZHOU Hong-wei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2003, 23(4): 1-8.
- [19] 许金泉. 界面力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] 吴礼舟, 张利民, 黄润秋, 等. 非饱和土的变形与渗流耦合的一维解析分析及参数研究[J]. **岩土工程学报**, 2009, 31(9): 1450-1455.  
WU Li-zhou, ZHANG Li-min, HUANG Run-qiu, et al. One-dimensional analysis and parameter study of coupled deformation and seepage in unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(9): 1450-1455.
- [29] 刘俊新, 刘育田, 胡启军. 非饱和地表径流-渗流和流固耦合条件下降雨入渗对路堤边坡稳定性研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(3): 903-910.  
LIU Jun-xin, LIU Yu-tian, HU Qi-jun. Stability of embankment slope subjected to rainfall infiltration considering both runoff-underground seepage and fluid-solid coupling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 903-910.
- [30] 詹良通, 贾官伟, 陈云敏, 等. 考虑土体非饱和特性的无限长斜坡降雨入渗解析解[J]. **岩土工程学报**, 2010, 32(8): 1214-1219.  
ZHAN Liang-tong, JIA Guan-wei, CHEN Yun-min, et al. Analytical solution for rainfall infiltration into infinite long slopes considering properties of unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(8): 1214-1219.
- [31] CLARKE M, BISHNOI P R. Determination of the activation energy and intrinsic rate constant of methane gas hydrate decomposition[J]. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, 2001, 79(1): 143-147.
- [32] SRIVASTAVA R, YE H T C J. Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils[J]. **Water Resources Research**, 1991, 27(5): 753-762.
- [33] YOUSIF M H, ABASS H H, SELIM M S, et al. Experimental and theoretical investigation of methane-gas-hydrate dissociation in porous media[J]. **SPE Reservoir Engineering**, 1991, 6: 69-76.
- [34] KLEINBERG R L, GRIFFIN D D. NMR measurements of permafrost: Unfrozen water assay, pore-scale distribution of ice, and hydraulic permeability of sediments[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2005, 42(1): 63-77.
- [35] DUAN Z H, SUN R. A model to predict phase equilibrium of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> clathrate hydrate in aqueous[J]. **American Mineralogist**, 2006, 91: 1346-1354.
- [36] 杨顶辉, XU Wen-yue. 盐度对甲烷气水合物系统的影响[J]. **中国科学 D 辑: 地球科学**, 2007, 37(10): 1370-1381.
- [37] SUN X F, MOHANTY K K. Kinetic simulation of methane hydrate formation and dissociation in porous media[J]. **Chemical Engineering Science**, 2006, 61(11): 3476-3495.

---

上接第 644 页