

基于沉积特征的层状盐岩界面抗剪强度特性研究

张桂民¹, 李银平², 刘 伟², 张光辉¹

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 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:层状盐岩界面的抗剪强度特性对储气库的稳定性和密闭性具有决定性影响。依托湖北应城盐矿地质和试验资料, 讨论不同种类界面的强度特性, 提出 2 种主要界面的抗剪强度模型, 并给出破损机制分析。主要结论有: (1) 层状盐岩大部分界面为化学沉积界面, 因此为强界面, 比如盐岩和泥质硬石膏的界面, 少部分为机械沉积界面, 因而为弱界面, 例如泥岩和岩盐的界面, 弱界面一般存在于不连续沉积的突变界面处; (2) 提出渐变型界面和突变型界面 2 种不同剪切强度模型, 渐变型界面近似于功能梯度材料, 突变型界面可以近似作为盐岩和夹层的接触面; (3) 渐变型界面可以较好地传递盐岩和夹层由于变形不协调产生的附加作用力, 因而不容易产生破损, 而突变型界面则不能。建立界面抗剪强度特性与其沉积地质特征之间的相关性, 为盐穴油气储库的稳定性和密闭性研究提供重要的参考。

关键词: 岩石力学; 层状盐岩; 沉积特征; 渐变型界面; 突变型界面; 抗剪强度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2014)增2-3631-08

STUDY OF SHEAR STRENGTH PROPERTIES OF INTERFACES IN BEDDED SALT FORMATIONS BASED ON SEDIMENTARY CHARACTERISTICS

ZHANG Guimin¹, LI Yinping², LIU Wei², ZHANG Guanghui¹

(1. *State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China*; 2. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*)

Abstract: The interfaces in bedded salt formations have a critical influence on the stability and tightness of underground gas/oil storages. Relying on the geological and test data of Yunying salt mine in Hubei province, the shear strength properties of the interfaces were firstly analyzed, and then two strength models for dominant interfaces were revealed, finally the failure mechanism was discussed. Results show that: (1) Most of the interfaces of bedded salt formations formed by chemical deposition are strong, such as interface between rock salt and argillaceous anhydrite. The strengths of mechanical deposition interfaces are lower, specifically interfaces between mudstone and rock salt. Weak interfaces normally appear at the sudden transition interfaces. (2) Two shear strength models were proposed respectively for the gradual transition interfaces and discrete discontinuous interfaces. Especially gradual transition interfaces are similar to functionally graded materials(FGM) while sudden transition interfaces can be treated as the contact surface between rock salt and interlayer. (3) Gradual transition interfaces could transfer the additional force resulted from the inconsistent deformation between salt rock and interlayer, thus

收稿日期: 2013-10-16; **修回日期:** 2014-01-05

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2014M560462); 江苏省博士后科研资助计划(1401097C); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB227900)

作者简介: 张桂民(1985-), 男, 2013 年于中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业获博士学位, 现任讲师, 主要从事采动岩体力学行为及渗透特性演化方面的教学与研究工作。E-mail: zhangguimin08@mails.ucas.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.030

not prone to breakage. However, the sudden transition interfaces cannot. The analysis reveals the relationship between sedimentary characteristics and shear strength of bedded salt formations, which provides important references for the design and construction of underground gas storage in bedded salt formations.

Key words : rock mechanics ; bedded salt formations ; sedimentary characteristics ; gradual transition interfaces ; sudden transition interfaces ; shear strength

1 引言

与国外的盐丘不同,我国盐岩大部分为层状,其基本特点是盐岩层数多,单层厚度薄,含盐岩地层的不可溶解性夹层多^[1]。众多的夹层之间、夹层与盐岩之间会有诸多种类的界面,这些界面的赋存状态与力学性质决定了层状盐岩的变形、强度和破损等特性,其亦是最可能发生油(气)泄漏的通道,对层状盐岩地下储备库的稳定性、密闭性起着重要的控制作用。

在层状盐岩或含夹层盐岩的力学或渗透特性方面,郜保平等^[2-3]研究了层状盐岩的蠕变性质与其组分、结构的关系;彭瑞东等^[4-8]研究了泥岩和盐岩力学特性上的不匹配导致含夹层盐岩的破损规律,认为泥岩和盐岩力学特性上的不匹配导致二者界面附近泥岩体等效受到横向拉伸应力作用而破损;杨春和等^[9-11]在将界面假设为一个平面的基础上研究了层状盐岩的 Cosserat 介质扩展本构方程及应用;周宏伟等^[12-14]研究了空隙率、夹层和界面等对含夹层盐岩的渗透特性的影响;李银平等^[15]针对云应盐矿深部层状盐岩中盐岩和硬石膏夹层的交界层面开展了直剪试验,结果表明,交界层面具有较强的黏结力;李林等^[16]进行了单轴条件下层状盐岩的表面裂纹扩展分析,认为含夹层盐岩表面裂纹扩展分布受夹层与盐岩界面过渡形式影响,却没有指出过渡形式的种类;姚院峰等^[17]针对金坛、潜江盐矿 2 种不同沉积环境下形成的界面盐岩分别进行了试验研究,认为界面剪切破坏由盐岩的力学特性决定;张桂民等^[18-19]在进行盐岩和夹层直接剪切试验时发现,盐岩和夹层具有完全不同的峰值和峰后曲线;G. M. Zhang 等^[20-22]提出了考虑弱夹层和弱界面效应的薄互层盐岩破坏准则,并指出了其在储气库中的应用;刘伟等^[23]从细观和宏观方面对储库围岩界面变形与破损特性开展了研究,但仅考虑了突变型界面。

以往的研究更多地关注了盐岩地层中特定盐岩、夹层、界面的力学性质,却没有将盐岩的沉积

特性与力学特性联系起来。同时,研究的界面通常为特定的界面,如岩盐与泥质硬石膏的界面等。由于试样在加工的过程中要经历取芯、钻样、搬运等过程,最终成功获取的可以做试验的试样界面通常较强,如此便造成了试验结果均偏向于界面为强界面的现象。这样造成了试验样本不全,不能代表地下所有种类的界面黏结状态,其普适性值得考虑。

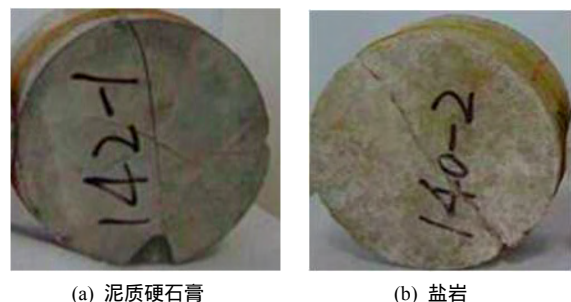
本文首先介绍了层状盐岩界面的巴西劈裂和直接剪切试验研究成果,然后从沉积地质出发,研究了层状盐岩界面的分类和强度特性,分析了储备库区域内层状盐岩的沉积地质特性与界面的强度特性之间的关系,为保证储气库溶腔结构的稳定性、不渗透性和耐压性等提供依据。文中,岩盐专指仅含有少量杂质的 NaCl 矿物组成的岩石,盐岩泛指岩盐、钙芒硝和芒硝等盐类矿物组成的岩石^[20]。

2 典型界面力学特性试验

2.1 巴西劈裂试验

巴西劈裂试验的目的是确定岩石的抗拉强度。岩石试样一般为圆柱形,试验时沿着圆盘的直径方向施加集中荷载,理论上试件受力后沿着受力方向的直径裂开。对层状盐岩抗拉强度试验结果表明^[7],云应盐矿的平均抗拉强度为 1.041 MPa;泥质硬石膏的平均抗拉强度为 2.194 MPa;层状盐岩的平均抗拉强度为 1.000 MPa。可见层状盐岩的平均抗拉强度与盐岩接近,均为 1 MPa 左右。

图 1 为巴西劈裂试验后典型泥质硬石膏和盐岩。



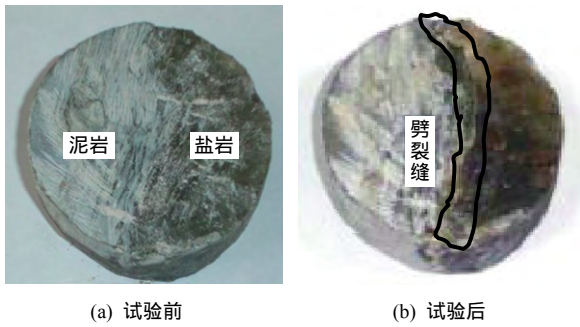
(a) 泥质硬石膏

(b) 盐岩

图 1 巴西劈裂试验后典型泥质硬石膏和盐岩

Fig.1 Typical fracture surfaces of argillaceous anhydrite and rock salt after Brazilian split tests

从图 1 中可以看出，泥质硬石膏和盐岩破坏形式相同，均为沿圆盘试件中心附近开始破裂，最后裂成 2 个半圆形。而含界面试样破坏形式与泥质硬石膏、盐岩的破坏形式并不完全相同，并未沿着试件中心裂成 2 个半圆形，而是沿着交界面偏向盐岩(抗拉强度较低)一侧发生破坏，如图 2 所示，这解释了含界面盐岩的抗拉强度与盐岩相同的原因，亦从另一方面说明了含夹层盐岩的界面并不一定是弱界面^[7, 15]。



(a) 试验前 (b) 试验后

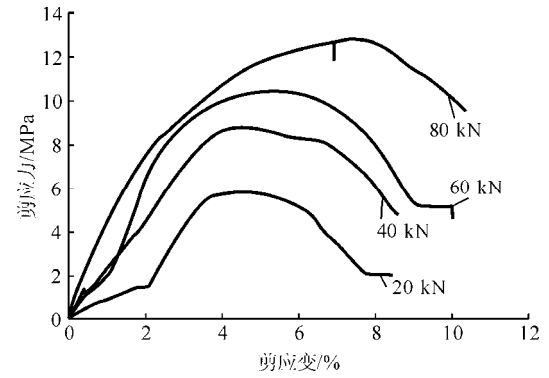
图 2 含界面盐岩抗拉试验前后对比

Fig. 2 Contrast of bedded salt rock before and after tensile test

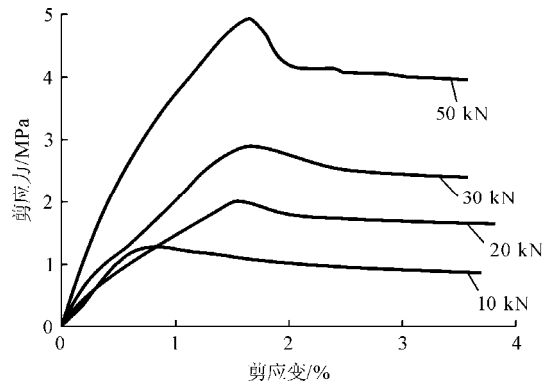
2.2 直接剪切试验

李银平等^[15]指出：层状盐岩中盐岩和泥岩交界层面的强度参数 c 值跟盐岩和泥岩相差不大，而 φ 值则比盐岩和泥岩的大，交界层面的黏结力较强，有较强的抗剪切能力，不易产生剪切滑动。同时，李银平等^[15]还对交界层面、盐岩、泥质硬石膏在不同法向力作用下的剪应力-剪应变曲线进行了分析，认为层状盐岩中交界层面、盐岩和泥质硬石膏 3 种岩石的剪应力-剪应变曲线相近的地方为：(1) 加载初期曲线的斜率较小，剪应力增加缓慢而剪应变增加较快，这一阶段试样内开始产生张裂纹，但是开始产生的张裂纹并不就是沿着剪切面发生破坏；(2) 当剪应力达到某一数值后，剪应变受阻增加变得缓慢，而剪应力迅速增加，曲线斜率变陡，快达到峰值强度时曲线斜率再逐渐由陡变缓达到峰值强度；(3) 达到峰值强度后曲线斜率由正变负，剪应力随剪应变的增加逐渐达到残余强度。不同的地方为：(1) 沿岩石交界面剪切的层状盐岩和泥岩由陡变缓达到峰值强度的这个阶段跟盐岩相比要短；(2) 从峰值强度到残余强度层状盐岩的剪应力随剪应变下降得比较快，而泥岩和盐岩下降得比较慢。

姚院峰等^[17-19]对盐岩、夹层和层状盐岩的剪切试验结果进行进一步研究认为：盐岩直剪曲线在峰值段表现得比较平缓(见图 3(a))，并未像一般岩石那样峰值明显，并且发生剪切应力跌落的情况(见图 3(b))，



(a) 盐岩



(b) 夹层

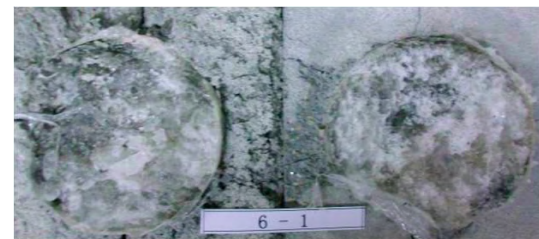
图 3 不同法向力作用下盐岩和夹层剪应力-剪应变曲线^[17-19]

Fig.3 Shear stress-strain curves for rock salt and interlayers under different normal forces^[17-19]

其原因为劈裂、滑移、位错堆积这一系列变化并不是在整个盐岩试样断面上同时发生的，而是先在局部发生，之后交替传递直至整个断面产生宏观滑移(见图 4, 5)。



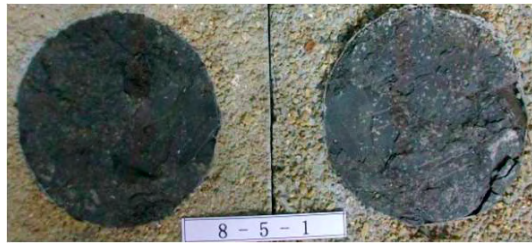
(a) 试样 21-21



(b) 试样 6-1

图 4 典型盐岩剪切破坏后断面形态

Fig.4 Typical fracture surfaces of rock salt under direct shear tests



(a) 试样 8-5-1



(b) 试样 9-18

图 5 典型夹层剪切破坏断面形态

Fig.5 Typical fracture surfaces of interlayers under direct shear tests

同时,张桂民等^[18-19]指出,在夹层剪应力-剪应变曲线峰值处,剪应力有一个明显折拐点;峰值过后,剪应力急剧下降,曲线急剧变陡,产生了剪应力跌落的现象,并认为剪应力跌落的值约为此岩石的黏聚力。

不难发现,盐岩和夹层不仅抗剪能力不同,而且受到剪切作用后的变形性质亦不相同。于是,含夹层盐岩在受到剪切作用时其界面附近就会因变形不协调而产生破损。为此进行了含夹层(硬石膏)盐岩的界面抗剪切试验,获得的典型含夹层盐岩剪应力-剪应变曲线如图 6 所示。与盐岩和纯夹层相比,界面剪切破坏曲线具有自己的特点,既有盐岩在峰值阶段平缓过渡阶段,又有泥岩的剪应力跌落阶段,这说明界面的剪切破坏受到盐岩破坏和泥岩破坏的双重影响。

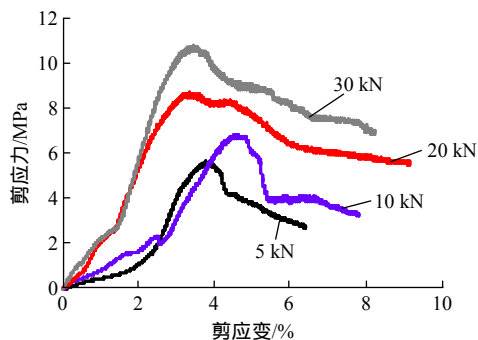
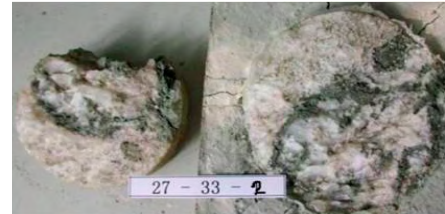


图 6 典型含夹层盐岩剪应力-剪应变曲线

Fig.6 Shear stress-shear strain curves of typical bedded salt rocks

值得注意的是,盐岩与夹层有明显的界面,但是在剪切的过程中,有些试样并未沿着界面滑开(见图 7(a)),而有些试样部分沿着界面剪断(见图 7(b))。这说明,此时界面的抗剪强度并不低,界面并非传统意义上的弱面。



(a) 试样 27-33-2



(b) 试样 39-8-2

图 7 典型含夹层盐岩剪切破坏断面形态

Fig.7 Typical fracture surfaces of bedded salt rocks

层状盐岩由盐岩和夹层组成,其中盐岩包括岩盐、芒硝、钙芒硝等,夹层包括泥岩、硬石膏等。节 2 中巴西劈裂试验和直接剪切试验所采用的界面试样均为盐岩和泥质硬石膏的界面,虽然试验结果表明其为强界面,但这并不能完全代表层状盐岩中所含有的各种界面的强弱情况。同时,具有不同硬石膏含量的泥质硬石膏的力学性能肯定不同,其与盐岩界面的强度亦会不同。

取到所有类型的界面试样并进行力学试验分析在短时间内是不现实的,为此将从地质特征出发,探讨层状盐岩界面的力学特征。

3 界面强度的多样性分析

层状盐岩具有多韵律沉积特性^[24],韵律中各分层因物质组成不同便会产生各种各样的交界面。云资一井(中国石油集团西气东输管道分公司在云应矿区钻取的一口资料井)某井段典型互层状盐岩试样如图 8 所示,图中 G 为钙芒硝,G's 为芒硝,M 为泥岩,H 为岩盐,A 为硬石膏。由于钻井液的溶蚀作用,不同位置均有不同程度的损失。大量岩芯表明,云应盐矿区为典型的泥岩-硬石膏-钙芒硝-芒硝-岩盐-泥岩周期性多韵律沉积特征。

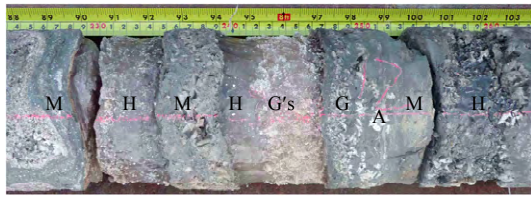


图 8 典型互层状盐岩试样

Fig.8 Typical bedded salt formations

由于沉积环境的变化，相邻分层的胶结面亦会有所不同。根据界面两侧分层矿物质变化是渐进的还是突变的，可将其分为渐变型界面和突变型界面。渐变型界面指界面两侧分层岩层相互嵌入，多为连续沉积界面，如钙芒硝-芒硝-岩盐界面(I_{G-G's}，I_{G's-RS})、泥岩-硬石膏界面(I_{M-A})等；突变型界面指界面清晰，两侧岩层互不嵌入或较少嵌入，多为不连续沉积界面，如岩盐-泥岩界面(I_{RS-M})、岩盐-泥质硬石膏界面(I_{RS-MA})等(见图 9)。



图 9 产生于泥岩处断裂

Fig.9 Fracture occurred in mudstone

对现场岩芯进行统计，弱界面一般为先沉积的岩盐、钙芒硝、芒硝等与后沉积的泥岩形成的界面，均属于机械沉积界面；而强界面一般为顺序沉积形成的化学沉积界面。因此，机械沉积界面一般弱于化学沉积界面，最弱界面一般存在于不连续沉积的突变界面处。盐岩地层在沉积过程中，一般会沉积出较厚的泥岩层，因而纯泥岩岩样相对容易获得。硬石膏因溶解度极低，常伴随泥质矿物等一起沉积，现场取芯获得的岩芯，通常为硬石膏质泥岩或泥质硬石膏岩。芒硝、钙芒硝亦常相伴沉积，此处亦将其归为一类。初步得到薄互层盐岩主要界面胶结状态如表 1 所示。

表 1 主要界面胶结状态

Table 1 Cementation states of the major interfaces

下层	上层			
	泥岩	泥质硬石膏	芒硝、钙芒硝	岩盐
泥岩	-	渐变, 强	渐变, 强	突变, 较强
泥质硬石膏	渐变, 较强	-	渐变, 强	突变, 较强
钙芒硝、芒硝	渐变, 较强	突变, 弱	-	渐变, 强
岩盐	突变, 弱	突变, 弱	渐变, 较强	-

由此可见，通过地质调查可以定性分析界面胶结强度的状态，在此基础上有针对性地补充相应的力学试验，即可获得较全面的界面胶结状态。

4 特定界面模型及讨论

界面微观分析表明，层状盐岩交界层面处可以分为 2 种情况^[20]：(1) 交界面较为清晰明显，即突变型界面；(2) 交界面不明显，而是一个渐变的区域，即渐变型界面。界面分类结果表明，将界面分类为渐变型和突变型亦是界面的一种分类方式，突变型界面和渐变型界面应该是界面分析的突破点，需要建立相应的力学模型进行分析。

此外，界面对储气库稳定性和密闭性的影响主要体现在：盐岩和界面的变形不协调导致沿界面的破损，从而引起油气沿着界面产生泄漏，最终导致储气库事故。因此本文主要研究沿界面的破损，而非穿层面破坏。

4.1 渐变型界面

渐变型界面，在 SEM 下为不清晰界面，界面胶结较好，现场取芯较少产生自然断面，界面两侧岩层矿物渐变变化，夹层颗粒和盐岩颗粒没有明显的界面，而是相互咬合形成一个渐变层。

在某种意义上，以渐变层存在的交界面，一种情况可以把其当作含有杂质渐变变化的盐岩；另一种情况亦可以把其当作含有盐岩渐变变化的夹层，即渐变层可认为是岩性由盐岩渐变到夹层，为一个过渡带。为简化可作如下假设，渐变层由无数层面组成，各层面均垂直于厚度方向，而且假设每一层面的岩性性质是均匀的，而邻近的层面具有稍微不同的岩性常数(见图 10)。这与近年来材料科学中研究的热点——功能梯度材料非常相近^[25-27]。梯度功能材料是一种新型的功能复合材料，它的两侧由不同性能的材料组成，中间部分的组成和结构连续地

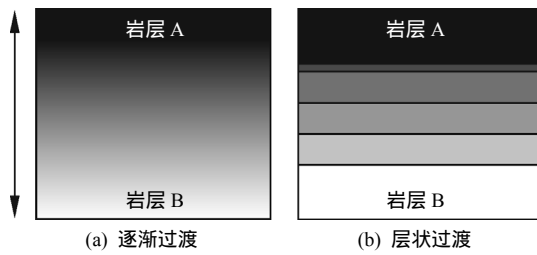


图 10 渐变层界面模型

Fig.10 Models of the gradual transition interface

呈梯度变化，从而使材料的性质和功能也沿厚度方向呈梯度变化，克服了不同材料结合的性能不匹配因素，使 2 种材料的优势都得到了充分发挥，其力学性质的变化通常假设符合幂指数函数、正弦函数等，渐变型界面变形状态如图 11 所示。

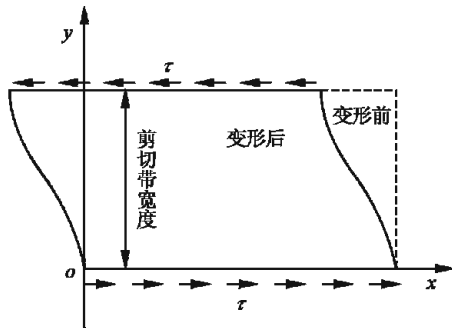


图 11 渐变型界面变形状态

Fig.11 Deformation state of the gradual transition interface

由莫尔-库仑准则可知，界面的强度由黏聚力 c 和内摩擦力 $f_{内}$ 两部分组成，其中，内摩擦力 $f_{内}$ 为法向应力 σ_n 和内摩擦角 φ 的函数，其表达式为

$$\tau = c + f_{内} = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

渐变型界面为一个过渡带，获得其力学特性需要首先获得不同品位盐岩或夹层的力学特性，黏聚力 c 和内摩擦力 $f_{内}$ 便为某一品位盐岩和夹层的数值，将式(1)变为

$$\tau_{渐} = c_{渐}(\alpha) + f_{渐}(\alpha) \quad (2)$$

式中： α 为盐岩品位，取值范围为 0~1。

假设渐变型界面的黏聚力和内摩擦角等强度参数同步变化，可构造按照正弦规律变化的函数：

$$R_{渐}(\alpha) = R_i + \frac{1}{2}(R_s - R_i) \left[1 + \sin\left(\pi\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (3)$$

式中： $R_{渐}(\alpha)$ 为渐变界面某位置具有 α 品位的强度参数，包括黏聚力和内摩擦角； R_s ， R_i 分别为试验

获得的纯盐岩和纯夹层强度参数。

以应城盐矿为例^[5]，盐岩和硬石膏的界面为过渡型界面。盐岩黏聚力为 4.17 MPa，内摩擦角为 41.4°，硬石膏黏聚力为 4.25 MPa，内摩擦角为 39°。采用式(3)绘出渐变界面参数变化曲线如图 12 所示。

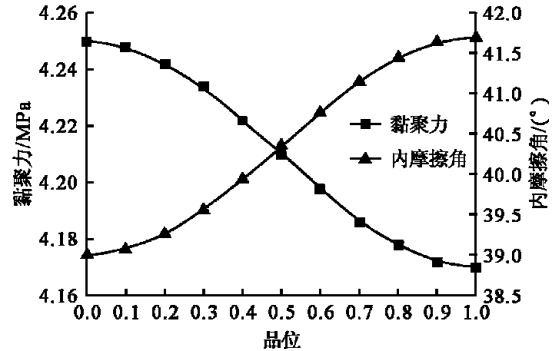


图 12 渐变界面参数变化曲线

Fig.12 Curves of parameters for gradual transition interface

4.2 突变型界面

突变型界面，在 SEM 条件下界面清晰，多为沉积过程的间断造成的，现场取芯观察到这种界面最容易产生断面，特别是泥岩和盐岩的界面。原因可能有：(1) 泥质岩本身较容易风化，由于钻井液未饱和或岩芯过度暴露于空气等，迫使泥质岩风化断裂；(2) 盐岩与泥质岩(特别是黏土矿物含量比较多的泥质岩)的突变型界面本身就是弱面。

突变型界面，其界面较为平整，属于宏观界面，由于两侧岩性发生突变，受力时容易因应力集中而产生破坏，外在表现为界面黏结强度通常较低，在力学和数值分析时常将其作为盐岩和夹层的接触平面来考虑，比如 Cosserat 介质扩展本构模型，该模型的突变型界面如图 13 所示。

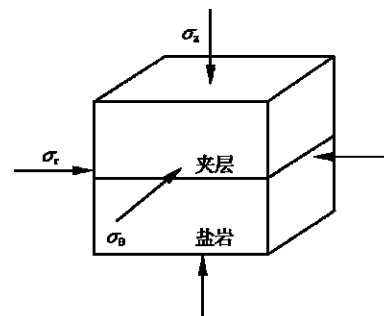


图 13 Cosserat 介质扩展本构模型中的突变型界面

Fig.13 Sudden transition interface in expanded constitutive model of Cosserat medium

突变型界面作为宏观界面，其黏聚力为 $c_{突}$ ，内

摩擦力为 $f_{\text{突}}$ ，抗剪强度为

$$\tau_{\text{突}} = c_{\text{突}} + f_{\text{突}} \quad (4)$$

通常情况下，突变型界面黏聚力 $c_{\text{突}}$ 非常小，远低于两侧的盐岩和夹层，考虑到部分突变型界面受到扰动(现场取芯、试样加工)后极易破断，试验中很难得到突变型界面的真实力学参数，可认为其值为 0。此外，考虑到突变型界面极易破断这一特性，本文认为突变型界面的内摩擦角可以用盐岩和夹层的接触面破断后的残余摩擦角 φ' 近似替代，于是突变型界面在极不利条件下的抗剪强度可以表示为

$$\tau_{\text{突}} = 0 + f_{\text{残余}} = \sigma_n \tan \varphi' \quad (5)$$

在此情况下，可以通过破损后的盐岩和夹层的接触面摩擦试验获得突变型界面的力学参数。

4.3 讨 论

界面产生破损的根本原因在于盐岩与夹层的力学属性不同导致的变形不匹配。界面是一种由盐岩和夹层颗粒所构成的非均质、各向异性的复合材料，材料之间的力学属性不匹配，必然造成界面处出现极为复杂的细观应力场。变形能力强、强度低的盐岩晶粒由于要协调与泥岩颗粒的变形，会受到附加压力作用；变形能力弱、强度高的泥岩颗粒由于要协调与盐岩晶粒的变形会受到附加拉力作用。

界面处于盐岩和夹层之间，承担了传递这种附加作用力的功能。当界面本身的力学性能能够传递这种附加作用力时，界面不产生破损；当界面不足以传递这种附加作用力时，即界面受到的剪应力超过抗剪强度时，必将引起界面的错动和滑移，形成破损。与盐岩不同的是，界面不具有损伤自修复性能，其破损是不可逆的，进而引起层间滑移加剧，进一步降低了储库的稳定和密闭性能。

渐变型界面作为一个过渡区，连接了盐岩和夹层，较好地传递了盐岩和夹层的不协调变形。而突变型界面，由于缺少盐岩和夹层之间的过渡，应力集中显著，从而更容易产生破坏。

5 结 论

在总结层状盐岩界面相关力学试验研究的基础上，依托湖北应城盐矿地质资料开展分析，对层状盐岩各分层界面进行了分类，讨论了不同种类界面的抗剪强度特性，给出了 2 种界面的强度模型，并

分析了其破损机制。得到以下结论：

(1) 层状盐岩不同于一般的层状沉积岩体，大部分界面为化学沉积形成的强界面，比如盐岩和泥质硬石膏的界面。

(2) 少部分为机械沉积界面，是弱界面，例如泥岩和岩盐的界面；最弱界面一般存在于不连续沉积的突变界面处。

(3) 在将渐变型界面看做一种功能梯度材料的基础上，提出了一种与盐岩品位相关的渐变界面强度模型；在将突变型界面看做盐岩和夹层的接触面的基础上，提出了一种利用接触面残余强度来表征突变界面强度的模型。

(4) 界面处于盐岩和夹层之间，承担了传递盐岩和夹层因变形不协调产生的附加作用力的功能。当界面本身的力学性能能够传递这种附加作用力时，界面即不产生破损，例如黏结较强的渐变型界面；当界面不足以传递这种附加作用力时，即界面受到的剪应力超过抗剪强度时，必将引起界面的错动和滑移，形成破损，例如突变型界面。

综上所述，现实中存在较多的是渐变型界面，而之前研究的却多为突变型界面，可见后期的研究重点应该是不同品位的盐岩力学特性。

参考文献(References)：

- [1] 杨春和,李银平,陈 锋,等.层状盐岩力学理论与工程[M].北京:科学出版社,2009:4-6.(YANG Chunhe,LI Yinping,CHEN Feng, et al. Mechanics theory and engineering of bedded salt rock[M]. Beijing: Science Press, 2009: 4-6.(in Chinese))
- [2] 邵保平,赵阳升,赵延林,等.含高盐份泥岩夹层的盐岩蠕变特性研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(1):23-26.(XI Baoping, ZHAO Yangsheng, ZHAO Yanlin, et al. Study on creep property of rock salt with mudstone interlayer[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 23-26.(in Chinese))
- [3] 邵保平,赵阳升,赵金昌,等.层状盐岩温度应力耦合作用蠕变特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):90-96.(XI Baoping, ZHAO Yangsheng, ZHAO Jinchang, et al. Study on coupled thermo-mechanical creep properties of bedded rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 90-96.(in Chinese))
- [4] 彭瑞东,武志德,周宏伟,等.层状盐岩中裂纹扩展规律的细观实验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增 2):3 953-3 959.(PENG Ruidong, WU Zhide, ZHOU Hongwei, et al. Meso-experimental investigation on crack evolution in bedded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supp.2): 3 953-3 959.(in Chinese))
- [5] 姜德义,任 涛,陈 结,等.含软弱夹层盐岩型盐力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(9):1 797-1 803.(JIANG Deyi, REN Tao, CHEN Jie, et al. Experimental study of mechanical characteristics of molded salt rock with weak interlayer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1 797-1 803.(in Chinese))

- [6] 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))
- [7] 刘江. 层状盐岩力学特性试验研究及其理论分析[硕士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.(LIU Jiang. Experimental investigation and theoretic analysis on the mechanical properties of layered rock salt[M. S. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.(in Chinese))
- [8] 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.
- [9] 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))
- [10] 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): 509–514.(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))
- [11] 尹雪英, 杨春和, 李银平. 层状盐岩体三维 Cosserat 介质扩展本构模型的程序实现[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1 415–1 420.(YIN Xueying, YANG Chunhe, LI Yinping. Program implementation of 3D expanded constitutive model of Cosserat medium for laminated salt rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1 415–1 420.(in Chinese))
- [12] 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, 2009, 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))
- [13] 陈卫忠, 谭贤君, 伍国军, 等. 含夹层盐岩储气库气体渗透规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1 297–1 304.(CHEN Weizhong, TAN Xianjun, WU Guojun, et al. Research on gas seepage law in laminated salt rock gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1 297–1 304.(in Chinese))
- [14] 梁卫国, 杨春和, 赵阳升. 层状盐岩储气库物理力学特性与极限运行压力[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 22–27.(LIANG Weigu, YANG Chunhe, ZHAO Yangsheng. Physico-mechanical properties and limit operation pressure of gas deposit in bedded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 22–27.(in Chinese))
- [15] 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): 1 768–1 771.(LI Yinping, JIANG Weidong, LIU Jiang, et al. Direct shear test for layered salt rocks of Yunying salt mine in Hubei province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1 768–1 771.(in Chinese))
- [16] 李林, 陈结, 姜德义, 等. 单轴条件下层状盐岩的表面裂纹扩展分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1 394–1 398.(LI Lin, CHEN Jie, JIANG Deyi, et al. Analysis of surface crack growth in layered salt rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1 394–1 398.(in Chinese))
- [17] 姚院峰, 杨春和, 纪文栋, 等. 两种不同沉积类型界面盐岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 265–272.(YAO Yuanfeng, YANG Chunhe, JI Wendong, et al. Experimental study of mechanical property of two types of sedimentary salt rock with interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 265–272.(in Chinese))
- [18] 张桂民, 李银平, 杨春和, 等. 岩石直剪峰后曲线与抗剪强度参数关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增1): 2 981–2 988.(ZHANG Guimin, LI Yinping, YANG Chunhe, et al. Discussion on relationship between post-peak curves and shear strength parameters of rocks subjected to direct shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.1): 2 981–2 988.(in Chinese))
- [19] ZHANG G M, LI Y P, YANG C H, et al. Relationship between shear stress and shear strain at post-peak curves of rocks subjected to direct shear tests[C]// Proceedings of 46th US Rock Mechanics and Geomechanics Symposium. [S. l.]: [s. n.], 2012: 994–1 003.
- [20] ZHANG G M, LI Y P, YANG C H, et al. Stability and tightness evaluation of bedded rock salt formations for underground gasoil storage[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(1): 161–179.
- [21] 张桂民, 李银平, 施锡林, 等. 一种交互层状岩体模型材料制备方法及其初步试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增2): 284–289.(ZHANG Guimin, LI Yinping, SHI Xilin, et al. Research on a model material preparation method for alternate layered rock mass and preliminary experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp.2): 284–289.(in Chinese))
- [22] 张桂民, 李银平, 杨长来, 等. 软硬互层盐岩变形破坏物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1 813–1 820.(ZHANG Guimin, LI Yinping, YANG Changlai, et al. Physical simulation of the deformation and failure mechanism of soft and hard interbedded salt rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1 813–1 820.(in Chinese))
- [23] 刘伟, 李银平, 霍永胜, 等. 盐岩地下储库围岩界面变形与破坏特性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1 621–1 628.(LIU Wei, LI Yining, HUO Yongsheng, et al. Analysis of deformation and fracture characteristics of wall rock interface of underground storage caverns in salt rock formation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1 621–1 628.(in Chinese))
- [24] 王清明. 石盐矿床与勘查[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 80–143.(WANG Qingming. Halite deposit and exploration[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 80–143.(in Chinese))
- [25] 马涛, 赵忠民, 刘良祥, 等. 功能梯度材料的研究进展及应用前景[J]. 化工科技, 2012, 20(1): 71–75.(MA Tao, ZHAO Zhongmin, LIU Liangxiang, et al. The research development and future application of functionally gradient materials[J]. Science and Technology in Chemical Industry, 2012, 20(1): 71–75.(in Chinese))
- [26] 韩杰才, 徐丽, 王宝林, 等. 梯度功能材料的研究进展及展望[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(3): 207–215.(HAN Jiecai, XU Li, WANG Baolin, et al. Progress and prospects of functional gradient materials[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 27(3): 207–215.
- [27] MARUR P R, TIPPUR H V. Evaluation of mechanical properties of functionally graded materials[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1998, 26(6): 539–545.