

# 鄂西渝东盖层碳质泥页岩的卸荷力学特性 试验研究

霍亮<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</sup>, 冒海军<sup>2</sup>, 刘俊新<sup>3</sup>, 袁玉松<sup>4</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 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; 3. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 4. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:** 隆升剥蚀过程可能导致鄂西渝东地区油气盖层破裂, 油气散失。选取区域盖层碳质泥页岩, 开展 10, 20, 30, 40, 50 MPa 五种不同初始围压下的三轴卸荷力学试验, 研究隆升剥蚀对不同埋深岩石的影响。结果表明: 岩石卸荷破坏时的轴向、径向变形随卸荷初始围压增大而增大; 卸围压过程中卸载初始围压较小时, 径向应变大于轴向应变, 随初始围压增大, 径向应变略小于轴向应变; 卸荷试验获得的泥页岩抗压强度与抗剪切参数均比常规三轴压缩试验高; 岩石的破裂形式由低卸荷围压下的张性破裂向高卸荷围压下的剪切破坏过渡, 在 40 MPa 时产生纵横切割试样的网状裂纹; 提出侧压破裂系数初步评价区域盖层, 结合鄂西渝东的抬升剥蚀量数据, 推断石柱复向斜北部和方斗山复背斜以西是油气勘探容易取得突破地区, 为区域油气勘探提供岩石力学依据。

**关键词:** 岩石力学; 鄂西渝东; 泥页岩; 盖层; 抬升剥蚀; 三轴卸载

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2016)增 1-2898-09

## Experimental research on mechanical properties of western Hubei-Eastern Chongqing carbonaceous shale cap rock under unloading stress path

HUO Liang<sup>1</sup>, YANG Chunhe<sup>1,2</sup>, MAO Haijun<sup>2</sup>, LIU Junxin<sup>3</sup>, YUAN Yusong<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, China Petroleum and Chemical Corporation, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Western Hubei-Eastern Chongqing region is a major exploration block of oil and gas. The area has been suffered long term uplift and erosion, which may resulted in cap rock failure. To investigate the sealing effectiveness of cap rock during geological evolution, a series of triaxial unloading tests of shale samples have been conducted under initial confining pressures of 10, 20, 30, 40, 50 MPa. The results show that under different confining pressures, the unloading properties of carbonaceous shale are as follows. During unloading process, lateral strains are greater than axial strains under lower confining pressure, with the increase of confining pressure, lateral strains are less than axial strains; Strength values and strength parameters of unloading tests are both higher than those obtained from conventional triaxial compression tests; The fracture modes are obviously affected by the initial confining pressure: under low initial confining pressure, samples split into several large pieces; with the

**收稿日期:** 2015-02-04; **修回日期:** 2015-04-20

**基金项目:** 重庆大学国家重点实验室开放基金项目(2011DA105287-FW201404)

Supported by the Open Foundation of State Key Laboratory of Chongqing University(Grant No. 2011DA105287-FW201404)

**作者简介:** 霍亮(1988-), 男, 博士, 2010年毕业于重庆大学采矿工程专业, 主要从事岩石力学试验方面的研究工作。E-mail: huoliang@126.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0148

increasing of confining pressure, the fracture modes gradually transfer to main shear failure; under the confining pressure of 40 MPa, the fracture mode is characterized by occurrence of cracks-net; Also, rupture coefficient of lateral pressure is proposed to evaluate sealing effectiveness of cap rock. Based on the results of tests and erosion thickness of Western Hubei Eastern Chongqing area, we could conjecture that north of Shizhu composite anticline and west of Fangdou Mountain composites syncline are favorable place for exploration.

**Key words:** rock mechanics; Western Hubei-Eastern Chongqing region; shale; cap rock; erosion thickness; triaxial unloading

## 1 引 言

盖层是油气成藏的必要条件,可以阻止或减缓油气渗漏。盖层质量的好坏直接影响着气藏的形成、规模以及保存<sup>[1]</sup>。盖层封闭性评价通常以盖层厚度、孔隙度、渗透率、比表面积、孔喉半径为切入点,以排替压力为核心,从物性评价的角度研究盖层对油气的封闭有效性。这一方法在地质构造简单的区域取得了成功,但是对于复杂构造区域,此方法已经不能满足勘探需求。

我国鄂西渝东地区已经证实埋藏有大量的志留系烃源岩,其中天然气总资源量为  $1.74 \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[2]</sup>,该地区经历了多期复杂地质构造运动,晚燕山—喜马拉雅期以来长期处于隆升剥蚀状态<sup>[3]</sup>。肖开华等<sup>[4]</sup>从物性评价的角度,鉴定鄂西渝东地区的志留系泥岩为一套良好的区域性盖层,但是区域背斜上多口探井失利表明该地区的盖层蕴含很多裂缝,导致封闭性变差,对油气的保存极为不利。这说明,在稳定变形区,单纯的盖层物性指标评价能够解决盖层封闭性的部分问题,但在复杂变形区,不同地质过程及构造变形环境中盖层力学行为研究显得更为关键<sup>[5]</sup>。

如何评价构造变形过程中盖层封闭性,在石油地质学中是一个重要课题。李双建等<sup>[6]</sup>引入岩石力学的方法,选择恒定轴压卸围压的试验方案模拟盖层的地层抬升过程,从试验角度证实了盖层抬升到一定程度会集中产生破裂,但是其试验方案并没有真实反映盖层抬升的应力环境变化,也没有研究卸荷过程中岩石的变形特征。而三轴卸荷试验在油气勘探方面应用甚少,主要用于研究高陡边坡、地下硐室开挖对于岩体变形的影响。高春玉等<sup>[7]</sup>对大理岩试样进行了不同应力路径的卸围压试验,分析了岩石的强度变形特征;黄润秋和高达<sup>[8]</sup>以三峡水电站开挖为背景,研究花岗岩在不同卸载方案下变形特征,变形参数规律以及破裂特征;赵国斌等<sup>[9]</sup>研

究灰岩在轴压的升高、围压卸荷应力路径下的强度、变形特征;李建林等<sup>[10]</sup>对卸荷路径下砂岩的应力应变响应力学模型进行了研究;吕颖慧等<sup>[11]</sup>进行了高应力条件下卸围压并增大轴压的花岗岩卸荷试验,建立了岩石由压剪破裂逐渐过渡到张剪破坏的渐进演化体系。上述研究对象多为硬质岩石,以泥页岩为对象进行的卸荷试验研究还很少。因此,从油气勘探及岩石卸荷试验角度,对盖层泥页岩经行三轴卸荷试验研究是非常有必要的。

本文以鄂西渝东地区地质资料,地层构造演化为基础,选取龙马溪组碳质泥页岩,采用围压与轴压的不等比例卸载模拟盖层抬升过程中的力学环境变化。根据岩石在不同卸载初始围压下的强度、变形、破坏特征,结合龙马溪组盖层岩石抬升前的古赋存参数以及地区钻井的抬升剥蚀量数据,为鄂西渝东地区的油气资源勘探提供参考依据。

## 2 区域构造演化概况

鄂西渝东地区西起重庆万县,东至湖北利川,地处生烃凹陷之间,是油气运移和聚集指向区域。该地区的大地构造属于中、上扬子地台的过渡地带,可划分为 4 个二级构造单元,自西向东依次是方斗山复背斜、石柱复向斜、齐岳山复背斜、利川复向斜。区内除复向斜内部发育的背斜相对平缓、地层产状一般小于  $30^\circ$ 外;高陡构造发育区背斜一般比较窄陡、且两翼不对称,地层产状多数在  $45^\circ$ 以上<sup>[12]</sup>,区域构造简图见图 1<sup>[13]</sup>所示。

黄文明等<sup>[14]</sup>认为,加里东运动的强挤压致使鄂西渝东地区发生强制海侵,龙马溪组泥页岩因此而沉积。印支运动结束了区域内的持续海相沉积,随着后期侏罗系岩石的沉积,区域内的龙马溪组泥页岩陆续进入油气藏生成阶段,其自身既是烃源岩又是储层同时还是盖层,具有“自生自储自盖”的成藏模式。同期发生的燕山运动引起强烈褶皱,基本奠定了地区的主体构造格架,而区内的主要隆升剥

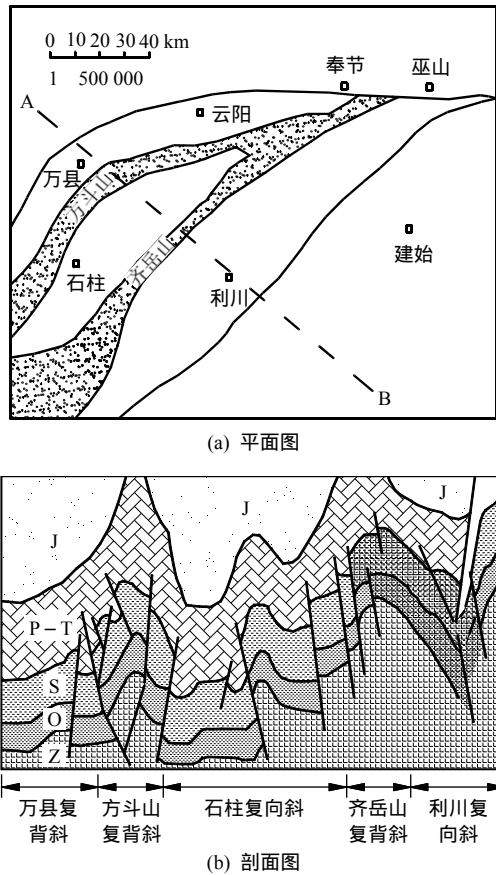


图1 鄂西渝东地区构造简图<sup>[13]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of Western Hubei-Eastern Chongqing region<sup>[13]</sup>

蚀发生在白垩纪。袁玉松<sup>[15]</sup>认为,鄂西渝东褶皱带从 97 Ma 前开始持续抬升剥蚀,因此区内的主要整体抬升发生在油气藏生成之后、且在主体构造框架形成之后,构造演化示意图如图 2 所示。

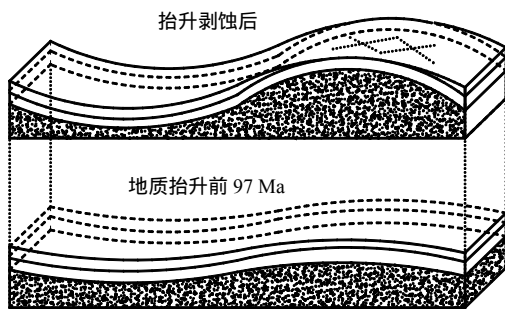


图2 构造演化示意图

Fig.2 Schematic diagram of tectonic evolution

龙马溪组盖层泥页岩从起源形成至今经历了复杂的构造演化运动,为了研究隆升剥蚀作用对泥页岩盖层封闭有效性的影响,确定泥页岩发生破裂时的应力水平,抬升状况,从岩石力学角度选取三轴卸载试验作为研究手段。

### 3 盖层岩石三轴卸载试验

#### 3.1 试验制备

岩样取自齐岳山复背斜露头的新鲜开挖剖面,岩性为黑色~深黑色炭质泥页岩,采用中国地质大学(武汉)的德国 Bruker AXS D8-Focus X 射线衍射仪进行成分分析,其主要矿物成分及百分比含量分别为:石英 48.94%~50.84%、方解石 0.92%~2.22%、黄铁矿 1.71%~6.92%、钠长石 9.59%~13.18%、钾长石 4.52%~6.16%、黏土矿物 32.42%~22.57%,对黏土矿物进行定向片分析,其中伊利石占 82.75%~85.77%,高岭石占 14.23%~17.25%。岩样天然密度为 2.52~2.60 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度在 2%左右,结构致密。

岩样按照国际岩石力学试验规程的要求钻取(见图 3),为减小岩样间的个体差异,试样均取自同一岩块,垂直于层理钻取,对钻孔岩芯加工成直径  $D = 48\text{ mm}$ ,长度  $L = 100\text{ mm}$  的标准圆柱体试件,然后蜡封保存。为保证岩样的均一性,测得的岩样的纵波平均波速为 3 181 m/s,剔除了波速与密度具有明显差异的样品。



(a)



(b)

图3 样品钻取制备

Fig.3 Manufactured samples

#### 3.2 试验方案

采用中国科学院武汉岩土力学研究所 MTS 815.03 型压力试验系统,首先对样品进行不同围压

下的常规三轴试验，表 1 列出了常规三轴试验下强度参数，根据偏应力强度值，预估岩石在预定围压下的比例极限应力水平，以此为参照，进行不同卸载初始围压条件下的卸荷试验，试验应力路径如图 4 所示。

表 1 常规三轴试验下强度参数

Table 1 Strength values of conventional triaxial compression tests

围压/MPa	偏应力峰值/MPa
10	74.78
20	86.06
30	113.33
40	128.61
50	133.89

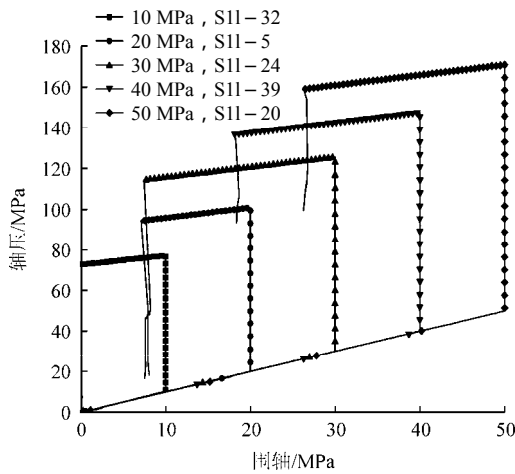


图 4 三轴试验应力路径

Fig.4 Triaxial stress paths of samples

卸荷试验中的围压模拟岩层抬升前的垂直应力，轴压模拟岩层受到的水平应力，围压与轴压的不等比例卸载模拟地层抬升过程中的应力环境变化。岩层抬升过程伴随有上覆岩层的风化剥蚀，抬升后埋藏较浅，抬升过程中竖直应力不断减小，水平应力略有减小，即轴压 $\sigma_1$ 卸载速率小于围压 $\sigma_3$ 的卸载速率。

设计 10, 20, 30, 40, 50 MPa 五种初始围压，试验分为 3 个阶段：

(1) 首先按 0.5 MPa/s 的加载速率对试件施加静水压力 $\sigma_1 = \sigma_3$ 至预定值，并维持 10 min 左右，更真实地模拟深部岩石赋存状态。

(2) 保持围压 $\sigma_3$ 不变，按照 0.25 kN/s 的加载速率逐渐提高 $\sigma_1$ 至试件破坏前的某一应力水平(略小于比例极限)。

(3) 按速率 0.02 kN/s 降低 $\sigma_3$ 的同时以 0.01 kN/s

的速率卸载 $\sigma_1$ 直至破坏。

## 4 试验结果分析

表 2 列出了岩样卸载阶段前的初始应力水平和破坏时的应力状态。

表 2 三轴卸荷破坏试验结果

Table 2 Failure results of triaxial test under unloading conditions

岩样编号	卸荷起始应力状态		卸荷破坏状态	
	$\sigma_3$ /MPa	$\sigma_1$ /MPa	$\sigma_3$ /MPa	$\sigma_1$ /MPa
S11-26	50	170.43	25.98	158.26
S11-20	50	170.92	26.28	159.04
S11-34	40	146.84	15.21	134.13
S11-39	40	147.55	18.27	137.62
S11-4	30	123.95	10.34	114.10
S11-24	30	125.51	7.48	114.14
S11-5	20	100.86	7.13	94.44
S11-29	20	100.90	9.69	95.59
S11-13	10	78.38	1.34	74.56
S11-32	10	77.23	0.05	72.89

### 4.1 应力-应变曲线分析

整理三轴卸荷试验记录中的数据，绘制得到泥页岩在不同初始围压下的应力差-应变全程曲线见图 5，图中显示随卸载初始围压增大，峰值强度与残余强度均呈现增大趋势。

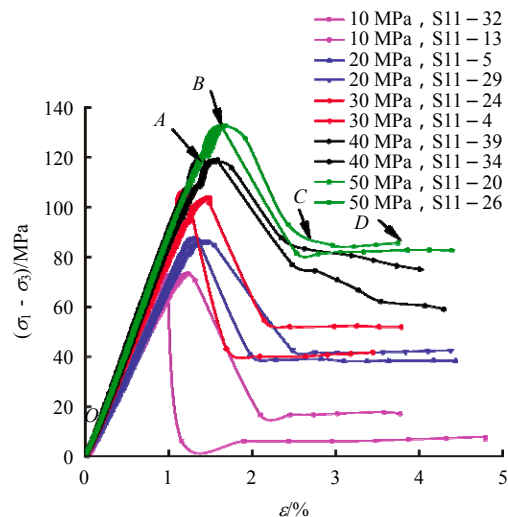


图 5 泥页岩在不同初始围压下的应力差-应变全程曲线

Fig.5 Stress difference-strain curves of shale under different initial confining pressures

不同初始围压下的卸荷破坏应力-应变曲线可

分为 4 段，其中：*OA* 段为弹性变形阶段，这一阶段对应岩层的埋藏过程，不同围压代表不同埋藏深度的岩层；*AB* 段为卸荷屈服阶段，对应岩层的抬升剥蚀过程，岩石从该段开始产生塑性变形，并随卸荷量的增大逐渐达到峰值强度，由于围压卸载造成的轴向应变突增，曲线形态呈“S”型抖动，随差应力的持续增加，曲线恢复屈服凸型形态；*BC* 段为卸荷破坏段，在此阶段裂纹迅速贯通样品，样品破裂，轴向应力发生跌落，表现为脆性破坏；*CD* 段为塑性变形段，此时轴应力不变，应变持续增加体现明显的塑性流动特性。在岩层隆升剥蚀过程中，深埋岩层的上覆压力不断减小，图 6 给出了岩石在不同卸载初始围压下的围压 - 应变曲线。

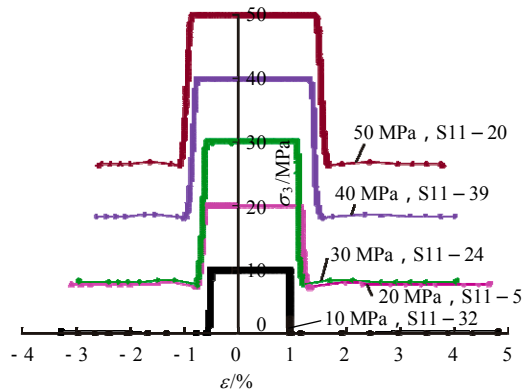


图 6 泥页岩在不同初始围压下的围压 - 应变曲线  
Fig.6 Confining pressure-strain curves of shale under different initial confining pressures

图 6 中的围压水平段对应轴压加载段(图中的 *OA* 段)，比较不同初始围压下的应变值，随围压增大，差应力增加，加载段产生的轴向应变值与径向应变值逐渐增大，对应岩层埋藏过程，随岩层埋深越深，岩石结构会更加致密；达到预定轴压后，图中近乎垂直段为轴压与围压的不等比例卸载(对应 *AB* 段)，卸载起始至样品破坏，随初始围压增大，因卸载导致的轴向、径向应变值均逐渐增大，图 7 直接展示岩样在点 *A* 后的围压 - 应变关系。

岩层的沉积建构与抬升剥蚀发生在不同地质时期，卸荷路径中的屈服段类比于岩层经历的地质抬升。图 7 中曲线形态在不同的卸荷初始围压下基本一致，初始围压为 10, 20, 30 MPa 时，卸载引起的径向应变大于轴向应变，初始围压增大至 40, 50 MPa 时，由于相应的残余破坏围压较大，卸载引起的径向应变略小于轴向应变值，两者几乎对称分布

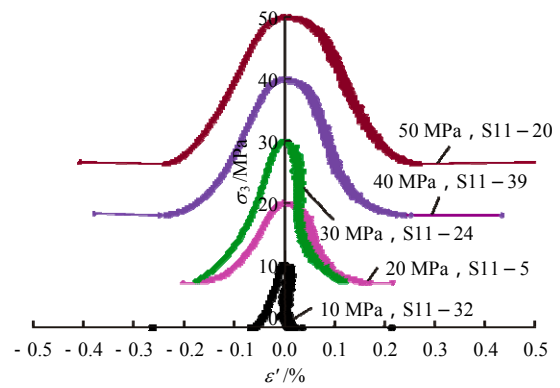


图 7 卸围压过程的围压 - 应变曲线

Fig.7 Confining pressure-strain curves of specimens during unloading stage

在坐标轴两侧。高春玉等<sup>[7]</sup>定义，岩石发生破坏时的径向应变与轴向应变的比值负数为侧胀系数，岩石在 *OB* 段与 *AB* 段的侧胀系数如图 8 所示，*AB* 段的侧胀系数远大于 *OB* 段侧胀系数，说明卸荷路径极大的促进岩石的侧向变形，侧向膨胀效应非常显著。

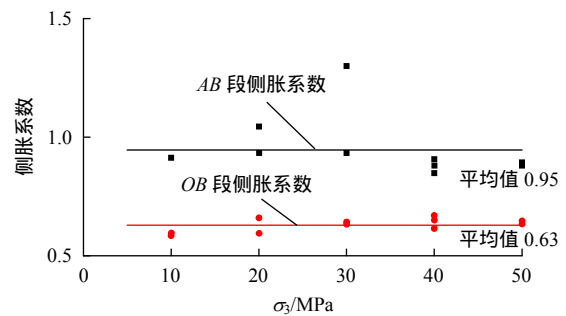


图 8 不同应力阶段的侧胀系数

Fig.8 Lateral expansion coefficients during unloading stage

### 4.2 强度特征

岩石破坏的强度不仅与发生破坏时的应力状态相关，而且与应力路径相关，选取表 1, 2 中的数据，分别将拟合岩样在常规加载与卸载路径下发生破坏时的围压与轴压参数，得到卸荷强度破坏曲线(见图 9)。

岩石发生破坏时的环境围压相同时，卸载得到抗压强度比加载路径下高，并随围压升高，差距呈明显上升趋势，说明龙马溪组岩层在经历抬升以及上覆岩层的剥蚀后，其岩石强度明显强于之前埋深浅的岩层。可以理解为，对于同样的抬升剥蚀过程，同一套沉积地层，区域内经历更大埋深的龙马溪组岩层在抬升剥蚀后更不容易产生破坏。

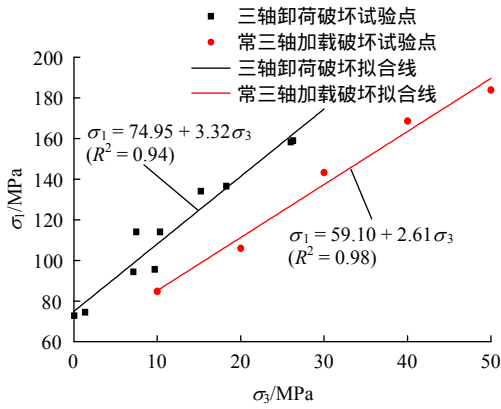


图 9 泥页岩加载、卸荷强度破坏曲线

Fig.9 Strength values of specimens from triaxial loading and unloading tests

试验过程中，当试样的破坏面上剪切应力达到极限值时，岩样沿此破坏面发生破坏，卸荷条件下，Mohr-Coulomb 屈服准则可以作为岩石的屈服准则，其表达式为

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1)$$

式中： $\sigma_1$  为最大主应力， $\sigma_3$  为最小主应力， $\varphi$  为内摩擦角， $c$  为黏聚力。Mohr-Coulomb 屈服准则中  $\sigma_1$  与  $\sigma_3$  是线性相关的，通过对图 9 中的拟合参数换算得到不同状态下试样的抗剪强度参数(见表 3)。

表 3 泥页岩加载、卸荷强度参数

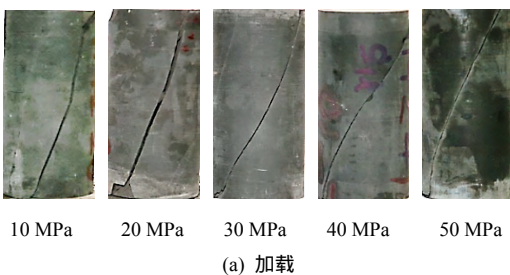
Table 3 Strength parameters from triaxial loading and unloading conditions respectively

试验方法	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
常规三轴加载	18.3	26.5
三轴卸载	20.6	32.5

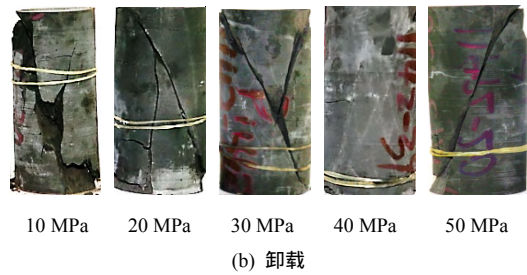
黏聚力相较于同等围压的三轴加载试验结果小幅上升，内摩擦角则增加了 23%，岩石卸荷前的高围压状态提高了岩石抗剪切能力。

### 4.3 破裂特征

图 10 给出了岩石样品在加载路径和卸载路径下的最终破坏形态。



(a) 加载



(b) 卸载

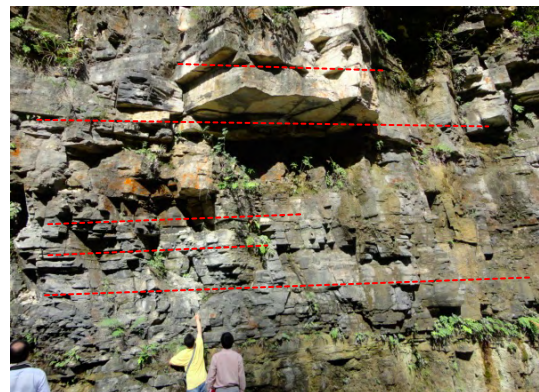
图 10 试样在不同应力路径下的破坏照片

Fig.10 Rock failure photos in different stress paths

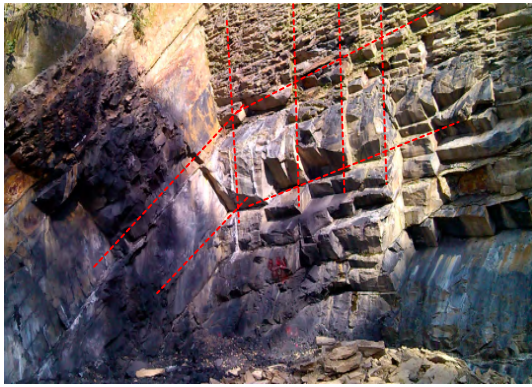
加载破坏呈现明显的单一剪切滑移破坏，剪裂角随着围压的增大而增大，而卸载破坏主要呈现张剪复合破坏特征，并且破坏形式更剧烈，伴随主破坏产生许多卸荷剥落的张性落片。围压由 10 MPa 卸载至破坏时出现了剧烈的张性破坏；卸载初始围压为 20，30 MPa 时，出现了与张拉破坏带相交的剪切破坏；初始围压为 40 MPa 时，岩石样品出现了纵横交错的裂纹网格，并且产生平行于样品端面的横向裂纹，50 MPa 时，已经看不出岩石的张性破裂面，出现了单剪切裂纹。

深部岩层处于上覆岩石的强大水平主应力作用下，抬升剥蚀过程中，上覆压力逐渐解除，岩层相应产生向上膨胀变形，当附加内力超过黏聚力时，岩石失去自身的连续性，发生破裂，在鄂西渝东地区的野外勘测时，可以观测到岩层经历抬升剥蚀后中产生的节理裂隙(见图 11)。

对于完全抬升至地表的露头，没有上部约束，原有的沉积层面张开，形成平行于水平主应力的层状裂隙(见图 11(a))，类似于初始围压为 10 MPa 的卸载，对于抬升后仍然具有一定埋深的地层，由于受到围压的束缚，产生张剪性破坏，如图 11(b)中的高角度裂缝，类似于初始围压为 40 MPa 下的卸载破坏。



(a) 水平缝



(b) 剪切缝

图 11 鄂西渝东地区地质裂缝图

Fig.11 Geological fractures of western Hubei-Eastern Chongqing region

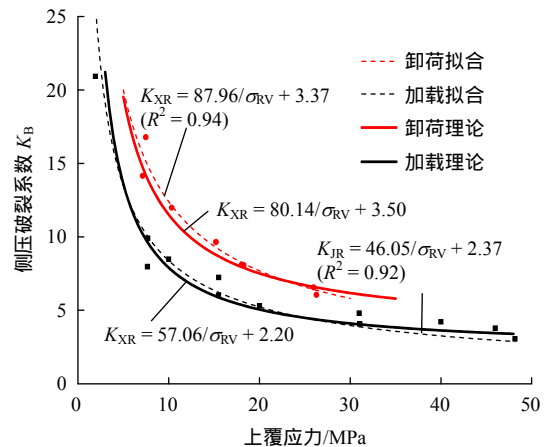


图 12 泥页岩加载、卸荷侧压破裂系数

Fig.12 Rupture coefficient of lateral pressure in different stress paths

## 5 在石油盖层评价中的初步应用

### 5.1 侧压破裂系数

岩石力学试验中常用差应力描述岩石承受的应力状态不适用于地下岩层应力状态描述，深埋地下岩层常常到水平挤压错位导致破坏，比值系数——侧压系数  $K$  常被用来描述某点的应力状态<sup>[16]</sup>。本文定义岩石卸荷破裂时的水平应力与垂直应力的比值为侧压破裂系数，用  $K_R$  表示：

$$K_R = \frac{\sigma_{RH}}{\sigma_{RV}} \quad (2)$$

式中： $\sigma_{RH}$  为岩石破裂时的最大水平应力， $\sigma_{RV}$  为破裂时的垂向应力。

试验中采用围压模拟垂直应力，轴压模拟岩层受到的水平应力，因此根据式(1)可得

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_V} = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2c \cos \varphi}{(1 - \sin \varphi)\sigma_3} \quad (3)$$

假设：

$$M = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, N = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

联合式(2)，(3)，(4)可得侧压破裂系数表达式：

$$K_R = \frac{M}{\sigma_{RV}} + N \quad (5)$$

据式(5)可得到的卸荷应力路径的  $K_{XR}$  与常三轴加载应力路径下的  $K_{JR}$  表达式如下：

$$K_{XR} = \frac{80.14}{\sigma_{RV}} + 3.50 \quad (6)$$

$$K_{JR} = \frac{57.06}{\sigma_{RV}} + 2.20 \quad (7)$$

根据实测数据拟合得到的曲线如图 12 所示。

图 12 中的曲线趋势说明，加载路径和卸载路径下，随着岩石的上覆应力减小，岩石发生破坏时的侧压破裂系数在增大，并且相对于加载路径，岩石在卸载路径下发生破坏时的侧压力值更高。

景峰等<sup>[17]</sup>统计国内地应力的数据，最大水平应力与垂直应力均随埋深的减小而减小，而侧压系数则随埋深减小而逐渐增大，三轴卸荷试验得到的侧压破裂系数同样遵循这样的规律。

陈劲人和彭秀美<sup>[18]</sup>分析鄂西渝东地区水化学性质，证实埋深小于 500 m 岩层为良好产水层，无法起到密封作用，因此不分析小于 10 MPa 的侧压破裂系数的突增变化。由于不知晓区域水平应力分布，不能根据现今的侧压系数与侧压破裂系数比较侧压系数  $K$  与侧压破裂系数  $K_R$  值大小来判定区域的岩层是否发生破坏。

### 5.2 抬升剥蚀破裂判定

燕山运动基本奠定了区内的主体构造格架<sup>[14]</sup>。因此，区域内的龙马溪地层在整体隆升前曾受到挤压，可以假设完整的龙马溪岩层在抬升剥蚀前，最大水平应力达到试验设置的比例极限，采用三轴卸载试验数据，依据垂直抬升距离初步判断不同埋深的龙马溪组盖层泥页岩在经历不同的抬升幅度后是否会产生破裂。

根据 L. F. Ahty<sup>[19]</sup>提出的理论，计算泥页岩的古孔隙度，进而计算古密度，最后得到隆升前的古上覆岩层重力如表 4 所示。

依据表 4 中计算得到的古埋深对应的垂向应力，结合表 2 中试验得到的卸载初始围压与破裂围压，可推断埋深 4 000 m 地层抬升约至 2 000 m 时发生破裂，3 000 m 的地层在抬升至 1 500 m 发生破裂，

表 4 鄂西渝东地区抬升前垂向应力参数

Table 4 Vertical stress before uplift in Western Hubei-Eastern Chongqing area

古埋深/km	垂向应力/MPa
0	0
100	1
500	7
1 000	13
2 000	27
3 000	40
4 000	54

2 000 m 的埋深在抬升至 500 m 发生破裂, 1 500 m 抬升至 500 m 左右会发生破裂。

晚白垩世以来, 鄂西渝东地区一直处于高隆升剥蚀量地带, 袁玉松等<sup>[3, 20]</sup>利用古温标  $R_o$  数据反演得到鄂西渝东地区晚燕山—喜马拉雅期的钻井剥蚀范围为 1 700~4 000 m, 总体上从东往西剥蚀量逐渐变小, 利川复向斜北部剥蚀量大于 4 000 m, 南部剥蚀量为 2 000~2 500 m, 齐岳山复向斜隆升 4 000 m, 石柱复向斜南部剥蚀量为 1 500~2 000 m, 北部为 2 000~2 500 m, 方斗山复背斜核部剥蚀量为 3 500~4 000 m, 方斗山复背斜以西剥蚀量为 1 000~1 500 m。

据三轴卸荷试验结果, 利川复向斜北部发生破裂, 由于南部抬升剥蚀量远小于北部, 变形差异大, 并不适宜作为勘探地点; 齐岳山复背斜抬升后部分地段龙马溪组裸露, 并且齐岳山断裂的存在也证明齐岳山不适宜作为勘探地点; 石柱复向斜仅出露侏罗系, 根据抬升幅度, 以及平缓单一的地质构造, 其盖层没有破裂, 石柱复向斜是优势的油气勘探位置, 建深 1 井获得的稳定的工业气流<sup>[21]</sup>证实这一点; 方斗山复背斜核部志留系地层基本出露, 保存条件差, 而且山高地陡, 也不利于勘探和开发, 方斗山复背斜以西剥蚀量较小, 埋深增加, 盖层因抬升剥蚀产生的裂纹减少, 但保存条件相对较好, 可以作为油气勘探区域。

## 6 结 论

采用不同初始围压下的卸载试验研究探讨升剥蚀作用对鄂西渝东地区志留系盖层的影响, 得到以下几点有益结论:

(1) 龙马溪岩石在三轴卸载试验条件下其应力—

应变曲线分为 4 个阶段, 分别是弹性阶段、卸荷屈服段、卸荷破坏段和塑性变形段。卸荷破坏时的轴向、径向应变值均随卸载初始围压的增大而增大, 卸围压过程中卸载初始围压较小时, 径向应变大于轴向应变, 随初始围压增大, 径向应变略小于轴向应变。

(2) 岩石从高围压卸载至低围压发生卸荷破坏的抗压强度, 比岩石在低围压下的常规三轴抗压强度明显要高, 计算得到的抗剪切参数均比三轴压缩试验的参数大, 证明卸荷前的高围压状态增强了岩石抗剪切能力。因此区域内经历更大埋深的龙马溪组岩层在抬升剥蚀后更不容易产生破坏。

(3) 岩石的破裂形态随卸载初始围压的增大, 由张性破裂向张剪性破裂过渡, 围压为 40 MPa 时, 岩石产生张裂纹与剪切纹相互连接共同实现网格贯穿破坏。

(4) 提出侧压破裂系数  $K_R$  评价当今鄂西渝东龙马溪组盖层封闭性, 结合目前已知岩层的抬升剥蚀量以及区域的地质构造, 推断方斗山复背斜以西为勘探备选区, 石柱复向斜是勘探优势位置, 也是目前志留系油气藏勘探潜力最大和最容易取得突破的地区。

鉴于实测资料, 并没有对  $K_R$  做工程检验。进一步讲, 岩层当前应力状态仅是地质演化进程中的一个时间点, 是经历抬升剥蚀后的结果, 区域岩层更有可能在漫长抬升剥蚀史中的某个未知时间段中发生破裂, 因此要预测岩层是否发生过破裂, 需要考虑岩石的抬升速率、测量计算岩层的古垂向应力、古水平应力和抬升剥蚀量参数, 绘制区域岩层自抬升剥蚀以来  $K$  值的区域动态演化曲线, 与  $K_R$  值比较, 从空间与时间的角度来判定岩层是否发生过破裂, 从而确定鄂西渝东区域龙马溪岩层的破裂区域, 这也是未来的工作方向。本文借鉴了岩石力学试验方法, 模拟鄂西渝东地区的抬升剥蚀, 但是岩石力学试验与真实的地质抬升之间的相似性是未来的研究重点之一。

本文是将岩石卸荷力学与油气盖层勘探相结合的初步研究成果, 将来还会针对不同卸荷速率、不同地质组别的泥页岩做进一步研究。

## 参考文献(References):

- [1] 袁玉松, 范明, 刘伟新, 等. 盖层封闭性研究中的几个问题[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 336-347. (YUAN Yusong, FAN Ming, LIU Weixin, et al. Several discussion of sealing of capacity studies of cap rock[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(4): 336-



- 347.(in Chinese))
- [2] 郭战峰,陈绵馄,付宜兴,等. 鄂西渝东地区震旦、寒武系天然气成藏条件[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2008, 30(4): 3-5.(GUO Zhanfeng, CHEN Miankun, FU Yixing, et al. Natural gas reservoiring conditions of Sinian and Cambrian from western Hubei to eastern Chongqing areas[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology, 2008, 30(4): 3-5.(in Chinese))
- [3] 袁玉松,林娟华,程心阳,等. 鄂西渝东地区晚燕山—喜马拉雅期剥蚀量[J]. 地球物理学报, 2014, 57(9): 2 878-2 884.(YUAN Yusong, LIN Juanhua, CHENG Xinyang, et al. Yanshan—Himalayan denudation in Western Hubei—Eastern Chongqing[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(9): 2 878-2 884.(in Chinese))
- [4] 肖开华,李双建,汪新伟. 中、上扬子区志留系油气成藏特点与勘探前景[J]. 石油天然气地质, 2008, 29(5): 590-596.(XIAO Kaihua, LI Shuangjian, WANG Xinwei, Hydrocarbon accumulation features and exploration direction in the Silurian of the middle and upper Yangtze Platofrm[J]. Oil and Gas Geology, 2008, 29(5): 590-596.(in Chinese))
- [5] 周雁,李双建,范明. 构造变形过程中的盖层封闭性研究[J]. 地质科学, 2011, 46(1): 226-232.(ZHOU Yan, LI Shuangjian, FAN Ming. Study on sealing capacity of cap rock in the process of tectonic deformation[J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(1): 226-232.(in Chinese))
- [6] 李双建,周雁,孙冬胜. 评价盖层有效性的岩石力学实验研究[J]. 石油实验地质, 2013, 35(9): 575-586.(LI Shuangjian, ZHOU Yan, SUN Dongsheng. Rock mechanic experiment study of evaluation on cap rock effectiveness[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35(9): 575-586.(in Chinese))
- [7] 高春玉,徐进,何鹏,等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456-460.(GAO Chunyu, XU Jin, HE Peng, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 456-460.(in Chinese))
- [8] 黄润秋,黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2 205-2 213.(HUANG Runqiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 205-2 213.(in Chinese))
- [9] 赵国斌,周建军,王思敬. 卸荷条件下灰岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 2 994-2 999.(ZHAO Guobin, ZHOU Jianjun, WANG Sijing. Study of mechanical characteristics of limestone under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 2 994-2 999.(in Chinese))
- [10] 李建林,王瑞红,蒋昱州,等. 砂岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2 034-2 041.(LI Jianlin, WANG Ruihong, JIANG Yuzhou, et al. Experimental study of sandstone mechanical properties by unloading triaxial tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2 034-2 041.(in Chinese))
- [11] 吕颖慧,刘泉声,江浩,等. 基于高应力下花岗岩卸荷试验的力学变形特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 337-343.(LU Yinghui, LIU Quansheng, JIANG Hao, et al. Study of mechanical deformation characteristics of granite in unloading experiments of high stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 337-343.(in Chinese))
- [12] 徐政语,李大成,卢文忠,等. 渝东构造样式分析与成因解析[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(1): 15-22.(XU Zhengyu, LI Dacheng, LU Wenzhong, et al. Pattern analysis and genetic interpretation about the geotectonics of Yudong(East Chongqing)[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(1): 15-22.(in Chinese))
- [13] 刘树根,曾祥亮,黄文明,等. 四川盆地页岩气藏和连续型—非连续型气藏基本特征[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2009, 36(6): 578-592.(LIU Shugen, ZENG Xiangliang, HUANG Wenming, et al. Basic characteristics of shale and continuous discontinuous transition gas reservoirs in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology, 2009, 36(6): 578-592.(in Chinese))
- [14] 黄文明,刘树根,马文辛,等. 川东南—鄂西渝东地区下古生界页岩气勘探前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 364-371.(HUANG Wenming, LIU Shugen, MA Wenxin, et al. Shale gas exploration prospect of Lower Paleozoic in Southeastern Sichuan and Western Hubei—Eastern Chongqing areas, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 364-371.(in Chinese))
- [15] 袁玉松,孙冬胜,周雁,等. 中上扬子地区印支期以来抬升剥蚀时限的确定[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 362-369.(YUAN Yusong, SUN Dongsheng, ZHOU Yan, et al. Determination uplifting for the Mid-upper Yangtze area after of onset of Indosinian event[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 362-369.(in Chinese))
- [16] 景锋,边智华,陈昊,等. 不同岩性侧压系数分布规律的统计分析[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(4): 48-51.(JING Feng, BIAN Zhihua, CHEN Hao, et al. Statistical analysis of lateral pressure coefficient distribution law for different lithology[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(4): 48-51.(in Chinese))
- [17] 景锋,盛谦,张勇慧,等. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2 056-2 062.(JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2 056-2 062.(in Chinese))
- [18] 陈劲人,彭秀美. 从三轴抗剪抗压实验看埋深对区域盖层遮挡性能的影响[J]. 石油实验地质, 1994, 16(3): 282-288.(CHEN Jingren, PENG Xiumei. Influence of buried depth on the properties of regional covering strata with an experimental analysis of triaxial resistance to shearing and compressing[J]. Petroleum Geology and Experiment, 1994, 16(3): 282-288.(in Chinese))
- [19] ATHY L F, Density, porosity and compaction of sedimentary rocks[J]. AAPG Bulletin, 1930, 14(1): 1-24.
- [20] 卢庆治,马永生,郭彤楼,等. 鄂西—渝东地区热史恢复及烃源岩成烃史[J]. 地质科学, 2007, 42(1): 189-198.(LU Qingzhi, MA Yongsheng, GUO Tonglou, et al. Thermal history and hydrocarbon generation history in western Hubei—Eastern Chongqing area[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(1): 189-198.(in Chinese))
- [21] 肖开华,沃玉进,周雁,等. 中国南海相层系油气成藏特点与勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 317-325.(XIAO Kaihua, WO Yujin, ZHOU Yan, et al. Petroleum reservoiring characteristics and exploration direction in marine strata in Southern China[J]. Oil and Gas Geology, 2006, 27(3): 317-325.(in Chinese))