

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.03.013

不同沉积年代泥岩卸荷力学特性试验研究

霍 亮¹, 周 雁², 杨春和^{1,3}, 冒海军³, 刘俊新⁴, 陈西磊⁴

(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. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 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; 4. 西南科技大学, 四川 绵阳 621010)

摘 要:鄂西渝东地区蕴藏着丰富的油气资源, 纵向主要分布有侏罗系和志留系两套泥岩盖层, 区域经历的抬升剥蚀过程会导致盖层破裂, 影响油气保存。选取沉积于侏罗系沙溪庙组、桐竹园组以及志留系龙马溪组的 3 个典型区块泥岩, 开展 10~50 MPa 5 种围压下的三轴卸荷力学试验, 探索卸荷对泥岩力学特性影响。研究表明: 随卸荷围压增大, 3 类泥岩的卸荷效应均增强, 侏罗系泥岩体现在卸荷变形增大, 志留系泥岩主要体现在沿卸荷方向的侧向膨胀; 对比常规三轴压缩试验中岩石破裂时的应力状态, 卸荷得到的泥岩强度均上升, 内摩擦角更大, 泥岩侧压破裂系数呈负指数分布, 随围压增大而减小, 并且沉积时间短浅的泥岩在抬升剥蚀过程中更容易产生破坏; 岩石破裂形态由岩石组构与应力环境共同决定, 沙溪庙组泥岩的裂纹形态为单一剪切断面破坏, 并且断口平缓, 而桐竹园组泥岩与龙马溪组泥岩则随围压升高, 由单一剪切断面向共轭剪切破坏过渡, 其中桐竹园组泥岩断口平滑, 龙马溪组泥岩断口则呈现锯齿状。

关键词:泥岩; 地质年代; 卸荷; 侧胀系数; 侧压破裂系数; 破坏形态

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 03 - 0714 - 10

Experimental study of unloading mechanical behaviour of mudstone in different geological era

HUO Liang¹, ZHOU Yan², YANG Chun-he^{1,3}, MAO Hai-jun³, LIU Jun-xin⁴, CHEN Xi-lei⁴

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

Abstract: Western Hubei-Eastern Chongqing region is rich in oil and gas resources, and the cap rocks are Jurassic mudstone and Silurian mudstone from top to bottom. However, this region has been suffered long term uplift and erosion, which may result in cap rock generating fractures. To investigate mechanical properties of mudstones during geological evolution, three typical tectonic mudstones deposited in the Jurassic Shaximiao formation, Tongzhuyuan formation and Silurian Longmaxi group, are selected to conduct triaxial unloading tests under five different confining pressures from 10 to 50 MPa. The results show that the unloading effect of these three mudstones is enhanced with the increase of unloading confining pressure, and the Jurassic mudstone increases in unloading deformation, the Silurian mudstone mainly exhibits the lateral expansion along the unloading direction. In comparison with the stress state of rock failure in the normal triaxial compression test, under unloading condition, the unloading strength of the mudstone and the internal frictional angle are increased. The mudstone lateral fracture coefficient is negative exponential distribution and decreases with the increase of the confining pressure. The mudstone with short sedimentary history is more prone to damage during the uplift and denudation process. The rock fracture pattern is governed by the rock structure and the stress environment. The mudstone of Shaximiao formation presents a single shear section failure, and the fracture is gentle, while the fractures of the mudstones of Tongzhuyuan formation and Longmaxi formation transit from a single shear cross section to the conjugate shear with increasing the confining pressure. The fracture of Tongzhuyuan formation mudstone is smooth, but the fracture of Longmaxi formation mudstone is jagged.

Keywords: mudstone; geological era; unloading; lateral expansion coefficient; lateral rupture coefficient; fracture mode

收稿日期: 2015-04-07

基金项目: 重庆大学国家重点实验室开放基金 (No.2011DA105287-FW201404)

This work was supported by the Open Fund of State Key Laboratory of Chongqing University (2011DA105287-FW201404).

第一作者简介: 霍亮, 男, 1988 年生, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: huoliang@126.com

1 引 言

鄂西渝东地区是我国页岩气勘探开发的主战场，位于区域石柱复向斜的建南气田预估储量约为 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1]，但区域经历了复杂的地质构造运动，尤其是发生在白垩纪的剧烈隆升剥蚀^[2]，会导致盖层产生释重裂缝和构造裂缝，降低盖层的封盖能力^[3]，严重影响油气资源的保存。我国柴达木盆地油砂山以及准噶尔盆地西北部的黑油山均因抬升剥蚀而油气散失^[3]。

鄂西渝东区域盖层主要为泥岩盖层，其中侏罗系泥岩盖层能有效阻止地表水的渗入淋滤和油气散失，在石柱复向斜内部的厚度一般在 100 ~ 300 m，南部可达 400 m^[4]；志留系龙马溪组泥岩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，在区域内厚度为 100 ~ 900 m，平均为 203 m^[5]。区域的抬升剥蚀作用可能导致泥岩盖层封闭性失效，油气藏逸散。为了研究抬升对于泥岩盖层的影响，周雁等^[6]、李双建等^[7]采用恒定轴压卸围压的试验方案模拟盖层的地层抬升过程，研究盖层在抬升过程中的变形，证实盖层抬升到一定程度会集中产生破裂，但没有对比不同泥岩盖层的破裂变形差异以及破裂方式的异同，且该研究只能考虑垂向卸载作用，未能考虑垂向卸载的同时水平应力也随之减小的耦合效应。

关于岩石在卸载条件下的力学特性，黄润秋等^[8]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；李宏哲等^[9]、汪斌等^[10]结合锦屏水电站洞室开挖工程，进行不同卸荷路径下的大理岩卸荷试验研究，得到了高应力条件下的卸荷力学特性；李建林等^[11]进行了砂岩的三轴卸荷力学特性试验研究；赵国斌等^[12]研究灰岩在轴压的升高、围压卸荷的应力路径下的强度、变形特征；张黎明^[13-14]对粉砂岩试样进行了常规三轴加载后保持轴向变形不变的峰前、峰后卸围压试验，得到了峰前、峰后卸围压全过程曲线，并对岩样破坏特征、强度和变形特性进行了分析。吕颖慧等^[15]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。

三轴卸荷试验在油气勘探方面的应用很少，上述文献主要针对地下洞室，因此，卸荷试验研究对象多为硬脆性岩石，如花岗岩、大理岩等，没有以石油勘探为背景对泥岩开展的三轴卸荷研究。

本文选取鄂西渝东地区的侏罗系沙溪庙组、竹

园组以及志留系龙马溪组 3 类沉积于不同地质年代的典型泥岩，采用卸荷试验研究泥岩抬升过程中的变形差异，得到 3 类泥岩在卸载路径下的应力-应变过程曲线，以及卸荷段的围压-应变曲线，分析泥岩在不同卸荷初始围压下的强度、破裂特征，为鄂西渝东地区的油气资源勘探提供参考依据。

2 方案设计与试验准备

鄂西渝东主体构造自西向东依次为方斗山复背斜、石柱复向斜、齐岳山复背斜和利川复向斜，如图 1 所示，其中石柱复向斜为重点勘探区位，产状平缓，可以假设其水平沉积，垂直隆升。据卢庆治^[16]、刘树根^[17]、石红才^[18]等对区域隆升剥蚀的研究，泥岩盖层的埋藏演化过程如图 2 所示，OA 段为盖层的沉积形成过程，随压实作用增强，孔隙度减小、渗透率降低、排替压力增大到一定程度后对油气具有封闭能力；AB 段为盖层隆升剥蚀过程，区域整体抬升剥蚀自 97 Ma 前开始，抬升后埋藏变浅，石柱复向斜抬升幅度约 2 000 m^[2]，抬升作用导致盖层产生裂缝，从而成为油气逸散通道，盖层失效，其中孔隙率变化很小，渗透率明显增大^[19]，因此，不考虑抬升过程中孔隙压力变化。

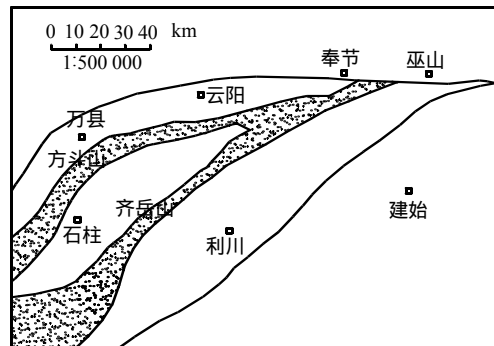


图 1 鄂西渝东地区构造简图
Fig.1 Schematic diagram of geological structure in Western Hubei-Eastern Chongqing region

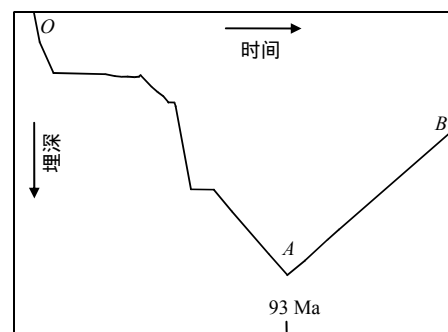


图 2 鄂西渝东地区沉积埋藏示意图
Fig.2 Fitted burial history in Western Hubei-Eastern Chongqing region

假设地层水平沉积，垂向抬升，忽略孔隙压力和构造应力影响，并且最大水平主应力与最小水平主应力相同后，由于抬升过程竖向应力不断减小，水平应力略有减小^[20]，选取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，其中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。

2.1 试样制备

沉积于不同地质时期的泥岩均取自鄂西渝东地区的新鲜开挖面，在钻取现场，同时期试样均取自同一岩块，并垂直于沉积层理钻取，减小试样间个体差异。因泥岩在水钻取芯过程中容易崩解，需将野外采取的岩块迅速擦干，用保鲜膜、牛皮纸、透明胶带、石蜡依次密封，运至试验室按照试验规程^[21]要求加工为标准圆柱体试样。加工时，为避免机械水力切割造成的节理张裂，试验所需试样均在

室内手工研磨成型，再次密封，如图 3 所示。



图 3 样品钻取制备图
Fig.3 Prepared rock samples

采用中国地质大学（武汉）的德国 Bruker AXS D8-Focus 型 X 射线衍射仪对试样进行成分分析，其主要矿物成分的平均百分比含量如表 1 所示。结果显示，沙溪庙组泥岩中主要为长石矿物，黏土含量最少，桐竹园组岩石的黏土矿物含量大于 50%，为黑色黏土岩，黑色染手，而龙马溪组岩石的石英含量最高，黑色不染手。

表 1 3 类岩石的矿物成分及含量

Table 1 Mineral compositions and contents of three kinds of mudstones

沉积地层	沉积年代/ Ma	岩性	黏土矿物/ %	石英/ %	钠长石/ %	钾长石/ %	方解石/ %	黄铁矿/ %
侏罗系沙溪庙组(J _{2s})	175.6±2.0	紫红色泥岩	12.34	16.20	57.5	13.78	0.03	0.15
侏罗系桐竹园组(J _{1t})	199.6±0.6	黑色泥岩	84.62	13.12	2.26			
志留系龙马溪组(S _{1l})	443.7±1.5	黑色泥岩	22.57	48.94	13.18	6.16	2.22	6.92

沉积于不同的地质年代意味着岩石的压密及成岩程度不同 对 3 类泥岩进行基本的物理力学试验，结果如表 2 所示。沉积年代久远的志留系龙马溪组泥岩的天然密度、纵波波速均大于其他两组，显示其岩石结构最为致密；反映在力学性质上，龙马溪组泥岩的单轴抗压强度与抗拉强度均最大，其单轴抗压强度是桐竹园组的 2 倍，沙溪庙组的 5 倍；比较 3 组泥岩的力学参数，沙溪庙组泥岩的弹性模量为桐竹园组的 1/5，是龙马溪组的 1/8，而泊松比则为龙马溪组岩石的 2 倍，与桐竹园组泥岩较为接近。上述特征反映出在外力作用下，相较于其他两组泥岩，沙溪庙组泥岩更易产生剪切变形，丧失承载能力，而弱化龙马溪组泥岩所需的变形最小，桐竹园组岩石居中。

表 2 3 类岩石的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of three kinds of mudstones

岩样编号	天然密度 / (g/cm ³)	纵波波速 / (m/s)	单轴抗压强度/ MPa	抗拉强度 / MPa	弹性模量 / GPa	泊松比
J _{2s}	2.48	2 470	10.85	0.37	0.80	0.34
J _{1t}	2.57	2 793	26.44	1.76	3.87	0.31
S _{1l}	2.64	3 181	55.02	1.90	6.91	0.17

2.2 试验方案

采用中国科学院武汉岩土力学研究所 MTS815.03 型压力试验系统，设计 10、20、30、40、50 MPa 5 种初始围压，进行不同卸载初始围压条件下的卸荷试验。试验分为 3 个阶段进行：按加载速率 0.5 MPa/s 对试件施加静水压力 $\sigma_1 = \sigma_3$ 至预定值，保持一段时间模拟岩石的压力环境；保持 σ_3 不变，按加载速率 0.25 kN/s 逐渐提高 σ_1 至试件破坏前的某一应力水平；按 0.02 kN/s 速率卸载 σ_1 的同时以 0.01 kN/s 的速率卸载 σ_3 直至破坏，试验应力路径如图 4 所示。

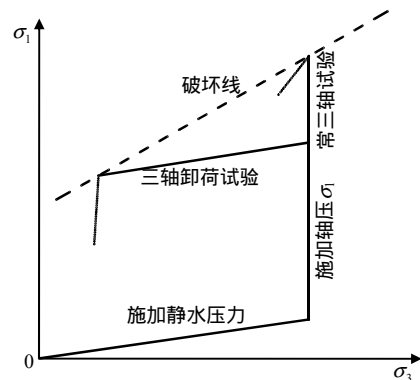
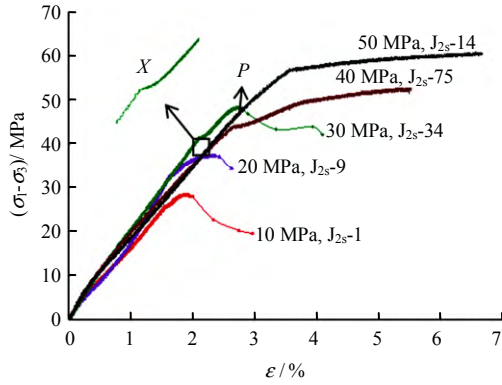


图 4 三轴试验应力路径
Fig.4 Triaxial stress path of rock samples

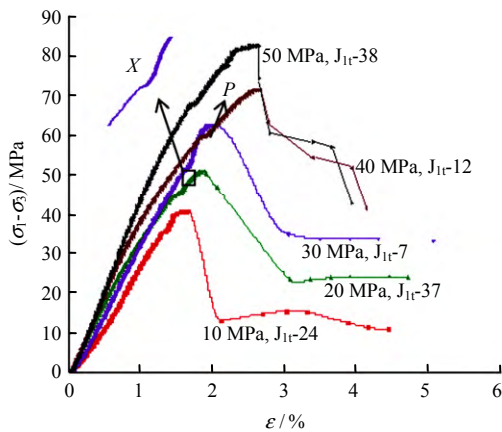
3 试验结果与分析

3.1 应力-应变曲线分析

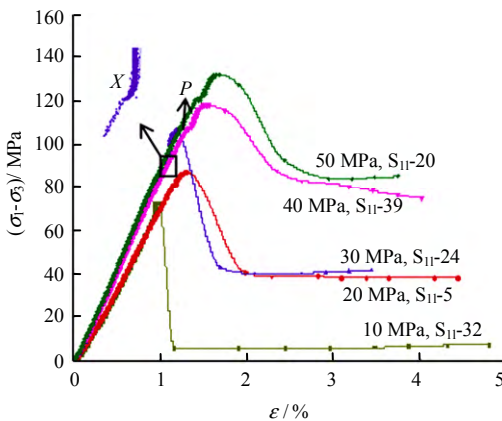
整理三轴卸荷试验数据，绘制不同初始围压下不同沉积年代泥岩的应力-应变曲线，为方便观察卸荷时的曲线特征，对初始围压为 30 MPa 时卸荷起始点进行放大处理，如图 5 所示。



(a) 侏罗系沙溪庙组(J_{2s})泥岩



(b) 侏罗系桐竹园组(J_{1t})泥岩



(c) 志留系龙马溪组(S_{1l})泥岩

图 5 不同泥岩的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of different mudstones

观察图中放大框内的曲线变化趋势，围压卸载导致岩样轴向应变突然增加，曲线偏离弹性轨迹向

内凹，该点为卸荷点 X ；随着差应力的增加，曲线整体呈现凸型屈服形态，到达峰值点 P 。以围压为 30 MPa 为例，比较 3 类岩样在峰值点 P 时的应力-应变关系，峰值强度 $\sigma_1 > \sigma_t > \sigma_s$ ，峰值时的轴向应变 $\epsilon_1 < \epsilon_t < \epsilon_s$ 。对同类岩样，随初始围压增大，卸荷破坏强度逐渐升高，发生破坏时的轴向变形在逐渐增大，其中沙溪庙组泥岩在 40、50 MPa 的卸荷围压下产生了延性变形，另两组岩石则仍表现出脆性破坏，残余强度随围压增大而升高。

X 为卸荷起始点，对应地层抬升剥蚀的起点， X 点之后的应力-应变过程可以视为抬升剥蚀对岩石变形的影响。 P 为峰值点，此后岩石产生的宏观裂纹可以作为油气逸散通道，盖层封闭性失效。因此 X - P 的变形过程是研究抬升剥蚀对泥岩盖层封闭性影响的重要阶段。

3.2 卸载过程变形特征

忽略卸荷点 X 之前的变形，仅研究卸荷阶段 X - P 过程中泥岩的变形可探索形成于不同沉积年代泥岩在经历抬升剥蚀后产生变形的差异。图 6 展示了不同沉积年代泥岩 X - P 段的围压-应变曲线，卸荷段变形用 ϵ' 表示。

对比 3 类泥岩的围压-应变曲线形态，随围压降低，卸荷作用增强，3 类泥岩的轴向应变与径向应变均增大，其中桐竹园组、龙马溪组与低围压下的沙溪庙组泥岩均呈现“S”型增长趋势，卸荷初始，应变突增，随后进入稳定卸荷变形阶段，最终应变软化屈服。随初始围压增大，沙溪庙组泥岩的围压-应变曲线如同一把慢慢撑开的伞，其他两组泥岩在不同初始围压下曲线形态只是形式的放大，原因在于，对于沉积年代短、结构松散沙溪庙组泥岩，较小卸荷量可以产生较大的卸荷变形，因而，表现出不同于其他泥岩的卸荷特征。比较 3 类泥岩卸载段径向应变与峰值径向应变比 $\epsilon'_3 / \epsilon_{peak}$ 随围压的变化规律，如图 7 所示。

图 7 显示，随卸荷初始围压增大，3 类泥岩卸荷段径向应变占峰值应变的比值在增大，由 10 MPa 时的 10%~25%，增加至 50 MPa 时的 40%~50%，对于 3 类岩石而言，随初始围压提高，围压卸荷效应均在增强，但不同泥岩卸荷特征不同。

沉积方向及原生的孔洞、溶洞较多等因素造成的样品内部的不均匀性，在静水压力加载过程中会产生较大变形，致使加载段结束时，侧向应变与轴向应变之比大于 0.5，虽然样品没有发生破坏，但不符合泊松比物理意义，因此，定义径向与轴向应变的比值为侧胀系数 μ_c 更为合适，分析不同应力阶段

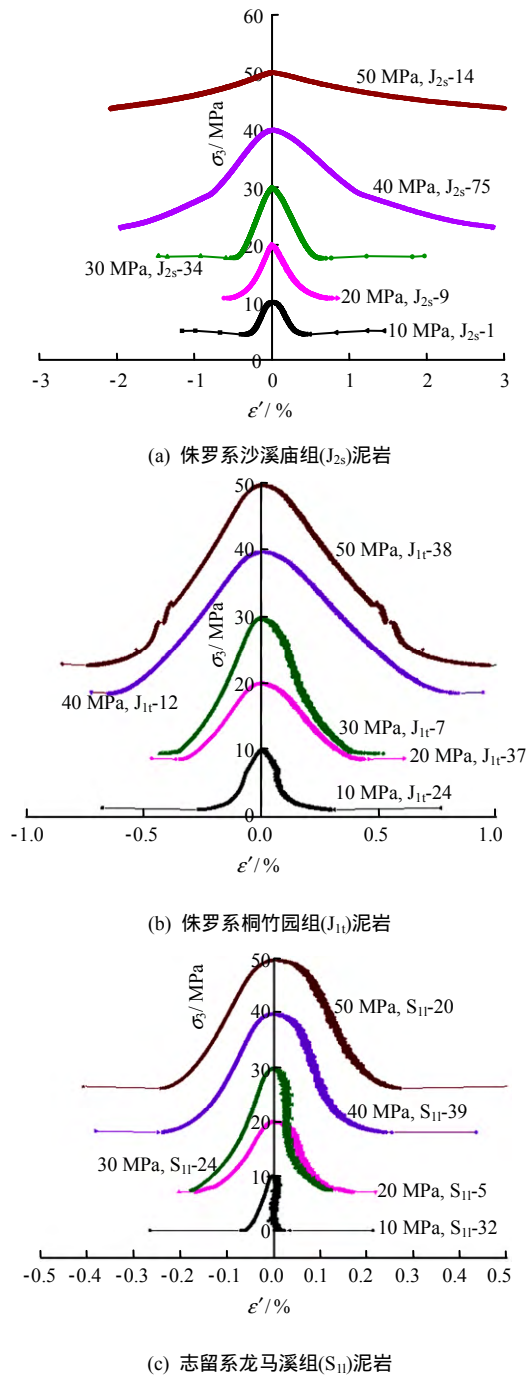


图 6 3 类泥岩在卸荷段的围压-应变曲线
Fig.6 Confining pressure-strain curves of different mudstones in unloading processes

3 类泥岩的侧胀系数平均值随初始卸荷围压的变化规律, 如图 8 所示。

在应力加载阶段, 沙溪庙组 (J_{2s}) 岩石的侧胀系数随初始围压的增大而降低, 体现了较强的围压约束效应, 而桐竹园组 (J_{1t}) 与龙马溪组 (S_{11}) 岩石的侧胀系数则随围压的增大而呈现上升趋势; 在加载阶段不同初始围压下, J_{2s} 岩石的侧胀系数均为最大, 平均值为 0.64, S_{11} 岩石的侧胀系数最小, 平均值为 0.56, J_{1t} 岩石居中; 进入卸载段后, 3 组岩石的侧胀系数都比加载段大, J_{2s} 岩石的侧胀系数均

值为 0.73, S_{11} 岩石为 0.93, J_{1t} 岩石侧胀系数居中, 说明卸荷对于 3 组岩石造成明显的侧向膨胀效应。引人注目的是, S_{11} 泥岩侧胀系数在卸荷段发生了反超, 显著大于 J_{1t} 、 J_{2s} 两类泥岩, 因此, S_{11} 岩石在侧向膨胀效应要强于侏罗系 J_{1t} 、 J_{2s} 泥岩。

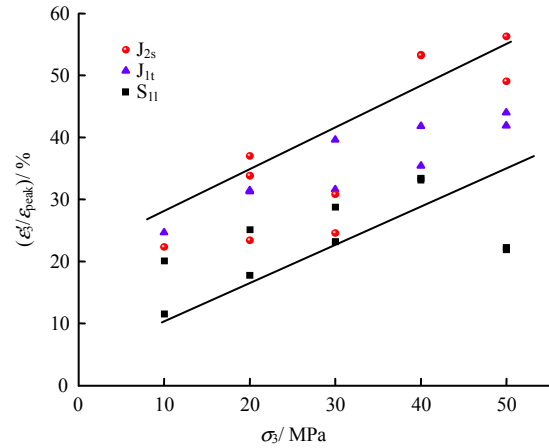
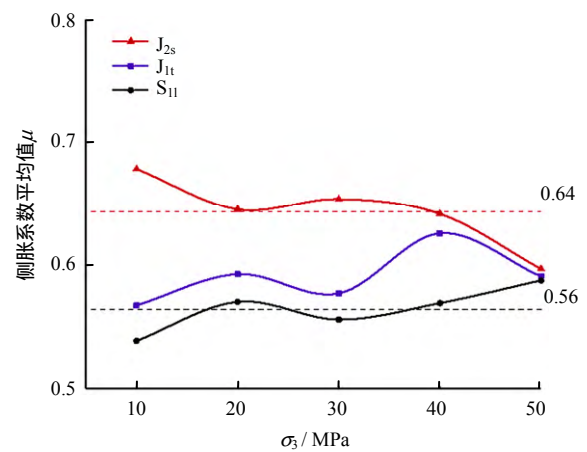
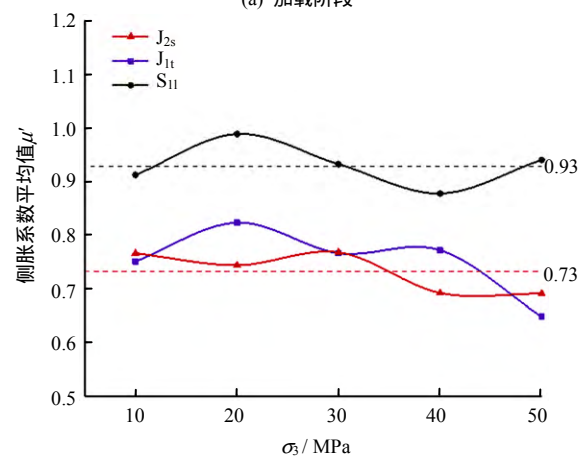


图 7 卸载段径向应变与峰值径向应变比值随围压变化
Fig.7 Relationships between $\epsilon'_3/\epsilon_{peak}$ ratio value and confining pressure in unloading processes



(a) 加载阶段



(b) 卸荷阶段

图 8 泥岩侧胀系数随围压变化规律

Fig.8 Relationships between the coefficient of lateral expansion and confining pressure

3.3 强度特征

抬升剥蚀过程中，上覆压力逐渐解除，岩石随之产生向膨胀变形，变形发展到一定程度后失去承载能力，岩石发生破坏，表 3 中列出了岩石样品在试验卸荷前 X 点的应力水平以及发生破坏时的应力状态参数。

表 3 三轴卸荷破坏试验结果
Table 3 Failure results of triaxial tests under unloading conditions

岩样编号	卸荷起始应力水平		卸荷破坏状态	
	σ_3 / MPa	σ_1 / MPa	σ_3 / MPa	σ_1 / MPa
S ₁₁ -26	50	170.43	25.98	158.26
S ₁₁ -20	50	170.92	26.28	159.04
S ₁₁ -34	40	146.84	15.21	134.13
S ₁₁ -39	40	147.55	18.27	137.62
S ₁₁ -4	30	123.95	10.34	114.10
S ₁₁ -24	30	125.51	7.48	114.14
S ₁₁ -5	20	100.86	7.13	94.44
S ₁₁ -13	20	78.38	1.34	74.56
S ₁₁ -32	10	77.23	0.05	72.89
J ₂₅ -13	50	104.28	34.16	97.44
J ₂₅ -15	50	106.85	36.73	104.27
J ₂₅ -75	40	83.96	23.13	75.59
J ₂₅ -31	40	84.59	28.86	79.02
J ₂₅ -32	30	71.94	14.51	64.13
J ₂₅ -34	30	71.46	17.77	66.13
J ₂₅ -9	20	52.68	10.75	45.61
J ₂₅ -22	20	53.10	11.98	48.97
J ₂₅ -23	10	35.57	4.49	32.96
J ₂₅ -24	10	33.30	0.10	30.66
J ₁₁ -38	50	117.46	22.77	105.22
J ₁₁ -36	50	120.16	25.36	107.84
J ₁₁ -12	40	99.63	18.58	90.04
J ₁₁ -10	40	101.24	20.13	91.30
J ₁₁ -7	30	81.40	9.51	72.31
J ₁₁ -6	30	90.28	14.85	82.71
J ₁₁ -37	20	64.69	8.65	59.14
J ₁₁ -26	20	63.08	5.97	56.77
J ₁₁ -33	10	43.78	5.58	41.61
J ₁₁ -24	10	45.97	1.06	42.12

选取表 3 中的相关数据，将泥岩发生破坏时的围压与轴压数据拟合得到卸荷强度曲线如图 9 所示，图中虚线为常规三轴加载强度曲线。

比较不同应力路径下岩石发生破坏时的应力状态，3 类泥岩在卸荷路径下抗压强度均比加载路径下高，并随围压升高，呈上升趋势。这是因为岩样之前经历的高围压状态会抑制了剪切裂纹沿轴向的延伸破坏，提高了岩石的抗剪切能力，对于我们的启示是，区域内经历更大埋深的岩层在抬升后更不容易产生破裂。

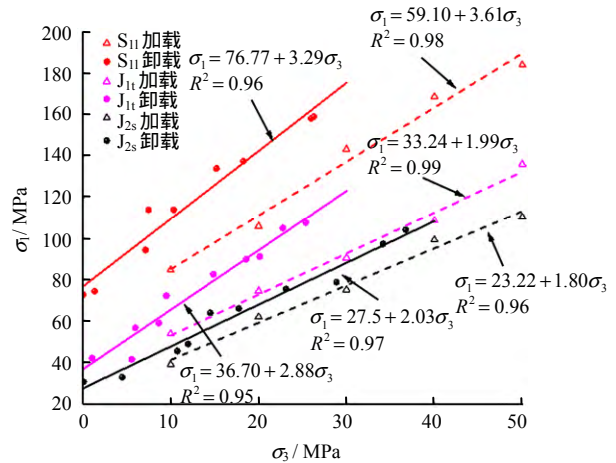


图 9 泥岩的加载、卸载强度曲线
Fig.9 Loading-unloading strength of mudstone specimens under different stress paths

试验过程中，当试样破坏面上剪切应力达到极限值时，岩样沿此面发生破坏，Mohr-Coulomb 准则可以作为岩石卸荷条件下的屈服准则，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： σ_1 为最大主应力； σ_3 为最小主应力； φ 为内摩擦角； c 为凝聚力。通过对图 9 中的拟合参数换算得到试样的抗剪强度参数见表 4。

表 4 泥岩的加载、卸载强度参数
Table 4 Strength parameters under loading and unloading conditions

地层组别	应力状态	凝聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)
沙溪庙组	常规三轴加载	8.65	16.64
	三轴卸载	9.66	19.83
桐竹园组	常规三轴加载	11.79	19.29
	三轴卸载	10.81	29.02
龙马溪组	常规三轴加载	21.07	25.01
	三轴卸载	21.17	32.23

泥岩在不同应力路径下的抗剪强度参数存在较大差异，沙溪庙组泥岩由于沉积结构松散，卸荷前的高围压状态类似于重新压密过程，凝聚力略有上扬，另外两组泥岩的凝聚力变化不大；卸荷对于内摩擦角的影响更大，试验结果显示，沙溪庙组泥岩内摩擦角增大 19%，桐竹园组泥岩内摩擦角增大 50%，龙马溪组泥岩内摩擦角增大 29%。

深埋地下岩层常常因水平挤压错位导致破坏，因此，侧压系数 K 常被用来描述地下岩层某点的应力状态^[16]。本文定义岩石破裂时的水平应力与垂直有效应力的比值为侧压破裂系数，用 K_b 表示。

$$K_b = \frac{\sigma_{Hb}}{\sigma_{vb}} \quad (2)$$

式中： σ_{Hb} 为岩石破裂时的最大水平应力，对应试验中的竖向应力； σ_{vb} 为破裂时的上覆应力，对应试验中破坏围压，卸荷试验中侧压破裂系数随上覆应力变化如图 10 所示。

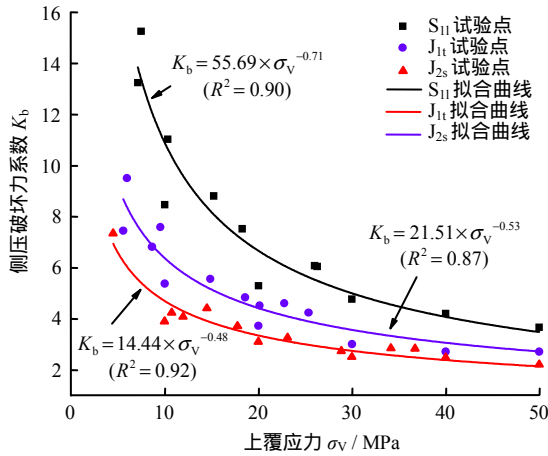


图 10 不同类泥岩侧压破裂系数随上覆应力变化规律
Fig.10 Relationships between the lateral rupture coefficient and confining pressure

随着岩层埋藏深度增加，上覆应力相应变大，3 类泥岩发生破裂时的侧压破裂系数均呈负指数减小，并逐渐趋同。岩石沉积年代越久远，曲线形态越陡峭，意味着同样埋藏深度的不同沉积年代泥岩（可能出现在区域的不同位置）沙溪庙组岩石的破裂系数约为龙马溪组岩石的 1/2，因此，在抬升剥蚀过程中，沙溪庙组岩石更容易破裂；而对于不同埋藏深度的同组泥岩，在经历同样的抬升过程后，经历更大埋深的岩层在抬升后更不容易破坏，对于相同埋藏深度的不同沉积时代泥岩，经历抬升剥蚀后，沉积时间短的岩石先发生破坏，但是破裂形态并不相同。

3.4 破裂特征

岩石破裂形态以裂纹展布、断口形貌特征表现出来，它们由驱动裂纹扩展的外部荷载以及岩石内部的矿物组构共同决定，图 11 展示了岩石样品在卸载路径下的典型破坏形态。

岩石变形破坏表现为沿卸荷方向的快速扩容或膨胀，对于不同沉积年代的泥岩，在不同初始围压作用下，破坏剧烈程度与裂纹展布并不相同。沙溪庙组泥岩的破坏方式较为温和，破坏后仍能保持岩样的完整性；在卸荷初始围压为 10、20、30、40 MPa 下沙溪庙组泥岩出现单一断面的剪切裂纹，其剪裂

角随围压升高而增大，由 10 MPa 时的 8° 增大至 40 MPa 时的 35°，其中 20 MPa 下出现了次裂纹向主裂纹向主裂纹汇聚，50 MPa 下岩石的中部变形显著，呈明显的鼓胀破坏形式，进入了内摩擦力维持的剪切滑移状态。

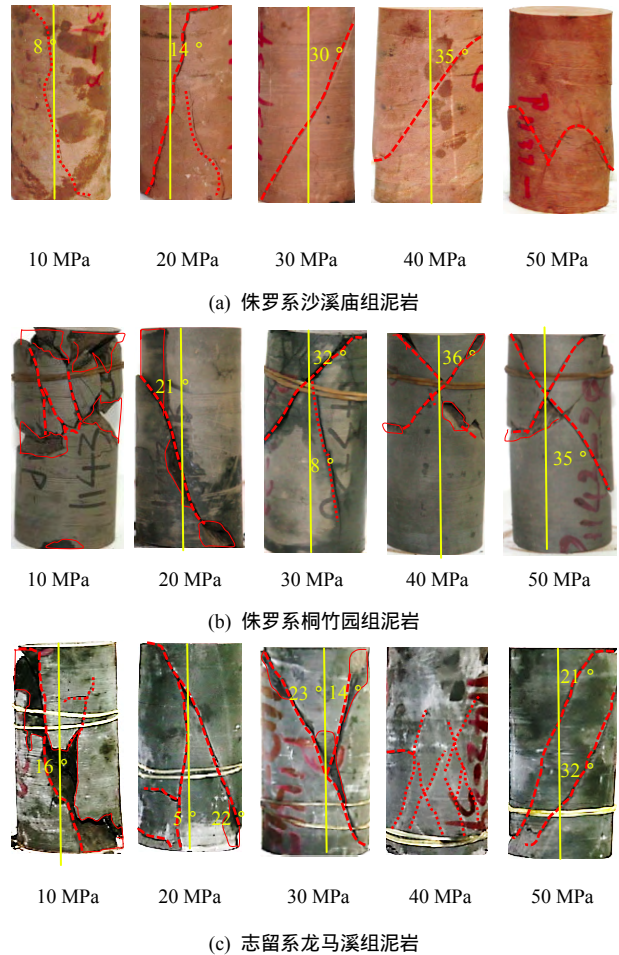


图 11 泥岩试样在卸载路径下的破坏照片
Fig.11 Rock failure photos after unloading stress tests

桐竹园组泥岩的整体破坏程度比沙溪庙组泥岩更剧烈，在裂纹相交及裂纹与岩石端面交汇处均出现了岩石掉块，破坏后丧失了样品的完整性。桐竹园组泥岩在 10 MPa 下出现了剧烈的碎裂破坏，已看不出裂纹展布形式；20、30 MPa 下样品呈现单一断面的剪破坏，30 MPa 时伴随剪切裂纹出现追踪张剪裂纹，尖灭于岩样端面；在 40、50 MPa 下出现了“x 型”共轭剪切裂纹。桐竹园组泥岩总体呈现由低围压的单一剪切破坏向高围压下的共轭剪切破坏过渡的特征。

龙马溪组泥岩破坏形式类似于桐竹园组泥岩，在 10 MPa 时出现了单一的剪切破坏面，剪裂角为 16°，其中次级张裂纹与主剪裂纹相交产生许多剥落掉块，初始围压为 20、30 MPa 时出现了“y 型”

共轭剪切裂纹，主裂纹的剪裂角随围压略有增大，而次级裂纹的剪裂角则由 20 MPa 时的 5° 增大至 30 MPa 时的 14° ；相较于之前的破坏程度，初始围压为 40、50 MPa 的龙马溪组样品破坏后相对完整，但破裂更充分，40 MPa 时出现共轭剪切带，形成纵横交错的裂纹网格，50 MPa 时出现了同方向的两条主剪切裂纹。

综上所述，裂纹分布特征为：软岩破坏程度小，裂纹为单一剪切断面，剪裂角随围压增大而升高；硬岩破坏剧烈，由低围压下的单一剪切断面向共轭剪切过渡。

岩石破坏断口面的宏观形态同样蕴含了关于破坏机制的丰富信息，图 12 给出了 3 类泥岩在 30 MPa 初始卸荷围压下泥岩试样破坏后断口照片。观察触摸发现，沙溪庙组泥岩断口平缓，矿物间的凝聚力小，触感粗糙，有颗粒感；桐竹园组泥岩断口形貌略有起伏，因黏土矿物含量高，触感顺滑；而志留系龙马溪组泥岩的破裂断口呈锯齿状，其中有小碎块散落其中。



(a) 沙溪庙组 (b) 桐竹园组 (c) 龙马溪组

图 12 3 类泥岩的破裂断口形态照片

Fig.12 Fracture surfaces of three kinds of mudstone

4 结 论

(1) 3 类泥岩的卸荷效应均随卸荷初始围压的增大而增强，对侏罗系泥岩而言，卸荷效应的增强体现在沿卸荷方向变形增大，对志留系泥岩而言，卸荷屈服过程所需的塑性变形较小，弹性段的变形恢复足以使其破坏，因此，卸荷效应增强主要体现在沿卸荷方向的强烈侧胀效应。

(2) 以破裂围压为准，相较于同围压下的三轴压缩破坏，岩石卸荷破坏强度均有所提高，内摩擦角增大，说明岩石卸荷前的高围压状态增强了岩石的抗剪切能力，岩石的侧压破裂系数均呈负指数分布，在抬升剥蚀过程中，证实沉积时间短、埋藏深度浅的岩石更容易产生破坏。

(3) 3 类泥岩在不同卸载初始围压下破裂形态差别较大，侏罗系沙溪庙组泥岩随围压的增高，由单一的剪性破坏向延性剪切破坏转变；而桐竹园组泥岩与龙马溪组泥岩沉积年代久远，结构相对致密，

破裂后掉块反而严重，裂纹形态由单一向剪切破坏向共轭剪切破坏过渡，剪裂角随围压提高而增大；分析破坏断口，龙马溪组泥岩呈现阶梯状，桐竹园组泥岩与沙溪庙组泥岩更为平缓顺滑，综合裂纹形态和端口形貌，说明岩石的破裂形态由岩石组构与应力环境共同决定。

本文研究了油气盖层三类泥岩的卸荷力学特征，对于研究构造复杂区域盖层的非常规油气工程勘探有重要意义，将来还会针对不同卸荷速率、不同的裂纹模式对油气逸散影响做进一步拓展研究。

参 考 文 献

- [1] 陈绵琨. 鄂西—渝东地区天然气勘探潜力分析[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(1): 27 - 29.
CHEN Mian-kun. Exploration potential of natural gas in western Hubei-eastern Chongqing area[J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2003, 25(1): 27 - 29.
- [2] 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): 2878 - 2884.
YUAN Yu-song, LIN Juan-hua, CHENG Xin-yang, et al. Yanshan-Himalayan denudation in Western Hubei Eastern Chongqing area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(9): 2878 - 2884.
- [3] 邓模, 吕俊祥, 潘文蕾, 等. 鄂西渝东区油气保存条件分析[J]. 石油试验地质, 2014, 31(2): 202 - 206.
DENG Mo, LU Jun-xiang, PAN Wen-lei, et al. Hydrocarbon pre-servation conditions in west Hubei and east Chongqing[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 31(2): 202 - 206.
- [4] 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 Shu-gen, ZENG Xiang-liang, HUANG Wen-ming, et al. Basic characteristics of shale and continuous discontinuous transition gas reservoirs in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2009, 36(6): 578 - 592.
- [5] 曹成润, 韩春花, 郑大荣. 构造变动对油气藏保存的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4): 95 - 98.
CAO Cheng-run, HAN Chun-hua, ZHENG Da-rong. The structural event influence on preserving hydrocarbon pools[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(4): 95 - 98.

- [6] 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 Shuang-jian, 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.
- [7] 李双建, 周雁, 孙冬胜. 评价盖层有效性的岩石力学试验研究[J]. 石油试验地质, 2013, 9(35): 575 - 586.
LI Shuang-jian, ZHOU Yan, SUN Dong-sheng. Rock mechanic experiment study of evaluation on cap rock effectiveness[J]. **Petroleum Geology & Experiment**, 2013, 9(35): 575 - 586.
- [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): 2205 - 2213.
HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2205 - 2213.
- [9] 李宏哲, 夏才初, 闫子舰, 等. 锦屏水电站大理岩在高应力条件下的卸荷力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2104 - 2109.
LI Hong-zhe, XIA Cai-chu, YAN Zi-jian, et al. Study of the marble unloading properties of Jinping Hydropower Station under high stress conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(10): 2104 - 2109.
- [10] 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2138 - 2145.
WANG Bin, ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, et al. Experimental study on mechanical properties of Jinping marble under loading and unloading stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2138 - 2145.
- [11] 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): 2034 - 2041.
LI Jian-lin, WANG Rui-hong, JIANG Yu-zhou, et al. Experimental study of sandstone mechanical properties by unloading triaxial tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2034 - 2041.
- [12] 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(增刊 2): 2994 - 2995.
ZHAO Guo-bin, ZHOU Jian-jun, WANG Si-jing. Study of mechanical characteristics of limestone under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.2): 2994 - 2995.
- [13] 张黎明, 王在泉, 宋全锋, 等. 粉砂岩卸荷破坏全过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 1): 5043 - 5047.
ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, SONG Quan-feng, et al. Experimental study on the total failure course of silt sand under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.1): 5043 - 5047.
- [14] 张黎明, 王在泉, 孙辉, 等. 岩石卸荷破坏的变形特征及本构模型[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1626 - 1631.
ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, SUN Hui, et al. Failure characteristics and constitutive model of rock under unloading condition[J]. **Journal of China Coal Society**, 2009, 34(12): 1626 - 1631.
- [15] 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.
LÜ Ying-hui, LIU Quan-sheng, 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.
- [16] 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 Qing-zhi, MA Yong-sheng, GUO Tong-lou, et al. Thermal history and hydrocarbon generation history in western Hubei-eastern Chongqing area[J]. **Chinese Journal of Geology**, 2007, 42(1): 189 - 198.
- [17] 刘树根, 马文辛, 黄文明. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2239 - 2252.
LIU Shu-gen, MA Wen-xin, HUANG Wen-ming. Characteristics of the shale reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan basin, China[J]. **Acta Petrologica Sinica**, 2011, 27(8): 2239 - 2252.

- [8] 高虎, 刘光廷, 陈凤岐. 混凝土双轴压缩徐变试验初步研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(11): 110 - 113.
GAO Hu, LIU Guang-ting, CHEN Feng-qi. Preliminary study of concrete creep under biaxial compression[J]. **Journal of Tsinghua University: Science and Technology**, 2001, 41(11): 110 - 113.
- [9] 刘博, 李海波, 朱小明. 循环剪切荷载作用下岩石节理强度劣化规律试验模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2033 - 2039.
LIU Bo, LI Hai-bo, ZHU Xiao-ming. Experimental simulation study of shear degradation of rock under cyclic shear loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 2033 - 2039.
- [10] 李伟, 谢和平, 王启智. 大理岩动态拉伸强度及弹性模量的 SHPB 试验研究[J]. 试验力学, 2005, 20(2): 200 - 206.
LI Wei, XIE He-ping, WANG Qi-zhi. Experimental study for dynamic tensile strength and elastic modulus of marble using SHPB[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2005, 20(2): 200 - 206.
- [11] LI X, DU K, LI D. True triaxial strength and failure modes of cubic rock specimens with unloading the minor principal stress[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2015, 48(6): 2185 - 2196.
- [12] GHAMGOSAR M, ERARSLAN N. Experimental and numerical studies on development of fracture process zone (FPZ) in rocks under cyclic and static loadings[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(3): 893 - 908.
- [13] 许江, 刘东, 尹光志, 等. 非均布荷载条件下煤与瓦斯突出模拟试验[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 836 - 842.
XU Jiang, LIU Dong, YIN Guang-zhi, et al. Simulation experiment of coal and gas outburst under nonuniform load[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(5): 836 - 842.
- [14] 中国建筑科学研究院. JGJ55-2011 普通混凝土配比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
China Academy of Building Research JGJ55-2011 Specification for mix proportion design of ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [15] 周瑞光, 罗光伟, 石锡钟. 加速度对强度和破坏机制的影响[J]. 地质科学, 1981, 19(4): 395 - 402.
ZHOU Rui-guang, LUO Guang-wei, SHI Xi-zhong. The effect of loading rate on strength and failure mechanism of rocks[J]. **Chinese Journal of Geology**, 1981, 19(4): 395 - 402.

上接第 722 页

- [18] 石红才, 施小斌, 杨小秋, 等. 鄂西渝东方斗山-石柱褶皱带中生代隆升剥蚀过程及构造意义[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(6): 1993 - 2002.
SHI Hong-cai, SHI Xiao-bin, YANG Xiao-qiu, et al. Exhumation process of the Fangdoushan-Shizhu fold belt in Meso-Neozoic and its tectonic significance in western Hubei-Eastern Chongqing[J]. **Progress in Geophysics**, 2012, 26(6): 1993 - 2002.
- [19] JIN Zhi-jun, YUAN Yu-song, SUN Dong-sheng, et al. Models for dynamic evaluation of mudstone/shale cap rocks and their applications in the Lower Paleozoic sequences, Sichuan Basin, SW China[J]. **Marine and Petroleum Geology**, 2014, 49: 121 - 128.
- [20] 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): 2056 - 2062.
JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui, et al. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(10): 2056 - 2062.
- [21] 中华人民共和国行业标准编写组. 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.
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL264-2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.