

川南地区志留系龙马溪组页岩力学性质及微观破裂机理

龚训^{1,2}, 金之钧^{1,2}, 马新华^{1,3,4}, 刘钰洋^{3,4}, 李关访⁵, 缪欢⁶

[1. 北京大学 能源研究院, 北京 100871; 2. 北京大学 地球空间与科学学院, 北京 100871; 3. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 国家能源页岩气研发中心, 河北 廊坊 065007; 5. 中国科学院 地质与地球物理研究所 页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029; 6. 中国石油大学(北京) 非常规油气科学技术研究院, 北京 102249]

摘要:为揭示页岩力学性质和微观破裂机理,对川南地区志留系龙马溪组页岩开展了X射线衍射、三轴压缩、微米CT扫描和扫描电镜测试。研究发现:页岩矿物成分和围压对其力学性质和储层物性具有显著影响。随着脆性矿物含量的增加,页岩弹性模量和峰值应力增大,指示两者具有正相关关系。随着黏土矿物含量的增加,页岩塑性增强,岩石强度降低。随着围压的增加,页岩中的裂缝逐渐闭合、孔隙变形收缩、孔隙度减小,围压越大,压缩越严重。页岩在破坏过程中主要发育矿物颗粒边界裂缝和矿物颗粒内部裂缝两种裂缝。对于力学性质相近的页岩,随着围压的增大,页岩从矿物颗粒边界裂缝占主导演变为矿物颗粒内部裂缝占主导。围压增大导致矿物颗粒内部和颗粒边界裂缝向破碎带演变,页岩发育更多的裂缝。

关键词:微观破裂机理;裂缝;岩石力学;页岩;龙马溪组;志留系;川南地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Mechanical properties of the Silurian Longmaxi Formation shale, southern Sichuan Basin and its microfracturing mechanisms

GONG Xun^{1,2}, JIN Zhijun^{1,2}, MA Xinhua^{1,3,4}, LIU Yuyang^{3,4}, LI Guanfang⁵, MIU Huan⁶

[1. Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 4. National Energy Shale Gas R&D (Experiment) Center, Langfang, Hebei 065007, China; 5. Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 6. Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: To reveal the mechanical properties and microfracturing mechanisms of shales, we investigate shales in the Silurian Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin using X-ray diffraction (XRD) analysis, together with triaxial compression, micro-computed tomography (micro-CT) and scanning electron microscopy (SEM) tests. The results indicate that the mechanical properties and reservoir physical properties of shale are significantly influenced by its mineral composition and confining pressure. Specifically, an increase in the brittle mineral content enhances its elastic modulus and peak stress, indicating positive correlations between these mechanical properties and the brittle mineral content. In contrast, higher clay mineral content increases the shale plasticity while reducing its rock strength. As confining pressure increases, fractures in the shale gradually close, and the pores deform and contract, leading to reduced porosity. A higher confining pressure results in greater compression. Two dominant types of fractures form during shale damage: boundary fractures occurring at interfaces between mineral grains and internal fractures occurring within grains. For shales with similar mechanical properties, increasing confining pressure shifts their dominant fracture type from boundary to internal fractures. Additionally, higher confining pressure causes the boundary and internal fractures to evolve into fracture zones, leading to an increased fracture density in the shale.

Key words: microfracturing mechanism, fracture, rock mechanics, shale, Longmaxi Formation, Silurian, southern Sichuan Basin

收稿日期:2024-04-08;修回日期:2024-09-06。

第一作者简介:龚训(1996—),男,博士研究生,非常规油气储层改造。E-mail: 2201110675@stu.pku.edu.cn。

通信作者简介:金之钧(1957—),男,中国科学院院士,石油地质理论和能源战略研究。E-mail: jinzj1957@pku.edu.cn。

基金项目:中国石油基础性前瞻性课题(2021DJ2005, 2022DJ8004, 2024DJ87)。

引用格式:龚训,金之钧,马新华,等.川南地区志留系龙马溪组页岩力学性质及微观破裂机理[J].石油与天然气地质,2024,45(5):1447-1455. DOI: 10.11743/ogg20240517.

GONG Xun, JIN Zhijun, MA Xinhua, et al. Mechanical properties of the Silurian Longmaxi Formation shale, southern Sichuan Basin and its microfracturing mechanisms[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1447-1455. DOI: 10.11743/ogg20240517.

中国拥有丰富的页岩气资源,主要分布在四川盆地和鄂尔多斯盆地。其中,四川盆地是中国页岩气商业化开发最为成功的区域,盆地内部的奥陶系五峰组和志留系龙马溪组页岩则成为了主力页岩气开发层系。经历十余年的勘探开发,目前,在四川盆地已建成长宁、威远、涪陵和昭通等国家级页岩气示范区,并在页岩埋深小于3 500 m的范围内建立了一套适配于中国地质条件的页岩气勘探开发理论体系和开采技术,实现了埋深3 500 m以浅海相页岩气的规模效益开发^[1-5]。其中,储层改造工艺作为页岩气开发过程的重要一环,对页岩气的产量具有决定作用。为尽可能提高储层改造效果、实现页岩气产量的最大化,首先需要查明页岩的储层物性、力学性质和破裂机理等基础性能,然后选择适配的压裂改造工艺。

目前,针对四川盆地五峰组-龙马溪组页岩,学者们利用一系列的力学实验,并将其与微米CT、纳米CT和扫描电镜等微观结构表征技术进行联用,由此揭示页岩的力学性质和微观破裂机理,实现了页岩的宏观破坏和微观破裂机理的结合。孙川翔等^[6]通过对取自四川盆地龙马溪组的页岩在不同围压和温度下进行孔-渗实验和三轴压缩实验,发现页岩在高温高压耦合作用下,其孔隙度和渗透率会逐渐减小,而强度和峰值应变等力学性质则有所增加。李庆辉等^[7]通过对龙马溪组页岩开展一系列的岩石力学实验,发现岩石强度等力学参数的大小与围压和岩石物质组成相关。Liu等^[8]通过对取自四川盆地龙马溪组的页岩在不同层理倾角下进行单轴压缩实验,发现岩石力学性质与层理倾角大小相关。刘俊新等^[9]通过对不同加载速率和围压下的龙马溪组页岩进行三轴压缩实验,探究了围压和荷载速率对岩石弹性模量和强度等力学性质的影响。除了探究岩石力学性质的影响因素外,学者们还利用微观结构表征技术,以获取岩石破裂过程内部裂纹的演化规律。Liu等^[10]对不同胶结强度的砂砾岩和砂岩进行三点弯曲试验,发现岩石破裂过程裂缝的扩展受到岩石胶结强度控制。王春萍和Zhou等^[11-12]通过对花岗岩进行单轴压缩实验和CT扫描测试,探究了花岗岩在单轴荷载下的损伤特征,发现岩石损伤程度随着轴向应力的增大而逐渐增加,且岩石中预先存在的裂隙会对岩石力学强度产生破坏作用。衡帅和韩

兵等^[13-14]通过对页岩进行一系列力学实验,得出页岩层理和受力条件对岩石破裂过程中裂缝的扩展起控制作用。Zhao和Duan等^[15-16]通过将单轴压缩和CT扫描实验联用,对页岩破裂过程中内部裂纹的演化进行了定量分析。以上学者针对岩石强度的影响因素及其破裂过程内部裂纹的演化规律开展了大量研究。但是,这些研究要么局限在宏观破裂尺度,要么局限在微米尺度^[17-20],并未在矿物成分尺度下将裂缝演化和宏观破裂进行结合,导致对页岩储层微观破裂机理认识不清。

为揭示页岩储层微观破裂机理,选取四川盆地南部(川南)长宁地区双河镇采石场龙马溪组露头岩样,通过开展矿物组分分析及不同围压下的三轴压缩实验,并结合微米CT扫描实验和扫描电镜测试,同时联合其矿物组分特征,探究不同围压下页岩储层力学性质,并将其宏观破裂与微米尺度裂纹及矿物成分尺度破裂相结合,建立宏观破裂和微观破裂的联系,从而揭示页岩微观破裂机理,并为后期页岩储层压裂设计与优化提供指导。

1 样品与实验

1.1 样品信息

实验样品取自四川盆地长宁地区双河镇采石场龙马溪组黑色硅质页岩露头。首先将页岩切割成边长为300 mm的立方体岩样(图1a),再将其切割成长、宽、高依次为300, 70和120 mm的长方体岩样(图1b);然后利用线切割在长方体样品中钻取5个直径为50 mm、高为120 mm的圆柱样(图1c),并将其端面打磨,最终获得直径为50 mm、高为100 mm的圆柱样(图1d),用于单轴压缩实验。接着将单轴压缩实验后的页岩样品进行钻取,获得5个直径为25 mm、高为100 mm的圆柱样(图1e);由于样品经过破碎,因此基于该样品,制取了5个直径为25 mm、高为10 mm的圆柱样(图1f),然后对该样品进行微米CT扫描和扫描电镜观测。最后,从破碎的页岩样品中取出一部分,按实验要求研磨成粉末状,且粒度均匀(过200目筛子),手摸面粉质感,无颗粒感,每份制取5 g,以保证实验用量需求,共计5份。

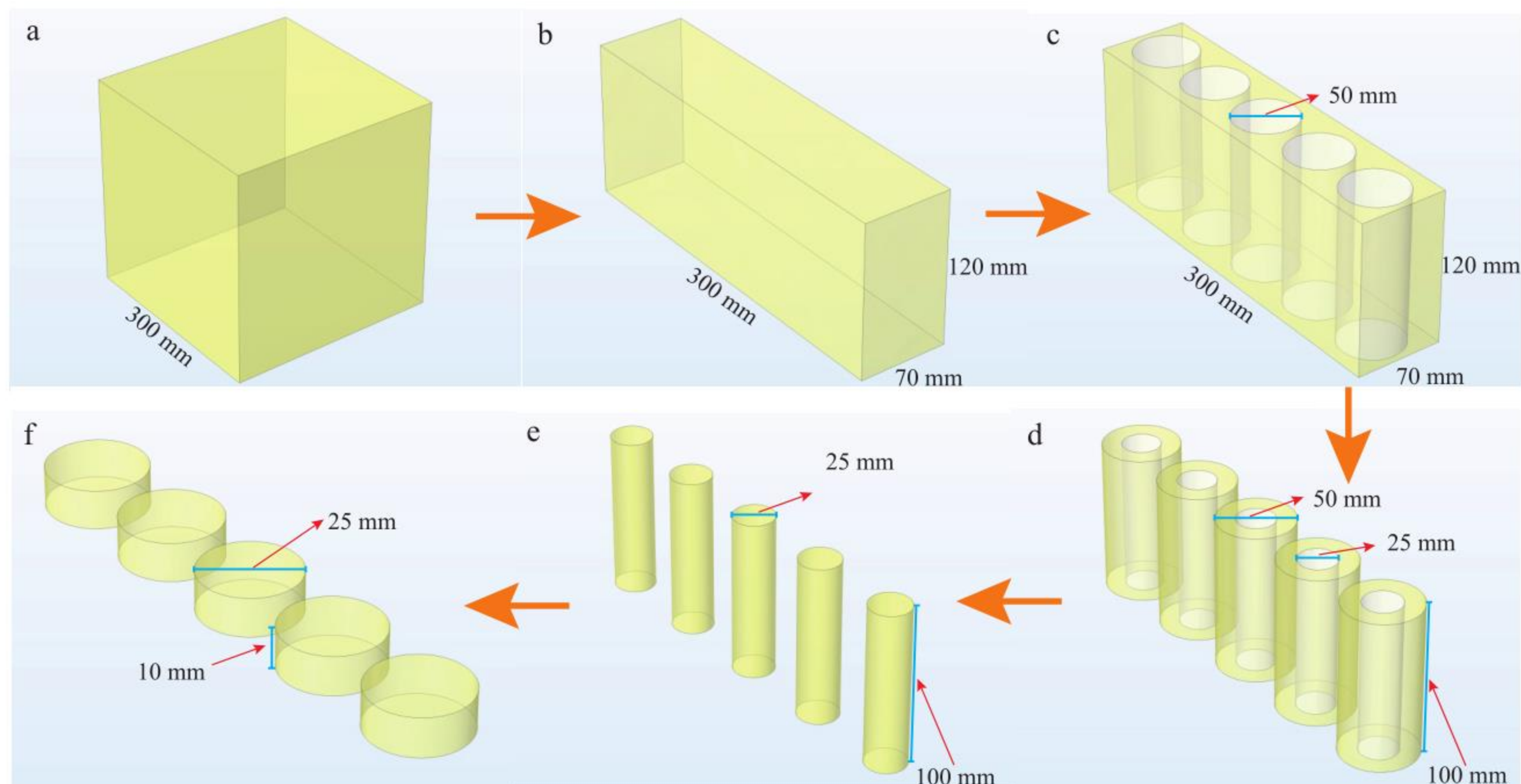


图1 实验样品制备过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the preparation of experimental shale samples

a—f. 分别为不同阶段样品形态示意图

1.2 实验方法

岩样制备完成后,首先利用MTS815岩石力学特性实验机对1-1,1-2,1-3,1-4和1-5共计5个页岩样品进行三轴压缩实验,施加的围压依次为15,15,15,20和25 MPa,获取页岩的应力-应变曲线,并得出页岩的宏观破坏特征。其次,对三轴压缩实验后的岩样中钻取的直径为25 mm、厚度为10 mm的圆柱试样开展微米CT扫描和扫描电镜实验,获取微观下页岩的微裂缝及矿物破坏特征。此外,还利用X射线衍射仪对其开展矿物成分分析,由此明确不同页岩的矿物组成。以上实验都在中国石油勘探开发研究院完成。

2 页岩力学性质特征

2.1 矿物成分分析

对5个页岩样品进行了矿物成分分析,数据显示该页岩主要由石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿和黏土矿物构成(图2)。其中方解石所占比例最大,相对含量为41.2%~48.2%,均值为45.9%;其次是黏土矿物,相对含量为24.6%~29.9%,均值为26.9%;石英相对含量介于15.0%~19.4%,均值为17.2%;长石、白云石和黄铁矿的含量较少。此外,5个样品中,石英和黏土矿物含量依次逐渐减少,方解石和长石所占比例逐渐增加,白云石矿物含量的变化较小。

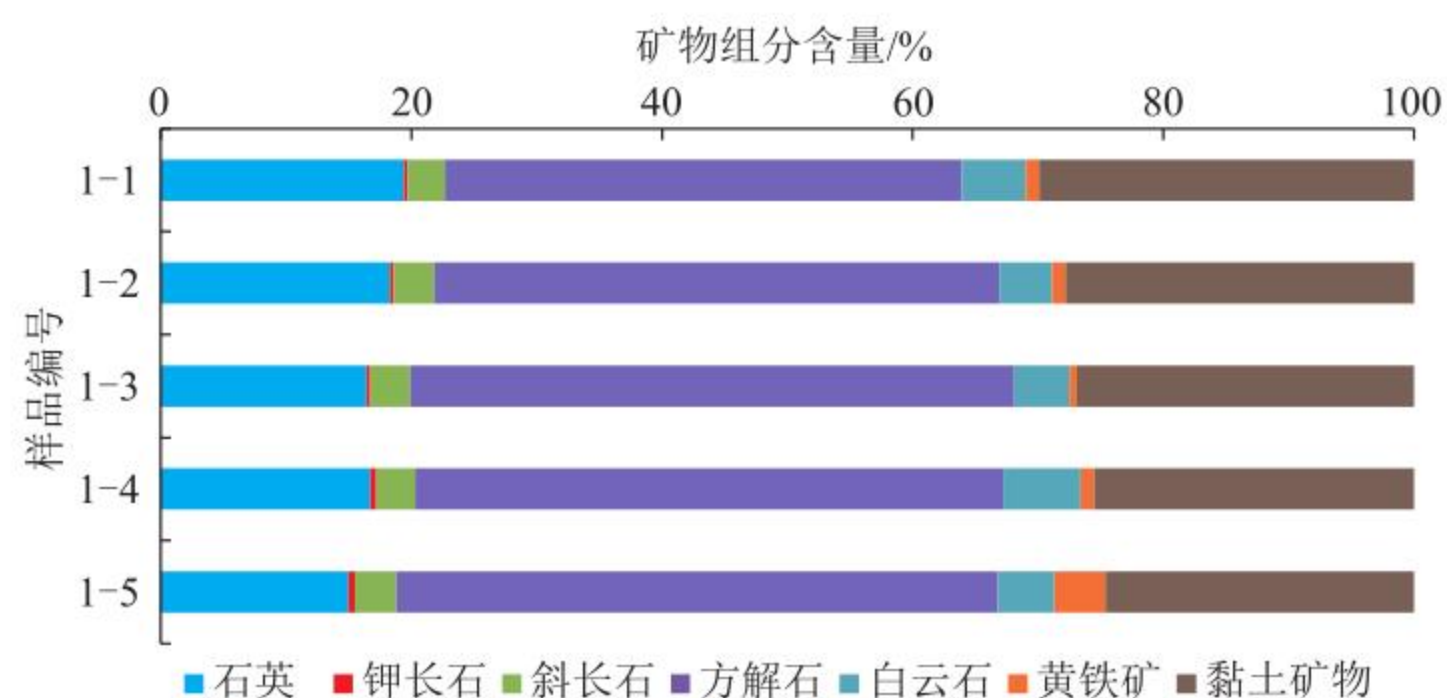


图2 川南地区龙马溪组页岩矿物组分含量

Fig. 2 Mineral component content of the Longmaxi Formation shale, southern Sichuan Basin

2.2 岩石力学参数分析

在三轴压缩过程中,页岩样品随着围压的增大逐渐由脆性向塑性转化,根据岩石的应力-应变曲线将其划分为4个阶段:①压密阶段(应变<0.2%),应力缓缓增加,曲线向上凹,岩样内部的裂隙逐渐闭合,并产生非线性变形;②弹性变形阶段(应变=0.2%~0.4%),曲线近似直线,应力-应变呈线性关系;③弹塑性变形阶段(应变=0.4%~0.8%),随着应力的持续增加,曲线发生偏离,应变软化逐渐增强,此时岩石内部产生破裂,但破裂程度并不明显;④峰后破坏阶段(应变>0.8%),应力增至峰值后,随着应变的增加逐渐减小,逐渐失去承载能力(图3)。同时,随着围压的增加,岩样中裂缝闭合,孔隙进一步变形缩小,岩样变得更加致密,导致压密阶段时间变短、弹性变形阶段持

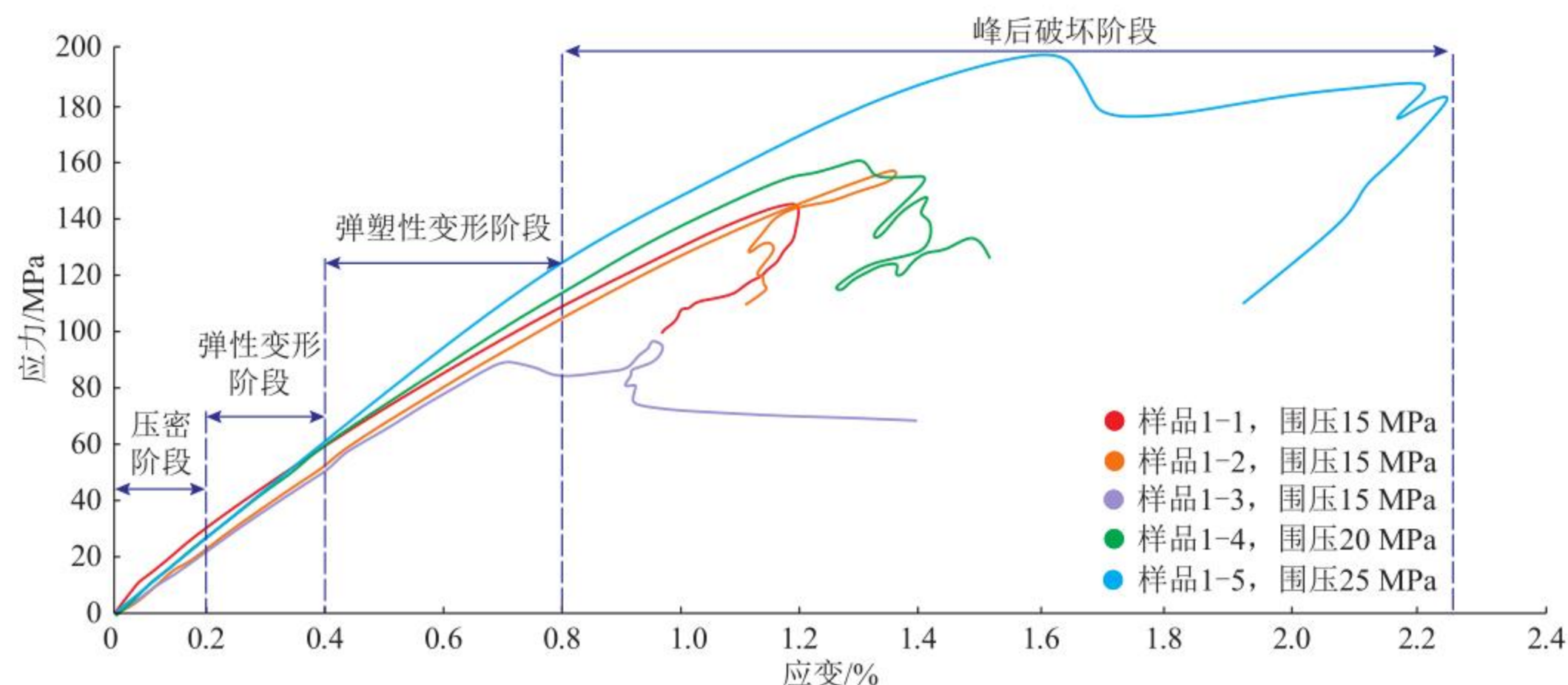


图3 川南地区龙马溪组页岩样品应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of the Longmaxi Formation shale samples, southern Sichuan Basin

续时间延长、塑性变形发生时间靠后。此外,随着围压的增加,岩样的峰值应力和轴向应变增大。

根据三轴压缩实验获取的应力-应变数据,选取图3中弹性变形阶段的数值,并利用最小二乘法对其进行拟合,从而求得各样品的力学参数(表1)。研究发现,对于取自相同位置且施加相同围压的样品1-1,1-2和1-3,其峰值应力和峰值应变均表现出先增大后减小的趋势,且减小的程度逐渐较大。整体变化趋势较大,峰值应力和峰值应变平均增长率分别为15.56%和17.64%,其中样品1-3的峰值应力不到样品1-2的2/3。同时,样品1-1,1-2和1-3的弹性模量也表现出先增大后减小的趋势,但是整体变化幅度较小,特别是样品1-4和1-5的弹性模量相差很小(表1)。此外,样品1-1,1-2和1-3的泊松比展现出依次减小的趋势。

3 页岩微观破裂特征

首先对三轴压缩后的岩样进行肉眼观测(图4),发现在其两个端面和侧面产生了与层理面斜交的裂缝,且裂缝的扩展方向与轴向加载方向斜交,表明岩样在三轴压缩实验中主要受到剪切应力的作用,并发育

剪切裂缝;同时,样品1-3预先存在的裂缝在三轴压缩过程中继续扩展,且裂缝的宽度也逐渐变大,导致该岩样峰值应力较小。此外,该岩样端面还可以见到贯穿岩样的裂缝,且该裂缝与预先存在的裂缝相互连通。

之后利用微米CT扫描对三轴压缩实验的岩石样品进行了内部微观结构分析,分析结果显示,三轴压缩后5个岩样内部发育大量裂缝,且裂缝多与层理面斜交,部分裂缝甚至贯穿整个岩样,同时大的裂缝又夹杂许多相互连通的微小裂缝(图5)。进一步缩小研究尺度,对不同岩样进行扫描电镜观测,发现受压岩样的矿物组分由于挤压和剪切作用的影响而出现强烈的相互作用,并在矿物组分间的边界形成边界裂缝,矿物颗粒内部则发育粒内裂缝,且相互作用越强,产生的裂缝尺寸越大(图6)。

4 页岩力学性能影响因素

4.1 矿物组分对页岩力学性能的影响

岩石的矿物组成及其含量和成岩作用对页岩的力学性能具有决定性作用。针对成岩作用,由于实验所取样品来自同一块岩石,并在同一水平高度,且彼此相邻,因此可认为其成岩作用是相同的。因此,认为主要是页岩的矿物组成及其含量对岩石的力学性能具有较强的控制作用。通过对页岩中常见的石英、长石、黄铁矿、白云石、方解石和黏土矿物等成分进行分析,发现石英、白云石、方解石和黄铁矿具有较高的弹性模量和强度,因而本次研究将这4种矿物定为脆性矿物^[21-24]。

研究发现,脆性矿物含量的增加将有利于岩石的

表1 川南地区龙马溪组页岩样品岩石三轴力学实验测试结果
Table 1 Results of triaxial compression tests on the Longmaxi Formation shale samples, southern Sichuan Basin

样品编号	实验条件	实验结果			
	围压/MPa	峰值应力/ MPa	峰值应变/ %	弹性模 量/GPa	泊松比
1-1	15	145.25	1.19	14.36	0.27
1-2	15	153.60	1.36	14.43	0.25
1-3	15	96.82	0.96	14.32	0.20
1-4	20	161.35	1.31	16.47	0.21
1-5	25	193.68	1.64	16.64	0.18

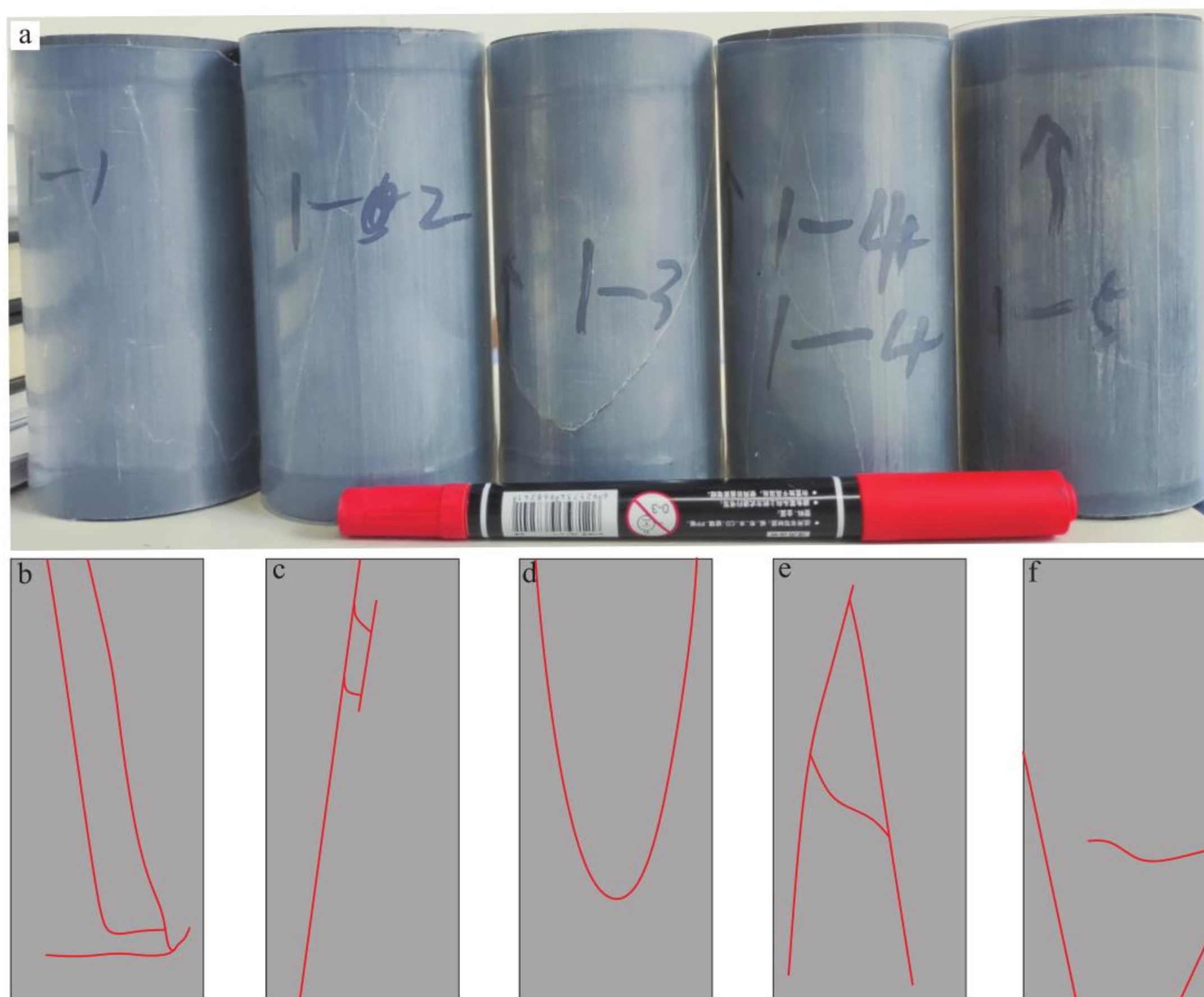


图4 川南地区龙马溪组页岩样品三轴压缩实验后岩心照片及裂缝形态

Fig. 4 Core photos and images showing the fracture morphology in the Longmaxi Formation shale samples after triaxial compression testing, southern Sichuan Basin

a. 实验后岩心照片; b—f. 样品 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 裂缝形态示意

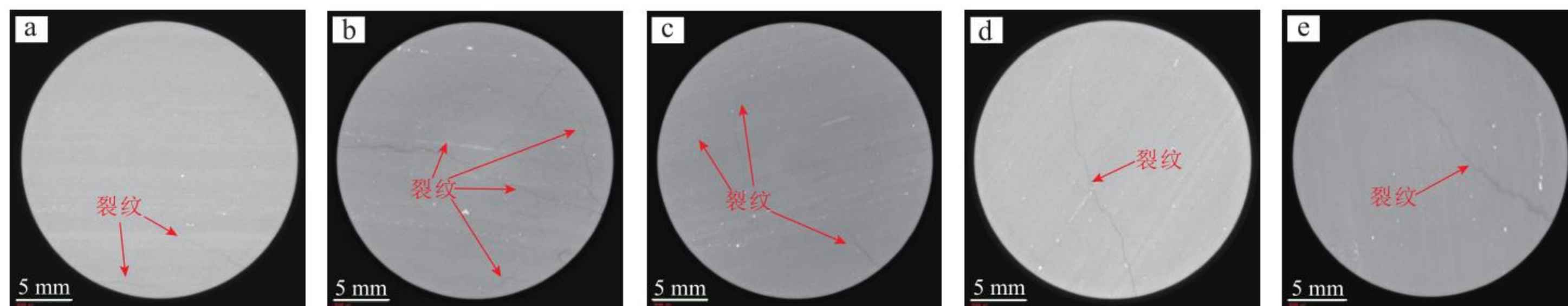


图5 川南地区龙马溪组页岩样品三轴压缩实验后微米CT扫描照片

Fig. 5 Micro-CT images of the Longmaxi Formation shale samples after triaxial compression testing, southern Sichuan Basin

a. 样品 1-1; b. 样品 1-2; c. 样品 1-3; d. 样品 1-4; e. 样品 1-5

脆性破坏,并一定程度上提高岩石的强度等力学性能;黏土矿物含量的增加将有利于增强岩石的塑性,并降低岩石强度。对样品 1-1 和 1-2 的矿物成分分析结果(图2)和应力-应变曲线(图3)进行联合分析,并结合以前的实验结果,发现样品随着黏土矿物含量逐渐减小,脆性矿物(石英、黄铁矿、白云石和方解石)和长石的含量逐渐增加,岩石弹性模量和峰值应力展现出逐渐增加的趋势;由此可知,岩石的弹性模量和峰值应力与其脆性矿物的含量具有正相关关系(图7)。分析认为是由于脆性矿物相比黏土矿物具有更高的强度和弹性模量等力学性质,进而导致脆性矿物含量高的岩石

其强度等力学性质也较大。

4.2 围压对页岩力学性能的影响

岩石所受围压对储层岩石的力学性能具有重要影响。前人研究结果表明,地下储层岩石所受围压随着储层岩石埋深增加而不断增大^[25-30]。根据本次三轴压缩实验数据,选取样品 1-1, 1-4 和 1-5,其所预设围压依次为 15, 20 和 25 MPa,同时结合以前实验结果,可以发现,随着围压的增加,岩石的峰值应力和弹性模量也是逐渐增大的(图8)。由此认为岩石弹性模量和峰值应力与围压呈正相关关系。究其原因,围压的增加会

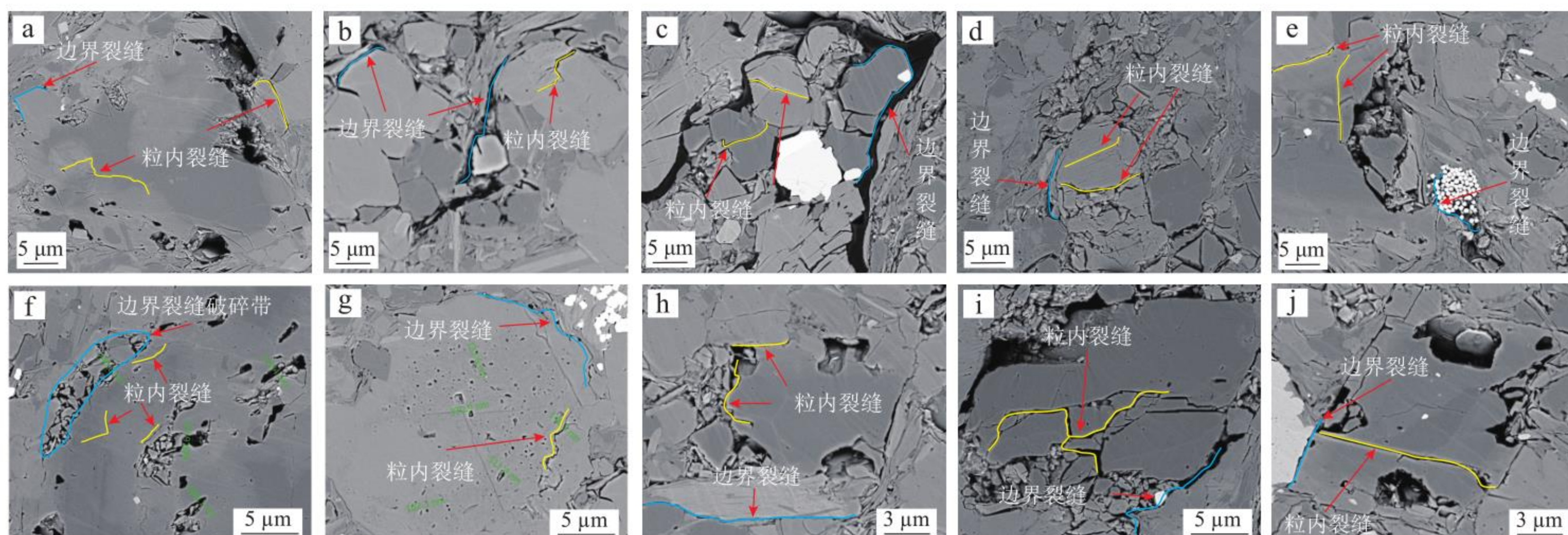


图6 川南地区龙马溪组页岩样品三轴压缩实验后扫描电镜照片

Fig. 6 SEM images of the Longmaxi Formation shale samples after triaxial compression testing, southern Sichuan Basin

a, f. 样品 1-1; b, g. 样品 1-2; c, h. 样品 1-3; d, i. 样品 1-4; e, j. 样品 1-5

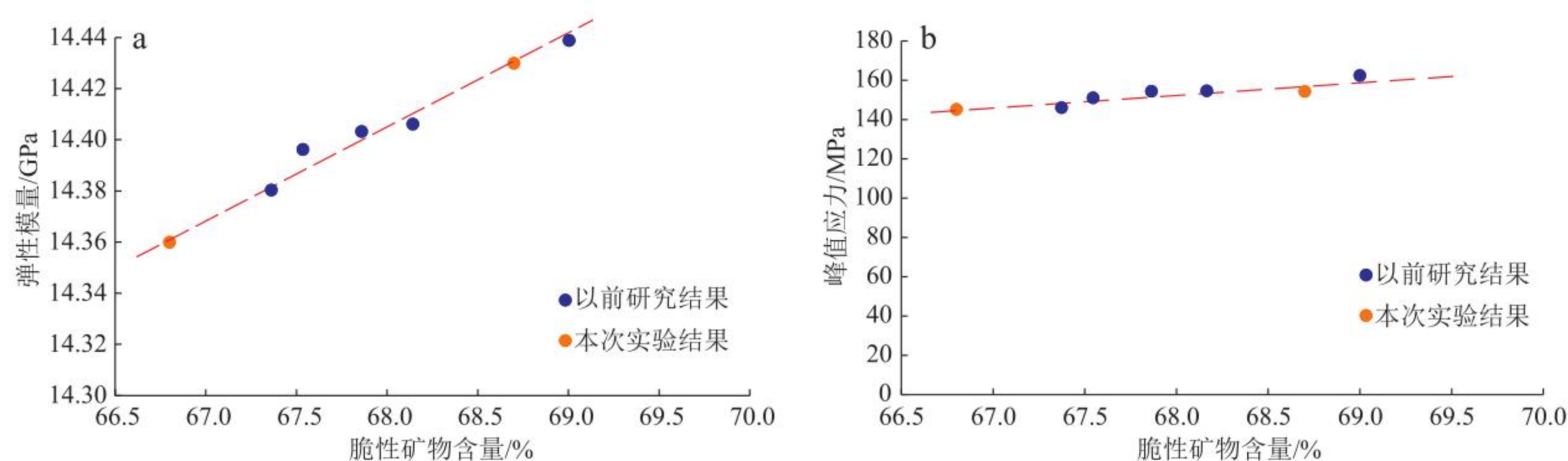


图7 川南地区龙马溪组页岩样品岩石力学性质与脆性矿物含量关系

Fig. 7 Mechanical properties vs. brittle mineral content of the Longmaxi Formation shale samples, southern Sichuan Basin

a. 弹性模量 vs. 脆性矿物含量; b. 峰值应力 vs. 脆性矿物含量

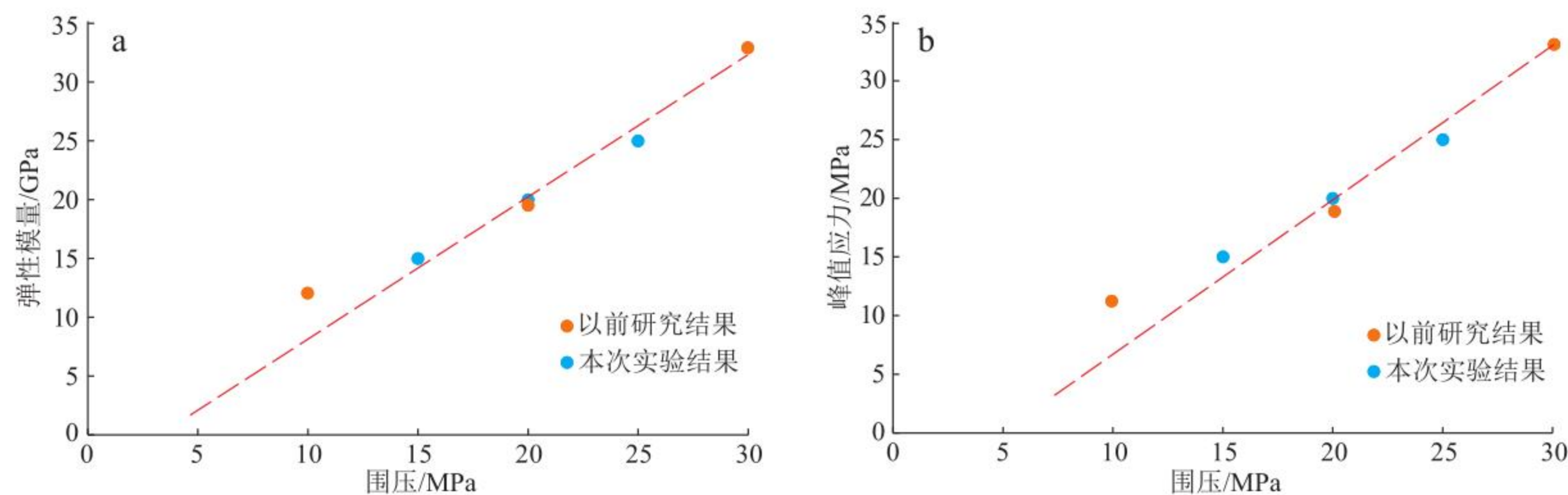


图8 川南地区龙马溪组页岩样品岩石力学性质与围压关系

Fig. 8 Mechanical properties vs. confining pressure of the Longmaxi Formation shale samples, southern Sichuan Basin

a. 弹性模量 vs. 围压; b. 峰值应力 vs. 围压

导致页岩处于压缩状态,岩石内部的裂纹闭合,孔隙度减小,且围压越大,压缩越严重。孔隙和裂纹是岩石内部的应力集中区域,当围压增大至一定值时,部分裂纹和孔隙由于到达其强度极限值而破碎,从而削弱岩石强度。但是,这些破碎的裂纹和孔隙所占比例较小,且破碎后受到围压的作用还会继续缩小,由此循环往复,

最终导致岩石密度增大,由此增强了岩石的密度和强度等性质^[31-39]。因此,埋深越大的页岩储层,其所受到围压也越大,岩石中发育的裂纹和层理结构等不连续面处于闭合状态的占比也越大,页岩变得越致密,导致其强度和破裂压力等参数增大,由此给储层改造施工带来难题。

5 岩石微观破裂机理

从单轴压缩实验后的岩样中选取表面结构较为完整的部分进行微米CT扫描和扫描电镜观测,从微观角度揭示岩样的破裂机理,并将其与宏观破坏相结合,由此实现岩石宏观破坏与微观破裂的结合。

通过扫描电镜对5个岩样进行观测,进一步缩小研究尺度。对于相同围压下的样品1-1,1-2和1-3,可以发现其矿物颗粒内部发育的裂缝(粒内裂缝)较少,而矿物颗粒边界处裂缝(边界裂缝)相对更加发育(图6a—c,f—h)。分析认为当围压较小且弹性模量相差不大时,随着轴向压力的增大,页岩矿物颗粒间的相互挤压作用(简称相互作用)增强,矿物颗粒边界强度小于矿物颗粒自身,因此易在矿物颗粒边界发育裂缝;当颗粒间的相互作用进一步增强时,颗粒内部也开始发育裂缝,且相互作用越强,颗粒内部裂缝越发育。

对样品1-1,1-4和1-5进行分析,发现随着围压的增加,页岩的弹性模量和峰值应力也逐渐增大,页岩破坏后其矿物颗粒边界和内部发育更多的裂缝,局部还可见破碎带,表明页岩的破坏程度较高(图6d,e,i,j)。分析认为这是由于本次研究的岩样取自同一块岩石的同一高度,因此页岩的弹性模量和峰值应力等力学性质相似。当围压增大时,矿物颗粒间的相互作用逐渐增强,当作用强度超过矿物极限强度时,矿物颗粒边界和内部逐渐发育微裂纹,岩石开始发生破坏,且页岩的破坏程度将随着荷载的持续增加而逐渐加剧。因此,当岩石力学性质相近时,围压的增加虽然能够进一步增强页岩的弹性模量和峰值应力等力学性质,但是微观结构上,矿物颗粒间的相互作用也增强,导致在破坏过程中岩石矿物颗粒边界和内部发育较多的裂缝,且形成破碎带,页岩破坏也更加彻底。即围压增大,页岩的弹性模量和峰值应力逐渐增加,矿物颗粒更易趋于极限强度,进而导致破坏过程中岩石内部发育更多的裂纹。

由此认为当页岩力学强度相似时,其微观破坏机理为:首先矿物颗粒间的相互作用导致矿物颗粒边界发育裂缝;随着外力的增加,边界裂缝进一步发育;当矿物颗粒间的相互作用增强到矿物颗粒的强度时,矿物颗粒内部开始发育裂缝。随着外力的继续增大,矿物颗粒内部和边界发育的裂缝逐渐转变为破碎带,导致页岩在宏观上发育更多的裂缝,且页岩的破碎程度更加彻底。

6 结 论

1) 页岩的弹性模量和峰值应力与其脆性矿物的含量呈正比,与其内部发育的裂纹等缺陷呈反比。

2) 页岩在破坏过程中主要发育矿物颗粒边界裂缝和矿物颗粒内部裂缝两种裂缝。

3) 当页岩力学性质相近时,随着围压的增加,岩石的弹性模量和峰值应力逐渐增大,矿物颗粒逐渐趋于极限强度,且微观破坏具有从矿物颗粒边界裂缝占主导转变为矿物颗粒内部裂缝占主导,且围压越大,页岩矿物颗粒内部及边界裂缝逐渐向着破碎带演变,导致页岩在宏观上发育更多的裂缝,并加剧页岩的破坏程度。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,赵群,丛连铸,等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [2] 马新华,张晓伟,熊伟,等. 中国页岩气发展前景及挑战[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 491-501.
MA Xinhua, ZHANG Xiaowei, XIONG Wei, et al. Prospects and challenges of shale gas development in China [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 491-501.
- [3] 马新华. 四川盆地南部页岩气富集规律与规模有效开发探索[J]. 天然气工业, 2018, 38(10): 1-10.
MA Xinhua. Enrichment laws and scale effective development of shale gas in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 1-10.
- [4] 金之钧,白振瑞,高波,等. 中国迎来页岩油气革命了吗?[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451-458.
JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution?[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451-458.
- [5] 王红岩,周尚文,赵群,等. 川南地区深层页岩气富集特征、勘探开发进展及展望[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1430-1441.
WANG Hongyan, ZHOU Shangwen, ZHAO Qun, et al. Enrichment characteristics, exploration and exploitation progress, and prospects of deep shale gas in the southern Sichuan Basin, China[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1430-1441.
- [6] 孙川翔,聂海宽,苏海琨,等. 温压耦合作用下四川盆地深层龙马溪组页岩孔渗和岩石力学特征[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 77-88.
SUN Chuanxiang, NIE Haikuan, SU Haikun, et al. Porosity, permeability and rock mechanics of Lower Silurian Longmaxi Formation deep shale under temperature-pressure coupling in the Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and

- Development, 2023, 50(1): 77–88.
- [7] 李庆辉, 李少轩, 刘伟洲. 深层页岩气储层岩石力学特性及对压裂改造的影响[J]. 特种油气藏, 2021, 28(3): 130–138.
LI Qinghui, LI Shaoxuan, LIU Weizhou. Rock mechanical properties of deep shale gas reservoirs and their influence on fracturing stimulation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(3): 130–138.
- [8] LIU Yang, CHEN Congrui, MA Tianshou, et al. Experimental investigation on the initiation of hydraulic fractures from a simulated wellbore in laminated shale [J]. Lithosphere, 2021, 2021(Special 4): 4152918.
- [9] 刘俊新, 张可, 刘伟, 等. 不同围压及应变速率下页岩变形及破损特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊1): 43–52.
LIU Junxin, ZHANG Ke, LIU Wei, et al. Experimental study of mechanical behaviours of shale under different confining pressures and different strain rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 43–52.
- [10] LIU Jiantong, GE Hongkui, XUE Xianjie, et al. Study on fracture development in glutenite reservoir [C]//56th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Santa Fe, 2022. Westminster, CO: American Rock Mechanics Association, 2022: ARMA-2022-0009.
- [11] 王春萍, 王璐, 刘建锋, 等. 单轴压缩条件下单裂隙花岗岩力学特性及破坏特征[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(2): 369–376, 446.
WANG Chunping, WANG Lu, LIU Jianfeng, et al. Mechanical properties and failure characteristics of granite intersected with single fractures under uniaxial compression [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(2): 369–376, 446.
- [12] ZHOU Tao, HAN Dongya, ZHU Jianbo. An experimental study of damage evolution in granite under compression and its influence on wave propagation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(5): 3413–3427.
- [13] 衡帅, 刘晓, 李贤忠, 等. 张拉作用下页岩裂缝扩展演化机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2031–2044.
HENG Shuai, LIU Xiao, LI Xianzhong, et al. Study on the fracture propagation mechanisms of shale under tension [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2031–2044.
- [14] 韩兵, 杨宏伟. 不同围压下页岩三轴压缩声发射能量分布特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 90–95.
HAN Bing, YANG Hongwei. Study on distribution characteristics of shale triaxial compression acoustic emission energy under different confining pressures [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 90–95.
- [15] ZHAO Yu, ZHANG Yongfa, YANG Haiqing, et al. Experimental study on relationship between fracture propagation and pumping parameters under constant pressure injection conditions[J]. Fuel, 2022, 307: 121789.
- [16] DUAN Yongting, LI Xiao, ZHENG Bo, et al. Cracking evolution and failure characteristics of longmaxi shale under uniaxial compression using real-time computed tomography scanning [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(9): 3003–3015.
- [17] DUAN Yongting, LI Xiao, HE Jianming, et al. Quantitative analysis of meso-damage evolution for shale under in situ uniaxial compression conditions[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(4): 154.
- [18] 唐摩天, 邬忠虎, 王安礼, 等. 不同围压下页岩微观破裂过程与量化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2): 438–445, 457.
TANG Matian, WU Zhonghu, WANG Anli, et al. Microscopic fracture process and quantitative study of shale under different confining pressures [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(2): 438–445, 457.
- [19] 柴金飞, 吴顺川, 高永涛, 等. 基于矩张量P-T图的岩石单轴压缩破裂机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3): 500–506.
CHAI Jinfei, WU Shunchuan, GAO Yongtao, et al. Rock failure mechanism under uniaxial compression condition based on P–T diagram of moment tensors [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(3): 500–506.
- [20] LIU Xiuyang, XU Dingping, LI Shaojun, et al. An insight into the mechanical and fracture characterization of minerals and mineral interfaces in granite using nanoindentation and micro X-ray computed tomography [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(5): 3359–3375.
- [21] 张晨晨, 刘滋, 董大忠, 等. 深层海相页岩脆性特征分析与表征[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(5): 555–563.
ZHANG Chenchen, LIU Zi, DONG Dazhong, et al. Brittleness analysis and characterization of deep marine shales [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(5): 555–563.
- [22] 曹丹平, 韩金鑫, 肖竣夫, 等. 弹性特征约束下的矿物成分页岩脆性评价方法研究[J]. 地球物理学报, 2023, 66(11): 4781–4791.
CAO Danping, HAN Jinxin, XIAO Junfu, et al. Method for evaluating the brittleness of shale minerals under the constraints of elastic characteristics [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(11): 4781–4791.
- [23] 崔春兰, 董振国, 吴德山. 湖南保靖区块龙马溪组岩石力学特征及可压性评价[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(5): 626–634.
CUI Chunlan, DONG Zhenguo, WU Deshan. Rock mechanics study and fracability evaluation for Longmaxi Formation of Baojing block in Hunan Province [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(5): 626–634.
- [24] 赖富强, 刘粤蛟, 张海杰, 等. 基于数字岩心模拟的深层页岩气储层可压性评价模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 1–11.
LAI Fuqiang, LIU Yuejiao, ZHANG Haijie, et al. Fracturing properties model of deep shale gas reservoir based on digital core simulation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(5): 1–11.
- [25] 王磊, 邹鹏, 谢广祥, 等. 深部原位应力煤岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12): 2876–2887.
WANG Lei, ZOU Peng, XIE Guangxiang, et al. Experimental study on unloading mechanical properties of deep coal under in-situ stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(12): 2876–2887.
- [26] 张旭龙, 张盛, 王龙飞, 等. 基于砂岩三轴加载过程声发射与

- 波速变化的峰前特征应力识别研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(11): 2711-2726.
- ZHANG Xulong, ZHANG Sheng, WANG Longfei, et al. Identification of pre-peak characteristic stress of sandstone under triaxial loading based on acoustic emission and wave velocity variation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(11): 2711-2726.
- [27] 郝宪杰, 杨怀翔, 张通, 等. 深部煤系储层损伤扩容点的天然裂隙与围压效应及声发射识别[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(4): 648-659.
- HAO Xianjie, YANG Huaixiang, ZHANG Tong, et al. Effect of natural fracture and confining pressure on damage-dilatancy point of deep coal measures reservoir and acoustic emission identification [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(4): 648-659.
- [28] 张培森, 许大强, 颜伟, 等. 不同围压下峰后循环载荷对砂岩力学及渗流特性的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 94-105.
- ZHANG Peisen, XU Daqiang, YAN Wei, et al. Effect of post-peak cyclic load on mechanics and seepage characteristics of sandstone under different confining pressures [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 94-105.
- [29] 边瑞康, 孙川翔, 聂海宽, 等. 四川盆地东南部五峰组-龙马溪组深层页岩气藏类型、特征及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1515-1529.
- BIAN Ruikang, SUN Chuanxiang, NIE Haikuan, et al. Types, characteristics, and exploration targets of deep shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formations, southeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1515-1529.
- [30] 葛勋, 郭彤楼, 马永生, 等. 四川盆地东南缘林滩场地区上奥陶统五峰组-龙马溪组页岩气储层甜点预测[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 633-647.
- GE Xun, GUO Tonglou, MA Yongsheng, et al. Prediction of shale reservoir sweet spots of the Upper Ordovician Wufeng-Longmaxi formations in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 633-647.
- [31] 李恒, 杨圣奇, 孙博文, 等. 双裂隙复合岩层单轴压缩力学性质及损伤机理离散元模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(10): 4000-4014.
- LI Heng, YANG Shengqi, SUN Bowen, et al. Discrete element simulation of mechanical properties and damage mechanism of composite rock containing two fissures under uniaxial compression [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(10): 4000-4014.
- [32] 胡训健, 卞康, 刘建, 等. 离散裂隙网络对岩石力学性质和声发射特性影响的颗粒流分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊1): 542-552.
- HU Xunjian, BIAN Kang, LIU Jian, et al. Particle flow code analysis of the effect of discrete fracture network on rock mechanical properties and acoustic emission characteristics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S1): 542-552.
- [33] 李克升, 刘传孝. 梯级等幅周期循环荷载作用下双裂隙黄砂岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 1945-1958.
- LI Kesheng, LIU Chuanxiao. Experimental investigation on mechanical properties of yellow sandstone samples containing two coplanar fissures under multistage constant-amplitude-cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 1945-1958.
- [34] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 含气页岩破坏模式及力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊2): 3763-3771.
- LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental research on failure modes and mechanical behaviors of gas-bearing shale [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3763-3771.
- [35] 王濡岳, 胡宗全, 龙胜祥, 等. 四川盆地上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 353-364.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, LONG Shengxiang, et al. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 353-364.
- [36] 王鹏威, 陈筱, 刘忠宝, 等. 海相富有机质页岩储层压力预测方法——以涪陵页岩气田上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 467-476.
- WANG Pengwei, CHEN Xiao, LIU Zhongbao, et al. Reservoir pressure prediction for marine organic-rich shale: A case study of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale in Fuling shale gas field, NE Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 467-476.
- [37] 张家伟, 刘向君, 熊健, 等. 含裂缝页岩在围压下力学特性及破坏模式[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7300-7309.
- ZHANG Jiawei, LIU Xiangjun, XIONG Jian, et al. Mechanics and failure modes of fractured shale under different confining pressures [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(17): 7300-7309.
- [38] 王飞, 吴宝成, 廖凯, 等. 从闷井压力反演页岩油水平井压裂裂缝参数和地层压力[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(5): 624-629.
- WANG Fei, WU Baocheng, LIAO Kai, et al. Inversion of fracture parameters and formation pressure for fractured horizontal wells in shale oil reservoir based on soaking pressure [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(5): 624-629.
- [39] 候梦如, 梁冰, 孙维吉, 等. 矿物界面刚度对页岩水力压裂裂缝扩展规律的影响研究[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 100-107.
- HOU Mengru, LIANG Bing, SUN Weiji, et al. Influence of mineral interface stiffness on fracture propagation law of shale hydraulic fracturing [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 100-107.

(编辑 许诺)