

文章编号:2095-6134(2018)04-0561-08

简报

四川盆地南缘五峰—龙马溪组海相页岩 压缩变形试验与破裂模式研究*

徐添阳, 琚宜文[†], 黄 骋, 戚 宇, 朱洪建

(中国科学院大学地球科学学院 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049)

(2017年4月14日收稿; 2017年5月16日收修改稿)

Xu T Y, Ju Y W, Huang C, et al. Compression deformation test and rupture mode study of the marine shales from Wufeng-Longmaxi Formations in the southern margin of Sichuan Basin[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(4):561-568.

摘 要 页岩气勘探开发的关键是通过储层压裂技术形成大规模的裂隙网络,评价页岩储层可改造性是储层压裂技术的基础,岩石力学和变形特性与储层可改造性关系密切。在四川盆地南缘五峰—龙马溪组海相页岩宏微观特征观测的基础上,通过页岩单轴压缩变形试验,获得其岩石力学参数,结合所得应力—应变曲线及破裂形态分析,结果表明:页岩抗压强度和杨氏模量相对偏低、脆性特征显著;页岩具有单斜面剪切破裂及劈裂式破裂两种模式,其破裂模式决定于页岩层理和加载方向;页岩岩石力学性质与破裂模式受诸多因素影响,非均质性是最重要的影响因素。

关键词 页岩;压缩变形试验;岩石力学参数;破裂模式;四川盆地南缘

中图分类号:P618.2 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2018.04.020

Compression deformation test and rupture mode study of the marine shales from Wufeng-Longmaxi Formations in the southern margin of Sichuan Basin

XU Tianyang, JU Yiwen, HUANG Cheng, QI Yu, ZHU Hongjian

(Key Lab of Computational Geodynamics of Chinese Academy of Sciences, College of Earth Sciences,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The key to shale gas exploration and exploitation is to form a large-scale fracture network through fracturing technology. The technology is based on the friability evaluation of shale reservoirs, which is closely related to the rock mechanics and deformation characteristics. Based on the observation of the macro and micro characteristics of the marine shales from Wufeng-Longmaxi Formations in the southern margin of Sichuan Basin, we obtained its rock mechanical parameters

* 国家自然科学基金(41530315,41372213)、国家科技重大专项(2016ZX050666003, 2016ZX050666006)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05030100)资助

[†] 通信作者, E-mail: juyw03@163.com

through uniaxial compression deformation tests. By combining the stress-strain curves and analysis of rupture morphology, we obtain the results as follows. The shale shows relatively low compressive strength and Young's modulus, and has significant brittle characteristics. The shale has two rupture modes, single cant shear rupture and splitting rupture, which are decided by the bedding and loading directions. The mechanical properties and rupture modes of shale are influenced by many factors, among which the heterogeneity is the most important.

Keywords shale; compression deformation test; rock mechanical parameters; rupture mode; southern margin of Sichuan Basin

近年来,中国加快了页岩气的勘探开发步伐。页岩气(油)源储一体,页岩既是烃源岩也是良好的储层,页岩气储层具有不同于其他储层的特点。因此,页岩气储层的研究,包括储层物质组成与孔隙裂隙系统、含气性及其可改造性等的研究,是非常规油气勘探开发最重要的内容之一^[1-5]。由于页岩气储层具有低孔低渗的特点,页岩气勘探开发的关键是通过储层压裂技术形成大规模的、相互连通和稳定的裂隙网络^[6-7],而评价页岩气储层可改造性是储层压裂技术的基础。已有研究表明,页岩岩石力学性质与其储层可改造性密切相关^[8-12]。岩石力学性质主要包括两个方面:岩石变形特征和强度特征。变形特征反映岩石在外力载荷下的变形规律;岩石强度反映岩石抵抗破坏的能力和破坏规律。

页岩的岩石力学与变形试验是揭示其岩石力学行为的重要手段,可以为施工定向水平井、制定压裂方案、评估致裂裂隙走向等提供重要的力学参数^[9]。国内外许多学者对页岩岩石力学与变形特性进行了试验研究,包括:Kuila 等^[13]研究复杂应力环境引起的页岩各向异性特征,认为在高围压下所研究的页岩仍具有很高的固有各向异性特征;Eseme 等^[14]对 6 个不同地质时期不同环境形成的油页岩样进行固热耦合作用下的单轴压缩实验和高温三轴压缩实验;众多国内学者分别从不同应变速率^[15]、不同围压^[10,16-17]、不同取心方向^[17-19]等各种角度揭示页岩岩石力学与变形特性及破裂模式。然而目前,没有对页岩强度、变形或破裂的特征、规律形成全面认识,因此,进行页岩岩石力学与变形试验的研究工作具有重要意义。

本文通过野外采集四川盆地南缘五峰—龙马溪组海相页岩并进行单轴压缩变形试验,研究页岩储层的岩石力学参数,包括单轴抗压强度、杨氏模量、泊松比等,并总结分析其破裂模式,讨论页

岩储层岩石力学特性及破裂模式的影响因素,对页岩气资源的勘探开发具有重要的指导意义。

1 地质背景及页岩样品宏微观特征

样品所采区块为四川盆地南缘长宁国家级页岩气示范区及周边区域,属于四川盆地川南低陡褶皱带南侧(图 1)。川南低陡褶皱带是华蓥山断褶带向西南延伸、呈帚状撒开的雁行式低背斜群,发育 NE 向、EW 向和 SN 向 3 组构造,各组系构造之间相互影响。长宁区块虽经多期次构造运动,但下古生界总体构造格局未受明显破坏。所采样品来自该区下古生界五峰—龙马溪组海相页岩,采样地点位于长宁县双河镇附近,地质上位于背斜的北侧翼,主要出露为灰黑—黑色碳质泥页岩,页理发育,碳质含量较高,含丰富的笔石化石,可见条带状黄铁矿(图 2)。试验所用页岩样品为五峰—龙马溪组厚层块状页岩,所采为五峰组上段及龙马溪组下段,受构造作用影响较弱,无明显裂隙等变形构造发育,风化程度较弱,样品在采集、运输过程中均采取了防护措施,避免扰动产生裂隙,基本保持样品原生状态。

长宁区块页岩微观组成主要为石英、碳酸盐矿物和黏土矿物,通过扫描电镜观察,可见多种类型微—纳米级孔隙(图 3),其中有机质孔、无机矿物(黏土矿物)粒间孔及溶蚀孔 3 类较为发育,孔隙度一般为 4%~6.5%。

2 页岩压缩变形试验与结果分析

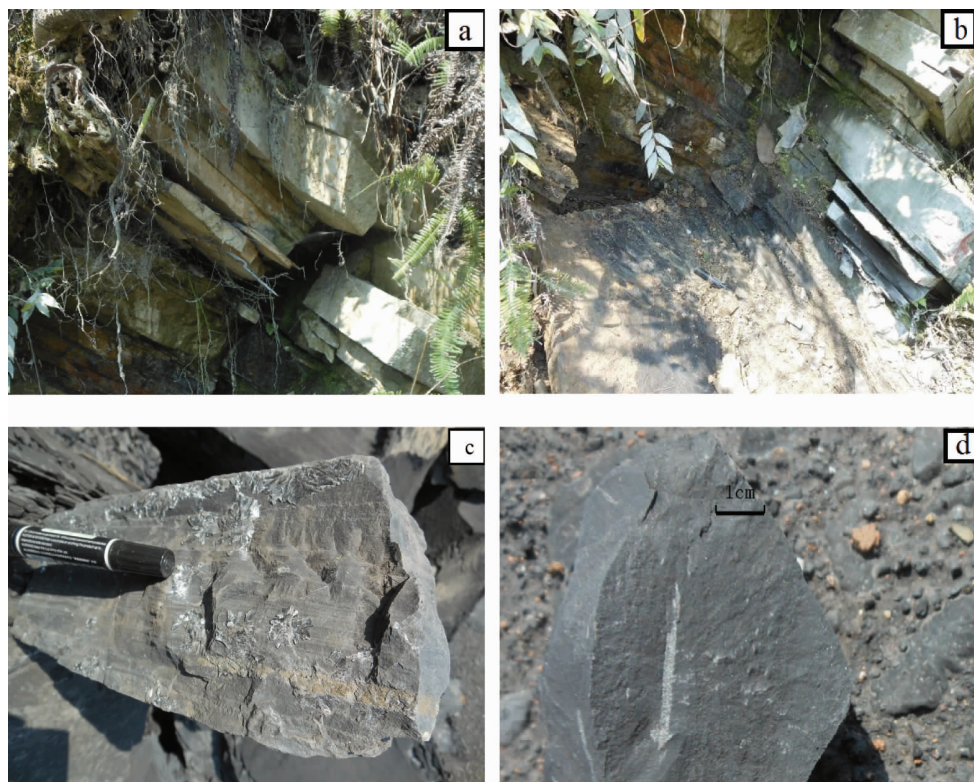
2.1 样品加工及试验方法

页岩样品加工成 $\Phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的标准圆柱体(如图 4(a)),五峰组与龙马溪组页岩各取平行、垂直层理方向两组,每组 2 个,共 8 个。样品加工情况见表 1,样品无肉眼可见的构造变形现象。将加工好的页岩立方体样品进行 100 °C 恒温加热 24 h,取出立即测量质量,经计算可得五峰



图 1 样品所采区块及采样点位置图(据文献[20])

Fig.1 Location of the sample block and sampling points(from Ref. [20])



(a) (b) 五峰—龙马溪组页岩样品采集点露头照片; (c) (d) 龙马溪组下段页岩样品照片, 可见条带状黄铁矿和笔石化石。

图 2 海相页岩露头及样品照片

Fig.2 Photos of outcrop and samples of marine shales

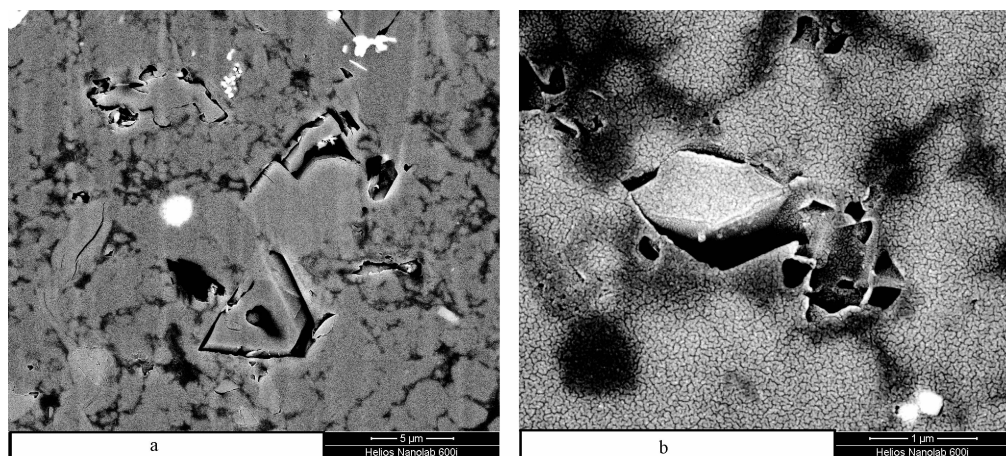


图 3 海相页岩扫描电镜图像
Fig.3 SEM images of marine shales

组页岩干密度平均为 2.232 g/cm^3 , 龙马溪组页岩干密度平均为 2.585 g/cm^3 。

样品在中南大学现代分析测试中心进行试验, 试验设备为 T 型工作台试验机(图 4(b))。依据国家标准(GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》), 单轴压缩变形试验的基本程序如下:

1) 应变片选择和粘贴: 阻值检查→位置确定(试件中部相互垂直的对称部位)→试样表面清洗处理→涂胶→贴电阻应变片→固化处理→焊接

导线→防潮处理。

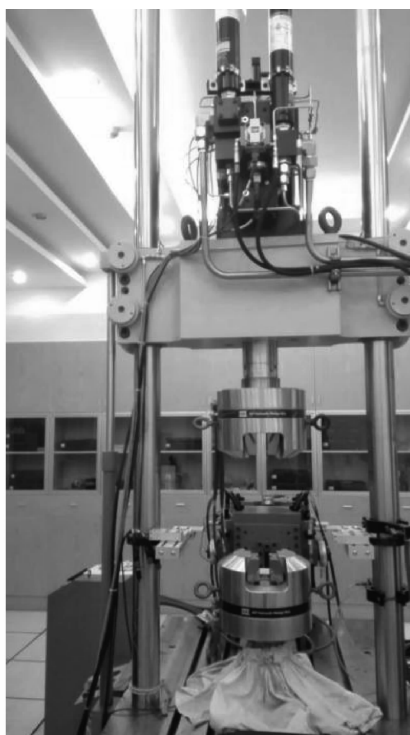
2) 核定试样编号, 连接测试导线, 将试样放置在试验机的承压板中心, 调整使试件受力均匀。

3) 施加初载荷, 检查试验机和应变片工作情况, 正常后以 1.0 MPa/s 的加载速度均匀加载, 直至试样完全破裂, 由试验设备及软件记录试验数据。试验过程中保持环境温度不变。

4) 记录试验数据并处理分析, 对试验后样品进行拍照, 并描述其破裂形式和特征。



(a) 试验样品



(b) 试验设备

图 4 试验样品及设备
Fig.4 Sample and equipment for test

表 1 样品加工情况

Table 1 Sample processing conditions

试验项目	样品层位	法向荷载 加载方向	样品编号	尺寸/ mm
页岩单轴压缩变形试验	五峰组	垂直层理	W1-1、W1-2	Φ25 × 50
		平行层理	W2-1、W2-2	
	龙马溪组	垂直层理	L1-1、L1-2	
		平行层理	L2-1、L2-2	

2.2 页岩力学与变形特性

按上述基本步骤进行四川盆地南缘五峰组及龙马溪组页岩的单轴压缩变形试验,垂直、平行层理方向各两块,其中样品 W1-1 因内部裂隙发育致裂,强度较低,且无法获得其弹性模量、泊松比等参数,试验所得的单轴岩石力学参数(表 2)及

应力-应变曲线(图 5)如下。

表 2 海相页岩单轴压缩变形试验结果

Table 2 Results of uniaxial compression deformation test of marine shales

页岩层位	荷载方向	样品 编号	单轴抗压 强度/MPa	弹性 模量/GPa	泊松比	总应变 $\times 10^{-3}$
五峰组	垂直层理	W1-1	43.1	—	—	—
		W1-2	141.8	12.69	0.34	13.53
	平行层理	W2-1	138.9	14.53	0.20	11.83
		W2-2	129.1	14.26	0.40	12.02
龙马溪组	垂直层理	L1-1	67.8	6.47	0.37	11.32
		L1-2	59.4	6.98	0.32	11.38
	平行层理	L2-1	65.5	7.61	0.40	11.19
		L2-2	56.9	7.18	0.29	10.69

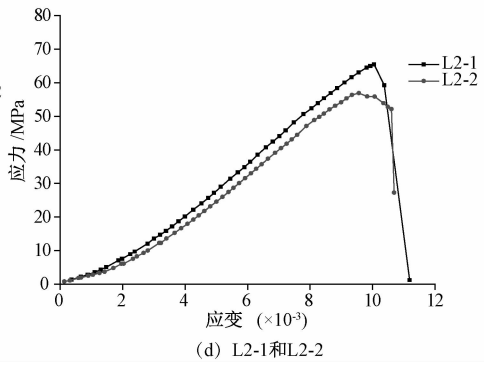
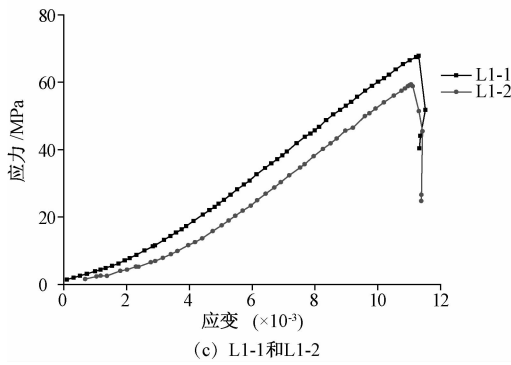
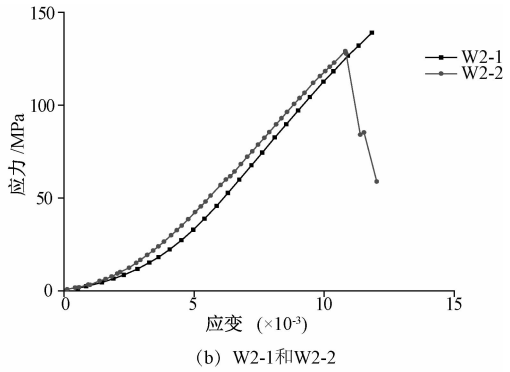
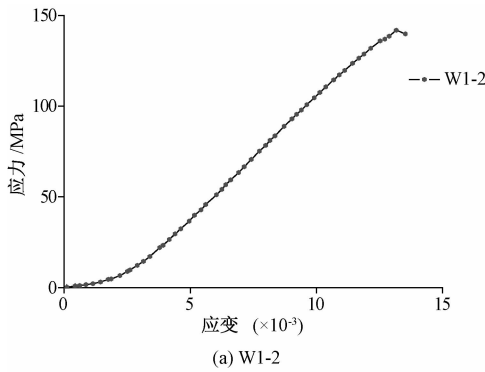


图 5 页岩单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 5 Uniaxial compressive stress-strain curves of shale

试验数据表明,五峰组页岩抗压强度平均为 136.6 MPa,弹性模量平均为 13.83 Gpa,龙马溪组页岩抗压强度平均为 62.4 MPa,弹性模量平均为 7.06 Gpa。龙马溪组页岩加工过程中可见微裂隙发育,通过 W1-1 及龙马溪组页岩样品的试验结果与五峰组其余样品比较,岩石天然裂隙的发育使页岩强度降低 50% 以上。与大量页岩单轴力学试验结果相比,五峰—龙马溪组页岩抗压强度及杨氏模量偏低。

结合单轴压缩变形应力-应变曲线(图 5)分

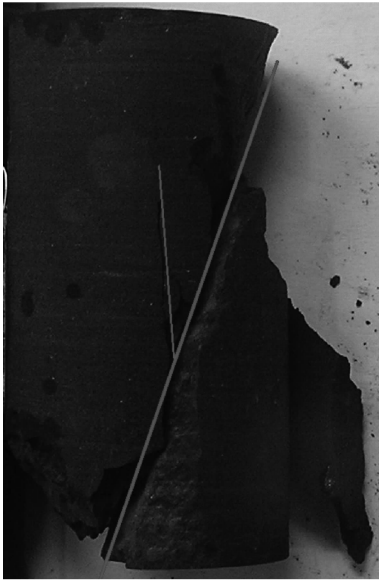
析,页岩的应力-应变曲线分为 4 个阶段:压密阶段、弹性变形阶段、弹塑性变形阶段及峰后脆性破坏阶段;五峰组与龙马溪组页岩力学性质总体上相似,应力-应变曲线中直线段较长,具有明显的弹性特性,直线段后弹塑性阶段不明显,达到峰值应力后迅速发生脆性断裂,总应变量均大于 10×10^{-3} ,脆性特征显著。

页岩单轴压缩的破裂形态如图 6 所示。试验时加载方向垂直于层理方向时,样品呈一定角度(与试件轴线夹角约 30°)破裂(图 6(a)、

6(c));当加载方向平行于层理时,样品破裂时可见数条竖向裂隙,并贯穿样品致使破裂(图 6(b)、6(d)),说明页岩的层理即非均质性对其破裂模式甚至页岩储层的压裂特征具有重要的影响。

根据本文试验结果,提出页岩两种破裂模式:单斜面剪切破裂(图 6(a)、6(c))及劈裂式破裂(图 6(b)、6(d))。页岩的破裂模式与页岩自身

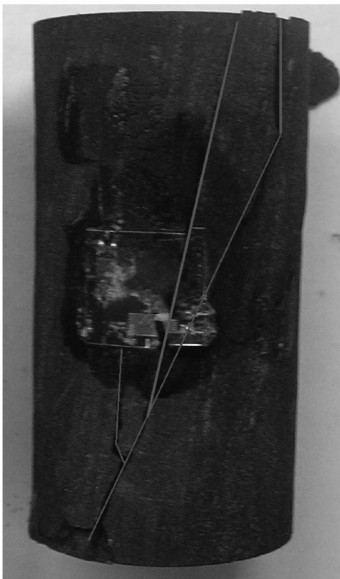
特点和加载条件有关。页岩的层理及天然裂隙是其主要薄弱面,当加载载荷平行于层理方向时,裂纹更容易沿层理萌生、扩展以至贯穿样品而发生劈裂式破裂,并产生较多裂纹;而加载载荷垂直于层理方向时,根据库伦准则的强度理论,页岩由于破裂面上的剪应力超过极限强度而发生剪切破裂,破裂面与样品轴线夹角 $\beta = \pi/4 - \varphi/2$ (φ 为页岩的内摩擦角)。



(a) 页岩W1-2



(b) 页岩W2-2



(c) 页岩L1-1



(d) 页岩L2-2

图 6 页岩单轴压缩破裂形态

Fig. 6 Rupture morphology of shale in uniaxial compression test

样品经单轴压缩变形试验破裂后较完整、破碎不完全(图 6)。根据刘俊新等^[15]的试验研究,

页岩样品破裂后的完整性取决于试验的应变速率:在较低应变速率下,样品内部应力有充分时间

随裂纹发展而重新分布,使之破裂较均匀;而在较高加载速率下,样品内部应力来不及重新分布便迅速达到岩石的强度并发生急剧破裂。李庆辉等^[16]认为页岩的非均质性越差,局部区域产生的微裂纹增多,样品越容易碎裂完全。从本文试验结果可知,五峰—龙马溪组页岩样品非均质性较好。

3 讨论

页岩气储层由于具有岩石致密、微裂缝发育、非均质性强等方面的特点,气藏产能通常与压裂形成裂隙网络的程度有关。页岩层经水力压裂后,形成的压裂裂隙会沟通页岩储层中的天然裂隙,也使原闭合裂隙重新开启并相互连通,从而形成复杂的裂缝网络。目前,对于页岩气储层可改造性的评价主要利用脆性指数及断裂韧性这两个指标,脆性指数是评价指标的核心。计算脆性指数,除利用页岩脆性矿物含量计算^[21]外,也经常使用杨氏模量和泊松比的弹性参数法来计算^[22],高杨氏模量、低泊松比的页岩具有更好的脆性。因此,进行页岩气储层的岩石力学与变形试验以获得更多的弹性参数,对于评价储层可改造性具有重要意义。此外,对页岩的破裂模式及裂纹萌生与扩展的研究也有助于揭示页岩气储层压裂裂缝的形成条件与机制,以及评价与预测储层压裂改造的效果。

要深入认识页岩的岩石力学与变形特性,还有必要讨论其影响因素。这些影响因素可归纳为3类,一是页岩的地质特征,包括页岩的矿物组成、结构及构造(结晶程度和颗粒大小、胶结情况),页岩微观上结构和构造的非均质性,主要由于沉积格局的多样性、成岩作用的复杂性及构造演化作用的多阶段性^[23-24],这是影响页岩岩石力学特性与破裂模式的本质因素;二是岩石形成后所受外部环境的影响,包括温度、压力、水及风化剥蚀作用等;三是力学试验中样品的制备及试验方法,主要是试件形状及尺寸、加载速率等。

因此,对四川盆地南缘五峰—龙马溪组海相页岩力学特性与破裂模式的深入研究,不仅要充分利用室内试验手段,研究各种影响因素下力学特性的规律,更要从微观结构及构造的角度去探讨页岩变形及破裂的机制,从非均质性方面认识其岩石力学特性与破裂模式。

4 结论

本文在宏微观特征观测的基础上,通过四川盆地南缘长宁区块五峰—龙马溪组海相页岩压缩变形试验与破裂模式研究,主要得出以下结论:

1) 页岩单轴抗压强度和弹性模量偏低、脆性特征显著,五峰组及龙马溪组页岩力学性质相似。

2) 页岩具有两种破裂模式:单斜面剪切破裂及劈裂式破裂。当作用力垂直于页岩层理时,样品呈一定角度沿最大剪切力方向发生单斜面剪切破裂;当作用力平行于页岩层理时,页岩沿薄弱面即层理方向发生劈裂式破裂。

3) 页岩岩石力学特性与破裂模式受诸多因素影响,非均质性是其中最重要的影响因素,页岩的强度参数、破裂特征均受到非均质性的影响。

4) 页岩气储层的岩石力学特性及破裂模式对页岩气勘探开发影响重大,可以为评价页岩储层可改造性及压裂效果提供重要参考。

参考文献

- [1] Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1 099-1 119.
- [2] 刘大永, 郭慧娟, 彭平安, 等. 下扬子地区下古生界页岩纳米孔隙特征及其控制因素[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 778-782.
- [3] Wang G C, Ju Y W, Han K. Early Paleozoic shale properties and gas potential evaluation in Xiuwu Basin, western Lower Yangtze Platform [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2015, 22(1): 489-497.
- [4] 朱炎铭, 王阳, 陈尚斌, 等. 页岩储层孔隙结构多尺度定性—定量综合表征: 以上扬子海相龙马溪组为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 154-163.
- [5] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1-10.
- [6] 姚军, 孙海, 黄朝琴, 等. 页岩气藏开发中的关键力学问题[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2013, 43(12): 1 527-1 547.
- [7] 苗文培, 姜汉桥, 葛洪魁, 等. 页岩气储层蠕变特性及其对页岩气开发的影响[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(4): 97-100.
- [8] Enderlin M B, Alsleben H, Beyer J A. Predicting fracability in shale reservoirs [C] // AAPG Annual Convention and Exhibition. Houston, 2011: 10-13.

- [9] Josh M, Esteban L, Delle Piane C, et al. Laboratory characterisation of shale properties[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, s 88-89(2): 107-124.
- [10] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 3 300-3 306.
- [11] 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 等. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 523-528.
- [12] 隋丽丽, 杨永明, 杨文光, 等. 胜利油田东营凹陷区页岩可压裂性评价[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(7): 1 588-1 594.
- [13] Kuila U, Dewhurst D N, Siggins A F, et al. Stress anisotropy and velocity anisotropy in low porosity shale[J]. *Tectonophysics*, 2011, 503(1): 34-44.
- [14] Esemé E, Krooss B M, Littke R. Evolution of petrophysical properties of oil shales during high-temperature compaction tests: implications for petroleum expulsion[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 31(1): 110-124.
- [15] 刘俊新, 刘伟, 杨春和, 等. 不同应变速率下泥页岩力学特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(11): 3 093-3 100.
- [16] 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(S2): 3 763-3 771.
- [17] 陈天宇, 冯夏庭, 张希巍, 等. 黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1 772-1 779.
- [18] 贾长贵, 陈军海, 郭印同, 等. 层状页岩力学特性及其破坏模式研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(S2): 57-61.
- [19] 张永泽, 刘俊新, 冒海军, 等. 单轴压缩下页岩力学特性的各向异性试验研究[J]. *金属矿山*, 2015, 44(12): 33-37.
- [20] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 775-782.
- [21] Jarvie D M, Hill R J, Ruben T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475-499.
- [22] Rickman R, Mullen M J, Petre J E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale[C] // *Spe Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*, 2008: 1-11.
- [23] 于炳松. 页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J]. *地学前缘*, 2012, 19(3): 252-258.
- [24] 据宜文, 卜红玲, 王国昌. 页岩气储层主要特征及其对储层改造的影响[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(4): 492-506.