

胜利油田罗家地区页岩储层可压性实验评价

郭海萱¹, 郭天魁²

(1. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 采油工艺研究院, 山东 东营 257000;

2. 中国石油大学(北京), 北京 102249)

摘要:页岩储层的“可压性评价”, 目前国内外尚无统一的评价方法。结合室内岩石力学和物性参数测试结果以及脆性指数计算方法, 尝试对目标储层进行可压性评价, 探索并形成较为系统的室内实验评价方法。结果显示, 页岩抗张强度、单轴抗压强度、抗剪强度和断裂韧性较砂岩和碳酸盐岩低; 垂直层理方向粘聚力大于平行层理方向, 沉积层理面胶结脆弱; 受诱导应力的作用, 平行的沉积层理(天然裂缝系)与主裂缝夹角越大, 越容易起裂。断裂韧性实验中, 当人字形切槽与沉积层理面的夹角在45°以内时, 裂缝容易沿层理面扩展; 大于45°时, 裂缝将穿过层理面扩展。综合分析表明, 该页岩储层可压性较强。

关键词:页岩; 可压性; 体积压裂; 岩石力学实验; 脆性指数

中图分类号:TE135+.3

文献标识码:A

Experimental evaluation of crushability of shale reservoirs in Luoia area, Shengli Oilfield

Guo Haixuan¹, Guo Tiankui²

(1. Production Research Institute of SINOPEC Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257000, China;

2. China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: At present, there is no unified method for crushability evaluation on shale reservoirs at home and abroad. Based on rock mechanics and physical parameter tests in laboratory as well as brittleness index calculations, a systematic evaluation method of laboratory experiment has been proposed. Compared to sandstones and carbonate rocks, the tensile strength, uniaxial compressive strength, shear strength and fracture toughness of shales are lower. Along sedimentary bedding plane, the shear strength of shales is very small and the internal cohesion of vertical bedding is greater than that of parallel bedding. The cementation of sedimentary layer (natural fracture) is very fragile, easily happening shear failure. Under the action of induced stress, the greater the angle between parallel natural fracture and main hydraulic fracture, the easier the fracture initiates. When the included angle between herringbone grooving and sedimentary layer is less than 45°, it is easy to propagate along bedding plane for fractures, but when more than 45°, it can cross the bedding plane. In the end, this shale reservoir is considered to have the conditions of crushability.

Key words: shale; crushability; stimulated reservoir volume; rock mechanics experiment; brittleness index

在页岩储层开发中, 通过对储层地化特征勘察检测, 确定某区块为优质储层之后, 需要对其开发效果进行评价, 即“可压性评价”。与常规砂岩和碳酸盐岩储层不同, 页岩储层的“可压性评价”并非指“是否适合压裂”, 而是在压裂的前提下, 评价水力裂缝网络形成的难易程度, 对能否有效开展“体积压裂”^[1-2]进行论证。“体积压裂”是指在水力压裂过程中, 在天然裂缝、沉积层理不断扩张和脆性岩石产生剪切滑移的综合作用下, 形成天然裂

缝、沉积层理与人工裂缝相互交错的裂缝网络, 实现增加改造体积、提高产量和最终采收率的目的。影响裂缝网络形态的关键因素是储层的地质条件, 如水平地应力差^[3-4]、岩石脆性^[5-8]、沉积层理和天然裂缝系统^[5,9-11], 除此之外, 也受施工参数(压裂液量^[1,12]、施工排量^[9,12-13]、压裂段间距^[9,12-13])和工艺技术(水平井分段压裂^[14]、同步压裂^[1,13]、拉链式压裂^[1,13]、重复压裂)的影响。对于页岩储层可压性评价, 目前国内外还没有统一的评价方法。

收稿日期: 2012-11-26; 修订日期: 2013-03-14。

作者简介: 郭海萱(1964—), 女, 高级工程师, 从事压裂酸化与天然气开采工作。E-mail: guo-h-x@163.com。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科研课题“胜利油田页岩油储层压裂改造技术研究”(P12128)资助。

本文总结了渤海湾盆地济阳拗陷页岩(油)气储层分布及特征,并针对罗 69 井页岩储层,基于国外远景页岩储层指标的调研,尝试结合室内岩石力学和物性参数测试以及脆性指数计算的方法,对影响缝网形态的关键因素和地质条件进行可压性评价,进一步了解页岩的岩石力学和物性特征,探索并形成较为系统的页岩储层可压性室内评价方法。同时,首次开展了垂直和平行层理方向的页岩剪切实验和人字形切槽与层理面不同夹角条件下的页岩断裂韧性实验,更好地理解页岩压裂裂缝的扩展机理。该评价方法和结论对今后页岩储层的评价有一定的指导意义。

1 济阳拗陷页岩(油)气储层分布及特征

某区块页岩储层的开发价值需要通过地化特征勘察检测来验证。济阳拗陷是中国东部具有典型意义的富油凹陷。济阳拗陷大部分油气藏的形成,与沙四上亚段、沙三下亚段及沙一下亚段 3 套高丰度的优质烃源岩密切相关。其主要烃源岩为古近系沙河街组湖相纹层状泥页岩。总体上来看,最好的烃源岩在沾化凹陷的沙一段及东营凹陷的沙四上亚段^[15]。在整个济阳拗陷沙三中一下亚段也

存在着优质的烃源岩。济阳拗陷优质烃源岩地化特征如表 1 所示。罗 69 井页岩储层位于沙三下亚段,有机碳含量高于 2%,干酪根类型较好,但热成熟度相对较低,更多为油页岩,储层厚度通常远大于 30 m^[3],油(气)资源量非常丰富,具备开发价值。

2 实验测试及结果分析

确定该区块为优质储层之后,需要对其开展“可压性评价”。水力压裂是页岩油气储层开发的必要手段,页岩储层的可压性评价应聚焦于“网状缝形成的难易”,但国内外尚未发现系统的评价方法。

影响页岩储层压裂缝网形态的 3 个地质因素中,页岩储层的水平地应力差可通过室内实验测试和现场监测等方法获取。页岩的脆性评价,目前国内外存在诸多评价方法^[3,6,16-17],通常需要开展岩石物理力学实验和计算脆性指数,不同方法评价结果也并非一致,需要综合确定。此外,岩石的脆性是储层压后形成裂缝网络的必要而非充分条件,天然裂缝系统和沉积层理分布结构也是其关键因素,因而需要对裂缝系统和沉积层理进行观测和力学性能测试。

为开展页岩储层的可压性评价,针对所取罗 69 井页岩岩心,设计了如下室内实验方案,如表 2 所示。

表 1 渤海湾盆地济阳拗陷优质烃源岩地化特征

Table 1 Geochemical characteristics of high-quality source rocks in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

层位	岩性	总有机碳含量/%	氯仿沥青“A”含量/%	干酪根类型	热演化程度 R_o /%	Pr/Ph	伽马蜡烷指数	C ₂₉ S/(S+R)	厚度/m	分布地区
沙一段	含颗石藻泥、页岩互层	3~8	0.44~1.00	I—II ₁	0.3~0.5	<0.8	0.4~0.8	<0.3	20~120	渤南
沙三下	钙质纹层、泥页岩互层	2~9	0.3~0.6	I—II ₁	0.5~0.8	>1	>0.2	0.2~0.6	80~200	主要洼陷均发育
沙四上	钙质泥页岩互层	2~6	0.3~0.8	I—II ₁	0.30~0.85	<0.6	0.6~1.0	0.3~0.5	40~120	东营凹陷

表 2 胜利油田罗家地区页岩储层可压性评价实验方案

Table 2 Experimental program on evaluation of crushability of shale reservoirs in Luoja area, Shengli Oilfield

取心构造位置	层位	实验内容	取心深度/m	测试岩心数目/块	实验目的
济阳拗陷 沾化凹陷 罗家鼻状构造带		水平地应力大小、方向	3 048.2~3 052.2	2	评价储层的水平应力差,确定井筒方位
		抗张强度	3 048.2~3 050.2	6	
		单轴抗压强度	3 046.2~3 050.2	4	
		三轴应力	3 046.2~3 050.2	5	
		平行层理方向	3 058.2~3 062.2	2	
	沙三下	抗剪强度	3 065.5~3 067.5	2	评价页岩脆性,沉积层理特征,了解裂缝扩展机理
		垂直层理方向	3 058.2~3 060.2	2	
			3 067.5~3 069.5	1	
		断裂韧性	第一组 3 058.2~3 060.2	4	
			第二组 3 067.5~3 069.5	4	
		全岩和粘土矿物分析	3 042.95~3 062.2	3	
		电镜扫描	3 048.2~3 052.2	2	评价天然裂缝和层理特征

2.1 水平地应力测试

页岩储层最大与最小水平主应力差是体积压裂能否实现的关键因素^[3-4]。对页岩储层实施水平井压裂时,井筒的最有利方位为沿最小水平主应力方向^[1,5],因而确定水平地应力的大小和方向至关重要。

实验利用油气藏地应力测试系统,施加同一围压 30 MPa,开展围压条件下 Kaiser 效应实验测试。

实验结果显示,第一块岩心的水平最大和最小地应力分别为 55.52 和 47.64 MPa,第二块岩心分别为 55.48 和 47.56 MPa。所测两块岩心的水平地应力差分别为 7.88 和 7.92 MPa。Sondergeld^[3]认为页岩储层水平地应力差小于 13.8 MPa 有利于形成缝网,因而罗 69 井页岩储层的水平应力差是有利于开展体积压裂的。

Beugelsdijk^[18]引入了水平应力差异系数 K_h 参数,见式(1),基于实验认为, $K_h < 0.25$ 时,裂缝会沿天然裂缝扩展;当 $K_h > 0.25$ 时,裂缝会沿垂直于最小主应力方向扩展。

$$K_h = (\sigma_H - \sigma_h) / \sigma_h \quad (1)$$

式中: σ_H 为水平最大主应力; σ_h 为水平最小主应力。

本区块页岩水平应力差异系数分别为 0.165 和 0.167,在水力压裂时,有利于裂缝沿天然裂缝扩展,形成更大的裂缝体积带。

由于页岩沉积层理太多,不同方向受力变形幅度差距较大,常规差应变结合古地磁确定方位的方法不适合于页岩,实验采用了声发射 Kaiser 实验同古地磁实验结合的方法^[19],确定了最小水平主应力的方位。第一块岩心最小地应力方位为 NE79.46°,第二块为 NE63.28°;第一块岩心最小地应力方位与 FMI 微电阻率扫描成像测得方位 NE78°相近。

2.2 抗张强度测试

水力压裂时,页岩主裂缝的产生为张性破裂,抗张强度一定程度上反映了张性缝扩张的难易,此参数也可用于计算“脆性指数”^[16]。

实验利用 WEP-600 微机控制屏显万能实验机,采用巴西实验法对标准试件进行抗张强度实验。测试结果显示,该区块页岩的抗张强度分布范围是 1.44 ~ 2.21 MPa,平均为 1.8 MPa,明显小于相同深度下砂岩的抗张强度(通常在 5 MPa 以上),且断裂时,页岩基本沿层理面断开。

数据表明,页岩抗张强度很小,沉积层理胶结强度很低,是力学上的薄弱环节,因而该区块页岩易受压起裂形成更大裂缝带。

2.3 单轴抗压强度实验测试

岩石单轴抗压强度的测试,不仅可用于计算“脆性指数”^[16],也可以利用应力—应变曲线判断岩心的变形特性。

利用油气藏地应力测试系统开展实验。所测单轴抗压强度分布范围是:39.28 ~ 62.01 MPa,平均为 48.34 MPa,较砂岩和碳酸盐岩小(通常在 100 MPa 左右)。图 1 为 C1'、A4 两块岩心的单轴抗压强度应力—应变曲线,从峰值前岩块的变形特征看,该页岩属于米勒^[20]划分的 6 类岩石中的第Ⅲ类,开始为上凹型曲线,随后变为直线,直至破坏,没有明显的屈服段,说明此页岩坚硬且裂隙发育。由于页岩基质的孔隙度很低,因而在“压密阶段”,基本为页岩裂隙或沉积层理的压密。此阶段对于孔隙不发育、质地坚硬且裂隙少的岩石是不明显的。从压密阶段末端开始,直到破坏前,随着应力增大,应变并未明显增大(曲线呈下凹状),说明该页岩在非稳定破裂发展阶段(或称累进性破裂阶段)并未表现出明显的塑性阶段,而表现出脆性破坏的特征。较低的单轴抗压强度、发育的微裂隙

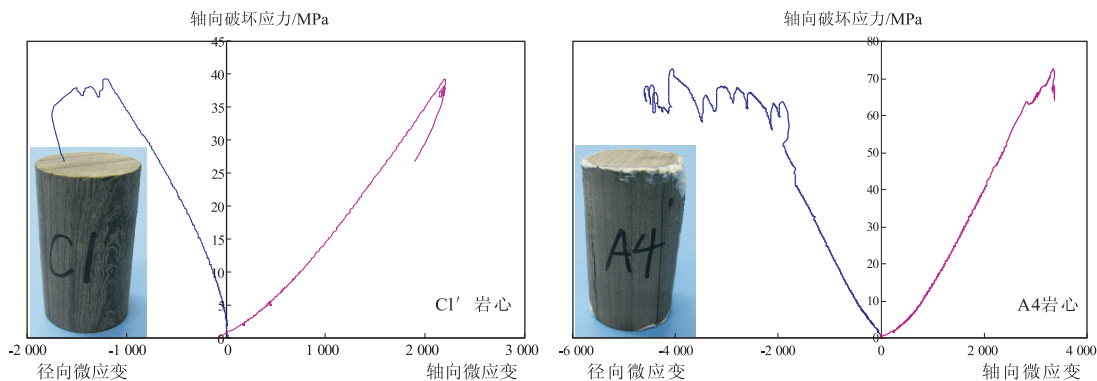


图 1 胜利油田罗家地区页岩单轴抗压强度应力—应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of uniaxial compressive strength of shales in Luoja area, Shengli Oilfield

和岩心的脆性破坏特征都是页岩储层具备可压性的表现。

2.4 三轴应力实验测试

根据三轴应力实验结果,不仅可获得地层压力条件下的杨氏模量和泊松比等参数,用于计算脆性指数,也可以获得三轴应力下的应力—应变曲线,用于分析地层条件下岩心的变形特征。

利用油气藏地应力测试系统,采用等侧压三轴压缩实验法进行实验,为了能够较真实地模拟地层条件,根据岩性特点及取心深度,加载围压 30 MPa,不施加孔压。

实验结果显示,该页岩的杨氏模量范围为 29.36 ~ 38.27 GPa,平均为 33.04 GPa。泊松比范围为 0.232 ~ 0.291,平均为 0.263。图 2 为不同地区页岩储层杨氏模量和泊松比的对比。Sondergeld 等^[3]认为,有利于体积压裂的页岩杨氏模量应大于 24 GPa (蓝色虚线),泊松比应小于 0.25 (红色虚线),可见本区块页岩的两项指标都基本符合。本区块页岩(水平取心)同美国路易斯安那州 Magnolia 水平方向取心页岩相比,杨氏模量、泊松比都较接近;同 Barnett 浅层和深层页岩相比,杨氏模量较低,泊松比较高。图 3 列出了 A1、C4' 两块岩心的三轴压缩应力—应变曲线。由于施加了一定围压,压实阶段已经消失。A1 岩心应力—应变曲线为一直线,其破坏形式为脆性破坏;C4' 岩心应力—应变曲线后端略微下凹,表现出一些塑性特征,破裂面为以张性为主的破裂,属于脆性破坏^[18]。高杨氏模量、较低泊松比和脆性破坏的特征,为页岩储层具备可压性的必要条件。

2.5 抗剪强度实验测试

页岩储层中的天然裂缝和沉积层理是实现体积压裂的必备条件,这些裂隙通常被硅质或碳酸盐类矿物充填,胶结强度很低,易发生剪切破裂^[9-11]。本文对垂直和平行层理方向的页岩开展了抗剪强

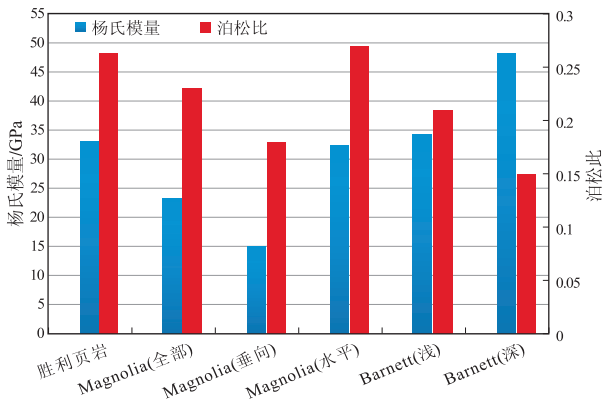


图2 不同地区页岩杨氏模量和泊松比对比
Fig. 2 Young's modulus and Poisson's ratio of shales from different regions

度测试,对天然裂缝和沉积层理的胶结强度进行评估,并根据实验结果计算了不同方位下裂隙岩体的初裂强度。

实验利用 WEP-600 微机控制屏显万能实验机,对标准件进行岩石变角模抗剪实验。1#—4#岩心采用沿沉积层理方向剪切,而 5#—7#采用沿垂直层理方向剪切。

实验结果如图 4 所示,平行于沉积层理方向(1#—4#)页岩的粘聚力值 $C=2.55$ MPa,内摩擦角度 $\phi=47.20^\circ$;而垂直于层理方向(5#—7#)页岩的粘聚力值 $C=11.33$ MPa,内摩擦角度 $\phi=44.04^\circ$ 。结果表明,页岩两个方向的粘聚力值较砂岩和碳酸盐岩(通常在 20 ~ 30 MPa 左右)都小,且平行层理方向粘聚力远小于垂直层理方向。图 5 展示了剪切破裂后的岩心形态,1#—4#破裂面为沉积层理面,相对平滑;5#、6#岩心剪切面大致垂直层理,但由于脆性较强,破裂面参差不齐,剪切面崩落出较多碎片;7#岩心沉积层理方向复杂,既有水平方位,也有偏转角度在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间的层理,剪切后岩心完全破碎,破裂面大都沿沉积层理方向。压剪实验结果证明,页岩沉积层理面(天然裂缝面)胶结脆

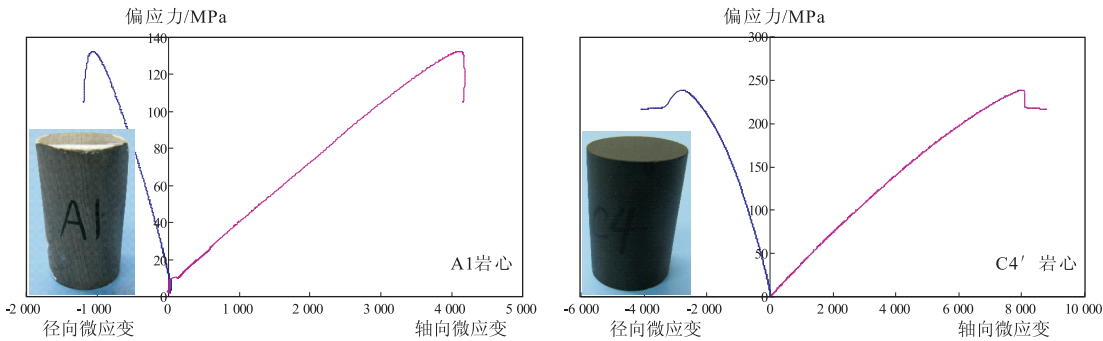


图3 胜利油田罗家地区页岩三轴压缩应力—应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of triaxial compression for shales in Luoja area, Shengli Oilfield

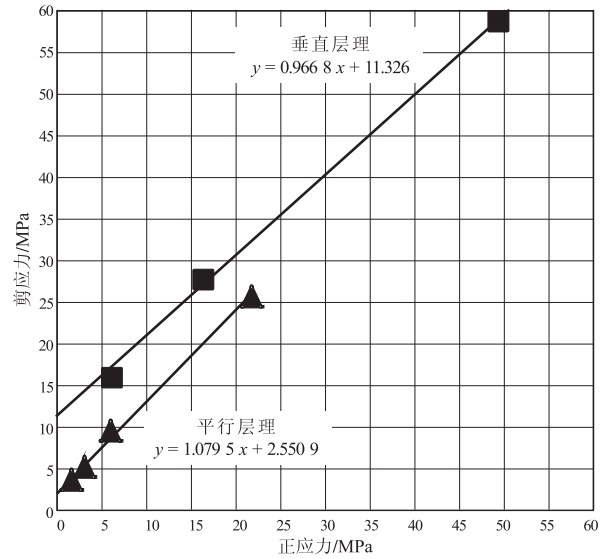


图4 胜利油田罗家地区页岩剪应力与正应力关系曲线

Fig.4 Curves of shear stress and normal stress for shales in LuoJia area, Shengli Oilfield



图5 胜利油田罗家地区页岩剪切实验

Fig.5 Shear experiments for shales in LuoJia area, Shengli Oilfield

弱,粘聚力值很低,易发生剪切破坏,而且页岩脆性较强,在呈现复杂交错层理的情况下,容易形成网状裂缝,表明本区块页岩具有较高的可压性。

页岩大致平行的沉积层理可看做受压剪岩块中的小错距平行裂纹系,这些裂隙岩桥,随着外荷的增加,经历压紧、滑动摩擦、分支裂纹起裂、最终裂隙贯通、岩体失稳的过程。裂隙的初裂强度

(σ_1)计算公式为^[21]:

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{3} K_{IC} - \sigma_3 (2C_n f \cos^2 \alpha + C_t \sin^2 \alpha)}{\sqrt{\pi a} \beta} \quad (2)$$

2C_n f \sin^2 \alpha - C_t \sin^2 \alpha

式中: K_{IC} 为断裂韧性值; a 为裂隙半迹长; β 为应力强度因子影响系数; σ_3 为水平应力; C_n 为传压系数; f 为岩石的摩擦系数; α 为裂隙与施压载荷的夹角; C_t 为传剪系数。

水力压裂时,主裂缝会对裂缝两侧不相连的天然裂缝系施加诱导应力,导致天然裂缝系断裂扩展。如果地层中存在这种平行的天然裂缝系(沉积层理),根据公式(2),我们可以计算 a 不同时,这些天然裂缝的初裂强度。

举例说明:通过本次室内实验测试,获得裂隙的 $K_{IC} = 0.67 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$;弹性模量 $E_0 = 3.3 \times 10^4 \text{ MPa}$;泊松比 $\nu = 0.263$;切向刚度 $K_s = 11\,000 \text{ MPa/m}$;法向刚度 $K_n = 32\,900 \text{ MPa/m}$; $a = 0.025 \text{ m}$; $f = 0.5$; $\beta = 1.1$; $\sigma_3 = \sigma_H = 55.5 \text{ MPa}$ 。

则 $C_t = \frac{\pi a}{\pi a + \frac{E_0}{(1-\nu^2) K_s}} = 0.024$;

$C_n = \frac{\pi a}{\frac{\pi a + E_0}{(1-\nu^2) K_n}} = 0.073$

当天然裂缝系与诱导应力夹角 $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 时,即与主裂缝夹角分别为 $90^\circ, 60^\circ, 30^\circ, 0^\circ$ 时, σ_1 分别等于 $-\infty, 32.65, 47.9, 49.8 \text{ MPa}$ 。从结果可以看出,天然裂缝(沉积层理)与主裂缝夹角越大,越容易起裂。实验所测得最小水平主应力为 47.5 MPa ,说明平行于主裂缝的天然裂缝系(沉积层理)在 $49.8 \text{ MPa} - 47.5 \text{ MPa} = 2.3 \text{ MPa}$ 的诱导应力下就能发生初裂,而与主裂缝夹角大于 30° 的平行裂缝系初裂强度小于最小主应力,说明这样的裂缝系不存在或在未压裂前已发生初裂。

2.6 断裂韧性实验测试

岩石的断裂韧性是对岩石阻止宏观裂纹失稳扩展能力的度量,也是其抵抗脆性破坏的韧性参数,它只与材料本身有关。测试结果可作为水力压裂数值模拟中裂缝扩展的判据,脆性材料一般断裂韧性较小。为检测沉积层理的胶结强度和进一步了解裂缝的扩展机理,首次设计开展了人字形切槽与层理面不同夹角条件下的断裂韧性实验。

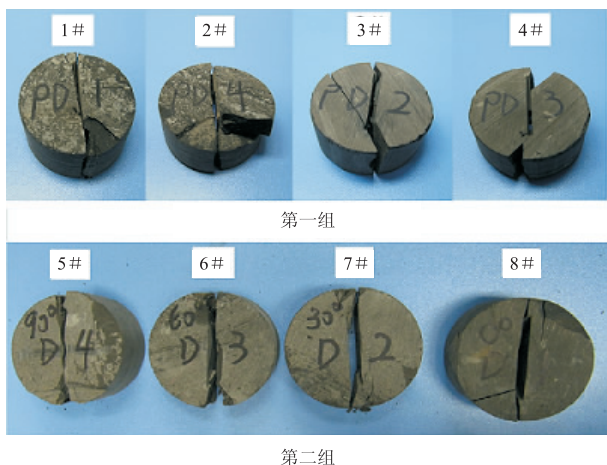


图6 胜利油田罗家地区页岩断裂韧性实验

Fig. 6 Fracture toughness experiments for shales in LuoJia area, Shengli Oilfield

实验利用油气藏应力敏感性测试仪,采用国际岩石力学学会(ISRM)推荐使用的有人字形切槽的巴西圆盘(CCNBD)确定I型断裂韧性的方法进行测试。试件的直径为50 mm,厚度为20 mm。设计了两组实验,如图6所示。第一组:1#和2#,切槽垂直于层理面;3#和4#,人字形切槽与层理面的夹角分别为30°和45°。第二组:5#~8#岩心的人字形切槽与层理面的夹角分别为90°,60°,30°,0°。

实验结果显示,1#和2#岩心断裂韧性分别为 $0.79 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ 和 $0.61 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$,平均值为 $0.70 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$,而常规砂岩一般大于 $1.5 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$,说明此页岩的裂纹失稳扩展所需的临界应力值比砂岩小,脆性很强。裂缝的断裂方向类似于砂岩,沿原切槽方向扩展。3#和4#岩心断裂韧性分别为 $0.53 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ 和 $0.55 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$,略小于垂向的断裂韧性,说明层理面的断裂强度更小,是力学上的脆弱面。3#裂缝沿沉积层理面扩展,4#出现了沿原裂缝方向和沉积层理面的双向扩展,结果导致缺口的出现。

第二组夹角为90°,60°,30°,0°时,对应的断裂韧性值分别为1.85,1.58,1.36,1.06 $\text{MPa} \cdot \sqrt{m}$,平均值为 $1.47 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$,大于第一组实验结果,且断裂韧性值随着夹角增大有逐渐增大的趋势。当水力裂缝遇到沉积层理(天然裂缝)时,通过以上结果可推测出不同逼近角情况下的裂缝扩展方向。将人字形切槽看做主裂缝,则当主裂缝与沉积层理(天然裂缝)的逼近角在45°以内时,裂缝沿层理面(天然裂缝面)扩展;当大于45°时,裂缝将穿过层理面(天然裂缝)扩展。页岩相对较低的断裂

韧性值表明裂纹更加容易扩展,有利于形成更大的裂缝体积,因而具备可压性的条件。

2.7 页岩矿物分析

页岩矿物分析可用于判断页岩的脆性程度,其粘土矿物分析结果可用于指导压裂施工。

岩石矿物分析结果显示,该页岩方解石含量在60%左右,石英含量在10%左右,粘土含量在20%左右;而Barnett页岩矿物中,粘土占30%~39%,石英占29%~38%,方解石、白云石、长石、黄铁矿共占25%~30%左右。相比国外已开发的大部分页岩储层,该区块页岩碳酸盐岩含量较高,石英含量较低,与美国Eagle Ford页岩储层接近。Matthews^[7]对北美页岩储层的矿物特征进行总结后也认为,相对粘土和石英来说,碳酸盐岩具有更高的脆性。从矿物组成看,此页岩的脆性较高,较高的碳酸盐含量表明储层岩石天然裂缝较发育。碳酸盐可通过化学淀积成岩作用填充于页岩天然裂缝内,此时天然裂缝较弱、易被水压开启,表明该区块页岩具备可压性的条件。

粘土矿物分析结果显示,伊/蒙混层含量占粘土总量的85%左右,它属于遇水易膨胀的矿物,易发生粘土膨胀和分散,造成地层伤害,因此在确定压裂液的配方时应考虑其防膨效果。同时由于页岩含有较高的碳酸盐岩矿物,此区块储层的开发可尝试采用加砂酸压方式,利用酸液蚀刻张开裂缝表面和剪切错位表面,同时有利于提高基质渗透率,从而达到提高产能的目的,但盐酸浓度不宜太高,避免释放出石英等不溶物,造成支撑剂层和裂缝的堵塞。

2.8 页岩脆性指数

脆性是材料的综合特性,是在自身天然非均质性和外在特定加载条件下产生内部非均匀应力,并导致局部破坏,进而形成多维破裂面的能力。它不像弹性模量、泊松比那样为单一的力学参数。想要表征脆性,需建立特定的脆性指数。

目前,有两种常用的评价页岩脆性指数的计算方法。一是,Rickman^[6]提出用杨氏模量和泊松比^[17]来计算脆性指数的方法,见式(3),并认为BRIT(脆性指数)大于40时,岩石是脆性的。二是,Goktan^[16]介绍的计算脆性指数的简单方法,见式(4)。

$$\begin{aligned} \text{YM_BRIT} &= ((\text{YMS_C}-1)/(8-1)) \times 100 \\ \text{PR_BRIT} &= ((\text{PR_C}-0.4)/(0.15-0.4)) \times 100 \\ \text{BRIT} &= (\text{YM_BRIT} + \text{PR_BRIT})/2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中:YM_BRIT和PR_BRIT分别代表由杨氏模量和泊松比确定的脆性指数;YMS_C为岩石的静态

杨氏模量;PR_C 为岩石的静态泊松比。

$$BI=\sigma_c/\sigma_t \tag{4}$$

式中:BI 为脆性指数; σ_c 为单轴抗压强度; σ_t 为抗张强度。参照表 3 确定脆性等级:

按照式(3) 计算,BRIT=43.9,表明该区块页岩具有较高脆性。根据式(4),BI=26.8,参照表 3,也表明该页岩脆性很强。

2.9 页岩电镜扫描

页岩薄片电镜扫描可用于观察页岩的孔隙结构和微裂隙展布情况。

图 7 为页岩的电镜扫描图^[22],测试显示纹层状显微晶泥质灰岩,可见大量微裂缝,粘土矿物、碳酸盐晶间微孔发育,孔径一般在 5~10 μm,结晶较粗的微—显微晶方解石晶间微孔发育,且孔隙较大,一般为 8~15 μm;微米级别片状微孔隙发育;可见黄铁矿晶间微孔及砂质微孔等^[23]。

页岩中微裂隙的大量分布,不仅有利于提高储层的局部渗透率,而且在水力压裂过程中,容易发生剪切错位,沟通主裂缝,形成更大体积的缝网,使储层具备可压性。

2.10 实验结果汇总

为评价罗 69 井页岩的可压性而开展的一系列实验的结果如表 4 所示,该实验结果有利于全面了解该区块页岩的岩石力学和物性特征,比较不同区块的页岩特征,指导压裂施工。综合实验结果表明,本区块页岩储层水平应力差较小,脆性强,且天然裂

表 4 胜利油田罗家地区
页岩岩石力学和物性特征实验结果

Table 4 Experimental results of rock mechanics
and physical characteristics of shales
in Luojia area, Shengli Oilfield

序号	实验项目	实验结果(平均值)
1	水平地应力差/MPa	7.9
	最小水平地应力方向/(°)	NE63.28~79.46
2	抗张强度/MPa	1.8
3	单轴抗压强度/MPa	48.34
4	杨氏模量/GPa	33.04
5	泊松比	0.263
6	垂直层理 粘聚力/MPa	11.33
	方向剪切 内摩擦角/(°)	44.04
	平行层理 粘聚力/MPa	2.55
	方向剪切 内摩擦角/(°)	47.20
7	断裂韧性	1.045 MPa·√m
8	脆性指数 式(3)	43.9
	式(4)	26.8
9	矿物组成	方解石 60%、石英 10%、 粘土 20%
10	天然裂缝系统	存在大量微裂缝, 方解石充填

缝和沉积层理系统发育,具备开展体积压裂的条件,具有可压性。

3 结论

1)页岩储层的“可压性评价”是对能否有效开展“体积压裂”进行论证,主要取决于 3 个地质因素:水平地应力差、天然裂缝系统和沉积层理、岩石脆性。可结合室内岩石力学和物性参数实验测试以及脆性指数的计算对其进行综合评价。评价结果显示,胜利罗 69 井页岩脆性较强,且天然裂缝(沉积层理)发育,水平地应力差相对较小,水平应力差异系数较低,具备开展体积压裂的条件,具有可压性。

2)剪切实验表明页岩沿层理面的抗剪强度很小,垂直层理方向的粘聚力远大于平行层理方向,但相比砂岩和碳酸盐岩小很多,沉积层理面(裂缝面)胶结脆弱,易发生剪切破坏,且页岩脆性较强,在呈现复杂交错裂缝的情况下,容易形成网状裂缝。

3)水力压裂过程中,主裂缝的扩展会在垂直于裂缝面方向产生一定的诱导应力,导致天然裂缝系(沉积层理)断裂扩展。通过裂隙岩体初裂强度计算,认为平行的天然裂缝系(沉积层理)与主裂缝夹角越大,越容易起裂。

4)页岩的断裂韧性值相对砂岩较低,当人字形切槽与沉积层理面的夹角在 45°以内时,裂缝容易沿层

表 3 岩石脆性等级划分

Table 3 Brittle classification of rocks

等级	脆性指数	特征
1	>25	脆性很强
2	15~25	脆性
3	10~15	中等脆性
4	<10	脆性较低

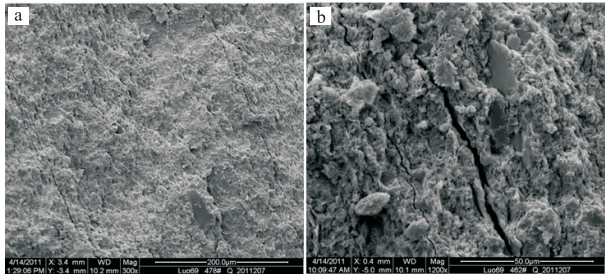


图 7 胜利油田罗家地区页岩电镜扫描
Fig. 7 Electron microscopy scanning pictures of
shales in Luojia area, Shengli Oilfield

理面扩展;大于45°时,穿过层理面扩展,断裂韧性值随夹角增大有逐渐增大趋势。此规律可用于认识天然裂缝同主裂缝的夹角对裂缝扩展的影响。

参考文献:

[1] Mayerhofer M J, Lolon E P, Warpinski N R, et al. What is stimulated rock volume? [R]. SPE 119890, 2008.

[2] Cipolla C L, Warpinski N R, Mayerhofer M J, et al. The relationship between fracture complexity, reservoir properties, and fracture-treatment design [R]. SPE 115769, 2008.

[3] Sondergeld C H, Newsham K E, Comisky J T, et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources [R]. SPE 131768, 2010.

[4] Cipolla C, Weng X, Mack M, et al. Integrating microseismic mapping and complex fracture modeling to characterize fracture complexity [R]. SPE 140185, 2011.

[5] King G E. Thirty years of gas shale fracturing; what have we learned? [R]. SPE 133456, 2010.

[6] Rickman R, Mullen M, Petre E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization; all shale plays are not clones of the Barnett shale [R]. SPE 115258, 2008.

[7] Matthews H L, Schein G, Malone M. Stimulation of gas shales; they're all the same—right? [R]. SPE 106070, 2007.

[8] Britt L K, Schoeffer J. The geomechanics of a shale play; what makes a shale prospective? [R]. SPE 125525, 2009.

[9] Olson J E. Multi-fracture propagation modeling; Applications to hydraulic fracturing in shales and tight gas sands [R]. ARMA 08-327, 2008.

[10] Cipolla C L, Warpinski N R, Mayerhofer M J. Hydraulic fracture complexity: diagnosis, remediation, and exploitation [R]. SPE 115771, 2008.

[11] Wang Y, Miskimins J L. Experimental investigations of hydraulic fracture growth complexity in slick water fracturing treatments [R]. SPE 137515, 2010.

[12] Soliman M Y, East L, Augustine J. Fracturing design aimed at enhancing fracture complexity [R]. SPE 130043, 2010.

[13] 陈作, 薛承瑾, 蒋廷学, 等. 页岩气井体积压裂技术在我国的应用建议 [J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 30-32.

[14] Waters G, Dean B, Downie R, et al. Simultaneous hydraulic fracturing of adjacent horizontal wells in the Woodford shale [R]. SPE 119635, 2009.

[15] 朱日房, 张林晔, 李钜源, 等. 渤海湾盆地东营凹陷泥页岩有机储集空间研究 [J]. 石油实验地质, 2012, 34(4): 352-356.

[16] Goktan R M, Yilmaz N G. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting [J]. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105: 727-733.

[17] Mullen M, Roundtree R, Barree B. A composite determination of mechanical rock properties for stimulation design (what to do when you don't have a sonic log) [R]. SPE 108139, 2007.

[18] Beugelsdijk L J L, Pater C J, Sato K, et al. Experimental hydraulic fracture propagation in a multi fractured medium [R]. SPE 59419, 2000.

[19] 卢运虎, 陈勉, 金衍, 等. 深层地应力地理方位确定的新方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 233-237.

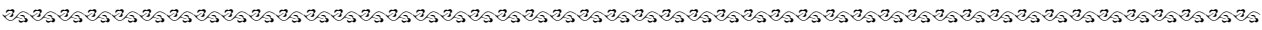
[20] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 42-55.

[21] 易顺民, 朱珍德. 裂隙岩体损伤力学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 38-47.

[22] Grieser B, Bray J. Identification of production potential in unconventional reservoirs [R]. SPE 106623, 2007.

[23] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究 [J]. 石油实验地质, 2012, 33(3): 219-225.

(编辑 韩 或)



(上接第338页)

[9] 王丹萍, 许长海, 焦若鸿, 等. 基于碎屑锆石裂变径迹记录的下扬子构造热演化史研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 227-234.

[10] 施泽进, 张渝昌, 施央申, 等. 苏北溱潼凹陷形成演化的运动学模拟 [J]. 石油实验地质, 1994, 16(4): 326-333.

[11] 张世奇. 平衡剖面分析技术在松辽盆地构造演化恢复中的应用 [J]. 新疆地质, 2003, 21(4): 489-498.

[12] Chase R B, Kehew A E, Glynn M E, et al. Modeling debris slide geometry with balanced cross sections; a rigorous field test [J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2007, 13(1): 45-53.

[13] 胡望水, 柴浩栋, 李瑞升, 等. 平衡剖面技术对东海西湖凹陷正反转构造及其成藏控制的研究 [J]. 特种油气藏, 2010, 17(1): 15-19.

[14] 张建培, 唐贤君, 张田, 等. 平衡剖面技术在东海西湖凹陷构造演化研究中的应用 [J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(8): 31-37.

[15] 包汉勇. 下扬子区白垩纪以来的构造热演化 [D]. 上海: 同

济大学, 2011.

[16] 邱旭明, 刘玉瑞, 傅强, 等. 苏北盆地上白垩统一第三系层序地层与沉积演化 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-153.

[17] 张沛, 周祖翼, 许长海. 苏皖下扬子区晚白垩世以来的构造—热历史: 浦口组砂岩磷灰石裂变径迹证据 [J]. 海洋石油, 2009, 29(4): 26-32.

[18] 国家地震局地质断面编委会. 上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地质断面 [M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-66.

[19] 黄耘. 江苏及邻区地壳上地幔结构研究 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2009.

[20] Zhou Meifu, Yan Danping, Vasconcelos P M, et al. Structural and geochronological constraints on the tectono-thermal evolution of the Danba domal terrane, eastern margin of the Tibetan plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 33(5/6): 414-427.

(编辑 韩 或)