

# 湖相细粒沉积岩成分对可压裂性的控制作用

熊周海<sup>1</sup>, 操应长<sup>1,2</sup>, 王冠民<sup>1,2</sup>, 杨 振<sup>3</sup>, 石晓明<sup>1</sup>,  
张 健<sup>4</sup>, 张 婕<sup>1</sup>, 张 宝<sup>1</sup>, 李佳伟<sup>1</sup>

- (1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;
2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071;
3. 中国石油新疆油田开发公司, 新疆 克拉玛依 834000;
4. 中国石油大庆油田采油八厂, 黑龙江 大庆 163514)

**摘要:** 湖相细粒沉积岩的成分普遍存在差异, 这种差异使得岩石在可压裂性的控制规律上存在明显的不同. 本论文以岩石力学实验为基础, 对我国东部中生界湖相细粒沉积岩的可压裂性进行评价, 认为细粒沉积岩的可压裂性随长英质矿物或碳酸盐矿物含量的增多均呈先减弱后增强的趋势. 黏土矿物和有机质含量增多一般会降低细粒沉积岩的可压裂性, 但随成岩作用增强, 塑性较强的高岭石和蒙脱石向硬脆性较高的伊利石和绿泥石转化, 岩石的脆性增强, 可压裂性变好. 研究表明: 长英质矿物或碳酸盐矿物的质量分数小于 30% 时, 可压裂性与该矿物含量呈负相关或相关性较弱; 质量分数高于 30% 时, 呈良好的正相关. 钙质生物碎屑对裂纹的扩展具有促进作用, 而长英质颗粒和以微晶或细晶形式发育的碳酸盐矿物则会为阻碍裂纹的单向扩展, 使裂纹尖端方向容易发生偏转, 利于发育复杂有效的网状缝而提高细粒沉积岩的可压裂性.

**关键词:** 成分; 细粒沉积岩; 可压裂性; 控制作用

中图分类号: P 618.12 文献标志码: A 文章编号: 1000-1964(2018)03-0538-11

DOI: 10.13247/j.cnki.jcumat.000827

## Controlling effect of lacustrine fine-grained sedimentary rocks composition on fracability

XIONG Zhouhai<sup>1</sup>, CAO Yingchang<sup>1,2</sup>, WANG Guanmin<sup>1,2</sup>, YANG zhen<sup>3</sup>, SHI Xiaoming<sup>1</sup>,  
ZHANG Jian<sup>4</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, ZHANG Bao<sup>1</sup>, LI Jiawei<sup>1</sup>

- (1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China;
3. Development Company, PetroChina Xinjiang Oilfield, Kelamayi, Xinjiang 834000, China;
4. The 8<sup>th</sup> Oil Plant, PetroChina Daqing Oilfield, Daqing, Heilongjiang 163514, China)

**Abstract:** The composition of lacustrine fine-grained sedimentary rocks is generally different in terms of its controlling effect on rock fracability. Based on mechanical experiments, the fracability of the Mesozoic and Cenozoic lacustrine fine-grained sedimentary rocks in eastern China was evaluated. It is considered that the controlling effect of felsic minerals and carbonate minerals on the fracability of fine-grained sedimentary rocks is basically the same. With the increasing of mineral content, the fracability has a trend varies from decreasing to increasing.

收稿日期: 2017-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572123, U1762217); 山东省自然科学基金项目(ZR2014DM013)

通信作者: 王冠民(1969-), 男, 吉林省桦甸市人, 教授, 博士, 从事石油地质与勘探方面的研究.

E-mail: wguanmin@sina.com Tel: 15153226536

引用格式: 熊周海, 操应长, 王冠民, 等. 湖相细粒沉积岩成分对可压裂性的控制作用[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 538-548.

Controlling effect of composition on fracability in lacustrine fine-grained sedimentary rocks[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 538-548.

The increment in clay minerals and organic matter content can lower the fracability. However, with the reinforcement of diagenesis, kaolinite and montmorillonite with strong plasticity was changed into hard and brittle illite and chlorite, which causes the enhancement of brittleness and better fracability for fine-grained sedimentary rocks. Results show that the fracability has a negative or weak correlation with the mineral content when the mass fraction of felsic minerals or carbonate minerals is less than 30%, but has a positive relation when the mass fraction is higher than 30%. Calcareous biotritus can accelerate the crack propagation, while felsic granule and carbonate minerals developed in the form of crystallite or fine grain essentially act as a hindrance to crack propagation, which makes the crack tip easy to spin, and helps to develop complex and effective mesh joints to improve the fracability of fine-grained sedimentary rocks.

**Key words:** component; fine-grained sedimentary rock; fracability; controlling effect

我国陆相湖盆的细粒沉积岩分布范围广,发育期次多,层系厚度大,页岩油气资源储量极为丰富<sup>[1-3]</sup>。然而由于细粒沉积岩成分复杂,造成岩石的可压裂性也相对复杂,严重影响了我国东部湖相细粒沉积岩的开发进程,急需寻找成分差异对岩石可压裂性的控制规律。

对于细粒沉积岩成分对可压裂性的影响,目前国内大部分相关研究侧重于细粒沉积岩的脆性,而不是可压裂性。很多学者认为脆性矿物含量是影响天然裂缝或者人工裂缝发育程度的重要因素,其含量越多,裂缝越发育,越有利于油气的开采<sup>[7-11]</sup>。文献<sup>[9-12]</sup>认为石英是细粒沉积岩中最主要的脆性矿物。有学者将细粒沉积岩的脆性指数定义石英含量的多少,石英含量越多,岩石的脆性越高<sup>[13-14]</sup>,也有的学者认为碳酸盐矿物含量越高,脆性越好,越容易形成天然裂缝<sup>[15-16]</sup>。还有的学者考虑了黏土矿物含量,认为黏土矿物含量越高,岩石脆性越低<sup>[17-19]</sup>。此外,文献<sup>[20]</sup>认为细粒沉积岩中有机质与石英对岩石脆性的影响作用相似,它们的含量越高,越容易形成裂缝。

可压裂性是页岩在水力压裂作用下具有能够被有效压裂的性质。单纯利用弹性模量与泊松比来表征的脆性指数并不能完全判断储层的可压裂性,实际工作中经常发现,部分岩石的弹性模量与泊松比相近,但是脆性差别极大<sup>[21]</sup>。文献<sup>[21]</sup>研究表明细粒沉积岩的可压裂性不仅受到脆性指数的影响,还会受到断裂韧性的控制。本文以常规三轴压裂实验和断裂韧性实验为基础,结合岩石的常规分析测试,研究细粒沉积岩不同矿物成分对可压裂性的控制作用,以期页岩油气的有效开发提供理论支持。

## 1 样品来源及实验概况

### 1) 实验样品

本次实验所采用的细粒沉积岩样品包括胶莱盆地莱阳组 13 块,阜新盆地阜新组 32 块,济阳坳陷沙河街组 36 块,抚顺盆地计军屯组和西露天组共 27 块,黄县盆地黄县组 15 块,桦甸盆地桦甸组 10 块以及五图盆地五图组 6 块。其中胶莱盆地和阜新盆地地层年代较老,属于中生界盆地;济阳坳陷、抚顺盆地、黄县盆地、桦甸盆地以及五图盆地地层年代较新,属于新生界盆地。对于采集的样品,首先进行取芯用于三轴压裂和断裂韧性实验,对于剩下的样品进行常规分析,包括 X 全岩衍射分析、黏土矿物成分分析、干酪根镜检和类型分析以及岩石热解分析等。

通过常规分析可知,如表 1 及图 1 所示,各盆地的成岩作用强度都较低。中生界样品干酪根以 II 型和 III 型为主,而新生界样品干酪根多为 I 型和 II 型,并以 I 型为主。五图盆地的碳酸矿物含量普遍较高而缺乏长英质矿物,黄县盆地以高有机碳含量为特征。

### 2) 实验设备

常规三轴压裂实验和断裂韧性实验装置均由 TAW-1000 系统完成。其主要由如下几部分组成: a. 三轴应力室,由压力室缸体、进油口、传力压杆等组成。要求穿力杆端面光滑平整,平整度应为 0.005 mm; b. 轴向加载系统,由主体、电动高压泵及控制台等组成,要求该系统有足够的吨位,并能连续加荷; c. 侧向加载系统,由控制台、电动油泵、增压器和高压输油管组成。

表 1 不同沉积盆地细粒沉积岩基本特征

Table 1 Basic characteristics of fine-grained sedimentary rocks in different sedimentary basins

地区	$w_B/\%$			$R_o/\%$	TOC/ %	生烃势/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	降解率/ %	干酪根类型
	长英质矿物	碳酸盐矿物	黏土矿物					
胶莱盆地	25.0~52.0	15.0~33.0	6.0~28.0	0.5~0.7	0.4~1.1	0~0.5	0.5~6.3	II <sub>1</sub> -II <sub>2</sub>
阜新盆地	0~62.0	0~100	0~34.0	0.5~0.7	0~35.0	0.5~56.0	0.3~17.0	II <sub>2</sub> -III
黄县盆地	0~31.0	0~43.0	18.0~50.0	0.4~0.5	6.0~41.0	36.0~283.0	25.0~60.0	I-III, 以 I-II <sub>1</sub> 为主
济阳拗陷	4.0~75.0	4.0~94.0	1.0~33.0	0.4~0.7	2.3~6.5	8.0~35.0	31.0~45.0	I
五图盆地	0	66.0~91.0	3.0~19.0	0.3~0.4	3.0~10.0	9.0~47.0	24.0~39.0	I-II <sub>1</sub>
抚顺盆地	0~23.0	0~24.0	0~75.0	0.4~0.8	0.1~24.0	0.5~78.0	0.7~42.0	I-III, 以 II 为主
桦甸盆地	0~38.0	7.0~34.0	13.0~54.0	0.3~0.4	0.4~29.0	1.0~188.0	23.0~53.0	I-II <sub>1</sub>

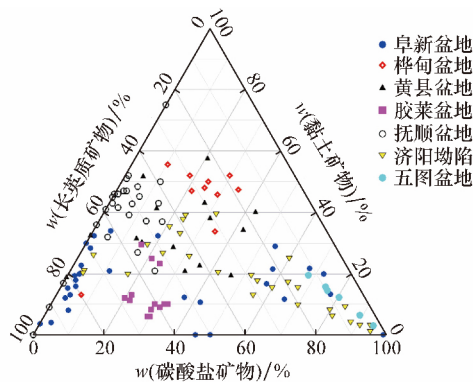


图 1 不同沉积盆地细粒沉积岩主要矿物特征

Fig. 1 Main mineral characteristics of fine-grained sedimentary rocks in different sedimentary basins

### 3) 试样准备

常规三轴压裂试件: a. 取芯: 为了不改变岩石的力学性质, 实验试件选择干取. 取芯方向主要有 3 种:  $0^\circ$  (与纹层平行)、 $45^\circ$  (与纹层斜交)、 $90^\circ$  (与纹层垂直); b. 试样规格: 直径  $\times$  高度: 25 mm  $\times$  50 mm. 首先利用取芯机取出直径为 25 mm 的岩心, 再利用切割机切割成高度为 50 mm 的圆柱体试件; c. 试样加工精度: 对切割后的样品试件利用打磨锯片对样品端面进行加工使其平整且与中轴线垂直; d. 实验前试件的测量及拍照: 对加工后的试件进行直径、高度以及重量的测量, 以此计算试件的密度. 此外, 还需对试件进行压裂前拍照, 以便与压裂后进行对比.

断裂韧性试件: 在断裂力学中, 裂纹主要分为 3 种: I 型 (张开型)、II 型 (滑移型) 和 III 型 (撕开型), 但一般认为水力压裂破裂以 I 型断裂为主, 即形成的裂缝为张开型<sup>[22-28]</sup>. 因此, 大多数岩石断裂韧性的测试工作主要着眼于 I 型裂纹的断裂韧性  $K_{IC}$ . 本次测试采用国际岩石力学学会 (ISRM) 推荐使用人字形切槽的巴西圆盘 (CCNBD) 确定 I 型断裂韧性的方法: 首先将岩石样品按照直径为 50 mm 的钻头取出岩心, 然后切割成高度为 25 mm 的圆柱体, 磨平, 并用直径为 34.665 mm 的锯片切割

成深度为 11.30 mm 的人字形或者“V”字形凹口的试件, 具体尺寸如表 2 所示.

表 2 标准 CCNBD 试样几何尺寸的大小

Table 2 Geometrical size of standard CCNBD sample

参数	数值	无量纲表达
岩样直径 $D/\text{mm}$	50	
岩样厚度 $B/\text{mm}$	20	$a_B = B/R = 0.8$
初始人字形缺口的长度 $a_0/\text{mm}$	6.59	$a_0 = a_0/R = 0.2637$
终点人字形缺口的长度 $a_1/\text{mm}$	16.25	$a_1 = a_1/R = 0.65$
锯的直径 $D_3/\text{mm}$	34.665	$a_1 = 0.6933$
切割深度 $h_c/\text{mm}$	11.30	

### 4) 试样测试

对于常规三轴实验, 首先将岩样放置在压力室内, 围压  $\sigma_3$  设定为 30 MPa, 然后施加轴向压力  $\sigma_1$  直至岩石破坏. 实验过程中, 仪器自动记录岩石轴向、径向应力与应变, 得到应力应变关系曲线. 根据应力应变曲线, 可计算出岩石的弹性模量、泊松比、峰值强度等参数.

对于断裂韧性实验, 将制好的样品试件置于圆盘上, 保持人字形裂缝方向平行于应力方向, 然后加载应力直至岩石发生破裂 (图 2), 并记录此过程, 从而获得岩石的断裂韧性值.



图 2 断裂韧性实验前后的样品试件

Fig. 2 Sample of specimens before and after fracture toughness test

## 2 成分对细粒沉积岩可压裂性的控制作用

### 2.1 可压裂性的评价

目前, 国内外学者对细粒沉积岩可压裂性的评价提出了很多方法<sup>[29-35]</sup>, 概括起来主要分为 3 种,

即基于脆性指数的可压裂性评价方法、基于脆性指数和断裂韧性的综合评价方法以及基于多因素的层次分析评价方法。由于基于脆性指数的评价方法考虑的影响因素不够全面,对于脆性指数相近的岩石,它们的可压裂性往往还存在很大的差异,而基于多因素的层次分析评价方法考虑的因素要求多,难以达成统一的标准。因此,在综合考虑前人的研究以及结合自身实验条件的情况下,本文选择基于脆性指数和断裂韧性的综合评价方法。

1) 脆性指数

关于细粒沉积岩脆性的评价,本次采用文献[36]提出的以杨氏模量和泊松比来计算页岩的脆性指数为:

$$B_{rit\_Y} = \frac{Y_{MS} - Y_{MS\_min}}{Y_{MS\_max} - Y_{MS\_min}} \times 100\%,$$

$$B_{rit\_P} = \frac{P_R - P_{R\_max}}{P_{R\_min} - P_{R\_max}} \times 100\%,$$

$$B_{rit} = \frac{B_{rit\_Y} + B_{rit\_P}}{2}, \quad (1)$$

式中:  $Y_{MS}$  为岩石的静态杨氏模量, MPa;  $P_R$  为岩石的静态泊松比;  $Y_{MS\_max}$  和  $Y_{MS\_min}$  分别为杨氏模量的最大值和最小值, MPa;  $P_{R\_max}$  和  $P_{R\_min}$  分别为泊松比的最大值和最小值;  $B_{rit\_Y}$  和  $B_{rit\_P}$  分别代表由杨氏模量和泊松比确定的相应脆性指数;  $B_{rit}$  为综合脆性指数。

2) 断裂韧性

断裂韧性参数是通过“人”字形切槽的巴西圆

盘(CCNBD)实验在常温常压下可直接获得。为了与围压 30 MPa 的脆性指数对应,可根据文献[37]提出的断裂韧性随围压变化的拟合公式进行换算

$$K_{IC} = 0.2167P_C + K_{IC}^0, \quad (2)$$

式中:  $K_{IC}$  为地下岩石的断裂韧性,  $MPa \cdot \sqrt{m}$ ;  $K_{IC}^0$  为 0 围压下岩石的断裂韧性,  $MPa \cdot \sqrt{m}$ 。

3) 可压裂性指数

在数理统计分析中,对于受多重因素影响的指标,一般可以利用积的形式来表征它们的综合影响[38]。在综合考虑脆性指数和断裂韧性情况下,文献[21]认为细粒沉积岩的可压裂性可以由脆性指数和断裂韧性的比值来表征。因此,本次研究所采用的可压裂性指数计算方法如式(3)所示

$$F_{rac} = \frac{B_{rit}}{K_{IC}}, \quad (3)$$

式中  $F_{rac}$  为可压裂性指数。

2.2 成分对细粒沉积岩可压裂性的影响

1) 长英质矿物

实验样品中长英质矿物以碎屑颗粒为主,偶尔见到发育于生物碎屑中晶粒细小的玉髓。一般长英质矿物的硬脆性较高,其含量多少对岩石的可压裂性具有明显的控制作用。统计分析结果表明,在成岩作用强度相近且暂不考虑裂缝的情况下,除了个别异常数据点外,细粒沉积岩可压裂性指数随长英质矿物含量的增多呈先减弱后增强的趋势(图 3a, 3d)。

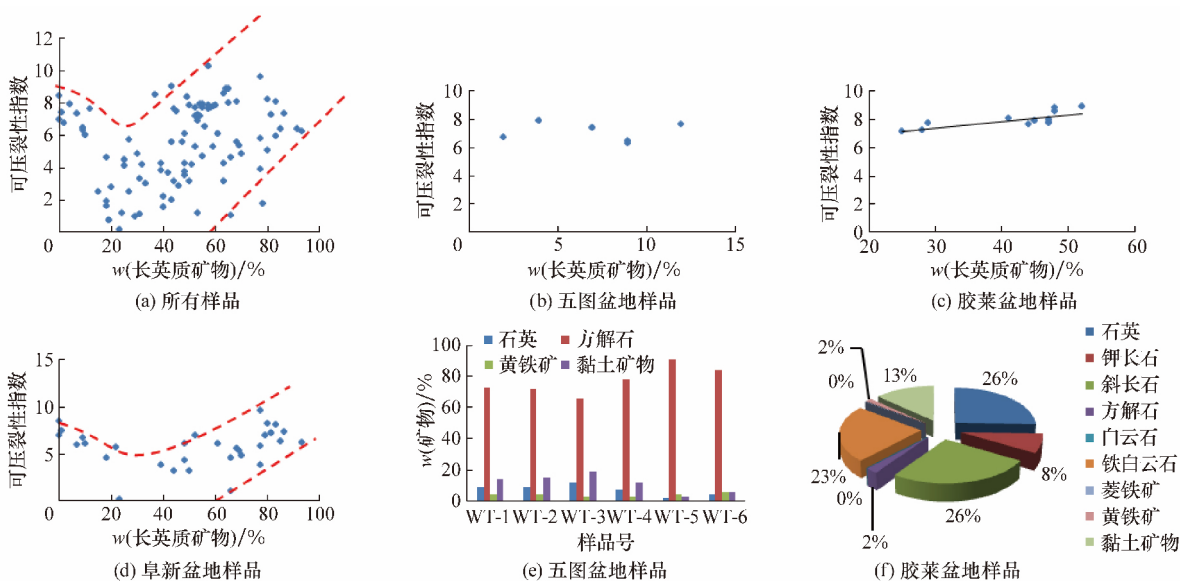


图 3 不同盆地细粒沉积岩长英质矿物含量与可压裂性的对应关系以及各组分含量分布

Fig. 3 The relation between the content of felsic minerals and fracability, and the distribution of the content of each component in the fine-grained sedimentary rocks of different basins

长英质矿物质量分数大于 30% 时,细粒沉积岩的可压裂性主要为长英质矿物所控制,即随长英

质矿物含量增多,细粒沉积岩的可压裂性增强(图 3c, 3f)。长英质矿物质量分数约小于 30% 时,细粒

沉积岩的可压裂性指数与长英质矿物含量总体上呈负相关或者相关性不强,这是由于细粒沉积岩的可压裂性是受多种类型矿物的综合控制所致:对于碳酸盐矿物较发育的细粒沉积岩(如图 3b,3e),长英质矿物含量低时以碳酸盐矿物为主,使得细粒沉积岩的可压裂性变好.随着长英质矿物含量的逐渐增多,碳酸盐矿物含量降低速度快,加上黏土矿物的影响,岩石的可压裂性也降低(图 3a);对于碳酸盐矿物不发育的细粒沉积岩,长英质矿物含量低时以黏土矿物为主,岩石的塑性强,可压裂性差.随着长英质矿物含量增多,黏土矿物含量减少,岩石的脆性增强,可压裂性也增强(图 3a).通过以上两种情况的分析说明,当长英质矿物质量分数 $<30\%$ 时,细粒沉积岩的矿物组分可能会存在两种情况:碳酸盐矿物含量较高或者黏土矿物含量较高,可分别导致长英质矿物含量与细粒沉积岩的可压裂性指数呈现出负相关或相关性不强的情况.

### 2) 碳酸盐矿物

碳酸盐矿物作为细粒沉积岩中一种重要的脆性矿物,其对可压裂性的控制作用与长英质矿物基本相似.如图 4a 所示,在成岩作用相近的情况下,碳酸盐矿物对可压裂性的控制也并不是简单的线性关系,往往也会受到如长英质矿物、黏土矿物等其他矿物的影响,当碳酸盐岩矿物质量分数 $<30\%$ ,岩石可压裂性指数与碳酸盐矿物含量的对应

关系较为复杂,高低值皆存在(图 4a,3c).高者一般主要受到硬脆性较高的长英质矿物影响,岩石的可压裂性较好;低者主要受到塑性较强的黏土矿物影响,岩石的可压裂性较差.随着碳酸盐矿物含量的逐渐增多,长英质矿物含量迅速减少,同时又受到黏土矿物的影响,可压裂性指数降低;随着碳酸盐矿物质量分数 $>30\%$ ,细粒沉积岩的可压裂性受碳酸盐矿物的控制明显增强,并以碳酸盐矿物的控制为主导,可压裂性指数随着碳酸盐矿物含量的增大而增大.此外,从阜新盆地细粒沉积岩可压裂性指数与碳酸盐矿物含量之间的关系也能进一步看出:细粒沉积岩可压裂性指数随着碳酸盐矿物含量由少到多的变化也呈现为先降低后增大的趋势(图 4b).

除了长英质矿物和碳酸盐矿物为细粒沉积岩的主要脆性矿物外,其他自生矿物如黄铁矿的硬度为 6,虽然其在细粒沉积岩中所占的比重低,但是发育较为普遍,并且其对增强岩石的脆性具有一定的贡献.因此,本研究把长英质矿物、碳酸盐矿物以及黄铁矿视为细粒沉积岩的总脆性矿物,并将其与可压裂性指数进行对比分析,结果表明:细粒沉积岩的可压裂性与脆性矿物含量的变化具有良好的相关性(图 4d),即脆性矿物的含量越多,细粒沉积岩的可压裂性越好.

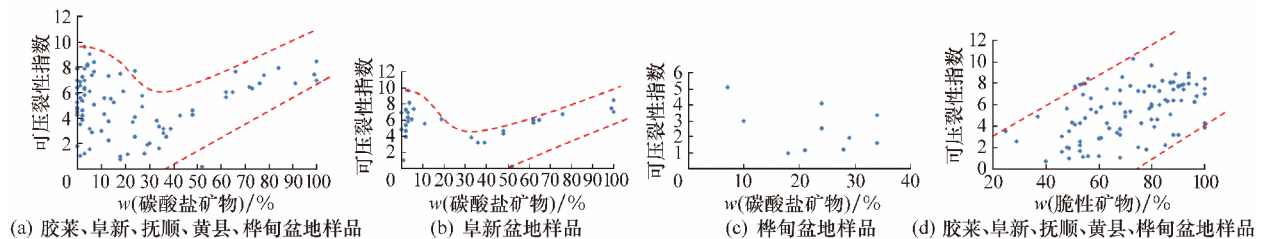


图 4 细粒沉积岩可压裂性与矿物含量的对应关系

Fig. 4 The relation between fracability and the mineral content in fine-grained sedimentary rocks

### 3) 黏土矿物

根据统计研究表明,随着总黏土矿物含量的增高,细粒沉积岩的弹性模量、抗压强度、脆性指数以及可压裂性指数逐渐降低(图 5a),泊松比逐渐增大.这是由于黏土矿物的塑性较强,对岩石的脆性起到消极的控制作用,导致其含量越高,细粒沉积岩的可压裂性越差.

但是,黏土矿物的各个组分对细粒沉积岩可压裂性所起到的作用也存在较大的差异.伊/蒙混层和高岭石的含量变化与细粒沉积岩的可压裂指数呈负相关,含量越高,岩石的可压裂性越低(图 5c).而伊利石和绿泥石相反,细粒沉积岩的可压裂

性随它们的含量增多而增强(图 5d).在黏土矿物中,伊蒙混层和高岭石晶体层间距较大,属于塑性矿物,而伊利石和绿泥石的稳定性较高,属于脆性矿物.随着成岩作用强度的增加,伊蒙混层和高岭石逐渐向绿泥石和伊利石转化,塑性矿物含量逐渐减少,而脆性矿物含量逐渐增多,岩石的可压裂性变好(图 6).

### 4) 总有机碳含量

总有机碳含量是评价细粒沉积岩生烃潜力的关键因素,一般其含量越高,烃源岩的生烃潜力越大.但有机质相对于矿物颗粒而言,其塑性较强,对岩石的可压裂性起到消极的作用,细粒沉积岩的弹

性模量、抗压强度、脆性指数以及可压裂性指数均随着有机碳含量的增多而逐渐降低,而泊松比与有机碳含量表现为正相关的关系(图 7),这表明细粒沉积岩的 TOC 含量越高,岩石的塑性越强,可压裂性越差。

进一步分析发现,细粒沉积岩的抗压强度随有

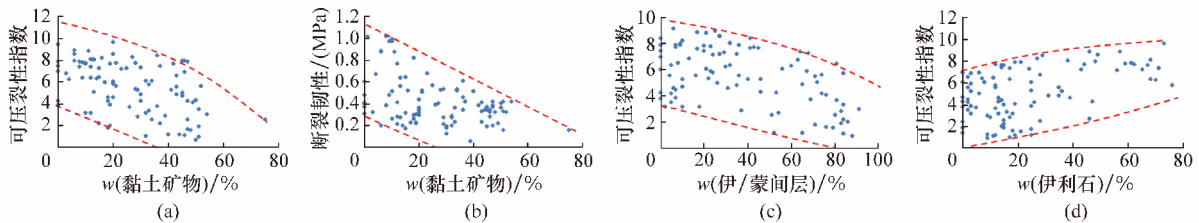


图 5 细粒沉积岩的可压裂性与黏土矿物含量的对应关系

Fig. 5 The relation between fracability and the content of clay mineral in fine-grained sedimentary rocks

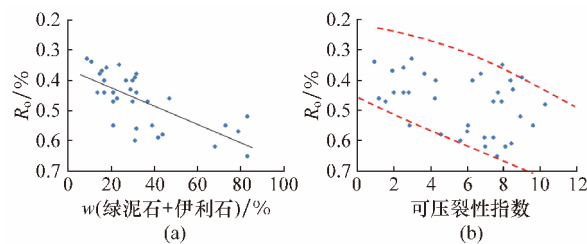


图 6 细粒沉积岩的可压裂性与成岩作用强度的对应关系

Fig. 6 The relation between fracability and the strength of diagenesis in fine-grained sedimentary rocks

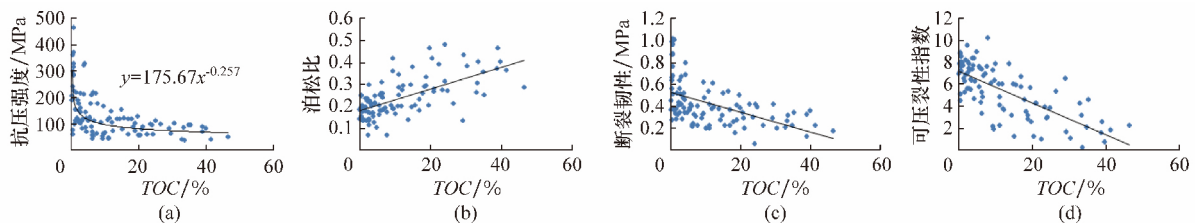


图 7 TOC 的对岩石力学参数的影响

Fig. 7 The effect of organic carbon content on parameters of rock mechanics

除了成分对细粒沉积岩可压裂性存在重要的控制作用以外,结构、构造以及天然微裂缝等因素也会造成重要的影响.关于细粒沉积岩结构和构造表征,本研究是通过利用 Matlab 软件编程对岩石薄片照片进行图像处理来实现,从而统计出薄片颗粒的粒径大小、圆度、分选程度、分布状况、纹层发育程度以及连续性等参数.其中颗粒的分布状况由  $8 \times 8$  密度方差来表征:以薄片照片像素点为基础,将图像等分成 8 行 8 列,统计每个区域的颗粒数目,并计算出方差.如果方差越小,表明颗粒分布越均匀,反之,均匀程度越差.纹层的连续度是通过分别统计亮暗两种纹层的断点数的倒数来表征,即亮纹层区域统计暗色像素点,而暗纹层区域统计亮色像素点,然后对两者求平均,再根据所有研究对象进行归一化,最后求取倒数,即为连续度.如果断点数越多,连续度越低,反之,连续度越高.由图像

机碳含量的增多而呈指数递减的关系(图 7a),说明有机碳含量高的细粒沉积岩,岩石抗压强度低且随有机碳含量的变化而差别不大;当有机碳含量低时,岩石的抗压强度高且随有机碳含量的变化而差别较大。

分析结果数据表明,如图 8 所示细粒沉积岩的可压裂性指数与颗粒含量呈良好的正相关,而与颗粒磨圆度、颗粒分选度以及  $8 \times 8$  密度方差呈良好的负相关.纹层越发育,连续性越好的细粒沉积岩,可压裂性越好.显然,图像处理识别出的颗粒大多为长英质矿物颗粒,颗粒含量越多,长英质矿物含量越高,岩石的可压裂性越好.颗粒磨圆度很大程度上影响岩石内部各组分之间的内摩擦角,从而影响岩石的抗压强度,控制岩石的可压裂性.构造对可压裂性的影响往往与纹层层理面的发育程度有关,一般纹层越发育,连续性也越强,层理面(结构弱面)也越发育,细粒沉积岩的可压裂性越差。

综上所述,细粒沉积岩的成分和结构对岩石的可压裂性均有一定控制作用.成分上,除生物碎屑中的碳酸盐矿物外,长英质矿物、碳酸盐矿物以及黄铁矿等矿物为细粒沉积岩主要的脆性矿物,它们

的相对含量增多有利于提高岩石的可压裂性;黏土矿物以及有机质含量在细粒沉积岩中表现为相对塑性,它们含量的增多反而降低岩石的可压裂性.细粒沉积岩的结构和构造对岩石的可压裂性也存在一定的影响.对于陆相湖盆来说,靠近盆缘陆源

碎屑供应强,岩性以粉砂岩,泥质粉砂岩以及粉砂质泥岩为主,长英质碎屑对细粒沉积岩的可压裂性影响作用明显;靠近湖盆中央陆源碎屑供应弱,岩性以泥灰岩和页岩为主,碳酸盐矿物对细粒沉积岩可压裂性的影响作用明显.

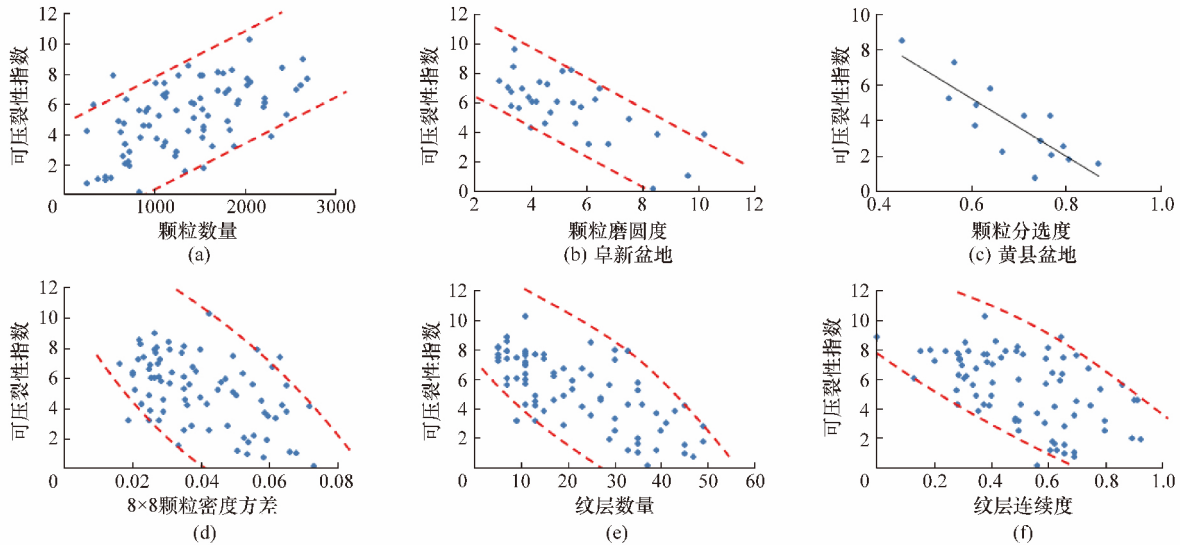


图 8 颗粒结构与细粒沉积岩可压裂性的对应关系

Fig. 8 The relationship between the granular structure and the fracability in fine-granular sedimentary rocks

### 3 成分对细粒沉积岩可压裂性的控制机理

#### 1) 长英质矿物

可压裂性是指泥页岩在水压作用下被压裂形成有效的复杂网状缝,从而提高产能的一种性质<sup>[39-40]</sup>.由于长英质矿物颗粒在细粒沉积岩中多为漂浮状,其与基质的匹配特征很大程度上与混凝土材料相似,然而可以从混凝土断裂力学和普通岩石断裂力学的角度来综合分析细粒沉积岩的破裂过程,进而分析岩石的可压裂性.在岩石断裂力学中,裂缝扩展必然消耗能量,并且裂缝扩展单位面积所消耗的能量  $R$ <sup>[41]</sup>为

$$R = \lim_{\Delta S_C \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta S_C}, \quad (4)$$

式中:  $\Delta S_C$  裂缝扩展的面积,  $m^2$ ;  $\gamma$  裂缝单位面积的表面能,  $J/m^2$ ;  $R$  为裂缝扩展阻力,  $N$ .

一般来说,裂缝的扩展遵循能量较小原则,当裂缝在基质中扩展时,应力达到极限应力  $\delta_s$ ,裂缝开始失稳扩展<sup>[42]</sup>为

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi L}}, \quad (5)$$

式中:  $\gamma_s$  是细粒沉积岩的基质的断裂表面能,  $J/m^2$ ;  $E$  为杨氏弹性模量,  $Pa$ ;  $L$  为裂缝长度,  $m$ .

当裂缝从基质扩展  $\Delta L$  后遇到颗粒,裂缝不稳定扩展条件变为

$$\delta_g = \sqrt{\frac{2E\gamma_g}{\pi(L+\Delta L)}}, \quad (6)$$

式中:  $\delta_g$  为裂纹在颗粒在中扩展的极限应力,  $N$ ;  $\gamma_g$  为细粒沉积岩颗粒的断裂表面能,  $J/m^2$ .一般  $\gamma_g$  大于  $\gamma_s$ ,从而使得  $\delta_g$  大于  $\delta_s$ <sup>[41]</sup>.然而,在压实和胶结作用较低的细粒沉积岩中,裂缝穿过颗粒所需要的能量要比绕过颗粒的大,在载荷增加到  $\delta_g$  之前,裂缝已经绕过颗粒,这样就增加了裂缝实际扩展长度,吸收了更多的能量,颗粒在客观上起到了阻裂的效果.正因如此,当裂缝延伸至颗粒时很难穿过颗粒,只有停止延伸(图 10b)或者绕过颗粒继续向前延伸(图 10a).

细粒沉积岩的断裂韧性特征也进一步说明了长英质矿物颗粒对裂缝的控制,断裂韧性为裂缝起裂后,阻碍裂纹继续向前扩展的能力( $K = \sqrt{2E\Gamma}$ ,  $K$  为断裂韧性,  $E$  为弹性模量,  $\Gamma$  为表面能).从断裂韧性与长英质矿物含量的对应关系可以看出,如图 9a 所示,断裂韧性总体上与长英质矿物含量呈现为正相关的趋势,从而进一步表明了长英质颗粒对裂纹的扩展具有阻碍作用.

正是因为长英质颗粒对裂缝的扩展起到阻碍作用,导致裂缝尖端的进一步延伸偏离了原来的方向,从而使裂缝由单一平直的形态向复杂弯曲的形态转变,加上多条裂缝的相互作用,从而构成了复杂的网状缝.此外,对于长英质矿物颗粒含量较高

的细粒沉积岩,裂缝形成后一般不会发生塑性变形而导致再次闭合,从而形成了有效的网状缝。

## 2) 碳酸盐矿物

细粒沉积岩中碳酸盐矿物的发育类型多样,常见的有钙质生物碎屑、泥晶、亮晶等类型。一般以生物碎屑和泥晶形式发育的碳酸盐矿物对裂纹扩展的控制作用存在较大的差异。前者在一定程度上虽然增强了生物碎屑的硬脆性,但相对于周围的基质来说,生物碎屑本身强度始终往往较低,或其与周围基质之间的接触面呈结构弱面,导致裂缝容易以单一的形态延伸,从而降低细粒沉积岩的可压裂性;后者以微晶或细晶为主,其对裂缝扩展的控制机理与长英质矿物颗粒的相同,表现为阻碍裂缝的扩展,在压裂的过程中易于形成复杂的网状缝,有利于提高细粒沉积岩的可压裂性。

从断裂韧性与碳酸盐矿物含量的对应关系也可以进一步证实,桦甸和阜新盆地的断裂韧性与碳酸盐矿物含量呈负相关或不相关(图9b),即碳酸盐矿物含量增多有利于裂纹的简单扩展。而五图盆地、胶莱盆地、黄县盆地以及抚顺盆地的断裂韧性与碳酸盐矿物含量表现为正相关(图9c),即碳酸盐矿物含量的越多,对裂纹扩展的阻碍作用越强。

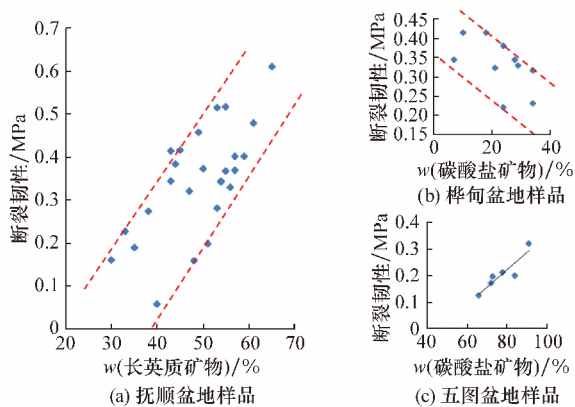


图9 断裂韧性与细粒沉积岩矿物成分含量的对应关系  
Fig. 9 The relation between fracture toughness and the content of mineral composition in fine-grained sedimentary rocks

导致相关性不同的原因可能有两个方面:  
a. 断裂韧性是受多种矿物共同作用的结果,如前面所述,碳酸盐矿物含量低时,长英质矿物和黏土矿物的影响作用较大。b. 由于不同类型的碳酸盐矿物所引起的岩石力学性质差异所致,钙质生物碎屑和细晶或微晶的碳酸盐矿物对裂纹扩展的影响机理不同,从而影响细粒沉积岩的断裂韧性和可压裂性。阜新盆地的碳酸盐矿物多赋存于煤屑裂纹中,以细脉为主,桦甸盆地的碳酸盐矿物多赋存于生物碎屑中(图10c)。而胶莱盆地的碳酸盐矿物以铁白

云石为主,抚顺盆地以菱铁矿为主,五图盆地以泥晶方解石为主(图10d),这些盆地大多为微晶或细晶的碳酸盐矿物。

## 3) 黏土矿物和有机质

黏土矿物和有机质在细粒沉积岩中均属于塑性较强的组分,对细粒沉积岩可压裂性的控制机理也基本相同。在岩石断裂力学中,格里菲斯判据( $G$ 判据)认为,当能量释放效应和裂纹扩展所消耗的表面能相等时,系统处于临界状态<sup>[43]</sup>。文献<sup>[44]</sup>进一步指出,当最大能量释放率 $G_{max}$ 达到某个临界值时,裂纹开始扩展,并且裂纹往往沿着产生最大能量释放率的方向扩展。在常规材料中,裂纹的扩展由材料的弹性效应( $\Gamma$ )和非弹性效应( $\Gamma_p$ )所消耗的能量所决定<sup>[45]</sup>,即

$$R = \Gamma + \Gamma_p. \quad (7)$$

Irwin 和 Orowan 在研究材料的塑性对裂纹扩展的影响时,指出了 $\Gamma_p$ 比 $\Gamma$ 大3个数量级以上<sup>[46]</sup>,说明在细粒沉积岩中,当粉砂层和黏土层处于相同的应力作用下时,由于黏土矿物比其他矿物的塑性强,易于吸收较多的能量,导致裂纹尖端优先向黏土层区域偏转,加之裂缝裂开后易于再次闭合,裂缝有效性低,岩石的可压裂性变差。

从断裂韧性与黏土矿物的对应关系可以看出,如图5b所示,黏土矿物含量越高,细粒沉积岩的断裂韧性越小,也表明了黏土矿物含量的增多利于裂缝的延伸。从图10e所显示的裂缝扩展特征也可表明,裂缝起裂后越容易沿泥岩层本身发生单一的延伸,不易形成复杂有效的网状缝,从而降低岩石的可压裂性。

TOC较高的细粒沉积岩,裂纹在其富有机质纹层中的扩展机理与在黏土纹层中的扩展机理基本相似,富有机质纹层相对周围的贫有机质纹层来说,其表现为相对塑性,在压裂的过程中本身吸收的能量较大,所以裂纹易于沿有机质纹层延伸,不利于发育形态复杂的有效网状缝,从而降低岩石的可压裂性。从图8c可以看出,细粒沉积岩的断裂韧性与有机碳含量为负相关关系,表明有机质含量提高有利于裂缝的扩展。镜下薄片裂纹发育特征也可表明,如图10f所示,富有机质纹层往往是裂纹延伸的路径,裂纹沿着有机质纹层发生单一的延伸,可以贯穿岩石而不发生转向。同时,在贫有机质层和富有机质层中,裂纹也易集中发育于富有机质层中(图10e)。因此,从力学角度看,有机质含量高的细粒沉积岩,岩石可压裂性低,而从生烃潜力角度看,有机质含量高的细粒沉积岩为油气勘探开发的



重点. 这两者似乎存在一定矛盾, 但有机质一般在细粒沉积岩中所占比例相对小, 与其他矿物组分比较, 其对可压裂性所起的作用小, 有机质含量

对细粒沉积岩可压裂性的影响在压裂作业过程中可作为一个参考.

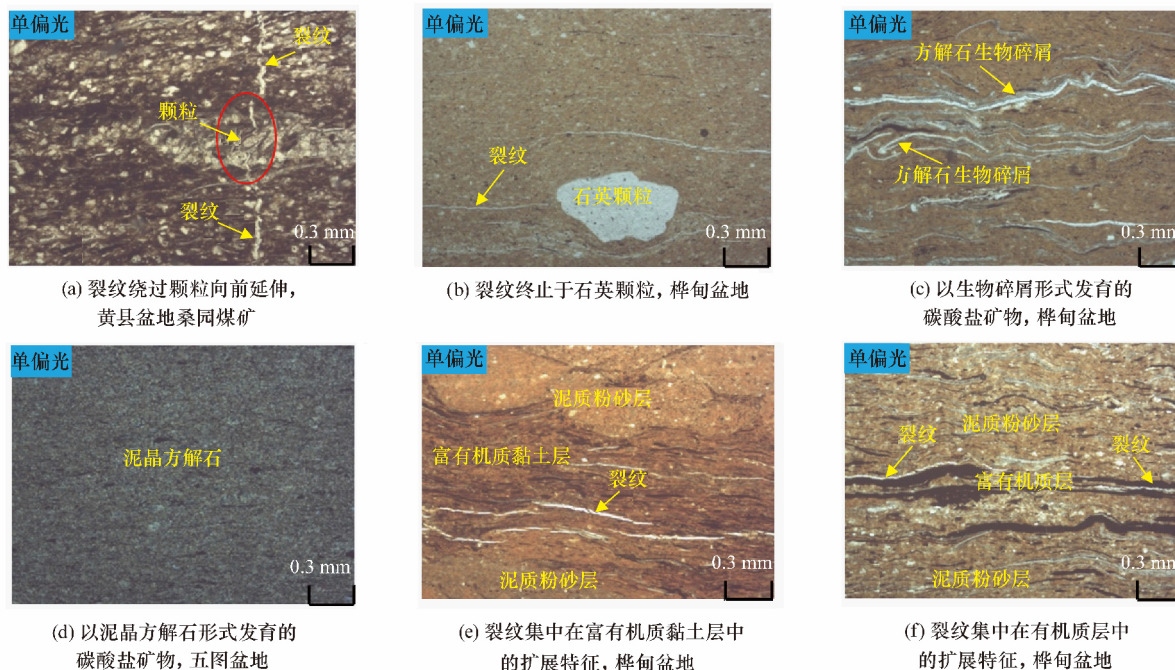


图 10 细粒沉积岩薄片镜下特征

Fig. 10 The microscopic features of thin slice in fine-grained sedimentary rocks

## 4 结 论

1) 长英质矿物和碳酸盐矿物作为细沉积岩最主要的脆性矿物, 可压裂性随着脆性矿物含量增多均表现为先降低后增大的趋势. 长英质矿物或碳酸盐矿物的质量分数小于 30% 时, 可压裂性与该矿物含量呈负相关或相关性较弱; 矿物的质量分数高于 30% 时, 二者可呈良好的正相关.

2) 长英质矿物和碳酸盐矿物对细粒沉积岩可压裂性的控制作用基本相同: 除了生物碎屑成因的碳酸盐矿物对裂缝的扩展具有促进作用外, 长英质颗粒和以微晶或细晶形式发育的碳酸盐矿物含量增多对岩石断裂韧性都具有增强作用, 表现为阻碍裂纹的单向扩展, 使裂纹扩展方向易于发生偏转, 利于发育复杂有效的网状缝, 从而提高细粒沉积岩的可压裂性.

3) 黏土矿物和有机质含量越高, 岩石的可压裂性越差. 它们对细粒沉积岩可压裂性的控制机理也基本相同: 黏土矿物和有机质在细粒沉积岩中属于塑性组分, 能量释放率最大, 是裂缝优先扩展的方向, 但它们的塑性较强, 裂缝易于再次闭合, 不利形成有效裂缝, 反而降低岩石的可压裂性. 随成岩作用强度的增大, 塑性较强的高岭石和蒙脱石向硬

脆性较高的伊利石和绿泥石转化, 细粒沉积岩的脆性增强, 可压裂性变好.

## 参考文献:

- [1] 祝彦贺, 陈桂华, 梁建设, 等. 页岩油气甜点识别的综合评价方法[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 301-309.  
ZHU Yanhe, CHEN Guihua, LIANG Jianshe, et al. Comprehensive evaluation methods of shale oil and shale gas sweet spot identification[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(2): 301-309.
- [2] 郭英海, 赵迪斐. 微观尺度海相页岩储层微观非均质性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 300-307.  
GUO Yinghai, ZHAO Difei. Analysis of micro-scale heterogeneity characteristics in marine shale gas reservoir[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 300-307.
- [3] 谢国梁, 刘水根, 沈玉林, 等. 赣东北荷塘组页岩气成藏条件及有利区评价[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 704-713.  
XIE Guodong, LIU Shuiyin, SHEN Yulin, et al. Reservoir-forming conditions and favorable areas evaluation of shale gas reservoir in Hetang formation north-

- eastern Jiangxi area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4): 704-713.
- [4] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.  
ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [5] 蒋廷学, 卞晓冰, 苏 瓌, 等. 页岩可压性指数评价新方法及应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 16-20.  
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, SU Yuan, et al. A new method for evaluating shale fracability index and its application[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 16-20.
- [6] 张明扬, 李贤庆, 董泽亮, 等. 皖南地区下寒武统荷塘组页岩矿物组成及脆度分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 177-183.  
ZHANG Mingyang, LI Xianqing, DONG Zeliang, et al. Analyses on mineral compositions and brittleness of the lower cambrian hetang formation shale in southanhui province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 177-183.
- [7] 潘结南, 孟召平, 刘保民. 煤系岩石的成分、结构与其冲击倾向性关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4422-4427.  
PANG Jienan, MENG Zhaoping, LIU Baomin. Relationship between rock composition and texture of coal-bearing formation and its burst potential[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4422-4427.
- [8] 杨海博, 武云云. 致密储层岩石的微观结构和力学性质试验分析[J]. 复杂油气藏, 2011, 4(3): 10-15.  
YANG Haibo, WU Yunyun. The experimental analysis of microstructure and mechanical properties of tight reservoir rocks[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2011, 4(3): 10-15.
- [9] NELSON R A. Geologic Analysis of naturally fractured reservoirs; contribution in petroleum geology and engineering[M]. Houston; Gulf Publishing Company, 1985: 320.
- [10] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [11] 聂海宽, 唐 玄, 边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484-491.
- NIE Haikuan, TANG Xuan, BIAN Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484-491.
- [12] 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 27-323.  
LI Xinjing, LÜ Zonggang, DONG Dazhong, et al. Geologic controls on accumulation of shale gas in North America[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 27-323.
- [13] JARVIE D, HILL R J, RUBLE 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.
- [14] WANG F P. Production fairway: Speed rails in gas shale[C]//The 7th Annual Gas Shale Summit. Dallas; Society of Petroleum Engineers, 2008: 6-7.
- [15] 李钜源. 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 615-620.  
LI Jv yuan. Analysis on mineral components and frangibility of shales in dongying depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 615-620.
- [16] 胡明毅, 邓庆杰, 邱小松. 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩气储层矿物成分特征[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2013, 35(5): 1-6.  
HU Mingyi, DENG Qingjie, QIU Xiaosong. Characteristics of mineral composition of shale gas reservoirs of lower cambrian niutitang formation in the upper yangtze region[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(5): 1-6.
- [17] 孟庆峰, 侯贵廷. 页岩气成藏地质条件及中国上扬子区页岩气潜力[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(1): 11-14.  
MENG Qingfeng, HOU Tinggui. Geological controls on shale gas play and potential of shale gas resource in upper Yangtze region, China[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(1): 11-14.
- [18] 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): 1527-1547.  
YAO Jun, SUN Hai, HUANG Caoqing, et al. Key mechanical problems in the development of shale gas reservoirs[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2013, 43(12): 1527-1547.
- [19] 董丙响, 程远方, 刘钰川, 等. 页岩气储层岩石物理性质[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2013, 28

- (1):25-28.  
DONG Bingxiang, CHEN Yuanfang, LIU Yucuan, et al. Research of the petrophysical property of shale has reservoirs[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2013, 28(1):25-28.
- [20] 王 阳, 朱炎铭, 陈尚斌, 等. 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气形成条件分析[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4):586-594.  
WANG Yang, ZHU Yanming, CHEN Shangbing, et al. Formation conditions of shale gas in Lower Cambrian Niutitang formation, northwestern hunan[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4):586-594.
- [21] 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):523-527.  
YUAN Junliang, DENG Jingen, ZHANG Dingyu, et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3):523-527.
- [22] LAJTAIE Z. A theoretical and experimental evaluation of Griffith theory of brittle fracture[J]. Tectonophysics, 1971, 11(2):129-156.
- [23] BAZANT Z P. Crack band theory for fracture of concrete[J]. Materials and Structures, 1983, 16(2):155-177.
- [24] SANTIAGO S D, HILSDORF H K. Fracture mechanism of concrete under compressive loads[J]. Cement and Concrete Research, 1973, 3(4):363-388.
- [25] EBRAHIMI M E, CHEVALIER J, FANTOZZI G. Slow crack growth behavior of alumina ceramics[J]. Journal of Materials Research, 2000, 15(1):142-147.
- [26] NEMAT-NASSER S, HORII H. Compression-induced non-planar crack extension with application to splitting, exfoliation and rock bursts[J]. Journal of Geophysics Research, 1982, 87(B8):6805-6821.
- [27] MELIN S. When does a crack grow under mode II conditions[J]. International Journal of Fracture, 1986, 30(1):103-104.
- [28] LI Jianteng, CAO Ping, YUAN Haiping. Testing study of subcritical crack growth velocity and fracture toughness of marble[J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2005, 11(1):23-25.
- [29] JESSE V H. Glossary of geology and related sciences[M]. Washington D C: American Geological Institute, 1960:99-102.
- [30] 刘恩龙, 沈珠江. 岩土材料的脆性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 4(19):3449-3453.  
LIU Enlong, SHEN Zhujiang. Study on brittleness of geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 4(19):3449-3453.
- [31] 王 祥, 刘玉华, 张 敏, 等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2):350-355.  
WANG Xiang, LIU Yuhua, ZHANG Min, et al. Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2):350-355.
- [32] 郭天魁, 张士诚, 葛洪魁. 评价页岩压裂形成缝网能力的新方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(4):947-954.  
GUO Tiankui, ZHANG Shicheng, GE Hongbo. A new method for evaluating ability of forming fracture network in shale reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4):947-954.
- [33] 蒋廷学, 卞晓冰, 苏 瓌, 等. 页岩可压性指数评价新方法及应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5):16-20.  
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, SU Huan, et al. A new method for evaluating shale fracability index and its application[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5):16-20.
- [34] 王 鹏, 纪有亮, 潘仁芳, 等. 页岩脆性的综合评价方法:以四川盆地 W 区下志留统龙马溪组为例[J]. 天然气工业, 2013, 33(12):48-53.  
WANG Peng, JI Youliang, PAN Renfang, et al. A comprehensive evaluation methodology of shale brittleness: A case study from the Lower Silurian Longmaxi Fm in block W, Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12):48-53.
- [35] 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, 105:727-33.
- [36] RICKMAN R, MULLEN M, PETER E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale[R]. New York; SPE, 2008.
- [37] 陈 勉, 金 衍, 袁长友. 围压条件下岩石断裂韧性的实验研究[J]. 力学与实践, 2001, 23(4):32-35.  
CHEN Mian, JIN Yan, YUAN Changyou. Study on the experiment for fracture toughness under confining pressure[J]. Mechanics in Engineering, 2001, 23(4):32-35.

(下转第 578 页)

油勘探与开发,2016,43(4):580-589.

MACunfei, DONG Chunmei, LUAN Guoqiang, et al. Types, characteristics and effects of natural fluid pressure fractures in shale: A case study of the Paleogene strata in Eastern China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 580-589.

- [62] 张 顺,陈世悦,蒲秀刚,等. 断陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及储层特征: 以东营凹陷沙河街组和沧东凹

陷孔店组为例[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3): 568-581.

ZHANG Shun, CHEN Shiyue, PU Xiugang, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of fine-grained sedimentary rocks in Paleogene, southern Bohai fault-depressed lacustrine basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(3): 568-581.

(责任编辑 姚志昌)

(上接第 548)

- [38] 杜鸿善,贾 璋. 实验数据的统计检验及其处理[J]. 原子能科学技术, 1987, 21(4): 397-403.

DU Hongshan, JIA Zhang. Statistic inspection and mathematical treatment of experimental data[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1987, 21(4): 397-403.

- [39] CHONG K K, GRIESER W V, PASSMANA. A completions guide book to shale-play development; a review of successful approaches to wards shale-play stimulation in the last two decades [R]. Calgary: CSUG/SRE 133874, 2010

- [40] MULLEN M, ENDERLIN M. Fracability index- More than just calculating rock properties[C]//Paper 159755-MS Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonin: SPE, 2012.

- [41] 李世愚. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 1-468.

LI Shiyu. Introduction to rock fracture mechanics

[M]. Hefei: University of Science & Technology China Press, 2010: 1-468.

- [42] PRASAD B K R. Fracture Mechanics of Concrete [M]. Amsterdam: Elsevier, 1983: 219-228.

- [43] GRIFFITH A A. The Phenomena of rupture and flow in solids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1921, 221(2): 163-198.

- [44] PALANISWAMY K, KNAUSS W G. II-On the Problem of crack extension in brittle solids under general loading [J]. Mechanics Today, 1978, 4: 87-148.

- [45] 徐世焱. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 18-140.

XU Shilang. Fracture mechanics of concrete [M]. Beijing: Science Press, 2011: 18-140.

- [46] OROWAN E. Fracture and strength of solids[J]. Reports on Progress in Physics, 1949, 12(1): 185-232.

(责任编辑 姚志昌)