

文章编号: 0253-2697(2019)01-0074-12 DOI:10.7623/syxb201901006

湖相细粒沉积岩纹层结构差异对可压裂性的影响

熊周海¹ 操应长^{1,2} 王冠民^{1,2} 梁超¹ 石晓明¹ 李明鹏³ 付尧⁴ 赵寿强⁵

(1. 中国石油大学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. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 4. 白山市地震台 吉林白山 134300; 5. 青岛嘉航石油科技有限公司 山东青岛 266590)

摘要: 细粒沉积岩纹层结构(如纹层发育程度、厚度大小、厚度差异性和连续度)是影响岩石力学性质以及裂缝扩展的内在因素。通过对中国东部中生代—新生代的湖相细粒沉积岩开展研究,以常规三轴实验和断裂韧性实验为基础,结合图像分析和处理技术,分析了不同纹层结构与岩石力学参数之间的对应关系,综合评价了湖相细粒沉积岩纹层结构差异对可压裂性的影响。研究表明,细粒沉积岩的可压裂性指数与纹层数量、连续度呈负相关,但与纹层厚度方差、颗粒垂向分布方差呈正相关。纹层发育且连续性强的细粒沉积岩,其塑性较强,压裂缝以沿纹层界面或塑性纹层(黏土纹层或有机质纹层)扩展为主,裂缝易再次闭合,从而导致岩石的可压裂性降低。纹层厚度差异性较大、颗粒垂向分布均匀度较高的细粒沉积岩,其脆性较高,在压裂过程中易形成复杂有效的网状缝,从而提高岩石的可压裂性。此外,细粒沉积岩组分、颗粒结构以及成岩作用对可压裂性也具有重要的控制作用。

关键词: 纹层结构; 细粒沉积岩; 可压裂性; 连续性; 控制机理

中图分类号: TE357.11 文献标识码: A

Influence of laminar structure differences on the fracability of lacustrine fine-grained sedimentary rocks

Xiong Zhouhai¹ Cao Yingchang^{1,2} Wang Guanmin^{1,2} Liang Chao¹
Shi Xiaoming¹ Li Mingpeng³ Fu Yao⁴ Zhao Shouqiang⁵

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Shandong Qingdao 266071, China; 3. Petrochina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 4. Baishan Seismostation, Jilin Baishan 134300, China; 5. Qingdao Jiahang Petroleum Technology Company Limited, Shandong Qingdao 266590, China)

Abstract: Laminar structures of fine-grained sedimentary rocks (e. g., laminar development degree, thickness, thickness difference and continuity) are intrinsic factors affecting the mechanical properties of rocks and crack propagation. Taking the Mesozoic-Cenozoic lacustrine fine-grained sedimentary rocks of Eastern China as an example, the corresponding relationship between different laminar structures and mechanics parameters of rocks is analyzed based on the conventional triaxial test and fracture toughness experiment in combination with image analysis and processing technology. Meanwhile, this paper comprehensively evaluates the influence of the laminar structure difference of lacustrine fine-grained sedimentary rocks on the fracability. The results show that the fracability index of fine-grained sedimentary rocks is negatively correlated with the quantity and continuity of laminae, while positively correlated with the laminar thickness variance and the vertical distribution variance of grains. The developed fine-grained sedimentary rocks with strong continuity show excellent plasticity. The compressive fractures are mainly extended along the lamina interface or the laminae with certain plasticity (e. g., clay lamina or organic lamina), easy to close again in the fine-grained sedimentary rocks, thus reducing the fracability of rock. The fine-grained sedimentary rocks with large difference in thickness and high homogeneity of laminar vertical distribution have high brittleness, which is beneficial to the development of complex and effective mesh fractures in fracturing process, thus improving the fracability of rocks. In addition, the composition, particle texture and diagenesis of fine-grained sedimentary rocks also play an important role in controlling the fracability.

Key words: laminar structure; fine-grained sedimentary rocks; fracability; continuity; controlling mechanism

引用: 熊周海, 操应长, 王冠民, 梁超, 石晓明, 李明鹏, 付尧, 赵寿强. 湖相细粒沉积岩纹层结构差异对可压裂性的影响[J]. 石油学报, 2019, 40(1): 74-85.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41572123 和 U1762217), 国家科技重大专项(2016ZX05024-003 和 2016ZX05006-003), 山东省自然科学基金项目(ZR2014DM013), 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 41602142)和中国石油大学(华东)研究生创新基金项目(18CX06022A)资助。

第一作者: 熊周海, 男, 1990年1月生, 2013年获中国石油大学(华东)资源勘查工程专业学士学位, 2017年获中国石油大学(华东)地质学硕士学位, 现为中国石油大学(华东)地质学博士研究生, 主要从事页岩油气勘探开发工作。Email: xiongzhouhai@126.com

通信作者: 王冠民, 男, 1969年4月生, 1991年获长春地质学院地质学专业学士学位, 2005年获中国科学院广州地球化学研究所矿物学、岩石学、矿床学专业博士学位, 现为中国石油大学(华东)教授、博士生导师, 主要从事石油地质与勘探研究。Email: wguanmin@sina.com

Cite: XIONG Zhouhai, CAO Yingchang, WANG Guanmin, LIANG Chao, SHI Xiaoming, LI Mingpeng, FU Yao, ZHAO Shouqiang. Influence of laminar structure differences on the fracability of lacustrine fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(1): 74-85.

中国陆相湖盆的地质条件复杂,在沉积环境、沉积物质组分和结构、成岩作用等方面均存在巨大差异^[1-5],造成细粒沉积岩的非均质性强^[6-7],开发难度大,获得工业产能的页岩油气井较少。细粒沉积岩的有效压裂是影响页岩油气产能的关键^[8-9],其纹层结构是制约压裂性的内在因素^[10]。纹层的发育程度、厚度差异性、连续度等不同结构直接控制着岩石裂缝的扩展和分布,是评价细粒沉积岩可压裂性的关键。

可压裂性是指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^[11-12]。在可压裂性的相关力学研究中,前人在均质介质理论上开展了各向异性体的研究,提出了弹性非均质体的本构方程和弹性常数^[13-14],岩石强度的差异是导致岩石各向异性破坏的原因^[15]。H-W 模型、H-F 模型、黄氏模型等水力压裂模型相继被提出^[16-18],在模型的基础上,利用数值模拟技术研究裂缝的起裂、扩展以及贯通过程得到快速发展^[19-21],岩石的单轴压缩、拉伸、剪切以及巴西劈裂等试验方法也逐渐成熟^[22-24]。一些研究从层状岩石的不同倾角方向来分析岩石力学性质、破坏方式以及破坏准则^[22,25-27],一些研究通过利用水泥、重晶石粉和石膏复合砂浆等相似材料制作模型来开展模拟分析^[25,28]。研究表明,岩性由砂岩、粉砂岩过渡到泥岩,岩石的抗剪强度减小^[29-31];纹层的结构面(如纹层界面、天然裂缝)属于力学薄弱面,易削弱岩石强度^[32-35]。

细粒沉积岩纹层结构的差异对可压裂性的影响尚处于初步探索阶段。中国陆相湖盆页岩的非均质性

强,纹层结构差异性大,可压裂性复杂,严重影响页岩油气的开发进程。笔者基于常规三轴压裂实验和断裂韧性实验,结合数字图像分析技术,研究了细粒沉积岩不同纹层结构类型对可压裂性的控制规律,为提高页岩压裂的认识提供了理论支持。

1 实验与方法

1.1 样品测试

实验共选取了 139 块成分、结构以及构造差异较大的细粒沉积岩样品,包括新生界样品 94 块(济阳拗陷沙河街组 36 块,黄县盆地黄县组 15 块,五图盆地五图组 6 块,桦甸盆地桦甸组 10 块以及抚顺盆地计军屯组和西露天组 27 块)和中生界样品 45 块(胶莱盆地莱阳组 13 块和阜新盆地阜新组 32 块)。对样品进行 X 射线衍射(XRD)分析、干酪根类型鉴定、岩石热解分析、总有机碳(TOC)含量分析等常规分析测试,并开展了三轴压裂实验和断裂韧性实验。

表 1 为常规分析的统计结果。镜质组反射率(R_o)为 0.3%~0.8%,表明各盆地的成岩作用普遍较低,且差别不大。济阳拗陷、黄县盆地和桦甸盆地的新生界样品中干酪根多为腐泥型和含腐殖腐泥型,而阜新盆地和胶莱盆地的中生界样品中干酪根以中间型和含腐泥腐殖型为主。五图盆地以泥晶灰岩为主,样品中暂未发现长英质矿物,黄县盆地以高 TOC 含量为特征。镜下薄片观察可知,各盆地以及各样品的结构差异性大,纹层的厚度、连续性存在较大差异。

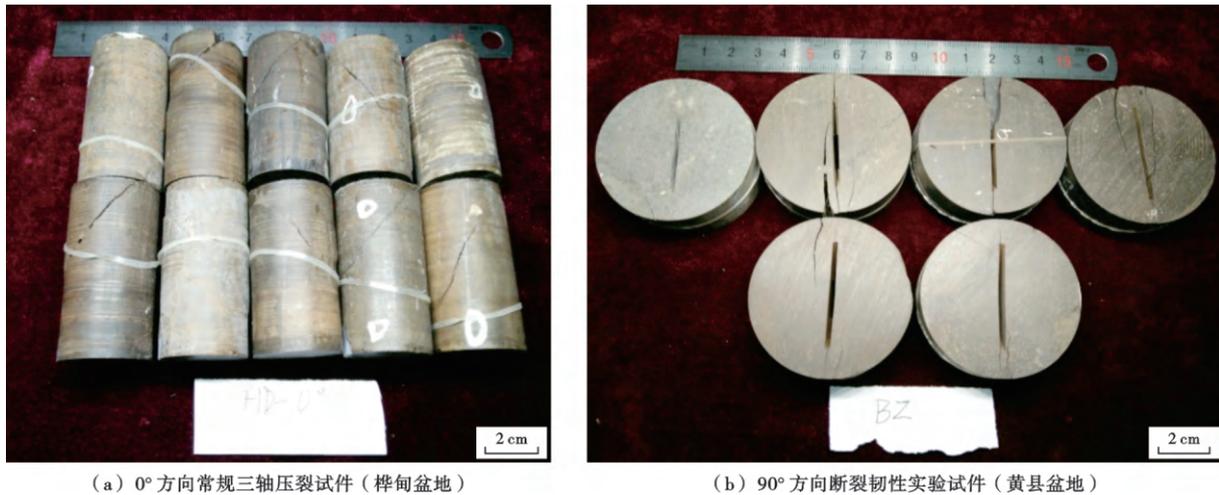
表 1 实验样品的基本特征

Table 1 Basic characteristics of experimental samples

地区	矿物含量/%			R_o / %	TOC 含量/ %	生烃势/ ($mg \cdot g^{-1}$)	降解率/ %	干酪根类型
	长英质	碳酸盐	黏土					
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 ₁ -II ₂
阜新盆地	0~62.0	0~100.0	0~34.0	0.5~0.7	0~35.0	0.5~56.0	0.3~17.0	II ₂ -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 ₁ 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 ₁
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 ₁

力学实验装置的型号为 TAW-1000 实验系统。实验试件选择未发育天然或人工裂缝的样品,以排除宏观裂缝对实验的影响。常规三轴实验的试件以 0°(与纹层平行)为主[图 1(a)],实验围压设为 30 MPa。在实验加载过程中,仪器自动记录实验试件的轴向和径向应变的全过程,并计算出岩石的弹性模量和泊松比。

巴西圆盘(CCNBD)法是目前测试 I 型断裂韧性的一种较为成熟的方法。实验条件为常温常压,采用“人”字形切槽的巴西圆盘法,应力加载过程中保持“人”字形裂缝方向与力的加载方向平行,直至岩石发生破坏,数据由仪器自动记录,根据所记录的数据计算岩石的 I 型断裂韧性值。



(a) 0°方向常规三轴压裂试件(桦甸盆地)

(b) 90°方向断裂韧性实验试件(黄县盆地)

图1 力学实验试件

Fig. 1 Experimental specimens of mechanics

1.2 数据处理

数据处理的过程主要对可压裂性指数进行计算。可压裂性的评价方法较多,例如:基于脆性指数的可压裂性评价方法^[36-39],基于多因素的层次分析评价方法^[9,40]以及基于脆性指数和断裂韧性的综合评价方法^[41-45]。第1种评价方法从细粒沉积岩的脆性出发,缺点在于考虑的影响因素不够全面。研究发现,即便岩石的脆性相近,其可压裂性可以存在很大差异。第2种评价方法所考虑的因素不确定,难以达成统一的标准。综合考虑前人的研究并结合实验条件,笔者选择第3种基于脆性指数和断裂韧性的综合评价方法开展分析。

脆性指数的计算基于杨氏模量和泊松比^[46],即:

$$B_Y = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \times 100\% \quad (1)$$

$$B_P = \frac{\nu - \nu_{\max}}{\nu_{\min} - \nu_{\max}} \times 100\% \quad (2)$$

$$B = \frac{B_Y + B_P}{2} \quad (3)$$

为了与围压 30 MPa 的脆性指数匹配,室温下由巴西圆盘实验所获得的岩石断裂韧性值可根据经验公式^[46]计算为:

$$k = 0.2167p + k_0 \quad (4)$$

其中, k_0 的计算关系为:

$$k_0 = \sqrt{2EI} \quad (5)$$

对 k 进行无量纲化,可得:

$$k_n = \frac{k - k_{\min}}{k_{\max} - k_{\min}} \quad (6)$$

与数理统计分析中用积的形式来表征多重因素综合影响类似^[47],可压裂性指数用脆性指数和断裂韧性的比值来表征^[41]:

$$F = \frac{B}{k_n} \quad (7)$$

1.3 纹层结构的表征

纹层结构的表征利用 Matlab 图像分析技术对细粒沉积岩的薄片图像进行识别,表征出纹层数量、厚度、厚度差异以及连续性等。技术上主要包括以下几个步骤:①图像预处理,即对细粒沉积岩尤其是页岩中的顺层裂缝或不规则裂缝利用 photoshop 软件进行涂抹处理,消除非纹层因素。②加载图像[图 2(a)],将图像归一化到规定的尺寸(如设置图像尺寸为 1944 像素×2592 像素),以便得到统一的特征参数值。③对图像进行均值滤波、膨胀运算和二值化处理[图 2(b)]。均值滤波可以将周围临近像素点均值为目标像素点,以便去掉瑕疵;膨胀运算将有效像素点进行扩充,消除图像中一些较大的“瑕疵”;二值化将图像中所有像素点的灰度值按 0 或 255 设置,只显示黑白图像。④判定图像是否有纹层。统计图像每一行的亮色像素点,根据波峰(亮像素点的高值)来设定第一阈值,从而判定图像是否有纹层。⑤确定亮色纹层的数量。设定第二阈值,根据相邻两个波峰找到波谷位置,若有效波峰(大于第一阈值的波峰)与相邻波谷的高程差大于第二阈值,认为存在波谷,从而获取波峰和波谷的位置,确定亮、暗纹层的数量(有效波峰数即为亮纹层数,有效波谷数即为暗纹层数)[图 2(c)]。在设定亮纹层和暗纹层带的带宽时,亮纹层和暗纹层存在亮—暗过渡带,实验以波峰与波谷高程差的 2/5 处定为亮—暗纹层界线[图 2(d)]。⑥确定亮—暗纹层的连续度。在亮—暗纹层各自的区域中,以图像中每一行像素点为单元(图 3),统计相应的断点数(即每一行像素点中一个或者相邻多个同色像素点的计数),并求出平均断点数的倒数,倒数的大小可以表征纹层的连续度。⑦将纹层数、厚度、连续度以及亮—暗纹层的厚度方差等参数的统计和计算结果写入表格中(表 2)。

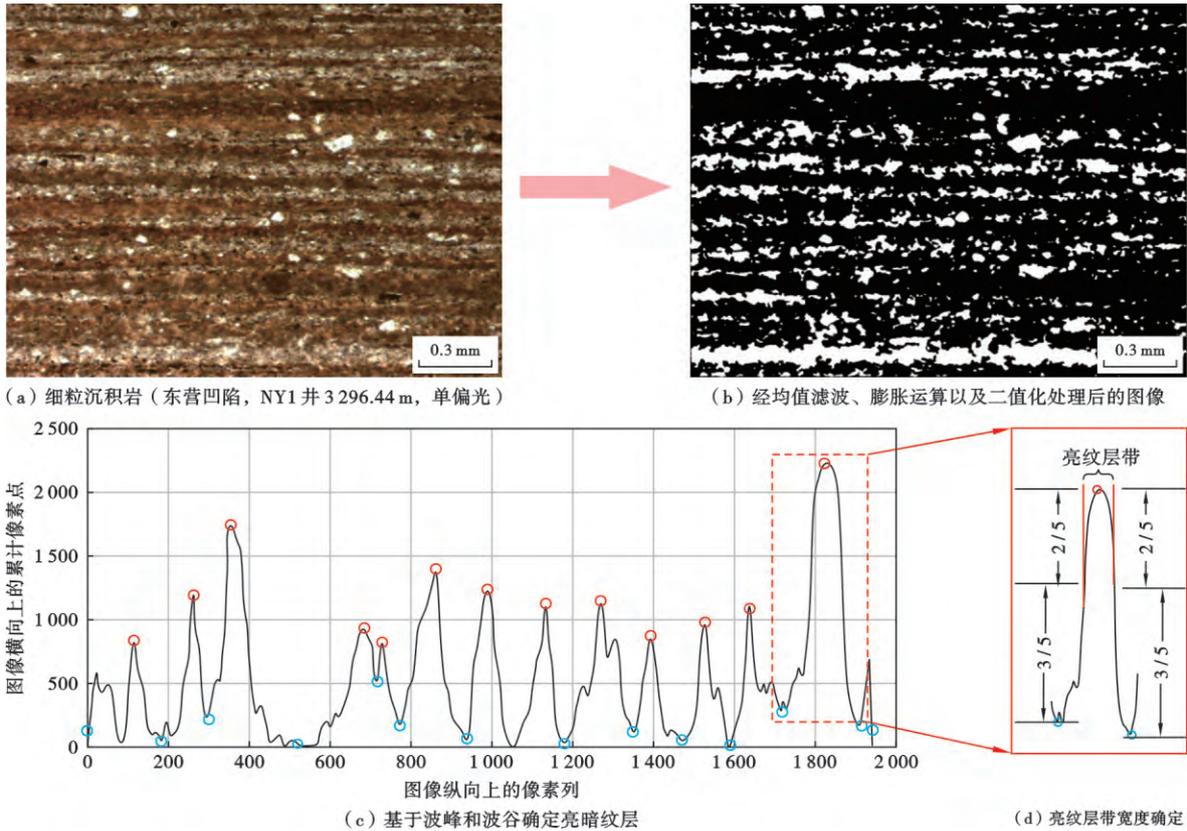


图 2 细粒沉积岩薄片图像处理过程

Fig. 2 Image processing of rock thin sections of fine-grained sedimentary rocks

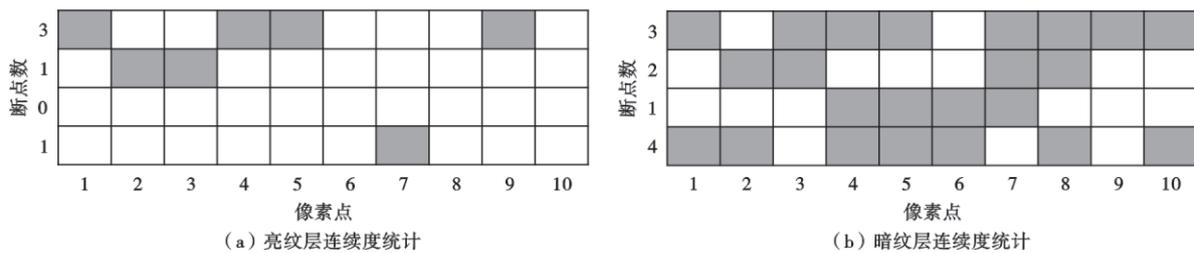


图 3 纹层连续度统计

Fig. 3 Statistics of the lamina continuity

表 2 岩石薄片图像分析结果

Table 2 Image analysis results of rock thin section

输出类型	值
亮纹层数/层	14
亮纹层连续度	0.68765
亮纹层平均厚度/mm	0.050843
亮纹层厚度方差/mm	0.120496
亮、暗纹层平均连续度	0.736013
亮、暗纹层平均厚度/mm	0.046672
暗纹层数/层	15
暗纹层连续度	0.784375
暗纹层平均厚度/mm	0.0425
暗纹层厚度方差/mm	0.13796
亮、暗纹层平均厚度方差/mm	0.129228

1.4 灰色关联分析

笔者利用灰色关联分析方法来分析细粒沉积岩不同因素对可压裂性的影响。灰色关联分析通过灰色关联度可分析和确定系统诸因素间的影响程度或因素对系统主行为的贡献程度。方法的主要分析步骤为:①确定参考数列和比较数列;②数据标准化,即对所有不同单位或者不同意义的数据进行无量纲化;③计算关联系数,其中分辨系数取值为 0.5;④计算关联度,即对关联系数进行加权平均。

2 实验结果分析

对 139 块样品的 488 张薄片进行了薄片分析。磨

制的薄片在同等放大倍数下进行单偏光拍摄,每块样品选取5张代表性照片进行图像处理,并计算纹层结构的平均值,获得样品的纹层结构参数。将纹层结构参数与对应的力学参数进行比较,分析纹层的发育程度、平均厚度、厚度差异、连续性、细粒沉积岩组分、颗粒结构和成岩作用等对可压裂性的影响,以及不同因素对可压裂性影响的主次关系。

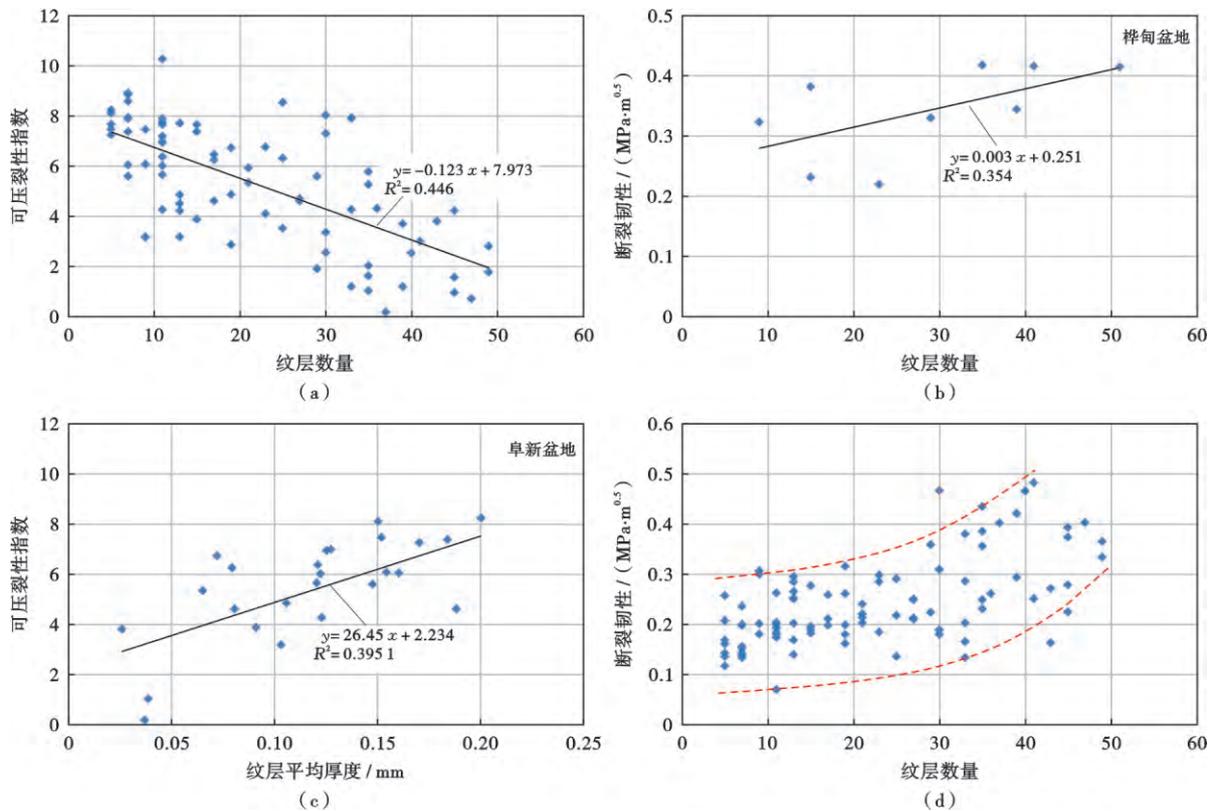
2.1 纹层发育程度

岩石薄片中文层的数量反映细粒沉积岩纹层的发育程度。统计分析(图4)表明,除个别异常点外,纹层数量总体上与细粒沉积岩的抗压强度、弹性模量和可压裂

性指数呈负相关,即细粒沉积岩的纹层越发育,岩石的强度和可压裂性反而降低。泊松比与纹层数量的对应关系显示[图4(d)],当纹层数量小于30时,随着纹层数量增多,岩石泊松比增长的斜率较低;当纹层数量大于30时,泊松比增长的斜率较大,岩石的塑性迅速增强。

2.2 纹层平均厚度

阜新盆地细粒沉积岩的可压裂性指数与纹层平均厚度的相关性分析表明,可压裂性指数与纹层的平均厚度呈正相关[图4(c)]。细粒沉积岩中,纹层厚度大有利于增加岩石的脆性,纹层细密的细粒沉积岩不利于岩石的压裂。



注:(a)和(d)为胶莱盆地、阜新盆地、抚顺盆地、黄县盆地、桦甸盆地、五图盆地和济阳拗陷样品数据。

图4 细粒沉积岩纹层数量和厚度与力学参数的关系

Fig. 4 Relationships between the number and thickness of lamina and mechanical parameters in fine-grained sedimentary rocks

2.3 纹层厚度差异

纹层厚度的差异性由纹层厚度的方差来表征。方差越大表明纹层厚度的差异性也越大。纹层厚度的差异对岩石力学性质有着重要的影响。在图5中,分析的数据点相对分散可能与细粒沉积岩的组分差异有关。例如,阜新盆地的细粒沉积岩中发育一定量的煤屑,桦甸盆地的细粒沉积岩中发育少量的生物碎屑,胶莱盆地的细粒沉积岩中粉砂含量偏高等。细粒沉积岩的纹层厚度方差总体上与抗压强度、弹性模量和可压裂性指数呈正相关,而与泊松比呈负相关(图5),表明

细粒沉积岩纹层厚度差异越大,岩石弹性模量越高,可压裂性越好。

2.4 纹层连续性

为了更加直观地对比分析不同样品纹层的连续性,将各样品中文层的连续度归一化为0~1之间的值。连续度越接近于1,指示纹层的连续性越强。分析表明,细粒沉积岩的纹层连续度总体上与抗压强度、弹性模量和可压裂性指数呈负相关[图6(a)、图6(b)],而与岩石的泊松比呈正相关[图6(c)],即细粒沉积岩的连续性越好,岩石强度反而越低,可压裂性越差。在岩

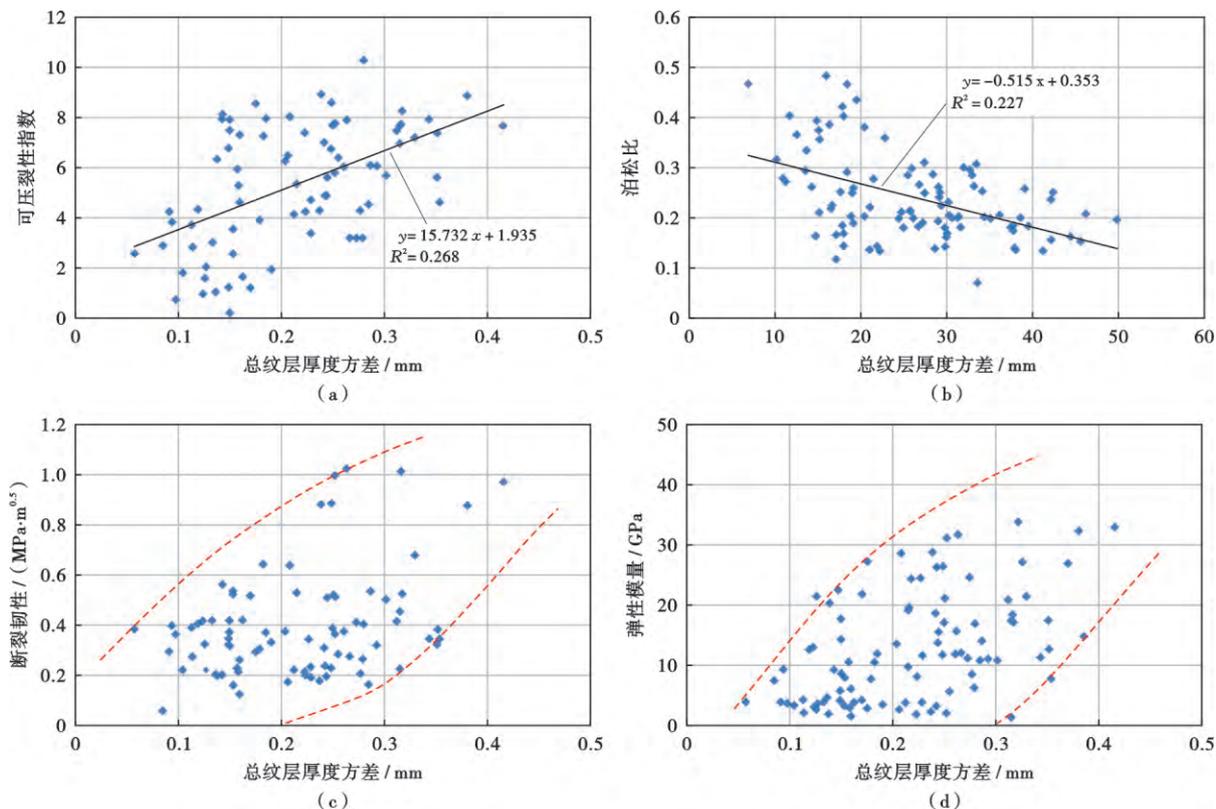


图 5 细粒沉积岩纹层厚度差异与力学参数的关系

Fig. 5 Relationships between thickness differences of lamina and mechanical parameters in fine-grained sedimentary rocks

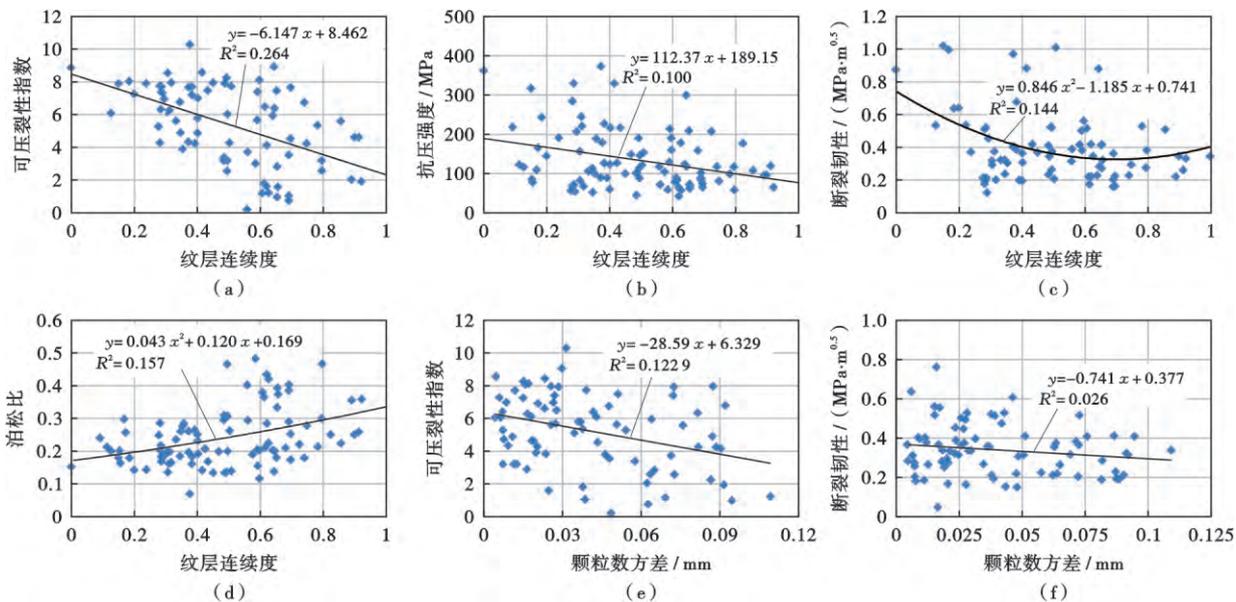


图 6 细粒沉积岩纹层连续度、颗粒垂向分布均匀度与力学参数的对应关系

Fig. 6 Relationships between lamina continuity, vertical distribution uniformity and mechanical parameters in fine-grained sedimentary rocks

性上,细粒沉积岩中纹层的连续度较低时,表现为以块状的泥质粉砂岩和粉砂岩为主;而当其连续度较高时,细粒沉积岩以纹层发育较好的泥页岩、页岩为主。在纹层连续性较差的泥质粉砂岩和粉砂岩中,脆性矿物(如长英质矿物)较发育,岩石强度较高,可压裂性较

好;而在纹层连续性较好的泥页岩和页岩中,塑性矿物(如黏土矿物)较发育,岩石强度较低,可压裂性较差。

2.5 颗粒垂向分布均匀度

颗粒垂向分布的均匀程度反映沉积时水动力的稳定性,在一定程度上也反映出颗粒沿层分布的状况。

笔者利用 6×1 区域的颗粒数方差来表征颗粒的垂向分布均匀程度,即将薄片图像在平行纹层方向上等分为 6 个区域,再统计每个区域的颗粒数,进而统计出颗粒垂向分布方差。方差越大,表明颗粒在垂向上的分布均匀度越差,但颗粒沿层分布越好。图 6(e) 的统计表明,细粒沉积岩的可压裂性指数随颗粒数方差的增大而降低。即细粒沉积岩颗粒的垂向分异性越强,成层性越高时,岩石强度反而越低,脆性减弱,可压裂性变差。

2.6 其他因素

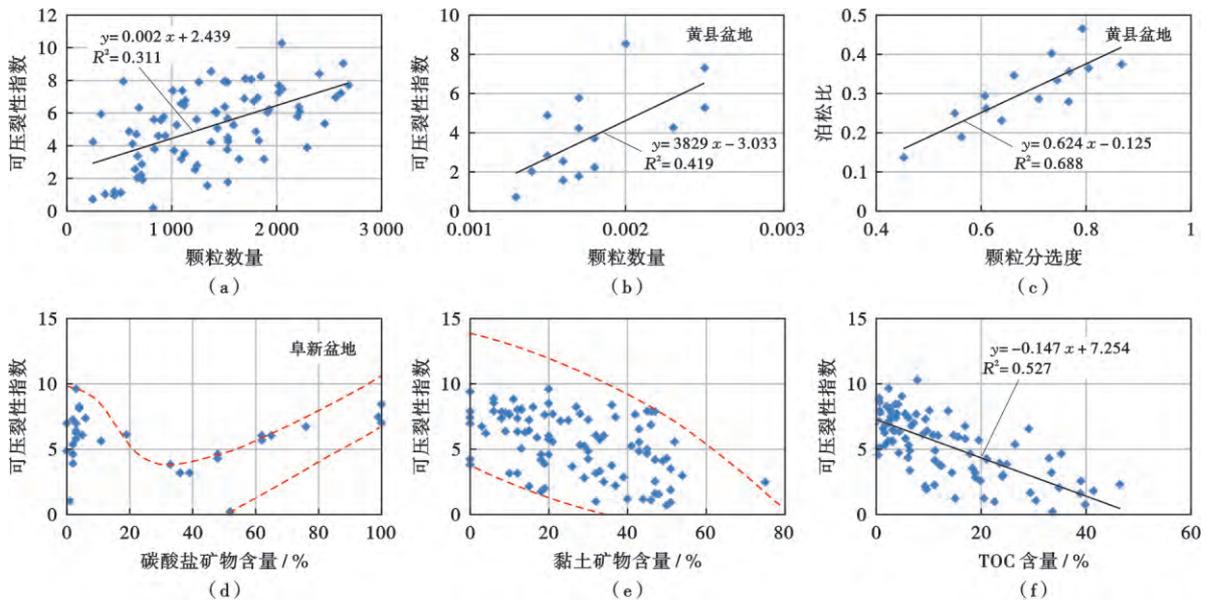
基于岩石薄片的图像分析,可获得细粒沉积岩的微观结构,其中包括颗粒数目、大小、形态等参数。统计分析表明,可压裂性随颗粒数量和颗粒粒径的增大而增强[图 7(a)、图 7(b)],随颗粒分选度和磨圆度的增高反而降低[图 7(c)]。

由 XRD 测试获得的细粒沉积岩组分与可压裂性

指数的对比分析可知,以质量分数占 30% 的长英质矿物或碳酸盐矿物为界,随着长英质矿物或碳酸盐矿物所占的质量分数逐渐增大,细粒沉积岩的可压裂性指数呈先降低后增大的趋势[图 7(d)],即质量分数小于 30% 时,可压裂性随矿物含量的增多而减弱(负相关),而质量分数高于 30% 时,可压裂性随矿物含量的增多而增强(正相关)。细粒沉积岩的可压裂性指数与黏土矿物和有机质的质量分数呈负相关[图 7(e)、图 7(f)]。随着成岩作用增强,可压裂性往往变好^[48],其原因可能在于压实和胶结作用增强,且塑性矿物向脆性矿物转化,从而提高了岩石的脆性。

2.7 各因素对可压裂性的影响程度

分析细粒沉积岩可压裂性指数与各影响因素之间的关联度可知,各因素与可压裂性均存在较高的关联度(图 8)。其中,颗粒数量、纹层厚度的差异、石英含



注:(a)、(e)和(f)为胶莱盆地、阜新盆地、抚顺盆地、黄县盆地、桦甸盆地、五图盆地和济阳拗陷样品数据。

图 7 细粒沉积岩颗粒结构和组分与力学参数的对应关系

Fig. 7 Relationships between particle texture, composition and mechanical parameters of fine-grained sedimentary rocks

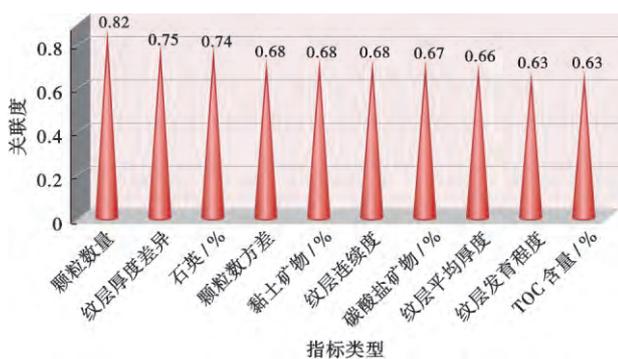


图 8 细粒沉积岩可压裂性与各影响因素之间的关联度

Fig. 8 Correlation between fracability of fine-grained sedimentary rocks and each influencing factor

量与细粒沉积岩可压裂性指数的关联度较大,其次为颗粒数方差、黏土矿物含量、纹层连续度、碳酸盐矿物含量、纹层平均厚度和纹层发育程度,TOC 含量与可压裂性的关联度较弱。

3 讨论

3.1 裂缝扩展机理

在岩石断裂力学中,Griffith 能量准则^[49-50]认为,裂缝扩展必然消耗能量。单位面积裂缝扩展所消耗的能量为:

$$R = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \Pi}{\Delta S} \quad (8)$$

裂缝扩展阻力 R 在理想脆性材料中与材料常数 (弹性效应下的 Γ) 有关^[49,51],与裂纹尺寸无关,即:

$$R = \Gamma \quad (9)$$

但在非理想脆性材料中,裂缝扩展是一个材料损伤演变的过程,需要克服裂缝表面能(弹性效应下的 Γ)和产生裂缝扩展前塑性变形所消耗的能量(非弹性效应下的 Γ_p)^[50]。

$$R = \Gamma + \Gamma_p \quad (10)$$

式(10)中, R 不再为材料常数,而与裂缝的尺寸有关。 Γ_p 比 Γ 一般大三个数量级以上^[52]。因此,压应力必须大于或者等于裂缝扩展的阻力,或局部材料的损伤程度达到一定上限,体系才被破坏。

在混凝土断裂力学中,当应力达到基质的极限应力 σ_s 时,裂缝在基质中开始失稳扩展^[50]。计算为:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{2E\gamma_g}{\pi L}} \quad (11)$$

裂缝由基质扩展至颗粒,假设距离增量为 ΔL ,此时扩展条件演变为:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{2E\gamma_g}{\pi(L + \Delta L)}} \quad (12)$$

由于 $\gamma_g > \gamma_s$,故 $\sigma_g > \sigma_s$ 。裂缝的扩展一般遵循能量较小原则^[53],在相同条件下,裂缝优先在基质中扩展。

3.2 不同纹层结构细粒沉积岩的裂缝扩展规律

细粒沉积岩既包括脆性组分(如长英质矿物、碳酸盐矿物),也包括塑性组分(如黏土矿物、有机质),所以细粒沉积岩属于非理想脆性材料。裂缝在细粒沉积岩中的扩展属于一个损伤演变的过程,服从式(10)的扩展规律,既要克服裂缝表面能(弹性效应下的 Γ),也要消耗一部分能量来克服裂缝扩展前的塑性变形(非弹性效应的 Γ_p)。如图 9 所示,亮色纹层的主要组分为长英质矿物或碳酸盐矿物,属于脆性层;暗色纹层的主

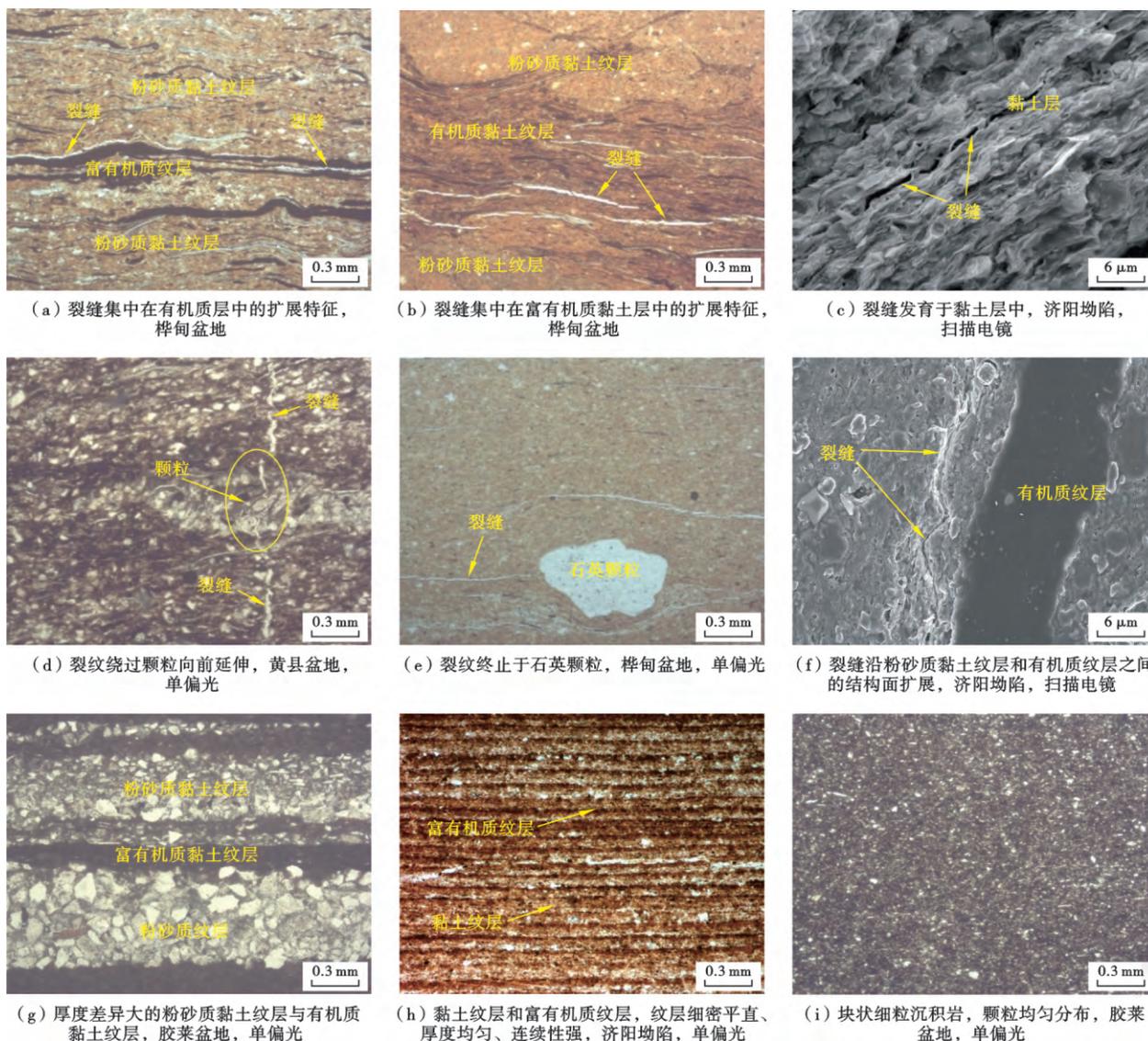


图 9 细粒沉积岩纹层结构及裂缝扩展特征

Fig. 9 The structure of lamina and the characteristics of crack propagation in fine-grained sedimentary rocks

要组分为黏土矿物或有机质,属于塑性层。在压裂过程中,由于 Γ_p 比 Γ 一般大三个数量级以上,因此基质部分或塑性层易于吸收较多的能量,导致裂纹尖端优先向这些区域偏转,裂缝主要集中发育于有机质纹层或黏土纹层[图 9(a)~图 9(c)]。然而,由于有机质纹层或黏土纹层的塑性较强,裂缝开启后易于再次闭合,裂缝有效性低。塑性层越发育则越不利于岩石的压裂。从结构面角度上看,纹层与纹层之间的结构面属于力学薄弱面,纹层越发育,结构面也越发育,压裂过程中裂缝易于沿结构面发育单一的裂缝而不利于形成复杂的网状缝,从而降低岩石的可压裂性[图 9(f)]。

纹层平均厚度大的细粒沉积岩,相对于纹层细密的细粒沉积岩而言,岩石坚实且强度较高,天然弱面发育相对少,粉砂含量相对多。从式(12)可知,颗粒的 σ_g 较大,在压裂过程中裂纹尖端不易于直接切穿而发生转向,但有利于发育复杂有效的网状缝,可压裂性好。在厚度差异较大的细粒沉积岩[图 9(g)]的压裂过程中,可压裂性较好,厚纹层所起的作用比细纹层大得多。

断裂的韧性分析也可反映纹层结构差异对裂纹扩展的影响。断裂韧性为裂缝起裂后,阻碍裂缝继续向前扩展的能力^[48]。断裂韧性与纹层数量、纹层厚度方差的对应关系[图 4(b)、图 5(c)]看出,断裂韧性总体上随纹层数量和纹层厚度方差的增大而减小,表明纹层越发育且厚度越均匀的细粒沉积岩,在压裂过程中越易于吸收更多能量,岩石的塑性强,不利于复杂网状裂缝发育。

纹层连续性的好坏与颗粒含量有关。细粒沉积岩的颗粒在岩石中多呈漂浮状[图 9(i)],与基质的匹配特征在很大程度上与混凝土材料相似,从式(11)和式(12)可知,在成岩作用较低的细粒沉积岩中,裂缝在细粒沉积岩中的扩展机理与混凝土材料相同,裂缝在基质或者颗粒边缘中扩展所需要的能量小于穿过颗粒所需要的能量,在载荷增加到 σ_g 之前,裂缝已经绕过颗粒^[50,54][图 9(d)]。因此,在颗粒含量较多的细粒沉积岩(如粉砂质泥岩、泥质粉砂岩以及粉砂岩)中,裂缝通常会发生转向而复杂化[图 9(e)],裂缝起裂后不易于再次发生闭合,使得复杂网状缝的有效性增强。在颗粒含量较少的细粒沉积岩中,从纹层连续性与断裂韧性的关系可看出,断裂韧性随纹层连续度的增大而总体降低[图 6(c)],即纹层连续度增高,断裂韧性降低,以发育简单裂缝为主,岩石的可压裂性也降低。

颗粒垂向分布的均匀度与纹层发育程度和纹层连续度也具有一定的相关性。一般地,纹层越发育的细粒沉积岩,纹层连续度往往越高,颗粒垂向分布的均匀

度则越低[图 9(g)、图 9(h)]。颗粒垂向分布均匀度低的岩石多为页岩或纹层状细粒沉积岩,其在压裂过程中塑性较强,裂缝多为单一形态,易再次闭合,从而降低岩石可压裂性。

此外,从细粒沉积岩的可压裂性与各影响因素之间的关联度来看,纹层厚度的差异、颗粒垂向分布的均匀度(颗粒数方差)以及纹层连续度对可压裂性的影响作用较大,这在一定程度上与颗粒数量相关。例如,纹层厚度差异大,代表沉积环境变化快,粉砂颗粒含量往往较高[图 9(g)]。一般来说,从粉砂岩、泥质粉砂岩到泥页岩,岩石的脆性降低,颗粒数量也递减,颗粒对网状缝的发育具有重要的控制,进而影响细粒沉积岩的可压裂性。纹层平均厚度和纹层发育程度所指示的意义大体相同,其与可压裂性的关联度较小,可能与纹层结构弱面的影响作用有关。

4 结 论

(1) 细粒沉积岩纹层结构的差异对可压裂性有重要的影响。细粒沉积岩的可压裂性指数与纹层数量、连续度呈负相关,而与纹层厚度方差、颗粒垂向分布方差呈正相关。纹层发育、连续性强的细粒沉积岩,其塑性较强,压裂缝以沿纹层界面或塑性纹层(黏土纹层或有机质纹层)扩展为主,裂缝易于再次闭合,使得岩石的可压裂性降低。纹层厚度差异较大、颗粒垂向分布均匀度较高的细粒沉积岩,其脆性较高,在压裂过程中利于发育复杂有效的网状缝,从而提高岩石的可压裂性。

(2) 细粒沉积岩的可压裂性与长英质矿物或碳酸盐矿物含量的变化并不是单一的相关关系,呈现出先减弱后增强的趋势;黏土矿物和有机质的含量增多可使得岩石的可压裂性降低;可压裂性随颗粒数量和颗粒粒径的增大而增强,随颗粒分选度和磨圆度的增高反而降低。

符号注释: E —岩石的静态杨氏模量, GPa; E_{\max} —最大杨氏模量, GPa; E_{\min} —最小杨氏模量, GPa; ν —岩石的静态泊松比; ν_{\max} —最大泊松比; ν_{\min} —最小泊松比; p —围压, MPa; B_Y —通过杨氏模量确定的相应脆性指数; B_P —通过泊松比确定的相应脆性指数; B —综合脆性指数; k —地下岩石的断裂韧性, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$; k_0 —零围压下岩石的断裂韧性, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$; k_n — k 的无量纲化参数; k_{\max} —最大的 k 值, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$; k_{\min} —最小的 k 值, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$; F —可压裂性指数; ΔS —裂缝扩展的面积, m^2 ; Γ —脆性材料裂缝扩展的表面能, J/m^2 ; Γ_p —裂缝非弹性扩展单位面积所消耗的塑性功(表面能), J/m^2 ; ΔII —裂缝扩展了 ΔS 面积时所需的能量, J; R —裂缝

扩展阻力, N/m ; γ_g —颗粒断裂表面能, J/m^2 ; γ_s —基质断裂表面能, J/m^2 ; L —裂缝长度, m ; ΔL —裂缝扩展长度, m ; σ_s —裂缝在基质中扩展的极限应力, MPa ; σ_g —裂纹在颗粒在中扩展的极限应力, MPa 。

参 考 文 献

- [1] 胡钦红, 刘惠民, 黎茂稳, 等. 东营凹陷沙河街组页岩油储集层润湿性、孔隙连通性和流体一示踪剂运移[J]. 石油学报, 2018, 39(3): 278-289.
HU Qin hong, LIU Huimin, LI Maowen, et al. Wettability, pore connectivity and fluid-tracer migration in shale oil reservoirs of Paleogene Shahejie Formation in Dongying sag of Bohai Bay Basin, East China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(3): 278-289.
- [2] 吴靖, 姜在兴, 潘悦文, 等. 湖相细粒沉积模式——以东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油学报, 2016, 37(9): 1080-1089.
WU Jing, JIANG Zaixing, PAN Yuewen, et al. Lacustrine fine-grained depositional model: a case study of the upper submember of the fourth Member of Paleogene Shahejie Formation in Dongying sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9): 1080-1089.
- [3] 王勇, 刘惠民, 宋国奇, 等. 湖相泥页岩中碳酸盐成因及页岩油气地质意义——以东营凹陷沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段烃源岩为例[J]. 石油学报, 2017, 38(12): 1390-1400.
WANG Yong, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Carbonate genesis and geological significance of shale hydrocarbon in lacustrine facies mud shale: a case study of source rocks in the upper submember of Member 4 and lower submember of Member 3 of Shahejie Formation, Dongying sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(12): 1390-1400.
- [4] 张顺, 王永诗, 刘惠民, 等. 渤海湾盆地东营凹陷细粒沉积微相对页岩油储层微观结构的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 923-934.
ZHANG Shun, WANG Yongshi, LIU Huimin, et al. Controlling effect of fine-grained sedimentary microfacies upon the micro-structure of shale oil reservoirs in the Dongying sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 923-934.
- [5] 耿志强. 柴西北部盐湖相细粒沉积岩储集物性研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
GENG Zhiqiang. Research on reservoir property of fine-grained sedimentary rock in saline lake phase in Northwest Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [6] 张旭. 柴达木盆地西北区新近系细粒沉积岩油气储集特征与成岩演化研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2017.
ZHANG Xu. Research on reservoir characteristics and diagenesis evolution of the Neogene fine-grained sedimentary rocks in the northwestern Qaidam Basin [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2017.
- [7] 孙善勇, 刘惠民, 操应长, 等. 湖相深水细粒沉积岩米兰科维奇旋回及其页岩油勘探意义——以东营凹陷牛页 1 井沙四上亚段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 846-858.
SUN Shanyong, LIU Huimin, CAO Yingchang, et al. Milankovitch cycle of lacustrine deepwater fine-grained sedimentary rocks and its significance to shale oil: a case study of the upper Es₄ Member of Well NY1 in Dongying sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(4): 846-858.
- [8] 陆程, 刘雄, 程敏华, 等. 页岩气体压裂水平井产能影响因素研究[J]. 特种油气藏, 2014, 21(4): 108-112.
LU Cheng, LIU Xiong, CHENG Minhua, et al. Research on factors influencing shale gas productivity of volumetric fractured horizontal wells[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(4): 108-112.
- [9] 唐颖, 邢云, 李乐忠, 等. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 356-363.
TANG Ying, XING Yun, LI Lezhong, et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 356-363.
- [10] 王冠民, 熊周海, 张婕. 岩性差异对泥页岩可压裂性的影响分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2016, 46(4): 1080-1089.
WANG Guanmin, XIONG Zhouhai, ZHANG Jie. The impact of lithology differences to shale fracturing[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2016, 46(4): 1080-1089.
- [11] CHONG K K, GRIESER W V, PASSMAN A, et al. A completions guide book to shale-play development: a review of successful approaches toward shale-play stimulation in the last two decades[R]. SPE 133874, 2010.
- [12] MULLEN M J, ENDERLIN M B. Fracability index—More than rock properties[R]. SPE 159755, 2012.
- [13] LEKHNITSKII S G, FERN P, BRANDSTATTER J J, et al. Theory of elasticity of an anisotropic elastic body[J]. Physics Today, 1964, 17(1): 84.
- [14] SALAMON M D G. Elastic moduli of a stratified rock mass[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1968, 5(6): 519-527.
- [15] 赵平劳. 层状岩石抗压强度围压效应各向异性研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1993, 29(1): 105-109.
ZHAO Pinglao. Anisotropy study on confining pressure, effect about compressive strength of bedded rock [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 1993, 29(1): 105-109.
- [16] HUBBERT M K, WILLIS D G. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. AIME Petroleum Transactions, 1957, 210: 153-168.
- [17] HAIMSON B. Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1967, 7(3): 310-318.
- [18] 黄荣樽. 地层破裂压力预测模式的探讨[J]. 华东石油学院学报, 1984(4): 335-347.
HUANG Rongzun. A model for predicting formation fracture pressure[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1984(4): 335-347.
- [19] 门晓溪, 唐春安, 马天辉. 水压致裂作用下岩体参数对裂纹扩展影响的数值模拟[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(5): 700-703.
MEN Xiaoxi, TANG Chun'an, MA Tianhui. Numerical simulation on influence of rockmass parameters on fracture propagation during hydraulic fracturing[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2013, 34(5): 700-703.
- [20] 代树红, 王召, 潘一山, 等. 水力压裂作用下裂隙在层状岩体内的

- 扩展特征[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2370-2375.
- DAI Shuhong, WANG Zhao, PAN Yishan, et al. Study on characteristics of crack propagation in stratified rock under the force of hydraulic fracturing[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2370-2375.
- [21] KIM J, MORIDIS G J. Numerical analysis of fracture propagation during hydraulic fracturing operations in shale gas systems[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 76: 127-137.
- [22] 梁正召, 唐春安, 李厚祥, 等. 单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 57-62.
- LIANG Zhengzhao, TANG Chunan, LI Houxiang, et al. A numerical study on failure process of transversely isotropic rock subjected to uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 57-62.
- [23] 刘恺德, 刘泉声, 朱元广, 等. 考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 308-316.
- LIU Kaide, LIU Quansheng, ZHU Yuanguang, et al. Experimental study of coal considering directivity effect of bedding plane under brazilian splitting and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 308-316.
- [24] 姚池, 李瑶, 姜清辉, 等. 应力作用下软硬互层岩石破裂过程的细观模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1542-1551.
- YAO Chi, LI Yao, JIANG Qinghui, et al. Mesoscopic model of failure process of interlayered rock under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1542-1551.
- [25] 张桂民, 李银平, 杨长来, 等. 软硬互层盐岩变形破坏物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1813-1820.
- ZHANG Guimin, LI Yinping, YANG Changlai, et al. Physical simulation of deformation and failure mechanism of soft and hard interbedded salt rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1813-1820.
- [26] 李庆辉, 陈勉, 金衍. 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): 3763-3771.
- LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan. 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.
- [27] XU Dan, HU Ruilin, GAO Wei, et al. Effects of laminated structure on hydraulic fracture propagation in shale[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 573-579.
- [28] 余永强, 胡明研, 杨小林, 等. 层状复合岩体相似模拟的试验研究[J]. 金属矿山, 2009(1): 21-24.
- YU Yongqiang, HU Mingyan, YANG Xiaolin, et al. Similarity simulation of bedded composite rock[J]. Metal Mine, 2009(1): 21-24.
- [29] 王迎春, 陈剑. 红层软岩微观结构与抗剪强度关系实验分析[J]. 现代地质, 2013, 27(3): 738-742.
- WANG Yingchun, CHEN Jian. Preliminary research on the relationship between microscopic structure and shear strength of red-bed soft rocks[J]. Geoscience, 2013, 27(3): 738-742.
- [30] 刘珊. 结构性黏土力学特性与微观形态试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- LIU Shan. Experimental study on mechanical properties and micro-structure of structural clay[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [31] 孙成才. 陆相煤系泥岩微观结构及其力学特性关联性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- SUN Chengcai. Association study on micro fabric and mechanical properties of terrestrial coal series mudstone[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [32] 彭春耀. 层状页岩水力压裂裂缝与岩体弱面的干扰机理研究[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(4): 32-36.
- PENG Chunyao. Mechanism of interaction between hydraulic fractures and weak plane in layered shale[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(4): 32-36.
- [33] 张冲, 谢润成, 姚勇, 等. 深层致密砂岩储层岩石结构面微观力学行为特征[J]. 断块油气田, 2014, 21(5): 560-563.
- ZHANG Chong, XIE Runcheng, YAO Yong, et al. Micro-mechanical behavior characteristics of rock structure surface for deep tight sandstone reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(5): 560-563.
- [34] 吴涛. 页岩气层岩脆性影响因素及评价方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- WU Tao. Shale gas reservoir rocks and factors affecting the fragility evaluation method [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [35] 赵文韬, 侯贵廷, 张居增, 等. 层厚与岩性控制裂缝发育的力学机理研究——以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2015, 51(6): 1047-1058.
- ZHAO Wentao, HOU Guiting, ZHANG Juzeng, et al. Study on the development law of structural fractures of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(6): 1047-1058.
- [36] HOWELL J V. Glossary of geology and related sciences: a cooperative project of the American Geological Institute[M]. Washington DC: American Geological Institute, 1960: 99-102.
- [37] 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, 24(19): 3449-3453.
- LIU Enlong, SHEN Zhujiang. Study on brittleness of geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3449-3453.
- [38] 王鹏, 纪友亮, 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.
- [39] GOKTAN R M, YILMAZ N G. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting efficiency[J]. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105(10): 727-733.
- [40] 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): 1588-1594.
- SUI Lili, YANG Yongming, YANG Wenguang, et al. Comprehensive evaluation of shale fracability in Dongying subsidence

- zone of Shengli oilfield[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7):1588-1594.
- [41] 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.
- [42] 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 Hongkui. A new method for evaluating ability of forming fracture network in shale reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4):947-954.
- [43] 刘奎, 王宴滨, 高德利, 等. 页岩气水平井压裂对井筒完整性的影响[J]. 石油学报, 2016, 37(3):406-414.
LIU Kui, WANG Yanbin, GAO Deli, et al. Effects of hydraulic fracturing on horizontal wellbore for shale gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3):406-414.
- [44] 李勇, 陈瑶, 靳建洲, 等. 页岩气井体积压裂条件下的水泥环界面裂缝扩展[J]. 石油学报, 2017, 38(1):105-111.
LI Yong, CHEN Yao, JIN Jianzhou, et al. Cement ring interface crack propagation under volume fracturing in shale gas well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1):105-111.
- [45] RICKMAN R, MULLEN M J, PETER J 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
XIONG Zhouhai, CAO Yingchang, WANG Guanmin, et al. Controlling effect of lacustrine fine-grained sedimentary rocks composition on fracability[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3):538-548.
- [49] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1921, 221:163-198.
- [50] 徐世烺. 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.
- [51] 朱乃龙, 饶云刚, 余舟波. 脆性材料统计断裂判据的研究[J]. 工程力学, 2009, 26(5):47-51.
ZHU Nailong, RAO Yungang, YU Zhoubo. Study on criterion of statistical fracture for brittle materials[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5):47-51.
- [52] OROWAN E. Fracture and strength of solids[J]. Reports on Progress in Physics, 1949, 12(1):185-232.
- [53] 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, 2010:157-200.
LI Shiyu. Introduction of rock fracture mechanics[M]. Hefei: University of Science & Technology China Press, 2010:157-200.
- [54] 据宏昌, 陈国荣, 夏晓舟. 骨料形状对混凝土拉伸强度的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4):554-558.
QU Hongchang, CHEN Guorong, XIA Xiaozhou. Influence of aggregate shape on tensile strength of concrete[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(4):554-558.

(收稿日期 2018-04-19 改回日期 2018-09-18 编辑 雷永良)