

湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气储层可压裂性评价

吴晶晶^{1,2,3}, 张绍和^{1,2,3}, 曹函^{1,2,3}, 孙平贺^{1,2,3}

- (1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 湖南 长沙, 410083;
2. 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 湖南 长沙, 410083;
3. 地球科学与信息物理学院(中南大学), 湖南 长沙, 410083)

摘要: 通过对湘西北地区实地勘察及采样分析, 对湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩储层的宏观和微观参数对可压裂性的影响进行评价; 基于 SEM 技术与 ImageJ 软件相结合的方法, 实现页岩孔裂隙率的定量评价; 采用组合赋权法建立可定量评价研究区页岩储层可压裂性的可压裂系数数学模型。研究表明: 研究区下寒武统牛蹄塘组页岩具有脆性矿物质量分数高、脆性系数高、热演化程度高、微孔裂隙较发育的特点, 具备页岩储层压裂的有利条件; 运用可压裂系数模型计算研究区页岩储层的可压裂系数为 0.504 0, 咸丰、龙山、桑植和慈利的可压裂系数较高, 是研究区页岩较理想的压裂区域; 基于储层各参数特征, 将研究区的页岩可压裂性分为 3 个级别, 即可压裂性差(可压裂系数小于 0.277 4, 压裂效果差)、可压裂性中等(可压裂系数为[0.277 4, 0.436 3], 压裂效果一般)和可压裂性好(可压裂系数为(0.436 3, 0.653 8]), 缝网压裂效果较理想), 应选择可压裂系数大于 0.436 3 的页岩层进行水力压裂。

关键词: 湘西北; 页岩气储层; 下寒武统牛蹄塘组; 组合赋权法; 可压裂性评价

中图分类号: TE357

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)05-1160-09

Fracability evaluation of shale gas reservoir in Lower Cambrian Niutitang formation, northwestern Hunan

WU Jingjing^{1,2,3}, ZHANG Shaohe^{1,2,3}, CAO Han^{1,2,3}, SUN Pinghe^{1,2,3}

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education (Central South University), Changsha 410083, China;
2. Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Changsha 410083, China;
3. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The effect of macro and micro parameters on fracability of Lower Cambrian Niutitang shale of northwestern Hunan was evaluated based on field investigations and sample analysis. The quantitative evaluation of fractured rate of shale was achieved by combining SEM technique and ImageJ. A mathematical model based on the combination weight method was established to quantitatively evaluate the shale fracability. The results show that the Lower Cambrian Niutitang formation shale in the study area has great content of brittle mineral, high brittleness index, high degree of thermal evolution and well developed micro-fractures and pores, possession of advantageous conditions for the fracturing of shale gas reservoir. The fracability of the shale Lower Cambrian Niutitang is 0.504 0. And the optimum area for fracturing in the Niutitang Formation shale is Xianfeng, Longshan, Sangzhi and Cili due to their relatively higher

收稿日期: 2017-06-10; 修回日期: 2017-08-12

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(41302124); 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学)开放基金资助项目(2016YSJS009) (Project (41302124) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2016YSJS009) supported by Open Research Fund of Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education (Central South University))

通信作者: 曹函, 博士, 副教授, 从事非常规能源勘探与开发等研究; E-mail: hancock@csu.edu.cn

fracability indexes. Besides, shale fracability can be divided into three levels according to the reservoir parameters. The shale with low fracability (fracability index is less than 0.277 4) cannot be stimulated effectively. Shale with the medium fracability (fracability index range is [0.277 4, 0.436 3]) can be stimulated effectively but the effect is actually modest. Shale with high fracability (fracability index range (0.436 3, 0.653 8]) is the best interval to be fractured. It is better to choose shale with fracability index above 0.436 3.

Key words: northwestern Hunan; shale gas reservoir; Lower Cambrian Niutitang; combination weight method; fracability evaluation

赋存于富含有机质页岩中的天然气即页岩气是一种重要的非常规天然气资源^[1-2]。作为新能源之一,它既是常规天然气的潜在替代能源,也是一种清洁环保能源,已受到我国油气工作者的高度重视。页岩气储层具有低孔、低渗的特点,勘探开发难度较大,大多数页岩气井需经过压裂改造才能获得较理想的产量。可压裂性是指储层在水力压裂中具有能够被有效压裂能力的性质^[3]。储层的可压裂性评价对于优选压裂井段、预测经济效益具有重要意义,已成为页岩气开发的核心内容^[4]。CHONG 等^[5-6]采用页岩脆性系数表征可压裂性,为压裂性评价提供了思路。我国对页岩储层的改造研究起步较晚,对可压裂性研究较薄弱。唐颖等^[3, 7-9]结合国内外页岩可压裂性研究进展以及室内岩石力学和物性参数测试结果,对页岩气储层的可压裂性影响因素及定量评价方法进行了研究,这为开展湘西北牛蹄塘组页岩可压裂性评价提供了重要参考。湘西的牛蹄塘组页岩发育好,出露多,分布面积广,是湖南省内页岩气研究及勘探的重要区域^[10]。游先军等^[11]对湘西地区岩系进行了沉积学、地球化学、成矿作用、控矿等研究,张琳婷等^[12-14]对湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气藏形成条件、资源潜力、页岩气储集条件和含气性特征等进行了研究。然而,目前针对该区域页岩可压裂性的研究未见报道。本文作者结合国内外页岩可压裂性研究进展,在对湘西北地区实地勘察及采样分析的基础上,从矿物成分、岩石力学参数、成岩作用和天然裂隙4个方面对该区块下寒武统牛蹄塘组页岩气储层可压裂性进行评价,并提出针对该区域页岩可压裂性的定量评价方法,以期为该区域压裂选井、选层提供参考。

1 区域地质概况

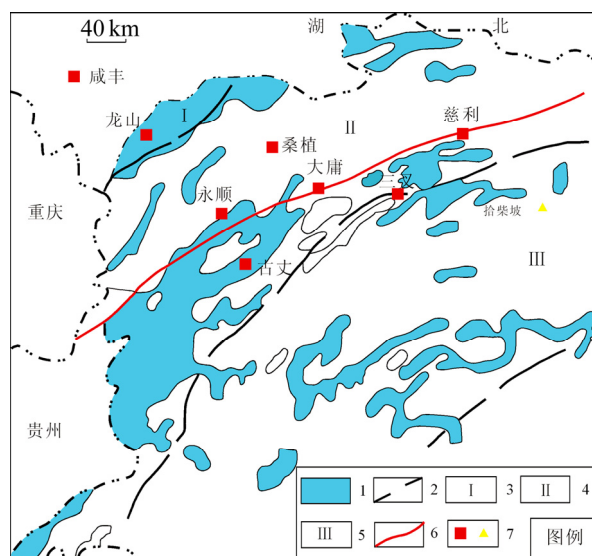
研究区(见图1)隶属于华北区系的扬子区,位于湖南西北隅,包括龙山茨岩塘至桑植五道水一线的西北部,且其东南界达到花垣、保靖、大庸、慈利、岳阳

一线^[15]。区域露头揭示,研究区内出露的地层发育齐全,其中,寒武系从南向北均有出露,自下而上可以划分为下统(包括牛蹄塘组(\in_{1n})、杷榔组(\in_{1p})、清虚洞组(\in_{1q}))、中统(包括高台组(\in_{2g})、平井组(\in_{2p}))和上统(包括耿家店组(\in_{3g})、毛田组(\in_{3m})),与上覆奥陶系整合接触。区内赋存的下寒武统的牛蹄塘组为页岩气主要烃源岩,为一套灰黑—黑色碳质页岩^[11, 13],间夹细砂岩及粉砂岩。

2 样品与实验

2.1 样品

本次研究工作所用样品取自于湘西北9个地区,如咸丰、龙山、桑植、永顺、慈利等(见图1),共采集样品100余个。这9个地区均有下寒武统牛蹄塘组黑色



1—露头分布区; 2—地层分界线; 3—湘西北区; 4—武陵山分区; 5—湘中雪峰小区; 6—深断裂; 7—地名

图1 研究区位置及下寒武统露头分区图^[15]

Fig. 1 Research area and partition map of outcrop sections of Lower Cambrian Niutitang Formation^[15]

泥页岩出露,且露头岩心样品中,页岩岩性主要为黑色页岩和碳质页岩。

2.2 实验

为了对湘西北牛蹄塘组页岩的可压裂性进行评价,选取 36 个符合室内实验测试的页岩样品(9 个地区各选 4 个),设计室内实验方案,见表 1。

表 1 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩可压裂性评价实验方案

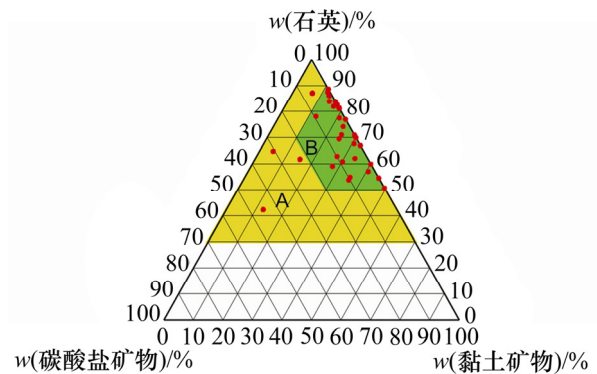
Table 1 Experimental program on evaluation of Lower Cambrian Niutitang shale in northwestern Hunan

取心露头剖面	实验内容	实验仪器
	全岩矿物和黏土矿物分析	X 线衍射仪(YST-1)
咸丰、龙山、桑植、永顺、古丈、大庸、慈利、三叉、拾柴坡	力学参数测定(弹性模量 E 和泊松比 μ)	岩石三轴实验系统(MTS815)
	镜质组反射率(R_o)	显微光度计(MPV-3)
	SEM 扫描电镜	扫描电子显微镜(Quanta-200)

3 实验结果及分析

3.1 页岩矿物分析

采用 XRD 方法对湘西北 9 个野外露头剖面采集样品的全岩矿物组分进行测定。岩石矿物成分定量分析结果表明:实验岩样的主要矿物组分为硅酸盐矿物(主要为石英)、黏土矿物和碳酸盐矿物(主要为方解石)。图 2 所示为湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩组成三角图。从图 2 可以看出:80%以上的岩样分布在 B 区域,即石英、长石和黄铁矿的质量分数主要集中在 50%~90%之间,黏土矿物的质量分数大部分集中在 10%~50%之间,碳酸盐矿物的质量分数基本低于 20%,少数为 0。与国外已开发的大部分页岩储层相比,该区块页岩石英质量分数较高,碳酸盐矿物质量分数较低。已有研究表明,富含石英的黑色页岩段脆性较强,裂缝的发育程度比富含方解石且塑性较强的灰色页岩更高^[16];另外,从岩石破裂机理看,石英主要成分是 SiO_2 ,具有较高的脆性,在外力下易破碎产生裂缝。因此,该区域页岩具有高质量分数的脆性矿物,在水力压裂作业时也容易产生较多的诱导裂缝,表明该区域页岩具备可压裂性条件。



A 区域(石英等质量分数 40%~100%; 黏土矿物质量分数 0~60%; 碳酸盐矿物质量分数 0~60%); 岩样数量为总数量 100%

B 区域(石英等质量分数 50%~90%; 黏土矿物质量分数 10%~50%; 碳酸盐矿物质量分数 0~20%); 岩样数量大于总数量的 80%

图 2 研究区页岩矿物组成三角图

Fig. 2 Triangular diagram of mineral composition of shale in research area

3.2 页岩矿物分析

弹性模量和泊松比是表征页岩脆性的主要岩石力学参数。弹性模量反映了页岩被压裂后保持裂缝的能力,泊松比反映了页岩在压力下破裂的能力^[3-4]。

据国外对页岩气储层可压裂性的评价经验,脆性系数可以表征压裂的难易程度。脆性系数是基于岩石的弹性模量和泊松比定义的,一般地,弹性模量越大、泊松比越小,脆性系数越高^[2]。RICKMAN 等^[17]提出用弹性模量和泊松比计算脆性系数,计算公式如下:

$$Y_B = ((Y_{MSC} - 1) / (8 - 1)) \times 100\% \quad (1)$$

$$P_B = ((P_{RC} - 0.4) / (0.15 - 0.40)) \times 100\% \quad (2)$$

$$B_1 = (Y_B + P_B) / 2 \quad (3)$$

式中: Y_B 和 P_B 分别为弹性模量和泊松比确定的脆性系数; Y_{MSC} 为静态弹性模量,单位为 10 GPa; P_{RC} 为静态泊松比; B_1 为脆性系数; 1 和 8 表示泥页岩的弹性模量分布区间的上限和下限; 0.15 和 0.40 分别表示泥页岩的泊松比分布区间的上限和下限。

实验所测岩样弹性模量和泊松比以及根据式(1)~(3)所计算的脆性系数 B_1 见图 3。从图 3 可见:该区域页岩弹性模量和泊松比均比较适中,弹性模量平均为 10~30 GPa,泊松比为 0.10~0.35。但研究区页岩脆性系数较高,为 10.41%~76.96%,平均为 46.44%,约 62%岩样的脆性系数大于 40%,具有较好的脆性,且其脆性与 Barnett 页岩(脆性系数为 46.4%)和美国其他页岩(脆性系数为 52%)脆性大致相当,见图 4。

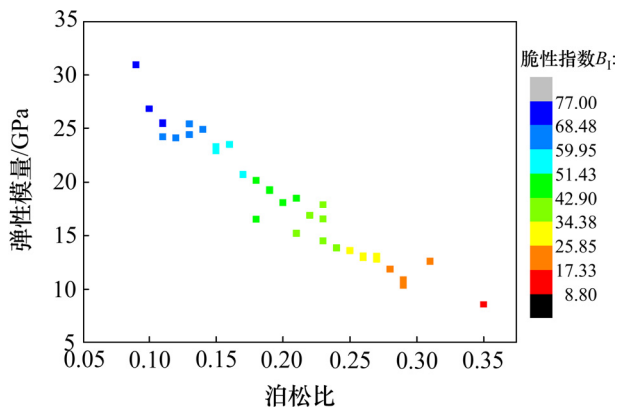


图 3 研究区页岩弹性模量、泊松比和脆性系数变化趋势
Fig. 3 Variation tendency of elastic modulus, Poisson ratio and brittleness index for shale from research area

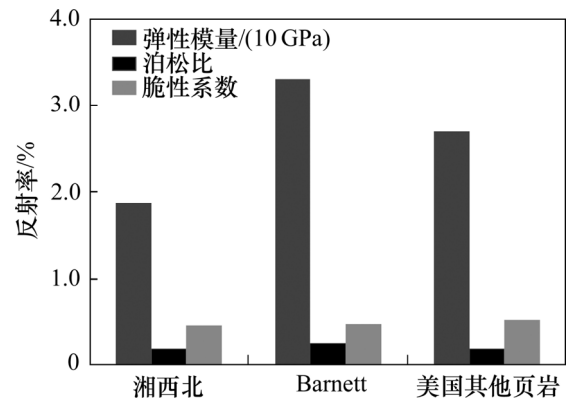


图 4 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩与国外页岩压裂改造参数对比
Fig. 4 Comparison of fracturing parameters of Lower Cambrian Niutitang shales from Northwestern Hunan and America

3.3 成岩作用

页岩在不同成岩作用阶段, 其矿物形态、黏土矿物组成以及孔隙类型都有较大差异, 从而使得页岩的可压裂性不同。有机质镜质体反射率(R_o)是表征成岩作用最合适的参数^[18]。本文采用显微光度计, 测量湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩样品的 R_o 。实验结果表明: 该区页岩的有机质成熟度高, 约 83% 的页岩岩样的等效镜质体反射率分布在 2.0%~4.0%, 处于晚成岩阶段(高成熟阶段)。另外, 有研究表明^[4, 8, 18]: 高演化的页岩能增大岩石的脆性, 增大可压裂性。这是因为随着成熟度增加, 不稳定的长石向稳定的正长石、斜

长石和石英转化, 蒙皂石、高岭石等塑性黏土矿物向伊利石、绿泥石转化, 岩石矿物向脆而稳定的组分转化, 脆性增强。而且当达到成熟阶段时, 页岩中残余沥青质和干酪根热裂解产气^[19], 生烃膨胀促使页岩中压力不断升高, 当这种压力超过岩石突破压力时, 页岩内部产生的大量微裂缝对页岩可压裂性起积极作用。页岩可压裂性随成岩作用阶段的变化见图 5。从图 5 可以看出: 研究区下寒武统牛蹄塘组页岩集中分布在 C 区域, 页岩有机质成熟度高(均值为 2.8%), 可压裂性普遍较高, 这有利于后期的压裂改造。

成岩阶段	R_o	特征	可压裂性
早成岩阶段	0.5%	原生孔隙发育, 可有早期的碳酸盐、自生绿泥石环边、少量石英加大等自生矿物, 压实作用为主	
中成岩阶段	A期	伊利石、绿泥石、伊蒙混层, 高岭石等黏土矿物向绿泥石转化, 页岩石英颗粒裂缝愈合, 能见少量裂缝及粒内溶孔等次生孔隙; 在A期后期, 由于晚期碳酸盐岩胶结、交代作用, 孔隙度下降	
	B期	页岩中高岭石、伊蒙混层质量分数减少, 伊利石、绿泥石质量分数升高, 孔隙以裂缝为主, 含少量溶孔; 随着页岩的生烃排烃, 孔隙度增加	
晚成岩阶段	2.0%	页岩孔隙以裂缝为主, 不稳定的长石向稳定的正长石、斜长石和石英转化, 蒙皂石、高岭石等塑性黏土矿物向伊利石、绿泥石转化, 岩石矿物向危而稳定的组分转化, 脆性增强	
过成岩阶段	4.0%	储层黏土矿物更稳定, 裂缝发育更好	

● 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩岩样

图 5 页岩不同成岩阶段特征及与可压裂性关系曲线

Fig. 5 Key features bear on fracability in different diagenetic stages and relationship between shale fracability and diagenesis

3.4 天然裂缝

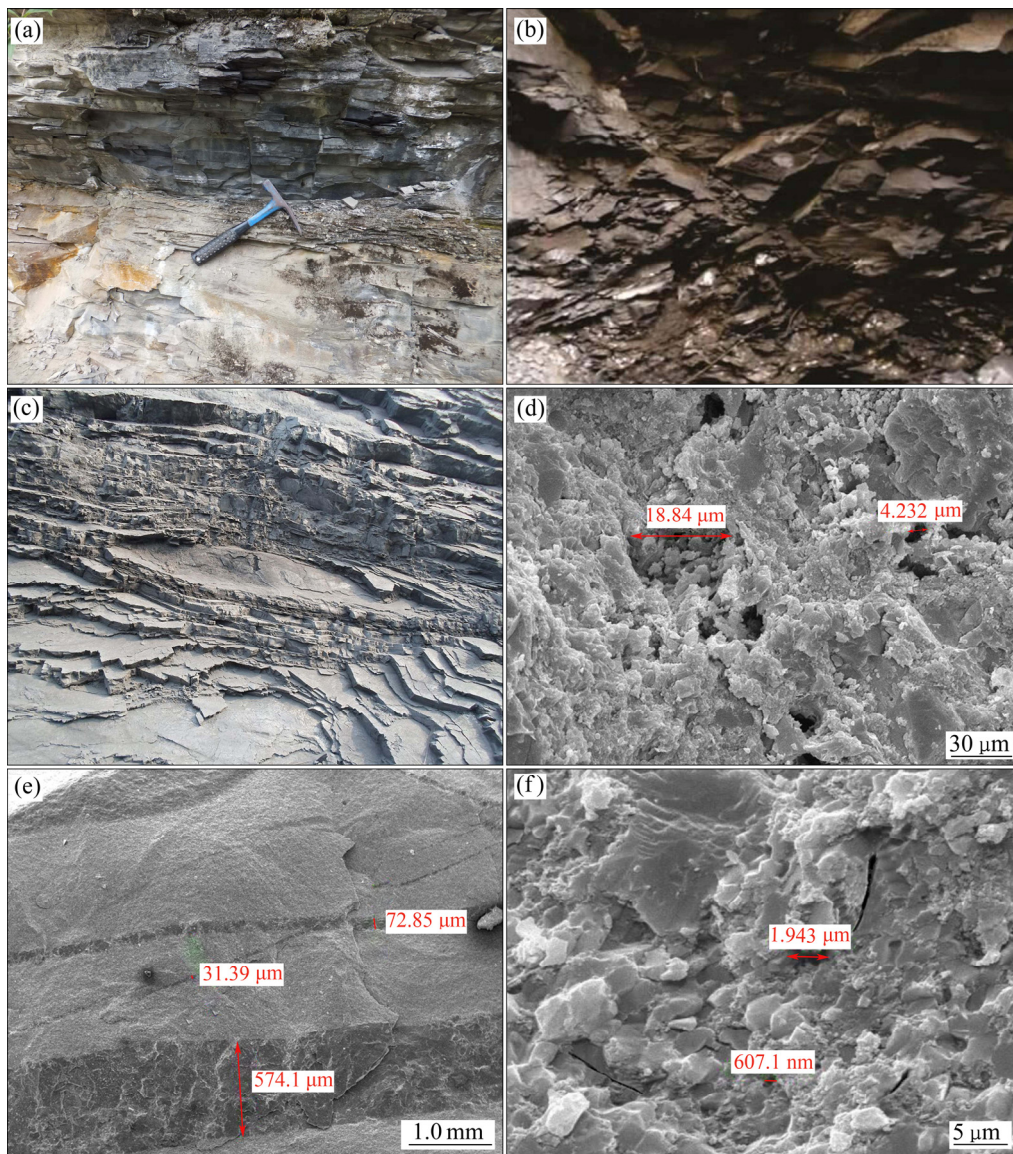
天然裂缝是地应力不均一的表现,是力学上的薄弱环节^[4]。页岩中微裂隙的大量分布不仅有利于提高储层的局部渗透率,而且在水力压裂过程中容易发生剪切错位,沟通主裂缝,形成更大体积的缝网,使储层具备可压性^[7]。

图 6 所示为湘西北地区下寒武统牛蹄塘组页岩野外露头剖面及样品扫描电镜照片。从图 6(a), 6(b)和 6(c)可见该区发育了大量的节理,从图 6(d), 6(e)和 6(f)可见页岩内部发育不同成因类型的微米级孔裂隙。由图 6(d)可知:页岩样品见溶蚀微孔,微孔以微米级孔隙较发育。从图 6(e)可见页岩样品存在构造缝 3 条,分 2 期形成:一期宽 0.03 mm 左右,二期为平行分布

的 2 条,宽分别约为 0.07 mm 和 0.60 mm,缝内充填硅质。从图 6(f)可见样品存在微裂隙,缝宽小于 1 μm ,长度一般在微米级。

研究区发育盆地与美国东部地区页岩气发育盆地一样,均是古生代海相沉积背景下形成的富含有机质页岩,自加里东运动以来,经历了燕山期、喜马拉雅期等多期构造运动和挤压作用,在下寒武统牛蹄塘组泥页岩中产生大量的裂缝^[10]。因此,湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩中节理和微孔裂隙的存在可以大大提高页岩的可压裂性。

由于天然裂隙一般难以量化,为了后续对该区页岩的可压裂性进行综合评价,通过软件 ImageJ 对样品的 SEM 图进行面孔或裂隙率计算^[20],用来表征页岩



(a) 慈利露头剖面; (b) 杆子坪露头剖面; (c) 拾柴坡露头剖面; (d) 页岩中溶蚀孔隙; (e) 页岩中构造缝; (f) 页岩中微裂隙

图 6 湘西北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂隙宏观和显微特征

Fig. 6 Macroscopic and microscopic characteristics of pore-fractures in shales of Niutitang Formation, northwestern Hunan

天然裂隙的发育程度, 从而实现页岩孔裂隙的定量评价。以图 6(e)为例, 首先将图导入 ImageJ 软件中, 通过 Type(8-bit)转换成灰度图^[21], 并通过菜单栏中的 brightness/contrast 来增大对比度, 同时以原图比例尺作为标尺(见图 7(a)); 然后, 使用 trace 工具选择合适的阈值获得相应二值图像(见图 7(b)), 并用 binary 工

具获得黑前景-白背景的二值图像(见图 7(c)); 最后, 通过 Analyze 计算出 SEM 图的裂隙率为 16.77%。表 2 所示为研究区 9 个野外露头页岩裂隙率平均值。

3.5 页岩可压裂性指标模型

页岩气储层的可压裂性不仅与页岩脆性有关, 而且与页岩中石英质量分数、成岩作用及天然裂缝等密不可分, 但目前依然难以解决上述影响因素在脆性评价中的权重问题。组合赋权法是将层次分析法计算的主观权重与熵值法计算的客观权重结合起来^[22], 既反映出研究人员对页岩可压裂性的直观认识, 又反映出客观调查结果的规律。因此, 为了综合各个因素对可压裂性的影响, 通过组合赋权法确定各影响因素的权重, 从而建立可定量评价该区域页岩可压裂性的可压裂系数数学模型。

采用组合赋权法的具体测算过程如下。

1) 采用极差变换法对可压裂性影响因子进行标准化处理^[8], 使量纲不同的各类参数转化为可直接进行计算的数值。极差变换法中参数分为正向指标(即指标越大越好)和负向指标(即指标越小越好) 2 种^[4], 通过极差变换后, 可将参数值映射到[0, 1]之间。统计分析中极差标准化方法对正负指标标准化的处理方法如下:

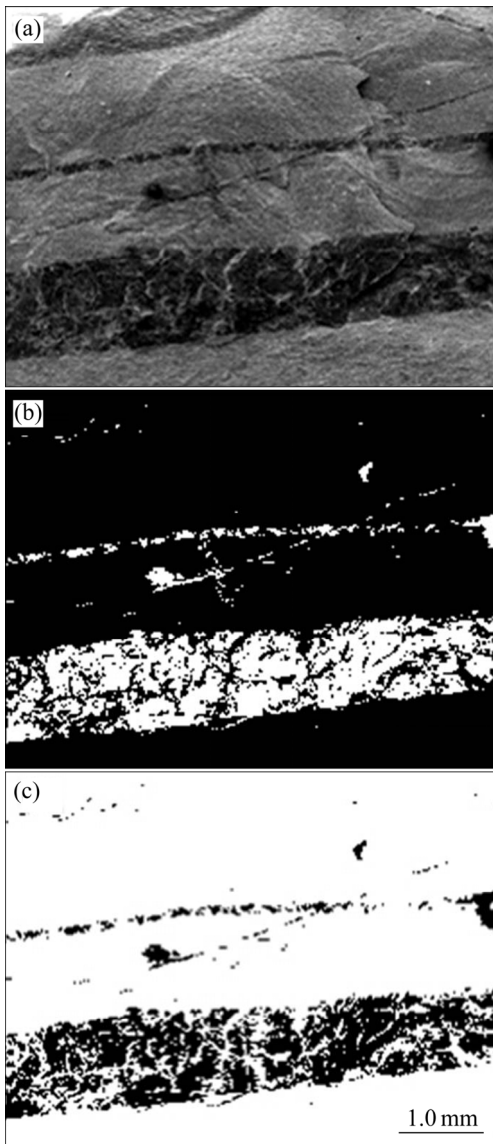
$$A_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})}, X_{ij} \text{ 为正向指标} \quad (4)$$

$$A_{ij} = \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})}, X_{ij} \text{ 为负指标} \quad (5)$$

式中: A_{ij} 为参数标准化值; X_{ij} 为参数值; $\max(X_{ij})$ 为参数最大值; $\min(X_{ij})$ 为参数最小值。

2) 组合赋权法确定权重。

① 层次分析法求主观权重。将各个因素根据参数特征以形成有序的递阶层次结构, 对每一层次, 通过两两比较的方式确定层次中各因素的相对重要性, 即给出相应的比例标度, 建立判断矩阵, 通过求解判断矩阵的最大特征值及对应的正交化特征向量, 得出该层次各要素对于该准则的权重, 进而求得各层要素对总体目标的组合权重^[23]。据文献[4]可知, 采用层次分析法可知页岩脆性、石英质量分数、成岩作用、天然裂隙对应的权重分别为 0.56, 0.26, 0.06 和 0.12。



(a) 页岩灰度图; (b) 页岩二值化图; (c) 调整阈值后的二值化图

图 7 页岩灰度图及裂隙提取图

Fig. 7 Gray images and 2-D binary images of shale

表 2 湘西北 9 个野外露头页岩裂隙率均值

Table 2 Average fissure ratio of shale samples from nine outcrops in Northwestern Hunan

露头点	咸丰	龙山	桑植	永顺	古丈	大庸	慈利	三义	拾柴坡
裂隙率/%	4.59	4.25	1.08	2.86	5.31	4.46	9.23	4.51	5.49

② 熵值法求客观权重^[24]。假设 B 为标准化后的矩阵, b_{ij} 表示第 i 个对象在第 j 个指标的属性值, 则

$$k_{ij} = b_{ij} / \sum_{i=1}^m b_{ij} \quad (6)$$

式中: k_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个对象的指标值的比重; $i \in [1, m]$; $j \in [1, n]$ 。

信息熵(h_j)为

$$h_j = -(\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^m k_{ij} \ln(k_{ij}) \quad (7)$$

式中: $j \in [1, n]$ 。

式(7)中, 当 $k_{ij}=0$ 时, 规定 $k_{ij} \ln(k_{ij})=0$, 则第 j 个指标的权重(q_j)为

$$q_j = (1 - h_j) / \sum_{j=1}^n (1 - h_j) \quad (8)$$

由式(6)~(8)对实验数据进行客观赋权, 可得页岩脆性、石英质量分数、成岩作用、天然裂隙对应的权重分别为 0.48, 0.17, 0.14 和 0.21。

③ 组合权重。设主观权重和客观权重分别为 W_i 和 K_i , 两者之间的距离函数为

$$d(W_i, K_i) = \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (W_i - K_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

其组合权重 W_z 为两者的线性加权, 表达式为 $W_z = \alpha W_i + \beta K_i$ (其中, α 和 β 为主客观权重的分配系数)。为了使不同权重之间的差异程度和分配系数间的差异程度一致, 使式(9)中的距离函数与分配系数取等式, 其表达式为:

$$d(W_i, K_i)^2 = (\alpha - \beta)^2 \quad (10)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (11)$$

因此, 联立式(9)~(11), 可求得主客观权重的分配系数分别为 0.560 2 和 0.439 8, 页岩脆性、石英质量分数、成岩作用、天然裂隙这 4 个主要影响因子的组合权重分别为 0.525 0, 0.220 0, 0.095 0 和 0.160 0。

3) 简单线性加权法^[25]确定可压裂性系数, 其计算公式为

$$F_i = \sum_{i=1}^n P_i Z_i \quad (12)$$

式中: F_i 为可压裂性系数; P_i 为第 i 个可压裂性影响因子量纲一化处理后的值; Z_i 为 P_i 的权重; n 为可压裂性影响因子个数。

采用式(12)得出 9 个取样点(咸丰、龙山、桑植、永顺、古丈、大庸、慈利、三义、拾柴坡)的可压裂系

数均值分别为 0.551 0, 0.598 0, 0.549 0, 0.448 0, 0.411 0, 0.492 0, 0.565 0, 0.462 0 和 0.462 0。

综上所述, 采用本方法对湘西北 9 个地区进行压裂性评价, 可压裂评价系数为 0.411 0~0.598 0, 平均为 0.504 0, 其中, 咸丰、龙山、桑植和慈利的可压裂系数较高, 可压裂性更好。

另外, 根据该地区储层各参数特征和计算模型特点, 将湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩可压裂性分为 3 个等级, 见表 3。同时, 根据式(12)可得出 3 个等级下的可压裂系数。据表 3, 建议页岩气开发选择可压裂系数大于 0.436 3 的页岩层, 储层的压裂效果理想。

表 3 不同级别可压性页岩储层特征

Table 3 Characteristics of shale reservoirs with different fracability levels

可压裂级别	脆性系数/%	石英质量分数/%	天然裂隙率/%	等效镜质体反射率(成岩作用)/%	可压裂系数	可压裂程度
I	<30	<50	<5	≤2	<0.277 4	低
II	30~50	50~70	5~10	2~4	[0.277 4, 0.436 3]	中等
III	50~80	70~90	10~20	≥4	(0.436 3, 0.653 8]	高

4 结论

1) 可压裂性是页岩气井评价的关键参数, 主要影响因素有石英质量分数、页岩脆性、成岩作用和天然裂隙等。湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩具有脆性矿物质量分数高、脆性系数较高、热演化程度高、微孔裂隙较发育等特点, 具备页岩储层压裂的有利条件。

2) 结合 SEM 技术和 ImageJ 软件, 实现了页岩孔隙裂隙的定量评价。湘西北各露头点下寒武统牛蹄塘组页岩的裂隙率平均为 1.08%~9.23%。

3) 采用组合赋权法确定各影响因素的组合权重系数, 将权重系数与各影响因素标准化值进行加权, 形成湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩可压裂性评价模型, 从而对其可压裂性进行定量评价。采用此模型计算湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩储层的可压裂系数为 0.504 0, 并认为咸丰、龙山、桑植和慈利区块的可压裂系数较高, 是该区域页岩可压裂性较优区域。

4) 根据湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩储层各参数特征, 将该区的页岩可压裂性分为 3 个级别: 可压裂系数小于 0.277 4, 可压裂性差, 压裂效果差; 可压

裂系数为[0.277 4, 0.436 3], 可压裂性中等, 压裂效果一般, 缝网压裂效果较理想; 可压裂系数介于(0.436 3, 0.653 8], 可压裂性好, 是优质的可压裂页岩。建议该区域页岩气开发选择可压裂系数大于 0.436 0 的页岩层, 若不存在这样的区域, 则应尽量选可压性系数大的区域。

参考文献:

- [1] 吕秋香, 赵士鹤, 林潇, 等. 页岩气储层低阻高抑制性携砂液添加剂的优选[J]. 西部探矿工程, 2015(7): 67-70.
LÜ Qiuxiang, ZHAO Shihe, LIN Xiao, et al. Screening and optimizing additives of sand-carrying fluid with low resistance and high inhibition for shale-gas reservoir[J]. West-China Exploration Engineering, 2015(7): 67-70.
- [2] 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 Dingyun, et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 523-527.
- [3] 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.
- [4] 段宏亮, 何禹斌. 高邮凹陷阜四段页岩可压裂性分析[J]. 复杂油气藏, 2014, 7(1): 1-3.
DUAN Hongliang, HE Yubin. Analysis on fracability of E₄f₄ shale in Gaoyou Sag Duan Hongliang, He Yubin[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2014, 7(1): 1-3.
- [5] CHONG K K, GRIESER B, JARIPATKE O, et al. A completions guide book to shale-lay development: a review of successful approaches towards shale-play stimulation in the last two decades[C]// Proceedings of Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference. Alberta, Canada: CSUG/SPE, 2010: 1-18.
- [6] BREYER J A, ALSLEBEN H, ENDERLIN M B. Predicting fracability in shale reservoirs[EB/OL]. [2012-08-10]. http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2011/hedberg-texas/abstracts/ndx_breyer.pdf.html.
- [7] 郭海萱, 郭天魁. 胜利油田罗家地区页岩储层可压性实验评价[J]. 石油实验地质, 2013, 35(3): 339-346.
GUO Haixuan, GUO Tiankui. Experimental evaluation of crushability of shale reservoirs in Luojia area, Shengli Oilfield[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(3): 339-346.
- [8] 王建波, 冯明刚, 严伟, 等. 焦石坝地区页岩储层可压裂性影响因素及计算方法[J]. 断块油气田, 2016, 23(2): 216-220, 225.
WANG Jianbo, FENG Minggang, YAN Wei, et al. Influence factors and evaluation methods for shale reservoir fracability in Jiaoshiba Area[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2016, 23(2): 216-220, 225.
- [9] 赵金洲, 许文俊, 李勇明, 等. 页岩气储层可压性评价新方法[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(6): 1165-1172.
ZHAO Jinzhou, XU Wenjun, LI Yongming, et al. A new method for fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(6): 1165-1172.
- [10] 肖正辉, 杨荣丰, 冯涛, 等. 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件及其勘探潜力分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2012, 27(1): 50-54.
XIAO Zhenghui, YANG Rongfeng, FENG Tao, et al. Reservoir-forming conditions and exploration potential of shale gas in Lower Cambrian Niutitang Formation, Northwestern Hunan[J]. Journal of University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2012, 27(1): 50-54.
- [11] 游先军, 戴塔根, 息朝庄, 等. 湘西北下寒武统黑色岩系地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(2): 304-312.
YOU Xianjun, DAI Tagen, XI Chaozhuang, et al. Geotechnical characteristics of Lower Cambrian black series in Northwestern Hunan, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(2): 304-312.
- [12] 张琳婷, 郭建华, 焦鹏, 等. 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气藏形成条件与资源潜力[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 1163-1173.
ZHANG Linting, GUO Jianhua, JIAO Peng, et al. Accumulation conditions and resource potential of shale gas in Lower Cambrian Niutitang formation, northwestern Hunan[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014, 45(4): 1163-1173.
- [13] 肖正辉, 王朝晖, 杨荣丰, 等. 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气储集条件研究[J]. 地质学报, 2013, 87(10): 1612-1623.
XIAO Zhenghui, WANG Zhaohui, YANG Rongfeng, et al. Reservoir conditions of shale gas in the Lower Cambrian Niutitang formation, Northwestern Hunan[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(10): 1612-1623.
- [14] 林拓, 张金川, 包书景, 等. 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气井位优选及含气性特征: 以常页 1 井为例[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 312-319.
LIN Tuo, ZHANG Jinchuan, BAO Shujing, et al. The optimum selecting of shale gas well location and gas content of Lower Cambrian, Northwest Hunan: a case study of well Changye[J]. Natural Gas Geosciences, 2015, 26(2): 312-319.
- [15] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 41-61.
Bureau of Geology and Mineral of Hunan Province. Regional geology of Hunan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 41-61.
- [16] 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.
- [17] 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[C]// Presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Colorado, USA, 2008: 21-24.
- [18] FANG Changliang, AMRO M. Influence factors of fracability in Nonmarine shale[C]// SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition. Vienna, Austria, 2014: 25-27.
- [19] 李艳霞, 李净红. 中扬子区上震旦统一志留系页岩气勘探远景[J]. *新疆石油地质*, 2010, 31(6): 659-663.
LI Yanxia, LI Jinghong. Exploration prospects of shale gas of Upper Simian—Silurian in Mid—Yangtze region[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(6): 659-663.
- [20] 徐祖新, 郭少斌. 基于氩离子抛光 SEM 和 ImageJ 软件的页岩储层孔隙结构分析: 以中扬子地区陡山沱组为例[J]. *东北石油大学学报*, 2014, 38(4): 45-51.
XU Zuxin, GUO Shaobin. Analysis of pore structure in shale reservoirs based on the SEM of polished argon ion and ImageJ software: taking Doushantuo Formation shale of mid-yangtze area[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2014, 38(4): 45-51.
- [21] 冯爱芬, 张永久. 应用 Image J 软件进行图像处理统计织物孔隙率[J]. *针织工业*, 2015(1): 9-11.
FENG Aifen, ZHANG Yongjiu. Application of Image J software for image processing and fabric porosity analyzing[J]. *Knitting Industries*, 2015(1): 9-11.
- [22] 张晨, 王清, 陈剑平, 等. 金沙江域泥石流组合赋权法危险度评价[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 831-836.
ZHANG Chen, WANG Qing, CHEN Jianping, et al. Evaluation of debris flow risk in Jinsha River based on combined weight process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 831-836.
- [23] 焦秋实. 露天采石场防尘现状模糊综合评价的研究[D]. 南京: 江苏大学安全技术及工程学院, 2009: 24-25.
JIAO Qiushi. Fuzzy overall evaluation of quarry dustproof[D]. Nanjing: Jiangsu University. College of Environment and Safety Engineering, 2009: 24-25.
- [24] 郭庆清, 刘磊磊, 张绍和, 等. 基于组合赋权法和聚类分析法的岩爆预测[J]. *长江科学院院报*, 2013, 30(12): 54-59.
GUO Qingqing, LIU Leilei, ZHANG Shaohe, et al. Prediction of rockburst by combination weight method and cluster analysis method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, 30(12): 54-59.
- [25] 靖继鹏. 信息经济学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 273-274.
JIN Jipeng. Information economics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 273-274.

(编辑 陈灿华)