

深层致密砂岩储层可压裂性评价新方法

曾治平¹, 刘震², 马骥¹, 张春磊², 李静³, 刘振³, 孙鲁宁³

(1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015;

2. 中国石油工程建设有限公司北京设计分公司, 北京 100085;

3. 中国石油大学(华东)地质力学与工程研究所, 山东 青岛 266580)

摘要: 岩石可压性评价是储层压裂改造层位优选、压后产能评估的重要基础工作。准中4区块致密砂岩储层埋藏深、物性差, 亟需通过压裂改造提高工业产能。因此, 以董2井北三维区侏罗系致密砂岩为例, 基于岩石三轴实验建立了致密砂岩断裂能密度—弹性模量的拟合公式, 采用矿物成分法和弹模-泊松比法确定了研究区不同深度岩石脆性指数, 采用岩石破裂准则确定了研究区不同深度的裂缝发育指数。以断裂能密度表征致密砂岩断裂韧性, 以裂缝发育指数表征储层天然裂缝发育程度, 综合考虑岩石脆性、断裂韧性、地应力环境和天然裂缝发育程度的影响, 采用层次分析法计算了各因素权重, 建立了适合深层致密砂岩的可压性评价方法。研究结果表明, 可压裂性指数大于0.55时, 可压性好; 可压裂性指数介于0.50~0.55之间时, 可压性一般; 可压裂性指数小于0.50时, 可压性差; 研究区D7井的最佳压裂层位为4145~4160 m、4470~4480 m、5290~5330 m, D8井的最佳压裂层位为5120~5330 m、5350~5365 m, D701井的最佳压裂层位为3900~3910 m、4430~4440 m、4455~4465 m、5125~5135 m。

关键词: 致密砂岩; 可压裂性; 可压裂性指数; 岩石脆性; 断裂韧性; 天然裂缝

中图分类号: TE349

文献标识码: A

A NEW METHOD FOR FRACRABILITY EVALUATION IN DEEP AND TIGHT SANDSTONE RESERVOIRS

ZENG Zhiping¹, LIU Zhen², MA Ji¹, ZHANG Chunlei², LI Jing³, LIU Zhen³, SUN Luning³

(1. Research Institute of Exploration and Development of Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying 257015, Shandong, China;

2. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Beijing Company, Beijing 100085, China;

3. Institute of Geological Mechanics and Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract: Fracrabability evaluation is the basis for the optimization of fracturing level and the evaluation of productivity after fracturing. The tight sandstone reservoirs in block 4 in central Junggar Basin are buried deep and poor in physical property, and it is urgent to improve the industrial productivity by fracturing.

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05002-002); 国家自然科学基金 (41272141)

作者简介: 曾治平 (1977-), 男, 高级工程师, 博士, 从事石油地质与油气成藏研究。E-mail: zengzhipingupc@163.com

通讯作者: 李静 (1967-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与地质力学方面的教学与研究。E-mail: lijing0681@163.com

收稿日期: 2018-09-14; **修回日期:** 2018-12-15; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 曾治平, 刘震, 马骥, 等. 深层致密砂岩储层可压裂性评价新方法 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (2): 223-232 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.02.021

ZENG Zhiping, LIU Zhen, MA Ji, et al. A new method for fracrabability evaluation in deep and tight sandstone reservoirs [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (2): 223-232 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.02.021

Therefore, the fracture property of the Jurassic tight sandstone of Dong 2 well north area is studied as an example. Based on the experimental data of the rock triaxial test, the fitting formula of fracture energy density and elastic modulus of tight sandstone is established. Brittleness index of rocks at different depths in the study area is determined by mineral composition method and elastic modulus-Poisson ratio method. The fracture development index of different depths in the study area is determined by the criterion of rock fracture. Fracture energy density is used to characterize the fracture toughness of tight sandstone, and the fracture development index is used to characterize the development degree of natural fractures. Considering the influence of rock brittleness, fracture toughness, in-situ stress and development degree of natural fractures, the weight of each parameter is calculated by analytic hierarchy process, and a new quantitative fracrability evaluation of deep and tight sandstone reservoirs is established. The results show that when the fracrability index is greater than 0.55, the reservoir can be fractured well, when the fracrability index is between 0.50~0.55, the fractured reservoir is moderate, and when the fracrability index is less than 0.50, the fractured reservoir is poor. In the study area, the optimal fracturing horizons of Well D7 are 4145~4160 m, 4470~4480 m, 5290~5330 m, Well D8 are 5120~5330 m, 5350~5365 m, and Well D701 are 3900~3910 m, 4430~4440 m, 4455~4465 m, 5125~5135 m.

Key words: tight sandstone; fracrability; fracrability index; rock brittleness; fracture toughness; natural fractures

0 引言

随着油气勘探开发的不断深入, 深层、超深层储层逐渐成为油气资源增储上产的重要领域^[1]。准噶尔盆地中部致密砂岩储层埋藏深、物性差^[2], 传统油气开采手段不能满足生产需求, 亟需通过压裂改造提高工业产能^[3]。储层可压裂性评价作为压裂层段优选、压后产能评估定量评价的基础, 是压裂方案设计成功与否的关键所在^[4-5]。

储层可压裂性常采用岩石脆性指数来表征, 后来为了克服单一因素的片面性, 部分专家引入断裂韧性、成岩作用等作为可压裂性评价的参数^[6-7]。研究发现, 可压裂性受岩石本身特征和储层地质特征的影响, 但与施工工艺、泵注排量等工程因素无关^[8]。

目前, 国内外众多学者已针对页岩油气储层的可压裂性评价开展了系统研究^[8-9]。但是针对致密砂岩储层, 尤其是深层致密砂岩储层可压裂性研究较少。同时, 岩石断裂韧性的计算主要基于陈治喜等^[10]建立的拟合公式, 对于深层致密砂岩的适用性有待研究; 储层天然裂缝发育程度还停留在通过铸体薄片、成像测井定性描述上^[7], 获得的仅是部分点数据, 只能作为可压裂性评价的验证指标, 未能作为量化参数赋予权重加入可压裂

性评价之中。

因此, 文章以准中4区块侏罗系致密砂岩储层为研究目标, 综合考虑岩石脆性、断裂能密度、水平应力差异系数和裂缝发育指数, 建立了一套针对深层致密砂岩的可压裂性评价新方法, 定量评价了研究区储层可压裂性, 明确了压裂改造的有利层位, 为研究区下一步勘探开发提供技术支持。

1 可压裂性影响因素

1.1 脆性指数

脆性是岩石受力破坏时所表现出的一种固有性质, 影响压裂裂缝的数量和形态, 一般用脆性指数表征^[4,11]。李庆辉等^[11]、周辉等^[12]总结了国内外脆性指数计算的多种方法, 并分析了部分指标在评价岩石脆性时的局限性。在以往研究的基础上, 文中采用矿物成分法和弹模—泊松比法确定了研究区脆性指数。

一般认为, 石英、长石、碳酸盐岩等矿物为脆性矿物, 占比越高, 岩石脆性越强。通过矿物成分确定岩石脆性指数的计算公式^[13]如下。

$$B_{\text{min}} = \frac{W_{\text{qtz}} + W_{\text{carb}}}{W_{\text{total}}} \quad (1)$$

公式中, B_{min} 为通过矿物成分法确定的岩石脆

性指数; W_{qtz} 为石英和长石含量; W_{carb} 为碳酸盐岩含量; W_{total} 为岩石总矿物成分含量。

准中 4 区块董 2 井北三维区位于新疆昌吉回族自治州阜康市北部, 构造上处于中央坳陷昌吉凹陷东段。研究实验样品取自该区 D7 井 4133 ~ 4135 m、D8 井 4542 ~ 4545 m、D701 井 3901 ~

3904 m 侏罗系致密砂岩储层, 共计 12 块。根据岩心观察及 X 射线衍射实验分析, 矿物成分含量如图 1 所示, 研究区域岩石矿物成分以岩屑 (22% ~ 78%)、石英 (14% ~ 55%) 为主, 长石 (4% ~ 20%)、云母 (0% ~ 4%) 次之, 岩屑成份主要为火成岩及少量变质岩, 风化蚀变程度中等。

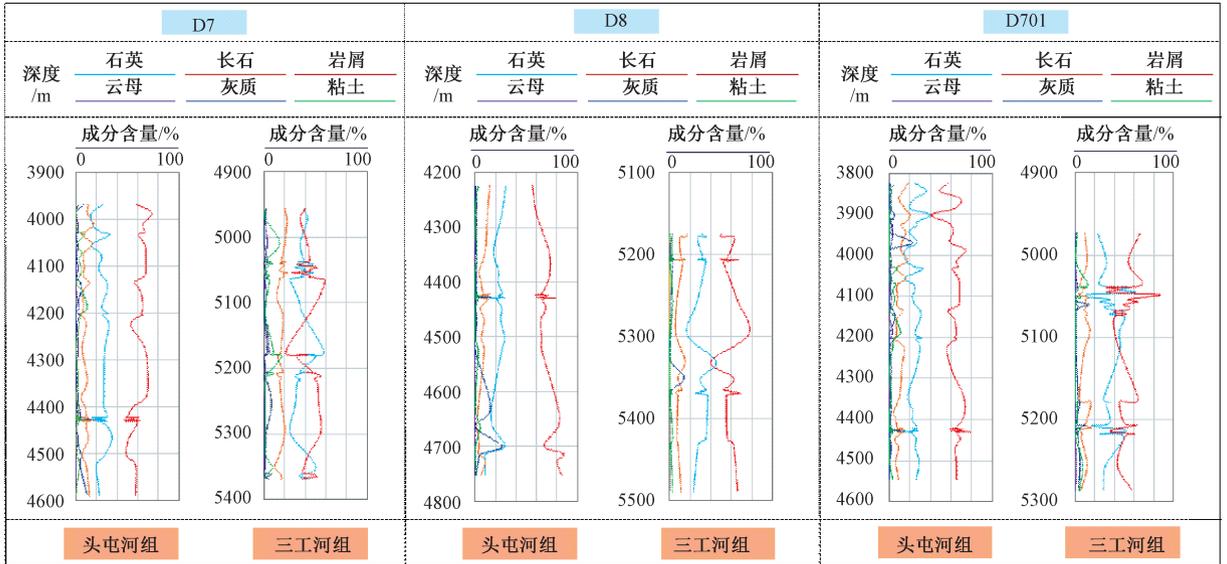
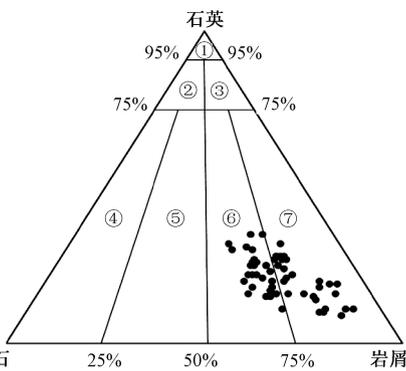


图 1 研究区矿物成分含量图

Fig. 1 The composition of rock samples in the study area

对研究区侏罗系储层矿物测试数据进行分类, 如图 2 所示。由图可知, 研究区侏罗系储层岩石成分中岩屑比重较大, 多为岩屑砂岩。

松比法确定了研究区储层岩石脆性指数, 如公式 (2)^[15] 所示。绘制了研究区侏罗系储层致密砂岩弹性模量、泊松比与脆性指数的关系如图 3 所示。



- ①—石英砂岩; ②—一次长石砂岩; ③—一次岩屑砂岩; ④—长石砂岩;
- ⑤—岩屑长石砂岩; ⑥—长石岩屑砂岩; ⑦—岩屑砂岩

图 2 研究区侏罗系成分含量图

Fig. 2 The composition of rock samples in the Jurassic reservoir in the study area

弹性模量反映了岩石被压裂后保持裂缝的能力, 泊松比反映了岩石受力后抵抗破裂的能力, 弹性模量越高, 泊松比越低, 脆性越强。利用声波测井资料计算得到了储层岩石力学参数^[14], 采用弹模-泊

$$\begin{cases} E_{Brit} = (E - E_{min}) / (E_{max} - E_{min}) \\ \mu_{Brit} = (\mu_{max} - \mu) / (\mu_{max} - \mu_{min}) \\ B_{rit2} = (E_{Brit} + \mu_{Brit}) / 2 \end{cases} \quad (2)$$

公式中, E_{Brit} 、 μ_{Brit} 为归一化弹性模量和泊松比; E_{max} 、 E_{min} 为研究区储层岩石弹性模量最大值和最小值, GPa; μ_{max} 、 μ_{min} 为研究区储层岩石泊松比最大值和最小值; B_{rit2} 为通过弹模-泊松比法确定的岩石脆性指数。

弹模-泊松比法进行脆性评价时, 弹性模量和泊松比的权重不确定; 所采用的横波资料因为井眼的不规则性需进行修正, 且横波资料测试费用较高数据较少, 一般通过纵波资料转换得到, 精度较低; 矿物成分法进行脆性评价不需要横波资料, 费用较低、操作简单, 但仅靠三种矿物组分含量表征岩石脆性准确度不够。为此, 研究综合考虑两种方法的优缺点, 研究脆性与弹性模量、泊松比和矿物成分含量之间的相关关系, 构建了研究区脆性指数的计算方法, 如公式 (3) 所示。

$$B_{rit} = B_{rit1} \times B_{rit2} \quad (3)$$

公式中, B_{rit1} 为通过矿物成分法确定的岩石脆性指数; B_{rit2} 为通过弹模-泊松比法确定的岩石脆性指数。

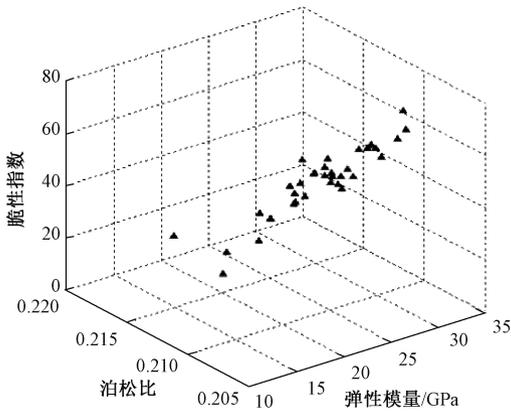


图3 弹模—泊松比法表征研究区脆性指数

Fig. 3 Using elastic modulus Poisson's ratio method to characterize the brittleness index of the study area

1.2 断裂韧性

断裂韧性是一项表征储层压裂难易程度的重要因素,反映压裂过程中裂缝形成后维持裂缝向前延伸的能力^[6]。断裂韧性实验繁琐、随机性大,目前断裂韧性的计算主要基于陈治喜等^[10]建立的断裂韧性与抗拉强度拟合公式,但是对于深层致密砂岩的适用性有待研究。储层岩石的破坏行为本质上是能量耗散和释放的宏观体现,断裂能尤其是峰后断裂能作为反映裂纹扩展所消耗的能量,是决定岩石是否发生断裂的本质因素^[16]。岩石断裂能越小,压裂裂缝宽度越小,裂缝长度越大;岩石弹性模量越大,压裂裂缝宽度越小,裂缝长度越大,裂缝越扁长^[17]。弹性模量是岩石主要的物理力学性质,对岩石断裂能的大小和裂缝的形成有直接的影响。鉴于此,从能量角度出发,基于岩石三轴实验建立了不同围压下峰后断裂能密度与弹性模量的拟合公式,利用峰后断裂能密度定量表征研究区致密砂岩断裂韧性。

研究区12块致密砂岩破坏全过程应力—应变曲线,如图4所示。确定了12组试块断裂能密度和静态弹性模量,如表1所示。拟合建立了研究区深层致密砂岩断裂能密度与静态弹性模量的方程式,如公式(4)所示。深层致密砂岩断裂能密度与静态弹性模量相关关系曲线如图5所示。

$$G_e = 0.301E^2 + 1.703E + 1.550; R^2 = 0.957 \quad (4)$$

公式中, G_e 为岩石断裂能密度, $N \cdot mm/mm^3$;

E 为静态弹性模量, GPa。

基于测井资料确定研究区不同深度连续地层的弹性模量^[14],进而结合公式(4)可以确定研究区不同地层致密砂岩的断裂能密度。

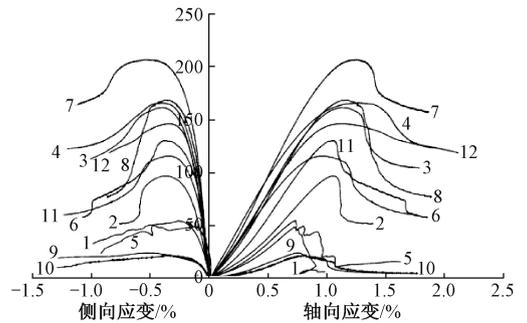


图4 不同围压下致密砂岩应力—应变全曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of tight sandstone under different confining pressures

表1 研究区致密砂岩弹性模量及断裂能密度表

Table 1 Elastic modulus and fracture energy density table for tight sandstone in the study area

井号	编号	围压/ MPa	峰值强度/ MPa	残余应力/ MPa	弹性模量/ GPa	断裂能密度/ ($N \cdot mm \cdot mm^{-3}$)
D7	1	0	54.5	6.5	9.55	23.35
	2	10	106.7	61.8	12.16	51.94
	3	30	191.5	134.2	19.09	133.99
	4	40	206.4	162.4	19.19	151.86
D8	5	0	49.9	15.8	8.87	41.75
	6	10	140.7	67.4	16.40	121.78
	7	30	237.3	186.9	22.46	175.04
	8	20	188.9	97.3	19.50	158.31
D701	9	0	24.4	4.7	4.28	21.06
	10	0	22.4	4.8	4.27	19.26
	11	20	136.0	80.3	15.64	107.52
	12	40	186.3	161.1	17.74	142.94

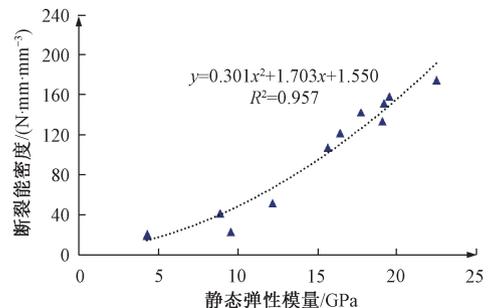


图5 静态弹性模量与断裂能密度拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of static modulus of elasticity and fracture energy density

1.3 储层地应力

地应力是存在于地层中的天然应力,决定了人工裂缝的方位与形态^[18]。当水平主应力差值较

小时, 压裂裂缝容易沿多个方向扩展, 有利于形成充分的裂缝网络; 随着水平主应力差值的增大, 地应力对压裂裂缝的控制作用逐渐增强, 此时压裂裂缝主要沿最大水平主应力方向扩展, 裂缝形态相对单一^[7,19]。

采用水平应力差异系数描述水平主应力差值的大小, 计算公式如公式(5)^[20]所示。

$$K_h = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_h} \quad (5)$$

公式中, K_h 为水平应力差异系数; σ_H 、 σ_h 为储层水平最大、最小主应力, MPa。

基于常规测井资料, 采用黄氏模型获得了研究区不同深度的单井地应力值^[21]。将计算的单井地应力值带入公式(5), 确定了研究区关键井点不同深度的水平应力差异系数。研究表明, 当水平应力差异系数小于0.3时, 容易产生网状裂缝, 可压裂性好; 当水平应力差异系数大于0.5时, 水力裂缝形态单一, 可压裂性差^[22]。

1.4 裂缝发育程度

在压裂过程中, 天然裂缝和诱导裂缝相互影响, 诱导裂缝可以使天然裂缝重新张开并相互沟通, 天然裂缝也可以改变诱导裂缝的延伸方向, 产生下一级诱导裂缝, 最终形成缝网^[8]。目前, 储层天然裂缝发育程度主要通过薄片分析、成像测井等方法定性描述, 获得的仅仅是点数据, 一般作为可压性评价的验证指标, 未能作为参数赋予权重加入可压裂性评价之中。

采用岩石破裂准则确定了研究区不同深度地层的张破裂率、剪破裂率, 根据研究区张拉裂缝和剪切裂缝比重进行加权求和, 得到研究区裂缝发育指数, 定量表征天然裂缝发育程度, 如公式(6) — (8)所示。

$$I_n = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta}{2[\tau_n]} \quad (6)$$

$$I_t = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{8(\sigma_1 + \sigma_3)[\sigma_t]} \quad (7)$$

$$I = \alpha I_n + \beta I_t \quad (8)$$

公式中, I_n 、 I_t 分别为剪破裂率和张破裂率; σ_1 、 σ_3 分别为储层最大、最小主应力, MPa; $[\tau_n]$ 、 $[\sigma_t]$ 分别为岩石的抗剪、抗拉强度, MPa; θ 为岩石内摩擦角, ($^\circ$); α 、 β 分别为研究区张拉裂缝和剪切裂缝比重。理论上 I 值越大, 天然裂缝越发育。

2 应用实例

2.1 可压裂性综合评价

综合考虑研究区储层岩石矿物成分、岩石力学参数、断裂韧性、地应力和天然裂缝发育程度, 采用脆性指数、断裂能密度、水平应力差异系数和裂缝发育指数4个参数定量评价研究区储层可压裂性。

脆性指数、断裂能密度、水平应力差异系数和裂缝发育指数4个参数的单位和量纲都不相同, 而且各参数值的大小和有效范围也不相同, 因此需先对各参数进行归一化处理, 然后采用层次分析法确定不同因素对可压裂性影响的权重, 最后将归一化值与权重系数加权即为研究区致密砂岩的可压裂指数。

(1) 参数归一化处理

岩石脆性和裂缝发育指数为正向指标, 即数值越大对储层压裂改造越有利, 正向指标计算公式:

$$S = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (9)$$

断裂韧性和水平应力差异系数为负向指标, 其数值越大对储层压裂改造越不利, 负向指标计算公式:

$$S = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (10)$$

公式(9)、(10)中, S 为归一化后的参数值; X_{\max} 、 X_{\min} 分别为研究区参数的极大值和极小值; X 为目的层段的参数值。

(2) 确定各参数权重

结合工程经验分析认为, 脆性对储层可压裂性影响最大, 其次为断裂能密度和水平应力差异系数, 最后为裂缝发育指数, 层次结构模型如图6所示。

通过各参数间两两比较判断确定每一层次中各元素的相对重要性, 并给出定量表示(即标度)。各种情况下的定量值(标度)如表2所示, 以各参数对比后的标度值构造判断矩阵, 如表3所示。采用和积法确定判断矩阵的特征向量 $A = (0.42, 0.23, 0.23, 0.12)$, 即脆性指数、断裂能密度、水平应力差异系数和裂缝发育指数4个参数权重分别为0.42、0.23、0.23和0.12, 采用可

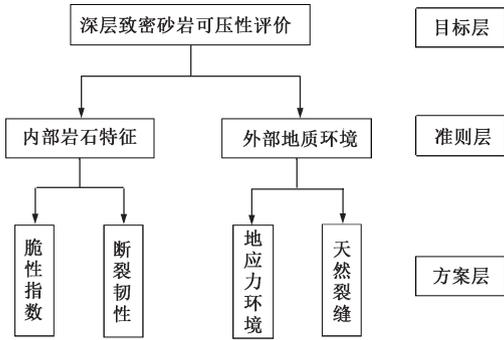


图6 深层致密砂岩储层可压性层次结构模型

Fig. 6 The hierarchical structure model of the deep tight sandstone reservoir fracability

压裂性指数 FI 定量表征深层致密砂岩压裂改造的难易程度，如公式 (11) 所示。

$$FI = 0.42B_{rit} + 0.23G_e + 0.23K_h + 0.12I \quad (11)$$

公式中， FI 为可压裂性指数； B_{rit} 为归一化脆性指数； G_e 为归一化断裂能密度； K_h 为归一化水平应力差异系数； I 为归一化裂缝发育指数。

2.2 压裂层位优选

以研究区 D7 井、D8 井、D701 井为例，计算得到 D7 井、D8 井、D701 井储层可压裂性指数 (图 7)。由图 7 可看出，D7 井可压裂性指数范围在

表 2 判断矩阵标度

Table 2 Judgement matrix scale

标度	含义
1	表示两影响因素 i 和 j 相比，重要性相同
3	表示两影响因素 i 和 j 相比，一个比另一个稍微重要
5	表示两影响因素 i 和 j 相比，一个比另一个重要
7	表示两影响因素 i 和 j 相比，一个比另一个明显重要
9	表示两影响因素 i 和 j 相比，一个比另一个极其重要
2、4、6、8	上述两相邻判断中间值

注：影响因素 i 和 j 比较判断值为 A_{ij} ，则 j 和 i 比较判断值为 $1/A_{ij}$

表 3 可压裂性指标判断矩阵

Table 3 Judgment matrix for fracability index

A	脆性指数	断裂能密度	水平应力差异系数	裂缝发育指数
脆性指数	1	2	2	3
断裂能密度	1/2	1	1	2
水平应力差异系数	1/2	1	1	2
裂缝发育指数	1/3	1/2	1/2	1

0.46~0.65 (平均值为 0.53)；D8 井可压裂性指数范围在 0.43~0.56 (平均值为 0.51)；D701 井可压裂性指数范围在 0.46~0.62 (平均值为 0.53)。其中，D7 井三工河组底部、D8 井三工河组中部、D701 头屯河组顶部及底部、D701 井三工河组可压裂性指数较大。

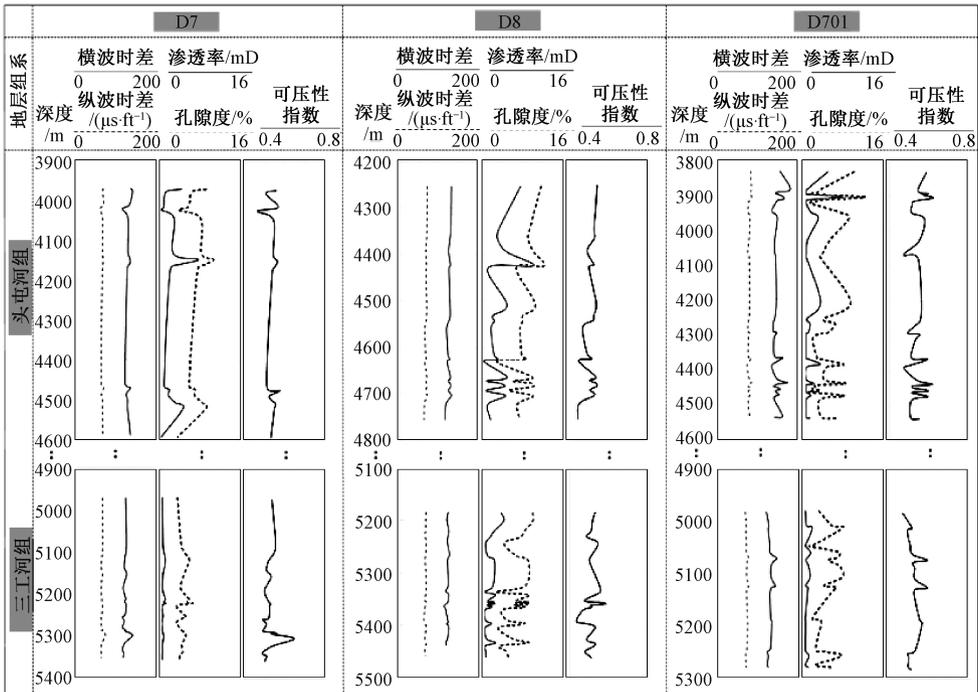


图 7 研究区可压裂性指数

Fig. 7 Fracability index of the study area

当相邻层段可压裂性指数相差较大且为有效储层时, 可压裂性指数较大的层段容易进行压裂, 而且可压裂性指数 FI 越大, 压裂缝网越复杂, 压裂效果越好。研究区 D7 井、D8 井、D701 井研究层段可压裂性指数平均值均大于 0.5。鉴于此, 综合分析 D7 井、D8 井、D701 井侏罗系可压裂性指数随深度变化和有效储层分布情况, 将研究区致

密砂岩可压裂性分为 3 个级别: 可压性指数大于 0.55 的储层为一类储层, 可压性好; 可压性指数介于 0.50~0.55 之间的为二类储层, 可压性一般, 需要通过增大压力或者其他方法提高压裂改造效果; 可压性指数小于 0.50 的储层为三类储层, 可压性差。最终确定研究区 D7 井、D8 井和 D701 井侏罗系的压裂层位优选结果 (图 8、9、10)。

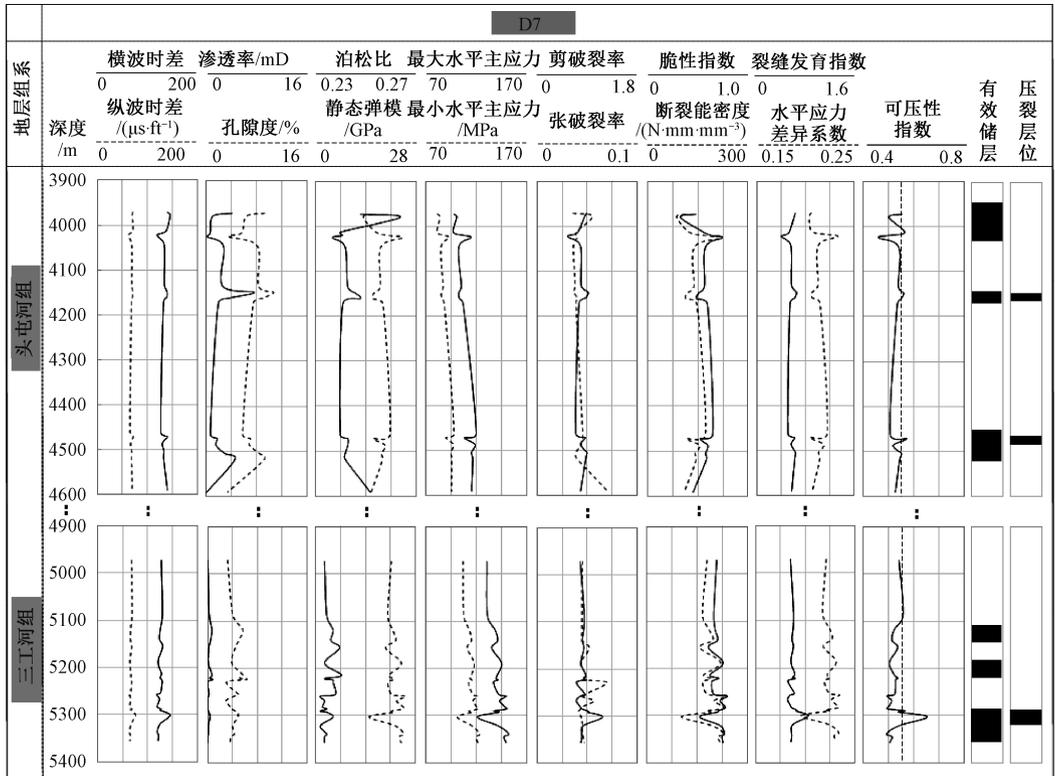


图 8 研究区 D7 井储层可压性综合评价

Fig. 8 Comprehensive evaluation of reservoir fracrability in Well D7 in the study area

其中 D7 井 4144~4160 m、4470~4480 m 和 5290~5330 m 可压性好且为有效储层, 可作为 D7 井压裂改造的优选层位; D8 井 5120~5330 m 和 5350~5365 m 可压性好且为有效储层, 可作为 D8 井压裂改造的优选层位; D701 井 3900~3910 m、4430~4440 m、4454~4465 m 和 5124~5135 m 可压性好且为有效储层, 可作为 D701 井压裂改造的优选层位。

2.3 压后效果评估

采用文中建立的深层致密砂岩可压性评价方法, 选取 D8 井侏罗系三工河组 5350~5365 m 开展了酸化压裂改造, 并对其进行了实时微地震监测, 如图 11 所示。

观察发现, 该层段 5353.7~5364.4 m 井段产生了一条北东向压裂裂缝, 裂缝总长度约

191.4 m, 且多向东翼延伸; 压裂改造效果较好, 达到了压裂造缝的目的, 证明了利用该方法进行优选压裂层段的可行性。

3 结论

(1) 针对储层可压裂性的影响因素, 分别采用矿物成分法和弹模-泊松比法构建研究区脆性指数的计算方法, 确定了研究区脆性指数范围在 0.50~0.83, 岩石脆性较好; 从能量角度出发, 基于岩石三轴实验建立了不同围压下峰后断裂能密度与静态弹性模量二次函数关系, 进而利用峰后断裂能密度定量表征了研究区致密砂岩断裂韧性; 基于黄氏模型确定了研究区关键井点的地应力值, 水平应力差异系数范围在 0.17~0.23, 容易形成裂

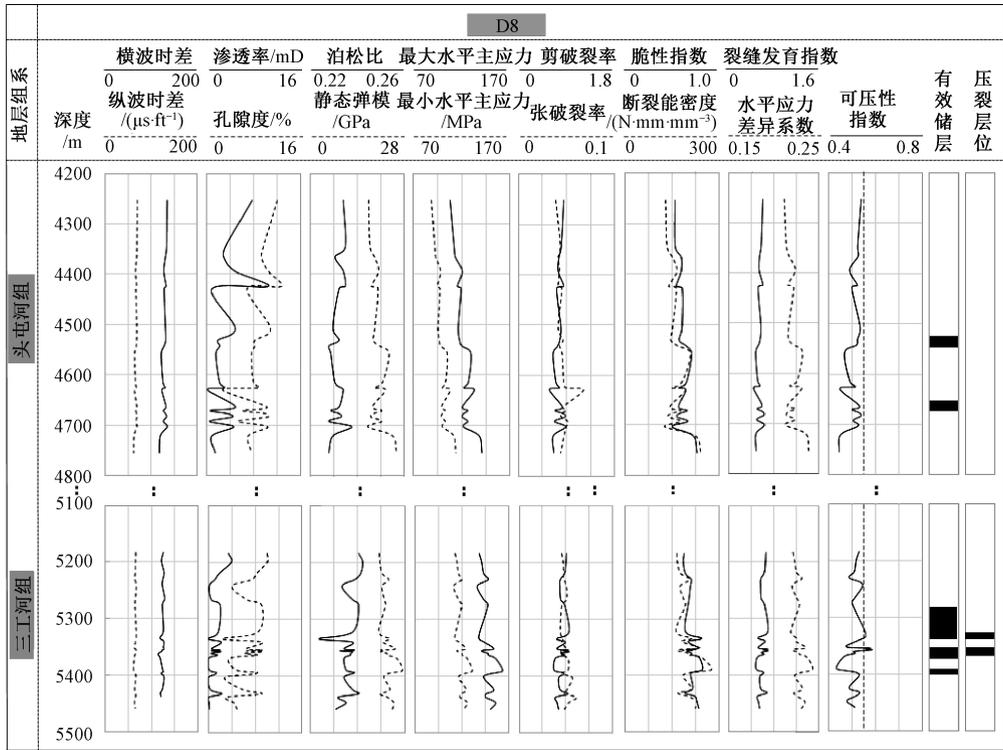


图 9 研究区 D8 井储层可压性综合评价

Fig. 9 Comprehensive evaluation of reservoir fracrability in Well D8 in the study area

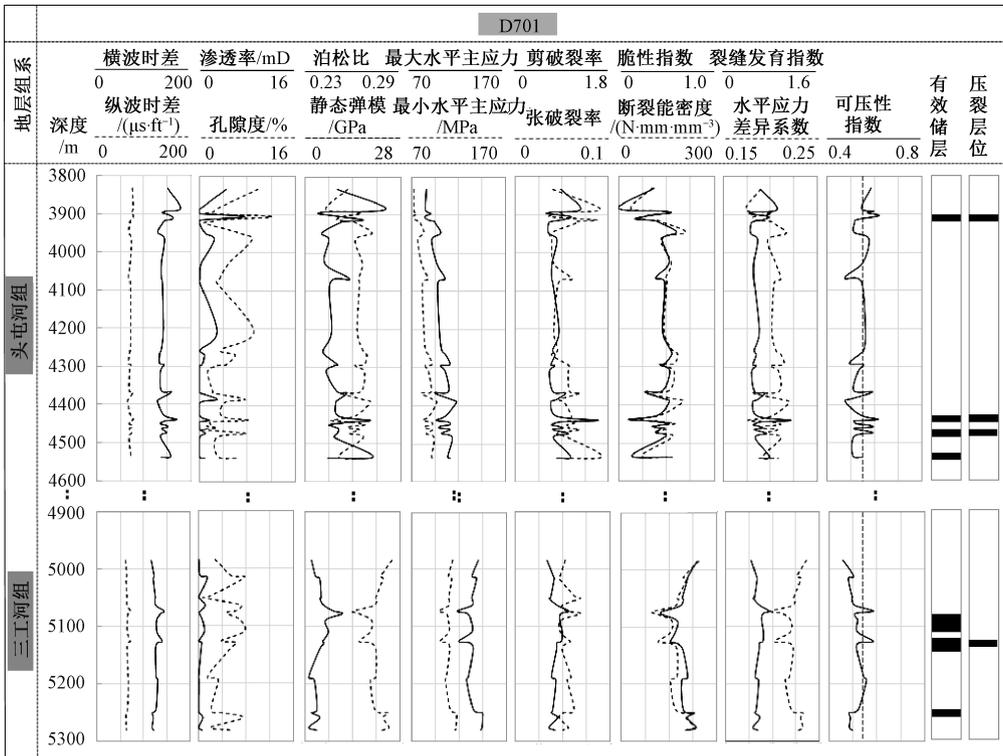


图 10 研究区 D701 井储层可压性综合评价

Fig. 10 Comprehensive evaluation of reservoir fracrability in Well D701 in the study area

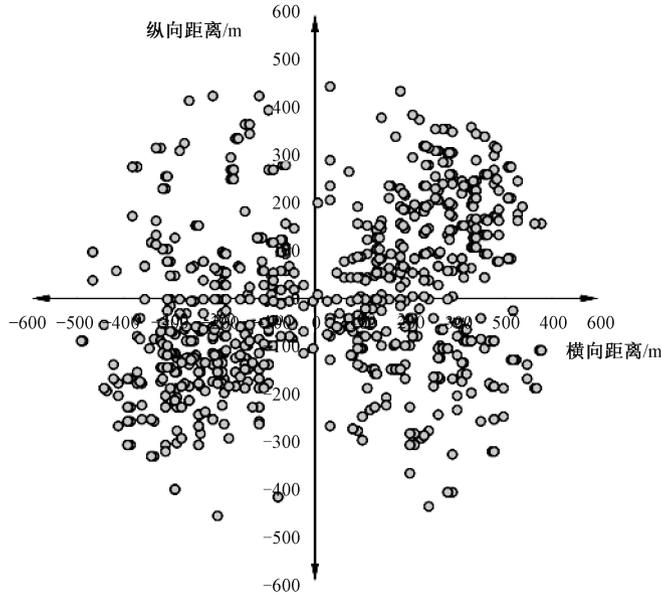


图 11 研究区 D8 井原始微震点图

Fig. 11 The original microseismic points of the Well D8 in the study area

缝网络; 基于岩石破裂准则计算得到了研究区裂缝发育指数, 裂缝发育指数范围主要在 0.4~0.8 之间, 多为裂缝轻微发育区。

(2) 综合考虑研究区储层岩石脆性、断裂韧性、地应力和天然裂缝发育程度, 采用层次分析法, 确定了脆性指数、断裂能密度、水平应力差异系数和裂缝发育指数 4 个参数的权重分别为 0.42、0.23、0.23 和 0.12, 采用可压性指数 FI 定量表征深层致密砂岩压裂改造的难易程度, 建立了一套适合深层致密砂岩的可压性评价方法。

(3) 根据储层各参数特征、可压裂性指数大小和有效储层分布情况将储层分为三类: 可压性指数大于 0.55 的储层为一类储层, 可压性好; 可压性指数介于 0.50~0.55 之间的为二类储层, 可压性一般, 需要通过增大压力或者其他方法提高压裂改造效果; 可压性指数小于 0.50 的储层为三类储层, 可压性差。

(4) 基于建立的深层致密砂岩可压裂性评价方法, 确定了 D7 井的最佳压裂层位为 4145~4160 m、4470~4480 m 和 5290~5330 m, D8 井的最佳压裂层位为 5120~5330 m 和 5350~5365 m, D701 井的最佳压裂层位为 3900~3910 m、4430~4440 m、4455~4465 m 和 5125~5135 m。经 D8 井 5350~5365 m 压裂改造实时微地震观察结果, 证明了建立的可压性评价方法切实可行。

参考文献/References

- [1] 张惠良, 张荣虎, 杨海军, 等. 超深层裂缝-孔隙型致密砂岩储集层表征与评价——以库车前陆盆地克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组为例 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41 (2): 158~167.
ZHANG Hui-liang, ZHANG Rong-hu, YANG Hai-jun, et al. Characterization and evaluation of ultra-deep fracture-pore tight sandstone reservoirs: a case study of Cretaceous Bashiji-qike Formation in Kelasu tectonic zone in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41 (2): 158~167. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张丽辰, 吴孔友, 何文军, 等. 准噶尔盆地北三台凸起断裂结构特征及成岩封闭作用 [J]. 地质力学学报, 2018, 24 (5): 607~616.
ZHANG Lichen, WU Kongyou, HE Wenjun, et al. Structural characteristics and diagenetic sealing of faults in the Beisantai Swell, Junggar Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24 (5): 607~616. (in Chinese with English abstract)
- [3] 周汉国, 郭建春, 李静, 等. 裂隙特征对岩石渗流特性的影响规律研究 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (4): 531~539.
ZHOU Hanguo, GUO Jianchun, LI Jing, et al. A study on the influence rule of the fracture characteristics on rock seepage characteristics [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (4): 531~539. (in Chinese with English abstract)
- [4] 孙建孟, 韩志磊, 秦瑞宝, 等. 致密气储层可压裂性测井评价方法 [J]. 石油学报, 2015, 36 (1): 74~80.
SUN Jianmeng, HAN Zhilei, QIN Ruibao, et al. Log evaluation method of fracturing performance in tight gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (1): 74~80. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杜书恒, 关平, 师永民, 等. 低渗透砂岩储层可压裂性新判据 [J]. 地学前缘, 2017, 24 (2): 257~264.

- DU Shuheng, GUAN Ping, SHI Yongmin, et al. New fracturing criteria on low permeability sandstone reservoirs [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24 (2): 257~264. (in Chinese with English abstract)
- [6] 肖苏芸, 张冲, 张杰, 等. 基于阵列声波资料评价致密砂岩可压裂性 [J]. *中州煤炭*, 2016, (4): 125~128.
- XIAO Suyun, ZHANG Chong, ZHANG Jie, et al. Fracability evaluation of tight sandstone reservoirs based on array acoustic data [J]. *Zhongzhou Coal*, 2016, (4): 125~128. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李年银, 代金鑫, 刘超, 等. 致密碳酸盐岩气藏体积酸压可行性研究及施工效果——以鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐岩气藏为例 [J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23 (3): 120~126.
- LI Nianyin, DAI Jinxin, LIU Chao, et al. Feasibility research on volume acid fracturing to tight carbonate gas reservoir and its construction effect: a case study of lower Paleozoic carbonate gas reservoir in Ordos basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23 (3): 120~126. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王松, 杨洪志, 赵金洲, 等. 页岩气井可压裂性综合评价方法研究及应用 [J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23 (2): 121~126.
- WANG Song, YANG Hongzhi, ZHAO Jinzhou, et al. Research and application of comprehensive evaluation on fracability of shale gas wells [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23 (2): 121~126. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈治喜, 陈勉, 金衍. 岩石断裂韧性与声波速度相关性的试验研究 [J]. *石油钻采工艺*, 1997, 19 (5): 56~60, 75.
- CHEN Zhixi, CHEN Mian, JIN Yan. Experimental study on the relationship between rock fracture toughness and acoustic velocity [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1997, 19 (5): 56~60, 75. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩脆性的室内评价方法及改进 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31 (8): 1680~1685.
- LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31 (8): 1680~1685. (in Chinese with English abstract)
- [12] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33 (6): 1114~1122.
- ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33 (6): 1114~1122. (in Chinese with English abstract)
- [13] Jarvie D M, 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] 杨秀娟, 张敏, 闫相祯. 基于声波测井信息的岩石弹性力学参数研究 [J]. *石油地质与工程*, 2008, 22 (4): 39~42.
- YANG Xiujuan, ZHANG Min, YAN Xiangzhen. Study on acoustic logging-based rock elasticity parameters [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2008, 22 (4): 39~42. (in Chinese with English abstract)
- [15] Rickman R, Mullen M J, Petre J E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the barnett shale [A]. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition [C]*. Denver, Colorado, USA: Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [16] 张军, 艾池, 李玉伟, 等. 基于岩石破坏全过程能量演化的脆性评价指数 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36 (6): 1326~1340.
- ZHANG Jun, AI Chi, LI Yuwei, et al. Brittleness evaluation index based on energy evolution of the whole process of rock failure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36 (6): 1326~1340. (in Chinese with English abstract)
- [17] 彭成勇, 刘书杰, 李扬, 等. 砂岩储层可压裂性评价方法研究 [J]. *科学技术与工程*, 2014, 14 (20): 205~209.
- PENG Chengyong, LIU Shujie, LI Yang, et al. Fracability evaluation of sandstone reservoirs [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14 (20): 205~209. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张美玲, 董传雷, 蔺建华. 地应力分层技术在压裂设计优化中的应用 [J]. *地质力学学报*, 2017, 23 (3): 467~474.
- ZHANG Meiling, DONG Chuanlei, LIN Jianhua. The application of geostress layering technology in fracture design optimization [J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23 (3): 467~474. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈勉, 周健, 金衍, 等. 随机裂缝性储层压裂特征实验研究 [J]. *石油学报*, 2008, 29 (3): 431~434.
- CHEN Mian, ZHOU Jian, JIN Yan, et al. Experimental study on fracturing features in naturally fractured reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29 (3): 431~434. (in Chinese with English abstract)
- [20] Beugelsdijk L J L, de Pater C J, Sato K. Experimental hydraulic fracture propagation in a multi-fractured medium [A]. *Proceedings of SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management [C]*. Yokohama, Japan: Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [21] 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. (in Chinese with English abstract)
- [22] 郭建春, 尹建, 赵志红. 裂缝干扰下页岩储层压裂形成复杂裂缝可行性 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33 (8): 1589~1596.
- GUO Jianchun, YIN Jian, ZHAO Zhihong. Feasibility of formation of complex fractures under cracks interference in shale reservoir fracturing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33 (8): 1589~1596. (in Chinese with English abstract)