

基于权重分配的页岩气储层可压性评价新方法

王汉青, 陈军斌, 张杰, 谢青, 魏波, 赵逸然

(西安石油大学石油工程学院, 陕西西安 710065)

摘要:为了解决现有页岩气储层可压性评价方法无法连续评价页岩气储层可压性的问题,考虑地质甜点和工程甜点双重因素,通过定量评价地质甜点参数,综合矿物组分含量、细观力学参数计算工程甜点参数,运用标准化、归一化、调和平均和算数平均方法建立了基于权重分配的页岩气储层可压性评价模型。该评价模型充分考虑了页岩储层含气性和易改造性的潜力,确定总有机碳含量、镜质体反射率、剪切模量和断裂韧度4个参数作为评价可压性的关键参数;当总有机碳含量大于2%、镜质体反射率大于1.3%、硅质矿物含量为20%~60%、碳酸盐岩矿物含量为10%~30%、黏土矿物含量为30%~50%时,页岩气储层最适合进行压裂改造。利用建立的评价模型评价了四川盆地威远地区某页岩气井W井储层段的可压性,并根据评价结果指导了该井的压裂设计与施工,压后微地震监测显示,产生了较多裂缝,实现了体积压裂。这表明,利用该评价模型可以连续评价储层的可压性,根据计算结果可以更加准确地划分有效压裂层段和遮挡层段,可操作性强,具有工程应用价值。

关键词:页岩气;压裂;可压性指数;地质甜点;工程甜点;含气性;矿物组分

中图分类号:TE377 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2016)03-0088-07

A New Method of Fracability Evaluation of Shale Gas Reservoir Based on Weight Allocation

WANG Hanqing, CHEN Junbin, ZHANG Jie, XIE Qing, WEI Bo, ZHAO Yiran

(School of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China)

Abstract: Existing shale gas reservoir fracability evaluation methods cannot be used in continuous fracability evaluation of reservoirs. After a quantitative evaluation of the parameters of geological sweet spots and the calculation of engineering parameters by combining the contents of mineral composition and the micromechanics parameters, a new shale gas reservoir fracability evaluation model based on weight allocation through standardization, normalization, harmonic averaging and arithmetic averaging methods was developed. This model considers the gas-bearing potential and stimulation potential of shale gas reservoirs, with four critical parameters (total organic carbon (TOC), vitrinite reflectance (R_o), shear modulus, and fracture toughness) defined for fracability evaluation which takes into consideration both geological and engineering criteria for sweet spots. It is proposed that shale gas reservoirs with $TOC > 2\%$, $R_o > 1.3\%$, silica mineral content of $20\% \sim 60\%$, carbonate mineral content of $10\% \sim 30\%$, and clay mineral content of $30\% \sim 50\%$, are good candidates for hydraulic fracturing. This model was used to evaluate the fracability of reservoir sections in Well W, a shale gas well in the Weiyuan area of the Sichuan Basin. Microseismic monitoring results showed that multiple fractures were generated during fracturing. This indicated that this model could be used in continuous fracability evaluation of shale reservoirs. From the calculated results, the pay zone and barriers could be identified accurately. So the proposed model is highly operable and worthy of engineering applications.

Key words: shale gas; fracturing; fracability index; geological sweet spot; engineering sweet spot; gas-bearing potential; mineral composition

评价页岩气储层的可压性,对于优选页岩气井压裂井段、优化页岩气田开发方案和预测经济效益具有十分重要的意义^[1],是目前国内外学者关注的热点。唐颖等人^[2]在K. K. Chong的可压性概念基础上,考虑页岩脆性、天然裂缝、石英含量和成岩作用获得页岩气储层可压性评价系数;M. J. Mullen等人^[3]认为页岩气储层的可压性评价

收稿日期:2015-07-19;改回日期:2016-04-14。

作者简介:王汉青(1990—),男,陕西紫阳人,2013年毕业于西安石油大学资源勘查工程专业,在读硕士研究生,主要从事开发地质与油气田特种增产技术方面的研究。E-mail:wanghanqing90@126.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目“页岩气藏水平井液态气动力压裂增产新方法研究”(编号:51374170)、西安石油大学全日制硕士研究生创新基金项目“页岩气储层矿物组分与力学参数关系研究”(编号:2014CX130103)联合资助。

在于评价储层形成复杂裂缝网络的能力,应从页岩沉积构造特征、矿物含量组成等方面综合考虑;陈勉等人^[4-6]则以岩石力学试验为基础,通过测试页岩岩石力学参数,结合室内压裂模拟,对页岩进行可压性评价;袁俊亮等人^[1]考虑脆性指数、断裂韧度和岩石力学特性建立了可压裂指数模型;蒋廷学等人^[7]则综合地质甜点指标,利用压裂施工参数来评价页岩气储层的可压性;赵金洲等人^[8]认为页岩脆性、断裂韧度和天然弱面涵盖了影响页岩气储层可压性的所有因素。

上述研究总体可分为岩心试验评价法和可压性系数评价法两大类:前者综合考虑了矿物组分含量和岩石力学参数,但由于页岩岩心易破碎,在进行岩心测试分析时,由于取心角度和加载方式的差异,无法确保测试值的确定性,且试验操作费时费力,现场推广难度大;后者综合考虑各种因素,确定各种因素的权重,利用数学方法获得综合评价系数,但现行方法对于权重的分配没有确定的标准,且存在无法对页岩气储层可压性进行连续性判断的问题。

针对上述问题,笔者综合考虑地质甜点和工程甜点因素,从评价页岩储层含气性和易改造性潜力的角度出发,构建了可以对页岩气储层进行连续性判断的可压性评价模型。

1 可压性评价参数优选

1.1 地质甜点可压性参数优选

地质甜点的可压性评价参数首先需要反映页岩气储层的含气潜力及物性,其次是与储层的脆性相关,因此,笔者选用总有机碳含量和成岩作用 2 个参数来表征地质甜点。

1.1.1 总有机碳含量

总有机碳含量是筛选优质页岩气储层的关键参数之一:1)有机质含量直接决定了页岩气储层的含气量,大量的生产实践证明,总有机碳含量与吸附气能力成正比,且有机质中的孔渗物性明显优于页岩基质,在一定程度上影响着裂缝的发育和分布^[9];2)总有机碳含量对含气页岩的密度影响巨大,进而对页岩储层的力学性质,尤其是脆性影响显著^[10]。笔者参考 Schlumberger 公司的评价标准,结合实际情况分析了总有机碳含量与干酪根质量、气体含量和可压性的关系,结果见表 1。

表 1 总有机碳含量与干酪根质量、气体含量和可压性的关系
Table 1 Relationship between fracability and TOC, kerogen quality, gas content

| 总有机碳含量, % | 干酪根质量 | 气体含量 | 可压性 |
|-----------|-------|------|-----|
| ≤0.5 | 很差 | 很低 | 很差 |
| 0.5~1.0 | 差 | 低 | 差 |
| 1.0~2.0 | 一般 | 一般 | 一般 |
| 2.0~4.0 | 好 | 高 | 好 |
| 4.0~12.0 | 很好 | 很高 | 很好 |
| >12.0 | 极好 | 极高 | 极好 |

1.1.2 成岩作用

在不同的成岩阶段,页岩气储层具有不同的特征。镜质体反射率是反映页岩成熟度的关键指标,用它来反映页岩的成岩作用较为合适^[11],且它与页岩气流动速率和储层脆性均有明显的关系^[12-13]。镜质体反射率与成岩阶段、储层特征、气体流量和可压性的关系见表 2。

表 2 镜质体反射率与成岩阶段、储层特征、气体流量和可压性的关系
Table 2 Relationship between fracability and R_o and diagenetic stages, reservoir characteristics, gas flow

| 镜质体反射率, % | 成岩阶段 | 储层主要特征 | 气体流量/ ($10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) | 可压性 |
|-----------|-----------|------------------|---|-----|
| ≤0.5 | 早成岩阶段 | 黏土矿物未转化,未成熟或成熟度低 | ≤12.74 | 差 |
| 0.5~1.3 | 中成岩阶段 A 期 | 黏土矿物绿泥石化,孔隙度下降 | (12.74~21.24) | 一般 |
| 1.3~2.0 | 中成岩阶段 B 期 | 生烃量增加,出现少量溶孔 | (21.24~25.49) | 较好 |
| 2.0~3.0 | 晚成岩阶段 A 期 | 矿物趋于稳定,脆性增加 | (25.49~28.32) | 好 |
| 3.0~4.0 | 晚成岩阶段 B 期 | 矿物基本稳定,脆性高 | >28.32 | 很好 |
| >4.0 | 变质阶段 | 矿物稳定,过成熟,裂缝发育 | 由变质程度决定 | 极好 |

1.2 工程甜点可压性参数优选

选取工程甜点的可压性参数时,应充分考虑其对储层力学性质的影响,因此,笔者从脆性破坏难易程度和破坏强弱程度 2 个方面来判断。

1.2.1 页岩脆性破坏难易程度的表征

页岩在低围压时主要发生张性劈裂,在高围压时发生单剪或双剪破裂,在天然裂缝发育的区域更容易发生剪切破裂^[5]。所以,采用剪切模量作为表

征页岩脆性破坏难易程度的参数。且剪切模量包含了杨氏模量和泊松比的双重效应,其与杨氏模量及泊松比的关系为:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

式中:G为剪切模量,GPa;E为杨氏模量,GPa;ν为泊松比。

剪切模量越大,储层的脆性越强,裂缝越容易起裂,压裂后形成的人工裂缝和剪切滑移缝越不容易闭合;反之,剪切模量越小,储层的塑性越强,裂缝不易起裂,且形成的人工裂缝和剪切滑移缝越容易闭合。

1.2.2 页岩脆性破坏强弱程度的表征

裂缝向前有效延伸并与天然裂缝沟通的能力是评价页岩储层可压性的另一项重要指标。张开缝和剪切缝是页岩破裂后的主要裂缝形态,其中人工压裂产生的主裂缝为张开缝,而在人工裂缝延伸作用下激活的天然微裂缝为剪切缝,从而表现出混合型缝网,因此以张开缝为主导裂缝。根据 G. R. Irwin 断裂力学理论^[14],在弹塑性条件下,当裂缝边缘应力强度因子达到某个临界值时,裂缝将失稳扩展导致岩体破裂,该临界值为断裂韧度,即:

$$K_I = K_{IC} \quad (2)$$

式中:K_I为应力强度因子,MPa·√m;K_{IC}为断裂韧度,MPa·√m。

断裂韧度越小,人工裂缝越容易向前延伸,越容易与天然裂缝沟通,从而形成复杂的裂缝网络。

2 可压性评价模型

2.1 地质甜点可压性评价模型

由于地质甜点是一个宏观上的综合指标,应用经验赋值标准化和权重分配法得到其可压性评价指数:

$$F_1 = (S_1, S_2)(\omega_1, \omega_2)^T \quad (3)$$

式中:F₁为地质甜点可压性指数;S₁为标准化的总有机碳含量;S₂为标准化的镜质体反射率;ω₁为总有机碳含量所占的权重系数,%;ω₂为镜质体反射率所占的权重系数,%。

由于 S₁ 和 S₂ 对于可压性都是正向指标,根据表 1 和表 2 的分类评价标准,其标准化处理如下:

$$S_1 = \begin{cases} 1 & (C_{TO} > 12.0) \\ \frac{C_{TO} - 0.5}{12.0 - 0.5} & (0.5 < C_{TO} \leq 12.0) \\ 0 & (C_{TO} \leq 0.5) \end{cases} \quad (4)$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & (R_o > 4.0) \\ \frac{R_o - 0.5}{4.0 - 0.5} & (0.5 < R_o \leq 4.0) \\ 0 & (R_o \leq 0.5) \end{cases} \quad (5)$$

式中:C_{TO}为总有机碳含量,%;R_o为镜质体反射率,%。

因为 C_{TO} 和 R_o 本身也是相互影响的指标,故视二者的权重均为 50%,则式(3)变为:

$$F_1 = \frac{S_1 + S_2}{2} \quad (6)$$

2.2 工程甜点可压性评价模型

2.2.1 物理模型的定义

页岩储层矿物主要由 3 大类构成:1)硅质矿物,主要包括石英和长石;2)碳酸盐岩矿物,主要包括方解石和白云石;3)黏土矿物,主要包括伊利石和绿泥石。不同类型的矿物有着不同的细观结构,而细观结构是决定岩石变形与破坏的主要因素。细观的岩石组构称之为细胞元^[15],用细胞元表征方法量化不同细观结构,将页岩宏观变形破坏等效为细胞元之间的干扰作用,如图 1 所示(图 1(a)、图 1(b)来源于文献^[16])。其中,图 1(a)为某区块真实页岩岩心,图 1(b)为局部放大的页岩岩心铸体薄片,图 1(c)为根据图 1(b)细观结构获得的数字化图像(白色代表硅质矿物,灰色代表碳酸盐岩矿物,黑色代表黏土矿物)。

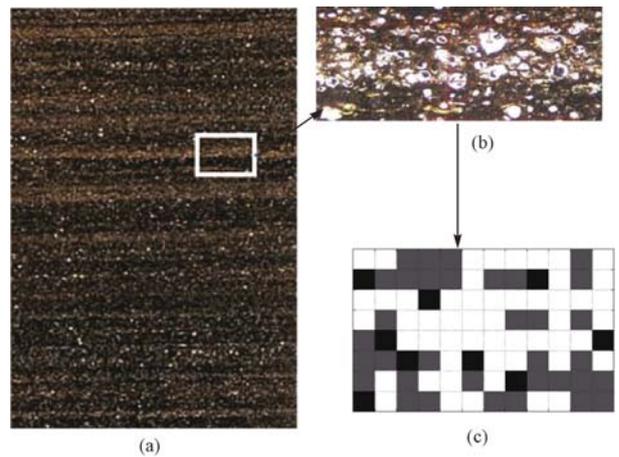


图 1 页岩储层简化模型

Fig. 1 Simplified model of a shale gas reservoir

2.2.2 参数计算

基于矿物分类,分析矿物细观力学性质,得到页岩剪切模量和断裂韧度的计算公式:

$$G = \alpha_1 n_1 G_1 + \alpha_2 n_2 G_2 + \alpha_3 n_3 G_3 \quad (7)$$

$$K_{IC} = \beta_1 n_1 K_{IC_1} + \beta_2 n_2 K_{IC_2} + \beta_3 n_3 K_{IC_3} \quad (8)$$

$$n_1 + n_2 + n_3 = 1 \quad (9)$$

式中: α_1, α_2 和 α_3 为与剪切模量相关的多元回归常数; G_1, G_2 和 G_3 为硅质、碳酸盐岩和黏土矿物的剪切模量, GPa; β_1, β_2 和 β_3 为与断裂韧度相关的多元回归常数; K_{IC_1}, K_{IC_2} 和 K_{IC_3} 为硅质、碳酸岩盐和黏土矿物的断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$; n_1, n_2 和 n_3 分别为硅质、碳酸岩盐和黏土矿物的体积相对含量。

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 和 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 可通过统计实验数据进行拟合获得, 或通过理论分析取值。页岩成层性强, 因此可视作多个具有不同力学性质的层状模型^[17]。取多元回归常数分别为 1 时来表征层状页岩参数的趋势值, 并代入矿物细胞元力学参数^[16-18](见表 3), 则有:

$$G_i = 45.00 n_1 + 38.50 n_2 + 17.65 n_3 \quad (10)$$

$$K_{IC_i} = 0.24 n_1 + 0.79 n_2 + 2.19 n_3 \quad (11)$$

表 3 矿物细胞元参数的值

Table 3 Values of mineral cell parameters

| 矿物分类 | G/GPa | $K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}})$ |
|--------|-------|---|
| 硅质矿物 | 45.00 | 0.24 |
| 碳酸盐岩矿物 | 38.50 | 0.79 |
| 黏土矿物 | 17.65 | 2.19 |

2.2.3 可压性模型

基于归一化准则和调和平均方法, 定义工程甜点可压性评价模型为:

$$F_2 = \frac{2}{\frac{1}{G_n} + \frac{1}{K_{IC_n}}} \quad (12)$$

其中 $G_n = \frac{G_i - G_{\min}}{G_{\max} - G_{\min}} \quad (13)$

$$K_{IC_n} = \frac{K_{IC_{\max}} - K_{IC_1}}{K_{IC_{\max}} - K_{IC_{\min}}} \quad (14)$$

式中: F_2 为工程甜点可压性指数; G_n 为正向归一化的剪切模量趋势值; K_{IC_n} 为反向归一化的断裂韧度趋势值; G_i 为剪切模量趋势值, GPa; G_{\max} 为硅质矿物剪切模量, 取 45 GPa; G_{\min} 为黏土矿物剪切模量, 取 17.65 GP; K_{IC_1} 为断裂韧度趋势值, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$; $K_{IC_{\max}}$ 为黏土矿物断裂韧度, 取 2.19 $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$; $K_{IC_{\min}}$ 为硅质矿物断裂韧度, 取 0.24 $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 。

2.3 综合可压性模型

页岩储层可压性模型应该是反映页岩脆性(可压性)和压裂后产气量(出气性)的综合指标^[7], 综合

地质甜点和工程甜点双重指标, 定义可压性指数:

$$F = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad (15)$$

在确定可压性指数评价下限的时候也应充分考虑地质甜点下限和工程甜点下限双重因素。对于地质甜点指标, 其下限值并没有明确界定。事实上, 地质甜点指标也并非与储层改造指标毫无关系, D. M. Jarvie 等人^[11]提出了气体流量随总有机碳含量、镜质体反射率和矿物脆性指数增加而增加的关系图, 工程甜点指标已有用矿物脆性指数作为评价标准的先例。对于页岩, 其黏土矿物含量对于页岩沉积、成岩和成气均有显著影响, 碳酸盐岩矿物则很大程度上决定了溶蚀孔隙裂缝是否发育, 而硅质矿物则影响储层的脆性, 因此可以通过分析不同矿物的含量来确定可压性下限, 从而将地质甜点指标和工程甜点指标有效结合起来。

根据页岩矿物组分三元端分类, 北美主要页岩气盆地页岩矿物组分含量分布^[19]与中国典型页岩气盆地页岩矿物组分分布进行对比(见图 2)发现,

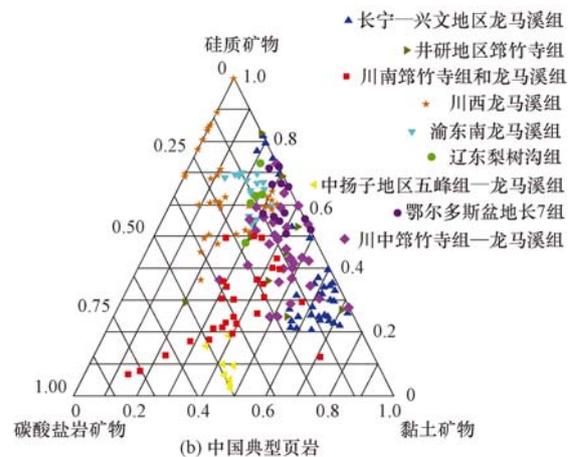
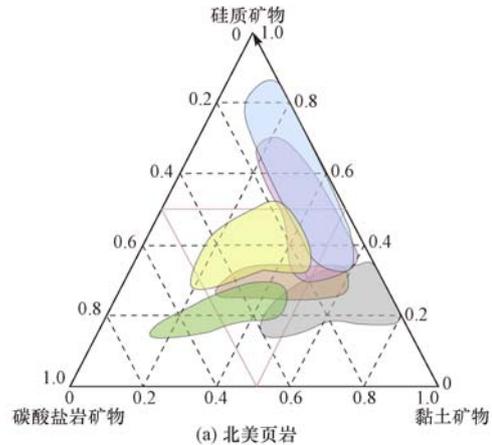


图 2 中美页岩储层矿物组分分类对比

Fig. 2 Comparison of shale reservoir mineral component by classes in China and the United States

有利区的矿物成分分布具有相对一致性,即页岩可压性储层矿物分布范围为:硅质矿物含量 20%~60%,碳酸盐岩矿物含量 10%~30%,黏土矿物含量 30%~50%(见图 2),在此区域内页岩储层可压性最强。

对于黏土矿物,当其含量大于 50%时,为深水陆棚沉积;当其含量小于 30%时,为海陆过渡相沉积;当其含量为 30%~50%时,沉积环境多为浅水陆棚沉积^[20]。深水陆棚沉积储层的吸附气量大却不利于压裂改造;海陆过渡相沉积储层的脆性虽增强,适合压裂改造,但页岩气储层的含气量却大大降低;浅水陆棚沉积储层高岭石不发育,伊/蒙混层矿物含量较高,有利于储藏页岩气,且适合进行储层改造。

对于碳酸盐岩矿物,其含量在 10%~30%时最容易形成高孔裂隙段^[21];当其含量小于 10%时,即使全被溶解,孔隙度也小于 10%;若大于 30%,其溶孔会因缺少支撑物而闭合,从而导致孔隙率降低。

对于硅质矿物,其主要决定储层的脆性程度,理论上其含量越高越好。

综上所述,理论上下限值选取应为反向指标最大值和正向指标最小值的综合,因此黏土矿物含量的最大值取 50%,硅质矿物的最小值取 20%,剩下的即为碳酸盐岩矿物含量(30%),此时计算出的可压性指数的下限值定为 50%。

3 现场试验

利用上文建立的可压性评价模型,对四川盆地威远地区某页岩气井 W 井 2 610.00~2 820.00 m 井段页岩储层的可压性进行评价,并指导该井段的压裂设计与施工。

3.1 计算步骤

1) 利用常规测井曲线分析储层的有利层段,确定含气层段;

2) 通过处理页岩气井测井曲线获得总有机碳含量曲线,由地质评价结果或岩心测试获得镜质体反射率,利用式(3)和式(4)计算出标准化的总有机碳含量和镜质体反射率,再利用式(6)计算出地质甜点可压性评价参数 F_1 ;

3) 由矿物含量曲线(元素俘获测井或荧光录井)分别计算 3 大类矿物的相对含量,利用式(10)和式(11)分别计算出剪切模量和断裂韧度趋势值,再利用式(12)计算工程甜点可压性评价参数 F_2 ;

4) 将利用式(6)和式(12)计算出的参数代入式(15),计算综合可压性指数 F ;

5) 根据可压性评价指数,按照截止值对储层进行划分。

3.2 W 井可压性评价

按照上面的计算步骤对 W 井 2 610.00~2 820.00 m 井段的储层进行了可压性评价,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,该井 2 610.00~2 820.00 m 井段的储层划分如下:1、3、5、7、9、11、13、15 和 17 层(图 3 中第 14 道浅蓝色)为遮挡层;2、4、6、8、10、12、14、16 和 18 层(图 3 中第 15 道粉红色)为可压裂层段。

1、11、15 和 17 层为明显的隔层,2、10、16 和 18 层为明显的可压裂层。3、5 和 7 层遮挡层与 4、6 和 8 层可压裂层相互间隔,其中 4 层实测无含气显示,6 和 8 层虽然有含气显示,但厚度太薄,因此将这些层段统一归为隔层;13 层夹在 12 和 14 层可压裂层之间,推断其为薄夹层,因此与 12 和 14 层统一划分为可压裂层。

综合上述分析,优选出 5 个可压裂层(见图 3)。由于第 II 段储层较厚,约为 30 m,可压性指数为 58.1%,上下均为发育较厚的隔层,因此建议优先开发第 II 段;其次第 III 段厚度约 11 m,可压性指数为 54.8%,上下具有较厚的隔层,也是较为理想的压裂改造层段;第 VI 段和第 V 段储层也是优质的压裂改造层段,但 2 个段间的隔层太薄,压裂改造任何一段都可能存在穿层的风险,是否可将二者进行合层压裂改造有待进一步论证;第 I 段相对较薄,可作为后期压裂改造的备选储层。

将划分结果与用岩石力学参数法和矿物组分参数法(图 3 中第 7 道、第 8 道和第 9 道)进行对比,岩石力学参数法和矿物组分评价法评价 W 井 2 610.00~2 820.00 m 井段均适合进行压裂改造,结合含气性分析后所划出的适合压裂改造的范围也较大,而可压性指数法综合了地质甜点和工程甜点,充分考虑了储层含气性和力学性质,划分出的可压层更细致,且隔层划分也更明显。

3.3 现场施工效果

经过综合论证,选择对 W 井第 II 层段进行加砂压裂改造,且选择在储层下部的 2 690.00~2 700.00 m 井段作为射孔段,射孔密度 16 孔/m,以 60°相位角进行射孔。

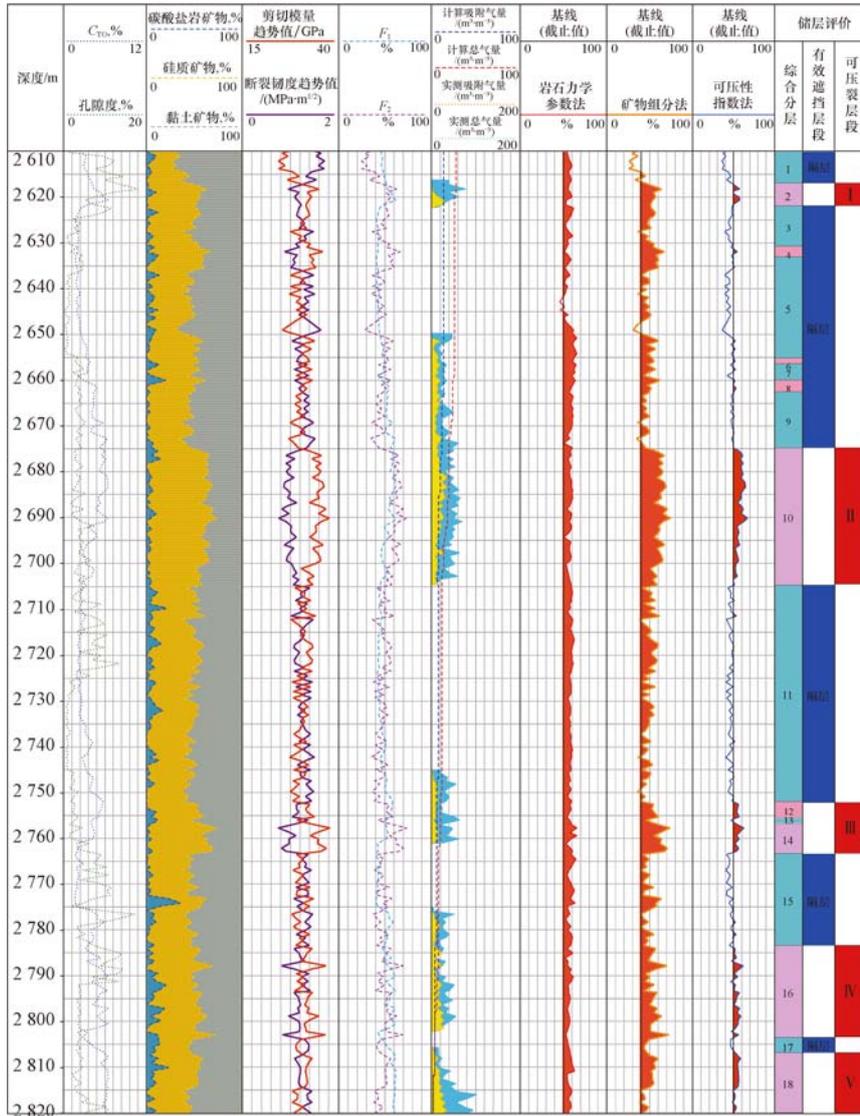


图 3 W 井可压性评价解释结果

Fig. 3 Fracability evaluation interpretation of Well W

施工主要分 2 步进行, 先进行压裂测试施工, 接着是主压裂施工, 2 步工序均采用 $\phi 139.7$ mm 套管注入压裂液。为了避免施工时压力过高, 压裂测试时使用 10 m^3 10% 稀盐酸对储层进行预处理, 以降低储层破裂压力, 压裂测试过程排量 $1\sim 10\text{ m}^3/\text{min}$, 泵压稳定在 $45\sim 55\text{ MPa}$, 共注入 122 m^3 滑溜水; 随后进行主压裂施工, 排量 $9\sim 10\text{ m}^3/\text{min}$, 泵压 $45\sim 55\text{ MPa}$, 共注入 $1\ 602\text{ m}^3$ 滑溜水, 考虑到该井储层的岩性较脆, 因此在段塞式注入 3.75 m^3 100 目石英砂后, 再注入 50.0 m^3 40/70 目低密度陶粒作为支撑剂。整个施工过程中排量稳定, 注液过程中采用旋回加砂技术, 使加砂量保持平稳。

压后监测结果显示, 该井初期产气量不是十分稳定(在 $3\ 000\sim 3\ 500\text{ m}^3/\text{d}$ 间波动)。微地震监测结果显示, 散点在平面上成离散状, 估算改造面积约

为 $4.8\times 10^4\text{ m}^2$, 改造体积约为 $1.2\times 10^6\text{ m}^3$, 再结合压裂液和支撑剂的注入量综合分析, 认为改造效果较好, 产生了较多的裂缝, 有效实现了体积缝网改造, 证实了新方法的有效性。

4 结 论

- 1) 综合考虑地质甜点和工程甜点双重因素, 优选出总有机碳含量、镜质体反射率、剪切模量和断裂韧度作为表征页岩气储层可压性的关键参数。
- 2) 基于页岩气储层含气性和易改造性潜力, 运用标准化、归一化、调和平均和算数平均等方法, 构建了综合地质甜点和工程甜点双重指标的可压性指数模型, 提出了新的页岩气储层可压性评价方法。
- 3) 对比分析中美页岩气储层的矿物含量分布

范围,提出最适合页岩储层改造的矿物含量分布范围为硅质矿物 20%~60%,碳酸盐岩矿物 10%~30%,黏土矿物 30%~50%,并以此为基础确定了可压性评价方法的下限值为 50%。

4) 与传统方法相比,新方法综合考虑了页岩储层的含气性和易改造性,在划分有效压裂层段和遮挡层段时更加准确,且可操作性强,具有一定的工程应用价值。

参 考 文 献

References

[1] 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.

[2] 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.

[3] MULLEN M J, ENDERLIN M B. Fracability index-more than just calculating rock properties[R]. SPE 159755, 2012.

[4] 陈勉,金衍.基于岩心分析的页岩气压裂工艺参数优选[J].石油钻探技术,2012,40(4):7-12.
CHEN Mian, JIN Yan. Shale gas fracturing technology parameters optimization based on core analysis[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 7-12.

[5] 李庆辉,陈勉,金衍,等.页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J].石油钻探技术,2012,40(4):17-22.
LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 17-22.

[6] 郭海莹,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 and Experiment, 2013, 35(3): 339-346.

[7] 蒋廷学,卞晓冰,苏媛,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.

[8] 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.

[9] 胡昌蓬,徐大喜.页岩气储层评价因素研究[J].天然气与石油,2012,30(5):38-42.
HU Changpeng, XU Daxi. Study on shale reservoir evaluation factors[J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(5): 38-42.

[10] 刘双莲,李浩,张元春. TOC 含量对页岩脆性指数影响分析[J].测井技术,2015,39(3):352-356.

LIU Shuanglian, LI Hao, ZHANG Yuanchun. Analysis of TOC content influence on shale brittleness index evaluation[J]. Well Logging Technology, 2015, 39(3): 352-356.

[11] 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.

[12] WANG F P, GALE J F W. Screening criteria for shale gas systems[J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 2009, 59: 779-793.

[13] MERRIMAN R J. Clay minerals and sedimentary basin history[J]. European Journal of Mineralogy, 2005, 17(1): 7-20.

[14] 罗荣,曾亚武,杜欣.非均质岩石材料宏观细观力学参数的关系研究[J].岩土工程学报,2012,34(12):2331-2336.
LUO Rong, ZENG Yawu, DU Xin. Relationship between macroscopic and mesoscopic mechanical parameters of inhomogeneous rock material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2331-2336.

[15] SLATT R M, ABOUSLEIMAN Y. Merging sequence stratigraphy and geomechanics for unconventional gas shales[J]. The Leading Edge, 2011, 30(3): 274-282.

[16] 汪鹏,钟广法.南海 ODP1144 站深海沉积牵引体的岩石物理模型研究[J].地球科学进展,2012,27(3):359-366.
WANG Peng, ZHONG Guangfa. Application of rock physics models to the deep-sea sediment drift at ODP site 1144, Northern South China Sea[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(3): 359-366.

[17] 于庆磊.基于数字图像的岩石类材料破裂过程分析方法研究[D].沈阳:东北大学资源与土木工程学院,2008.
YU Qinglei. Digital image processing-based numerical methods for failure process analysis of rocklike materials[D]. Shenyang: Northeastern University, School of Resources and Civil Engineering, 2008.

[18] 廖东良,肖立志,张元春.基于矿物组分与断裂韧度的页岩地层脆性指数评价模型[J].石油钻探技术,2014,42(4):37-41.
LIAO Dongliang, XIAO Lizhi, ZHANG Yuanchun. Evaluation model for shale brittleness index based on mineral content and fracture toughness[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(4): 37-41.

[19] PASSEY Q R, BOHACS K, ESCH W L, et al. My source rock is now my reservoir-geologic and petrophysical characterization of shale-gas reservoir: the Society for Organic Petrology 28th Annual Meeting, Halifax, Canada, July 31-August 4, 2011[C].

[20] 王秀平,牟传龙,葛祥英,等.四川盆地南部及其周缘龙马溪组黏土矿物研究[J].天然气地球科学,2014,25(11):1781-1794.
WANG Xiuping, MOU Chuanlong, GE Xiangying, et al. Study on clay minerals in the lower Silurian Longmaxi Formation in Southern Sichuan Basin and its periphery[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1781-1794.

[21] 王正普,张荫本.志留系暗色泥质岩中的溶孔[J].天然气工业,1986,6(2):117-119.
WANG Zhengpu, ZHANG Yinben. The dissolution pore in dark argillaceous rock of Silurian[J]. Natural Gas Industry, 1986, 6(2): 117-119.