

Evaluation Method for the Compressibility of Shale Reservoir in the Weiyuan, Sichuan

Liang Kang, Lin Jiang, Haonan Sun, Liting Liu, Yong Tang

BGP Southwest Geophysical Company, CNPC, Chengdu Sichuan
Email: kangl_wt@cnpc.com.cn

Received: Jul. 8th, 2020; accepted: Jul. 22nd, 2020; published: Jul. 29th, 2020

Abstract

The shale reservoir has the characteristics of tight reservoir, low porosity and low permeability. To realize the economic development of shale gas, the stimulation measures of volumetric fracture are needed. The evaluation for the compressibility of shale reservoir has great significance on selecting well sections of fracture, optimizing the fracture parameters and predicting economic benefits. The Weiyuan Shale Gas Demonstration Area in Sichuan is an important area for the development of shale gas. We calculated the effective thickness, effective porosity, total organic carbon content, brittleness index and other parameters of the shale reservoir, and combined with the parameters of fracturing construction process and the results of micro-seismic monitoring to evaluate the compressibility of shale reservoir in Weiyuan, Sichuan, which could provide an important basis for selecting well sections of fracture and optimizing fracturing parameters to improve the effect of fracture.

Keywords

The Weiyuan Shale Gas Demonstration Area, Shale Reservoir, Evaluation for the Compressibility, Brittleness Index

四川威远地区页岩储层可压性评价方法研究

康亮, 蒋琳, 孙皓楠, 刘丽婷, 唐勇

中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司西南物探分公司,
四川 成都
Email: kangl_wt@cnpc.com.cn

收稿日期: 2020年7月8日; 录用日期: 2020年7月22日; 发布日期: 2020年7月29日

摘要

页岩储层具有储层致密、低孔低渗的特征,要实现页岩气的经济开发,需进行体积压裂增产措施,页岩储层的可压性评价对于优选压裂井段、优化压裂参数及预测经济效益具有重要意义。四川威远页岩气示范区是页岩气开发的重要区域,本文通过计算页岩储层有效厚度、有效孔隙度、总有机碳含量、脆性指数等参数,并结合压裂施工工艺参数、微地震监测成果等资料,对四川威远地区龙马溪组页岩储层的可压性进行综合评价,为优选压裂井段、优化压裂参数以提高压裂改造效果提供重要依据。

关键词

威远页岩气示范区,页岩储层,可压性评价,脆性指数

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

页岩储层具有储层致密、低孔低渗的特征,要实现页岩气的经济开发,需进行体积压裂增产措施,因此,页岩储层的可压性评价对于优选压裂井段、优化压裂参数及预测经济效益具有重要意义[1]-[10]。页岩气藏体积压裂在水力压裂过程中,使天然裂缝不断扩张和脆性岩石产生剪切滑移,成天然裂缝与人工裂缝相互交错的裂缝网络,从而增加改造体积,提高气体产量和最终采收率。然而并非所有的储层都能通过大规模的压裂施工实现大范围的体积改造,现有评价方法由于分析因素不够全面,导致评价效果不理想[11]。目前,在页岩储层的可压性评价研究方面,R. Rickman 等[12]采用综合考虑弹性模量、泊松比影响的页岩脆性指数表征页岩储层对压裂改造的响应程度,该方法是页岩可压性评价的普遍思路。但在实际应用中却发现脆性指数高的地层,其压裂改造效果却出现较差的情况,这表明虽然脆性指数对储层可压性的影响较大,但仅从脆性指数角度判断页岩气储层可压性并不全面。袁俊亮等[13]在 R. Rickman 提出的脆性指数[12]基础上,将断裂韧性对裂缝延伸的影响纳入考量,创新性提出了可压性指数的概念。但其存在用脆性指数、断裂韧性对可压性影响的量化表征和物理意义不充分且未经验证等问题。因此本文从页岩储层物性、岩石脆性及天然裂缝等地质特征分析入手,结合页岩储层压裂施工工艺参数、微地震监测成果等资料,对四川威远地区龙马溪组页岩储层进行可压性分析评价,为优选压裂井段、优化压裂参数以提高压裂改造效果提供重要依据。

2. 地质概况

四川盆地龙马溪组是现阶段页岩气开发的主要层系。整体为陆棚相沉积,沉积相带较稳定,分布范围广泛,外陆棚为页岩储层分布的有利相带[14] [15]。威远地区龙马溪组页岩储层埋深主要分布在2000~3000米之间,储层岩性以黑色碳质页岩、黑色页岩、硅质页岩、黑色泥岩、黑色粉砂质泥岩为主,储层厚度一般为20~50m,孔隙度为3.6%~6.3%,储集空间类型较多,孔隙类型包括有机孔、粒间孔、晶间孔、晶内溶孔,裂缝类型分为构造缝、成岩缝、溶蚀缝、生烃缝等[16] [17] [18] [19]。

3. 研究方法 with 评价指标

3.1. 研究方法

依据四川威远页岩气示范区资料的实际情况，由纵横波关系出发，结合密度曲线计算泊松比和杨氏模量，进而得到脆性指数，再利用研究区的常规测井曲线计算泥质含量和孔隙度参数，并结合总有机碳含量进行储层物性、总有机碳含量的评价，再综合天然裂缝等地质特征及压裂施工工艺参数、微地震监测成果等资料，对页岩储层进行可压性综合分析评价，为优选压裂井段、优化压裂参数以提高压裂改造效果提供重要依据，具体技术流程见图 1：

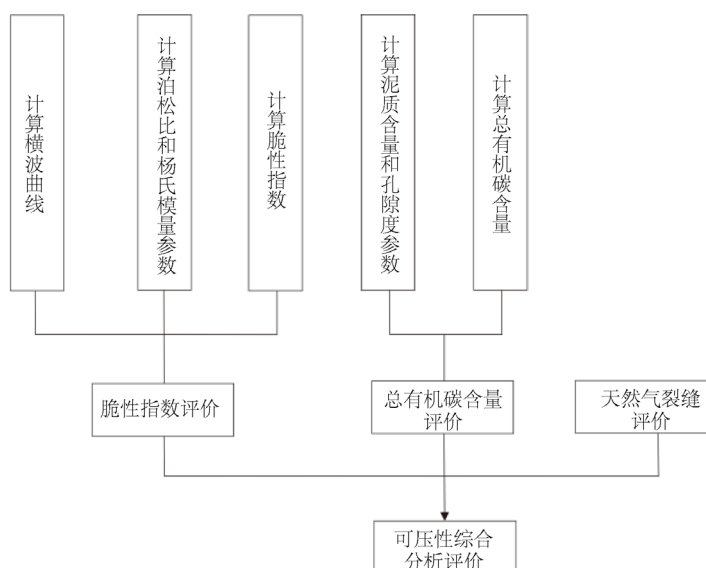


Figure 1. Technology route

图 1. 技术路线图

3.2. 评价指标

3.2.1. 横波曲线的计算

在计算杨氏模量及泊松比参数中，需要地层的横波资料，但是常规测井中并没有直接的横波资料，只能通过纵波与横波资料的关系转换得到[20] [21] [22] [23]。利用研究区块已知的两口井的横波速度资料，得到了研究区其他井横波的计算公式[20] [21] [22] [23]为

$$SDT = 1.3618 * DT + 83.409 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.9534 \quad (2)$$

其中 SDT 为横波时差($\mu\text{s}/\text{m}$)； DT 为纵波时差($\mu\text{s}/\text{m}$)。运用拟合公式计算了研究井区其它井的横波曲线，应用 N1 井横波曲线进行验证，相对误差为 2.6%，计算结果可靠。

3.2.2. 泊松比和杨氏模量参数的计算

通过上述计算得到了横波和纵波数据，结合密度曲线可以计算泊松比和杨氏模量两个弹性参数。采用经验公式，计算泊松比(μ)公式[12]：

$$\mu = \frac{0.5\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \quad (3)$$

其中 Δt_s 为横波时差($\mu\text{s}/\text{ft}$); Δt_p 为纵波时差($\mu\text{s}/\text{ft}$)。

计算杨氏模量(E)公式:

$$E = \frac{\rho(3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2)}{\Delta t_s^2(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)} \quad (4)$$

其中 Δt_s 为横波时差($\mu\text{s}/\text{m}$); Δt_p 为纵波时差($\mu\text{s}/\text{m}$); ρ 为密度(g/cm^3)。

3.2.3. 脆性指数的计算

页岩脆性是影响可压裂性最重要的因素, 页岩脆性的大小对压裂产生的诱导裂缝的形态产生很大的影响。页岩脆性越高, 压裂形成的裂缝网络越复杂, 可压裂性越高[20] [24]。杨氏模量和泊松比是表征页岩脆性的主要岩石力学参数, 杨氏模量越高, 泊松比越低, 脆性越强。脆性大小使用脆性指数定量表示, 计算公式为:

$$YM_BRIT = (YM - YM_MIN / (YM_MAX - YM_MIN)) \times 100 \quad (5)$$

$$PR_BRIT = (PR - PR_MAX / (PR_MIN - PR_MAX)) \times 100 \quad (6)$$

$$BRIT_{avg} = (YM_BRIT + PR_BRIT) / 2 \quad (7)$$

其中, YM 为静态杨氏模量, 10 GPa; PR 为静态泊松比; YM_BRIT 为归一化的杨氏模量; PR_BRIT 为归一化的泊松比; $BRIT_{avg}$ 为脆性指数。

3.2.4. 泥质含量和孔隙度参数的计算

目前用于分析页岩储层矿物组分的测井方法一般为常规测井、元素俘获能谱测井和自然伽马能谱测井等[25]。鉴于研究区块测井曲线只有常规测井曲线, 且通常认为沉积岩的放射性和泥质含量相关, 因此, 泥质含量的计算采用自然伽马曲线计算公式[25]为

$$I_{sh} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (8)$$

$$V_{sh} = \frac{2^{(G_{CUR} \times I_{sh})} - 1}{2^{G_{CUR}} - 1} \quad (9)$$

其中 V_{sh} 为自然伽马曲线计算的泥质含量; I_{sh} 为泥质指数; GR_{max} 为纯泥岩处的自然伽马测井值; GR_{min} 为纯砂岩处的自然伽马测井值; GR 为估算井段自然伽马测井值; G_{CUR} 为计算泥质体积的经验系数, 一般老地层取值 2, 古近系和新近系取值 3.7。

由于泥页岩中含有一定量的有机质, 同时占据矿物骨架体积, 采用张晋言等提出的一种适用于泥页岩的利用密度测井资料进行泥质和 TOC 含量校正的孔隙度计算公式[25]为

$$\varnothing_e = \varnothing_d - \frac{V_{TOC}(\rho_{ma} - \rho_{TOC})}{\rho_{ma} - \rho_f} - \frac{V_{sh}(\rho_{ma} - \rho_{sh})}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (10)$$

其中 V_{TOC} 为有机质体积; V_{sh} 为泥质含量; ρ_{ma} 、 ρ_{TOC} 、 ρ_f 、 ρ_{sh} 分别为骨架、有机质、流体、泥质密度。

3.2.5. 总有机碳含量(TOC)的计算

由于干酪根形成常在放射性元素 U 含量高的还原环境中, 因而总有机碳含量较高的地方其自然伽马曲线会出现高值[10] [26]。比较发现, 研究区块 TOC 和自然伽马测井值之间具有良好的线性关系, 并通过回归计算确定相应系数, 得出使用自然伽马指示法计算 TOC 含量公式[10] [26]为

$$TOC = 0.0367 * GR - 4.3379 \quad (11)$$

$$R^2 = 0.866 \quad (12)$$

4. 结果

4.1. 储层物性、总有机碳含量(TOC)评价

根据四川威远地区部分井资料, 威远志留系龙马溪组储层厚度一般在 20~50 m, 孔隙度一般在 3.6%~6.3%, TOC 含量一般分布在 1.1%~4.3% (表 1)。

Table 1. Statistics table of reservoir thickness, porosity and TOC content of some wells of Longmaxi Formation in Weiyuan area, Sichuan

表 1. 四川威远地区龙马溪组部分井储层厚度、孔隙度、TOC 含量统计表

井名	层位	层号	起始深度(m)	终止深度(m)	厚度(m)	有效孔隙度(%)	总有机碳含量(%)	解释结论
X1	龙 1 段	1	1506	1544	36.7	5.6	3	II 类页岩气层
	龙-2~龙-1	1	2535	2574	37.9	6.3	3.3	II 类页岩气层
X2	五峰	2	2574	2580.6	3.6	5.1	2.9	I 类页岩气层
平均值					41.5	6.2	3.3	

4.2. 脆性指数评价

威远地区井脆性指数计算结果显示, 其脆性指数一般为 30%~80%, 平均脆性指数为 42.5%~65.6%, 处于中高水平, 可压性较高。其中, H1 平台页岩脆性指数一般为 38%~63% (图 2); H2 井页岩脆性指数一般为 32%~64% (图 3); H3 平台页岩脆性指数一般为 37%~68% (图 4); H4 平台页岩脆性指数一般为 38%~80% (图 5), H4 脆性较高。

结合微地震事件分析, 井旁脆性较好区段监测到的微地震事件个数较井旁脆性较差区段多, 事件密度大。叠合微地震事件与龙马溪组优质页岩段脆性指数、裂缝预测切片可以发现, 高脆性指数区域, 微地震事件数较多, 微地震事件分布与脆性指数平面宏观特征一致。

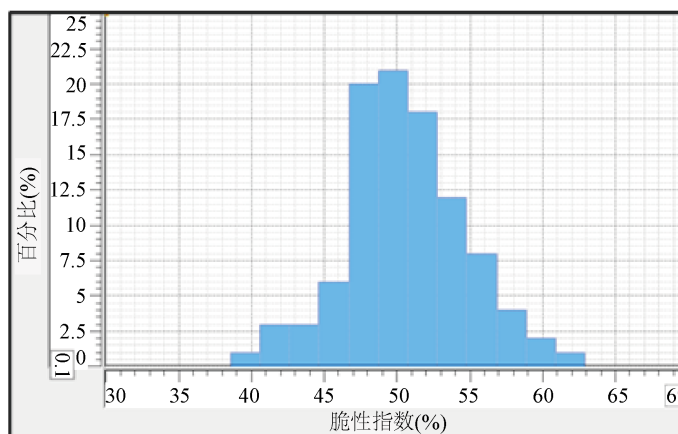


Figure 2. Probability graph of brittleness index of H1

图 2. H1 井脆性指数概率图

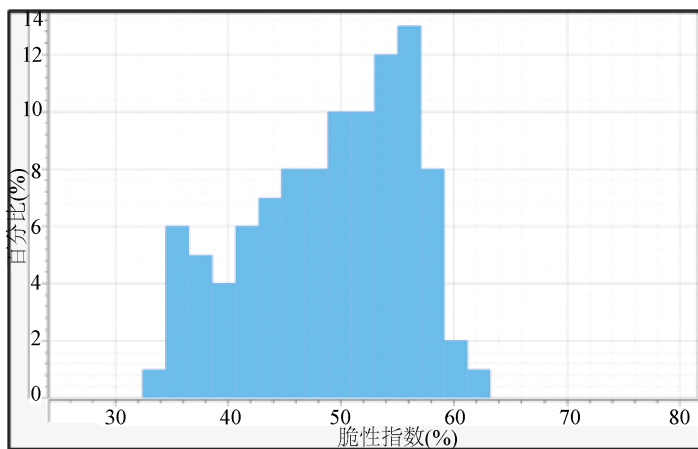


Figure 3. Probability graph of brittleness index of H2
图 3. H2 井脆性指数概率图

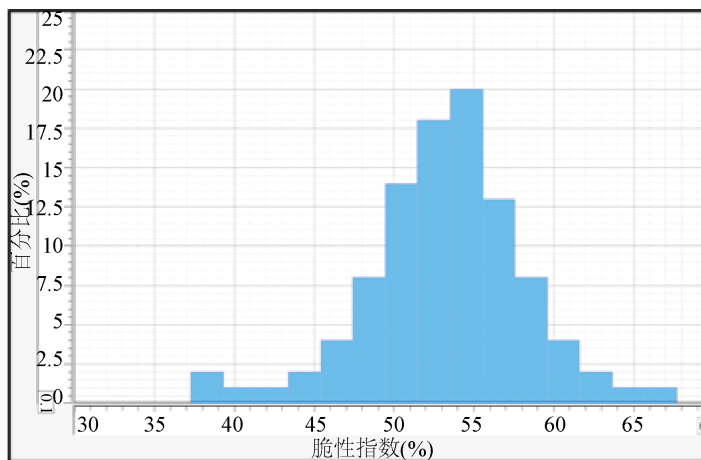


Figure 4. Probability graph of brittleness index of H3
图 4. H3 井脆性指数概率图

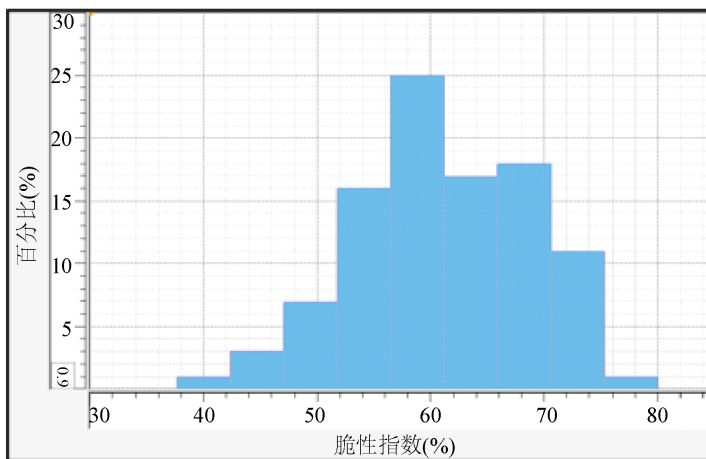


Figure 5. Probability graph of brittleness index of H4
图 5. H4 井脆性指数概率图

4.3. 天然裂缝评价

天然裂缝的存在是地应力不均一的表现,发育区带往往是地层应力薄弱的地带,天然裂缝的存在降低了岩石的抗张强度,并使井筒附近的地应力发生改变,对诱导裂缝的产生和延伸产生影响[27] [28]。一般储层的天然裂缝越发育,可压裂性越高。在压裂过程中,天然裂缝和诱导裂缝也会相互影响。压裂液通过天然裂缝进入储层压裂产生诱导裂缝,诱导裂缝生成又能够引起天然裂缝的张开,从而使压裂液更容易进入页岩储层中,天然裂缝与诱导裂缝一起构成页岩气产出的高速通道。

四川威远页岩气示范区压裂开采结果表明,天然裂缝的存在提高了龙马溪组页岩的可压性。在 X3-2 井第 6 段附近地震属性预测结果显示存在明显的天然裂缝响应带,天然裂缝方向为 80° ,压裂时微地震监测反映,压裂初期微地震事件主要沿天然裂缝方向延展,随着压裂的进行,发育更多近东西向的裂缝,说明诱导裂缝受到天然裂缝的影响,裂缝方向受天然裂缝和诱导裂缝的共同控制(图 6)。

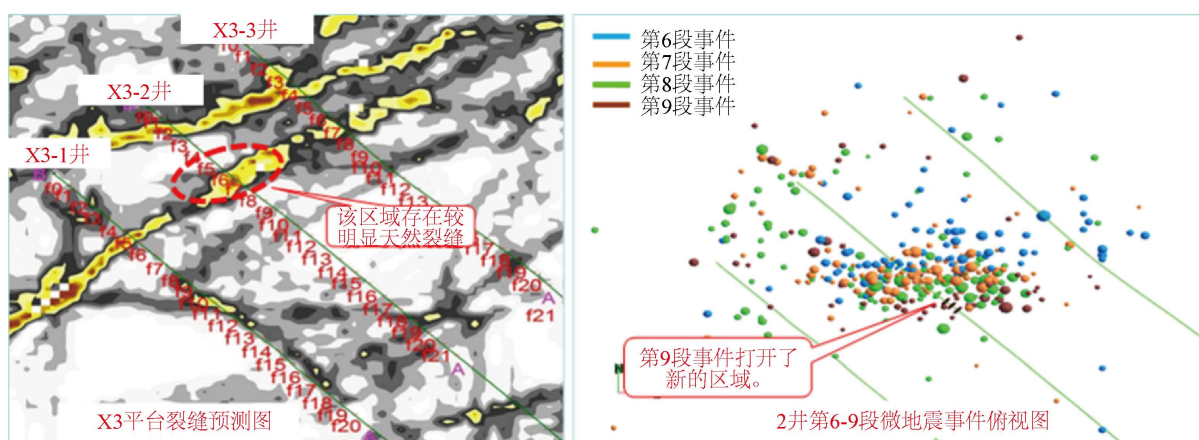


Figure 6. Characteristic analysis diagram of fracturing fractures in the 6th-9th section of well X3-2

图 6. X3-2 井第 6-9 段压裂裂缝特征分析图

4.4. 压裂施工规模、施工排量与改造体积关系分析

据威远地区龙马溪组优质页岩物性参数,设计压裂模型,正演模拟分析得到,在一定的施工排量下,相同射孔方式、数量条件下,随着压裂施工规模加大,液体波及范围增大,但是,增大幅度减小。页岩气在采用水平井开发时,考虑级间距和水平井间距,当施工规模为 2000 方液体,100 方支撑剂,可以满足经济有效开发需求。

施工排量越大越能够提供持续的能量,使水力裂缝和天然裂缝开启和延伸。但是,近井地带产生的裂缝过多,则会消耗过多能量,这样会使井壁不稳定且不能给远井地带裂缝扩展提供能量。因此,需要使用变排量,调整压裂液黏度,控制近井地带的裂缝,使裂缝扩展到远井地带。

压裂施工及微地震监测结果显示,当储层非均质性强时,压裂施工参数、排量、压力及加砂量,段间差异较大;当储层段间差异较小,压裂施工参数变化不大时,微地震监测结果 SRV 体积与压裂施工规模关系不明显[29] (图 7)。

因此,从压裂施工的角度,需要增大有效 SRV,获取较好的改造效果,实现平台产能建设,在设定施工规模和施工排量条件下,采用拉链式作业模式,提高作业效率与返排液环保利用;利用微地震实时监测,现场优化泵注参数,交错布缝,充分利用井间应力干扰增加裂缝复杂程度,可以达到提高压裂改造效果的目的。

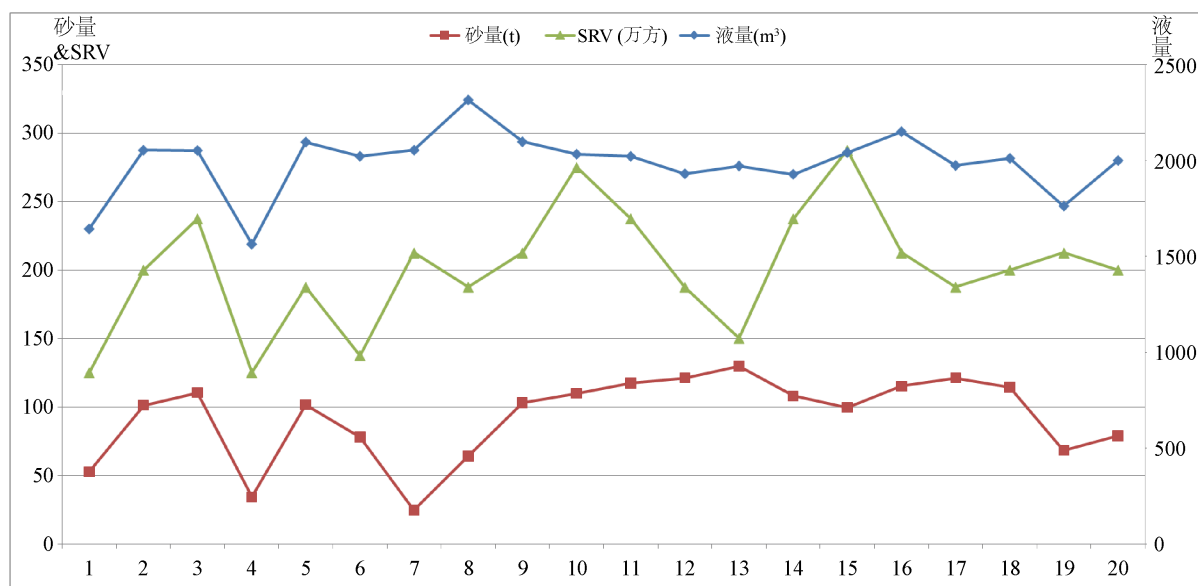


Figure 7. Analysis chart of SRV volume and construction parameters based on the H2 micro-seismic monitoring results
图 7. H2 井微地震监测结果 SRV 体积和施工参数分析图

5. 结论

1) 计算结果显示, 威远地区页岩储层厚度一般为 20~50 m, 孔隙度一般为 3.6%~6.3%, TOC 含量一般为 1.1%~4.3%。此外, 储层脆性指数一般为 30%~80%, 平均脆性指数为 42.5%~65.6%, 处于中高水平, 可压裂性较高。高脆性指数区域, 微地震事件数较多, 微地震事件分布与脆性指数平面宏观特征一致。

2) 研究显示该区存在明显的天然裂缝响应带, 且微地震监测成果反映, 压裂初期微地震事件主要沿天然裂缝方向延展, 随着压裂的进行, 裂缝方向受天然裂缝和诱导裂缝的共同控制。

3) 研究区在设定施工规模和施工排量条件下, 需要增大有效 SRV, 采用拉链式作业模式, 提高作业效率与返排液环保利用。同时利用微地震实时监测, 现场优化泵注参数, 交错布缝, 充分利用井间应力干扰增加裂缝复杂程度, 以达到提高压裂改造效果的目的。

参考文献

- [1] 付永强, 马发明, 曾立新. 页岩气藏储层压裂实验评价关键技术[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 51-54.
- [2] 赵金洲, 许文俊, 李勇明, 胡晋阳, 李晋秦. 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.
- [3] 张辰庆, 许江, 彭守建, 闫发志, 吴斌, 岳雨晴. 考虑断裂韧性影响的页岩气储层可压性评价方法[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 131-137.
- [4] 龙章亮, 温真桃, 李辉, 曾贤薇. 一种基于灰色关联分析的页岩储层可压性评价方法[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(1): 37-42.
- [5] Mohamed, M.I., Salah, M., Coskuner, Y., 等. 评价页岩气储层岩石脆性和可压性的综合方法[J]. 石油科技动态, 2019(11): 32-45.
- [6] 崔春兰, 董振国, 吴德山. 湖南保靖区块龙马溪组岩石力学特征及可压性评价[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(5): 626-634.
- [7] 洪克岩, 朱亮亮, 程晓艳, 姜生玲, 谢伍平, 佟恺林. 湘鄂西构造复杂区页岩气井含气性及可压性评价——以湖北鹤峰区块 HY1 井为例[J]. 断块油气田, 2018, 25(6): 721-725.
- [8] 肖佳林, 李远照, 候振坤, 郭印同, 王磊. 一种页岩储层脆性评价方法[J]. 断块油气田, 2017, 24(4): 486-489.
- [9] 沈骋, 郭兴午, 陈马林, 雍锐, 范宇. 深层页岩气水平井储层压裂改造技术[J]. 天然气工业, 2019, 39(10): 68-75.

- [10] 盛秋红, 李文成. 泥页岩可压性评价方法及其在焦石坝地区的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(4): 1473-1479.
- [11] 王永辉, 卢拥军, 李永平, 等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用[J]. 石油学报, 2012, 32(z1): 149-158.
- [12] Rickman, R., Mullen, M.J., Petre, J.E., *et al.* (2008) A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado, 21-24 September 2008, SPE-115258-MS. <https://doi.org/10.2118/115258-MS>
- [13] 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.
- [14] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551-561.
- [15] 赵迪斐, 郭英海, Geoff Wang, 等. 层序地层格架及其对页岩储层发育特征的影响——以四川盆地龙马溪组页岩为例[J]. 沉积学报, 38(2): 379-396.
- [16] 咎博文, 刘树根, 白志强, 等. 川西南威远地区龙马溪组页岩储层孔隙发育特征及控制因素分析[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2): 65-74.
- [17] 张廷山, 杨洋, 龚其森, 等. 四川盆地南部早古生代海相页岩微观孔隙特征及发育控制因素[J]. 地质学报, 2014, 88(9): 1728-1740.
- [18] 韩超, 吴明昊, 吝文, 等. 川南地区五峰组—龙马溪组黑色页岩储层特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(3): 14-22.
- [19] 蒲泊伶, 董大忠, 吴松涛, 等. 川南地区下古生界海相页岩微观储集空间类型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 19-25.
- [20] 唐颖, 刑云, 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): 26-29.
- [21] 王濡岳, 丁文龙, 王哲, 等. 页岩气储层地球物理测井评价研究现状[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 228-241.
- [22] 蒋廷学, 卞晓冰, 苏瑗, 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): 16-21.
- [23] 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): 947-955.
- [24] 任岩, 曹宏, 姚逢昌, 等. 岩石脆性评价方法进展[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(4): 875-886.
- [25] 石文睿, 冯爱国, 等. 一种描述页岩储层可压性的简易评价方法[J]. 江汉石油职工大学学报, 2018, 31(4): 38-41.
- [26] 张辉, 罗文波. 建南气田页岩储层可压性评价方法研究[J]. 中国西部科技, 2015, 8(14): 31-33.
- [27] 侯冰, 陈勉, 王凯, 等. 页岩储层可压性评价关键指标体系[J]. 石油化工高等学校学报, 2014, 27(6): 42-49.
- [28] 米洪刚, 张茂强, 李浩. 考虑天然裂缝影响的低渗透气藏产能分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(2): 178-184.
- [29] 张山, 刘清林, 赵群, 姜宇东. 微地震监测技术在油田开发中的应用[J]. 石油物探, 2002, 41(2): 226-231.