

引用格式:刘叶轩,刘向君,丁乙,等.考虑隔层影响的页岩油储层可压性评价方法[J].油气藏评价与开发,2023,13(1):74-82.

LIU Yexuan, LIU Xiangjun, DING Yi, et al. Evaluation method of fracability of shale oil reservoir considering influence of interlayer[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 74-82.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.01.008

考虑隔层影响的页岩油储层可压性评价方法

刘叶轩,刘向君,丁乙,周鑫,梁利喜

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610500)

摘要:页岩油储层物性极差,必须通过体积压裂改造形成网状裂缝系统才能实现经济有效开发。而页岩油储层上下均有渗透性更差的隔层,掌握有隔层情况下的储层裂缝扩展规律是页岩油成功压裂的关键。借助岩石破裂损伤分析系统数值模拟软件RFPA,开展了储隔层压裂缝扩展影响因素研究。在考虑了地层非均质的前提下,综合考虑储隔层弹性模量、储隔层泊松比、储隔层单轴抗压强度、储隔层抗拉强度、水平应力差异以及层间应力差这几种影响因素,采用层次分析法进行了页岩油储层可压性评价。结果表明,储隔层的弹性模量和水平地应力差以及储层的单轴抗压强度都与裂缝扩展程度呈负相关性,随着这些参数的增加,裂缝越难扩展。而储层的压拉比和储隔层层间应力差与裂缝扩展程度呈正相关性,即抗拉强度和层间应力差的增大将会有利于加大裂缝扩展的规模,并且较大的层间应力差还会使裂缝穿过隔层,在隔层继续发展;采用模糊数学中的层次分析法建立可压性数学模型,应用于工区已压裂井,预测结果与实验微地震监测结果相符,研究成果可为页岩油压裂改造提供参考。

关键词:页岩油藏;隔层;可压性;数值模拟;层次分析法

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Evaluation method of fracability of shale oil reservoir considering influence of interlayer

LIU Yexuan, LIU Xiangjun, DING Yi, ZHOU Xin, LIANG Lixi

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: The physical properties of shale oil reservoir are extremely poor, so it is necessary to form a network fracture system through volume fracturing to realize economic and effective development. However, there are lower permeability interlayers both in the top and bottom of shale oil reservoirs, so to master the fracture propagation law of reservoir with interlayers is the key for the successful fracturing of shale oil. With the help of the numerical simulation software, RFPA, of the rock fracture damage analysis system, the influencing factors of fracture propagation in the reservoir interlayers are studied. On the premise of considering the heterogeneity of strata, and by the comprehensively consideration of the elastic modulus, Poisson's ratio, uniaxial compressive strength, tensile strength, horizontal stress difference and interlayer stress difference of the reservoir, the fracability of shale oil reservoir is evaluated by the analytic hierarchy process. The results show that the elastic modulus of the reservoir interlayer, the difference of horizontal in-situ stress and the uniaxial compressive strength of the reservoir are negatively correlated with the degree of crack propagation. As these parameters increase, the cracks are more difficult to expand. However, there is a positive correlation between the ratio of tension and compression of reservoir and the stress difference between layers of reservoir and the degree of fracture propagation, that is, the increase of tensile strength and interlayer stress difference will help to increase the scale of fracture propagation, and the larger interlayer stress difference will make the fractures pass through the interlayers and continue to develop in the interlayer. Meanwhile, the mathematical model of the fracability is established by the analytic hierarchy process in fuzzy mathematics, and applied to the fractured wells in the work area. The predicted results are consistent with the experimental microseismic monitoring results, and the research results can provide reference for shale oil fracturing reform.

Keywords: shale reservoir; interlayer; fracability; numerical simulation; analytic hierarchy process

收稿日期:2022-01-14。

第一作者简介:刘叶轩(1996—),男,在读硕士研究生,主要从事石油工程岩石力学方面的研究。地址:四川省成都市新都区新都大道8号,邮政编码:610500。E-mail:18280313301@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目“富有机质硬脆性页岩水化机理基础研究”(41772151)。

中国陆相页岩油资源潜力巨大,页岩油是今后相当长一个时期获取稳定石油和天然气产量的重要领域,将对中国原油自给供应的长期安全形成重大支撑^[1-2]。页岩油属于源内聚集,原位成藏,就地聚集,没有二次运移。所以页岩油储层一般存在生、储、盖这三大部分,并且由于页岩储层低孔、特低渗的特点,所以水平井分段压裂技术是高效开采页岩油的必须手段,可以在井周形成复杂的裂缝网络,扩大油气渗流通道,有效采出赋存于页岩储层中的油气资源。而盖层,即该文中所说的隔层,对裂缝扩展的影响还需做进一步的研究。实现高效压裂改造效果的基础是形成页岩油储层力学参数的精准评价。

关于页岩储层可压性评价,CHONG等^[3]总结了北美页岩区块在过去20年中成功压裂的方法,认为可压裂性是页岩储层具有能够被有效压裂从而增产能力的性质,不同可压裂性的页岩在水力压裂过程中形成不同的裂缝网络,利用页岩脆性指数描述可压裂性为以后的研究提供了思路;GUO等^[4-5]将沉积层理、岩性、矿物分布、弱面方向、地应力场等综合考虑,计算了页岩的可压性系数,但参数获取困难;LIU等^[6-9]将地应力各向异性、天然裂缝方位等信息考虑在内,结合测井、抗压强度等岩石力学参数和岩心分析等数据,综合预测了页岩的可压性系数,但未考虑储层参数;陈朝伟等^[10-12]通过综合弹性参数和矿物组分2种方法提出了一种新的脆性评价方法:弹性参数与矿物成分组合法(EP&MC Method),并实现了单井脆性评价,但未考虑地层因素;袁俊亮等^[13]建立了以杨氏模量、泊松比、单轴抗拉强度3项岩石力学参数为自变量,可压性系数为因变量的可压裂性评价方法,但未研究矿物组分的影响;SU等^[14]提出了一种页岩气可压性综合评价方法,使用6个地质力学参数绘制而成的雷达图,对页岩可压性进行分级,尚不能定量分析;孙建孟等^[15]基于脆性指数和断裂韧性的影响,提出了致密气储层的可压裂性评价模型;赵金洲等^[16]通过综合页岩脆性、断裂韧性和天然弱面3个方面特性,提出了页岩气可压性的评价方法,但未研究岩石力学参数的影响;杨宏伟等^[17-18]提出利用脆性系数、脆性矿物质量分数、断裂韧性、黏土矿物质量分数和TOC(总有机碳含量)实现页岩气可压性定量计算;陈江湛等^[19]构建以脆性系数、岩石矿物含量、黏

聚力、天然裂缝和孔隙度共6个因素的页岩可压裂性评价体系,对牛蹄塘组开展可压裂性评价,但未考虑有机质和地应力差的影响;徐春碧等^[20-22]选定TOC含量、孔隙度及岩石力学参数表征储层的含气性和压裂难易程度,未考虑矿物和地应力差的影响;信诗琪等^[23]在分析岩石力学因素时主要分析了抗张强度和内摩擦角对可压性的影响。研究表明,抗拉强度越小,天然裂缝越发育,可压性越好,而内摩擦角会影响岩石的剪切强度,从而影响天然裂缝的发育,进而影响岩石可压裂性;王小军等^[24-25]综合考虑了脆性指数、地应力差异系数、断裂韧性、层间水平最小主应力之差、层界面抗张强度等因素对断裂韧性的影响,但对页岩气储层的层间应力差获取较困难;宋明水等^[26]采用层次分析和熵值法相结合方法分析了可压裂性的影响因素,以此建立了可压裂性评价模型;崔春兰等^[27-28]采用了一种基于层次分析的致密砂岩储层可压性评价方法。

目前,对可压性的研究主要集中在页岩气储层,但页岩油储层特征与页岩气储层具有明显差异性,直接套用页岩气储层的可压性评价技术不利于指导页岩油储层压裂改造技术。压裂过程中,隔层对储层裂缝扩展具有明显影响。因此,储层可压性与隔层特征密切相关,但目前针对隔层效应影响尚未形成定量表征方法,进而影响了可压性的精准评价。基于此,该文结合力学实验、数值模拟及数理分析方法,构建了具有隔层效应的可压性指数预测模型,为页岩油储层压裂优化设计提供了有力手段,对降低页岩油储层压裂工程成本,提高页岩油产量具有重要意义。

1 页岩油储隔层岩石力学特征研究

针对页岩油岩石力学特征研究主要开展巴西劈裂、三轴压缩实验,得到页岩油岩石力学参数分布范围。图1、图2分别为三轴压缩实验应力应变曲线、巴西劈裂实验载荷位移曲线及实验前后岩样图。

根据20组三轴实验以及16组巴西劈裂实验结果和测井资料统计岩石力学参数结果:储层抗压强度介于89.65~157.64 MPa,储层弹性模量介于12.8~31.3 GPa,储层泊松比介于0.12~0.26,储层抗张强度介于2.03~7.42 MPa,隔层抗压强度介于132.61~224.43 MPa,隔层弹性模量介于30.6~46.5 GPa,隔层泊松比介于0.14~0.35,隔层抗张强度介于10.2~18.2 MPa。

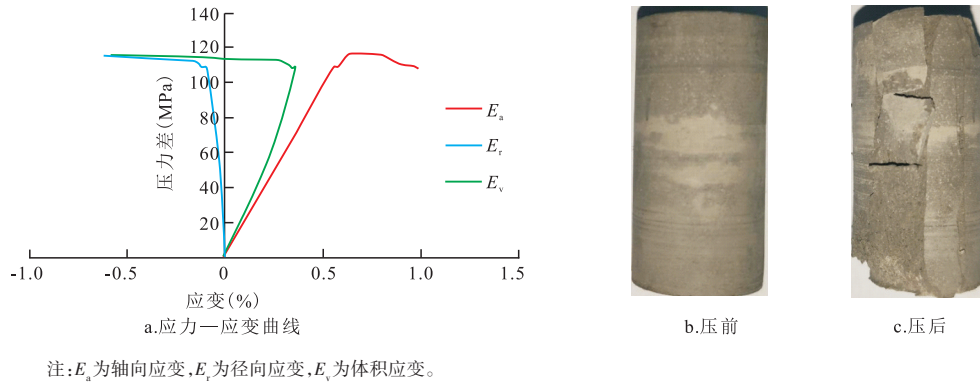


图1 储层岩样三轴压缩应力—应变曲线及实验前后照片

Fig. 1 Triaxial compressive stress-strain curve of rock sample and photos before and after experiment

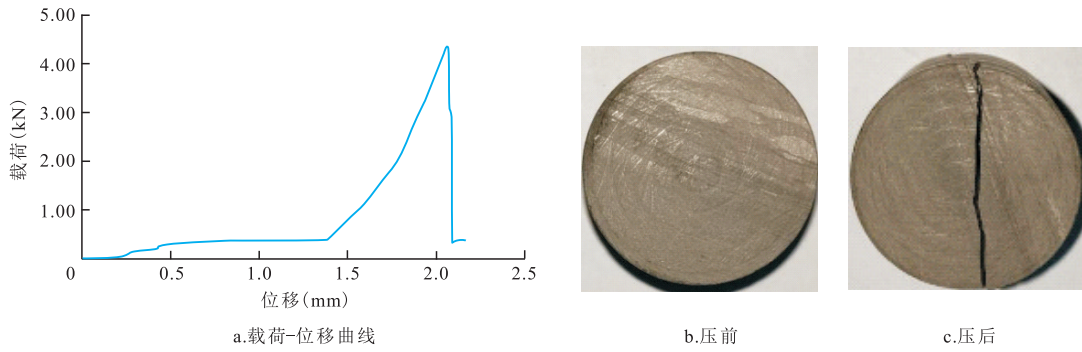


图2 隔层岩样巴西劈裂载荷—位移曲线和前后实验的照片

Fig. 2 Load-displacement curve and photos before and after experiment of Brazilian splitting

可以发现隔层与储层具有明显的力学参数差异性,目前研究均证明隔层的存在对储层压裂缝的扩展具有显著影响。

2 页岩油储层数值模拟研究

由于储层与隔层具有明显差异性,考虑页岩油储层典型的储隔层特征,利用RFA数值模拟软件,分别设置储层与隔层的岩石力学参数(抗压强度、弹性模量、泊松比、脆性系数、抗张强度),同时设置整体模型的地层应力状态(地层压力、垂向地应力及水平地应力),最终构建具有储隔层条件的井筒压裂缝扩展模型,扩展模型如图3所示, σ_v 为垂向主应力, σ_H 为水平最大主应力。

2.1 压裂缝数值模拟

该模型尺寸为2 m×2 m,网格划分为300×300=90 000个细观单元,井眼半径为20 mm。模型边界分

别施加2个主应力:水平最大地应力、垂向地应力。水平地应力 $\sigma_H=75$ MPa,垂向地应力 $\sigma_v=84$ MPa,应力比值1.12,孔隙压力 $p_p=62$ MPa。井筒采用渗流空洞载荷加载方式,在初始液体载荷 $p_0=40$ MPa的基础上以单步增量1 MPa逐步增加。

2.2 灰度化与二值化处理

为了便于量化压裂缝网面积,利用Matlab编程软件对压裂缝扩展图进行灰度值处理与二值化处理,得到压裂缝网面积。灰度值法与二值化法处理过程如图4所示。其中,黑色部分代表压裂缝区域,白色部分代表地层未压开部分(图4c)。基于二值化后的井周压裂缝扩展图,计算压裂缝网无因次面积,如式(1)所示:

$$\begin{cases} S_f = \frac{N_1}{N} \\ N = N_0 + N_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_f 为压裂缝无因次面积; N 为模型面积大小; N_0

为图4c中白色部分(地层未压开面积); N_1 为图4c中黑色部分(压裂缝面积)。

2.3 页岩油可压性影响因素

基于上述数值模拟,认为在同样的井筒压裂条件下,压裂缝无因次面积越大,储层可压性越好。因此,以数值模拟的第70步,也即是井筒压力110 MPa的压裂缝面积为指标,开展页岩油可压性的影响因素分析。

2.3.1 储隔层弹性参数对压裂缝的影响

图5为在相同加载步数下不同储隔层弹性参数

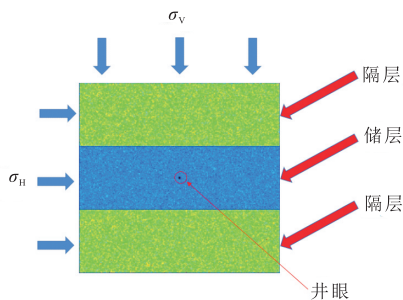


图3 井筒压裂缝扩展模型

Fig. 3 Borehole fracture propagation model

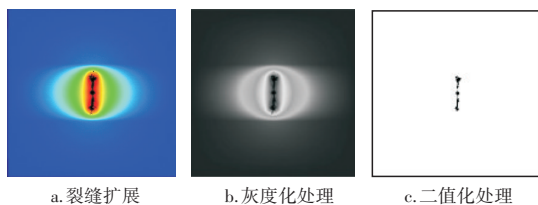
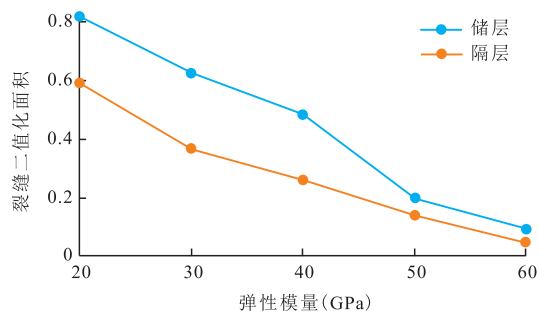


图4 灰度值与二值化方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of gray value and binarization method



a. 储层、隔层弹性模量与裂缝扩展的关系

对裂缝扩展影响的数值模拟结果。随着储层弹性模量的不断增大,在相同荷载的情况下,压裂缝面积也在逐渐减小。隔层强度大小同样会影响到储层裂缝是否能够有效的扩展以及扩展程度。对比储层弹性模量可以看出,和储层弹性模量对裂缝的影响一致,低弹性模量下,裂缝扩展程度越大。可以看出储隔层泊松比对于压裂缝的影响较小,泊松比的增大并没有很明显地影响压裂缝面积的大小。

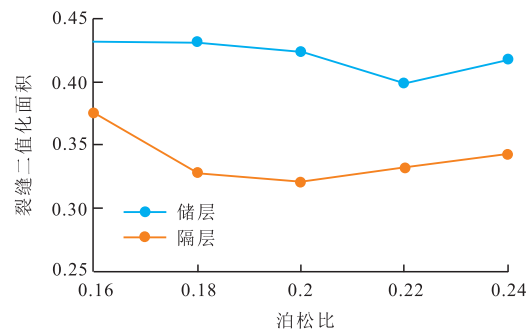
2.3.2 储隔层强度参数对压裂缝的影响

岩石的单轴抗压强度是评价岩石受压后破坏的难易程度,因此,改变模型的单轴抗压强度研究其对裂缝扩展的影响。随着储层单轴抗压强度的不断增加,在相同荷载下,裂缝越难扩展延伸。与储层单轴抗压强度相比,隔层单轴抗压强度对裂缝扩展影响也很显著。从图6中可以看出,改变隔层单轴抗压强度,裂缝面积也有较大变化。

岩石材料的压拉比是一个非常重要的岩石性质参数,抗压不抗拉就是岩石等脆性材料本身的一种固有特性,有学者也研究了不同强度准则下岩石压拉比与内摩擦角之间的关系,显然压拉比对于岩石破坏具有重要的研究意义。从图6中可以看出,随着压拉比的提高,裂缝面积越大,说明随着压拉比的提高,岩石的整体强度逐渐降低。与单轴抗压强度一样,隔层的压拉比相较于储层压拉比影响程度较低。但是和储层压拉比相同,与裂缝面积都是成正相关的关系。

2.3.3 储层水平地应力差对压裂缝的影响

在地层井眼周围存在着应力场,而且地应力状



b. 储层、隔层泊松比与裂缝扩展的关系

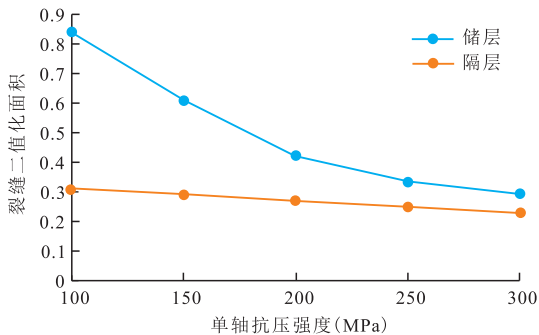
图5 不同储隔层弹性参数对压裂缝的影响

Fig. 5 Influence of different elastic parameter of reservoir interlayer on fracturing

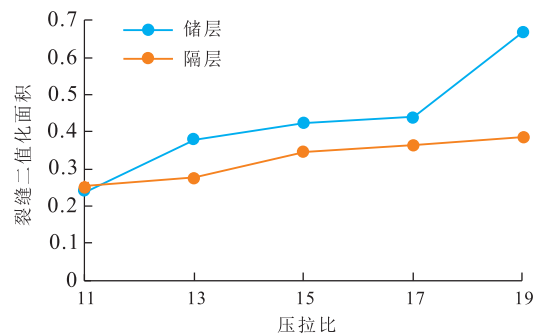
态是控制裂缝延伸的一个很重要的因素,随着应力场的变化,地层的可改造性也会发生相应的改变。从图7中可以看出,随着地应力差增大,压裂缝面积减小,储层可压性减弱。主要原因在于,高应力差条件下,储层压实效应显著,从而导致储层可压性受到限制。

2.3.4 储隔层岩石层间应力差对压裂缝的影响

地层中存在储隔层分层情况下,一般储层和隔层所对应的地层地应力都有所差异,有明显的层间应力差,这种层间的应力差异往往是影响裂缝扩展的关键因素。由图8可知,随着层间应力差的增大,压裂缝面积减小,储层可压性减弱。较大的层间应力差易形成强应力遮挡现象。高地应力对隔层具有明显挤压作用,使得隔层强度增大,且更为致密,从而导致隔层对储层可行的抑制作用增强。



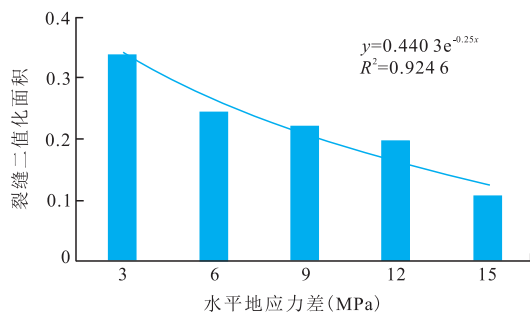
a. 储层、隔层单轴抗压强度与裂缝扩展的关系



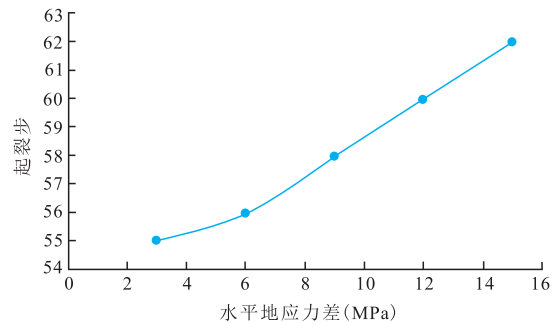
b. 储层、隔层压拉比与裂缝扩展的关系

图6 不同储隔层强度参数对压裂缝的影响

Fig. 6 Influence of different strength parameters of reservoir interlayer on fracturing



a. 水平地应力差与裂缝扩展的关系



b. 水平地应力差与起裂步的关系

图7 不同储层水平地应力差对压裂缝的影响

Fig. 7 Influence of horizontal in-situ stress of different reservoirs on fracturing

3 可压性综合评价方法

基于上述可压性影响因素分析,采用层次分析法确定各类影响因素的重要性。由于各评价参数有各自单位和量纲,需参数标准化后参与运算。该文对各地质力学参数进行无量纲化处理。评价参数分为正、逆向两种指标,为了便于计算,采用极差变化进行参数统一。

对于正向指标,取:

$$S = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

对于负向指标,取:

$$S = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

式中:S为参数标准;X为参数值; X_{\max} 为参数最大值;

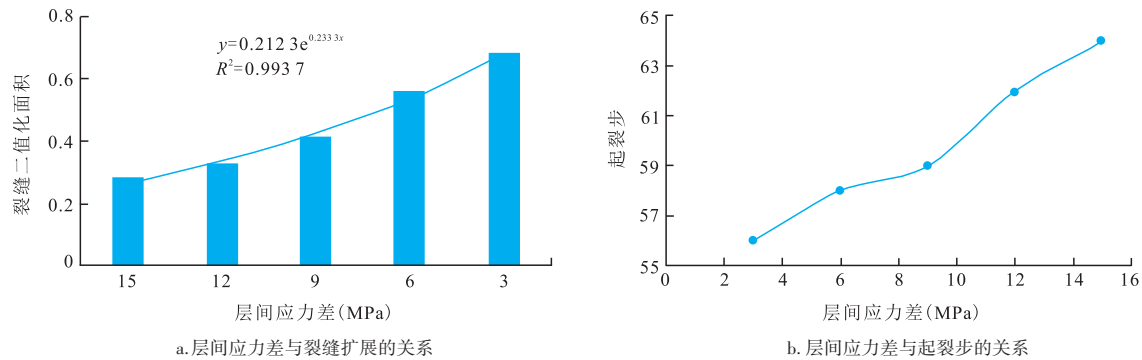


图8 不同层间应力差对压裂缝的影响

Fig. 8 Influence of different interlayer stress difference on compressive fracture

表1 压裂网无因次面积影响幅值

Table 1 Impact amplitude of dimensionless area of fracturing net

储层弹性模量	储层单轴抗压强度	储层压拉比	储层泊松比	隔层弹性模量	隔层单轴抗压强度	隔层压拉比	隔层泊松比	层间应力差	水平地应力差
1.235	0.942	0.425	0.052	0.512	0.294	0.108	0.077	1.474	0.230
负相关	负相关	正相关	负相关	负相关	负相关	正相关	负相关	负相关	负相关

X_{\min} 为参数最小值。

经过极差变换后,指标值均为0~1,正、逆向指标均化为正向指标,最优值为1,最劣值为0。

基于极差变换后的地质力学参数和压裂缝网无因次面积,拟合归一化后的地质力学参数和压裂缝网无因次面积相关性方程,计算各地质力学参数对压裂缝网无因次面积的影响幅值,计算方程如下:

$$R(X_{\text{nor}}) = \frac{S_i(i) - S_i(j)}{X_{\text{nor}}(i) - X_{\text{nor}}(j)} \quad (4)$$

式中: $R(X_{\text{nor}})$ 为归一化后的地质力学参数 X_{nor} 对压裂缝网 S_f 的增幅; $S_i(i)$ 、 $S_i(j)$ 分别为数据点 i 和数据点 j 下的压裂缝网无因次面积 S_f ; $X_{\text{nor}}(i)$ 、 $X_{\text{nor}}(j)$ 分别为数据点 i 和数据点 j 下的地质力学参数。

统计各地质力学参数对压裂网无因次面积的影响幅值,如表1所示。

基于上述分析,采用层次分析法对可压性进行评价。由于储层隔层存在明显的差异性,于是可将上述地质力学参数分为3类:第1类为储层参数(储层弹性模量、储层单轴抗压强度、储层压拉比、储层泊松比);第2类为隔层参数(隔层弹性模量、隔层单轴抗压强度、隔层压拉比、隔层泊松比);第3类为地应力参数(层间应力差、水平地应力差)。

基于文献调研及专业分析^[29-30],将可压性评价参

数进行两两比较,得到判断矩阵,如表2、表3、表4所示。

表2 储层参数判断矩阵

Table 2 Judgment matrix of reservoir parameters

	泊松比	压拉比	单轴抗压强度	弹性模量
泊松比	1	3	5	7
压拉比	1/3	1	3	5
单轴抗压强度	1/5	1/3	1	3
弹性模量	1/7	1/5	1/3	1

表3 隔层参数判断矩阵

Table 3 Judgment matrix of interlayer parameters

	泊松比	压拉比	单轴抗压强度	弹性模量
泊松比	1	2	5	8
压拉比	1/2	1	4	7
单轴抗压强度	1/5	1/4	1	3
弹性模量	1/8	1/7	1/3	1

表4 地应力参数判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of in-situ stress parameters

	水平地应力差	层间应力差
水平地应力	1	8
层间应力差	1/8	1

根据上述重要程度矩阵,认为压裂缝网面积越大,代表可压性越好,分别对3类地质力学参数进行权重系数分配,从而形成可压性模型。

对上述表2、表3、表4矩阵进行特征值计算后,得到各影响参数的权重系数,形成储层系数、隔层系数、地应力系数,如下所示:

$$R = 0.5648E^s + 0.2639\sigma_t^s + 0.1179\sigma_{ct}^s + 0.0533\mu^s \quad (5)$$

$$I = 0.5134E^k + 0.3321\sigma_t^k + 0.1068\sigma_{ct}^k + 0.0477\mu^k \quad (6)$$

$$G = 0.8894\sigma_{sd} + 0.1111\sigma_{ah} \quad (7)$$

式中: R 、 I 、 G 分别为储层系数、隔层系数及地应力系数; E^s 、 σ_t^s 、 σ_{ct}^s 、 μ^s 分别为归一化后的储层的弹性模量、抗压强度、压拉比、泊松比; E^k 、 σ_t^k 、 σ_{ct}^k 、 μ^k 分别为归一化后的隔层的弹性模量、抗压强度、压拉比、泊松比; σ_{sd} 、 σ_{ah} 分别为归一化后的层间应力差、水平地应力差。

由于层次分析法是人们主观判断的表达,需要尽可能减弱甚至剔除主观随意性,使得描述能够尽量客观,因此对判断矩阵进行一致性检验是一项必不可少的工作。

一致性检验的指标为一致性比例 C ,其定义为:

$$C = CI/RI \quad (8)$$

式中: CI 为一致性指标, RI 为平均随机一致性指标。

$$CI = (\lambda_{\max} - n)/(n-1) \quad (9)$$

式中: λ_{\max} 为矩阵的最大特征根。

根据一致性检验的计算,得到3个矩阵的一致性指标,见表5。

表5 一致性指标
Table 5 Consistency index

参数	λ_{\max}	CI	RI	一致性比例	检验标准
储层参数	4.071	0.024	0.890	0.021	< 0.1
隔层参数	4.076	0.026	0.890	0.023	< 0.1
地应力参数	2.000	0	0	0	< 0.1

根据计算3个判断矩阵都是可以接受的,结果是可行的。

基于此,对储层的整体可压性进行评价时,可压性的程度受制于储层参数、隔层参数与地应力参数。因此,综合储层系数、隔层系数以及地应力系数,最终构建页岩油储层可压性评价方法。

$$D = \alpha R + \beta I + \gamma G \quad (10)$$

式中: D 为页岩油可压性指数; α 、 β 、 γ 分别为储层系数、隔层系数、地应力系数对总的可压性系数的影响权重,该权重系数的确定通过各系数所含地质力学参数的影响幅度总和确定,确定方程如下:

$$\alpha = [R(E^s) + R(\sigma_t^s) + R(\sigma_{ct}^s) + R(\mu^s)] / [R(E^s) + R(\sigma_t^s) + R(\sigma_{ct}^s) + R(\mu^s) + R(E^k) + R(\sigma_t^k) + R(\sigma_{ct}^k) + R(\mu^k) + R(\sigma_{sd}) + R(\sigma_{ah})] \quad (11)$$

$$\beta = [R(E^k) + R(\sigma_t^k) + R(\sigma_{ct}^k) + R(\mu^k)] / [R(E^s) + R(\sigma_t^s) + R(\sigma_{ct}^s) + R(\mu^s) + R(E^k) + R(\sigma_t^k) + R(\sigma_{ct}^k) + R(\mu^k) + R(\sigma_{sd}) + R(\sigma_{ah})] \quad (12)$$

$$\gamma = [R(\sigma_{sd}) + R(\sigma_{ah})] / [R(E^s) + R(\sigma_t^s) + R(\sigma_{ct}^s) + R(\mu^s) + R(E^k) + R(\sigma_t^k) + R(\sigma_{ct}^k) + R(\mu^k) + R(\sigma_{sd}) + R(\sigma_{ah})] \quad (13)$$

式中: $R(E^s)$ 、 $R(\sigma_t^s)$ 、 $R(\sigma_{ct}^s)$ 、 $R(\mu^s)$ 为归一化后的储层的弹性模量、抗压强度、压拉比、泊松比对压裂缝网的影响幅值; $R(E^k)$ 、 $R(\sigma_t^k)$ 、 $R(\sigma_{ct}^k)$ 、 $R(\mu^k)$ 为归一化后的隔层的弹性模量、抗压强度、压拉比、泊松比对压裂缝网的影响幅值; $R(\sigma_{sd})$ 、 $R(\sigma_{ah})$ 为归一化后的层间应力差、水平地应力差对压裂缝网的影响幅值。

根据上述方程确定各系数影响权重,建立页岩油可压性数学模型:

$$D = 0.498R + 0.183I + 0.319G \quad (14)$$

根据层次分析法计算的评价参数的权重,对标准化后的J工区4口井进行可压性评价,得到4口井的可压性综合评价结果如表6所示。

根据计算综合分析,在四口井中第二口井的可压性最好,再与现场实际压裂地层微地震监测结果对比,四口井中第二口井微地震监测储层改造体积

表6 可压性综合评价结果
Table 6 Comprehensive evaluation result of fracability

井号	E^s	σ_t^s	σ_{ct}^s	μ^s	E^k	σ_t^k	σ_{ct}^k	μ^k	σ_{sd}	σ_{ah}	D
1	0.589	0.593	0.595	0.483	0.472	0.515	0.533	0.454	0.592	0.543	0.569
2	0.636	0.615	0.587	0.475	0.483	0.521	0.526	0.473	0.623	0.555	0.595
3	0.534	0.553	0.549	0.431	0.425	0.486	0.504	0.417	0.569	0.523	0.529
4	0.495	0.528	0.516	0.405	0.419	0.477	0.512	0.398	0.522	0.504	0.497

大,可压性较高,预测结果与实际监测结果相符(表7)。

表7 现场微地震监测结果与可压性预测结果对比
Table 7 Comparison between in-situ microseismic monitoring results and fracability prediction results

井号	事件数	储层改造体积(10 ⁴ m ³)	可压性指数
1	52	457.65	0.569
2	68	529.40	0.595
3	42	303.50	0.529
4	38	283.05	0.497

4 结论

1) 基于RFPA数值模拟软件,构建了具有储、隔层的压裂缝扩展模型。综合考虑页岩油储层参数、隔层参数、地应力参数这3个可压裂性影响因素,对各影响因素对应的参数标准化后采用层次分析法确定各参数的权重,各参数值与权重的加权确定可压性指数,最终建立了一种具有储、隔层条件下的页岩油可压性评价模型。

2) 隔层效应不改变储层可压性的影响机制,高强度隔层对裂缝扩展具有抑制作用,当隔层弹模增大时,岩石整体弹性增大,井周岩石不易进入塑性及变形破坏阶段。

3) 较大的层间应力差对裂缝扩展具有很强的遮挡作用,导致岩石可压性减弱。而地应力差的增大,会使岩石压实效应增大,裂缝扩展更困难。

4) 该方法能全面、有效地评价存在隔层遮挡影响的储层可压性,对于页岩油压裂选层具有一定的参考价值。

参考文献

[1] EIA. Annual energy outlook 2017: With projections to 2050[R]. Washington D.C.: U.S. Energy Information Administration, 2017.

[2] 黎茂稳,孙川翔,张海霞.我国陆相页岩油前景可期[J].中国石油石化,2017(20): 38-39.
LI Maowen, SUN Chuanxiang, ZHANG Haixia. Prospect of continental shale oil in China[J]. Petrochemicals of China, 2017 (20): 38-39.

[3] CHONG K, K, GRIESSR W V, PASSMAN A, et al. A completions guide book to shale-play development: A review of successful approaches towards shale-play stimulation in the last two decades[C]// Paper SPE-133874-MS presented at the Canadian Unconventional Resources and International

Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, October 2010.

[4] 郭长永,李雅飞,于会永,等.砂砾岩储层重复射孔工艺优化[J].石油机械,2020,48(9): 51-58.
GUO Changyong, LI Yafei, YU Huiyong, et al. Optimization of repeated perforation technology for glutenite reservoirs[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(9): 51-58.

[5] MIKE M, MILT E. Fracability index—more than just calculating rock properties[C]// Paper SPE-159755-MS presented at the SPE Annual Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 2012.

[6] 刘海龙,张磊,谢涛,等.脆性泥页岩椭圆形井眼坍塌规律分析[J].石油机械,2020,48(5): 28-33.
LIU Hailong, ZHANG Lei, XIE Tao, et al. Analysis of the collapse law of elliptical brittle mud shale boreholes[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(5): 28-33.

[7] 谢建勇,袁珍珠,代兵,等.页岩油储层层理缝渗吸机制和渗吸模式[J].特种油气藏,2021,28(5): 161-167.
XIE Jianyong, YUAN Zhenzhu, DAI Bing, et al. Imbibition mechanism and model of bedding fractures in shale oil reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(5): 161-167.

[8] 范玉光,田中兰,马喜伟,等.页岩气水平井井眼清洁评价研究[J].石油机械,2021,49(3): 9-14.
FAN Yuguang, TIAN Zhonglan, MA Xiwei, et al. Study on hole cleaning evaluation for shale gas horizontal wells[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(3): 9-14.

[9] ENDERLIN M B, ALSLEBEN H, BEYER J. Predicting fracability in shale reservoirs[C]// Paper presented at the 2011 AAPG Hedberg Conference, Austin, Texas, December 2010.

[10] 陈朝伟,房超,朱勇,等.四川页岩气井套管变形特征及受力模式[J].石油机械,2020,48(2): 126-134.
CHEN Zhaowei, FANG Chao, ZHU Yong, et al. Deformation characteristics and stress modes of casings for shale gas wells in sichuan[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(2): 126-134.

[11] 宁凡,邹姐姐,张大权,等.黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩特征研究[J].特种油气藏,2020,27(1): 62-67.
NING Fan, ZOU Niuniu, ZHANG Daquan, et al. Shale characterization of the lower cambrian niutitang formation in northern guizhou[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27 (1): 62-67.

[12] 刁海燕.泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J].岩石学报,2013,29(9): 3300-3306.
DIAO Haiyan. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir[J]. Journal of rock, 2013, 29(9): 3300-3306.

[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.
YUAN Junliang, DENG Jingen, ZHANG Dingyu, et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 523-527.

[14] SU K, ONAISI A, GARNIER A. A comprehensive methodology of e-valuation of the fracability of a shale gas play[C]// Paper presented at the Unconventional Resources Technology Conference, Denver, Colorado, August 2014.

[15] 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.
- [16] 赵金洲, 许文俊, 李勇明, 等. 页岩气可压性评价新方法[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(6): 1672-1172.
- 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): 1672-1172.
- [17] 杨宏伟, 李军, 柳贡慧, 等. 基于测井数据的页岩可压性定量评价[J]. 断块油气田, 2017, 24(3): 382-386.
- YANG Hongwei, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Quantitative evaluation of shale fracability based on logging data[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(3): 382-386.
- [18] 孙翰文, 费繁旭, 高阳, 等. 吉木萨尔陆相页岩水平井压裂后产量影响因素分析[J]. 特种油气藏, 2020, 27(2): 108-114.
- SUN Hanwen, FEI Fanxu, GAO Yang, et al. Production sensitivity analysis of fractured horizontal wells in jimusar continental shale[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(2): 108-114.
- [19] 陈江湛, 曹函, 孙平贺. 湘西北牛蹄塘组页岩可压裂性评价[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 390-398.
- CHEN Jiangzhan, CAO Han, SUN Pinghe. Fracability evaluation of shale in the Niutitang Formation in northwestern Hunan[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(6): 390-398.
- [20] 万远飞, 秦启荣, 范宇, 等. 长宁背斜龙马溪组页岩裂缝发育特征及期次解析[J]. 特种油气藏, 2021, 28(1): 59-66.
- WAN Yuanfei, QIN Qirong, FAN Yu, et al. Development characteristics of shale fractures in Longmaxi Formation of Changning anticline and the stage analysis[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(1): 59-66.
- [21] 范明涛, 李社坤, 李军, 等. 深层页岩气水泥环界面密封失效机理研究[J]. 石油机械, 2021, 49(1): 53-57.
- FAN Mingtao, LI Shekun, LI Jun, et al. Study on the sealing failure mechanism of cement sheath interface in deep shale gas wells[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(1): 53-57.
- [22] 徐春碧, 肖晖, 杨德普, 等. 利用综合甜点度对YDN地区龙马溪组页岩储层进行可压性评价[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2017, 19(6): 1-4.
- XU Chunbi, XIAO Hui, YANG Depu, et al. Compressibility evaluation of Longmaxi shale reservoir in YDN area based on comprehensive dessert index[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology, 2017, 19(6): 1-4.
- [23] 信诗琪. 致密砂岩储层可压性评价及应用[D]. 北京: 中国石油大学, 2018.
- XIN Shiqi. Fracability evaluation and tight sandstone and its application[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018.
- [24] 王小军, 梁利喜, 赵龙, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组含油页岩岩石力学特性及可压裂性评价[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 661-668.
- WANG Xiaojun, LIANG Lixi, ZHAO Long, et al. Rock mechanics and fracability evaluation of the lucaogou formation Oil shales in Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 661-668.
- [25] 董岩, 徐东升, 钱根葆, 等. 吉木萨尔页岩油“甜点”预测方法[J]. 特种油气藏, 2020, 27(3): 54-59.
- DONG Yan, XU Dongsheng, QIAN Genbao, et al. Shale oil “sweet-spot” prediction in Jimusar Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 54-59.
- [26] 宋明水, 刘振, 张学才, 等. 基于改进层次熵分析法的致密砂岩储层可压性评价——以准噶尔盆地Z109井侏罗系储层为例[J]. 地质力学学报, 2019, 25(4): 509-517.
- SONG Mingshui, LIU Zhen, ZHANG Xuecai, et al. Fracability evaluation of tight sandstone reservoir based on improved entropy analytic hierarchy process: Taking the jurassic reservoirs of well Z109 in the junggar basin as an example[J]. Journal of geomechanics, 2019, 25(4): 509-517.
- [27] 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.
- CUI Chunlan, DONG Zhenguo, WU Deshan. Rock mechanics study and fracability evaluation for Longmaxi Formation of Baojing block in Hunan Province[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(5): 626-634.
- [28] 张冲, 夏富国, 夏玉琴, 等. 基于层次分析法的致密砂岩储层可压性综合评价[J]. 钻采工艺, 2021, 44(1): 61-64.
- ZHANG Chong, XIA Fuguo, XIA Yuqin, et al. Comprehensive evaluation of fracability of tight sandstone reservoirs based on analytic hierarchy process[J]. Drilling and Production Technology, 2021, 44(1): 61-64.
- [29] 王汉青, 陈军斌, 张杰, 等. 基于权重分配的页岩气储层可压性评价新方法[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(3): 88-94.
- WANG Hanqing, CHEN Junbin, ZHANG Jie, et al. A new method of fracability evaluation of shale gas reservoir based on weight allocation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(3): 88-94.
- [30] 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.
- HOU Bing, CHEN Mian, WANG Kai, et al. The key index system of fracability evaluation in gas shale reservoir[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2014, 27(6): 42-49.

(编辑 常燕)

更正:

1. 2020年第三期第51页正文第一段中“探明地质储量 12.67×10^4 t, 控制储量 3.02×10^4 t。其中, 未动用探明储量 3.72×10^4 t”更正为“探明地质储量 12.67×10^8 t, 控制储量 3.02×10^8 t。其中, 未动用探明储量 3.72×10^8 t”。

2. 2022年第6期封二专家简介专家姓名“张召锋”更正为“张召峰”。

3. 2022年第6期英文总目录年份更正为“2022”。

4. 2022年第6期序的专家简介中“地热届”更正为“地热界”。