

松南盆地情字外前缘砂页交互储层可压性评价

陈凯, 段永伟, 于雪盟, 刘洪霞, 王翠翠, 朱旭

中国石油吉林油田公司油气工艺研究院 吉林松原 138000

通讯作者: Email: 18242364125@163.com

项目支持: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“吉林水平井体积改造技术提升攻关与现场试验”(2022ZS0604)

引用: 陈凯, 段永伟, 于雪盟, 等. 松南盆地情字外前缘砂页交互储层可压性评价[J]. 油气井测试, 2024, 33(4): 66-72.

Cite: CHEN Kai, DUAN Yongwei, YU Xuemeng, et al. Fracturability evaluation on sand-shale interbedded reservoir at forefront of Qingzi margin in Songnan basin [J]. Well Testing, 2024, 33(4): 66-72.

摘要 松南盆地情字外前缘砂页交互储层资源储量丰富, 但储层孔渗较低, 资源禀赋差, 在采取改造措施前需要对其进行有效的可压性评价。通过对该区的岩心进行X射线衍射、三轴应力压缩等实验, 以脆性系数、水平地应力差异系数、断裂韧性以及脆性矿物含量四种影响因素为基础, 采用层次分析法确定各因素所占权重, 构建了与储层具有较好匹配程度的可压性指数计算模型, 综合波速各向异性分析、应力敏感性评价等实验结果, 对储层的可压性进行综合评价。结果显示, 情字外前缘砂页交互储层可压性指数计算结果为0.28, 可压性中等, 但水平层理及天然裂缝较为发育, 目标层整体具有较大的改造潜力。应用该方法对H2-1井开展可压性评价, 并根据评价结果对压裂方案进行优化, 优化后微地震解释有效改造体积 $491.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、平均日产油 9 m^3 , 应用效果显著, 研究成果可为压裂施工技术路线的确定提供理论支撑。

关键词 松南盆地; 砂页交互储层; 矿物特征; 力学特征; 波速各向异性; 应力敏感性; 可压性评价; 压裂优化**中图分类号**: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.04.011

Fracturability evaluation on sand-shale interbedded reservoir at forefront of Qingzi margin in Songnan basin

CHEN Kai, DUAN Yongwei, YU Xuemeng, LIU Hongxia, WANG Cuicui, ZHU Xu

Oil and Gas Technology Research Institute of Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin 138000, China

Abstract: The sand-shale interbedded reservoir at the forefront of the Qingzi margin in the Songnan Basin is rich in hydrocarbon resources but characterized by low porosity and permeability, indicating poor resource quality. An effective evaluation of its fracturability is necessary before implementing any stimulation measures. Through core analysis, including X-ray diffraction and triaxial stress compression experiments, four key factors—brittleness coefficient, horizontal stress differential coefficient, fracture toughness, and brittle mineral content—were investigated. By using analytic hierarchy process, the weights to these factors were determined, and a fracturability index model that aligns well with the reservoir characteristics was established. Integrating results from wave velocity anisotropy analysis and stress sensitivity evaluation, a comprehensive fracturability evaluation on the reservoir was performed. The results indicate that the fracturability index of the sand-shale interbedded reservoir at the Qingzi margin is 0.28, signifying moderate fracturability. Despite this, the well-developed horizontal bedding and natural fractures suggest significant stimulation potential for the target layer. The methodology was applied to well H2-1 for fracturability evaluation, and the results were used to optimize the fracturing plan. After optimization, the micro-seismic interpretation of the well showed an effective stimulation volume of $491.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ and an average daily oil production of 9 m^3 , demonstrating remarkable application effectiveness. The research outcomes provide a theoretical support in determining the technology route for fracturing operation.

Keywords: Songnan Basin; sand-shale interbedded reservoir; mineral characteristic; mechanical property; wave velocity anisotropy; stress sensitivity; fracturability evaluation; fracturing optimization

页岩油作为非常规油气的重要组成部分之一, 其储层物性较差, 地质特征多表现为低孔低渗, 非均质性强, 开发难度大^[1], 页岩油的有效开发需对

储层采取相应改造措施, 而储层可压性评价是储层改造前的重要技术组成部分^[2], 对储层压裂层段优选、压裂设计优化等具有重要意义^[3]。熊健等^[4]采

用灰色关联方法,针对陆相页岩油储层开展了地质力学参数对压后效果影响的相关研究,研究认为地应力、杨氏模量等岩石力学参数对储层压后效果具有重要影响。崔春兰等^[5]针对页岩气储层建立了可压性评价模型,模型在考虑地质力学参数基础上,同时考虑了储层岩石矿物组成对储层可压性的影响,研究认为有机质丰富、高脆性矿物含量储层具有更有利的改造条件。田晓东等^[6]基于储层岩石物理实验,应用层次分析法对孔隙度、岩石矿物组成等储层储集品质、弹性模量、断裂韧性等储层工程品质开展了中深层储层的可压性综合分析,研究结果显示两者共同影响储层可压性。窦亮彬等^[7]在页岩储层可压性评价研究建立的新模型,认为地质力学参数、围压、断裂韧性等参数对于裂缝起裂、缝网形成、改造范围具有重要影响。

通过调研分析可知,目前对于页岩油储层可压性评价研究较多,各评价方法中考虑因素多样,但存在可压性评价模型大多基于储层岩石力学性质及矿物组成,未考虑页岩储层层理、天然裂缝对储层可压性的影响。针对上述问题本文通过综合分析包含杨氏模量、泊松比、断裂韧性、地应力、脆性矿物含量等多方面因素可压性指数,层理弱面以及天然裂缝三方面对情字外前缘砂页交互储层的可压性进行整体评价,为该区压裂措施的选取、形成裂缝的能力形成理论指导与技术支持。

1 储层地质特征

情字外前缘砂页交互储层位于松辽盆地南部中央拗陷区,主力含油层系为青山口组青一、青二段砂页交互层,有利含油面积 1 300 km²,砂岩储层资源 1.7×10⁸ t,页岩储层资源 18.3×10⁸ t,开发潜力巨大。但根据岩心实验分析结果显示,青一段的平均孔隙度为 7.82%、渗透率为 0.86 mD,青二段的平均孔隙度为 4.59%、平均渗透率为 0.089 mD,孔隙结构分布不均,孔隙细小且无机孔隙发育,岩心敏感性较强,原油产出难度高,需采取压裂措施方可实现效益开发。

压前为开展松南盆地情字外前缘砂页交互储层可压性评价的研究,需要对储层的矿物组成、地应力、弹性参数等岩石力学特征参数进行精细描述,同时对储层层理发育情况、天然微裂缝发育程度等指标进行分析,综合多因素对储层可压性进行评价,进而为压裂方式选择及压裂方案制定等实际

工程问题提供指导。

1.1 矿物特征

储层岩石的矿物组成,尤其是脆性矿物的含量对于储层脆性以及压后是否容易产生诱导裂缝具有重要影响作用^[8],情字外前缘砂页交互储层矿物成分以富粘土硅质页岩为主,粘土含量高,粘土与有机质在空间上的关系复杂,发育大量无机孔隙,有机孔不发育,粘土矿物主要以伊利石、伊蒙混层为主,该区域储层岩心 X 射线衍射矿物组分分析结果如图 1 所示。可以看出储层岩心呈现高粘土含量、低孔低渗的特征,不利于开采,资源禀赋较差。

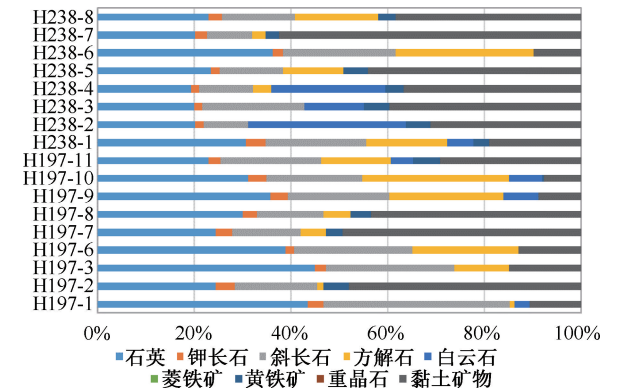


图 1 岩心 X 射线衍射矿物组分分析
Fig. 1 Analysis of mineral composition by core X-ray diffraction

1.2 岩石力学特征

地应力、杨氏模量、泊松比等储层岩石力学参数对于裂缝的起裂及延伸方向、裂缝的高度、裂缝宽度等参数具有重要影响,分析目标储层各岩石力学参数是储层可压性评价的重点内容。

1.2.1 地应力分析

储层水平应力差与层间应力差对于压后人工裂缝类型以及裂缝走向具有重要影响,根据核磁共振以及正交偶极声波测井资料分析计算,得到的储层应力解释结果如表 1 所示。

表 1 储层应力解释结果
Table 1 Reservoir stress interpretation results

井号	井段/m	垂深/m	σ_h /MPa	σ_H /MPa	σ_V /MPa
H197	2 515.0~2 558.0	2 557.00	52.31	53.31	62.65
		2 536.00	52.91	57.49	62.13
		2 515.50	47.55	50.34	61.63
H258	2 391.0~2 463.1	2 459.10	41.32	43.62	56.80
		2 447.50	42.43	43.97	56.53
		2 436.90	43.47	44.46	56.29
		2 409.25	42.82	46.17	55.65

1.2.2 静态力学参数分析

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。页岩杨氏模量越高,泊松比越低,页岩脆性越强^[9]。情字外前缘砂页交互储层静态岩石力学数据显示储层整体表现为脆性,部分深度储层出现一定的塑性,各油层间非均质性较强,储层杨氏模量在 20.9~32.86 GPa 之间,平均 27.95 GPa,泊松比在 0.171~0.258 之间,平均 0.217,抗压强度在 225.98~384.71 MPa 之间,平均 293.01 MPa。

该区页岩抗压强度较低,杨氏模量较低,泊松比较高,相较四川盆地页岩及长庆致密油,脆性较差,该区岩心三轴岩石压缩部分实验结果如图 2 所示。从图中可以看出实验结果显示 H258 井整体上的应力-应变曲线表现出脆性,并且随围压和深度变化不大。

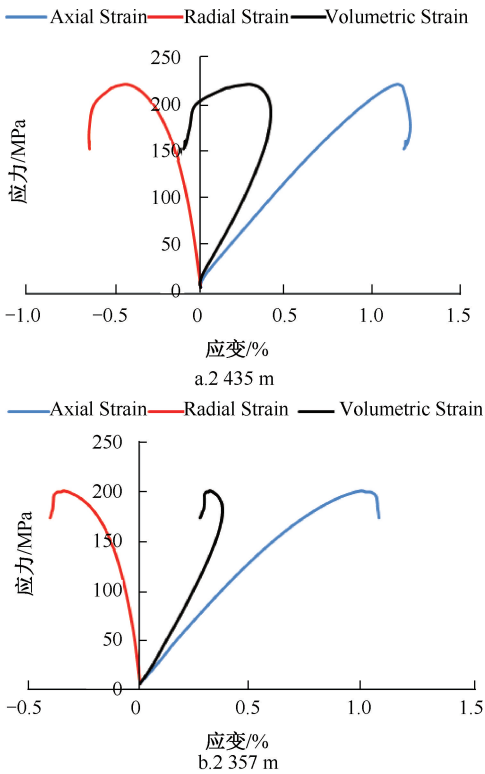


图 2 岩心三轴压缩应力-应变实验曲线(35 MPa、2 435/2 357 m)

Fig. 2 Stress-strain curve of core under triaxial compression(35 MPa、2 435/2 357 m)

1.3 波速各向异性评价

矿物颗粒在沉积压实过程中的择优取向会对沉积岩强度、杨氏模量、渗透率及波速等各向异性特征产生明显影响,其中岩石波速各向异性变化规律取决于层理面方向^[10],反之层理面的分布直接影响岩石的声学特性^[11],因此通过分析岩石的波速各向异性可以对储层的层理发育进行客观反映。

情字外前缘砂页交互储层 H258 井岩心波速各向异性实验结果如图 3 所示。

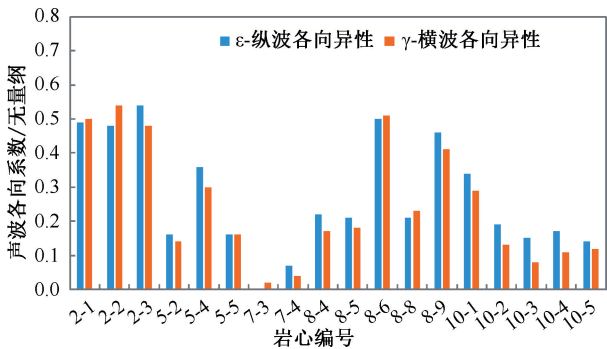


图 3 岩心波速各向异性分析
Fig. 3 Anisotropy analysis of core wave velocity

从图 3 中可以看出 P 波与 S 波各向异性系数分布规律相似,主要分布于 0.2 与 0.5 左右,各向异性较强,层理较为发育,并存在随深度增加层理发育随之的趋势。情字外前缘砂页交互储层对比其余致密储层的波速各向异性数据如图 4 所示,从图中可知,目标区层理发育处于较高水平,岩石破裂过程中,层理弱面被激活概率更大,可形成更加复杂的裂缝网络。

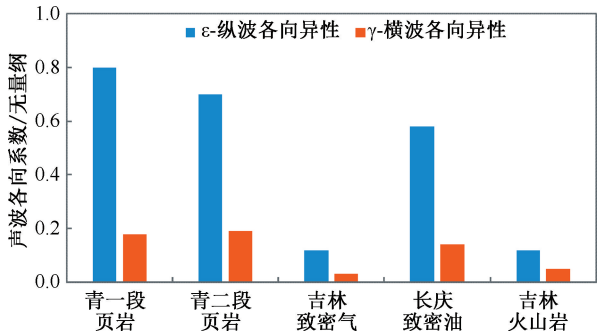


图 4 目标储层与各致密储层波速各向异性对比
Fig. 4 Comparison of wave velocity anisotropy between the target reservoir and various tight reservoirs

1.4 应力敏感性分析

波速应力敏感性是岩石内部微裂缝发育程度的一种反映,波速相对应力的变化率即为应力敏感性系数^[12]。岩石敏感性与裂隙密度有很高的正相关性,其应力敏感性随着天然裂缝密度的增加而增加,可以根据应力敏感系数反演裂隙密度^[13]。

情字外前缘砂页交互储层岩心应力敏感性实验结果如图 5 所示,从图中可以看出根据常用应力敏感性系数评价标准^[14],埋深为 2 360 m 时目标储层应力敏感性系数为 15.7,储层天然裂缝发育,随着埋深增加,天然裂缝发育程度降低,但是当埋深增加至 2 430~2 470 m 之间时,天然裂缝又呈现较

为发育特征。

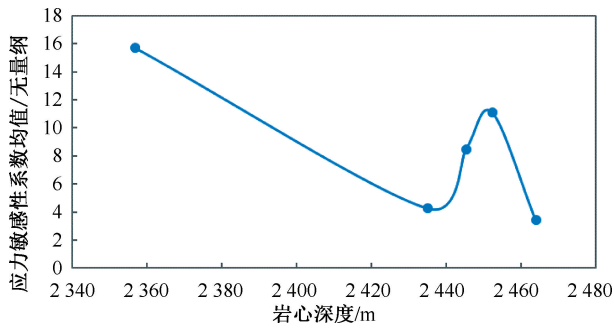


图 5 岩心应力敏感性系数均值随岩心深度变化情况
Fig. 5 The variation of mean stress sensitivity coefficient with core depth

2 储层可压性评价

目前针对页岩储层可压性评价方法较多,主要包括岩石力学参数分析、矿物成分组成^[15]、地质因素分析、甜点识别等主流方法^[16],不同区块适用方法不同,同种方法中不同影响因素比重不同^[17]。结合情字外前缘砂页交互储层实际地质情况,综合考虑储层可压性指数、层理发育情况以及天然裂缝发育情况三方面对储层可压性进行综合分析。

2.1 可压性指数影响因素分析

压裂改造过程中,储层抵抗变形能力、缝网形成能力、改造区域范围、导流能力等都会直接影响压后效果,因此脆性系数、水平地应力差异系数、断裂韧性、脆性矿物含量等四项指标对于储层可压性指数具有重要影响。

2.1.1 脆性系数

常用的脆性系数的计算方法主要有矿物组份法、Goktan 方法及弹性参数法^[18-20]。弹性参数方法中涉及的杨氏模量代表岩石抵抗弹性形变的能力,泊松比能够反映岩石横向变形的能力,两者可以间接地反应储层的地质特征

$$\begin{cases} B_{\text{Brit}} = \frac{1}{2}E_{\text{Brit}} + \frac{1}{2}\mu_{\text{Brit}} \\ E_{\text{Brit}} = \frac{E - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}} \\ \mu_{\text{Brit}} = \frac{\mu - \mu_{\text{min}}}{\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{min}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: B_{Brit} 为脆性系数,无量纲; E_{Brit} 为归一化静态杨氏模量,无量纲; μ_{Brit} 为归一化静态泊松比,无量纲; E 为储层平均静态杨氏模量, GPa; E_{max} 为最大静态杨氏模量, GPa; E_{min} 为最小静态杨氏模量, GPa; μ 为储层平均静态泊松比,无量纲; μ_{max} 为最大

静态泊松比,无量纲; μ_{min} 为最小静态泊松比,无量纲。

根据上述脆性系数计算方法,对目标区域储层三口井开展脆性系数计算,计算结果如图 6 所示,从图中可知,情字外前缘砂页交互储层脆性系数均未超过 0.6,脆性程度中等。

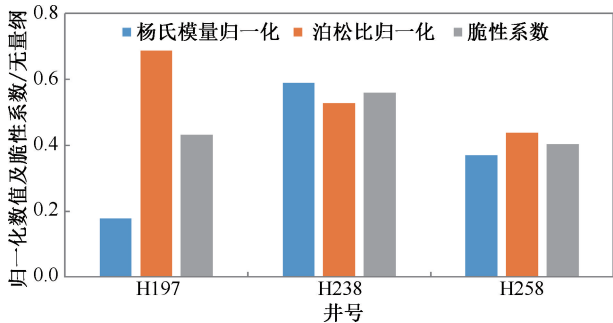


图 6 不同区域储层脆性系数对比
Fig. 6 Comparison of reservoir brittleness coefficients in different regions

2.1.2 水平地应力差异系数

水平地应力差异系数是最大、最小两向水平应力差与最小水平主应力的比值,通常而言,储层水平地应力差异系数越大,代表储层经过压裂改造后形成的裂缝越容易沿着最大水平主应力方向延伸,不易沟通天然裂缝,容易形成主裂缝而无法形成复杂缝网。

$$K_h = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_h} \quad (2)$$

式中: K_h 为水平地应力差异系数,无量纲; σ_H 为储层最大水平主应力, MPa; σ_h 为储层最小水平主应力, MPa。

根据上述计算方法,对目标区块储层的水平地应力差异系数开展计算,计算结果如图 7 所示,从图中可以看出,情字外前缘砂页交互储层的两向水平应力差较小,水平地应力差异系数也较小,人工裂缝转向门槛低,更易形成复杂缝网。

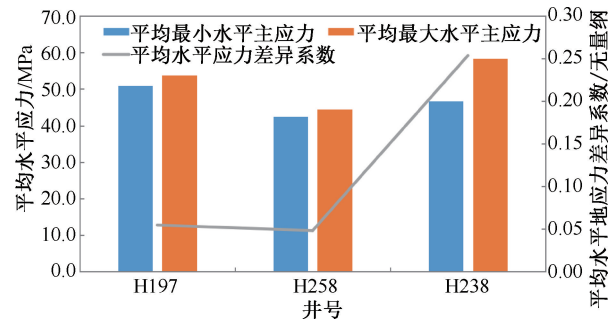


图 7 目标储层三口井水平地应力差异系数对比
Fig. 7 Comparison of horizontal in-situ stress difference coefficients of three wells in target reservoir

2.1.3 断裂韧性

断裂韧性是表征压后裂缝保持裂缝延伸能力的参数,对于储层的可压性具有直接影响。断裂韧性的值越小,意味着相同施工压力下,水力裂缝越容易延伸并保持延伸状态。根据线弹性力学分类标准,最为常见的页岩储层的压后裂缝形式为Ⅰ型断裂与Ⅱ型断裂,情字外前缘砂页交互储层岩心单轴压缩实验结果如图 8 所示,从图中可以看出压后主要裂缝类型为剪切断裂,断裂韧性数值 K_{IIC} 在 0.14~1.71 MPa·m^{1/2},平均值为 1.11 MPa·m^{1/2}。

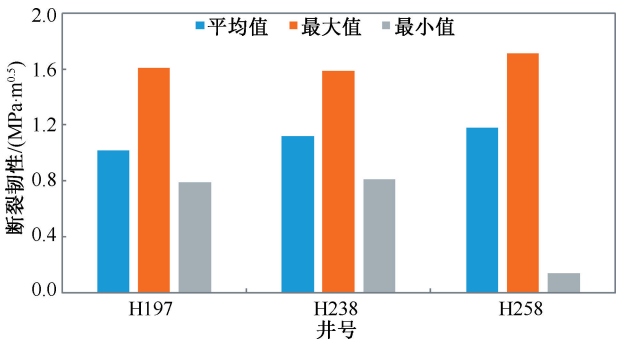


图 8 目标储层三口井断裂韧性实验分析
Fig. 8 Experimental analysis of fracture toughness of three wells in target reservoir

2.1.4 脆性矿物含量

页岩储层的脆性矿物含量是评价可压性的重要参数之一,对于岩石的力学性质以及压裂的难易程度具有重要影响。情字外前缘砂页交互储层主力含油层段岩石矿物成分分析结果如图 9 所示。从图中可以看出,脆性矿物以石英和长石为主,方解石、白云石次之,青一段、青二段的脆性矿物构成较为接近,但青二段的黄铁矿较为发育,目标储层整体脆性矿物平均含量 C_{Brit} 为 60%~80%,平均值 71.2%,较高的脆性矿物含量有利于复杂缝网的形成。

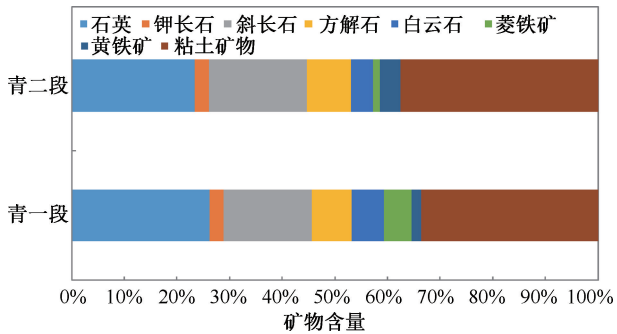


图 9 青一、二段全岩矿物成分分析
Fig. 9 Mineral composition analysis of the entire rock of the Q1 and Q2

2.2 可压性指数计算模型

通过以上分析可知,松南盆地情字外前缘砂页交互储层的可压性指数主要受脆性系数、水平地应力差异系数、脆性矿物含量、断裂韧性等因素的影响,为了便于横向比较,对脆性矿物含量、断裂韧性进行归一化计算,计算公式为

$$\begin{cases} C_{Brit-N} = \frac{C_{Brit} - C_{Brit_{min}}}{C_{Brit_{max}} - C_{Brit_{min}}} \\ K_{IIC-N} = \frac{K_{IIC_{max}} - K_{IIC}}{K_{IIC_{max}} - K_{IIC_{min}}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_{Brit-N} 为脆性矿物含量,无量纲; K_{IIC-N} 为断裂韧性的归一化数值,无量纲; C_{Brit} 为脆性矿物含量标准,%; $C_{Brit_{max}}$ 为脆性矿物含量标准的最大值,%; $C_{Brit_{min}}$ 为脆性矿物含量标准的最小值,%; K_{IIC} 为断裂韧性标准,MPa·m^{1/2}; $K_{IIC_{max}}$ 为断裂韧性标准的最大值,MPa·m^{1/2}; $K_{IIC_{min}}$ 为断裂韧性标准的最小值,MPa·m^{1/2}。

同时根据层次分析法以及各因素对储层可压性的影响程度,经计算得到各因素在可压性指数模型中所占权重,最终可知情字外前缘砂页交互储层的可压性指数 I_f 计算公式为

$$I_f = 0.467B_{Brit} + 0.16C_{Brit-N} - 0.278K_h - 0.095K_{IIC-N} \quad (4)$$

根据建立的可压性指数计算公式,对该区三口井进行可压性指数分析,结果如表 2 所示,表中给出了各影响因素的推荐值,并计算出可压性指数的推荐值 0.25,当储层可压性指数低于 0.25 时,说明储层脆性较低、可压性较差,高于 0.25 时,储层脆性较高、可压性较好。

表 2 目标储层可压性指数成果表						
Table 2 Result table of target reservoir compressibility index						
	脆性系数	水平地应力差异系数	脆性矿物含量(归一化)	断裂韧性(归一化)	可压性指数	停泵压力/MPa
推荐数值	>0.6	<0.3	>0.6	<0.5	>0.25	-
H197	0.43	0.05	0.58	0.72	0.21	37.8
H238	0.56	0.05	0.52	0.60	0.27	48.6
H258	0.62	0.25	0.52	0.34	0.27	48.2
储层平均	0.56	0.14	0.56	0.38	0.28	-

表 2 为目标储层可压性指数成果表,从表中可以看出储层平均脆性系数与推荐值接近,综合脆性中等,但低于吉木萨尔、Barnett 等页岩油储层,储层平均水平地应力差异系数仅为 0.14,形成复杂裂缝网络的可能性较高,并且脆性矿物含量中等、岩石断裂韧性较大,最终可压性指数计算结果显示储层



整体可压性中等。可压性指数与停泵压力显示出了较好的匹配性,可压性指数越小的措施井,其停泵压力越高,说明可压性指数计算模型具有较高的可信程度,能够较为真实地反映储层实际情况。

从储层可压性指数、波速各向异性评价以及应力敏感性分析三方面来看,情字外前缘砂页交互储层的脆性中等,水平地应力差异系数小,水平方向上形成复杂裂缝难度较低,并且层间应力差小,层理发育,产生的纵向裂缝容易沟通各水平层理,当深度在2 380 m以上时,储层天然裂缝较为发育,整个储层容易被打碎,具有较大的储层改造潜力。

3 现场应用

H2-1 直井位于情字外前缘井区,含油目的层是典型的砂页交互储层,平均油层厚度 78 m,黏土矿物平均含量 36%,平均孔隙度 3.1%。为有效指导其压裂技术路线,利用本文所述方法对该井储层的可压性进行综合评价,结果显示该井附近储层可压性指数为 0.26,可压性中等,岩心波速各向异性实验结果中 ε 值较高, γ 较小,垂直方向层理发育程度较高,平行层理面方向呈各向同性,岩心应力敏感性实验结果中应力敏感性系数为 9,数值偏低,表明天然裂缝发育程度较低。

基于上述可压性评价结果,为提高储层纵向改造程度、实现裂缝的充分开启与支撑,该井压裂施工过程采用 $10 \sim 14 \text{ m}^3/\text{min}$ 大排量,累计入井液量 $6\,297 \text{ m}^3$ 、砂量 254.1 m^3 ,同时为进一步打碎储层、获取更大的改造体积,射孔布簇方式由少簇多孔密改为多簇少孔密+层间暂堵,施工全程开展微地震监测,压裂两个层段其解释结果,第 1 段裂缝网格总长为 255 m,裂缝网格宽为 73 m,裂缝网格高为 62 m,SRV 为 $491.175 \times 10^4 \text{ m}^3$,第 2 段裂缝网格总长为 230 m,裂缝网格宽为 33 m,裂缝网格高为 76 m,SRV 为 $491.175 \times 10^4 \text{ m}^3$,地震检测得知微地震事件点较多,整体裂缝网络呈现垂直缝网形态,裂缝延伸高度大,说明储层纵向上得到了有效改造,同时返排阶段结束后平均日产液 17.66 m^3 ,平均日产油 9 m^3 ,压后产能高于前期同区生产井,综上所述该井改造较为成功,前期的储层可压性评价对于压裂技术路线的指导具有重要作用。

4 结论

(1)松南盆地情字外前缘砂页交互储层整体表

现为低孔低渗,黏土矿物含量较高,但储层两向水平应力差以及层间应力差较小,整体显示为脆性中等。同时储层的波速各向异性系数较大,水平方向层理较为发育,层理弱面更易被打开,并且在深度较小时,天然裂缝发育程度较高。

(2)基于脆性系数、水平地应力差异系数、断裂韧性以及脆性矿物含量四种因素,构建了储层可压性指数模型,情字外前缘砂页交互储层的可压性指数计算结果为 0.28,可压性中等,结合层理发育以及天然裂缝发育情况,目标层整体具有较大的改造潜力。

(3)建立的储层可压性综合评价方法简单实用、考虑因素全面,现场应用效果显著,能够为压裂施工技术路线的确定提供理论依据,进而达到增效提产的目的。

致谢:感谢油气工艺研究院同意本论文公开发表;感谢领导和同事们在论文撰写过程中提供的支持和帮助!

参考文献

- [1] 匡立春,侯连华,杨智,等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J]. 石油学报,2021,42(1):1-14.
KUANG Lichun, HOU Lianhua, YANG Zhi, et al. Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(1): 1-14.
- [2] 邹才能,王红岩,董大忠,等. 非常规油气勘探开发[M]. 北京:石油工业出版社,2019.
- [3] 刘光玉,王卫明,王艳玲. 王府断陷深层气藏火山岩储集层可压性评价[J]. 新疆石油地质,2020,41(3):359-364.
LIU Guangyu, WANG Weiming, WANG Yanling. Evaluation of fracability of volcanic reservoir in deep gas reservoirs of Wangfu fault depression[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(3): 359-364.
- [4] 熊健,吴俊,刘向君,等. 陆相页岩储层地质力学特性及对压裂效果的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版):2023,45(2):69-80.
XIONG Jian, WU Jun, LIU Xiangjun, et al. Investigation on the geomechanical characteristics of the continental shale reservoirs and its influence on the fracturing effect[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition): 2023,45(2):69-80.
- [5] 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 Human Province[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(5): 626-634.
- [6] 田晓冬,魏博,梁忠奎,等. 南堡凹陷4号构造中深层储层可压性综合评价[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2023,20(4):1-10.
- TIAN Xiaodong, WEI Bo, LIANG Zhongkui, et al. Comprehensive evaluation of compressibility of mid-deep reservoirs in No.4 structure of Nanpu sag [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2023, 20(4): 1-10.
- [7] 窦亮彬,杨浩杰,XIAO YingJian,等. 页岩储层脆性评价分析及可压裂性定量评价新方法研究[J]. *地球物理学进展*,2021,36(2):576-584.
- DOU Liangbin, YANG Haojie, XIAO Yingjian, et al. A Probability study of formation brittleness and new quantitative evaluation of fracability for shale reservoirs[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(2): 576-584.
- [8] 罗新辉,苏杭. 页岩气储层可压裂性评价[J]. *绿色环保建材*,2017,(7):231-232.
- LUO Xinhui, SU Hang. Fracturability evaluation of shale gas reservoir[J]. *Green Environmental Protection Building Materials*,2017,(7): 231-232.
- [9] 李玉伟,李子健,邵力飞,等. 基于物理信息约束的页岩油储层可压性评价新方法[J]. *煤田地质与勘探*,2023, 51(10):37-51.
- LI Yuwei, LI Zijian, SHAO Lifei, et al. A new physics-informed method for the fracability evaluation of shale oil reservoirs[J]. *Coal Geology & Exploration*,2023,51(10): 37-51.
- [10] 陈勇. 各向异性表征技术在页岩气储层探测中的应用[J]. *能源与环保*,2022,44(6):98-103.
- CHEN Yong. Application of anisotropy characterization technology in shale gas reservoir exploration [J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2022, 44(6): 98-103.
- [11] 邓华锋,李涛,李建林,等. 层状岩体各向异性声学和力学参数计算方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020,39(增刊1):2725-2732.
- DENG Huafeng, LI Tao, LI Jianlin, et al. Research on calculation methods for anisotropic acoustic and mechanical parameters of layered rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(Suppl. 1): 2725-2732.
- [12] 康毅力,赖哲涵,陈明君,等. 页岩储层应力敏感性的时间效应[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(1): 53-63.
- KANG Yili, LAI Zhehan, CHEN Mingjun, et al. Time effects of stress sensitivity in shale reservoirs[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2024, 46(1): 53-63.
- [13] 任世杰,刘大鹏. 页岩应力敏感性分析研究[J]. *非常规油气*,2019,6(1):51-54.
- REN Shijie, LIU Dapen. Study of the shale stress sensitivity experimental [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2019, 6(1): 51-54.
- [14] 李传亮. 储层岩石的应力敏感性评价方法[J]. *大庆石油地质与开发*,2006,(1):40-42.
- LI Chuanliang. Evaluation method for stress sensitivity of reservoir rock[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006,(1): 40-42.
- [15] 刘伟男,王敏. 基于矿物岩石力学特征差异的页岩储层脆性评价方法研究[J]. *当代化工*,2020,49(2):458-461,466.
- LIU Wei-nan, WANG Min. Research on evaluation of shale reservoir brittleness based on differences in the rock mechanical characteristics [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(2): 458-461,466.
- [16] 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 and Gas Reservoirs*, 2020, 27(3): 54-59.
- [17] SONDERGELD C H, NEWSHAM K E, COMISKY J T, et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources[R]. *SPE 131768*, 2010.
- [18] GOKTAN R M, YILMAZ N G. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting [J]. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 2005, 105: 727-733.
- [19] 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 [R]. *SPE 115258*2008.
- [20] 吴峙颖,胡亚斐,蒋廷学,等. 孔洞型碳酸盐岩储层压裂裂缝转向扩展特征研究 [J]. *石油钻探技术*,2022, 50(4):90-96.
- WU Zhiying, HU Yafei, JIANG Tingxue, et al. Study on propagation and diversion characteristics of hydraulic fractures in vuggy carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(4): 90-96.

编辑 穆立婷

第一作者简介:陈凯,男,1994年出生,硕士研究生,工程师,2020年获中国石油大学(北京)硕士学位,现主要从事油气藏增产改造技术研究工作。电话:18242364125; Email: 18242364125@163.com。通信地址:吉林省松原市宁江区区长宁北街618号,邮政编码:138000。