



地面微地震监测技术在页岩油水平井压裂效果评价中的应用 ——以松页油 2HF 井为例

姚玉来¹, 李 昂¹, 李士超¹, 杨建国¹, 肖 飞¹, 王维红²

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 东北石油大学, 黑龙江 大庆 163318

摘 要: 地面微地震监测是评价水平井压裂效果的有效手段。采用矩形观测系统、高灵敏度检波器深浅结合埋置、覆土耦合压实的采集技术, 在 2000 m 之下的松页油 2HF 井水平段泥页岩储层中获得明显的压裂微地震信号。利用数据归一化、噪声压制、速度建模、震源定位等关键处理技术, 有效提高了泥页岩储层低频信号成像精度。采用高精度反演定位解释技术, 客观真实地评价了松页油 2HF 井的压裂效果, 并提出压裂优化建议。

关键词: 微地震监测; 压裂; 页岩油; 水平井; 松辽盆地

APPLICATION OF SURFACE MICROSEISMIC MONITORING TECHNOLOGY IN FRACTURING EFFECT EVALUATION OF SHALE OIL HORIZONTAL WELL: A Case Study of SY-2HF Well

YAO Yu-lai¹, LI Ang¹, LI Shi-chao¹, YANG Jian-guo¹, XIAO Fei¹, WANG Wei-hong²

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang Province, China

Abstract: Surface microseismic monitoring is an effective method to evaluate the fracturing effect of horizontal well. By adopting the rectangular observation system, shallow-depth embedment and soil-covering coupling compaction acquisition techniques of high sensitivity geophones, obvious fracturing microseismic signals are obtained in shale reservoir in the horizontal interval of SY-2HF well below 2000 m. The application of key processing technology including data normalization, noise suppression, velocity modeling and seismic source localization has effectively improved the imaging precision of low-frequency signals in shale reservoir. Through high-precision inversion positioning and interpretation technology, the paper objectively evaluates the fracturing effect of SY-2HF well and puts forward suggestions for fracturing optimization.

Key words: microseismic monitoring; fracturing; shale oil; horizontal well; Songliao Basin

0 引言

页岩油是典型的自生自储式油气藏, 富有机质的

泥页岩既是它的生油岩, 又是储集岩, 储集空间以纳米—微米级孔隙和裂缝为主, 具有极低孔低渗的特点^[1]。

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-03-22. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“大庆齐家-古龙地区页岩油气战略调查与评价”(DD20179613), “松辽盆地北部页岩油战略调查”(DD20190114), “松辽盆地核心目标区页岩油参数获取”(DD20189810)

作者简介: 姚玉来(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事油气地质调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//yaoyulai@mail.cgs.gov.cn

改造低渗透油气藏的重要手段是水力压裂。通过压裂在目标层产生复杂缝网,形成油气运移通道^[2-7]。压裂裂缝生成也是岩石破裂的过程,这个过程伴随的是一系列微地震事件,通过监测这些微地震事件,可以刻画裂缝的展布特征^[8-11]、计算储层改造体积等^[12],从而对压裂效果进行评价。

储层的压裂效果决定了后续的页岩油勘探开发效果。对页岩油井的压裂效果进行评价可为相同类型储层的压裂方案设计提供参考依据。微地震监测是评价水平井压裂效果的有效手段,一般采用井下监测^[13-20]和地面监测两种方式^[4, 20-26]。井下监测的前提是必须有临井作为监测井,如果没有只能选择地面监测方式。地面监测是在地表采用一定的排列方式布设大量的检波器接收微地震信号,也可以将检波器埋置到浅孔中,能大幅度减少地面噪声干扰。地面监测施工方便,监测方位角大,成本较低^[26]。与井下监测相比,地面监测的定位结果水平分辨率更高,但在深度上的分辨率较差^[4]。

因此,在附近无监测井的情况下,松页油 2HF 井水平段压裂微地震监测选用地面监测方式。在压裂段深度大、地表土壤层厚、水泡子发育、地表噪声多的情况下,通过采用先进的采集、处理和高精度反演定位解释技术,有效评价了泥页岩储层的改造效果。该井压裂监测结果有望为同类型储层其他水平井的压裂设计提供借鉴。

1 松页油 2HF 井压裂基本概况

松页油 2HF 井位于松辽盆地古龙凹陷北部,是一口基质含油型页岩油水平井,目的层是上白垩统青山

口组一段下部,岩性为暗色泥页岩,完钻水平段长 739 m。该井 A 靶点垂深 2 146.82 m,B 靶点垂深 2 151.43 m,于 2018 年 10 月 30 日完成 10 段水力压裂施工,平均段长 72 m,单段射孔 2~3 簇,平均簇间距 29.1 m,总压裂液量 15 963 m³,总压裂加砂量 713.8 m³,总加入聚酯纤维 2 220 kg。

2 微地震信号采集

2.1 微地震检测设备

松页油 2HF 井压裂微地震监测采用了高性能的检波器和采集器(表 1),其动态范围大,信号失真小。对于目的层埋藏较深的压裂段,该套设备可实现信号的有效采集。微地震信号采集器的频带宽度达到 150 Hz,自噪声水平低,对于信号的保真和后续微地震资料的成像和反演定位精度提高奠定了技术基础。

该井压裂微地震监测使用 HFRTMS 软件,该软件具有微地震监测数据实时监测、实时处理和后续精细处理与解释的功能,为现场压裂监测、压裂参数调整和压裂效果评价提供参考依据。

2.2 微地震观测系统

在水力压裂微地震定位中,监测系统的空间布置是决定定位效果和评价效果的关键性因素^[27]。为确定不同观测系统对地面微地震监测定位精度的影响,对星型、矩型和散点型 3 种常见的地面微地震观测系统进行了三维弹性波的正演数值模拟。依据 3 种观测系统的布置方式设计了三维空间的地质模型,其 3 个方向的网格点分别为 400、400 和 200 m,空间采样间隔为 6 m,设计采集道数均为 160 道,震源为主频为 40 Hz 的雷克子波。另外,考虑到微地震资料的信噪比因

表 1 检波器和采集器性能参数
Table 1 Performance parameters of geophone and collector

检波器参数信息		采集器参数信息	
自然频率/Hz	4.5×(1±7.5%)	频带宽度/Hz	0.033~150
灵敏度/(V/m·s ⁻¹)	100×(1±5%)	自噪声水平	整个频段低于 NHNM 曲线; 10 s~10 Hz 低于 NLNM 曲线
动态范围/dB	110	时间稳定度 (GPS+北斗定位授时)/s	5×10 ⁻⁷
阻尼系数	0.55~0.65	整机功耗/mW	免交互工作模式, <150 @100 sps; Ethernet 工作模式, <700 @100 sps
非线性畸变值	失真度≤0.9%	采样率/ms	2、5、10、50
线圈电阻/Ω	3800×(1±5%)	数据格式	2 bit 或 MSD(可转为 SAC、PSD 等格式)

素,将实际监测的背景噪声加入上述 3 种数据中,经过同样的信号成像处理,并采用相似加权叠加法进行事件定位. 结果表明,由于噪声的影响,散点型观测系统无法进行震源的定位,而星型和矩型观测系统均具有良好的微地震事件定位效果,且信号的时距曲线特征清晰,同相轴可连续追踪.

松页油 2HF 井压裂微地震监测采取较为规则的网格排列观测系统,该观测系统充分考虑了本井压裂段空间位置、目的层埋深、可能产生的噪声环境、附近的建筑物分布和居民活动等因素,可有效保证接收的微地震信号的信噪比、地震波射线覆盖面和入射角度等物理参数的精度,同时为后续微地震资料的成像和反演定位奠定技术基础. 需要说明的是,由于在微地震定位算法中可校正检波器的空间位移,这种网格排列的不规则度不会影响后续的定位精度.

对泥页岩进行多级连续压裂监测,信号的有效采集是压裂效果评价的关键. 在井周围部署了 6 条微地震监测测线(图 1),每条测线的检波器间距为 120~150 m,所有检波器距井口 300 m 以上. 科学合理埋置检波器,近南东向测线检波器埋深 30 m,其余测线检

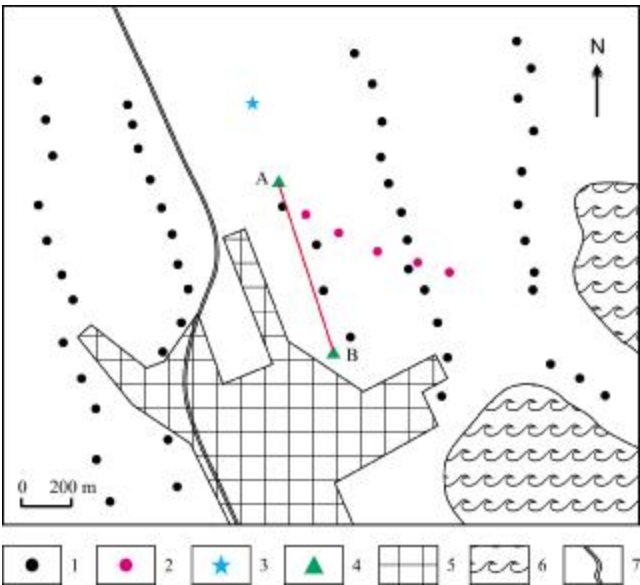


图 1 松页油 2HF 井微地震监测观测系统部署图

Fig. 1 Microseismic monitoring observation system map of SY-2HF well

1—埋深 2 m 的检波器位置 (geophone position at buried depth of 2 m);
2—埋深 30 m 的检波器位置 (geophone position at buried depth of 30 m);
3—井口(wellhead); 4—靶点(target); 5—村镇(village/town); 6—水泡子(water pool); 7—公路(highway)

波器埋深 2 m,以确保接收器与地层的良好耦合,也可最大限度减少地面噪声对信号接收的影响.

2.3 微地震信号采集

在微地震信号采集,连续记录地震信号,采样时间间隔为 2 ms. 除各压裂段的压裂过程外,在压裂前后的一段时间(30 min)内也进行监测,这样可有效记录背景噪声、射孔信号、压裂信号和压裂过程外可能的破裂信号,为准确定位破裂点和裂缝展布特征提供基础资料.

松页油 2HF 井压裂施工地面微地震监测了 10 段压裂过程信号和射孔信号,典型的观测数据如图 2、3 所示,射孔信号和能量较大的压裂信号均可有效接收到. 实施射孔相当于传统的人工地震,事先可确定发震时刻和震源位置,便于在微地震信号中识别和搜索该类信号. 松页油 2HF 井的所有射孔信号均被接收

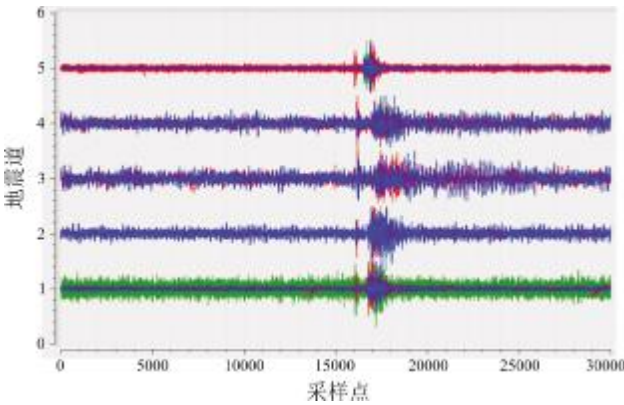


图 2 松页油 2HF 井第 10 段第 21 簇射孔信号

Fig. 2 Signal of the 21st cluster perforation in the 10th stage of SY-2HF well

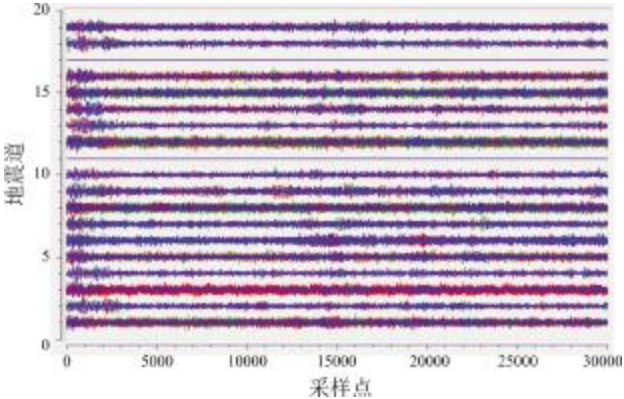


图 3 松页油 2HF 井第 7 段压裂采集的微地震记录

Fig. 3 Microseismic records for the 7th stage fracturing of SY-2HF well

到,为后续微地震资料分析、处理和速度模型修正提供了重要资料.实施压裂时,采集站采集的三分量微地震数据,经过数据转换后以 SEG-Y 格式记录在存储介质.松页油 2HF 井 10 段压裂采集的微地震记录显示,每段可接收到 2~6 个肉眼可识别的、强能量的微地震信号.图 3 为 2018 年 10 月 27 日 10 点 39 分采集的压裂微地震数据,在第 500 个采样点附近,可见较为明显的微地震信号.

3 微地震数据处理

地面微地震监测因其信号弱、噪声强、速度建模困难等特点相对井中微地震监测难度更大,因此需要采取针对性的数据处理技术,才能保证震源定位结果的精度和可靠性^[28-29].数据处理的主要目的是对压裂过程中地层释放的一系列微地震信号进行震源定位,根据震源事件点的空间和时间分布确定压裂裂缝形态.根据松页油 2HF 井微地震资料的特点确定了数据处理流程,主要包括数据归一化、噪声压制、速度建模、震源定位等步骤.

3.1 数据归一化

在实际微地震数据采集,地震数据是间隔采集和处理的,存在时间差异.另外,噪声、物理环境、高程、近地表条件、仪器、采集和处理参数等诸方面的不同,都会给微地震事件定位造成很大影响.所以首先进行微地震数据的归一化处理,以保证微地震信号的振幅

在同一数量级范围内,同时也可以对微震数据进行综合分析.图 4 为归一化前后的效果对比图.对比看出,归一化后各道数据之间的振幅、能量更均匀,同相轴更清晰,而且连续性得到增强.

3.2 噪声压制

地面微地震监测采集的三分量数据由于高频衰减严重,频率比较低,而且一般能量比较弱,信噪比较低.因此分析各种噪声影响因素、噪声源并对其进行滤波处理,是地面微地震监测数据采集和处理流程中的关键步骤.目前,微地震数据去噪的方法有很多,可以解决不同种类的噪声压制问题^[30-32].松页油 2HF 井压裂微地震监测数据采用快速离散剪切波变换 (FFST) 方法进行滤波去噪.该方法可有效减小信号处理的吉布斯效应,增强信号细节刻画能力,算法速度较快,非常适合微地震数据的噪声压制处理.图 5 为噪声压制前后的实际记录.原始数据的随机噪声较为明显,而且微震信号的能量不均,滤波后的数据有效压制了随机噪声,提高了微地震资料的信噪比.

3.3 速度建模

速度模型建立是微震数据处理中的重要环节,速度模型的精度直接影响微震反演定位的精度.与传统地震勘探相比,微地震信号监测的覆盖面积很小,仅限于井身几公里的范围,所以可将地下介质视为平层模型.松页油 2HF 井压裂地面微地震监测的速度模型主

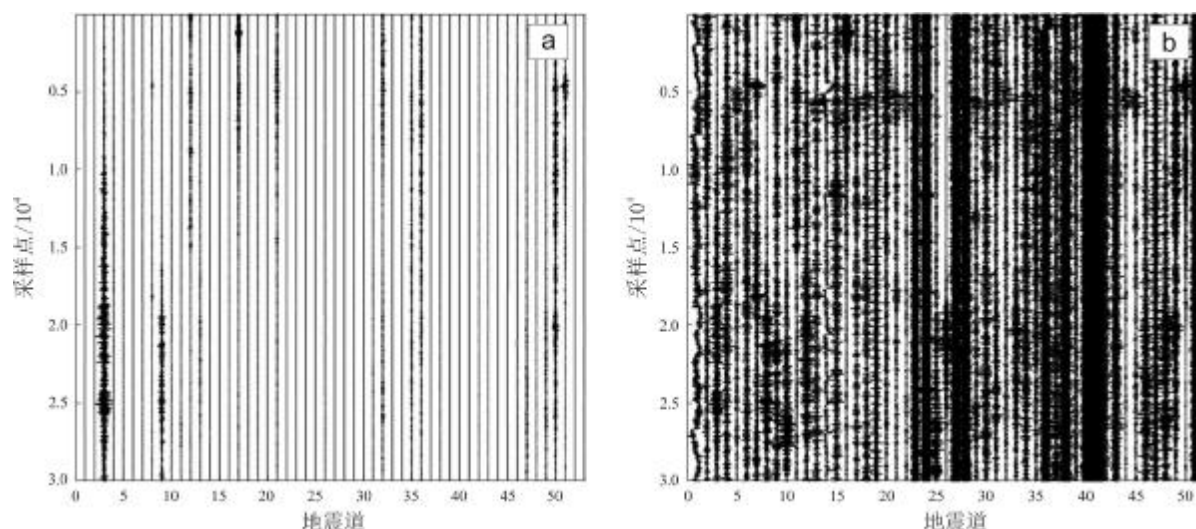


图 4 归一化处理前后的微地震数据

Fig. 4 Microseismic data before and after normalization processing

a—原始信号(original signal); b—归一化后信号(normalized signal)

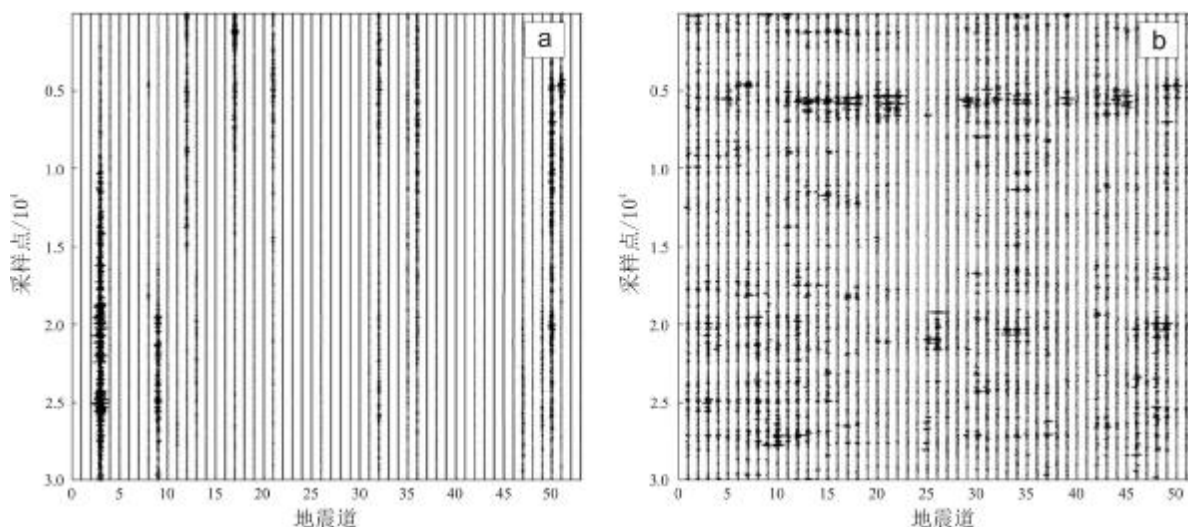


图5 噪声压制前后的微地震记录

Fig. 5 Microseismic records before and after noise suppression

a—原始信号(original signal); b—去噪后信号(after denoising)

要根据松页油 2 井直井的地质分层表和声波测井建立的. 测井曲线包括常规场波曲线(963.125~2 348.125 m)、偶极声波纵波曲线(1 901.3~2 348.0 m)和横波(1 901.3~2 348.0 m)曲线. 地表至低速带、黄土层等较浅地层没有声波测井数据, 这一深度范围内的速度模型通过综合分析钻井中遇黄土层厚度及地表岩性对应速度确定. 在没有实测横波速度的情况下, 建议仅使用 P 波振幅和波至进行定位. 图 6 为松页油 2HF 井根据地质分层和声波测井曲线建立的层状 P 波速度模型, P 波速度曲线利用中值滤波算法进行了平滑.

3.4 震源定位

松页油 2HF 井压裂微地震震源定位采用地震发射层析成像(SET)技术, SET 是一种适用于地面微地震监测低信噪比情况的微震源定位方法^[3-4, 33-34]. 该方法具有很多特点, 一是无需拾取微地震信号初至时间, 只需要根据地层速度模型和检波器位置用射线追踪或波动方程求解等正演方法计算理论走时即可, 适合于低信噪比信号震源定位; 二是采集站点个数越多, SET 成像震源定位的精度越高; 三是可利用较准确的地层速度模型预先计算走时, 速度模型越准确, 定位计算越准确.

4 微地震数据解释

在实际微地震数据解释时, 主要是依据微地震事

件的定位资料. 根据微地震事件点的空间位置和发震时刻, 连接微地震事件点, 形成压裂裂缝的展布特征图, 从而进行压裂效果评价. 由于微震信号的信噪比低, 加之浅地表各种噪声的干扰, 难以拾取准确的初至, 使得单纯通过地震数据的反演方法无法取得理想的效果. 贝叶斯反演方法是一种把先验信息和后验信息结合起来的推理估计方法, 可以更好地融合多方面先验信息实现后验信息的最佳估计^[35]. 松页油 2HF 井地面微地震监测采用多线观测, 利用多线观测结果进行微地震事件的反演, 可提高事件点和裂缝的解释精度. 利用拾取的各条线到时和速度模型, 采用贝叶斯反演方法进行反演, 可得到震源位置. 综合各条线的反演结果, 根据目标函数和不同测线之间的权系数, 利用全概率公式推断估计最佳震源位置和裂缝展布特征.

5 压裂效果评价及优化建议

根据松页油 2HF 井微震源的定位, 明确了各压裂段的裂缝展布特征, 在此基础上对该井压裂效果进行评价, 并提出相应的压裂优化建议.

5.1 压裂效果评价

微地震监测结果(表 2)表明, 松页油 2HF 井压裂造缝以主裂缝为主, 伴随有次要裂缝产生, 裂缝在井眼附近比较发育. 压裂主裂缝长度最大为第六段 271 m, 最小为第一段 141 m, 平均 206 m, 裂缝方位整体为北

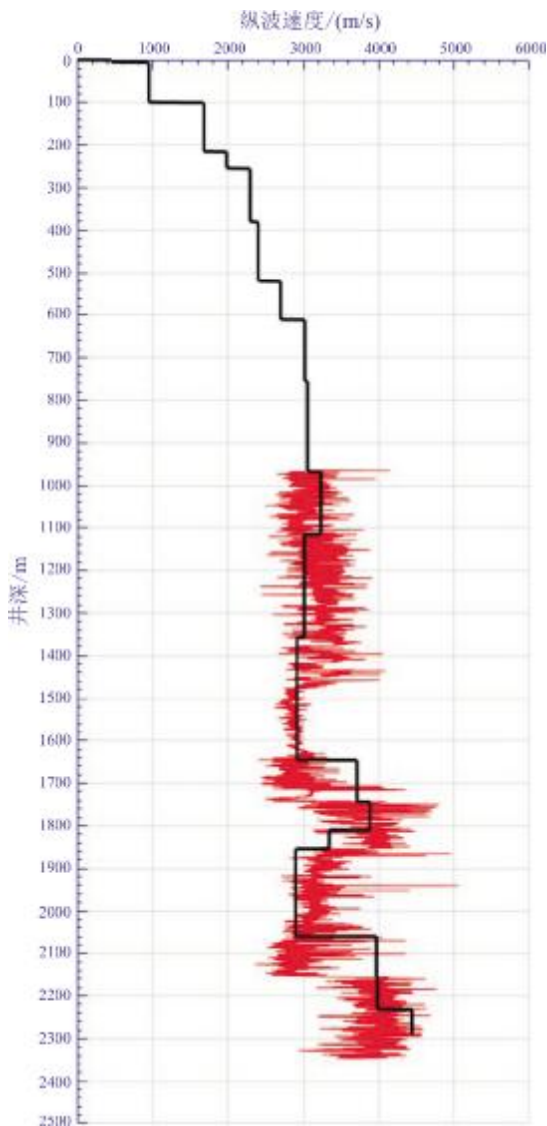


图 6 松页油 2HF 井纵波速度模型

Fig. 6 Primary wave velocity model of SY Y-2HF well

东向.有效压裂面积以第六段最大,为 34 202 m²,第一段面积最小,仅为 13 002 m²,平均 23 606 m²,全井段总有效压裂面积为 121 774.1 m².因地面微地震对事件垂向上定位误差较大,加之目的层的厚度不大,所以对压裂高度直接按照目的层平均厚度(12 m)进行近似计算,有效压裂面积乘以目的层平均厚度得到有效压裂储层改造体积为 1 461 289.2 m³.

整体压裂造缝效果显示水平段东翼压裂效果较好,裂缝延展长度较大(图 7).在两翼造缝规模上,第一、八、九段两翼造缝规模相当;第二、三、十段西侧稍小于东侧,第七段西侧远小于东侧;第四、五段西侧稍大于东侧,第六段西侧远大于东侧,说明地层存在一定

表 2 松页油 2HF 井有效压裂区域及主裂缝特性

Table 2 Effective fracturing zones and major fracture features of SY Y-2HF well

压裂段	主缝长度/m	裂缝方向	破裂面积/m ²	造缝评价
第一段	141	SE22°	13002	带状缝
第二段	196	NE9°	20193	带状缝
第三段	153	SE29°	18384	带状缝
第四段	213	SE19°	19563	带状缝
第五段	170	SE25°	20152	带状缝
第六段	271	NE43°	34202	带状缝
第七段	259	NE36°	28950	带状缝
第八段	219	NE12°	27712	带状缝
第九段	213	NE36°	22467	带状缝
第十段	228	NE73°	31430	带状缝

的非均质性.

总体上看,松页油 2HF 井各段压裂造缝效果较为明显,并且从井底到井口造缝效果整体上逐渐变好,基本实现了泥页岩储层的有效改造.各级裂缝有效沟通了储层与井眼的流体通道,增大了渗流面积,达到了压裂设计的预期效果.松页油 2HF 井最终获得了较好的压裂效果,抽汲求产获得日产 10.06 m³的高产工业油流,最高日出油 27.81 m³.该水平井已经移交大庆油田进行试采,试采效果理想^[36].

5.2 压裂优化建议

松页油 2HF 井各压裂段之间整体连通性较好,第八段至第十段造缝无压裂空白区,压裂重复区域也很小;在第六段和第七段之间存在很小的压裂空白区,但是在第七段左翼压裂空白区较大;在第二段到第六段之间存在一定的压裂重复区域.建议松辽盆地古龙地区其他相同压裂规模的压裂井可参考第八段到第十段的段长(70~98 m)设计,从而达到更优的压裂效果.

另外,松页油 2HF 井压裂段裂缝主走向多数为北东方向,只有第一、三、四、五段为北西方向,初步判断该井所在区域最大水平应力方向为北东方向.因为与裂缝主走向垂直的次要裂缝发育程度也较高,揭示该区最小水平应力与最大水平应力的大小差异较小,形成两组共轭裂缝.裂缝走向北西向应为与最大水平应力相差不大的最小水平应力方向.建议可根据该分析结果优化相邻地区其他钻井水平段方位,以获得最佳压裂效果.

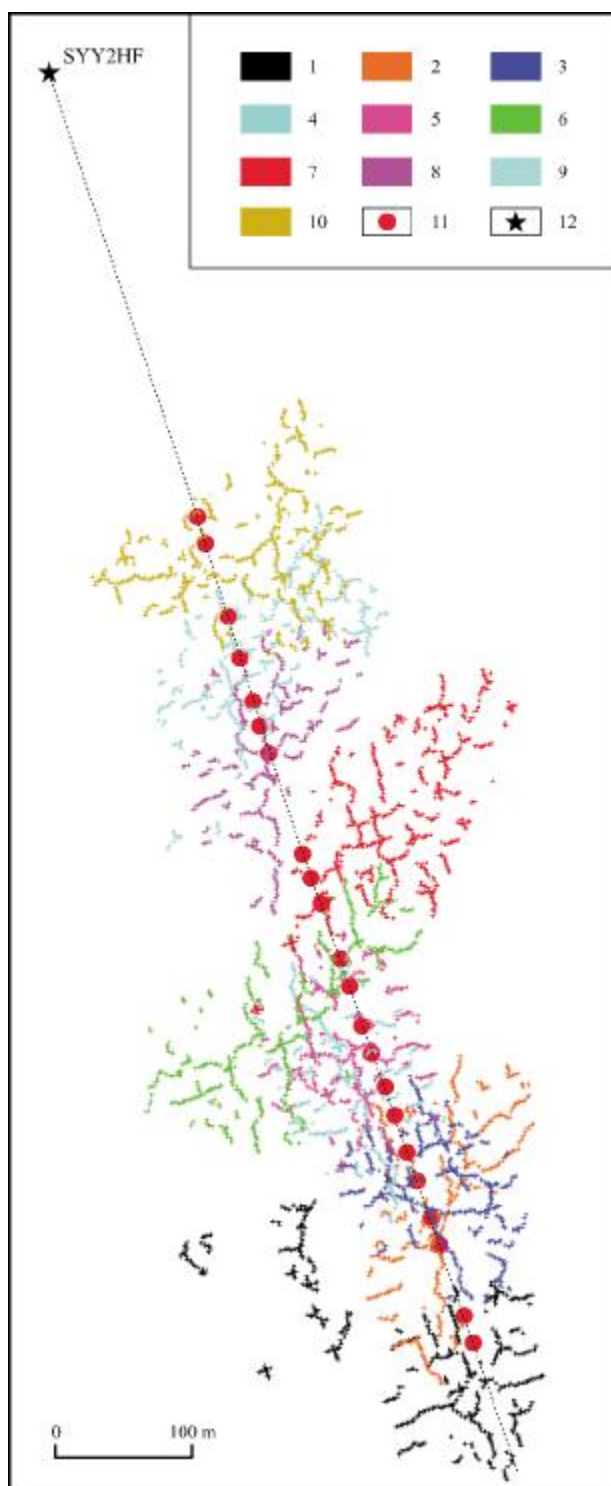


图7 松页油 2HF 井压裂裂缝解释图

Fig. 7 Fracture interpretation of SYY-2HF well

1~10—第一段—第十段压裂裂缝(fracturing fractures of 1st-10th stages); 11—射孔点(shooting point); 12—井口(wellhead)

6 结论

(1)网格排列观测系统适合于松辽盆地北部页岩

油水平井地面微地震监测,同时需要科学合理埋置检波器,以确保接收器与地层的良好耦合。

(2)以弱信号噪声压制、高精度速度建模和微地震事件定位为核心的微地震处理基础流程,提高了资料信噪比,为准确定位微震源提供了可靠的数据资料。

(3)利用裂缝成像几何形态解释技术,描述了压裂裂缝网络。松页油 2HF 井各段压裂造缝效果较为明显,基本实现了泥页岩储层的有效改造,获得了较好的产能。该井泥页岩目标层水力压裂参数和地面微地震监测技术,可为松辽盆地同类目标层的水力压裂设计提供借鉴。

参考文献(References):

- [1]张欣,刘吉余,侯鹏飞.中国页岩油的形成和分布理论综述[J].地质与资源,2019,28(2):165-170.
Zhang X, Liu J Y, Hou P F. A review on the formation and distribution theories of the shale oil in China[J]. Geology and Resources, 2019, 28(2): 165-170.
- [2]Maxwell S C, Urbancic T I. The role of passive microseismic monitoring in the instrumented oil field[J]. The Leading Edge, 2001, 20(6): 636-639.
- [3]Chambers K, Kendall J M, Brandsberg-Dahl S, et al. Testing the ability of surface arrays to monitor microseismic activity[J]. Geophysical Prospecting, 2010, 58(5): 821-830.
- [4]Duncan P M, Eisner L. Reservoir characterization using surface microseismic monitoring[J]. Geophysics, 2010, 75(5): 75A139-75A146.
- [5]Eisner L, Hulsey B J, Duncan P, et al. Comparison of surface and borehole locations of induced seismicity[J]. Geophysical Prospecting, 2010, 58(5): 809-820.
- [6]刘百红,秦绪英,郑四连,等.微地震监测技术及其在油田中的应用现状[J].勘探地球物理进展,2005,28(5):325-329.
Liu B H, Qin X Y, Zheng S L, et al. Microseismic monitoring and its applications in oilfield operations[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2005, 28(5): 325-329.
- [7]张山,刘清林,赵群,等.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.
Zhang S, Liu Q L, Zhao Q, et al. Application of microseismic monitoring technology in development of oil field[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(2): 226-231.
- [8]Li J L, Zhang H J, Rodi W L, et al. Joint microseismic location and anisotropic tomography using differential arrival times and differential back azimuths[J]. Geophysical Journal International, 2013, 195(3): 1917-1931.

- [9] Grechka V, De La Pena A, Schisselé-Rebel E, et al. Relative location of microseismicity [J]. *Geophysics*, 2015, 80(6): WC1-WC9.
- [10] Zimmer U. Microseismic design studies [J]. *Geophysics*, 2011, 76(6): WC17-WC25.
- [11] Close D, Perez M, Goodway B, et al. Integrated work flows for shale gas and case study results for the Horn River Basin, British Columbia, Canada [J]. *The Leading Edge*, 2012, 31(5): 556-569.
- [12] 李大军, 杨晓, 王小兰, 等. 四川盆地 W 地区龙马溪组页岩气压裂效果评估和产能预测研究 [J]. *石油物探*, 2017, 56(5): 735-745.
- Li D J, Yang X, Wang X L, et al. Estimating the fracturing effect and production capacity of the Longmaxi Formation of the Lower Silurian in area W, Sichuan Basin [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(5): 735-745.
- [13] Maxwell S C, Urbancic T I. Real-time 4D reservoir characterization using passive seismic data [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas: SPE, 2002: SPE-77361-MS.
- [14] 宋维琪, 刘军, 陈伟. 改进射线追踪算法的微震源反演 [J]. *物探与化探*, 2008, 32(3): 274-278.
- Song W Q, Liu J, Chen W. Microearthquake source inversion of an improved ray tracing algorithm [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2008, 32(3): 274-278.
- [15] 宋维琪, 孙英杰, 朱卫星. 微地震资料频域相干-时间域偏振滤波方法 [J]. *石油地球物理勘探*, 2008, 43(2): 161-167.
- Song W Q, Sun Y J, Zhu W X. Method of coherent filtering in frequency domain and polarization filtering in time domain for micro-earthquake data [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2008, 43(2): 161-167.
- [16] 刘旭礼. 井下微地震监测技术在页岩气“井工厂”压裂中的应用 [J]. *石油钻探技术*, 2016, 44(4): 102-107.
- Liu X L. The application of downhole microseismic monitoring technology in shale gas “well factory” hydraulic fracturing [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(4): 102-107.
- [17] 邵晓光, 董宏丽, 代雨艳. 微地震监测技术综述 [J]. *吉林大学学报 (信息科学版)*, 2018, 36(1): 55-61.
- Shao X G, Dong H L, Dai L Y. Review of microseismic monitoring technology [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2018, 36(1): 55-61.
- [18] 黄小贞, 谷红陶. 井中微地震监测技术在平桥南页岩气区块应用效果分析 [J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(1): 43-48.
- Huang X Z, Gu H T. Microseismic monitoring technology of shale gas block in the southern part of Pingqiao [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(1): 43-48.
- [19] 刘博, 徐刚, 纪拥军, 等. 页岩油水平井体积压裂及微地震监测技术实践 [J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(6): 172-180.
- Liu B, Xu G, Ji Y J, et al. Practice of volume fracturing and microseismic monitoring technology in horizontal wells of shale oil [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(6): 172-180.
- [20] 赵超峰, 贾振甲, 田建涛, 等. 基于井中微地震监测方法的压裂效果评价——以吉林探区 Y22 井为例 [J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(2): 161-168.
- Zhao C F, Jia Z J, Tian J T, et al. Fracturing effect evaluation based on borehole microseismic monitoring method: A case study from well Y22 in Jilin exploration area [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(2): 161-168.
- [21] 巫芙蓉, 闫媛媛, 尹陈. 页岩气微地震压裂实时监测技术——以四川盆地蜀南地区为例 [J]. *天然气工业*, 2016, 36(11): 46-50.
- Wu F R, Yan Y Y, Yin C. Real-time microseismic monitoring technology for hydraulic fracturing in shale gas reservoirs: a case study from the Southern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(11): 46-50.
- [22] 陈新安. 页岩气水平井分段压裂微地震监测认识及应用 [J]. *特种油气藏*, 2017, 24(1): 170-174.
- Chen X A. Understanding and application of microseism monitoring over staged fracturing in horizontal wells for shale gas development [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2017, 24(1): 170-174.
- [23] 刘家橙, 刘家橘, 王晓燕, 等. 微地震技术评价中牟区块体积压裂的效果 [J]. *地质找矿论丛*, 2019, 34(1): 78-83.
- Liu J C, Liu J J, Wang X Y, et al. Micro-seismic technique evaluation of the effect of volumetric fracturing in Zhongmou area [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2019, 34(1): 78-83.
- [24] 缪思钰, 张海江, 陈余宽, 等. 基于微地震定位和速度成像的页岩气水力压裂地面微地震监测 [J]. *石油物探*, 2019, 58(2): 262-271, 284.
- Miao S Y, Zhang H J, Chen Y K, et al. Surface microseismic monitoring of shale gas hydraulic fracturing based on microseismic location and tomography [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(2): 262-271, 284.
- [25] 李德伟, 杨瑞召, 张都, 等. 水力压裂微地震事件分布趋势分析——以 MY1 井微地震监测为例 [J]. *断块油气田*, 2019, 26(3): 346-349.
- Li D W, Yang R Z, Zhang D, et al. Distribution trend analysis of hydraulic fracturing events: Taking MY1 Well microseismic monitoring as an example [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, 26(3): 346-349.
- [26] 刘振武, 撒利明, 巫芙蓉, 等. 中国石油集团非常规油气微地震监测技术现状及发展方向 [J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(5): 843-853.
- Liu Z W, Sa L M, Wu F R, et al. Microseismic monitor technology status for unconventional resource E&P and its future development in CNPC [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(5): 843-853.
- [27] 余洋洋, 梁春涛, 康亮, 等. 微地震地面监测系统的优化设计 [J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(5): 974-983.
- Yu Y Y, Liang C T, Kang L, et al. Design optimization of surface-

- based microseismic monitoring system for hydraulic fracturing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(5): 974-983.
- [28] 崔庆辉, 尹成, 刁瑞, 等. 地面微地震监测数据处理难点及对策[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(1): 7-13.
- Cui Q H, Yin C, Diao R, et al. Difficulties and countermeasure of surface microseismic monitoring data processing [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(1): 7-13.
- [29] 毛庆辉, 王鹏, 曾隽. 水力压裂微地震事件定位方法综述[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 1878-1886.
- Mao Q H, Wang P, Zeng J. Review of hydro-fracturing microseismic event location methods[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(5): 1878-1886.
- [30] 张晟瑞, 任朝发, 李星缘, 等. 地面微地震资料噪声压制方法[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2522-2527.
- Zhang S R, Ren C F, Li X Y, et al. Denoising method of surface microseismic data[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(6): 2522-2527.
- [31] 代丽艳, 董宏丽, 李学贵. 微地震数据去噪方法综述[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(4): 1145-1159.
- Dai L Y, Dong H L, Li X G. Review of microseismic data denoising methods [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(4): 1145-1159.
- [32] 王程, 王维红. 基于背景噪声和特征值下降比的微地震 SVD 去噪改进方法[J]. 东北石油大学学报, 2020, 44(5): 1-12.
- Wang C, Wang W H. Optimal method of SVD for micro-seismic data based on background noise and eigenvalue ratio of reduction [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2020, 44(5): 1-12.
- [33] 王维波, 周瑶琪, 春兰. 地面微地震监测 SET 震源定位特性研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(5): 45-50, 55.
- Wang W B, Zhou Y Q, Chun L. Characteristics of source localization by seismic emission tomography for surface based on microseismic monitoring[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(5): 45-50, 55.
- [34] Duncan P M. Is there a future for passive seismic? [J]. First Break, 2005, 23(6): 111-115.
- [35] 宋维琪, 朱海伟, 姜宇东, 等. 地面微地震资料震源定位的贝叶斯反演方法[J]. 石油物探, 2013, 52(1): 11-16.
- Song W Q, Zhu H W, Jiang Y D, et al. Bayesian inversion method for surface monitoring microseismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(1): 11-16.
- [36] 杨建国, 李士超, 姚玉来, 等. 松辽盆地北部陆相页岩油调查取得重大突破[J]. 地质与资源, 2020, 29(3): 300.
- Yang J G, Li S C, Yao Y L, et al. Significant breakthrough in the continental shale oil survey in northern Songliao Basin [J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 300.

(上接第 120 页/Continued from Page 120)

- [19] 常柏林, 李效羽, 卢静芳, 等. 概率与数理统计[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 45-47.
- Chang B L, Li X Y, Lu J F, et al. Probability and mathematical statistics[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2001: 45-47. (in Chinese)
- [20] 郑书富, 王佑恩, 刘墨德, 等. 概率论与数理统计[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2018: 36-37.
- Zheng S F, Wang Y E, Liu M D, et al. Probability and mathematical statistics[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2018: 36-37.