



松辽盆地北部页岩油水力压裂微地震监测技术及应用

王维红, 时伟, 柯璇, 韩刚

东北石油大学, 黑龙江 大庆 163318

摘要: 松辽盆地页岩油储量丰富, 是重要的油气资源接替领域。页岩油是一种重要的非常规油气类型, 但是其形成和埋藏的地质条件复杂, 储层物性差。页岩油的勘探、开发都需要进行水力压裂, 微地震监测是压裂效果需要评价的重要技术。根据松页油 1HF 井的地表、地下的地震地质条件和水平段展布特征, 设计较为规则的矩形观测系统实施地面微地震监测, 保证全方位均匀地覆盖目标区。通过保证检波器和地表良好耦合的系列措施, 对埋深 2 000 m 以下的页岩油目标, 采集到肉眼可识别的压裂微地震信号, 采用层析成像技术进行压裂破裂范围计算和微地震事件反演定位。成像结果表明, 各段压裂后造缝效果较为明显, 有效沟通了储层与井眼的流体通道。微地震监测的实践初步证明, 合理的压裂参数设计和工程施工, 可获得页岩油压裂的良好效果, 形成的微地震监测技术是评价压裂效果的重要而有效的手段, 为页岩油的勘探开发提供技术支持。

关键词: 松辽盆地; 页岩油; 微地震监测; 水力压裂

APPLICATION OF MICROSEISMIC MONITORING TECHNOLOGY IN HYDRAULIC FRACTURING OF THE SHALE OIL IN NORTHERN SONGLIAO BASIN

WANG Wei-hong, SHI Wei, KE Xuan, HAN Gang

Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang Province, China

Abstract: Songliao Basin is rich in shale oil reserves, and serves as a significant oil-gas resources replacing field. Shale oil is an important unconventional oil-gas type. Due to complex geological conditions of formation and burial, and poor reservoir physical property, its exploration and development requires hydraulic fracturing, and microseismic monitoring is an essential technology to evaluate fracturing effect. According to the surface and underground seismic geological conditions and distribution characteristics of horizontal stages in SYY-1HF well, a regular rectangular observation system is designed for ground microseismic monitoring to ensure uniform coverage of the target area in all directions. For shale oil buried below 2000 m, the fracturing microseismic signals visible to naked eyes are collected through good coupling of geophone and ground, and tomography technique is used for calculation of fracture range and inversion positioning of microseismic events. The imaging results show that the fracture formation effect is obvious after fracturing in each stage, which effectively links the fluid channel between reservoir and wellbore. The practice of microseismic monitoring has initially proved that reasonable fracturing parameter design and engineering construction can achieve good fracturing effect of shale oil; the microseismic monitoring technology is a significant and effective means to evaluate fracturing effect and provide technical support for exploration and development of shale oil.

Key words: Songliao Basin; shale oil; microseismic monitoring; hydraulic fracturing

收稿日期: 2020-05-08; 修回日期: 2020-05-12. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于数据驱动的逆散射级数层间多次波压制方法”(41974116).

作者简介: 王维红(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地震资料数字处理和勘探地球物理研究, 通信地址 黑龙江省大庆市高新技术产业开发区学府街 99 号, E-mail/wangweihong@nepu.edu.cn

0 引言

松辽盆地大庆探区非常规油气资源具有类型多、分布广、潜力大等特点^[1],近几年松辽盆地北部陆相页岩油调查取得重大突破,极大地推动了页岩油工业化开采进程^[2].对于非常规油气资源的勘探开发,水力压裂储层改造技术是国内外应用较为广泛的一种增产手段,而微地震监测技术则是定量分析、评价水力压裂后储层改造情况的一种技术方法^[3].常用的微地震监测主要有井中监测和地面监测两种方式^[4].微地震监测技术从20世纪70年代开始井中监测,逐步走向成熟.2000年以后随着仪器精度及数据处理手段的提高,地面微地震监测逐步取代井中监测,成为目前应用最为广泛的水力压裂监测方式^[5].一般情况下,微地震监测分为实时监测处理和后期高精度处理两部分^[6-7],通过对微地震数据的高精度处理可以反演水力压裂后地下裂缝的倾角、走向、震源位置及发震时刻、震源震级、压裂面积及SRV体积等参数^[8-11].通过对监测数据的实时处理还可以监测水力压裂施工中裂缝发育的实时情况,进而适时调整压裂方案,降低油气开发成本,为进一步储层改造及开发井位部署提供技术支撑^[12].目前,微地震监测技术在煤层气开发、矿山安全监测等方面也发挥着重要作用,体现出巨大的商业价值^[13].

1 地面微地震监测原理

水力压裂施工中利用地面高压泵组将高黏液体以大大超过地层吸收能力的排量注入井中,进而在压裂井射孔部位产生高压,当井壁附近的地应力和地层岩石抗张强度不能抵抗注入的高压时,地层产生裂缝,继续注入带有支撑剂的携沙液,裂缝向四周延展并形成复杂的裂缝网^[14].地面微地震监测技术是指将检波器阵列部署在地表,采集压裂、注水等工程作业诱发岩石破裂时产生的微地震信号,通过分析和处理微地震信号,求解岩水力压裂过程中的各种裂缝参数,进而对水力压裂效果做出一系列定性、定量分析^[15].

在水力压裂储层改造工程施工中,微地震监测技术的应用主要包含4个方面^[16]:1)储层压裂监测——微地震监测与压裂施工同步进行,可以实现监测水力压裂裂缝的产生,实时或精细确定裂缝的高度、长度、倾角及方位,进而刻画裂缝网络,评价压裂作业效果,优化压裂方案;2)油藏动态监测——针对油田流体驱

动中追踪流体前缘,对于动态掌握地层裂隙状态、提高产能有一定的帮助;3)震源机制研究——可提供有关油藏内部变形机制、震源震级大小、传导性裂缝和活动断裂构造形态的信息;4)多信息综合研究——将微地震监测与其他井中地震技术及反射地震技术综合分析,能够形成地震-地质-工程一体化工作模式,进一步认识储层压裂效果,为下一步井位部署及压裂施工提供技术支撑,降低储层监测的周期和费用.

2 研究区概况

松页油1HF井位于黑龙江省大庆市大同区大榆山村西1.9 km处,构造上位于松辽盆地中央拗陷区齐家凹陷南部,目的层为上白垩统青山口组一段(青一段),井别为参数井,井型为开窗侧钻水平井.此次压裂施工设计为10段,钻探目的为了评价青一段页岩油含油气性和产能(表1).

表1 松页油1HF井简况
Table 1 Profile of SY-1HF well

压裂井号	松页油1HF井(SY-1HF)
井别/井型	参数井/开窗侧钻水平井
构造位置	松辽盆地中央拗陷区齐家凹陷南部
地理位置	黑龙江省大庆市大同区大榆山村西1.9 km
压裂层位	上白垩统青山口组一段(K ₂ qn ¹)
压裂井段	2 765-3 418 m
井口坐标	X:5138828.0 Y:21620127.0
A靶坐标	X:5139333.98 Y:21620225.38,垂深:2 432.31 m
B靶坐标	X:5139554.40 Y:21620268.20,垂深:2 434.18 m
C靶坐标	X:5140120.23 Y:21620379.25,垂深:2 444.39 m
监测站点	三分量站点52个,低频台站12个,有效站点63个

区内植被覆盖严重,交通不便.地质结构复杂,标志层不明显,褶皱、断层、岩性变化不稳定,露头出露较差,故地质复杂程度为Ⅲ级.

物探工作区以第四系覆盖为主,发育冲沟,平均坡度5~10°,高差50~200 m.综合地形等级为2.0级.

3 微地震监测技术应用

3.1 观测系统布设

根据观测系统的调研和论证结果,此次松页油

1HF 井微地震监测设计采用矩形网格观测系统. 部署观测系统基础原则是^[17]: 1) 围绕压裂段地表投影点, 全方位均匀地覆盖目标区; 2) 检波器距井场 300 m 以上且需埋深 2 m, 在保证检波器良好耦合的前提下, 尽量降低各种背景噪声干扰, 避开压裂车群、人员车辆、生产和施工井等; 3) 保证仪器在允许的环境条件下可靠地连续工作.

此次布设检波器为三分量、宽频专用微地震台站, 共部署 6 条测线, 均为近南北向的长测线, 平行于井轨迹部署. 图 1 表示本次微地震监测检波器部署情况, 红色及黄色标记处布设 52 台三分量检波器, 黄色标记位置处增设 12 台低频检波器. 布设检波器过程中, 检波器埋置地表打孔采用拖拉机钻机与洛阳铲相结合的方式, 三分量设备埋深均在 2 m 左右, 低频设备采用浅地表埋置的方式.

采集过程中连续记录地震信号, 检波器时间采样间隔为 2 ms. 监测时除整个压裂段的压裂过程外, 常在压裂前后的一段时间同样进行监测, 这样可有效记

录背景噪声和射孔信号, 在了解噪音情况的同时进一步修正储层速度模型, 为微地震成像提供基础资料.



图 1 松页油 1HF 井和微地震信号采集器布设卫片图
Fig. 1 Satellite image of SYU-1HF well and layout of microseismic signal collectors

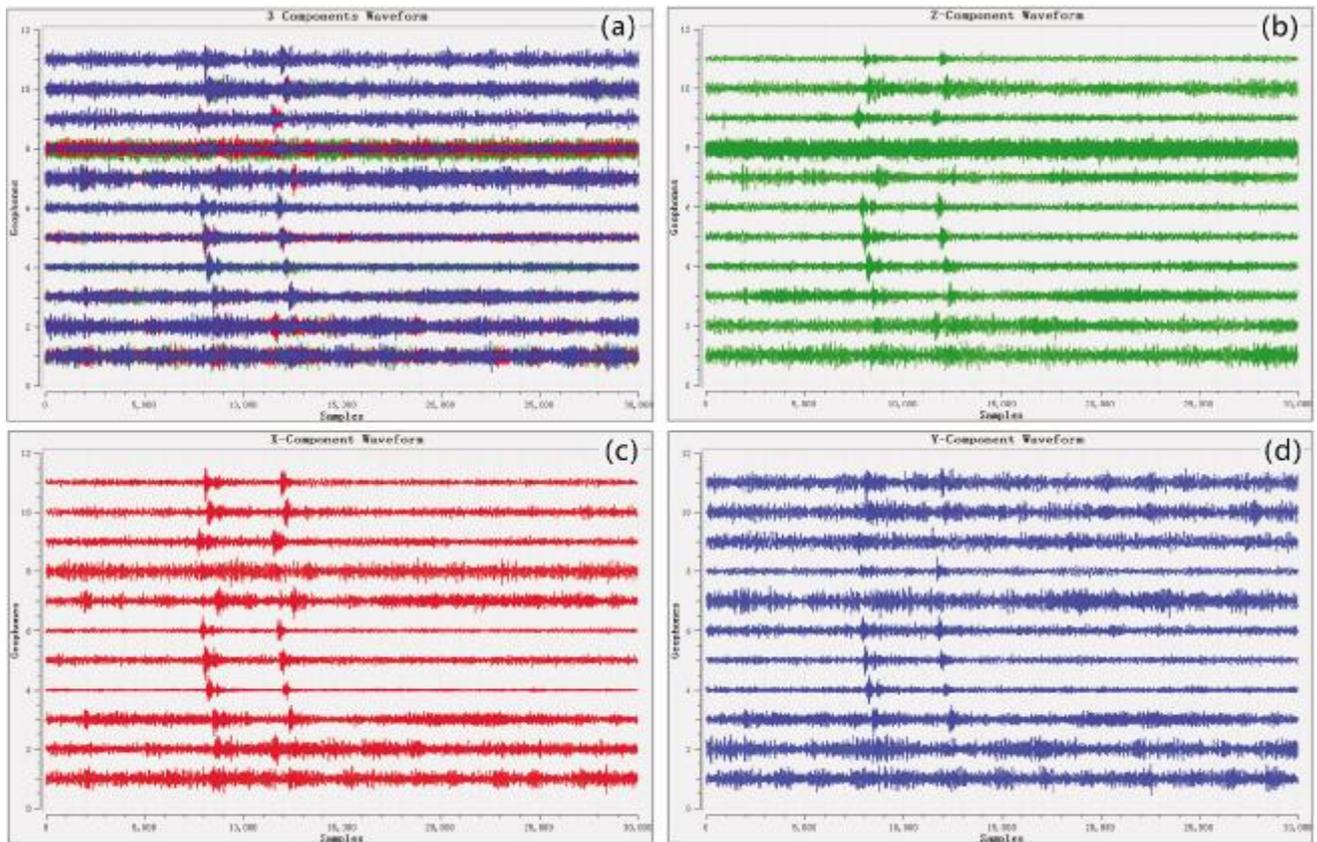


图 2 某时刻采集到的不同分量微地震原始数据

Fig. 2 Original microseismic data collected at a certain moment by components

a—三分量(three components); b—Z分量(Z component); c—X分量(X component); d—Y分量(Y component)

3.2 微地震数据采集

为满足本次地面微地震监测采集需要,确定采样间隔为 2 ms. 共采用 63 套专业采集设备以 SEGY 格式记录存储原始数据,其中 51 套检波器为三分量设备,12 套检波器为低频设备,包括 Sigma 采集台站、三分量检波器 VM-S112、无线传输天线和供电电源. 采集到的原始微地震信号数据如图 2 所示.

3.3 微地震数据处理及解释

油气井压裂微地震监测数据处理的主要目的是确定压裂诱发裂缝的形态,对压裂过程中释放的一系列微地震信号进行震源定位^[18],通过刻画一系列事件点的空间和时间分布来确定压裂裂缝的形态^[19]. 本次施工根据对监测作业区的实地踏勘及地质条件的分析,在压裂井场周围布设地面检波器阵列 (FracGrid) 及 WIFI 数据实时传输系统,利用微震监测仪器车进行监测和数据接收,并向现场压裂工程人员提供水力裂缝的实时成像结果. 技术流程如图 3 所示.

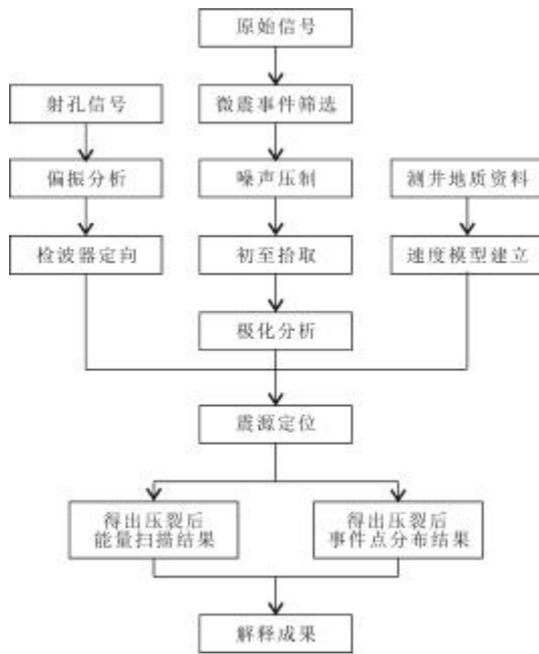


图 3 地面微地震监测技术流程图

Fig. 3 Flow chart of ground microseismic monitoring technology

微地震数据处理的主要工作如下.

1)有效微地震事件信号检测^[20]:从大量连续记录的数据中检测出包含有微地震事件信号的数据段,以用于震源定位处理.

2)信号分析与去噪处理^[21]:分析信号特性,采用

各种滤波算法及噪声压制手段,针对不同类型的信号,有针对性地对不同类型的信号进行滤波与去噪处理,来提高微地震信号的信噪比. 高信噪比的微地震信号可大大提高微地震事件的定位精度.

3)地层速度模型建立与校正:各种震源计算方法都需要利用到地震波在地层中的走时信息,建立区域的等效速度模型或分层速度模型. 然后利用射孔监测到的信号对速度模型进行校正,可以得到比较准确的地层地震波速度模型,从而提高震源计算的精度.

4)震源定位^[22]:采用合适的震源计算方法对监测到的微地震信号进行震源定位计算. 井下监测和地面监测的震源定位方法不同,井下监测的信号信噪比高,一般采用基于初至提取的震源定位方法,地面监测的

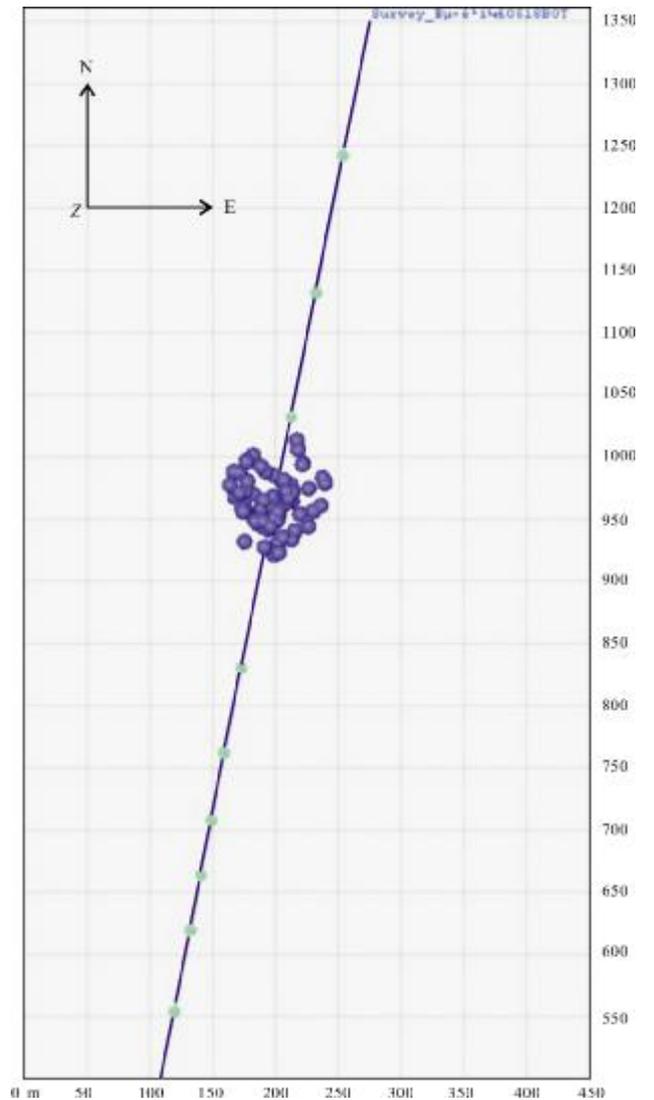


图 4 第四段压裂事件点

Fig. 4 Event points of fracturing in Stage 4

信号信噪比低,一般采用基于波形偏移叠加的震源定位方法.

5)裂缝解释:根据定位结果,结合数据分析算法,最终确定各段裂缝的形成演化过程,定量分析水力压裂整体参数,做出压裂效果评价.

针对本次水力压裂微地震监测施工,通过详细分析压裂井的测井录井资料,对压裂段地层分层,建立 P 波、S 波二维层状模型,并采用裂缝层析成像技术^[23-24],对微地震数据进行基于能量叠加的微地震事件反演定位计算.对全井 10 段压裂原始数据进行处理,这里以第四段处理结果为例.

第四段压裂共监测到明显微地震事件 69 个,处理后得到第四段压裂事件点如图 4 所示,其中蓝色线条表示井轨迹.图 4 为平行于井轨迹的剖面图,坐标表示与井口的相对位置.图 5 为图 4 的局部放大图的解释结果,图中色标表示不同微震源形成的先后顺序,红色线条表示第四段压裂的裂缝连通情况.压裂裂缝形成过程如图 6 所示,图中时间色标由左至右表示微震源形成的先后顺序.通过计算得到第四段压裂有效储

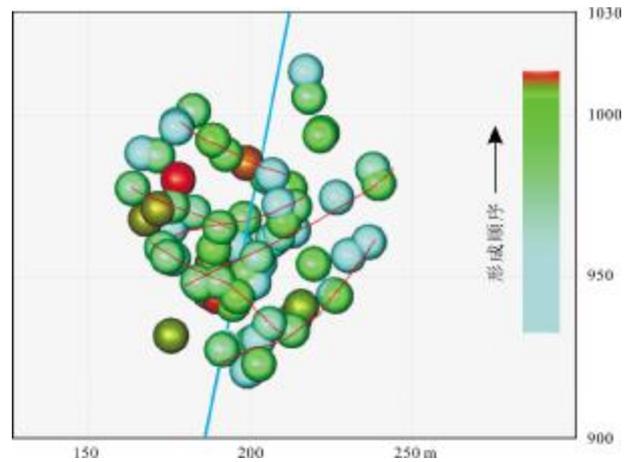


图 5 第四段裂缝解释图

Fig. 5 Interpretation of fractures in Stage 4

层改造体积(SRV)示意图(图 7),图中色标表示压裂区域内能量的相对密度,能量越强表示该部位储层改造的程度越大.

通过分析裂缝解释结果(图 4—6)及第四段能量扫描空间展布图(图 7),发现该段压裂过程中,压裂前期事件点数较少,形成一条主裂缝,裂缝整体沿北东

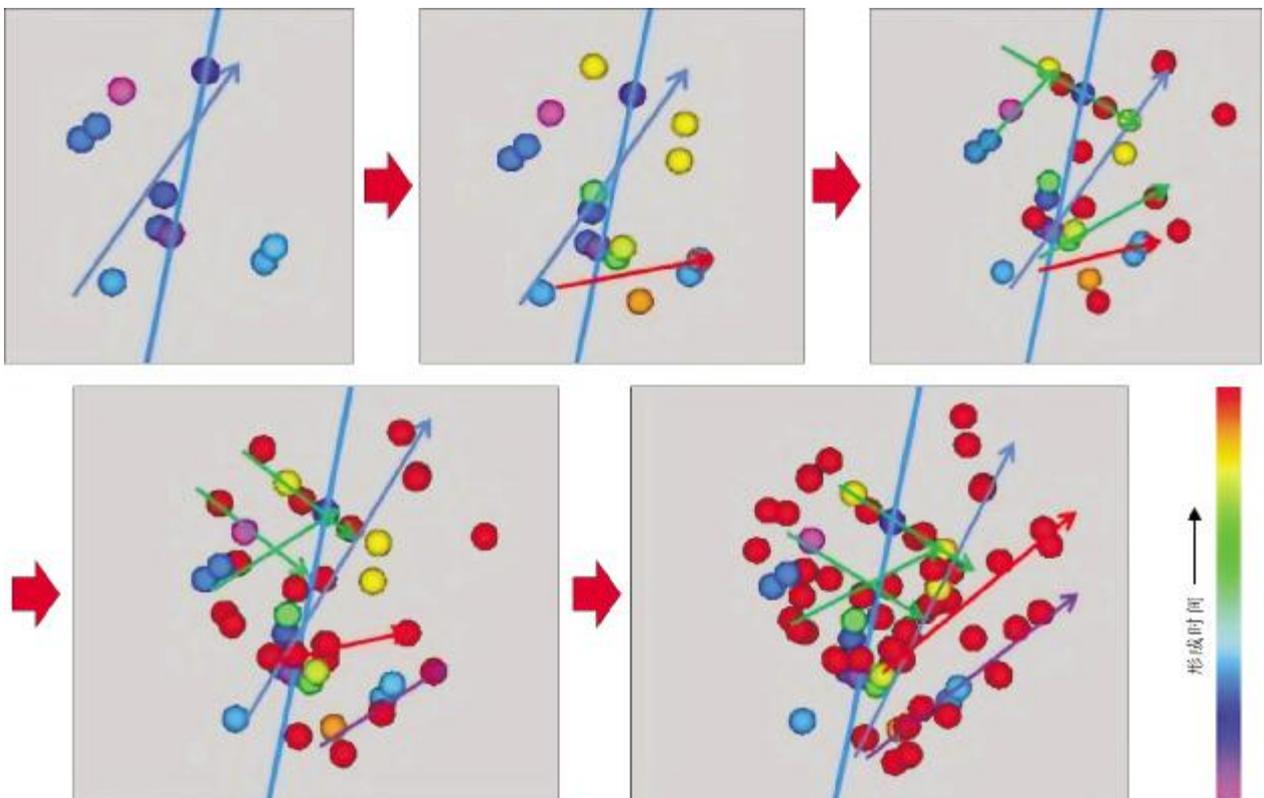


图 6 第四段裂缝形成过程示意图

Fig. 6 Formation process of fractures in Stage 4

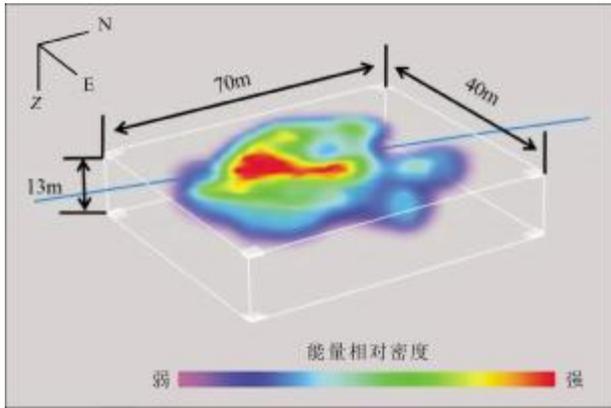


图7 第四段压裂有效储层改造体积示意图

Fig. 7 Sketch of SRV for fracturing in Stage 4

向. 随着压裂进行,事件点数不断增加,水平方向形成与主裂缝平行的裂缝,并构成一条与主应力方向垂直的共轭裂缝.

经综合分析后得到主破裂的空间分布特征如下.

- 1)该段压裂主裂缝长度约为 79 m,其中左缝有效长度约为 38 m,右缝有效长度约为 41 m,主裂缝缝宽约为 20 m,缝高约为 15 m.
- 2)主裂缝的走向为 NE50°.
- 3)有效压裂区域面积约为 8 000 m²,有效压裂区域SRV约为 216 384 m³.
- 4)第四段两翼造缝规模西侧与东侧大致相等,形成一条北东向主裂缝,裂缝整体呈复杂的网状缝.
- 5)压裂段形成理想的共轭裂缝,判断该裂缝最大水平应力方向为北东方向,北西向应为与最大水平应力垂直的最小水平应力方向.

3.4 全井段微地震事件成果解释

应用 3.3 节中微地震数据处理模式对全井段微地震资料进行处理,获得松页油 1HF 井全井段压裂微地震事件点处理结果图(图 8),图中坐标为井口位置的相对坐标. 对数据处理后得到松页油 1HF 井总有效压裂面积图(图 9)、松页油 1HF 井压裂有效储层改造体积图(图 10)和松页油 1HF 井全井段压裂能量扫描二维空间展布图(图 11).

全井段总有效压裂面积图(图 9)是根据不同压裂段裂缝解释结果(图 8)对全井段去包络得到的,该面积是后续计算压裂改造体积的重要参数. 计算表明,松页油 1HF 井总有效压裂面积为 82 818 m².

通过计算得到 SRV 体积示意图(图 10). 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,所以对压裂的高度直接按照目的层的平均

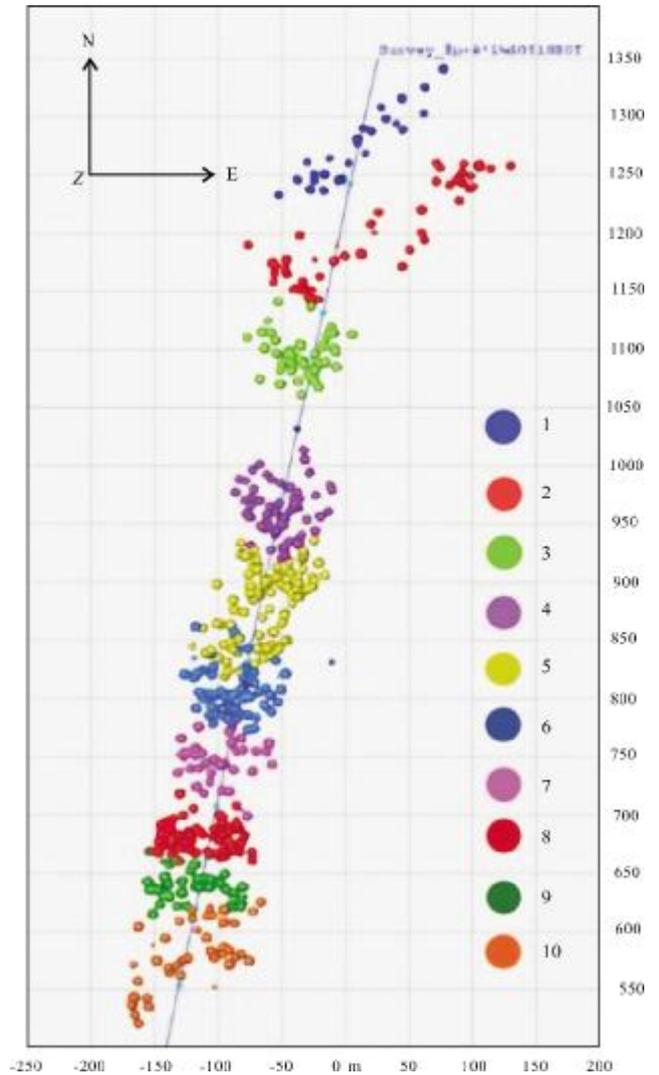


图8 松页油 1HF 井全井段压裂微地震事件点处理结果图

Fig. 8 Process of the microseismic event points of whole well fracturing in SYY-1HF well

- 1—第一段(Stage 1); 2—第二段(Stage 2); 3—第三段(Stage 3); 4—第四段(Stage 4); 5—第五段(Stage 5); 6—第六段(Stage 6); 7—第七段(Stage 7); 8—第八段(Stage 8); 9—第九段(Stage 9); 10—第十段(Stage 10)

厚度进行近似计算. 参考地质和地震综合研究结果,目的层厚度取 12 m,利用图 9 给出的压裂面积与目的层厚度建模,获取 SRV 体积值. 计算表明,松页油 1HF 井压裂有效储层改造体积为 2 115 576 m³.

将松页油 1HF 井全井段压裂能量扫描二维空间展布(图 11)与事件点分布(图 8)进行对比,图 11 中色标表示相对能量强弱,其中红点为射孔点参照物,蓝点为分割器,即表示压裂目的层改造程度. 结果显示,随着桥塞间的距离减小,分布越密集,压裂效果越好.

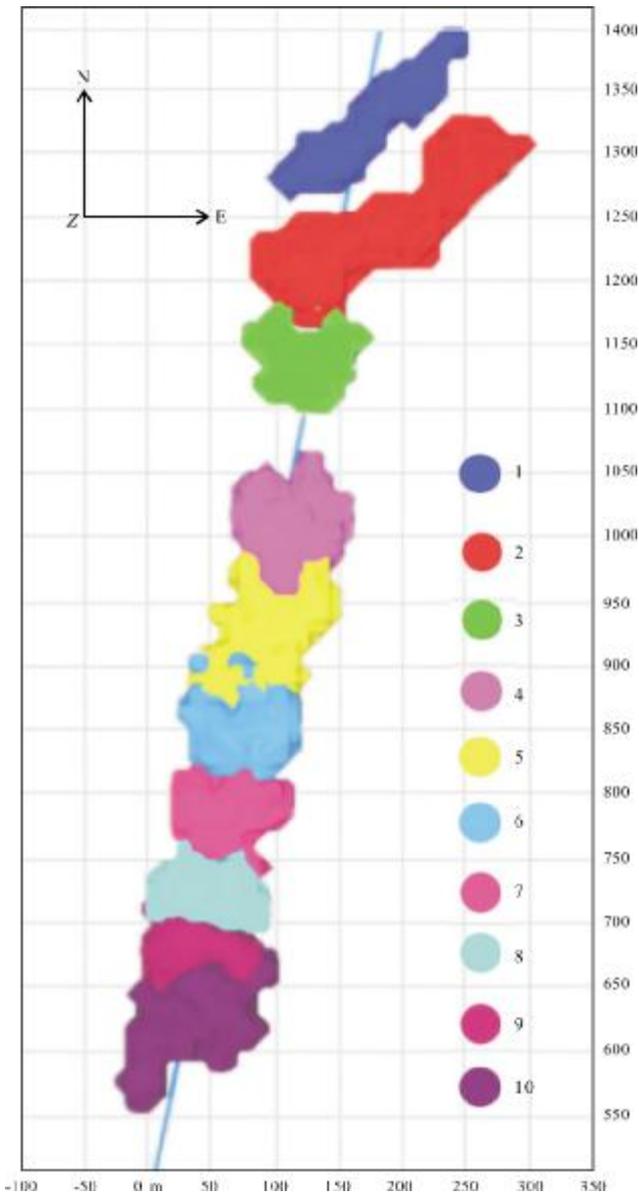


图 9 松页油 1HF 井总有效压裂面积图

Fig. 9 Total effective fracturing area of SYY-1HF well

1—第一段(Stage 1); 2—第二段(Stage 2); 3—第三段(Stage 3); 4—第四段(Stage 4); 5—第五段(Stage 5); 6—第六段(Stage 6); 7—第七段(Stage 7); 8—第八段(Stage 8); 9—第九段(Stage 9); 10—第十段(Stage 10)

4 结论

对于非常规油气的钻采,水力压裂技术得到广泛的应用.本次松页油 1HF 井地面微地震监测工程,通过监测水力压裂产生的微震对压裂裂缝方位、倾角、长度、高度、宽度、储层改造体积等压裂评价参数进行定量计算,进而掌握压裂后人工裂缝延伸情况,为优化井

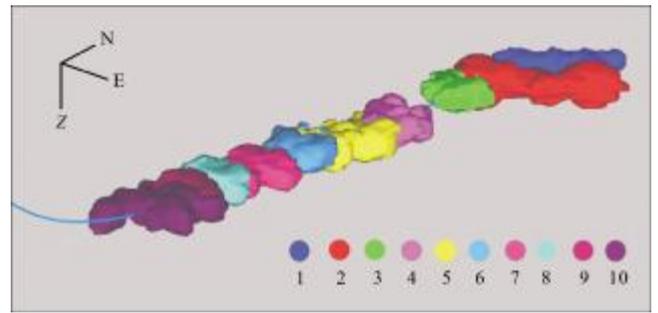


图 10 松页油 1HF 井压裂有效储层改造体积图

Fig. 10 Sketch of SRV for fracturing in SYY-1HF well

1—第一段(Stage 1); 2—第二段(Stage 2); 3—第三段(Stage 3); 4—第四段(Stage 4); 5—第五段(Stage 5); 6—第六段(Stage 6); 7—第七段(Stage 7); 8—第八段(Stage 8); 9—第九段(Stage 9); 10—第十段(Stage 10)

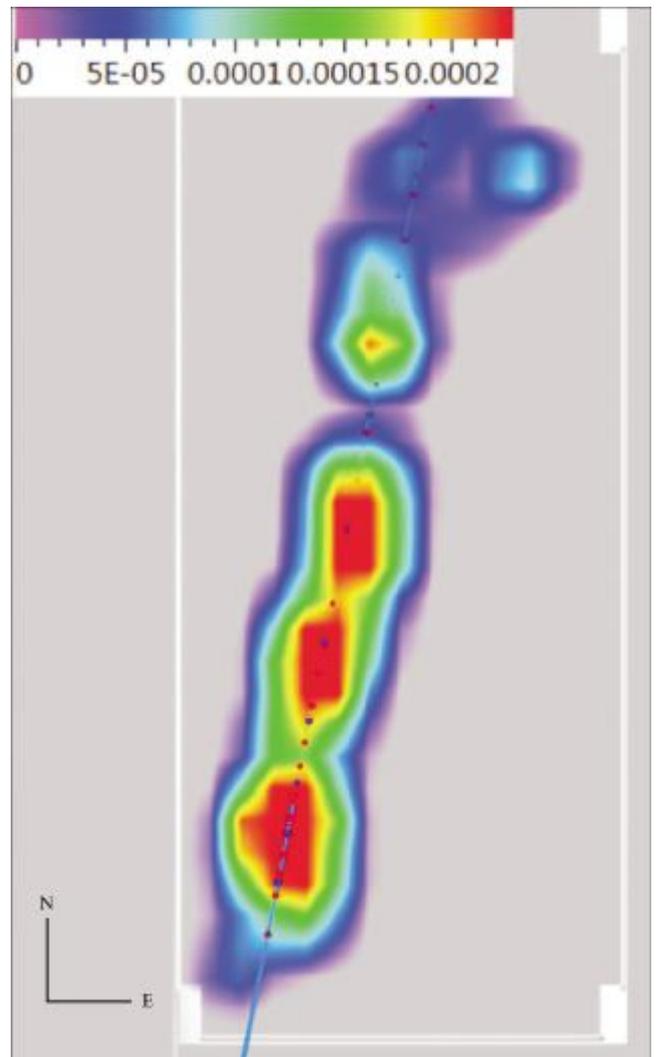


图 11 全井段压裂能量扫描二维空间展布图

Fig. 11 2-D fracturing distribution by energy scanning of the whole well

位部署、压裂工艺设计、油气田设计及生产开发等提供了依据。综合分析松页油 1HF 井地面微地震水力压裂监测成果,取得结论及认识如下。

1)各段压裂造缝效果较为明显,裂缝方位近北东向。水平段除第一和第二段东翼压裂效果较好,裂缝延展长度较大外,其他各压裂段两翼裂缝延展长度大致相当。

2)压裂造缝以主裂缝为主,伴有次要裂缝产生,在一些压裂段呈现复杂的网状缝特征。相比于致密砂岩油气藏,松页油 1HF 井的压裂井整体造缝长度略显不够,综合分析后认为可能是泥页岩的塑性较大,对远离井轨迹的区域压裂造缝难度较大。

3)压裂井整体造缝效果显示,第四、第七和第九段两翼造缝规模相当,第一、第六和第十段西侧稍小于东侧,第二段西侧远小于东侧,第三、第五和第八段西侧稍大于东侧,说明目的储层存在一定的非均质性。

4)对松页油 1HF 井全井段压裂能量扫描二维空间展布图分析后发现,随着桥塞间距离减小,事件点分布越密集,压裂效果较好。

参考文献(References):

- [1]杨海波,杨建国,郭庆霞.大庆探区非常规油气资源潜力及勘探开发对策分析[J].地质与资源,2015,24(3):242-247,183.
Yang H B, Yang J G, Guo Q X. Resources prospects and development strategy of unconventional oil and gas in Daqing exploratory area[J]. Geology and Resources, 2015,24(03):242-247+183.
- [2]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.
- [3]贾利春,陈勉,金衍.国外页岩气井水力压裂裂缝监测技术进展[J].天然气与石油,2012(1):44-47.
Jia L C, Chen M, Jin Y. Technical progress in overseas hydraulic fracture monitoring techniques for shale gas well [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(1): 44-47.
- [4]李振春,盛冠群,王维波,等.井地联合观测多分量微地震逆时干涉定位[J].石油地球物理勘探,2014,49(4):661-666,671.
Li Z C, Sheng G Q, Wang W B, et al. Time-reverse microseismic hypocenter location with interferometric imaging condition based on surface and downhole multi-components [J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2014, 49(4): 661-666,671.
- [5]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.
- [6]Stevenson P R. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana: A study using automatic earthquake processing [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976,66(1): 61-80.
- [7]Allen R. Automatic earthquake recognition and timing from single traces [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1978,68: 1521-1532.
- [8]Baer M, Kradolfer U. An automatic phase picker for local and teleseismic events [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77:1437-1445.
- [9]Ross Z E, Ben-Zion Y. An earthquake detection algorithm with pseudo-probabilities of multiple indicators [J]. Geophysical Journal International, 2014,197: 458-463.
- [10]Vaezi Y, Baan M V D. Comparison of the STA/LTA and power spectral density methods for microseismic event detection [J]. Geophysical Journal International, 2015, 203(3):1896-1908.
- [11]Akram J, Peter D, Eaton D. A k-mean characteristic function for optimizing STA/LTA based detection of microseismic events [J]. Geophysics, GEO-2018-0484.R1.
- [12]吕世超,郭晓中,贾立坤.水力压裂井中微地震监测资料处理与解释[J].油气藏评价与开发,2013,3(6):37-42.
Lv S C, Guo X Z, Jia L K. Microseismic monitoring data processing and interpretation of horizontal fracturing wells [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(6): 37-42.
- [13]田峰.地面微地震压裂监测技术在煤层气开发中的应用[J].中国煤炭地质,2018,30(8):75-78,90.
Tian F. Application of surface microseismic fracturing monitoring technology in CBM exploitation [J]. Coal Geology in China, 2018, 30(8): 75-78,90.
- [14]周新国.油层水力压裂原理的探讨与技术应用[J].科技致富向导,2009(20):94-95.
Zhou X G. Discussion on hydraulic fracturing principle of oil reservoir and its technical application [J]. Guide of Sci-tech Magazine, 2009 (20): 94-95.
- [15]Duncan P M. Microseismic monitoring: Technology state of play[C]. 2010, SPE 131777.
- [16]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, 2002,2002,41(2):226-231.
- [17]任朝发,赵海波,陈百军,等.地面微地震监测采集观测系统定位精度的影响因素分析——以大庆SZ探区为例[J].石油物探,2018,57(5):668-677.

- Ren C F, Zhao H B, Chen B J, et al. Analysis of location precision factors in surface microseismic monitoring acquisition geometry: A case study of an SZ exploration area in Daqing, China [J]. *Petroleum Geophysical Prospecting*, 2018, 57(5): 668–677.
- [18]李红梅. 微地震监测技术在非常规油气藏压裂效果综合评估中的应用[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(3): 129–134.
- Li H M. Application of micro-seismic monitoring technology to unconventional hydrocarbon reservoir fracturing evaluation [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(3): 129–134.
- [19]芮拥军. 地面微地震水力压裂监测可行性分析[J]. *物探与化探*, 2015, 3(2): 341–345.
- Rui Y J. Feasibility analysis of surface micro-seismic hydraulic fracturing monitoring[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 3(2): 341–345.
- [20]张伟, 王海, 李洪臣, 等. 用变换时窗统计能量比法拾取地震初至波[J]. *物探与化探*, 2009, 33(2): 178–180.
- Zhang W, Wang H, Li H C, et al. The application of statist energy ratio of transform time windows to the pickup of seismic first arrival wave [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, 33(2): 178–180.
- [21]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, 124.
- Wang C, Wang W H. Optimal method of SVD for micro-seismic data based on background noise and wigenvalue ratio of reduction [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(5): 1–12, 124.
- [22]Julian B R, Foulger G R. Time-dependent seismic tomography [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 182(3): 1327–1338.
- [23]杨瑞召, 李德伟, 庞海玲, 等. 页岩气压裂微地震监测中的裂缝成像方法[J]. *天然气工业*, 2017, 37(5): 31–37.
- Yang R Z, Li D W, Pang H L, et al. Fracture imaging of the surface based microseismic monitoring in shale gas fracking: Methods and application [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(05): 31–37.
- [24]吴建光, 张平, 吕昊, 等. 基于震幅叠加的微地震事件定位在地面监测中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(1): 255–264.
- Wu J G, Zhang P, Lv H, et al. Application of microseismic event location using amplitude summation in surface monitoring [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(1): 255–264.

(上接第 394 页/Continued from Page 394)

- [13]Schapper S, Jefferson R, Calvert A, et al. Anisotropy velocities and offset vector tile prestack-migration set vector domain [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2009, 28: 1172–1176.
- [14]Craft K L, Mallick S, Meister L J, et al. Azimuthal anisotropy analysis from P-wave seismic travelttime data [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1997, 16(1): 1214–1217.
- [15]Fatkhani R, Urosevic M. The use of P-wave reflectivity to detect fractured sands and anisotropy clays [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2001, 118–121.
- [16]Cordson A, Galbraith M. Narrow-versus wide-azimuth land 3D seismic surveys[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(8): 764–770.
- [17]Thompson A, Rich J, Ammerman M. Fracture characterization through the use of azimuthally sectorized attribute volumes [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2010, 1433–1437.
- [18]Kallweit R S, Wood L C. The limits of resolution of zero-phase wavelets[J]. *Geophysics*, 1982, 47(7): 1035–1047.
- [19]Williams M, Jenner E. How important is the effect of azimuthal anisotropy in 3-D seismic data? Enhancing data quality and extending the potential of the 3-D interpretation [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2001, 126–128.
- [20]Williams M, Jenner E. Interpreting seismic data in the presence of azimuthal anisotropy; or azimuthal anisotropy in the presence of the seismic interpretation [J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(8): 771–774.
- [21]赵忠华. 炮检距矢量道集非刚性匹配方位各向异性时差校正[J]. *大庆石油地质与开发*, 2019, 38(1): 141–146.
- Zhao Z H. Azimuthal anisotropy moveout correction by non-rigid matching for the offset vector gather [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(1): 141–146.
- [22]马涛, 王彦春, 李扬胜, 等. OVT 属性分析方法在采集设计中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(1): 1–8.
- Ma T, Wang Y C, Li Y S, et al. Application of OVT attribute analysis in seismic acquisition [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(1): 1–8.
- [23]孟阳, 许颖玉, 李静叶, 等. OVT 域地震资料属性分析技术在断裂精细识别中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(S2): 289–294.
- Meng Y, Xu Y Y, Li J Y, et al. Fault identification with OVT-domain seismic attribute analysis [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S2): 289–294.