

井中微地震监测质量控制与微地震事件筛选方法

任朝发

中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712

通讯作者:Email:renchaofa@petrochina.com.cn

项目支持:中国石油天然气股份公司重大科技专项“大庆油气持续有效发展关键技术研究与应用”(2016E-0201)

引用:任朝发. 井中微地震监测质量控制与微地震事件筛选方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(5): 44-52.

Cite: REN Chaofa. Quality control of downhole micro-seismic monitoring and interpretation method of micro-seismic events [J]. Well Testing, 2019, 28(5): 44-52.

摘要 为保证井下微地震监测观测系统设计的准确性与数据采集质量,以松辽盆地一口实际水平井的水力压裂井下微地震监测为例,应用微地震监测数据采集观测系统设计,检波器旋转、速度模型校正、初至拾取和事件定位等关键环节质量控制方法,保证微地震监测结果的准确性;综合测井数据、三维地震数据和压裂施工数据对微地震事件进行综合分析评价;运用数据信噪比统计图、震级距离图与时间距离图对微地震事件进行筛选,获得了能客观反映压裂造缝的数据集。综合判断认为,H1井压后分段求产产量不理想,进一步证实地质条件下不宜控制同一段两个射孔点的同时起裂和造缝。在相邻的另一口水平井压裂设计优化时,缩短段间距,每一段只射一个孔进行造缝,取得良好的应用效果。该微地震事件筛选工作可在优化压裂设计中发挥重要作用。

关键词 微地震监测; 数据采集; 压裂设计; 质量控制; 信噪比; 筛选; 分析评价

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.05.008

Quality control of downhole micro-seismic monitoring and interpretation method of micro-seismic events

REN Chaofa

Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163712, China

Abstract: In order to ensure the accuracy and data acquisition quality of downhole micro-seismic monitoring and observation system design, taking the actual downhole micro-seismic monitoring of a horizontal well in Songliao Basin as an example, the design of micro-seismic monitoring data acquisition and observation system, the quality control methods of key links such as geophone rotation, velocity model correction, first break pickup and event location were applied to ensure the accuracy micro-seismic monitoring. Meanwhile, the comprehensive analysis and evaluation of micro-seismic events were carried out by integrating logging data, three-dimensional seismic data and fracturing construction data. Finally, the micro-seismic events were selected by using data signal-to-noise ratio statistics map, magnitude-distance map and time-distance map, and the data set which can objectively reflect fracturing was obtained. Comprehensive judgment shows that the production rate of well H1 after fracturing was not ideal, which further proved that it is not easy to control the simultaneous initiation and fracturing of two perforation points in the same section under geological conditions. When optimizing the fracturing design of another adjacent horizontal well, the interval between segments was shortened and only one hole was perforated in each segment for fracturing. The screening of micro-seismic events can play an important role in optimizing fracturing design.

Keywords: micro-seismic monitoring; data acquisition; fracturing design; quality control; signal-to-noise ratio; screening; analysis and evaluation

低渗透油气藏和非常规油气藏普遍采用体积压裂工艺进行储层改造,为了掌握压裂后人工裂缝延伸情况,为后续工作提供依据,需要对压裂裂缝时空展布进行监测。在众多的裂缝监测方法中,井下微地震监测具有事件信号可靠及定位精度高的

优点,在油气田储层改造中的应用日趋成熟。刘振武等^[1-2]报道了微地震监测技术被大规模应用于非常规油气储层改造压裂监测,不仅能实时确定微地震事件发生的位置,能对压裂裂缝方位、倾角、长度、高度、宽度、储层改造体积进行定量计算,还能

评价压裂作业效果,优化压裂方案。高东伟等^[3]介绍了在涪陵页岩气开发中,根据先压裂井组的井中微地震监测成果,优化相邻井组压裂方案中的段间距、射孔位置、前置破裂提排量,并实时优化中后期暂堵转向工艺,实现了改造体积及效益最大化。李红梅^[4]和容娇君等^[5]也分别通过典型的压裂微地震监测项目分析了人工裂缝空间发育特征及其影响范围,同时结合钻录井、测井、三维地震,以及压裂施工过程参数曲线等资料,综合评估了非常规油藏压裂改造效果,精细地解决储层相关的油藏地质问题。张云银等^[6]应用微地震监测数据评估了砂砾岩体、泥页岩、致密砂岩等不同类型储层的压裂改造效果,取得了很好的应用效果。Maxwell S. C. 和 Estrada E. 等^[7-8]论述了成功利用微地震裂缝成像在井距、井位部署等方面的工程应用实例。综上所述,前人的研究均是基于微地震监测结果准确、真实的假设,而实际不容易达到理想情况。现以实际微地震监测为例,讨论微地震监测全过程中的质量控制方法,确保用于后续解释分析事件集的相对准确性。

1 质量控制环节与方法

微地震监测技术是通过观测生产活动过程中所发生的微小地震事件来分析其影响的地球物理技术^[9],其特点:一是能量微弱,水力压裂诱发微震的震级一般小于0级,油气采出和流体注入诱发微震的震级通常为-3~0级;二是频率很高,频带一般为100~1 500 Hz,持续时间短(小于15 s),衰减快,一般传播400~600 m后便淹没在背景噪音里^[10-11]。为了保证充分发挥微地震监测在地震-地质-工程一体化多信息综合研究中的作用,必须做好微地震数据采集、室内精细处理过程中关键环节质量控制和微地震事件定位结果筛选工作。

1.1 数据采集

与常规地面地震一样,数据采集是一切工作的基础,采集数据的质量直接决定井下微地震监测的成败^[12-15]。井下微地震监测数据采集中,核心质量控制因素有两个:(1)监测井位的选择;(2)监测井中检波器的布置。监测井距离宜小于600 m,且固井质量良好,并做好降低井口液面等工程工作,以减小监测井内的噪声影响^[16-19];检波器宜采用10级以上、级间距20 m,跨越压裂储层段布设。

1.2 数据处理

微地震数据处理是依据所记录的微地震信号

计算微地震震源信息,为保证定位结果准确可靠,需要对关键处理环节实施严格的质量控制。微地震处理中的关键质量控制环节主要包括:检波器旋转定向、速度模型校正、初至拾取与反演定位。

井下微地震监测三分量检波器在下放过程中,各个检波器的水平分量方位是随机的。在进行微地震信号的震相分离之前,必须进行检波器的旋转定位,以此确定水平分量的相对方位。检波器方位角的确定主要有能量准则法、直方图法和矢端曲线法3种方法。实际工作中,矢端曲线法使用比较广泛^[20]。由于射孔信号源位置和方位都是已知的,激发能量比较大,资料信噪比高,利用其P波直达波,根据矢端曲线,求出每个检波对应的角度。室内精细处理中,比较好的方案是采用从不同方位多个震源计算检波器水平分量方位,绘制相应质量控制图件,检验检波器旋转质量与检验监测过程中有无检波器重新起放等异常行为。

井下微地震资料处理一般既需要纵波速度也需要横波速度,两种震相都可在记录的地震道中识别出来,同时采用纵、横波定位事件更为准确。可以利用不同资料建立速度模型,包括声波测井、地质模型、VSP和三维反射地震资料。其中,声波测井资料应用广泛,作为创建速度模型的初始输入。再结合地层岩石物理特性、射孔资料,通过调整速度使其与校验炮观察到的纵、横波波至时差或已知炮点和估计炮点位置相匹配,对速度模型进行校正。另外,在裂缝性地层、页岩的特殊地质条件下,或者校验炮很难校准的一些情况下,需要考虑横向非均质性、HTI和VTI各向异性对速度模型的影响^[21-23]。

微地震信号检测主要根据有效事件与周围噪音在域的种类(如振幅、频率)、波形的相似性、波矢量的相似性、偏振、能量等方面的区别。微地震信号自动拾取或震相识别方法有能量比法、AIC算法、极化分析法,以及卡尔曼估计等方法,其中前两种是工业界广泛应用的自动拾取方法,适用于在噪声水平不断变化的情况下保持一致的信噪比^[24]。室内精细处理时,依据时距关系特征、道间相关性、偏振一致性等质量控制方法,通过人机交互处理,最终确定事件与提高初至拾取精度,同时需要联合使用定位功能。

井下微地震监测震源定位算法众多,其中波至时间反演算法是一种成熟,且主流的定位方法。该方

法首先对到达各检波器的纵波和横波的波至时间进行可视化拾取或自动拾取,然后对剩余波至时间进行最小二乘求解,使所有检波器波至残差最小化(理论波至和实际拾取波至)。该方法可以通过协方差矩阵分析来估计统计位置的不确定性(这在微地震解释数据评估中很重要),通常使用均方根残差作为数据拾取误差的度量,用不确定性椭圆体表示各个方向上的误差^[25]。在反演定位之后,需要将定位的微地震事件点逐一返回到波形数据进行质量控制,根据理论初至和实际初至差异、方位角差别等,二次修正初至拾取,从而提高初至拾取及事件定位精度。

1.3 井下微地震事件解释筛选

微地震解释的目的是推断压裂裂缝几何结构的发育情况,并理解水力压裂或注气水过程的微地震地质力学响应。但微地震事件解释之前必须对微地震事件的定位不确定性进行评估和筛选,尽量消除解释误差。综合微地震事件质量、 b 值(断层活化、水力压裂诱发的微地震事件的 b 值分别约为 1、2)、地质和反射地震等数据分析,对微地震事件进行筛选,以得到更好的数据集用于裂缝参数的解释^[26]。

筛选方法具体包括以下 4 种:(1)确认和校正潜在的监测偏差。单井井中监测具有固定的与距离有关的偏差,小震级事件会在近距离被检测到,根据震级-距离关系图进行震级切除,消除此偏差;(2)利用微地震事件置信度或信噪比等基本数据质量控制准则进行过滤,以选择高质量的数据;(3)利用 b 值计算判断微地震事件的产生源,再结合反射地震进行验证,正常情况下微地震事件点应该在储层内部,除非有天然裂缝发育,沟通储层内外;(4)寻找在有源注入时间段内的微地震事件,在这个时间段之外产生的微地震事件对支撑剂的流动贡献不大。

2 应用实例

压裂井 H1 井位于松辽盆地中央断隆区龙虎泡-大安阶地龙虎泡构造,为构造-岩性油藏,主力油层为高三组油层,油层整体构造为西高东低的单斜,厚度 46~64 m。高三组岩性为一套深灰色、灰色泥岩和灰、深灰色含泥、含钙粉砂岩组合。压裂井完钻井深 3 348 m,其中水平段进尺 1 225 m,钻遇砂岩 1 225 m,砂岩钻遇率 100.0%。目的层最大水平地应力分别为

北东 75°、115°,井筒方向为北东 180°。

压裂工艺为多段切割压裂,设计簇间距离平均为 80 m,每段射开 2~3 簇,全井共压裂 7 段 15 簇,对第 5 段至第 7 段进行了微地震监测。观测系统如图 1 所示,图中红色点为压裂井 H1 井压裂段射孔位置,垂深为 1 832.97~1 837.00 m,绿色点为布置在监测井 Z1 井中的检波器阵列,测深 1 945.33~1 704.92 m,距离第 5 段与第 7 段压裂射孔点水平距离在 390.00~672.00 m。9 级三分量检波器布置段固井质量良好,节间距为 30 m,跨越压裂目的层,中间位置的检波器基本上和目的层处于同一深度,对目的层有一个很好的覆盖角度。为了最小化监测井内的噪音影响,检波器下放前对井筒进行刮削作业,保证耦合质量,重点刮削检波器放置深度及附近井段,做到在套管上没有石蜡或泥浆等附着物;并将井筒内液体置换为清水,降液面至距井口 300 m 左右,在检波器阵列下 50 m 用桥塞封堵以射孔层,并且关闭了方圆 250 m 范围内的抽油泵生产井,停止所有钻井施工。

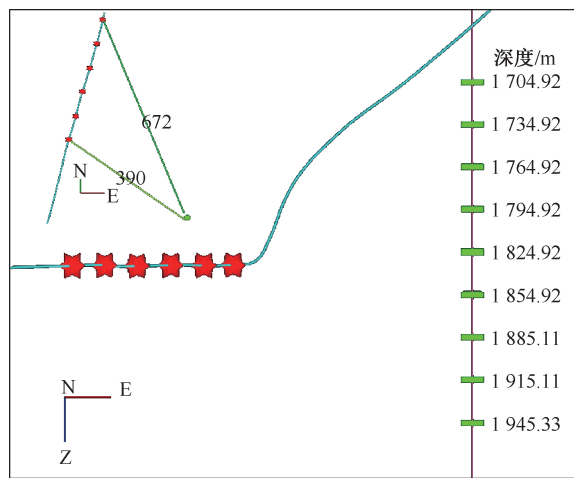


图 1 井下微地震监测观测系统图
Fig.1 Downhole micro-seismic monitoring and observation system chart

图 2 展示的是采集数据中的一个破裂信号,P 波与 S 波初至起跳清晰,信噪比较高。经过对监测数据的检查评价,80%的破裂信号采集质量好,满足后续定位处理要求。图 3 显示使用 H1 井 4 个射孔信号对检波器进行旋转定位质量控制图件,图中不同颜色的连线代表同一个检波器依据不同射孔信号的旋转定向角度。质量控制图显示,同一个检波器依据所用的不同射孔信号定位出的方位角角度差别很小,判断此次检波器旋转定向质量很好,监测过程中无检波器移动或者滑动等异常情况。

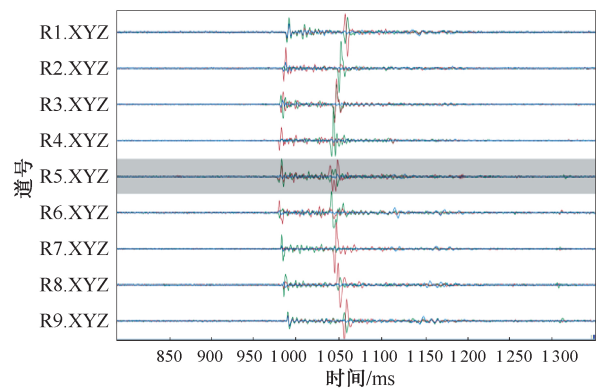


图 2 压裂破裂信号
Fig.2 Breakdown signal of fracturing

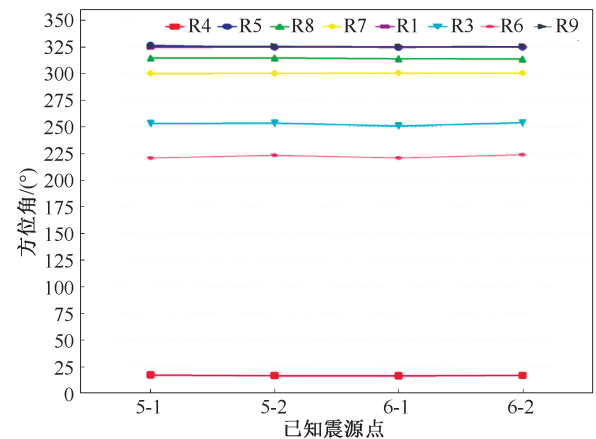


图 3 检波器旋转质量控制图
Fig.3 Quality control chart of geophone rotation

由于监测井 Z1 井只有纵波时差和密度,无横波时差,根据此区块已有的横波信息设定初始纵、横波比值为 1.70 计算得到横波速度,用二者建立初始速度模型,再用已知空间位置的射孔信号进行纵、横波到时分析,对初始速度模型进行反演校正。图 4 是 H1 井 4 个射孔信号校正后的速度模型质量控制图。

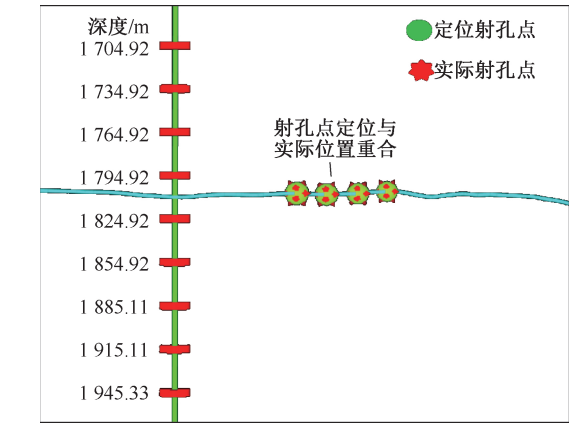


图 4 速度模型校正质量控制图(侧视图)
Fig.4 Quality control chart of velocity model correction

可以看出,速度模型校正后射孔信号定位结果(绿点)基本与射孔位置(红点)重合,实际工作中定位误差多控制在 5 m 以内。

运用能量比法、AIC 算法等方法对微地震信号进行自动检测与初至拾取后,再人机交互确认微地震事件与检查初至拾取,保证初至拾取精度。图 5 根据压裂层段位于检波器阵列中部的空间关系,微地震信号具有两端开口比中部大的双曲或抛物线时矩关系特征;再根据有效事件,在不同检波器上具有很好的波形相关性、相对走时特征明显进一步甄别有效事件;最后根据 P 波、S 波到时位置、方位角和倾角关系提高初至拾取精度。图中右侧的圆中的蓝色线代表方位角,红色代表倾角。从图中可以看出,P 波和 S 波的方位角在所有检波器上基本垂直,初至起跳位置拾取准确。在微地震事件反演定位之后,还可根据理论初至和实际初至差别,二次修正初至拾取,提高初至拾取及事件定位精度。

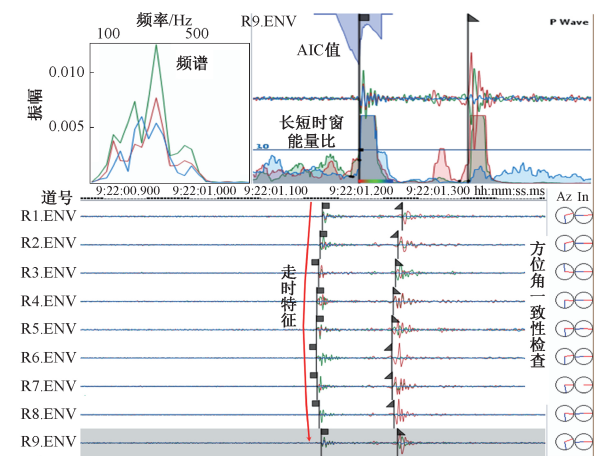


图 5 微地震事件初至拾取质量控制图
Fig.5 Quality control chart of first arrival pickup of micro-seismic events

质量控制是微地震震源定位的基础,有以下 3 种评价手段:

(1)把定位的微地震事件点返回波形记录上,查看事件的有效性。图 6 从方位角、初至线等精细调整提高事件的定位精度。图中上部事件离目的层很远,P 波、S 波走时特征为上部检波器先接收到信号,下部检波器后接收到信号,判断微地震事件点确实位于上部,实际拾取初至统计方位角方向与理论方位角差别很小,精细拾取的初至规律线(红色)与理论初至线(黑色)也基本相符。综合上述信息,该事件点的初至拾取与定位准确,确为真实的微地震事件,判断为压力传导引起上部地层产生的

裂缝信号(干事件),图中下部事件点同理。

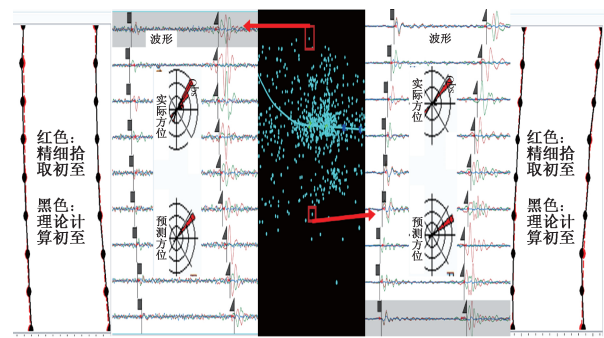


图 6 定位事件与波形数据联合质量控制图
Fig.6 Joint quality control chart for locating events and waveform data

(2)用理论初至与实际初至残差统计图评价定位结果的优劣,一般要求主体残差小于 3 ms,如图 7a 所示,蓝色代表 P 波初至拾取残差,红色代表 S 波初至拾取残差。从图可知,此次精细处理绝大部分事件的初至残差满足要求。

(3)用信噪比评价初至质量的好坏和事件的可靠程度(图 7b),此次精细处理中 S 波(红色)的信噪比普遍高于 P 波(蓝色),而且信噪比可以用于后续裂缝解释中微地震事件筛选的主要依据。

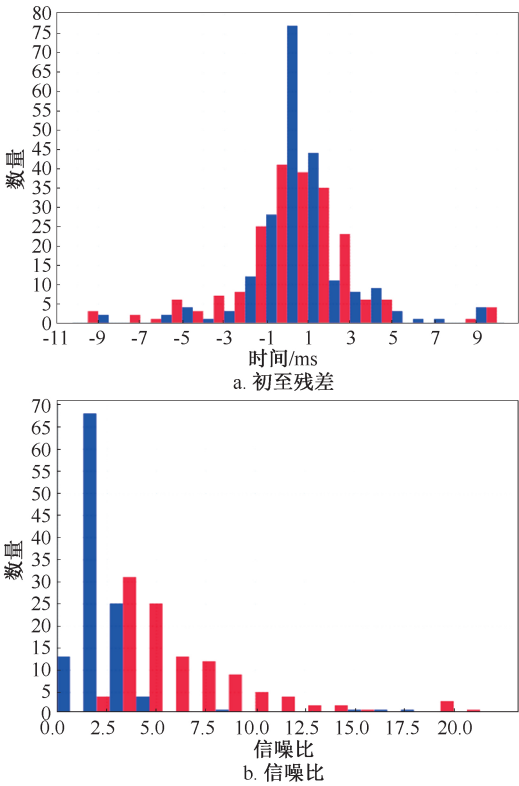
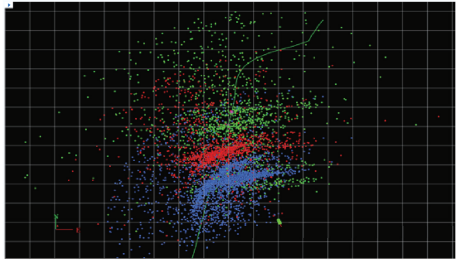
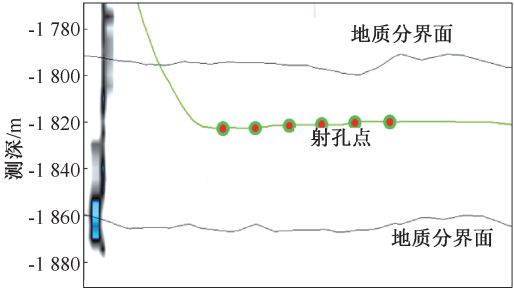


图 7 初至残差与信噪比直方图统计
Fig.7 Histogram statistics of residual and signal-to-noise ratio

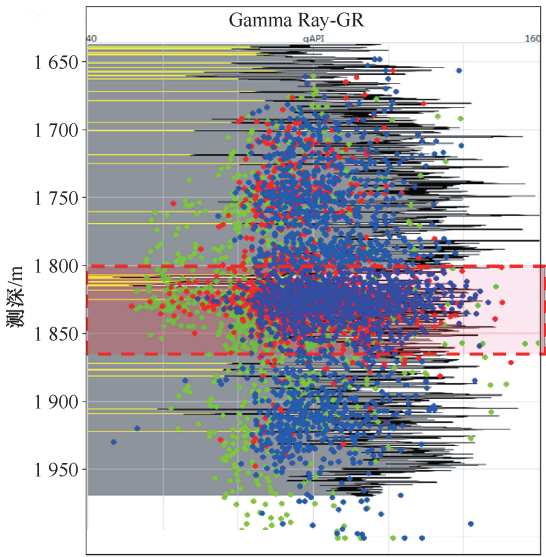
图 8a 所示为应用一系列的质量控制方法后的最终定位结果的俯视图,不同颜色代表不同压裂段的微地震事件,蓝色代表第 5 段,红色代表第 6 段,绿色代表第 7 段;微地震事件点揭示的裂缝在平面上的展布规模很大。根据邻井交叉式多极子阵列声波测井解释成果,储层最大应力 38.2 MPa,最小应力 35.0 MPa,水平两相应力差 3.2 MPa,应该为简单缝。图 8c 将微地震事件点与 Z1 井测井 GR 曲线叠合显示,图中红框代表压裂目的砂岩储层,目的层上下发育很厚的泥岩层,具有很好的岩性遮挡。但图中显示很多事件进入到非目标储层内,在纵向上的逢高很高,而且有分层现象,不合理。接着再用三维地震蚂蚁体属性判断射孔位置并无天然裂缝存在(图 8b)。



a. 微地震定位结果俯视图



b. 过井轨迹蚂蚁体属性剖面



c. 微地震事件与GR曲线叠合图

图 8 微地震事件综合分析图

Fig.8 Comprehensive analysis plots of micro-seismic events

而 H1 井的三段压裂施工曲线形态都比较正常,第 5 段、第 6 段和第 7 段在压力随时间变化和微地震事件形成方面都比较相似(图 9),排量稳定,正常开裂。在前置液阶段,当排量稳定时,地表压力逐渐减少。

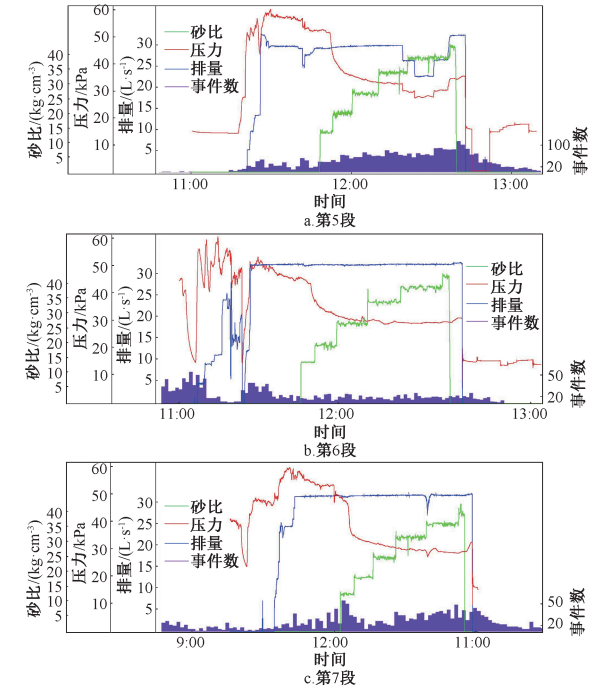


图 9 压裂施工曲线与微地震事件图
Fig.9 Fracturing construction curve and micro-seismic event map

稳定的下降趋势表明裂缝根据 KGD 模型或者 Radial 模型在井筒附近开裂。当支撑剂到达射孔段的时候,考虑到由于压裂液密度增大而带来额外的静水力学压力,地表压力继续呈指数趋势减少,当砂比达到一定量时,地表压力最终稳定,根据 KGD 模型或者 Radial 模型开裂的裂缝最终的高度是可控的。第 6 段和第 7 段开泵之前,能够观察到少量微地震事件,考虑是由于之前压裂段局部应力受到本段活动影响发生变化引起,但并不表示两段的裂缝有连通。再将微地震事件分上、中、下三层分别计算 b 值,其值均在 2.1 左右,分析认为是水力压裂诱发的微地震事件。综合分析可知,该监测结果的微地震事件形态都正常,逢高异常不是由天然裂缝引起。因此,在微地震事件解释前,还需作进一步的质量控制分析。

本文对微地震事件的筛选主要有消除数据质量误差、消除监测井偏差、干事件识别 3 个内容。信噪比是事件波形质量的指标,高信噪比通常代表更精确的事件定位。依靠微地震事件的信噪比消除数据质量误差,阈值选取依据整体质量和事件数数量。图 10 显示 H1 井三段微地震事件定位结果

的信噪比直方图。经过分析,确定第 5 段信噪比的阈值为 2、第 6 段为 1.9、第 7 段为 2.1,信噪比低于阈值的微地震事件被删除,保留信噪比大于阈值的微地震事件。

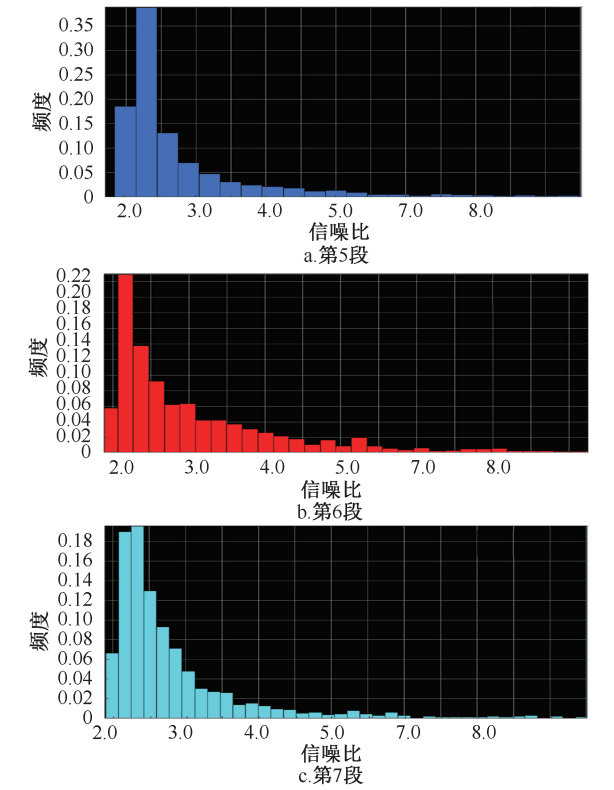


图 10 H1 井各段微地震定位事件信噪比统计直方图
Fig.10 Statistical histogram of signal-to-noise ratio of micro-seismic locating events in Well H1

图 11 是全三段经过信噪比筛选后的整体效果,显示使用具有较高信噪比的较小数据集揭示的裂缝形态在平面与纵向上都进一步清晰。

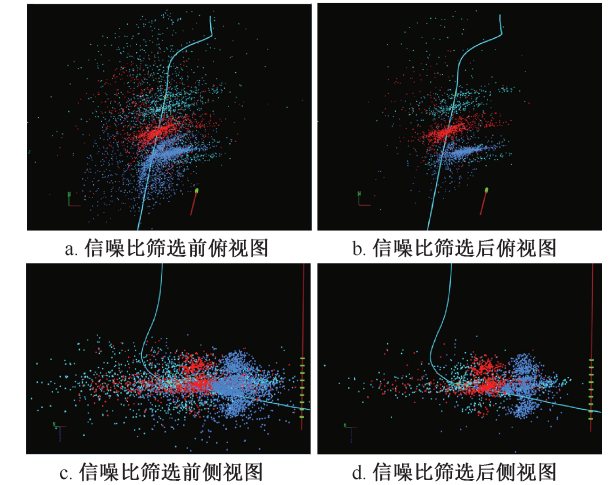


图 11 H1 井全三段信噪比筛选前后效果图
Fig.11 Effect charts before and after screening of signal-to-noise ratio in all three sections of Well H1

井下微地震监测会受到监测井位置的影响,在靠近监测井一侧经常出现大量能级较低的微地震事件,因此在解释微地震结果之前,需要确认和校正潜在的监测偏差。通过分析震级-距离图(图 12),找到最大截止距离将分析限定在充分采样区域内,门槛值选取依据是使整个裂缝几何形态被清晰刻画。图 13 是过滤掉能级低于-2.8 的微地震事件前后效果对比图,裂缝的形态基本上保持一致,但格架更加清晰。

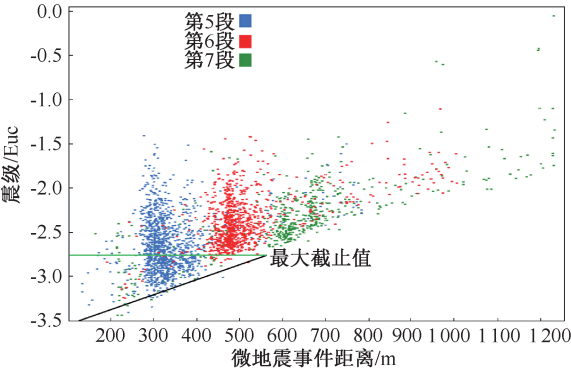


图 12 H1 井微地震事件震级距离交汇图
Fig.12 Crossplot of magnitude and distance of micro-seismic events in Well H1

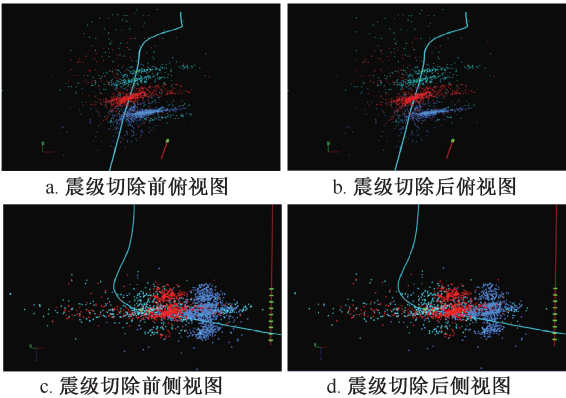


图 13 H1 井微地震事件震级切除前后对比图
Fig.13 Comparison of magnitude before and after micro-seismic event removal in Well H1

微地震事件离起裂点距离随时间变化的交汇图有以下用途:(1)可解释裂缝生长速度或水力扩散速度;(2)可以识别事件是否主要发生在裂缝端部或在推进前缘之后;(3)可用于识别应力和孔隙压力转移导致的潜在干微地震事件,此类事件发生在通过地层的可能流体运移之前。图 14 随着注入时间的增大,裂缝生长或者水力扩散速度在从起点开始的包络线内(图中的蓝色三角形),在包络线外的微地震事件点(淡绿色)可能是由于应力传导或者孔隙压力转移导致的潜在干事件,这些事件对水力造缝没有积极意义,应该消除。

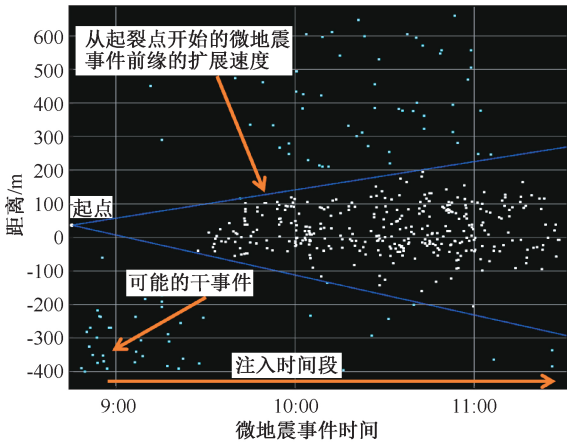


图 14 H1 井第 7 段微地震事件时间-距离交汇图
Fig.14 Time-distance plot of micro-seismic events in section 7 of Well H1

图 15 展示的是 H1 井第 7 段疑似干事件消除前后效果,颜色代表微地震事件发生的先后。消除可能的干事件后,水力压裂裂缝在平面上形态更清晰,缝高更合理。

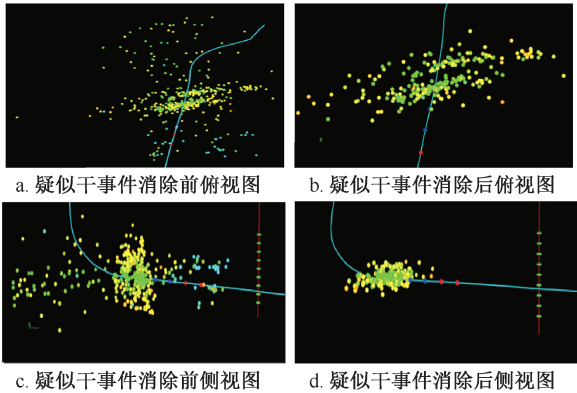


图 15 H1 井第 7 段疑似干事件消除前后对比图
Fig.15 Comparison of pre-and post-elimination of suspected incidents in Section 7 of Well H1

图 16 展示了 H1 井通过信噪比、震级-距离与干事件筛选前后的综合效果,不同颜色代表不同的压裂段。筛选前微地震事件点在平面与空间分布杂乱无章,但在筛选后,平面分布更合理,裂缝形态特征清晰,裂缝的高度也更加合理。

经过筛选后,H1 井微地震监测结果形态比较简单、合理,可更好的用于解释裂缝参数。如图 16 所示,第 5、6 段压裂段没有观察到在两个射孔点同时造缝,只形成了一个主裂缝,判断油藏连通性可能不太理想,第 7 段观察到较明显的同时在两个射孔点开裂,形成双组缝,效果优于第 5、6 段。综合判断此地质条件下不太容易控制同一段两个射孔点的同时起裂和造缝,压后分段求产产量不理想进一步

证实这认识。根据这一认识建议,在相邻的另一口水平井压裂设计优化时缩短段间距,每一段只射一个孔进行造缝。根据后期工程与求产反馈情况证实,优化后的压裂方案实际压裂效果比较理想。

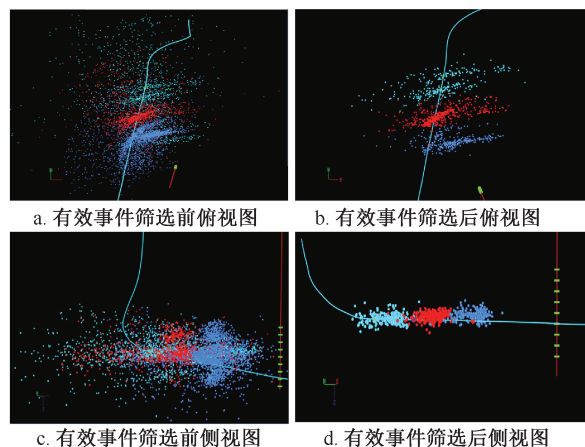


图16 H1井有效事件筛选前后效果图

Fig.16 Comparison of effects before and after effective event screening in Well H1

3 结论

(1)井下微地震监测数据采集质量是关键,做好监测观测系统设计与数据采集过程的质量控制,保证了该项目的数据质量,有利于准确的拾取到时。

(2)检波器定向、速度模型校正、初至拾取与事件反演定位等环节的质量控制,能确保本次微地震监测结果的准确可靠。

(3)结合地质-地震等信息综合分析更能客观评价微地震事件形态,是微地震事件筛选的前提,能提供更好的数据集用于解释。

(4)微地震事件的筛选工作能更好地发挥微地震监测结果在优化压裂设计等诸多方面的重要作用。

致谢:感谢大庆油田勘探开发研究院和采油工程研究院同意本文公开发表;感谢井下作业分公司杨光、采油工程研究院冯程滨与勘探开发研究院陈百军等人在论文修改、压裂施工总结方面做出的贡献。

参考文献

[1] 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 Zhenwu, SA Liming, WU Furong, 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.
[2] 刘振武,撒利明,董世泰,等. 中国石油物探技术现状及发展方向[J]. 石油勘探与开发,2010,37(1):1-10.
LIU Zhenwu, SA Liming, DONG Shitai, et al. Current situation and trend of geophysical technology in CNPC [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1):1-10.
[3] 高东伟,赵志红,张晗,等.焦石坝区块分段压裂井中微地震实时监测技术[J]. 油气井测试,2018,27(5):42-49.
GAO Dongwei, ZHAO Zhihong, ZHANG Han, et al. Micro-seismic real-time monitoring technology for staged fracturing wells in Jiaoshiba block [J]. Well Testing, 2018,27(5):42-49.
[4] 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 Hongmei. Application of micro-seismic monitoring technology to unconventional hydrocarbon reservoir fracturing evaluation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015,22(3):129-134.
[5] 容娇君,李彦鹏,徐刚,等. 微地震裂缝检测技术应用实例[J]. 石油地球物理勘探, 2015,50(5):919-924.
RONG Jiaojun, LI Yanpeng, XU Gang, et al. Fracture detection with microseismic [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015,50(5):919-924.
[6] 张云银,刘海宁,李红梅,等. 应用微地震监测数据估算储层压裂改造体积[J]. 石油地球物理勘探,2017,52(2):309-314.
ZHANG Yunyin, LIU Haining, LI Hongmei, et al. Reservoir fracturing volume estimation with microseismic monitoring data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017,52(2):309-314.
[7] MAXWELL S C. Hydraulic fracture height growth [C]. CSEG Recorder, 2011,36:44-47. (<https://csegrecorder.com/articles/view/hydraulic-fracture-height-growth>).
[8] MAXWELL S C. Microseismic network design: estimating the number of detected microseismic events during hydraulic fracturing [C]. 81st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2011:4404-4408. (SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011:4404-4408.)
[9] MAXWELL S C, RUTLEDGE J, JONES R, et al. Petroleum reservoir characterization using downhole seismic monitoring [J]. Geophysics, 2010,75(5):75A129-75A137.
[10] ESTRADA E, ROBERTS N, PHILLIPS C, et al. Frac-

- ture mapping in the Sanjuan basin, New Mexico [C]. SPE 124673, 2009.
- [11] CAI M, KAISER P K, MORIOKA H, et al. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(4): 550-564.
- [12] 杨炳祥, 邹一锋. 水平井分段压裂井下微地震裂缝监测技术应用[J]. 油气井测试, 2015, 24(3): 59-61.
YANG Bingxiang, ZOU Yifeng. Application of down-hole microseismic fracture monitoring technology in horizontal well [J]. Well Testing, 2015, 24(3): 59-61.
- [13] 郑爱萍, 刘强, 田永鹏, 等. 微地震水力压裂监测技术在浅层石炭系火山岩油藏中的应用[J]. 特种油气藏, 2012, 19(1): 120-123.
ZHENG Aiping, LIU Qiang, TIAN Yongpeng, et al. Hydraulic fracturing evaluation with microseismic monitoring technique for shallow Carboniferous volcanic rock reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(1): 120-123.
- [14] 刘建安, 马红星, 慕立俊, 等. 井下微地震裂缝测试技术在长庆油田的应用[J]. 油气井测试, 2005, 14(2): 54-56.
LIU Jian'an, MA Hongxing, MU Lijun, et al. The application of down hole micro-seismic fracture testing technique in Changqing Oilfield [J]. Well Testing, 2005, 14(2): 54-56.
- [15] 王治中, 邓金根, 赵振峰, 等. 井下微地震裂缝监测设计及压裂效果评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6): 76-78.
WANG Zhizhong, DENG Jingen, ZHAO Zhenfeng, et al. Downhole microseismic fracture monitoring design and fracturing results analysis [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(6): 76-78.
- [16] AUSTRALIA S, EATON D. Noise examples from two microseismic datasets [J]. Cseg Recorder, 2011(10): 47-49.
- [17] 杨瑞兆, 赵争光, 王占刚. 页岩气开发微地震监测技术[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2016: 36-47.
- [18] EISNER L, DUNCAN P M, HEIGL W M, et al. Uncertainties in passive seismic monitoring [J]. The Leading Edge, 2009, 28(6): 648-655.
- [19] 崔荣旺. 微地震压裂监测应在井中进行[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(4): 138-142.
CUI Rongwang. Microseismic fracture monitoring should be carried out in wells [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(4): 138-142.
- [20] 宋维琪. 微地震监测新技术与新方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2014: 99-106.
- [21] BARDAINNE T, GAUCHER E. Constrained tomography of realistic velocity models in microseismic monitoring using calibration shots [J]. Geophysical Prospecting, 2010, 58(5): 739-753.
- [22] 尹陈, 刘鸿, 李亚林, 等. 微地震监测定位精度分析[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 800-807.
YIN Chen, LIU Hong, LI Yalin, et al. The precision analysis of the microseismic location [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 800-807.
- [23] GRECHKA V, DUCHKOV A A. Narrow-angle representations of the phase and group velocities and their applications in anisotropic velocity-model building for micro-seismic monitoring [J]. Geophysics, 2011, 76(6): 127-142.
- [24] 宋维琪, 冯超. 微地震有效事件自动识别与定位方法[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(2): 283-288.
SONG Weiqi, FENG Chao. Automatic identification and localization of microseismic effective events [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(2): 283-288.
- [25] PAVLIS G. Appraising earthquake hypocenter locations errors: A complete practical approach for single event locations [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1986, 94: 1817-1830.
- [26] CIPOLLA C, MAXWELL S, MACK M, et al. A practical guide to interpreting microseismic measurements [C]. SPE 144067, 2011.

编辑 穆立婷

第一作者简介:任朝发,男,1982年出生,工程师,2005年毕业于西南石油大学信息与计算科学专业,主要从事储层地球物理和地震资料处理等领域的科研工作。电话:0459-5595985;Email:renchaoa@petrochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市让胡路区科苑路勘探开发研究院,邮政编码:163712。