

# 威荣气田深层页岩气压裂井中微地震监测技术

张正玉, 吴晓光, 刘兴春, 缪祥禧, 吴家安, 樊靖宇, 李德才, 赵翔

中石化经纬有限公司西南测控公司, 四川 成都

收稿日期: 2022年12月20日; 录用日期: 2023年1月13日; 发布日期: 2023年1月28日

## 摘要

井中微地震监测技术是目前诊断评价页岩气体积压裂的最有效技术手段, 在页岩气田开发过程中发挥着重要作用。威荣深层页岩气田储层埋藏深度3500~3850米, 目的层地温最高达140℃以上, 在页岩气井水力压裂的整个过程中, 耐高温且能够持续长时间稳定工作的三分量检波器成为了威荣气田页岩气井体积压裂监测的主要技术难题。通过研制自主知识产权的高温井下微地震监测仪, 仪器在井下138℃条件下长时间工作状态稳定, 资料品质高, 满足威荣地区高温监测要求, 在1925米的最远有效监测空间距离上依然能够拾取明显的微地震事件特征信号。通过现场处理解释技术能够实时提供压裂缝网的空间几何参数扩展及动态变化, 用于现场评估和指导压裂施工。通过压后精细解释技术, 可获取压裂缝网展布特征, 进行压裂体积计算, 暂堵效果分析、压裂缝与天然裂缝发育特征及关系研究、套管变形预警分析等研究工作。已在威荣气田威页3X平台、4X平台、4Y平台完成了10口井70余层段的水力压裂监测, 为压裂施工效果评估、后续压裂设计调整、开发方案优化及井距调整等工作提供了技术参考。

## 关键词

耐高温检波器, 微地震事件, 压裂监测, 深层页岩气, 威荣气田

# Downhole Microseismic Monitoring Technology for Hydraulic Fracturing in Deep Shale Gas Wells in WeiRong Gas Field

Zhengyu Zhang, Xiaoguang Wu, Xingchun Liu, Xiangxi Miao, Jia'an Wu, Jingyu Fan, Decai Li, Xiang Zhao

Xinan MWD/LWD Logging Corporation, Sinopec Matrix Coporation, Chengdu Sichuan

Received: Oct. 20<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 13<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Borehole microseismic monitoring technology is the most effective technical mean to diagnose and

文章引用: 张正玉, 吴晓光, 刘兴春, 缪祥禧, 吴家安, 樊靖宇, 李德才, 赵翔. 威荣气田深层页岩气压裂井中微地震监测技术[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(1): 20-33. DOI: 10.12677/ag.2023.131003

evaluate shale gas volume fracturing, which plays an important role in the development of shale gas field. The buried depth of WeiRong deep shale gas field is 3500~3850 m, and the ground temperature of the target layer is up to 140°C. In the whole process of hydraulic fracturing of shale gas wells, three-component geophones that are resistant to high temperature and can work stably for a long time have become the main technical problem of volume fracturing monitoring of shale gas wells in Weirong Gas Field. Through the development of high temperature underground microseismic monitoring instrument with independent intellectual property rights, the instrument works stably for a long time under the condition of 138°C underground, with high data quality, meeting the requirements of high temperature monitoring in WeiRong area, and can still pick up obvious characteristic signals of microseismic events at the farthest effective monitoring space distance of 1925 m. The field data processing and interpretation technology can provide real-time expansion and dynamic change of space geometric parameters of hydraulic fracture network, which can be used for field evaluation and guidance of hydraulic fracture operation. Through the fine interpretation technology after hydraulic fracturing, the distribution characteristics of fracture network can be obtained, and the fracturing volume calculation, temporary plugging effect analysis, development characteristics and relationship between hydraulic fractures and natural fractures, early warning analysis of casing deformation and other research work can be carried out. The microseismic monitoring of more than 70 layers in 10 wells has been completed in Weiye-3X platform, -4X platform and -4Y platform of WeiRong gas field, which provides technical reference for hydraulic fracturing evaluation, subsequent fracturing design adjustment, gas field development scheme optimization and well spacing adjustment.

## Keywords

High Temperature Tector, Microseismic Event, Fracturing Monitoring, Deep Shale Gas, WeiRong Gas field

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

研究表明,页岩气水平井产能主要受控于优质储层发育厚度、优质储层钻遇长度和储层改造程度[1]。储层的改造程度如何是提高优质储量动用程度的最后一环保障,在很大程度上直接影响到页岩气井产能能否达到商业开发标准。体积改造是上述三个因素之中的受人为控制因素影响最大的环节,需要对压裂效果进行具体评估和认定,才能对页岩气井的产能评价,压裂工艺优化,开发方案调整等后续工作做出客观的可靠分析。水力压裂通过泵入高粘液体和砂粒等促使储层岩石破裂,破裂产生的能量以地震波的方式传播开来,引发微小震级级别(一般认为-3级至1级)的微地震(Microseismic),通过检波器对压裂施工的整个过程中产生的这种微地震信号进行监测和采集,通过对微地震事件识别反演定位等计算,获取微地震事件(压裂缝)的空间位置及展布特征,进而对压裂效果进行评价,即微地震监测技术[2][3][4],是目前监控水力压裂最有效的手段。

微地震监测技术的概念早在1962年被提出[5],1965年美国宾夕法尼亚州岩石力学实验室开展了石油天然气压裂诱发微地震的相关研究,1973年,该项技术开始应用于地热开发行业,随后此技术被应用在油气藏动态监测、地热动态监测、煤田动态监测、工程动态监测等方面[6];根据微地震监测检波器的布置及采集方式可分为地面及井中监测[7][8][9][10][11]。地面微地震监测技术易受地面压裂设备的震

动、车辆及环境背景噪音等干扰,有效信号能量弱,信噪比低,且地面布置的检波器距离页岩气水平井压裂改造段比较远[3],与美国页岩气储层相比,四川盆地页岩气储层埋藏普遍较深,地表山地条件复杂,在对压裂进行监测时,井下微地震监测技术数据信噪比更高,信号可靠性更强,其应用相较地面微地震应用更广泛[3][12][13][14]。经过40余年的发展,至20世纪初,微地震监测技术基本实现了全面商业化发展,目前国外油服公司如法国的 Magnitude 公司,美国的 Pinnacle 公司、Weatherford 公司,加拿大的 ESG 公司等凭借技术优势面向全世界提供微地震监测服务,其服务几乎涵盖了微地震监测数据采集到分析、解释、油藏监测配套技术各个方面。2010年以前,国内市场上该微地震监测技术被国外技术服务公司垄断,价格居高不下。近年来,国内一些石油技术服务公司(中石油东方地球物理勘探公司、川庆地球物理勘探公司、中国石化物探高新技术研发中心等)通过合作引进,自主创新的方式,逐步形成了具有自主知识产权的微地震压裂监测技术,具备了深井、浅井和地面微地震数据采集的能力,在大庆、华北、长庆、四川等油气田进行了应用[7][8][9][13][14]。

近几年随着四川盆地页岩气勘探开发的快速发展,微地震监测页岩气体积压裂也逐步开展起来[8]-[15]。然而由于威荣气田储层埋藏深度大(现今平均埋深3750米),井下温度最高达140℃,属于深层高温页岩气范畴,加之市场上的检波器耐温性能一般约为150℃,井下施工环境温度接近检波器的耐温极限,加之检波器需要长时间置于监测井中监测平台并整个压裂过程,市场上的主流检波器温度指标基本不能满足施工要求。故在文中微地震项目实施之前,研究区内尚未开展过井下微地震监测施工及相关评价工作,能够长时间运行稳定,耐高温的井下检波器是在威荣页岩气田开展井下微地震监测工作的基础和技术关键。

## 2. 研究区概况

威荣气田构造位置上主体位于四川盆地川中隆起低缓区白马镇向斜,向斜底部构造略有起伏。西部深度较大,东区略微抬升,区内断层不发育,地层构造变形强度较弱[16][17]。区内上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组一段沉积了一套埋深介于3500~3850m的深水陆棚相暗色富有机质页岩[16]。五峰组-龙马溪组一段优质页岩气储层现今平均埋深3750米,是我国首个深层页岩气田,是继涪陵页岩气田之后中石化第二个页岩气建产阵地,于2021年底已经完成一期10亿方/年的产能建设工作。

根据岩性、电性(GR-DEN、GR-CNL等相互叠合关系)特征、笔石带分布、TOC含量变化、以及含气性等,区内五峰组-龙一段可划分为①~⑨9个地质小层,①~⑨小层厚80.5~85.7m,其中①~④层优质页岩厚度展布基本稳定(厚27.4~38.7m),连续性好,无明显隔层,由东向西逐渐增厚。区内5口井①~⑥小层曲线岩心孔隙度平均5.4%,TOC平均2.82%,含气量3~6m<sup>3</sup>/t。气藏压力系数较大(地压系数1.85~2.16),地温梯度平均3.22℃~3.46℃/100m,水平段产层中垂深温度135℃~140℃。现今区内龙马溪组最大主应力方位介于北北东75°~90°之间,属于低丰度、低产、中孔特低渗、高TOC、高脆性、深层大型页岩气藏;一期页岩气平台井水平段长平均1500米左右。

## 3. 井下耐高温检波器

通过技术攻关,成功研制了具备自主知识产权的井下耐高温微地震监测三分量数字检波器(175℃,140MPa),耐高温检波器的主体结构框架与国内外市场上的检波器基本一致,主要创新结构设计体现在以下两个方面。

1) 选择长时间耐高温电源变压器:即每一支检波器都有自身单独使用的电源板,电源板采用开关电源变压的形式,核心器件是H桥和变压器,保证在井下高温环境中持续工作实现连续变压不异常。

2) 旁路功能:单支检波器出现电子线路故障时,可旁路自身以下的其他检波器,以保持其他检波器

工作，旁路的检波器没有数量限制，以保障不因单支检波器出现故障导致整体仪器串起出进而无法对压裂进行实时监测的情况发生。

适用于深层页岩气压裂监测的高温井下微地震监测设备主要包括了地面采集系统和井下仪器组合(井下高速数字传输短节和耐高温井下数字检波器)，配合使用的仪器设备包括马龙头、长度可自由定制的级间电缆、利于仪器串下放的加重杆以及一些辅助测井单元(张力短节、自然伽马仪、磁定位短节)，监测设备现场连接及处理解释系统详见图 1。

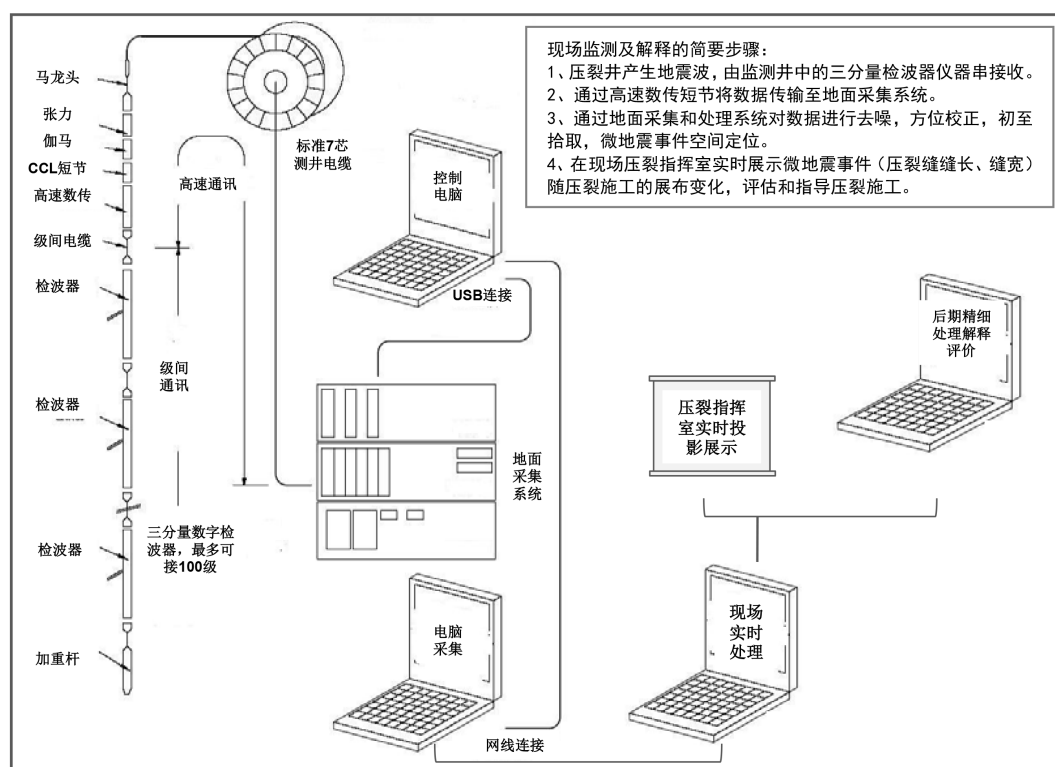


Figure 1. Schematic diagram of microseismic field monitoring, processing and interpretation system

图 1. 微地震现场监测及处理解释系统示意图

#### 4. 微地震监测井选择与测前导爆索作业

##### 1) 监测井选择

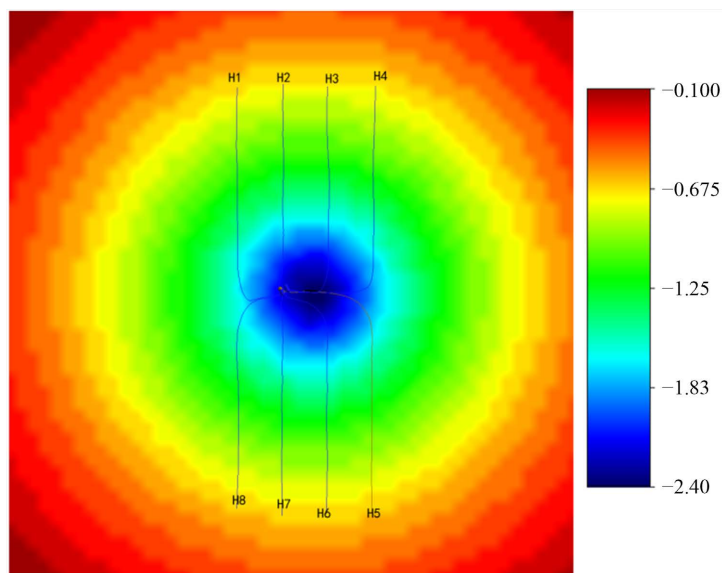
监测井须满足相应的条件，首先检波器须置放在固井质量好的井段、同时沉放位置尽可能靠近压裂作业段，保证监测距离最短，同时为保证微地震监测仪器串下井安全，防止仪器遇阻，造成级间电缆打折受损，仪器下入最大井斜不能超过  $40^\circ$ ，此外须做好降低井口液面等工程工作，以减小监测井内的噪声影响。

例如在威页 4X 平台北半支威页 4X-1~4HF 井压裂期间，需要从平台南半支威页 4X-5~8HF 井这 4 支井中选择最佳的一支井作为监测井。通过弹性波动方程对接收信号进行数值模拟，由水力压裂参数、储层岩石物理性质等估算微地震破裂能量和传播距离近似关系，确定最佳观测井段位置[18]。图 2 为检波器分别沉放在威页 4X-5HF 井时，压裂区域能够监测到最小震级分布图，从图中可以看出检波器沉放在威页 4X-5HF 井时对威页 4X-1、2、3HF 井的最大监测距离约 2000 米左右，在最远端能监测到震级为  $-0.5$  级以上的微地震事件，同时考虑到威页 4X-5HF 井更有利于地面设备的摆设，并根据现场施工顺序及其

地面场地的客观条件,最终综合考虑选择威页 4X-5HF 为监测井,14 级检波器下放到该井井下 3290~3550 m 深度范围内,采用 0.25 mS 的采样率进行连续监测,仪器所处地层温度高达 138.0°C (图 3)。

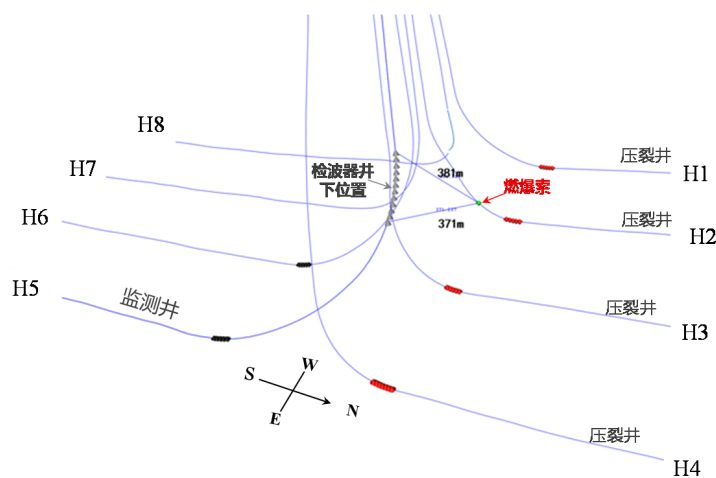
## 2) 导爆索作业

实际监测过程中,由于检波器距离水平井末端第 1 段射孔位置较远,不能拾取较强的射孔信号源进行检波器方向定位,因此需在邻井中开展导爆索作业定位检波器方向,校正速度模型。现场选择在威页 4X-1、2、3、4HF 井任意一口井的直井段导爆索作业,以对威页 4X-5HF 井下检波器进行方位定向校正,根据现场实际工况选择在威页 4X-2 井中进行,导爆索深度 3600 m,导爆索 250 g 药量均匀分布在 15 米的入井工具上同时激发。导爆索信号特征为纵波强,横波弱,纵、横波初至清楚(图 4),信噪比高,纵横波时差在 95 ms 左右,为检波器方位及其速度模型校正奠定基础。



**Figure 2.** Sensitivity analysis diagram of magnitude when the geophone was sunk in Weiye 4X-5HF well

**图 2.** 检波器沉放在威页 4X-5HF 井时的震级敏感性分析图



**Figure 3.** Schematic diagram of space location of Weiye 4X platform well microseismic monitoring geophone and detonation cable

**图 3.** 威页 4X 平台井微地震监测检波器及燃爆索空间位置示意图



### 3) 微地震事件信号特征

在地震记录上,微地震事件一般表现为清晰的脉冲,其特点一是能量微弱,水力压裂诱发微震的震级多小于 0 级,二是频率很高,频带宽度窄,持续时间短(小于 15 秒),衰减快,易受噪声影响[19]。越弱的微地震事件,其频率越高,持续时间越短,能量越小,代表压裂缝破裂的长度也就越短。每个微地震分量上纵波后边紧跟着一个横波,每个分量上的纵波波至、横波波至时间分别相同,横波能量比纵波强的多,其主要原因是被解释为水力压裂产生的裂缝主要为剪切破裂,因为发射出的能量主要是剪切波,另外一个原因是纵波衰减比横波强烈(图 5)。

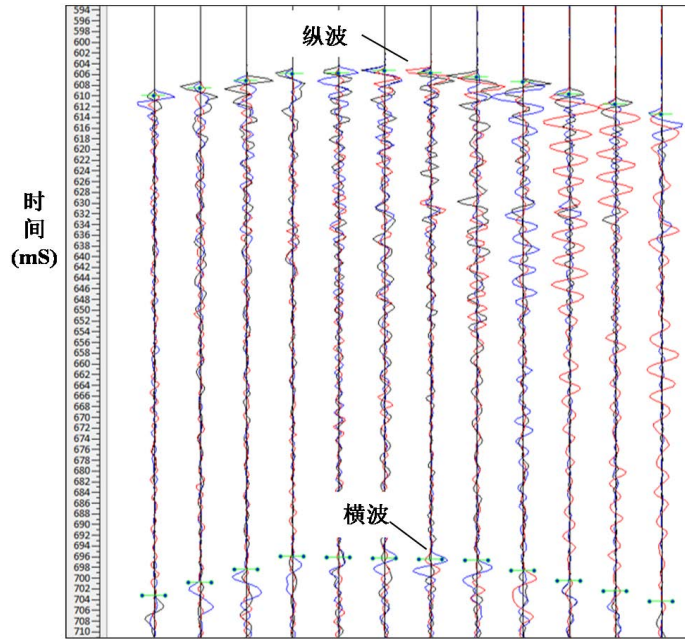


Figure 4. Monitoring record of detonating cable signal in well Weiye 4X-2HF

图 4. 威页 4X-2HF 井导爆索信号监测记录

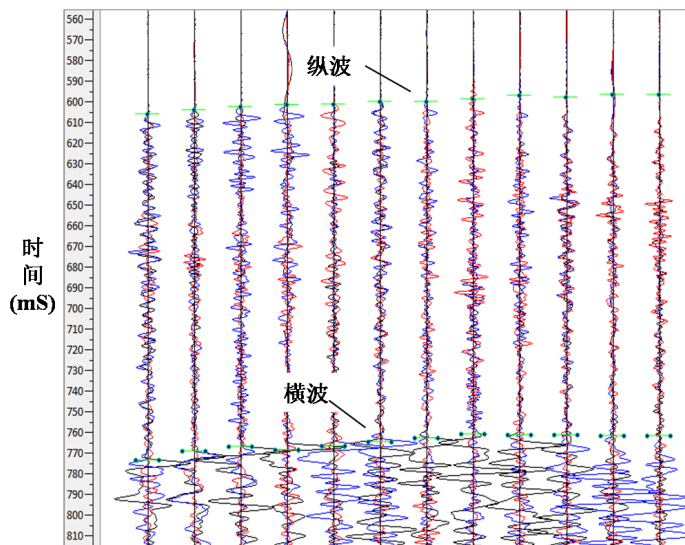


Figure 5. Monitoring record of microseismic event signal

图 5. 微地震事件信号监测记录

## 5. 微地震数据处理

微地震资料处理关键步骤主要包括以下内容:

1) 监测数据去噪处理: 进行带通滤波、强噪音去除, 相比地面微地震监测, 井中微地震信噪比较高, 噪音类型主要有随机干扰、电磁干扰、强噪音干扰、仪器高电流方波等等, 主要是去强噪音、高频噪音, 目的是增强事件识别、初至拾取[20] [21]。

2) 检波器方位校正: 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, 须进行检波器的旋转定位, 确定水平分量的相对方位[22]。

微地震大斜度井监测方位分析主要包括井下检波器方位分析和微地震事件方位分析两部分。其中的“方位分析”主要包括方位角和倾角两个角度的分析和计算。微地震事件的方位角和倾角是进行微地震事件定位的基础。为计算微地震事件的方位角和倾角, 首先要计算井下检波器方位角和倾角, 由于导爆索(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, 可以通过已知的导爆索(射孔)点位置和相应地震信号计算出来。井下检波器方位角和倾角计算出来以后, 可根据微地震事件地震记录计算其射线到达检波器的方位角和倾角。

3) 基于射孔(导爆索信号)定位速度标定: 合适的速度模型是精确定位微地震事件的前提, 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初始速度模型, 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建立一维的水平层状速度模型[22]。利用井轨迹来确定速度界面倾角及方位, 建立初始速度模型; 再结合地层岩石物理特性、导爆索(射孔)资料, 通过调整速度使其与模拟炮点观察到的纵、横波波至时差或已知炮点(导爆索/射孔)位置相匹配。采用速度模型优化算法(模拟退火法), 不断调整与优化速度, 使得反演点与射孔点的误差直至最小。

4) 事件识别及初至拾取: 在压裂的过程中, 岩石产生裂缝发生微地震, 微地震信号分别以纵波(P 波)和横波(S 波)的形式传播。一个地震事件发生后, 震源即发震初始位置以及发震时刻, 随着微震事件在时间和空间上的逐渐产生, 附近的检波器接收由微震事件发出的波动信号, 由于微地震信号具有能量弱、持续时间短等特点, 要先对接收到的微地震事件进行预处理和合理过滤, 要分析计算其幅度谱、频谱、能量包络以及频带范围等微地震信号特征, 进而判断并确定有效事件, 使过滤背景噪音后的微震信号显示一致, 保证每个接收到的微震信号的真实性, 避免伪信号的进入。

井中微地震压裂数据处理重点在于震源的精确定位, 影响因素主要包括速度模型建立、反演算法的适用性、正演算法的精度、初至拾取等方面。其中纵、横波初至准确拾取是震源精确定位首要条件之一。井中微地震初至拾取一般采用常规地震直达波初至拾取方法, 其原理主要是根据有效波与噪声在能量、偏振特性以及其他一些统计特性上存在区别, 获得稳定可靠的初至时间, 如能量分析法、自回归 AR 模型法、偏振分析法等等。本项目采用的能量分析法是基于长短时窗能量比, 当信号到达时, 能量比变化快, 相应的值会有一个明显的突跳, 将该点时间定义为有效事件初至时间。该方法实现事件识别与初至拾取计算速度快, 最后辅助人工干预, 能够获得所有事件较准确纵波、横波初至[23]。

5) 微地震事件定位: 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、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), 寻找实测值和理论值最匹配的点。本项目采用网格塌陷算法进行微地震事件定位, 实际操作过程中保证每个定位事件都对应一个清楚的波形文件记录, 每个记录的纵横波初值都比较清楚, 高信噪比, 识别的事件客观、真实。

通过上述工作的完成,现场即可进行微地震实时解释,以监控每个目标压裂段的改造效果,并在现场压裂指挥室内进行实时展示压裂缝空间展布特征(长、宽、高、走向等)及缝网扩展过程,暂堵前后缝网扩展对比分析,用于现场评估和指导压裂施工,为后续室内精细解释中确定压裂裂缝、天然裂缝或区域断层的空间位置,评价压裂改造的地层体积,评价压裂整体效果等工作打下基础。

## 6. 微地震解释技术研究

### 1) 微地震事件空间几何特征

威页 4X 平台共完成 3 口井共计 41 段的监测任务,其中威页 4X-1HF 井共监测 6 段,该井后续由于套管形变,压裂施工及监测中止,威页 4X-2HF 井共完成监测 16 段,威页 4X-3HF 井完成监测 19 段,累计监测定位有效微地震事件 2882 个。水力压裂事件几何特征:威页 4X-1HF 井压裂缝网平均长度 342.8 米,平均宽度 99 米,平均高度 64 米;威页 4X-2HF 井平均长度 346.1 米,平均宽度 84.8 米,平均高度 66 米;威页 4X-3HF 井平均长度 327.2 米,平均宽度 87 米,平均高度 64 米;且同时共监测到 3 组系天然裂缝事件响应(图 6)。

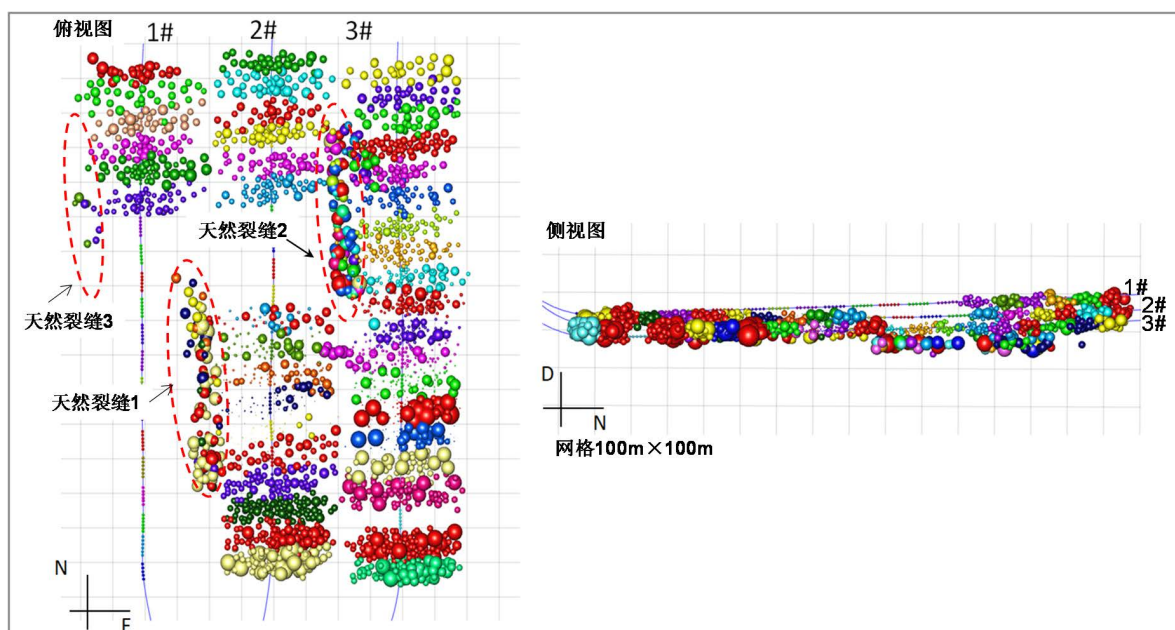


Figure 6. Overall effect of Weiye 4X flat surface half branch microseismic monitoring

图 6. 威页 4X 平台北半支微地震监测整体效果图

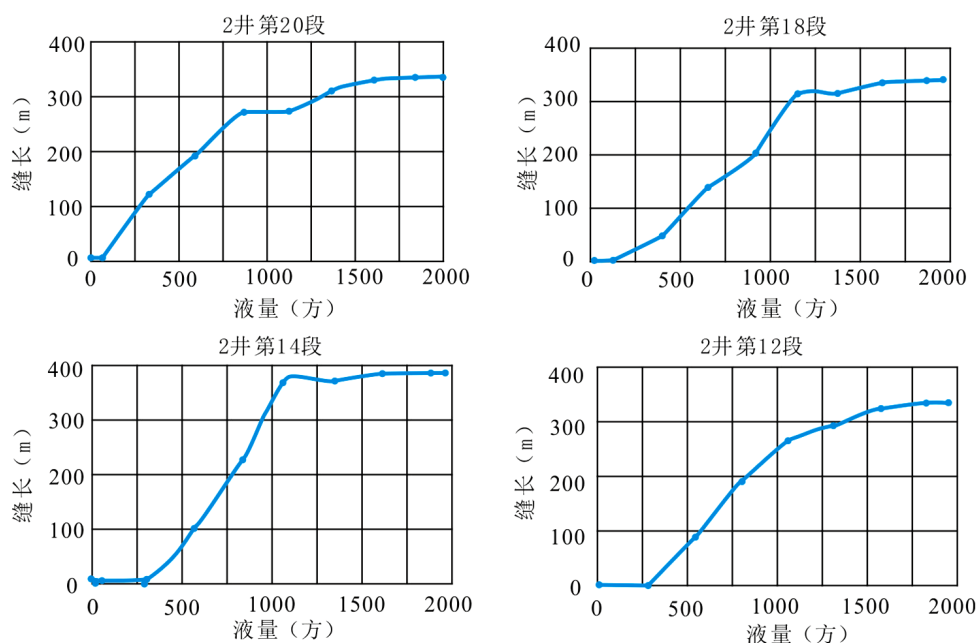
### 2) 压裂液量与缝长关系

通过统计压裂总液量与压裂缝长增长关系,发现压裂缝长在压裂初期随着压裂液的增加而增长,早期增长速度快,当压裂液注入量达到一定规模后,缝长随着压裂液的增加而趋于平稳,缝长增长出现拐点时的总液量平均约在 1500 方左右(图 7)。

### 3) 天然缝分析

天然裂缝的发育对于储层改造的重要性不言而喻,在压裂过程中,井下地应力状态被发生变化,即水力压裂活动改变了天然裂缝的应力状态,井下天然裂缝或断层被重新激活,在天然裂缝活动的传导作用下,在压裂液无法到达的、远离作业井段部位产生破裂而形成新的“诱发破裂裂缝”[24]。这种由天然裂缝“诱发破裂裂缝”产生的波能量同水力压裂裂缝形成的微地震事件一同被记录下来。





**Figure 7.** Statistical analysis of fracturing fluid volume and fracture length in part of Weiye 4X-2HF  
**图 7.** 威页 4X-2HF 部分段压裂液液量与缝长的统计分析图

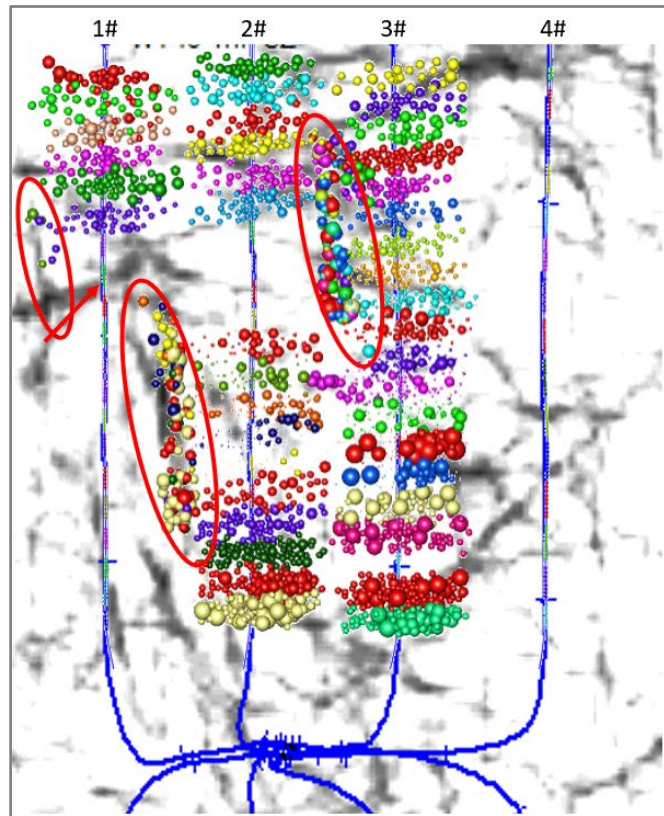
Gutenberg 等(1942)通过统计大量天然地震数据发现,地震发生的频次与震级大小  $\lg N = a - bM$ , 式中  $N$  是地震次数;  $M$  是地震震级;  $a$  是常量;  $b$  是震级大小与不同震级事件数对数的直线斜率。如果微地震波形信噪比高,事件的  $b$  值是否约等于 1, 则可能为天然裂缝事件。同时天然裂缝诱发后的微地震事件能量较大,平均能量是水力压裂事件的 10 倍左右,事件簇轮廓形态线性明显,且其事件数与压裂目标段、压裂施工参数等相关性差,则可判断存在天然裂缝或断层,并推测其在井旁的空间位置[24]。天然裂隙和断层的存在,易造成微地震事件分布的非对称性[25] [26],因此根据  $b$  值、事件震级能量及事件的时空展布特征综合判断天然裂缝事件(图 6)。

威页 4X 平台共监测到 3 组系天然裂缝,方位大致为西偏北  $75^\circ$ ;从蚂蚁体属性图上看,3 条天然裂缝与蚂蚁体裂缝预测图的吻合性比较好(图 8)。天然裂缝微地震事件在停泵后依然有持续响应,只是响应的频率变慢。停泵后持续监测 12 小时,仍然监测到了一些强能量事件,这些强事件位置在天然裂缝带上。三条天然裂缝带均离井筒较远,没有与井筒形成有效沟通,因此对压裂的影响很小,压裂过程中每段的泵压比较平稳(图 9)。

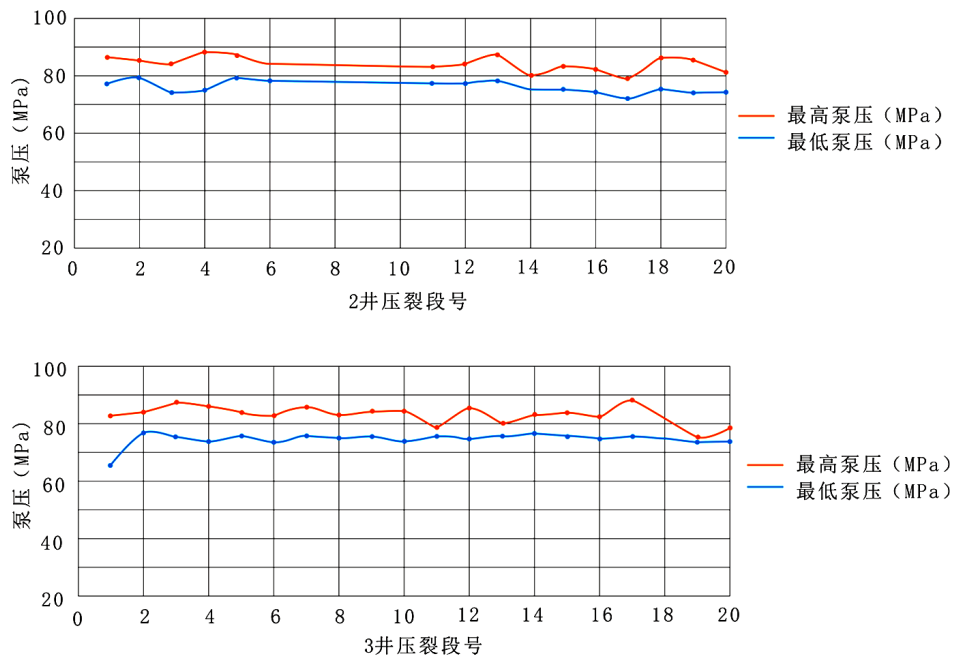
#### 4) 套变异常分析

大规模体积压裂导致的页岩气水平井套管损坏或套管变形(简称套变)在现场施工过程中一直都存在,极大地影响了现场施工效率和开发经济效益。套管损坏及变形的原因和机理比较复杂,跟地质工程特性、固井质量、压裂工艺、构造位置、地应力状态、天然裂缝发育等多种因素相关联。李凡华等(2019)等通过统计四川盆地中石油威远页岩气区块 100 余口水平井的压裂资料,发现天然裂缝诱发开启,滑移引起的套损井的数量不多,在明确知道水平井钻遇天然裂缝带时,也要充分重视相应风险[27]。

威页 4X-1HF 井压裂期间第 8 段发生了套变,致使该井压裂施工中止,监测结果显示发生套变的位置出现了强的微地震信号响应,同时套变处在蚂蚁体裂缝预测图上也出现了明显异常,为套管形变异常提供了探索性的原因分析(图 10)。此外如果在现场目标段压裂监测过程中,发现连续的强能量微地震事件沿井轨迹附近堆积,则有可能会造成套管发生异常形变,在后续的压裂作业中需要引起重视。



**Figure 8.** Comparison of the results of half microseismic monitoring and ant body superimposed on a Weiye 4X flat surface  
**图 8.** 威页 4X 平台北半支微地震监测结果与蚂蚁体叠合对比图



**Figure 9.** Fracturing pump pressure variation diagram of Well Weiye 4X-2HF and Weiye 4X-3HF  
**图 9.** 威页 4X-2HF 井、-3HF 井压裂泵压变化图

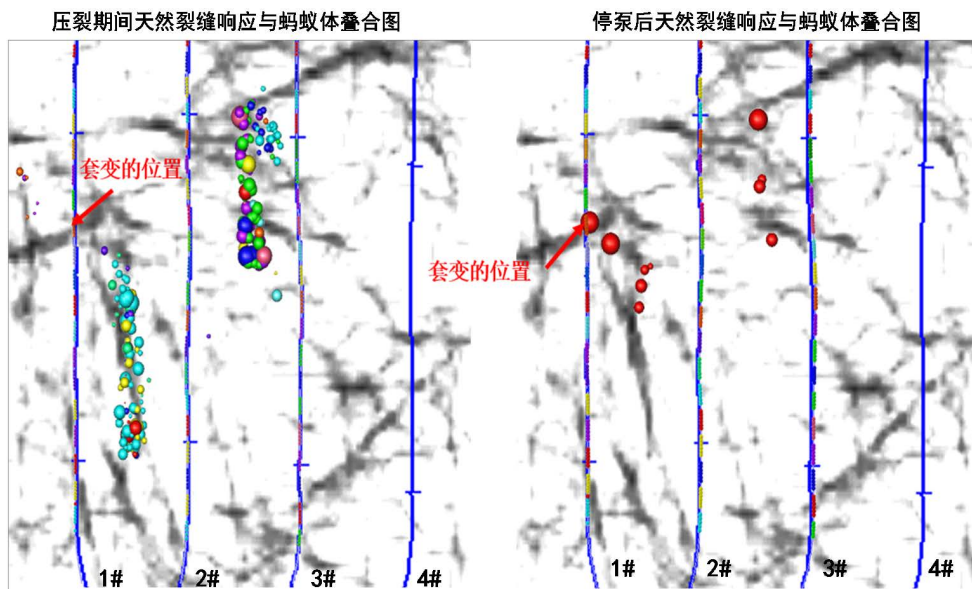


Figure 10. Comprehensive analysis of abnormal casing deformation in Weiye 4X-1HF well  
图 10. 威页 4X-1HF 井套变异常综合分析

### 5) 暂堵作业分析

目前威荣区块页岩气水平井的压裂实践中形成的暂堵转向工艺主要有粉陶缝内暂堵转向工艺和缝口暂堵转向压裂[28]。缝口暂堵转向压裂技术是通过一次或多次向井段内投送可溶性暂堵球，暂堵已开启裂缝，迫使后续压裂液进入未压裂的射孔簇，促使新缝的产生，最终提高改造段的裂缝覆盖率。

根据威页 4X 平台井压裂期间暂堵前后事件分布的特点大体上可以分为三类：第一类为暂堵前事件在井筒一边响应，成不对称性分布，对于此类情况可以根据微地震现场监测结果择机投放暂堵球或者暂堵剂，使其转向；第二类为暂堵前事件成对称分布，且施工压力平稳，对于此类情况此种情况下不需要加暂堵球，可以让其保持正常的破裂趋势进行，也可以达到较好的改造效果；第三类为加暂堵球后，在近井筒附近(暂堵前破裂区域)出现的事件比较少，而是向两侧延伸，对于此种情况下建议另外添加一定量的暂堵剂，暂堵转向，增加近井筒附近的缝网复杂程度(图 11)。

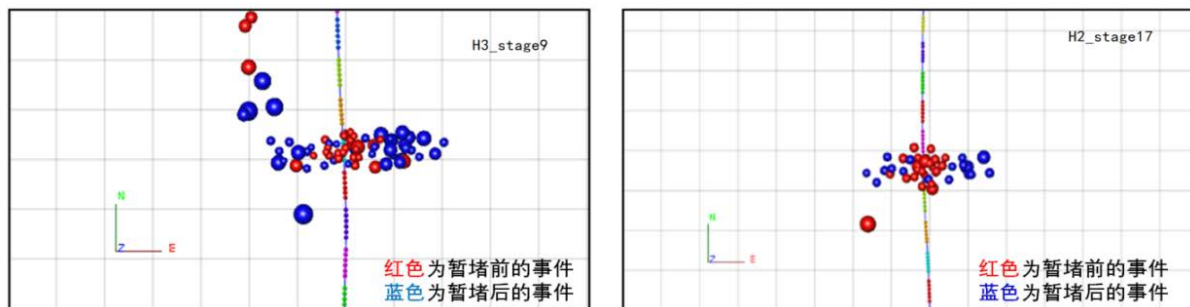


Figure 11. Microseismic event distribution map of Weiye 4X-3HF well No. 9 and Weiye 4X-2HF Well No. 17 before and after temporary plugging (grid 100 m × 100 m)

图 11. 威页 4X-3HF 井第 9 段、威页 4X-2HF 井第 17 段暂堵前后的微地震事件分布图(网格 100 m × 100 m)

### 6) 改造体积计算分析

增产储层体积(SRV: Stimulated Rock Volumes)可以定义为水力压裂后渗透率有所提高的岩石体积。

SRV 用于近似的表达水力压裂过程对地层改造的范围, 评价水力压裂效果。页岩气水平井的长期生产数据的分析表明, 有效的压裂改造体积( $E\_SRV$ )要小于微地震监测的改造体积( $M\_SRV$ )。实践表明, 页岩气压裂效果与  $E\_SRV$  密切相关, 压裂形成的有效裂缝体积是描述页岩气压裂的关键参数, 即压裂改造体积( $E\_SRV$ )所波及的范围越小, 页岩气压裂效果也就越差。

威页 4X-1、2、3HF 的事件点的外包络体( $M\_SRV$ )大小是  $1.16 \times 10^8$  立方米(图 12), 从图中切片可以看出井筒上下 10 米内压裂改造效果较好, 其中图中红色部分为单位体积( $20^3$  立方米)内出现两个微地震事件的包络体, 认为这部分区域改造裂缝是互相连通, 对产能贡献最大。统计威页 4X-2HF 井 16 段有效的压裂改造体积( $E\_SRV$ )为  $2.7 \times 10^7$  立方米, 统计威页 4X-3HF 井 19 段有效的压裂改造体积( $E\_SRV$ )为  $3.6 \times 10^7$  立方米。

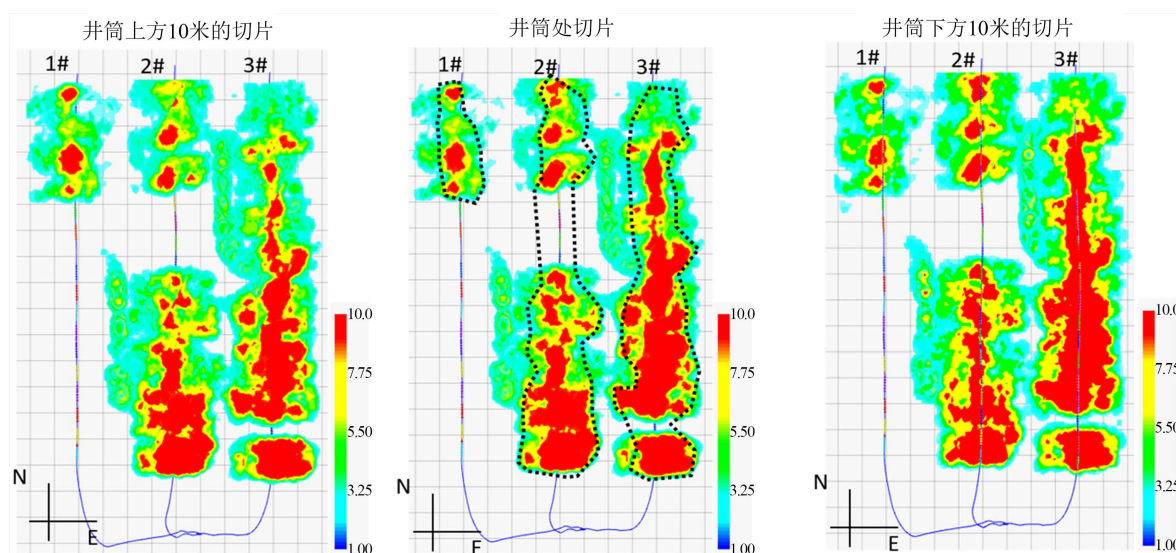


Figure 12. Sections of Weiye 4X-1,2 and 3HF outer envelope ( $M\_SRV$ ) at different depths

图 12. 威页 4X-1、2、3HF 外包络体( $M\_SRV$ )不同深度切片

#### 7) 井间距分析

在威页 4X 平台目前施工规模的情况下, 单测平均压裂缝缝长达到 170 米左右, 密度体切片上优质连通缝网部分的单边缝长也达到了 150 米(图 12), 针对目前威页 4X 平台的井间距是 400 米的情况下压窜临井的可能性不大, 但是针对井间距为 300 米的井组, 采用威页 4X 平台的施工规模及工艺压窜的风险很大, 建议适当减少规模或者采用其他手段控制缝长。

#### 8) 震级与监测距离分析

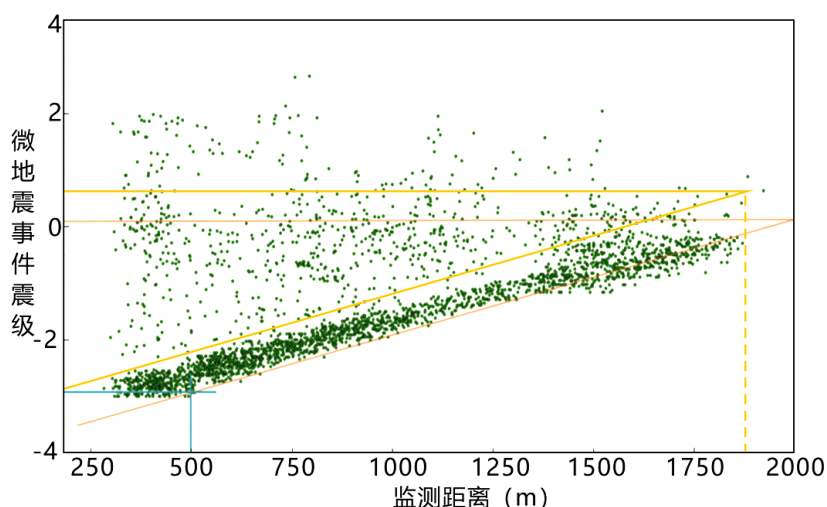
井中监测到的最小震级事件与监测距离有直接关系, 威荣气田 3 个平台 10 口井 70 余段监测到的事件的震级与监测距离的统计图, 从图中可以看出, 在当前的施工工艺及施工规模的情况下, 监测距离 1925 米的位置能监测到的最小震级约为 0.5 级, 监测距离为 500 米的位置能监测到的最小震级为 -3 级左右(图 13)。

## 7. 结论

1) 通过自主研发的耐高温检波器在威荣高温、深层页岩气田压裂井下监测中得到了良好应用, 监测结果显示在 1925 米的最远有效监测距离上能够拾取震级 0.5 级的微地震事件特征信号。

2) 在当前威荣气田压裂参数及施工规模条件下, 井下微地震监测结果显示压裂缝长平均约 340 米左右, 为后续井网调整、压裂设计提供了技术参考。





**Figure 13.** Statistical diagram of magnitude and monitoring distance of microseismic events in Weirong Gas field

**图 13.** 威荣气田微地震事件震级与监测距离统计图

3) 通过天然裂缝诱发的微地震事件分析结合蚂蚁体属性图, 可以对套变异常的原因进行有意义的探索和分析。

## 基金项目

中石化西南石油工程公司科研项目(编号 XN-2020-002)。

## 参考文献

- [1] 马新华, 李熙喆, 梁峰, 等. 威远页岩气田单井产能主控因素与开发优化技术对策[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 555-563.
- [2] 严永新, 张永华, 陈祥, 等. 微地震技术在裂缝监测中的应用研究[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 270-274.
- [3] 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.
- [4] 金维浚, 张衡, 张文辉, 等. 微地震监测技术及应用[J]. 地震, 2013, 33(4): 84-96.
- [5] Milkereit, B., Adam, E. and Banerjee, D. (2002) Continuous 3D Seismic Reservoir Monitoring—A Modeling Study. *CESG Geophysics*.
- [6] 董世泰, 高红霞. 微地震监测技术及其在油田开发中的应用[J]. 石油仪器, 2004, 18(5): 5-8.
- [7] 李政, 常旭, 姚振兴, 等. 微地震方法的裂缝监测与储层评价[J]. 地球物理学报, 2019, 62(2): 707-719.
- [8] 刘尧文, 廖如刚, 张远, 等. 涪陵页岩气田井地联合微地震监测气藏实例及认识[J]. 天然气工业, 2016, 36(10): 56-62.
- [9] 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.
- [10] 卞晓冰, 蒋廷学, 贾长贵, 等. 基于施工曲线的页岩气井压后评估新方法[J]. 天然气工业, 2016, 36(2): 60-65.
- [11] Mohammad, N.A. and Miskimins, J.L. (2012) A Comparison of Hydraulic Fracture Modeling with Downhole and Surface Microseismic Data in a Stacked Fluvial Pay System. *SPE Production & Operations*, 27, 253-264. <https://doi.org/10.2118/134490-PA>
- [12] Neuhaus, C.W. and Miskimins, J.L. (2012) Analysis of Surface and Downhole Microseismic Monitoring Coupled with Hydraulic Fracture Modeling in the Woodford Shale. *SPE Europe/EAGE Annual Conference*, Copenhagen, June 2012, SPE-154804-MS. <https://doi.org/10.2118/154804-MS>
- [13] 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.

- [14] 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.
- [15] 杜开元, 段国斌, 徐刚, 等. 深层页岩气井压裂加砂工艺优化的微地震评价[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(增刊 2): 148-155.
- [16] 武恒志, 熊亮, 葛忠伟, 等. 四川盆地威远地区页岩气优质储层精细刻画与靶窗优选[J]. 天然气工业, 2019, 39(3): 11-20.
- [17] 熊亮. 川南威荣页岩气田五峰组-龙马溪组页岩沉积相特征及其意义[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 326-332.
- [18] 储仿东, 李彦鹏, 徐刚, 等. GeoEast-ESP 微地震实时监测系统(V1.0) [J]. 石油科技论坛, 2015(B10): 8-11.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 梁北援, 沈琛, 冷传波, 等. 微地震压裂监测技术研发进展[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 401-410.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 赵超峰, 张伟, 田建涛, 等. 微地震事件解释实例[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(4): 770-777.
- [26] 刘振武, 撒利明, 巫芙蓉. 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+676+854.
- [27] 李凡华, 董凯, 付盼, 等. 页岩气水平井大型体积压裂套损预测和控制方法[J]. 天然气工业, 2019, 39(4): 69-75.
- [28] 曹学军, 王明贵, 康杰, 等. 四川盆地威荣区块深层页岩气水平井压裂改造工艺[J]. 天然气工业, 2019, 39(7): 81-87.