



地球物理学进展
Progress in Geophysics
ISSN 1004-2903, CN 11-2982/P

《地球物理学进展》网络首发论文

题目：页岩气压裂微地震监测技术及其在四川盆地威远地区 X 平台的应用
作者：赵超峰, 王海波, 郭伟, 张伟, 范青云, 田建涛, 陈浩, 唐大明, 赵建宇
收稿日期：2022-04-11
网络首发日期：2022-10-17
引用格式：赵超峰, 王海波, 郭伟, 张伟, 范青云, 田建涛, 陈浩, 唐大明, 赵建宇. 页岩气压裂微地震监测技术及其在四川盆地威远地区 X 平台的应用[J/OL]. 地球物理学进展. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20221017.0917.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

页岩气压裂微地震监测技术及其在四川盆地威远地区 X 平台的应用

赵超峰^{1,2}, 王海波³, 郭伟⁴, 张伟², 范青云⁴, 田建涛², 陈浩⁴, 唐大明⁵, 赵建宇²

(1. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318; 2. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司辽河物探分公司, 辽宁盘锦 124010; 3. 攀枝花学院, 四川攀枝花 617000; 4. 中国石油集团长城钻探工程有限公司地质研究院, 辽宁盘锦 124010; 5. 辽河油田曙光采油厂, 辽宁盘锦 124010)

摘要 四川盆地威远地区志留系龙马溪组页岩气压裂过程中存在压裂井套管变形和周边井受压裂干扰产量波动的问题。为了有效评价页岩气压裂效果, 查明压裂井套管变形、周边井产量波动的原因, 以四川盆地威远地区 X 平台微地震监测为例, 开展了页岩气压裂微地震监测技术研究与应用。结果表明: ①基于微地震事件计算的储层改造体积可定性评价压裂效果, 一般压裂规模越大, 压裂改造体积越大, 压后产量也越高; ②根据微地震监测结果实时调整暂堵剂加入时机和尝试多次暂堵, 可提高人工压裂裂缝的复杂度, 同时降低可能引起套管变形的天然裂缝活化; ③与人工压裂裂缝方向一致的天然裂缝不易引起套管变形, 与人工压裂裂缝方向不一致的天然裂缝的剪切滑移是套管变形的重要因素; ④压裂液在压裂层段积累, 形成高压带, 逐渐驱动压裂液沿着天然裂缝或储层孔隙通道向周边井的低压力带渗流, 造成 X 平台周边井产量波动。以上认识, 对页岩气高效开发具有一定指导意义。

关键词 微地震监测; 页岩气; 威远地区; 压裂效果评价; 天然裂缝

中图分类号 P631 文献标志码 A

Microseismic monitoring technology of shale gas pressure fracture: a case study from X platform in Weiyuan area of Sichuan Basin

ZHAO ChaoFeng^{1,2}, WANG HaiBo³, GUO Wei⁴, ZHANG Wei², FAN QingYun⁴, TIAN JianTao², CHEN Hao⁴, TANG DaMing⁵, ZHAO JianYu²

(1. College of Earth Science, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Liaohe Geophysical Exploration Company, BGP Inc., CNPC, Panjin, Liaoning 124010, China; 3. Panzhihua University, Panzhihua, Sichuan 617000, China; 4. Geology Research Institute, CNPC Greatwall Drilling Company, Panjin, Liaoning 124010, China; 5. Liaohe Oilfield Company Shuguang Oil Production Plant, Panjin, Liaoning 124010, China)

Abstract In the process of gas fracturing of Silurian Longmaxi formation shale in Weiyuan area, Sichuan Basin, there are problems of casing deformation of fracturing wells and production fluctuation of surrounding wells disturbed by fracturing. In order to effectively evaluate the effect of shale gas fracturing and find out the causes of casing deformation of fracturing wells and production fluctuation of surrounding wells, taking the microseismic monitoring of X platform in Weiyuan area of Sichuan Basin as an example, the research and application of shale gas fracturing microseismic monitoring technology are carried out. The results show that: ① The reservoir reconstruction volume calculated based on microseismic events can qualitatively evaluate the fracturing effect. Generally, the larger the fracturing scale is, the larger the fracturing reconstruction volume is, and the higher the post fracturing production is; ② According to the microseismic monitoring results, real-time adjustment of the time of adding temporary plugging agent and multiple attempts of temporary plugging can improve the complexity of artificial fracturing fractures and reduce the activation of natural fractures that may cause casing deformation; ③ The natural fracture with the same direction as the artificial fracturing fracture is not easy to cause casing deformation. The shear slip of the natural fracture with the different direction is an important factor of casing deformation; ④ The fracturing fluid accumulates in the fracturing interval to form a high pressure zone, which gradually drives the fracturing fluid to flow along the natural fracture or reservoir pore channel to the low pressure zone of the surrounding wells, resulting in the production fluctuation of the wells around platform X. The above achievements have certain guiding significance for the

收稿日期: 2022-04-11

作者简介: 赵超峰, 男, 1991 年生, 黑龙江省绥化人, 研究生在读, 工程师, 主要从事地震采集方面的工作.E-mail: 1120201698@qq.com

网络首发时间: 2022-10-17 11:32:56 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20221017.0917.002.html>

efficient development of shale gas.

Key words Microseismic monitoring; Shale gas; Weiyuan area; Fracturing effect evaluation; Natural fracture

0 引言

四川盆地威远地区志留系龙马溪组页岩气资源丰富, 储集层具有超致密、低渗透的特点, 应用水平井和体积压裂技术进行大规模开发, 取得了很好的效果(周小金等, 2020; 马新华, 2021)。随着页岩气的大规模开发, 页岩气压裂过程中也出现一些问题, 例如, 水力压裂过程中压裂井出现套管变形, 造成压裂段数的减少, 单井产量下降(陈朝伟等, 2020); 压裂过程中发生井间窜扰现象, 导致邻井产量降低, 甚至停产, 影响整个区块产能建设(曾凌翔, 2021)。

水力压裂技术是非常规油气开发的一项关键技术, 其效果决定了油气井的产量, 而微地震监测技术是评价压裂效果的有效手段。微地震监测是通过储层压裂破裂信号的识别、拾取、定位, 获得地下破裂发生位置, 评价压裂效果, 指导压裂施工(Maxwell S C, *et al.*, 2012; Refunjol X E, *et al.*, 2012; 赵超峰等, 2020; 王维红等, 2021)。很多学者在微地震监测结果解释和应用微地震监测评价压裂效果, 指导压裂施工方面做了大量研究, 赵超峰等(2018, 2020, 2022)、李政等(2019)应用能表征储层特征的三维地震、测井等数据解释微地震事件的时空分布、震级属性等, 讨论了微地震事件和储层的相关性, 认识了储层对压裂的影响; 李晗等(2018), 唐杰等(2022)研究了震源机制反演算法, 对获得压裂区域的破裂方向、尺度和应力状态, 深入认识储层地质力学特性等具有重要意义; 巫芙蓉等(2016)利用微地震监测技术实时调整了前置液参数、射孔方案、暂堵剂投放等, 提升了储层改造效果, 且得到了后期测试产量的验证。微地震监测在页岩气压裂监测应用方面, 汪国庆等(2019)在老井重复压裂中, 应用微地震监测方法准确分析了新开启裂缝的扩展区域、缝长等参数, 实时调整了排量、砂量、暂堵材料投送时机等, 使压后产量达到重复压裂前的 4~5 倍; 朱海燕等(2021)在页岩气藏加密井压裂优化研究中, 应用微地震监测结果验证了加密井可以形成复杂裂缝; 陈朝伟等(2020)基于微地震监测研究了四川盆地长宁区块页岩气井套管变形和裂缝带的相关性; 黄浩勇等(2022)利用微地震监测验证了页岩气叠后裂缝综合预测结果的有效性, 提高了压裂效率; 赵金洲等(2022)利用微地震监测结果计算了压裂缝网的复杂度, 评价了压裂效果。综合上述调研结果, 微地震监测在页岩气压裂中应用的角度主要包括综合地面地震数据解释微地震监测结果, 应用微地震监测指导压裂施工, 验证裂缝预测等相关方法的可靠性等, 但还没有形成包括微地震监测结果解释、基于微地震监测的压裂效果评价、微地震监测的工程应用等完整的技术流程。

本文聚焦页岩气开发过程中压裂井套管变形突出、周边井受压裂窜扰减产等问题和压裂效果准确评价的需求, 结合前人研究成果, 发展形成了综合性的页岩气压裂微地震监测技术流程, 实时、准确评价压裂改造效果, 认识天然裂缝对压裂的影响, 从微地震角度解释压裂过程中的井间窜扰和套管变形原因, 达到现场工程预警和支撑页岩气的高效开发的目的, 可为从事微地震监测工作的技术人员提供指导和借鉴。

1 页岩气微地震监测技术

水力压裂是将高压液体注入压裂井筒, 造成储层应力失稳而破裂, 改造储层孔渗性, 增大泄油面积, 实现油气井增产。压裂施工诱发的微地震事件是储层对水力压裂的响应, 因此, 微地震监测结果是联系储层性质和压裂工程的纽带和桥梁, 也是评价压裂效果的基础。一般压裂过程中监测到的微地震事件数量越多, 其储层改造效果也越好。微地震、数值模拟、真三轴水力压裂物理模拟试验均证明了储层天然裂缝、水平地应力大小、岩石力学脆性与矿物脆性等影响压裂裂缝的复杂度。

研究区天然裂缝比较发育, 与相邻平台存在压裂沟通风险, 造成压裂窜扰, 降低研究区的产量, 而且存在平行于压裂井井轨迹方向的天然裂缝, 可能对人工压裂缝网形成造成一定影响; 另外, 研究区以往压裂造成压裂井套管变形的问题比较突出, 因此, 为更高效的指导压裂施工, 对微地震监测结果的实时性和准确性提出了更高的要求。

页岩气压裂监测的一个关键环节就是证明监测结果的准确性，尤其是解释清楚异常的微地震事件产生的原因。只有证明监测结果是准确的，才能依据监测结果做出及时、有效的调整。微地震事件是储层对压裂的响应，因此，利用能表征储层性质和压裂施工的数据对微地震监测结果进行解释，建立微地震、储层、压裂施工的联系，并通过示踪剂、压裂井后期产量等其他方面的数据对微地震监测结果进行验证。在证明监测结果可靠的基础上，实时指导施工调整，达到压裂改造的目的。通过综合多种数据评价压裂效果，提高对储层和压裂工艺的深入认识，形成页岩气微地震监测技术流程（图1），具体如下：

(1) 对微地震信号进行自动拾取，辅以人工质控，实时定位微地震事件。根据微地震事件时空分布，定量描述压裂裂缝波及的长度、高度、宽度、方向、改造体积等，总结微地震事件分布规律，重点描述微地震监测反映的特殊现象。

(2) 将微地震事件与能表征储层特征的三维地震、测井、地质等数据，能反应施工过程的压裂施工曲线、压裂施工参数，以及压裂井、周边井生产数据等结合，解释微地震事件的平面分布和纵向分布，查明特殊微地震现象产生的原因和压裂裂缝的形成过程。通过多数据融合、分析，验证了监测结果的准确性。

(3) 建立微地震和储层、工程的相关性，准确评价压裂改造效果，深化对储层的地质认识。

(4) 将微地震监测结果与压裂工程结合，评价压裂施工参数和暂堵剂效果，解释压裂过程中套管变形现象产生原因和周边井产量波动原因，实时指导压裂施工，提高压裂改造效果，降低套管变形数量。

(5) 后期综合示踪剂解释成果、压裂井压后产量等数据进一步对微地震监测结果进行验证，通过综合微地震监测结果、生产数据、储层性质、压裂工程进行一体化分析和评价，提出区块开发建议，指导后期区块高效开发。

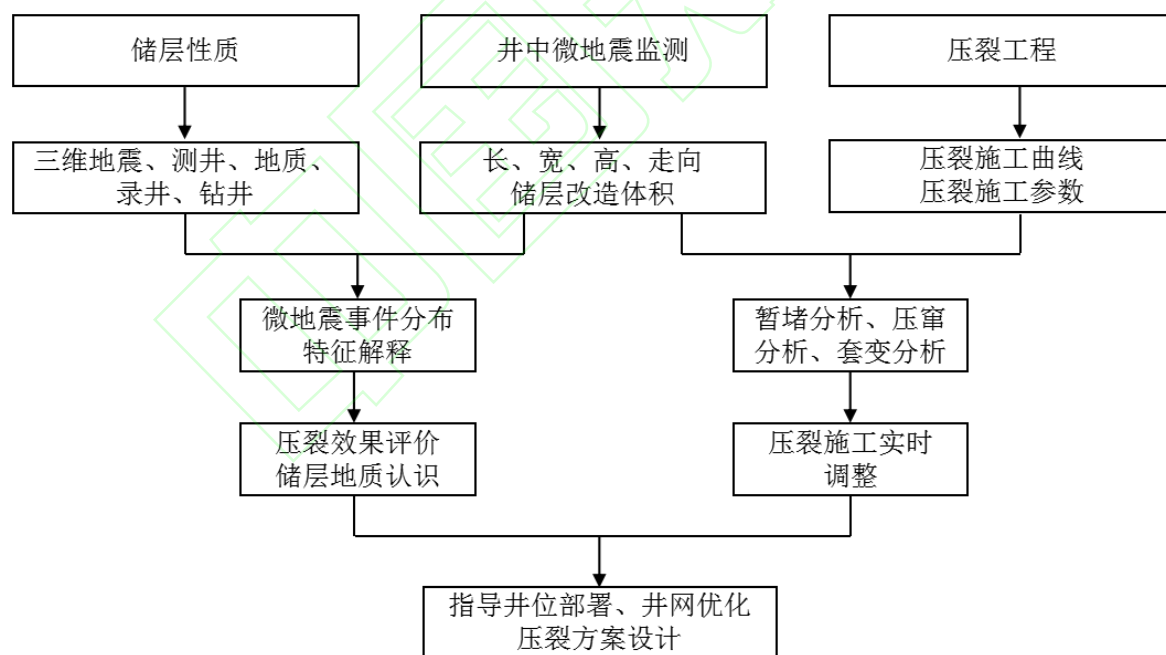


图1 页岩气微地震监测技术
Fig.1 Shale gas microseismic monitoring technology

2 应用实例

X 平台位于四川盆地威远地区，完钻层位为龙马溪组。X 平台共有 3 口水平井，分别为 X1 井、X2 井、X3 井。以快速建产为目标，对 X 平台的 3 口水平井进行体积压裂。对 X1 井、X2 井、X3 井的压裂过程进行了井下微地震监测，X3 井同时进行了化学示踪剂监测。压裂井和监测井位置关系见

图 2, 监测井为 X4 井, 放置了 9 级级间距为 20 m 的 Geowave II 三分量检波器。

2.1 微地震监测结果

受监测距离限制和监测需要, X1 井压裂了 18 段, 监测了第 3~18 段, X2 井压裂了 19 段, 监测了第 10~19 段, X3 井压裂了 19 段, 监测了第 2~19 段, 其中 X1 和 X3 井现场应用了实时监测, X2 井每段压裂结束后提交监测结果。本次微地震事件定位方法为纵横波时差法, X 平台最终监测结果见图 2 (球的颜色表示压裂段), X1 井压裂裂缝在北偏东 43° 至 68° 之间 (图 2a 黑色箭头), X2 井压裂裂缝在北偏东 65° 至 85° 之间 (图 2a 蓝色箭头), X3 井压裂裂缝在北偏东 75° 至 127° 之间 (图 2a 红色箭头)。从整体上看, 监测结果有两个特点, 其一, 3 口井之间的距离在 1 500 m 范围内, 但压裂裂缝方向变化较大; 其二, 同一口井不同压裂段和不同压裂井之间的微地震事件都有重叠现象, 压裂裂缝相互波及, 裂缝比较复杂。

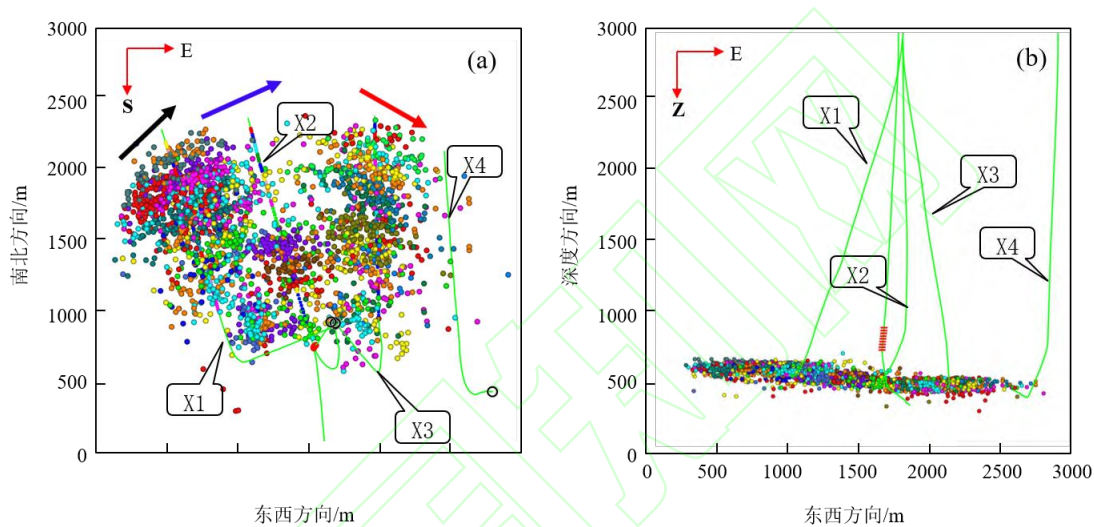


图 2 X 平台监测结果俯视图(a)与侧视图(b)
Fig.2 Top view (a) and side view (b) of monitoring results of platform X

2.2 微地震监测结果解释

X 平台 3 口井压裂裂缝方向变化大说明 X 平台储层具有很强的横向非均质性。结合 X 平台压裂目的层底界蚂蚁体图 (图 3) 进行对比, 从全局看, 压裂裂缝的方向 (图 2a 中 3 个箭头方向) 与图 3 蓝色箭头所指位置预测的天然裂缝方向具有很好的相关性, 即压裂裂缝的方向与天然裂缝的方向基本一致, 可以认为天然裂缝造成了压裂裂缝方向变化大和复杂性。

结合图 3 和图 4 进一步精细分析。图 4a 是 X1 井第 4 段监测结果, 可以发现, 红色线所描述的裂缝形态与图 3 红色圆圈位置的天然裂缝形态一致, 说明压裂裂缝沿着天然裂缝延伸扩展; 图 4b 是 X1 井第 6 段和第 10 段监测结果, 可以发现, 第 6、10 段压裂均激活了图 3 粉色椭圆位置和绿色椭圆位置的天然裂缝; 图 4c 是 X3 井第 13~19 段监测结果, 可以发现, 第 13~19 段压裂均激活了图 3 红色椭圆位置的天然裂缝。因此, 压裂过程诱发了天然裂缝活化, 且天然裂缝活化造成了微地震事件的复杂分布, 增加了压裂裂缝的复杂度。

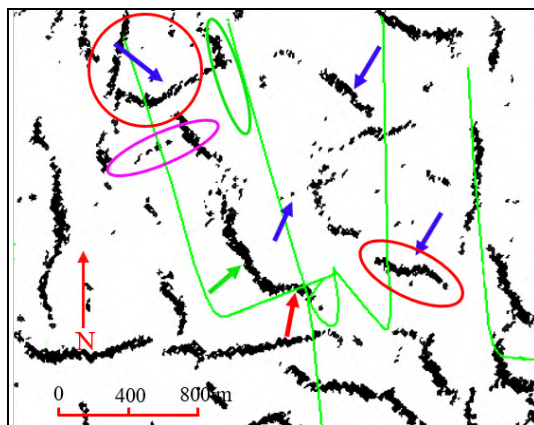


图 3 X 平台压裂目的层底界蚂蚁体图
Fig.3 Ant body diagram of bottom boundary of fracturing target layer of platform X

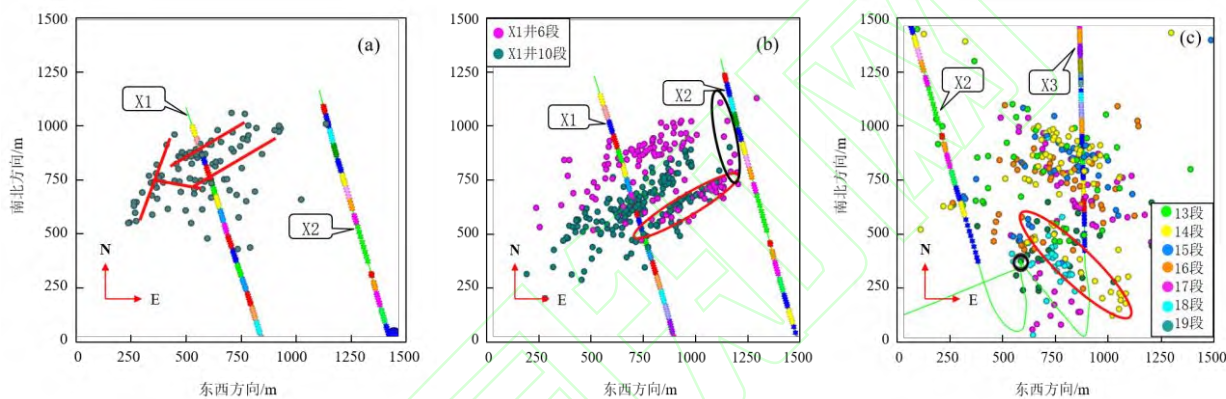


图 4 X1 井第 4 段(a)和 X1 井第 6、10 段(b)以及 X3 井第 13~19 段(c)监测俯视图
Fig.4 Top view of section 4 (a) of well X1, section 6 and 10 (b) of well X1 and section 13 ~ 19 of well X3 (c)

2.3 压裂效果评价

微地震监测结果表明微地震事件有重叠现象，压裂裂缝相互波及，裂缝比较复杂，说明井排间距设计合理，压裂裂缝有一定沟通，整体上达到压裂目的。根据示踪剂解释结果，X1 井和 X2 井都监测到 X3 井部分压裂段的示踪剂，验证了压裂裂缝相互沟通。

根据微地震事件的空间分布计算压裂体积，评价单井压裂效果。因为 3 口井监测的压裂段数不同，所以分别计算 3 口井的单段平均改造体积和 3 口井的单段压裂施工规模（表 1），对比发现，X1 井的压裂施工规模（单段液量、单段砂量、加砂强度）最大，压裂改造体积也最大，X3 井与 X2 井的压裂施工规模相近，压裂改造体积也相近。因此认为 X1 井的压裂改造效果最好，X2 井和 X3 井次之。压裂后 X1 井产量最高，X2 井和 X3 井产量相近，与微地震监测评价的结果一致。因此，压裂效果与压裂施工规模关系密切，压裂规模越大，压裂改造体积越大，压后产量也越高。

表1 X平台监测压裂段规模和施工参数对比

Table1 Comparison of reconstruction volume and fracturing parameters

井号	监测数量/段	平均改造体积/万 m ³	单段液量/m ³	加砂强度/ (t/m)	单段砂量/m ³
X1	8	703	2036.05	2.58	112.68
X2	8	498	1420.72	1.51	74.77
X3	17	427	1477.95	1.70	77.79

2.4 微地震监测工程应用

2.4.1 暂堵效果分析与压裂施工实施调整

X 平台 3 口井压裂过程中, 大多数压裂段进行了段内暂堵, 迫使压裂裂缝转向, 压开未破裂区域, 提高改造程度。根据微地震监测结果进行暂堵剂投放, 并对暂堵剂投放前、后的微地震事件对比分析, 总结暂堵剂应用效果。大多数压裂段投入暂堵剂后, 微地震事件数量增多, 裂缝有一定转向、延伸, 波及范围变大, 裂缝变为复杂化, 例如 X3 井 13 段暂堵后压裂裂缝向西南方向转向 (图 5a 黑色圆圈); 部分压裂段投入暂堵剂后, 裂缝转向不明显, 例如 X1 井 16 段 (图 5b); 部分压裂段投入暂堵剂后, 诱发了附近天然裂缝活化, 例如 X3 井 14 段 (图 5c 黑色椭圆); 部分压裂段暂堵前诱发了附近天然裂缝活化 (图 5d 红色圆圈处绿色事件), 为降低天然裂缝活化, 防止套管变形, 采取投入暂堵剂措施, 投入暂堵剂后天然裂缝继续活化 (图 5d 红色圆圈处红色事件), 于是进行第 2 次投入暂堵剂, 发现微地震事件主要出现在主缝位置, 天然裂缝位置事件减少 (图 5d 红色圆圈处蓝色事件), 有效的降低了天然裂缝活化。综上分析, 为提高暂堵剂的应用效果, 提高储层改造程度, 同时降低天然裂缝活化程度, 应结合微地震监测结果实时调整暂堵剂加入时机, 尝试多次暂堵。

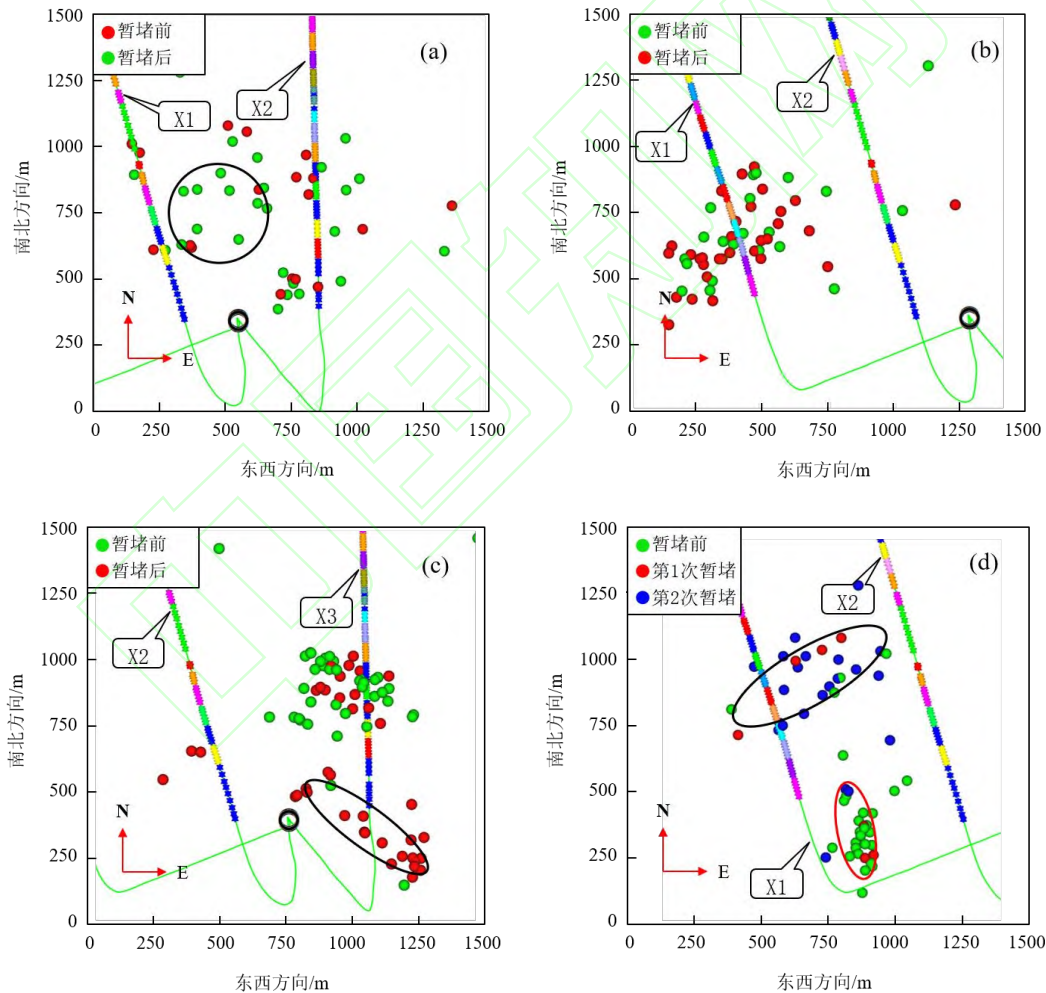


图 5 X 平台压裂暂堵效果分析

(a)X3 井 13 段监测结果; (b)X1 井 16 段监测结果; (c)X3 井 14 段监测结果; (d)X1 井 14 段监测结果。

Fig.5 Analysis of fracturing temporary plugging effect of platform X

(a) Monitoring results of section 13 of well X3; (b) Monitoring results of section 16 of well X1;

(c) Monitoring results of section 14 of well X3; (d) Monitoring results of section 14 of well x1

2.4.2 套管变形分析

X1 井 2 处发生套管变形, X2 井 4 处发生套管变形, 对既发生套管变形又有微地震监测结果的 X1 井 18 段和 X2 井 17 段, 结合微地震事件分布特征和蚂蚁体属性进行套管变形原因分析。

(1) X1 井 18 段套管变形分析

X1 井 18 段, 暂堵前裂缝主要向北偏东 42° 方向延伸 (图 6a 蓝色椭圆), 暂堵后裂缝发生了转向, 主要向北偏东 111° 方向延伸 (图 6a 红色椭圆), 且在 18 段和 19 段射孔位置附近有密集微地震事件响应。压裂过程中这种现象没有引起太多关注, 但压裂后密集微地震事件位置发生了套管变形。结合图 3 蚂蚁体图, 发现该套管变形位置天然裂缝不发育, 结合微地震事件特点, 认为暂堵后的裂缝转向形成了 X 型剪切裂缝, 剪切套管导致套管 19 段位置发生套管变形。

(2) X2 井 17 段套管变形分析

X2 井 17 段, 暂堵前压裂裂缝在主缝方向 (图 6b 黑色椭圆) 延伸, 且长度较小, 暂堵后压裂裂缝沿着裂缝向南延伸 (图 6b 黑色箭头), 且激活了与 X2 井轨迹斜交的天然裂缝 (图 6b 蓝色箭头位置、图 4 红色箭头位置)。压裂结束后, 图 6b 蓝色箭头位置发生了套管变形。分析认为压裂造成了过 X2 井天然裂缝发生剪切滑移导致套管变形。

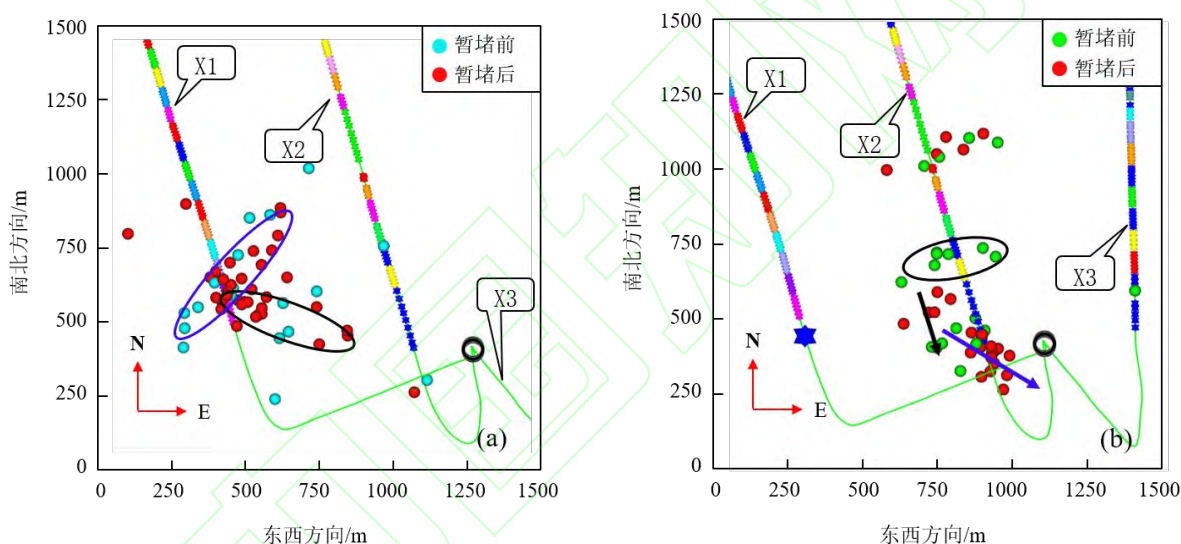


图 6 X1 井第 18 段监测结果(a)和 X2 井第 17 段监测结果(b)
Fig.6 Monitoring results of section 18 of well X1 (a) and section 17 of well X2 (b)

首先结合 X 平台套管变形现象、微地震监测结果、蚂蚁体等进行统计分析和总结套管变形与天然裂缝的相关性。根据图 3, 把天然裂缝分为穿过井筒的天然裂缝和未穿过井筒天然裂缝, 穿过井筒的天然裂缝又分为与压裂裂缝方向一致的天然裂缝和与压裂裂缝方向不一致的天然裂缝, 可以看出, 与压裂裂缝方向不一致的天然裂缝压裂时引起了套管变形 (图 3 红色箭头位置的天然裂缝), 而未穿过井筒天然裂缝 (图 3 绿色箭头位置的天然裂缝) 和与压裂裂缝方向一致的天然裂缝 (图 3 红色圆圈和椭圆位置的天然裂缝) 压裂时均没有引起套管变形。分析认为, 与压裂裂缝方向不一致的天然裂缝发生了剪切滑移, 剪切套管导致套管变形, 而未穿过井筒天然裂缝和与压裂裂缝方向一致的天然裂缝发生了拉张破裂, 拉张对套管影响不大, 因此, 与压裂裂缝方向不一致的天然裂缝更易引起套管变形。另外, 压裂过程中, 不受天然裂缝影响的压裂段也会发生套管变形, 但是套管变形段的微地震监测结果呈 X 型。综上所述, 受力复杂的位置更易发生套管变形, 受力复杂表现为与压裂裂缝方向不一致的天然裂缝和压裂裂缝呈 X 型。

2.4.3 井间窜扰分析

X 平台压裂期间, 周边 8 口井产气量出现不同程度的减少或者波动。以 X4 井为例, 说明压裂对

周边生产井的影响。从图 2 微地震监测结果看出, X4 井附近仅有少量微地震事件, 未见形成明显的压裂裂缝通道导致压裂液大量窜入 X4 井; X3 井压裂过程中施工压力也未出现明显降低; X4 井在压裂期间井口压力、产气量没有出现变化, 而在压裂停止后的几小时才出现井口压力降低、产气量逐渐减小。微地震监测结果, 施工压力变化, X4 井井口压力、气量变化均说明 X4 井气量减小不是压裂直接形成压裂裂缝, 沟通 X4 井, 造成其气量减小。相关研究表明, 威远地区地层无边底水、孔隙束缚水极其有限, 同时结合 X 平台压裂裂缝比较发育, 且距离压裂井较远的井也不同程度的受到影响, 分析认为, X 平台压裂过程中, 造成液量在压裂层段累积, 形成 X 平台高压带, 逐渐驱动压裂液沿着天然裂缝或储层孔隙通道向周边生产井的低压力带渗流, 造成周边井产量的减少。示踪剂解释成果也表明周边井均不同程度见到了 X3 井的示踪剂, 验证了微地震的分析结果准确。因为微地震监测需要有岩石的破裂, 而压裂液沿着储层渗流, 并未造成储层的破裂, 所以微地震监测技术无法刻画压裂液渗流通道, 体现了微地震监测在刻画渗流通道方面的局限性。为防止压裂对周边井影响, 应控制压裂井和周边井之间的压力差, 可从两个方面采取措施, 第一, 提高周边生产井地层能量, 减小诱导力, 第二, 减小压裂井压裂规模, 使液体均匀扩散。具体措施为, 靠近生产井一侧部署井的间距加大; 压裂期间生产井关井, 防止生产井区域亏空及生产诱导压裂裂缝; 减小压裂规模; 区块采用整体开发模式, 部署井全部完钻后, 再进行压裂等。

3 结论

(1) 本文发展形成的页岩气压裂微地震监测技术, 综合了研究区地震、地质、压裂工程、示踪剂、压后产量等多种数据解释微地震监测结果, 实现了多数据融合、多角度验证, 证明了微地震监测结果的可靠性, 为压裂效果评价和压裂工程应用提供了准确的基础资料, 支撑了页岩气的高效开发, 为页岩气压裂微地震监测提供了指导和借鉴。

(2) 与压裂裂缝方向不一致的天然裂缝剪切滑移和压裂裂缝转向引起的剪切是造成 X 平台套管变形的重要因素, 通过采取多次暂堵、实时调整压裂液量等措施可在一定程度上减少套管变形数量和减轻套管变形程度。

(3) X 平台压裂造成压裂液在储层大量累积, 形成局部高压带, 逐渐驱动压裂液沿着天然裂缝或储层孔隙通道向周边生产井的低压力带渗透, 造成压裂窜扰, 使周边井产量波动。

(4) 利用微地震监测技术还不能完全避免套管变形发生和准确刻画压裂液渗流通道等, 具有一定的局限性, 下一步将结合其他监测方法, 发展更为综合性的压裂监测技术。

References

- [1] Chen Zhaowei, Cao Hu, Zhou Xiaojin, *et al.* 2020. Correlation between casing deformation and fracture zones in Changning shale gas block, Sichuan Basin. *Natural gas exploration and development*, 43(4): 123-130.
- [2] HUANG Haoyong, GOU Qiyong, LIU Shengjun, *et al.* 2022. Post-stack fracture comprehensive prediction technology for shale gas:taking Changning national shale gas demonstration area as an example [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 29(2): 218-223.
- [3] LI Han, YAO Zhenxing. 2018. Microseismic focal mechanism inversion in frequency domain based on general dislocation point model[J]. *Chinese Journal Of Geophysics*, 61(3): 905-916.
- [4] Li Z, Chang X, Yao Z X, *et al.* 2019. Fracture monitoring and reservoir evaluation by micro-seismic method[J]. *Chinese Journal of Geophysics(in Chinese)*, 62(2): 707-719, doi: 10.6038/cjg2018L0729.
- [5] MA Xinhua. 2021. "Extreme utilization" development theory of unconventional natural gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(2): 1-11.
- [6] Maxwell S C, Norton M. 2012. Enhancing shale gas reservoir characterization using hydraulic fracture microseismic data[J]. *First Break*, 30(1): 95-101.
- [7] Refunjol X E, Marfurt K J, Calvez J L. 2011. Inversion and attribute-assisted hydraulically induced microseismic fracture characterization in the North Texas Barnett Shale[J]. *The Leading Edge*, 30(3): 292-299.
- [8] TANG Jie, LI Cong, LIU Yingchang, *et al.* 2020. Moment tensor inversion method from borehole data constrained by shear-tensile source model[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 55(1): 126-135.
- [9] TANG Jie, LIU YingChang, HAN ShengYuan, *et al.* 2022. Microseismic forward modeling and full-waveform inversion of focal mechanisms for viscoelastic vertically transverse isotropic media. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 65(1): 301-319, doi: 10.6038/cjg2022P0046.
- [10] Wang Guoqing, Xiao Yongjun, Zhao Hao, *et al.* 2019. Application of microseismic monitoring technology to re-fracturing of shale gas horizontal wells [J]. *Geology and Exploration*, 55(5): 1336-1342.
- [11] WANG Weihong, SHI Wei, KE Xuan, *et al.* 2021. Application of microseismic monitoring technology in hydraulic fracturing of the shale oil in northern SONGLIAO BASIN. *GEOLOGY AND RESOURCES*, 30(3): 357-365.
- [12] Wu Furong, Yan Yuanyuan, Yin Chen. 2016. Real-time microseismic monitoring technology for hydraulic fracturing in shale gas reservoirs:

A case study from the Southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 36(11):46-50.

- [13] Zeng Lingxiang. 2021. Optimization and application of fracture control and channeling prevention technology in Weiyuan shale gas horizontal well[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 11(1): 81-85.
- [14] Zhao C F, Jia Z J, Tian J T, *et al.* 2020. Fracturing effect evaluation based on borehole microseismic monitoring technology: a case study from the well Y22 in Jilin exploration area. *Lithologic Reservoirs*, 32(3):161-168.
- [15] Zhao C F, Zhang W, Tian J T, *et al.* 2018. Interpretation examples of microseismic events[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 53(4): 770-777.
- [16] ZHAO ChaoFeng, ZHANG Wei, TIAN JianTao, *et al.* 2022. Adjustment and effect of oilfield development based on microseismic monitoring technology: a case study from the block J2 in Liaohe exploration area. *Progress in Geophysics(in Chinese)*, 37(1): 320-327, doi: 10.6038/pg2022FF0080.
- [17] Zhao C F, Zhou Z Y, Tian J T, *et al.* 2020. Borehole microseismic monitoring technology for fracturing in unconsolidated sandstone gas reservoir: a case study from the Sebei gas field[J]. *Progress in Geophysics(in Chinese)*, 35(5): 1919-1925, doi: 10.6038/pg2020DD0390.
- [18] ZHAO Jinzhou, FU Yongqiang, WANG Zhenhua, *et al.* 2022. Study on diagnosis model of shale gas fracture network fracturing operation pressure curves[J]. *Natural Gas Industry*, 42(2): 11-19.
- [19] Zhou Xiaojin, Yong Rui, Fan Yu, *et al.* 2020. Influence of natural fractures on fracturing of horizontal shale gas wells and process adjustment[J]. *China Petroleum Exploration*, 25(6): 94-104.
- [20] ZHU Haiyan, SONG Yujia, TANG Xuanhe, *et al.* 2021. Optimization of fracturing timing of infill wells in shale gas reservoirs: a case study on Well Group X1 of Fuling Shale Gas Field in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 41(1): 154-168.

参考文献

- [21] 陈朝伟, 曹虎, 周小金, 等. 2020. 四川盆地长宁区块页岩气井套管变形和裂缝带相关性 [J]. *天然气勘探与开发*, 43(4): 123-130.
- [22] 黄浩勇, 苟其勇, 刘胜军, 等. 2022. 页岩气叠后裂缝综合预测技术: 以长宁国家级页岩气示范区为例 [J]. *断块油气田*, 29(2): 218-223.
- [23] 李晗, 姚振兴. 2018. 基于“剪切+张裂”一般位错模型频率域求解微地震震源机制[J]. *地球物理学报*, 61(3): 905-916.
- [24] 李政, 常旭, 姚振兴, 等. 2019. 微地震方法的裂缝监测与储层评价[J]. *地球物理学报*, 62(2): 707-719, doi: 10.6038/cjg2018L0729.
- [25] 马新华. 2021. 非常规天然气“极限动用”开发理论与实践[J]. *石油勘探与开发*, 48(2): 1-11.
- [26] 唐杰, 李聪, 刘英昌, 等. 2020. 剪张源约束的井中微地震震源机制反演方法[J]. *石油地球物理勘探*, 55(1): 126-135.
- [27] 唐杰, 刘英昌, 韩盛元, 等. 2022. 黏弹性 VTI 介质微地震正演模拟与震源机制全波形反演[J]. *地球物理学报*, 65(1): 301-319, doi: 10.6038/cjg2022P0046
- [28] 汪国庆, 肖勇军, 赵昊, 等. 2019. 微地震监测技术在页岩气水平井重复压裂中的应用[J]. *地质与勘探*, 55(5): 1336-1342.
- [29] 王维红, 时伟, 柯璇, 等. 2021. 松辽盆地北部页岩油水力压裂微地震监测技术及应用[J]. *地质与资源*, 30(3): 357-365.
- [30] 巫芙蓉, 闫媛媛, 尹陈. 2016. 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*, 36(11): 46-50.
- [31] 曾凌翔. 2021. 威远页岩气水平井控缝防窜技术优化与应用[J]. *油气藏评价与开发*, 11(1): 81-85.
- [32] 赵超峰, 贾振甲, 田建涛, 等. 2020. 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*, 32(3): 161-168.
- [33] 赵超峰, 张伟, 田建涛, 等. 2018. 微地震事件解释实例[J]. *石油地球物理勘探*, 53(4): 770-777.
- [34] 赵超峰, 张伟, 田建涛, 等. 2022. 基于微地震监测技术的油田开发方案调整及效果——以辽河探区 J2 块为例[J]. *地球物理学进展*, 37(1): 320-327, doi: 10.6038/pg2022FF0080.
- [35] 赵超峰, 周治岳, 田建涛, 等. 2020. 疏松砂岩气藏压裂井中微地震监测应用研究: 以涩北气田为例[J]. *地球物理学进展*, 35(5): 1919-1925, doi: 10.6038/pg2020DD0390.
- [36] 赵金洲, 付永强, 王振华, 等. 2022. 页岩气水平井缝网压裂施工压力曲线的诊断识别方法[J]. *天然气工业*, 42(2): 11-19.
- [37] 周小金, 雍锐, 范宇, 等. 2020. 天然裂缝对页岩气水平井压裂的影响及工艺调整[J]. *中国石油勘探*, 25(6): 94-104.
- [38] 朱海燕, 宋宇家, 唐焯赫, 等. 2021. 页岩气藏加密井压裂时机优化——以四川盆地涪陵页岩气田 X1 井组为例[J]. *天然气工业*, 41(1): 154-168.