

# 微地震裂缝检测技术应用实例

容娇君\* 李彦鹏 徐刚 梁雪莉

(东方地球物理公司新兴物探开发处,河北涿州 072750)

容娇君,李彦鹏,徐刚,梁雪莉. 微地震裂缝检测技术应用实例. 石油地球物理勘探,2015,50(5):919-924.

**摘要** 对于断层和天然裂隙发育的致密砂岩储层,设计者希望通过人工压裂连通天然裂缝改造储层内部导流能力,使其更有效产油产气。然而储层内部复杂的各向异性使得压裂裂缝形态很难被提前预测,对储层改造过程中发生的微地震事件进行监测,可以通过微地震事件的分布及属性特征较准确地评估压裂效果。本文展示了一个致密砂岩储层改造微地震监测实例,通过微地震事件信号处理及定位结果分析,认识断层和水力压裂致裂的微地震信号特点及震源属性差异,查明了储层改造后产水原因。

**关键词** 微地震监测 裂缝检测 震源属性 储层改造

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.05.015

## 1 引言

微地震监测技术是对压裂效果最有效的评价手段之一,在油气储层改造中应用广泛。在储层改造施工过程中岩石破裂将释放能量,产生能被监测到的破裂振动信号,微地震能较好地评估改造效果。地面微地震监测受能量衰减及地面噪声影响,能有效检测并进行定位的微地震事件数量不足,对储层改造效果的描述能力不够全面;而井下微地震监测具有事件信号可靠并准确定位的优点,得以在油气田储层改造中推广应用。随着井下微地震监测应用技术的成熟及定位精度的提高,该技术已不再局限于提供改造裂缝的长、宽、高等几何信息,转而结合其他信息精细地解决储层相关的油藏地质问题。越来越多的学者开始研究微地震相关的储层动态信息,Will等<sup>[1]</sup>利用连续微地震事件对水力压裂力学机理进行研究,Turuntaev等<sup>[2]</sup>把微地震活动作为局部孔隙压力变化的特性。本文通过一个典型的压裂微地震监测项目,识别了储层改造后产水原因,认识断层重新激活后产生的微地震信号特征。

## 2 工区概述

研究区地处四川盆地东部,储层为致密砂岩气,

埋深在2300m左右,从地震资料分析周围应有小断层,成像测井也显示裂缝比较发育,但钻井、录井均没发现断层,测井和钻井显示在储层目的层下部为水层,储层和水层中间没有明显的挡水层。天然裂缝在影响区域内对单井产量影响较明显,因此此次压裂设计采用“大液量、低砂比、大排量”储层改造模式,力求与储层天然裂缝连通,提高裂缝对储层流动区域的控制范围。

为了解人工裂缝延伸形态,采用了井下微地震裂缝监测。监测井选择了附近的一口斜井,该井固井质量良好,最大斜度达 $36^\circ$ 。监测井对井下的目的层采用了射孔完井方式,为了降低监测井内的噪声在射孔上方进行了桥塞封堵。为尽可能接近储层改造目的层,井下三分量检波器安置在监测井桥塞位置之上,该处井斜为 $33.4^\circ$ 。建立的观测系统如图1所示,

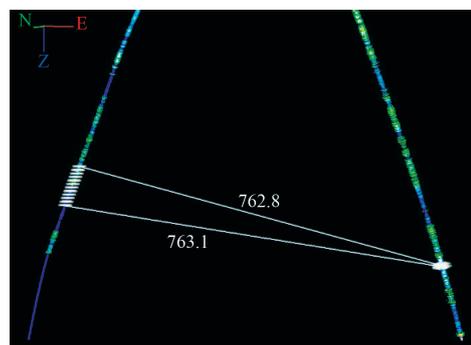


图1 井下微地震监测观测系统图(单位:m)

\* 河北省涿州市范阳西路188号新安小区,072750。Email:rongjiaojun@cnpc.com.cn

本文于2014年7月3日收到,最终修改稿于2015年8月7日收到。

采用 12 级井下三分量检波器接收, 储层改造井射孔位置与检波器的距离在 762.8~763.1m 之间。

### 3 微地震资料分析处理

该项目压裂井附近的储层内部为较复杂的各向异性介质, 但整体信号采集背景较好。监测井场周围 1.5km 内没有其他活动井场, 也没有明显外部干扰源。监测井和压裂井在同一个井场, 压裂施工设备的振动为主要干扰源, 庆幸的是从采集的背景噪声对信号没有出现明显影响。采集的射孔信号中噪声较弱, P 波起跳比较清晰, 可以用于检波器方向的校正。射孔信号中没有识别到清晰的 S 波起跳, 仅通过射孔信号对 P 波速度模型进行了校正, S 波速度模型主要通过测井相关资料确定。斜井中检波器的垂直分量处于倾斜状态, 斜度随井轨迹变化, 检波

器方向和斜度均需校正, 并且要求较高。从射孔信号反定位的结果来看, 速度模型和检波器方向较准确, 反定位误差为 5.3m。

中间储层改造期间接收到的微地震事件较少, 并且能量弱, 进行定位的误差相对较大。上部储层改造期间接收到了大量高信噪比事件 (如图 2a、图 2b), 信号主频带为 50~450Hz (如图 2c), 采用纵横波时差法对所有较可靠的微地震事件进行定位处理, 即利用校正后速度模型和纵横波时差确定微地震事件到检波器的距离, 利用 P 波偏振方向确定微地震事件的发生方位, 用距离和方位共同确定微地震事件准确的空间位置。P 波能量越强方位准确性越高; P 波和 S 波的能量越强, 起跳越清晰, P 波和 S 波的到达时间拾取越准确, 方位和距离将越准确。如图 2 中微地震事件中 P 波的起跳比较清晰, 并且 S 波能量和 P 波能量相当, 可比较准确地定位。

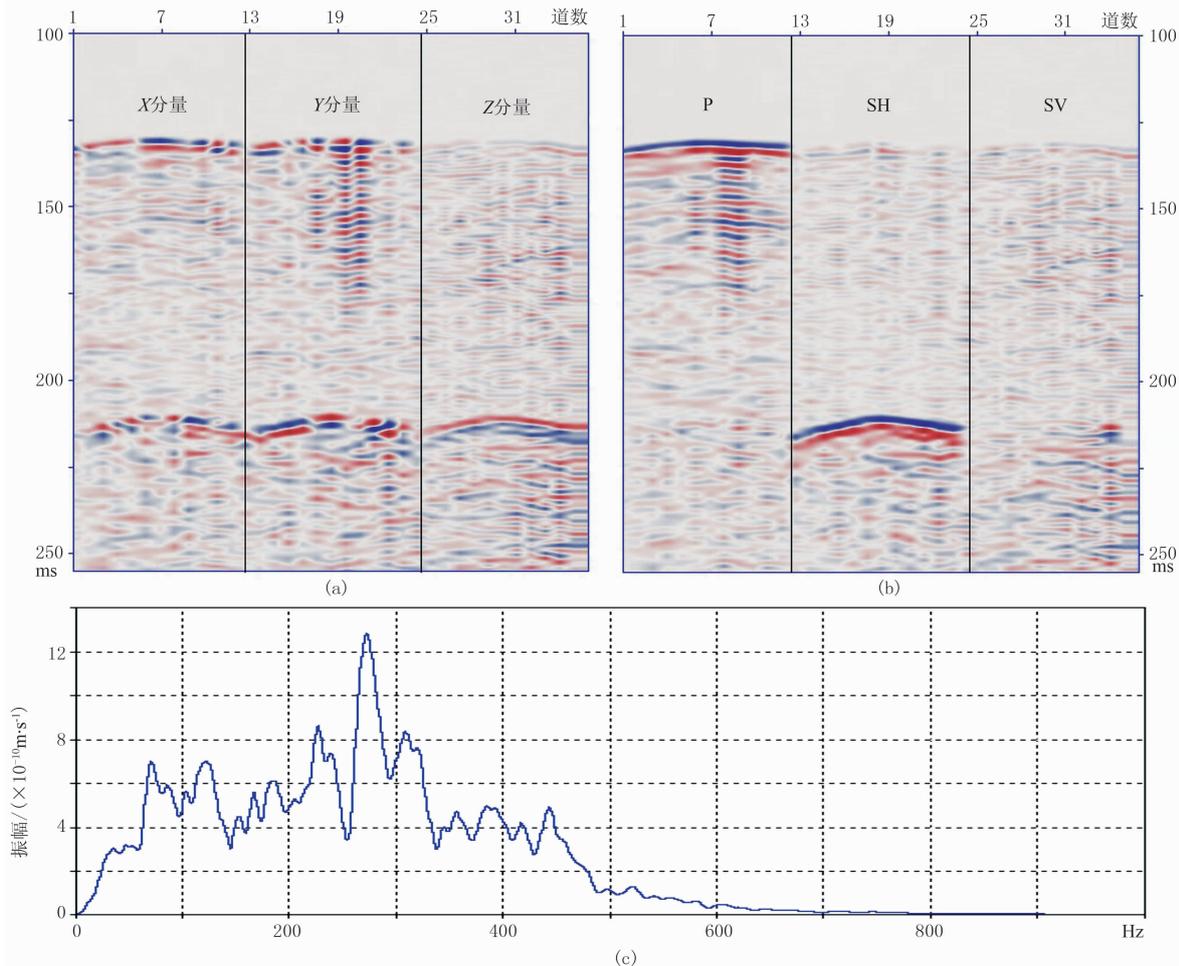


图 2 典型微地震事件信号特征

(a) 微地震事件原始信号; (b) 分离后的 P、SH 和 SV 波场; (c) 原始信号频谱图

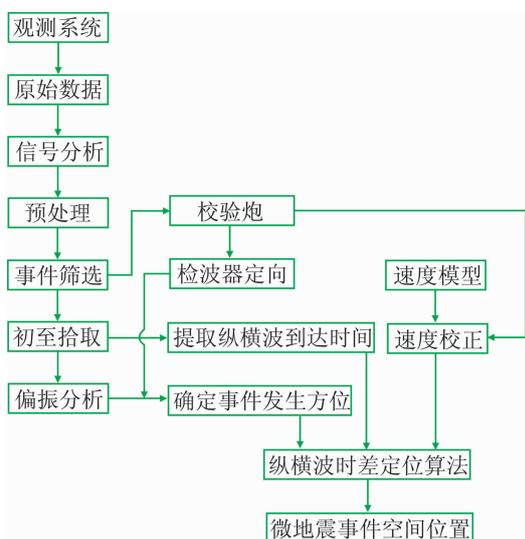


图 3 微地震资料处理流程图

在施工现场根据制定的微地震处理流程(图 3)对监测到的所有可定位微地震事件进行处理,得到如图 4 所示的结果,微地震事件共 154 个,震级范围在  $-3.1 \sim -0.1$  之间(图 4 中绿色到红色代表微地震事件发生时间从早到晚,球形大小代表事件震级大小)。

### 4 裂缝检测

为了清楚地了解人工裂缝的形成过程,对比储层改造施工参数(图 5),通过观察分析不同时间施工参数的变化和微地震发生数量关系。图 5 中的阶段①在短时间给地层挤入了酸,此过程没有形成可识别的微地震事件,主要目的是清除井筒中的酸溶

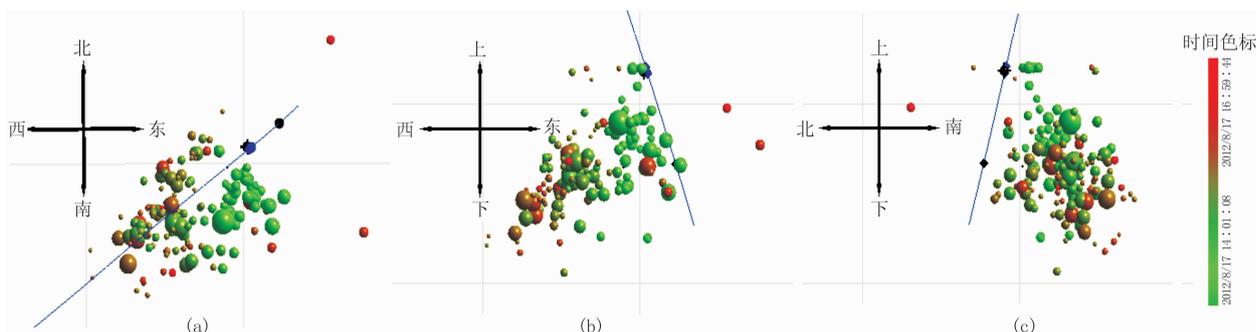


图 4 上部储层改造过程中发生的微地震事件分布  
(a)俯视图; (b)侧视图(深度—东西); (c)侧视图(深度—南北)

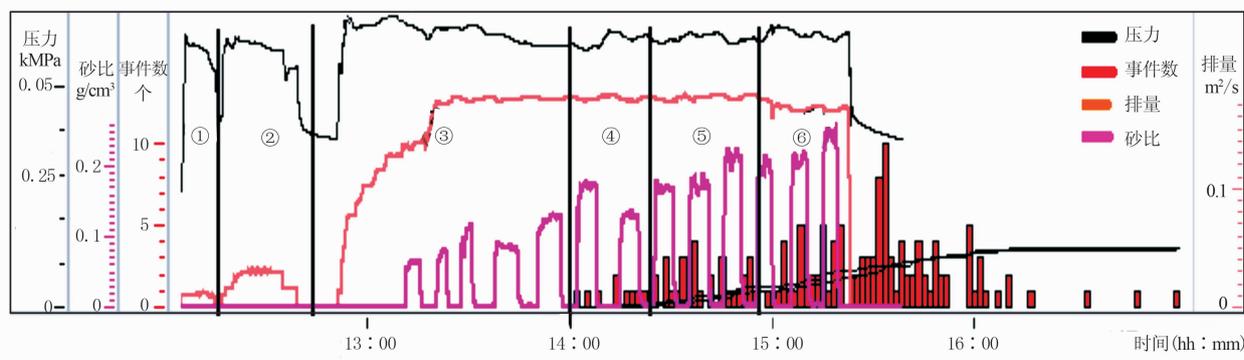


图 5 施工曲线和微地震事件

性结垢物及疏通射孔孔眼;阶段②和阶段③是反复注入前置液对储层进行预冲洗和段塞,以调整产层吸收能力之后开始造缝填砂,这段时间识别的微地震事件较少,信噪比低,未能成功进行空间定位;阶段④、阶段⑤、阶段⑥是支撑剂注入的过程,在 14:00 前后压力略有降低,随后压力稳定起伏,该现象说明裂缝(人工或天然裂缝)在改造过程中有延伸,而砂

比连续增加说明造缝显著(极有可能与天然缝沟通)。

对应压裂施工曲线(图 5)同时反复观察断层在深度方向的延伸状态,图 6 把断层活动分为开始有反应、激活状态和彻底沟通三个时间段。在这三个时间段内微地震事件展布有差异,图 6a 的截止时间为 14:23,为断层对注水压裂开始有反应,但并没有产生大震级的微地震事件,说明断层处于诱导反应状态;

图 6b 的截止时间为 14 : 55, 断层开始逐渐激活, 伴随有大震级的微地震事件发生, 说明断层已处于激活状态; 图 6c 的截止到压裂施工结束, 为断层大量

活动并随着水力压力的降低而闭合的过程, 期间大量的微地震事件发生, 并有一定数量的大震级事件, 断层响应的宽度也明显增大, 说明断层彻底活动了。

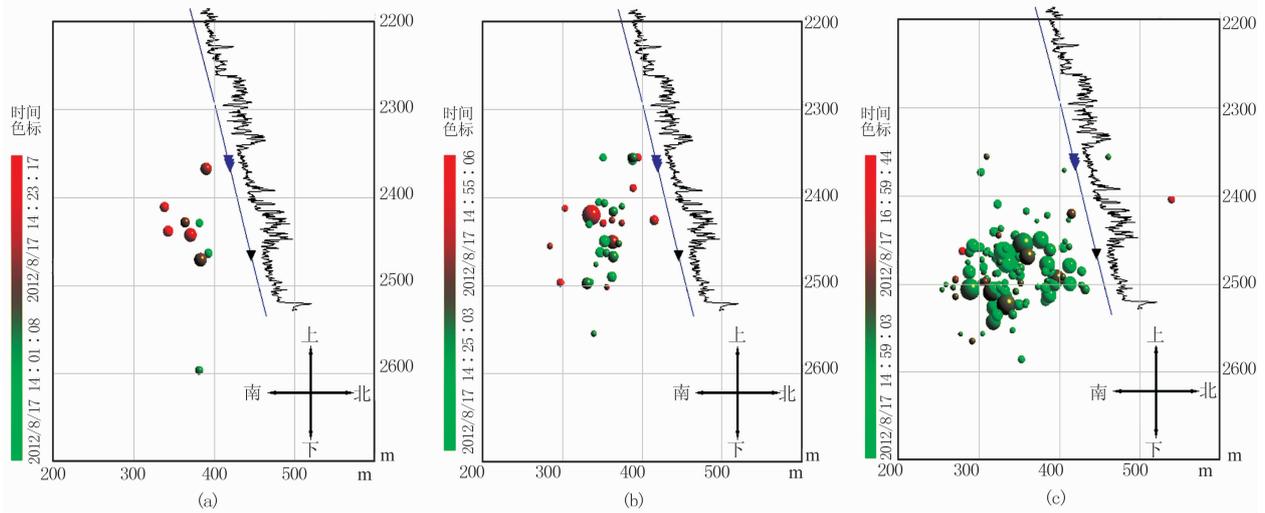


图 6 三个时间段内微地震事件的空间分布

(a)截止时间为 14 : 23; (b)截止时间为 14 : 55; (c)截止到压裂施工结束

Maxwell 等<sup>[3]</sup>对水力压裂中的断层活动进行了分析, 说明断层活动产生的信号确实有别于正常水力致裂信号。一般相对均质的地层压裂造缝过程中微地震显示的裂缝在射孔点周围对称分布, 然而此次上部储层的大部分微地震事件从射孔点(图 7 中红色处)一侧往下延展(从图 7 的微地震密度分布中看得更清楚), 其展布情况比较复杂。此外, 还有三个异常情况: 图 2 显示 P 波和 S 波的能量相当(图 8), 而一般人工裂缝改造中以剪切为主, S 波能量要数倍以上于 P 波能量; 微地震事件震级差异较大(图 9), 说明破裂活动极度不均匀; 停泵之后的微地震事件

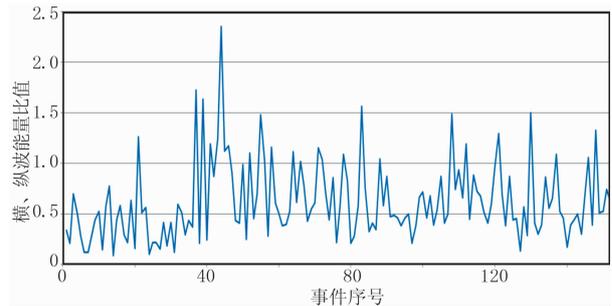


图 8 微地震事件横、纵波能量比统计

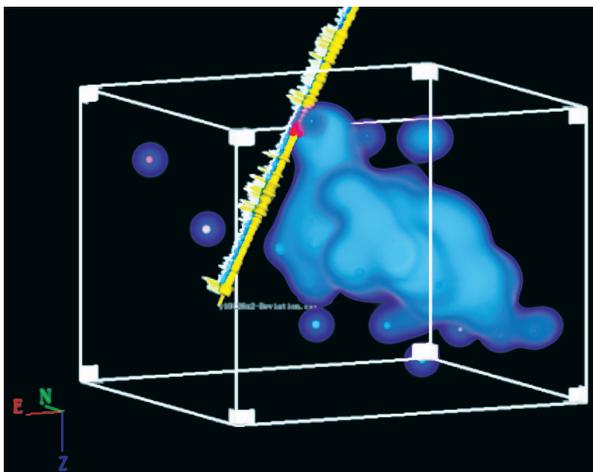


图 7 微地震事件密度分布

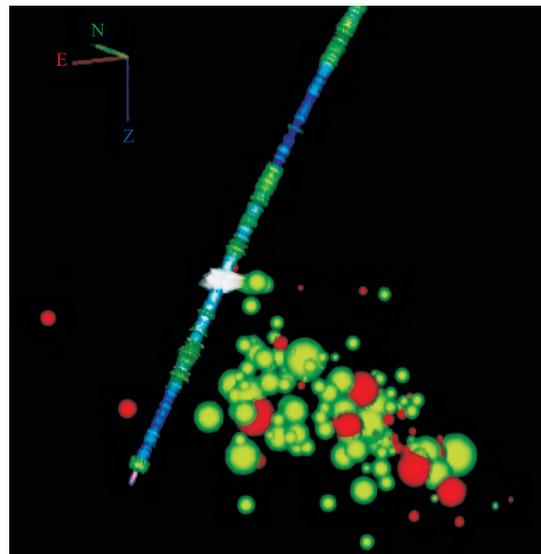


图 9 微地震事件(绿色为停泵前, 红色为停泵后)

震级也较大,达到 $-0.1$ ,并且差异较大。这一点均说明此次人工裂缝改造结果较复杂,现场得出的结论是人工造缝过程很有可能沟通了目的层周围的小断层,这个结论与储层改造的初衷一致,但是造缝结果与小断层及周围裂隙的沟通情况需进一步分析。

为了更清楚地了解微地震在整个储层段附近的波及情况,把微地震事件分布和该井周围的地震剖面进行嵌入式比较(图10,深度方向以已知井轨迹

射孔点为基准点,按校正后速度模型进行时深转换后进行匹配;水平方向以井口距离为基准进行等比例匹配)。从图10中可以较清晰地得出结论,从压裂施工开始初期微地震事件显示的裂缝往上部储层的下侧延伸,并且随着压裂的进行开始进入周围的小断层,与压裂初衷不一致的是微地震事件穿过了下部储层进入水层。如果压裂后生产,水层中的水将涌进上部储层导致上部储层以下的油气无法开采。

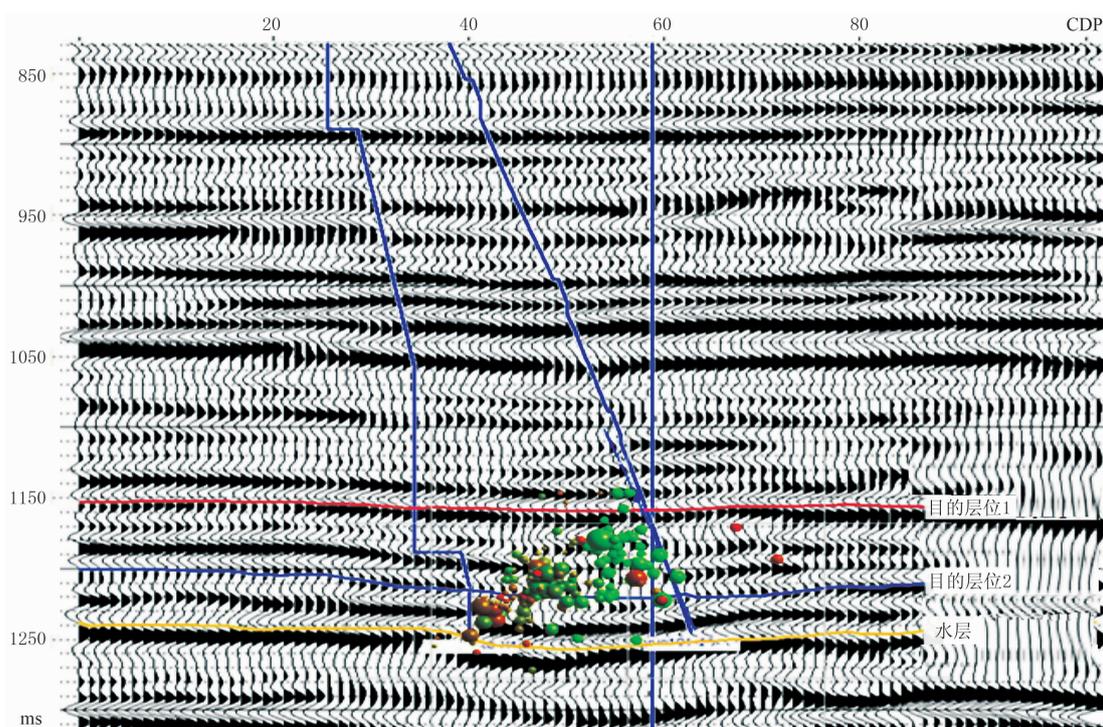


图10 微地震事件和地震剖面的综合显示

由于没有更好的解决办法,对该井进行了钻塞试生产。反排进行了数天,当反排量超过压裂液量后反排排量依然没有降低,并且一直出水,证明下部水层通过裂缝进入了上部储层。最后该井在上部储层之上进行了桥塞封堵,转而计划进行其他油气层位的开发。

## 5 结论与建议

该项目压裂井储层附近内部的断层、天然裂隙发育,地质条件相对复杂,微地震监测达到了对人工造缝展布的精细描述,对复杂区域的裂缝诊断比较准确。通过该项目得到几点认识:①压裂破裂的微地震信号横、纵波能量比较大,而断层激活产生的微地震事件横、纵波能量比值偏小,震源属性也不一

样;②断层活动发生的微地震事件震级偏大,并且伴有震级相对小的微地震事件发生,整体微地震事件的震级差异大;③经过实际验证下部水层通过裂缝进入了上部储层,微地震监测在有效监测范围内能对复杂人造裂缝网络进行有效诊断。

建议在其他断层及裂隙发育的复杂区域进行储层改造时,需根据微地震监测结果实时调整压裂施工参数,如果前期有完整的地震属性、地震地质、测井资料及储层油藏信息等资料,需要对这些资料进行综合分析才能更准确地描述裂缝属性。

### 参考文献

- [1] Will P, Juan R M, Young R P. Using continuous microseismic records for hydrofracture diagnostics and mechanics. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28:1542-1546.

- [ 2 ] Turuntaev S B, Zenchenko E V, Eremeeva E I. Temporal behavior of microseismicity as a characteristic of local pore pressure change. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28: 1642-1646.
- [ 3 ] Maxwell S C, Jones M, Parker R. Fault activation during hydraulic fracturing. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28: 1552-1556.
- [ 4 ] Tokso M N. Microseismic and an attempted application to exploration. Geophysics, 1964, 29 (2): 154-177.
- [ 5 ] Das I and Mark D Z. Long period, long duration seismic events during hydraulic fracture stimulation of a shale gas reservoir. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30:1473-1477.
- [ 6 ] Scott W, Michael K, Alejandro D L P. Identifying fault activation during hydraulic stimulation in the Barnett shale: source mechanisms, b values, and energy release analyses of microseismicity. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30:1463-1467.
- [ 7 ] Mayerhofer M J, Lolon E P, Warpinski N R et al. What is stimulated reservoir volume (SRV)? SPE Shale Gas Production Conference, 2008, SPE-119890.
- [ 8 ] Waleed F. Innovative simulation techniques to history match horizontal wells in shale gas reservoirs. SPE Eastern Regional Conference, 2010, SPE-139114.
- [ 9 ] Raquel V, Kit C, Stephen W. The characterization of fracture mechanisms using a combination of surface microseismic imaging, microdeformation modelling, and downhole microseismic mapping; An examination of the value of moment tensor microseismic imaging. Unconventional Resources Technology Conference, 2014, Urtec-2014-1920493.
- [10] 梁兵,朱广生. 油气田勘探开发中的微震监测方法. 北京:石油工业出版社,2004,67-73.
- [11] 贺振华,黄德济,文晓涛. 裂缝油气藏地球物理预测. 成都:四川科学技术出版社,2007,5-42.
- [12] 容娇君,张固澜,郭晓玲等. 压裂/微地震事件地面响应信号模拟. 石油天然气学报,2010,32(4):247-250. Rong Jiaojun, Zhang Gulan, Guo Xiaoling et al. Surface signal simulation of fracturing and microseismic events. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(4):247-250.

(本文编辑:刘英)

### 作者简介



容娇君 工程师,1982年生;2005年毕业于江汉石油学院勘查技术与工程专业,获学士学位;2008年获成都理工大学地球探测与信息技术专业硕士学位;现在中国石油东方地球物理勘探有限责任公司从事微地震监测技术方法研究工作。

(上接第 911 页)

- [27] Chew W C and Liu Q H. Perfectly matched layers for elastodynamics: A new absorbing boundary condition. Journal of Computational Acoustics, 1996, 4 (4): 341-359.
- [28] Komatitsch D, Barnes C, Tromp J. Wave propagation near a fluid-solid interface: A spectral-element approach. Geophysics, 2000, 65 (2): 623-631.
- [29] Komatitsch D, Barnes C, Tromp J. Simulation of anisotropic wave propagation based upon a spectral element method. Geophysics, 2000, 65 (4): 1251-1260.
- [30] De Basabe J D, Sen M K. Grid dispersion and stability criteria of some common finite-element methods for acoustic and elastic wave equations. Geophysics, 2007, 72 (6): T81-T95.
- [31] de Hoop A T. A modification of Cagniard's method

for solving seismic pulse problems. Applied Scientific Research, 1960, 8 (1): 349-356.

(本文编辑:宜明理)

### 作者简介



刘少林 博士,1988年生;2010年毕业于云南大学地球物理系,获学士学位;2015年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所固体地球物理专业,获博士学位;现在清华大学数学科学系做博士后研究,主要从事地震波传播与成像研究;至今以第一作者发表 SCI 和 EI

收录论文 10 篇。