

# 利用微破裂四维影像技术分析二次加砂压裂效果

安丰军<sup>1,2</sup>, 赵安军<sup>3</sup>, 周慧智<sup>3</sup>, 段贵府<sup>4</sup>

(1. 中国地质大学(北京)人文经管学院, 北京 100083; 2. 延边大学马克思主义学院, 吉林延吉 133002; 3. 中国石油华北油田公司, 河北任丘 062552; 4. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

**摘要:**在水力加砂压裂中,目前常用获取压裂裂缝几何形态和几何参数信息的手段(如井温测井、阵列声波测井)存在不足,为此,试验应用了微破裂向量扫描四维影像监测技术。该技术通过在近地表按不同排列形式布置多道地震采集站形成的微地震仪器阵列,共同接收地下储层液体流动压力引起的岩石微破裂所产生的纵波和横波,检波器接收到信号后通过能量转换器将振动波转换成电信号,经前置放大后以电磁波的形式,发射送入记录、分析系统,利用多波三分量地震数据进行矢量叠加、振幅反演计算、四维相关可视化裂缝形态解释技术,在时间域上分析裂缝的演变过程。在二连盆地兰地1井的现场试验表明,该技术可以进行压裂施工全过程破裂能量分析、裂缝产生演变过程分析及裂缝空间形态参数求取,能真实反映二次加砂压裂效果并为下一步的压裂施工设计提供可靠依据。

**关键词:**水力压裂 加砂压裂 裂缝方位 裂缝高度 向量扫描 兰地1井

**中图分类号:**TE357.1<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)05-0098-04

## Effect Analysis of Secondary Sand Fracturing Using Four-Dimensional Seismic Imaging of Micro-Fractures

An Fengjun<sup>1,2</sup>, Zhao Anjun<sup>3</sup>, Zhou Huizhi<sup>3</sup>, Duan Guifu<sup>4</sup>

(1. Faculty of Humanities, Economy & Management, China Geosciences University, Beijing, 100083, China; 2. Marx College, Yanbian University, Yanji, Jilin, 133002, China; 3. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei, 062552, China; 4. Langfang Branch of Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Langfang, Hebei, 065007, China)

**Abstract:** Commonly used means to obtain fracture geometry at present such as temperature log and arrayed acoustic log have some deficiencies, four-dimensional vector scanning imaging was tested. During hydraulic fracturing, longitudinal wave and shear wave produced from rock failure are received by micro-seismic instrument array of multi-channel seismic acquisition station in different patterns near the surface. Wave signals received by geophones are then converted into electrical signals through energy converter. After pre-amplification, they are sent to the recording and analysis system in the form of electromagnetic waves. Finally vector stacking of multi-wave three component seismic data, amplitude inversion modeling and four dimension related visual fracture morphology interpretation techniques are used to analyze the evolution of fractures in time domain. Its application in Well Landi 1 of Erlian Basin showed it could be used to analyze the fracturing energy and fracture evolution in whole fracturing process, and to calculate fracture spatial geometry parameters, which reflect the effect of sand fracturing and provide reliable basis for the future fracturing design and operation.

**Key words:** hydraulic fracturing; sand fracturing; fracture azimuth; fracture height; vector scanning; Well Landi 1

对油气储层进行水力压裂时,高黏流体注入地层会使孔隙流体压力迅速升高,高孔隙压力以剪切破裂和张性破裂的方式引起岩石破裂。岩石破裂时发出微地震波,微地震波在地层中以球面波的形式向四周传播。因此,压裂裂缝几何形态的描述和几何参数的求取是非常复杂且很难准确的。目前关于压裂裂缝高度等的判断,采用比较多的技术是井温测井和阵列声波测井,但这两种方法存在共同的不足,

即一旦压裂施工中井筒沉砂则无法完成测井。微破

**收稿日期:**2013-07-20; **改回日期:**2013-09-05。

**作者简介:**安丰军(1973—),男,吉林敦化人,1996年毕业于延边大学农学院森林资源专业,2005年获延边大学法学硕士学位,中国地质大学(北京)管理科学与工程在读博士研究生,副教授,主要从事环境伦理学方面的研究。

**联系方式:**(0433)2733132, dqsky2008@163.com。

**基金项目:**中国石油天然气股份有限公司重大专项“低/特低渗透油藏有效开发技术”(编号:2013B-1202)部分内容。

裂向量扫描四维影像监测技术(以下简称微破裂四维影像技术)不受井筒条件限制,而且可以在时间域上分析裂缝的演变过程,并适时监测裂缝的几何形态及方位<sup>[1-3]</sup>。为此,笔者介绍了微破裂四维影像技术,以兰地 1 井为例,详细分析了该技术的应用效果。

## 1 微破裂四维影像技术原理

### 1.1 关键技术

微破裂四维影像技术,是通过在近地表按不同排列形式布置多道地震采集站,形成微地震仪器阵列,共同接收储层液体流动压力引起的岩石微破裂所产生的纵波和横波。利用多波三分量地震数据进行矢量叠加、振幅反演计算、四维相关可视化裂缝形态解释技术,可在时间域上分析裂缝的演变过程。

微破裂四维影像技术在微地震波的采集、资料处理和裂缝解释方面主要采用以下关键技术:

1) 多波多分量微地震数据采集技术。采用高采样率、宽频带、连续记录、宽动态范围的三分量检波器采集站进行微地震纵波、横波信号采集。

2) 多道向量叠加振幅反演技术。通过多个采集站接受的地震波道集的不同入射角地震波场的向量叠加和网格扫描振幅反演计算,确定监测区域地下空间体内各网格节点的振幅(能量)值。

3) 四维可视化相干体裂缝解释技术。在压裂期内进行一维时间域各时间点三维振幅数据体的相关差异对比,清晰认识压裂裂缝的演变过程,并判断破裂裂缝的方位及几何形态。

### 1.2 技术原理

#### 1.2.1 多道向量叠加振幅反演计算

微破裂四维影像技术是利用微地震波的振幅属性,通过多道微地震波的 Semblance 向量叠加和网格扫描振幅反演处理技术,得出三维空间体内各网格节点的振幅(能量)值。其具体方法是:

1) 确定监测的三维空间体的范围,其顶面为地表最高点海拔的平面,监测的油藏目的层对应空间体中某一深度值的曲面或平面,按一定长度单位将监测地质空间体划分为多个网格扫描单元。

2) 根据其他地球物理资料(如声波测井)计算出空间体各扫描单元网格节点的地震波速度。

3) 进行微地震波路径射线追踪,计算出各网格节点到地面各检波点的射线方向(入射角方位与倾角)和最小旅行时值。

4) 多道微地震信号进行向量叠加,在地表各个采集站接受的所有多道微地震信号取特定时间窗口  $\omega$ ,根据空间体网格节点  $k$  经射线追踪确定的到各个采集站的方位及入射角,旋转各道三分量微地震记录信号形成矢量波动场,适当移动每一信号记录时间,向量叠加计算所有采集站记录的信号振幅  $f$ ,并适当使用归一化因子  $F$ ,即得出空间体网格节点  $k$  的破裂辐射能量  $S(k)$ 。图 1 所示为地下微破裂点  $K$  与地表各个采集站之间的射线追踪路径,图 2 所示为地下各网格节点与地面采集站 SL 之间的射线追踪路径。

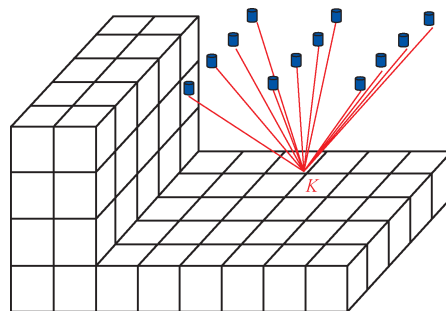


图 1 破裂点  $K$  与各采集站间的射线示意

Fig. 1 Relationship between rock breaking point  $K$  and the acquisition station ray

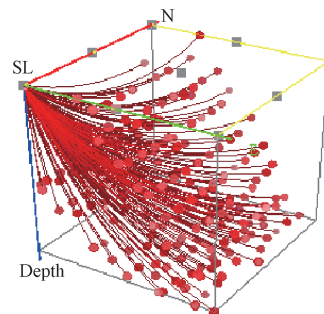


图 2 各网格节点与采集站 SL 间的射线示意

Fig. 2 Relationship between each grid node and the acquisition station SL ray

在向量叠加计算中,取每一采集站记录,取特定时间窗口  $\omega$ ,计算公式为<sup>[4]</sup>:

$$S(k) = \frac{\sum_{i=1}^N \left[ \sum_{j=1}^M f_{ij} \right]^2}{F} \quad (1)$$

式中: $S(k)$ 为 Semblance 系数,是使用  $M$  个采集站阵列的向量方向的道对空间第  $k$  点破裂微地震振幅(能量)的测量值,即向量叠加的破裂能量; $f_{ij}$ 为第  $i$  道的第  $j$  个样点记录( $i=1, \dots, M; j=1, \dots, N$ ); $F$ 为适当的归一因子。

5) 空间体能量扫描计算及破裂定位。对所有目标空间体的网格单元节点逐一进行扫描,进行多道微地震信号向量叠加,从而获得监测目标空间体

内各个网格节点的能量值。

6) 归一因子  $F$  的计算。消除仪器本身噪音和不同时窗的差别。经归一因子计算后,  $S(k)$  的物理意义就是单位台站、单位时间破裂释放的能量。归一计算后监测得到的地下能量的单位为 1。

### 1.2.2 四维可视化相干体裂缝解释技术

多道地震波场矢量叠加后, 随机噪音将消弱, 有用破裂地震信号将增强, 从而“提取”出不同时间窗口空间体内各网格节点的破裂能量。但为了进一步突出压裂期间破裂能量的突变及破裂空间形态, 需再针对压裂全过程不同时间、相同区域的三维空间数据体进行互相关计算, 即相同区域内各点的能量值减去该区最小的能量值。将叠加反演计算的四维振幅数据体转换为压裂裂缝解释的四维振幅相干体。在振幅相干体的显示上运用相同色标差值的标定方法, 色差显示出不同时间不同区域的相关性梯度突变情况, 从而有效压制背景噪音及随机干扰, 见图 3。

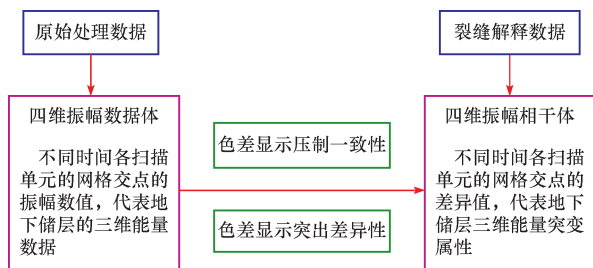


图3 四维可视化相干体裂缝解释流程

Fig. 3 Interpretation diagram of fractures with four-dimensional visualization of coherent volume

## 2 应用实例

微破裂四维影像技术在兰地 1 井进行了现场试验应用, 以验证其效果。

### 2.1 兰地 1 井概况

兰地 1 井是部署在二连盆地新区乌兰花凹陷的一口探井, 压裂井段 2 231.40~2 253.00 m, 13.8 m/5 层, 压裂的最大难点是纵向改造程度的提高。兰地 1 井的应力剖面如图 4 所示。从图 4 可以看出, 压裂目的层段应力差异大, 因此采用常规的压裂工艺很难一次全部压开<sup>[5-6]</sup>。

为提高纵向压开程度, 采用了多级加砂技术, 即压开第一层后停泵, 待裂缝闭合后再压第二层。依靠第一层加砂压裂后产生的应力差, 使第二次压裂

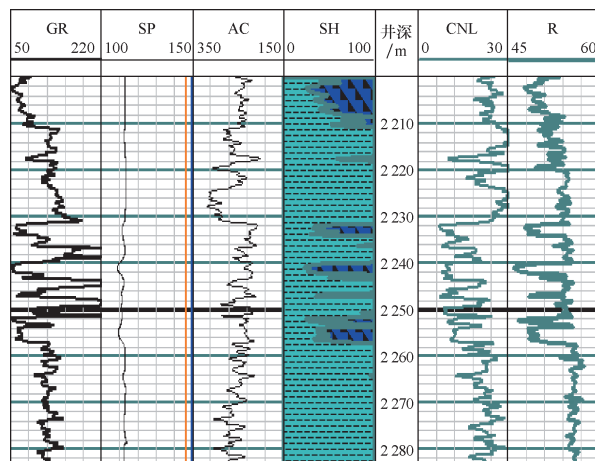


图4 兰地 1 井应力剖面

Fig. 4 Stress profile of Well Landi 1

时更有利于压开新的目的层, 达到提高纵向改造程度的目的<sup>[7]</sup>。采用微破裂四维影像技术检验二次加砂效果: 适时监测压裂几何尺寸, 并用缝高来帮助分析多级加砂技术的应用效果。

### 2.2 压裂施工情况及全过程破裂能量分析

第 1 次加砂 35.34 m<sup>3</sup>, 第 2 次加砂 19.62 m<sup>3</sup>。监测中, 在距井 1 km 处布置 4 个排列 36 道采集站 180 个三分量检波器芯的微地震波采集仪器阵列, 共同接受储层微破裂地震纵横波。通过多道向量叠加振幅反演计算, 得出压裂全过程监测区域三维空间 ( $x$  方向 0~800 m;  $y$  方向 0~800 m;  $z$  方向 2 210~2 280 m) 每 30 s 的破裂能量分布数据体。通过分析对比能量数据体中井筒附近破裂能量随时间的变化可知: 第 1 次压裂在井筒附近产生的较强破裂能量、第 2 次加砂后 20 min 井筒附近产生的较强破裂能量、压裂引起的储层破裂时间, 与压裂施工的实际情况基本一致。根据压裂施工储层产生裂缝的演变规律和岩石破裂机制分析结果, 说明井筒附近区域储层岩性存在非均质差异, 区域储层存在断层破裂带<sup>[8]</sup>。储层在压裂液挤压作用下, 造成周边岩石发生一定的剪切破裂活动, 并产生微地震横波。由于横波的振幅较大, 故在数据体的水平切片上形成破裂能量的差异突变。

### 2.3 压裂裂缝产生的演变过程分析

压裂从第 1 次前置液注入到第 2 次顶替液注入结束, 前后共 141 min, 在解释压裂裂缝产生演变过程中运用每隔 30 s 的三维空间能量相干体。其中, 距井筒 150 m 区域范围内破裂能量过井间垂深 2 240 m 处的水平能量时间切片。分析压裂

裂缝在水平面投影的演变过程表明:压裂开始后,岩石破裂首先发生在井的东南部,第 1 条裂缝方位为北偏西向;约 30 min 后,破裂发生转向产生第 2 条裂缝,方位为北偏东向;随后开始第 1 次加砂,压裂开始 40 min 后第 1 条裂缝向西北部扩展;压裂停泵后,储层破裂活动主要集中在井筒附近,并在压裂开始 88 min 后第 2 条裂缝向西扩展;第 2

次加砂开始后(压裂开始 127 min 后)产生第 4 条裂缝,其方位为北偏西向。

2.4 压裂裂缝的空间形态参数求取

能量梯度切片采用色差显示突出能量相关差异性,通过梯度边界的坐标求取裂缝的三维形态参数,结果见表 1。

表 1 压裂裂缝参数  
Table 1 Fracture parameters

| 裂缝    | 缝长/m | 半缝长/m             | 裂缝垂深/m      | 裂缝方位    | 裂缝特征                 |
|-------|------|-------------------|-------------|---------|----------------------|
| 第 1 条 | 242  | 91(南部)<br>151(北部) | 2 235~2 245 | 北偏西 35° | 双边裂缝                 |
| 第 2 条 | 135  | 135(北部)           | 2 225~2 245 | 北偏东 36° | 单边裂缝                 |
| 第 3 条 | 100  | 100(西部)           | 2 235~2 245 | 北偏西 90° | 单边裂缝,第 2 条<br>裂缝向西延展 |
| 第 4 条 | 114  | 32(南部)<br>82(北部)  | 2 245~2 265 | 北偏西 30  | 双边裂缝                 |

综合以上分析可知,通过多道向量叠加振幅反演计算,得出压裂全过程监测区域三维空间每 30 s 的破裂能量分布数据体;通过分析对比能量数据体中井筒附近的破裂能量随时间的变化,利用多波三分量地震数据进行矢量叠加、振幅反演计算、四维相关可视化裂缝形态解释技术,在时间域上分析裂缝的演变过程,可以得出 4 条纵向上不同深度的裂缝,监测证实 2 次压裂都压开新缝。

3 结论与建议

- 1) 利用微破裂四维影像监测技术,可以监测得到压裂裂缝的空间形态参数及裂缝演变过程。现场试验证实,该技术可真实反映二次加砂压裂效果。
- 2) 压裂期间,井周边储层破裂能量变化所揭示的岩石破裂特性,可为下一步压裂施工设计提供依据。
- 3) 兰地 1 井应用微破裂四维影像监测技术时,在野外监测中在距井 1 km 处布置 4 个排列 36 道采集站 180 个三分量检波器芯的微地震波采集仪器阵列,建议今后适当增加采集站道数和三分量检波器芯,以进一步提高压裂裂缝几何参数的精度和准确程度。

参 考 文 献  
References

[1] 才博,史原鹏,孙豪,等. 二连盆地致密油藏低伤害改造技术[J]. 特种油气藏,2012,19(5):139-142.  
Cai Bo, Shi Yuanpeng, Sun Hao, et al. Fracturing technology with low damage in tight reservoirs of Erlian Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs,2012,19(5):139-142.

[2] 才博,王晓冬,王欣. 人工裂缝缝壁表皮效应数学模型研究[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(6):938-942.  
Cai Bo, Wang Xiaodong, Wang Xin. Mathematical study of fracture face skin in hydraulic fractures[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2011,40(6):938-942.

[3] Economides M J, Martin T. Modern fracturing enhancing natural gas production[M]. Houston: Energy Tribune Publishing Inc,2008:116-125.

[4] 沈琛,梁北援,李宗田. 微破裂向量扫描技术原理[J]. 石油学报,2009,30(5):744-748.  
Shen Chen, Liang Beiyuan, Li Zongtian. Principle of vector scanning technique for micro-fractures[J]. Acta Petrolei Sinica,2009,30(5):744-748.

[5] 赵安军,胡金堂,赵政嘉,等. 阿尔塔拉凹陷压裂控缝高及诊断技术[J]. 石油钻采工艺,2010,32(5):79-81.  
Zhao Anjun, Hu Jintang, Zhao Zhengjia, et al. Study on fracture height controlling and diagnose technology in Artala Depression[J]. Oil Drilling & Production Technology,2010,32(5):79-81.

[6] 蒋廷学,贾长贵,王海涛,等. 页岩气网络压裂设计方法研究[J]. 石油钻探技术,2011,39(3):36-40.  
Jiang Tingxue, Jia Changgui, Wang Haitao, et al. Study on network fracturing design method in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques,2011,39(3):36-40.

[7] 才博,蒋廷学,丁云宏,等. 提高油气藏纵向动用效果的投球分压技术[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2013,32(4):535-538.  
Cai Bo, Jiang Tingxue, Ding Yunhong, et al. Separate layer fracturing technology on oil and gas reservoirs with multilayers[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science,2013,32(4):535-538.

[8] Bunger A P, Jeffrey R G, Zhang X. Constraints on simultaneous growth of hydraulic fractures from multiple perforation clusters in horizontal wells[R]. SPE 163860,2013.