

引用格式:黄小贞,谷红陶.井中微地震监测技术在平桥南页岩气区块应用效果分析[J].油气藏评价与开发,2020,10(1):43-48.

HUANG X Z, GU H T. Microseismic monitoring technology of shale gas block in the southern part of Pingqiao[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1):43-48.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.01.007

# 井中微地震监测技术在平桥南页岩气区块应用效果分析

黄小贞<sup>1</sup>,谷红陶<sup>2</sup>

(1.中国石化华东油气分公司勘探开发研究院,江苏南京 210011;

2.中国石化华东油气分公司南川页岩气项目部,重庆 408400)

**摘要:**如何准确描述水平井水力压裂裂缝展布状态、储层改造体积、造缝主控因素是页岩气开发中一项关键技术。采用在邻井JY×-2中下放高精度检波器的方式对平桥南JY×-1页岩气井第10至15压裂段进行井中微地震监测。根据监测结果描述每段压裂施工的裂缝发育过程,分析6段压裂后裂缝的分布特征:主要以人工裂缝为主,半缝长250 m,宽210 m,高85 m;储层改造体积 $2.187 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,单段压裂区域有一定重合;主裂缝方向为北西 $60^\circ$ ,与最大主应力方向基本一致;压裂屏障是裂缝不对称发育的主控因素。结合三维地震曲率属性分析认为,储层内的天然闭合裂缝是压裂微裂缝延伸的屏障,影响压裂微裂缝延伸方向和长度的同时也会导致施工压力升高。

**关键词:**平桥南页岩气;微地震监测;水平井水力压裂;压裂屏障;压裂微裂缝

中图分类号:TE357

文献标识码:A

## Microseismic monitoring technology of shale gas block in the southern part of Pingqiao

HUANG Xiaozhen<sup>1</sup>, GU Hongtao<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210011, China;

2. Nanchuan Shale Gas Project Department, Sinopec East China Oil and Gas Company, Chongqing 408400, China)

**Abstract:** How to accurately describe the distribution state of fractures formed by hydraulic fracturing in horizontal wells, the volume of reservoir transformation and the main control factors of fracture formation is one of the key technologies in shale gas development. Microseismic monitoring in the 10th to 15th fracturing section of shale gas well JY×-1 in the south of Pingqiao is carried out by means of devolving high precision geophone in adjacent well JY×-2. According to the monitoring results, the fracture development of each section of fracturing is described, and the distribution characteristics of fractures in six sections after fracturing. The main fractures are artificial fractures, whose half length is 250 m, width is 210 m, and height is 85 m. The stimulated reservoir volume (SRV) is  $2.187 \times 10^4 \text{ m}^3$ . There is a certain coincidence in the single fracturing section. The main fracture direction is  $60^\circ$  north of east, which is basically consistent with the direction of the maximum principal stress. Fracturing barrier is the main factor of fracture asymmetry development. Combined with the analysis of 3D seismic curvature attribute, it is considered that the natural closed fracture in the reservoir is the barrier of micro-fracture extension, which affects the extension direction and length of micro-fracture, and also leads to the increase of construction pressure.

**Key words:** shale gas of the southern part of Pingqiao, microseismic monitoring, hydraulic fracturing of horizontal well, fracturing barrier, microfracture by fracturing

收稿日期:2019-03-01。

第一作者简介:黄小贞(1989—),女,助理工程师,主要从事非常规油气地质及勘探评价等方面的研究工作。通讯地址:江苏省南京市鼓楼区热河南路37号,邮政编码:210011。E-mail:huangxiaozhenm@163.com

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061);中国石化科技开发部项目“渝东南盆缘转换带页岩气富集主控因素研究”(P18057-2)。

## 1 应用背景

20世纪40年代,美国矿业局率先提出应用微地震技术监测对地下矿井造成严重危害的冲击地压。2000年,美国德克萨斯州的Barnett油田成功进行了水力压裂微地震监测,并对页岩层内的裂缝开展了成像监测。2003年,微地震监测技术全面进入商业化运作阶段<sup>[1]</sup>。中国该项技术应用较晚,2002年,刘建中等<sup>[2]</sup>在华北油田京11断块用地面台站布设方式进行了微地震注水监测试验。2004年长庆油田与国外公司合作在庄19井区实施了3口井的微地震压裂井中监测,随后长庆西峰、苏里格气田等也相继实施了超过50口井的井下微地震监测<sup>[3-4]</sup>。2016年,中国石化涪陵页岩气一期产建区17口井应用微地震监测技术,近距离准确、清晰地反映了压裂过程中地层裂缝实时延伸情况。

中国石化华东油气分公司于2009年在南川区块开展页岩气勘探与开发,历经11年的勘探实践,已完成 $6.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 产能建设。为监测压裂裂缝在储层内的延伸情况,评估水平井体积压裂改造的效果,开展了焦页JY×-1井井中微地震监测。从方法原理、监测数据采集、应用效果等方面对井中微地震监测技术进行了分析。

## 2 方法原理

刘建中等<sup>[2]</sup>观察发现,水平井水力压裂时,在射孔位置,当迅速升高的井筒压力超过岩石的抗压强度时,岩石遭到破坏并形成裂缝扩展,将产生一系列向四周传播的微震波。范天佑<sup>[5]</sup>和毛庆辉等<sup>[6]</sup>认为井中微地震监测技术就是以断裂力学理论和摩尔·库仑定律为依据,通过布置在邻井的检波器对水力压裂产生的微震波进行接收、处理、解释,继而确定微震源位置,计算出裂缝的分布方位、长度、高度、缝型及地应力方向等地层参数<sup>[7]</sup>。该技术可以给出水平井水力压裂后裂缝的空间几何形态和储层改造体积,评价压裂工艺效果,为下一步制定地质方案提供科学依据。

压裂时可导致地层发生剪切滑动或断裂,从而激发微地震。在邻井中下放一组检波器,对压裂过程中裂缝开启或闭合时形成的微地震事件进行接

收,将数据传输到地面,然后对数据进行处理来确定微地震的震源在空间的分布,用震源分布图就可以解释压裂产生的裂缝的空间展布情况。

井中微地震定位主要应用纵横波时差和矢量端图技术,前者可用以计算微地震事件距离检波器的距离,后者可用以计算微地震事件的方位和倾角<sup>[8-10]</sup>。

## 3 监测数据采集

### 3.1 压裂井和监测井的选择

JY×-2井是平桥南页岩气区块南部开发井,该井地化指标、含气性、地应力相对优越,裂缝发育,水平井穿行最优靶窗①上至③下小层,优选为监测井。JY×-1井水平段第10至15段录井解释气测异常,全烃最高40%,该段处于靶窗①上至③下小层,储层物性较好,平均孔隙度3.7%。根据曲率属性预测,第10至15段东侧为高曲率带,第10、12、14段西侧为低曲率带,第11、13、15段西侧为高曲率带。因此,优选第10至15段进行微地震监测,对比压裂施工参数、裂缝形态、改造规模等参数的变化规律,研究曲率带对体积压裂效果的影响,通过在相邻的JY×-2井中下放高精度检波器,对JY×-1井第10至15段压裂施工进行井中微地震监测(图1)。

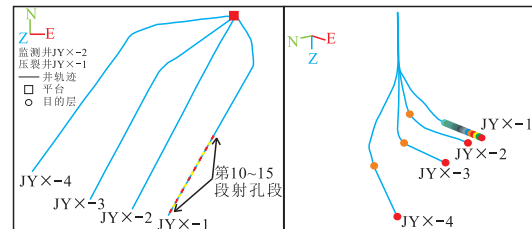


图1 JY×平台井眼轨迹(三维视图)

Fig. 1 Well trajectory of JY× platform(3D view)

### 3.2 监测方案设计

JY×-2井采用VSI地震成像仪、GAC三分量加速度检波器进行监测,检波器级间距为31.15 m,由于检波器下放深度受限于井斜角(需在 $50^\circ \sim 55^\circ$ ),因此,该井检波器深度下至2 169.65~2 450 m。中心检波器与第10段射孔段距离为1 740 m,与第15段射孔段距离为1 413 m,与目的层距离为700 m(图2、表1)。

### 3.3 监测结果

本次施工处理解释微地震事件7 275个。压裂

表1 检波器深度  
Table 1 Depths of geophones

检波器序号	深度/m	检波器序号	深度/m
1	2 170	6	2 325
2	2 201	7	2 357
3	2 232	8	2 388
4	2 263	9	2 419
5	2 294	10	2 450

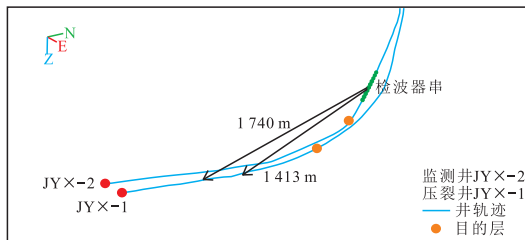


图2 检波器下放置  
Fig. 2 Position of geophones

微裂缝发育均在仪器探测范围之内,经处理后可定位的微地震事件明显,定位准确,监测结果见图3,不同颜色表示不同的压裂段,并按矩震级大小排列。

通过微地震事件的空间展布和时间发育顺序,分析6段压裂微裂缝发育特点如下:

- 1) 6段压裂改造产生的裂缝均具有良好的展布性。
- 2) 井筒西侧裂缝较东侧更为发育,西侧裂缝长度约为300~400 m,东侧裂缝长度约为10~200 m;主裂缝沿主应力方向约北西60°发育,第14、15级压裂井筒东侧次生裂缝方向为北东60°。
- 3) 大量的微地震事件集中发育的深度介于2 250~2 420 m,压裂微裂缝垂向发育的高度约为70~120 m,裂缝主体贯穿①至⑤号小层。

4) 近井筒压裂微裂缝宽度约为180~210 m。其中第14级压裂微裂缝在井筒北侧拓展出新的区域,近井筒裂缝宽度达到270 m。

## 4 应用效果分析

### 4.1 压裂微裂缝方向分析

利用纵横波比值对6段压裂监测微地震事件进行过滤,进一步分析压裂微裂缝的发育特征。图4为纵横波比值大于2的全部微地震事件。分析认为第10~15段压裂井筒西侧发育的主裂缝方向为北西60°,第14、15段压裂微裂缝在井筒东侧产生了次生裂缝,裂缝方向为北东60°。

### 4.2 裂缝类型分析

B-Value 的概念最早是由 GUTENBERG 和 RICHTER<sup>[11]</sup>提出来的,其原理是通过统计地震或压裂过程中采集到的不同震级事件个数的频率分布关系(FMD),得到一个常数值**b**。

$$\log N = A - b \times M \quad (1)$$

式中: $N$ 代表事件的个数, $M$ 是震级, $A$ 是截距, $b$ 是斜率。 $b$ 代表的是在一系列事件中,不同大小的事件的频率分布变化。斜率**b**值越高,表示少量高震级事件伴随着大量小震级事件。

MAXWELL等<sup>[12]</sup>观察发现,如果天然裂缝或断层发育,在其发育位置得到的微地震事件通过统计得到的**b**值约为1;当压裂产生人工缝为主时,**b**值约为2。这是由于在压裂过程中,如果压裂液进入断层或天然裂缝,其应力释放需要更长的时间,期间便会伴随着不同数量微地震事件的产生。

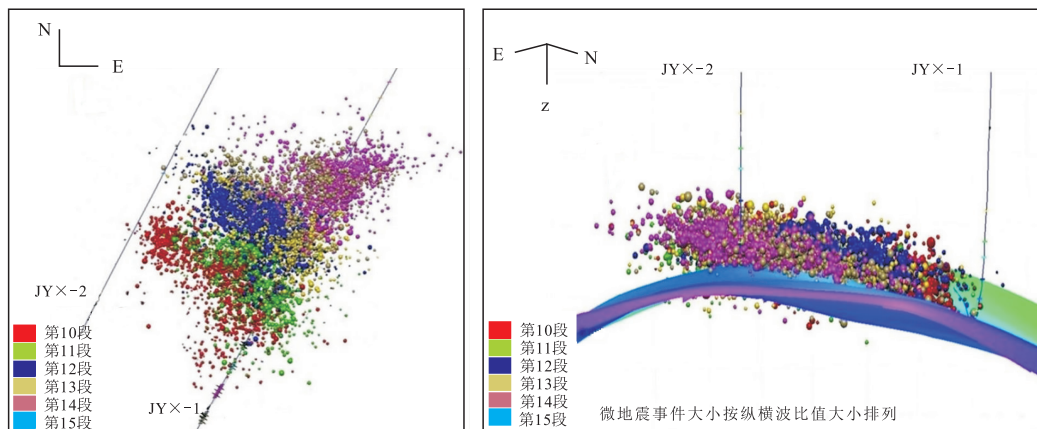


图3 整体监测结果

Fig. 3 Overall monitoring results

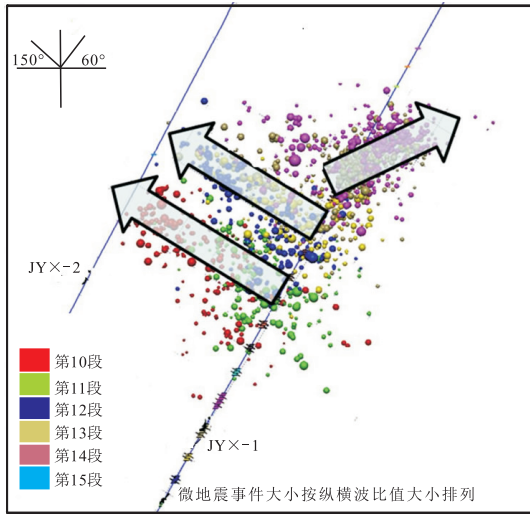


图4 纵横波比值大于2的微地震事件  
Fig. 4 Microseismic events when P/S wave ratio is greater than 2

JYX-1井6级压裂微裂缝产生的微地震事件可分为3个区域:第一个区域为第10、11级压裂区域,第二个区域为第12、13、14压裂区域,第三个区域为第14、15压裂区域(在第15段射孔段附近)。采用B-Value统计方式对这3个区域的微地震事件进行分析(图5)。

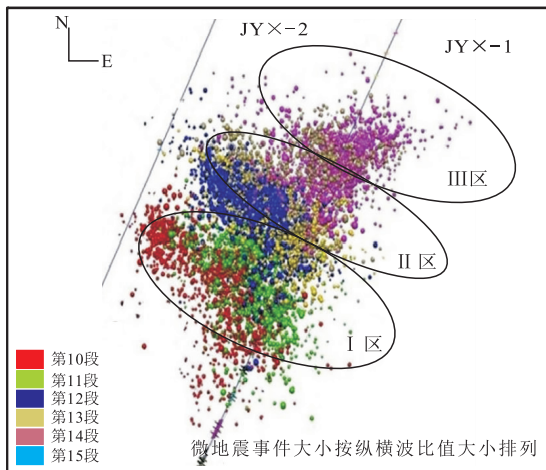


图5 微地震事件区域划分  
Fig. 5 Division of microseismic events

通过统计发现,3个区域的微地震事件B-Value分别为1.98,1.87,2.1。水平井水力压裂微裂缝以人工裂缝为主。

### 4.3 裂缝参数分析

通过微地震事件的空间分布统计出单段压裂裂

缝的长、宽、高及方向(表2)。压裂微裂缝平均半缝长250 m,宽210 m,高85 m,主裂缝方向为北西60°,次生裂缝方向为北东60°。结合单段压裂液量对裂缝半缝长进行分析,压裂微裂缝半缝长与单段施工液量呈明显正相关关系,当单级施工液量达到2 000 m<sup>3</sup>左右时,裂缝半缝长达到250 m。

表2 压裂微裂缝参数  
Table 2 Parameters of fracturing micro-fracture

段数	半缝长/ m	缝宽/ m	缝高/ m	主裂缝 方向	次裂缝 方向	施工 液量/ m <sup>3</sup>	施工 排量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )
10	250	180	90	北西60°	N/A	2 056	14.0~16.5
11	260	230	100	北西60°	N/A	2 097	15.0~17.0
12	280	195	120	北西60°	N/A	2 092	12.0~15.5
13	255	210	80	北西60°	N/A	1 937	16.5~17.0
14	270	270	60	北西60°	北东60°	2 228	13.0~15.5
15	225	190	70	北西60°	北东60°	1 929	13.0~16.0
平均	256.67	212.50	86.67	N/A	N/A		

### 4.4 压裂微裂缝复杂程度分析

裂缝复杂指数(FCI)常用于描述水平井水力压裂裂缝类型和形态的复杂性,反映体积压裂改造的效果。裂缝复杂指数是井中微地震监测的水平井水力压裂裂缝网宽度与长度的比值。FCI值越大表明产生的压裂微裂缝越复杂、改造体积越大、改造效果越好<sup>[13-14]</sup>。通过对本次监测获得的裂缝宽度和半缝长进行计算得出第10至15段压裂微裂缝的FCI值(表3)。

表3 压裂微裂缝复杂程度指数  
Table 3 Fracture complexity index of micro-fracture

段数	西侧缝长/ m	东侧缝长/ m	半缝长/ m	缝宽/ m	FCI
10	400	100	250	180	0.36
11	320	200	260	230	0.44
12	410	150	280	195	0.35
13	360	150	255	210	0.41
14	400	140	270	270	0.50
15	330	120	225	190	0.42

本次6段压裂微裂缝FCI均分布在0.3~0.5,表明压裂微裂缝具有良好的复杂性,在半缝长达到250 m的基础上,裂缝宽度拓展同样良好。

### 4.5 储层改造体积分析

储层改造体积(SRV)可直观地判断改造的储层

体积大小和评价压裂效果。首先将微地震事件的空间分布范围网格化,在计算微地震事件密度的基础上计算网格化的体积,最终得出储层改造体积(图6)<sup>[15]</sup>。

计算第10至15段每一段的微地震事件,得出单段压裂储层改造体积(表4)。单段压裂微裂缝储层改造体积和为 $2\ 608.08 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,全部6段压裂的储层改造体积为 $2\ 187 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。SRV重合比为19.29%。显示单段压裂区域有一定重合。

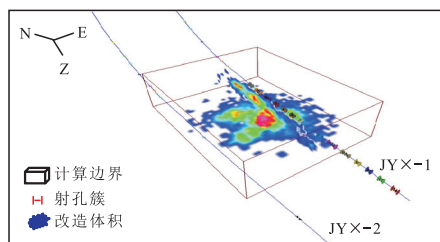


图6 计算储层改造体积  
Fig. 6 Calculation of SRV

表4 单段压裂裂缝储层改造体积

Table 4 SRV of fractures by single-stage fracturing

段数	半缝长/m	缝宽/m	缝高/m	SRV/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>
10	250	180	90	564
11	260	230	100	516
12	280	195	120	428
13	255	210	80	398
14	270	270	60	374
15	225	190	70	329
平均	256.67	212.50	86.67	434.80

#### 4.6 压裂屏障

JYX-1井第10至15段压裂微裂缝具有明显单翼发育的特点,大量微地震事件出现在井筒西侧,裂缝从射孔段附近起裂并不断向西侧延伸,部分区域延伸至邻井井筒附近;而东侧裂缝在短暂延伸后,均停止发育。第14、15段压裂微裂缝在向西侧延伸的同时向北侧也有延伸,并在井筒东侧产生了北东60°方向的次生裂缝。结合三维地震的曲率属性预测图进一步分析表明压裂微裂缝的延伸受到地下垂直于最小水平主应力方向闭合裂缝的影响,这些天然闭合裂缝成为了压裂微裂缝延伸的屏障,即压裂屏障<sup>[4]</sup>。

曲率属性是地震数据中的一种属性,最大正曲率图可突出显示背斜,尤其是背斜的枢纽带。据NELSON<sup>[16]</sup>分析,曲率值高的区域可能出现天然裂缝

发育带,当天然裂缝方向与现今最小水平主应力方向垂直时,天然裂缝应为闭合裂缝<sup>[17-18]</sup>。JYX-1井轨迹附近的曲率呈条带状分布在井筒两侧,与现今最小水平主应力方向近似垂直,分析可能为天然闭合裂缝。

对全部微地震事件结合曲率属性(图7)分析表明:JYX-1井第10至15段东侧条带状高曲率区域在压裂过程中成为明显的压裂屏障,限制裂缝向井筒东侧发育。

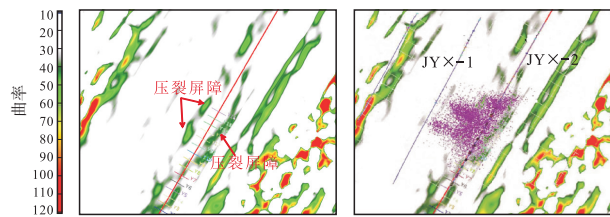


图7 微地震事件结合曲率属性

Fig. 7 Microseismic events combined with curvature attribute

JYX-2井井筒两侧无明显压裂屏障,裂缝相对发育,地形相对舒缓。通过施工压力对比可看出JYX-1井第15段施工压力较大,为92 MPa,从曲线上看出施工压力整体起伏较大,JYX-2井施工压力明显低于JYX-1井,分析认为压裂屏障的存在可能是同一平台单井压裂施工参数明显不同的主要原因(图8)。

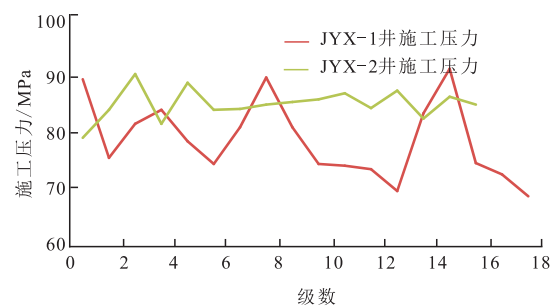


图8 JYX-1井与JYX-2井施工压力对比

Fig. 8 construction pressure comparison of well JYX-1 and well JYX-2

## 5 结论

1) JYX-1井微地震监测解释表明:6段压裂微裂缝以人工裂缝为主,主裂缝方向为北西60°,次生裂缝(第14、15段产生)发育方向为北东60°,压裂微裂缝有明显的单翼发育趋势,西侧较东侧裂缝延伸更远,储层改造体积为 $2\ 187 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2) 井中微地震监测结果结合三维地震曲率属性分析显示: 储层内的天然闭合裂缝是压裂微裂缝延伸的屏障, 不但会影响压裂微裂缝的延伸方向和长度, 也会导致施工压力升高。

#### 参考文献

- [1] 王海华, 田黔宁. 微地震监测技术在非常规能源勘探开发中的应用及发展前景[C]//中国石油学会. 2015年物探技术研讨会论文集, 涿州, 2015: 755-758.  
WANG H H, TIAN Q N. Application and prospects of microseismic monitoring technology for unconventional resource E&P[C]// Proceedings of the symposium on geophysical techniques, 2015, Zhuozhou: 755-758.
- [2] 刘建中, 王春耘, 刘继民, 等. 用微地震法监测油田生产动态[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 71-73.  
LIU J Z, WANG C Y, LIU J M, et al. Micro-seismic monitor on the operation of oil fields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 71-73.
- [3] 李大军, 杨晓, 王小兰, 等. 四川盆地W地区龙马溪组页岩气压裂效果评估和产能预测研究[J]. 石油物探, 2017, 56(5): 735-745.  
LI D J, YANG X, WANG X L, et al. Estimating the fracturing effect and production capacity of the Longmaxi Formation of the Lower Silurian in area W, Sichuan Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(5): 735-745.
- [4] 刘博, 梁雪莉, 容娇君, 等. 非常规油气层压裂微地震监测技术与应用[J]. 石油地质与工程, 2016, 30(1): 142-145  
LIU B, LIANG X L, RONG J J, et al. Microseismic monitoring technology and application of unconventional reservoir fracturing [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(1): 142-145.
- [5] 范天佑. 断裂理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
FAN T Y. Theoretical basis of fracture[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [6] 毛庆辉, 陈传仁, 桂志先, 等. 水力压裂微震监测中速度模型研究[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(6): 708-711.  
MAO Q H, CHEN C R, GUI Z X, et al. Research on velocity model in hydro-fracturing microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(6): 708-711.
- [7] 邵尚奇, 陈凯, 丁文刚, 等. 水力裂缝周围应力场解析模型及应力扰动分析[J]. 石油机械, 2018, 46(2): 108-114.  
SHAO S Q, CHEN K, DING W G, et al. Stress field analytic model and stress perturbation analysis around hydraulic cracks[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(2): 108-114.
- [8] 崔庆辉, 尹成, 刁瑞, 等. 地面微地震监测数据处理难点及对策[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(1): 7-13.  
CUI Q H, YIN C, DIAO R, et al. Difficulties and countermeasure of surface microseismic monitoring data processing[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(1): 7-13.
- [9] 李宏, 杨心超, 朱海波, 等. 水力压裂微地震震源定位与震源机制联合反演研究[J]. 石油物探, 2018, 58(2): 312-320.  
LI H, YANG X C, ZHU H B, et al. Joint inversion of source location and microseismic focal mechanism[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 58(2): 312-320.
- [10] 缪思钰, 张海江, 陈余宽, 等. 基于微地震定位和速度成像的页岩气水力压裂地面微地震监测[J]. 石油物探, 2019, 58(4): 262-271.  
MIAO S Y, ZHANG H J, CHEN Y K, et al. Surface microseismic monitoring of shale gas hydraulic fracturing based on microseismic location and tomography[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(4): 262-271.
- [11] GUTENBERG B, RICHTER C F. Seismicity of the Earth and associated phenomena[M]. Princeton: Princeton University Press, 1954: 17-19.
- [12] MAXWELL S C, JONES M, PARKER R, et al. Fault activation during hydraulic fracturing[C]// paper SEG- 2009- 1552 presented at the 2009 SEG Annual Meeting, 25- 30 October 2009, Houston, Texas, USA.
- [13] 杨瑞召, 赵争光, 王占刚, 等. 页岩气开发微地震技术[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2017.  
YANG R Z, ZHAO Z G, WANG Z G, et al. Microseismic technology for shale gas development[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2017.
- [14] 毛庆辉, 王彦春, 王鹏等. 改进的微震事件反演重定位方法及其应用[J]. 石油物探, 2015, 54(3): 359-366.  
MAO Q H, WANG Y C, WANG P, et al. The improved microseismic event relocation method and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(3): 359-366.
- [15] 谢宋雷, 桂志先, 赵成, 等. 水力压裂诱发微震资料处理方法[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(4): 81-82.  
XIE S L, GUI Z X, ZHAO C, et al. Processing methods of data from microseismic induced by hydraulic fractures[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(4): 81-82.
- [16] NELSON R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs[M]. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2001.
- [17] 刘喜武, 刘宇巍, 刘志远, 等. 页岩层系天然裂缝地震预测技术研究[J]. 石油物探, 2018, 58(4): 611-617.  
LIU X W, LIU Y W, LIU Z Y, et al. Seismic prediction of natural fractures in series of shale oil reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 58(4): 611-617.
- [18] MAXWELL S C, CIPOLLA C L. What does microseismicity tell us about hydraulic fracturing [C]// paper SPE- 146932- MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 October-2 November 2011, Denver, Colorado, USA.

(编辑 余聪)