



基于微地震向量扫描的煤层气井天然裂缝监测

刘子雄

引用本文:

刘子雄. 基于微地震向量扫描的煤层气井天然裂缝监测[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 204–210.

LIU Zixiong. Microseismic vector scanning-based natural fracture monitoring of the coalbed methane wells[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(5): 204–210.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.05.025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤层气水平井微地震成像裂缝监测应用研究

Application of microseismic monitoring and imaging of fractures in horizontal CBM well

煤田地质与勘探. 2018, 46(4): 67–71 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.04.011>

煤层气直井间接压裂施工的先导地质分析

Pilot geological analysis of indirect fracturing in vertical CBM well

煤田地质与勘探. 2016, 44(3): 46–50 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2016.03.009>

沁水盆地柿庄区块煤层气井压裂增产效果 关键影响因素分析与实践

Analysis and application of key influencing factors of CBM well fracturing effects in Shizhuang area, Qinshui basin

煤田地质与勘探. 2019, 47(4): 76–81 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.012>

不同煤体结构煤的水力压裂裂缝延伸规律

Fracture extension law of hydraulic fracture in coal with different structure

煤田地质与勘探. 2019, 47(2): 51–57 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.02.009>

高阶煤煤层气直井低产原因分析及增产措施

Reasons of low yield and stimulation measures for vertical CBM wells in high-rank coal

煤田地质与勘探. 2019, 47(5): 104–110 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.05.014>

文章编号: 1001-1986(2020)05-0204-07

基于微地震向量扫描的煤层气井天然裂缝监测

刘子雄

(中海油服油田生产研究院, 天津 300459)

摘要: 天然裂缝发育程度是影响煤层气产能的主要因素, 为了准确获取沁水盆地南部 A 煤层气田井组的天然裂缝发育程度和分布位置, 采用地面微地震向量扫描技术对区域内 7 口二次压裂井进行天然裂缝发育情况监测。在压裂井周围部署一定量的三分量检波器, 采集压裂过程中周边储层的微地震事件, 进行 Semblance 叠加后得到监测区内不同时刻的破裂能量切片, 解释出监测区内天然裂缝发育情况。对比井组单井产能, 与监测到的天然裂缝表现出良好的相关性, 揭示了天然裂缝是影响煤层气单井产能的主控因素, 同时表明煤层气储层非均质性强, 天然裂缝呈现局部发育特征, 且比较分散、面积小, 常规的三维地震预测方法难以有效的识别。应用该技术能够准确地识别出煤层气储层的天然裂缝发育情况, 为调整井位的部署及优选层位提供可靠的指导。

关键词: 煤层气井; 天然裂缝; 压裂; 微地震向量扫描; 监测; 沁水盆地

中图分类号: P631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.05.025



移动阅读

Microseismic vector scanning-based natural fracture monitoring of the coalbed methane wells

LIU Zixiong

(COSL Oilfield Production Research Institute, Tianjin 300459, China)

Abstract: The development degree of natural fractures is the main factor affecting coalbed methane productivity. In order to accurately obtain the distribution position of the natural fractures in the a coalbed methane field in the southern Qinshui basin, 7 refracturing wells in the area were adopted by surface microseismic vector scanning to monitor the natural fractures. A certain amount of three-component geophones were deployed around the fracturing well to collect microseismic events in the surrounding reservoir during fracturing, and after Semblance superposition, the fracture energy slices at different times in the monitoring area were obtained to explain the natural fractures in the monitoring area. Comparing the single well productivity of the well group showed a good correlation with the monitored natural fractures, revealing that natural fractures are the main controlling factor affecting single well productivity, and at the same time showed that the CBM reservoir has strong heterogeneity and natural fractures were localized. Due to the development characteristics and the relatively small scattered area, conventional 3D seismic prediction methods are difficult to identify effectively. The technology can accurately identify the development of natural fractures in coalbed methane reservoirs, and provide reliable guidance for the adjustment of well placement and measures for layer selection.

Keywords: coalbed methane; natural fracture; fracturing; microseismic vector scanning; monitoring; Qinshui basin

煤层气甜点预测主要是通过三维地震预测以及静态参数评价方法对煤层厚度、物性、含气性等参数建立评价指标^[1-2], 预测煤层气的富集区, 优选出

井位部署的甜点区^[3-5], 位于甜点区内的井普遍能够高产, 具有较好的经济性。但由于煤层气的储层非均质性强, 即使在筛选的有利区内部, 仍然存在大

收稿日期: 2020-01-12; 修回日期: 2020-08-07

基金项目: 中海油田服务股份有限公司科研项目(YSB16YF004)

Foundation item: Scientific Research Project of China Oilfield Services Limited(YSB16YF004)

作者简介: 刘子雄, 1982 年生, 男, 湖北随州人, 硕士, 高级工程师, 从事非常规油气开发研究工作. E-mail: liuzx2560@163.com

引用格式: 刘子雄. 基于微地震向量扫描的煤层气井天然裂缝监测[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 204-210.

LIU Zixiong. Microseismic vector scanning-based natural fracture monitoring of the coalbed methane wells[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 204-210.

量的投产即表现出低产低效的井,应用这些方法对开发布井的指导作用有限^[5-8]。仅仅通过单井点的静态参数对比已经很难找出影响产能的关键因素,无法针对性优化下一步的井位部署。

天然裂缝对煤层气产能起决定性作用^[5,8-9]。由于煤层气的开发主要采取排水降压方式^[10],天然裂缝的发育程度是影响其降压速度的关键因素,天然裂缝越发育降压速度越快,煤层气产能越高^[11-12]。同时通过对已投产井的煤层气井产能影响因素的分析认为,对低产井的影响最主要因素是渗透率^[13]。采用常规的静态参数以及三维地震预测方法很难准确预测出对渗透率起决定作用的天然裂缝平面位置。微地震地面监测是近年发展起来的一种地面压裂监测新技术,在地面监测的可行性^[14-16]及去噪和解释方法^[17-18]方面研究越来越多,通过大量压裂井的应用得到了广泛认可。微地震向量扫描是利用多波振幅属性多道叠加反演向量扫描的计算方法。该技术在各类油气藏的压裂监测中得到广泛应用,主要用来识别压裂裂缝的方向和规模^[19-20]。由于煤层气井储层一般比较浅,微地震监测的信噪比更高,获得的结果更为准确可靠。该技术能够直观得到目的层平面破裂情况,且应用成本低。

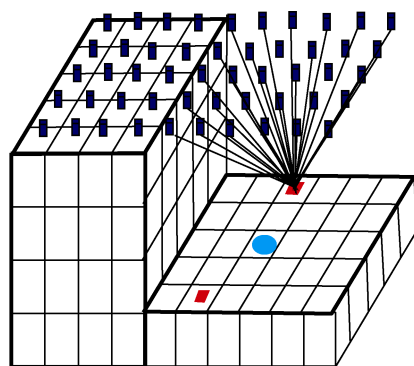
基于此,本文以沁水盆地南部A煤层气田井组为研究对象,在二次压裂作业的同时,对其中7口井采用微地震向量扫描技术,查明研究区的天然裂缝发育程度和分布位置,以其中2口井为例,对比了监测区内井组单井产能,与监测到的天然裂缝表现出良好的相关性,揭示了天然裂缝是影响煤层气单井产能的主控因素。

1 微地震向量扫描监测方法

1.1 原理

微地震地面监测是一种地面压裂监测新技术,通过对目的层进行破裂能量反演,获取监测区的破裂能量差异,进行压裂裂缝参数解释。根据声波测井的速度模型,进行射线追踪,将三分量信号旋转到入射矢量方向,形成矢量场波动方程,进行矢量叠加后得出各点的破裂能量,然后进行能量辐射扫描定位获取破裂位置。由于煤层节理裂缝发育,受到压裂液挤压时,容易变形产生微地震事件,进而被地面的三分量检波器采集到。相对于井中微地震监测,对监测环境要求低,可大幅降低施工成本;在震源定位时,无需进行纵横波初至拾,直接通过层析成像获取破裂位置。

由于煤层在受到高压流体挤压后会产生变形,进而产生微地震事件^[15],发射出纵波(P)、横波(S_v 、 S_h),在储层应力越薄弱(天然裂缝发育、高孔渗区)发育区,储层变形剧烈,产生的微地震事件就越多^[21],通过在地面部署一定数量的三分量检波器,能够将所有的微地震事件记录在相应的时窗内。为了获取微地震事件的位置和时间,需要将监测区划分成一定密度的网格。然后根据测井建立速度模型,通过射线追踪方法计算出每个网格点到每一个三分量检波器的走时,将时窗内的微地震数据按照走时曲线偏移,然后在每一个时间步上进行叠加,即为可能震源位置的成像函数(图1)。在所有网格中都进行这样的叠加后,可以得到整个监测区的成像函数,成像函数最大值的位置为储层中的震源位置^[20]。



■ 检波器 ◆ 破裂点 ● 井点 ▭ 划分的网格

图1 微地震向量扫描监测

Fig.1 Schematic diagram of microseismic vector scanning monitoring

从微地震监测的定位过程可以看出,其反演方法主要是基于 Semblance 叠加,通过将破裂能量扫描叠加,背景噪声则被削弱,有效微地震的振幅被增强。最后通过对比叠加后的破裂能量差异识别出监测区破裂位置和规模。该技术在监测区的水平定位误差较小,最低在10 m以内,可以用来进行平面的破裂区监测,而垂向定位误差较大^[21-23]。但通过对压裂层初始破裂位置进行深度校正后,能够准确地识别出纵向上破裂深度。任意一个时窗内的各个网格的破裂能量 $S(k)$ 计算式为^[16]:

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

其中, F 为归一化因子,表达式为:

$$F = NM \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M f_{ij}^2 \quad (2)$$

式中: M 为监测的检波器个数; N 为某个时间窗口

内信号数据点的个数; f_{ij} 为记录向量, 是第 i 个台站的第 j 个记录样点的地面运动速度, 它前面的正负号由叠加时窗内相对于参考台的相关性决定; W_i 为第 i 个台站记录在扫描叠加中的权重; k 为被扫描的网格块某个点。

1.2 微地震部署数量及位置优化

前人对微地震向量扫描监测技术中三分量检波器部署方式和优化方法研究较多^[15-19], 但主要集中在对压裂裂缝的监测方面。为了能够准确地识别出破裂能量强弱分布的边界, 则要求在天然裂缝发育区监测到的振幅能量叠加后能够显著强于其他位置, 才能被有效的识别。部署的检波器数量越多,

则叠加后的振幅能量差异越明显, 故需要在地面部署较多的三分量检波器。但考虑到经济性, 需要针对目标区煤层的破裂特征是否明显能够被监测, 而进行监测试验(在射孔时采用该技术进行监测, 识别射孔位置), 当满足最小识别要求时(破裂能量值差异显著), 即为合理的检波器部署数量, 如图 2 所示, 当检波器数量低于 7 台时, 背景噪声较大, 无法有效识别出射孔位置的破裂。通过试验可知, 当检波器数量超过 7 台时, 可以得到比较可靠的监测数据^[24], 破裂能量集中在中心处的井点位置。在重复压裂时, 为了保证能够识别出目标区内有效的甜点位置, 部署的检波器在 25 台, 以保证甜点区监测效果。

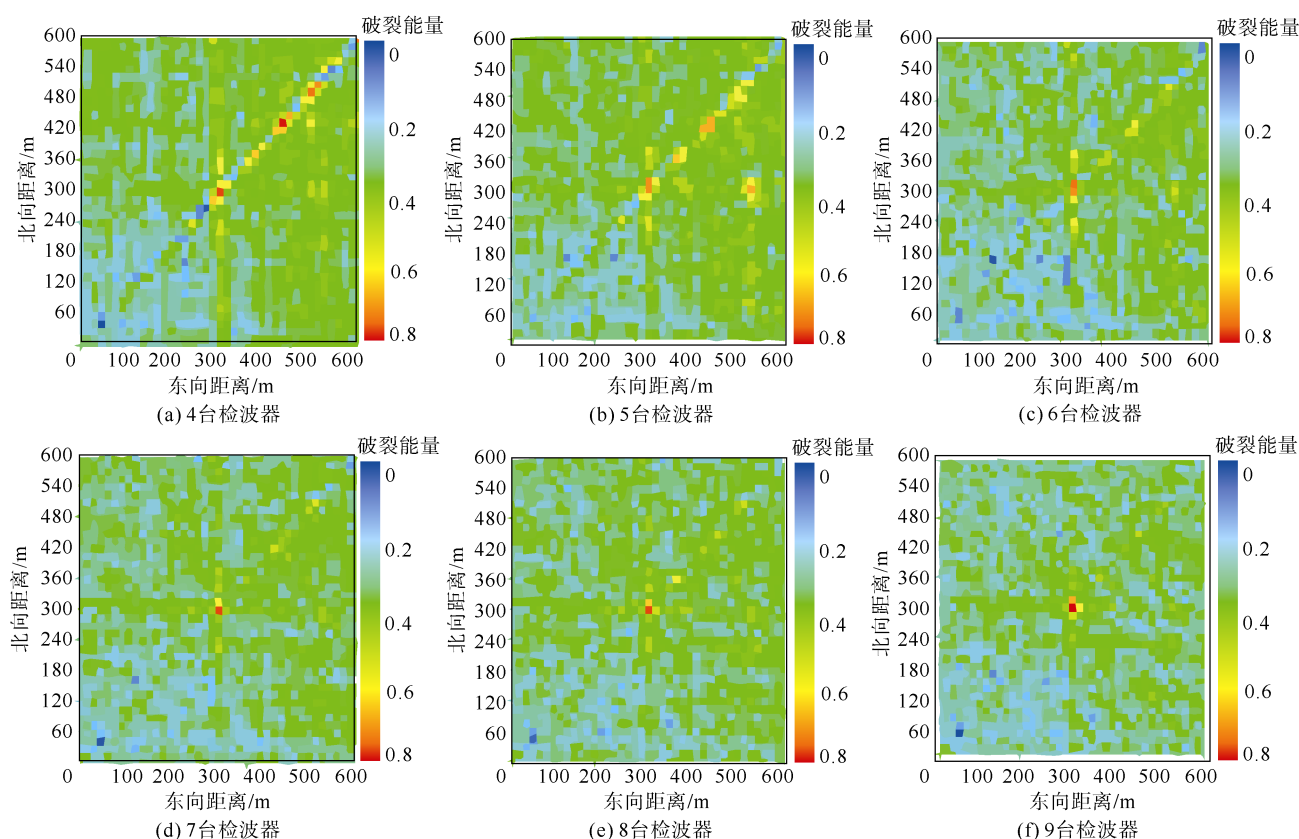


图 2 不同数量的检波器监测效果试验

Fig.2 Monitoring effect experiment of different number of geophones

为了提高各个检波器采集的数据质量, 在选择部署三分量检波器位置时, 要避免其他震动源的干扰, 确保监测的信噪比大于 0.5^[19]。因此, 需要对各个检波器的背景噪声振幅进行测试, 判断其背景噪声幅度。当振幅低于 0.7 时, 即表示放置点合理(图 3)。同时在部署方式上也需优化, 一般将检波器放置在压裂点 1 km 以外的地方(降低施工过程中压裂设备带来的噪声), 埋置地下 2 m 的深度^[20], 以保证能够获得有效的微地震信号。

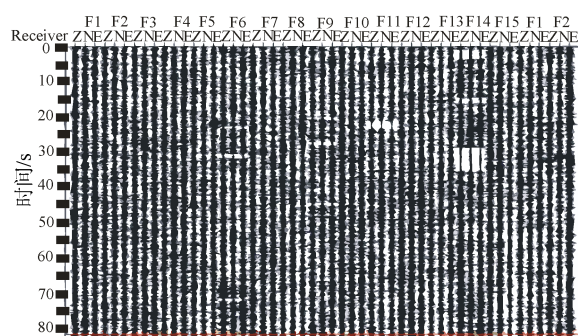
1.3 速度模型构建

地震波速度模型是进行微地震向量扫描的基

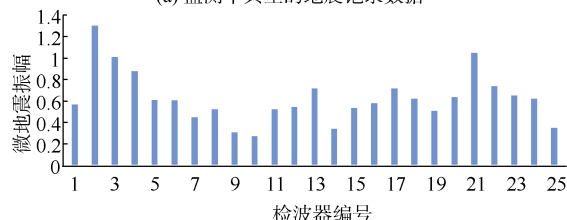
础^[24]。为了能够建立准确可靠的速度模型, 需要利用监测区内或者邻近井的声波测井数据、射孔或者压裂初期的微地震响应位置。速度模型的建立主要分为两步: 首先, 据测井的声波曲线数据, 建立简单的速度模型(图 4), 进行地层的速度分布进行表征; 然后, 根据压裂初期的微地震响应进行重新定位和验证, 以保证速度模型的可靠性, 最终形成监测区的三维速度模型(图 5)。

2 应用实例

研究区位于沁水盆地南部, 构造较简单、单斜



(a) 监测中典型的地震记录数据



(b) 三分量检波器平均振幅柱状

图3 监测的地震记录和振幅

Fig.3 Monitored seismic records and amplitudes

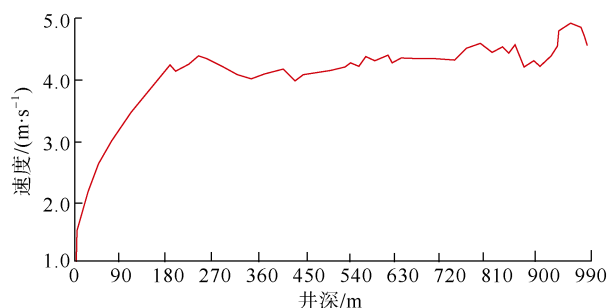


图4 监测井的声波测井一维模型

Fig.4 One dimensional acoustic logging model of the monitoring well

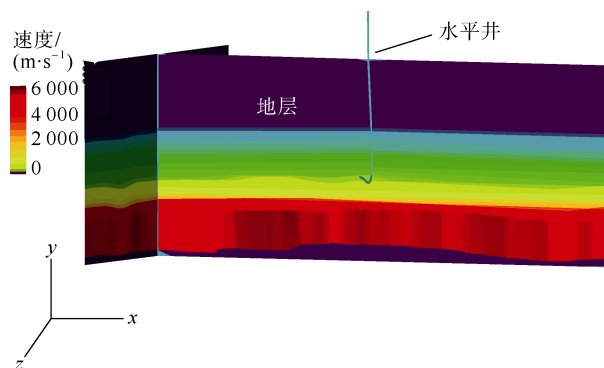


图5 声波测井数据插值后的三维速度模型(3口井)

Fig.5 Velocity model interpolated by acoustic logging data of 3 wells

构造, 倾角小于 5° , 断层不发育^[13]。主要目的层为下二叠统山西组3号煤层, 发育稳定, 埋深小于1 000 m, 厚度为0.5~7.8 m, 平均含气量为 $12 \text{ m}^3/\text{t}$ 。煤岩整体物性较差, 基质致密, 孔隙率较低, 渗透率仅为 $(0.02\sim 1.10)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[10], 由于甜点认识不清影响

着煤层气的勘探开发^[2], 自2011年投产以后, 单井均采用压裂投产, 生产稳定的井中达到经济产量的仅占33%, 低产井比例高。采用常规的单井静态参数对比, 以及三维地震预测都未能找出I类区中影响产能的主控因素, 无法针对性的优化井位和增产措施, 导致开发效果差。

对研究区内已投产的煤层气井的产能统计得出, 地质参数综合评价位于I类区的井组产能差异大。为了提高单井产能, 对其中13口低产井采取二次压裂, 压裂后产气量增幅不明显, 增幅最高 $630 \text{ m}^3/\text{d}$, 其中6口井产气量增幅均低于 $200 \text{ m}^3/\text{d}$, 在采取措施后未达到单井 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ 的经济门限(图6)。在二次压裂时采取了多种不同的新工艺, 但依旧没有见到明显的增产效果, 常规的分析方法难以找出增产效果差的主要原因。

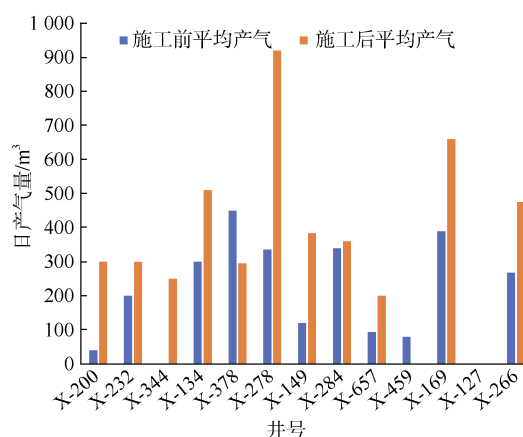


图6 目标区二次压裂前后煤层气产能对比

Fig.6 Comparison of production capacity before and after secondary fracturing in the target area

在二次压裂的13口井中, 有7口井二次压裂作业的同时进行了微地震向量扫描裂缝监测。以X-200井二次压裂井为例, 对甜点监测过程进行说明。检波器的部署方式是以目标井(X-200井)为中心的 $600 \text{ m}\times 600 \text{ m}$ 网格, 根据该井周围环境噪声检测情况, 优化后最终检波器部署25台, 其分布位置如图7所示, 图8为部分检波器在三个方向(平面上的北、东向和垂向)监测到的微地震事件。

利用井组中3口老井的声波测井数据, 插值建立了井组的三维速度模型(图5); 对各个检波器的破裂能量进行去噪叠加后, 形成了以压裂井为中心 $600 \text{ m}\times 600 \text{ m}$ 的不同时间破裂能量切片图。在不同时刻的破裂能量切片中, 由于部分时刻的环境噪声较大, 导致监测结果中存在明显的能量伪点, 通过对不同时刻的破裂能量图对比分析, 在同一位置不同时刻出现3次以上的高的破裂能量时, 被认为是有效的破裂能量, 才能够进行不同时刻的破裂能量叠加, 进而获取

整个压裂过程中的有效破裂叠加图(图 9、图 10)。

从图 9 可以看出,破裂能量分布不均匀,表明天然裂缝呈现局部发育,且面积小分布范围为 500~10 000 m²,因此,采用常规三维地震预测的方式难以找出来。通过监测发现,部分二次压裂的井所处位置均未见明显的天然裂缝发育,即使二次压裂后也未取得明显的增产效果(图 6)。

分别统计了 X-200、X-232 两口井二次压裂时监测范围内邻井的动态(表 1)。对比甜点监测图中各井的分布位置,与各井的产能表现出较好的相关性。从图 9、图 10 中可以看出,在 X-232 和 X-200 井组中, X-200 井组监测出的天然裂缝分布面积大于 X-232 井组,该井组的产能普遍高于 X-232 井组;在 2 个井组中,井点位置的破裂能量越高,压裂产能越高。进一步验证了天然裂缝发育程度是决定煤层气产能的主要因素,也验证了煤层气井甜点监测

结果的准确性。为后期增产措施的层位优选和调整井位部署提供了可靠的指导。

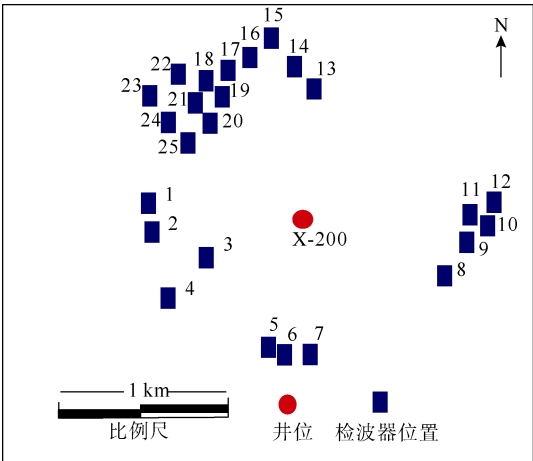


图 7 X-200 井二次压裂时检波器部署位置
Fig.7 Deployment position of the geophones during refracturing operations of well X-200

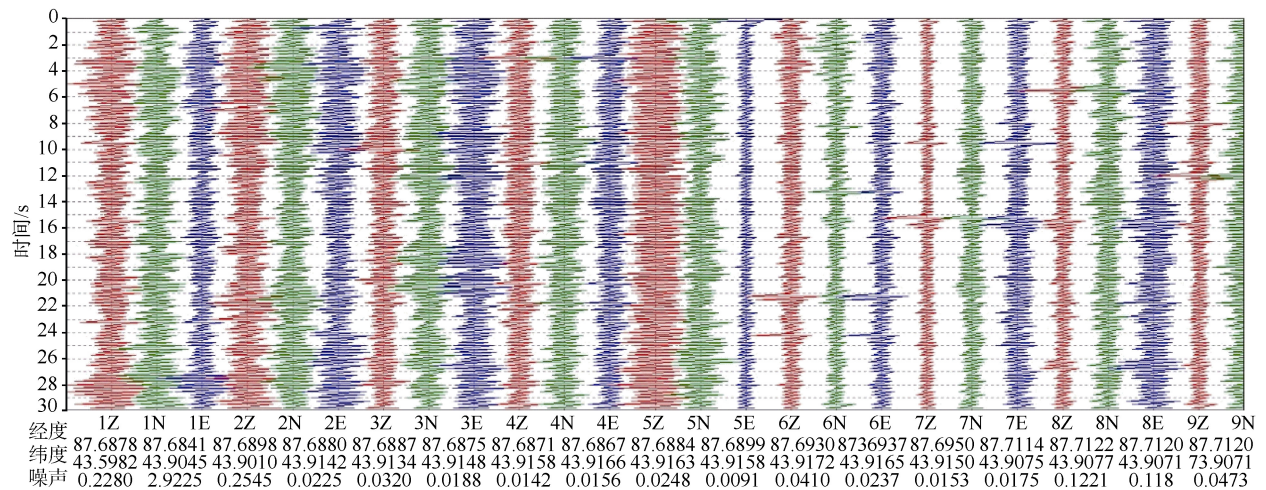


图 8 X-200 井压裂时监测到的微地震事件
Fig.8 Microseismic events detected during the fracturing of well X-200

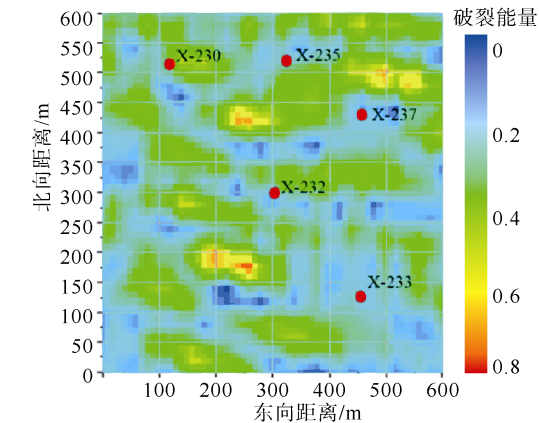


图 9 X-232 井组压裂时甜点监测
Fig.9 Distribution of the sweet spots monitored during fracturing of well cluster X-232

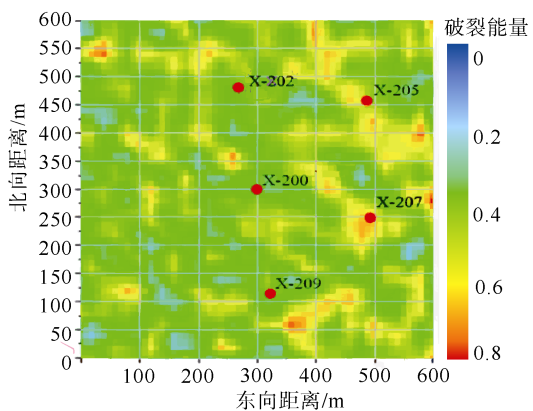


图 10 X-200 井组压裂时甜点监测
Fig.10 Distribution of the sweet spots monitored during fracturing of well cluster X-200

表 1 监测井组单井生产数据
Table 1 Production data of single well in monitoring well group

| 井组 | 井号 | 动液面/m | 套压/MPa | 产气量/ (m ³ ·d ⁻¹) | 产水量/ (m ³ ·d ⁻¹) |
|-------------|-------|-------|--------|--|--|
| X-232 井组 | X-232 | 333 | 0.33 | 336 | 0.5 |
| | X-230 | 358 | 0.54 | 1 971 | 0.3 |
| | X-233 | 356 | 0.30 | 236 | 2.3 |
| | X-235 | 342 | 0.45 | 408 | 7.6 |
| | X-237 | 269 | 0.18 | 283 | 1.5 |
| X-200 井组 | X-200 | 382 | 1.05 | 526 | 0.3 |
| | X-202 | 340 | 0.30 | 952 | 1.1 |
| | X-205 | 312 | 0.85 | 2 952 | 0.4 |
| | X-207 | 342 | 0.25 | 3 960 | 0.2 |
| | X-209 | 303 | 0.29 | 1 632 | 0.2 |

3 结 论

- a. 在压裂时应用微地震向量扫描技术可以监测出压裂井周围的天然裂缝发育程度和分布位置，与井组的单井产能相关性好，表明天然裂缝发育是决定煤层气井能否高产的主要因素。
- b. 由于煤层的节理裂缝发育，受到压裂液挤压后，容易变形产生微地震事件，采用微地震向量扫描的方式能够直接获得破裂的位置，对天然裂缝的识别精度较高。
- c. 由于地面微地震监方法容易受到环境噪声的影响，因此，在部署检波器的位置时需要对背景噪声进行测试；对噪声的识别是影响天然裂缝识别精度的重要因素，通过有效的去噪方法，增加压裂过程中有效的破裂能量切片数量，提高监测精度。
- d. 采用地面微地震向量扫描技术能够有效地识别出小面积的天然裂缝发育情况，用于指导煤层气井位部署和层位优选。

请听作者语音介绍创新技术成果
等信息，欢迎与作者进行交流



参考文献(References)

[1] 王金, 康永尚, 姜杉钰, 等. 沁水盆地寿阳区块和柿庄区块煤层气开发条件对比[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 56–62.
WANG Jin, KANG Yongshang, JIANG Shanyu, et al. Difference of CBM development conditions in Shouyang and Shizhuang blocks, Qinshui basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 56–62.

[2] 余杰, 秦瑞宝, 梁建设, 等. 煤层气“甜点”测井判别与产量预测: 以沁水盆地柿庄南区块为例[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(4): 482–487.

YU Jie, QIN Ruibao, LIANG Jianshe, et al. Sweet spot identification with well–logging data and production prediction for coalbed methane: A case study from southern Shizhuang block in Qinshui basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(4): 482–487.

[3] 王哲, 徐礼贵, 付晶, 等. 鄂尔多斯盆地东缘 BD 区块煤层气富集沉积控制作用及有利区预测[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 387–396.
WANG Zhe, XU Ligui, FU Jing, et al. Sedimentary controls of coalbed methane accumulation and prediction of favorable area in the BD area eastern margin of Ordos basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 387–396.

[4] 李贵红. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气有利区块优选[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(2): 28–32.
LI Guihong. Selection of the favorable coalbed methane(CBM) blocks in eastern Ordos basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 27(2): 387–396.

[5] 苗雅楠, 李相方, 肖芝华, 等. 甲烷在煤孔隙内的赋存特征及其对产能的影响[J]. 天然气工业, 2018, 38(增刊 1): 24–30.
MIAO Yanan, LI Xiangfang, XIAO Zhihua, et al. Occurrence characteristics of methane in coal pores and its influence on productivity[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(Sup.1): 24–30.

[6] 贾慧敏, 胡秋嘉, 祁空军, 等. 高阶煤煤层气直井低产原因分析及增产措施[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 104–110.
JIA Huimin, HU Qiujia, QI Kongjun, et al. Reasons of low yield and stimulation measures for vertical CBM wells in high-rank coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5): 104–110.

[7] 郭广山, 邢力仁, 廖夏, 等. 基于储层“三品质”的煤层气产能主控地质因素分析[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(8): 1198–1204.
GUO Guangshan, XING Liren, LIAO Xia, et al. Analysis of main controlling geological factors of production based on “three qualities” of CBM reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(8): 1198–1204.

[8] 白生宝, 王凤琴, 杜厚余, 等. 煤储层条件对煤层气产能的影响分析: 以鄂尔多斯盆地东南某区块为例[J]. 天然气勘探与开发, 2015, 38(2): 47–50.
BAI Shengbao, WANG Fengqin, DU Houyu, et al. Impact of coal-reservoir conditions on CBM productivity: An example from one block in southeastern Ordos basin[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2015, 38(2): 47–50.

[9] 李勤, 马随波, 赵斌. 各向异性煤层裂隙流体因子及地震波速度响应[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 167–173.
LI Qin, MA Suibo, ZHAO Bin. Fluid factor of fracture and seismic velocity response in anisotropic coal beds[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 167–173.

[10] 刘人和, 刘飞, 周文, 等. 沁水盆地煤岩储层单井产能影响因素[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 30–33.
LIU Renhe, LIU Fei, ZHOU Wen, et al. An analysis of factors influencing single well deliverability of coalbed methane in the

- Qinshui basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(7): 30–33.
- [11] 李俊, 崔新瑞, 张聪, 等. 影响煤层气井产能差异的主控地质因素分析: 以樊庄区块北部为例[J]. 中国煤层气, 2019, 16(1): 13–16.
- LI Jun, CUI Xinrui, ZHANG Cong, et al. Analysis of main controlling geological factors influencing the production capacity of CBM wells: Taking north Fanzhuang block as example[J]. China Coalbed Methane, 2019, 16(1): 13–16.
- [12] 薛海飞, 朱光辉, 王伟, 等. 沁水盆地柿庄区块煤层气井压裂增产效果关键影响因素分析与实践[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 76–81.
- XUE Haifei, ZHU Guanghui, WANG Wei, et al. Analysis and application of key influencing factors of CBM well fracturing effects in Shizhuang area, Qinshui basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 76–81.
- [13] 伊永祥, 唐书恒, 张松航, 等. 沁水盆地柿庄南区块煤层气井储层压降类型及排采控制分析[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 118–126.
- YI Yongxiang, TANG Shuheng, ZHANG Songhang, et al. Analysis on the type of reservoir pressure drop and drainage control of coalbed methane well in the southern block of Shizhuang[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5): 118–126.
- [14] 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.
- [15] 芮拥军. 地面微地震水力压裂监测可行性分析[J]. 物探与化探, 2015, 39(2): 341–345.
- RUI Yongjun. Feasibility analysis of surface micro-seismic hydraulic fracturing monitoring[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 341–345.
- [16] 梁北援, 王会卿. 微破裂向量扫描在微震监测中的解释原则[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(4): 1314–1322.
- LIANG Beiyuan, WANG Huiqing. Interpretation of vector scanning for microseismic[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1314–1322.
- [17] 张永成, 郝海金, 李兵, 等. 煤层气水平井微地震成像裂缝监测应用研究[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 67–71.
- ZHANG Yongcheng, HAO Haijin, LI Bing, et al. Application of microseismic monitoring and imaging of fractures in horizontal CBM well[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 67–71.
- [18] 梁北援, 程百利, 吴壮坤, 等. 微破裂向量扫描技术的自动化数据处理[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 377–386.
- LIANG Beiyuan, CHENG Baili, WU Zhuangkun, et al. Data processing automatically in vector scanning for microseismic[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 377–386.
- [19] 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.
- YANG Ruizhao, LI Dewei, PANG Hailing, et al. Fracture imaging of the surface based microseismic monitoring in shale gas cracking: Methods and application[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(5): 31–37.
- [20] LACAZETTE A, VERMILYE J, FEREJA S, et al. Ambient fracture imaging: A new passive seismic method[C]//Unconventional Resources Technology Conference, 12–14 August, 2013, Denver, Colorado. USA.
- [21] 王维波, 周瑶琪, 春兰. 地面微地震监测 SET 震源定位特性研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(5): 45–50.
- WANG Weibo, ZHOU Yaoqi, CHUN Lan. Characteristics of source location by emission tomography for surface based on microseismic monitoring[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(5): 45–50.
- [22] 刘子雄, 陈玲. 四维影像裂缝监测技术在致密气砂体展布研究中的应用[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 815–821.
- LIU Zixiong, CHEN Ling. Application of 4D microseismic fracture monitoring for studying tight gas sandstone distribution[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 815–821.
- [23] 周德山, 韩文功, 李振春, 等. 基于相对走时计算的地面微地震监测 SET 定位算法[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2495–2500.
- ZHOU Deshan, HAN Wengong, LI Zhenchun, et al. Source location method for surface microseismic monitoring based on relative travel time calculation[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2495–2500.
- [24] 梁北援, 冷传波. 微破裂向量扫描原理的研发进展[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(4): 1620–1627.
- LIANG Beiyuan, LENG Chuanbo. Development of vector scanning for microseismic[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(4): 1620–1627.

(责任编辑 聂爱兰)