



Current Situation of Microseismic Monitoring and Vector Scanning

Beiyuan Liang¹, Jianli Wang^{2,3,*}

¹GeoImage LLC, San Francisco, USA

²Youyou (Shaanxi) Energy Technology, Xi'an, China

³Co-Sail Petroleum Technology, Beijing, China

Email address:

bjiywd@126.com (Beiyuan Liang), wjl@co-sail.com (Jianli Wang)

*Corresponding author

To cite this article:

Beiyuan Liang, Jianli Wang. (2025). Current Situation of Microseismic Monitoring. *Science Discovery*, 13(3), 39-45.

<https://doi.org/10.11648/j.sd.20251303.11>

Received: 23 March 2025; **Accepted:** 27 April 2025; **Published:** 14 May 2025

Abstract: The current situation of microseismic monitoring at home and abroad is not optimistic. The principles, data acquisition, data processing, and interpretation of many monitoring methods are far from the requirements of microseismic monitoring characteristics, and far from the level of analyzing specific microseismicity. We argue that the main technical reason for this situation is still the lack of understanding of microseismic characteristics and the corresponding monitoring characteristics, so that the development and application of microseismic monitoring are not based on strict seismology, geology, rock mechanics, a large number of reliable experiments, and mathematical statistics. Microseismic monitoring is even more difficult than monitoring stealth aircraft and navigators, in which the target and detector are separated by fluid, and there is always some way to test them. This paper first summarizes the characteristics of microseismic and its monitoring. Based on this, as well as the most basic requirements of seismometry, various monitoring methods are discussed, including their applicable conditions, limitations and development prospects. This discussion shows that the development and application of microseismic monitoring have to be based on the reality of low signal-to-noise ratio, even after avoiding strong noise sources as much as possible during data acquisition and effectively denoising during processing. This paper then reports that in the past two to three years, following the review ("Microseismic and its monitoring") in January 2023, our Vector Scanning (VS) for microseismic ground monitoring has been greatly improved, including an in-depth understanding of the VS principles, the refinement of the conditions necessary for the success of the VS application with a high probability, and their quantitative integration in the VS automated process of data processing and interpretation. A large number of cases are available for mathematical statistics, which provide a basis for analyzing the details of microseismicity. Finally, we describe the specific morphology of the Stimulated Rock Volume (SRV) induced by fracturing, the relationship between the corresponding deformation and the stress fields (equivalent microseismic focal mechanism), and the effect of production measures such as pump shutdown. The necessary conditions, monitoring output patterns, some analyses and questions described here also provide a basis for the test of the microseismic monitoring.

Keywords: Microseismic, Monitoring, Situation, Vector-scanning, Unconventional

微地震监测现状与微破裂向量扫描

梁北援¹, 王建立^{2,3*}

¹GeoImage LLC, San Francisco, USA

²油优（陕西）能源科技有限公司，西安，中国

³北京科胜伟达石油科技股份有限公司，北京，中国

邮箱

bjiywd@126.com（梁北援），wjl@co-sail.com（王建立）

摘要: 国内外微地震监测的现状并不乐观。很多监测方法的原理、数据采集、处理和/或解释, 距微震监测特性的要求有很大距离, 远未到分析具体微震活动性的程度。我们认为造成这种现状的主要技术原因, 仍然是对微震特性、以及相应的监测特性理解不够, 以至于微震监测的研发、应用与检验并未建立在严格的地震学、地质学、岩石力学、大量的可靠实验与数理统计基础上。微震监测比监测隐形航空器与航海器还要艰难, 因为那里是流体相隔, 总有办法检验。故本文首先总结了微震及其监测的种种特性。据此, 以及必要的最基本的测震学要求, 具体讨论了各类监测方法, 包括其适用条件、局限性以及发展前景。这种评价与分析说明: 微震监测的研发与应用, 即使在数据采集时尽可能躲避强噪声源以及处理时有效去噪后, 也不得不面对低信噪比的现实。随后报告了这两三年中, 继2023年1月《微地震及其监测综述》文章之后, 我们的微破裂向量扫描的微震地面监测方法得到很大的完善提高; 包括对其原理的深入理解, 大概率应用成功必要条件的完善, 以及它们被定量地融入自动处理解释一体化过程中。现已有大量案例可供数理统计, 为分析微震活动细节提供了的基础。本文以实例描述了压裂等诱发的有效连通缝网(改造体积)的具体形态, 相应的形变场与应力场的关系, 即微震等效震源机制, 以及停泵等压裂生产措施的效应等。本文所述种种监测必要条件、监测输出形态、一些分析及质疑等, 也为微地震监测的检验提供了依据。

关键词: 微地震, 监测, 现状, 向量扫描, 非常规

1. 引言

本文为微震监测现状的调研报告。继2023年1月综述文章[1]之后, 通过参加国内外专业会议、查阅有关微震监测文献、技术交流以及实际监测对比, 我们保持着对微震监测现状的关注。目前国内外微地震监测的现状并不乐观。很多监测方法的原理、数据采集、数据处理和/或解释, 距微震监测特性的要求有很大距离; 主因仍然是对微震特性、以及相应的监测特性理解不够, 或者说方法的研发及检验没有建立在严格的地震学基础上。

在此期间, 微破裂向量扫描(Vector Scanning, VS)微震地面监测方法得到很大的完善提高; 包括对监测原理更深入地理解[1-4], VS应用大概率成功的必要条件的补充完善[4, 5], 以及这些条件已被定量地融入处理解释一体自动化过程中。现已有大量满足必要条件的可靠监测案例供数理统计, 为分析微震活动性细节提供了的基础。

第2章叙述了微震及其监测的一般情况, 特别是总结了微震及其相应的监测特性。基于这些特性, 第3章评价了各类监测方法的利弊, 分析了当前微震监测的局限性现象及其技术原因, 给出了发展建议。特别的, 微震监测特性决定了不可能再遵循过去的老路, 即使躲避了强噪声源、有效去噪后也只能基于低信噪比(Signal-to-Noise Ratio, S/N)的现实, 与噪声共存, 使用数理统计与剪切错动的震源机制原理提取微震活动性。第4与第5章报告了VS遵循微震监测特性的研发与应用。第4章总结了VS原理及其大概率应用成功的8项必要条件。第5章以实例描述了VS地面监测压裂等诱发的有效连通缝网(Stimulated Rock Volume, SRV)的具体形态, 相应的形变场与应力场的

关系, 即微震等效震源机制, 以及停泵等压裂生产措施的效应等。第6章为结论。

本文所述种种调研分析的微震监测的局限性现象、可靠性必要条件、输出形态及分析等也为微地震监测的验证提供了依据; 希望这类并不容易的监测方法的研发、应用、检验等建立在坚实的地震学、地质学、信号处理、大量工程实验与数理统计的基础上。

2. 微地震及其监测特性

微地震是微小的地下岩石破裂。人们以震级(M)定义地震的大小: $M \leq 0$, 为微震, 其中 $M > -1.5$, 可称强微震; $0 < M \leq 3$, 小震; 其余为中、大、强震[1, 6, 7]。

微震监测的范围和意义简列如下[1, 8]:

- 1) 常规油气、煤层气、页岩气、废料等储层的压裂;
- 2) 扩展井中邻近监测的范围;
- 3) 油气库的存取过程及安全评估;
- 4) 注气(水)生产过程的蒸汽腔(注水前缘);
- 5) 矿山、巷道、开发区安全预警;
- 6) 确定煤炭火烧区边界及内部特性;
- 7) 矿山越界采掘判断;
- 8) 使用强微震以上事件的人工地震辅助勘探;
- 9) 一般构造、地震活动、应力场研究; 等等。

每天地下都有成千上万的微震发生。从地震学专业的角度, 通过微震监测, 人们要研究与获得:

- 1) 监测区域内微震活动(或其释放能量)的时空规律(x, y, z, t_0 -发震时刻, M);
- 2) 这些规律与相应时空的生产生活事件的关联;
- 3) 这类规律和关联所对应的当地岩石物理化学及地质构造特性。

表1 微震特性和相应的微震监测特性[1-8]。

微震特性	相应的微震监测特性
微小 (压裂破裂震级 $M \approx [-3, -2]$, 相当于爆竹与枪弹; 地震勘探的人工地震是几百克到几十千克炸药, $M = [0, 1.5]$ 。矿洞空区塌陷可引起最大的 $M > 2$, 一般为强微震 $M = [-1.5, 0]$.)	1) 一般距震源几百米外, 凸显于背景噪声的地震波振幅接近背景噪声大小, 传统地震定位失效。 2) 由此推论, 在地表, 微震信号一般淹没于监测记录的背景噪声中。 3) 必须躲避较强噪声源。尽力在安静点布台, 提高信噪比。 4) 需要有效去除大的噪声干扰, 如抽油机等共振和激励、远震和重型车辆的大面积污染, 使得背景噪声记录基本是随机的。 5) 即使如此, 噪声干扰会伴随着监测全过程, 去噪将进行到监测的最后。 6) 由于微小, 人们对一定时长内的震源个数、信噪比、初至极性 etc 一概不知; 但微震数量巨大; 故可使用概率、数理统计和震源机制的理念, 从大量的记录中, 获取微震信息。

微震特性	相应的微震监测特性
剪破裂为主 (压破裂产生剪破裂。压裂时，离开井眼距离后基本为剪破裂。)	7) 微震一般为被动地震，剪切破裂机制为主。剪切错动向不同方向发射压缩或拉伸而初动符号不同的纵波与横波，横波振幅是纵波的至少几倍以上、频率低而衰减慢、从而传播远[9, 10]。在地面监测中不得不主要使用横波。 8) 需要用剪切错动机制与相应的地震波传播知识分析振动向量，提取微震共性。

如同一般地震观测，微震监测也要满足测震学的最基本要求，观测者必须了解地震产生的各种波型特点、观测仪器特性、监测台网覆盖目标域程度（至少在两个维度上覆盖）、台网不同分布几何的利弊、各种处理方法的误差范围等等[1, 8-10]。

但是，任何监测方法的研发及应用，必须熟悉监测目标及其相应的监测特性[2]。微震最基本的两个特性是：(1) 微小，(2) 剪切破裂为主；相应的微震监测特性列于表1中。微震监测照搬已有的人工地震勘探和一般小震以上的天然地震学软硬件是不可能的，必须经过严格地大量实验与摸索，创新研发。微震监测和检验其可靠性并不比监测隐形航空器和航海器容易，因为流体或真空相隔，总可以设置并接近目标，加以比较检测。微震监测的成功研发、应

用与检验需要坚实的地震学、地质学、信号处理、数理统计、自动化与编程的基础。

3. 微地震监测现状

通过文献与会议的调研、技术交流及监测对比，我们发现目前国内外微地震监测的现状并不乐观。有关会议专题未断，但相应的正式发表的专题学术文献近两年急剧减少。不少监测的原理、数据采集、数据处理和/或解释，距离微震监测特性所要求的有很大距离，远未到分析具体微震活动性的程度。基于微震及其监测特性，对各种监测方法的基本评价列于表2中。

表2 各类监测方法评价[1, 2, 6-8]。

方法	类别	方法 简述	优点	局限性	建议
井中邻近		传统定位。将检波器阵置于邻近观测目标，如压裂点，附近的观测井中，基于M大小和震源几何分布解释破裂裂缝 4D分布	当克服了其局限性（见建议栏），因靠近震源，可以作为科学研究的最佳方法	1) 要求监测域邻近有观测井； 2) 随着目标（如压裂段）距检波器阵渐远，必定存在一个距离(300-500米,有人总结为100-600米，据专业会议调研)，在此之外无法实施传统定位； 3) 邻近检波器的介质速度由于大量的微震群（如压裂诱发的）在不断变小，不及时修正，常常一二十分钟后就会定位到很远的错误地点。其中2)和3)，遍查文献中井中邻近监测报告，多有此类问题或嫌疑。	可作为科学和技术研究的最佳方法，因它能靠近震源，但： 1) 应该有≥2个监测井； 2) 地震检波器阵列应跨越储层； 3) 说明使用记录的初至及点或圆标志震源的传统定位仅对距地震检波器阵列几百米内有效;否则可使用偏移叠加扩大监测范围。 4) 应当对震源定位和速度模型进行不间断的联合反演，校正压裂中介质的较大变化。
		使用纵波传统定位（或偏移叠加获得能量分布，或追踪纵波到时）	几无，除非为监测较强微震以上（M>-1）目的	已知纵波的振幅成倍地小于横波的，故对每一观测点需千以上点的叠加才可能看到微破裂波形，实施传统定位；成功率极低（<5%），且已知成功的监测深度<2700 米（专业会议调研）	放弃，除非为仅监测较强微震目的
微破裂	向量扫描（VS）	偏移叠加，一般以横波为主。用震源机制原理提取各台共性	性价比高、施工简单、4D实时报告	使用它的代价，即压裂地面监测不能可靠地确定缝网垂高，随着最近的研究及可靠的井中邻近监测的调研，这个地面监测的技术瑕疵，已经解决。	可作为伴随生产的日常监测工具（详见细下）

表3 调研发现的主要问题及技术原因[1-8]。

领域	主要问题或技术原因	领域	主要问题或技术原因
井中邻近监测	1) 台网几何差，误差大； 2) 几百米外传统定位失效； 3) 不能及时反演矫正定位与速度模型； 4) 克服了井中监测局限性的例子少于10%。	矿山生产及安全	坚持仅仅适合强微震（M≥-1.5）的传统定位；而不能变换研发思路，去统计大量的记录，提取微震特性，将强微震和小震（此时已发生事故）预警提高到微震级别。
地面监测	1) 不在数值定义的离散安静点布台； 2) 不会处理离散点的记录数据； 3) 不会处理使用S波； 4) 不认同地面监测某时段内，微震数量、准确到时、初动极性（震源机制）等一般不知，只能承认信噪比极低的事实，与其共存，在此基础上探索台记录时空上的相关性。 5) 不会具体地使用数理统计方法，对各台记录大规模地偏移叠加试算概率高低意义上的震源机制。 6) 没有有效去噪	其它有关学术及科研技术训练	1) 不完整公布微震震源或相应的释放能量分布； 2) 不说明监测台网在哪里； 3) 不给观测均要说明的误差估计； 4) 对监测方法与应用质疑仅仅限于常识或生产数据等而无法验证； 5) 震源或能量分布相对井迹完美对称？ 6) 水平井各压裂段的震源或能量分布范围互不相交？ 7) 震源或能量主分布与最大主压应力方位准确一致（通常应有一个锐角）？ 8) 强烈建议：任何研发者需深入地实践微震监测应用；其中，天然地震学出身者需重视微震监测的精细性，勘探地震学出身者需详细了解天然地震的剪切特性。

调研发现的微震监测的主要问题及技术原因列于表3中。

4. VS微震地面监测原理及应用必要条件

基于上述, 微震监测的研发与应用不得不基于低S/N的现实。VS采用的微震地面监测原理可简述为: 在任意时段内, 一般微震个数与初至均未知; 于是在处理数据时, VS使用震源机制原理 [9, 10] (即应变场与应力场的关系)

$$E_P = r_P - r_{\min} = \frac{\left(\frac{1}{M}\right) \sum_{i=1}^L \left(\sum_{j=1}^M (\pm)x_{ij}\right)^2}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M x_{ij}^2} - r_{\min} \leq \frac{S}{N} = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M n_{ij}^2} \tag{1}$$

(1)式右端是S/N的定义[13]。向量 $x_{ij} = s_{ij} + n_{ij}$, s 与 n 分别为有用信号与噪声。 E_P 对M个台每个波型向量中有用信号样点 x_{ij} 求和然后平方, 再对某时窗内的L个样点求和。式中部即是微震释放能量的定义, 也是相关性系数的定义, 它从所有M个观测台记录中, 使用某一波型, 对准空间一点P, 用先偏移再叠加的方法提取它们之间的相关性系数 r , $0 \leq r \leq 1$ 。 r_{\min} 为有用信号成分很小的一个时空内的最小值, $r(P)-r_{\min}$ 意为 E_P 以0起算。

最后, E_P 也是P点的S/N下限, 若能确定这个下限, 而真实的S/N大于它, 我们就能判断此点在一个时段内是否存在微震, 以及此监测的可靠程度。 $E_P \geq 1\%$ 可考虑为某时空存在微震的阈值, 这是根据VS应用的数千压裂段层的统计, 对应于射孔段附近存在较高微震释放能量的S/N的最小值。除了特殊情形, 一般VS应用所发现的S/N多小于10%。

实施大规模偏移叠加, 进行各种可能的初动±号组合试算, 选择大概率意义上微震释放能量 (即各台相关性系数, 也是最小S/N) 的时空分布, 具体公式为[1, 11, 12]:

偏移叠加必须考虑微震的剪切破裂特性, 即震源处辐射的地震波成大致正负 (压和拉) 两两斜对称的空间四象限的格局向外传播 [9, 10]。也即要考虑记录的初动正负极性。否则, x_{ij} 之和存在趋于零的可能。注意, 无论是纵波还是横波, 均存在正负初动情形, 且依台点相对于震源的方位及不同波型而变化。因而, 在不知道微震震源机制的情形时, 需要大规模试算, 即指定任一台记录为参考台, 对其余随后叠加上来的台记录需要试算正负号, 观察式中 x_{ij} 叠加后再平方的系列值的组合。对没有微震的空间点, 一般不同台随机背景记录的任意组合的相关性较低。

据此, 以及长期的大量实验与应用, VS提出地面监测成功的必要条件, 或识别检查应用可靠性的缺一不可的要点 (表4)。这些条件可以通过具体的应用参数融入到监测自动化过程中[4, 8]。

表4 检验应用VS可靠性的必要条件及相应的监测步骤[1, 5, 8]。

序号	必要条件	监测步骤
1	3-C且具有较低自然频率和螺旋形旋入地下的旋入式微震检波器	野外数据采集 (下面一道黑杠未删去)
2	地震台网各台处于定量确定的离散安静点	
3	使用≥有统计意义的最小扫描台站数 N_{\min} (~10) 实施扫描偏移叠加。	
4	偏移叠加前的有效去噪	去噪与偏移叠加→ 确定 E_P 时空分布
5	偏移叠加必须考虑剪切破裂特性。一般放弃振幅小的纵波, 而使用到达较远处能量得多的横波。	
6	信噪比下限 (释放能量) ≥1% (统计确认), 为微震时空存在的阈值	获 E_P (SRV) 随时间的变化 集成随时间变化的 E_P 获得最终SRV几何
7	使用特征参数, 在解释中去除噪声相干的干扰	
8	在概率与统计意义上, 定义与判断目标域微震能量释放分布 (SRV) 的空间几何。	

5. 应用VS的SRV、震源机制、与停泵效应研究

我们以SRV、震源机制与停泵效应的研究为例, 说明VS的原理与应用必要条件。

5.1. SRV的定义与其形态参数

SRV的定义如表4中必要条件7、8所述。当完成了必要条件7时, E_P , 或者SRV, 随时间的变化有如图1所示; 而这些随时间变化的SRV的最后地集成, 可得最终SRV几何, 如图2。低S/N时, 可用 (长, 宽, 高) 等几何形状参数、时段始终以及等效微震震级[14]表达SRV, 或可辅以

其位置以及内部能量强弱分布细节的描述。经统计, 压裂这类微震的平均等效震级 $M \in [-3.1, -2.5]$ 。

VS地面监测精度在水平向可为十到几十米, 在纵向浅部, 如千米以内, 与水平向类似, 但对深部目标, 其误差可能是水平向的几倍[1], 例如图2b。垂向误差大是地面监测的代价。似很难给出恰当的SRV垂向高度 (Vertical Height of SRV, VH SRV) 。

5.2. SRV高度的确定

然而, 观察VS应用的497段层的压裂 E_P 纵向2D分布, 例如图2bd:

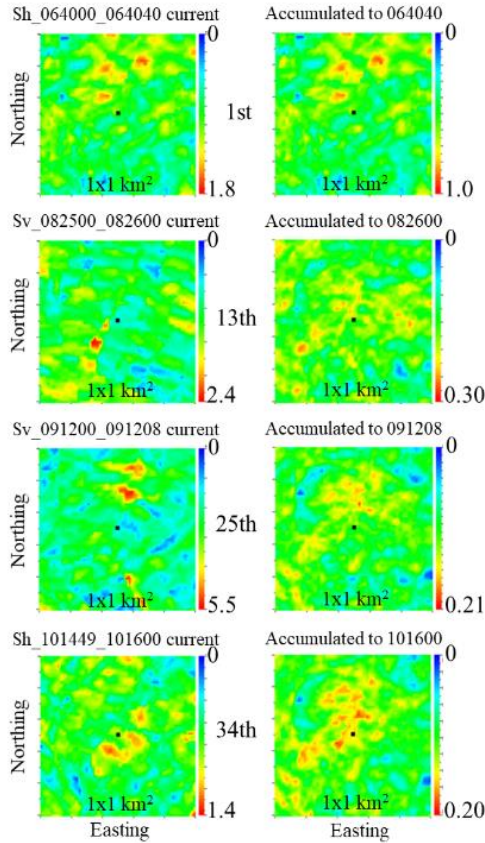


图1 7-41M煤层气井实时压裂微震监测重要时段的2D平面能量分布。这是在解释过程中去除了较强干扰嫌疑后的挑选与集成，称重要时段，共发现34组（每组时长~分钟）。这里仅显示了第1、13、25和34组。每组两个子图，其中左图为当前时段的波型在射孔段或井眼（每图中央黑点，垂深2030m）附近有较高能量释放的平面能量分布，以信噪比（%）形式表达，例如最后一组左图最大值为1.4%；右图为到此时刻所有选中的重要时段归一化（最小最大值为0-1）后空间每点的累积集成平均值分布，也就是最后的SRV。故3D空间点对点叠加集成平均后一般总体最高值不变或逐步下降。一个重要时段中可能选中1-2个横波波型，即互相正交独立传播的Sh和Sv波。图标题中，例如Sh_101449_101600，Sh表示波形，101449（时分秒—hhmmss）和101600为格林尼治时间本时段始终。色标颜色尺度并不一致。

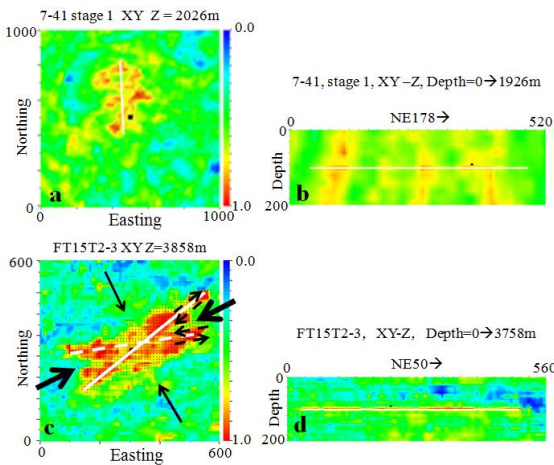


图2 2D大概率高破裂能表达的压裂段SRV分布。ab与图1最后一组累积对应。a:平面2D，雁行（也见图3b）；白实线为SRV主走向；黑点为斜井射孔段投影。b:沿a中实白线的剖面2D，白线为倾向。储层上下的能量垂向误差部分较大。c和d同a和b类似；但c尺度为600m，其共轭裂缝带以虚白线表示，粗黑箭头对表示 σ_1 ，细黑箭头对为 σ_3 ，虚线箭头对示意裂缝带错动方向。

- 1) 这些 E_p 的49%的垂向数十至百米的高能量误差被大幅度地抵消了；虽无法确认VHSRV的具体数值，但高能量集中在储层附近，例如图2d；
- 2) 无论抵消程度如何，储层及其附近的高能量值总是存在，具有代表性(例如图2bd)；
- 3) 抵消程度与监测的时空、台网几何分布没有必然联系；很大可能这类垂向误差是随机的。

类似地，观察几十个压裂段的井中邻近监测（Borehole Proximity Monitoring, BPM）的传统定位，统计与射孔段垂向中心最大垂距的震源点[6]。由于BPM的局限性（表2、表3），其监测的微震垂向分布误差也不小，但大部分集中在射孔段或储层附近（上下各~100m）。

那么，BPM监测条件较好时如何？经仔细筛选较可靠的BPM近百实例报告后，发现有9例 [15-21] 既公布了、又可以较可靠地判断垂向震源分布，且给出了压裂储层高度。若以密集震源群定义SRV，它们的分布与储层高度吻合。因而，对于分层结构内的压裂这类微震，SRV主要在储层内延展，可用储层厚度代表VHSRV。

使用储层厚度代表VHSRV的最重要的地质与岩石力学机理可能是：

- 1) 大陆地区的最大构造主压应力(σ_1)处于水平或近水平[22]。此时，压裂等诱发的破裂很容易沿水平扩展；
- 2) 层理褶皱构造分布。不同强度的层状构造易形成层间滑移碎裂薄层，它是压裂微破裂应力集中前缘所遇到的垂向缓冲边界。

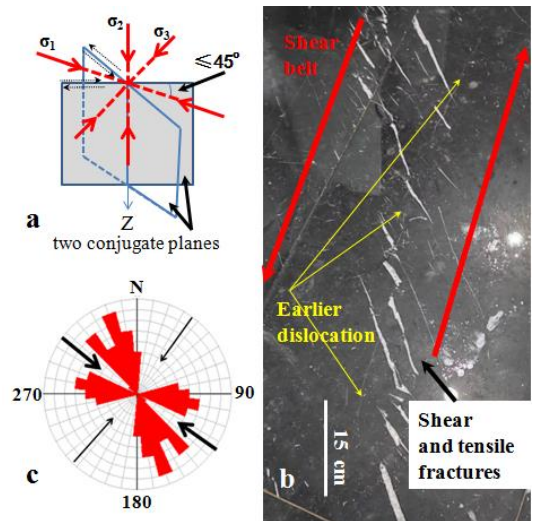


图3 a: 构造应力场与剪切滑动破裂的关系，俗称X型构造破裂型。红色箭头对表示最大、最小、中间主压应力方位，两个蓝色框表示共轭破裂平面，细虚线箭头对表示每个平面的错动滑移类型。旋转这个应力场可得到各式各样的正断层、逆断层等。b: 是VS研发人员在某建筑内拍下的真实剪裂带岩样。大的红色箭头对表示这个地域剪切错动方向，中间的白色填充显示的是大量的剪切带中的张（剪）缝。黄色箭头标明早期剪切错动开的连贯而较长的错动缝。因而，剪切带中可能有两组特性缝：大批的雁行张（剪）缝和错开了的剪切缝。c: Z平台三口井50余段的SRV走向统计；粗（细）黑箭头表示最大（小）水平主压应力方向。

5.3. SRV水平向扩展形态

无论SRV随时间如何变化，其最终累积后的空间SRV水平形态是“Anderson讨论”[22]（图2c，图3）的X型，或X型的一部（Y、V、I型等），或者这共轭剪切带的内部

形态以雁行的形态显示 (图2a、图3b)。有时, 这些形态在层段压裂未结束时就显现出来了。

5.4. 微震地面监测的等效震源机制

震源机制是形变场与应力场的关系。由于微震及其监测的特性 (表1), 每个时段内, 人们对微震个数与初至一概不知, 不可能像较大天然地震那样定位并且依据各台的初至确认震源机制。根据VS地面微震监测得到的SRV形态, 我们有以下形变场与应力场的关系或微震监测等效震源机制:

- 1) 含水平井的几百至千米域的SRV的统计 (图3c) 与 σ_1 可能的方位范围;
 - 2) 压裂段层的SRV (图2c) 与 σ_1 可能的方位范围。
- 它们表示在一定范围内的主要变形带与构造应力场的平均机制[23]。
- 因为 VHSRV 通常比SRV 的长度小得多, 所以SRV 的垂直细节不那么清楚; 但是根据显示的许多X 型 (例如图2c和图3c), 我们倾向于这种模式: σ_1 和 σ_3 都是 (接近) 水平的, 也即, 压裂X型破裂的两个剪切面接近或者就是直立的。

5.5. 原地停泵效应

压裂期间原地停泵 (Pump Shutdown, PS; 或 ≥ 2 次压裂)和/或暂堵, 是希望在已有SRV基础上, 在新的方向 (Changed Direction, CD=压裂前期就已经双向) 或部位 (Extended and/or crack density Increased, EI) 产生更多裂缝。这里“原地”指段长为几十米。PS效果如何?

表5 停泵效应统计。

463合格的SRV中	使用PS占59%, 其中	86% PS前已双向 14% PS后双向
	没有PS占41%, 其中	90% 前期已双向 10% 后期双向

合格的SRV可以是: 全长 ≥ 200 米, 等效宽度 \geq 射孔段长, 两翼长度或面积之比 $\geq 1/3$, 例如图2c。统计了497个层段, 34个 (7%) SRV不理想 (紧贴井迹或在井迹一侧), 463个合格; 合格的SRV无论何时CD, 几乎都有足够的EI。压裂效果与原地PS无关 (表5)。经细察, 压裂效果也与射孔方式、储层类型、其它时空因素等无必然联系。

为何原地PS无效? 我们有例子: 衔接在300米的被暂堵的老压裂段的新百米段, 其压裂的CD与EI都明显有效。这或许就是原地PS无效的机理: 因为即使有新裂缝, 极易迅速与老SRV连通。

6. 结论

- 1) 目前国内外微地震监测的现状并不乐观。很多监测方法的原理、数据采集、数据处理和/或解释, 距微震监测特性的要求有很大距离, 远未到分析具体微震活动性的程度。
- 2) 这种状态的主因仍然是对微震特性、以及相应的监测特性理解不够, 以至于研发、应用与检验并未建立在严格的地震学、地质学、岩石力学、大量的可靠实验与数理统计基础上。微震监测比

监测隐形航空器与航海器还要艰难, 因为那里是流体相隔, 总有办法直接检验。

- 3) 全面分析比较各类监测方法后, 我们认为微震监测的研发与应用必须基于低S/N的现实, 与噪声共存; 在此基础上开拓思路和完善方法。
- 4) VS的微震地面监测, 由于一个时段内一般微震个数与初至均未知, 使用了震源机制原理实施大规模偏移叠加试算组合, 输出大概率意义上微震释放能量 (即各地震台记录的相关性系数, 也是最小S/N) 的时空分布。
- 5) 据此, VS建立了大概率保证应用可靠性的8项必要条件, 及相应的定量检验体系。至此, VS已有了分析压裂微震监测的SRV形态的条件。
- 6) 可用储层厚度表为SRV的垂向高度; SRV的水平分布呈现出剪切错动带的X、雁行形态等细微特性。
- 7) 对一定压裂层段或区块, 可以提出其微震等效震源机制, 即SRV与构造应力场的关系。
- 8) 合格的SRV与PS等压裂原地的具体措施无必然联系; 原因很可能是新缝距原SRV太近, 极易连通。

参考文献

[1] 梁北援, 常力, 房大志, 等. 2023. 微地震及其监测综述——走向基于低信噪比的微破裂向量扫描 [J]. 地球物理学进展. 38(1): 47-75.

[2] 梁北援, 王建立. 2017. 对微地震监测的最大挑战: 目标特性不明 [J]. 科学技术与工程. 18(13): 14-21.

[3] Feng Y., Liang B., and Wang W. 2022. Monitoring for microseismicity induced by goaf collapse at coal mine. EAGE, Near Surface Geoscience Conference & Exhibition 2022, Geophysical Methods in Mining Engineering [C]. Paper number 53. Belgrade, Serbia.

[4] Liang B., Guo B. Statistics in Vector Scanning for Microseismic [C]. 2023. EAGE 5th Petroleum Geostatics, Paper number 15, Porto, Portugal.

[5] Wu Gang, Cai Jiang, Zhao Yewei, et al. 2024. Ground monitoring for fracturing microseismic of two ultra-deep wells [C]. SEG 1st Tarim Ultra-Deep Oil & Gas Exploration Technology Workshop. 2024-UD-06X-OR-080. Korla, China.

[6] Maxwell S. 2014. Microseismic imaging of hydraulic fracturing: Improved Engineering of unconventional shale reservoirs. Distinguished instructor short course [M]. SEG.

[7] 梁兵, 朱广生编著. 2004. 油气田勘探开发中的微震监测方法 [M]. 北京: 石油工业出版社.

[8] 陈明, 孙龙飞, 石元宝等. 2025. 向量扫描微地震监测中的数理统计 [J]. 科学技术与工程, 2025.

[9] Aki K, Richards P.G. 1980. Quantitative Seismology: Theory and Methods [M]. W. H. Freeman and Company.

[10] Bullen K. E and Bolt B. 1985. An introduction to the theory of Seismology [M], 4th edition. Cambridge.

[11] 程乾声. 2003. 数字信号处理 [M]. 北京: 北京大学出版社.

- [12] Press W, Teukolsky S., Vetterling W., et al. 1997. Numerical Recipes in C, the art of scientific computing. 2nd Edition [M]. 1997. Cambridge.
- [13] Robinson E. A., and Treitel S. 2000. Geophysical signal processing [M]: SEG.
- [14] 冯彦军, 梁北援. 2023. 基于向量扫描法的微地震震级确定方法 [J]. 地震科学进展, 53(3) 115-119.
- [15] Peterson, R., S. Wolhart, and K.H. Frohne, 1996. Fracture diagnostics research at the GRI/DOE multi-site Project: Overview of the concept and results [C]: Paper SPE 36449, Presented at the 1996 Annual Technical Conference and Exhibition.
- [16] Maxwell S, T. Urbancic, and S. Falls et al. 2000. Real-time microseismic mapping of hydraulic fracturing in Carthage [C], Texas: Abst. 70th Ann. Internat. Mtg 2000, SEG.
- [17] Maxwell, S. et al. 2010. Passive seismic and surface monitoring of geomechanical deformation associated with steam injection: In "Heavy Oil. Reservoir Characterization and Production Monitoring [C], SEG, 293-300.
- [18] Rutledge, J., and W. Phillips. 2003. Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, east Texas [J]. Geophysics. 68, No. 2, 441-452.
- [19] Belayouni N., A. Gesret, G. Daniel, and L. Nobel. 2015. Microseismic event location using the first and reflected arrivals [J]. Geophysics, 80, No. 6, WC133-WC143.
- [20] Belayouni, N., D. Kats, V. Grechka, and P. Christianson, 2017. Microseismic event location using direct and reflected waves: A Woodford case study. 87th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract, SGS 1.
- [21] Hickman, R. and J. Gallop. 2022. Microseismic monitoring during hydraulic fracture treatments complements 3D geomechanics modelling [J]. First Break. 40, No. 4, 49-54.
- [22] Jaeger J., Cook N., and Zimmerman R. 2007. Fundamentals of rock mechanics [M]. 4th Edition. Blackwell Publishing Ltd.
- [23] Wyss M., Gillard D, Liang B. 1992. An estimate of absolute stress tensor [J]. Journal Geophysical Research, 97(B4): 4763-4768.