

微地震监测技术发展方向及应用

刘建中¹,唐春华¹,左建军²

(1. 北京科若思技术开发股份有限公司,北京 100082; 2. 胜利油田物探研究院,山东东营 257022)

[摘要] 论述了微地震监测技术的发展方向,并指出了提高微地震监测系统质量,降低仪器前端噪音,记到更多、更小的微地震,夯实微地震监测的理论基础。同时增多微地震监测台数,一次监测获取更多可以对比的资料是微地震技术发展的重要方向。引入常规地震、勘探理论也可以提高微地震监测水平,形成完整的微地震学理论。上述三者是微地震监测技术发展的重要方向。随着技术的发展,微地震监测技术除了用于油田压裂、注水监测外,还可应用于地震勘探,矿山、水库安全预报领域。

[关键词] 微地震监测;地震勘探;压裂监测;注水监测

[中图分类号] P315.73 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)10-0054-05

1 前言

随着页岩气、非常规油气开采提上日程,微地震监测技术成为判断压裂裂缝形成、发展趋势的判断依据,监测结果为提高页岩气开采水平,非常规油气采收率提供了重要保证。研究微地震监测技术发展方向,了解微地震监测技术应用领域成为需要。需要是技术发展的最重要的动力,微地震监测技术在最近几年取得了长足进展^[1]。

2 降低仪器噪音,记到更小的微地震

发展质量更高的监测系统是微地震技术发展的主要趋势。

油田水力压裂形成的微地震分布在-1级至-5级,地下微地震信号的强度可以由式(1)估计,依据古登堡的体波震级理论^[2]

$$M = \lg \sqrt{3} A_0 + Q(H, r) \quad (1)$$

可以估算测点微地震幅度

$$A_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} 10^{M-Q(H, r)} = 0.72 \times 10^{-4} \quad (2)$$

式(2)中: M 是体波震级; $Q(H, r)$ 是反映震中距影响的量规函数,量规函数包括了所有衰减的影响。古

登堡使用的原始量规函数在5 km的距离上是1.4,国家地震台网使用的量规函数在5 km的距离上是1.8,有些地震专家针对华北的研究结果建议在5 km的距离上量规函数采用1.9^[3]。鉴于微地震震级小,周期短,笔者趋于使用较大的量规函数;量规函数取值越大,测点信号强度越弱。 A_0 是-2级地震在监测点的地动位移,单位是微米。原震级公式使用的是S波最大振幅,微地震通常监测到的是P波,S波振幅是P波振幅的 $\sqrt{3}$ 倍,因此修改了原震级公式。

由此可以计算出-2级地震在5 km的距离上由仪器输入端记到的电压

$$V = A_0 \times \varepsilon \times \omega = 4.7 \mu\text{V} \quad (3)$$

式(3)中: ω 是角频率,微地震频率在50~200周之间,在式(3)中取为100; ε 是地震仪的转换系数,使用2个地震仪直接串接。

计算结果表明,-2级地震在测点的信号幅值为4.7 μV ,要记到清晰的微地震波形,应该满足

$$\frac{C(1 - \frac{S}{P})}{T} > 3 \quad (4)$$

式(4)中: C 是采样率; T 是被采集信号的最高频率,为200周; S 是仪器前端输入噪音; P 是微地震信号

[收稿日期] 2013-06-20

[基金项目] 国家高新技术研究发展“863计划”资助项目——陆上非一致性时延地震(2011AA060303)

[作者简介] 刘建中(1947—),男,吉林吉林市人,高级工程师,主要从事采油工程和地应力研究工作;E-mail:jianzhong.liu@microseismic.net

在测点折算出的电压幅值。由式(4)可看出,提高仪器水平有两条途径,降低仪器前端输入噪音水平或者提高采样率。事实上,在仪器研制过程中,两者也是互相制约的,采样率提高,仪器前端的输入噪音也会增大,选择一个最佳的结合点,也可以提高仪器水平。由式(4)可以计算出

$$S < (1 - 3T/C) \times P < 1.88 \mu V$$

仪器前端输入噪音小于1.88 μV ,才可以保证每个地震周期采集3个以上的有效点,回放出清晰的地震波形。

仪器前端输入噪音的测试方法是:前端短路,用输出端的电压除以整个仪器系统的放大倍数,其结果就是输入端噪音。图1是仪器前端输入噪音的测试结果。

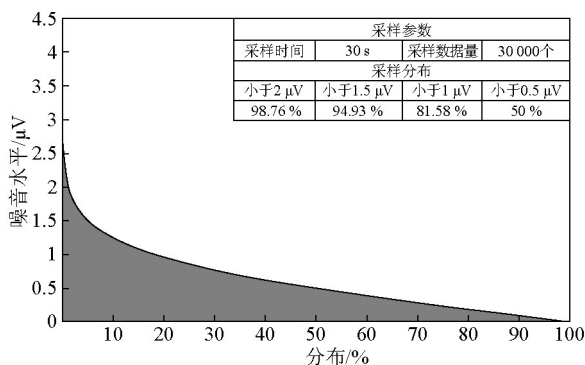


图1 折算到仪器前端的噪音分布

Fig.1 The noise distribution that converted to the front end of the instrument

图1横轴是时间分布比例,纵轴是仪器噪音水平,单位为 μV 。有约95%以上的时间,仪器前端噪音水平小于1.5 μV 。该监测系统可以在5 km的距离上记到-2级微地震。

如果记到清晰的微地震波形,可以进行显性相关分析,得到可靠的分析结果。

图2是某油田压裂监测实际记到的微地震波形,16个记录道12道记录质量良好。图2中:横轴是时间,时间标度是1 s;图中有7组纵向可以对比的波形,用黑色框标出的一组尤其显著。以这一组资料做显性相关分析得出以下结果:提取出显著的地震波形;给出台站间可靠的到时差;用相关分析,依据初动符号把数据分成两组。上述结果可以作为评价监测结果可靠性,震源精确定位,计算速度模型,做出震源机制的基本资料。

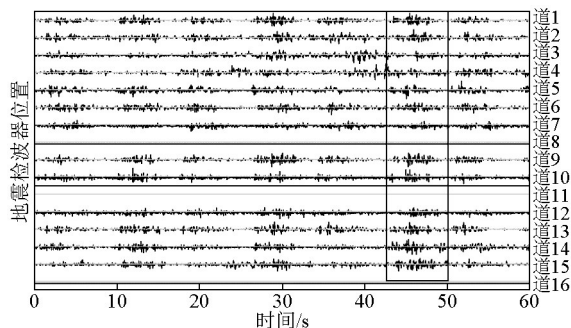


图2 某油田压裂监测实际记到的微地震波形

Fig.2 The actually microseismic waveform recorded by fracturing monitoring of some oilfield

如果仪器系统达不到上述指标,则记录不到清晰的微地震波形,影响记录、分析的可靠性。作为补救,可以进行隐性相关分析,得到相对可靠的分析结果。

隐性相关分析通常使用时间偏移、叠加技术。记录波形的精确叠加需要可靠的到时差,计算到时差需要可靠的速度模型,计算可靠的速度模型依赖可靠的到时差,二者互相依存,这使隐性相关分析存在某些不确定性。

高可信的压裂、注水监测,应该使用合格的监测系统,减少结果的不确定性。

3 增加微地震监测的台站个数,解释出更多的未知数

每增加一个台站,可以增加2个方程;震源参数个数是固定的只有4个: X_0 、 Y_0 、 Z_0 、 T_0 ,3个空间坐标,一个发震时刻;在水平均匀速度模型的假设下,每一层有2个未知数,层厚、层速。在监测台站个数足够多的情况下,可以在精确确定震源参数的情况下,建立多层水平均匀速度模型。建立速度模型的层数可以写为

$$n = (m - 4) / 2 \quad (5)$$

式(5)中: n 是层数; m 是监测台站个数。使用下面公式可以进行震源参数、速度模型的联合反演。如果有20个台站,可以建立8层水平均匀速度模型。速度模型近于实际,震源参数也会更可靠。

$$h_1 \operatorname{tg} \alpha_{m1} + h_2 \operatorname{tg} \alpha_{m2} + \dots + h_n \operatorname{tg} \alpha_{mn} = r_m \quad (6)$$

$$\frac{h_1}{V_1 \cos \alpha_{m1}} + \frac{h_2}{V_2 \cos \alpha_{m2}} + \dots + \frac{h_n}{V_n \cos \alpha_{mn}} = t_m - t_0 \quad (7)$$

$$h_1 + h_2 + \dots + h_n = H \quad (8)$$

$$\frac{\sin \alpha_{mn}}{\sin \alpha_{m1}} = \frac{V_{mn}}{V_1} \quad (9)$$

式(6)~式(8)是进行震源参数、速度模型联合反演的基本公式。式中: H 是震源深度、震源上方的地层厚度, h_1, h_2, \dots, h_n 是震源上方的各层厚度; α_{m1} 是相对第 m 个台站的震源地震射线出射角, α_{mn} 是相对第 m 个台站、第 n 层地震射线出射角, α_{m1} 是一个过渡性待求参数,计有 m 个; α_{mn} 由式(9)得出; r_m 是震源相对第 m 个台站的水平距离,是由 X_0, Y_0 两个未知数表示的震源水平位置; t_0 是发震时刻, t_m 是第 m 个台站的直达P波到时; V_1, V_2, \dots, V_n 是各层的P波波速。式(6)是路径方程,有 m 个;式(7)是走时方程,有 m 个。可以计算出震源参数,各地层厚度及速度。

式(6)~式(9)是依据一个地震的计算过程及结果,微震个数增多,还可以依据不同来源位置的地震计算结果的差别细化地层、波速结构。

实际地层不是水平均匀的,层面存在倾斜,这时,每层需要增加2个待求参数,地层倾角、倾向。倾角、倾向的物理意义是,用一个竖直面去切水平面和地层,竖直面沿着直立轴转动。若水平面和地层在竖直面上的切线始终平行或重合,则地层是水平的;若水平面和地层在竖直面上的切线有夹角,则地层倾斜,最大的夹角是地层倾角,最大夹角的张开方向是地层倾向。

建立速度模型的层数可以写为

$$m = (n - 4)/4 \quad (10)$$

只有使用更多的台站,才可以做出满足要求的地层速度模型与结构,其计算过程见式(11)

$$\sum_1^n L_{mn} = r_m \quad (11)$$

$$\sum_1^n \frac{\sqrt{L_{mn}^2 + H_{mn}^2}}{V_n} = t_m - t_0 \quad (12)$$

式(11)和式(12)是有倾斜地层的路径方程、走时方程。式中, L_{mn}, H_{mn} 由式(13)和式(14)给出

$$L_{mn} = \frac{\bar{h}_n \operatorname{tg}^2 \bar{\alpha}_{mn}}{\operatorname{tg} \bar{\alpha}_{mn} - \operatorname{tg} \bar{r}_n} \quad (13)$$

$$H_{mn} = \frac{\bar{h}_n [\operatorname{tg} \bar{\alpha}_{mn} - \operatorname{tg} \bar{r}_n (1 - \operatorname{tg}^2 \bar{\alpha}_{mn})]}{\operatorname{tg} \bar{\alpha}_{mn} - \operatorname{tg} \bar{r}_n} \quad (14)$$

式(13)和(14)中: \bar{h}_n 、 $\bar{\alpha}_{mn}$ 、 \bar{r}_n 是经过地层倾斜校正后的第 n 层厚度、相对第 m 个台站第 n 层的地震射线出射角、第 n 层倾角,第1层厚度无须校正。其校正公式为

$$\bar{h}_n = h_n - \Delta H_{m(n-1)} \quad (15)$$

$$\bar{\alpha}_{mn} = \alpha_{mn} - r_{n-1} \quad (16)$$

$$\bar{r}_n = r_n \cos(\beta_m - s_n) \quad (17)$$

式(15)~式(17)中: h_n 、 α_{mn} 、 r_n 是原始地层厚度、地震射线出射角、地层倾角; s_n 是第 n 层倾向,是与正北方向的夹角。式中参数可由下式计算出

$$\Delta H_{mn} = \frac{\bar{h}_n \operatorname{tg}^2 \bar{\alpha}_{mn} \operatorname{tg} \bar{r}_n}{\operatorname{tg} \bar{\alpha}_{mn} - \operatorname{tg} \bar{r}_n} \quad (18)$$

$$\frac{\sin \alpha_{mn}}{\sin(\alpha_{m(n-1)} - r_{n-2} + r_{n-1})} = \frac{V_n}{V_{n-1}} \quad (19)$$

$$\operatorname{tg} \beta_m = \frac{X_m - X_0}{Y_m - Y_0} \quad (20)$$

可以看出,较水平均匀假设,每层增加了2个待求未知数:倾角 r_n 、倾向 s_n 。

依据式(11)~式(20)可以计算出地层的倾角、倾向、厚度、速度。多个微地震可以细化地层结构。

如果台站个数足够多,可以反演地层结构,代替常规三维勘探。应该注意的是,用微地震技术做三维勘探,信号源来自地下,看到的是透射波,没有常规三维地震勘探常见的反射震相,不能用反射震相排列描述地质层面,而是计算出地层参数,给出地质结构。

断层可以形成反射震相,如果在记录中存在明显的反射震相,可以用监测到反射震相的台站分布描述地层产状。

使用微地震监测技术进行三维地震勘探,来自地下的信号只有一个单程且较清晰;用在构造反转地层,可以得到事半功倍的效果。目前使用微地震监测技术进行三维地震勘探已经成为一种潮流,国内外均有人进行此项研究,并已经取得长足进展。

4 与成熟的地震学理论融合,形成完整的微地震学理论

微地震监测技术是一个新兴技术,只有借鉴成熟技术,理论才会更完善。引进常规地震中的应力降、地震矩、震源机制理论,提高了资料解释水平,丰富、扩大了微地震技术的理论技术,拓展了微地震监测技术的应用领域。如用张性、剪性震源机制判别压裂施工形成的人工裂缝的有效缝、无效缝,评价压裂施工水平。张性震源机制标示该微震所在位置的压裂裂缝是张开型的,多个张开型微地震标示的压裂裂缝是有效裂缝;剪切型微地震标示该微震所在位置的压裂裂缝是沿着已有裂缝的错动,多个剪切型微地震标示的压裂裂缝是无效裂缝^[4](见图3、图4)。用微地震震源机制判断压裂裂缝的有效性,在大量裂缝中判别主要压裂裂缝已经被很多应用单位使用。

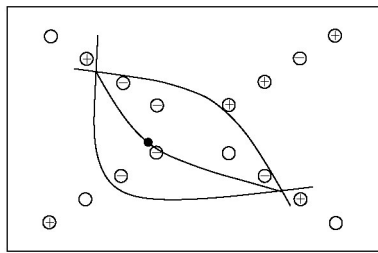


图3 某油田微地震监测做出的张性震源机制
Fig.3 The tensional focal mechanism made by
microseismic monitoring of some oilfield

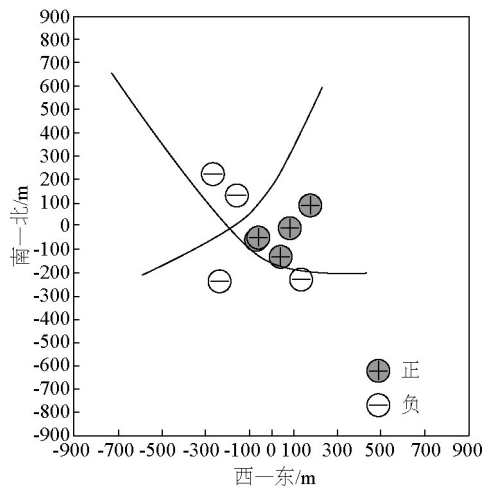


图4 某油田监测做出的剪切性震源机制
Fig.4 The shearing focal mechanism made by
microseismic monitoring of some oilfield

图3、图4是利用监测到的微地震绘制的2幅震源机制图,两者差别明显。平面震源机制是用2条弧线把初动符号不同的微地震监测台站切分开,使弧线两侧的地震初动符号不同。如果2条弧线的围限区内是负号、区外是正号,该地震是张开型的,其2条弧线交汇位置过震源的连线是发生微地震的裂缝方向(见图3)。如果2条弧线把负号、正号的微地震监测台站切分为4个区,相对2个区符号相同,该地震是剪切型的,弧线中的一条是发生微地震的裂缝方向(见图4)。

应力降、地震矩、震源尺度理论也已经被引进微地震监测技术领域,用以估计震源尺度,地震强度。

依据地震低频幅度及波谱确定的地震矩写为^[3]

$$M_0 = 4\pi\beta^3\Omega_0\Delta/0.85 \quad (21)$$

式(21)中: β 是S波波速; Ω_0 是低频位移振幅; Δ 是震源面积。用地震矩可以估计微地震张开或者错动的

位移幅度,进而判断压裂裂缝宽度,是一个评价油田压裂效果的非常有用的参数。式(21)中的 Δ 通常采用圆盘假设去计算,震源半径可以由式(22)计算

$$r = 2.34\beta/2\pi f_0 \quad (22)$$

式(22)中: f_0 是拐角频率,是地震频谱幅度明显变小一点的频率拐点。地震应力降可以写为

$$\Delta\sigma = (7/16) \cdot M_0/r^3 \quad (23)$$

由式(1)、(21)、(22)、(23)可以计算出微震震级、震源尺度及应力降,上述几个参数在许多场合常有重要应用。

引进常规地震勘探的时间偏移、相关叠加理论,提高了监测的可靠性,铺平了进入地震勘探领域的技术基础。

用12个以上放在地面上的地震仪,把被监测区切分成三维网格(见图5)。监测前,计算出来自空间网格每一个节点至全部监测站的地震波走时,给出来自某一节点至一指定监测站与至其他监测站的走时差;监测时,把其他台站的地震记录做时差修正后叠加在指定台站的地震记录上,若叠加后某一段时间地震记录幅度明显增大,信号变得清晰,则存在来自这一节点的地震信号。使用时间偏移、微地震记录叠加技术,可以大幅度提高空间定位精度,把震源定位误差控制在10 m以内。

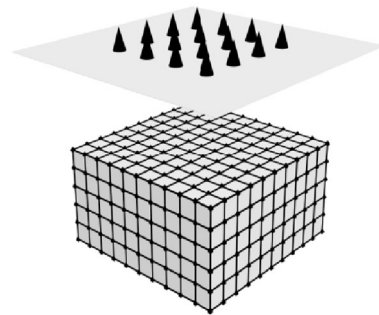


图5 微地震偏移、叠加示意图
Fig.5 Schematic diagram of microseismic
deviation and superposition

图5中,上面是布置的微地震台站,下面是切分的三维网格。如果可以由声波时差或监测射孔获得速度模型,偏移、叠加技术会取得更好的效果。

5 在矿山、水库进行危险性预测

常规地震预报中,以小震报大震是一类常用技术,但经常出现失误。事实上,小震向某一断层集

中,有两种发展趋势:地震能量转移,形成新的、更大的集中;地震能量释放,沿着断层已经没有可以发生地震的能量。二择一的结果作为唯一的判断,出现失误在所难免。原因是震源深度大于人类施工深度,难以取得其他佐证。矿山、水库则不同,震源深度小,通常在几百米至几千米,可以进行其他测量,以检验发震趋势。如小震发生时,沿断层某一部分的剪切应力增加,则可能有新的地震发生;否则没有后续地震。

常规地震的大震通常指5级以上地震,以1、2级地震预测大震;在矿山、水库,5级地震太大,2级以上地震就可能形成破坏,需要更小的地震进行危险预报,以微地震进行水库、矿山危险预报是现实可行的^[5]。

微地震数据量大,可以进行多种分析^[5]。在国外,用微地震技术进行矿山安全性监测,已经普遍被采用;国内水库、矿山也会逐渐推广这项技术,以减少矿难所造成的人类生命和财产损失。

6 结语

微地震监测技术已经成为一个有重要应用的前沿技术,发展方向受到瞩目。

开发质量更高的微地震监测系统,增多微地震

监测台站个数无疑是其最重要的两个发展方向。前者,可以记到更多、更小的微地震,夯实了微地震监测技术的理论基础。后者,增多了提取微地震信号的机会,得到更多的资料、信息,可以解释出更多成果,增大了微地震技术的应用前景。引进成熟的地震学理论,可以形成完整的微地震学理论。

在前述发展基础上,转而把微地震技术应用于勘探领域,可以大幅度提高勘探水平,在前人无法取得合格勘探资料的地区实施勘探施工。

微地震震级小、频度高,随时可以在任何地点、任何时间取得资料,可以为常规地震中的小地震进行前期预报,在水库、矿山安全领域也有广泛应用。

参考文献

- [1] 刘建中,孙庆友,徐国明,等. 油气田储层裂缝研究[M]. 北京:石油工业出版社,2007:84-112.
- [2] 中国科学院地球物理所. 地震学基础[M]. 北京:科学出版社,1976:126-168.
- [3] Reginald Hardy H Jr. Acoustic emission/microseismic activity: Principles, techniques and geotechnical applications [M]. 1st edition. 2003:5.
- [4] 郭履灿,赵凤竹. 震级及震源参数确定[M]. 北京:中国科学出版社,1986:3-4.
- [5] 刘建中,刘国华. 用微地震监测结果预报水库、矿山有害地震[J]. 中国工程科学,2012,14(4):45-48.

Microseismic monitoring technology development direction and application

Liu Jianzhong¹, Tang Chunhua¹, Zuo Jianjun²

(1. Beijing Traverse Technology and Development Ltd., Beijing 100082, China;

2. Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257022, China)

[Abstract] This paper discussed the development direction of microseismic monitoring technology, pointed out that improve the quality of microseismic monitoring system, reduce the front end noise of the instrument, record more and smaller microseismic, tamp the theoretical foundation of microseismic monitoring, and increase the number of microseismic monitoring stations so as to obtain more information that can be compared are important directions for the development of microseismic technology. The introduction of conventional seismic exploration theory can also increase the level of microseismic monitoring, and form complete theory of microseismic. Above are important directions of microseismic monitoring technology development. With the development of technology, microseismic monitoring technology can also be used in seismic exploration and safety prediction of mine, reservoir besides oilfield fracturing and water monitoring.

[Key words] microseismic monitoring; seismic prospecting; fracturing monitoring; water monitoring