

水力压裂微地震监测质量监控方法研究

崔庆辉^{1,2}

1. 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 275022;
2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500

摘 要:微地震监测是评价油气井水力压裂效果的一种重要方法,在非常规油气田水力压裂效果评价中得到广泛应用。针对如何保证微地震监测质量这一问题,从微地震波形特征、理论合成数据处理、射孔信号定位及微地震事件时空分布特征等方面研究了微地震监测质量监控方法,现场应用表明,研究所取得的成果基本符合实际情况,保证了微地震监测结果应用于压裂评价的可靠性。

关键词:水力压裂;微地震监测;质量监控

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.05.009

0 前言

水力压裂已成为开发低渗透油气藏的一项重要技术,成为致密页岩油气等非常规油气资源成功开发的关键因素^[1]。微地震监测通过记录岩石破裂产生的信号及震源反演获得裂缝的几何参数,进而实现压裂效果的评估,近年来日益受到重视并得到广泛应用^[2-4]。目前国内外许多学者对微地震监测技术进行了大量研究,主要集中于微地震去噪^[5]、速度模型^[6-10]、定位方法^[11-12]等方面。微地震监测数据具有噪音广、信号弱、速度建模困难等特点,有效实施质量监控,保证微地震监测处理质量是确保压裂评价可靠性的必要步骤,遗憾的是国内外缺少这方面的研究。

本文基于微地震监测技术原理,从微地震信号波形、模拟微地震数据处理、射孔信号定位及微地震事件时空分布特征等四个方面探讨了微地震监测质量控制方法,为水力压裂微地震监测技术的应用提供了有力保障。

1 微地震监测质量监控方法

1.1 微地震信号波形特征

成功记录到微地震信号是微地震监测技术的基础,

微地震信号信噪比较低导致了在数据处理中常常把噪音错误识别成有效信号,进而得出错误的定位结果,误导后续的压裂效果评价。为了保证有效信号识别的准确率,需要对识别出的有效信号从波形特征上加以判别。微地震信号波形特征主要表现在分布范围、道间相似程度及时差曲线特征等方面。

同一微地震信号往往表现为大部分或全部的检波器上可见,同时在各检波器之间还表现出高度相似性。水力压裂通过射孔后向地层注入液体,引起岩石破裂并产生微地震信号,因此微地震信号发生位置具有特定的范围,在该范围内的信号与地表的各种噪音在时差曲线上具有完全不同的特征。

图1为在地表模拟布置检波器,计算地下某一范围内不同位置的时距曲线(不同颜色代表不同位置),可以看出,在一定范围内不同位置处的时距曲线具有高度相似性。因此,实际应用中可以利用射孔点计算出的时差曲线作为模板,来判断微地震信号的真实性的做法是:计算地层等效速度,根据射孔点坐标,计算射孔点到各检波器的走时并转换成相对时差,绘制出时差曲线显示在微地震数据体上,道间时差与时差曲线相似的信号

收稿日期:2016-03-07

基金项目:国家863课题“陆上非一致性时延地震、微地震油藏监测方法研究”(2011 AA 060303)

作者简介:崔庆辉(1984-),男,陕西宜川人,高级工程师,在读博士研究生,主要从事地震勘探近地表校正及水力压裂微地震监测技术研究。

可认为是有效地震信号。

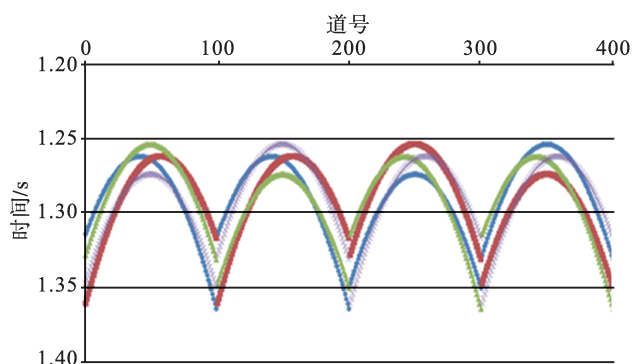
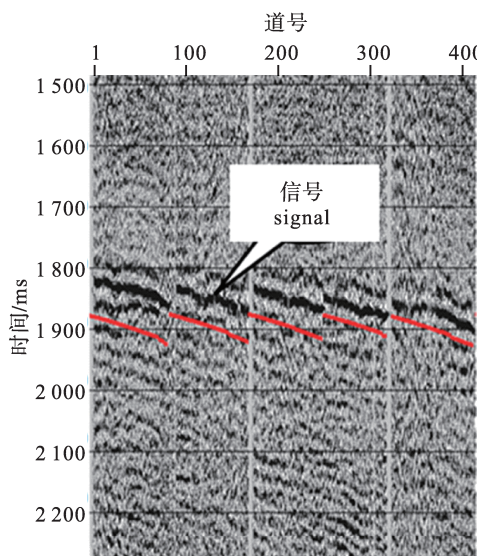
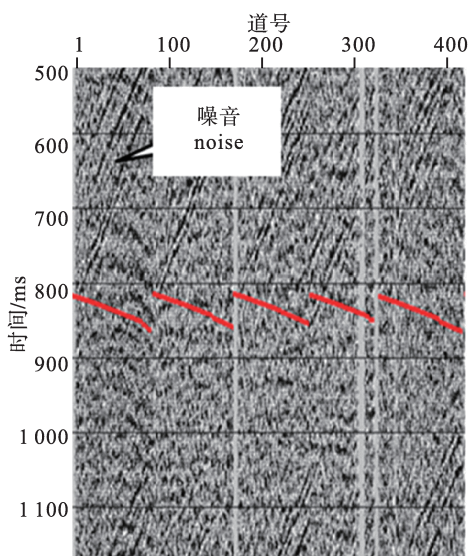


图1 地下特定范围内不同位置计算的理论时距曲线

图2所示为一实际地面微地震监测数据,图中红色曲线为压裂段的理论时差曲线,可依此判断出图2-a)为噪音,图2-b)为有效微地震信号。



a) 有效微地震信号



b) 噪音

图2 压裂段时差曲线量板识别微地震有效信号

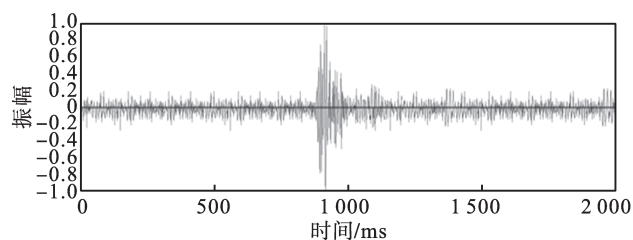
1.2 模拟数据处理

微地震监测结果受环境噪音、观测系统、检波器个数、压裂深度、地质特征等多种因素影响^[13-14]。通过对模拟微地震数据的处理,可以评估以上因素能否实现微地震信号的识别和定位,为实现微地震监测质量监控提供合理依据。以下将以一实际地面微地震监测数据为例,说明模拟数据用于微地震监测质量监控的过程。

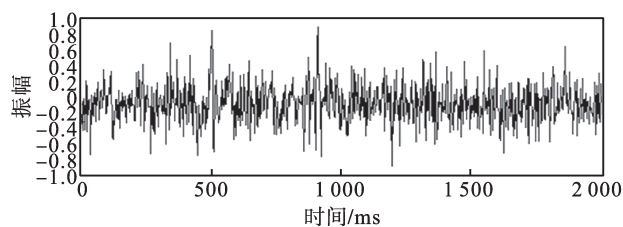
1.2.1 有效信号的识别

提取工区在以往微地震监测中记录到的微地震信号波形,加入实际监测的环境噪音合成模拟微地震数据,计算该模拟微地震数据的长短时窗能量比曲线,应用长短时窗能量比的方法识别有效信号^[15]。

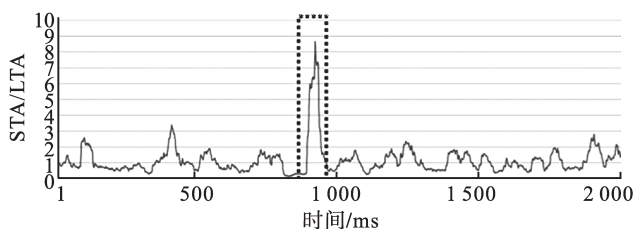
图3-a)所示为地面监测到的实际微地震信号,图3-b)为加入工区实际记录到的背景噪音后形成的模拟记录,图3-c)为计算的长短时窗能量比值(STA/LTA)曲线。可以看出,虽然通过直接观察很难发现微地震信号,但是在长短时窗能量比值曲线上可以清晰地发现有效信号出现的位置,由此验证了该工区进行微地震监测可识别出较弱的微地震信号,保证了其信号识别结果的可靠性;反之,由计算机自动识别出的信号的真实性的得不到保证。



a) 实测的微地震有效信号



b) 加入实际背景噪音的合成微地震数据



c) 长短时窗能量比值曲线

图3 合成微地震数据的信号识别

1.2.2 微地震事件的定位

建立一个均匀的速度模型,计算实际压裂位置到地表各个检波器的旅行时间,采用图3-a)所示的波形及

实际监测的环境噪音制作模拟微地震数据,通过调整图 3-a)所示的波形振幅,获得不同信噪比的模拟数据,见图 4。利用能量扫描叠加定位方法^[16-18],对不同信噪比模拟微地震数据进行定位,最终结果见表 1。结果表明,在该工区进行地面微地震监测,可实现信噪比大于等于 0.5 的微地震有效信号的定位,但不能保证更低信噪比下微地震有效事件的定位精度。

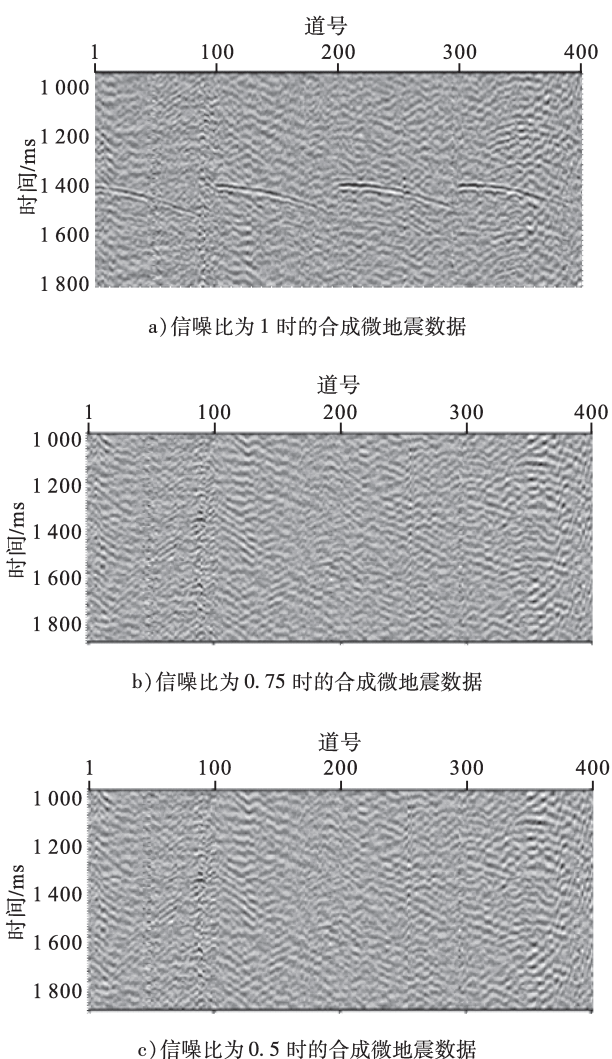


图 4 不同信噪比的合成微地震数据

表 1 不同信噪比合成微地震数据定位误差

信噪比 SNR	X /m	Y /m	Z /m	距离 /m
1	0	0	0	0
0.75	5	5	10	7.7
0.5	12	8	16	21.5

1.3 射孔信号的定位

速度模型的准确性直接影响微地震事件定位精度,利用模拟微地震数据验证定位结果时使用的是均匀速度模型,忽略了地下速度模型的复杂性对结果的影响^[19]。射孔信号与实际的微地震信号相比能量较强,其

背景噪音、传播路径等均与实际微地震信号具有较高的相似性,并且射孔位置是已知的,因此对实际射孔信号进行和微地震信号相同的处理流程,计算射孔信号的定位结果与射孔点实际位置的误差,可以用来评价微地震定位结果的可信度。

1.4 微地震事件时空分布特征

微地震事件的分布受地应力、天然裂缝、岩石物理性质等影响往往表现出各向异性,很少对称分布,但总体上微地震事件发生的时间具有以下时空特征:以压裂段为起始点向外延伸,越近的微地震事件发生的时刻越早,见图 5。因此将最终监测结果进行三维显示并以不同颜色表示事件发生时刻的先后,也可以用来评价定位结果是否合理。

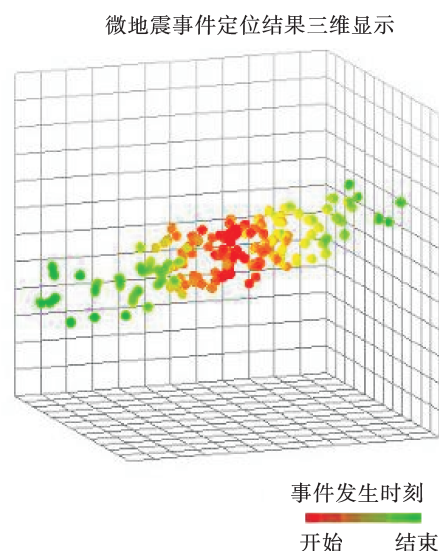


图 5 合理的微地震事件时空分布

2 应用效果

Y 砂砾岩体油藏位于我国东部,是常温常压稀油低孔特低渗油藏,深度近 4 000 m,主地应力呈北西向。为实现优化形成平面、纵向立体缝网,确保裂缝不窜通情况下,达到储量控制最大化,对多口水平井进行了水力压裂。在地表布置了近 900 个检波器对其中两口井共 26 段的压裂进行了微地震监测,图 6 为井轨迹与检波器位置分布图。应用本文研究的质量监控方法对微地震监测资料处理过程进行了严格监控,得到了图 7 所示的最终结果。

根据最终对两口井的监测结果综合分析认为:压裂产生的裂缝方向主要为北西和北东两组方向;解释的裂缝长度与压裂设计基本一致;裂缝高度低于设计值,但没有压穿储层,总体达到预期效果。图 8 为对两口压裂井压裂后产能的追踪,从产量的提升上也验证了以上结论。



图6 Y油藏微地震监测检波器分布

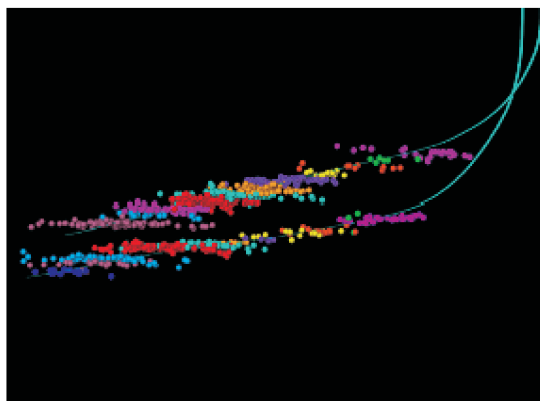


图7 最终微地震监测处理结果显示

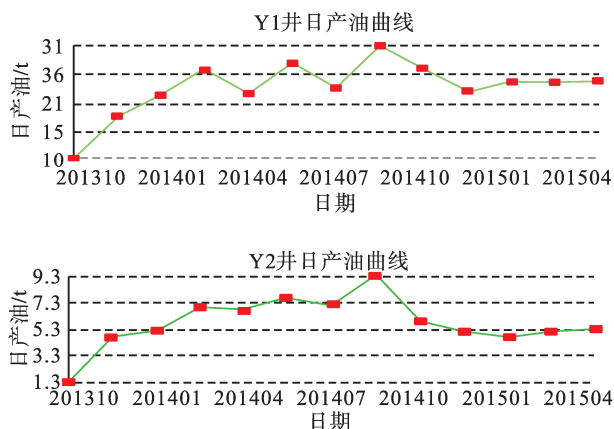


图8 两口井压裂后的日产油曲线

3 结论

本文主要从微地震信号波形特征、模拟微地震数据处理、射孔信号的定位及微地震事件时空分布特征等四个方面探讨了微地震监测质量控制方法,所取得的经验和认识有助于微地震监测技术服务人员进行质量监控,有利于油田开发部门人员对微地震监测结果进行评价,并合理地指导开发方案的调整,在实际应用中取得了良好效果。但所建立的方法基本上以定性评价为主,在定量

分析方面需要进一步的研究,以取得更精确的评价效果。

参考文献:

- [1] 贾利春,陈勉,金衍. 国外页岩气井水力压裂裂缝监测技术进展[J]. 天然气与石油, 2012, 30(1): 44-49.
Jia Lichun, Chen Mian, Jin Yan. Technical Progress in Overseas Hydraulic Fracture Monitoring Techniques for Shale Gas Well [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(1): 44-49.
- [2] 刘振武,撒利明,杨晓. 页岩气勘探开发对地球物理技术的需求[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(1): 810-818.
Liu Zhenwu, Sa Liming, Yang Xiao. Needs of Geophysical Technologies for Shale Gas Exploration [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(1): 810-818.
- [3] 刘振武,撒利明,巫芙蓉. 中国石油集团非常规油气微地震监测技术现状及发展方向[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(5): 844-853.
Liu Zhenwu, Sa Liming, Wu Furong, et al. Microseismic Monitor Technology Status for Unconventional Oil and Gas and Its Future Development in CNPC [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(5): 844-853.
- [4] 梁北援,沈琛,冷传波,等. 微地震压裂监测技术研发进展[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 401-410.
Liang Beiyuan, Shen Chen, Leng Chuanbo, et al. Development of Microseismic Monitoring Technology for Hydro-Fracturing [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 401-410.
- [5] 宋维琪,杨勤勇,郭全仕,等. 地面微地震资料弱信号提取方法研究[J]. 石油物探, 2013, 52(2): 131-136.
Song Weiqi, Yang Qinyong, Guo Quanshi, et al. Research on Weak Signal Extraction Method for Surface Microseismic Data [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(2): 131-136.
- [6] Pei D H, Quirein J A, Cornish B E, et al. Velocity Calibration for Microseismic: A Very Fast Simulated Annealing (VF-SA) Approach for Joint-Objective Optimization [J]. Geophysics, 2009, 74(6): WCB 47-WC B55.
- [7] 谭玉阳,何川,张洪亮. 基于初至旅行时差的微地震速度模型反演[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(1): 54-60.
Tan Yuyang, He Chuan, Zhang Hongliang. Microseismic Velocity Model Inversion Based on Moveouts of First Arrivals [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(1): 54-60.
- [8] 宋维琪,王新强,高艳可,等. 地面监测微地震事件等效速度反演定位方法[J]. 石油物探, 2012, 51(6): 606-610.
Song Weiqi, Wang Xinqiang, Gao Yanke, et al. The Inversion Positioning Method of the Equivalent Velocity of Surface Microseismic Monitoring [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(6): 606-610.

(下转第49页)

(上接第 44 页)

- [9] 赵 忠, 谭玉阳, 张洪亮, 等. 基于 Occam 反演算法的微地震速度模型反演[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(1): 43 - 49.
Zhao Zhong, Tan Yuyang, Zhang Hongliang, et al. Velocity Model Inversion for Micro- Seismic Monitoring Based on Occam Inversion Algorithm [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51 (1): 43 - 49.
- [10] 宋维琪, 高艳珂, 朱海伟. 微地震资料贝叶斯理论差分进化反演方法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1331 - 1338.
Song Weiqi, Gao Yanke, Zhu Haiwei. The Differential Evolution Inversion Method Based on Bayesian Theory for Micro Seismic Data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56 (4): 1331 - 1338.
- [11] 王 磊, 杨世刚, 刘 宏, 等. 微破裂向量扫描技术在压裂监测中的应用[J]. 石油物探, 2012, 51(6): 613 - 617.
Wang Lei, Yang Shigang, Liu Hong, et al. Application of Micro- Fracture Vector Scanning Technology for Fracture Monitoring [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51 (6): 613 - 617.
- [12] Warpinski N R, Sullivan R B, Uhl J E, et al. Improved Microseismic Fracture Mapping Using Perforation Timing Measurements for Velocity Calibration [J]. SPE Journal, 2003, 10 (1): 14 - 23.
- [13] Eisner L, Duncan P M, Heigl W M, et al. Uncertainties in Passive Seismic Monitoring [J]. Leading Edge, 2009, 28 (6): 648 - 655.
- [14] 尹 陈, 刘 鸿, 李亚林, 等. 微地震监测定位精度分析[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 800 - 807.
Yin Chen, Liu Hong, Li Yalin, et al. The Precision Analysis of the Microseismic Location [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28 (2): 800 - 807.
- [15] 叶根喜, 姜福兴, 杨淑华. 时窗能量特征法拾取微地震波初始到时的可行性研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1574 - 1581.
Ye Genxi, Jiang Fuxing, Yang Shuhua. Possibility of Automatically Picking First Arrival of Microseismic Wave by Energy Eigenvalue Method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51 (5): 1574 - 1581.
- [16] Gajewski D, Anikiev D, Kashtan B, et al. Localization of Seismic Events by Diffraction Stacking [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2007, 26 (1): 1287 - 1291.
- [17] 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 Localization By Seismic Emission Tomography for Surface Based on Microseismic Monitoring [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36 (5): 45 - 50.
- [18] Duncan P M, Eisner L. Reservoir Characterization Using Surface Microseismic Monitoring [J]. Geophysics. 2010, 75 (3): 75A139 - 75146.
- [19] 尹 陈, 巫芙蓉, 李亚林, 等. 射孔校正速度对微地震定位精度的影响[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 1809 - 1816.
Yin Chen, Wu Furong, Li Yalin, et al. The Effect of the Velocity Calibrated by the Perforation on Microseismic Location Error [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28 (4): 1809 - 1816.