

# 基于微地震监测的深层页岩储层压裂效果评价

缪祥禧, 赵翔, 吴晓光

中石化经纬有限公司西南测控公司, 四川 成都

收稿日期: 2024年2月28日; 录用日期: 2024年6月11日; 发布日期: 2024年6月21日

## 摘要

威荣气田五峰-龙马溪组优质页岩储层埋深普遍超过3500米, 属于深层页岩气范畴, 威荣深层页岩具有“一深、两低、三高”的特点, 一深: 储层埋藏深; 两低: 低脆性、低裂缝发育程度; 三高: 高温、高应力、高应力差, 导致压裂难以形成复杂裂缝、难以形成裂缝有效支撑。模拟表明, 压裂裂缝有效率为28.7%~44.5%, 平均42.8%实践表明开发效果并不理想, 为准确评价储层压裂效果, 评估现有压裂工艺的适用性, 气田开发过程中开展了井中微地震监测, 利用监测数据开展缝网展布特征分析、压裂体积计算、暂堵效果评价及天然裂缝发育情况分析等研究, 成果为威荣气田压裂效果综合评价、压裂设计调整、开发方案优化等工作提供了技术参考。

## 关键词

威荣气田, 五峰组-龙马溪组, 深层页岩, 微地震监测, 压裂效果评价

# Evaluation of Fracturing Effectiveness in Deep Shale Reservoirs Based on Micro-Seismic Monitoring

Xiangxi Miao, Xiang Zhao, Xiaoguang Wu

Southwest Logging & Control Company, Sinopec Matrix Corporation, Chengdu Sichuan

Received: Feb. 28<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 11<sup>th</sup>, 2024; published: Jun. 21<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

The buried depth of the high-quality shale reservoirs in the Weirong Gas Field's Wufeng-Longmaxi Formation generally exceeds 3500 meters, belonging to the category of deep shale gas. The deep shale of Weirong Gas Field has the characteristics of "one deep, two lows, and three highs". One deep refers to the deep burial of the reservoir; two lows refer to low brittleness and low fracture

development; three highs refer to high temperature, high stress, and high stress difference, which makes it difficult to form complex fractures and difficult to effectively support the fractures. Simulation shows that the effective rate of fracturing fractures is 28.7%~44.5%, with an average of 42.8%. Practice shows that the development effect is not ideal. To accurately evaluate the fracturing effect of the reservoir and assess the applicability of the existing fracturing technology, micro-seismic monitoring in the well was carried out during the development of the gas field. The monitoring data was used to analyze the characteristics of fracture network distribution, calculate the fracturing volume, evaluate the temporary plugging effect, and analyze the development of natural fractures. The results provide technical references for the comprehensive evaluation of fracturing effects, adjustment of fracturing designs, and optimization of development plans in the Weirong Gas Field.

## Keywords

Weirong Gas Reservoirs, Wufeng-Longmaxi Formation, Deep Shale Reservoirs, Micro-Seismic Monitoring, Evaluation of Fracturing Effectiveness

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

页岩气水平井产能主要受控于优质储层发育厚度、优质储层钻遇长度和储层改造程度。储层改造效果是提高储量动用程度的重要保障,在很大程度上直接影响页岩气井产能能否达到商业开发标准[1] [2] [3]。微地震监测技术是储层压裂过程中最精确、最及时、信息最丰富的监测手段之一[4],随着对微地震震源机制、反演及可视化的深入研究,微地震技术不断扩大应用范围,可对页岩气井的产能评价,压裂工艺优化,开发方案调整等后续工作做出客观的可靠分析[5] [6]。

## 2. 研究区概况

威远-荣县地区构造位置隶属于四川盆地二级构造单元川西南坳陷北部威远构造带南缘。气田主体处于白马镇向斜区,东南部紧邻自流井背斜,整体构造形态较简单,断层主要分布在自流井背斜,方向呈 NE-SW 向展布。向斜底部构造略有起伏。西部深度较大,最深位置位于威页 23-1HF 井附近,东区略微抬升,区内龙马溪组底部构造海拔深度范围为-3200 m 至-3540 m,威荣气田页岩气储层属于深层页岩气范畴,累计提交页岩气探明地质储量 1246.78 亿方。

威荣区块龙马溪组页岩微孔隙和微裂隙比较发育,基质孔隙类型丰富,按照成因分类,包括残余原生孔隙、不稳定矿物溶蚀孔、粘土矿物层间孔和有机质孔等 4 种类型。根据孔隙的赋存状态,可将基质孔隙进一步归纳为脆性矿物内微孔隙(包括残余原生孔隙、不稳定矿物溶蚀孔)、粘土矿物层间微孔隙、有机质微孔隙 3 大类。实钻证实,其中粘土矿物层间孔和有机质孔是海相龙马溪组页岩储集空间的特色和重要组成部分,尤其有机质孔发育最广泛。五峰-龙一段矿物组分以脆性矿物(石英、长石、方解石、白云石),粘土矿物(伊利石、蒙脱石、伊/蒙混层)为主。脆性矿物:含量介于 37%~88.5%之间,平均 56.50%,以硅质(平均 37.79%)、钙质(平均 15.60%)为主。粘土矿物含量介于 10.5%~61.0%之间,平均 42.02%,以伊利石、蒙脱石、伊/蒙混层为主。脆性矿物含量较高,对页岩基质孔隙度和微裂缝发育程度、含气性及压裂改造取到积极作用。

### 3. 微地震监测资料综合应用

#### 3.1. 监测情况

地质 - 工程条件显示威荣气田具备商业开采价值，实践表明开发效果并不理想，为准确评价储层压裂效果、评估现有压裂工艺的适用性，气田开发过程中在十余口井 180 段开展了井中微地震监测，监测成功率 97% (如表 1 所示)。能够满足现场压裂效果评价和压后综合分析。

#### 3.2. 压裂波及参数计算

通过对监测到的微地震事件数量、震级进行统计，计算微地震波及体东西翼长，波及体南北翼宽、波及体上下高及压裂缝网的展布走向。结合事件点的时间、位置关系定性描述压裂改造效果以及暂堵效果[7] [8]。

Table 1. Statistics of micro-seismic monitoring in Weirong Gas Field

表 1. 威荣气田微地震监测情况统计

井名	温度(°C)	压力(兆帕)	设计段数(段)	监测段数(段)	成功率(%)	微地震事件(个)
WY34-1HF	138	79.4	12	11	92%	1142
WY34-2HF	139	79.5	19	18	95%	1045
WY34-3HF	137	79.2	20	20	100%	1089
WY25-1HF	139	80.7	28	27	96%	2135
WY25-2HF	140	81	11	11	100%	2027
WY25-3HF	137	80.6	35	33	94%	2086
WY25-4HF	141	81.2	14	14	100%	2508
WY3-3HF	96	42.9	16	16	100%	1382
WY3-4HF	94	42.7	12	12	100%	1112
WY3-7HF	96	43.1	18	18	100%	1524

Table 2. Micro-seismic parameters of the third stage fracturing in WY34-3HF well

表 2. WY34-3HF 井第 3 段压裂微地震参数

监测井段	波及体长度 L (m)	波及宽度 W (m)	波及高度 H (m)	缝网走向 (°)	微地震数量	波及体积(万方)
第 3 段	217	74	44	91	66	70.6

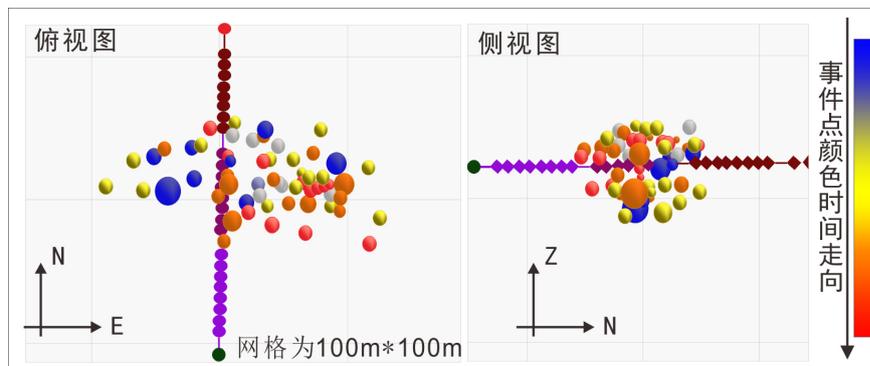


Figure 1. Analysis of fracturing propagation range (The third section of WY34-3HF well)

图 1. 压裂波及范围分析(WY34-3HF 井第 3 段)

监测显示 WY34-3HF 井第 3 段微地震事件为 66 个(表 2), 满足压裂效果评价需求, 通过微地震事件展布分析: 压裂缝延井轴向东延伸 117 米, 向西延伸 100 米, 裂缝波及宽度 74 米, 裂缝高度 44 米, 事件波及体积( $V=L \times W \times H$ )达到 70.6 万方, 裂缝走向与最大主应力方向一致, 为北偏东向(图 1)。压裂缝波及范围及裂缝走向表明压裂效果较好。

### 3.3. 暂堵效果评价

暂堵压裂工艺是在压裂施工过程中一次或者多次向地层中投放高强度水溶性颗粒暂堵剂。由于流体总是向阻力最小的方向流动, 暂堵剂颗粒进入井筒的射孔孔眼, 部分进入地层中的裂缝或高渗透层, 并在这些地方产生滤饼桥堵, 临时封堵已存在的裂缝, 形成高于裂缝破裂压力的压差, 从而迫使后续压裂液进入高应力区或开启新裂缝, 最终形成多条新裂缝, 达到密集切割储层的目的[9]。

暂堵压裂工艺能对裂缝的延伸实现有效的控制, 实现裂缝转向或开启新裂缝, 对高低渗透层进行均匀改造[10]。因此, 在暂堵转向作业过程中实时监测并优化施工显得尤为重要, 这通常需要利用多种先进技术和监测手段。一般使用的方法主要有: ① 施工压力分析, ② 管外光纤监测技术, ③ 压裂示踪技术, ④ 微地震监测技术, 监测暂堵转向压裂施工过程中的压力响应以及施工过程中裂缝梯度的变化是最常见的、最经济的判断暂堵有效性的方法之一[11] [12]。

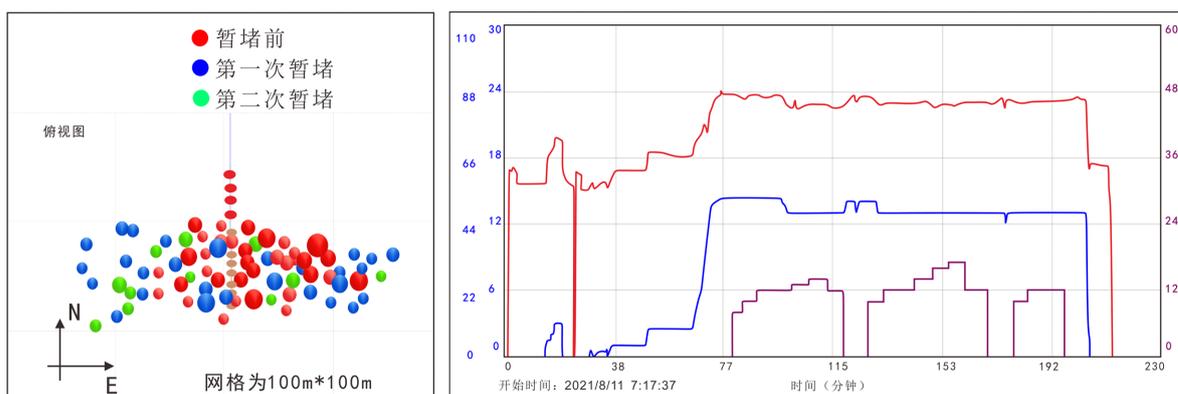


Figure 2. Distribution of events before and after temporary plugging and fracturing operation curve  
图 2. 暂堵前后事件分布及压裂施工曲线图

WY34-1HF 井第 2 段暂堵前后事件分布如图 2 所示。红色为暂堵前发生的事件, 蓝色为第一次暂堵后的事件, 绿色为第二次暂堵后的事件。WY34-1HF 井第 2 段压裂过程中, 事件在井筒两侧交替出现, 第一次暂堵前事件在井筒两侧交替出现, 东西两侧缝长相近, 西侧破裂范围较东侧更广。

暂堵后微地震监测到的事件个数明显增加, 第一次暂堵后, 在东西两侧在已破裂区域出现新的破裂, 同时两侧破裂区域外延明显。第二次暂堵, 事件在井筒两侧交替出现, 在已破裂区域出现新的破裂, 东侧破裂范围增大。暂堵后的裂缝长度、宽度、高度均有所增长, 暂堵效果明显。暂堵工艺提高了改造的范围及缝网的复杂程度[13]。

### 3.4. 天然缝发育情况分析

天然裂缝既是油气资源良好的储渗空间, 也是影响水力裂缝扩展的重要因素。通过地质工程一体化研究思路, 研究天然裂缝对压裂施工及效果的影响, 充分利用天然裂缝的有利属性提高压裂设计方案的针对性及改造效果, 尽可能降低天然裂缝对压裂设计执行率及效果的负面影响, 具有重要的理论意义与现实意义[14]。

在压裂过程中，井下地应力状态被发生变化，即水力压裂活动改变了天然裂缝的应力状态，井下天然裂缝或断层被重新激活，在天然裂缝活动的传导作用下，在压裂液无法到达的、远离作业井段部位产生破裂而形成新的“诱发破裂裂缝”，这种由天然裂缝“诱发破裂裂缝”产生的波能量同水力压裂裂缝形成的微地震事件一同被记录下来[15]。

压裂期间，水力能量难以突破大尺度天然裂缝约束，当水力裂缝扩展过程中遇到大尺度天然裂缝后，多被大尺度天然裂缝捕获。因此，微地震监测事件点多沿天然裂缝展布方位聚集，而在垂直于天然裂缝方向上事件点较少。实践表明，大尺度天然裂缝与井筒、地层最小水平主应力方向的夹角大小是影响压裂施工的重要因素，实际井筒方位多沿地层最小水平主应力方向设计，因此重点分析大尺度天然裂缝与井筒夹角大小对压裂施工的影响。

天然裂缝在微地震监测过程中，主要特征表现为，在天然裂缝发育区域，微地震事件密集出现，通过与地震资料相结合，可以很好地进行天然裂缝识别。一般情况下，主要是基于微地震 - 蚂蚁体追踪、基于微地震 - 曲率追踪、基于微地震 - 相关属性等方法进行，通过将微地震响应的事件点投影在相关地震属性剖面图上，综合评判天然裂缝的发育情况。

由于理论基础不同，微地震事件点响应和地震蚂蚁体等地震属性剖面并不存在严格对应关系，实践中采用的是结合多种资料进行综合评定。通常微地震事件集中在某一区域出现，且密集事件位置与蚂蚁体、曲率、相关属性在剖面上较吻合，表明该区域发育天然裂缝。

WY46 平台微地震监测成果(图 3)显示该平台共监测到三簇微地震事件密集区(红色圈线所示)，微地震事件集中处方向大致为西偏北 75°；从蚂蚁体上看，两条天然裂缝与蚂蚁体的吻合性比较好，证明平台区域天然裂缝相对发育。

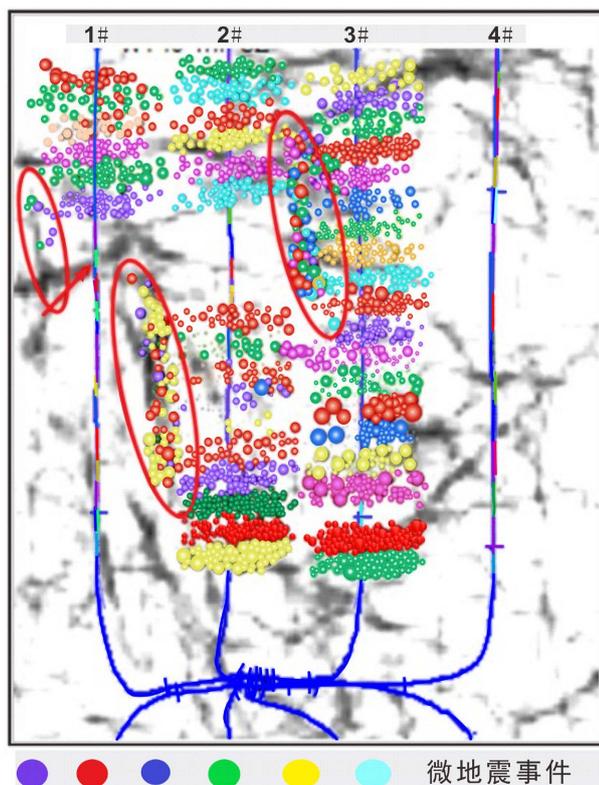


Figure 3. Identification of natural fractures based on micro-seismic-ant colony system  
图 3. 基于微地震 - 蚂蚁体的天然缝识别

压裂参数显示天然裂缝附件微地震事件在停泵后仍然有持续的响应,只是在微地震信号上表现为响应的频率变慢。研究表明,天然裂缝发育层段,在停泵后持续监测 12 小时,仍然监测到一些强能量的事件,强能量事件点所在的位置就处在天然缝带上。WY46 平台在停泵后,天然裂缝发育处仍然能够监测到部分微地震响应事件,表明该时间信号为非压裂产生。判断为应力失衡后天然裂缝被激活所产生。

微地震监测表明:威荣气田深层页岩储层压裂过程中地震事件发育,压裂波及体积大,暂堵效果较好,造成产能不及预期的原因可能与工区天然缝发育相关,研究表明大型天然缝的发育在压裂中会产生砂堵效应,从而影响压裂效果。

#### 4. 结论

(1) 威荣气田微地震监测资料现场解释能够提供压裂缝网的空间几何参数扩展及动态变化情况,可实时指导压裂施工;

(2) 压后资料精细解释可获取压裂缝网的展布特征、计算压裂体积,并进行暂堵效果分析;

(3) 基于微地震 - 蚂蚁体追踪、基于微地震 - 曲率追踪、基于微地震 - 相关属性等方法可综合评判天然裂缝的发育情况;

(4) 监测结果可为威荣气田深层页岩储层压裂施工效果综合评估、后续压裂设计调整、开发方案优化等工作提供技术参考。

#### 参考文献

- [1] 董国福,翟军,邹立双,等. 微地震裂缝监测技术及其进展[J]. 华北科技学院学报, 10(2): 22-28.
- [2] 姜福兴. 压裂裂缝地面微地震监测技术[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(1): 26-28.
- [3] 姜秀娣,魏修成,黄捍东,等. 井下微地震裂缝监测设计及压裂效果评价[J]. 石油地球物理学报, 2016, 40(5): 585-591.
- [4] 刘建中,冯涛,员增荣,等. 油气田开发中微地震监测技术的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 23(14): 2409-2412.
- [5] 陆菜平,窦林名,吴兴荣,等. 岩体微震监测的频谱分析与信号识别[J]. 岩土工程学报, 2018, 27(7): 772-775.
- [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.
- [7] 苗小虎,姜福兴,王存文,等. 用微地震技术评价姬塬油田体积压裂的效果[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 971-976.
- [8] 平健,李仕雄,陈虹燕,等. 微震定位原理与实现[J]. 金属矿山, 2010(1): 167-169.
- [9] 宋维琪,王新强,高艳可. 井下微地震监测技术在页岩气“井工厂”压裂中的应用[J]. 石油物探, 2012, 51(6): 606-612, 632.
- [10] 吴顺川,周喻,高斌. 微地震监测技术在暂堵压裂工艺中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 4082-4088.
- [11] 徐文杰,胡瑞林,王艳萍. 水平井分段压裂井下微地震裂缝监测技术应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 358-362.
- [12] 张小东,张鹏,刘浩,等. 油气井压裂微地震裂缝监测技术研究与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 573-579.
- [13] 周婕,何平,等. 微地震裂缝监测系统在鄯善油田的应用[J]. 油气井测试, 2005, 14(6): 62-64.
- [14] 高敬文,等. 分段压裂与微地震裂缝监测技术工艺标准研究[J]. 油气井测试, 2005, 14(6): 62-64.
- [15] 王伟涛,倪四道,王宝善. 涪陵页岩气田压裂曲线形态分类及微地震响应特征分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 503-512.