

doi: 10.11720/wtyht.2023.1089

胡志方, 罗卫锋, 王胜建, 等. 广域电磁法在安页 2 井压裂监测应用探索[J]. 物探与化探, 2023, 47(3): 718-725. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1089>

Hu Z F, Luo W F, Wang S J, et al. Application of wide field electromagnetic method in the fracturing monitoring of well Anye-2[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 718-725. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1089>

# 广域电磁法在安页 2 井压裂监测应用探索

胡志方<sup>1</sup>, 罗卫锋<sup>1</sup>, 王胜建<sup>1</sup>, 康海霞<sup>1</sup>, 周惠<sup>1</sup>, 张云泉<sup>1</sup>, 詹少全<sup>2</sup>

(1. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 江苏省有色金属华东地质勘查局八一四队, 江苏 镇江 212005)

**摘要:** 为了评价安页 2 井两水平井压裂效果, 采用广域电磁法压裂监测技术, 探索压裂监测测网布设、采集和数据处理。通过对压裂前、压裂中和压裂后的监测数据开展定性半定量差分分析, 初步判断压裂缝延伸方向, 半定量计算缝长和缝高等参数。每个压裂段通过深度约束精细反演差分定量确定缝高和缝长等参数, 压裂监测显示两水平井缝长在 100~125 m, 缝高在 20~25 m。通过评价每段压裂效果指导压裂生产, 以上段压裂成果指导下段压裂, 最终对整个压裂段效果进行评价。广域电磁法在预测压裂的液波及方向和范围(缝长等)方面, 取得良好的应用效果。

**关键词:** 广域电磁法; 安页 2 井; 压裂监测

**中图分类号:** P631.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2023)03-0718-08

## 0 引言

随着水平井钻井技术和分段压裂技术的进步和规模应用, 页岩气的勘探开发技术相对成熟, 水力压裂是页岩气藏增产、增注的一项重要措施。在水力压裂及后续开发过程中, 能够准确监测压裂裂缝形态及体积是后续开发的重要保障。水平井分段压裂已成为页岩气有效开发的关键技术, 可以有效改造储层, 获得工业气流, 是改造页岩气藏的必备环节。页岩气藏常被称为“人造气藏”, 勘探开发通常需要水平井钻井技术和水力压裂技术改造储层, 形成人造裂缝网络才能形成工业生产能力。压裂效果的好坏直接影响最终的产能大小, 编制区块开发方案和提高产能都需要对压裂效果有足够清晰的认识。

目前, 水力裂缝的监测方法主要有井下微地震、测斜仪、分布式声传感和可控源电磁法等<sup>[1]</sup>, 已被广泛应用于现场。广域电磁法广泛应用于页岩气勘探<sup>[2-6]</sup>, 但在压裂监测方面尚在探索阶段, 与之配套

的实时数据处理等监测技术却尚在起步阶段, 理论方法研究仍有很多问题等待攻克, 实际应用技术经验急需总结。本文以安页 2 井两水平井互压以广域电磁法监测的项目为例, 对压裂作业进行了实时处理解释, 压裂效果评价、压裂参数确定等工作, 旨在进一步总结广域电磁法监测技术, 完善、优化该技术, 使其推广应用。

## 1 安页 2 井概况

安页 2 井位于贵州省遵义市正安县安场镇安场向斜西翼, 两水平井(右井、左井)平行相距 300 m(图 1), 两水平井长约 1 500 m, 垂深 2 121.3 m, 主要目的层为志留系下统龙马溪组下部高伽马页岩段, 通过压裂获取 2 套目的层页岩气的真实产能, 进一步落实安场向斜的天然气管道开发潜力。因压裂监测区位于安场镇集市区, 住房、商场等分布较为密集, 部分区域无法布极形成空点。

地表出露地层为三叠系下统夜郎组, 自上而下

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2023-01-03

基金项目: 国家科技重大专项项目“正安、宜昌地区海相页岩气勘查评价应用试验”(2016ZX050340034)

第一作者: 胡志方(1966-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事石油地质综合研究工作。Email: yjzshzf@163.com

通讯作者: 詹少全(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事物探数据处理与综合研究工作。Email: 1150600969@qq.com

钻遇三叠系下统夜郎组;二叠系上统合山组、中统茅口组、栖霞组、下统梁山组;志留系下统韩家店组、石牛栏组、新滩组、龙马溪组,地层层序正常,无断层。

### 1.1 地应力方向

对正安地区4口页岩气井地应力方向进行了统计分析,安页2井解释新滩组—五峰组地层各向异性较弱,方向 $116^{\circ}48'$ ;安页3井解释龙马溪组地层各向异性较弱,方向 $103^{\circ}54'$ 。安页1井成像测井资料显示井段2 270~2 311 m井眼崩落,方位为NNE—SSW向,代表最小水平主应力方向为NNE—SSW向,即最大水平主应力方向为SEE—NWW向,与诱导缝分析结果一致。安页4井导眼井成像测井解释,诱导缝主要发育在2 440~2 560 m井段,倾向为NNW向,倾角 $38^{\circ}\sim 88^{\circ}$ 为主,走向为NEE—SWW向。综合分析认为正安地区现今最大主应力方向为近EW向。

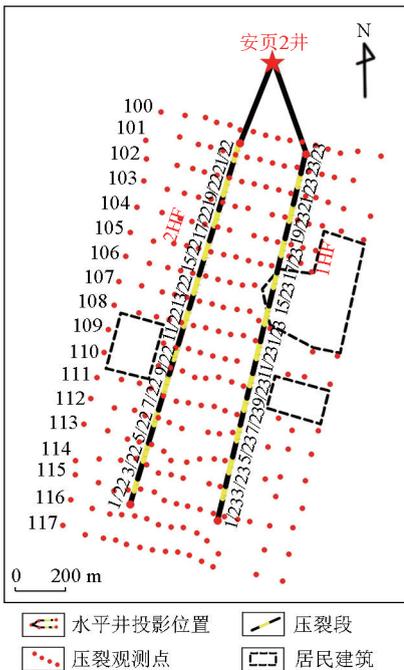


图1 广域电磁法压裂监测实际材料  
Fig. 1 Actual material of wide field electromagnetic fracturing monitoring

### 1.2 孔参与微裂缝发育特征

龙马溪组脉冲法有效孔隙度介于 $0.67\%\sim 1.76\%$ ,平均 $1.27\%$ ,有效孔隙度在 $1\%\sim 1.5\%$ 为主要分布区间,渗透率 $0.0049\sim 0.6912$  mD,平均 $0.1528$  mD,渗透率以 $0\sim 0.01$  mD区间为主,占总体的 $58.2\%$ 。龙马溪组核磁共振孔隙度测试样品3个孔隙度最低 $3.92\%$ ,最高 $7.618\%$ ,平均 $4.36\%$ ,有效孔隙度与渗透率呈半对数线性趋势。

通过对安页2井导眼井岩心观察:岩心总长 $38.35$  m,裂缝共计发育122条,缝密度 $4.90$ 条/m,

平缝较为发育,缝长 $3.0\sim 31.4$  cm,缝宽 $0.10\sim 0.60$  mm,多数未充填,其次为全充填及半充填。说明目标层五峰—龙马溪组裂缝发育,渗透率较好,通过压裂液的输入可以降低目标层的电阻率引起地球物理异常的响应,具备了广域电磁法监测的地球物理前提条件。

## 2 广域压裂监测基本原理

储层压裂改造是页岩气等油气开发利用的关键环节,实施压裂改造措施后,需要有效的监测方法来确定压裂作业效果,以获取压裂裂缝导流能力、几何形态、复杂性及其方位等诸多信息,来改善油气藏压裂增产作业效果及气井产能,帮助提高采收率。广域电磁法三维观测系统适用于精细勘探<sup>[6]</sup>,能取得地下三维地质信息,适合浅地表到深至 $10$  km高分辨率勘探需求,开展压裂三维广域电磁法储层压裂监测应用研究,进一步帮助用户解决开发井加密、压裂效果评价等问题,提高采收率。

### 2.1 基本原理

广域电磁法属于人工源电磁法,发射功率大,创新的广域视电阻率计算,所谓“广域”,在包括远区,也包括非远区的广大地区进行测量,把电磁测深的观测范围扩大到包括非远区的广大区域,其算法是直接由电偶源全区精确公式出发<sup>[5]</sup>,提出了全区公式计算视电阻率:

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)}, \quad (1)$$

式中:  $K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN}$ ;  $\Delta V_{MN} = E \cdot MN$ ;  $K$  为波数;  $I$  为偶极子源电流强度;  $MN$  为测量电极间距离,  $dL$  为偶极距。式(1)构成了广域电磁法全区视电阻率的计算基础。采用积分方程、谱方法和有限元相结合,研发出一种新的高效、高精度数值模拟技术。通过压裂前、压裂中和压裂后的3次数据采集,经过定性曲线对比分析、频率电阻率差分分析和反演差分定量分析确定压裂缝的几何形态,评价压裂效果。

### 2.2 压裂监测采集系统

压裂监测面积一般为 $1\sim 2$  km<sup>2</sup>,为了有效动态监测压裂效果采取三维观测方式(图1),网度 $100$  m $\times 50$  m,为了保证信号强度,收发距设为 $8$  km。由于压裂监测方法的特殊性,每段压裂监测要完成压裂前、压裂中和压裂后的3次数据采集<sup>[7-10]</sup>,采集条件基本不变,电流与接地电阻变化大小一般不超过 $10\%$ ,即发射源位置不变、发射电流大小一致、发射

接地电阻一致、接收电极位置不变、接收电极接地电阻一致,为开展对比分析和差分处理提供条件。

### 2.3 差分处理技术

获取监测点在压裂前后的电场信号,根据不同频率电磁波激励信号对应的电流强度对压裂后电场信号归一化,并以压裂前所测的电场信号为基准,对压裂施工期间不同时间监测到的电场信号进行差分计算,得到各个监测点的残差电场,用差分电场绘制频率—差分电场曲线,利用各监测点差分电场曲线分析缝网分布。

利用压裂前后各监测点的电位差数据,计算出差分电场,公式如下:

$$dE_{if_t} = E_{if_t} - E_{if_{t_0}} = \frac{\frac{\Delta v_{if_t}}{I_{if_t}} - \frac{\Delta v_{if_{t_0}}}{I_{if_{t_0}}}}{MN}, \quad (2)$$

式中: $i$  表示监测点位置; $f$  表示频率; $MN$  表示监测点接收长度; $t_0$  表示压裂前时刻, $t$  表示压裂后时刻。

基于所述差分电场得到频率—差分电场关系,对所述频率—差分电场关系中的负异常或正异常进行积分处理,得到电场差分值。

用差分电场绘制频率—差分电场,利用各监测点频率—差分电场曲线分析推断每段的压裂裂缝范围。对频率—差分电场曲线中的负异常进行积分,形成评价单点压裂效果的参数—电场差分值。

计算电场差分值或差分电阻率公式如下:

$$\rho_{it} = \int_{f_1}^{f_n} (E_{if_t} - E_{if_{t_0}}) \cdot df, \quad (3)$$

式(3)表示压裂过程中第  $i$  个监测点  $t$  时刻的电场(电阻率)差分值。

利用压裂段每个监测点的电场(反演电阻率)差分绘制平面等值线图,可推断压裂裂缝分布。

### 2.4 深度约束反演技术

近年来,随着计算机技术的发展,电磁反演方法得到了飞速发展,取得了长足进步,由线性反演发展到非线性反演,反演精度和速度大大提高。压裂监测反演具备 3 个有利条件:第一,压裂段钻井资料详细,能取得详细的地质资料,电阻率、压裂改造储层的厚度已知;第二,压裂段深度确定;第三,压裂地区地层、电阻率已知,能确定压裂段响应中心频率。这些有利条件为实现针对某一目标深度范围内的 2D 约束精细反演成像提供了可能。

用已知地质资料或钻孔电阻率信息作为约束反演的初始模型,开展深度约束反演。在目标深度范围内,结合初始模型给定目标深度的顶界面和底界面或电阻率的变化范围,为下一步约束反演作准备,

缩小搜索范围,避免在反演过程中陷入局部极小,使得迭代无法收敛。针对已知深度对应的中心频率段对应的某一深度范围的目标层加密空间网格剖分,适当稀疏目标深度范围以外的空间网格,通过重点拟合目标深度范围对应的中心频率频段的频率—视电阻率曲线细节变化,得到该深度范围内的精细电性结构,进而提升电磁法对深部较小目标层位的分辨率<sup>[11-14]</sup>。

## 3 压裂监测数据处理

### 3.1 数据处理流程

广域电磁法压裂监测数据处理与广域电磁法常规数据处理有共性也有异性,一般分为数据质量评价、数据预处理、半定量计算和精细定量计算 4 个阶段(图 2),数据质量评价主要是对数据可以利用情况和程度进行评价,特别是对压裂前的每个测点的数据干扰情况、地质情况进行充分的掌握,为数据处理与分析提供背景资料;数据预处理主要是去噪和静态校正处理;对比分析主要是压裂前后曲线对比分析和压裂前后频率—电阻率断面的对比分析,差分分析为主要手段,定性判断压裂延伸方向,初步半定量判断评价压裂效果;精细定量计算主要是指通过目标层深度段精细反演确定压裂缝高和缝长等几何参数,为计算改造体积提供依据。

### 3.2 定性与半定量解释

为了定性分析压裂效果,对压裂前后曲线对比

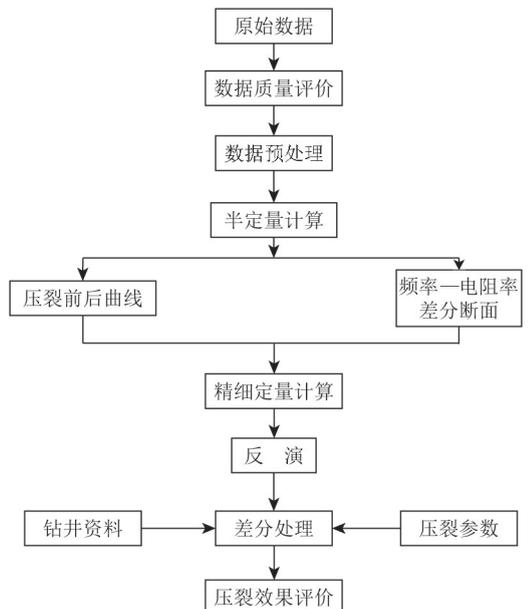


图 2 广域电磁法压裂监测数据处理流程

Fig. 2 Data processing flow chart of wide field electromagnetic fracturing monitoring

(图 3)和压裂前后频率电阻率差分断面(图 4)进行分析,如果该测点压裂前后曲线基本重合且形态一致,说明该测点未检测到压裂缝的变化,该点地下地质体未发生明显变化,压裂缝(液)未影响该区域;如果压裂段对应的频率段,压裂后的曲线低于压裂前的曲线,说明该点检测到了压裂的影响,压裂液的低阻引起了压裂后曲线凹的变化,可以定性判断压裂效果和压裂液延伸的方向。

频率视电阻率差分断面发现以 10 Hz 为中心在 102~106 号点和 109~112 号点存在明显的负异常,

频率范围大体在 100~0.5 Hz,但最强的地方是 10 Hz,说明压裂影响的频率是以 10 Hz 为中心的一段频率,因为电磁法的体积效应,影响多个频率,低频对压裂目标层也有弱反应,根据图 4 断面可以半定量的分析压裂效果,通过某阈值大体圈定压裂缝的范围。

该阈值的确定采用观测精度(测量随机误差)和异常置信度统计规律来确定,本次采用 4  $\mu\text{V}$  作为异常阈值。

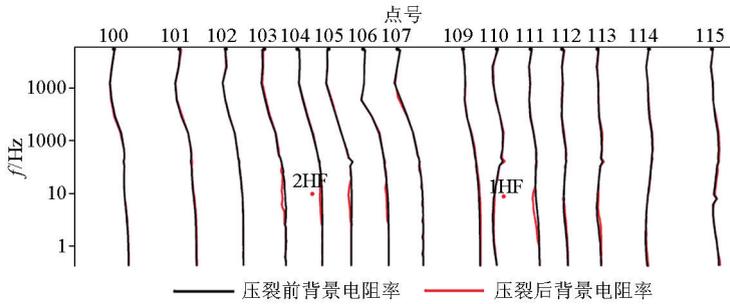


图 3 某压裂段压裂前后曲线对比

Fig. 3 Comparison of curves before and after fracturing in a fracturing section

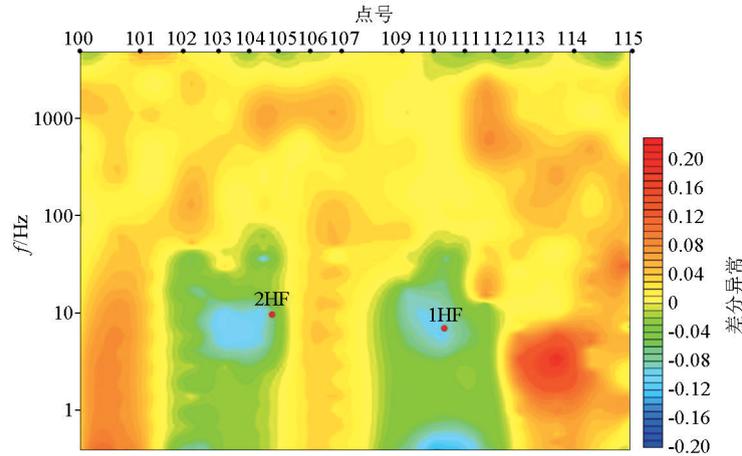


图 4 某压裂段频率视电阻率差分断面

Fig. 4 Frequency apparent resistivity difference section of a fracturing section

### 3.3 定量解释

为了精确确定压裂参数(缝高、缝长)必须经过精细反演。压裂监测在反演上有 3 个有利条件:第一是压裂段的具体位置已知,即深度已知;第二是压裂段的厚度(储层厚度)已知;第三是压裂段响应的中心频率已知。在反演过程中把压裂液波及体积当作椭球体,椭球体的长宽高就是压裂液波及(裂缝)的长宽高。为此我们对已知深度进行精细剖分,精确计算已知频率段的响应来反演。采用这样的技术思路,先对压裂前采集的数据进行反演,取得该压裂段压裂前反演电阻率断面(图 5),作为背景场摸清

压裂段压裂深度的电阻率情况;然后对压裂后采集的数据进行反演,取得该压裂段压裂后反演电阻率断面(图 6);最后对压裂前后的数据进行差分处理精确计算压裂参数。

图 7 为差分反演电阻率异常断面,在水平 2 井和水平 1 井处存在明显的负异常,为了定量计算压裂的几何参数,以 -0.09 为阈值可以圈定压裂的缝高与缝长等几何参数(红色)。该压裂段水平 1 井缝长 100 m,缝高 36 m;水平 2 井缝长 120 m,缝高 55 m。

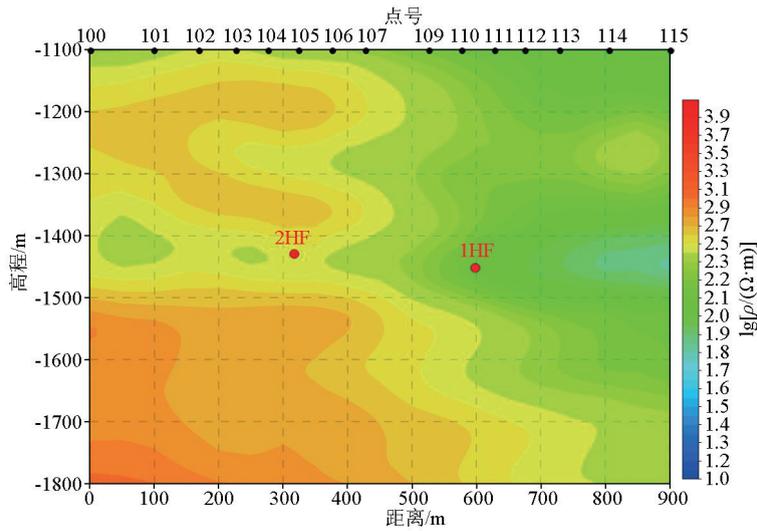


图 5 某压裂段压裂前电阻率反演断面

Fig. 5 Resistivity inversion section of a fracturing section before fracturing

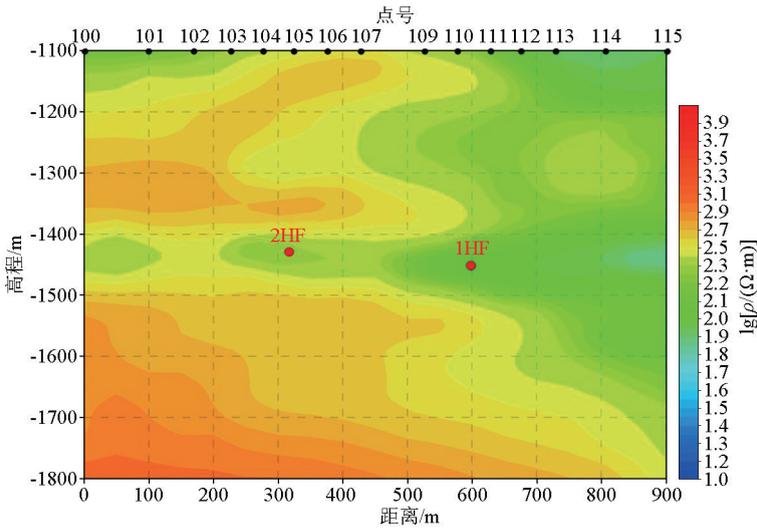


图 6 某压裂段压裂后电阻率反演断面

Fig. 6 Resistivity inversion section of a fracturing section after fracturing

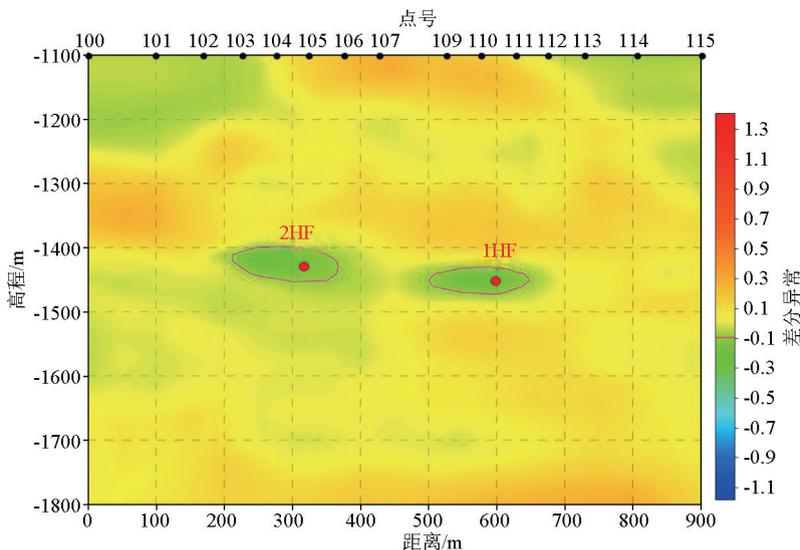


图 7 某压裂段电阻率反演差分

Fig. 7 Resistivity inversion difference of a fracturing section

### 4 压裂监测效果分析

通过压裂前后电性异常的差分处理结合用液等情况可以评价压裂效果,为后期水平井部署提供参考。压裂效果评价是一个综合因素,从监测效果上来说如果压裂液波及的面积(体积)大,说明压裂缝规模大,压裂效果好;如果压裂液进入达到了设计量,而砂未达到设计量,压裂改造效果不一定好。液量和砂量 2 个指标,砂量指标为首先考虑指标,因为砂对缝起支撑作用;在压裂过程中希望通过压裂液等工艺的设计达到复杂缝改造作用,形成缝网达到均匀改造效果。从平面上看,单位用液量(砂量)的增加,其缝长整体上呈增加趋势,两者具一定的正相关性(图 8),在安页 2 左井 110 线以北,趋势更加明显。裂缝 NWW 向延伸长度明显大于 NE 向的延伸,反映了压裂液的运移方向以 NWW 向为主;压裂

改造后的裂缝集中长度在 80~120 m。

根据压裂后的地层改造情况,包括形成的缝高、缝长等特征,对本次压裂作业及监测效果作出评价:

一类区:压裂作业改造均匀,改造规模大,改造后形成的缝长普遍大于 100 m,缝高大都在 50 m 以上。安页 2 右井共划分一类区 10 段;安页 2 左井共划分一类区 17 段。

二类区:压裂作业改造较均匀,改造规模较大,改造后形成的缝长普遍大于 80 m,缝高大都在 50 m 以上。安页 2 右井共划分二类区 4 段;安页 2 左井共划分二类区 3 段。

三类区:压裂作业改造不均匀或改造规模小,改造后形成的缝长小于 80 m,缝高小于 50 m。安页 2 右井共划分三类区 6 段;安页 2 左井共划分三类区 2 段。

安页 2 右井 9/23、10/23、11/23 段因受空点等的影响,没能监测到真实的异常变化情况,未作出相应的评价。

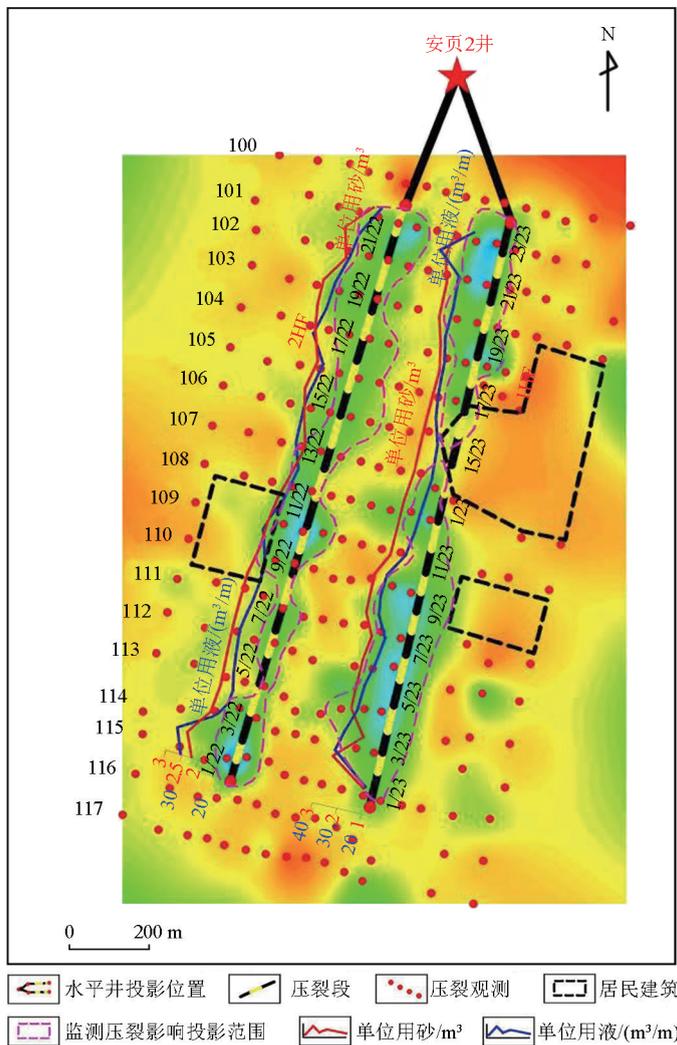


图 8 安页 2 井压裂监测综合成果

Fig. 8 Comprehensive results of fracturing monitoring of well Anye-2

## 5 结论

通过对安页 2 井互压式两水平井开展广域电磁法压裂监测,取得了缝高、缝长等压裂成果参数,对压裂效果作出了评价,同时指导压裂生产,总结认为:

1) 压裂监测受压裂进度控制,压裂的数据采集具有快速和高效性。前期现场踏勘工作必须完成每个测点的踏勘,包括干扰位置、发射场源、地形和交通等条件,详细掌握每个测点的干扰和地质等情况,为异常分析提供基础资料;

2) 采集方式上,保持发射和接收电极条件基本不变、保证前后测量条件的一致性。在压裂前、压裂中和压裂后监测过程中保持场源位置及接地条件不变,接收端接收  $MN$  极位置不变,发射与接收的接地电阻变化不超过 10%。当测线离开压裂段一定距离时测点引起的响应低于仪器测量精度,认为该点无法测量到压裂液引起的异常信息,属于无异常,可以采用各压裂段滚动观测,提供施工效益降低成本;

3) 压裂前背景场的采集数据为差分分析基础资料,在采集完背景场数据后,必须进行每个测点的干扰情况及地质等研究分析,发现曲线形态变化或不连续应详细分析原因,并做好备注,资料采集误差小于 5%,为高精度反演提供资料基础;

4) 数据处理上,通过曲线对比分析和频率视电阻率差分分析等定性判断压裂液的运动方向,半定量认识缝高与缝长等,初步评价压裂效果,指导压裂工作;

5) 通过已知频率、深度和规模的精细深度约束反演差分计算,定量计算缝高和缝长等压裂成果参数,参考压裂单位液量、停泵压力和砂量的变化综合解释,完成压裂评价工作。

## 参考文献 (References):

- [1] 肖艳丽,李明星. 压裂监测技术应用现状研究[J]. 石化技术, 2019, 26(7): 74-76.  
Xiao Y L, Li M X. Research on application status of fracturing monitoring technology[J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(7): 74-76.
- [2] 詹少全,丁梅花,李爱勇,等. 贵州碳酸盐岩山区广域电磁法勘探应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 88-92.  
Zhan S Q, Ding M H, Li A Y, et al. The application of wide field electromagnetic sounding method to exploration in carbonatite mountain areas of Guizhou Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 88-92.
- [3] 詹少全,李爱勇,王导丽,等. 极寒环境中广域电磁法勘探技术

研究[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1019-1024.

Zhan S Q, Li A Y, Wang D L, et al. A study of wide field electromagnetic method under extremely cold conditions[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1019-1024.

- [4] 赵福海,王导丽,张明鹏,等. 松辽盆地北部石炭—二叠系底埋深综合物探预测技术[J]. 矿产与地质, 2018, 32(1): 116-121.  
Zhao F H, Wang D L, Zhang M P, et al. The comprehensive geophysical prediction technique of the bottom buried depth of Carboniferous-Permian in the northern Songliao Basin [J]. Mineral Resources and Geology, 2018, 32(1): 116-121.
- [5] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.  
He J S. Wide field electromagnetic sounding methods and pseudo-random signal coding electrical method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [6] 何继善. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(3): 1065-1072.  
He J S. Wide field electromagnetic sounding methods[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1065-1072.
- [7] 王志刚,张林,许健华,等. 时频电磁技术在水力压裂监测中的应用[C]//北京: CPS/SEG 北京 2018 国际地球物理会议, 2018: 1286-1290.  
Wang Z G, Zhang L, Xu J H, et al. The use of time-frequency domain electromagnetic (TFEM) technique to monitor hydraulic fracturing[C]//Beijing: CPS/SEG Beijing 2018 International Geophysical Conference, 2018: 1286-1290.
- [8] 刘子雄,常青铨,李新发,等. 基于裂缝监测的致密储层压裂裂缝走向预测[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(6): 846-854.  
Liu Z X, Chang Q X, Li X F, et al. Fracturing direction prediction based on fracturing monitoring of tight gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(6): 846-854.
- [9] 周东平,李栋,刘元雪,等. 煤矿井下水力压裂有效范围监测技术研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(10): 167-169.  
Zhou D P, Li D, Liu Y X, et al. Study on effective range of hydraulic fracturing in underground coal mine [J]. Coal Technology, 2018, 37(10): 167-169.
- [10] 郭鹏,呼赞同,贾金赞,等. 微破裂向量扫描在丰探 15 井压裂微震实时监测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(4): 1370-1378.  
Gou P, Hu Z T, Jia J Y, et al. Application to the hydraulic fracture of well FT15 by real-time monitoring using vector processing for microseismic[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(4): 1370-1378.
- [11] 何展翔,胡祖志,王志刚,等. 时频电磁 (TFEM) 技术: 数据联合约束反演[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(4): 898-905.  
He Z X, Hu Z Z, Wang Z G, et al. Time frequency electro magnetic (TFEM) method: Data joint constrained inversion [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(4): 898-905.
- [12] 何展翔,杨国世,陈思琪,等. 时频电磁 (TFEM) 技术: 数据采集参数设计[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(4): 908-914.  
He Z X, Yang G S, Chen S Q, et al. Time frequency electro magnetic (TFEM) method: Data acquisition design[J]. Oil Geophysi-

cal Prospecting, 2019, 54(4):908-914.

- [13] 何展翔,陈忠昌,任文静,等.时频电磁(TFEM)勘探技术:数据采集系统[J].石油地球物理勘探,2020,55(5):1131-1138.  
He Z X, Chen Z C, Ren W J, et al. Time frequency electro magnetic(TFEM) method: Data acquisition system [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(5): 1131-1138.

- [14] 李金朋,范红波,刘利,等.多参数约束磁性体三维形态反演[J].石油地球物理勘探,2021,56(2):407-418.  
Li J P, Fan H B, Liu L, et al. Three dimensional shape inversion of multi parameter constrained magnetic body [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(2):407-418.

## Application of wide field electromagnetic method in the fracturing monitoring of well Anye-2

HU Zhi-Fang<sup>1</sup>, LUO Wei-Feng<sup>1</sup>, WANG Sheng-Jian<sup>1</sup>, KANG Hai-Xia<sup>1</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>,  
ZHANG Yun-Xiao<sup>1</sup>, ZHAN Shao-Quan<sup>2</sup>

(1. Oil and Gas Resources Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. No. 814 Geological Team of East China Non-ferrous Metals Geological Exploration Bureau of Jiangsu Province, Zhenjiang 212005, China)

**Abstract:** To evaluate the fracturing performance of two horizontal wells of well Anye-2, this study explored the layout of the fracturing monitoring network and data acquisition and processing using the fracturing monitoring technique combined with the wide field electromagnetic method. Through the qualitative and semi-quantitative difference analysis of the pre-, in-, and post-fracturing monitoring data, this study preliminarily determined the propagation direction of induced fractures and semi-quantitatively calculated the parameters such as fracture length and height. For each fracturing interval, the parameters such as fracture height and length were quantitatively determined through fine-scale inversion with depth as constraints and difference calculation. The fracturing monitoring results show that the fractures at two horizontal wells had lengths of 100~125 m and heights of 20~25 m. The fracturing production was guided by evaluating the fracturing performance of each fracturing interval. The fracturing results of the previous interval were used to guide the fracturing of the subsequent interval. Finally, the fracturing performance of all fracturing intervals was evaluated. The application results show that the wide field electromagnetic method can effectively predict the spread direction and range (e. g., fracture length) of fracturing fluids, achieving encouraging performance.

**Key words:** wide field electromagnetic method; well Anye-2; fracturing monitoring

(本文编辑:叶佩)