

页岩压裂过程的连续时域电磁法动态监测试验//Continuous TDEM for monitoring shale hydraulic fracturing, Yan Liang-Jun, Chen Xiao-Xiong, Tang Hao, Xie Xing-Bing, Zhou Lei, Wang Zhong-Xing, and Hu Wen-Bao, APPLIED GEOPHYSICS, 2018, 15(1), P26-34. DOI:10.1007/s11770-018-0661-1

页岩压裂过程的连续时域电磁法动态监测试验*

严良俊¹, 陈孝雄², 唐浩³, 谢兴兵¹, 周磊¹, 王中兴⁴, 胡文宝¹

(1. 湖北省非常规油气协同创新中心(长江大学); 2. 中石化石油工程地球物理有限公司江汉分公司; 3. 中国石油川庆钻探地球物理勘探公司; 4. 中国科学院地质与地球物理研究所)

摘要: 页岩气开发水压过程中监测裂缝的空间展布对页岩气稳产高产并指导压裂至关重要。常规的时移地震、井间地震及微震监测不但成本高, 监测效果显示周期长, 且不能直观展示压裂液的平面和空间形态的动态变化。本试验研究首先对压裂液及压裂液充填的岩样进行了电性测试与分析, 发现其具有极低阻与高极化特征, 表明可控源电磁法进行页岩压裂过程的动态监测有着良好的电性基础。其次, 基于试验区井震资料建立的地电模型, 通过改变储层电性进行正演模拟, 研究了电场分量的变化规律, 提出了瞬变电磁法动态监测的归一化残差电阻率成像方法。最后, 以时移电磁长偏移距瞬变电磁阵列法为手段, 在我国南方涪陵页岩开发区水平压裂井上进行了连续时域电磁法动态监测试验。通过参研单位高度协同, 采取了大功率与数百道阵列观测方式, 获取了埋深在 2800 米处三个压裂段上方地面 224 个物理点近 9 个小时的电场时间序列数据。处理结果表明, 该方法能有效观测到压裂液引起的电场信号变化。通过残差处理与电阻率成像, 获取了储层改造过程的动态图像, 结合地震、测井与水平井位的标定, 解释了压裂液平面和空间展布, 其结果对页岩气有效压裂与安全开采有重要指导意义, 展示出连续时域电磁法在页岩气开发的压裂监测中有着广阔的应用前景。

关键词: 页岩压裂, 电阻率, 时移瞬变电磁, 三维成像, 动态监测

引言

分段压裂技术是非常规油气藏开发的核心技术, 其目的是对储层进行改造, 形成有效的人造裂隙区。压裂过程中裂缝的发育程度和模式将直接控制着页岩气的开采量, 压裂效果的好坏直接影响到页岩气井的稳产高产。显然, 监测压裂裂缝区空间展布参数对了解裂缝形态, 分析地层

主应力方向, 评价压裂效果, 指导页岩气有效开发有着重要的指导作用。常规的时移地震、井间地震成像和微地震已应用于油藏动态监测, 并取得了一定的效果(Maxwell, 2012; Albaric, 2014)。然而, 微震的精度受限于两点, 一是速度模型难以准确获得, 从而影响裂缝定位精度; 二是即使定位准确, 但微震无法给出裂缝连通性描述(Hoversten, 2017)。至于地面地震方法, 由于我

收稿日期: 2017-07-13; 修改稿收到日期: 2017-12-14

*基金项目: 本研究由国家自然科学基金项目(编号: U1562109 和 41774082)、国家重点研发计划(编号: 2016ZX05004 和 2016YFC0601104)和中石油科学研究与技术开发项目(编号: 2017D-5006-16)联合资助。

◆通讯作者: 严良俊 (Email: yljemlab@163.com)

© 2018 应用地球物理编辑部, 保留所有版权。

国南方地区灰岩覆盖, 地表及表层地质结构复杂, 地震资料品质较低, 压裂监测效果不尽人意。

众所周知, 在储层岩石注入大量水或压裂液时, 压裂液会沿着微裂流动并不断扩展裂隙, 由于压裂液本身的极低阻特性, 加之流体流动导致的良好连通性, 改造后的储层表现为良好的低电阻率和高极化率特性, 这就奠定了电磁法压裂动态监测的物性基础。电磁勘探新方法新技术的应用可获取压裂过程中流体走向、体积大小变化及连通性等敏感参数, 达到非常规油气藏储层改造中的动态监测之目的。近年来, 随着大地电磁法三维阵列采集技术水平的不断提高, 观测成本不断降低, 施工效率明显增强。与此同时, 三维正反演方法与技术有了长足进步, 使该方法在地热压裂、煤层气开发和油气田开发中的动态监测成为可能 (Peacock, 2012, 2013; Peng, 2012, Abdelfettah, 2016; Rees, 2016; He, 2015)。Weckmann (2003) 等提出了以相位和电阻率张量参数来进行残差处理的时移处理方法, 取得了一定的效果。然而, 对于埋深大于 3000m 的页岩气及煤层气压裂监测, 受资料质量与方法的限制, 目前 MT 法效果并不是十分明显。显然, MT 方法在深部目标的监测中其信噪比难以达到监测前后两次压裂变化的高分辨率能力要求。如何提高电磁方法在动态监测中的分辨能力和可靠性是业内国内外专家的研究热点。与大地电磁法相比, 可控源电磁法具有分辨率高、信噪比强和工作效率高等优势。频域 (如可控源频域电磁法, CSEM; 时频电磁法, TFEM) 与时域 (如长偏移距瞬变电磁法, LOTEM; 多道瞬变电磁法, MTEM) 可控源电磁法已广泛用于油藏动态监测中, 并形成了可控源电磁法动态监测与流体识别方法与技术, 取得了较好的应用效果 (Hu, 2008; Orange, 2009; Hoversten, 2015; Streich, 2016; Xie, 2016; Xu, 2016)。然而, 由于目前可控源频域电磁法受方法和工作频率的限制, 低频大于 0.1Hz, 只能用于 2000m 以内的目标动态监测。而常规

的时域电磁法, 由于功率小, 电磁信号衰减快, 晚期信号较弱, 勘探深度有限。中国南方页岩储层埋深大 (3000m 左右), 页岩压裂储层改造的目标深、体积小, 加之伏盖层又有巨厚的志留系低阻泥岩层屏蔽和灰岩覆盖, 引起的电磁信号变化较弱, 这对可控源电磁法提出了挑战。目前, 用于深部探测的可控源时域电磁法日臻完善, 发射功率可达几百千瓦, 供电电流上百安培, 是常规可控源功率的近 10 倍, 信噪比明显增强。其观测时窗从 1s 至 16s 不等, 有效勘探深度可达 5 至 6 Km, 已广泛用于石油勘探领域, 是南方页岩气压裂电磁法动态监测的最佳选择。

本论文以大功率长偏移距瞬变电磁阵列法为手段, 在中国南方涪陵页岩开发区进行了连续时域电磁法压裂动态监测试验。通过采用我国最大的 200KW 发射系统, 工作电流达 60A 至 70A, 连续记录压裂段前、中、后过程, 每段记录时间大于 3 小时, 获取了埋深在 2800m 处三个压裂段上方地面 224 个物理点近 9 个小时的电场时间序列数据。通过正演模拟与处理, 能有效观测到压裂液引起的电场信号变化。与此同时, 提出了时域残差四维处理方法, 获取了页岩储层压裂改造引起的电性变化灵敏参数, 实现了对压裂液空间分布成像, 初步达到了动态监测的效果。该研究成果展示出连续时域电磁法在页岩气开发的压裂监测中有着广阔的应用前景。

试验区页岩储层及压裂液电性分析

焦石坝试验区页岩气储层电阻率特征

试验区位于重庆焦石坝国家级页岩气开发区。页岩储层为志留系龙马溪组, 厚度近百米, 地质构造与电性结构较为清楚。表 1 是焦页 1 井深侧向测井电阻率统计结果。从中看出, 测井电阻率值与地层及岩性具有很好的对应关系, 且页岩层的电性与围岩差异明显。含气页岩层电阻率值较低, 但相对于泥岩层具有高值。页岩层的泥质含量高, 电阻率反映为低值而富含有机质的页

岩层, 含有导电性较弱的烃类, 在电阻率上曲线上相对泥岩表现为高异常。该地电模型为时域电

磁场模拟提供了重要依据。

表 1 焦页 1 井深测向测井电阻率统计表

地层	岩性	深度范围 (m)	厚度 (m)	电阻率($\Omega\cdot m$)
二叠系长兴组-黄龙组	灰岩	0--1430	1430	>2000
志留系韩家店组-龙马溪组上部	泥岩	1430--2290	860	30-40
志留系龙马溪组上部	砂岩	2290--2330	40	244
志留系龙马溪组下部—五峰组	含气页岩	2330--2410	80	42
奥陶系	灰岩	2410以下		>1000

压裂液及饱含流体页岩的电性特征

在试验区收集了来自于 54 号平台、51-5 水平井的 8, 9 两段压裂的压裂液 (基液为 2% 的氯化钾), 进行了复电阻率测试, 结果如图 1 所示。图中看出, 54 号平台使用的压裂液电阻率幅值随

频率在 $5.5\text{--}6.5\Omega\cdot m$ 间变化, 而 51 号平台使用的压裂液电阻率幅值随频率在 $1.0\Omega\cdot m$ 左右变化。显然均小于含气页岩电阻率一个数量级。从相位结果来看, 在 50 至 500Hz 之间三种压裂液均出现了明显的极小值, 说明压裂液因有支撑剂存在, 有较强的极化特性。

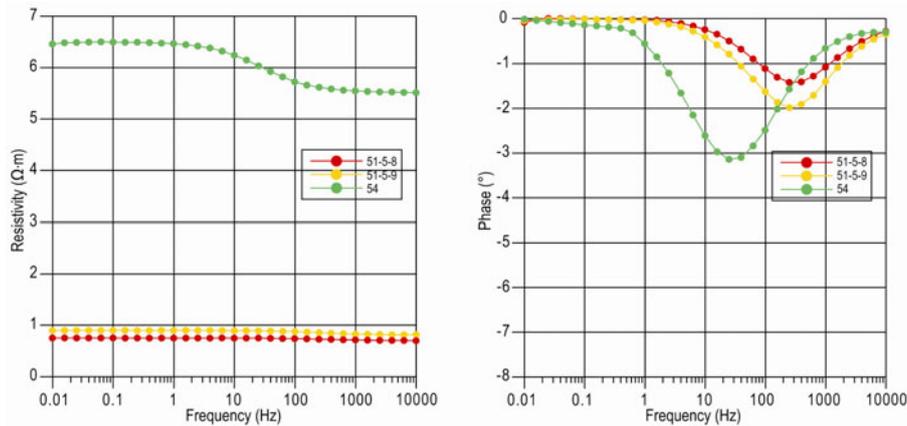


图 1 压裂液电阻率 (左) 与相位曲线 (右)

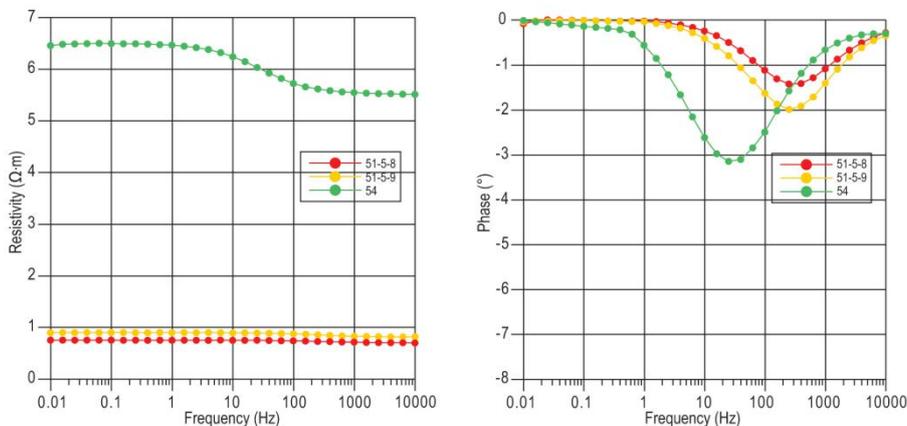


图 2 页岩水饱和与压裂液饱和时复电阻率测试结果 (左: 电阻率, 右: 相位)

与此同时, 我们选取了研究区龙马溪组页岩岩样, 分别在清水与压裂液充填时进行了复电阻率测量, 结果如图 2 所示。图中看出, 压裂液充填时的电阻率比清水饱和时的电阻率明显降低, 且极化率变化明显。这说明与围岩相比, 显然当页岩储层注入压裂液后, 将明显改变电性结构并表现出低阻与高极化特征。

压裂监测的电磁成像与时移处理

时域电磁法电阻率成像

依据 Raiche (1985)、Macnae(1987)等建立的瞬变电磁深度与电阻率成像公式:

$$D_T = K \sqrt{\frac{\rho_a t}{\mu_0}} \quad (1)$$

$$\rho = \mu_0 \left(\frac{d^2 t}{dD_T^2} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中 D_T 是成像深度, 单位为 m; ρ 是反演电阻率, ρ_a 是视电阻率, 单位为 $\Omega \cdot m$, t 是一次关断后的衰减时间, 单位为 s, μ_0 是自由空间中的磁化率, 单位为 H/m。

在进行成像时, 应先进行试验区地电模型与实际观测装置参数条件下正演模拟, 并结合测井资料确定最佳参数 K, 保证深度参数有较高的精度。

时移成像方法

(1) “归一化残差”方法

理论上讲, 当地下页岩储层结构因压裂液注入而发生改变时, 可以观测到电磁场的变化。由于时移观测是在观测装置及参数不变的条件下连续时间序列记录, 可以通过多次叠加形成的多个电场分量衰减曲线的差异分析来研究电性结构的变化。实际数据采集时考虑到供电电流的大小会因多种因素发生变化。为了消除电流波动影

响, 同时突出场值的变化, 我们通过模型正演研究, 提出了“归一化残差”时移资料处理方法。具体步骤为:

基于电场分量的瞬变电磁全区视电阻率定义均匀半空间上电偶极子激发下的瞬变电磁场的变化特征, 对电性源瞬变电磁法数据处理与解释中的视电阻率定义具有重要意义。当源以下阶跃电流波形激发时, 观测点处的水平电场 e_x 时域表达式为 (Yan, 2001):

$$e_x = \frac{\rho \cdot P_E}{2\pi r^3} [\Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} u e^{-u^2/2}] \quad (3)$$

其中: e_x 为与源平行的电场分量, ρ 为均匀半空间的电阻率, P_E 为电偶极距, r 为收发距, t 为观

测时间, $u = \sqrt{\frac{\mu_0}{2\rho t}} r$ 。

式 (3) 不能写出 ρ 的显示表达式, 因而无法用显示表达式来定义视电阻率, 但可通过式 (3) 以数值求根方式定义视电阻率, 即求解如下方程:

$$E_x(t) * 2\pi r^3 - \rho_a \cdot P_E * [\Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} u e^{-u^2/2}] = 0 \quad (4)$$

式中 $E_x(t)$ 为观测的电场分量, ρ_a 为全区视电阻率。

成像电阻率的归一化残差处理

通过观测的电场分量计算压裂前后的全区视电阻曲线, 并进行 (1)、(2) 式电阻率成像。为了突出电阻率的变化, 我们采取了双对数域内对电阻率进行求导的归一化残差处理, 计算公式如下:

$$DF_\rho = 100 \times d | \log \rho_1 - \log \rho_2 | / d \log h \quad (5)$$

其中 ρ_1 是第一次成像电阻率, ρ_2 是第二次成像电阻率, h 是反演深度。

(2) 模型试验效果

基于焦页 1 井深侧向测井结果, 我们按表 1

建立一维电阻率模型, 并根据压裂液的测试结果, 假定压裂前储层的电阻率为 $42\Omega\cdot\text{m}$, 而压裂后电阻率变为 $5\Omega\cdot\text{m}$ 。图3是压裂前后全区视电阻率曲线及归一化残差曲线。图3左图中看出, 当2330米埋深处80米储层电阻率从 $42\Omega\cdot\text{m}$ 变为

$5\Omega\cdot\text{m}$ 后, 视电阻率值在 5ms 至 100ms 间发生了变化。通过归一化处理, 变化率最大的地方得到了体现, 在 30ms 至 40ms 之间, 归一化曲线达到了有效体现储层电阻率变化之目的。

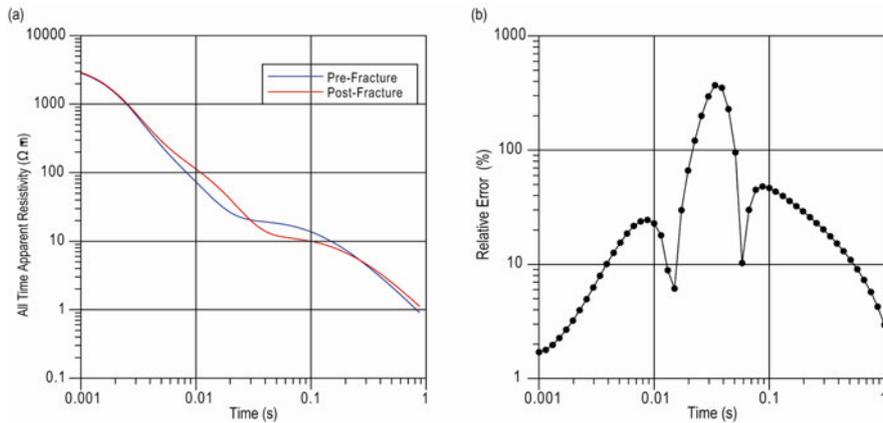


图3 压裂前后场值变化(a)与归一化参数曲线(b)

动态监测试验与资料处理效果分析

时移观测方法与资料采集

长江大学研发的长偏移距瞬变电磁阵列法 (YU Transient Electromagnetic Method, 简称 YUTEM) 是在 LOTEM 方法基础上改进而来 (Strack, 1992; Yan, 2001), 具有大功率、长偏移距、长时窗和阵列观测之特点。该方法野外观测的装置系统包括两大部分: 一是发射系统。它由长接地导线 (AB)、大功率发电机和由 GPS 同步控制的发射机组成; 二是接收系统, 主要由 V8 主机和采集站阵列组成。对于电性源瞬变电磁勘探而言, 由于磁场分量相对于电场分量而言随距离衰减快, 同一观测点处的磁分量信号要小于电场分量, 且南方复杂地质条件及强电磁干扰环境下磁分量受干扰更为严重, 观测难度大于电场分量。为此, YUTEM 方法采取只记录 E_x 电场分量的观测方式。

测线布设

试验区压裂水平井为南北走向, 埋深约

2800m。在水平井压裂段6、7、8段正上方地表布设垂直于水平井方向的测线8条, 东西走向, 点线距均为50m, 每条测线长1400m, 物理点总计224个。

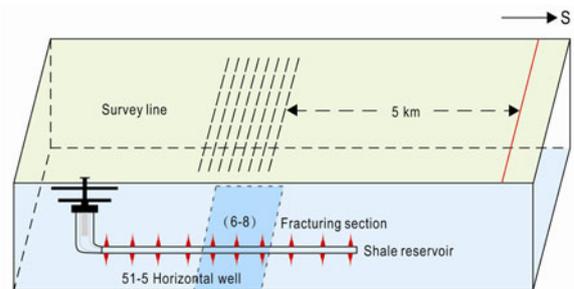


图4 YUTEM压裂监测野外布置示意图

观测参数

发射源长度4000m, 成东西走向; 最小收发距5000m; 发射电流65A; 发射波形为双极性方波, 周期为8s, 占空比50%; 采样率为400Hz。

YUTEM压裂监测野外布置示意图如图4所示。

(3) 压裂观测

为了成功实现可控源电磁法压裂监测, 压裂生产、采集布置与发射源供电多方的相互协调,

协同配合是前提保证。通过精心组织,我们在水平压裂井的6、7、8段成功实现了动态监测(压裂生产信息详见表2),获取了压前,压中及压后三个时段的时间序列数据,每段监测时间达3小

时以上,3段总计监测时间达9小时,为可控源电磁法压裂监测的时移数据处理与方法研究奠定了基础。

表2 试验水平井页岩气压裂生产信息记录表

井段号	压裂日期	压裂起始时间	压裂终止时间	压裂液/支撑剂体积 (m ³)
×-×-6	2016.02.29	18:07:23	20:35:03	1849.9/40.4
×-×-7	2016.03.01	08:41:33	11:37:00	1955.6/49.6
×-×-8	2016.03.01	17:07:50	19:53:00	1847.7/48.1

可行性分析

基于试验区的地电模型,通过野外实际观测参数条件下的正演模拟,可进行压裂检测可行性分析。表3是表1地电模型在试验观测参数条件下计算的压裂前后电位差在各时窗变化的绝对值与相对变化率。从中看出,在早时与晚时压裂的前后变化不大,而在0.01s至0.1s时窗内,地表面

测的时窗内,相对变化超过20%,最大变化信号达到10 μ V。此外,在压裂前我们采集了约半小时的背景噪声,图5是时窗1s内电场衰减信号叠加结果。由图可知,电场噪声的平均振幅处于-0.8 μ V到0.8 μ V之间,远小于压裂引起的电位差变化水平(1.0 μ V-10 μ V)。考虑到V8仪器系统具有0.1 μ V的信号分辨能力,YUTEM方法进行压裂监测是可行的。

表3 压裂前后电位差变化统计表

时窗 (s)	压裂前 (μ V)	压裂后 (μ V)	绝对变化 (μ V)	相对变化 (%)
0.001	704.112	715.009	10.897	1.548
0.002	362.086	372.982	10.896	3.009
0.005	58.956	69.845	10.889	18.470
0.010	18.062	27.946	9.884	54.725
0.023	5.793	8.040	2.247	38.787
0.051	4.497	2.944	1.553	34.533
0.100	3.376	2.460	0.916	27.124
0.131	2.760	2.198	0.562	20.368
0.150	2.448	2.041	0.407	16.637
0.258	1.350	1.338	0.012	0.894

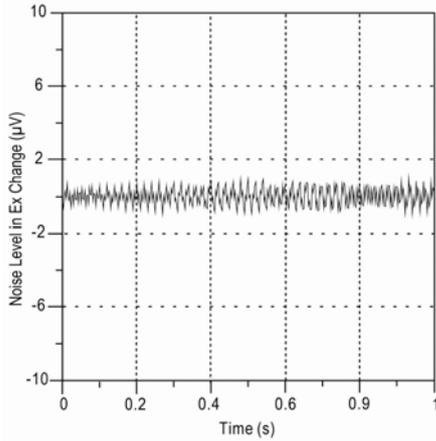


图5 试验区某测点噪音水平曲线图

资料的时移处理与成像

(1) 单点资料处理

为了提高资料的信噪比, 必须保证衰减曲线的叠加次数。为此我们抽取了6段压裂前、6段压裂后及7段压裂后各30分钟的电场分量时间序列分别进行叠加处理, 获取了压裂过程前后的衰减曲线。图6是水平井压裂6段与7段上方L01线14号点与16号点观测的电场变化曲线。图中看出, 在时窗0.03s至0.1s之间, 压裂前后的电场衰减曲

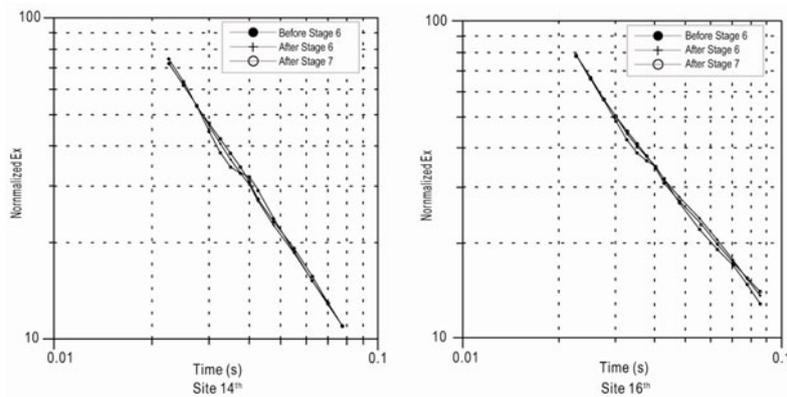


图6 水平井压裂6段与7段上方L01线14号点与16号点观测的电场变化曲线

线征收明显变化, 说明可以分辨, 与图3中的正演模拟曲线的形态及时窗范围均较为吻合。

(2) 压裂异常成像及效果分析

基于建立的成像与时移处理方法, 我们计算了6段压前、后与7段压后的时移残差数据, 并进行了成像处理, 形成了6段与7段压裂后储层改造电性异常空间变化立体图, 如图7所示。通过对照地质结构与地震标定, 我们从图中可以明显看出, 压裂液的走向与空间分布范围成哑铃状。

(3) 压裂效果分析

基于图7推断, 第6段压裂后形成的储层改造异常体东西长约600m, 水平井段以西约400m, 以东约200m; 异常南北宽约200-300m。第7段压裂后异常体东西长增至700米, 西面约400米, 东面约300m; 南北宽增至300-400m; 异常整体向北部扩大。总体看, 西面压裂效果优于东面。

根据电场残差越大对应的压裂液厚度越大的基本规律, 通过地震、测井及水平井位标定, 可将由残差图转换为压裂厚度图。压裂厚度总体为西薄东厚, 东面最大厚度约为65m; 西面最大厚度约为55m。

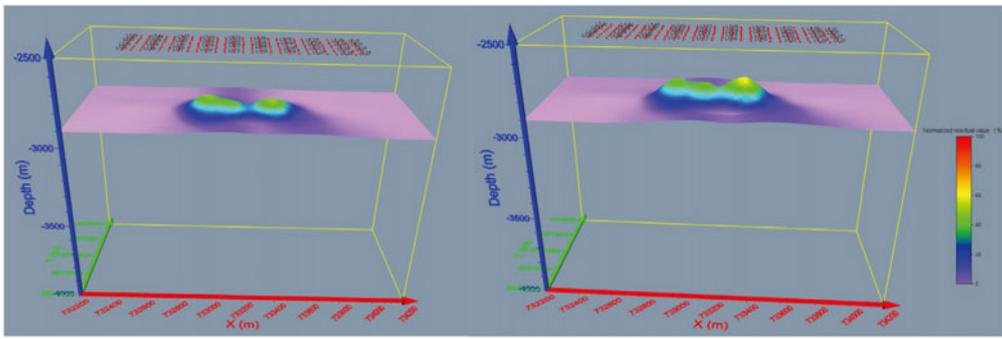


图7 水平井压裂储层改造前后异常空间变化立体图(左: 6段后; 右: 7段后)

结论

岩石物理电性测试表明, 压裂液具有极低阻和高极化特征。页岩压裂过程中由于压裂液的作用, 页岩储层改造后电阻率明显降低, 为可控源电法动态监测奠定了岩石物理基础。

基于试验区2890米埋深的页岩储层一维正演模拟表明, 压裂引起的电场变化明显, 可以观测。尽管试验区噪声强烈, 由于采取了大功率发射和叠前信号处理技术, 明显观测到了压裂引起的电场变化信号。

在1.4*0.8平方公里范围内的224个观测点上获取了高质量的TDEM时间序列数据。通过归一化时移残差处理和地震与测井标定, 给出了埋深2890处的压裂液空间三维分布及其变化过程。

参考文献

- Albaric, J., Oye, V., Langet, N., Hasting, M., Lecomte, I., Iranpour, K., Messeiller, M., and Reid, P., 2014, Monitoring of induced seismicity during the first geothermal reservoir stimulation at Paralana, Australia: *Geothermics*, **52**, 120–131.
- Abdelfettah, Y., Sailhac, E., and Schill, H., P. D., 2016, Continuous MT monitoring for small fluid injection volume at Rittershoffen Geophysical Project, northern Alsace France: 23rd Electromagnetic Induction Workshop, Chiang Mai, Thailand.
- He, Z., Hu, Z., Gao, Y., He, L., Meng, C., and Yang, L., 2015, Field test of monitoring gas reservoir development using time-lapse continuous electromagnetic profile method: *Geophysics* **80**(2), WA127–WA134.
- Hoversten, G. M., Commer, M., Haber, E., and Schwarzbach, C., 2015, Hydro-frac monitoring using ground time domain electromagnetics: *Geophysical Prospecting*, **63**, 1508–1526.
- Hoversten, G. M., Schwarzbach, C., Haber, E., Belliveau, P., and Shekhtman, R., 2017, Borehole to surface electromagnetic monitoring of hydraulic fractures: 6th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics. Berkeley, California, USA, March 28–30.
- Hu, W., Yan, L., Su, Z., Zheng, R., and Strack, K., 2008, Array TEM Sounding and Application for Reservoir Monitoring: 78th Ann. Internat. Mtg. SEG, Expanded Abstracts, **27**(1), 634–638
- Macnae, J., 1987, Imaging quasi-layered conductive structures by simple processing of transient electromagnetic data: *Geophysics*, **52**(4), 545–554.
- Maxwell, S. E., Cho, D., Pope T., Jones, M., and Leonard, J., 2011, Enhanced reservoir characterization using hydraulic fracture microseismicity. Paper SPE140449 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, USA, 24–26 January, 2011.
- Orange, A., Key, K., and Constable, S., 2009, The feasibility of reservoir monitoring using time-lapse marine CSEM: *Geophysics*, **74**(2), F21–f29.
- Peacock, J. R., Thiel, S., Reid, P., and Heinson, G., 2012, Magnetotelluric monitoring of a fluid injection: Example from an enhanced geothermal system: *Geophysical Research Letters*, **39**(18), L18.
- Peacock, J., Thiel, S., Heinson, G., and Reid, P., 2013, Time-lapse magnetotelluric monitoring of an enhanced geothermal system: *Geophysics* **78**(3), B121–B130.
- Peng, R. H., Hu, X.Y., Liu, Y. X., and He, Z. X., 2012, The feasibility study of time-lapse two dimensional

- magnetotelluric for reservoir monitoring: Chinese Geophysical Society, 2012, 112.
- Raiche, A. P., and Gallagher, R. G., 1985, Apparent resistivity and diffusion velocity: *Geophysics*, **50**, 1628–1633.
- Rees, N., Heinson, G., and Krieger, L., 2016, Magnetotelluric monitoring of coal seam gas depressurization: *Geophysics*, **81**(6), E424–E431.
- Rees, N., Carter, S., Heinson, G., and Krieger, L., 2016, Monitoring shale gas resources in the Cooper Basin using magnetotellurics: *Geophysics*, **81**(6), A13–A16
- Strack, K. M., 1992, *Exploration with Deep Transient Electromagnetics*: Elsevier, 373 pp.
- Streich, R., 2016, Controlled-source electromagnetic approaches for hydrocarbon exploration and monitoring on land: *Surveys in Geophysics*, **37**(1), 47–80.
- Weckmann, U., Ritter, O., and Haak, V., 2003, Images of the magnetotelluric apparent resistivity tensor: *Geophysical Journal International*, **155**(2), 456–468.
- Xie, X. B., and Zhou, L., 2016, The application of long offset transient electromagnetic method in the monitoring of residual oil: *Oil Geophysical Prospecting*, **51**(3), 606–612.
- Xu, D., Hu, X.Y., Shan, C. L., etc., 2016, Landslide monitoring in southwestern China via time-lapse electrical resistivity tomography: *Applied Geophysics*, **13**(1), 1–12.
- Yan, L. J., Yang, S. F., and Hu, W. B., 2001, *Electromagnetic prospecting method and its application in carbonate area of South China*: Petroleum Industry Press, Beijing.

严良俊, 长江大学地球物理学院教授, 博士生导师, 湖北荆州人。1985年中国地质大学(武汉)本科毕业, 1991年硕士研究生毕业于中国地质大学(北京), 2002年博士研究生毕业于浙江大学。长期从事电磁法勘探方法研究与教学。

