

基于 Comsol 的电位法压裂裂缝监测正演研究

杨晓丁, 梁华庆, 耿敏, 沈维

(中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249)

摘要: 随着我国石油开发的不断深入, 大部分油田已经进入了高含水开发期; 电位法压裂裂缝监测通过套管向井中供电, 地面观测电位分布, 监测压裂裂缝形态。该方法简单易行, 是一种重要的裂缝监测方法; 因此开展相关电位法压裂裂缝监测的正演以及反演研究具有十分重要的意义; 首先, 文章基于有限单元法, 利用 comsol 软件建立了电位法压裂裂缝监测模型, 进行了数学分析, 并选取了合适的边界条件; 其次, 通过建立的模型, 研究了裂缝方位与地面电位的对应关系; 然后, 通过改变测量区域的坡度, 研究了坡度对地面测量电位的影响; 研究表明, 裂缝的方位与异常电位值的极小值相对应; 地表坡度将对裂缝方位的监测造成影响; 因而, 在实际的电位法压裂裂缝监测中, 应考虑坡度的影响, 并对测量电位进行相应地修正补偿以消除误差。

关键词: 裂缝监测; 电位法; 坡度; 有限单元法; comsol

Forward Modeling for Fracture Monitoring Technology Through Electrometric Method Based on Comsol

Yang Xiaoding, Liang Huaqing, Geng Min, Shen Wei

(College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum—Beijing,

Beijing 102249, China)

Abstract: With the deepening of the oil development in our country, most of the oilfield has entered high water cut development period. Potential method of fracturing fracture monitoring through supplying power for the casing wells, monitoring electrical potential distribution on the ground, to monitor fracturing fracture morphology. This method is simple, so the crack monitoring measure is an important method. So the associated potential method forward modeling and inversion of fracturing fracture monitoring research is of great significance. First of all, based on the finite element method, potentiometry fracturing fracture monitoring model is established by using the software Comsol, the mathematical analysis is implemented, and the appropriate boundary conditions is selected. Second, through the establishment of the model, and studies the fracture azimuth and the corresponding relation of ground potential. And then, by changing the measuring area of the slope, slope is studied to measure the ground potential. Research has shown that the fracture azimuth and the unusual potential value of minimum corresponding; The surface of the slope will affect the fracture azimuth monitoring. Therefore, in the actual potential method of fracturing fracture monitoring, the influence of the slope should be considered and measuring potential compensation be revised accordingly to eliminate the error.

Keywords: fracture monitoring; potentiometry; gradient; finite element method; comsol

0 引言

水力压裂是目前世界上老油田增产和非常规油气田开发应用中最为有效的技术措施。通过压裂在地下形成人工裂缝, 改善油气层渗流条件, 疏通堵塞, 提高油井产能^[1]。因此, 油气层裂缝分布规律监测对于油田勘探开发具有重要意义。

为了获得较准确的裂缝形态, 提出了多种主要的裂缝监测方法, 包括井下微地震监测、测斜仪裂缝监测、直接近井筒裂缝监测、电位法裂缝监测等技术^[2-9]。井下微地震裂缝监测受限于监测信号微弱, 测斜仪裂缝监测技术由于施工复杂, 以及直接近井筒裂缝监测受限于监测范围, 只能监测井眼附近区域^[10]。因此这些技术都存在一定的局限性, 而不能精确、方便地应用于裂缝监测。

电位法裂缝监测技术是以传导类电法勘探的基本理论为依据, 通过测量由注入到压裂层内的高电离能量的工作液所引起地面电位变化来达到解释推断裂缝参数的目的。该技术能够对裂缝的方位、长度等参数进行监测, 测试工作全部在地面进行, 具有操作简单、测试设备少、测试精度高、不影响生产、结果直观、成本低廉等特点, 并且该测量技术不依赖于目的层岩石的自然状况, 具有更广泛的应用场合, 如煤层气的勘探开发。

由于高电离能量工作液的较强导电能力, 可以将裂缝视为电流源, 该电流源可在地表产生相应的电位分布。所以可通过监测地表的电位来推断裂缝参数。以往的研究都是基于平坦地面来研究裂缝监测过程中的地面电位响应的^[4-13], 而实际中地面不一定是平坦的。同时, 地面的坡度会对裂缝监测造成影响。本文将基于有限单元法研究裂缝方位角与地表电位的对应关系, 以及地表坡度对裂缝监测的影响。通过研究这些影响, 将能够对实际应用中的裂缝监测的精确测量提供指导。

收稿日期: 2016-03-24; 修回日期: 2016-04-25。

基金项目: 北京市青年英才计划资助项目(00001086)。

作者简介: 杨晓丁(1989-), 男, 宁夏银川人, 硕士研究生, 主要从事电法勘探理论及仪器方向的研究。

1 理论和方法

1.1 理论模型

电位法压裂裂缝监测原理如图 1 所示^[11]。电位法压裂裂缝监测属于地下动态导体的充电法探测, 因为压裂施工过程中所使用的压裂液的电阻率与地层介质的电阻率小很多, 所以可将压裂液看成是通过套管供电的地下充电导体, 视作场源。由于导电裂缝的存在, 从而使得压裂前后的电场分布形态发生变化, 即大部分电流集中到充满压裂液的低阻带, 引起地面电位发生改变, 不同规模的压裂裂缝形成不同的场源, 在地表形成不同形态的大地电场分布^[12-14]。所以通过观测地表电位分布情况, 便可推断充电良导体即裂缝的方位、长度等特性参数。

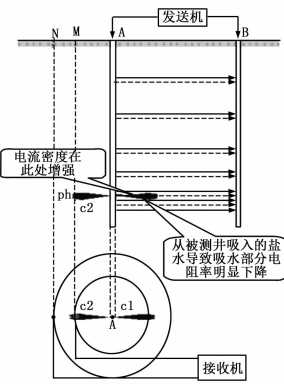


图 1 电位法压裂裂缝监测原理图

观测时, 以电流注入井井口为圆心, 环形布置内、外呈放射状对应的 2 圈测点 M 和 N, 测点间夹角为 15 度, 共布置 24 组 48 个测点, 构成 24 条测线, 2 圈测点与井口间距离根据实际工作参数调整, 如图 2 所示。压裂前后, 依次逐条测线进行 MN 间电位差和被测井供电电流的观测, 计算归一化的电位梯度值, 从而依据电位梯度推得压裂裂缝的方位、长度等参数。

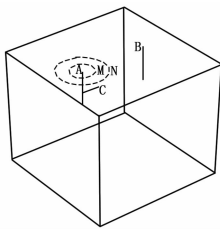


图 2 监测电极布置示意图

电位法压裂裂缝监测方法, 将电流注入井 A、回流井 B、压裂裂缝 C 等效为线源来计算地面电位响应^[15]。压裂前, 正常场电位由 A 井产生的电位和 B 井产生的电位叠加构成, 即

$$U_{QMN} = U_{AMN} + U_{BMN} \quad (1)$$

U_{AMN} 、 U_{BMN} 分别为 A 井、B 井在观测点 M、N 之间的电位差, U_{QMN} 为压裂前观测点 M、N 之间的电位差。

压裂后, 总电场电位由 A 井、B 井、裂缝 C 共同作用形成:

$$U_{HMN} = U_{BMN} + (1 - K)U_{AMN} + KU_{CMN} \quad (2)$$

其中, U_{HMN} 为压裂后, 观测点 M、N 之间的电位差, K 为裂缝分流系数, U_{CMN} 为裂缝 C 在观测点 M、N 之间的电位差。

依据 (1) 式与 (2) 式可得:

$$U_{CMN} = \frac{U_{HMN} - U_{QMN}}{K} + U_{AMN} \quad (3)$$

由上式可知, 分流系数 K 的大小只能改变 U_{CMN} 的比例尺, 不改变曲线的形态, U_{AMN} 为一常数, 它只能使异常曲线沿纵轴上下平移, 但不会改变其形态。所以, $U_{HMN} - U_{QMN}$ 是反映 U_{CMN} 的主要因素, 可以通过该差值得到裂缝的相关信息, 我们称之为视纯异常, 即

$$U_S = U_{HMN} - U_{QMN} \quad (4)$$

因而依据 (1) 式与 (2) 式可得总场电位与正常场电位之差, 即异常电位表示为:

$$U_S = KU_{CMN} - KU_{AMN} \quad (5)$$

由于 U_{AMN} 为一规则的圆, 当加上 U_{CMN} 的影响时, 在一个周期内将出现一个变化。因而, 若 U_S 视纯异常曲线在 360° 范围内出现一个周期的变化, 则认为形成单翼裂缝; U_S 视纯异常曲线在 360° 范围内出现两个周期的变化, 则认为形成双翼裂缝。综上可知, U_S 是裂缝参数反演计算的依据, 而如何得到压裂前后地表的电位差 U_{QMN} 、 U_{HMN} 又是得到 U_S 的关键。

1.2 有限单元法

井地电阻率分布规律满足以下泊松方程:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla u) = -2I\delta(A) \quad (6)$$

满足边界条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial n} = 0 & \in \Gamma^* \\ \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{\cos(r, n)}{r}u = 0 & \in \Gamma^\infty \\ u_1 = u_2 & \in \Gamma \\ \sigma_1 \frac{\partial u_1}{\partial n_1} = -\sigma_2 \frac{\partial u_2}{\partial n_2} & \in \Gamma \end{cases} \quad (7)$$

式中, Γ^* 、 Γ^∞ 、 Γ 分别为地面边界、无穷远边界、不同电阻率分界面边界。

然后构造泛函如下:

$$\begin{cases} F = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla u)^2 - 2I\delta(A)u \right] d\Omega + \int_{\Gamma^\infty} \frac{1}{2} \frac{\sigma \cos(r, n)}{r} u^2 d\Gamma \\ \delta F(u) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

容易证明, 当地下存在多个不均匀体时, 上式仍然成立。

对于地下局部均匀介质中的线电流源, 对其进行微分, 每一小段线元 dL 视为一个点电流源, 对 (8) 式第一个等式沿线源积分, 根据位场叠加和能量叠加原理, 线源激励下的边值问题对应的变分问题可写为

$$\begin{cases} F = \int_L \left\{ \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla u)^2 - 2I\delta(A)u \right] d\Omega + \int_{\Gamma^\infty} \frac{1}{2} \frac{\sigma \cos(r, n)}{r} u^2 d\Gamma \right\} dL \\ \delta F(u) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

然后对区域进行剖分如图 3 所示, 将 (9) 式中对区域 Ω 的积分分解为对各单元的积分之和, 即:

$$\begin{cases} F = \sum_{\Omega} \int_L \int_{\Omega} \frac{1}{2} \sigma (\nabla u)^2 d\Omega dL - \sum_{\Omega} \int_L \int_{\Omega} 2I\delta(A)u d\Omega dL + \sum_{\Gamma^\infty} \int_L \int_{\Gamma^\infty} \frac{\sigma \cos(r, n)}{r} u^2 d\Gamma dL \\ \delta F(u) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

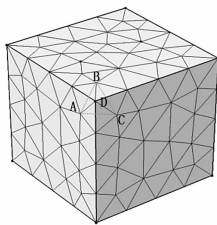


图 3 网格剖分示意图

由 (10) 式可得一大型方程, 从中可解得剖分各节点的电位值。

1.3 comsol 正演准确性验证

地表边界面 Γ^* , 可以通过选择 comsol 中的零通量边界条件进行设定。对无限远处边界面 Γ^∞ , 需要选择通量/源边界条件, 并利用均匀介质条件下的 u 根据 $\frac{\partial u}{\partial n} - \lambda u = 0 \in \Gamma^\infty$ 得到通量/源选项中表达式所需的 λ 值。

为了验证以上模型设置的准确性, 将采用相应模型进行验证。验证模型空间为 $1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$ 的正方体, 背景电阻率为 $100\ \Omega \cdot \text{m}$; 电流注入井, 即线电流源 A, 长度为 100 m , 供电电流为 1 A , 该线电流源通过地表供电, 供电点坐标为 $(250, 500, 1\ 000)$; 线电流源 B, 即回流井, 长度为 100 m , 电流强度为 -0.2 A , 该线电流源在地表的投影点坐标为 $(750, 500, 1\ 000)$; 线电流源 C, 即裂缝, 长度为 50 m , 电流强度为 0.8 A , 两个端点的位置坐标分别为 $(250, 500, 920)$ 、 $(300, 500, 920)$ 。此处, 将采用两种数据采集方式对精确性进行验证, 数据采集点分别如图 4 和图 5 中的虚线所示, 采集点连线与裂缝分别成 45° 度和 -45° 度夹角。图 6 和图 7 为对应的相对误差值。

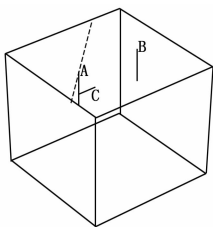


图 4 采样数据点连线与裂缝成 45° 度夹角

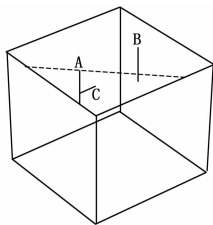


图 5 采样数据点连线与裂缝成 -45° 度夹角

由图 6 与图 7 可见, 距离第一个采样点 300 m 到 400 m 之间有一个起伏很大的峰 (A 井距第一个采样点 360 m), 这是由于电流源奇异性造成的计算值误差, 最高峰的中点附近对应 A 井所在位置。一方面, 由两幅图可以看到当距离 A 井大约大于 40 m 时, 最大误差小于 1% , 而且随着距离的增大, 误差越小。另一方面, 通常情况下, 分布形式为圆周的测量极距

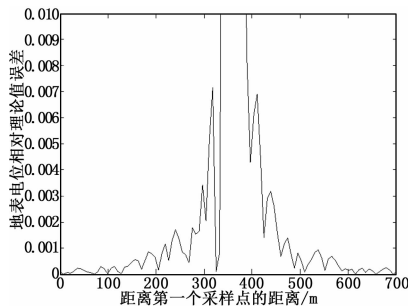


图 6 与图 4 对应的相对误差

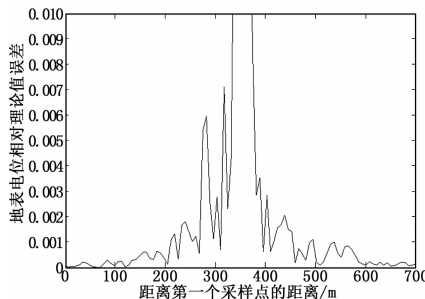


图 7 与图 6 对应的相对误差

离 A 井井口的距离都较大。因而综合以上两个方面原因, 这个模型的精度是令人满意的。

2 裂缝监测分析:

2.1 内外圈电位差与裂缝方位的关系验证:

下面将以有限单元法研究在均匀半空间当中裂缝方位角分别为 0° 、 60° 、 90° 度时, 裂缝方位角与 U_s 的对应关系。模型空间为 $1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$, 背景电阻率为 $100\ \Omega \cdot \text{m}$ 。A 井长 100 m , 井口所在坐标为 $(250, 500, 1\ 000)$; B 井长 100 m , 井口所在坐标为 $(750, 500, 1\ 000)$; 裂缝 C 长 50 m , 距地表 80 m ; 内侧电极距 A 井井口 120 m , 外侧电极距 A 井井口 150 m 。依据 (5) 式, 设定分流系数 K 为 0.8 , $I_a = I_c = 1\text{ A}$, $I_b = 0\text{ A}$ 得到 U_s 与裂缝方位角对应关系如下图所示。

由图 8 结果可以发现, (a) 图中裂缝与 A、B 井井口连线夹角为 0° , U_s 的极小值也恰好对应 0° 。图 8 中 (b)、(c) 图也有着相应的对应关系。由此可见, U_s 的极小值与裂缝的方位角很好的对应。因而实际中, 可以依据视纯异常 U_s 的极小值来确定裂缝的方位角。

2.2 斜坡角度对裂缝监测的影响

在此, 模型空间 $1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$, 背景电阻率为 $100\ \Omega \cdot \text{m}$ 。A 井长 100 m , x 、 y 坐标分别为 250 、 500 。B 井长 100 m , x 、 y 坐标分别为 750 、 500 。裂缝 C 长 50 m , 距地表 80 m , 裂缝沿 A、B 井连线逆时针旋转, 方位角为正, 沿 A、B 井连线逆时针旋转, 方位角为负; 内侧电极距 A 井井口 120 m , 外侧电极距 A 井井口 150 m ; 斜坡与水平面夹角为 β , 模型如图 9 所示。依据 (5) 式, 设定分流系数 K 为 0.8 , $I_a = I_c = 1\text{ A}$, $I_b = 0\text{ A}$, 使 β 分别取 3° 、 5° 、 7° 以及使裂缝方位角为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 度时, 得到 U_s 如图 10~13。

由图 10 (a) 可知, 由于坡度的存在, U_s 极小值出现偏离, 随着坡度的增加, 极小值逐渐向下坡偏移。由图 10 (b)

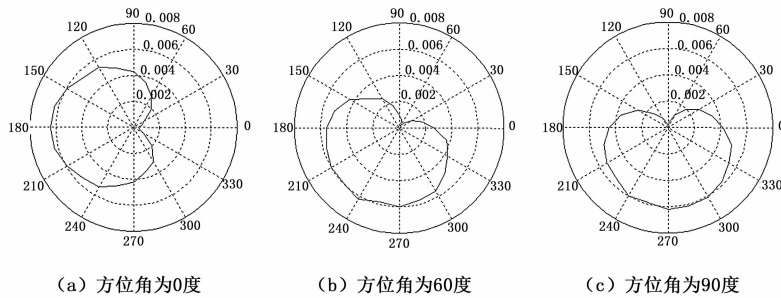
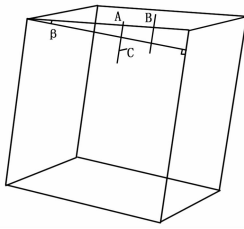
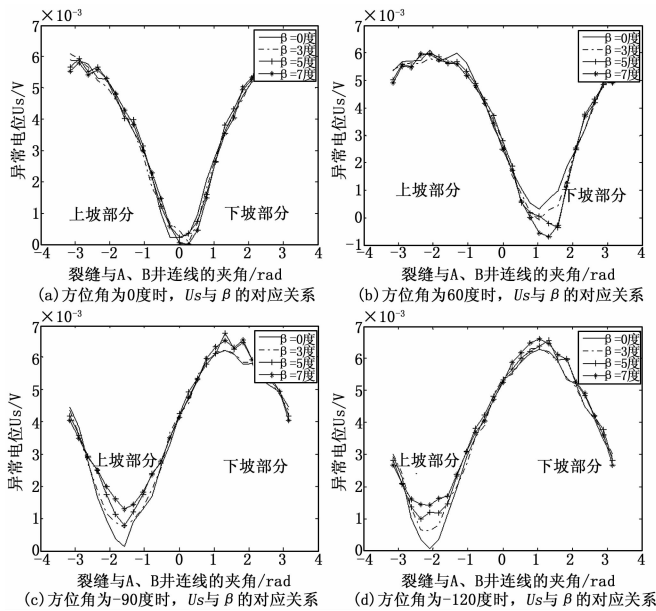
图8 有限单元法计算得到的 U_s 值与裂缝方位对应关系

图9 坡度测量模型

图10 不同方位角时, U_s 与 β 的对应关系

可知, 由于坡度的存在, U_s 极小值变得更明显, 但也发生了一定偏移。随着坡度的增加, U_s 极小值逐渐向左上坡偏移。由图 10 (c), (d) 可知, 坡度的存在并没有使极小值发生偏移, 但随坡度的增加, 极小值变得模糊。

3 结论

1) 仿真结果表明, 裂缝方向与视纯异常 U_s 有一定的对应关系。在单翼裂缝情况下, 通过测量压裂前后的地表电位, 进而求得视纯异常电位 U_s , 其极小值对应裂缝的方向。

2) 实验及相关结果表明, 测量地区的坡度对测量结果有影响, 且坡度越大影响越大。具体影响体现在: 上坡部分将使异常电位 U_s 极小值变得模糊; 下坡部分将使异常电位 U_s 极小值变得明显, 但出现了偏移, 且随坡度增大, 测量方位角逐

渐增大。由以上分析可知, 坡度对裂缝有一定影响, 因此, 在实地测量过程中需考虑坡度的影响, 并依据坡度的大小及测量电极的位置, 对相应异常电位差值进行修正, 以消除相应误差, 得到较准确的结果。

参考文献:

- [1] Zhao M G, Zhou H F, Chen D F. Investigation and application on gas-drive development in ultra-low permeability reservoirs [J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20 (2): 254-260.
- [2] Shawn Maxwell. Microseismic Hydraulic Fracture Imaging: The Path Toward Optimizing Shale Gas Production [J]. Shales, 2011, 30 (3): 340-346.
- [3] Robert C Downie, Le Calvez Joel H, Ken Kerrihard. Real-Time Microseismic Monitoring of Simultaneous Hydraulic Fracturing Treatments in Adjacent Horizontal Wells in the Woodford Shale [J]. Frontiers+Innovation-2009 CSPG CSEG CWLS Convention, 2009, 26 (1): 484-492.
- [4] 周健, 张保平, 李克智, 等. 基于地面测斜仪的“井工厂”压裂裂缝监测技术 [J]. 石油钻探技术, 2015, 43 (3): 71-75.
- [5] Fisher M K, Wight B M, Davidson, et al. Integrating Fracture Mapping Technologies to Optimize Stimulations in the Barnett shale [C]. SPE 77441, 2002.
- [6] Cipolla C L, Wright C A. Diagnostic Techniques To Understand Hydraulic Fracturing: What Why and How [C]. SPE 75359, 2002.
- [7] 何裕盛. 地下动态导体充电法探测概论 [J]. 物探与化探, 2000, 24 (1): 62-68.
- [8] 郑花锡, 郑永哲. 电位法油田开发动态监测技术在调剖增产措施中的应用 [J]. 石油钻探技术, 2006, 34 (2): 7-9.
- [9] 张金成, 王小剑. 煤层压裂裂缝动态法监测技术研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24 (5): 107-109.
- [10] 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): 44-47.
- [11] 吴柏志, 李军. 电位法井间监测技术在压裂裂缝监测中的应用 [J]. 石油地质与工程, 2011, 25 (2): 126-128.
- [12] 张金成. 电位法井间监测技术 [J]. 地震地质, 2001, 23 (2): 292-300.
- [13] 李国富, 孟召平, 张遂安. 大功率充电电位法煤层气井压裂裂缝监测技术 [J]. 煤炭科学技术, 2006, 34 (12): 53-55, 72.
- [14] 王树军, 刘洪章, 崔彦立. 提高低渗透油田后期压裂效果 [J]. 吐哈油气, 2006, 11 (1): 52-57.
- [15] 柴燕军, 韩小峰. 电位法测试技术在古潜山裂缝油藏注水开发中的应用 [J]. 特种油气藏, 2002, 9 (Z1): 79-82.