

压裂过程中地面和井下倾斜场的主控因素研究

曾义金¹, 郭印同², 杨春和²

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油工程技术研究院, 北京 100101 ;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要 :水力压裂技术改造储层已经成为非常规油气开发的重要技术手段,以井下测斜仪为代表的远场测量技术进行裂缝形态监测已经逐步应用于压后裂缝效果评价。采用不同的裂缝分析模型对压裂过程中地面和井下倾斜场进行了正演研究,验证了模型的正确性,并采用矩形张裂缝模型对影响压裂倾斜场的地层和裂缝参数进行了定量分析。研究表明,(1)地面倾斜场对于裂缝的方位角和倾角变化较为敏感,对于裂缝的尺寸及裂缝中心深度变化不敏感;(2)井下倾斜场值对于裂缝的尺寸、裂缝中心深度变化较为敏感,对于裂缝的方位角及倾角变化不敏感。研究结果可应用于储层水力压裂优化设计中。

关 键 词 :水力压裂;裂缝监测;裂缝模型;倾斜场;敏感性

中图分类号 : O 319.56

文献标识码 : A

文章编号 : 1000 - 7598 (2016) 增 1 - 0079 - 09

Investigation on major factors controlling surface and subsurface inclined fields upon hydraulic fracturing

ZENG Yi-jin¹, GUO Yin-tong², YANG Chun-he²

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, China Petroleum Chemical Corporation, Beijing 100101, China;
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Hydraulic fracturing is an important technique for unconventional oil and gas reservoir. The far field measurement technology has represented by down-hole gauge, the split extending shape has been applied to the effect evaluation of hydraulic-fracture. The major factors on surface and subsurface inclined fields are studied upon hydraulic fracturing; and then the model is verified to be correct. Using rectangle crack model, a quantitative analysis of the formation and fracture parameters are carried out. Research results show: (1) The ground tilt field is sensitive to the change of azimuth and dip angle of the crack, the crack size and depth of the crack centre is not sensitive. (2) The inclination of the field is sensitive to the crack size and depth of the crack; but to the azimuth and dip angle of the crack is not sensitive. The results can be applied to optimization design of hydraulic fracturing in reservoir.

Keywords: hydraulic fracturing; crack monitoring; crack model; inclined field; sensitivity

1 引 言

利用水力压裂技术改造储层已经逐步成为非常规油气田开发中的重要技术手段,在压后效果评价研究中可准确地获取压裂过程中地下人工裂缝的参数信息,对于优化压裂施工、指导开发井网部署、油藏动态管理、提高油气采收率等方面都具有重大意义^[1]。目前国内外已经形成近 10 种裂缝监测技术,可将裂缝监测技术分为三类,即以微地震和测

斜仪技术为代表的远场直接监测方法、以生产测井及井筒映像测井为代表的近井直接方法和以净压力和试井分析为代表的间接诊断方法,对以上三类技术的可靠性对比研究后发现,获取裂缝参数时以测斜仪和微地震为代表的远场测量技术的可靠性明显高于近井筒和间接测量技术^[2]。

测斜仪监测方法是一种新兴的裂缝监测技术,具有安全、环保、维护简单、监测结果科学准确等特点,是目前裂缝监测领域最先进的技术之一^[3],

收稿日期: 2015-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51490650)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51490650).

第一作者简介: 曾义金,男,1964 年生,博士,教授级高工,中国石化石油工程技术研究院副院长,主要从事石油工程技术研究与应用。E-mail: zengyj.sripe@sinopec.com

在确定裂缝的倾角和走向方面具有很高的精度。采用高灵敏度的测斜仪监测压裂对大地造成的倾斜场，运用地球物理反演方法确定出裂缝的位置、方位、倾角及尺寸等参数，还可以及时地获取压裂时裂缝两翼的对称性、裂缝延伸的具体方位、裂缝是否有效地覆盖产层以及压裂的规模是否合适等信息。

为模拟压裂过程中地层因裂缝张开而发生的形变，本文采用了不同的裂缝分析模型对压裂过程中地面和井下倾斜场进行了正演，并对影响倾斜场的地层和裂缝参数进行了定量分析，对水压过程中压裂裂缝的发育状态进行研究，描述了水压过程中裂缝的中心位置、方位、倾角、分布状态与压裂体积等关键几何参数，研究结果可应用于储层水力压裂优化设计中。

2 井下测斜仪原理与布置方式

储层水力压裂裂缝引起的岩石变形场向各个方向辐射，引起地面及地下地层的变形，可在井下或地面压裂井周围布设一组测斜仪来测量压裂引起岩石变形而导致的地质倾斜。图1为测斜仪监测垂直裂缝的示意图。由测斜仪监测的垂直裂缝引起的地面变形是沿着裂缝方向的凹槽，且凹槽两侧地面发生突起，通过凹槽两侧的突起可以推算出裂缝的倾角和方位。井下测斜仪布置在与压裂储层相同深度的邻井中，垂直裂缝在邻井处产生突起变形，从而可以推算出裂缝的几何形态。

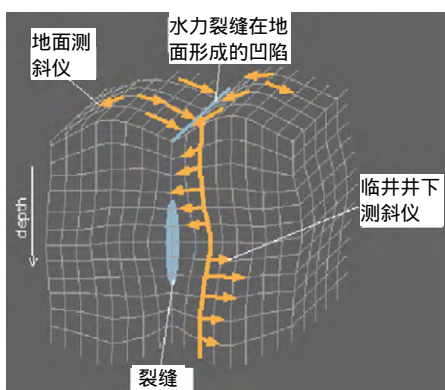


图1 测斜仪监测垂直裂缝原理图^[4]
Fig.1 Fracture monitoring principle diagram of surface tiltmeter^[4]

在地表压裂缝引起的变形量级通常为万分之一英寸，几乎是不可测量的，但测量变形梯度即倾斜场相比而言是比较容易的。为保证裂缝测量精度，需在压裂施工前将12~24个测斜仪按照压裂地层

深度为15%~75%的径向距离排布在压裂井的周围，即裂缝在地面造成最大倾斜的区域^[3]。压裂测量的结果并不取决于测斜仪在地面的排布方式，而是主要取决于测斜仪应用的数量和仪器的信噪比。

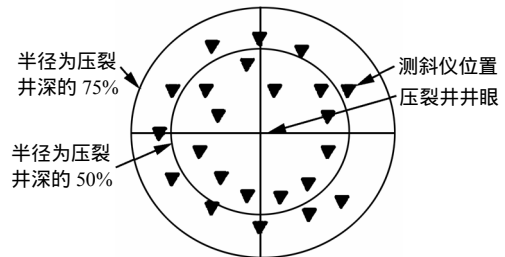


图2 典型的测斜仪阵列布置^[3]
Fig.2 Array layout of the gauge^[3]

监测需在临井布置一条测井电缆的测斜仪排列，而排列由分布在电缆上的6~10个测斜仪组成。井下测斜仪在裂缝中心深度连续的记录倾斜场的变化，距离为100~300m不等。压裂导致的地面最大的变形位于裂缝中心深度处，且当观测井距离裂缝很近时变形量等于裂缝位错量的1/2。在远离裂缝的上部和下部倾斜场几乎为0，而在裂缝的顶端和底端深度处倾斜场达到最大值，在裂缝的中心深度处倾斜场减为0。倾斜场的两个极值点的间距与裂缝的宽度有关，倾斜场极值的大小由裂缝的位错量和长度决定。

3 地面和井下倾斜场参数研究

本文采用了平坦椭圆裂缝模型和矩形张裂缝模型对储层水力裂缝所引起的大地倾斜场进行模拟，得到了任意倾向和倾角的裂缝在井下和地面产生的倾斜场，并与前人做过的实际压裂试验结果进行对比，验证了正演模型的正确性。

3.1 平坦椭圆裂缝模型

把压裂缝看作无限均匀介质内具有一定倾角和倾向的椭圆，裂缝为张性破裂，具有均布的垂直于裂缝面的压力^[5]。图3为椭圆模型的示意图，图中长轴、短轴分别为 $2a$ 和 $2b$ 。

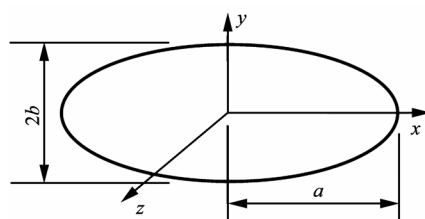


图3 平坦椭圆裂缝模型示意图
Fig.3 Sketch of flat elliptical crack model

Green 等^[5]给出了位移的解析表达式。在笛卡尔坐标系下无限介质中任一点由椭圆裂缝引起的应力和位移表达式为

$$\left. \begin{aligned} D &= 8 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left\{ (1+2\nu)\varphi + Z \frac{\partial \varphi}{\partial Z} \right\} \\ u_z &= -8(1-\nu) \frac{\partial \varphi}{\partial Z} + 4Z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Z^2} \\ \Theta &= -8G \left\{ (1+2\nu) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Z^2} + Z \frac{\partial^3 \varphi}{\partial Z^3} \right\} \\ \Phi &= 32G \frac{\partial^2}{\partial \bar{z}^2} \left\{ (1-2\nu)\varphi + Z \frac{\partial \varphi}{\partial Z} \right\} \\ \sigma_z &= -8G \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Z^2} + 8GZ \frac{\partial^3 \varphi}{\partial Z^3} \\ \Psi &= 16GZ \frac{\partial^3 \varphi}{\partial \bar{z} \partial Z^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中：

$$\left. \begin{aligned} D &= u_x + iu_y; \quad \Theta = \sigma_x + \sigma_y \\ \Phi &= \sigma_x - \sigma_y + 2i\tau_{xy}; \quad \Psi = \tau_{xz} + i\tau_{yz} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

G 为介质的剪切模量； ν 为介质的泊松比； Z 为坐标系中的 Z 方向坐标； $z = x - iy$ ； $\bar{z} = x + iy$ ； φ 为应力函数，可在椭圆坐标系下进行椭圆积分计算得到。

Warpinski^[6]得到了无限介质中任一点由于裂缝引起的位移对空间 x 、 y 、 Z 三个方向上的导数，即可求得沿任意方向上的倾斜矢量。

对于垂直缝，当裂缝长大于缝高时，垂直于裂缝走向方向的倾斜值可以表示为

$$\frac{\partial u_z}{\partial u_y} = \frac{8AZ}{ab^2} \left[-(1-2\nu) \left(k'^2 \frac{sn^2 u}{cn^2 u} \right) \frac{du}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dy} + Z \left(2k'^2 \frac{sn(u)dn(u)}{cn^3 u} \right) \left(\frac{du}{d\lambda} \right)^2 \frac{\partial \lambda}{\partial y} \frac{\partial \lambda}{\partial Z} + Z \left(k'^2 \frac{sn^2 u}{cn^2 u} \right) \left(\frac{d^2 u}{d\lambda^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \frac{\partial \lambda}{\partial Z} + \frac{du}{d\lambda} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y \partial Z} \right) \right] \quad (3)$$

式中： sn 、 dn 、 cn 为雅可比椭圆函数； A 、 λ 分别定义为

$$A = -\frac{ab^2 P}{16GE(k)}; \quad \lambda = a^2 \frac{cn(u)}{sn(u)} \quad (4)$$

同理可得平行于裂缝走向方向的倾斜值：

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{8(1-2\nu)Ax}{a^3} sn^2 u \frac{du}{dy} \frac{d\lambda}{dy} + \frac{8AZ^2}{ab^2} \left[\left(2k'^2 \frac{sn(u)dn(u)}{cn^3 u} \right) \left(\frac{du}{d\lambda} \right)^2 \frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{\partial \lambda}{\partial y} + \left(k'^2 \frac{sn^2 u}{cn^2 u} \right) \left(\frac{d^2 u}{d\lambda^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{\partial \lambda}{\partial y} + \frac{du}{d\lambda} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x \partial y} \right) \right] \quad (5)$$

通过 Matlab 编程实现了计算无限空间内任意一点由于平坦椭圆裂缝模型所引起的倾斜场值。采用 M-Site 压裂监测试验数据^[7]验证了正演模型的正确性。根据微地震和测斜仪数据采用联合反演得到裂缝信息^[8]为裂缝长 225 m，高 40.2 m，中心深度约为 1 365 m（假定裂缝为垂直缝，方位角由微地震方法已获取，为 N15oW）。图 4 中右侧为定位出的微地震事件以及裂缝形态的剖面图，左侧中点为测斜仪监测到的倾斜场值，虚线为正演得到的倾斜场的理论计算值。

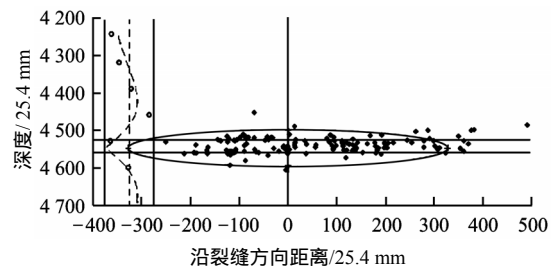


图 4 倾斜场监测、微地震事件以及裂缝位置^[6]
Fig.4 Inclined field monitoring, micro seismic events and crack location^[6]

采用 Warpinski 的裂缝反演结果如图 5 所示。从图中可见，合成方向上的正演结果与图 4 中 M-Site 试验中的理论计算值（红色虚线）能较好的吻合，验证了所采用的平坦椭圆裂缝模型的正确性。

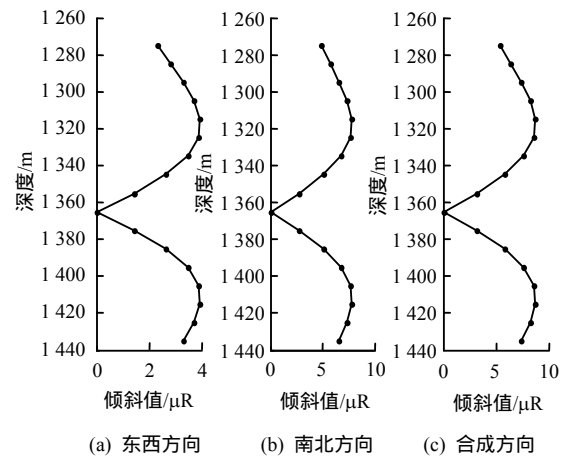


图 5 平坦椭圆裂缝模型正演结果
Fig.5 Results of flat elliptical crack model

3.2 矩形张裂缝模型

如图 6 所示，在笛卡尔坐标系中 $u_i^j(x_1, x_2, x_3; \xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 表示点 (x_1, x_2, x_3) 由于受到点 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 处 j 方向上的力而引起的 i 方向的位移分量； $abs()$ 分别表示 (x_1, x_2, x_3) 为笛卡尔坐标系中点坐标，

(ξ_1, ξ_2, ξ_3) 为无限介质中点坐标, $(\xi_1, \xi_2, -\xi_3)$ 点的像源坐标。根据 Mindlin^[9] 给出的推导可以得到

$$\left. \begin{aligned} u_i^j(x_1, x_2, x_3) &= u_{iA}^j(x_1, x_2, -x_3) - u_{iA}^j(x_1, x_2, x_3) + \\ & u_{iB}^j(x_1, x_2, x_3) + x_3 u_{iC}^j(x_1, x_2, x_3) \\ u_{iA}^j &= \frac{F}{8\pi\mu} \left\{ (2-\alpha) \frac{\delta_{ij}}{R} + \alpha \frac{R_i R_j}{R^3} \right\} \\ u_{iB}^j &= \frac{F}{4\pi\mu} \left\{ \frac{\delta_{ij}}{R} + \frac{R_i R_j}{R^3} + \frac{1-\alpha}{\alpha} \left[\frac{\delta_{ij}}{R+R_3} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{R_i \delta_{j3} - R_j \delta_{i3} (1-\delta_{j3})}{R(R+R_3)} - \frac{R_i R_j}{R(R+R_3)^2} (1-\delta_{i3})(1-\delta_{j3}) \right] \right\} \\ u_{iC}^j &= \frac{F}{4\pi\mu} (1-2\delta_{i3}) \left\{ (2-\alpha) \frac{R_i \delta_{j3} - R_j \delta_{i3}}{R} + \right. \\ & \left. \alpha \xi_3 \left[\frac{\delta_{ij}}{R^3} - \frac{3R_i R_j}{R^5} \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\alpha = (\lambda + \mu) / (\lambda + 2\mu)$, λ 、 μ 为拉梅常数; δ_{ij} 为 Kronecker 算符; $R_1 = x_1 - \xi_1$; $R_2 = x_2 - \xi_2$; $R_3 = -x_3 - \xi_3$; $R^2 = R_1^2 + R_2^2 + R_3^2$ 。

由式 (5) 可知, 描述由点源所引起的半无限介质内部的位移场由两个无限介质项 (A 部分) 与地面变形相关的项 (B 部分) 以及和深度相乘的项 (C 部分) 三部分组成。

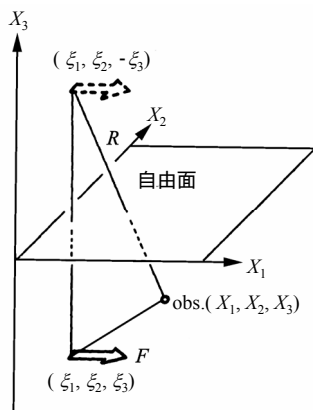


图 6 点源和观测点的位置图^[9]

Fig.6 Location of point source and observation point^[9]

对于张性点源, u^r 的表达式为

$$u^r = \frac{M_0}{F} \left[\frac{2\alpha - 1}{1 - \alpha} \frac{\partial u^n}{\partial \xi_n} + 2 \left(\frac{\partial u^2}{\partial \xi_2} \sin^2 \delta + \frac{\partial u^3}{\partial \xi_3} \cos^2 \delta \right) - \left(\frac{\partial u^2}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u^3}{\partial \xi_2} \right) \sin(2\delta) \right] \quad (7)$$

由此可得由张性位错点源所引起的位移场及位移在不同方向上的导数的表达式:

$$\left. \begin{aligned} A_3 &= 1 - \frac{3x^2}{R^2}; A_5 = 1 - \frac{5x^2}{R^2}; A_7 = 1 - \frac{7x^2}{R^2} \\ B_3 &= 1 - \frac{3y^2}{R^2}; B_5 = 1 - \frac{5y^2}{R^2}; B_7 = 1 - \frac{7y^2}{R^2} \\ C_3 &= 1 - \frac{3d^2}{R^2}; C_5 = 1 - \frac{5d^2}{R^2}; C_7 = 1 - \frac{7d^2}{R^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据式 (8) 可以得到半无限空间内任一点的应力和应变场:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (9)$$

式中: u_i 、 u_j 为张性位错源引起的位移场; λ 为拉梅常数; δ_{ij} 为 Kronecker 算符; ε_{ij} 为半无限空间任一点应变场; σ_{ij} 为半无限空间任一点应力。

如图 7 所示, 如果裂缝为矩形张性位错源, 裂缝的长、高分别为 L 、 W , 对点源产生的位移场经过坐标变换, 将 x 、 y 、 c 分别替换为 $x - \xi'$ 、 $y - \eta' \cos \delta$ 、 $c - \eta' \sin \delta$, 并转变为如下形式的积分: $\int_0^L d\xi' \int_0^W d\eta'$, 通过转换, 将积分变量 ξ' 、 η' 转变为 ξ 、 η :

$$x - \xi' = \xi; p - \eta' = \eta \quad (10)$$

积分公式将变为如下形式: $\int_x^{x-L} d\xi \int_p^{p-W} d\eta$ 。

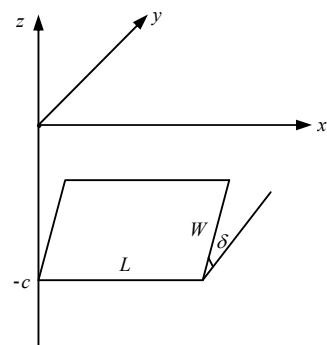


图 7 Okada 矩形位错模型

Fig.7 Okada rectangular dislocation model

可得在半无限空间内任意一点由矩形张裂缝所引起的位移场及其空间导数。

3.3 试例验证

为验证模型的正确性, 采用了 Davis 所做的 Columbia No.20148T 气井的注水压裂试验结果进行了对比分析^[11]。具体思路为: 将试验反演出的裂缝参数 (裂缝的位置、方位角、倾角及尺寸) 作为已知输入, 对裂缝在地面产生的倾斜场进行正演, 然

后，将正演结果与 Davis 在试验中的正演结果进行对比，观察二者是否能够较好的吻合。该气井在埋深 268 ~ 345 m 井段进行压裂，注入了 219 m³ 的砂-CO₂-水的混合物，图 8 为压裂井以及测斜仪的平面位置。图中的实线为监测到的地面倾斜场数据。Davis^[11] 根据监测到的地面倾斜场数据，采用 Marquardt 法对水力压裂裂缝参数进行了正演计算，计算得到的裂缝深度为 221 m，裂缝的长、宽、高为 131 m、0.007 3 m 和 229 m，倾角和方位角分别为 16°、17°。图 8 中虚线为 Davis 反演得到的倾斜场的理论计算值；uradians 为弧度标尺。

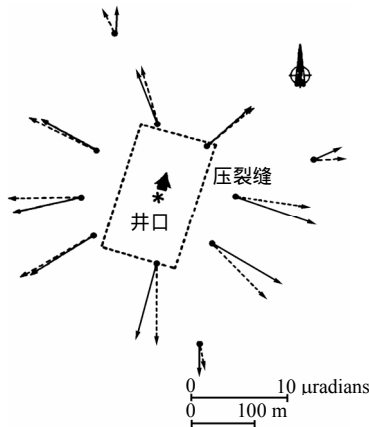


图 8 压裂试验的观测值和正演拟合值
Fig.8 Observation of fracturing values of test and forward fitting

采用 Davis 反演出的裂缝参数，通过 Okada 矩形张裂缝模型，正演计算得到该裂缝所产生的地面倾斜场如图 9 所示。从图中可见，正演出的倾斜场与图 8 中 Davis 正演出的倾斜场（虚线）可以较好的吻合，验证了所采用的矩形张裂缝模型的正确性。

3.4 正演模型比较与选取

表 1 为平坦椭圆裂缝模型和矩形张裂缝模型对比分析。平坦椭圆裂缝模型适用于无限均匀介质中

倾斜场的正演模拟，缺少相应的边界条件，只能用于井下倾斜场的正演。矩形张裂缝模型适用于半无限均匀介质中，可进行地面和井下倾斜场的正演，后续正演计算将基于矩形张裂缝模型。

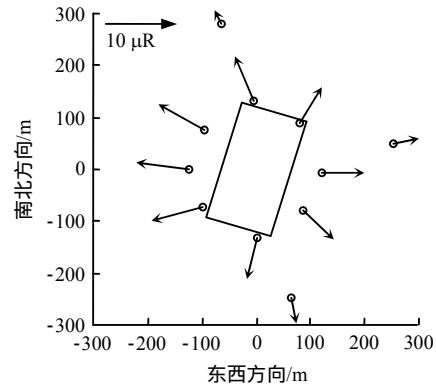


图 9 采用 Okada 模型正演计算结果
Fig.9 Results of forward calculation of Okada model

表 1 平坦椭圆裂缝模型与矩形张裂缝模型对比
Table 1 Contrast of ellipse crack and rectangle crack model

模型	假设条件	输入参数	适用范围
椭圆裂缝	将裂缝面抽象为一无限均匀介质中的椭圆，裂缝破裂为张性破裂，裂缝面上各个点的压力是相同的	流体净压力、地层的剪切模量、泊松比、裂缝中心位置及几何参数	井下倾斜场的正演
矩形张裂缝	介质是半无限空间内均匀介质，裂缝面是矩形，破裂面上各个点的位错方式和位错幅度是一致的	裂缝破裂宽度、泊松比、裂缝中心位置及几何参数	地面及井下倾斜场的正演

采用矩形张裂缝模型对不同倾角裂缝在地面所产生的垂向位移和倾斜场进行正演，如图 10 所示。水平缝在地面引起的垂向位移为对称分布的“单波峰”形态，60°倾斜缝引起的地面垂向位移的形态为不对称的“单波峰”和“单波谷”组合，而垂直缝所引起的地面垂向位移形态为对称分布的“双波峰”和“单波谷”的组合。水平缝、60°倾斜缝和垂直缝在地面产生的倾斜场如图 11 所示。

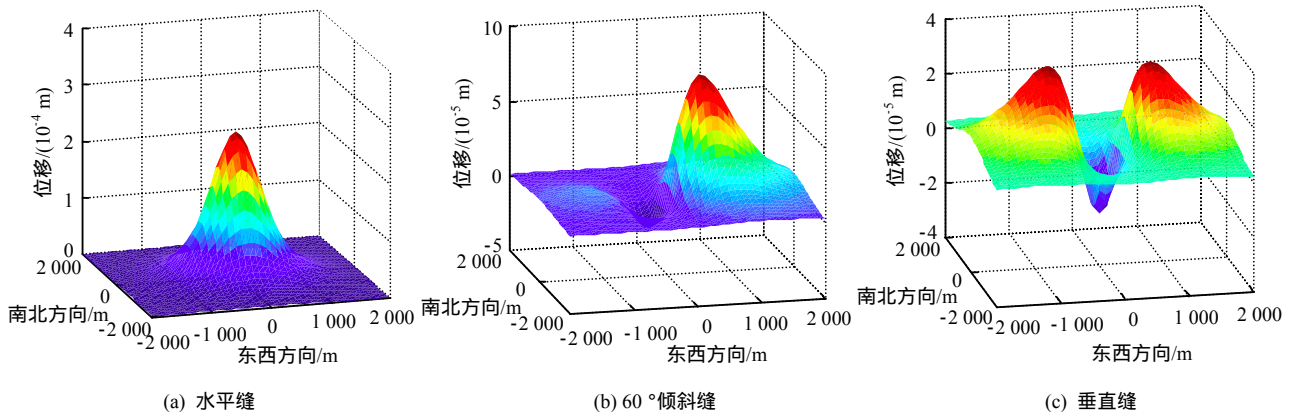


图 10 裂缝在地面产生的垂向位移
Fig.10 Vertical displacements of cracks in ground

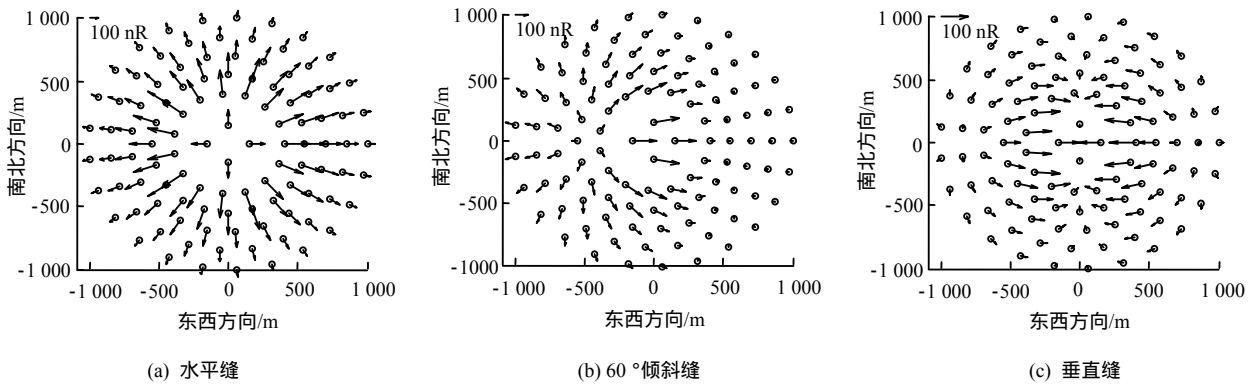


图 11 裂缝在地面产生的倾斜场
Fig.11 Inclined field produced by cracks

4 影响地面及井下倾斜场的因素分析

影响倾斜场的因素包括裂缝的方位角、倾角、裂缝的中心位置以及裂缝的尺寸(长、宽、高)等, 本文定量分析了不同因素对井下和地面倾斜场的影响, 以评价不同监测方式对影响因素的敏感度, 裂缝参数见表 2, 图 12 为地面测斜仪与压裂井的平面位置图, 图 13 为裂缝位置与井下测斜仪的位置图。

表 2 裂缝参数
Table 2 Crack parameters

裂缝深度/m	缝长/m	缝宽/m	缝高/m	方位角/(°)	倾角/(°)
900	120	0.06	60	15	89

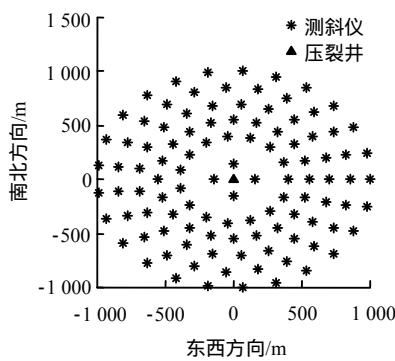


图 12 地面测斜仪及压裂井平面位置图
Fig.12 Surface tiltmeter and fracturing well plane location map

4.1 裂缝方位角

采用图 13 中的布置方式, 当裂缝的方位角由 15°变为 25°时地面产生的倾斜场如图 14 所示。从图中可见, 地面倾斜场的形态及对称性发生了较大变化, 由于方位角不同而引起井下数据的变化(见图 15), 曲线的幅度略有变化, 但形态基本不变。相对于井下监测来说裂缝方位角对于地面监测影响更大。

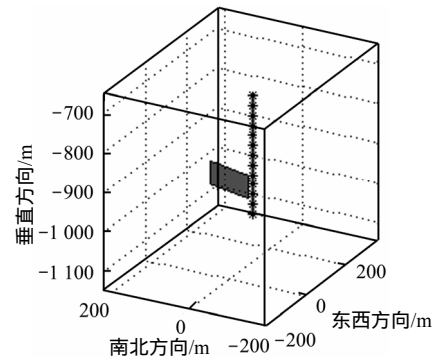


图 13 井下测斜仪和裂缝空间位置图
Fig.13 Downhole inclinometer and crack spatial location map

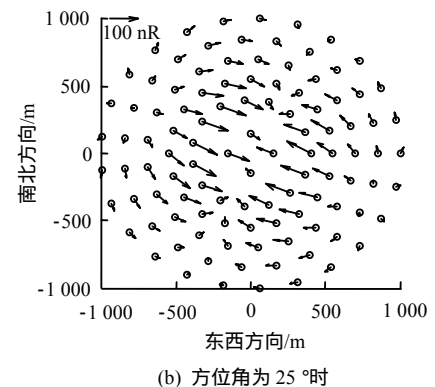
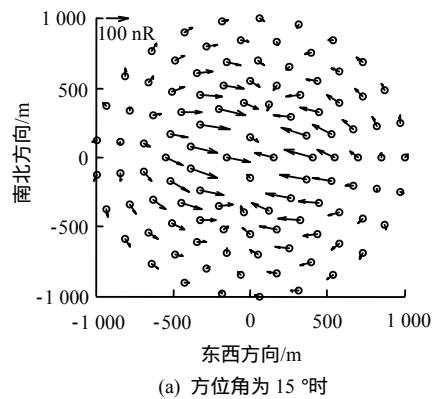


图 14 不同方位角时地面倾斜场
Fig.14 Inclined field produced when different azimuths

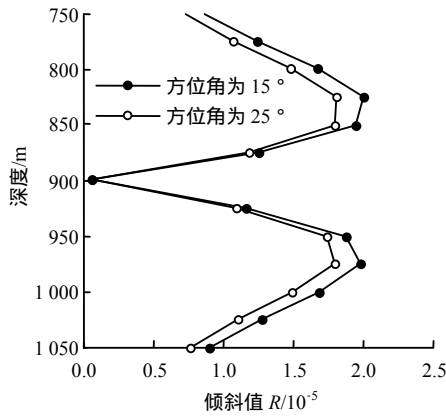
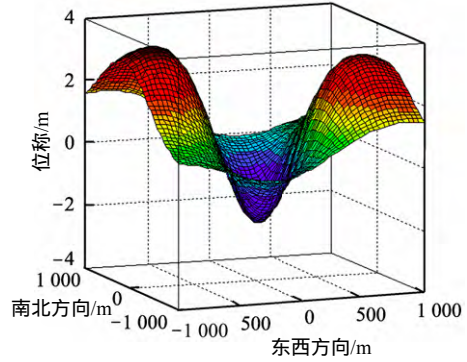


图 15 方位角变化前后的井下倾斜场值

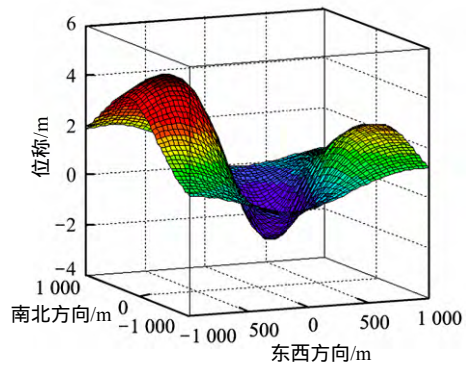
Fig.15 Values of downhole azimuth tilt field values before and after change of azimuth

4.2 裂缝倾角

裂缝倾角由 89°变为 84°时，会对地面倾斜场的形态产生很大的影响，整个倾斜场的对称性发生了改变如图 16 所示。图 17 中的地面垂向位移更能显示出这种形态上的变化。对于井下监测来说，倾斜场其形态和幅值差别并不是很大，如图 18 所示。分析可知裂缝的倾角对于地面监测方式来说影响较大，而对井下监测影响较小。



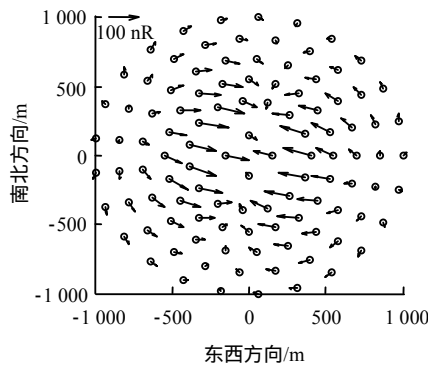
(a) 倾角为 89°时



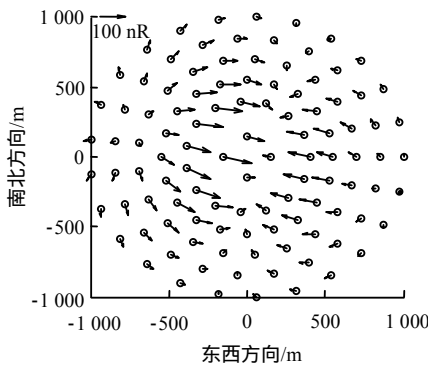
(b) 倾角为 84°时

图 17 不同倾角时的地面位移

Fig.17 Ground displacements at different dip angles



(a) 倾角为 89°时



(b) 倾角为 84°时

图 16 不同倾角时地面倾斜场

Fig.16 Ground tilt field at different dip angles

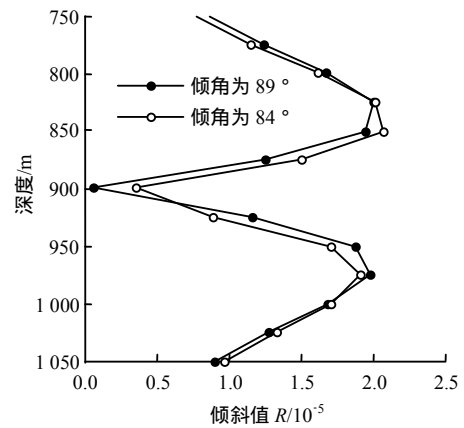


图 18 倾角变化前后的井下倾斜场值

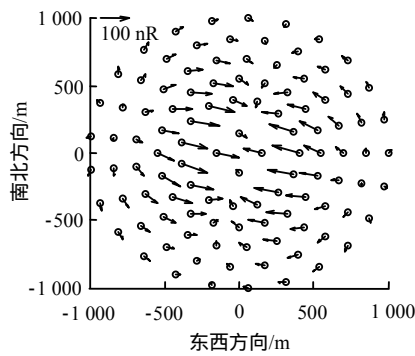
Fig.18 Downhole tilt field values before and after change of dip angle

4.3 裂缝中心深度

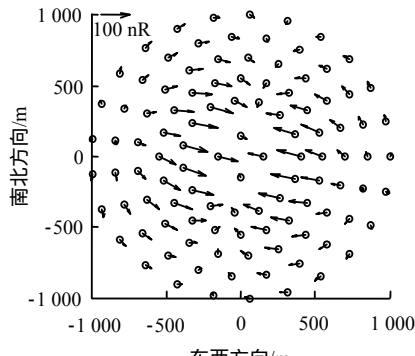
当裂缝中心深度由 900 m 变为 950 m 时，所产生的地面倾斜场分别如图 19 所示。从图中可见，倾斜场形态没有太大改变，只是幅度有微小变化，倾斜场最大值变化小于 10%。而对于井下监测而言，如图 20 所示，两曲线出现了明显的平移，可见井下监测对于裂缝的中心深度变化更为敏感。

4.4 裂缝尺寸

对于同一裂缝模型，若其体积不变，长×高由



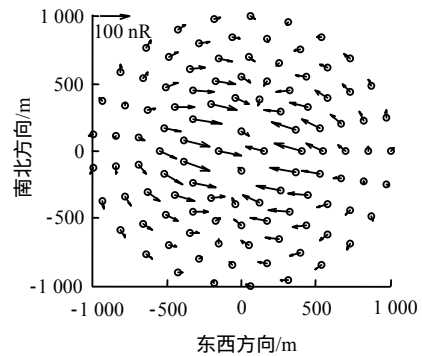
(a) 裂缝深度为 900 m



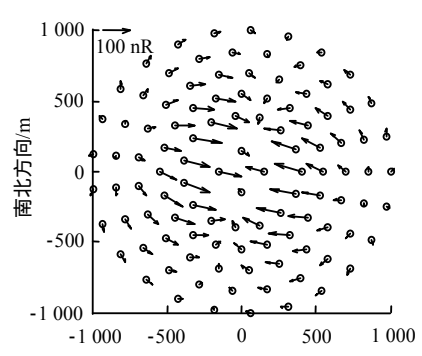
(b) 裂缝深度为 950 m

图 19 裂缝深度为 900 m 和 950 m 的地面倾斜场

Fig.19 Ground tilt field when crack depths is 950 m and 950 m



(a) 裂缝长x高为 120 m x 60 m 时



(b) 裂缝长x高为 90 m x 80 m 时

图 21 裂缝不同长和高时地面倾斜场

Fig.21 Ground tilt field when different crack lengths and heights

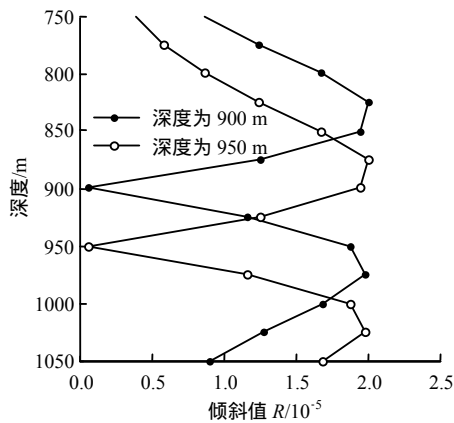


图 20 裂缝深度变化前后的井下倾斜场值

Fig.20 Downhole tilt field values before and after changes of crack depth

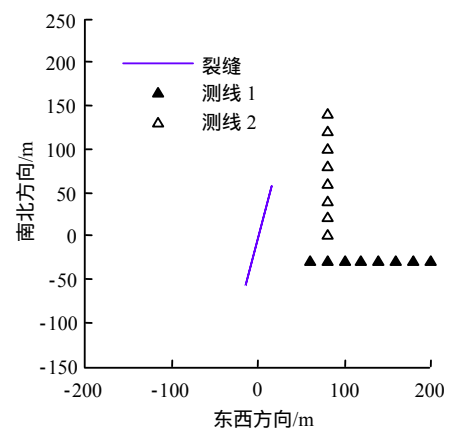


图 22 裂缝及观测井平面位置图

Fig.22 Location map of crack and observation well

120 m×60 m 变为 90 m×80 m 时 地面上的倾斜场形态及幅度变化较小, 只是裂缝地面投影附近倾斜场的形态略有变化, 倾斜场最大值的变化小于 0.4%, 如图 21 所示。

为了分析裂缝尺寸的变化对井下倾斜场的影响, 分别沿裂缝方向和垂直裂缝方向设置 8 口观测井, 如图 22 所示。当裂缝尺寸由 120 m×60 m 变为 90 m×80 m 时, 分析倾斜场的变化规律。沿裂缝走

向的观测井, 随着观测井距离裂缝由近及远, 裂缝尺寸变化对井下倾斜场的影响并不明显, 如图 23(a) 所示。垂直于裂缝方向的观测井, 随着距裂缝中心距离的增加, 裂缝尺寸的变化对于井下倾斜场的影响由小变大, 当距离大于 80 m 时, 影响又逐渐减小, 如图 23(b) 所示。从图中可见, 裂缝尺寸的变化对井下监测的倾斜场的影响相对复杂, 主要是由于井下监测相对于地面监测来说距离裂缝更近, 所以受裂缝尺寸变化影响会更大。

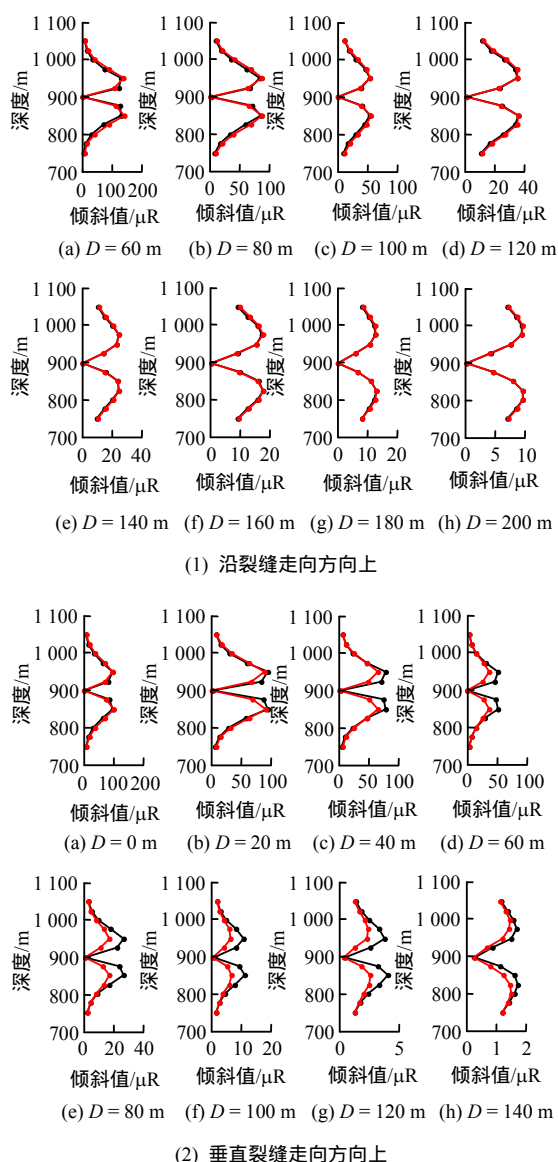


图 23 沿裂缝和垂直裂缝走向方向上不同观测井的倾斜场
Fig.23 Tilt field along fracture and vertical fracture in different doservation wells

5 结 论

(1) 地面倾斜场对于裂缝的方位角和倾角变化较为敏感，而对于裂缝的尺寸及裂缝中心深度变化不敏感。

(2) 井下倾斜场值对于裂缝的尺寸、裂缝中心深度变化较为敏感，而对于裂缝的方位角及倾角变化不敏感。

(3) 综合影响倾斜场因素的定量分析，建立如下正演方案，即利用地面监测数据来反演裂缝的方位角和倾角，并利用井下监测数据来计算裂缝的尺寸信息。

参 考 文 献

[1] 张景和, 孙宗顺. 地应力、裂缝测试技术在石油勘探

开发中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
ZHANG Jing-he SUN Zong-qi. Application of in-situ stress fracture test technology in petroleum exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.

[2] 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]. 石油与天然气, 2012, 30(1): 44 - 47.

JIA Li-chun, CHEN Mian, JIN Yan. Technical progress in overseas hydraulic fracture monitoring techniques for shale gas well[J]. Oil and Gas Field Development, 2012, 30(1): 44 - 47.

[3] 唐梅荣, 张矿生, 樊凤玲. 地面测斜仪在长庆油田裂缝测试中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(3): 107 - 110.

TANG Mei-rong, ZHANG Kuang-sheng, FAN Feng-ling. Application of surface tiltmeter fracture mapping in Changqing oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(3): 107 - 110.

[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.

ZHOU Jian, ZHANG Bao-ping, LI Ke-zhi, et al. Fracture monitoring technology based on surface tiltmeter in "well factory" fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(03): 71 - 75.

[5] GREEN A E, SNEDDON I N. The distribution of stress in the neighbourhood of a flat elliptical crack in an elastic solid[J]. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1950, 46: 159 - 163.

[6] WARPINSKI N R. Analytic crack solutions for tilt fields around hydraulic fractures[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B10): 23463 - 23478.

[7] WARPINSKI N R, BRANAGAN P T, PETERSON R E, et al. An interpretation of M-site hydraulic fracture diagnostic results[C]//SPE Rocky Mountain Regional/Low-Permeability Reservoir Symposium and Exhibition. Denver: [s.n.], 1998.

[8] WARPINSKI N R, GRIFFIN L G, DAVIS E J, et al. Improving hydraulic frac diagnostics by joint inversion of downhole microseismic and tiltmeter data[C]//2006 SPE Annual Technical Conference. San Antonio: [s.n.], 2006.

[9] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, 7: 195 - 202.

[10] OKADA Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(2): 1018 - 1040.

[11] KIRKPATRICK S, GELATT C D, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220: 671 - 680.