

断层对地应力场方向的影响机理

刘中春^{1,2}, 吕心瑞^{1,2}, 李玉坤³ 张 辉³

[1. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化 海相油气藏开发重点实验室, 北京 100083;
3. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580]

摘要:断层附近区域地应力方向相对于远离断层区域存在明显变化。前人利用实验及有限元模拟等手段研究了断层对其附近区域地应力方向的影响规律,但是缺少从力学机理角度解释这些规律的研究。研究总结了单一断层附近最大水平主应力方向变化规律,利用孔口问题弹性力学解析解揭示了这种规律的力学机理,并以某单元为例,研究了多断层区域最大主应力方向沿断层走向上的变化。结果表明,断层端部区域最大水平主应力朝着断层走向偏转,应用孔口问题弹性力学求解可以获得理论证明,塔河某单元的地应力计算结果也验证了这种规律。

关键词:椭圆孔口问题;地应力;断层;塔河油田

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

Mechanism of faults acting on in-situ stress field direction

Liu Zhongchun^{1,2}, Lyu Xinrui^{1,2}, Li Yukun³, Zhang Hui³

[1. *Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;*
2. *Marine Oil and Gas Reservoirs Development Key Laboratory, SINOPEC, Beijing 100083, China;*
3. *China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China*]

Abstract: Direction of in-situ stress near a fault is significantly different with that far away from the fault. Experimental approaches and finite element simulation method were previously used to study the patterns of faults acting on in-situ stress field direction, but these patterns were never explained in respect of mechanical mechanism. The regularity of elasticity mechanical mechanism were reveals by using the analytical solution of elliptic orifice problems based on study of the change patterns of the maximum horizontal principal stress direction near a single fault. And a block was taken as an example to study the change of the direction of maximum principal stress along fault strike in areas with multiple faults. The results show that the maximum horizontal principal stress deviates to the fault strike at the ends of faults. The phenomenon can be well explained with the aid of orifice problem of elastic mechanics analytical solution. The calculation results of in-situ stress in one unit of Tahe oilfield also verify the rule.

Key words: elliptic orifice problem, in-situ stress, fault, Tahe oilfield

地壳中较大范围内地应力场方向通常趋于一致,但在断层存在的周边区域水平最大主应力方向会发生较大变化。前人针对断层对周边地应力场方向影响规律做了大量工作。苏生瑞通过对国内外大量实测地应力资料的分析,分别研究了活动断裂和非活动断裂对地应力场的影响^[1-2]。孙礼健等用有限元方法模拟研究了断层规模、岩体和断层弹性模量、断层走向与区域最大水平主应力的夹角、边界应力比、断层几何形态等因素影响下断层附近应力场分布规律^[3]。彭学军等进行了断层区域应力场对围岩稳定性影响

研究^[4]。以往的研究多集中在断层对地应力场方向影响规律的描述上,未从力学角度对这种影响机理做深入研究。

本文在前人研究基础上,用有限元软件建立单个断层平面计算模型,进一步总结了断层对水平最大主应力方向的影响规律。运用椭圆孔口问题的弹性力学复变函数解,分析了断层附近水平最大主应力方向变化机理。最后针对塔河某区块地应力场反演结果,分析了多断层区域最大主应力方向沿断层走向上的变化规律。

收稿日期:2015-09-17;修订日期:2016-01-23。

第一作者简介:刘中春(1965—),女,博士、高级工程师,油田开发与提高采收率。E-mail:liuzc_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05014-003);中央高校基本科研业务费专项资金项目。

1 “单断层”对地应力影响规律

由于实施实际地应力方向测量代价高昂,针对断层附近地应力方向的测量数据较少,无法对其规律进行系统总结。而且实际地层中影响地应力方向因素众多,单靠实测值无法排除其他因素的干扰^[5]。因此,在对已有资料分析的基础上,利用数值模拟手段研究断层附近地应力方向的变化规律十分必要。为了逐步揭示断层对地应力场方向影响规律,本文先从单断层情况入手进行讨论。

1.1 断层平面应变模型建立

由于地层受上覆岩层压力,可以认为在水平挤压力下其垂直方向应变为零,因此为了更直观地研究断层附近地应力方向变化规律,采用平面应变模型建模。建立 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 平面方型地层区块模型,在区块中间建立延伸长度为 40 m ,最大断距为 2 m 的椭圆型断层,断层走向与区块边界呈 45° 夹角(图 1a)。

为了使计算结果更有针对性,本文在塔河油田缝洞型油藏条件下进行研究^[6-8]。根据塔河油田某区块地应力测试结果,该区块平均最大水平主应力为 120 MPa ,平均最小水平主应力为 90 MPa 。因此,在模型左右边界施加最大水平主应力 120 MPa ,上边界施加最小水平主应力 90 MPa 。为了使模型能够求解,将底部边界上下方向位移进行约束,建立的 ANSYS 几何模型及施加的边界条件如图 1b 所示。该区块油藏岩心实测周围岩体弹性模量为 45 GPa ,泊松比为 0.22 。断层物质多为填充物,物性较软,所以断层弹性模量设为 5 GPa ,泊松比设为 0.35 。选择平面应变单元进行网格划分,其中断层端部采用较精细的网格(图 1c)。该模型假设断层只产生微小位移,断层活动产生的次生应力场可以忽略。

1.2 计算结果分析

垂直主应力主要受上覆岩层压力控制,一般为竖直方向,断层的存在对垂直主应力方向几乎没有影响。最小水平主应力与最大水平主应力垂直,确定了最大水平主应力方向也就确定了最小水平主应力方向。因此,本文主要研究断层周围最大水平主应力的变化规律。

对上述模型进行求解,得到最大水平主应力大小和方向云图(图 2)。

从与最大水平主应力夹角为 45° 的断层模型的计算结果可以看出,断层内部以及断层边缘最大水平主应力较远离断层区域偏小,但是断层端部区域最大水平主应力出现明显应力集中现象。靠近断层端部区域最大水平主应力方向出现偏转,偏转趋势为沿着断层向断层端部偏转。断层内部最大水平主应力方向总是垂直于断层走向。

为了研究断层走向与最大水平主应力夹角是否影响断层附近区域最大水平主应力偏转程度,按照上述建模方法,分别建立断层与最大水平主应力方向夹角为 30° , 60° 以及 75° 的计算模型。求解后提取模型应力场方向,图 3 为断层走向与最大水平主应力方向不同夹角计算模型应力场方向结果。

从对比图 3a 至图 3d 结果可知,断层走向与最大水平主应力方向夹角 α 对断层附近应力场有显著影响: α 越大,断层对附近地应力场方向影响范围越大,其附近最大水平主应力方向朝断层端部偏转越明显。

2 “单断层”对附近区域地应力场方向影响的弹性力学解释

2.1 椭圆孔口问题弹性力学解

本文总结的上述规律已被很多学者的研究所证

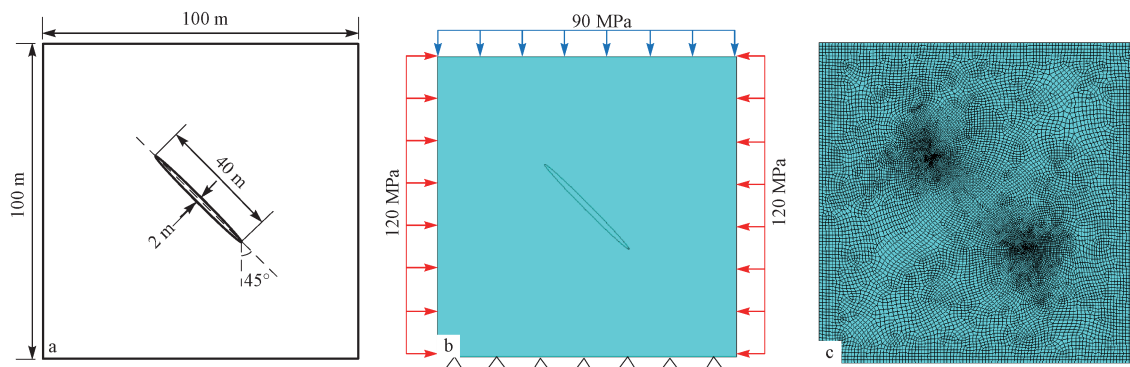


图1 单断层计算模型

Fig. 1 Model for single fault calculation

a. 模型尺寸; b. ANSYS 几何模型及边界条件; c. 有限元模型

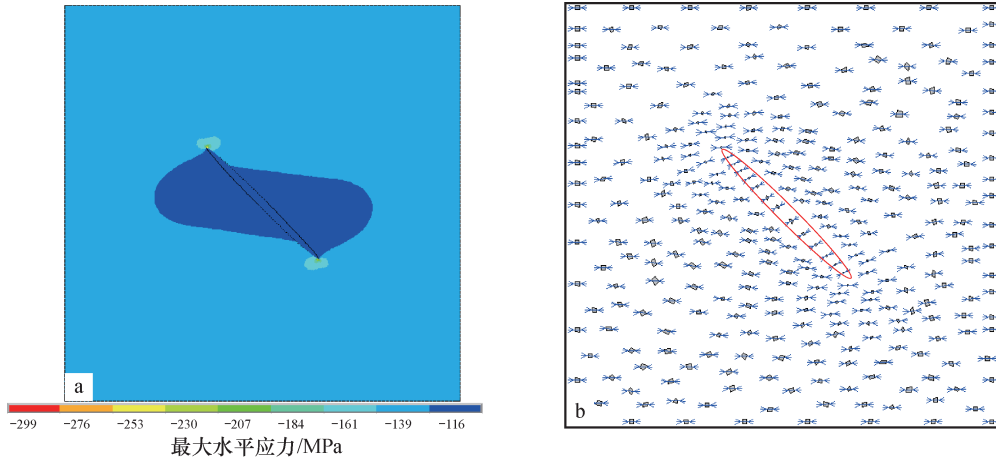


图2 最大水平主应力大小和方向

Fig. 2 Magnitude and direction of the maximum horizontal principal stress

a. 最大水平主应力大小; b. 最大水平主应力方向

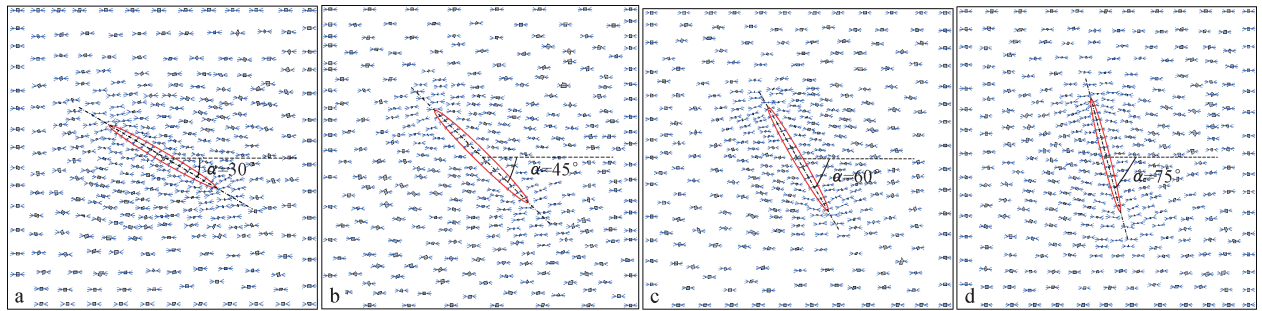


图3 断层走向与最大水平主应力方向夹角变化对断层附近应力场的影响

Fig. 3 Influence of the angle between fault strike and maximum horizontal principal stress direction on the stress field of fault adjacent

a. 30°夹角; b. 45°夹角; c. 60°夹角; d. 75°夹角

实^[9-12],如何解释这些规律是本文的研究重点。如果不考虑断层的填充情况,可以将断层在地层中的受力情况用无限大受压平板椭圆孔口平面应变模型来描述。对于椭圆孔口问题,弹性力学给出了复变函数解答。

如图4a所示的椭圆孔口平板受力模型,对其采用保角变换:

$$z = \omega(\zeta) \quad (1)$$

式中: z 为 z 平面复数; ω 为变换函数; ζ 为 ζ 平面复数。

把弹性体在 z 平面上所占的区域变换为 ζ 平面上的区域。这样,在 ζ 平面上令

$$\zeta = \rho(\cos\theta + i\sin\theta) = \rho e^{i\theta} \quad (2)$$

式中: ρ 为椭圆孔边缘一点和椭圆中心连线的长度; m ; θ 为椭圆孔边缘一点和椭圆中心连线与椭圆长轴的夹角, (°)。 ρ 和 θ 构成极坐标系。

则 ρ, θ 与 x, y 转换关系为:

$$x = R\left(\frac{1}{\rho} + m\rho\right)\cos\theta \quad (3)$$

$$y = -R\left(\frac{1}{\rho} - m\rho\right)\sin\theta \quad (4)$$

式中: x 和 y 分别为以椭圆长、短轴为直角坐标系中的横、纵坐标; $R = \frac{a+b}{2}$,其中 a 为椭圆长半轴长度, b 为

椭圆短半轴长度; $m; m = \frac{a-b}{a+b}$ 。

最终求得应力分量复变函数表达式为:

$$\sigma_\rho + \sigma_\theta = q\operatorname{Re} \frac{(2e^{2i\alpha} - m)\zeta^2 - 1}{m\zeta^2 - 1} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \sigma_\theta - \sigma_\rho + 2i\tau_{\rho\theta} \\ &= \frac{q(m\rho^4 + \zeta^2)\zeta^2}{\rho^4\left(m - \frac{\zeta^2}{\rho^4}\right)(m\zeta^2 - 1)} \left[2e^{2i\alpha} - m + m \frac{1 + m\zeta^2 - 2e^{2i\alpha}\zeta^2}{m\zeta^2 - 1} \right] + \\ & \frac{q}{\rho^2\left(m - \frac{\zeta^2}{\rho^4}\right)} \left[e^{-2i\alpha} - \frac{3e^{2i\alpha}\zeta^2 + me^{2i\alpha} - m^2 - 1}{m\zeta^2 - 1} \zeta^2 + \right. \\ & \left. \frac{e^{2i\alpha}\zeta^2 + me^{2i\alpha} - m^2 - 1}{(m\zeta^2 - 1)^2} 2m\zeta^4 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: σ_ρ 为极坐标中径向应力, Pa; σ_θ 为极坐标中环向应力, Pa; $\tau_{\rho\theta}$ 极坐标中切应力, Pa; q 为板两端拉力, Pa; $\operatorname{Re}(z)$ 为复数 z 的实部; α 为椭圆长轴与拉应力夹角, (°)。

将公式(2)代入公式(3)—公式(5), 分开实部和虚部, 可得 $\sigma_\rho, \sigma_\theta$ 和 $\tau_{\rho\theta}$ 的表达式, 但是该过程复杂不易求解。根据保角变换可知, 在椭圆孔边, ρ 方向为垂

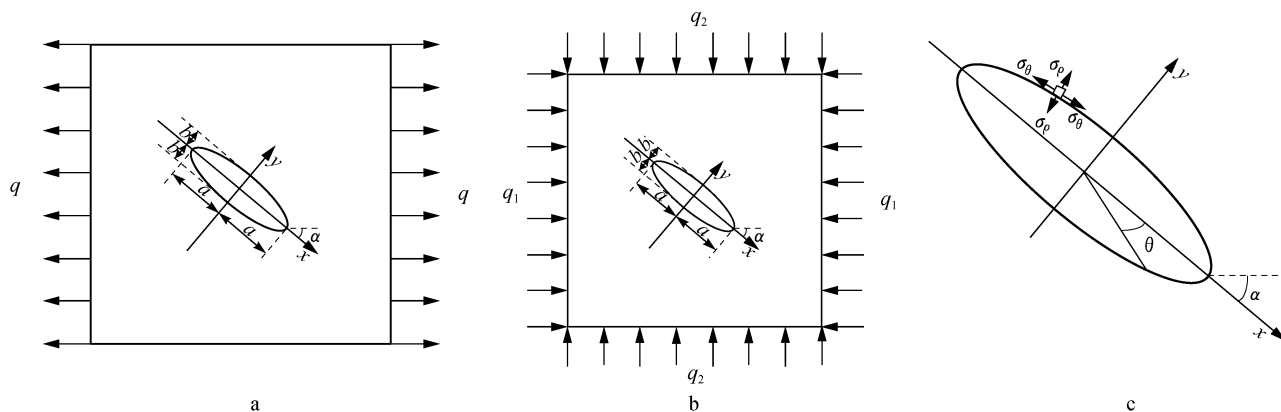


图4 椭圆孔口问题理论解分析

Fig. 4 Theoretical solution analysis of the elliptic orifice problem

a. 椭圆孔口平板受力模型; b. 无限大平面椭圆孔口四周受压模型; c. 孔边一点应力状态

直于椭圆曲线切线方向, θ 方向为椭圆曲线切线方向。则在孔边界上有 $\sigma_\rho = 0$, $\zeta = \cos\theta + i\sin\theta = e^{i\theta}$, 因此由(5)式得:

$$\begin{aligned}\sigma_\theta &= q \operatorname{Re} \frac{(2e^{2i\alpha} - m)\sigma^2 - 1}{m\sigma^2 - 1} \\ &= q \operatorname{Re} \frac{[2(\cos 2\alpha + i\sin 2\alpha) - m](\cos 2\theta + i\sin 2\theta) - 1}{m(\cos 2\theta + i\sin 2\theta) - 1} \\ &= q \frac{1 - m^2 + 2m\cos 2\alpha - 2\cos 2(\theta + \alpha)}{1 + m^2 - 2m\cos 2\theta}\end{aligned}\quad (7)$$

式中: σ 代指 $e^{i\theta}$ 。

公式(7)为单向受拉或受压无限大平板椭圆孔口环向应力计算公式, 根据叠加原理可求得如图4b四周受压无限大平板椭圆孔口环向应力计算公式:

$$\begin{aligned}\sigma_\theta &= q_1 \frac{1 - m^2 + 2m\cos 2\alpha - 2\cos 2(\theta + \alpha)}{1 + m^2 - 2m\cos 2\theta} + \\ &\quad q_2 \frac{1 - m^2 + 2m\cos 2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - 2\cos 2\left(\frac{3\pi}{2} - \theta - \alpha\right)}{1 + m^2 - 2m\cos 2(2\pi - \theta)}\end{aligned}\quad (8)$$

式中: q_1, q_2 分别为两个方向拉应力, Pa。

从图4c孔边一点应力状态可以看出, 在椭圆孔口边缘 $\tau_{\rho\theta} = 0$, 所以 σ_ρ 和 σ_θ 为两个主应力, 由于 $\sigma_\rho = 0$, 所以 σ_θ 是椭圆孔口最主要的应力。上文模拟得知, 断层附近应力场方向沿着断层边缘向端部偏转, 而椭圆孔口 σ_θ 方向正是椭圆边界切线方向。下面通过考察椭圆孔口 σ_θ 变化规律来研究 σ_θ 对断层附近应力场方向的影响程度。

2.2 椭圆孔口环向应力分析

对于图4所示力学模型, 如果不考虑椭圆断层填充物的影响, 根据公式(8)可计算出断层边缘环向应力分布。将 $q_1 = 120 \text{ MPa}$, $q_2 = 90 \text{ MPa}$, $m = 0.9$, $\alpha = \pi/2$ 代入公式(7), 计算不同 θ 下 σ_θ 的值, 并绘制出断层边缘一周环向应力曲线(图5)。

从图5可以看出, 如果不考虑椭圆断层填充物的影响, 断层边缘 σ_θ 变化非常剧烈。当 $\theta = 0^\circ (360^\circ)$ 或 180° 时, σ_θ 达到边界应力的近40倍; 当 θ 在 $40^\circ \sim 160^\circ$ 以及 $220^\circ \sim 340^\circ$ 范围内时, σ_θ 不到边界应力值的一半甚至接近于0。由此可知, 断层端部区域 σ_θ 非常大, 导致最大水平主应力方向趋于与 σ_θ 方向一致, 即沿着断层走向方向偏转。而远离端部边界处 σ_θ 很小, 不足以改变最大水平主应力方向, 因此远离断层端部边缘最大水平主应力几乎没有偏转。

为了研究最大水平主应力方向与断层走向夹角 α 对断层附近区域最大水平主应力偏转程度的影响, 考察不同 α 下断层端部点 σ_θ 值的变化(即 $\theta = 0$ 处)。根据公式(8), 代入参数: $q_1 = 120 \text{ MPa}$, $q_2 = 90 \text{ MPa}$, $m = 0.9$, $\theta = 0$, 由于模型对称性, 计算 α 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内各 σ_θ 值, 并绘制其变化曲线如图6。

可以看出, 最大水平主应力方向和断层走向夹角 α 对断层端部环向应力 σ_θ 有显著影响。随着 α 从 0° 增大到 90° , σ_θ 从 $3\,400 \text{ MPa}$ 的压应力增大到 $4\,600 \text{ MPa}$ 。表明 α 越大, 断层端部 σ_θ 越大, 因此最大水平主应力方向偏转程度越大。

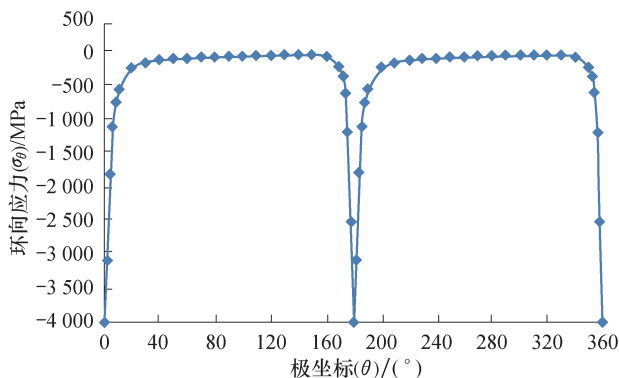
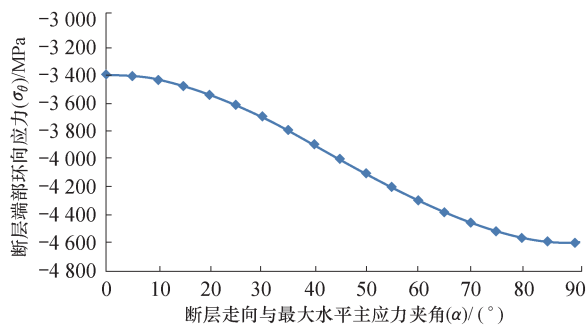
图5 断层边缘一周环向应力 σ_θ

Fig. 5 Circumferential stress curve of fault end

图6 断层端部 σ_θ 随 α 变化曲线Fig. 6 Circumferential stress σ_θ on end of fault vs. fault angle α

3 “多断层”区地应力模拟结果

为了分析多断层复杂地层中地应力方向的变化规律,在塔河某单元目的层地质模型(图7a)基础上,为便于边界条件的施加,在模型外部建立三维尺寸均大于目的层的立方体(图7b)。通过网格划分得到目的层和整体计算模型的网格如图7c和图7d。

以该单元水力压裂信息确定的部分井点地应力、成像测井信息确定的部分井最大水平主应力方向为依据,经过多次边界条件试算,最终设定模型的边界条件如图8所示。模型的西边界施加均布挤压载荷(115 MPa)和由南向北的切向力(10 MPa)。模型的南边界上施加均布挤压载荷(110 MPa)和由西向东的切向力(10 MPa)。模型的北边界上施加均布挤压载荷(110 MPa)和由东向西的切向力(10 MPa)。模型东边界约束东西向和南北向位移,模型的底部边界施加沿Z轴方向的位移约束,顶部边界施加等效岩体重力载荷112 MPa。

最终计算求得目的层最大水平主应力大小在110~130 MPa(图9a)。求得目的层整体最大水平主应力方向在NE50°~60°(以下角度皆指北东向)(图9b)。可以看出,断层端部普遍为最大水平主应力较大的位置,断层内部最大水平主应力较小,离断层较远的位置最大水平主应力方向趋于一致。

为了展示断层周边主应力变化情况,从而分析断层对水平最大主应力方向的影响,选取两条穿过多个

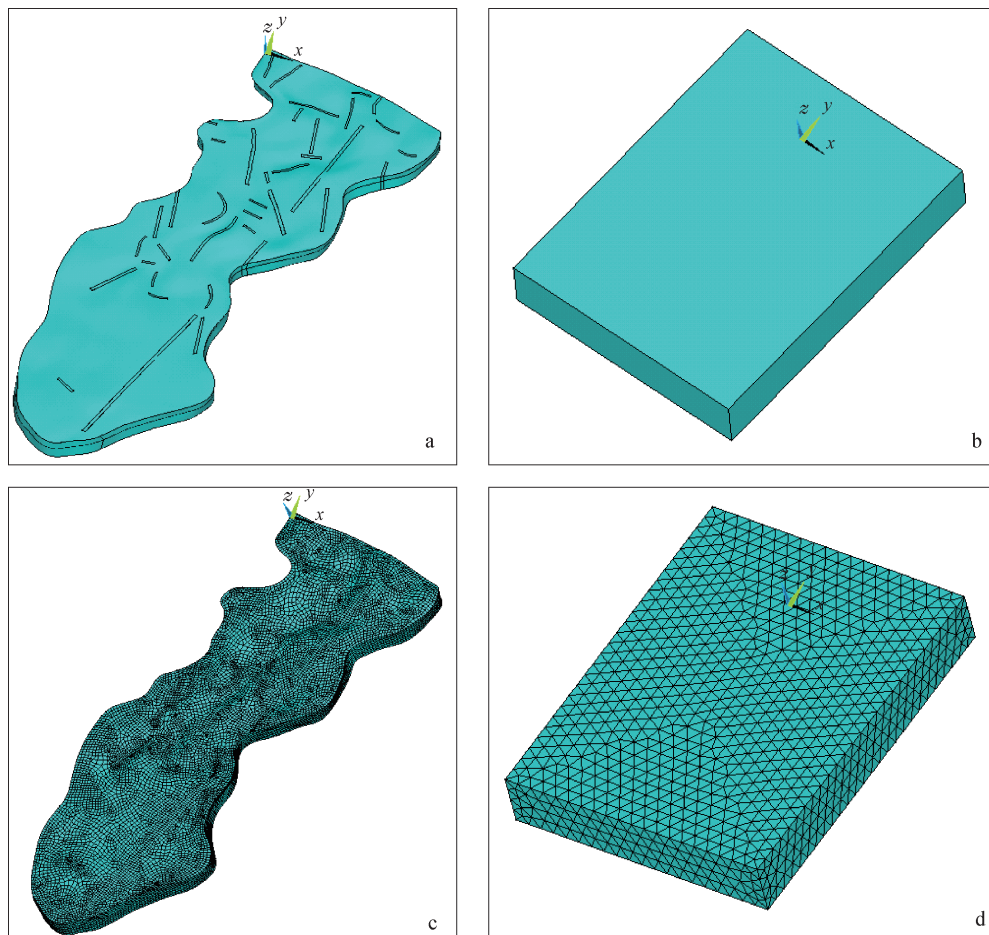


图7 塔河某单元地应力计算模型

Fig. 7 Stress calculation model for one unit of Tahe oilfield

a. 塔河某单元目的层模型;b. 整体计算模型;c. 目的层网格;d. 整体计算模型网格

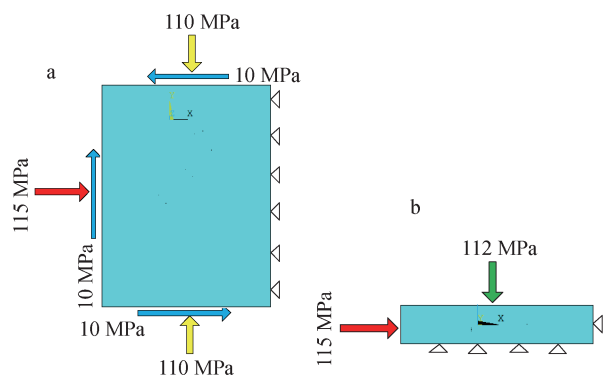


图8 模型边界条件

Fig. 8 Schematic map showing the boundary conditions of the model

a. 边界条件俯视图; b. 边界条件正视图

断层的路径(A_1-A_2, B_1-B_2),如图9c所示。其中路径 A_1-A_2 穿过断层1—4,路径 B_1-B_2 穿过断层5—9。提取路径上若干个点的最大水平主应力方向数据,绘制出这些点沿着路径的最大水平主应力方向变化曲线(图10)。

通过分析路径 A_1-A_2, B_1-B_2 上若干点的最大水平主应力变化方向曲线(图10),可以看出,路径上点的最大水平主应力方位在断层位置均出现极值,表明断层对其附近点的最大水平主应力方向有显著影响。分析断层走向与最大水平主应力方位变化可以看出,③号和⑦号断层附近位置处最大水平主应力方向与正北向夹角略大于整体区域,其余断层处最大水平主应力方向与正北向夹角均小于整体区域。分析其原因

可知,③号和⑦号断层走向与正北方向夹角大于整体区域最大水平主应力方向与正北方向夹角,由上文结论可知,断层附近最大水平主应力方向趋于与断层走向一致,因此③号和⑦号断层附近位置处最大水平主应力方向与正北方向夹角偏大。其余断层走向与正北方向夹角小于整体区域最大水平主应力方向与正北方向夹角,其附近区域最大水平主应力方向要趋于与断层走向一致,因此与正北方向夹角要减小。

4 结论

1) 若忽略断层位移或断层活动产生的次生应力场的影响,单断层附近应力场方向分布规律为:靠近断层端部区域最大水平主应力方向沿着断层向断层端部偏转,断层内部最大水平主应力方向总是垂直于断层走向。断层走向与最大水平主应力方向夹角 α 越大,断层对附近地应力场方向影响范围越大,其附近最大水平主应力方向朝断层端部偏转越明显。在多断层区域,断层附近最大水平主应力方向趋于与断层走向一致。

2) 通过对孔口问题弹性力学解析解分析可知:断层端部区域 σ_θ 很大,使最大水平主应力方向沿着断层走向方向偏转。而远离断层端部边界处 σ_θ 很小,不足以改变最大水平主应力方向,因此远离断层端部边缘最大水平主应力几乎没有偏转。最大水平主应力方向和断层走向夹角 α 越大,断层端部 σ_θ 越大,故最大水平主应力方向偏转程度越大。

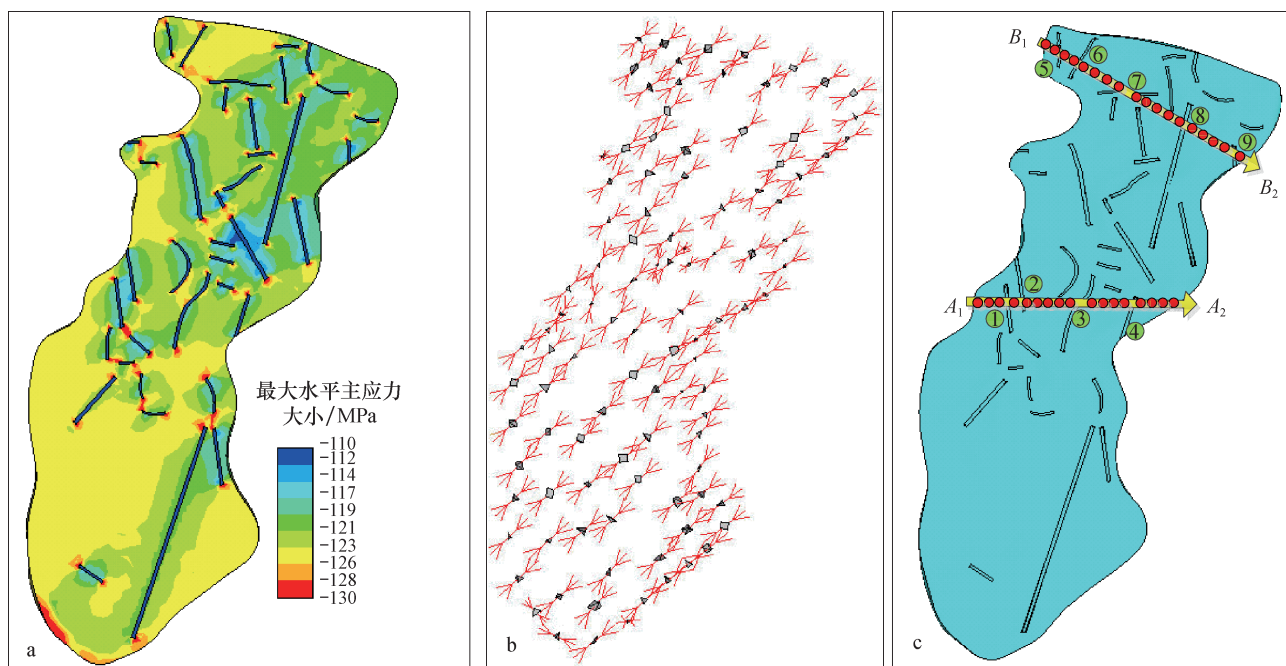


图9 模型计算结果

Fig. 9 Calculation results of the model

a. 最大水平主应力大小; b. 最大水平主应力方向; c. 截取路径及选取点

(注: c 中箭头表示路径方向; 红色点为选取的点位; ①, ②, ③等为断层编号。)

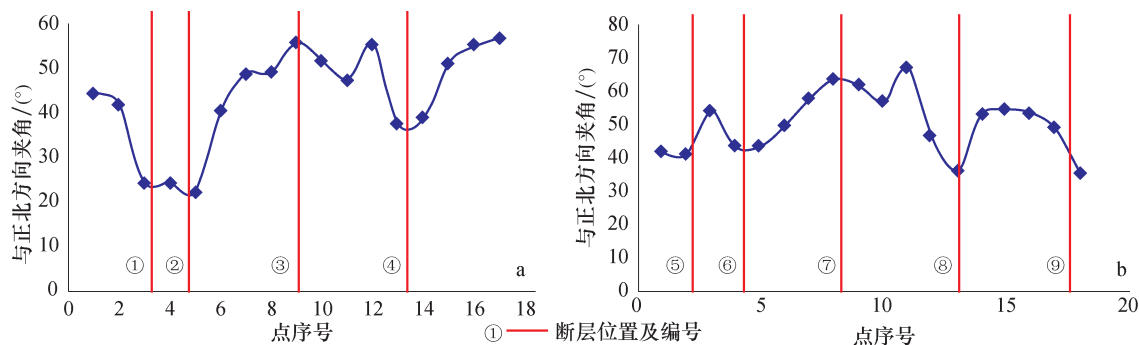


图10 截取路径上最大水平主应力变化

Fig. 10 Changes of maximum horizontal principal stress on the interception paths

a. 路径 A_1-A_2 上水平最大主应力变化; b. 路径 B_1-B_2 上水平最大主应力变化

参 考 文 献

- [1] 苏生瑞. 断裂构造对地应力场的影响及其工程意义[D]. 成都理工大学, 2001.
Su Shenrui. The influence of fracture structure on the stress field and its engineering significance [D]. Chengdu Institute of Technology, 2001.
- [2] 苏生瑞. 岩石物理力学性质对断裂附近地应力场的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 370-377.
Su Shenrui. The influence of rock physical and mechanical properties on the stress field near the fault [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 370-377.
- [3] 孙礼健, 朱元清. 断层端部及附近地应力场的数值模拟[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(2): 7-12.
Sun Lijian, Zhu Yuanqing. Numerical simulation of the stress field around the fault tip and the fault [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(2): 7-12.
- [4] 倪兴华. 地应力研究与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007, 1.
Ni Xinghua. Ground stress research and application [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007, 1.
- [5] 陈彭年. 世界地应力实测资料汇编[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
Cheng Pengnian. Compilation of measured data of the ground stress in the world [M]. Beijing: Seismological Press, 1990.
- [6] 金强, 田飞, 鲁新便, 等. 塔里木油田奥陶系古径流岩溶带垮塌充填特征[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 729-755.
Jin Qiang, Tian Fei, Lu Xinbian, et al. Characteristics of collapse breccias filling in caves of runoff zone in the Ordovician karst in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 729-755.
- [7] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔里木地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347-355.
Lu Xinbian, Hu Wenge, Wang Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347-355.
- [8] 黄太柱, 蒋华山, 马庆佑. 塔里木盆地古生界碳酸盐岩油气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 780-787.
Huang Taizhu, Jiang Huashan, Ma Qingyou. Hydrocarbon accumulation characteristics in Lower Paleozoic Carbonate reservoirs of Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 780-787.
- [9] 马启超. 工程岩体应力场的成因分析与分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 1986, 5(4): 329-342.
Ma Qichao. Cause analysis and distribution law of stress field for engineering rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1986, 5(4): 329-342.
- [10] 刘美平. 断层附近地应力分布规律及巷道稳定性分析[D]. 山东科技大学, 2009, 6.
Liu Meiping. The crustal stress distribution law and the roadway stability analysis near the fault [D]. Shandong University of Science and Technology, 2009, 6.
- [11] 罗林, 向宇, 王启智. 拉伸偏心椭圆孔板的应力集中系数表达式[J]. 应用数学和力学, 2012, 33(1): 113-123.
Luo Lin, Xiang Yu, Wang Qizhi. The expression of stress concentration factor of the eccentric elliptical hole plate [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2012, 33(1): 113-123.
- [12] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011, 1.
Xu Zhilun. Elastic mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011, 1.

(编辑 张玉银)