

Kingfisher 区块过断层地应力变化规律及井壁稳定性

邓金根¹, 林海¹, 胡连波¹, 陈子剑¹, 袁俊亮¹, 刘兆年²

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中海油研究总院, 北京 100027

摘要 Kingfisher 区块断层发育, 钻穿断层时井壁坍塌、钻井液漏失等复杂情况频发。根据孔隙弹性理论及 Mohr-Coulomb 强度准则, 分析了正断层对地应力的影响规律, 结合断层对地层力学性质的影响建立过断层时井壁稳定预测模型。结果表明, 过正断层后垂直断层迹线水平应力明显增加; 断层附近发育断层破碎带, 使地层强度降低、坍塌压力升高; 过断层时的安全泥浆密度窗口大大减小, 为防止断层破碎带发生漏失, 应以最小水平主应力作为安全泥浆密度窗口的上限; 合理的钻井液密度及优良的封堵性是保证安全钻井的关键。研究结果与 Kingfisher 区块实钻情况吻合, 对 Kingfisher 区块过断层时的钻井安全具有指导意义。

关键词 断层; 地应力; 井壁稳定; 安全泥浆密度窗口

中图分类号 TE21

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.23.009

Variations of *In-situ* Stress and Wellbore Stability for Kingfisher Block Through the Fault

DENG Jingen¹, LIN Hai¹, HU Lianbo¹, CHEN Zijian¹, YUAN Junliang¹, LIU Zhaonian²

1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China

Abstract The development of faults is common in the Kingfisher block, causing frequently complicated situations, such as the wellbore collapse, the drilling fluid leakage and so on, in the process of drilling through faults. According to the pore elastic theory and the Mohr-Coulomb strength criterion, this paper analyzes the influence of the normal fault on the *in-situ* stress, which, combined with the influence of the faults on the formation and mechanical properties, is used finally to establish a prediction model of wellbore stability through faults. The results show that the horizontal stress perpendicular to the fault trace increases significantly through the normal fault; meanwhile, the fault fracture zone develops near the fault, and reduces the formation strength and increases the collapse pressure. The safe mud density window of the drilling fluid is greatly reduced with the fault. In order to prevent the drilling fluid leakage due to the fault fracture zone, it is necessary to consider the minimum horizontal principal stress as the upper limit of the safe mud density window. The reasonable drilling fluid density and the good sealing property of the drilling fluid are the key of the safety of drilling. The results of the study provide some guidance for the solid drilling situation of the Kingfisher block and the drilling safety of the Kingfisher block through the fault.

Keywords fault; *in-situ* stress; wellbore stability; safe mud density window

0 引言

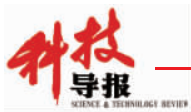
断层是断块油气藏成藏不可缺少的条件, 对其形成过程起着重要作用, 同时断层作为软弱结构面导致了地下岩体的不连续, 从而影响岩体力学性质和地应力分布^[1]。地应力的

大小与方向对各种岩土工程十分重要, 是井身结构设计中破裂压力的预测及井壁稳定性研究的必要条件。另外储层压力衰竭过程中, 理解地应力和孔隙压力的关系是出砂预测的重要考虑因素。地应力测量比较昂贵, 有时仅会根据地质构造估

收稿日期: 2013-03-01; 修回日期: 2013-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174219); 国家科技重大专项(2011ZX05009-005)

作者简介: 邓金根, 教授, 研究方向为石油工程与岩石力学, 电子信箱: dengjingen@163.com



算地应力的大小和方向。成岩作用与断层等地质构造的扰动效应叠加导致断层附近地带的地应力状态极其复杂,且断层越发育,断层构造格架越复杂,应力场的变化就越复杂,搞清地应力分布规律是保持井壁稳定、高效钻井的重要前提^[2,3]。Kingfisher 油田主力储层为 Okuka 层,沉积类型多为河流和三角洲,储层为多期叠置河道、三角洲砂岩,物源方向主要为北东向。Kingfisher 区块过断层已钻井在钻井过程中均有复杂情况发生且普遍较为严重,6 口已钻井在钻井过程中井径扩大现象非常严重,其中 2 口井存在缩径现象;各井起下钻过程中均出现了不同程度的阻卡现象,需要不断的进行划眼、倒划眼作业,严重影响了钻井作业的顺利进行,部分井段发生钻井液漏失。本文利用 KF-1 井具体信息,就过断层前后应力状态、安全密度窗口进行分析研究,预防可能出现的井壁坍塌等井壁失稳问题,减少井下复杂事故的发生。

1 地应力理论预测模型

现有文献中地应力的理论预测一般根据特定深度的被动盆地或者 Anderson 断层应力结构假设条件。被动盆地预测地应力的假设前提是沉积过程中,地层无横向应变且水平应力大小相等^[4]。在此假设条件下地应力产生是沉积物或岩石的重力载荷造成的。但不同深度盆地或油藏真实应力存在各向异性,直井中观察到井壁坍塌也说明水平应力不相等,确定水平地应力大小时需要考虑应力的各向异性,因此利用“被动盆地”预测水平最小应力存在较大的误差。Anderson 断层模型被地质学和地球物理学广泛用于地应力大小的预测,它依据 Mohr-Coulomb 准则下岩石的剪切受力状态^[5]。

1.1 正断层对地应力的影响

Anderson 断层分类依据 3 个主地应力 $\sigma_1, \sigma_H, \sigma_h$ 的相对大小^[6]。正断层控制的断块区域对地应力的影响取决于垂直方向的上覆岩层压力 σ_v , 上覆岩层压力和地层构造应力产生水平方向的应力,同时断层摩擦力也是构造应力的组成部分,需要克服摩擦力断层才能移动。假设断层岩石是弹性体,根据 Mohr-Coulomb 准则,作用在断层面上水平最小地应力 σ_h , 平行于断层面水平最大地应力 σ_H 可分别表示为^[4]

$$\sigma_H = \sigma_v \left(\frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} \right) + P_p \left(\frac{2 \sin\phi}{1 + \sin\phi} \right) - \frac{2C \cos\phi}{1 + \sin\phi} \quad (1)$$

$$\sigma_h = \sigma_v \left(\frac{2\mu}{1 + \sin\phi} \right) + P_p \left(1 - \frac{2\mu}{1 + \sin\phi} \right) - \mu \frac{U_{cs}}{K_p} \quad (2)$$

式中, σ_H, σ_h 分别为水平最大、最小地应力, MPa; σ_v 为上覆岩层压力, MPa; P_p 为地层孔隙压力, MPa; μ 为地层泊松比; C 为内聚力, MPa; U_{cs} 为岩石单轴抗压强度, MPa; ϕ 为断面摩擦角; $K_p = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$, Mohr-Coulomb 被动系数。

假设无内聚力,选择不同的泊松比、断面摩擦角,结合式(1)、式(2),对某一特定深度 $\sigma_H/\sigma_v, \sigma_h/\sigma_v$ 的变化规律进行分析。这里选取上覆岩层压力梯度 $G_0 = 0.0227 \text{ MPa/m}$, 地层孔隙压力梯度为 0.00981 MPa/m 。不考虑内聚力,计算结果如图 1。

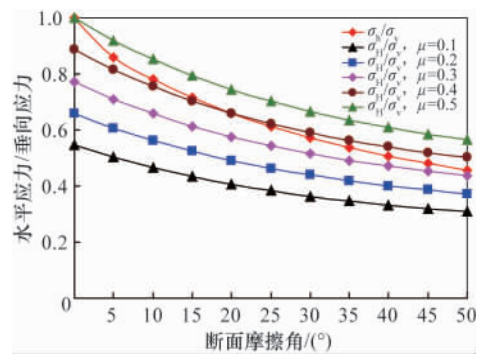


图 1 正断层应力比与泊松比、断面摩擦角关系曲线
Fig. 1 Relations among the normal fault stress ratio, the Poisson's ratio and the friction angle

对于正断层,断层水平应力是断面摩擦角和泊松比的函数。从上图 1 可以看出, σ_H/σ_v 曲线把整个区域分成两个部分。 σ_H/σ_v 曲线上方区域,满足水平最小主应力方向和 Anderson 断层系统所要求方向一致,即作用在断层面的水平应力就是最小水平主应力。 σ_H/σ_v 曲线下方区域 $\sigma_H > \sigma_h$, 对于较低泊松比和断面摩擦角区域来说更加明显,这说明过断层面的地层水平最小主应力变为平行于断层面的水平应力。

有关学者就正断层形成前后的垂直于断层迹线的水平应力和垂向应力之间的比值进行了计算^[7]。正断层形成前主应力分布如图 2 所示。

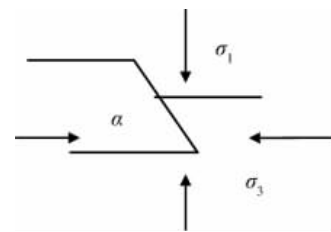


图 2 正断层主应力分布
Fig. 2 Principal stress distribution of normal fault

垂向应力即为上覆岩层压力, $\sigma_1 = \sigma_v = \rho g z$, 垂直于断层迹线水平应力 $\sigma_3 = \sigma_h$, 根据 Mohr-Coulomb 理论确定应力关系

$$\sigma_1 = U_{cs} + \sigma_3 \tan^2 \alpha \quad (3)$$

其中, α 为断裂面上的法线方向与最大主应力方向间的夹角, ($^\circ$); ρ 为岩石密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; z 为垂直深度, m ; 此时垂直于断层迹线的水平应力 σ_h (最小主应力) 和垂向的上覆岩层压力 σ_v (最大主应力) 之间的比值 K_a 表示为

$$K_a = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \left(1 - \frac{U_{cs}}{\sigma_v} \right) \frac{1}{\tan^2 \alpha} = \left(1 - \frac{U_{cs}}{\rho g z} \right) \cot^2 \alpha \quad (4)$$

当形成断层后地层处于稳定状态时,此时的垂直于断层迹线的水平应力 σ'_h 和垂向的上覆岩层压力 σ'_v 均可沿断层面分解成平行于和垂直于断层面的分力,如图 3 所示。

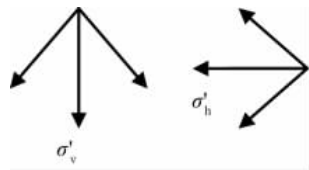


图 3 应力分解

Fig. 3 Decomposition of stress

断层面的平行方向、垂直方向受力平衡,可得到:

$$\sigma'_v (\sin\alpha - f \cos\alpha) = \sigma'_h (\cos\alpha + f \sin\alpha) \quad (5)$$

其中, σ'_v , σ'_h 分别是断层稳定时的垂向的上覆岩层压力和垂直于断层迹线的水平应力, MPa; f 为地层沿断面滑动时的摩擦系数, $f = \tan\phi$ 。

因此,可求得此时垂直于断层迹线的水平应力(最小主应力)和垂向的上覆岩层压力(最大主应力)之间的比值

$$K_a^* = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = \tan(\alpha - \phi) \quad (6)$$

假设垂直应力不变,正断层活动停止时垂直于断层迹线的水平应力 σ'_h 与断层发生前该水平应力 σ_h 的比值用 K 表示,即 $K = \sigma'_h / \sigma_h$,可分为以下两种情况。

当断层上盘沿断面处于平衡下限时,有

$$K = \frac{\sigma'_h}{\sigma_h} = \frac{\tan(\alpha - \phi) \tan^2 \alpha}{1 - U_{cs} / \rho g z} \quad (7)$$

当断层上盘沿断面处于平衡上限时 ($\phi=0$),有

$$K = \frac{\sigma'_h}{\sigma_h} = \frac{\tan^3 \alpha}{1 - U_{cs} / \rho g z} \quad (8)$$

选定特定的 α, ϕ 值,计算可以得到 K 值在不同的 α 下随断面摩擦角的变化规律,计算结果如图 4 所示。

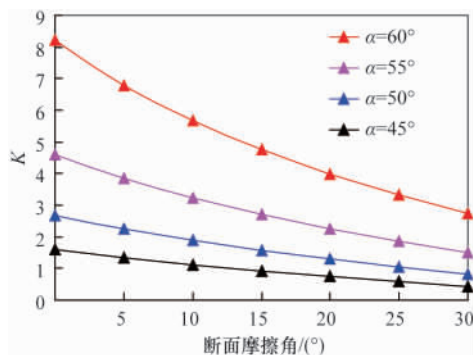


图 4 K 值与断面摩擦角关系曲线

Fig. 4 Relation between K and fault friction angle

从图 4 可知,过正断层后垂直于断层迹线的水平应力增加,增加程度与正断层倾角、断面摩擦角有关。同一个断层倾角条件下,断面摩擦角越小,其对应的垂直迹线的水平应力值越大;同一个断面摩擦角下,垂直迹线的水平应力随着断层倾角增加而增大。

1.2 断层对 Kingfisher 区块地层力学性质的影响

根据区域地质信息,该边界断层不是拉伸断裂形成,据

此推断,断层面附近无巨大破碎带。同时,此处为高角度断层,沉积覆盖前为长期裸露的高角度断层面,断裂形成的破碎物及强风化物易在重力作用下塌落。断裂面主要弱风化物,其力学性质不可能完全丧失。对于长期裸露在外的地层,岩石会发生风化,使岩石矿物组成和结构发生改变,从而影响岩块的物理力学性质(强度降低、抗变形性能减弱、空隙率增大、渗透性加大)。根据《岩土工程勘察规范》对硬质岩石按波速指标的风化分级,Kingfisher 区块断层附近应属于中等风化,断层面岩石强度按折减系数法进行评估时,折减系数可按中等风化系数的中值计算,为 0.6。

2 Kingfisher 区块过断层安全泥浆密度窗口

Kingfisher 构造所在的 Block 3A 区块位于乌干达西北部的 Albert 地堑的南部,构造由东南向西北延伸进 Albert 湖。Albert 盆地主要受正断层控制,南部圈闭以边界断层控制的半背斜为主。Kingfisher 区块所在的 Albert 盆地是由地层断裂形成的,形成盆地的第一次断裂发生于晚渐新世,二期断裂发生于上新世到更新世,盆地的边缘为变质岩,盆地内的沉积物为从中新世到更新世的沉积岩。

断层对地层孔隙压力、地应力都有影响。断层面附近的孔隙压力很难进行准确预测,当钻遇断层高压时,由于没有充足的压井准备,很容易引起溢流和井涌。断层的后期活动会对上下盘造成不同的影响,使断层附近的地应力状态变得非常复杂^[8]。断层形成后沉积作用产生附近应力,有可能使地层坍塌压力突变,预防不及可能会造成井壁坍塌,引起井下复杂情况发生。Kingfisher 区块过断层安全泥浆密度窗口计算以 KF-1 井为例。KF-1 井是直井,对于直井坍塌压力计算依据 Mohr-Coulomb 准则。坍塌压力密度、破裂压力密度为^[9-10]

$$\rho_m = \frac{\eta(3\sigma_{tr} - \sigma_h) - 2CR + \beta P_t(R^2 - 1)}{(R^2 + \eta)H} \times 100 \quad (9)$$

$$\rho_f = \frac{3\sigma_{tr} - \sigma_{tr} - \beta P_t + S_t}{H} \times 100 \quad (10)$$

其中, ρ_m 为坍塌压力密度, g/cm^3 ; ρ_f 为破裂压力密度, g/cm^3 ; β 为有效应力系数; η 为应力非线性修正系数; S_t 为岩石的抗拉强度, MPa; H 为井深, m; $R = \cot(45^\circ - \frac{\phi}{2})$ 。由于破坏带裂缝发育,泥浆密度过高将导致漏失,确定裂缝漏失压力,其计算方法主要依据钻井液性能判断地层中裂缝重启即漏失发生的临界条件。

对于有极好密封能力的钻井液,漏失压力的计算方法为

$$P_w = \max\{|\sigma_h|, | -3\sigma_{tr} + \sigma_{tr} - P_t |\} \quad (11)$$

对于完全没有封堵能力的钻井液漏失压力的计算方法为

$$P_w = \sigma_h \quad (12)$$

其中, P_w 为地层漏失压力。

KF-1 井过断层安全泥浆密度窗口计算结果如图 5 所示。

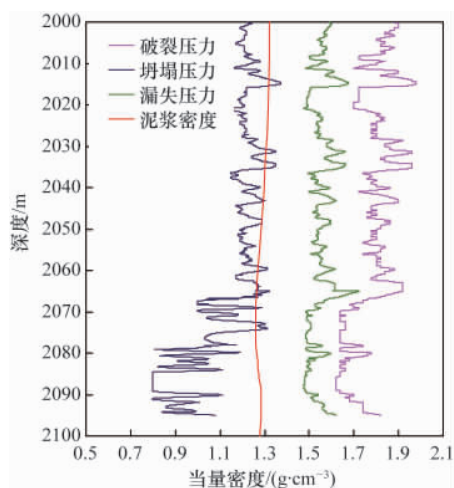
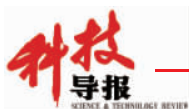


图5 KF-1井过断层安全泥浆密度窗口

Fig. 5 Safe mud density window of well KF-1 through fault

从图5可知,KF-1井过断层附近坍塌压力较高且处于波动状态,而使用的泥浆密度偏低,将导致井壁坍塌造成扩径、阻卡复杂现象。过断层后破裂压力、漏失压力均比较高,在钻井过程中压裂地层的可能性不大。Kingfisher区块上部地层较为疏松,下部位松软到中硬地层的互层,尤其是泥岩地层软硬交错,岩性描述中显示部分泥页岩为块状、易分裂的具有一定的结构特征,钻井时软硬泥岩相互影响,会严重影响该区块钻井的井壁稳定性。因此安全泥浆密度窗口应选择地层压力和坍塌压力两者的较大值与漏失压力之间。

3 结论

(1) 正断层停止滑动时,断层有可能引起水平地应力发生改变,垂直于断层迹线的水平应力将超过原平行于断层迹线的水平应力,成为新的中间主应力,原来的中间主应力就变为新的最小主应力。

(2) Kingfisher区块过断层地层上覆岩层压力为最大主地应力,过断层后新的垂直于断层迹线的水平应力与原来的水平应力相比,明显增加,且基底层位坍塌压力波动性较大,这说明断层是造成Kingfisher区块井壁失稳的主控因素。

(3) Kingfisher区块过断层破裂压力、漏失压力均比较高,压裂地层的可能性不大。安全泥浆密度窗口的下限为地

层孔隙压力和坍塌压力两者的较大值,上限为漏失压力,断层下部地层要提高泥浆密度,防止井壁坍塌,同时优化钻井液性能,增强钻井液的封堵性。

参考文献 (References)

- [1] 苏生瑞. 断裂对地应力场影响及其工程意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 296-296.
Su Shengrui. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 296-296.
- [2] 沈海超, 程远方, 王京印, 等. 断层对地应力场影响的有限元研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(2): 34-37.
Shen Haichao, Cheng Yuanfang, Wang Jingyin, et al. Petroleum Geology Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(2): 34-37.
- [3] 程远方, 沈海超, 赵益忠, 等. 复杂断块构造的地应力场研究 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(5): 15-20.
Cheng Yuanfang, Shen Haichao, Zhao Yizhong, et al. Journal of Xian Shiyou University: Natural Science Edition, 2008, 23(5): 15-20.
- [4] Addis M A, Last N C, Yassir N A. Estimation of horizontal stresses at depth in faulted regions and their relationship to pore pressure variations [J]. SPE Formation Evaluation, 1996, 11(1): 11-18.
- [5] Rubey W W, Hubbert M K. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting[J]. Geological Society of America Bulletin, 1959, 7(2): 115-166.
- [6] 王珂, 戴俊生. 地应力与断层封闭性之间的定量关系[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 74-81.
Wang Ke, Dai Junsheng. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 74-81.
- [7] 孙宗顺, 张景和. 地应力在地质断层构造发生前后的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3964-3969.
Sun Zongqi, Zhang Jinghe. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3964-3969.
- [8] Paul P, Zoback M. Wellbore stability study for the SAFOD borehole through the San Andreas fault[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, USA, September 24-27, 2006.
- [9] 邓金根, 张洪生. 钻井工程中井壁失稳的力学机理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
Deng Jingen, Zhang Hongsheng. The mechanics mechanism of wellbore instability in drilling engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [10] 邓金根, 程远方, 陈勉, 等. 井壁稳定预测技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
Deng Jingen, Cheng Yuanfang, Chen Mian, et al. Wellbore stability prediction technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.

(责任编辑 刘志远)

SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。