

山前高陡构造节理围岩的井壁失稳机制研究

邹灵战¹, 邓金根¹, 徐显广², 李维轩³

(1. 中国石油大学 石油天然气工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油集团公司 钻井工程技术研究院, 北京 100097;

3. 新疆油田公司勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 我国西部山前的高陡构造油气蕴藏丰富, 但剧烈构造运动形成的节理岩体在钻井过程中容易出现井壁失稳问题, 严重制约了勘探开发效益的提高。深入研究节理岩体井壁失稳机制对解决这一难题具有重要意义。结合中国天山山脉南缘霍尔果斯构造的地质情况, 利用 RFPA^{2D}-flow 软件建立山前构造节理岩体的井眼模型, 探讨了井眼周围应力场和渗流场的特点, 模拟了井壁围岩失稳坍塌的过程, 讨论了稳定井壁的对策。井壁周围的应力集中出现在水平最小主应力方位上, 而渗流则主要发生在水平最大主应力方位的节理面上, 随着渗流作用节理面上流体压力逐渐升高, 并导致围岩在节理面上发生拉张破坏而坍塌, 井壁坍塌主要出现在水平最大主应力方位上。这一结果合理解释双井径测井曲线上井眼长轴发生翻转的现象。研究表明, 降低节理面的渗流速度能够明显地减轻节理围岩的失稳, 说明加强钻井液封堵性能对稳定井壁具有针对性; 过低的井眼液柱压力会导致水平最小主应力方位上井壁围岩剪切破坏, 然而过高的井眼液柱压力却对水平最大主应力方位上节理围岩的稳定产生不利影响, 说明控制泥浆密度上限是必要的。研究成果对山前高陡构造钻井的井壁稳定问题具有参考价值。

关键词: 岩石力学; 节理岩体; 井壁稳定; 钻井

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 1 - 2733 - 08

STUDY ON WELLBORE COLLAPSE MECHANISM IN JOINTED ROCK MASSES OF HIGH-DIP-STRUCTURES BEFORE MOUNTAINS

ZOU Lingzhan¹, DENG Jinggen¹, XU Xianguang², LI Weixuan³

(1. School of Oil Gas Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Institute of Drilling Engineering and Technology, China National Petroleum Corporation, Beijing 100097, China; 3. Institute of Exploration and Exploitation, Xinjiang Oilfield Co., Kalamayi, Xinjiang 834000, China)

Abstract: There exist abundant oil and gas in the hip-dip structures before mountains in the West China. But borehole caving takes place frequently during drilling in the section of fractured rock masses generated by violent tectonic movements, which severely restricts the profit of exploration and development. This paper sets up the model of borehole drilled in the highly fractured rock masses according to geological situation in the Huoerguosi structure before Tianshan mountains using the software RFPA-flow. The characteristics of stress and seepage around borehole are inquired and the process of wellbore collapse is simulated, also the countermeasures are discussed. The research indicates that stress concentrates around wellbore in the direction of the minor principal stress, however, seepage occurs chiefly on the joint planes around borehole in the direction of the minor principal stress, and water head rises on the joint planes along with seepage process, which results in the collapse of

收稿日期: 2007 - 03 - 20; **修回日期:** 2007 - 04 - 20

基金项目: “长江学者和创新团队发展计划”资助项目(IRT0411); 全国百篇优秀博士论文基金项目(200349); RFPA^{2D}-flow: 东北大学唐春安教授开发项目

作者简介: 邹灵战(1972 -), 男, 1993年毕业于承德石油高等专科学校计算机应用专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: zoulingzhan@126.com

surrounding fractured rock masses. The result that collapse occurs in the direction of the maximum principal stress, showing a reasonable explanation to the complex phenomenon that long axis of borehole exists in the direction of the maximum principal stress on the dip log. The research also indicates that borehole collapse is easy when seepage velocity on the joint planes is decreased, which confirms that improving the plugging performance of drilling fluid is the countermeasure. Lower water head in the hole may cause collapse of rock masses around hole in the direction of the maximum principal stress, however, over-high water head in the hole can also cause collapse of fractured rock masses in the direction of the maximum principal stress, which clarifies that controlling the upper limit of drilling fluid weight is also a necessary countermeasure. The research and result may offer reference for drilling before mountains.

Key words: rock mechanics; jointed rock mass; wellbore stability; drilling

1 引言

我国西部山前高陡构造的油气蕴藏丰富,但钻井中面临的井壁失稳问题非常严重。当钻遇剧烈构造运动形成的严重节理化岩体时,井下卡钻事故频繁发生。如我国西部天山南缘霍尔果斯构造是一个典型的异常高压、山前高陡构造(见图1),由于井壁失稳造成了严重的卡钻事故和井下复杂情况,在12-1/4"井眼的钻井过程中,收集到的最大井壁掉块重达5.1 kg。从双井径测井曲线看,一些井段的井壁坍塌发生在水平最大主应力的方位上,这和经验性的认识是不同的,反映了井壁失稳机制的复杂性。

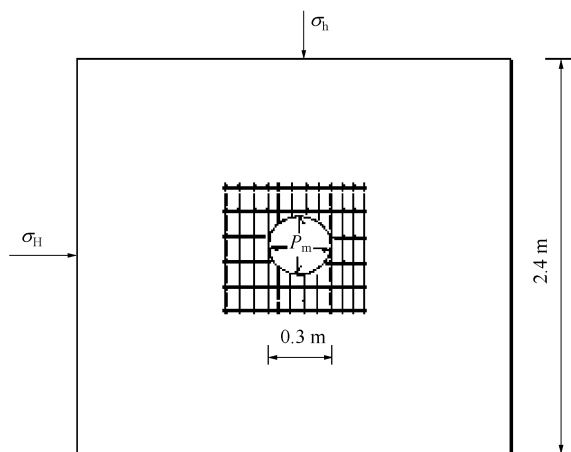


图1 几何模型和边界条件

Fig.1 Geometric model and boundary condition

国内外在探索解决山前构造钻井的井壁稳定措施方面积累了一些经验,提出加强钻井液封堵的措施,取得了一些效果^[1~5]。但是,这些认识多停留在经验认识上,没有完全解决对井壁破坏机制的认

识问题。

节理岩体问题研究中应关注应力状态和结构面两个方面的因素^[6,7]。节理面成为岩体中渗流的主要路径,渗流速度比完整岩石大很多^[8],节理面上的渗流受应力的影响很明显^[9],井眼钻开后,由于应力-渗流的耦合作用,节理面上渗流出现非均匀性,而且可能导致节理面上内摩擦角的降低,井壁围岩容易受到剪切应力作用下在水平最小主应力方位上发生坍塌^[10,11]。但这些研究仍然不能合理解释某些井段的井眼长轴发生翻转、井壁坍塌发生在水平最大主应力方位上的复杂问题。

因此,对高应力和高井眼液柱压力作用下节理围岩的坍塌机制研究就具有非常重要的工程意义。本文采用RFPA^{2D}-flow软件,建立了严重节理化的岩体和井眼模型,模拟了井壁节理围岩在应力-渗流耦合作用下发生在水平最大主应力方位上坍塌过程,澄清了双井径测井曲线上井眼长轴发生翻转的原因,指出节理面的渗流是这种井壁失稳的主要影响因素,并对钻井液密度上限控制的必要性做了探讨,提出了山前构造钻井稳定井壁的技术措施。

2 理论模型和软件的处理方法

RFPA^{2D}-flow是基于连续介质力学和统计损伤力学原理开发的岩石破裂过程分析系统^[12]。该软件能模拟在应力和流体压力耦合作用下岩石介质逐渐破坏的过程。系统计算中除了用到经典Biot渗流力学耦合方程外,还用到了渗流与应变(孔隙变化率)的耦合方程。对渗流中流固耦合问题,Biot将孔隙流体压力 p 和水容量 Δn 的变化增列为状态变量,七对本构方程是状态变量 (σ_y, ϵ_y) 和 $(p, \Delta n)$ 之间的物理关系,其三维基本方程表达如下。

平衡方程:

$$\partial\sigma_{ij,j} + \rho X_j = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

几何方程:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \varepsilon_v = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad (2)$$

本构方程:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_v + 2G \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

渗流方程:

$$K_{ij} \nabla^2 p = \frac{1}{Q} \frac{\partial p}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度; p 和 Δn 分别为孔隙流体压力和水容量; Q, α 均为 Biot 常数; K_{ij} 为渗透系数; α 为耦合系数; G, λ 分别为剪切模量和拉梅系数; σ_{ij} 为总应力; σ'_{ij} 为有效应力; ε_{ij} 为总应变。

式(1)~(4)是基于 Biot 经典渗流理论的表达式, 该理论中没有考虑应力引起渗透性的变化, 不能满足动量守恒, 需要补充下面渗流与应力的耦合方程:

$$K_{ij}(\sigma, p) = \xi K_0 e^{-\beta(\sigma_{ij}/3 - \alpha p)} \quad (5)$$

式中: K_0 和 K 均为渗透系数初值和渗透系数; ξ, α, β 分别为渗透系数突跳系数、孔隙压力系数、耦合系数^[12]。

RFPA^{2D}-flow 系统的分析过程包括渗流分析、应力分析、破坏分析和耦合分析。渗流分析与应力分析采用有限元法进行, 求渗流模型的解得到每一计算步水头分布和水荷载, 依据有效应力原理完成每一计算步在外载荷或环境因素作用下的力学响应。渐进破坏分析是根据修正后的库仑(Coulumb)准则(包含拉伸截断)来检查材料中是否有单元破坏, 对破坏单元采用刚度特性软化(分离处理)和刚度重建(接触处理, 单元再次发挥传递相邻单元应力的作用)的办法进行处理。耦合分析通过单元渗透率与应力之间的耦合计算求解单元的渗透系数, 并对连通的破坏单元在满足应力与渗透系数关系方程的基础上进行渗透系数突变和水压力传递处理, 重复上述渗流分析、应力分析、破坏分析各过程, 进行耦合迭代循环, 直到满足迭代误差为止, 之后进行下一步骤的计算^[13]。

3 破碎带井壁破坏的数值模拟研究

山前高陡构造的节理岩体, 通常由三族互相垂

直的节理面切割形成^[6, 14]。为了简化问题, 突出井眼钻开后节理围岩的失稳研究, 把节理岩体的三维模型简化, 忽略垂直于井眼轴向的第三族节理面, 建立由两族互相垂直的节理面切割形成的平面岩体模型^[14], 结构面间距为 2~5 cm, 几何模型和边界条件见图 1。

模型材料参数见表 1, 节理面上的渗流速度 10 m/d, 相当于砾岩的渗透性, 而完整岩石的渗流速度为 10⁻⁵ m/d^[14], 节理面上黏聚力丧失, 内摩擦角不变, 抗拉强度丧失。

表 1 模型的材料参数

位置	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	泊松比	渗流速度 /($m \cdot d^{-1}$)
完整岩石	14.8	30	2	1.6×10^4	0.23	1×10^{-5}
节理面上	0.0	30	0	5.0×10^2	0.33	10

模型边界上施加水平最大和水平最小地应力, 井眼内施加液柱压力, 水平最大有效主应力为 16 MPa, 施加在模型水平方向的边界上; 水平最小有效主应力为 9 MPa, 施加在模型竖直方向的边界上; 井眼有效的液柱压力为 7 MPa, 模型的应力边界条件见表 2。

表 2 模型的应力边界条件

水平最大主应力有效值 ($\sigma_{H, \max} - P_p$)/MPa	水平最小主应力有效值 ($\sigma_{H, \min} - P_p$)/MPa	井眼液柱压力有效值 ($P_m - P_p$)/MPa
16	9	7

(施加在水平方向的边界) (施加在竖直方向的边界) (施加在井眼内)

3.1 井眼周围的应力场和渗流场

井眼钻开前的剪应力均见图 2, 剪应力在节理的端部较为集中, 渗流场见图 3, 分布较为均匀。

井眼钻开后的剪应力场见图 4, 渗流场见图 5, 由于井壁周围应力的集中不同, 渗流场出现明显差异, 在水平最大主应力方位的节理面上渗流速度大, 在水平最小主应力方位的节理面上渗流速度小。渗流速度的差异, 使井眼周围流体压力出现了明显差异, 在水平最大主应力方位的节理面上流体压力高, 而水平最小主应力方位上的流体压力低, 见图 6。

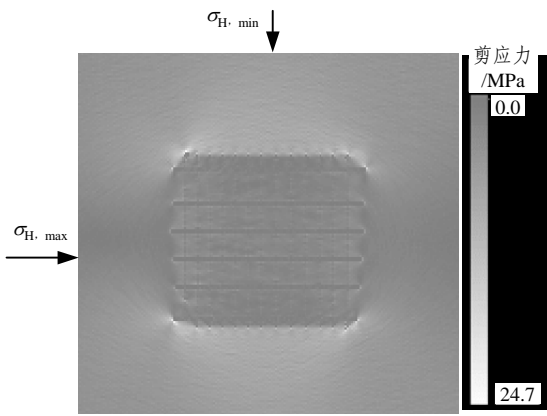


图 2 井眼钻开前的剪应力场(亮度代表应力大小)
Fig.2 Shear stress field before drilling(brightness illuminating stress magnitude)

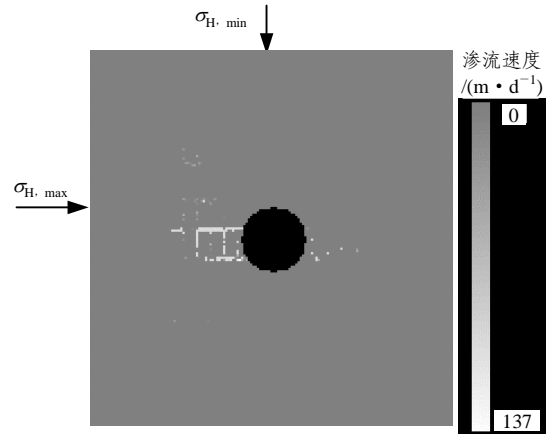


图 5 井眼钻开后的渗流场(亮度代表渗流速度大小)
Fig.5 Seepage field after drilling(brightness illuminating seepage velocity)

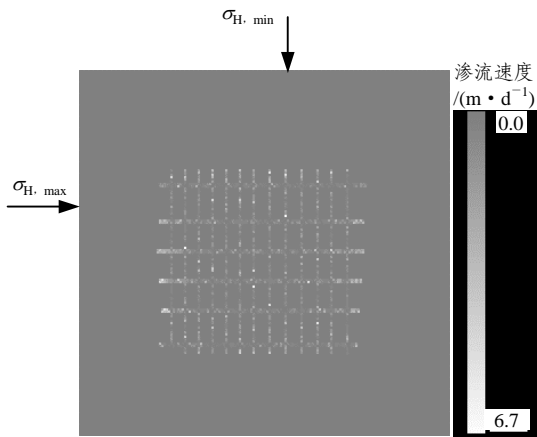


图 3 井眼钻开前的渗流场(亮度代表渗流速度大小)
Fig.3 Seepage field before drilling(brightness illuminating seepage velocity)

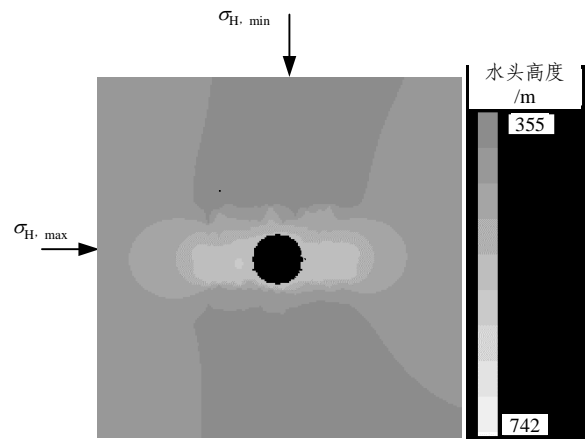


图 6 井眼钻开后流体压力(亮度代表水头高低)
Fig.6 Water head around hole(brightness illuminating water head)

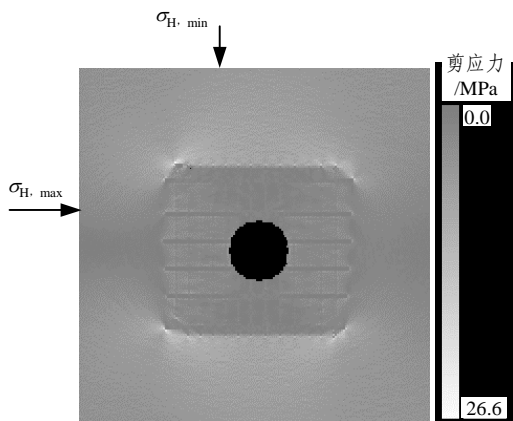


图 4 井眼钻开后的剪应力场(亮度代表应力大小)
Fig.4 Shear stress field after drilling(brightness illuminating stress magnitude)

3.2 井壁节理围岩的坍塌过程模拟

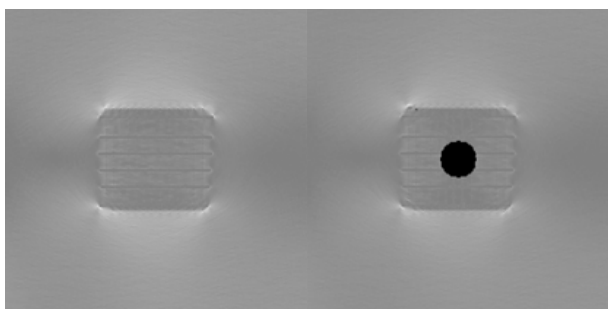
井眼钻开后，由于钻井液液柱压力和地层压力之间存在压力差，钻井液及其滤液将沿着节理面渗

流，随着渗流的作用，节理面上的流体压力升高，导致节理面张开，发生节理拉张破坏而坍塌，这个过程见图 7(a)~(f)，节理围岩的坍塌主要发生在水平最大主应力方向上，形成了该方向上的井眼长轴。

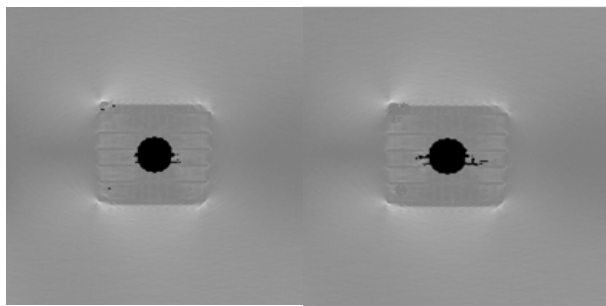
3.3 钻井液封堵对井壁稳定的影响

井眼节理围岩在水平最大主应力方位上发生坍塌，主要是因为渗流作用下，节理面上流体压力升高引起了水力拉张破坏所造成的。提高钻井液的封堵效果可以改变节理面的渗流速度，为了验证封堵作用对井壁稳定的影响，对比 3 种节理面上的渗流速度以对应不同的钻井液封堵效果，见表 3。模型的边界应力条件不变，井眼液柱压力不变，模拟结果见图 8。

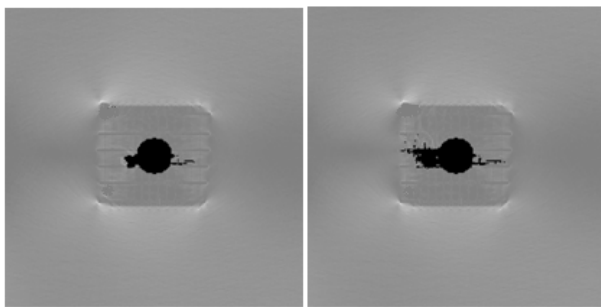
没有采取封堵措施，井眼周围节理围岩破坏结果见图 8(a)。当节理面上渗流速度降低 3 个数量级，



(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)

图 7 节理围岩在渗流 - 应力耦合下的破坏过程

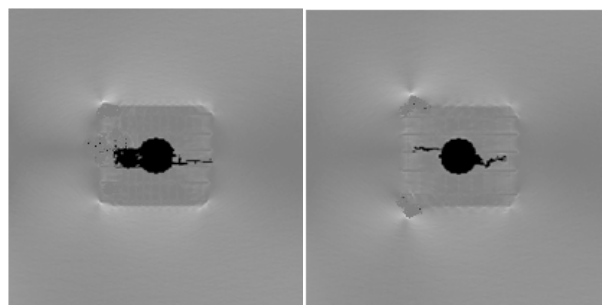
Fig.7 Collapse process of surrounding jointed rock masses along with hydro-stress coupling

表 3 不同节理面渗流速度模拟钻井液封堵效果

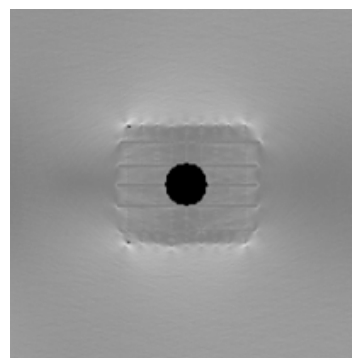
Table 3 Different seepage velocities on joint plane vs. different drilling fluid plugging

钻井液封堵效果	节理面渗流速度/(m · d ⁻¹)	封堵对渗流速度影响
封堵效果不好	10	同量级
封堵效果普通	1 × 10 ⁻²	降低 3 个数量级
封堵效果理想	1 × 10 ⁻⁵	降低 6 个数量级

模拟封堵起到了一定的效果, 井壁围岩则发生较轻的破坏, 结果见图 8(b)。当节理面上渗流速度降低 6 个数量级(和完整岩石的相同)模拟理想封堵的情况, 此时井壁没有发生坍塌也没有漏失, 结果见图 8(c)。从 3 种节理面渗流速度对井壁破坏的对比来看, 节理围岩在水平最大主应力方向上坍塌的主



(a) 节理面渗流速度为 10 m/d (b) 节理面渗流速度为 10⁻² m/d



(c) 节理面渗流速度为 10⁻⁵ m/d

图 8 节理面渗流速度对井壁稳定的影响

Fig.8 Influence of seepage velocity on joint plane on the stability of borehole

要原因是节理面上的渗流因素。因此, 提高钻井液的封堵措施对稳定节理围岩的井壁具有很强的针对性。

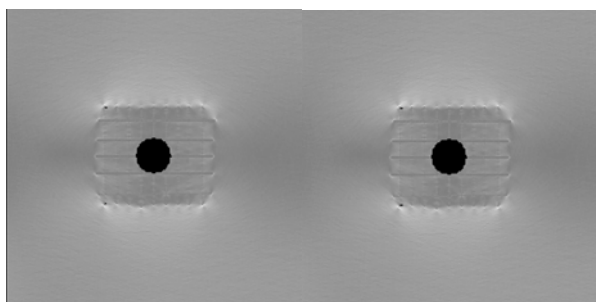
3.4 钻井液密度上限控制的必要性

为了考察井眼液柱压力对井壁稳定的影响, 假设钻井液对节理面的渗流有理想封堵效果, 节理面渗流速度和完整岩石一样, 设置为 10⁻⁵ m/d, 应力边界条件不变, 井眼液柱压力从 0.78σ_{H, min} 逐步提高到 0.94σ_{H, min}, 模拟结果见图 9。

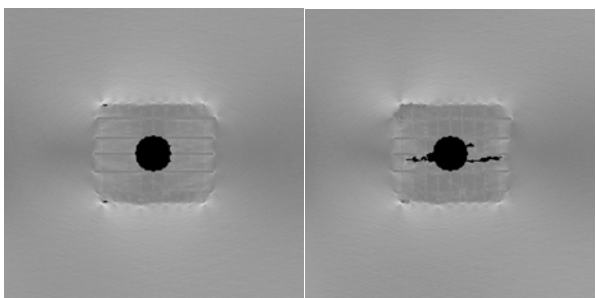
模拟结果表明即使钻井液封堵效果理想, 过高的井眼液柱压力对节理井壁围岩的稳定是不利的。山前高陡构造如果 3 个主应力的大小特点是水平最大主应力 > 水平最小主应力 > 上覆应力, 则钻井液密度的安全上限应该为上覆应力梯度, 以保证节理面的稳定; 如果上覆应力为中间主应力的情况, 则建议以 0.9 倍的水平最小主应力梯度作为钻井液密度的安全上限。

3.5 两类井壁坍塌的对比

井眼钻开后如果钻井液密度过低, 不足以平衡坍塌压力, 井壁围岩在水平最小地应力方位上发生剪切破坏, 破坏后的井眼形状见图 10(a)。在双井径测井曲线上表现为水平最小主应力方向上形成椭圆



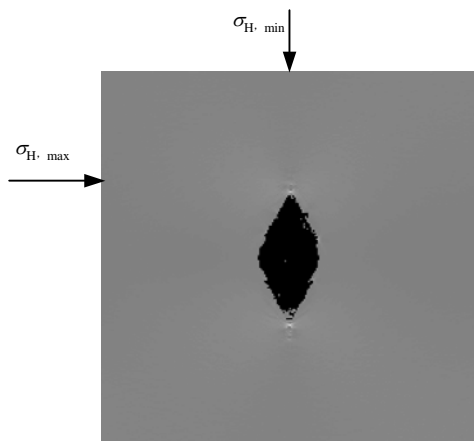
(a) 井眼液柱压力等于 $0.78\sigma_{H, \min}$ (b) 井眼液柱压力等于 $0.83\sigma_{H, \min}$



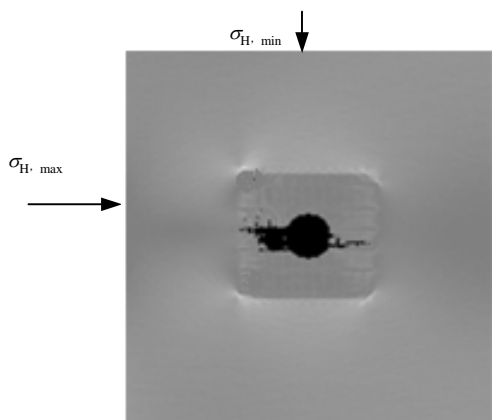
(c) 井眼液柱压力等于 $0.90\sigma_{H, \min}$ (d) 井眼液柱压力等于 $0.94\sigma_{H, \min}$

图9 井眼液柱压力对井壁稳定的影响

Fig.9 Influence of water head in the hole on stability of well bore



(a) 井壁围岩剪切破坏造成的坍塌



(b) 节理围岩拉张破坏造成的坍塌

图10 两类井壁围岩坍塌对比

Fig.10 Comparison of two kinds of collapse surrounding borehole

长轴。井壁失稳的原因是应力集中超过了井壁围岩的强度而发生了剪切破坏，此时提高钻井液密度对稳定井壁有利。

但在山前高陡构造钻遇节理化岩体，在高应力和高井眼液柱压力作用下，井壁围岩节理面上的渗流作用会导致在水平最大主应力方位上的坍塌，坍塌后的井眼形状并不是椭圆的，见图10(b)。在双井径测井曲线上，井眼长轴出现翻转。若不能有效解决钻井液的封堵措施而提高钻井液密度，反而促进了节理面上的渗流，发生更为严重的坍塌。

4 井壁稳定的对策

根据本研究的结果，提出在山前异常高压、高陡构造钻井稳定井壁的措施如下：

- (1) 采用强封堵的钻井液体系，遏制井壁围岩节理面上的渗流；
- (2) 钻井液密度的安全上限为上覆应力梯度，钻井液密度的安全下限根据节理围岩的坍塌压力确定；
- (3) 提高钻井液的携带性能，及时携带出井下坍塌物，减少井下复杂情况；
- (4) 严格控制起下钻速度，将井下压力的波动控制在安全范围以内。

5 工程应用实例

我国西部的霍尔果斯构造为典型的异常高压、山前高陡构造(见图11)，该构造位于天山南缘，是南北挤压的构造运动形成的一个高陡背斜构造，水平最大主应力方位为南北方向。钻井过程中发生了严重的井壁坍塌，双井径曲线上井眼长轴翻转现象突出(见图12的霍10井双井径曲线)，霍10井最高钻井液密度 2.16 g/cm^3 。随后的霍001井继续提高钻井液密度来试图稳定井壁，钻井液密度最高达 2.63 g/cm^3 ，趋于地层的破裂压力梯度，井壁坍塌问题更加突出。霍003井改变了钻井液体系，提高了钻井液的封堵效果和携岩效果，钻井液密度的上限控制在 2.35 g/cm^3 ，并严格限制井下压力的波动，该井没有发生严重的卡钻事故。这些钻井实践印证了本文对山前高陡构造的井壁失稳机制的认识，佐证了笔者提出的井壁稳定措施。

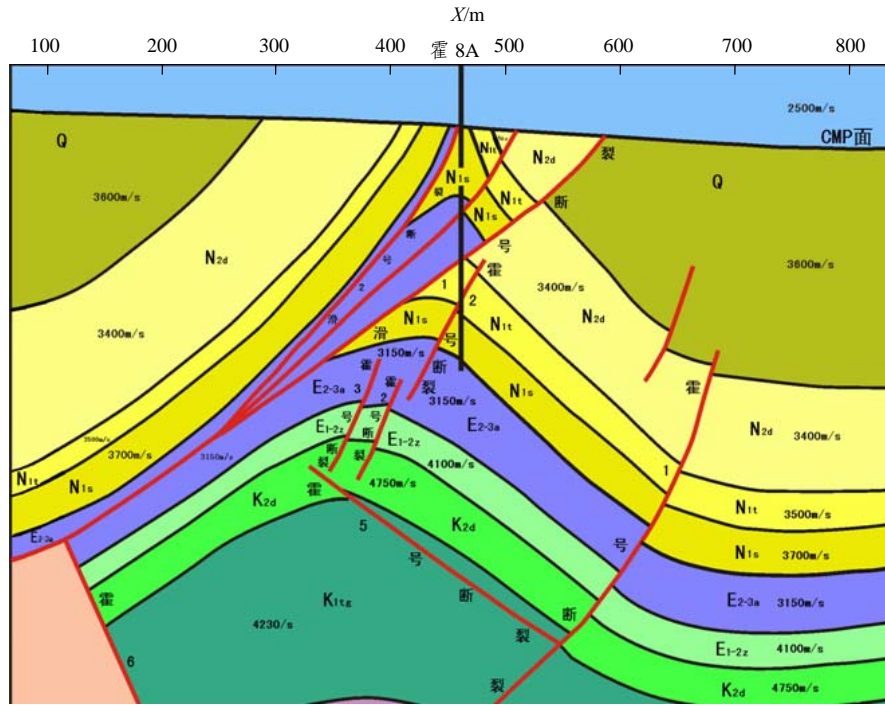
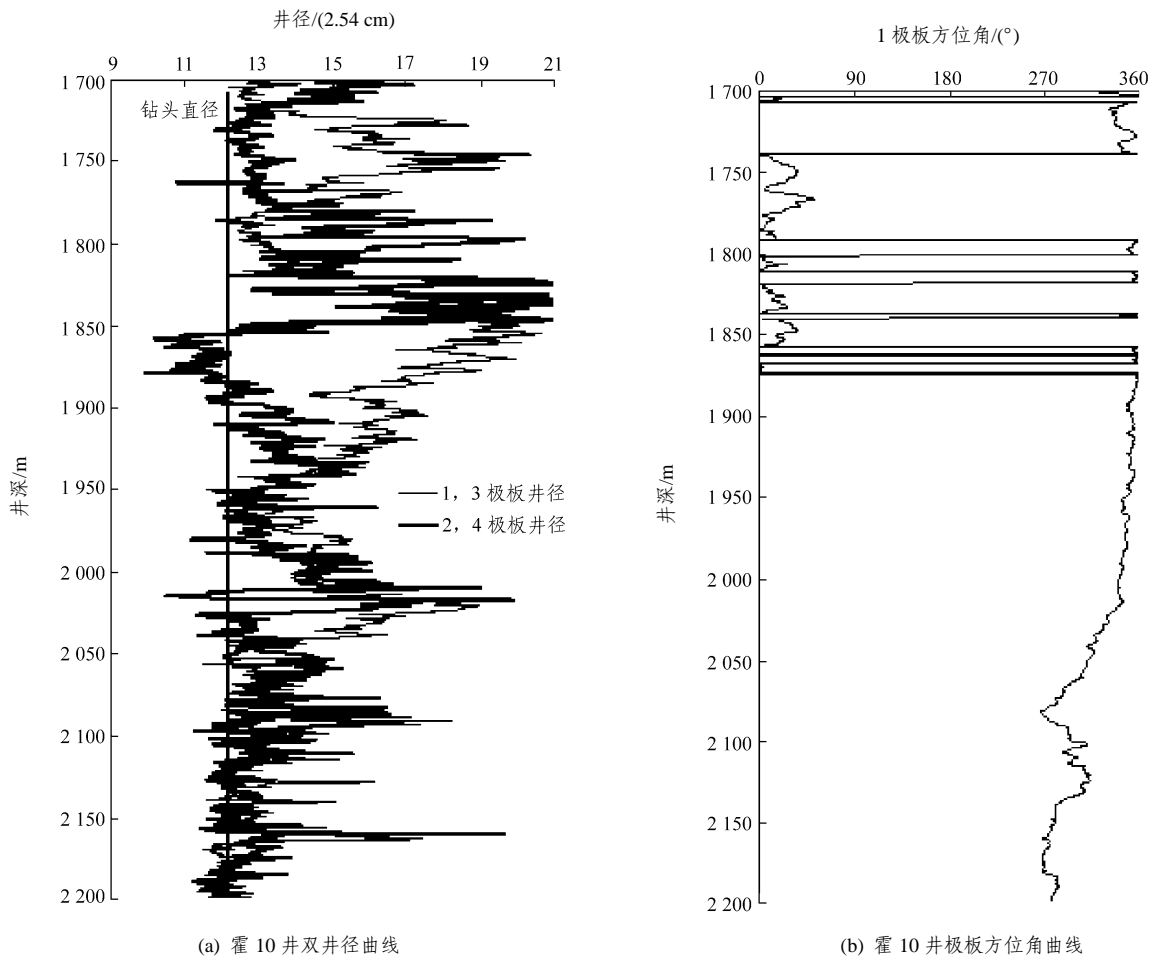


图 11 天山南缘霍尔果斯构造剖面图

Fig.11 Profile of Huoerguosi structure before Tianshan Mountains



(a) 霍 10 井双井径曲线

(b) 霍 10 井极板方位角曲线

图 12 霍尔果斯构造霍 10 井的双井径测井曲线上井眼长轴翻转现象

Fig.12 Complex phenomenon along axis of borehole 10 in Huoerguosi structure

6 结 论

井眼钻遇严重节理化的岩体, 井壁围岩结构面和渗流是井壁失稳的关键因素。在剪应力作用下会发生沿着节理面的剪切滑移而坍塌, 破坏主要发生在水平最小主应力方位上, 也可能因为渗流原因而发生垂直于节理面的拉张破坏而坍塌, 坍塌主要发生在水平最大主应力方位上。本文着重对节理围岩在渗流作用下的坍塌过程和原因进行了研究, 合理解释了双井径曲线上井眼长轴发生翻转的复杂现象, 并探讨了稳定井壁的措施。

节理岩体的井壁失稳和节理产状密切相关, 节理的张开度、走向、间距等对结果有很大影响, 需要进一步探讨研究。

参考文献(References):

- [1] SANTARELLI F J, CIAUDE C Z. Drilling through highly fractured formations: a problem, a model, and a cure[R]. SPE 24592994.
- [2] WOODLAND D C. Borehole instability in western Canadian overthrust belt[R]. SPE 17508, 1990.
- [3] ADDIS T, LAST N. The request for borehole stability in Cusania field[J]. Oilfield Review, 1993, 10(7): 63 - 66.
- [4] MAURY V M R, ZURDO C. Wellbore instability due to shear displacements along preexisting fractures: are we overlooking a common cause of drilling problems[R]. SPE 27492, 1994.
- [5] STJERN G, AGLE A, HORSRUD P. Local rock mechanical knowledge improves drilling performance in fractured formations at the Heidrun field[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 38(1): 83 - 96.
- [6] 朱焕春, RICHARD B, PATRICK A. 节理岩体数值计算方法及其应用(一): 方法与讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 3 444 - 3 449.(ZHU Huanchun, RICHARD B, PATRICK A. Numerical methods and application for jointed rock mass, part 1: approaches and discussions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 3 444 - 3 449.(in Chinese))
- [7] 朱焕春, RICHARD B, PATRICK A. 节理岩体数值计算方法及其应用(二): 方法与讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 89 - 96.(ZHU Huanchun, PATRICK A, PATRICK A. Numerical modelling methods and application in jointed rock mass, part 2: application for engineering practice[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 89 - 96.(in Chinese))
- [8] WITTKE W. 岩石力学[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1996.(WITTKE W. Rock mechanics[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 1996.(in Chinese))
- [9] KI-BOK MIN, J. RUTQVIST, CHIN-FU TSANG, et al. Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(10): 1 191 - 1 210.
- [10] ZHANG X, LAST N, POWRIE W, et al. Numerical modeling of wellbore behaviour in fractured rock mass[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999, 23(1): 95 - 115.
- [11] CHENA X, TANA C P, DETOURNAYB C. A study on wellbore stability in fractured rock masses with impact of mud infiltration[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 38(1): 145 - 155.
- [12] 唐春安, 徐曾和, 徐小荷. 岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统在采场上覆岩层移动规律研究中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1999, 18(5): 456 - 458.(TANG Chun'an, XU Zenghe, XU Xiaohu. Application of analysis system RFPA^{2D} of rock fracture process in researching moving rules of covering workplace[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 1999, 18(5): 456 - 458.(in Chinese))
- [13] 杨天鸿, 唐春安, 徐涛, 等. 岩石破裂过程的渗流特性[M]. 北京: 科学出版社, 2004.(YANG Tianhong, TANG Chun'an, XU Tao, et al. Seepage characteristic in rock failure[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [14] CHEN Y F, ZHOU C B, SHENG Y Q. Formulation of strain-dependent hydraulic conductivity for a fractured rock mass[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 42(2): 406 - 418.