

井壁稳定的有效分析方法

——以泥页岩为例

牟晓倩*, 李 猛#

重庆科技学院, 石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2023年6月7日; 录用日期: 2023年8月31日; 发布日期: 2023年9月13日

摘 要

井壁失稳是钻井工程中的一大难题, 地层的岩性不同, 其影响井壁稳定的因素也不大相同, 但分析方法大体一致。基于此, 以较为特殊的泥页岩储层为例, 对岩石进行矿物组成试验, 阳离子交换容量计算、比表面积计算、微观结构观察等理化性能试验以及三轴压缩和史氏压入等力学特性试验, 确定影响井壁稳定的因素, 然后根据影响因素建立耦合数学模型, 最后将耦合模型带入数值模拟软件演练井壁破坏过程, 证明试验确定的影响因素的真实性, 达到井壁稳定性分析的目的。通过以泥页岩为例的井壁稳定分析表明该分析方法是可行有效的。

关键词

井壁稳定, 泥页岩, 分析方法

An Effective Method for Analyzing Well Wall Stability

—Taking Shale as an Example

Xiaoqian Mu*, Meng Li#

College of Petroleum and Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jun. 7th, 2023; accepted: Aug. 31st, 2023; published: Sep. 13th, 2023

Abstract

Borehole instability is a big problem in drilling engineering, and the factors affecting borehole

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 牟晓倩, 李猛. 井壁稳定的有效分析方法[J]. 石油天然气学报, 2023, 45(3): 260-271.

DOI: 10.12677/jogt.2023.453032

stability are not the same with different lithology of strata, but the analysis methods are generally the same. Based on this, taking a special mud shale reservoir as an example, the rock is tested for mineral composition, cation exchange capacity calculation, specific surface area calculation, microstructure observation and other physical and chemical properties, as well as mechanical properties tests such as triaxial compression and Stellar well compression, so as to determine the factors affecting shaft wall stability, and then a coupling mathematical model is established according to the influencing factors. Finally, the coupled model is put into the numerical simulation software to drill borehole failure process, to prove the authenticity of the influencing factors determined by the test, to achieve the purpose of borehole stability analysis. The analysis of wellbore stability of shale shows that the method is feasible and effective.

Keywords

Wall Stability, Mud Shale, Analytical Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国虽国土面积辽阔, 但已发现的油气储层较少, 且我国复杂的地质构造条件给油气开采带来了不小的难度 - 容易发生井壁失稳等问题, 导致油气采收率降低, 使得油气开采量无法满足如今国内的需求。目前约九成的井壁失稳问题发生在泥页岩储层中[1]。因为泥页岩硬度较小, 钻井过程中易于破碎, 且容易吸水发生水化膨胀造成井壁坍塌, 给钻井工程带来不小的难题, 故目前我国开采的大部分储层为砂岩储层。

为解决井壁稳定性问题, 国内外不少学者开展了大量研究。其中王磊[2]提出了基于瞬态热流固耦合的钻井井壁稳定性分析方法。Allawi Raed H [3]等通过构建力学地球模型(MEM), 并利用 MEM 定义安全的泥重窗口及提高开发井的钻井性能, 从而实现井壁稳定性分析。Eladj Said 等[4]在阿尔及利亚东南部油田利用地震反演建立的三维地质力学模型对油气井进行井壁稳定性评价。王庆[5]在建立了地层坍塌及破裂压力不确定性定量表征方法及 ECD 不确定性定量表征方法的基础上, 建立了定量评估井壁稳定性的分析模型, 解决了井壁失稳的识别难题, 实现了井壁稳定性的定量评价。上述研究缺乏岩石自身特性对井壁稳定性影响的分析, 大多考虑外部因素对井壁稳定的影响。且上述研究大多较为复杂, 缺少系统性, 无法普遍使用。

本文首先通过试验, 对岩石自身特性参数给井壁稳定带来的影响进行系统性、综合性分析, 然后利用数值模拟软件将各因素对井壁带来的不同影响更清晰直观地呈现出来, 从而实现井壁稳定的有效分析。

2. 特性分析

岩石的特性包括其矿物组成、理化性质和力学特性等, 下面将对其实试验分析方法进行介绍。

2.1. 矿物组成和理化性质分析

本节包括矿物组成试验和阳离子交换容量、比表面积、微观结构等理化性质试验。

2.1.1. 矿物组成分析

对于岩石的矿物组成测定我们可以用 X 线衍射仪[6] (如图 1 所示)、透射电子显微镜[7] (如图 2 所示)、

扫描电子显微镜等仪器(如图 3 所示)。通过以上仪器的测定可以得到岩石矿物的组成和含量,从而分析岩石的软硬程度、脆性程度、水化作用等。

大部分泥页岩都是不同程度的发育着石英、长石和方解石等脆性矿物,且具有较高含量的黏土矿物[8]。由此可以得出泥页岩一般呈现脆性,硬度较低。而黏土矿物在遇水的情况下会发生水化分散、水化膨胀等[8],故而推出泥页岩拥有一定的水化膨胀能力。



Figure 1. X-ray Diffractometer
图 1. X 线衍射仪



Figure 2. Transmission electron microscope
图 2. 透射电子显微镜



Figure 3. Scanning electron microscope
图 3. 扫描电子显微镜

2.1.2. 阳离子交换容量

阳离子交换容量是指黏土矿物的表面可用于交换阳离子的数量, 一般用单位质量干粘土在分散介质条件下交换下来的阳离子数量表示。测定阳离子交换容量的方法有离心机进行氯化铵-乙醇法测定[9]、原子吸收分光光度法[10]、分光光度计法[11]等。当粘土中携带的负电荷越多, 则吸收周围用来中和负电荷的阳离子就越多, 阳离子的交换容量也就越大, 阳离子交换容量越大越有利于泥页岩表面水化[12]。可以利用阳离子的交换容量, 来预测地层潜在的水敏性[13]。

有学者[14][15]表明泥页岩都具有一定的阳离子交换容量, 所以其也具有一定的水化能力, 在水基钻井液作用下易发生失稳问题。

2.1.3. 比表面积

比表面积是指单位质量物料所具有的总面积。常用的比表面积测定方法有: 一吸附量法, 其基本原理是测定矿物在一定条件下吸附物质的重量, 再根据吸附分子的截面积计算岩石的比表面积。二计算法, 根据实验得到的数据及结果间接计算岩石的比表面积[16]。对于含有膨胀粘土矿物的泥页岩, 氮气吸附法更为适用[17]。

梁大川[16]提给出的计算法计算比表面积的公式是:

$$S = \sqrt{\frac{a \times \text{CST} \times \rho_{wc} \times \varphi^3}{(1-\varphi) \times C}} / (\rho_a \times 10^4) (\text{m}^2/\text{g})$$

式中: a 为 1.66×10^{15} ; CST 为 CST 值, s ; ρ_{wc} 为湿泥饼的密度, g/mL ; φ 为孔隙度; ρ_a 为干泥饼的密度, g/mL ; C 为浓度。

比表面积的大小会影响粘土矿物的水化, 一般比表面积越大, 水化程度越强。而泥页岩的比表面积素来相对较大, 故而它的水化程度也较强。

2.1.4. 微观结构

观察岩石微观结构的仪器有岩相显微镜、扫描电镜(如图4所示)、原子力显微镜[18](如图5所示)等。通过仪器观察岩石内部矿物晶体的定向排列、胶结结构以及微裂隙的发育和分布状况, 分析岩石裂缝、孔隙发育情况。

以泥页岩为例, 如果泥页岩内部微裂缝、孔洞发育较好, 那么就会为钻井液的侵入提供通道, 可能造成钻井液与地层中的黏土矿物和有机物质发生反应, 加大井壁坍塌的风险。而对于不易发生水化作用的砂岩来说, 较好的微裂缝和空洞反而是良好的储层条件。故而同样的微观结构对于不同的岩石可能会导致不同的结果, 需要多方面结合考量。



Figure 4. Scanning electron microscope
图4. 扫描电镜



Figure 5. Atomic force microscope
图 5. 原子力显微镜

2.2. 力学特性分析

2.2.1. 力学特性试验

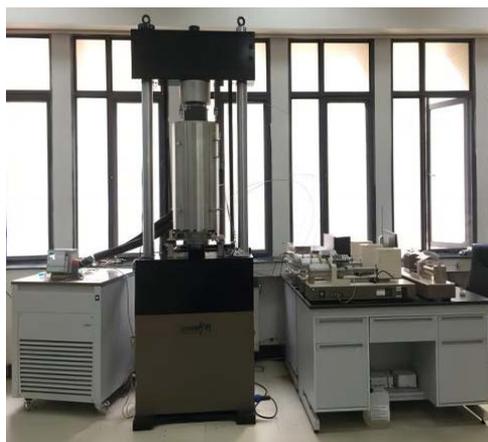


Figure 6. Triaxial fracturing test instrument
图 6. 三轴压裂试验仪器



Figure 7. Brazilian splitting test instrument
图 7. 巴西劈裂试验仪器

力学特性主要包括弹性模量、泊松比、抗张强度、黏聚力和内摩擦角等内容。岩石的力学特性可以

通过单轴压裂或三轴压裂和巴西劈裂试验得到(三轴压裂与巴西劈裂试验仪器如图 6、图 7 所示)。通过单轴压裂或三轴压裂可以得到岩石的弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角等力学特性, 但因为单轴压裂缺少对围压的考虑, 同样的岩石进行单轴压裂得到的结果远不如三轴压裂得到的结果更准确。通过巴西劈裂试验可以得到岩石的抗张强度。

对北美地区泥页岩的弹性模量、泊松比进行研究分析后, 在考虑弹性模量越大, 泊松比越小, 则脆性越大的基础上, Rickman [19]提出了利用弹性模量和泊松比 2 个参数表征岩石的脆性强弱。一般来说, 考虑矿物组成的原因, 泥页岩一般呈现一定的脆性。可以在进行力学特性试验后, 验证此结果。

2.2.2. 钻井液对力学特性的影响

在石油钻井过程中都要使用到钻井液, 根据地层条件的不同, 钻井液的组成也不同。但一般为了经济效益与简便, 多使用水基钻井液。为验证钻井液对岩石力学特性的影响, 可以在经过不同密度钻井液浸泡不同时间后进行史氏压入硬度法测试钻井液对岩石压入硬度的影响。

以泥页岩为例, 随着浸泡时间的增加岩石的硬度会不断降低, 且浸泡时间越长, 硬度降低越大, 表明钻井液本身及岩石在钻井液中的浸泡时间会影响岩石硬度, 从而导致井壁稳定性下降。

3. 特性耦合分析

综上所述, 在对岩石进行过大量特性检验实验后, 对于影响井壁稳定性的因素已经有了一定了解。综合可能产生影响的因素, 耦合不同因素的数学模型建立本构方程, 可以更精确, 直观的分析井壁稳定问题。同时还可以根据已经建立的本构方程, 分析不同性质岩石储层的井壁稳定性。

对于泥页岩, 已知水化作用对泥页岩储层井壁稳定性会产生影响, 同时考虑到钻井液注入后液柱压力对地层孔隙压力的影响。可以耦合水化作用对应的吸水扩散数学公式以及压力传递公式和弹塑性力学理论[20]等建立本构方程综合分析。

4. 数值模拟

岩土工程学常用的数值模拟软件有 ABAQUS 和 COMSOL。这两个软件可以实现石油工程中对于固体力学和流体力学的研究。一般我们进行钻井施工过程中井眼破坏问题时, 常用的几何结构为一个正四方体在中部位置挖去一个圆柱体, 但我们也可以只建立四分之一的井眼几何模型, 达到更加容易操作的效果。具体效果如图 8 和图 9 所示:

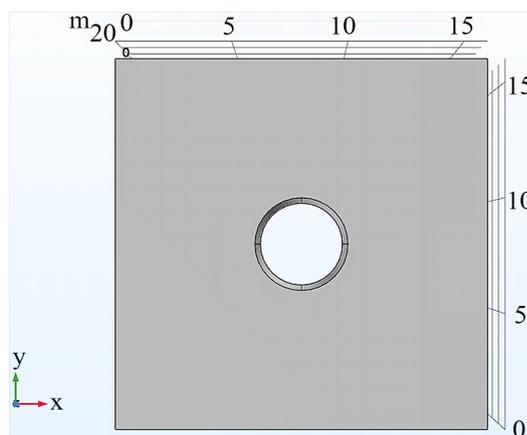


Figure 8. Complete borehole geometry model

图 8. 完整井眼几何模型

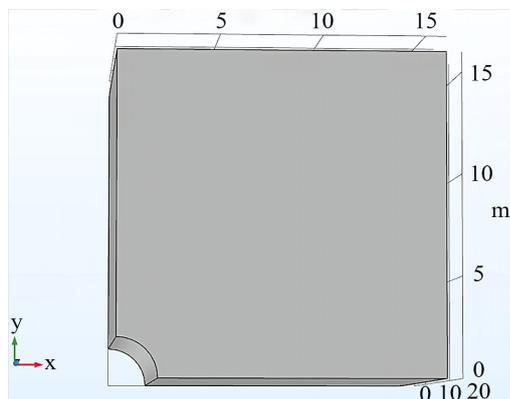


Figure 9. 1/4 hole model
图 9. 1/4 井眼模型

4.1. 建模步骤

- 1) 根据具体情况设定模型参数, 包括有几何体长宽高, 井眼半径, 边界条件以及之前试验得到的数据。
- 2) 平衡地应力, 由于地层受到上覆岩层压力及围压的作用, 在建立模型的时候应该提前考虑到他们对模型变形的影响, 故而应该设置预应力, 达到使初始的应力状态是地层没有钻开前的应力状态。
- 3) 模拟钻井阶段, 利用生死单元, 并施加泥浆压力模拟钻井过程。
- 4) 模拟流体在多孔介质中的扩散过程, 即运用达西定律模拟流体渗流, 完成因水化作用和钻井扰动而造成的井壁破坏过程。

最后根据得到的计算结果对井壁稳定性影响因素进行分析, 如钻井液的密度影响, 钻井液浸泡时间影响等。同时可以观测孔隙压力、黏聚力与内摩擦角的变化动态, 对井壁稳定性问题进行更加深入的研究。

4.2. 实例分析

下面以已经计算好的泥页岩模拟结果为例, 进行井壁稳定性分析。通过力学特性试验可以得到岩石的弹性模量、泊松比、粘聚力、内摩擦角等参数。通过测井解释得到岩石的渗透率以及孔隙度。结合现场实际的井深、上覆岩层压力、最大、最小水平压力等参数, 带入数值仿真软件中进行模拟。本实例的模拟数据结合经验进行了假设, 数据如下表 1 所示:

Table 1. Simulate assumed data parameters
表 1. 模拟假设数据参数

参数	数值
弹性模量	20 Gpa
比松比	0.15
粘聚力	20 Mpa
内摩擦角	20°
渗透率	12 mD
孔隙度	10%
井深	4000 m
上覆岩层压力	90 Mpa
最大水平地应力	75 Mpa
最小水平地应力	65 Mpa

图 10~图 13 为模拟的不同钻井液密度下的等效塑性变形图及井眼扩大率随时间的变化图, 清水是最普遍的钻井液, 其密度为 1.0 g/cm^3 , 故将钻井液密度的起点设置为 1.0 g/cm^3 , 以 0.1 为间隔, 进行不同密度下的井眼等效塑形变形及井眼扩大率对比。

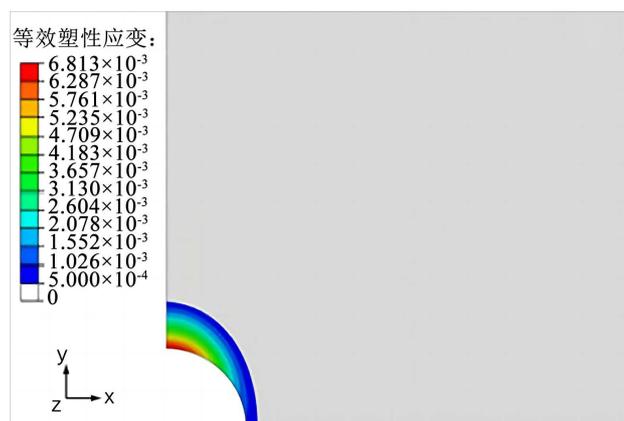


Figure 10. Wellbore deformation results at drilling fluid density 1.0
图 10. 钻井液密度 1.0 时井眼塑形变形结果

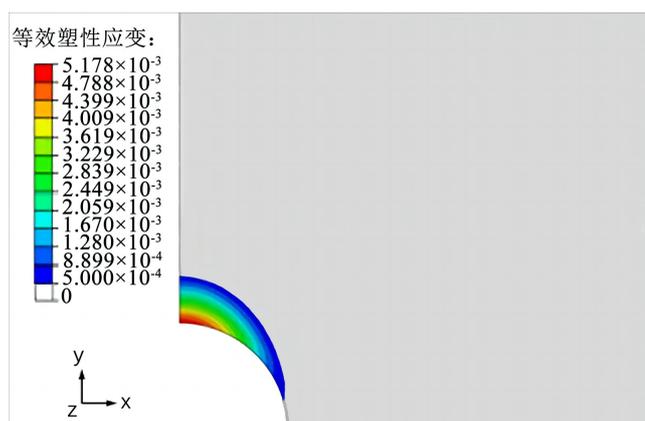


Figure 11. Wellbore deformation results at drilling fluid density 1.1
图 11. 钻井液密度 1.1 时井眼塑形变形结果

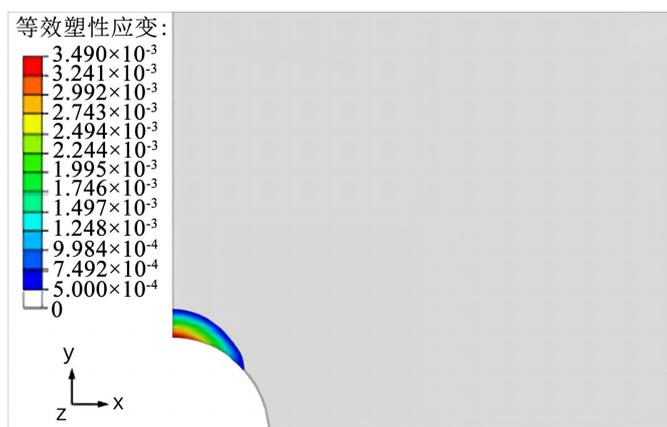


Figure 12. Wellbore deformation results at drilling fluid density 1.2
图 12. 钻井液密度 1.2 时井眼塑形变形结果

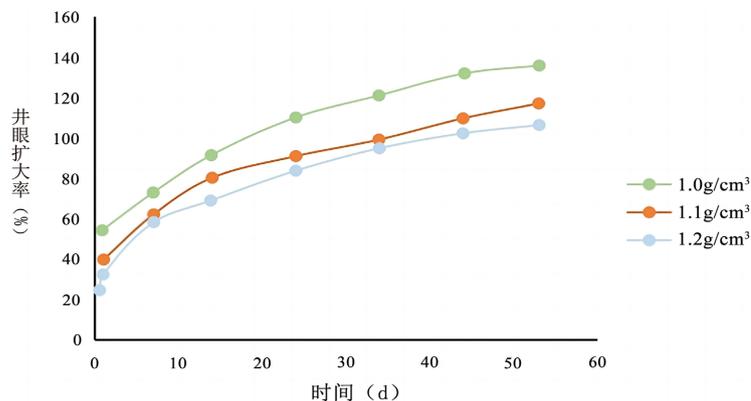


Figure 13. Plot of borehole expansion rate over time
 图 13. 井眼扩大率随时间的变化图

由图 13 可知, 当钻井液密度越大时, 井眼的等效塑性变形和井眼扩大率越小, 即井眼的破坏区越小。证明钻井液的密度对井眼的稳定性有一定的影响, 同时证明当遇到井壁坍塌问题时, 适当的增加钻井液密度有可以有效保持井壁的稳定。钻井液密度越大, 根据静液柱压力公式 $P = \rho gh$, 其在地层中的静液柱压力也越大, 可以防止井壁坍塌, 故而能够有效维持井壁稳定。

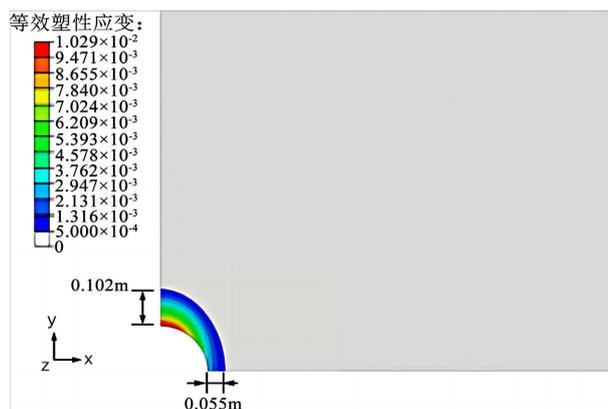


Figure 14. Soaking time 5 d hole shaping and deformation results
 图 14. 浸泡时间 5 d 井眼塑形变形结果

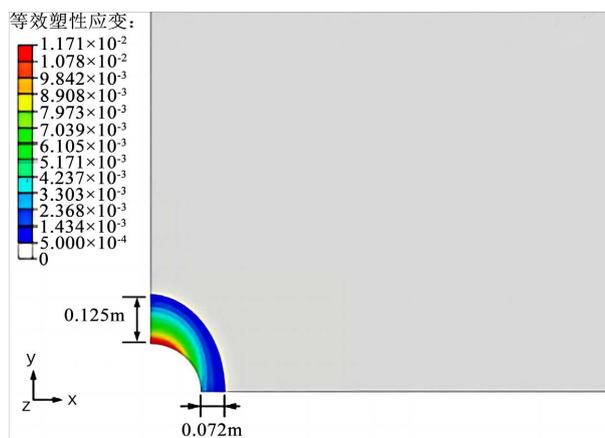


Figure 15. Soaking time 10 d hole shape deformation results
 图 15. 浸泡时间 10 d 井眼塑形变形结果

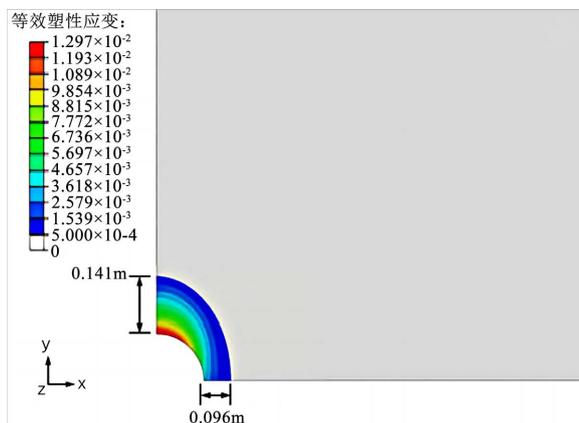


Figure 16. Soaking time 15 d hole shape deformation results

图 16. 浸泡时间 15 d 井眼塑形变形结果

图 14~图 16 为不同浸泡时间下井眼的等效塑性变形图, 为了使模型中不同时间下井眼等效塑形变形结果更加明显, 故以较大的 5 d 时间为间隔, 进行不同浸泡时间下的井眼破坏过程模拟。

由图可知, 浸泡时间越长, 井眼的等效塑性应变区就越大, 即井眼的破坏越大。故而钻井的时间也会影响井壁的稳定性的, 钻井时间越长, 井眼浸泡在钻井液中的时间就越长, 破坏就更大。

图 17(a)、图 17(b)为地层钻开后考虑水化效应和不考虑水化效应后的井壁孔隙压力变化图(钻井液密度为 1.2 g/cm^3):

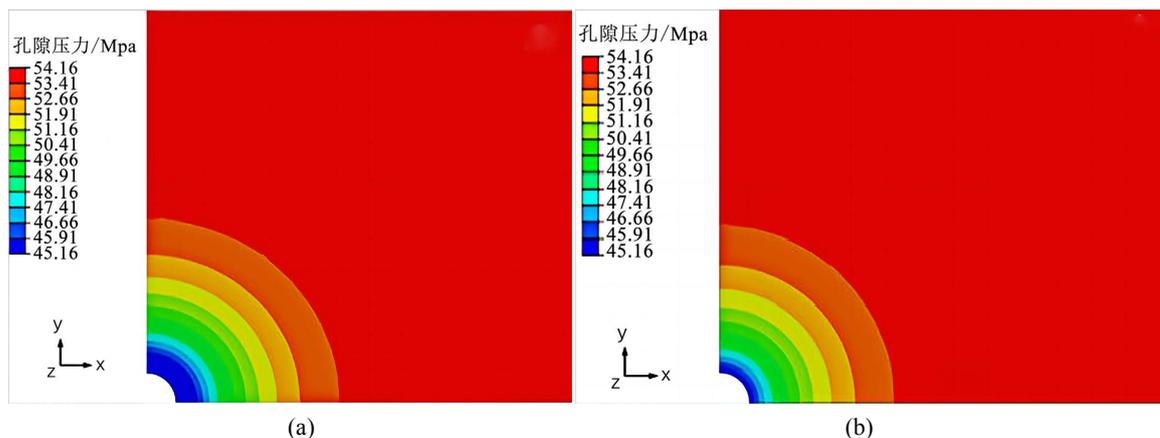


Figure 17. (a) Wellbore pore pressure distribution considering hydration; (b) Wellbore pore pressure distribution without hydration

图 17. (a) 考虑水化作用的井壁孔隙压力分布; (b) 不考虑水化作用的井壁孔隙压力分布

由图可知, 当地层钻开后, 由于钻井液静液柱压力以及钻井液浸入地层与矿物发生反应, 导致井壁附近的孔隙压力产生变化。且在水化作用的干扰下, 孔隙压力变化更大。

5. 总结

综上所述, 可以得到以下结论:

1) 岩石的矿物组成, 阳离子交换容量、比表面积以及微观结构等自身特性会造成不同稳定性的井壁。以泥页岩为例, 泥页岩的矿物组成为脆性矿物和黏土矿物, 自身具有一定的阳离子交换容量和较大的比表面积, 内部孔隙、裂缝较为发育, 使泥页岩地层呈现为脆性, 易发生水化作用, 故井壁稳定性不高。

2) 钻井过程中钻井液的使用必不可少, 而钻井液或多或少会对岩石的硬度产生一定的影响。产生的影响大小可以通过对比考虑钻井液和不考虑钻井液的力学特性试验结果得到。以泥页岩为例, 钻井液对泥页岩的硬度具有较大的影响, 且浸泡时间越长, 硬度越小。

3) 通过数值仿真软件的模拟, 证明了钻井液对井壁的稳定确实存在影响, 浸泡时间越长, 硬度越小, 且适当的增加钻井液密度可以保持地层的稳定。

基金项目

国家级大学生科技创新训练项目“202111551023”(编号: 202111551023); 重庆市高等教育学会高等教育科学研究课题(2021-GX-031); 重庆科技学院本科教育教学改革研究项目(202272); 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX1403)。

参考文献

- [1] 刘锋报, 邵海波, 周志世, 张欢庆, 陈永衡. 哈拉哈塘油田硬脆性泥页岩井壁失稳机理及对策[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(1): 38-41.
- [2] 王磊. 基于瞬态热流固耦合的钻井井壁稳定性分析[J]. 断块油气田, 2023, 30(2): 331-336.
- [3] Allawi, R.H. and Al-Jawad, M.S. (2023) Wellbore Stability Analysis and Selecting Safe Mud Weight Window for Mishrif Reservoir in Southern Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, **16**, Article No. 345. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11435-9>
- [4] Eladj, S., Doghmane, M.Z., Lounissi, T.K., Djeddi, M., Tee, K.F. and Djezzar, S. (2022) 3D Geomechanical Model Construction for Wellbore Stability Analysis in Algerian Southeastern Petroleum Field. *Energies*, **15**, Article 7455. <https://doi.org/10.3390/en15207455>
- [5] 王庆. 基于可靠度理论的井壁稳定性定量评价方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 11880-11886.
- [6] 余坤, 郑世帅, 张优. 基于矿物组分与弹性参数的泥页岩脆性评价模型[J]. 煤炭技术, 2017, 36(7): 73-76. <https://doi.org/10.13301/j.cnki.ct.2017.07.029>
- [7] 国家教育委员. JY/T011-1996. 透射电子显微镜方法通则[S]. 北京: 科学技术文献出版社, 1997.
- [8] 金浩增, 赵志红, 唐鹏程, 张鑫. 页岩储层黏土矿物水化膨胀致裂数值模拟研究[J]. 非常规油气, 2022, 9(2): 125-131.
- [9] 李雪梅, 廖立兵, 李瑞, 谷勤, 王春燕. 氯化铵-乙醇法测定蛭石的阳离子交换容量[J]. 岩矿测试, 2008, 27(3): 204-206.
- [10] 陈珉珉, 林芳, 陈莉, 朱跃芳. 原子吸收分光光度法测定蒙脱石散阳离子交换容量[J]. 广州化工, 2020, 48(11): 113-115.
- [11] 柯式镇, 宋建华, 李建筑, 胡薪云. 分光光度计法岩石阳离子交换容量测量方法及误差分析[J]. 测井技术, 2006, 30(4): 291-293. <https://doi.org/10.16489/j.issn.1004-1338.2006.04.001>
- [12] 罗诚. 硬脆性泥页岩结构及其对力学特征影响研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2013.
- [13] 肖志强, 贾善坡, 亓宪寅, 戴永浩, 吕方, 贾陆锋, 温曹轩. 流-固-化耦合条件下硬脆性泥页岩井壁渐进破坏效应探讨[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10): 2464-2480.
- [14] 吴涛, 韩书华, 张春光, 侯万国, 孙德军. 电导法测定粘土矿物的阳离子交换容量[J]. 油田化学, 2002, 19(3): 205-207, 221. <https://doi.org/10.19346/j.cnki.1000-4092.2002.03.004>
- [15] 宋洋. 海塔盆地井壁稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- [16] 梁大川. 粘土和泥页岩比表面积测定和计算方法综述[J]. 钻井液与完井液, 1995, 12(5): 11-15.
- [17] 邱正松, 丁锐, 于连香. 泥页岩比表面积测定方法研究[J]. 钻井液与完井液, 1999, 16(1): 9-11.
- [18] 余昊, 沈瑞, 郭和坤, 王国栋, 邵国勇, 尚祯浩. 原子力显微镜在页岩储层表征中的应用进展[J]. 应用化工, 2023, 52(2): 511-516, 523. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2023.02.003>
- [19] Rickman, R., Mullen, M., Petre, E., et al. (2008) A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. Paper Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA. <https://doi.org/10.2118/115258-MS>

-
- [20] Islam, M.A., Skalle, P. and Faruk, O. (2009) Analytical and Numerical Study of Consolidation Effect on Time Delayed Borehole Stability during Underbalanced Drilling in Shale. Paper Presented at the Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition, Kuwait City, Kuwait. <https://doi.org/10.2118/127554-MS>