

长庆西区气探井复杂地层井壁稳定性研究

梁海军¹, 吴 勇², 孙亚平³, 韦海防¹, 王培峰¹, 龚武镇⁴, 叶子恒⁴, 黄维安⁴

¹中国石油川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院, 陕西 西安

²长庆油田分公司勘探事业部, 陕西 西安

³川庆钻探有限公司长庆监督公司, 陕西 西安

⁴中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2025年9月23日; 录用日期: 2025年11月5日; 发布日期: 2025年10月13日

摘 要

长庆西区气探井过程中井壁失稳问题频发, 严重阻碍了现场作业进程。针对乌拉力克组页岩钻井过程中发生的剥落掉块、垮塌现象, 通过室内微观组构、理化性能及力学特征测试, 明确井壁失稳机理; 建立考虑弱面作用的力化耦合井壁稳定模型, 评价复杂地层井壁稳定性, 并优化井眼轨迹。结果显示: 乌拉力克组页岩属于弱膨胀性脆性页岩, 微裂缝和层理发育, 为钻井液滤液提供有利渗流通道, 产生尖端因子效应; 钻井液浸泡和层理角度对页岩力学特征具有劣化效应, 在层理角度为 30° 时岩石力学强度最低; 钻井液浸泡作用下, 化学势差和水力压差作用下, 近井带孔隙压力增加, 岩石强度降低, 井周坍塌失稳区域增大; 钻井液浸泡前期, 井周失稳区域较大, 随着浸泡时间增加, 井周失稳区域增加速率降低; 岩石弱面特征使地层坍塌压力增大, 采用井斜方位角为 $30^\circ\sim 240^\circ$ 、井斜角 $0^\circ\sim 28^\circ$ 钻井相对较为安全。

关键词

井壁稳定, 力化耦合井壁稳定模型, 化学势差, 坍塌压力, 长庆西区

Wellbore Stability of Complex Formation of Gas Exploration Well in Changqing West Area Reservoir

Haijun Liang¹, Yong Wu², Yaping Sun³, Haifang Wei¹, Peifeng Wang¹, Wuzhen Gong⁴, Ziheng Ye⁴, Wei'an Huang⁴

¹Drilling & Production Engineering Technology Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Exploration Division of Changqing Oilfield Branch, Xi'an Shaanxi

³Changqing Supervision Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

⁴School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong

Received: September 23, 2025; accepted: November 5, 2025; published: November 13, 2025

文章引用: 梁海军, 吴勇, 孙亚平, 韦海防, 王培峰, 龚武镇, 叶子恒, 黄维安. 长庆西区气探井复杂地层井壁稳定性研究[J]. 自然科学, 2025, 13(6): 1264-1276. DOI: 10.12677/ojns.2025.136132

Abstract

Shale Wellbore instability occurs frequently during drilling the gas exploration well in the Changqing West area, seriously hindering the field operation. In view of the problems of shale spalling and collapse for the Wulalike Formation, its wellbore instability mechanism is determined by the testing of microfabric, physical and chemical properties and mechanical characteristics at an indoor experiment. Considering the weak plane, a dynamic coupled wellbore stability model is established to evaluate the wellbore stability of complex formations and optimize the borehole trajectory. The results show that the shale in the Wulalike Formation is weakly expanded brittle shale, with rich micro-fractures and bedding, which provide favourable seepage channels for drilling fluid filtrate and produce tip factor effect. Drilling fluid immersion and bedding angle have a deterioration effect on shale mechanical characteristics, and the rock mechanical strength is the lowest at the bedding angle of 30° . Under the action of drilling fluid immersion, chemical potential difference and hydraulic pressure difference, pore pressure increases in the near-wellbore zone, rock strength decreases, and the collapse instability area increases. In the early stage of drilling fluid immersion, the wellbore instability area increases, and the rate of increase of the wellbore instability area decreases with the increase of immersion time. The weak plane of the rock makes the collapse pressure increase, so it is relatively safe to drill at the azimuth of $240^\circ\sim 30^\circ$ and the inclination angle of $0^\circ\sim 28^\circ$.

Keywords

Wellbore Stability, Mechanical Chemical Coupling Wellbore Stability Model, Chemical Potential Difference, Collapse Pressure, Changqing West Area

Copyright © 2025 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

长庆西区乌拉力克组地质构造复杂, 裂缝、层理发育[1], 膨胀性黏土矿物含量低, 脆性矿物含量高, 属于硬脆性页岩[2], 钻井过程中, 易发生井壁坍塌、剥落掉块现象, 导致阻卡及卡钻等井下复杂情况, 严重时甚至井眼报废, 增加了钻井难度[3]。为实现长庆西区安全高效钻井, 揭示井壁失稳机理及井壁稳定性评价意义重大。

井壁稳定性评价大致可分为室内实验和数值分析。室内实验方面, 刘厚彬等[4]测试了钻井液浸泡下页岩微观结构、理化性能和力学特征的动态演化规律, 揭示其岩石变形机理及井壁失稳主控因素。刘均一等[5]结合矿物组分与微观结构, 基于多元协同井壁稳定理论, 针对准噶尔盆地硬脆性页岩地层, 提出了以多尺度致密封堵为核心的协同稳定井壁技术对策。Zhang 等[6]指出了硬脆性页岩力学性能与各向异性以及水化作用之间的影响规律, 并得出了受水侵和地质应力影响的页岩地层的变形破坏准则。虽然实验能够直观评价井壁稳定性, 但地下情况复杂, 实验条件难以模拟, 数值模拟可作为拓展室内实验和验证实验结果的有利工具[7][8]。Li 等[9]基于孔隙弹性力学, 并通过测定页岩的强度参数和各向异性弹性, 建立了层状页岩各向异性的井筒稳定性模型, 揭示了不同地层条件下的坍塌压力变化规律。Aslannezhad 等[10]利用 6 种岩石破坏准则, 分析了温度变化、泥浆矿化度变化和黏聚力变化与页岩地层稳定井眼的安全泥浆窗口的影响机理。Fan 等[11]根据各向同性井眼稳定性模型, 基于岩石强度各向异性, 得出了层状

岩石井筒周围破坏区域的计算方法。

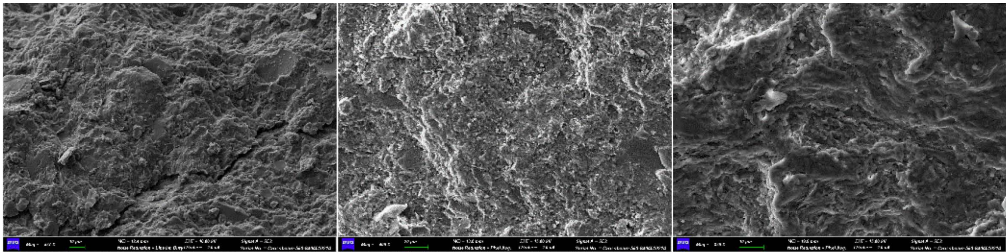
国内外针对井壁稳定研究较多，但地下情况复杂，需要落实到现场研究区域，因此，本文通过对乌拉力克组岩石开展室内实验，并结合考虑弱面作用的力化耦合井壁稳定模型，揭示井壁失稳机理，评价钻井浸泡时间和弱面效应对地层井壁稳定性的影响，确定合适的坍塌压力和最优的井眼轨迹。

2. 地层研究及井壁失稳分析

2.1. 微观组构

2.1.1. 微观结构特征

图 1(a)可知乌拉力克组岩样微裂缝发育含少量晶间微孔，矿物晶体形态差，含少量自生石英，粘土矿物以伊利石和伊蒙混层为主，微粒表面附有棉絮状伊蒙混层。图 1(b)铸体薄片结果可知岩样具泥晶结构，由泥晶方解石、泥晶白云石构成，二者混合沉积，其间见零星生物介壳和黄铁矿，经成岩作用，岩石致密，存在构造微裂缝，宽约 0.1 mm，未充填。图 1(c)可知岩样层理发育，高应力及外力环境下容易产生微裂缝，为钻井液提供渗流通道，弱化岩石强度从而导致井壁失稳。



(a) 电镜扫描



(b) 铸体薄片



(c) 层理结构

Figure 1. Shale structure of Wulalike formation
图 1. 乌拉力克组页岩结构

2.1.2. 矿物组成分析

由表 1 可知乌拉力克组岩样石英含量最高，平均为 36.85% (30.64%~39.50%)，其次为粘土矿物，平均为 28.14% (21.88%~39.58%)，石英、长石、方解石等脆性矿物含量达 63.15%左右，该地区页岩为硬脆性页岩。

由表 2 可知粘土矿物主要是以伊利石(平均为 44.25%)以及伊蒙间层(平均为 37.25%)，其间层比平均为 11.25%，可以看出，具有高膨胀性能的蒙脱石含量很低，推断出处在此类区域内的页岩属于膨胀性低的硬脆性页岩。

Table 1. Whole rock mineral analysis

表 1. 全岩矿物分析

序号	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	铁白云石	菱铁矿	黄铁矿	粘土矿物
1	39.05	1.00	7.09	24.28	-	3.44	0.78	0.15	24.21
2	30.64	0.50	7.45	17.63	11.68	9.29	0.63	0.30	21.88
3	39.50	7.38	10.33	0.50	-	1.59	0.77	0.35	39.58
4	38.22	0.48	6.73	21.83	2.66	2.49	0.72	-	26.87

Table 2. Clay mineral analysis

表 2. 黏土矿物分析

序号	高岭石(K)	绿泥石(Ch)	伊利石(I)	伊/蒙间层(I/S)	伊/蒙间层比(% S)
1	0	25	43	32	5
2	0	20	48	32	5
3	1	5	41	53	30
4	0	23	45	32	5

2.2. 理化性能分析

2.2.1. 水化性质分析

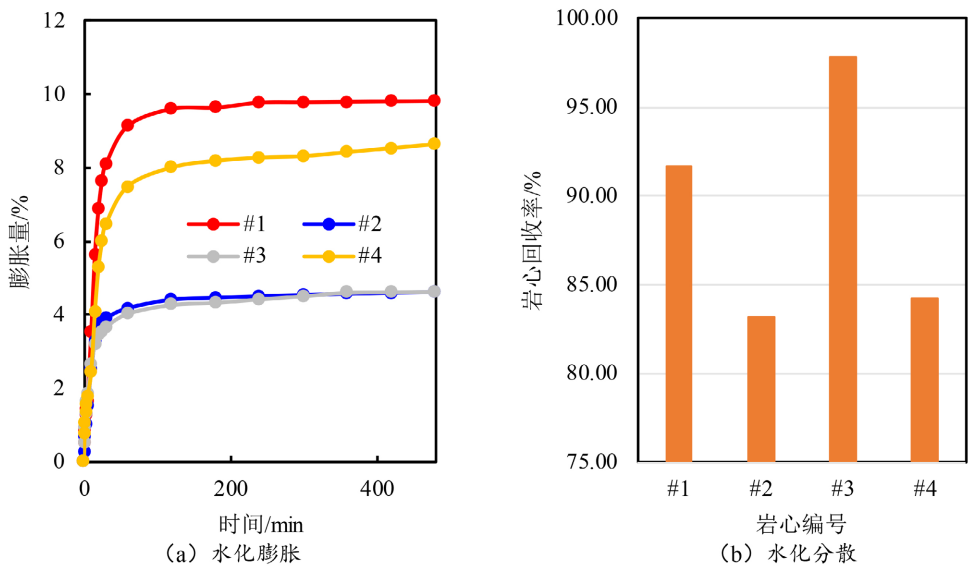


Figure 2. Analysis results of hydration properties
图 2. 水化性质分析结果

图 2 为乌拉力克组岩样水化性质分析结果，从图 2(a)看出，岩样膨胀率为 4.62%~9.82% (8 h 后)，平均为 6.93%。具有一定的水化膨胀性能，同时由于乌拉力克组岩样伊利石含量高，实验初始阶段岩样产生较高的膨胀压，初始阶段膨胀率急剧上升；从图 2(b)可知，岩样回收率为 83.23%~97.82%，平均回收率为 89.24%，属于弱分散性岩石。

2.2.2. ZETA 电位分析

从表 3 结果可知，乌拉力克组岩样 Zeta 电位绝对值介于 13.44~15.98 mV，岩样颗粒间 Zeta 电位绝对值小，吸引力较大，粒子倾向于凝结或凝聚，岩样基本处于不分散状态，粘土的水化膨胀受到抑制。

Table 3. ZETA potential analysis results
表 3. ZETA 电位分析结果

编号	Zeta 电位/mV			Zeta 电位均值及标准差
1	-14.37	-17.93	-15.65	-15.98 ± 1.80
2	-13.40	-15.36	-15.36	-14.71 ± 1.13
3	-13.29	-13.70	-13.34	-13.44 ± 0.22
4	-15.35	-13.86	-13.61	-14.27 ± 0.94

2.3. 力学特征分析

从表 4 结果可知，不同角度岩样峰值强度和弹性模量差异明显，0°和 90°岩样峰值强度和弹性模量最高，60°次之，30°岩样峰值强度和弹性模量最低，表明乌拉力克组岩样在力学特征上具有明显的各向异性特征，而岩样的泊松比随层理角度变化较为离散，规律性不强。钻井液浸泡后岩石强度均出现劣化现象，表明现场钻井液对岩石力学强度具有较高的影响。

Table 4. Strength characteristics of rock soaked by drilling fluid
表 4. 钻井液浸泡岩石强度特征

角度(°)	浸泡天数(d)	峰值强度(MPa)	弹性模量(GPa)	泊松比
0	0	170.66	16.32	0.21
	5	142.36	14.65	0.15
	10	120.68	12.36	0.17
30	0	50.36	20.65	0.24
	5	46.53	18.65	0.16
	10	40.23	17.46	0.18
60	0	71.63	18.65	0.18
	5	65.32	16.43	0.17
	10	60.2	14.23	0.21
90	0	190.65	23.69	0.16
	5	165.32	20.68	0.19
	10	150.2	18.95	0.17

2.4. 井壁失稳机理分析

由以上分析可知, 乌拉力克组岩样石英含量高, 石英颗粒间具有点、线接触模式, 同时岩样中片状黏土颗粒在沉积过程中具有定向分布特征, 使得岩样中发育有微裂缝和层理结构。通过全岩矿物和黏土矿物分析可知, 乌拉力克组岩样膨胀性矿物极少, 脆性矿物含量较高, 属于膨胀性低的硬脆性页岩, 岩样在高应力及外力环境下容易产生微裂缝。通过理化特性分析可知, 乌拉力克组岩样属于弱膨胀岩样, 颗粒倾向于凝结或凝聚, 岩样基本处于不分散状态, 粘土的水化膨胀受到抑制, 井壁失稳主要受控于钻井液滤液进入岩样导致颗粒间胶结强度变低, 并且在裂缝尖端产生应力因子, 诱发微裂缝扩展延伸, 同时钻井液进入岩样孔隙, 导致孔隙压力增加, 地层有效应力降低, 最终导致井壁坍塌失稳。力学特征实验表明, 弱面使得岩石易沿着弱面滑移破坏, 降低岩石力学特征。研究表明井壁失稳机理受到多重因素, 但根本原因是力学因素, 因此需结合力学分析模型指导井壁稳定。

3. 井壁稳定模型构建及求解

3.1. 井壁稳定模型

3.1.1. 压力传递模型

钻井液侵入地层后, 地层流体与钻井液之间的化学电位差以及水力压差致使地层孔隙压力会再次分布。通过考虑化学势变化以及流体流动的孔隙压力, 建立具体如下的计算模型[12] [13]:

$$\frac{k}{\mu C \varphi} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + I_m \frac{RT}{V} \ln \frac{1}{\theta_{\text{shale}}} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

式中, p 为地层流体压力, MPa; C 为流体压缩系数, Pa^{-1} ; μ 为流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; k 为渗透率, μm^2 ; φ 为孔隙度; T 为绝对温度, K; I_m 为膜效率; V 为水的偏摩尔体积, $1.80 \times 10^{-5} \text{ m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$; R 为气体常量, $8.314 \text{ m}^3\cdot\text{Pa}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$; θ 为钻井时地层流体活度; θ_{shale} 为泥页岩中地层水活度。

$$D \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

式中, D 为活度扩散系数, m^2/s 。

3.1.2. 本构方程

以压力传递模型、有效应力原理以及弹塑性力学理论为基础, 综合考虑化学势变化以及流体流动与骨架变形耦合, 得到如下的应力平衡方程[14]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \sigma_{ij} - \left(\frac{1}{6G} - \frac{1}{9K} \right) \sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{\alpha}{3K} p \delta_{ij} \quad (3)$$

式中, ε_{ij} 为应变张量; σ_{ij} 为应力张量; α 为 Biot 有效应力系数; K 为体积模量; G 为剪切模量; δ_{ij} 为 Kronecker-delta 函数, 其取值为 1 ($i=j$) 和 0 ($i \neq j$)。

3.1.3. 几何方程

应变被用来表示地层变形的程度。基于固体力学小变形的基本原理, 位移和应变相互关联, 而位移分量和应变分量之间的微分关系满足如下的变形几何方程[15]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4)$$

式中: $u_{i,j}$, $u_{j,i}$ 为位移分量。

3.1.4. 物性参数演化方程

受载岩石渗流过程涉及到岩石骨架、基质变形相互作用，孔隙度和渗透率处于动态演化过程，其控制方程如下[16]：

$$\phi = \frac{1}{1 + \varepsilon_v} (\phi_0 + \varepsilon_v) \quad (5)$$

$$\frac{k}{k_0} = \frac{\left[1 + \frac{\varepsilon_v}{\phi_0}\right]^3}{(1 + \varepsilon_v)} \quad (6)$$

式中： ϕ 为变形后的孔隙度， ϕ_0 为原始条件下的孔隙度， k 为变形后的渗透率， k_0 为原始条件下的渗透率。

3.1.5. 基质强度破坏准则

根据 Mogi-Column 准则计算基质临界井底压力，Mogi-Column 准则表达如下[17]：

$$\tau_{oct} = \alpha + b\sigma'_{m,2} \quad (7)$$

$$\sigma'_{m,2} = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (8)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \varphi \quad (10)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \quad (11)$$

式中， $\sigma'_{m,2}$ 为有效均应力， τ_{oct} 为八面体剪应力， c 为基质粘聚力， φ 为基质内摩擦角。

3.1.6. 弱面强度准则

当岩体沿弱面破坏时，岩体的强度受弱面强度控制，即岩体强度为[18]：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_w + \sigma_3 \tan \varphi_w)}{(1 - \tan \varphi_w \cot \varphi) \sin 2\varphi} \quad (12)$$

弱面法线与第一主应力方向的夹角 φ 满足 $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2$ 的前提是岩体沿弱面破坏。若 φ 满足前提，应力状态可以满足式(12)，那么岩石破坏会顺弱面进行滑移，且岩体强度会被弱面强度所控；若 φ 对此条件不成立，那么岩石破坏会沿 $\varphi = \pi/4 + \varphi_0/2$ 的方向产生破坏，岩体强度会被岩石基体强度所控。而其 φ_1 以及 φ_2 的值可以通过式(13)来计算出。

$$\begin{cases} \varphi_1 = \frac{\varphi_w}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_w \cot \varphi_w) \sin \varphi_w}{\sigma_1 + \sigma_3} \right] \\ \varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \varphi_w - \varphi_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中： σ_1 为最大主应力，MPa； σ_3 为最小主应力，MPa； c_w 为弱面的内聚力，MPa； φ_w 为弱面的内摩擦角，°； c_0 为基质内聚力，MPa； φ_0 为基质内摩擦角，°； φ 为弱面与最大主应力夹角，°； φ_0 为岩石本体破坏面与最大主应力的夹角，°。

3.2. 有限元模型构建

考虑到井壁稳定模型渗透性参数的演化与流固耦合作用，联立式(1)、(3)、(4)、(5)和(6)组成方程组，其方程具有高度非线性，很难具有解析解，本文采用商业有限元 COMSOL 进行求解，采用固体力学和达西定律接口。有限元方法建立的几何模型、网格划分如图 3 所示。坍塌压力求解通过 COMSOL 以及 MATLAB 联立公式(7)~(13)二次开发循环迭代求解，模型计算过程中需要将岩石力学参数通过插值方式嵌入 COMSOL 变量中。模型参数见表 5，模型参数来自乌拉力克组现场资料、测井资料以及室内试验所得。有限元模型建立后，对模型施加边界和初始条件(图 3(c))，可表示为：

$$\begin{cases} P(r,t=0)=P_0 \\ P(r=r_w,t)=P_m \end{cases} \tag{14}$$

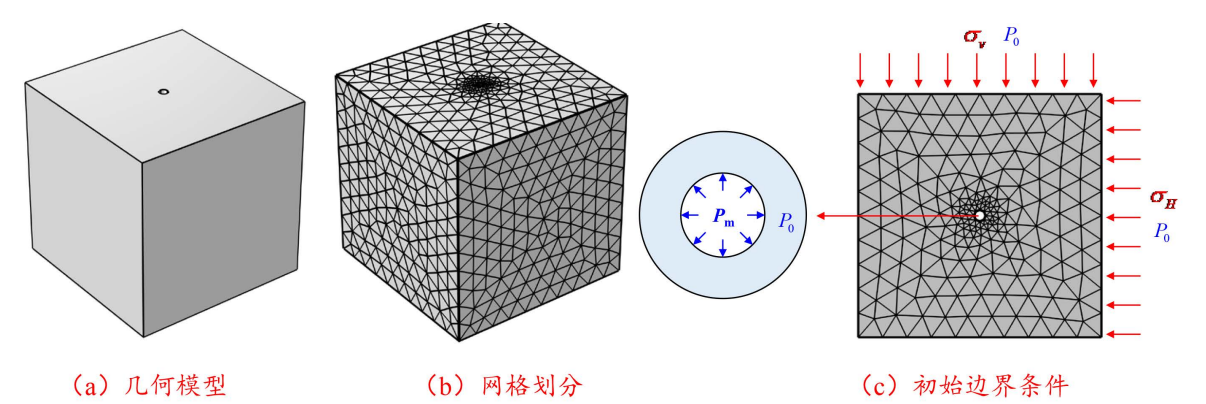


Figure 3. Finite element model
图 3. 有限元模型

Table 5. Model parameters
表 5. 模型参数

参数	数值	来源
渗透率, m ²	1.9 × 10 ⁻¹⁶	实验室
孔隙度,	5.3%	实验室
流体粘度, mPa·s	1	实验室
膜效率	0.2	实验室
解离系数	3	实验室
离子扩散浓度, m ² /s	4.6 × 10 ⁻⁹	实验室
低活度钻井液离子浓度, mol/L	4.5	实验室
原始地层离子浓度, mol/L	6.5	现场资料
井深, m	4235	现场资料
钻井液液柱压力, MPa	58	现场资料
地层孔隙压力, MPa	56	测井数据
井眼半径, m	0.1	现场资料
最大水平主应力, MPa	67	测井数据
最小水平主应力, MPa	65	测井数据
上覆岩层压力, MPa	104	测井数据

4. 实例计算分析

4.1. 孔隙压力分布规律

图 4 为钻井液作用下不同时刻地层孔隙压力分布规律。从图 4 可以看出，随着钻井液浸泡时间的持续增加，近井带的孔隙压力呈现递增趋势，主要因为在钻井液与地层流体化学势差以及钻井液的水力压差的共同作用下，钻井液滤液侵入地层并导致孔隙压力随之升高。由于离子以及流体持续向地层中储集，导致渗透压影响规模一直扩大。同时，在化学电位差的作用下，远井地层的孔隙压力也会随之下降，且逐渐趋近于地层压力。因此，通过优化钻井液性能，对地层进行有效封堵，降低溶质扩散，阻缓压力传递可有效提高井壁稳定性。

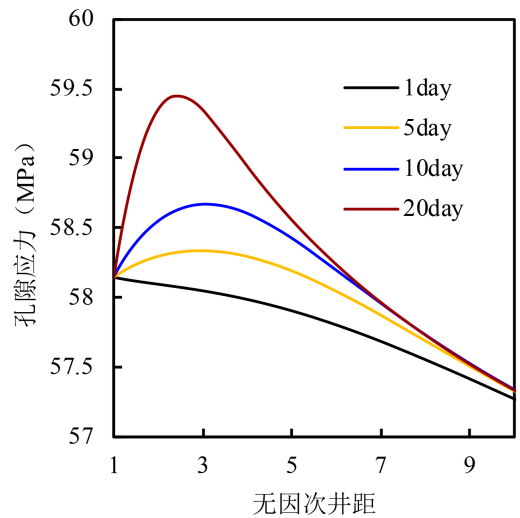


Figure 4. Pore pressure evolution with time
图 4. 孔隙压力随时间演化规律

4.2. 井周应力分布

由图 5 可知，NS 方向井眼周围轴向应力最大，其次为径向应力，周向应力最小，井周(井壁圆弧)易产生大角度周向剪切破坏，由于最大(轴向应力)和最小(周向应力)应力在井周轴向/切向弧(井壁圆弧)中。WE 方向井眼周围周向应力最大，其次为轴向应力，径向应力最小，井周易产生轴向剪切破坏。因此井周围岩处于轴向剪切和周向剪切共同作用。

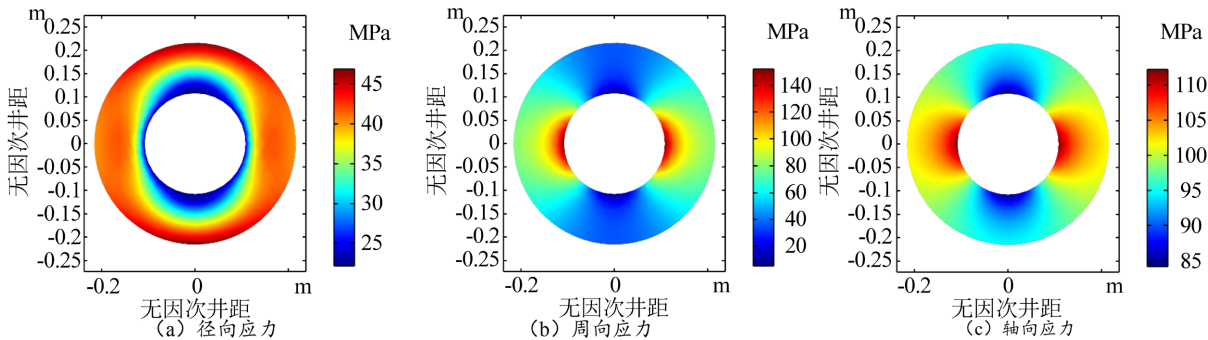


Figure 5. Distribution characteristics of stress around well
图 5. 井周应力分布特征

4.3. 井周失稳区分布

图 6 为井周失稳区域, 其中紫色表示失稳区域。由图 6 可知, 随着钻井液浸泡时间增加, 井眼周围失稳区域面积增大, 原因有: (1) 钻井液浸泡时间增加, 在化学势差和水力压差作用下, 地层含水量增加, 导致孔隙压力增加, 使得 Mohr 应力圆向左移动, 易超过包络线导致井壁失稳[19]; (2) 页岩具有水化特征, 钻井液滤液侵入地层导致岩石强度劣化。同时从图 6 可观察出, 井壁失稳不光发生在井壁处, 也可能发生在地层中, 这种情况容易导致井周剥落掉块。因此, 降低钻井液活度, 使地层中水分向井筒逆向流动, 减小地层孔隙压力, 强化岩石力学特征可有效降低井周失稳区域。

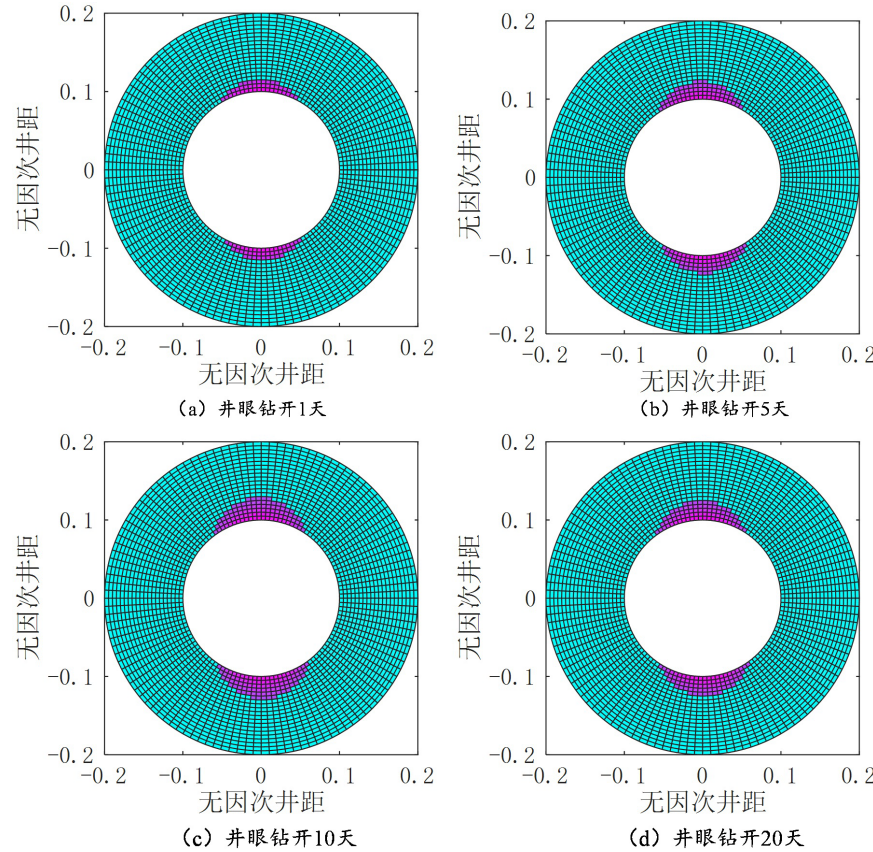


Figure 6. Distribution characteristics of wellbore instability area
图 6. 井周失稳区分布特征

4.4. 弱面影响机制

图 7 为不同弱面对井壁稳定性的影响, 图中径向表示井斜角, 周向为井斜方位角。井壁稳定评价依据为相同条件下坍塌压力越小, 越有利于快速钻进, 井壁稳定性越高。其中第一组弱面产状为倾向 165°、倾角为 0°; 第二组弱面产状为倾向 110°、倾角为 15°; 第三组弱面产状为倾向 110°、倾角为 20°, 该参数主要来源于乌拉力克组成像测井数据反算。由图 7 可知, 随着弱面个数增多, 坍塌压力呈递增趋势, 表明弱面对岩石整体强度劣化明显。当不考虑弱面时, 采用井斜角 0~35°钻井最为安全, 水平井钻井最危险。当考虑 1 个弱面时, 井斜方位角为 WE 方向时, 采用井斜角 0~35°钻井最为安全; 而当井斜方位角为 WE 时, 采用井斜角 0~28°钻井最为安全。当考虑 2 个和 3 个弱面时, 井斜方位角为 30°~240°时, 采用井斜角 0~45°钻井最为安全; 在井斜方位角为 30°~240°时扇形区域, 钻井相对危险。表明对于乌拉力克组微裂缝

发育地层需采用弱面强度准则评价井壁稳定性。对于弱面地层，对此应选择合理的钻井液密度，提高钻井液封堵能力，降低钻井液在裂缝中的渗流及压力传递，提高地层的承压能力[20]。

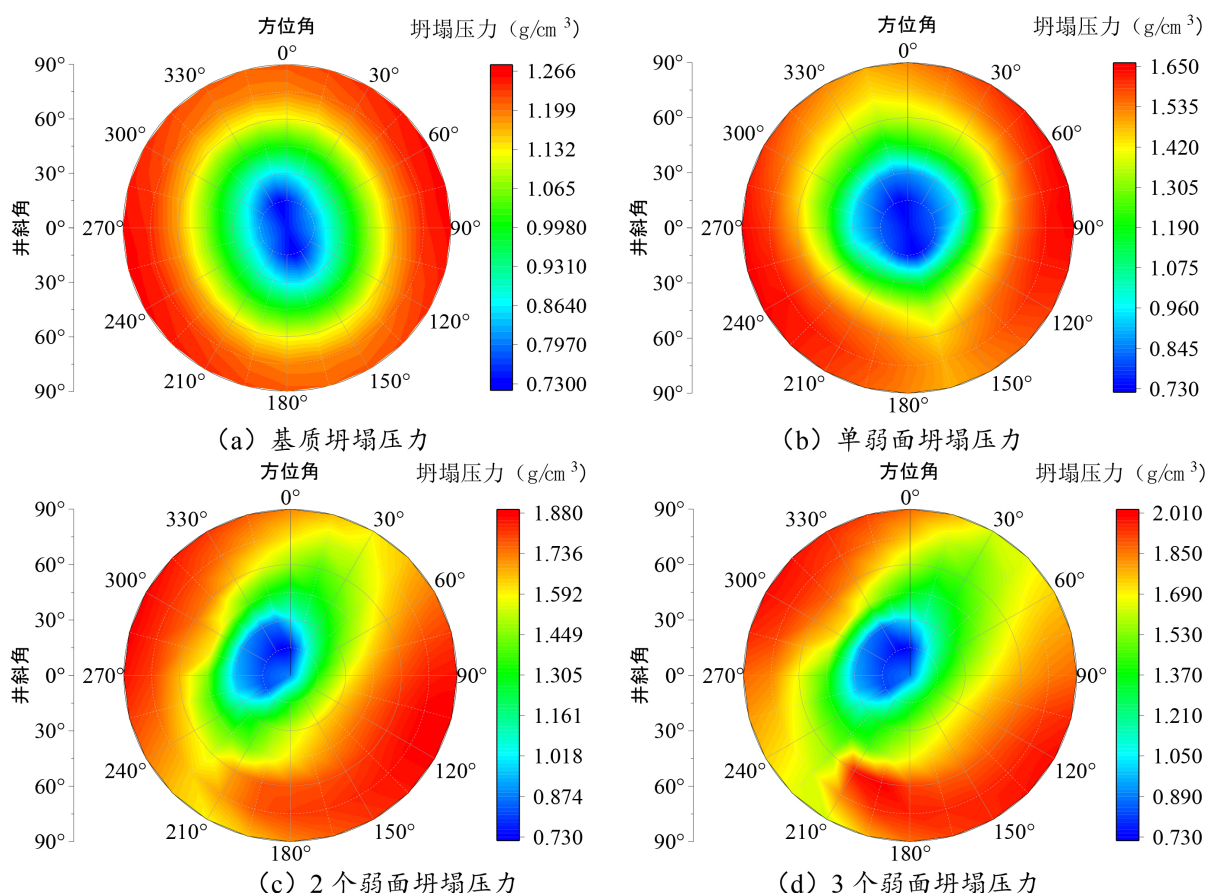


Figure 7. Influence rule of weak surface on collapse pressure

图 7. 弱面对坍塌压力影响规律

5. 讨论

本研究以长庆西区乌拉里克组气探井复杂地层井壁失稳问题为核心，通过室内实验与力化耦合模型结合，揭示了弱膨胀硬脆性页岩的失稳机理，并结合现场参数构建流固耦合井壁稳定模型，明确了弱面对于井壁稳定性的影响。同时该论文为乌拉里克组井壁稳定钻井液提供了设计思路。现有研究多聚焦单一因素对孔压的影响，未能体现“双驱动”的协同效应。例如，程远方等[12]在致密油水平井页岩坍塌周期研究中，仅关注水力压差导致的孔压变化，忽略了化学势差对孔压的长期调控作用；Zhang 等[14]虽建立力化耦合模型，但未量化化学势差的贡献比例，难以区分“水力主导”与“化学主导”的工况差异。本研究的贡献在于：首次针对乌拉里克组低膨胀页岩，量化了化学势差对孔压的影响，化学势差导致的孔压升高范围是单纯水力压差的 1.8 倍，且该效应随浸泡时间延长(10 d 后)逐渐占据主导。这一结论为钻井液性能优化提供了新方向：通过降低钻井液活度(如提高盐浓度至 4.5 mol/L 以上)，可反向利用化学势差促使地层水分向井筒流动，抑制孔压升高，这比单纯提高钻井液密度(易导致井漏)更安全高效。本文构建模型同样存在一定局限性：层理性较强的弱面地层，具有丰富的裂缝发育且伴随着非均质特征；其次，实际地层处于热力学开放系统，具有热流力学多场耦合作用，同时每个物理场对于井壁稳定性影响程度

具有强弱之分，现场需结合实际情况选择合理的多场耦合井壁稳定模型进行井壁稳定分析。

6. 结论

(1) 乌拉力克组岩样石英含量高，粘土矿物以伊利石和伊蒙混层为主，膨胀性粘土较少，膨胀性和分散性较弱，属于弱膨胀弱分散性硬脆性页岩，微裂缝和层理发育，为钻井液滤液提供有利通道，弱化岩石强度。

(2) 钻井液浸泡和层理角度可降低乌拉力克组页岩地层力学强度，弱面效应对乌拉力克组岩力学性能影响明显，岩石力学各向异性明显，层理角度为 0° 和 90° 岩石力学强度最大， 60° 次之， 30° 强度最大。

(3) 井周围岩处于轴向剪切和周向剪切共同作用，弱面导致地层坍塌压力增加，井壁岩石容易沿弱面滑移垮塌失稳，采用井斜方位角为 $240^\circ \sim 30^\circ$ 、井斜角 $0^\circ \sim 28^\circ$ 钻井相对较为安全。

(4) 钻井液浸泡作用下，在化学势差、水力压差和弱面作用下，钻井液滤液侵入地层导致孔隙压力升高，岩石力学特征弱化，降低井壁稳定性。对此，需重点考虑岩石弱面特征，选择合理钻井液密度，提高钻井液封堵性能，降低钻井液渗流能力和阻缓压力传递，提高地层承压能力和井周岩石有效支撑作用。

基金项目

中石油川庆钻探工程有限公司科研项目“长庆西区气探水平井安全钻完井工作液研究”(项目编号 CQ2023B-6-4-3); 国家自然科学基金项目“引入可靠性理论研究层理性页岩力-化-渗-热耦合井壁稳定化学调控方法与机理”(52374026); 国家自然科学基金项目“具有温度开关效应的环保型钻井液封堵剂研制及其作用机理”(51974351)。

参考文献

- [1] 王玉满, 周尚文, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地西北缘奥陶系乌拉力克组裂缝孔隙表征[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(7): 1146-1162.
- [2] 张琳琳, 王孔杰, 赖枫鹏, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组海相页岩气储层甜点分类评价[J]. 石油实验地质, 2024, 46(1): 191-201.
- [3] 金衍, 薄克浩, 张亚洲, 等. 深层硬脆性泥页岩井壁稳定力学化学耦合研究进展与思考[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 159-169.
- [4] 刘厚彬, 孙航瑞, 崔帅, 等. 层理性页岩变形机理及力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S1): 174-180.
- [5] 刘均一, 柴金鹏, 李光泉, 等. 准噶尔盆地硬脆性页岩强化致密封堵水基钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 50-56.
- [6] Zhang, Q.G., Fan, X.Y., Chen, P., et al. (2020) Geomechanical Behaviors of Shale after Water Absorption Considering the Combined Effect of Anisotropy and Hydration. *Engineering Geology*, **269**, Article 105547. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105547>
- [7] Huang, F.S., Kang, Y.L., Liu, H.Y., et al. (2019) Critical Conditions for Coal Wellbore Failure during Primary Coalbed Methane Recovery: A Case Study from the San Juan Basin. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **52**, 4083-4099. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01825-5>
- [8] Cui, S., Liu, H., Meng, Y., Zhang, Y., Tao, Y. and Zhang, X. (2021) Study on Fracture Occurrence Characteristics and Wellbore Stability of Limestone Formation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **204**, Article 108783. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108783>
- [9] Li, S.B., Liang, K., Wang, C.H., et al. (2022) Study on the Mechanism of Anisotropic Wellbore Instability in Continental Shale in Songliao Basin. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **12**, 2551-2563. <https://doi.org/10.1007/s13202-022-01504-2>
- [10] Aslannezhad, M., Keshavarz, A. and Kalantariasl, A. (2020) Evaluation of Mechanical, Chemical, and Thermal Effects on Wellbore Stability Using Different Rock Failure Criteria. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **78**, Article 103276. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103276>

-
- [11] Fan, X.Y., Zhang, M.M., Zhang, Q.G., *et al.* (2020) Wellbore Stability and Failure Regions Analysis of Shale Formation Accounting for Weak Bedding Planes in Ordos Basin. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **77**, Article 103258. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103258>
- [12] 程远方, 黄浩勇, 韩忠英, 等. 致密油开发水平井段页岩坍塌周期的确定[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 62-68.
- [13] 袁俊亮, 邓金根, 谭强, 等. 硬脆性泥页岩渗流-应力耦合井壁坍塌压力计算方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(8): 2053-2056+2085.
- [14] Zhang, S.F., Wang, H.G., Qiu, Z.S., *et al.* (2019) Calculation of Safe Drilling Mud Density Window for Shale Formation by Considering Chemo-Poro-Mechanical Coupling Effect. *Petroleum Exploration and Development*, **46**, 1271-1280. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(19\)60280-6](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(19)60280-6)
- [15] Liu, X.D., Sang, S.X., Zhou, X.Z., *et al.* (2023) Coupled Adsorption-Hydro-Thermo-Mechanical-Chemical Modeling for CO₂ Sequestration and Well Production during CO₂-ECBM. *Energy*, **262**, Article 125306. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125306>
- [16] 龙航, 林海飞, 马东民, 等. 基于弹-塑性变形的含瓦斯煤体渗透率动态演化模型研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(9): 3859-3871.
- [17] 丁立钦, 王志乔, 吕建国, 等. 基于围岩本体 Mogi-Coulomb 强度准则的层理性岩层斜井井壁稳定模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 622-632.
- [18] 曹文科, 邓金根, 蔚宝华, 等. 页岩层理弱面对井壁坍塌影响分析[J]. 中国海上油气, 2017, 29(2): 114-122.
- [19] 贾利春, 黄晓嘉, 郭正温. 井壁稳定性研究中考虑中间主应力强度准则的对比分析[J]. 断块油气田, 2017, 24(1): 105-111.
- [20] 马天寿, 王浩男, 杨赞, 等. 不同地应力状态下各向异性地层斜井井壁破裂规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(3): 1123-1135.