

长73泥页岩地层井壁失稳物化机理及力学特征研究

谢先奎^{1*}, 郭康², 高洁²

¹长庆油田公司勘探事业部, 陕西 西安

²川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年11月18日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

弄清鄂尔多斯盆地长73层位井壁频繁失稳物化机理及岩石力学特征, 对该地区钻井至关重要。通过扫描电镜、X射线衍射、滚动回收率、膨胀性和Zeta电位试验, 分析长73层位井壁失稳物化机理。结果表明: 岩石层理、微裂缝和微裂隙发育; 矿物组分中石英含量最高(平均28.33%), 其次为粘土矿物(平均18.5%), 其中粘土矿物以伊/蒙间层(平均62.67%)和伊利石(30.33%)为主, 属于典型的硬脆性泥页岩地层; 回收率为97.32%~98.62%, CST毛细管测试为13.65 s~20.67 s, Zeta电位绝对值介于8~22 mV, 岩石水化分散性较弱。物化分析表明, 长73层位井壁失稳主要是由于钻井液渗入地层, 引起泥页岩结构力变化导致剥落掉块。钻井液浸泡岩石结果显示: 钻井液滤液进入微裂缝后, 伊利石和蒙脱石在碱性条件下与溶液发生离子反应, 改变了层理面矿物成分, 降低了微裂缝面的摩擦性能, 从而影响岩石强度, 其中水基钻井液浸泡后岩石力学参数变化幅度最大, 岩石强度降低32.40%; 随着浸泡时间增加, 岩石力学参数呈递减趋势, 岩石强度降低幅度可达11.11%~36.81%, 且浸泡时间增加, 微裂缝尖应力强度因子增加, 临界断裂韧性降低, 裂缝更容易扩展。

关键词

泥页岩, 井壁稳定, 强度, 岩石力学, 理化性能

Study on Physicochemical Mechanism and Mechanical Characteristics of Wellbore Instability in Chang 73 Shale Formation

Xiankui Xie^{1*}, Kang Guo², Jie Gao²

¹Exploration Division of Changqing Oilfield Company, Xi'an Shaanxi

²Drilling and Production Engineering Technology Research Institute of Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

*第一作者。

Abstract

It is of marked importance for drilling to understand the physicochemical mechanism and mechanical characteristics of frequent instability occurrence of borehole at Chang 73 formation in Ordos Basin. The physicochemical mechanism of borehole instability at Chang 73 formation was analysed by the scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction, rolling recovery and zeta potential test. The results showed that rock bedding, microcracks and microfractures were developed and the content of quartz in mineral components was the highest (average 28.33%), followed by clay minerals (average 18.5%), in which clay minerals were mainly Iraq/Mongolia interlayer (average 62.67%) and illite (30.33%), belonging to typical hard brittle shale formation. The recovery was 97.32%~98.62%, the CST capillary test was 13.65 s~20.67 s, and the absolute value of zeta potential is between 8~22 MV, indicating its weak hydration dispersion. Physicochemical analysis showed that the wellbore instability of Chang 73 formation was mainly due to the change of shale structural force caused by the penetration of drilling fluid into the formation, leading to peeling and block falling. The results of rock immersion by the different drilling fluids showed that after the filtration entered the microcracks illite and Montmorillonite reacted with the solution under alkaline conditions, which changed the mineral compositions of bedding surface and reduced the friction performance of microfracture surface, thus affecting the rock strength. Among them, the variation range of rock mechanical parameters was the largest after soaking in water-based drilling fluids, reduced by 32.40%. The mechanical parameters of rock tended to decrease with soaking time, and the reduction ranged from 11.11% to 36.81%. With the increase of soaking time, the stress intensity factor at the tip of microcrack increased, the critical fracture toughness decreased, and the crack was inclined to expand.

Keywords

Shale, Borehole Stability, Strength, Rock Mechanics, Physical and Chemical Properties

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

井壁稳定性是钻井面临复杂性难题之一。井壁失稳在钻井施工过程中主要表现为缩径、井眼扩大、坍塌卡钻、固井质量差等，导致钻井周期长，同时给后期储层保护和改造实施带来困难[1] [2] [3] [4]。井眼失稳段，多发生在泥页岩层。实际钻井过程中 > 75%以上都是由泥页岩构成，约有 90%井眼坍塌问题都是与泥页岩不稳定性有关[5]。因此，对于泥页岩井壁稳定性的研究非常重要。岩石强度是维持井壁稳定最主要的因素，钻井液循环过程中，岩石浸泡在不同钻井液中，随着浸泡时间和钻井液组分及性质的改变，岩石强度会出现不同的变化规律[6] [7] [8] [9]。为此，展开岩石理化性能研究和钻井液浸泡对岩石力学特征的影响，对于安全钻井具有直接参考价值。

目前，针对泥页岩井壁稳定性研究可以通过多种手段研究。张文等人[10]通过高温下页岩三轴压缩实验，结合井壁稳定分析理论，分析了页岩强度随温度的劣化规律，并结合热固耦合模型，研究钻井液与井壁温差对井壁稳定性影响规律。黎然等人[11]采用半连续乳液聚合法合成了纳米封堵剂 NanoZJS-1，在

地层温度作用下,使得页岩表面亲水性反转,有效阻止滤液渗入地层,提高井壁稳定性。J. C. Jaeger、刘向君和 Liang 等人[11] [12] [13]基于连续性介质力学建立弱面井壁稳定分析模型,分析了泥页岩弱面产状,地应力基质对井壁稳定性研究。马天寿等人[14] [15]针对页岩水化问题,提出 CT 扫描技术并建立水化页岩损伤本构方程,定量评价页岩水化细观损伤特征。这些研究对于维持井壁稳定提供了理论依据。鄂尔多斯盆地长 73 层位多发生漏失和阻卡。因此,为了安全高效钻进,需要开展长 73 层位理化性能、岩石力学特征研究。

本文选用鄂尔多斯盆地长 73 层位泥页岩,通过 SEM, XRD 测试,膨胀性测试、水化分散实验和 CST 测试等,获取长 73 层位岩石理化性能。同时,展开不同钻井液及不同浸泡时间下强度特征试验,研究钻井液浸泡过程中长 73 页岩强度变化规律,为后期井壁稳定性研究提供科学依据。

2. 长 73 泥页岩层井壁失稳机理

试验岩心(如图 1 所示)取自鄂尔多斯东南部延长组长 73 段,岩性致密,层理、裂缝和微裂缝发育,为一套半深湖相-深湖相暗色泥页岩,岩电特征明显,表现为高伽马、高电阻、高声波时差特征[16]。



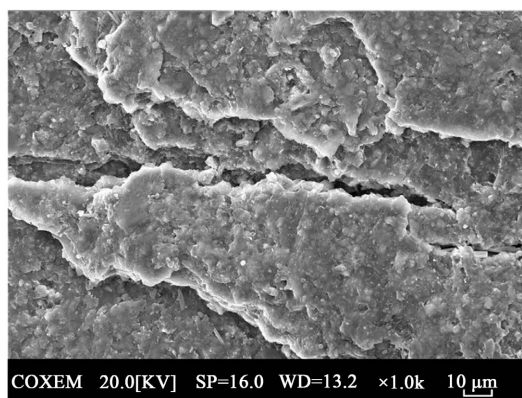
Figure 1. Core of Chang 73 member of Yanchang formation in the southeast of Ordos

图 1. 鄂尔多斯东南部延长组长 73 段岩心

2.1. 组构分析

2.1.1. 微观结构特征

利用扫描电镜分析了长 73 泥页岩层的微观构造特征,见图 2 所示。从图 2 可以看出,长 73 泥页岩层微孔隙、微裂缝和溶蚀孔隙发育,空隙中填充有粘土矿物,以片状、丝缕状伊利石为主,并且丝缕状伊利石在颗粒孔隙架桥形成网状结构,微粒表面附有棉絮状伊蒙混层和片状伊利石。



(a) 498 倍

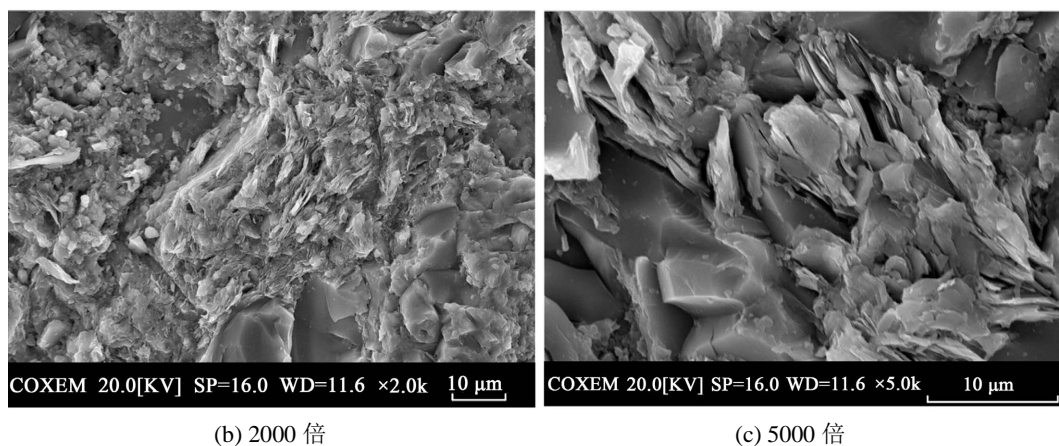


Figure 2. SEM results of Chang 73 shale rock sample
图 2. 长 73 泥页岩层岩样 SEM 扫描电镜结果

2.1.2. 矿物组成分析

利用 D/max-III A X-射线衍射仪, 测定长 73 泥页岩层全岩矿物及粘土矿物相对含量, 见表 1、表 2 所示。由表 1 看出, 长 7 地层岩样中石英含量最高, 平均 28.33% (w/w), 其次为粘土矿物(18.5%); 从表 2 看出, 长 73 地层岩样中粘土矿物以伊/蒙间层为主(平均 62.67%), 其次为伊利石(30.33%), 间层比均为 16.67%, 属典型的硬脆性泥岩。

Table 1. Analysis results of whole rock minerals of Chang 73 shale (%)

表 1. 长 73 泥页岩层全岩矿物分析结果(%)

编号	石英	钾长石	铵长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	方沸石	粘土矿物
4-12/53	22	-	11	12	4	-	-	34	-	17
4-19/53	23	-	8	7	3	-	5	16	11	27
5-20/58	27	9	-	15	2	-	3	18	2	24
5-30/58	23	-	22	27	-	-	2	9	3	14
5-41/58	25	-	15	18	-	-	1	21	-	20
6-18/57	50	7	-	15	10	5	3	1	-	9

Table 2. Analysis results of clay minerals in Chang 73 shale rock (%)

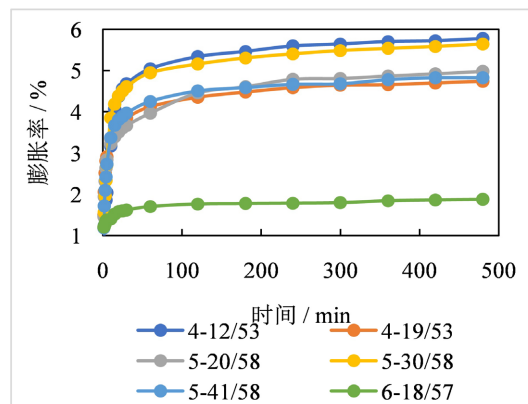
表 2. 长 73 泥页岩层粘土矿物分析结果(%)

编号	高岭石(K)	绿泥石(Ch)	伊利石(I)	伊/蒙间层(I/S)	伊/蒙间层比(%S)
4-12/53	0	3	33	64	17
4-19/53	0	3	21	76	15
5-20/58	0	5	40	55	15
5-30/58	0	4	25	71	20
5-41/58	0	5	35	60	13
6-18/57	5	17	28	50	20

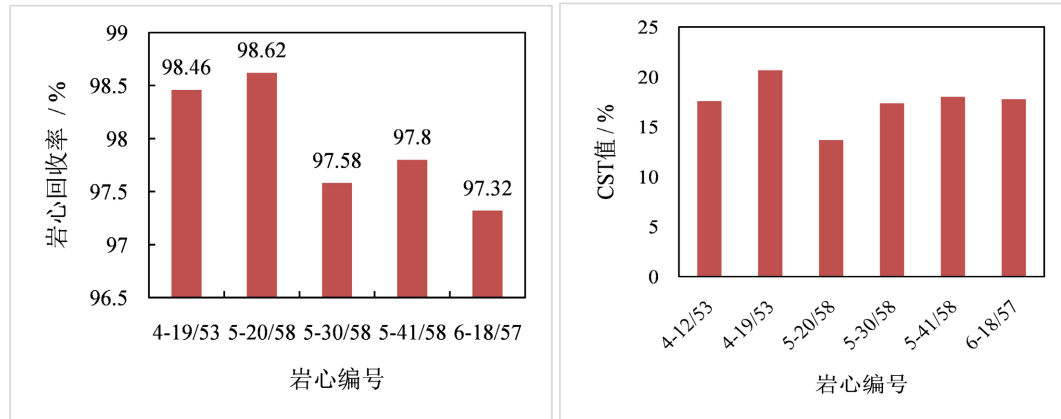
2.2. 理化性质分析

2.2.1. 水化性质

图3为长73泥页岩层水化性质分析结果。从图(a)看出,长73泥页岩层所有泥页岩样品在前30 min均呈线性膨胀,岩心2 h的膨胀率与8 h的膨胀率相近,长7泥页岩早期膨胀速率快,随时间推移膨胀速率变慢,后趋于稳定,膨胀率在1.88%~5.78%之间,水化膨胀性较弱。从图(b)和图(c)可知,长73泥页岩层回收率在97.32%~98.62%,表明长73泥页岩层水化分散性弱,CST毛细管测试在13.65 s~20.67 s,长73泥页岩层抑制水化分散能力强,对液体有越强的吸收性,导致黏土的膨胀和扩散形成胶体,使得液体难以被吸收出来。



(a) 水化膨胀性质结果



(b) 水化分散性质测试结果

(c) CST 毛细管测试结果

Figure 3. Hydration properties of Chang 73 shale

图3. 长73泥页岩层水化性质

2.2.2. Zeta 电位

表3为长73泥页岩层Zeta电位分析结果。从表3中可以看出,长73泥页岩层的Zeta电位绝对值介于8~22 mV。Zeta电位绝对值越小,吸引力越大,粒子越倾向于凝结或凝聚,分散被破坏,表明长73地层页岩基本处于不分散状态,粘土的水化膨胀收到抑制。

2.2.3. 井壁失稳物化机理分析

基于结构和理化性质分析结果,可归纳长73地层井壁失稳机理为:地层均为以伊/蒙混层和伊利石

为主的硬脆性泥页岩，层理、裂缝和微裂缝发育，地层水化分散性较弱，粘土的水化膨胀受到抑制，钻井液滤液沿地层微裂隙侵入地层深部时，引起泥页岩结构力变化导致剥落掉块，最终引起井壁失稳。

Table 3. Zeta potential comparison
表 3. Zeta 电位对比

编号	Zeta 电位/mV			
	Zeta 电位均值及标准差			
4-12/53	-14.26	-13.74	-13.00	-13.66 ± 0.63
4-19/53	-14.60	-15.42	-16.52	-15.51 ± 0.96
5-20/58	-19.53	-21.18	-20.44	-20.38 ± 0.82
5-30/58	-16.52	-12.52	-15.85	-14.96 ± 2.14
5-14/58	-7.97	-9.98	-7.80	-8.58 ± 1.21
6-18/57	-20.81	-20.76	-22.41	-21.32 ± 0.93

3. 钻井液浸泡下力学特征研究

泥页岩与钻井液接触后，泥页岩与钻井液存在表面水化、离子水化和渗透现象，从而导致岩石力学参数变化。使用现场提供的水基钻井液、油基钻井液、高性能钻井液和复合盐钻井液对长 73 层位岩心进行浸泡处理，研究不同钻井液浸泡和不同浸泡时间对岩石力学特征的影响规律[17] [18]。

3.1. 不同钻井液浸泡后岩石力学特征

表 4 为不同钻井液浸泡 15 天后岩心力学特征变化结果。从表 4 可知，经钻井液浸泡后，岩心抗压强度、弹性模量、粘聚力均有所下降，泊松比影响不明显，浸泡对岩石的抗压强度影响较大，并且浸泡后岩心出现多条张性破裂缝(如图 4 所示)。经水基钻井液浸泡后岩石力学参数变化幅度最大，岩石强度降低 32.40%，其次为复合盐钻井液、高性能钻井液，油基钻井液浸泡后对岩石力学特征影响较小。

不同钻井液浸泡岩石后，岩石力学特征劣化的主要原因是由于钻井液滤液进入微裂缝后，泥页岩中伊利石和蒙脱石在碱性条件下与溶液发生离子反应，改变了层理面矿物成分，降低了微裂缝面的摩擦性能，从而降低泥页岩强度[19]。

Table 4. Changes of core mechanical characteristics under different drilling fluid immersion

表 4. 不同钻井液浸泡下岩心力学特征变化情况

钻井液	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/°
原岩	150.31	17089.15	0.28	26.1	35.6
水基钻井液	101.61	9460.51	0.19	20.3	26.7
油基钻井液	125.92	13370.14	0.26	25.1	33.2
高性能钻井液	111.4	9144.1	0.22	22.6	28.1
复合盐钻井液	118.83	13373.68	0.23	24.1	29.3

3.2. 不同浸泡时间后岩石力学特征

表 5 为水基钻井液浸泡岩心不同时间后的力学特征变化结果。从表 5 可知，经钻井液浸泡后，岩心

抗压强度、弹性模量、粘聚力和泊松比均随着浸泡时间呈递减趋势，证实了在实际钻井过程中钻井液对井壁长时间浸泡导致井壁稳定性降低。水基钻井液浸泡岩心 22 天后岩石力学参数显著降低，抗压强度降低了 36.81%，弹性模量降低了 44.64%，泊松比降低了 32.14%，凝聚力降低了 22.22%，内摩擦角降低了 25%。



Figure 4. Tensile fracture of rock sample after soaking in drilling fluid

图 4. 钻井液浸泡后岩样张性破裂缝

随着钻井液浸泡时间增加，泥页岩内部微裂缝尖应力强度因子增加，岩石临界断裂韧性降低，裂缝更容易扩展。在钻井过程中应提高钻井液封堵性能，减小滤液渗入地层，阻缓压力传递，动态调整钻井液活度，增强岩石力学性能，提高井壁稳定性[6] [19]。

Table 5. Changes of core mechanical characteristics after different soaking times

表 5. 不同浸泡时间后岩心力学特征变化情况

浸泡时间/天	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/°
0	150.31	17089.15	0.28	26.1	35.6
1	133.59	14964.6	0.24	25.3	34.1
3	119.63	11863.2	0.23	24.6	33.2
22	94.98	9460.51	0.19	20.3	26.7

4. 结论

1) 长 73 层位岩石层理、裂缝和微裂隙发育，矿物中脆性矿物高，水化分散性弱，井壁失稳以滤液进入地层后，岩石本体及弱面结构应力变化导致的剥落掉块为主。

2) 不同钻井液对长 73 层位泥页岩浸泡后力学特征影响不同，其中水基钻井液影响幅度最大，油基钻井液影响幅度最小，主要是由于碱性条件下，泥页岩层理面矿物成分，微裂缝面的摩擦性能降低，降低泥页岩强度。

3) 随钻井液浸泡时间延长，岩石力学特征呈递减趋势，主要是由于裂缝扩展导致，实际钻井过程中，可通过加快建井周期，降低滤失量，阻缓压力传递等手段，实现高效安全钻井。

参考文献

[1] 张震, 万秀梅, 吴鹏程, 等. 川南龙马溪组深层页岩井壁失稳原因分析及对策[J]. 特种油气藏, 2022, 29(1):

- 160-168.
- [2] 鲁铁梅, 叶成, 鲁雪梅, 等. 准噶尔盆地南缘高温有机质储层井壁失稳机理及对策[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18(1): 26-31.
- [3] Zeng, W., Liu, X.J., Liang, L.X. and Xiong, J. (2018) Analysis of Influencing Factors of Wellbore Stability in Shale Formations. *Arabian Journal of Geosciences*, **11**, Article No. 532. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3865-z>
- [4] Geng, Z. and Wang, Y.F. (2020) Physics-Guided Deep Learning for Predicting Geological Drilling Risk of Wellbore Instability Using Seismic Attributes Data. *Engineering Geology*, **279**, 105857. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105857>
- [5] Al-Arfaj, M.K., Amanullah, Md., Sultan, A.S., et al. (2014) Chemical and Mechanical Aspects of Wellbore Stability in Shale Formations: A Literature Review. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Abu Dhabi, November 2014, Paper Number: SPE-171682-MS. <https://doi.org/10.2118/171682-MS>
- [6] Huang, T., Cao, L.N., Cai, J.J. and Xu, P. (2019) Experimental Investigation on Rock Structure and Chemical Properties of Hard Brittle Shale under Different Drilling Fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **181**, 106185. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106185>
- [7] 郑永华, 李少荣, 张健强, 等. 古生界海相页岩储层井壁稳定影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(34): 176-180.
- [8] 万有维, 刘向君, 袁芳, 等. 塔里木盆地巴西改组岩石理化性能及力学特性研究[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(5): 753-759, 771.
- [9] 汝智星, 赵锐, 张继标, 等. 塔里木顺北深层岩石强度与工作液浸泡关系研究[J]. 岩土力学, 2020(S2): 1-10.
- [10] 张文, 刘向君, 梁利喜, 等. 高温下页岩三轴压缩实验及井壁稳定研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 62-70.
- [11] 黎然, 刘玉娥, 张军, 等. 纳米封堵剂 NanoZJS-1 的合成与评价[J]. 石油化工, 2021, 50(9): 934-939.
- [12] Liang, C., Chen, M., Jin, Y. and Lu, Y.H. (2014) Wellbore Stability Model for Shale Gas Reservoir Considering the Coupling of Multi-Weakness Planes and Porous Flow. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **21**, 364-378. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.08.025>
- [13] Yue, X.W., Dai, J.S. and Wang, K. (2022) Influence of Rock Mechanics Parameters on Development of Fracture. *Journal of Geomechanics*, **20**, 372-378.
- [14] 马天寿, 陈平. 基于 CT 扫描技术研究页岩水化细观损伤特性[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 227-233.
- [15] Ma, T.S., Yang, C.H., Chen, P., et al. (2016) On the Damage Constitutive Model for Hydrated Shale Using CT Scanning Technology. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **28**, 204-214. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.11.025>
- [16] 李兆扬, 范萌萌, 马瑶, 等. 鄂尔多斯盆地东南部长 7 油层组沉积相研究[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2012, 30(1): 106-110, 121.
- [17] 陈士奎, 谭泉麒, 王荐, 等. 页岩气高性能水基钻井液技术研究[J]. 石油化工应用, 2018, 37(12): 57-60.
- [18] 王平全, 邓嘉丁, 白杨, 等. 钻井液浸泡对延长组页岩坍塌压力的影响[J]. 特种油气藏, 2018, 25(2): 159-163.
- [19] 卢运虎, 陈勉, 金衍, 等. 钻井液浸泡下深部泥岩强度特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1399-1405.