

水化对泥页岩力学性质影响的实验研究

路保平 林永学 张传进

摘要：在井眼失稳机理分析的基础上，经室内实验得出泥页岩水化后岩石力学参数的变化规律。页岩水化前后坍塌压力对比结果表明，水化使泥页岩的坍塌压力持续升高，证实了泥页岩地层在钻遇初期稳定、裸眼一段时间后出现失稳。

关键词：井眼稳定；坍塌压力；水化试验；钻井液；

分类号：TU456 **文献标识码**：B

Laboratory Study on Effect of Hydration to Shale Mechanics

LU Baoping¹, LIN Yongxue², ZHANG Chuanjin²

¹ Department of Development, CNSPC;

² Petroleum Drilling Research Institute, CSNPC, Dezhou Shandong 253005.

Abstract : On the basis of analyses of wellbore instability mechanism, the changing law of shale mechanics parameters was established after shale hydration by the experimentation. The results from contrasts of collapsing pressures between unhydrated shale and hydrated one indicate that collapsing pressure for shale which behaves poor water sensitivity can be increased on a large scale, and verify the phenomenon exists that shale is stable in early contact with drilling fluid and turns out to be unstable later.

Key words : wellbore stability; collapsing pressure; hydrated experimentation; drilling fluid

泥页岩不仅具有岩石的共同特点，而且具有独特的水化性，因此成为井眼稳定研究的一个焦点。泥页岩水化引起岩石力学参数发生变化，岩石力学参数的变化反过来引起岩石受力状态发生变化，岩石逐步遭破坏而出现井眼失稳。因此，在研究影响井眼稳定的力学因素时，必须研究水化对岩石力学参数的影响规律。

1 井壁坍塌压力计算

井壁周围的应力状态可以用以下力学模型求解：在无限大平面上，一圆孔受到均匀的内压，而在这个平面的无限远处受到两水平地应力（最大水平地应力 μ_H 和最小水平地应力 μ_h ）的作用，垂直方向受上覆岩层压力。依据文献 [1~3] 提供的方法可得到井壁坍塌压力的计算公式，用当量钻井液密度表示为：

$$\rho_m = \frac{\eta(3\sigma_H - \sigma_h) - 2CK + \alpha P_p(K^2 - 1)}{(K^2 + \eta)H} \times 100 \quad (1)$$

式中：C为岩石内聚力/MPa； $K = \cot^2(45^\circ - \varphi/2)$ ； φ 为内摩擦角/（°）；H为井深/m； ρ_m 为坍塌压力当量钻井液密度/ $g \cdot cm^{-3}$ ； η 为应力非线性修正系数； α 为毕奥特系数； P_p 为地层孔隙压力/MPa； σ_H 和 σ_h 分别为最大、最小水平地应力/MPa

可见坍塌压力当量钻井液密度除与岩石所受应力及地层孔隙压力有关外，还与岩石的力学参数有关。

2 泥页岩水化的评价方法及结果

2.1 实验评价方法

实验的基本方法是将加工好的天然岩心装入一单面开孔的岩心釜，放入高压容器，泵入实验液并升温加压，测量不同时间下的岩心吸水量（单位重量页岩土所吸附水的重量）。

主要技术参数如下：最大工作压力16MPa；一般工作压力8~10MPa；岩心直径25.4mm；岩心高度10~38mm；最高温度80℃；岩心釜开孔直径 $\phi = 10$ mm。

2.2 实验岩样及水化性

实验选用了古生代志留系页岩，水化性测试结果见表1。

表1 页岩的水化性测试结果
Table 1 Results shale water sensitivity

序号	每100g泥页岩所 吸附亚甲基蓝量/mL	吸附膨胀			CST分散值/s	岩样密度 = g/cm^3
		Mi	N	MT		
1	3.5	0.1806	0.0382	0.2503	138.4	2.6
2	3.5	0.2061	0.0243	0.2537	143.6	2.6
3	3.4	0.1985	0.0162	0.228	158	2.6
4	3.25	0.239	0.012	0.257	68.93	2.6

注：Mi为页岩瞬时吸水量；N为页岩的水化速率；MT为5000 min时的吸水量；CST指毛细管吸取试验。实验岩样为100目人工粉碎样。

2.3 高温高压条件下泥页岩的水化特征

在室内高温高压条件下，采用四种类型钻井液，对志留系页岩进行了水化特征实验。实验结果表明，尽管四种钻井液类型不同，但对志留系页岩水化的影响差异不大，饱和吸水量最大不超过3.3%。

2.3.1 实验用钻井液类型及性能 实验用钻井液类型^[4]及性能，如表2所示。

表2 钻井液类型及性能测试表
Table 2 Properties of drilling fluid systems

类型	钻井液配方	塑性粘度 mPa·s	动切力 Pa	API失水 ml/30min	pH值
1#	5%NV-1土	8	27	22.8	9
2#	5%NV-1土 +KHm+SPC+KPAN+AlK(SO ₄) ₂ +KOH	23	28	4	9
3#	5%NV-1土+SAS+FT-88 +CMC+PHP+SPNH+CMS	37	19	4.6	9.5
4#	5%NV-1土+CMC+FCLS+NaCl	49	36	4	9

表2中1#钻井液属纯坂土浆，抑制性差，高失水；2#钻井液属强抑制性低失水体系，抑制性是K⁺及有机分子聚合物吸附作用为特点；3#钻井液属低化学抑制性、低失水体系，抑制性以沥青类型处理剂的涂敷作用为特点；4#钻井液属强抑制性、低失水体系，抑制性以高浓度无机盐防渗透作用为特点。

2.3.2 实验结果及评价 实验结果如表3所示。

表3 高温高压浸泡实验
Table 3 Results of HTHP shale immersion in drilling fluid systems

编号	时间 d	不同钻井液体系下岩样吸水量/%			
		1#	2#	3#	4#
1	2	2.798	2.367	2.674	2.499
2	5	3.158	3.292	3.161	3.015
3	8	2.950	3.107	2.931	2.808
4	13	2.910	3.065	3.000	3.262
5	20	3.214	2.871	3.216	3.003

由表3可知,岩样的吸水量遵守着随时间增加而逐步增大的规律。不论于何种钻井液中,第2天的吸水量均低于其后续时间的吸水量。随时间的增加,不同钻井液体系的吸水量均趋于一致,但钻井液体系的差异却导致了岩心初期吸水量的不同。四种钻井液体系的第2天吸水量分别为2.798,2.367,2.674和2.499,其中1#钻井液的吸水量与饱和含量的偏差仅为8.58%,低于10%,可以认为已经达到饱和吸水量。显然,钻井液体系抑制性的不同是造成岩心达到饱和吸水量所需时间不同的主要原因。1#钻井液体系不仅失水量大,而且抑制性差,因此,岩心达到饱和吸水量的时间短;2#和4#钻井液体系均属典型的强抑制性体系,因此相应的吸水量也低;3#钻井液尽管具有沥青类添加剂,但其化学抑制能力差,因此综合抑制能力低,吸水量高于2#和4#钻井液。这一结果说明,尽管不同钻井液不能从根本上控制泥页岩吸水量的增加,但可以减缓达到饱和吸水量的时间,也正是这一结果说明优选钻井液体系的必要性、可行性和重要性。

3 水化对泥页岩力学性质的影响

水化性强的泥页岩,其吸水量可达10%以上。水化产生的膨胀和对岩石强度的影响是显而易见的,但对于饱和含水量仅3%的地层而言,井眼失稳是否与水化影响有关,是否存在大幅度的强度伤害问题至今仍是国内外岩石力学和钻井液专家们普遍关注且努力寻求解答的问题。本研究结果表明,即使泥页岩的水化能力很弱,但水化产生的强度伤害仍然很大,强度的降低,导致了岩石的破坏,这正是岩石破坏的重要原因。

3.1 水化对单轴抗压强度 R_c 、弹性模量 E 及泊松比 μ 的影响

室内对四种典型钻井液在浸泡条件下和不同蒸馏水湿度条件下的标准样品进行了岩石强度等三项力学参数的测试评价实验。实验仪器为TerraTek岩石力学测量系统。图1、图2、图3分别为不同含水量(吸水量)条件下岩心试样的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比的变化情况。从中可见,岩石强度等参数随岩石含水量的增加变化十分显著。饱和含水量岩样的单轴抗压强度值仅为其干燥状态下的31.5%,降低幅度高达68.5%;弹性模量的降低幅度也超过50%;而泊松比则大幅度上升,上升幅度达375%。目前,从理论上分析强度等三参数随含水量的变化是很困难的,暂对上述三组实验曲线分别进行线性回归处理并分别得到如下三个相关关系:

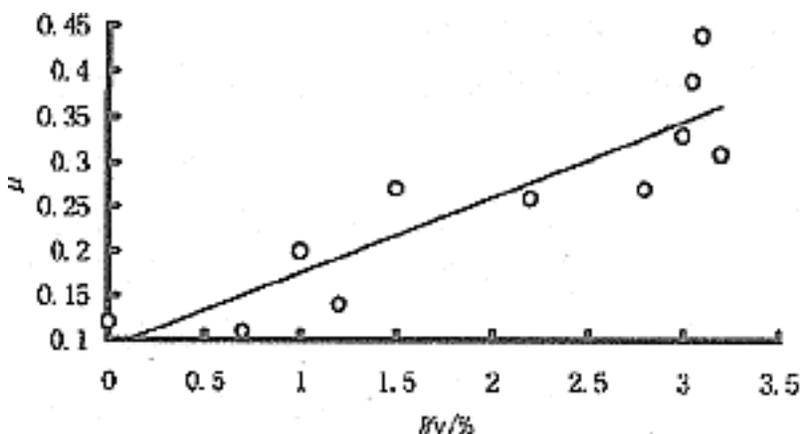


图1 含水量对单轴抗压强度影响

Fig.1 Effect of hydration on rock mechanic parameters(R_c)

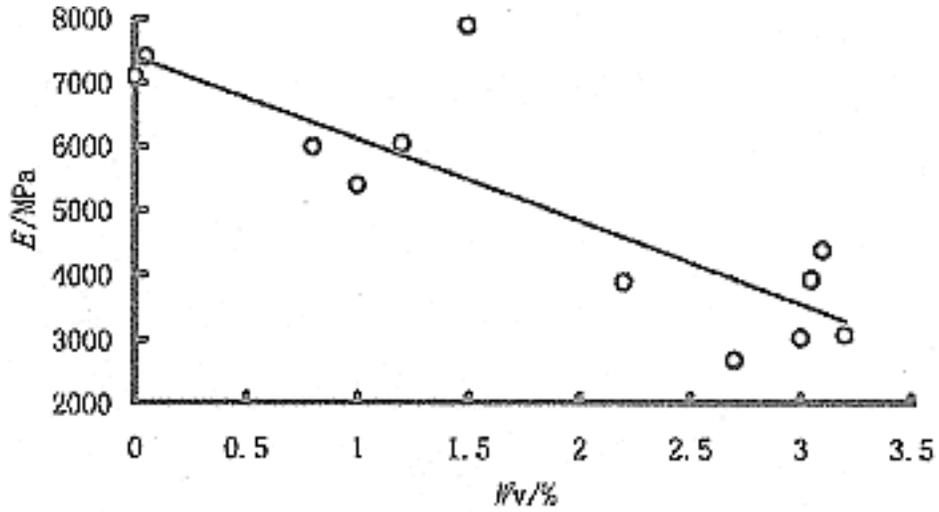


图2 含水量对弹性模量的影响

Fig.2 Effect of hydration on rock mechanic parameters(E)

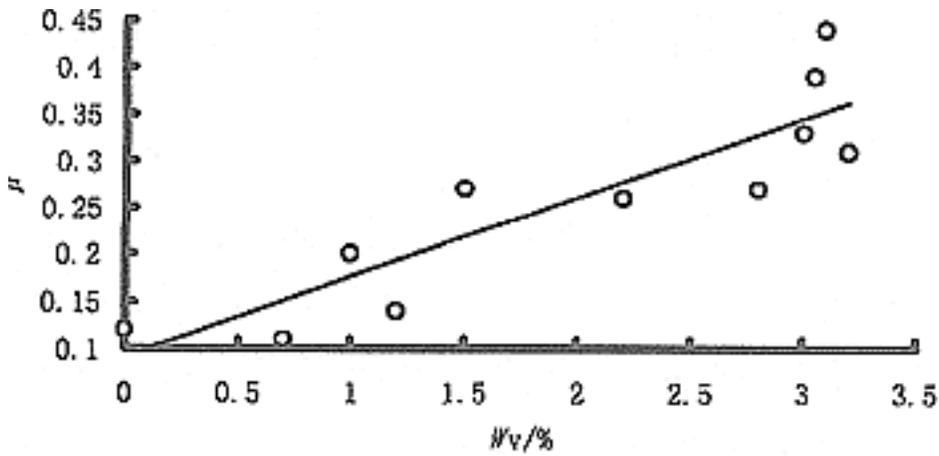


图3 含水量对泊松比的影响

Fig.3 Effect of hydration on rock
mechanic parameters(μ)

$$R_c = A_1 + B_1 \times W_V \quad (2)$$

$$E = A_2 + B_2 \times W_V \quad (3)$$

$$\mu = A_3 + B_3 \times W_V \quad (4)$$

式中： R_c 为单轴抗压强度/MPa； E 为弹性模量/MPa； W_V 为含水量/%； A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 、 A_3 、 B_3 为与岩石有关的常数。

上述三个公式的相关系数均较高，分别为0.9595，0.8651和0.8967。从中可见，水化对泥页岩的强度等参数有显著的影响，泥页岩在原始状态下可能有较高的强度，但水化会导致强度的大幅度降低。

3.2 水化对岩石内聚力 C 、内摩擦角 φ 的影响

依据不同含水量的 $P_c - p$ 多组测定结果，很容易计算出岩石的 C 、 φ 值。但是由于实验用岩样缺乏，难以进行直接测试。因此，利用几组室内实验数据，按单轴抗压强度与 C 和 φ 值成线性关系的假设，回归处理结果如下：

$$C = 0.3272 \times R_c - 3.66257 \quad (R=0.9987) \quad (5)$$

$$\varphi = 45.744 - 0.155448 \times R_c \quad (R=0.9686) \quad (6)$$

显然，随 R_c 的减少， C 逐渐减少，而 φ 值逐渐增加。

式(5)与式(6)间接地建立了页岩水化程度与 C 、 φ 值的关系。将式(5)、式(6)代入式(1)就可以确定水化对以当量钻井液密度表示的坍塌压力的影响规律。

4 实验结果在井眼稳定性评价中的应用

假设在裸眼泥页岩地层中钻进，其地层有关参数如下：

$$H = 2500 \text{ m}, \quad \mu = 0.0238 \text{ MPa/m}, \quad \mu_h = 0.0148 \text{ MPa/m}, \quad P_p = 0.0115 \text{ MPa/m},$$

$$\nu = 0.65, \quad \nu_h = 0.95; C = 17.6 \text{ MPa (水化前)}, \quad \varphi = 35^\circ \text{ (水化前)}$$

把假设条件带入式(1)~式(6)，计算结果见图4、图5，它说明了页岩水化对地层坍塌压力的影响。

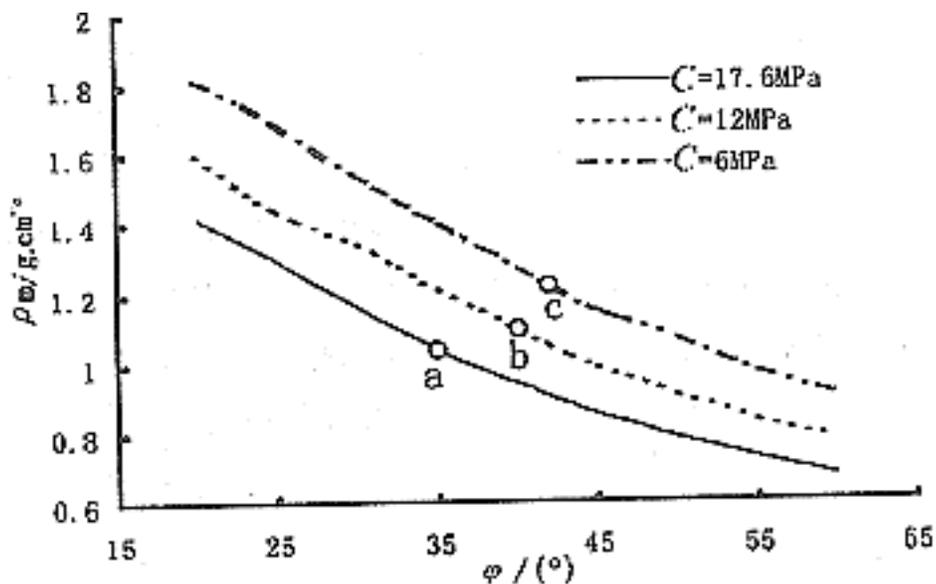


图4 页岩水化对坍塌压力当量密度的影响

Fig.4 Effect of shale hydration
on collapsing pressure

图4中a点表示水化前泥页岩坍塌压力当量钻井液密度为 1.05g/cm^3 ，水化的第1阶段即b点，C降为12MPa， φ 增为 38° ，坍塌压力当量钻井液密度增加到 1.14g/cm^3 ；水化的第2阶段即c点，C降为6MPa， φ 增为 40° ，坍塌压力当量钻井液密度增加到 1.28g/cm^3 ，即随水化程度的逐渐加深，岩石的内聚力下降，岩石的坍塌压力逐渐升高，增加幅度高达 0.23g/cm^3 当量钻井液密度。

图5反映了坍塌压力当量钻井液密度与 R_c 的关系。水化前（f点）岩石的 R_c 值为66MPa，坍塌压力当量钻井液密度为 1.01g/cm^3 ；水化后（e点） R_c 值降为30MPa，坍塌压力当量钻井液密度升高到 1.23g/cm^3 ，升高了 0.22g/cm^3 。

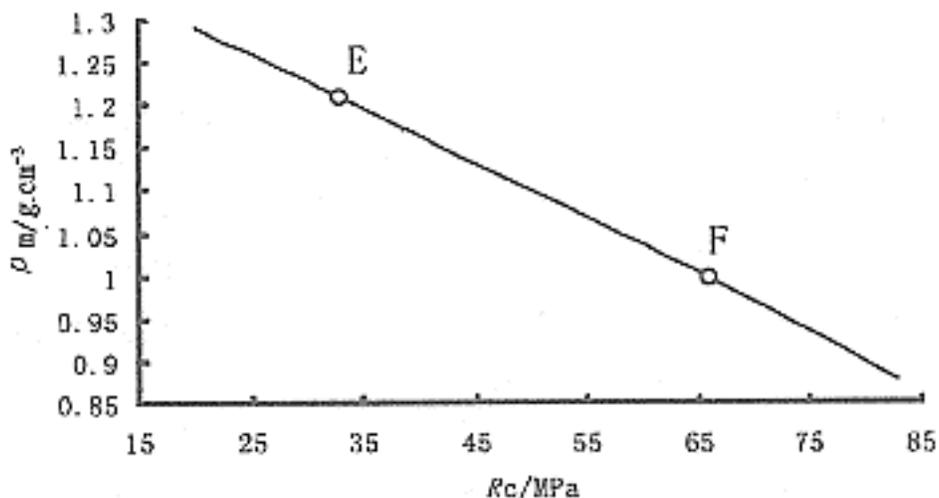


图5 坍塌压力当量密度与抗压强度的关系

Fig.5 Relations between collapsing pressure and R_c

上述结果说明,由于泥页岩的水化作用,地层的坍塌压力呈动态变化。在井眼形成初期,初始坍塌压力可能较小,所用钻井液密度尚能保持井壁稳定。井眼经钻井液长期浸泡后,井壁泥页岩水化程度增加,泥页岩的 R_c 、 C 降低, μ 增加,从而引起地层坍塌压力升高,钻井液密度在裸眼一段时间后不足以保持井壁应力平衡导致井壁失稳,揭示了钻井液在裸眼一段时间后产生坍塌的内在原因。

6 结论及建议

(1)水化对泥页岩岩石力学性质有显著影响,一般规律是随含水量增加,泊松比 μ 、内摩擦角增加,而单轴抗压强度 R_c 、杨氏模量 E 、内聚力 C 减小。

(2)岩石水化使泥页岩岩石力学性质发生变化,坍塌压力随之呈动态变化。实验结果表明,具有高初始强度、低坍塌压力的泥页岩,随水化发展会逐步转变为低强度、高坍塌压力,从而揭示了井壁延迟坍塌的内在原因。

(3)具有较强抑制性的钻井液体系,可以有效地控制泥页岩的吸水量与吸水进程,使井壁在较长一段时间内保持稳定。因此,应选择强抑制性的优质钻井液体系。

(4)由于坍塌压力呈动态规律变化,现场施工采用的钻井液密度不应一成不变。随着钻井裸眼时间的增加,泥页岩的吸水量增加,强度降低,坍塌压力逐渐升高,平衡井壁应力的钻井液的密度也应逐步提高。

(5)该项研究还须进一步完善试验方法,建立室内预测坍塌时间的模型,以便确保现场生产作业的安全。

作者简介:路保平(1962-),男,教授级高级工程师,国家级有突出贡献中青年专家,石油大学博士研究生,多年来一直从事石油钻采科研及生产管理工作。

作者单位:路保平 中国新星石油公司开发部,北京 100083;

林永学 张传进 中国新星石油公司石油钻井研究所,山东 德州

253005.

参考文献

- [1] 刘向君.井眼稳定性原理及影响因素分析[J].西南石油学院学报,1995,(5).
- [2] 程远方,黄荣樽.钻井工程中泥页岩井壁稳定和力学分析[J].石油大学学报,1993,(4).
- [3] 黄荣樽,陈勉,邓金根.泥页岩井壁稳定力学与化学的耦合研究[J].钻井液与完井液,1995,(3).
- [4] 林永学.三轴应力状态下页岩水化破坏实验研究[J].石油钻探技术,1996,(1).

收稿日期:1998-03-12