

# 锦州 25-1 油田井壁稳定问题

蔚宝华<sup>1</sup>, 闫传梁<sup>1</sup>, 邓金根<sup>1</sup>, 刘书杰<sup>2</sup>, 谭强<sup>1</sup>, 朱海燕<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
2. 中海石油(中国)有限公司北京研究总院, 北京 100027

**摘要** 锦州 25-1 油田沙河街组地层井壁失稳严重,为解决该油田的井壁失稳问题,对该油田的泥页岩矿物组分进行了分析,开展了泥页岩的力学及水化特性实验,分析了锦州 25-1 油田沙河街组泥页岩的岩石力学特性和井壁失稳机制。研究发现,沙河街组地层层理性泥页岩和水敏性泥页岩共同发育;层理性泥页岩具有显著的各向异性,易发生沿层理面的剪切滑移,造成井壁失稳;水敏性泥页岩在钻井液作用下会发生水化膨胀,导致井周地层的力学性质和应力状态发生变化,表现为坍塌压力随井眼钻开时间的改变而改变;两种地层相互影响造成油田复杂事故频发。结合室内实验结果,建立了合理钻井液密度的确定方法,研究了锦州 25-1 油田层理性泥页岩坍塌压力随井眼轨迹的分布规律和水敏性泥页岩的水化坍塌周期,给出了保证安全钻进的工程对策,该油田的井壁失稳问题必须在优化井眼轨迹和选择合理钻井液密度基础上,并增强钻井液的封堵性和抑制性才能解决。

**关键词** 锦州 25-1 油田;泥页岩;水化膨胀;水化分散;井壁稳定

**中图分类号** TE256

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.14.006

## Wellbore Stability Problem of Jinzhou 25-1 Oil Field

YU Baohua<sup>1</sup>, YAN Chuanliang<sup>1</sup>, DENG Jingen<sup>1</sup>, LIU Shujie<sup>2</sup>, TAN Qiang<sup>1</sup>, ZHU Haiyan<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Research Institute of China National Offshore Oil Corporation Limited, Beijing 100027, China

**Abstract** The wellbore instability of Jinzhou 25-1 oil field is quite serious. In order to decrease wellbore instability of the oil field, the clay mineral of shale is identified by the X-ray diffractometer. Laboratory experiments involving the rock mechanics and hydration characteristics of shale are conducted to study their rock mechanical characters and wellbore instability mechanism. Shale in Shahejie Formation has two types: they are bedding shale and water-sensitive shale. Strength of bedding shale is anisotropy, and is prone to shear failure along the bedding plane and causes wellbore instability. Water-sensitive shale would be hydration swelling under the action with drilling fluid, resulting in the change of mechanical properties around the well, showing a changed collapse pressure with the time. Based on the experimental results, the methods to determine collapse pressure are developed, which is applied to determine collapse pressure of Jinzhou 25-1 oil field, and engineering strategies for ensuring safe drilling are given. Based on optimized well trajectory and proper drilling fluid density, the problem involving the wellbore instability of the oil field is able to solve by increasing the plugging and inhibitory of drilling fluid.

**Keywords** Jinzhou 25-1 oil field; shale; hydration shattering; hydration swelling; wellbore stability

### 0 引言

锦州 25-1 油田位于辽东湾中部海域,平均水深 23m。该油田在东下段至沙河街组出现了较为严重的井壁坍塌和起下钻阻卡问题,部分井划眼异常困难,频繁憋憋扭矩、憋泵,甚至憋漏地层,倒划眼处理后井眼返出既有黏软岩屑,又有硬脆性掉块。

对锦州 25-1 油田 26 口井钻井情况进行统计发现,该油田处理复杂事故的时间占钻井总时间的 15%以上,部分井发生了严重的井下事故,以 JZ25-1-A22 井为例,该井三开发生卡钻,最终填井侧钻。井壁失稳是影响锦州 25-1 油田钻井速度的主要原因,有必要对井壁稳定性进行研究,找出失稳原因,从而提出具有针对性的防塌建议。

收稿日期:2012-12-30;修回日期:2013-02-04

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51134004);国家自然科学基金项目(51174219);国家科技重大专项(2011ZX05009-005,2011ZX05026-001-01)

作者简介:蔚宝华,讲师,研究方向为井壁稳定和油气井出砂,电子信箱:yubaohua73@126.com

## 1 地层地质力学特性

锦州 25-1 油田是具有背斜构造背景的复杂断块构造,受正断层控制,上覆岩层压力为最大地应力,水平最大地应力方向为 N40°E。东营组—沙河街组有一巨厚泥岩层,为发生井壁失稳的主要井段。

影响井壁稳定性的力学因素主要有地应力、孔隙压力、地层性质等<sup>[1]</sup>。锦州 25-1 油田不存在强构造应力作用,两水平地应力间差值不大,有利于井壁稳定。地层压力系数最高 1.15,略有高压但不足以影响正常钻井。因此,锦州 25-1 油田的井壁失稳应主要是由地层的特殊性质引起的。

沙河街组泥页岩黏土矿物以伊蒙混层为主,伊蒙混层中又以蒙脱石为主(表 1),地层水化性强。从 JZ25-1-4 井沙二段地层取心看,该处泥页岩主要分为两种,具有明显层理、裂缝面的泥页岩和不具有明显层理面的泥页岩。将两种岩心掉块浸泡在清水中 3min 后变成图 1 所示形态。两种岩心都发生散裂,有层理面的岩块沿层理面发生分散,分散后的泥岩薄片无黏手的感;无层理面的岩块散裂后相互黏结在一起,有明显黏手的感。

对于层理性泥页岩地层,层理面是高渗弱面,层间蒙脱石吸水膨胀容易使岩石沿层理面张开造成井壁垮塌,同时层理面在应力作用下易发生剪切滑动,造成井壁失稳<sup>[2-4]</sup>。水敏性泥页岩吸水后会产生水化应力,使井壁周期性坍塌<sup>[5]</sup>。

表 1 黏土矿物分析

Table 1 Clay mineral analysis

编号	黏土矿物/%	黏土矿物组成/%					混层比/S%
		伊蒙混层	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	
1	55.45	78	—	17	3	2	75
2	59.23	48	—	18	23	11	45

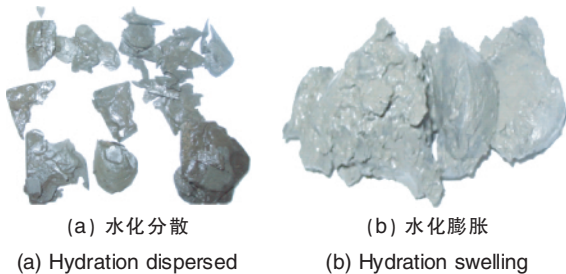


图 1 沙二段泥页岩岩心掉块泡水后形态  
Fig. 1 Shale morphology of Shahejie Formation after immersed in the water

## 2 锦州 25-1 油田地层力学性质实验

### 2.1 层理性泥页岩力学性质实验

对取自 JZ25-1-4 井沙二段层理性泥页岩的力学特性进行测定,实验结果见图 2。取心过程中岩心轴线和层理面法线之间按给定的角度钻取。

实验结果表明,岩心强度具有显著各向异性,地层强度是最大主应力与层理面法线间夹角的函数,且当轴向应力垂

直于层理面时,地层强度最大,当轴向应力与层理面法线之间的夹角在 52°左右时,岩心强度最低,然后随着夹角的增大强度又有所升高。

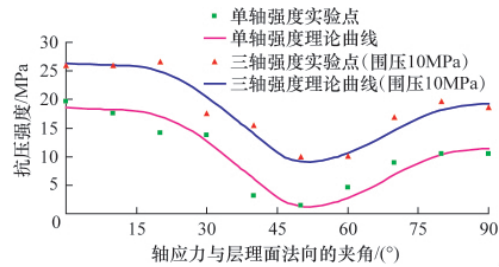


图 2 层理性泥页岩抗压强度实验结果

Fig. 2 Strength of bedding shale

当地层中存在弱面时,岩体破坏可以用黏聚力和内摩擦角连续变化的弱面准则来分析,即<sup>[6]</sup>

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{2(\tau - \sigma_3 \tan \phi)}{\tan \phi - \sqrt{\tan^2 \phi + 1}} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} \tau = A_1 - B_1 [\cos 2(\alpha_1 - \beta)]^m & 0 \leq \beta \leq \alpha_1 \\ \tau = A_2 - B_2 [\cos 2(\alpha_1 - \beta)]^m & \alpha_1 \leq \beta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tan \phi = C_1 - D_1 [\cos 2(\alpha_2 - \beta)]^n & 0 \leq \beta \leq \alpha_2 \\ \tan \phi = C_2 - D_2 [\cos 2(\alpha_2 - \beta)]^n & \alpha_2 \leq \beta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_3$  分别为地层所受的最大和最小有效主应力; $\phi$  为内摩擦角; $\tau$  为黏聚力; $A_1, B_1, A_2, B_2, \alpha_1, \alpha_2, C_1, D_1, C_2, D_2$  为通过实验确定的常数; $m, n$  为实验确定的整数。

### 2.2 水敏性泥页岩力学及理化性质实验

为了计算水化应力,必须首先掌握地层的吸水扩散系数和吸水产生的膨胀应变。利用中国石油大学(北京)自行研制的实验装置<sup>[7]</sup>对 JZ25-1-4 井水敏性泥页岩的吸水扩散特性进行测定,实验中与泥页岩接触的流体为 PEM 泥浆滤液,实验围压为 30MPa,滤液驱动压差为 8MPa,实验 50h 后将岩心取出,分割成小段后测定各段含水率,结果见图 3。膨胀应变的测量采用与 Yew<sup>[8]</sup>类似的方法进行,实验结果见图 4。

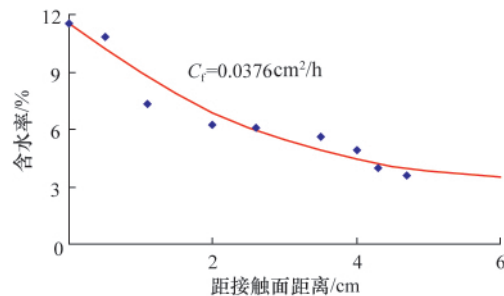


图 3 JZ25-1-4 井沙二段泥页岩吸水实验结果

Fig. 3 Experimental results of water absorption for Shahejie Formation shale in Well JZ25-1-4

实验结果表明,该段泥页岩地层的吸水性较强,吸水系数  $C_1=0.0376 \text{cm}^2/\text{h}$ ,岩心吸水后膨胀应变高,易水化坍塌。

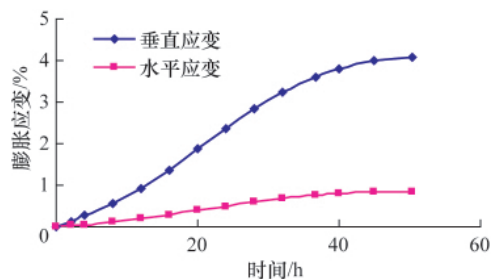


图4 JZ25-1-4井沙二段泥页岩吸水膨胀实验结果  
Fig. 4 Experimental results of hydration swelling for Shahejie Formation shale in Well JZ25-1-4

对水敏性泥页岩进行了钻井液浸泡后的强度测试,结果见表2。

表2 岩心浸泡钻井液后的实验结果

Table 2 Experimental results of rock core after immersed in drilling fluid

浸泡时间/h	含水率增量 $\Delta w/\%$	单轴抗压强度 UCS/MPa	泊松比 $\nu$	弹性模量 $E_i/10^3\text{MPa}$
0	0	13.62	0.28	3.86
2	0.98	11.34	0.31	2.35
6	2.43	9.86	0.33	1.81
12	3.24	10.21	0.32	1.87
24	3.94	7.98	0.36	1.48
36	5.07	7.74	0.34	1.70
48	5.35	6.90	0.37	1.23
96	6.13	7.15	0.35	1.51
192	6.82	5.57	0.40	1.19

利用实验结果对岩心力学参数随含水率的变化规律进行了拟合如下:

$$E_i = 3.9 \times 10^3 e^{-4.2\sqrt{\Delta w}} \quad (4)$$

$$\nu = 0.28 + 1.4\Delta w \quad (5)$$

$$UCS = 13.6 - 1.23\Delta w \quad (6)$$

假设地层黏聚力随含水率的变化规律与单轴抗压强度相同,即

$$\tau = \tau' - 1.23\Delta w \quad (7)$$

式中,  $\tau'$  为浸泡前黏聚力,由实验测得为 4.7MPa。

采用莫尔-库仑准则作为破坏判据

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cot^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) + 2\tau \cot \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (8)$$

单轴实验满足  $\sigma_3 = 0$ , 将式(6)和式(7)代入式(8),整理可得内摩擦角随含水率变化规律为

$$\phi = \arctan \left( \frac{13.6 - 1.23\Delta w}{9.4 - 2.46\Delta w} \right) \quad (9)$$

### 3 坍塌压力计算模型

#### 3.1 层理性泥页岩坍塌压力计算模型

视层理性泥页岩为连续介质体,井壁岩石所受的应力  $\sigma_{ij}$  为地应力、地层孔隙压力和井内液柱压力联合作用的结果,

定向井井壁应力可表示为

$$\begin{cases} \sigma_r = P_m - \delta f (P_m - P_p) \\ \sigma_\theta = A\sigma_{H1} + B\sigma_{H2} + C\sigma_v + (K_1 - 1)P_m - K_1 P_p \\ \sigma_z = D\sigma_{H1} + E\sigma_{H2} + F\sigma_v + K_1 (P_m - P_p) \\ \sigma_{\theta z} = G\sigma_{H1} + H\sigma_{H2} + J\sigma_v \\ \sigma_{r\theta} = \sigma_{rz} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中,

$$K_1 = \delta \left[ \frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu} - f \right] \quad (11)$$

式中,  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  分别为径向、周向和轴向正应力;  $\sigma_{r\theta}, \sigma_{\theta z}, \sigma_{rz}$  为切应力;  $\sigma_v$  为上覆岩层压力;  $\sigma_{H1}, \sigma_{H2}$  分别为水平最大、最小地应力;  $P_m$  为钻井液柱压力;  $P_p$  为孔隙压力;  $f$  为孔隙度;  $\alpha$  为有效应力系数;  $\delta$  为渗流系数;  $A, B, C, D, E, F, G, H, J$  为坐标变换系数,与井眼的井斜角、方位角和井壁上的井周角有关。

井壁处的主应力可表示为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_r = P_m - \delta f (P_m - P_p) \\ \sigma_2 = \frac{1}{2} [X - 2K_1 P_p + (2K_1 - 1)P_m] + \frac{1}{2} \sqrt{(Y - P_m)^2 + Z} \\ \sigma_3 = \frac{1}{2} [X - 2K_1 P_p + (2K_1 - 1)P_m] - \frac{1}{2} \sqrt{(Y - P_m)^2 + Z} \end{cases} \quad (12)$$

其中,

$$\begin{cases} X = (A + D)\sigma_{H1} + (B + E)\sigma_{H2} + (C + F)\sigma_v \\ Y = (A - D)\sigma_{H1} + (B - E)\sigma_{H2} + (C - F)\sigma_v \\ Z = 4(G\sigma_{H1} + H\sigma_{H2} + J\sigma_v)^2 \end{cases} \quad (13)$$

对于层理性地层,发生剪切破坏的应力状态为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_2 - \alpha P_p \\ \sigma_2 = \sigma_3 - \alpha P_p \\ \sigma_3 = \sigma_1 - \alpha P_p \end{cases} \quad (14)$$

$\sigma_1$  的作用面与井眼轴线的夹角为

$$\gamma = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\sigma_{\theta z}}{\sigma_\theta - \sigma_z} \quad (15)$$

将式(14)、式(15)与式(1)联立即可得到维持层理性泥页岩井壁稳定的坍塌压力值。

#### 3.2 水敏地层坍塌压力计算模型

井眼钻开后,钻井液中的水和离子进入泥页岩地层,根据质量守恒定律可建立泥页岩吸水扩散方程。

令  $q$  为水分吸附的质量流量,  $w(r, t)$  为距井轴  $r$  处时间为  $t$  时刻的含水率。质量守恒要求

$$\nabla q = \partial w / \partial t \quad (16)$$

假设

$$q = C_t \nabla w \quad (17)$$

依据式(16)、式(17),柱坐标系中水分吸附方程为

$$C_t \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial w}{\partial r} \right) = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (18)$$

利用边界条件

$$\begin{cases} w = w_s & r = R_a \\ w = w_0 & r \rightarrow \infty \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $R_a$  为井眼半径;  $w_s$  为地层饱和含水量;  $w_0$  为地层原始含

水率。

可得井周地层含水率  $w(r,t)$  为

$$w(r,t) = w_0 + (w_s - w_0) \cdot$$

$$\left[ 1 + \int_0^{+\infty} e^{-C_i \cdot \zeta^2 \cdot t} \frac{J_0(\zeta r) Y_0(\zeta R_a) - Y_0(\zeta r) J_0(\zeta R_a)}{J_0^2(\zeta R_a) + Y_0^2(\zeta R_a)} \cdot \frac{d\zeta}{\zeta} \right] \quad (20)$$

式中,  $J_0()$  和  $Y_0()$  分别为零阶第 1 类和第 2 类 Bessel 函数。

利用差分法求解上述无穷积分方程, 可求得井眼周围地层在不同时刻不同位置的含水量。

假定泥页岩水化后为线弹性材料, 平面应变状态下的本构方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] / E_1 + \varepsilon_h \\ \varepsilon_\theta = [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] / E_1 + \varepsilon_h \\ \varepsilon_z = [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] / E_1 + \varepsilon_v \end{cases} \quad (21)$$

式中  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$  为径向、切向和垂向应变;  $\varepsilon_h, \varepsilon_v$  为吸水产生的水平和垂直方向膨胀应变。

井眼周围地层的受力平衡方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (22)$$

几何方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = du/dr \\ \varepsilon_\theta = u/r \end{cases} \quad (23)$$

将式(21)和式(22)代入式(23)可得

$$r \frac{d^2 \sigma_r}{dr^2} + \left( 3 - \frac{r}{E_1} \frac{dE_1}{dr} + \frac{2\nu r}{v^2 - 1} \frac{d\nu}{dr} \right) \frac{d\sigma_r}{dr} + \left( \frac{4\nu + 1}{v^2 - 1} \frac{d\nu}{dr} - \frac{1}{E_1} \frac{2\nu - 1}{v - 1} \frac{dE_1}{dr} \right) \sigma_r = \frac{E_1(1 + \nu)}{v^2 - 1} \frac{d\varepsilon_v}{dr} + \frac{E_1 \varepsilon_v}{v^2 - 1} \frac{d\nu}{dr} \quad (24)$$

边界条件为

$$\begin{aligned} \sigma_r &= P_m & r &= R_a \\ \sigma_r &= S & r &\rightarrow +\infty \end{aligned} \quad (25)$$

式中,  $S$  为远场水平地应力。

利用有限差分法求解式(24)和式(25)即可获得考虑水化时井眼围岩的应力分布, 结合实验结果和莫尔-库仑强度准则即可求得水敏性泥页岩坍塌周期。

## 4 计算实例

### 4.1 层理性泥页岩坍塌压力分布规律

沙河街组层理性泥页岩地层坍塌压力变化规律如图 5 所示, 其中圆周方向为井眼方位角, 径向为井斜角。计算参数为: 井深 2131m,  $P_f = 1.15 \text{g/cm}^3$ ,  $\alpha = 0.8$ ,  $\sigma_{H1} = 1.95 \text{g/cm}^3$ ,  $\sigma_{H2} = 1.58 \text{g/cm}^3$ ,  $\sigma_v = 2.09 \text{g/cm}^3$ , 最大水平地应力方位为 N40°E, 地层倾角为 0°, 其他参数依据实验结果。

由不同方位向层理性泥页岩地层钻进时有相似情况, 即当井斜角小于 50°时, 向不同方位钻进的坍塌压力均较小, 基本在 1.25~1.35g/cm<sup>3</sup> 之间, 井斜角对坍塌压力的影响不大, 但当井斜角超过 50°时, 坍塌压力大幅升高。当井斜角大于 70°时, 坍塌压力基本在 1.47~1.59g/cm<sup>3</sup>, 并且向水平最大主应力方向钻进时坍塌压力较低, 向水平最小主应力方向钻进时坍塌

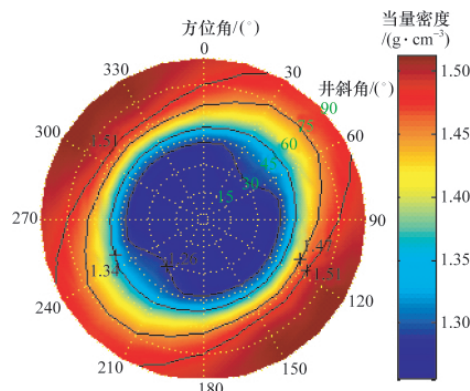


图 5 坍塌压力随井眼轨迹变化规律

Fig. 5 Rule of collapse pressure changing with well trajectory

塌压力较高。

### 4.2 水敏性泥页岩坍塌周期

水敏性地层含水量和井壁失稳风险最小的最小水平地应力方位处的应力变化规律如图 6 和图 7 所示。计算参数: 井深 2140m,  $w_0 = 3.5\%$ ,  $w_s = 12\%$ ,  $R_a = 10.8 \text{cm}$ ,  $\sigma_{H1} = 1.99 \text{g/cm}^3$ ,  $\sigma_{H2} = 1.61 \text{g/cm}^3$ ,  $\sigma_v = 2.10 \text{g/cm}^3$ ,  $P_m = 1.35 \text{g/cm}^3$ , 其他参数由实验获得。

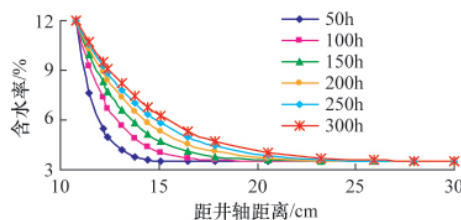


图 6 井周地层含水率变化

Fig. 6 Variation of water content around the well

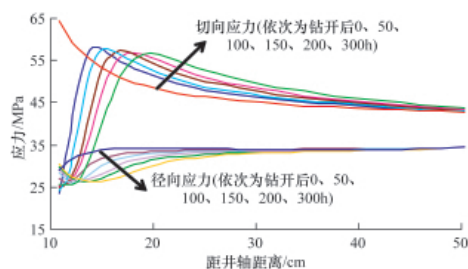


图 7 泥页岩水化对井周应力状态的影响

Fig. 7 Impact of shale hydration on the stress around the well

井眼钻开后, 泥页岩井壁上的吸水量很快达到饱和, 地层含水率随距井壁距离的增加而减小, 随钻进时间的增加而增加, 且在井壁附近降低速度最快, 当与井壁距离超过 25cm 后, 即使时间增加, 地层含水量也几乎不再变化, 其含水量接近原始含水量。

由于水化导致地层软化, 使切向应力降低, 虽然吸水产生膨胀应变有使应力增大的趋势, 但变形刚度降低造成泥页岩软化对应力的影响更大<sup>[9]</sup>。同时, 切向应力最大值不在井壁

上,而是在距井壁一定距离处,该距离随时间增加而向地层内部移动,该处径向应力会随时间的增加而减小,使井壁更易失稳。因此,井壁失稳不是在井壁上,而是在井壁内部,此种破坏与时间有关,表现为周期性坍塌,且塌块尺寸较大,数量较多,对钻井的危害极大,锦州 25-1 油田的钻井实践也证明了这一点。

图 8 给出了坍塌压力随时间的变化规律,结果表明,井眼钻开后,由于泥页岩水化,短时间内井壁坍塌压力降低,在 10h 左右最低,但随后,坍塌压力快速增加,经过 40h 左右即达到初始值,之后增加速度逐渐降低,在 4d 左右增加至  $1.41\text{g}/\text{cm}^3$ ,之后近似直线增加,增加速度缓慢。钻开泥页岩后,逐渐将钻井液密度增至  $1.45\text{g}/\text{cm}^3$  以上,有利于井壁长期稳定。

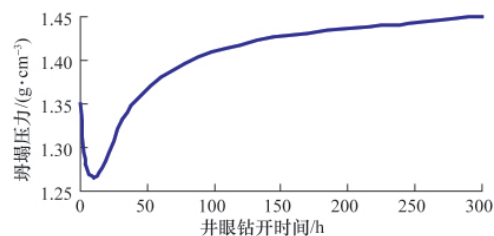


图 8 水敏性泥页岩坍塌压力随井眼钻开时间的变化  
Fig. 8 Collapse pressure of water-sensitive shale changing with drilling time

#### 4.3 钻井技术对策

锦州 25-1 油田沙河街组层理性泥页岩和水敏性泥页岩相互影响,造成该油田井壁失稳严重。水敏性泥页岩水化坍塌后易黏附在井壁上,起下钻时需要进行划眼作业,而划眼作业又会对层理性地层产生扰动,使地层沿层理面剥落,加剧井壁失稳<sup>[9]</sup>。需要在钻前及钻井过程中根据井壁稳定分析结果对钻井液密度和性能、井眼轨迹等提出较高要求,以维持井壁稳定。

(1) 选择合适的钻井液密度。由于层理弱面的存在和地层水化,需要一定的钻井液密度来防止地层坍塌,但密度过高又会使钻井液液柱压力和地层孔隙压力之间的压差增大,钻井液向地层的渗流加剧,不仅改变井眼周围有效应力状态,而且地层与侵入流体间的物理化学反应还将改变地层的力学性质,引起井壁失稳。

(2) 提高钻井液抑制性与封堵性。提高钻井液抑制性有利于防止泥页岩水化膨胀,加强对层理、裂缝封堵的主要目的是降低钻井液渗流对地层的影响。若封堵性不好,提高钻井液密度会加快钻井液沿层理、裂缝渗流,对稳定井壁不利。

(3) 提高钻井液的携岩能力。理论分析及钻井实践都表明,沙河街组地层易产生较大的掉块,因此要求钻井液具有良好的携岩性能。

(4) 井眼轨迹优化。由于层理面的存在,井斜角超过  $50^\circ$  后地层坍塌压力迅速升高,但密度过高又会加剧钻井液向地层的渗流,引起井壁失稳。在钻穿沙河街组地层时,应尽量保持井斜角在  $50^\circ$  以下,需钻大位移井时可以增大上部地层的

井斜角,钻进沙河街组后将井斜角降至  $50^\circ$  以内。

## 5 结论

(1) 锦州 25-1 油田存在水化膨胀和水化分散两种类型的泥页岩,是造成井壁失稳的主要原因。

(2) 层理性泥页岩地层的强度具有显著各向异性,地层强度是轴向应力与层理面法线间夹角的函数;当井斜角小于  $50^\circ$  时,层理性泥页岩地层坍塌压力处于较低水平,但当井斜角超过  $50^\circ$  时,坍塌压力将大幅升高。

(3) 水敏性泥页岩吸水后产生水化膨胀,地层力学参数和弹性参数都随地层含水量的增加而发生变化;井眼钻开后短时间内水敏性泥页岩地层坍塌压力降低,随后快速增加,在 4d 左右增加至  $1.41\text{g}/\text{cm}^3$ ,之后近似直线缓慢增加。井眼钻开后逐渐将钻井液密度增加至  $1.45\text{g}/\text{cm}^3$  以上,有利于维持井壁长期稳定。

(4) 沙河街组地层的井壁失稳问题,必须在优化井眼轨迹和选择合理钻井液密度基础上,并增强钻井液的封堵性和抑制性才能解决。

## 参考文献 (References)

- [1] Roegiers J C. Well modeling: An Overview Présentation générale de la modélisation géomécanique des puits de forage[J]. Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP, 2002, 57(5): 569-577.
- [2] Yamamoto K, Shioya Y, Uryu N. Discrete element approach for the wellbore instability of laminated and fissured rocks [C]. SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving, Texas, October 20-23, 2002.
- [3] Chenevert M E, Gatlin C. Mechanical anisotropies of laminated sedimentary rocks[J]. SPE Journal, 1965, 5(1): 67-77.
- [4] 蔚宝华, 邓金根, 汪海阁. 霍尔果斯背斜井壁稳定技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 108-112.  
Yu Baohua, Deng Jingen, Wang Haige. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 108-112.
- [5] 王炳印, 邓金根, 邹灵战. 物理-化学耦合作用下泥页岩坍塌周期应用研究[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 130-132.  
Wang Bingyin, Deng Jingen, Zou Lingzhan. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 130-132.
- [6] McLamore R T. A strength criterion for anisotropic rocks based upon experimental observations [C]. Annual Meeting of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Los Angeles, California, February 19-23, 1967.
- [7] 邓金根, 王金凤, 罗建生, 等. 泥页岩吸水扩散系数测量新方法 [J]. 岩土力学, 2002, 23(S1): 40-42.  
Deng Jingen, Wang Jinfeng, Luo Jiansheng, et al. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(S1): 40-42.
- [8] Yew C H, Chenevert M E, Wang C L, et al. Wellbore stress distribution produced by moisture in adsorption [J]. SPE Drilling Engineering, 1990, 5(4): 311-316.
- [9] 邓金根, 郭东旭, 周建良, 等. 泥页岩井壁应力的力学-化学耦合计算模式及数值求解方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S1): 2250-2253.  
Deng Jingen, Guo Dongxu, Zhou Jianliang, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S1): 2250-2253.
- [10] Aadony B S. Modeling of the stability of highly inclined borehole in anisotropic rock formation[J]. SPE Drilling Engineering, 1988, 3(3): 259-268.

(责任编辑 刘志远)