

泥 岩 地 层 井 壁 稳 定 性 研 究

刘向君* 罗平亚(中国工程院院士)
(西南石油学院)

刘向君等. 泥岩地层井壁稳定性研究. 天然气工业, 1997; 17(1): 45 ~48

摘 要 钻井过程中泥页岩地层井壁稳定问题十分复杂。长期以来,许多研究工作者或从井壁稳定的岩石力学分析着手,或从抑制泥页岩水化的新型处理剂和泥浆体系着手,对这一问题进行了大量研究,并取得了一定成效。但由于前者没有考虑地层与泥浆之间的物理—化学作用,忽略了井壁围岩力学特征将随水化程度不同而不同;而后者则没有考虑井壁岩石力学强度、围岩应力分布在井壁稳定过程中的重要作用。为此,通过实验分析指出,水敏性泥岩地层从钻井液中吸水、膨胀的过程,是引起钻井过程中井壁不稳定的重要原因。以均匀各向同性的线—弹性力学井壁稳定性模型为基础和出发点,引用 Yew C H 等提出的水化应力计算模型,建立了求解水敏性泥岩地层井壁围岩应力分布的力学基本方程,并在此基础上编制了可应用于泥岩地层井壁力学稳定性分析的相应的计算程序。

主题词 水敏性 泥岩 井眼稳定 围岩 应力 应变 分析

泥页岩中一般含有蒙脱石、伊利石和高岭石等粘土矿物。由于粘土矿物特殊的物理化学性质,当泥浆中水的活度大于地层水活度时,泥浆中的水分将向井壁渗透,使泥页岩吸水膨胀或裂解;反之,则地层水向井内移动,使泥页岩脱水而强度发生改变,两者都不利于井壁稳定。但比较起来,泥页岩吸水对其稳定性影响更大。泥页岩水化一方面在地层中产生水化膨胀应力;另一方面由于水的进入又将削弱粘土矿物颗粒之间的联结力,促使岩石力学强度减小,其变化量不仅取决于组成地层的粘土矿物种类、可交换性阳离子含量及类型,而且取决于与之接触的钻井液性质及接触时间、地层的温度和围岩压力。当条件一定时,相同时间内,水敏性泥岩地层从钻井液中吸附水越多,则泥浆性能越差,井壁也越不稳定。

Chenevert 利用 Mancos 页岩、Willington 页岩及 Pierre 页岩岩心,对泥页岩在不同水活度溶液中的膨胀动力学过程进行了全面深入的研究,实验证明:材料的膨胀百分比与材料所吸收的水分重量百分比成正比;实验也证明,页岩水化可以用扩散吸附过程加以描述。Yew C H 等首先利用泥页岩地层的这一实验结果,提出了一种计算井眼周围水化应力分布的模型。本文将以均匀各向同性的线—弹性力学井壁稳定性模型为基础和出发点,引用 Yew C H

等提出的这一计算模型,对水敏性泥岩地层井壁力学稳定性进行分析。

井眼围岩应力分布规律研究

1. 水敏性泥页岩地层力学基本方程的建立

依据热弹性力学的基本理论,从静力学、几何学、物理学三方面建立求解水化后岩体内应力分布所需的基本方程。引入广义平面应变条件,且不计体力,则在柱坐标系下,平衡方程为:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0 \tag{2}$$

可见,在柱坐标系下,从静力学出发建立的平衡方程与无水化过程时的平衡方程形式完全相同。但这里的径向应力(σ_r)、周向应力(σ_θ)、剪切应力($\tau_{r\theta}$)包括钻开地层由于载荷不平衡引起的应力和水化膨胀应力两部分。几何方程为:

$$\epsilon_r = \frac{\partial U_r}{\partial r} \tag{3}$$

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{U_r}{r} \tag{4}$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial U_z}{\partial z} \tag{5}$$

* 刘向君, 1969 年生; 1995 年毕业于西南石油学院石油工程系, 获工学博士学位; 现在西南石油学院完井中心工作。地址: (637001) 四川省南充市。电话: (0817) 2224433 转 2910。

$$\gamma_{r\theta} = \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} - \frac{U_\theta}{r} \quad (6)$$

几何方程的形式也与通常情况一样,这是因为几何方程反映的是应力与应变之间的纯粹几何关系。只要保证弹性体连续,就必然会得到这六个几何方程,它不会随引起应变的原因不同而不同。该处的应变和位移由力学和物理—化学因素共同引起。

载荷不平衡引起的应变仍然服从广义虎克定律,而由于泥页岩水化直接引起的那部分应变,则需由实验确定。根据 Chenevert 等的实验研究结果,将其设为:

$$\epsilon_w = f(\Delta w) = k_1 \cdot \Delta w + k_2 \Delta w^2 \quad (7)$$

其中, $\Delta w(r, t)$ 是指径向剖面上随时间而变化的吸附水增量。已知任意时刻地层含水量的分布 $w(r, t)$, 减去初始时刻含水量 $w(r, t_0)$, 即得到 $\Delta w(r, t)$ 。由 Chenevert 等的实验已证明,页岩的吸水可以用扩散吸附过程加以描述。泥页岩与特定泥浆组成体系的扩散吸附常数越大,泥页岩水化膨胀能力越强。利用测井参数确定特定泥浆/地层扩散吸附常数的方法在作者的其它文章中已进行了讨论,本文不再阐述。

假设地层均匀各向同性,则它在各个方向的水化膨胀应变都相同,不存在剪应变,从而得到该条件下的物理方程为:

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)] + \epsilon_w \quad (8)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] + \epsilon_w \quad (9)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)] + \epsilon_w \quad (10)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{r\theta} \quad (11)$$

已知钻井液对泥页岩地层的岩石力学性质有很大影响,构成井壁的泥页岩和在与水基泥浆滤液接触时很少改变的非粘土类岩石不同。在这种地层中由于粘土矿物的吸水性,使岩体力学性质变得不稳定,与纯岩石力学稳定性研究不同,在泥浆滤液侵入带内地层的岩石力学强度参数是 $\Delta w(r, t)$ 的函数,即 $E = f_1(\Delta w(r, t))$ 、 $C_0 = f_2(\Delta w(r, t))$, 随空间、时间而异。这时上述方程不满足线—弹性、平面应变条件下由 Fairhurst 得到的解析解,而只有数值解。

求解泥页岩地层吸水后围岩内应力、应变的基本方程有 10 个,同时求解相当困难。因此,根据方程特点选取位移分量作为基本未知量,引入广义平面应变概念,可以建立柱坐标系下利用位移法求解围

岩水化后应力应变分布特征的基本方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 U_r}{\partial r^2} + \left(\frac{\partial E}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) \frac{\partial U_r}{\partial r} + \left(\frac{\mu}{1-\mu} \frac{1}{rE} \frac{\partial E}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \right) U_r \\ & + \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)r^2} \frac{\partial^2 U_r}{\partial \theta^2} + \frac{1}{2(1-\mu)} \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial r \partial \theta} \\ & + \left(\frac{\mu}{(1-\mu)rE} \frac{\partial E}{\partial r} - \frac{3-4\mu}{2(1-\mu)r^2} \right) \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} \\ & = \frac{(1+\mu)}{(1-\mu)} \left(\frac{\epsilon_w}{E} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{\partial \epsilon_w}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial \theta^2} \left(\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)r^2} + \frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)rE} \frac{\partial E}{\partial r} \right) U_\theta + \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \\ & \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial r^2} + \left(\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)rE} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)r} \right) \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{1}{2(1-\mu)r} \\ & \times \frac{\partial^2 U_r}{\partial r \partial \theta} + \left(\frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)rE} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{3-4\mu}{2(1-\mu)r^2} \right) \frac{\partial U_r}{\partial \theta} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

2. 差分方程建立

差分网格如图 1 所示,该网格 r 方向不等距, θ 方向等距,且 θ 取值 $0 \sim \pi/2$ 。对基本方程分别进行离散差分得到差分方程:

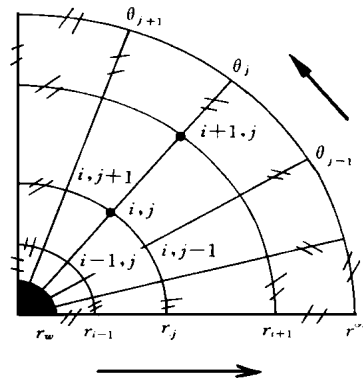


图 1 差分网格示意图

Fig. 1. Diagrammatic sketch of difference grid.

$$\begin{aligned} & d_{31} U_{i-1j} + a_{31} U_{ij} + e_{31} U_{i+1j} + c_{31} U_{rij-1} + b_{31} U_{rij+1} \\ & + b_{32} U_{\theta j+1} + c_{32} U_{\theta j-1} + g_{32} U_{\theta i+1j+1} + h_{32} U_{\theta i-1j-1} \\ & + f_{32} U_{\theta i+1j-1} + Q_{32} U_{\theta i-1j+1} = v_{31} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & d_{34} U_{\theta i-1j} + a_{34} U_{\theta j} + e_{34} U_{\theta i+1j} + c_{34} U_{\theta j-1} + b_{34} U_{\theta j+1} \\ & + b_{33} U_{rij+1} + c_{33} U_{rij-1} + g_{33} U_{ri+1j+1} + h_{33} U_{ri-1j-1} \\ & + f_{33} U_{ri+1j-1} + Q_{33} U_{ri-1j+1} = v_{31} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: d_{31} 、 a_{31} 、 e_{31} 、 c_{31} 、 b_{31} 、 b_{32} 、 c_{32} 、 g_{32} 、 h_{32} 、 f_{32} 、 Q_{32} 、 d_{34} 、 a_{34} 、 e_{34} 、 c_{34} 、 b_{34} 、 b_{33} 、 c_{33} 、 g_{33} 、 h_{33} 、 f_{33} 、 Q_{33} 为方程组系数。

由岩石力学有关试验知,随着岩石中含水量上升,杨氏模量、岩石的抗压、抗张强度将下降,但泊松比基本上保持不变,或变化很小,因此,为简化方程在推导上述方程中把泊松比作为常量,取为原地层条件下的泊松比值。

方程定解条件为:

内边界

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r \Big|_{r_w} &= p_{wf} \\ \tau_{\theta} \Big|_{r_w} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

外边界

$$\sigma_r^{\infty} = \frac{\sigma_{H1} + \sigma_{H2}}{2} + \frac{\sigma_{H1} - \sigma_{H2}}{2} \cos 2\theta \quad (17)$$
$$\tau_{\theta}^{\infty} = - \frac{\sigma_{H1} - \sigma_{H2}}{2} \sin 2\theta \quad (18)$$

井眼围岩极限平衡分析

井壁不稳定分两种情况:一是钻井液密度过低,井壁发生剪切垮塌;另一种是钻井液密度过高,井壁发生张性破坏。因此,钻井液存在一合理密度范围,上限对应于破裂压力,下限对应于坍塌压力。钻井时安全泥浆柱压力必须大于或等于地层的坍塌应力,小于或等于地层的破裂压力。

将井眼围岩应力分量与岩石破坏准则(即 Mohr-Coulomb 剪切破坏准则和张破裂准则)相比较,便可以对井眼稳定性进行分析,并计算出保持井壁稳定所需的合理钻井液密度范围。

1. 剪破坏准则
利用 Mohr-Coulomb 判别准则,围岩发生剪破坏时,破坏判据为:

$$[\sigma] = \alpha \sigma_3 + \sigma_c \quad (19)$$

式中: $[\sigma]$ 为岩石允许承载力;
 σ_c 为单轴抗压强度;
 σ_3 为井壁最小有效主应力。

对井壁地层进行平衡分析,稳定性系数为:

$$K = \frac{[\sigma]}{\sigma_1} \quad (20)$$

当稳定性系数 $k = 1$ 时,井壁处于极限平衡状态。

2. 张破裂准则
按最大拉应力理论,井壁应力满足以下等式时,井壁岩石将处于张性极限平衡状态。

$$\sigma_{\theta \min} = - |\sigma| \quad (21)$$

将 σ_{θ} 对角 θ 微分,可以求得 σ_{θ} 最小值 $\sigma_{\theta \min}$ 。

确定水敏性地层坍塌应力和破裂压力的算例分析

在前述分析的基础上编制了相应的计算程序,程序框图见图 2。

从程序框图中可见,已知杨氏弹性模量、水化膨胀应变与吸附水增量的函数关系等输入参数后,结合内外边界条件求解差分方程组,可以求得地层吸水后围岩中应力、应变大小;结合强度判别准则,就能够对井眼稳定性进行定量分析,确定出对应条件

下的坍塌压力和破裂压力。
程序框图中的基本计算参数,如特定地层与特定泥浆体系的扩散吸附系数、围岩地层吸附水分布及围岩地层的岩石力学参数等可以根据有关的测井参数进行确定。水化膨胀应变与吸附水增量的关系直接利用 Chenevert 等人的实验关系。

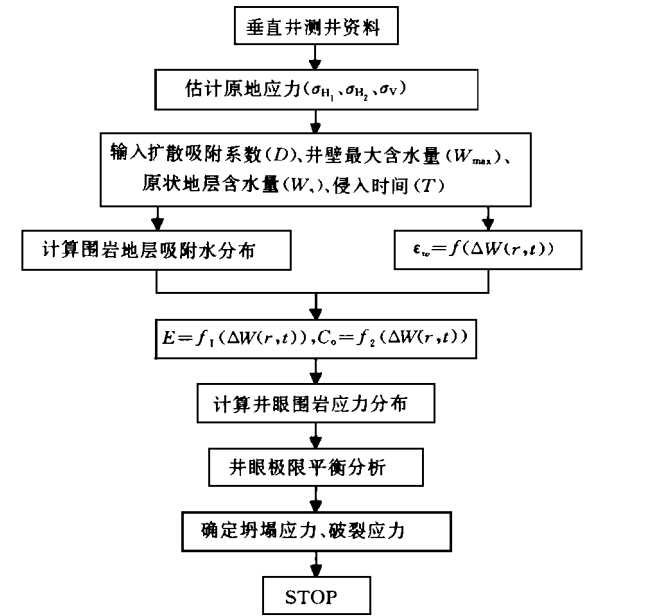


图 2 程序计算框图
Fig. 2. Program calculation block diagram.

由于测井响应是在地层压力、温度及一定的钻井条件下测得的,测井的每一个时刻都间接反映了地层在钻井过程中所经受的各种变化,反映了钻井液与地层之间的一个作用状态。所以,以测井数据为基础,对井眼围岩地层的力学特征进行研究,在一定程度上可以改进现有的岩石力学模型及强度判别准则,并能对水敏性泥岩地层钻井所用泥浆的防塌性能进行实时评价。

以某井井径为 12 cm、原始地层平均含水量为 1.4%、泊松比为 0.2、孔隙压力为 28.12 MPa、 $\sigma_{H1} = \sigma_{H2} = 56.24$ MPa、 $\sigma_v = 70.3$ MPa、扩散吸附系数为 $0.000\,051\,79\text{ cm}^2/\text{s}$ 和表 1 中参数为基本计算参数,岩石杨氏弹性模量 (E) 、岩石抗压强度等力学参数随水化过程而变化。代入该计算程序,可就水敏性地层中坍塌应力、破裂应力进行计算分析。

取膨胀应变系数 $k_1 = 0, k_2 = 0$,即假定地层与泥浆滤液不发生任何作用时,代入程序计算得到对应的安全泥浆相对密度范围为 0.63~2.53。但当假定膨胀应变系数 $k_1 = 0.007\,08, k_2 = 1.108$ 时,保持其

它参数不变, 代入程序计算, 则得到对应的安全泥浆相对密度范围为 1.06 ~ 1.46。可见, 当地层与所用水基泥浆滤液不发生任何作用时, 合理泥浆相对密度的可选择范围大, 在这种条件下钻井依靠岩石自身强度的支撑, 井壁通常不会出现失稳现象。但叠加水化作用后, 对应的合理泥浆相对密度范围将远小于纯力学状态下的合理泥浆相对密度范围。上限破裂压力降低, 下限坍塌压力升高了。

表 1 弹性模量与吸附水增量的关系
Table 1. Relation between elasticity modulus and absorbed water increment

吸附水增量(%)	杨氏模量(M Pa)
0	35 000
0.6	31 600
1.3	27 600
3.3	16 400
3.9	13 100

结 论

通过本文分析可见, 利用均匀各向同性介质的热弹性力学本构关系能够较好地刻画水敏性泥页岩

地层的力学基本特征。岩石力学强度、水化膨胀应与吸附水增量的函数关系是水敏性泥页岩地层井壁稳定性研究所需的关键参数。泥页岩地层水化膨胀后, 对应的合理泥浆相对密度范围小于纯力学状态下的合理泥浆相对密度范围。水化后泥页岩地层的坍塌应力比原状地层的坍塌应力高, 而水化后泥页岩地层的破裂应力比原状地层的破裂应力低。当泥页岩地层不与泥浆滤液发生物理—化学作用时, 在岩石自身强度的支撑下, 井壁通常不会出现失稳现象, 正是由于水敏性泥页岩地层的水化作用使得钻井过程变得复杂化了。因此, 水敏性泥页岩地层井壁不稳定是力学、物理—化学因素共同作用的结果。钻井过程中应尽可能抑制水敏性泥岩地层的水化膨胀过程。

参 考 文 献

1 严宗达, 王洪礼编著. 热应力. 高等教育出版社, 1993

2 Yew C H, Chenevert M E *et al.* Wellbore stress distribution produced by moisture adsorption. SPE 19536

3 刘向君, 罗平亚. 利用神经网络建立岩石强度预测模型. 西南石油学院学报, 1995; (3)

（ 审稿人 高级工程师 石仲华
收稿日期 1996-07-26 编辑 钟水清 ）

西西伯利亚天然气将成为 21 世纪
欧 亚 争 夺 的 焦 点

俄罗斯西西伯利亚地区是世界上天然气资源最丰富的地区, 已探明的天然气储量超过 $25 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。这里的天然气埋藏浅、储量集中、单井产能高、不含硫、勘探成本及开发成本低, 为世人所关注。1995 年俄罗斯销往欧洲的天然气达 $1\,174 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占当年欧洲天然气进口量的 40%。俄罗斯已和德国、意大利、波兰等国建立了合资企业, 还在 13 个欧洲国家建立了天然气销售公司, 并计划从西西伯利亚北部铺设一条 5 000 km 长的新管线到欧洲。

据俄罗斯国家天然气股份公司的预测, 俄罗斯对欧洲的天然气供应量到 2010 年还将翻一番。但是在欧洲市场俄罗斯的竞争对手还有英国、挪威, 而且西西伯利亚的天然气更靠近亚洲用户。亚洲在 21 世纪的能源短缺将更为严重, 对天然气的需求将更加迫切, 故亚洲的市场更为广阔。俄罗斯已认识到亚洲天然气市场的重要性, 已在中国、韩国、日本及东南亚一些国家商谈天然气工业的合作事项。从长远来看, 亚洲与欧洲对西西伯利亚天然气之争在所难免, 将成为 21 世纪争夺的焦点。

(龚畅编译)