

文章编号:1673-5005(2008)03-0055-05

大斜度井钻井液侵入数值模拟

杨震, 李智强, 邓少贵, 范宜仁, 陈华

(中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

摘要:根据油水两相渗流理论,考虑重力以及渗透率各向异性的影响,运用三维有限差分法模拟了大斜度井环境中井筒周围压力、流体饱和度和电阻率的分布情况。模拟结果表明:斜井环境下,当井眼与原始储层存在明显压力差时,重力对钻井液滤液侵入影响不明显;当储层渗透率为各向异性时,钻井液侵入不仅受储层水平渗透率影响,同时受到储层垂向渗透率和井斜角度影响;淡水钻井液侵入造成井眼周围储层电阻率分布复杂,局部冲洗带电阻率可能高于原状地层电阻率,从而出现低阻环带特征。

关键词:大斜度井; 钻井液侵入; 重力; 饱和度; 各向异性; 电阻率

中图分类号:TE 258 文献标识码:A

Numerical simulation of drilling fluid invasion in highly deviated wells

YANG Zhen, LI Zhi-qiang, DENG Shao-gui, FAN Yi-ren, CHEN Hua

(Faculty of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: Considering the influence of the gravity and the permeability anisotropy, the invasion pressure, fluid saturation and resistivity distribution in the highly deviated wells were numerically simulated with 3-D finite difference method on the basis of the filtration theory of oil-water two-phase flow. The simulation results show that the effect of gravity is generally slight if pressure difference between the borehole and the original formation is evident. Besides horizontal formation permeability, the invasion is also affected by vertical formation permeability and well deviation when formation permeability is anisotropic. The invasion of fresh drilling fluid resulted in the complex distribution of formation resistivity around the borehole. The resistivity of local flushed zone may be higher than the virgin zone resistivity and a low resistive zone appears in invading zone in the oil formation.

Key words: highly deviated well; drilling fluid invasion; gravity; saturation; anisotropy; resistivity

钻井过程中,钻井液一般采用水基钻井液,而钻井液滤液会不同程度地侵入到渗透性储层,尤其在常压地层或压力系数较低的地层。钻井液滤液侵入储层,使得储层径向电阻率分布发生变化,对于淡水钻井液直井情况,水层一般显示钻井液高侵特征,油层显示低侵特征,这一方面给人们利用深浅电测井资料组合定性识别油水层提供了方便,另一方面,钻井液的侵入可能会导致电测井仪器探测失真,使探测结果不能反映真实的储层电阻率。研究发现,原始储层性

质,诸如孔隙度、绝对渗透率、相对渗透率、孔隙压力、毛细管压力及剩余流体饱和度等,会对泥饼的动态形成^[1]和钻井液侵入过程产生重要的影响。目前国内对直井钻井液侵入作了很多研究^[2-5],主要针对一维径向情况,而对斜井侵入影响的认识和校正也仅停留在—维径向模型上面。实际上在斜井情况下,由于各向异性以及重力影响的不对称性,致使钻井液实际侵入变得更加复杂,这需要在理论上加以模拟研究。为此,笔者对大斜度井钻井液的侵入进行数值模拟研究。

收稿日期:2007-10-15

基金项目:中石油中青年创新基金项目(06E1020);山东省自然科学基金项目(Y2007F25)

作者简介:杨震(1982-),男(汉族),山东莱芜人,博士研究生,主要从事岩石物理及电法测井数值模拟。

1 钻井液滤液侵入机理

钻井液滤液侵入储集层是一个很复杂的物理过程,它涉及钻井液性质和储层性质以及钻井液浸泡油气层的时间等。钻井液滤液侵入地层大致可以分为三个物理过程:(1)驱替,钻井液滤液在钻井压差的作用下,向井筒周围渗滤,并驱走孔隙中的原生流体;(2)混合,钻井液滤液进入地层后,与地层孔隙中的原生溶液进行混合;(3)扩散,钻井液滤液与地层水矿化度不同,在接触面产生离子扩散。

钻井液滤液在储层中的侵入过程可由两相渗流方程来模拟。目前对于侵入剖面的研究,主要应用渗流力学中的 B-L 理论和扩散理论^[6],但钻井液滤液对储层的侵入过程与 B-L 理论的前提条件有所区别,主要体现在:(1)在钻井液侵入过程中由于侵入速率很小,毛管压力和重力对侵入剖面的影响相对增强;(2)侵入是由井筒向地层径向进行的,随侵入深度的增加,单位面积的侵入速率变小;(3)侵入速率随时间的增长不断降低,属于不稳定渗流,因此它是对侵入的近似描述。

1.1 驱替过程理论模型

在本文的计算模型中,假设:①油藏中存在油水两相流体渗流;②钻井液滤液对地层内流体的驱替过程是混溶的;③油藏中流体渗流符合达西(Darcy)定律;④考虑毛管压力和重力影响。

(1)压力饱和度方程。根据渗流理论,得到下面的压力饱和度方程:

$$\nabla \cdot \left[\rho_o k \frac{K_{ro}(S_o)}{\mu_o} \nabla (p_o - \rho_o g D) \right] + q_o = \frac{\partial(\varphi \rho_o S_o)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \left[\rho_w k \frac{K_{rw}(S_w)}{\mu_w} \nabla (p_w - \rho_w g D) \right] + q_w = \frac{\partial(\varphi \rho_w S_w)}{\partial t}, \quad (2)$$

$$p_c = p_o - p_w, \quad (3)$$

$$S_o + S_w = 1. \quad (4)$$

式中, p_w, p_o, p_c 分别为水相、油相和油水相之间的毛管压力; S_o, S_w 分别为含油、水饱和度; μ_o, μ_w 分别为油、水粘度; k 为地层绝对渗透率; D 为地层深度; g 为重力加速度; K_{ro}, K_{rw} 分别为油、水两相的相对渗透率; φ 为地层孔隙度; q_o, q_w 分别为油、水产量; ρ_o, ρ_w 分别为油、水的密度。

(2)初始条件。

$$p_r |_{t=0} = p_{i0}, S_w |_{t=0} = S_{w0}.$$

式中, p_{i0} 为原始储层压力; S_{w0} 为原始地层含水饱和

度; r 为地层径向半径; t 为侵入时间。

(3)边界条件。采用井壁定压,油井外边界封闭的边界条件,即

$$p_r |_{r=r_0} = p_d, \frac{\partial p}{\partial n} |_{r=r_e} = 0.$$

式中, p_d 为井内压力; r_0 为油井内边界; r_e 为油井外边界。

白玉湖等^[7]用该模型在同时考虑了重力和毛管压力的情况下得出的数值解与一维的 Buckley-Leverett 理论解^[8]进行了比较,发现含水饱和度随时间变化规律的数值解与理论解非常吻合,说明了该模型的合理性和准确性。Buckley-Leverett 理论的条件是:均质等厚地层中的一维流动;忽略毛管力和重力;忽略流体和多孔介质的压缩性;流体的密度和粘度为常数。

1.2 水的对流扩散方程

由于钻井液滤液和地层水矿化度不同,在侵入前沿,钻井液滤液和地层水会发生物理混合,离子发生对流扩散,并遵循如下方程(考虑重力):

$$\nabla \cdot \left[\frac{k K_w C_w}{\mu_w} \nabla (p_w - \rho_w g D) \right] = \frac{\partial(S_w C_w \varphi)}{\partial t}. \quad (5)$$

其中, C_w 为地层水矿化度,在求出压力和饱和度分布以后,根据边界、初始条件可以求出任意时刻储层的地层水矿化度分布。

2 斜井条件钻井液侵入模型

假设斜井模型井径为 r (如图 1),其中虚线区域为实际模拟计算区域。假设 $o(x_0, y_0, 0)$ 为位于井轴上的某一点,井轴方向为 oo' 方向,井轴的方向向量可以表示为 $(0, \sin \theta, \cos \theta)$, θ 为井斜角。斜井井壁边界处各点可用向量 om 表示, om 可以写成 $(x - x_0, y - y_0, z)$, om 和 oo' 的关系可写成

$$r^2 = \frac{|\overline{om} \times \overline{oo'}|^2}{|\overline{oo'}|^2} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x - x_0 & y - y_0 & z \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix}^2 = |[(y - y_0) \cos \theta - z \sin \theta]i - (x - x_0) \cos \theta j + (x - x_0) \sin \theta k|^2 = (x - x_0)^2 + ((y - y_0) \cos \theta - z \sin \theta)^2. \quad (6)$$

在任一水平截面 $z = z_0$ 上,式(6)整理为

$$\frac{(x - x_0)^2}{r^2} + \frac{(y - y_0 - z_0 \tan \theta)^2}{(r \sec \theta)^2} = 1,$$

这说明在该水平截面上井筒的边界是以 $(x_0, y_0 + z_0 \tan \theta)$ 为中心,以 r 和 $r \sec \theta$ 为短、长轴的椭圆。

同样在存在斜井的地层中任一竖直截面 $y = y_0$

上,井筒边界是以 r 和 $r \csc \theta$ 为短、长轴的椭圆。

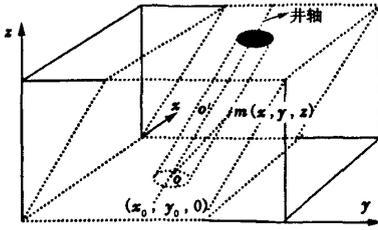


图 1 斜井地层模型

在用有限差分法进行数值模拟的过程中,网格的划分数量(或节点数)与数值解的精度有着直接的关系,为提高解的精度,希望网格划分的愈多愈好,但从另一方面来讲,网格数量又至少以一次幂的关系影响着计算所需的内存量和计算时间。通常所使用的网格剖分方法,网格疏密调节的灵活性较差,但对于钻井液侵入过程,井眼附近压力梯度、含水饱和度以及地层水矿化度变化较大,其他地方都很平缓,可使用非均匀网格剖分地层。计算区域的三维空间里网格划分如图 2 所示。只考虑油水两相液体渗流,不考虑 q_w, q_o , 在模拟区域内按照井斜角度自动剖分网格,采用块中心差分,时间变量按向前差分,对方程进行离散化处理,渗流方程(1),(2)的差分方程变为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta x_i} \left[\left(\frac{kK_{ro}\rho_o}{\mu_o} \right)_{i+\frac{1}{2}} \frac{p_{oi+1}^{n+1} - p_{oi}^{n+1}}{\Delta x_{i+\frac{1}{2}}} + \left(\frac{kK_{ro}\rho_o}{\mu_o} \right)_{i-\frac{1}{2}} \frac{p_{oi-1}^{n+1} - p_{oi}^{n+1}}{\Delta x_{i-\frac{1}{2}}} \right] + \frac{1}{\Delta y_j} \left[\left(\frac{kK_{ro}\rho_o}{\mu_o} \right)_{j+\frac{1}{2}} \frac{p_{oj+1}^{n+1} - p_{oj}^{n+1}}{\Delta y_{j+\frac{1}{2}}} + \left(\frac{kK_{ro}\rho_o}{\mu_o} \right)_{j-\frac{1}{2}} \frac{p_{oj-1}^{n+1} - p_{oj}^{n+1}}{\Delta y_{j-\frac{1}{2}}} \right] + \frac{1}{\Delta z_k} \left[\left(\frac{kK_{ro}\rho_o}{\mu_o} \right)_{k+\frac{1}{2}} \frac{p_{ok+1}^{n+1} - p_{ok}^{n+1} - \rho_o g(z_{k+1} - z_k)}{\Delta z_{k+\frac{1}{2}}} + \left(\frac{kK_{ro}\rho_o}{\mu_o} \right)_{k-\frac{1}{2}} \frac{p_{ok-1}^{n+1} - p_{ok}^{n+1} - \rho_o g(z_{k-1} - z_k)}{\Delta z_{k-\frac{1}{2}}} \right] = \\ & \frac{1}{\Delta t} [(\rho_o \varphi S_o)^{n+1} - (\rho_o \varphi S_o)^n], \quad (7) \\ & \frac{1}{\Delta x_i} \left[\left(\frac{kK_{rw}\rho_w}{\mu_w} \right)_{i+\frac{1}{2}} \frac{p_{wi+1}^{n+1} - p_{wi}^{n+1}}{\Delta x_{i+\frac{1}{2}}} + \left(\frac{kK_{rw}\rho_w}{\mu_w} \right)_{i-\frac{1}{2}} \frac{p_{wi-1}^{n+1} - p_{wi}^{n+1}}{\Delta x_{i-\frac{1}{2}}} \right] + \frac{1}{\Delta y_j} \left[\left(\frac{kK_{rw}\rho_w}{\mu_w} \right)_{j+\frac{1}{2}} \frac{p_{wj+1}^{n+1} - p_{wj}^{n+1}}{\Delta y_{j+\frac{1}{2}}} + \left(\frac{kK_{rw}\rho_w}{\mu_w} \right)_{j-\frac{1}{2}} \frac{p_{wj-1}^{n+1} - p_{wj}^{n+1}}{\Delta y_{j-\frac{1}{2}}} \right] + \frac{1}{\Delta z_k} \left[\left(\frac{kK_{rw}\rho_w}{\mu_w} \right)_{k+\frac{1}{2}} \frac{p_{wk+1}^{n+1} - p_{wk}^{n+1} - \rho_w g(z_{k+1} - z_k)}{\Delta z_{k+\frac{1}{2}}} + \left(\frac{kK_{rw}\rho_w}{\mu_w} \right)_{k-\frac{1}{2}} \frac{p_{wk-1}^{n+1} - p_{wk}^{n+1} - \rho_w g(z_{k-1} - z_k)}{\Delta z_{k-\frac{1}{2}}} \right] = \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\Delta t} [(\rho_w \varphi S_w)^{n+1} - (\rho_w \varphi S_w)^n]. \quad (8)$$

联合式(7)和式(8),采用隐式求解压力、显式求解饱和度(IMPES)^[9-10]的方法对方程组进行求解,可以得到 $n+1$ 时刻各节点的压力和饱和度。

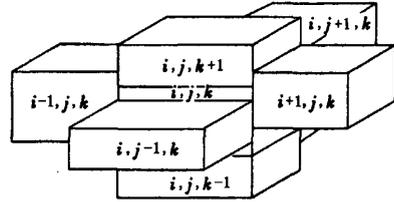


图 2 三维离散单元体

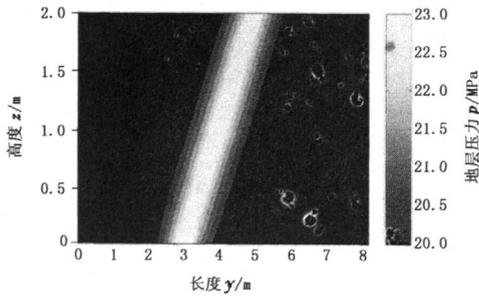
3 钻井液滤液侵入过程中地层压力变化特征及孔隙流体分布

钻井过程中,钻井液柱压力大于原始储层压力,使钻井液滤液向储层侵入,导致井筒周围地层孔隙流体压力分布的变化,并带动流体性质的改变,对于油层来说,就是侵入带油水饱和度和地层水矿化度的变化。为考察这种变化,对斜井钻井液侵入进行了数值模拟。模拟条件:井斜为 45° ,井眼与原始地层压力差为 3 MPa;地层渗透率为各向同性,绝对渗透率 $k = 300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;原状地层含油饱和度为 60%,束缚水饱和度为 20%,残余油饱和度为 25%;地层孔隙度 $\varphi = 25\%$;原油粘度为 3 mPa·s;地层水粘度为 1 mPa·s;侵入时间为 2 d。受重力影响严重的情况井斜为 60° ;压力差为 0.05 MPa;钻井液密度为 2.5 g/cm³;绝对渗透率 $k = 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;侵入时间为 30 d;其余条件相同。

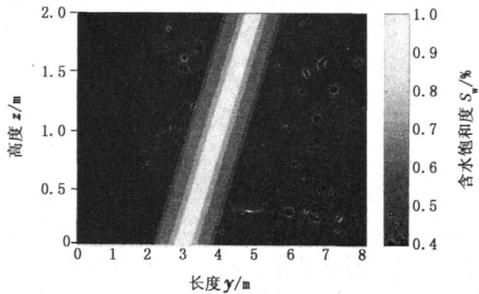
从数值模拟结果(图 3(a),(b))可以看出,在均匀各向同性地层中,压降主要在井筒周围附近,而且在侵入过程中,随着侵入时间增长,压力分布逐渐平缓。井壁附近储层由于钻井液滤液的侵入导致含油饱和度比原始储层含油饱和度低,在侵入前沿,含油饱和度升高,并逐渐恢复到原始储层状态。由侵入水平剖面来看(图 3(c)),由于井眼变为椭圆,侵入剖面也变为椭圆,这种椭圆形侵入剖面会对核测井产生影响,而对其他仪器的测量影响相对较小^[11]。

由模拟结果可以看出,当井筒和原始储层存在比较明显的压力差时,重力作用不明显,流体和压力围绕井轴基本呈对称分布。但当压差很小,并且钻井液密度较大、侵入时间较长、储层渗透率相对较大时,重力的影响开始体现出来,流体分布呈现明显的不对称,侵入剖面为一不规则的椭圆(如图 4),模拟

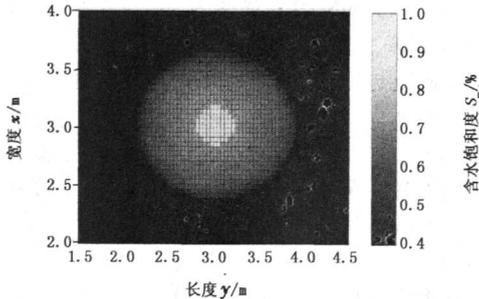
结果和 Peeters M 的填砂模型钻井液侵入的实验结果特征相似^[12]。这种不规则的侵入情况会使电测井响应变得难以预料。



(a) 储层压力分布(过井轴纵切面)



(b) 含水饱和度分布(过井轴纵切面)



(c) 含水饱和度分布(地层横切面)

图3 钻井液侵入2 d 储层压力分布与含水饱和度

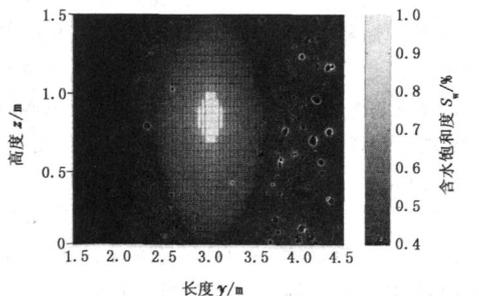
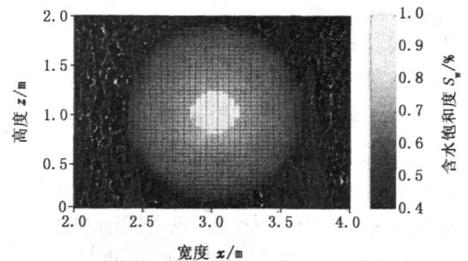


图4 受重力影响严重的钻井液侵入剖面

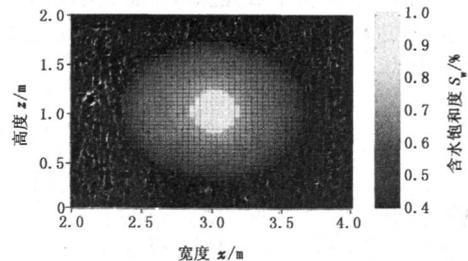
对于渗透率各向异性地层,通常情况下沿地层层面方向上的渗透性要好于地层层面法线方向

的渗透性。针对该种模型,本文中对水平和垂直方向上的绝对渗透率的比分别为1:1,1:0.1的情况分别进行模拟。模拟条件:井斜为45°,井眼压力与原始地层压力差为3 MPa;绝对渗透率 $k_h = 300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;原状地层含油饱和度为60%,束缚水饱和度为20%,残余油饱和度为25%;地层孔隙度 $\phi = 25\%$;侵入时间为2 d。

由模拟结果(图5)可知,在斜井条件下,钻井液滤液在井倾斜方向上的侵入不仅受到水平渗透率的影响,同时受到垂向渗透率的影响,而在与井斜垂直的方向上(x方向)侵入只受水平渗透率的影响,因此在该方向上的侵入程度相同。



(a) $k_h:k_v=1:1$



(b) $k_h:k_v=1:0.1$

图5 渗透率各向异性地层钻井液侵入剖面特征

4 钻井液滤液侵入过程中地层电阻率分布特征

钻井液侵入储层后,电阻率径向分布剖面的形状与储层渗透率、钻井液滤液矿化度、地层水矿化度以及井筒与储层的压力差等因素有关。不同性质的地层,其钻井液侵入引起的井眼周围地层电阻率出现不同的变化特征。

4.1 钻井液滤液侵入水层

钻井液滤液侵入水层的情况比较简单,因为不存在油水相之间的驱替问题。淡水钻井液侵入,将出现明显的钻井液高侵特征,盐水钻井液侵入,出现钻井液低侵现象,储层电阻率的分布只是简单呈现由冲洗带高(低)值到原状地层低(高)的一个渐变过渡带。

4.2 钻井液侵入油层

钻井液滤液侵入油层,一方面它对油层中的非相溶相(油)产生驱替作用,侵入结果使侵入带含水饱和度增大;另一方面,钻井液滤液不仅驱替相溶相(水),还与其发生离子扩散与对流传质作用。对于盐水钻井液侵入,随离开井壁距离增大,地层电阻率增大,见图6(其中,钻井液矿化度 $C_{mf} = 30 \text{ g/L}$,地层水矿化度 $C_w = 10 \text{ g/L}$,侵入时间 2 d);对于淡水钻井液侵入油层情况,则出现复杂的电阻率分布特征,见图7(其中,钻井液矿化度 $C_{mf} = 10 \text{ g/L}$,地层水矿化度 $C_w = 30 \text{ g/L}$,侵入时间 2 d)。

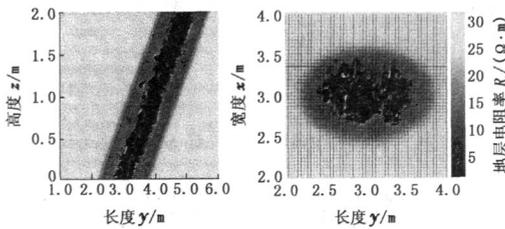


图6 盐水钻井液侵入油层电阻率分布

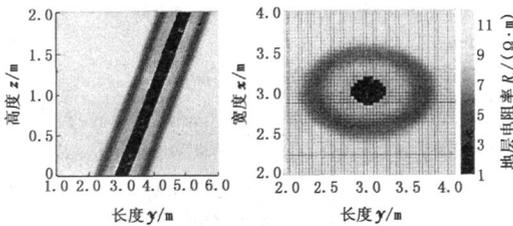


图7 淡水钻井液侵入油层电阻率分布

图6,7显示的这种特征可从钻井液侵入造成的油水驱替和水的离子扩散和对流传质来解释。在井壁周围,水驱油造成含水饱和度增大,其地层电阻率相对原状地层来说是降低的;同时,在离驱替前沿稍远距离井壁较近的地方,由于离子扩散和对流,孔隙水的矿化度降低较多,这种淡化使岩石孔隙水电阻率升高,且它的影响超过了含水饱和度变化对岩石电阻率的影响,致使岩石电阻率出现了高值,特别是当钻井液滤液和地层水的矿化度差异较大时,冲洗带电阻率甚至可能超过油层的原状地层的电阻率,这一过程也得到了淡水驱替岩石电阻率实验的证实。通过模拟可以看出,忽略重力影响,钻井液侵入过程中孔隙流体分布仍可以看成是关于井轴对称的,而且在特定的地层条件和井眼压力条件下,不同角度的斜井,其钻井液向地层侵入所造成的流体性质及分布特征接近,因此电阻率的分布情况也是基本相似的。即使如此,由于井斜引起的仪器偏心 and 地层各向异性会使测井响应变得非常复杂。

5 结论

(1)在有明显压力差情况下,重力对钻井液滤液侵入的影响不明显,这时井筒周围流体压力、饱和度以及地层电阻率分布仍然关于井轴对称。

(2)在大斜度井环境中,钻井液侵入受井斜和渗透率各向异性的影响较大,通过三维数值模拟可以准确分析钻井液侵入造成的井眼周围储层电阻率的变化特征。

参考文献:

- [1] 周凤山,赵明方,倪文学,等.泥饼厚度影响因素研究[J].西安石油学院学报,1999,14(5):26-28.
ZHOU Feng-shan, ZHAO Ming-fang, NI Wen-xue, et al. A study on the factors influencing the thickness of drilling fluid filter cake [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 1999, 14(5): 26-28.
- [2] CIVAN F, ENGLER T. Drilling mud filtrate invasion improved mode and solution [J]. J Pet Sci Eng, 1994, 11(3):183-193.
- [3] DEWAN J T, CHENEVERT M E. A model for filtration of water-based mud during drilling [J]. Petrophysics, 2001, 42(3): 237-250.
- [4] 张建华,胡启,刘振华.钻井泥浆侵入储集层的理论计算模型[J].石油学报,1994,15(4):73-75.
ZHANG Jian-hua, HU Qi, LIU Zhen-hua. A theoretical model for mud-filtrate invasion in reservoir formations during drilling [J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(4): 73-75.
- [5] 刘向军,陈福焯.泥浆滤液径向侵入特征研究[J].西南石油学院学报,1995,17(1):83-88.
LIU Xiang-jun, CHEN Fu-xuan. Study on radial invasion characteristics of mud-filtrate [J]. Journal of Southwestern Petroleum Institute, 1995, 17(1): 83-88.
- [6] 孙建孟,黄隆基.侵入深度对测井估算含气饱和度的影响[J].测井技术,1999,23(2):116-119.
SUN Jian-meng, HUANG Long-ji. Effect of invasion depth on oil/gas saturation computation [J]. Well Logging Technology, 1999, 23(2): 116-119.
- [7] 白玉湖,李家春,周济福.水驱油两相流物理模拟相似参数的敏感性分析[J].中国科学(E辑),2005,35(7):761-772.
BAI Yu-hu, LI Jia-chun, ZHOU Ji-fu. Flooding water two-phase flow simulation of the physical parameters of similar sensitivity analysis [J]. Science China (Series E), 2005, 35(7): 761-772.

(下转第67页)

- and its application [J]. *Drilling & Production Technology*, 2004, 27(3):4-8.
- [3] 姬长生. 空气钻井技术在大邑1井中的应用[J]. 钻采工艺, 2006, 29(4):110-111.
JI Chang-sheng. Application of air drilling technology in well Dayi 1 [J]. *Drilling & Production Technology*, 2006, 29(4):110-111.
- [4] 张金成, 位华, 于文红. 空气钻井技术在普光气田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(6):8-10.
ZHANG Jin-cheng, WEI Hua, YU Wen-hong. Application of air drilling technology in Puguang gas field [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2006, 28(6):8-10.
- [5] 屈展. 石油钻柱振动问题的力学机理分析与计算 [D]. 南充:西南石油学院石油工程系, 1994.
- [6] MLTCHELL Robert F, ALLEN Michael B. Lateral vibration: the key to BHA failure analysis [J]. *World Oil*, 1985, 200(4):101-106.
- [7] ASHLEY D K, MCNARY X M, TOMLINSON J C. Extending BHA life with multi-axis vibration measurements [R]. SPE 67696, 2001.
- [8] 杨东全. 钻柱静态变形的有限元分析[J]. 暨南大学学报, 2005, 26(1):137-140.
- YANG Dong-quan. Finite element analysis for static deformation of drill pipes [J]. *Journal of Jinan University*, 2005, 26(1):137-140.
- [9] 李茂生, 闫相祯, 高德利. 钻柱与井壁碰撞的非线性有限元分析[J]. 石油机械, 2006, 34(8):15-18.
LI Mao-sheng, YAN Xiang-zhen, GAO De-li. Nonlinear finite element analysis of the collision between drill pipe and the wall [J]. *China Petroleum Machinery*, 2006, 34(8):15-18.
- [10] DYKSTRA M W. Nonlinear drill string dynamics [D]. Oklahoma in America: The University of Tulsa, 1996.
- [11] BATHE Klaus-jürgen. Finite element procedures in engineering analysis [M]. New Jersey: Pre-Ntice-Hall, Inc, 1982: 371-604.
- [12] PRZEMIENIECKI J S. Theory of matrix structural analysis [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1968: 179-273.
- [13] 宋天霞, 邹时智, 杨文兵. 非线性结构有限元计算 [M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1996:88-118.
- [14] 崔俊芝, 梁俊. 现代有限元软件方法 [M]. 北京:国防工业出版社, 1995: 10-11.
- (编辑 李志芬)

(上接第59页)

- [8] 孔祥言. 高等渗流力学 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1999.
- [9] 沈平平, 刘明新, 汤磊. 石油勘探开发中的数学问题 [M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [10] 韩大匡, 陈钦雷, 闫存章. 油藏数值模拟基础 [M]. 北京:石油工业出版社, 2001:173-176.
- [11] PASSEY Q R, YIN H, RENDEIRO C M, et al. Overview of high-angle and horizontal well formation evaluation: issues, learnings, and future directions [CD]//SPWLA 46rd annual Logging Symposium, June 26-29, 2005, Paper A.
- [12] PEETERS M, KOVATS J, MOITA C, et al. Monitoring and modeling invasion using ground penetrating radar and flow simulation programs [CD]//SPWLA 43rd annual Logging Symposium, June 2-5, 2002, Paper VV.
- (编辑 修荣荣)

(上接第62页)

- [4] 郦明. 结构抗疲劳设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 1987:85-110.
- [5] 赵少沛. 抗疲劳设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 1994:99-120.
- [6] 曾春华, 邹十践. 疲劳分析方法及应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 1991:11-35.
- [7] 李文飞, 管志川. 深井钻柱疲劳强度计算 [J]. 石油机械, 2007, 35(4):25-30.
LI Wen-fei, GUAN Zhi-chuan. Calculation on fatigue strength of drill string in deep well [J]. *China Petroleum Machinery*, 2007, 35(4):25-30.
- [8] 徐灏. 疲劳强度设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 1981:26-66.
- [9] 路永明, 王世圣. 钻柱疲劳强度的实验研究 [J]. 石油矿场机械, 1996, 25(6):29-31.
LU Yong-ming, WANG Shi-sheng. Experimental study on fatigue strength of drill string [J]. *Oil Field Equipment*, 1996, 25(6):29-31.
- (编辑 李志芬)