

# 气体钻井转水基钻井条件下泥页岩水侵规律

周玉良<sup>1</sup>, 孟英峰<sup>1</sup>, 李 皋<sup>1</sup>, 胡 力<sup>2</sup>, 唐思洪<sup>3</sup>, 赵向阳<sup>4</sup>, 刘 骁<sup>5</sup>

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500;

2. 川中油气矿南充采油气作业区, 四川 南充 637100; 3. 广汉采气院, 四川 广汉 618300;

4. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 5. 延长石油集团油气勘探公司, 陕西 延安 716000)

**摘 要:**运用数学模型和实验模拟,开展了针对气体钻井转水基钻井条件下泥页岩近井壁地带的水侵规律研究。通过数学模型对该条件下的水侵过程进行模拟,得到了泥页岩近井壁地带内的含水饱和度和孔隙水(气)压力分布,并依据含水饱和度计算出水侵距离,对水侵范围进行了预测。同时,运用西南石油大学国家重点实验室欠平衡钻井自主研发的欠平衡钻井多功能评价仪,对地层温度、压力进行模拟,展开了对气体钻井转水基钻井条件下泥页岩的水侵规律实验研究,得到了岩心中的水侵范围,并与理论预测的水侵范围进行了对比验证,结果表明数学模型能很好地预测气体钻井转水基钻井条件下泥页岩近井壁地带内的水侵范围。

**关键词:**泥页岩;水气两相渗流;气体钻井;水侵范围

中图分类号:TE252

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2011)05-0123-04

气体钻井是20世纪50年代始于美国的一项钻井技术,在低渗油气田的开发、克服井漏、钻井提速、煤层气开发、井下作业等诸多领域得到了较广泛的应用。气体钻井采用气体代替钻井液作为循环介质,由于气体密度低,在井筒中形成的气柱压力小,在气体钻井过程中,由于井筒压力小于地层压力,在泥页岩地层近井壁地带内会形成一个泄压带,其压力接近于井筒压力,当气体钻井钻遇复杂情况需转换成水基钻井时,钻井滤液将在正压差和毛管力作用下侵入泥页岩地层,形成气水两相分布地带。

目前,关于砂岩的水侵规律研究较多,以泥页岩为研究对象的水侵规律研究也在水基钻井条件下进行<sup>[1-6]</sup>,未见有针对气体钻井转水基钻井条件下的水侵规律研究,为此,笔者将从数学模型和实验模拟两个方面,展开针对气体钻井转水基钻井条件下,泥页岩近井壁泄压带内的水侵规律研究。在暂不考虑泥页岩水化条件下,对钻井液滤液的水侵范围进行预测,这对预测井壁坍塌范围具有重要意义。

## 1 井周径向水侵数学模型及计算结果分析

### 1.1 井周径向水侵数学模型假设

(1)将泥页岩地层视为单一均质孔隙介质,泥页岩地层主要含气,地层水只以束缚水形式存在且不参与流动;(2)整个水侵过程发生在泥页岩近井壁泄

压带内<sup>[7]</sup>;(3)驱替为非活塞式驱替,流体流动符合达西定律;(4)不考虑水和泥页岩的压缩性,气体视为理想气体,泥页岩地层温度恒定不变;(5)在水侵过程中暂不考虑水与泥页岩的水化作用;(6)钻井液滤液视为纯水;(7)两相之间没有传质,流体黏度为常数。

### 1.2 井周径向水侵数学模型

钻井液滤液在压差和毛管力作用下,沿着井壁径向侵入泥页岩地层,泥页岩地层孔隙水压力( $p_w$ )、孔隙气压力( $p_g$ )及毛管力( $p_c$ )的关系满足:

$$p_w + p_c = p_g \quad (1)$$

泥页岩中的孔隙被水和气体完全充满,即有:

$$S_w + S_g = 1 \quad (2)$$

式中: $S_w$ 、 $S_g$ 分别为含水饱和度、含气饱和度(小数)。

基于达西定律描述气水两相渗流的运动方程<sup>[8-9]</sup>为:

$$\begin{cases} \bar{v}_w = -\frac{KK_{rw}(S_w)}{\mu_w} \text{grad} p_w \\ \bar{v}_g = -\frac{KK_{rg}(S_w)}{\mu_g} \text{grad} p_g \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\bar{v}_w$ 、 $\bar{v}_g$ 分别为水相和气相的渗流速度(m/s); $K$ 为泥页岩地层绝对渗透率( $\text{m}^2$ ); $K_{rw}(S_w)$ 、 $K_{rg}(S_w)$ 分别为水和气相对渗透率(小数); $\mu_w$ 、 $\mu_g$ 分别为水和气的黏度( $\text{MPa} \cdot \text{s}$ ); $\text{grad}(x)$ 为梯度。

若气体视为理想气体,则气体状态方程为:

收稿日期:2011-01-05

编辑:刘江霞

基金项目:国家高技术研究计划(863计划)项目“气体钻井技术与装备”(2006AA06a103)

作者简介:周玉良(1981—),男,现正攻读钻井工程专业博士学位,主要从事井壁稳定性方面的研究。E-mail:124817078@qq.com

$$\rho_g = \frac{p_g M}{RT} \quad (4)$$

式中:  $\rho_g$  为气相密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $M$  为摩尔质量 ( $\text{g}/\text{mol}$ );  $R$  为气体常数 [ $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ];  $T$  为温度 ( $\text{K}$ )。

连续方程:

$$\varphi \cdot \frac{\partial (S_l \rho_l)}{\partial t} + \text{div}(\rho_l \bar{v}_l) = 0, (l \text{ 为水和气两相}) \quad (5)$$

式中:  $\varphi$  为孔隙度 (小数);  $\text{div}(x)$  为散度;  $t$  为时间 ( $\text{s}$ )。

将式 (3)、(4) 代入 (5) 中得到在柱坐标系下气水两相渗流基本方程为:

$$\begin{cases} \varphi \frac{\partial S_w}{\partial t} = \frac{K}{\mu_w} \left\{ K_{rw}(S_w) \left[ \frac{\partial^2 p_w}{\partial r^2} + \frac{\partial p_w}{\partial r} \frac{1}{r} \right] + \frac{\partial p_w}{\partial r} \cdot \left[ \frac{\partial K_{rw}(S_w)}{\partial r} + \frac{1}{r} K_{rw}(S_w) \right] \right\} \\ \varphi \left( p_g \frac{\partial S_g}{\partial t} + S_g \frac{\partial p_g}{\partial t} \right) = \frac{K}{\mu_g} \left\{ K_{rg}(S_w) \frac{\partial p_g}{\partial r} \left( \frac{\partial p_g}{\partial r} + \frac{1}{r} p_g \right) + p_g \frac{\partial p_g}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} K_{rg}(S_w) + \frac{\partial K_{rg}(S_w)}{\partial r} \right] + p_g K_{rg}(S_w) \left( \frac{1}{r} \frac{\partial p_g}{\partial r} + \frac{\partial^2 p_g}{\partial r^2} \right) \right\} \\ p_w + p_c = p_g \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $r$  为距离井筒中心的径向距离 ( $\text{m}$ )。

其中, 毛管力与含水饱和度的关系如式 (7)<sup>[10]</sup>:

$$p_c = p_e \cdot \left( 1 - \frac{S_w - S_{wi}}{S_m - S_{wi} - S_{gr}} \right)^3 \quad (7)$$

式中:  $S_m$  为最大含水饱和度 (小数);  $S_{wi}$  为初始含水饱和度 (小数);  $S_{gr}$  为残余气饱和度 (小数);  $p_e$  为临界毛管力 ( $\text{MPa}$ )。

对于水的相对渗透率采用 Purcell 模型, 对于气的相对渗透率, 采用 Brooks-Corey 模型<sup>[11-13]</sup>, 具体如下:

$$K_{rw} = (S_w^*)^{\frac{2+\gamma}{\gamma}}$$

$$K_{rg} = (1 - S_w^*)^2 \cdot [1 - (S_w^*)^{\frac{2+\gamma}{\gamma}}]$$

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{gr}} \quad (8)$$

式中:  $S_w^*$  为水的有效饱和度 (小数);  $\gamma$  为孔径分布指数。

气体钻井转水基钻井条件下的初始条件、边界条件如下:

$$\begin{cases} \text{初始条件} \begin{cases} S_w|_{t=0} = S_{wi} \\ S_g|_{t=0} = 1 - S_{wi} \\ p_w|_{t=0} = p_0 - p_c(S_{wi}) \\ p_g|_{t=0} = p_0 \end{cases} \\ \text{边界条件} \begin{cases} S_w|_{t>0, r=r_w} = S_m \\ S_g|_{t>0, r=r_w} = 1 - S_m \\ p_w|_{t>0, r=r_w} = p_{well} \\ p_g|_{t>0, r=r_w} = p_w + p_c(S_m) \end{cases} \end{cases}$$

式中:  $p_{well}$  为井眼液柱压力 ( $\text{MPa}$ );  $p_0$  为泥页岩地层近井壁地带孔隙初始压力 ( $\text{MPa}$ );  $r_w$  为井眼半径。

### 1.3 实例计算及结果分析

取计算参数如下: 井眼液柱压力  $p_{well} = 9 \text{ MPa}$ ; 泥页岩地层近井壁地带内孔隙初始压力  $p_0 = 1 \text{ MPa}$ ; 泥页岩地层绝对渗透率  $K = 10^{-20} \text{ m}^2$ ; 孔隙度  $\varphi = 0.111$ ; 临界毛管力  $p_e = 5 \text{ MPa}$ ; 井眼半径  $r_w = 0.108 \text{ m}$ ; 气体黏度  $\mu_g = 10^{-11} \text{ MPa} \cdot \text{s}$ ; 温度为  $50^\circ\text{C}$  时水黏度  $\mu_w = 10^{-9} \text{ MPa} \cdot \text{s}$ ; 时间步长  $\Delta t = 100 \text{ s}$ ; 空间步长  $\Delta r = 0.03 \text{ m}$ ; 束缚水饱和度  $S_{wi} = 0.03$ ; 最大含水饱和度  $S_m = 0.72$ ; 残余气饱和度  $S_{gr} = 0$ 。

结合初始条件和边界条件, 运用差分法, 采用 MathCAD 编程并对方程组进行求解, 结果见图 1。

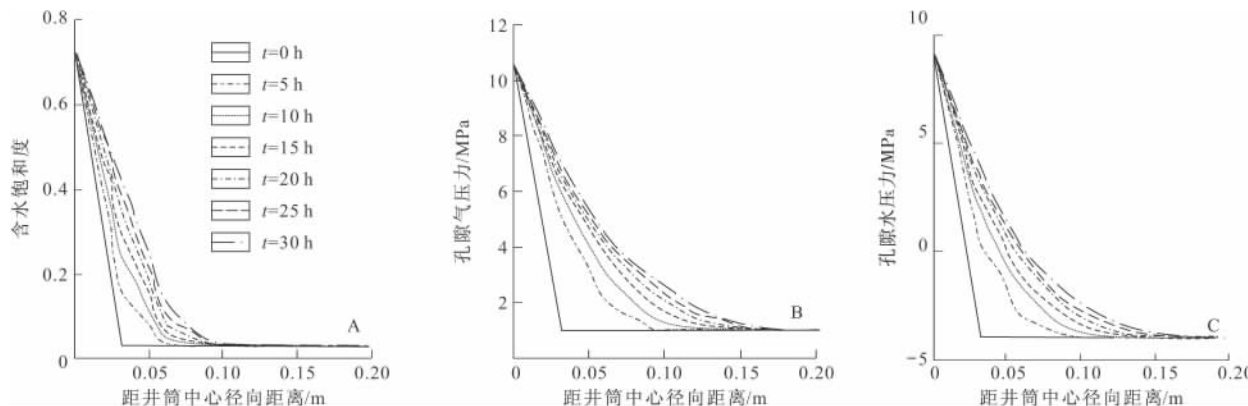


图 1 近井壁含水饱和度(A)、孔隙气压力(B)和孔隙水压力(C)分布图

Fig. 1 Distribution of water saturation(A), air pressure in pore(B) and water pressure in pore(C) near the wall of the well

由图 1 可知: ①当时间  $t$  一定时, 随着距井筒中心径向距离  $r$  的增大, 含水饱和度、孔隙气(水)压力均逐渐减小, 在一定距离之后, 含水饱和度减小至初

始含水饱和度, 孔隙气(水)压力减小至初始压力。当距井筒中心径向距离  $r$  一定时, 随着时间  $t$  的延长, 含水饱和度、孔隙气压力、孔隙水压力均逐渐增

加,在一定时间后,泥页岩吸水量趋于最大饱和度,并趋于稳定。②近井壁地带孔隙水的压力与毛管力之和等于气的压力,孔隙水的压力为负时,表明在毛管力作用下泥页岩具有潜在吸水能力。

## 2 水侵规律实验研究及其与数学模型结果的对比

依据西南石油大学 CNPC 欠平衡钻井所自主研发的 GUDMI 气体/欠平衡钻井多功能评价仪,在一定温度、围压条件下模拟气体钻井转水基钻井时泥页岩地层的水侵过程。

实验钻取蓬莱镇泥岩岩心,对岩心加温到 50℃、加围压 8 MPa,岩心一端加压 9 MPa,模拟井筒一端泥页岩井壁上的液柱压力,另一端加气压 1 MPa,模拟气体钻井转水基钻井条件下泥页岩近井壁地带内的压力。实验可得纵向分布在岩心上 3 个压力传感器测试的孔隙压力变化,然后找出 3 个位置点压力开始增大的时间,由此可编制水侵前沿—时间关系图。将计算所得的水侵前沿结果与实验设备测得结果进行对比,以验证数学模型是否可用于水侵范围预测。实验岩心参数如下:长 7 cm,直径 2.52 cm,绝对渗透率  $K = 10^{-20} \text{ m}^2$ ,孔隙度  $\varphi = 0.111$ 。

3 个压力传感器分别距模拟井壁端面:1.3,4,7 cm。由图 2 可见:

(1)由压力测试点压力开始上升的时间,即可得水侵前沿与时间关系,水侵前沿到达 3 个压力点位置 1.3,4,7 cm 的时间分别为:0.15,0.4,1.1 h。

(2)在压力传感器测试点,随着压力穿透实验的进行,压力传感器测试点的压力由开始缓慢上升,后迅速上升,最后趋于平衡,这是由于水侵前沿到达压

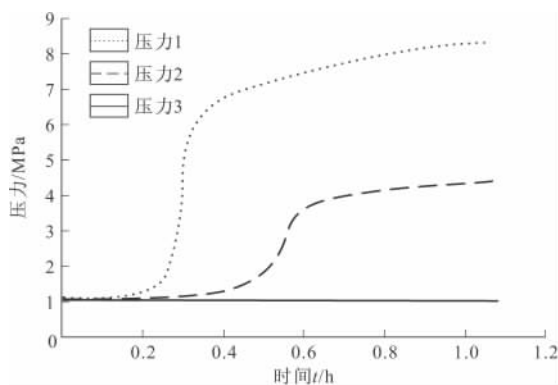


图 2 实验测得孔隙压力值

Fig. 2 Pore pressure through the experimental measurement

力测试点后逐渐充满岩石孔隙空间的过程,最后趋于饱和,压力逐渐趋于稳定。

(3)3 个压力测试点上能达到的最大压力逐渐减小,这表明压力穿过程中压力沿径向逐渐递减,近井壁端含水饱和度最高,孔隙压力也最大。

(4)泥页岩井周径向自吸侵入 5 cm 所需要的时间为 225 h<sup>[9]</sup>,压力穿透水侵入 5 cm 只需 0.6 h 左右,由此可见压力穿透水侵的速度比自吸要快得多。

由于含水饱和度推进前沿真实反映了近井壁地带压力穿透水侵前沿推进的过程,根据图 1 已算出的含水饱和度分布,可进一步计算岩心水侵前沿,即判定某一点之前含水饱和度是否大于初始含水饱和度,如果是,则水侵前沿刚好达到该位置,即可得水侵前沿与时间的关系图。

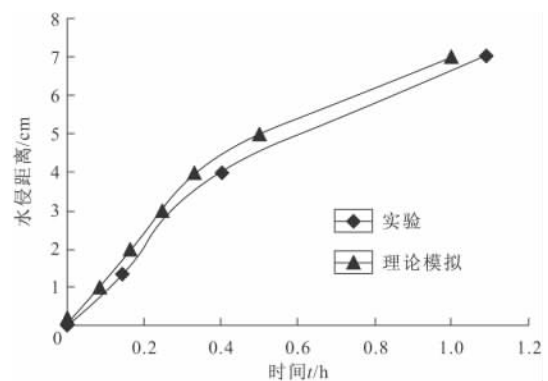


图 3 岩心水侵前沿实验与理论对比图

Fig. 3 Comparison of the computational results with the results of the experiment in quantity of water

由图 3 可知:

(1)在压力穿透初期,水侵前沿推进较快,0.4 h 内就推进了 4 cm,随后推进速度变慢,0.8 h 只推进了 3 cm。

(2)理论计算的水侵前沿结果和实验结果的趋势较为一致,在水侵初期,水侵速度均较快,水侵中后期水侵速度逐渐减慢,后均趋于水平,这是由于随着距井筒中心径向距离的增大,孔隙压力逐渐衰减到初始孔隙压力,水侵速度逐渐减缓。

(3)由于计算得到的含水饱和度、孔隙压力的分布彼此具有相关性,只需验证其中一组计算结果就可以验证模型的合理性,由图 3 可见,由含水饱和度推导的水侵前沿与实验室实测的水侵前沿结果较为一致,由此可见气水二相渗流理论可以用来预测气体钻井转水基钻井条件下泥页岩近井壁地带的水侵范围。

### 3 结 论

(1)运用气水两相渗流理论,能够对气体钻井转水基钻井条件下泥页岩近井壁地带的水侵规律进行模拟,由此可得到泥页岩近井壁地带中地层孔隙压力、含水饱和度分布,并可得到水侵前沿推进距离与时间的关系,预测水在泥页岩地层中的推进情况,从而估计水侵范围。

(2)在泥页岩近井壁地带内水侵过程中,随着距井筒中心径向距离的增大,压力逐渐减小,水侵速度逐渐减缓,水侵前沿推进也表现出初期最快,以后逐渐减慢的特点。

(3)在正压差和毛管力作用下的水侵速度要比泥页岩自吸快得多,在相同时间内,其水侵范围也要大得多。

#### 参考文献:

- [1] Li L, Horne R N. Effect of initial water saturation on spontaneous water imbibitions[J]. SPE, 2002, 76727.
- [2] Li K, Horne R N. An analytical scaling method for spontaneous imbibition in gas/water/rock systems[J]. SPE, 2004, 88996.
- [3] Zhou K, Zhang W, Li Y, et al. Prediction of recovery by spontaneous imbibition in gas/liquid/rock systems[J]. SPE, 2008, 107355.
- [4] Li K. Determination of capillary pressure and relative permeability from spontaneous imbibition data in gas-liquid-rock[J]. SPE, 2006, 99893.
- [5] 熊俊, 刘建, 刘建军, 等. 基于 Buckley-Leverett 方程的水气两相渗流理论[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(2): 213-215.
- [6] 涂运中, 宁伏龙, 蒋国盛, 等. 钻井液侵入含天然气水合物地层的机理与特征分析[J]. 地质科技情报, 2010, 29(3): 110-113.
- [7] 孟英峰. 泥页岩水化反应的系统仿真技术及其在油气田开发领域中的应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2002.
- [8] 葛家理, 宁正福, 刘月田, 等. 现在油藏渗流力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [9] 周玉良. 气体钻井条件泥页岩水侵规律研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2009.
- [10] 周玉良, 孟英峰, 李皋, 等. 气体钻井条件下泥页岩自发吸水规律研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(6): 31-34.
- [11] Li K. Theoretical development of the brooks-capillary pressure model from fractal modeling of porous media[J]. SPE, 2004, 89429.
- [12] Li K. Experimental verification of methods to calculate relative permeability using capillary pressure data[J]. SPE, 2002, 76757.
- [13] Proett M A, Chin W, Wu Jianghui, et al. Sample quality prediction with integrated oil and water-based mud invasion modeling[J]. SPE, 2002, 77964.

## Law of Water Invasion in the Shale Formation When the Gas Drilling is Changed to Drilling with Mud

ZHOU Yu-liang<sup>1</sup>, MENG Ying-feng<sup>1</sup>, LI Gao<sup>1</sup>, HU Li<sup>2</sup>, TANG Si-hong<sup>3</sup>, ZHAO Xiang-yang<sup>4</sup>, LIU Xiao<sup>5</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Oil and Gas Production Operation Area, Chuansong Oil and Gas Mining, Nanchong Sichuan 637100, China; 3. Gas Production Engineering Research Institute of South West Oil and Gas Field, Guanghan Sichuan 618300, China; 4. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China; 5. Oil and Gas Exploration Company, Yanchang Oilfield Corporation, Yan'an Shaanxi 716000, China)

**Abstract:** This paper studies the law of water invasion in the clay shale formation with mathematical model and simulation when gas drilling is changed to water-based drilling. The mathematical model makes it possible to obtain the distribution of water saturation and the distribution of water and gas pressure. According to the distribution of water saturation, it is possible to calculate the distance of water invasion, and predict the range of water invasion. At the same time, we have developed the experimental research with underbalanced drilling multi-function evaluation apparatus, which can simulate the temperature and pressure of the shale formation. Also we can get the range of water invasion in the core, which contrasted with the theory prediction we can find that the mathematical model can accurately predict the range of water invasion in the clay shale formation when gas drilling is changed to water-based drilling.

**Key words:** shale; water-gas two-phase flow; gas drilling; the range of water invasion