

钻井泥浆滤液侵入 储集层的理论计算模型^①

张建华^{*} 胡 启 刘振华

(西安石油学院)

提 要

利用多孔介质中两相渗流理论和岩电理论,建立了钻井泥浆滤液侵入孔隙性和渗透性地层的理论模型。利用数值计算方法可以得到水饱和度、水矿化度、水电阻率、地层电阻率等一系列物理量的径向侵入剖面分布特征,结果表明,泥浆侵入储集层后流体及地层的物性参数并非像传统的阶跃模型所描述的那样呈阶梯状突变,而是与时间有关的动态过程,沿径向呈较为复杂的分布。本文研究了侵入剖面随时间的动力学变化过程以及地层参数对侵入剖面的影响。

主题词 泥浆滤液 储集层 计算 模型

1 引 言

在使用水基泥浆钻井时,泥浆滤液在压力差的作用下将向渗透性和孔隙性地层中侵入,从而在井壁上形成一层泥浆过滤后的沉淀物(泥饼),在渗透层内部出现与原状地层所含流体性质不同的侵入带。泥浆滤液侵入地层,将改变地层物性参数和电性参数。研究钻井泥浆滤液的侵入过程,可以评价储集层段流体的移动情况,求解地层物性参数,确定地层饱和度、电阻率的分布,为测井分析技术提供计算和解释依据。

侵入过程的传统研究方法是基于一种阶跃模型^[1],该模型假设地层可动烃被泥浆滤液完全按照活塞式驱替,侵入带具有均匀的含水饱和度和电阻率。当使用淡水泥浆钻井时,在侵入前沿还出现一个低电阻率的环带,按照侵入的阶跃模型,侵入带、低电阻率环带和未侵入带之间饱和度以及电阻率的变化亦呈阶梯状跃变^[2]。然而,实际的侵入过程要复杂得多,侵入过程中饱和度、电阻率等地层参数的变化远非如阶跃模型描述的那样发生突变,而是有一个渐变的过程^[3~5]。因此,要精确研究侵入过程,传统的阶跃模型是无能为力的,必须考虑到实际侵入过程的特点。另外,钻井泥浆滤液侵入地层还是一个随时间变化的动力学过程,在研究中必须考虑到这一特点。

泥浆滤液对地层可动烃的驱替实际上是一个相渗流过程,泥浆滤液与地层共生水之间的物理混合等同于扩散过程。因此,我们利用多孔介质中的相渗流理论和扩散理论,建立了泥浆侵入地层的物理模型,再由岩电理论求出地层电性参数,利用数值计算方法对模型中的非线性

① 国家自然科学基金和中国石油天然气总公司科技发展局联合资助项目。

* 张建华,1962年10月生。1988年毕业于西北工业大学应用物理系,获硕士学位。现任西安石油学院副教授。通讯处:陕西省西安市。邮政编码:710061。

微分方程进行求解。

2 理论计算模型

2.1 油水两相渗流方程

钻井泥浆滤液(水相)在压力梯度和饱和度梯度的驱动下对地层可动烃(油相)进行驱替,考虑毛细管压力的影响,地层中岩石和流体均可压缩,忽略重力,分别以 P_o 、 P_w 、 P_c 表示油、水、毛管压力,以 S_o 、 S_w 表示地层含油、水饱和度, μ_o 、 μ_w 表示油、水的粘度, K_{ro} 、 K_{rw} 表示油、水相对渗透率, K 表示地层绝对渗透率, φ 表示地层孔隙度, q_o 、 q_w 表示油、水产量,以 r 表示地层中距井轴距离, t 表示时间,则油水两相径向不混溶驱替过程满足渗流方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{rKK_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial P_o}{\partial r} \right) + q_o = \frac{\delta(\varphi P_o S_o)}{\delta t} \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{rKK_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial P_w}{\partial r} \right) + q_w = \frac{\delta(\varphi P_w S_w)}{\delta t} \quad (2)$$

$$P_c = P_o - P_w \quad (3)$$

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

用半隐式联立求解方法构造(1)~(4)式的有限差分方程,引入记号 $P_{o,i}^n = P_o(r_i, t_n)$ 和 $S_{w,i}^n = S_w(r_i, t_n)$,则在标准网格排列下所形成的线性代数方程组具有如下形式:

$$a_{o,i}^n P_{o,i-1}^{n+1} + b_{o,i}^n P_{o,i}^{n+1} + c_{o,i}^n P_{o,i+1}^{n+1} + d_{o,i}^n S_{w,i-1}^{n+1} + e_{o,i}^n S_{w,i}^{n+1} + f_{o,i}^n S_{w,i+1}^{n+1} = g_{o,i}^n \quad (5)$$

$$a_{w,i}^n P_{o,i-1}^{n+1} + b_{w,i}^n P_{o,i}^{n+1} + c_{w,i}^n P_{o,i+1}^{n+1} + d_{w,i}^n S_{w,i-1}^{n+1} + e_{w,i}^n S_{w,i}^{n+1} + f_{w,i}^n S_{w,i+1}^{n+1} = g_{w,i}^n \quad (6)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, M; n = 1, 2, 3, \dots, N)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 均为与上一个时刻(n 时刻)有关的常数项, M 、 N 分别表示径向和时间轴的节点数目。结合边界条件:

$$P_1^n = P_{wf} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (\text{井底定流动压力})$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (\text{封闭外边界})$$

在给定初值后,求解方程(5)、(6),可得到($n+1$)时刻径向各节点的压力和饱和度。

2.2 不同矿化度水的扩散方程

钻井泥浆滤液矿化度 C_{mf} 一般和地层共生水的矿化度不同,它们之间的物理混合满足扩散方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{rKK_{rw}C_w}{\mu_w} \frac{\partial P_w}{\partial r} \right) + q_w C_{wf} = \frac{\delta(\varphi P_w S_w C_w)}{\delta t} \quad (7)$$

这里 C_w 表示水的矿化度,上式的有限差分格式为

$$a_i^n C_{w,i-1}^{n+1} + b_i^n C_{w,i}^{n+1} + c_i^n C_{w,i+1}^{n+1} = d_i^n \quad (i = 1, 2, 3, \dots, M) \quad (8)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 均为与上一个时刻有关的常数项。结合初边值条件,由(5)、(6)式求出水相压力和饱和度后,代入(8)式可得到各节点的地层水矿化度。

2.3 地层电性参数的计算

地层水的电阻率 R_w 与矿化度 C_w 和地层温度 T 有关,在有限差分网格的第 i 个节点,有

$$R_{wi} = \left[0.0123 + \frac{3647.5}{C_w^{0.955}} \right] \times \frac{82}{(T + 7)} \quad (9)$$

第 i 个节点的地层电阻率 R_{fi} 满足 Archie 公式

$$R_{fi} = \frac{a R_{wi}}{S_{wi}^n \phi^m} \quad (10)$$

式中 a 为常数; n 为饱和度指数; m 为胶结指数。

3 结果分析

在进行数值计算时,用第一个网格表示井眼,第二个网格表示泥饼,每一个网格的渗透率、粘度、压缩系数等参数均可以随时间变化。径向网格步长和时间步长均采用不等距划分,以避免数值弥散现象。计算所需的基本输入参数包括原始储集层压力 P 、井眼压力 P_w 、原始水饱和度 S_w 、地层水矿化度 C_w 、泥浆滤液矿化度 C_{mf} 、储集层温度 T 、地层孔隙度 ϕ 、渗透率 K 、泥浆密度 ρ_{mf} 以及 K_{ro} 、 $K_{rw} \sim S_w$ 和 $P_c \sim S_w$ 关系等。利用我们的计算模型,可以得到在泥浆侵入过程中,地层油水两相的相对渗透率、粘度、压缩系数、压力、饱和度以及毛细管压力、地层水矿化度、地层水电阻率、地层电阻率等一系列参数的径向分布。

3.1 侵入剖面的特征

图 1 至图 3 给出我们的计算结果,计算中取 $P=23.2\text{MPa}$, $P_w=38.8\text{MPa}$, $S_w=42\%$, $T=110\text{C}$, $\phi=0.20$, $K=4.935 \times 10^{-13}\text{m}^2$, $\rho_{mf}=1.2\text{g/cm}^3$; 图 1 至图 3 中 $C_w=12000\text{ppm}$, $C_{mf}=3000\text{ppm}$; 图 4 中 $C_w=4000\text{ppm}$, $C_{mf}=20000\text{ppm}$ 。

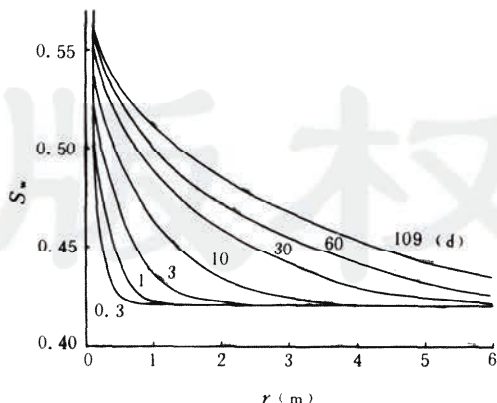


图 1 不同时间水饱和度 S_w 径向分布
Fig.1 Radial distribution of water saturation S_w for various time

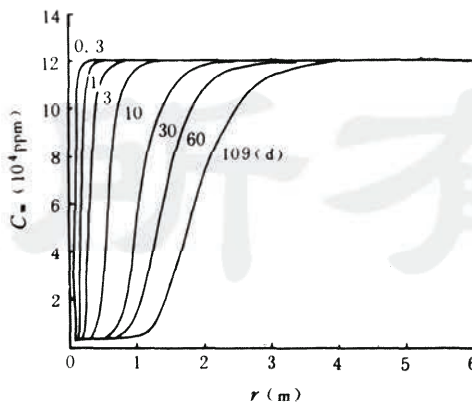


图 2 不同时间水矿化度 C_w 径向分布
Fig.2 Radial distribution of water salinity C_w for various time

计算结果表明,钻井泥浆滤液侵入地层后,井眼至原状地层之间的流体物性参数以及电性参数不是均匀的沿径向分布,也不是像阶跃模型所描述的那样在井眼、侵入带和原状地层之间发生跃变,而是有一个渐变的过程,在侵入带和原状地层之间并没有一个明显的界限。随着时间的推移,侵入不断深入,以上诸参量的径向分布也随之变化,图1至图4只给出了 S_w 、 C_w 、 R_f 径向分布随时间的变化。

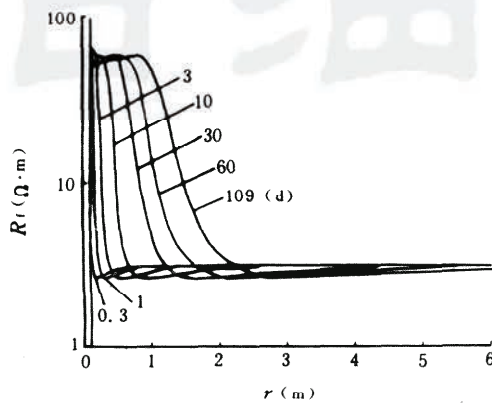


图3 不同时间地层电阻率 R_f 径向分布($C_{mf} < C_w$)

Fig. 3 Radial distribution of formation resistivity R_f for various time ($C_{mf} < C_w$)

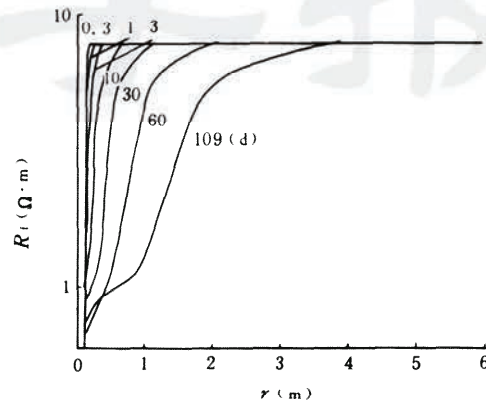


图4 不同时间地层电阻率 R_f 径向分布($C_{mf} > C_w$)

Fig. 4 Radial distribution of formation resistivity R_f for various time ($C_{mf} > C_w$)

在使用淡水泥浆钻井时,井眼附近泥浆滤液的水饱和度大于地层水饱和度,而泥浆滤液的矿化度却远远低于地层原生水矿化度,所以矿化度变化要比饱和度变化大。在混合驱动下,由于泥浆滤液侵入前沿地层水的运移,侵入前沿出现一个高饱和度和高矿化度的区域,由(9)和(10)式知,该区域具有较低的电阻率,导致了侵入前沿出现一个低电阻率的环带,可以把该环带作为侵入带和未侵入带之间的界限,并由环带的推进速度判断泥浆滤液侵入地层的速度,如图1至图3所示。图3的电阻率径向分布中,井眼附近的高电阻率尖峰是由高饱和度的泥浆滤液形成的,随着侵入的不断进行,该尖峰很快消失。

当钻井泥浆滤液的矿化度 C_{mf} 高于地层原生水矿化度 C_w 时,由于此时水饱和度梯度和矿化度梯度的方向相同,都是逆着径向方向,这时井眼附近不再出现图3所示的低电阻率尖峰,侵入前沿也不再出现低电阻率环带,从井眼到地层的电阻率呈渐变的特点,如图4所示。

3.2 地层参数对侵入剖面的影响

图5给出侵入时间 $t=1.8d$ 时地层渗透率 K 对地层电阻率径向分布剖面的影响,在其它参数(同图1至图3所用输入参数)不变的条件下,储集层流体的流动性随 K 的增加而增强,即地层渗透率 K 的大小控制了侵入前沿的推进速度。在侵入带中,由于泥浆滤液从井眼的快速渗透,使含水饱和度随 K 的增加而降低。另外, K 增加使得侵入前沿的推进速度也相应增加,这从图5中的低电阻率环带位置可看出这一点,但是, K 值越大,该低电阻率环带也越不明显,随着 K 的增加,低电阻率环带将逐渐消失,如图5所示。这说明在高渗透率地层,当淡水钻井泥浆滤液侵入储集层时,侵入前沿将不再存在低电阻率环带,这和Campbell等的实际结

果相符合^[4]。

图6给出地层孔隙度变化对地层电阻率径向分布剖面的影响。随着孔隙度 φ 的增加,在相同的侵入时间内,泥浆滤液的侵入深度减小,这是由于孔隙度增加意味着填充孔隙的体积增加,在驱替过程中需要较多的泥浆滤液替换原来孔隙中的油或水,使泥浆的侵入速率减小,这从图6的 $R_r \sim r$ 分布曲线上可以明显的看出这一规律。

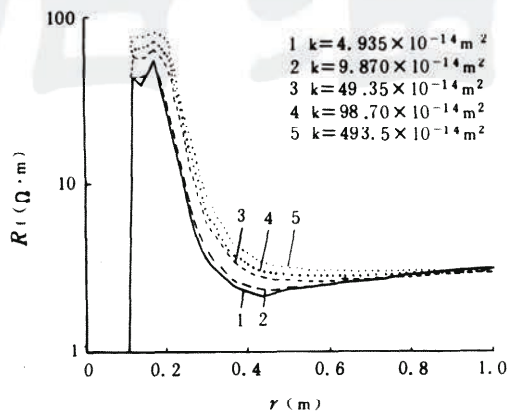


图5 渗透率 K 对地层电阻率剖面的影响

Fig. 5 Effect of permeability on the formation resistivity profiles

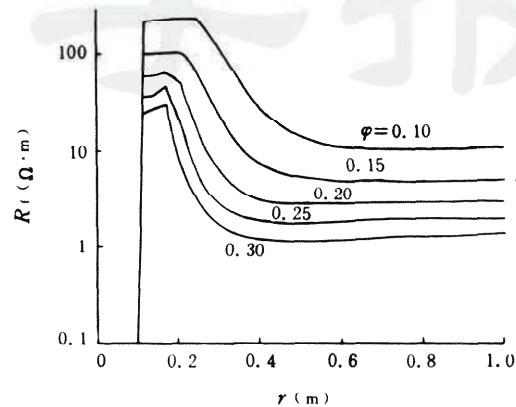


图6 孔隙度 φ 对地层电阻率剖面的影响

Fig. 6 Effect of porosity on the formation resistivity profiles

其它的地层参数诸如储集层原始水饱和度、泥饼渗透率、井眼和储集层间压力差等等都会影响侵入过程。通过对侵入过程的研究,可以评价储集层段流体的移动情况,正确识别油水层,还可以根据现场数据反演地层物性参数,为钻井、测井提供侵入特征的定量化描述。另外,侵入过程中地层电阻率的动态变化特性还将直接影响到电阻率测井的结果^[7]。

4 结 论

1. 钻井泥浆滤液侵入储集层并不像传统的阶跃模型所描述的那样按活塞式移动,地层水饱和度、水矿化度、水电阻率、地层电阻率等一系列储集层参数的径向分布并非呈阶梯状突变,而是和时间有关的动态侵入剖面。利用本文的理论模型及数值方法可以得到以上诸物理量的径向侵入剖面的特征分布。

2. 使用淡水泥浆钻井时,在侵入前沿出现一个具有高含水饱和度、高矿化度和低电阻率的环带,随着时间的推移,侵入不断推进,该环带也缓缓渗移远离井眼,并逐渐消失。从环带随时间的位移可以推断泥浆滤液的侵入速率,它随钻井时间的增加而下降。

3. 当钻井泥浆滤液矿化度高于地层原生水矿化度时,由于水饱和度梯度方向和水矿化度梯度方向相同,在地层电阻率径向分布曲线上不出现低电阻率环带。

4. 在其它参数不变时,地层渗透率增加将使泥浆滤液侵入速度增加。用淡水泥浆滤液钻井时,在地层电阻率剖面上出现的低电阻率环带将随着渗透率的增加而逐渐消失。相反,地层孔隙度增加将使泥浆滤液侵入速度下降,与其它参数相比,孔隙度对地层电阻率分布有较大影

响。

5. 钻井泥浆滤液的侵入过程还受储集层物性参数、井眼与地层之间压力差、泥饼性质等因素控制,通过定量研究侵入过程的特性,可以评价储集层段流体运移情况、反演地层物性参数,为油藏描述和测井解释提供理论依据。

致谢 塔里木石油勘探开发指挥部欧阳健和林纯增高级工程师向作者提出了研究侵入问题的建议并进行了有益的讨论,对此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Schlumberger log interpretation, Vol. I. Schlumberger Limited, New York, 1972.
- [2] Dresser Atlas Inc. Well logging and interpretation techniques Dresser Industries, USA, 1982.
- [3] Russell R G, Morgan F and Muskat M. Some experiments on mobility of interstitial water. Trans. AIME. 1947.
- [4] Campbell W M and Martin J L. Displacement logging—A new exploratory tool. Trans AIME 1955.
- [5] Dumanoir J L, Tixier M P and Martin M. Interpretation of the induction-electrical log in fresh mud. Trans. AIME, 1957.
- [6] Economides and Nolte K G. Reservoir stimulation, Schlumberger Educational Services, New York, 1987.
- [7] Tobola D P and Holditch S A. Determination of reservoir permeability from repeated induction logging. SPE Formation Evaluation, March 1991.

(本文收到日期 1993-01-20)

(修改稿收到日期 1993-11-23)

(编辑 杨 茁)

A THEORETICAL MODEL FOR MUD-FILTRATE INVASION IN RESERVOIR FORMATIONS DURING DRILLING

Zhang Jianhua Hu Qi Liu Zhenhua

(Xian Petroleum Institute)

Abstract

A theoretical model for mud-filtrate invasion in a porous and permeable formation during drilling is suggested through the application of the theory of fluid flow through porous media and rock physics. A series of radial distribution of parameters around the borehole, such as water saturation, water salinity, water resistivity, formation resistivity and so on, will be obtained with a numerical method. These distributions are not in a perfectly piston-like shapes described by the "step profile" model, rather that they vary with the invasion time and show complex behaviors. In the present work, both the dynamic process of the invasion varying with time and the effect of the formation parameters on their distributions are studied.

Key words mud-filtrate reservoir computation model