

doi:10.3799/dqkx.2010.082

泥浆侵入二维数值模拟

常文会^{1,2}, 潘和平^{1*}, 周峰¹

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中石化华北石油局测井公司, 河南新乡 453700

摘要: 石油钻井中由于井底压力略大于地层压力, 使得钻井泥浆侵入到原始地层中, 改变地层的电阻率, 影响了电阻率测井的准确性。以油水两相流的渗流方程、对流扩散方程和阿尔奇公式为理论模型, 采用有限差分方法对泥浆侵入过程进行二维数值离散, 针对麻黄山西探区储层实际情况输入模型中有关参数, 分别对侵入时间 24 h 和 48 h, 解得给定侵入时刻储层的压力、含水饱和度、地层水矿化度和电阻率在垂向和径向的分布, 计算结果与实际情况相符, 可用其对实际电阻率测井值进行校正。通过一个低侵算例验证, 结果与理论分析相符合, 因此该方法可以用于垂向上非均匀储层的泥浆侵入计算。

关键词: 两相流; 水基泥浆; 有限差分; 测井。

中图分类号: P631.8

文章编号: 1000-2383(2010)04-0674-07

收稿日期: 2009-11-26

Two-Dimensional Numerical Simulation of Mud Invasion

CHANG Wen-hui^{1,2}, PAN He-ping^{1*}, ZHOU Feng¹

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Digital Well Logging Station, North China Petroleum Bureau, Xinxiang 453700, China

Abstract: Due to the pressure difference between borehole and reservoirs, drilling mud invades the original reservoirs while drilling for petroleum, changing the formation resistivity, which has a negative effect on resistivity logging. Based on the theoretical model of two-phase flow equation, convection-diffusion equation and Archie formula, finite difference method is adopted to discretize mud invasion models in the way of two dimensions. Parameters of the reservoir in Mahuangshan area, Ordos basin, north-central China, with the mud invasion time of 24, 48 hours respectively are input for the model, and the vertical and radial distributions of pressure, water saturation, salinity and formation resistivity in the designated time are worked out. The computing results are consistent with fact instance, and can be used for correcting resistivity logging values for mud invasion reservoirs. A case of low invasion is computed and the results prove to conform to the theoretical analysis. This method can be used in mud invasion of vertical inhomogeneous medium.

Key words: two-phase flow; water-base mud; finite difference method; well logging.

地层岩石可以通过其中包含的束缚水传导电流, 当水的含量与其矿化度变化时, 岩石的导电性就随之发生变化。含油地层中含有绝缘液体(如油或气及其混合物), 因此具有较高的电阻率。地层中油气和束缚水等含量不同, 使得储层总的电阻率不同。基于此, Schlumberger *et al.* (1934) 提出将此特性应用在石油测井中, 以判断地层是否为含油气储层并确定储层中的油气含量, 即电阻率测井。在现场钻井时, 泥浆滤液会在压力差的作用下侵入到渗透性地

层, 使得油水的含量和地层水矿化度发生改变, 从而改变岩石的总电阻率, 使得在电阻率测井中测量的电阻率值偏离原始地层电阻率。

针对泥浆侵入地层电阻率的校正, 国外各测井公司主要是通过编制各种测井仪器及资料的校正图版来完成, 但是精度不够, 结果单一, 效率低。谭廷栋(1979)曾经对盐水泥浆的起因、侵入性质、测井特征及其评价都做了详细分析, 并对改进我国盐水泥浆测井提出了相关建议; 刘振华等(1996)对时间推移

双侧向测井的特征和响应规律进行了研究,为现场的时间推移测井解释提供了定量的分析方法;孙建孟等(2003)利用时间推移电阻率测井求地层原始含水饱和度,结果表明该方法可以提高测井解释精度;俄克拉荷马大学的 Donaldson and Chernoglazov (1987)最早进行了时间推移的泥浆侵入电阻率剖面模型的数值模拟;张建华等(1994)利用渗流方程和对流扩散方程对泥浆高侵情况进行了有限差分的一维数值模拟;Goode and Thambynayagam (1996)、Kuchuk and Onur(2003)、Dubost *et al.* (2004)对水基泥浆进行数值模拟的研究;Wu *et al.* (2002)模拟了单组分油基泥浆侵入情况下渗透率和毛细压力等值;马明学和鞠斌山(2004)对水基泥浆侵入过程中泥浆微粒对电阻率的影响进行了数值模拟,得出更精确的地层电阻率。

本研究采用有限差分方法,对水基泥浆滤液侵入下的地层参数模型进行二维数值模拟,进而求出不同时刻、不同深度的压力、含水饱和度、矿化度及地层电阻率的值,从而可以对实际测井进行校正。

1 泥浆侵入数学模型

随着泥浆滤液中的水侵入地层,地层中的油被驱离并孔,孔隙中的油水比例和水中的矿物质浓度随着离并孔的距离而发生径向的改变,这一过程可以通过各相的含水饱和度和矿化度值来量化。

假设地层中只有水相和油相,可以用两相流的流动方程(渗流方程)来描述油水相的压力和含水饱和度随时间的变化过程:

$$\nabla \cdot \left[\frac{\rho_w k k_{rw}}{\mu_w} (\nabla P_w - \rho_w \vec{g} \nabla D) \right] = \frac{\partial(\phi \rho_w S_w)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \left[\frac{\rho_o k k_{ro}}{\mu_o} (\nabla P_o - \rho_o \vec{g} \nabla D) \right] = \frac{\partial(\phi \rho_o S_o)}{\partial t}, \quad (2)$$

其中: ρ_w 和 ρ_o 分别为水和油的密度; k 为地层渗透率; k_{rw} 和 k_{ro} 分别为水和油的相对渗透率; μ_w 和 μ_o 分别为水和油的粘度; P_w 和 P_o 分别为水和油的压力; \vec{g} 为重力加速度; D 为垂直高度差; ϕ 为孔隙度; S_w 和 S_o 分别为含水饱和度和含油饱和度; t 为侵入时间。

对于两相流,公式(1)、(2)有如下控制方程:

$$S_w + S_o = 1, \quad (3)$$

$$P_c(S_w) = P_o - P_w, \quad (4)$$

其中: P_c 为油水之间的毛细压力,它是一个与含水饱和度有关的非线性函数。

一般情况下泥浆滤液和地层水含盐分的浓度是

不同的,当泥浆滤液渗入地层时,2种不同浓度的水发生了盐分的混溶,使得水的矿化度(盐分浓度)沿远离并孔的方向变化,这称为盐分的对流扩散,有如下公式表述混合后水的矿化度值,根据 Lake(1989)和 Dresser Atlas Inc. (1982)得到流体的对流扩散方程:

$$\nabla \cdot \left[\frac{\rho_w k k_{rw} C_w}{\mu_w} (\nabla P_w - \rho_w \vec{g} \nabla D) \right] +$$

$$\nabla \cdot (\rho_w \phi S_w K_D \nabla C_w) = \frac{\partial(\phi \rho_w S_w C_w)}{\partial t}, \quad (5)$$

其中: C_w 为矿化度; K_D 为弥散张量,反映了分子扩散对流体成分浓度的影响。

根据 Navarro(2007)分析扩散项对泥浆侵入电阻率影响的计算结果看,在泥浆侵入计算中,忽略扩散项对计算结果影响不大,因此在实际计算中,为了简化计算,本研究忽略分子扩散的影响,采用对流占优方程:

$$\nabla \cdot \left[\frac{\rho_w k k_{rw} C_w}{\mu_w} (\nabla P_w - \rho_w \vec{g} \nabla D) \right] = \frac{\partial(\phi \rho_w S_w C_w)}{\partial t}. \quad (6)$$

根据(1)、(2)、(4)求出地层中不同时刻距离并各个距离的含水饱和度和水的矿化度,由 Dresser Atlas Inc. (1982)得到地层水电阻率和地层总的电阻率:

$$R_w = \left(0.0123 + \frac{3647.5}{C_w^{0.955}} \right) \cdot \frac{82}{1.8T + 39}, \quad (7)$$

$$R_f = \frac{a R_w}{S_w^n \phi^m}, \quad (8)$$

其中: R_w 为地层水的电阻率; T 为地层温度; R_f 为地层电阻率; a 为比例常数; m 为胶结指数; n 为饱和度指数,其他参数与前面定义的相同。由公式(1)~(4)可以求出压力和含水饱和度的值,代入(6)得到矿化度值,最后代入(7)和(8)得到地层电阻率值。

2 数值模拟过程

本研究不考虑井斜的影响,采用有限差分对上述偏微分方程进行二维离散。由于研究区域在平面部分限于井壁周围数米范围,且围绕井轴呈对称的变化,研究考虑垂向的变化,故采用 $r-z$ 坐标进行离散化,即垂向上均匀离散,径向上非均匀离散。由于方程的系数随侵入时间和距离发生非线性变化,采用隐式压力显示饱和度的方法可以进行快速有效的近似计算(韩大匡等,1993)。

将公式(1)~(4)进行整理,消去油水饱和度和油压力项,得到离散后的隐式水压力方程为:

$$a_{i,j}P_{wi,j-1} + b_{i,j}P_{wi-1,j} + c_{i,j}P_{wi,j} + d_{i,j}P_{wi+1,j} + e_{i,j}P_{wi,j+1} = f_{i,j}, \quad (9)$$

其中: $a_{i,j} =$

$$\frac{1}{\Delta z^2} [\lambda_{wi,j-\frac{1}{2}} (\beta_{oi,j} P_{cpi,j} - \phi_{i,j} \rho_{oi,j}) - \lambda_{oi,j-\frac{1}{2}} \phi_{i,j} \rho_{wi,j}],$$

$$b_{i,j} =$$

$$\frac{1}{r_i^2 \Delta x^2} [\lambda_{wi-\frac{1}{2},j} (\beta_{oi,j} P_{cpi,j} - \phi_{i,j} \rho_{oi,j}) - \lambda_{oi-\frac{1}{2},j} \phi_{i,j} \rho_{wi,j}],$$

$$c_{i,j} =$$

$$\frac{1}{r_i^2 \Delta x^2} [\lambda_{wi+\frac{1}{2},j} (\beta_{oi,j} P_{cpi,j} - \phi_{i,j} \rho_{oi,j}) - \lambda_{oi+\frac{1}{2},j} \phi_{i,j} \rho_{wi,j}] +$$

$$\lambda_{wi-\frac{1}{2},j} (\beta_{oi,j} P_{cpi,j} - \phi_{i,j} \rho_{oi,j}) - \lambda_{oi-\frac{1}{2},j} \phi_{i,j} \rho_{wi,j} \cdot$$

$$\frac{1}{\Delta z^2} [\lambda_{wi,j+\frac{1}{2}} (\beta_{oi,j} P_{cpi,j} - \phi_{i,j} \rho_{oi,j}) - \lambda_{oi,j+\frac{1}{2}} \phi_{i,j} \rho_{wi,j}] +$$

$$\lambda_{wi,j-\frac{1}{2}} (\beta_{oi,j} P_{cpi,j} - \phi_{i,j} \rho_{oi,j}) - \lambda_{oi,j-\frac{1}{2}} \phi_{i,j} \rho_{wi,j} \cdot$$

$$\frac{1}{\Delta z} [(\beta_{oi,j} P_{cpi,j} - \phi_{i,j} \rho_{oi,j}) \beta_{wi,j} - \phi_{i,j} \rho_{wi,j} \beta_{oi,j}],$$

$$d_{i,j} =$$

$$\frac{1}{r_i^2 \Delta x^2} [\lambda_{wi+\frac{1}{2},j} (\beta_{oi,j} P_{cpi,j} - \phi_{i,j} \rho_{oi,j}) - \lambda_{oi+\frac{1}{2},j} \phi_{i,j} \rho_{wi,j}],$$

$$e_{i,j} =$$

$$\frac{1}{\Delta z^2} [\lambda_{wi,j+\frac{1}{2}} (\beta_{oi,j} P_{cpi,j} - \phi_{i,j} \rho_{oi,j}) - \lambda_{oi,j+\frac{1}{2}} \phi_{i,j} \rho_{wi,j}],$$

$$f_{i,j} =$$

$$- \frac{P_{wi,j}}{\Delta t} [(\beta_{oi,j} P_{cpi,j} - \phi_{i,j} \rho_{oi,j}) \beta_{wi,j} - \phi_{i,j} \rho_{wi,j} \beta_{oi,j}] +$$

$$(\beta_{oi,j} P_{cpi,j} - \phi_{i,j} \rho_{oi,j}) \frac{1}{\Delta z} (\lambda_{oi,j+\frac{1}{2}} \gamma_{oi,j+\frac{1}{2}} - \lambda_{oi,j-\frac{1}{2}} \gamma_{oi,j-\frac{1}{2}}) -$$

$$\phi_{i,j} \rho_{wi,j} \frac{1}{\Delta z} (\lambda_{oi,j+\frac{1}{2}} \gamma_{oi,j+\frac{1}{2}} - \lambda_{oi,j-\frac{1}{2}} \gamma_{oi,j-\frac{1}{2}}) - \phi_{i,j} \rho_{wi,j} \omega_{i,j},$$

其中: 下标 i 表示横向的网格点数; j 表示垂向上网格的点数; $i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, M; \Delta z$ 为纵向上的均匀离散网格大小; r_i 为横向上的非均匀离散网格大小, 有 $r_i = r_w \cdot e^{i\Delta x}$, 其中 $\Delta x = \ln(r_e/r_w)/N$; r_e 为储层外边界到井轴距离; r_w 为井壁到井轴距离; Δt 为时间离散间隔; $\lambda_{wi,j} = \rho_{wi,j} g k_{i,j} k_{rwi,j} / u_{wi,j}$, $\lambda_{oi,j} = \rho_{oi,j} g k_{i,j} k_{roi,j} / u_{oi,j}$ 为流动系数, $\lambda_{wi,j+1/2}$ 、 $\lambda_{wi,j-1/2}$ 、 $\lambda_{wi+1/2,j}$ 、 $\lambda_{wi-1/2,j}$ 、 $\lambda_{oi,j+1/2}$ 、 $\lambda_{oi,j-1/2}$ 、 $\lambda_{oi+1/2,j}$ 和 $\lambda_{oi-1/2,j}$ 的取值按照上游权值取值, 即取压力大的方向上的那个点的流动系数值; $\beta_{wi,j} = \rho_{wi,j} S_{wi,j} \phi_{i,j} (c_f + c_w)$, $\beta_{oi,j} = \rho_{oi,j} S_{oi,j} \phi_{i,j} (c_f + c_o)$;

$$\omega_{i,j} = - \frac{1}{r_i^2 \Delta x^2} \cdot$$

$$[\lambda_{oi+\frac{1}{2},j} (P_{ci+1,j} - P_{ci,j}) - \lambda_{oi-\frac{1}{2},j} (P_{ci,j} - P_{ci-1,j})] -$$

$$\frac{1}{\Delta z^2} [\lambda_{oi,j+\frac{1}{2}} (P_{ci+1,j} - P_{ci,j}) - \lambda_{oi,j-\frac{1}{2}} (P_{ci,j} - P_{ci-1,j})],$$

$$P_{cpi,j} = \frac{dP_{ci,j}}{dS_{wi,j}}, \gamma_{wi,j} = \rho_{wi,j} \vec{g}, \gamma_{oi,j} = \rho_{oi,j} \vec{g}.$$

采用托马斯算法(张烈辉, 2005)求解该大型稀疏方程组, 其中内边界压力为井底流体压力, 外边界压力为储层初始压力, 初始值为底层原始压力值, 最后得到水的压力在各个时间点和距离点的值。

显式求解含水饱和度的离散公式为:

$$S_{wi,j} =$$

$$\left\{ \frac{1}{r_i^2 \Delta x^2} [\lambda_{wi+\frac{1}{2},j} (P_{wi+1,j} - P_{wi,j}) - \lambda_{wi-\frac{1}{2},j} (P_{wi,j} - P_{wi-1,j})] + \frac{1}{\Delta z^2} [\lambda_{wi,j+\frac{1}{2}} (P_{wi,j+1} - P_{wi,j}) - \lambda_{wi,j-\frac{1}{2}} (P_{wi,j+1} - P_{wi,j-1})] - \beta_{wi,j} \frac{P_{wi,j} - P_{wi,j}^t}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta z} (\lambda_{oi,j+\frac{1}{2}} \gamma_{oi,j+\frac{1}{2}} - \lambda_{oi,j-\frac{1}{2}} \gamma_{oi,j-\frac{1}{2}}) \right\} \frac{\Delta t}{\phi_{i,j} \rho_{wi,j}} + S_{wi,j}^t, \quad (10)$$

其中: 上标 t 表示上一个时刻的值, 未有上标的代表本时刻的值。

对流方程采用隐式方法进行二维离散, 得到:

$$a_{i,j}C_{wi,j-1} + b_{i,j}C_{wi-1,j} + c_{i,j}C_{wi,j} + d_{i,j}C_{wi+1,j} + e_{i,j}C_{wi,j+1} = f_{i,j}, \quad (11)$$

$$\text{其中: } a_{i,j} = \frac{P_{wi,j+1} - P_{wi,j-1}}{2\Delta z} \frac{(-\lambda_{wi-1,j})}{2\Delta z} +$$

$$\frac{\gamma_{wi,j-1} \lambda_{wi,j-1}}{2\Delta z} + \frac{\rho_{wi,j} \phi_{i,j} S_{wi,j} K_D}{2\Delta z} -$$

$$\frac{\rho_{wi,j+1} \phi_{i,j+1} S_{wi,j+1} K_D - \rho_{wi,j-1} \phi_{i,j-1} S_{wi,j-1} K_D}{2\Delta z},$$

$$b_{i,j} =$$

$$\frac{1}{r_i^2} \left(\frac{P_{wi+1,j} - P_{wi-1,j}}{2\Delta x} \frac{(-\lambda_{wi-1,j})}{2\Delta x} + \frac{\rho_{wi,j} \phi_{i,j} S_{wi,j} K_D}{\Delta x^2} - \right.$$

$$\left. \frac{\rho_{wi+1,j} \phi_{i+1,j} S_{wi+1,j} K_D - \rho_{wi-1,j} \phi_{i-1,j} S_{wi-1,j} K_D}{4\Delta x^2} \right),$$

$$c_{i,j} =$$

$$\frac{1}{r_i^2} \left[\lambda_{wi,j} \frac{P_{wi+1,j} - 2P_{wi,j} + P_{wi-1,j}}{\Delta x^2} + \rho_{wi,j} \phi_{i,j} S_{wi,j} K_D \cdot \right.$$

$$\left. \left(\frac{-2}{\Delta x^2} \right) \right] + \lambda_{wi,j} \frac{P_{wi,j+1} - 2P_{wi,j} + P_{wi,j-1}}{\Delta z^2} +$$

$$\rho_{wi,j} \phi_{i,j} S_{wi,j} K_D \left(\frac{-2}{\Delta z^2} \right) -$$

$$\beta_{ci,j} S_{wi,j} \frac{P_{wi,j} - P_{wi,j}^t}{\Delta t} - \frac{\phi_{i,j} \rho_{wi,j} S_{wi,j}}{\Delta t},$$

$$d_{i,j} =$$

$$\frac{1}{r_i^2} \left(\frac{P_{wi+1,j} - P_{wi-1,j}}{2\Delta x} \frac{\lambda_{wi+1,j}}{2\Delta x} + \frac{\rho_{wi,j} \phi_{i,j} S_{wi,j} K_D}{\Delta x^2} + \right.$$

$$\left. \frac{\rho_{wi+1,j} \phi_{i+1,j} S_{wi+1,j} K_D - \rho_{wi-1,j} \phi_{i-1,j} S_{wi-1,j} K_D}{4\Delta x^2} \right).$$

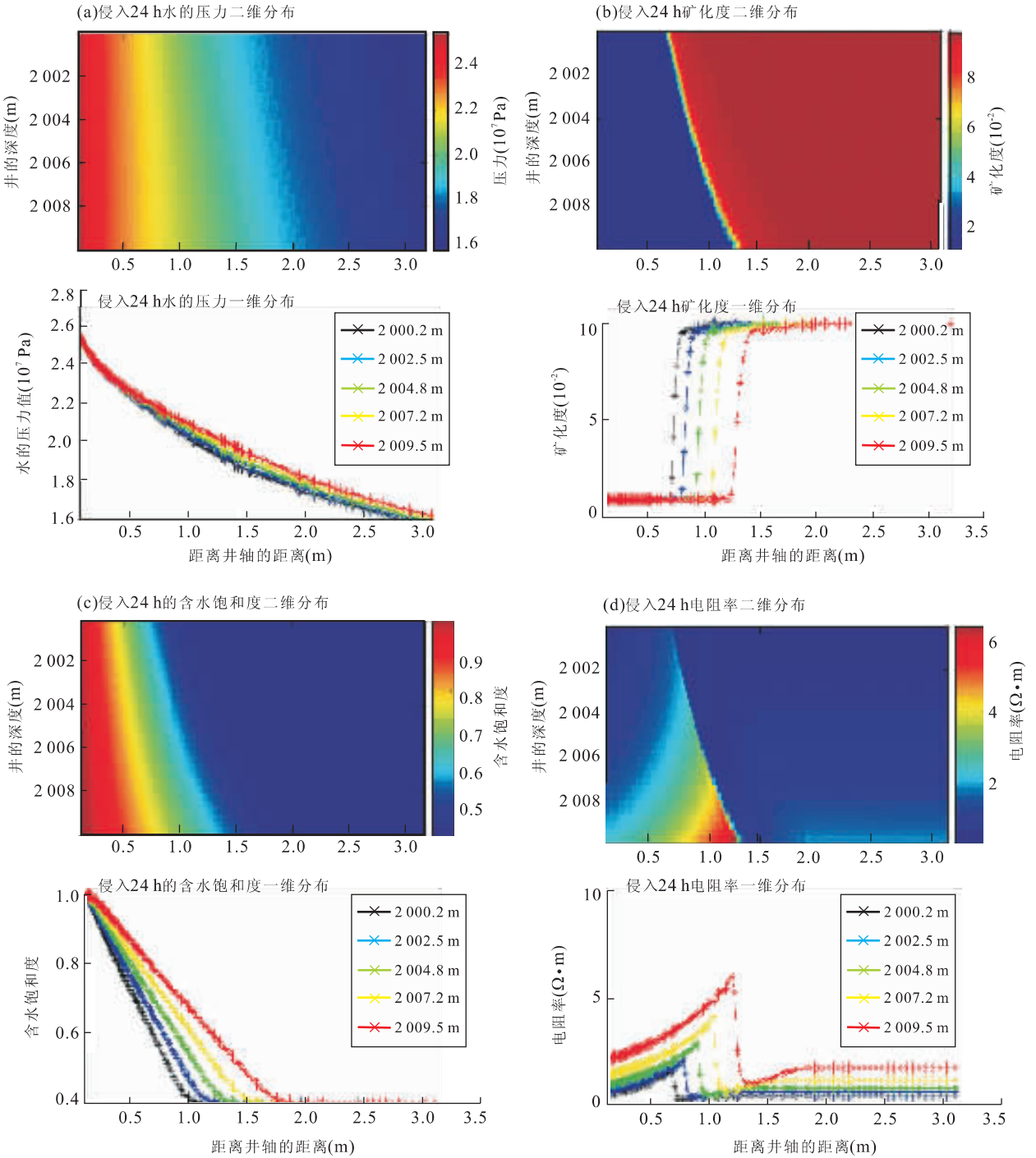


图 1 侵入 24 h 的压力、矿化度、含水饱和度和电阻率径向分布

Fig. 1 Pressure, salinity, water saturation and resistivity distribution in 2 dimension and 1 dimension after invasion of 24 hours

同样采用托马斯算法求解出矿化度的值, 再代入到(7)和(8)中求出电阻率值.

$$e_{i,j} = \frac{P_{wi,j+1} - P_{wi,j-1}}{2\Delta z} \cdot \frac{\lambda_{wi,j+1}}{2\Delta z} - \frac{\gamma_{wi,j+1}\lambda_{wi,j+1}}{2\Delta z} + \frac{\rho_{wi,j}\phi_{i,j}S_{wi,j}K_D}{\Delta z^2} + \frac{\rho_{wi,j+1}\phi_{i,j+1}S_{wi,j+1}K_D - \rho_{wi,j-1}\phi_{i,j-1}S_{wi,j-1}K_D}{4\Delta z^2},$$

$$f_{i,j} = \frac{\phi_{i,j}\rho_{wi,j}(-S_{wi,j}^t C_{wi,j}^t)}{\Delta t}.$$

3 算例

现给出算例进行数值模拟. 如图 1 和图 2 所示, 侵入时间分别为 24 h 和 48 h, 计算后将压力、含水

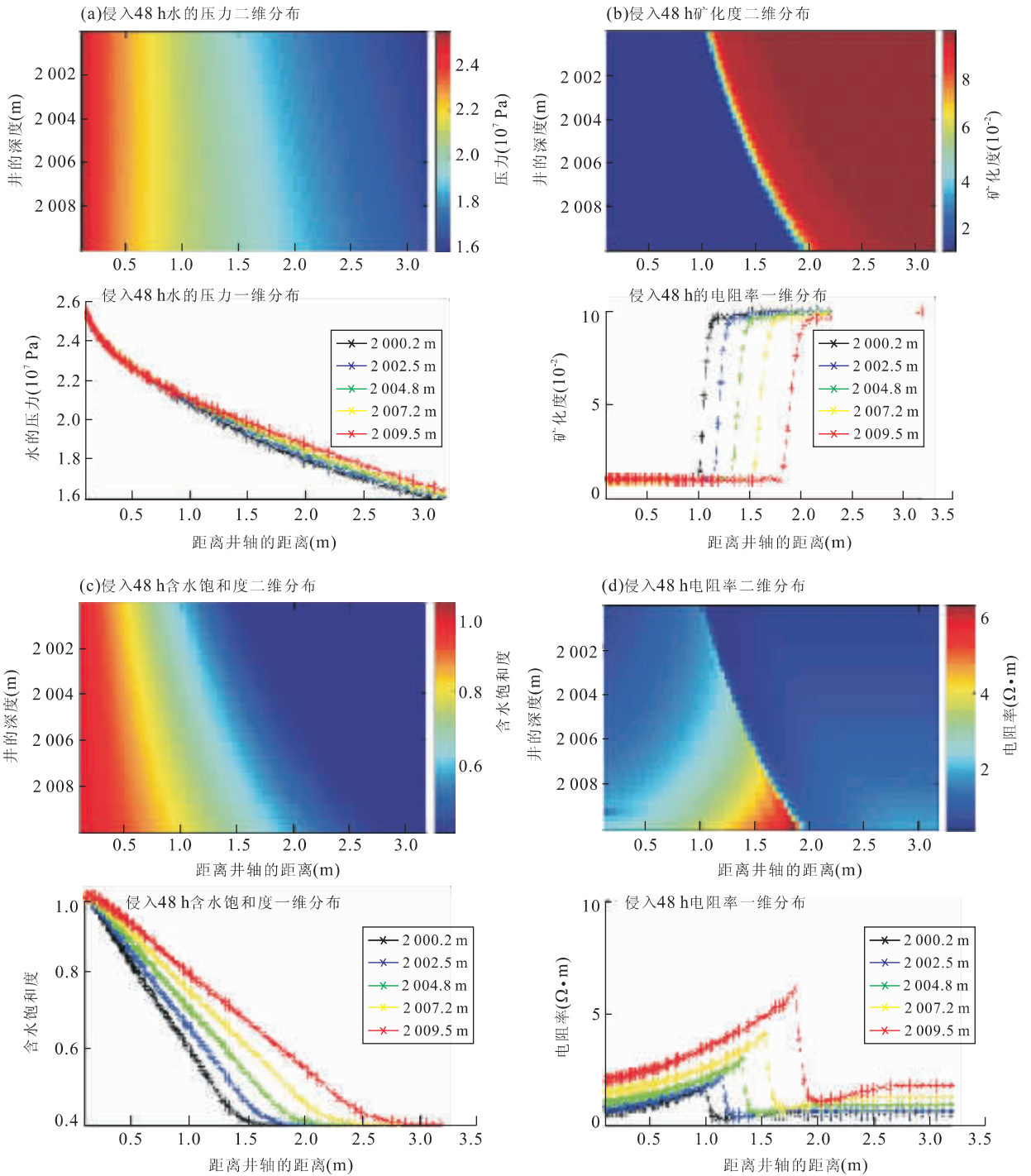


图 2 侵入 48 h 的压力、矿化度、含水饱和度和电阻率径向分布

Fig. 2 Pressure, salinity, water saturation and resistivity distribution in 2 dimension and 1 dimension after invasion of 48 hours

饱和度、矿化度和电阻率值在垂向和径向的分布进行二维成图,并在垂向上等间距抽取 5 条纵向的一维曲线进行绘图,将一维和二维曲线进行对比研究.

基本参数的设置如下:设储层的岩石为非均匀各向异性介质,考虑重力作用,忽略粘度随压力的变化,孔隙度初始值按照 $0.6 \sim 0.01j$ 由上至下递减,原始地层渗透率按照 $(9.8697 + 0.2j) \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 从

上至下逐渐变大(其中 j 为纵向网格节点数),水的初始密度为 1050 kg/m^3 ,油的初始密度为 950 kg/m^3 ,泥浆的密度为 1300 kg/m^3 ,水的粘度初始值为 $0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,油的粘度初始值为 $0.002 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,孔隙压缩系数为 $6 \times 10^{-10} 1/\text{Pa}$,水的压缩系数为 $5 \times 10^{-10} 1/\text{Pa}$,油的压缩系数为 $10 \times 10^{-10} 1/\text{Pa}$,含水饱和度初始值为 0.4 ,泥浆矿化度为 10^{-2} ,地层水矿化

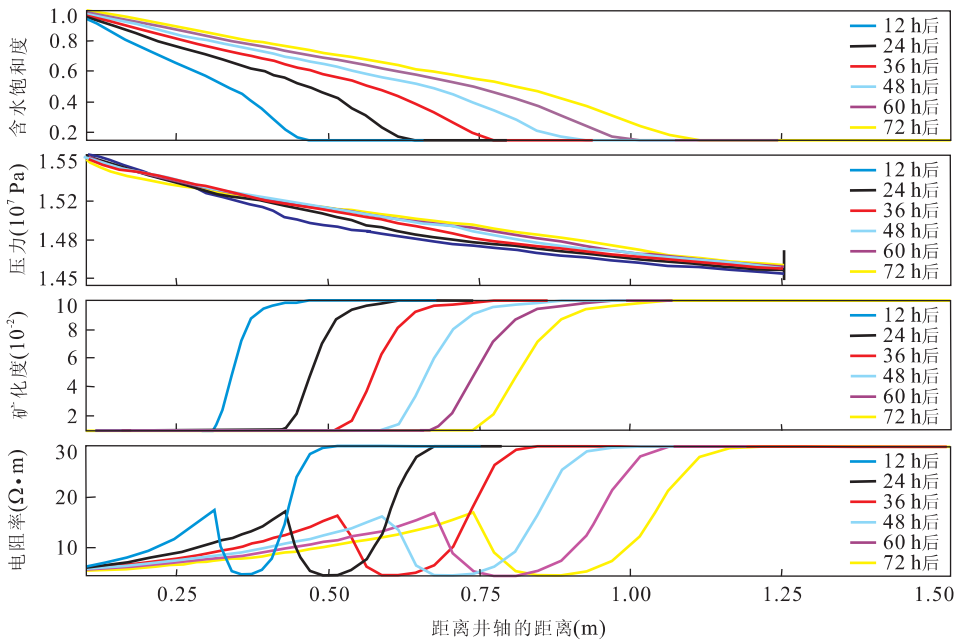


图 3 一维含水饱和度、压力、矿化度和电阻率分布(Navarro, 2007)

Fig. 3 Pressure, water saturation, salinity and resistivity distribution in 1 dimension

度为 10^{-1} , 泥浆渗透率取值与地层渗透率一样, 井口半径为 0.1 m, 储层半径为 6.1 m, 胶结因子为 1, 胶结指数为 2, 饱和度指数为 2, 地层温度为 100°C , 储层顶部参考压力为 11.3×10^7 Pa, 储层顶部深度为 2 000 m, 底部深度为 2 010 m. 径向网格划分为 200 个, 纵向网格划分为 30 个.

由图 1 和图 2 可见, 随着地层孔隙度由上至下的减少, 侵入的深度逐渐增加, 且电阻值增大. 从物理意义上分析, 在渗入流体的量一定的情况下, 随着孔隙度的降低, 要容纳这些流体, 就必须增大深度, 因为孔隙度与渗透深度成反比. 且随着孔隙度的减少, 地层电阻率也减少, 主要是由于岩石骨架的电阻率贡献高, 而地层水的电阻率贡献低, 因此, 当孔隙度减少时, 总的电阻率就会增大.

由图可见, 随着地层渗透率的加大, 侵入的深度逐渐增加. 从物理意义上分析, 主要因为侵入流体的量与渗透率成正比, 随着渗透率的加大, 流入到孔渗性地层的流体增加, 因此侵入深度随之加大.

在电阻率剖面图中可以看到一个明显的低阻环带, 这主要是由于油和水不能混溶, 而地层水和泥浆滤液可混溶, 在低阻环带这个位置, 孔隙中的油已经被泥浆滤液驱替, 但是泥浆滤液和地层水之间有个逐渐互溶的过程, 因此在该位置高矿化度地层水对总电阻率的贡献最大, 故此处出现低阻环带. 从数学公式分析, 图示显式相同时间某一层段的含水饱和度前沿总是比矿化度前沿超前一小段, 因此存在一

小段对应着较高的含水饱和度和矿化度值, 根据公式(7)、(8)可以得出一个较低电阻带, 这也和张建华等(1994)计算的一维低阻环带相符合.

为了验证和比较计算的正确性, 每幅图的下半部分为抽取不同深度的数据绘制的一维曲线, 将这些一维曲线和 Navarro(2007)的一维计算图例进行目视比较, 发现走势吻合, 也证明该二维计算的合理性(图 3).

4 结论

采用隐式压力显式饱和度的有限差分方法, 对泥浆侵入的数学模型在垂向和径向进行二维化离散, 采用托马斯算法求解该二维大型稀疏矩阵, 得出垂向和径向二维分布的压力值、含水饱和度值、矿化度值和电阻率, 并进行二维和一维成图. 取在垂向上孔隙度和渗透率不均匀分布的储层为算例进行计算, 其结果与进行理论分析的结果一致, 证明该方法可以用于垂向上不均匀介质的泥浆侵入计算, 也可以用于分层介质泥浆侵入计算. 该二维计算结果所抽取的一维曲线分布与 Navarro(2007)的一维计算结果相吻合.

References

- Donaldson, E. C., Chernoglazov, V., 1987. Characterization of drilling mud fluid invasion. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1(1): 3–13. doi: 10. 1016/

0920—4150(87)90010—6

Dresser Atlas Inc. , 1982. Well logging and interpretation techniques. Dresser Industries, USA.

Dubost, F. X. , Zheng, S. Y. , Corbett, P. W. M. , 2004. Analysis and numerical modelling of wireline pressure tests in thin-bedded turbidites. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 45(3—4): 247—261. doi: 10. 1016/i. petrol. 2004. 07. 001

Goode, P. A. , Thambynayagam, R. K. M. , 1996. Influence of an invaded zone on a multiprobe formation tester. *SPE Formation Evaluation*, 11(1): 31—40. doi: 10. 2118/23030—PA

Han, D. K. , Chen, Q. L. , Yan, C. Z. , 1993. Basic theory of oil reservoir numerical simulation. Petroleum Industry Press, Beijing, 147—179 (in Chinese).

Kuchuk, F. J. , Onur, M. , 2003. Estimating permeability distribution from 3D interval pressure transient tests. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 39(1—2): 5—27. doi: 10. 1016/s0920—4105(03)00037—8

Lake, L. W. , 1989. Enhanced oil recovery. Prentice-Hall Inc. , New Jersey, USA.

Liu, Z. H. , Hu, Q. , Zhang, J. H. , 1996. Response characteristics of time-lapse dual laterolog and their variations. *Oil Geophysical Prospecting*, 31(4): 535—540 (in Chinese with English abstract).

Ma, M. X. , Ju, B. S. , 2004. A novel mathematical model to calculate distribution of mud invasion formation resistivity. *Well Logging Technology*, 28(6): 503—507 (in Chinese with English abstract).

Navarro, D. , 2007. Effects of invasion transient on resistivity time-lapsed logging. In: Department of electrical and computer engineering 3rd annual ECE graduate research conference, 74—75.

Schlumberger, C. , Schlumberger, M. , Leonardon, E. G. , 1934. Electrical coring: a method of determining bottom-hole data by electrical measurements. *Trans. , AIME. ,*

110:237—272.

Sun, J. M. , Zhang, H. T. , Ma, J. H. , et al. , 2003. On a new method for calculating in-situ water saturation with time-lapse log. *Well Logging Technology*, 27(3): 217—220 (in Chinese with English abstract).

Tan, T. D. , 1979. Resistivity time-lapse logging. *Well Logging Technology*, 3(6): 1—8 (in Chinese).

Wu, J. H. , Torres-Verdín, C. , Proett, M. , et al. , 2002. Inversion of multi-phase petrophysical properties using pumpout sampling data acquired with a wireline formation tester. Paper SPE 77345 presented at the Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 29 September—2 October.

Zhang, J. H. , Hu, Q. , Liu, Z. H. , 1994. A theoretical model for mud-filtrate invasion in reservoir formations during drilling. *Acta Petrolei Sinica*, 15(4): 73—78 (in Chinese with English abstract).

Zhang, L. H. , 2005. Basic theory of oil reservoir numerical simulation. Petroleum Industry Press, Beijing, 100—101 (in Chinese).

附中文参考文献

韩大匡, 陈钦雷, 闫存章, 1993. 油藏数值模拟基础. 北京: 石油工业出版社, 147—179.

刘振华, 胡启, 张建华, 1996. 时间推移双侧向测井响应特征及其变化规律. 石油地球物理勘探, 31(4): 535—540.

马明学, 鞠斌山, 2004. 一种新的计算泥浆侵入储层电阻率分布的数学模型. 测井技术, 28(6): 503—507.

孙建孟, 张海涛, 马建海, 等, 2003. 用时间推移测井计算原始含水饱和度新方法研究. 测井技术, 27(3): 217—220.

谭廷栋, 1979. 电阻率时间推移测井. 测井技术, 3(6): 1—8.

张建华, 胡启, 刘振华, 1994. 钻井泥浆滤液侵入储集层的理论计算模型. 石油学报, 15(4): 73—78.

张烈辉, 2005. 油气藏数值模拟基本原理. 北京: 石油工业出版社, 100—101.