

文章编号: 0253-9985(2009)03-0388-05

水平井负压钻井渗透率剖面计算模型影响参数

鹿洪友^{1,2}, 陈小宏¹, 黄捍东¹

(1 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

(2 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 海洋采油厂, 山东 东营 257237)

摘要: 负压钻井可减小甚至避免钻井液侵入污染, 近年来越来越得到重用。实际工作中, 为准确调整钻井液配比以确保井底压力低于油藏压力, 需准确估算沿井筒流入的流量, 而渗透率剖面是计算流量的重要参数。通过推断导出一个渗透率剖面计算模型, 并应用数值模拟器对其进行验证, 同时对相关参数, 如地层非均质性、地层压力、钻速等进行了敏感性分析。计算结果表明该模型有一定的适用性。

关键词: 射孔长度; 渗透率剖面计算模型; 负压钻井; 水平井

中图分类号: TE319 文献标识码: A

An analysis on influential parameters for modeling permeability profile during underbalanced drilling in horizontal wells

(Lu Hongyou^{1,2}, Chen Xiaohong¹, Huang Handong¹)

(1 State Key Laboratory of Hydrocarbon Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2 Offshore Oil Producing Plant, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257237, China)

Abstract Underbalanced drilling can reduce or even eliminate formation damage from drilling fluid invasion, and therefore it is getting more and more popular. To ensure that the bottom hole pressure is lower than the reservoir pressure, it is essential to adjust the gas fraction of the drilling fluid and to accurate inflow calculations. The permeability profile is an important parameter to calculate inflow. We have derived a model for calculating permeability profile and proved it by applying numerical simulator. Parameters such as formation heterogeneity, formation pressure and drilling rate were studied in this paper. The results show that the model is applicable in certain areas.

Key words perforation length; model for calculating permeability profile; underbalanced drilling; horizontal well

负压钻井可减小井筒污染并提高单井生产能力, 因而这种技术在油气田开发工作中越来越得到重用。负压钻井过程中, 井底压力低于油藏压力, 压差使油藏流体流入井筒并影响井筒中的流体密度和井底压力。负压钻井过程中为确保井底压力低于油藏压力, 需要准确计算井筒流入的流量, 流量的计算离不开渗透率, 因此, 实际工作中渗透率的估算非常重要, 前人在这个领域做了许多研究^[1,2]。

根据计算方法的不同, 渗透率计算模型可分为分析模型和数值模型两种, 由于负压钻井的特殊性, 分析模型更适合于动态研究, 因此本文着重研究分析模型。

现有的分析模型虽作做了大量假设和简化以适应求解需要, 但已不能充分模拟事实上十分复杂的负压钻井过程。为准确模拟复杂的负压钻井过程, 了解油藏特性, 需要一个功能更强大的分析模型, 以便考虑油藏非均质性、钻速、负压等。

收稿日期: 2008-12-20。

第一作者简介: 鹿洪友 (1965—), 男, 高级工程师, 油气田开发地质。

1 负压钻井水平井模型

1.1 模型假设条件

模型假设条件如下:

- 1) 单相微可压缩流体;
- 2) 水平等厚非均质油藏, 横向无限大, 上下为不渗透地层;
- 3) 流体径向流向井筒, 用表皮因子来考虑井筒径向流的影响。

如图 1 的水平井示意图^[3, 4]所示, x 和 y 方向无限大, z 方向有上、下不渗透边界。 $t = 0$ 流量 $q_w(t) = Q$ 水平段长度 $l_w = 0$ 。在时间 t 时, 流量为 $q_w(t)$, 水平段长度为 $l_w(t)$ 。已经钻遇的油藏段在井筒中可分为两个部分: 新钻开的新井段和已经钻开的老井段。这里主要讨论新井段模型。根据渗透率和井筒压力求解流量, 或给定流量和压力求解渗透率。老井段则相对简单, 本文借鉴使用前人的计算模型, 下面分别介绍其计算模型。

1.2 新钻井段模型

根据负压钻井模型, 考虑一个新钻井段长度为 Δx , 离散方程可为:^[5~7]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

初始边界条件为:

$$p = p_i \quad y \geq 0 \quad t = 0 \quad (2)$$

$$p = p_i \quad y \rightarrow \infty, \quad t > 0 \quad (3)$$

$$p = p_w + q_w(t) \frac{\mu_o}{2\pi K \Delta x} S_z \quad y = 0 \quad t > 0 \quad (4)$$

$$S_z = \ln \left| \frac{h}{2\pi r_w} \right| \quad (5)$$

式中: η 为常数; p 为井筒压力, kPa ; p_i 为第 i 点的井筒压力, kPa ; p_w 为井口压力, kPa ; t 为时间, h ; $q_w(t)$ 为 t 时刻的井筒流量, m^3/h ; μ_o 为液体粘度系数; K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; S_z 为表皮系数; h 为产层厚度, m ; r_w 为井筒半径, m 。

1.3 新钻井段模型求解

应用拉普拉斯转换联合求解方程 (1) — 方程 (5)^[3, 8, 9]。

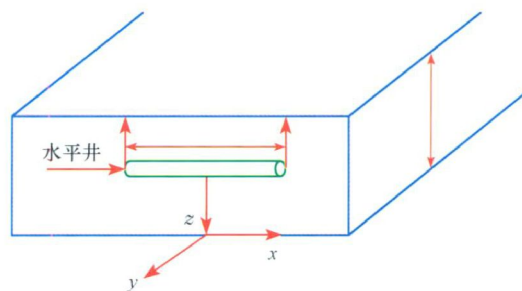


图 1 水平井示意图

Fig. 1 Sketch map showing the horizontal well

不考虑表皮系数:

$$q_w(Q, \Delta t) = \frac{2\Delta x h (p_i - p_w)}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{K \Phi c_i}{\mu_o}} \sqrt{\frac{1}{\Delta t}} \quad (6)$$

式中: Φ 为孔隙度, %; c_i 为压缩系数。

为求解渗透率 K , 方程 (6) 改写为:

$$K = \frac{q_w^2(Q, \Delta t) \pi \mu_o \Delta t}{4(\Delta x h)^2 (p_i - p_w)^2 \Phi c_i} \quad (7)$$

考虑表皮系数, 流量和渗透率关系变为复杂的隐式关系:

$$q_w(t) = \frac{2A}{S_z} \exp(B^2 t) \operatorname{erfc}(B\sqrt{t}) \quad (8)$$

其中,

$$A = \frac{\pi K \Delta x (p_i - p_w)}{\mu_o} \quad (9)$$

$$B = \frac{2\pi \sqrt{\eta}}{h S_z} \quad (10)$$

$$\exp(B^2 t) \operatorname{erfc}(B\sqrt{t}) \approx (a_1 t_k + a_2 t_k^2 + a_3 t_k^3) \quad (11)$$

$$t_k = \frac{1}{1 + p' B \sqrt{\Delta t}} \quad (12)$$

式中: p' , a_1 , a_2 , a_3 为常数。

把方程 (1) 代入方程 (7), 积分得第一个时间段累积的流量:

$$q(\Delta t) = \frac{2A}{S_z B^2} \frac{(a_1 t_k + a_2 t_k^2 + a_3 t_k^3) - 1.0 + \frac{2B}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\Delta t}}{\Delta t} \quad (13)$$

方程 (13) 是渗透率的隐式方程, 可用 Newton-Raphson 迭代法求解。

1.4 老井段计算模型

Vinsome 和 Westerveld^[10~12] 介绍了一个半分析解模型, 这个模型可以用以计算老井段在给定井底压力时的流量。

$$q(t) = \frac{K}{\mu_o} \left[\frac{p_i - p_w^{n+1}}{\delta^{n+1}} + A^{n+1} \right] \Delta x h \quad (14)$$

式中: n 为水平井段数; δ 为变量差值。

此公式中的渗透率可根据新井段模型计算得来, 有了渗透率就可以计算给定压力下的流量。

1.5 计算流程

负压钻井过程中渗透率剖面的计算流程:

- 1) 计算第一个时间步的新井段的流量, 应用方程 (7) 初始化未知的渗透率;
- 2) 应用 Newton-Raphson 迭代方法求解目标方程 (13), 以获得渗透率;
- 3) 根据 b 计算出来的渗透率计算不同时间步的参数 A 和 B ;
- 4) 根据方程 (14) 计算老井段在各自不同压力条件下的流量;
- 5) 总的流量减去老井段的流量, 获得新井段的流量;
- 6) 重复上述 5 个过程, 直到获得完整的渗透率剖面。

2 模型验证和参数敏感性分析

应用商业化数值模拟软件 CMG (2000) 模拟负压钻井过程, 得出流量, 再用本模型计算渗透率剖面, 最后把数值模拟软件中输入的渗透率数据与模型计算出来的渗透率数据进行比较, 这个过程不但可以验证模型的准确性, 而且可以对有关参数进行敏感性分析。

2.1 水平井的模拟器模型

根据水平井负压钻井模型示意图, 利用数值模拟软件 CMG MEX 建立相应的油藏模型。模拟器输入参数见表 1。分别对结果影响较大的地层压力、钻速进行敏感性分析。考虑实际复杂的非均质油藏, 为简化, x 轴方向上分为 8 个段, 对应渗透率 $K = 1 \times 10^{-3}$, 10×10^{-3} , 30×10^{-3} , 50×10^{-3} ,

表 1 模拟器输入参数

Table 1 Input parameters for the simulator

x 方向网格数目 / 个	96
y 方向网格数目 / 个	100
z 方向网格数目 / 个	1
油藏厚度 / m	5.0
井径 / m	0.076
时间步长 / h	1
孔隙度	0.10
粘度 / (10^{-3} Pa·s)	1.0
压缩系数 / (kPa^{-1})	1.0×10^{-6}
钻速 / ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	20
原始压力 / kPa	6 000

20×10^{-3} , 6×10^{-3} , 3×10^{-3} , 0.1×10^{-3} μm^2 。其他参数见表 1; 根据井底压力和钻速的不同, 分为 6 种情形, 见表 2。

2.2 参数敏感性分析

1) 例 1 井底压力稳定, 钻速稳定

原始地层压力为 6 000 kPa, 井底压力设定为 4 000 kPa, 钻速设定为 20 m/h, 时间为 96 h。结果表明输入的渗透率和模型计算的渗透率吻合非常好, 除了最后一时间段对应于小的渗透率 0.1×10^{-3} μm^2 , 该处渗透率突变, 计算结果略有偏差 (图 2a 图 3a)。

2) 例 2 井底压力稳定, 钻速递减

井底压力稳定, 钻速递减, 其他参数同例 1, 计算结果参见图 2b 和图 3b。比较图 3a 和图 3b 可以看出, 钻速的变化对渗透率的估算结果影响不大。

3) 例 3 井底压力阶梯式变化, 钻速稳定

井底压力阶梯式变化, 钻速稳定, 计算结果参见图 2c 和图 3c。从图 3c 可以看出, 后期计算的渗透率和输入的渗透率之间差异较大。比较图 3a 和图 3c 可认为, 压力变化影响较大。

4) 例 4 井底压力正弦变化, 钻速稳定

井底压力正弦变化, 钻速稳定, 计算结果参见图 2d 和图 3d。前期吻合很好, 后期吻合较差。比较图 3a 和图 3d 可以看出, 压力变化对渗透率的

表 2 非均质油藏模型参数

Table 2 Parameters for heterogeneous reservoir models

井底压力	井底压力稳定 (4 000 kPa)	井底压力 阶梯式变化	井底压力 正弦式变化
钻速稳定 (20 m/h)	例 1	例 3	例 4
钻速递减 [(20-0.1t) m/h t < 96 h]	例 2	例 5	例 6

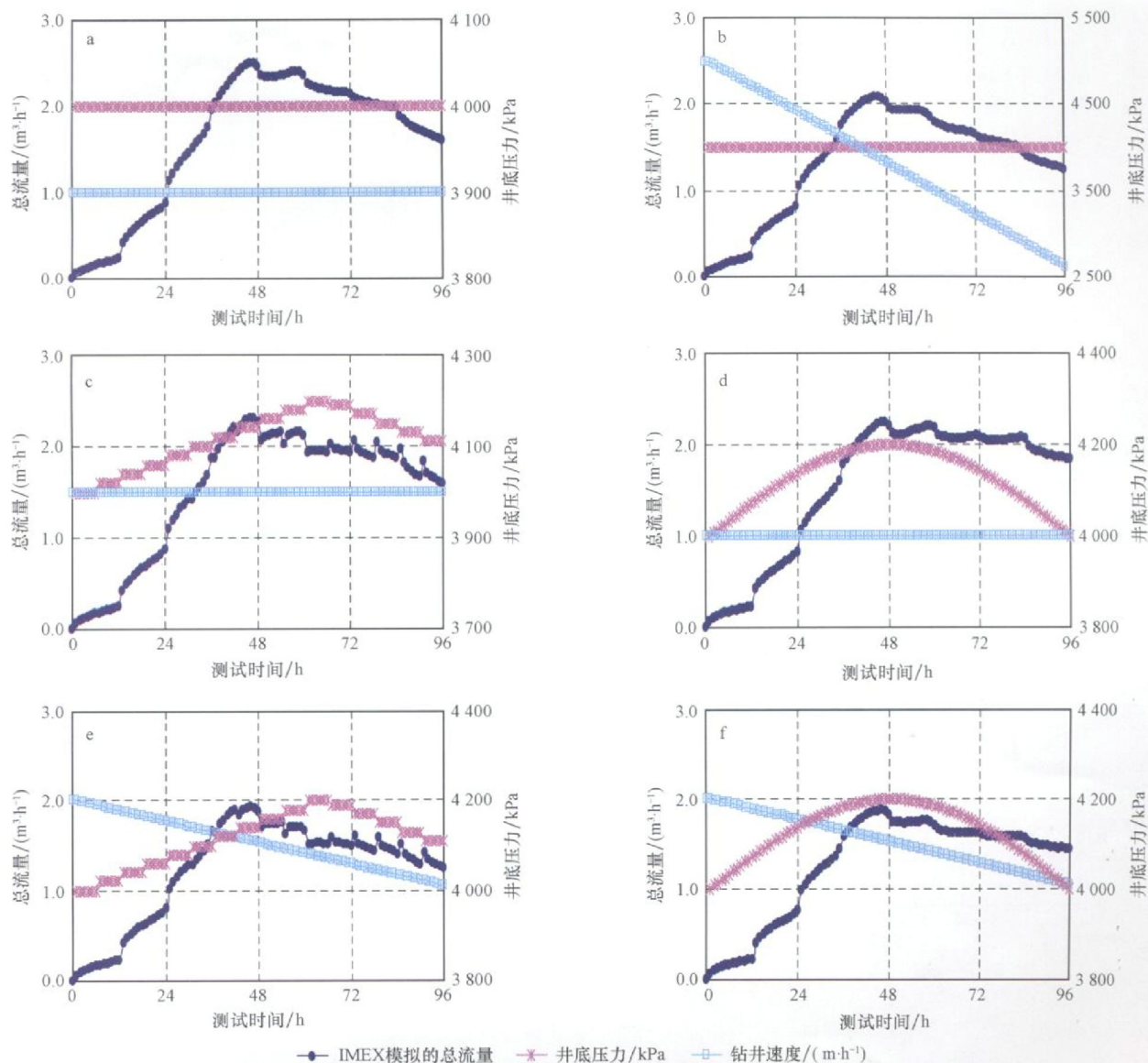


图 2 流量随时间的变化

Fig. 2 The change of inflow over time

- a. 井底压力稳定, 钻速稳定; b. 井底压力稳定, 钻速递减; c. 井底压力阶梯式变化, 钻速稳定;
d. 井底压力正弦变化, 钻速稳定; e. 井底压力阶梯式变化, 钻速递减; f. 井底压力正弦变化, 钻速递减

计算结果影响较大。

5) 例 5 井底压力阶梯式变化, 钻速递减 (以 10% 递减)

井底压力阶梯式变化, 钻速递减, 计算结果参见图 2e 和图 3e, 模拟结果同例 3 近似, 表明钻速影响不大。

6) 例 6 井底压力正弦变化, 钻速递减 (以 10% 递减)

井底压力正弦变化, 钻速递减, 计算结果参见图 2f 和图 3f 结果同例 4 相差不大, 表明钻速对渗透率计算结果影响不大。

3 结论

1) 本文推导了一个水平井负压钻井渗透率计算模型, 此模型考虑了井底压力和钻速的影响, 并应用数值模拟器对模型进行了验证, 计算结果表明这个模型具有一定的适应性。

2) 对模型的重要参数进行敏感性分析表明, 渗透率剖面估算结果受钻速影响较小, 受井底压力变化影响较大, 其中地层非均质性对计算结果影响最大, 非均质性越严重, 则误差越大。

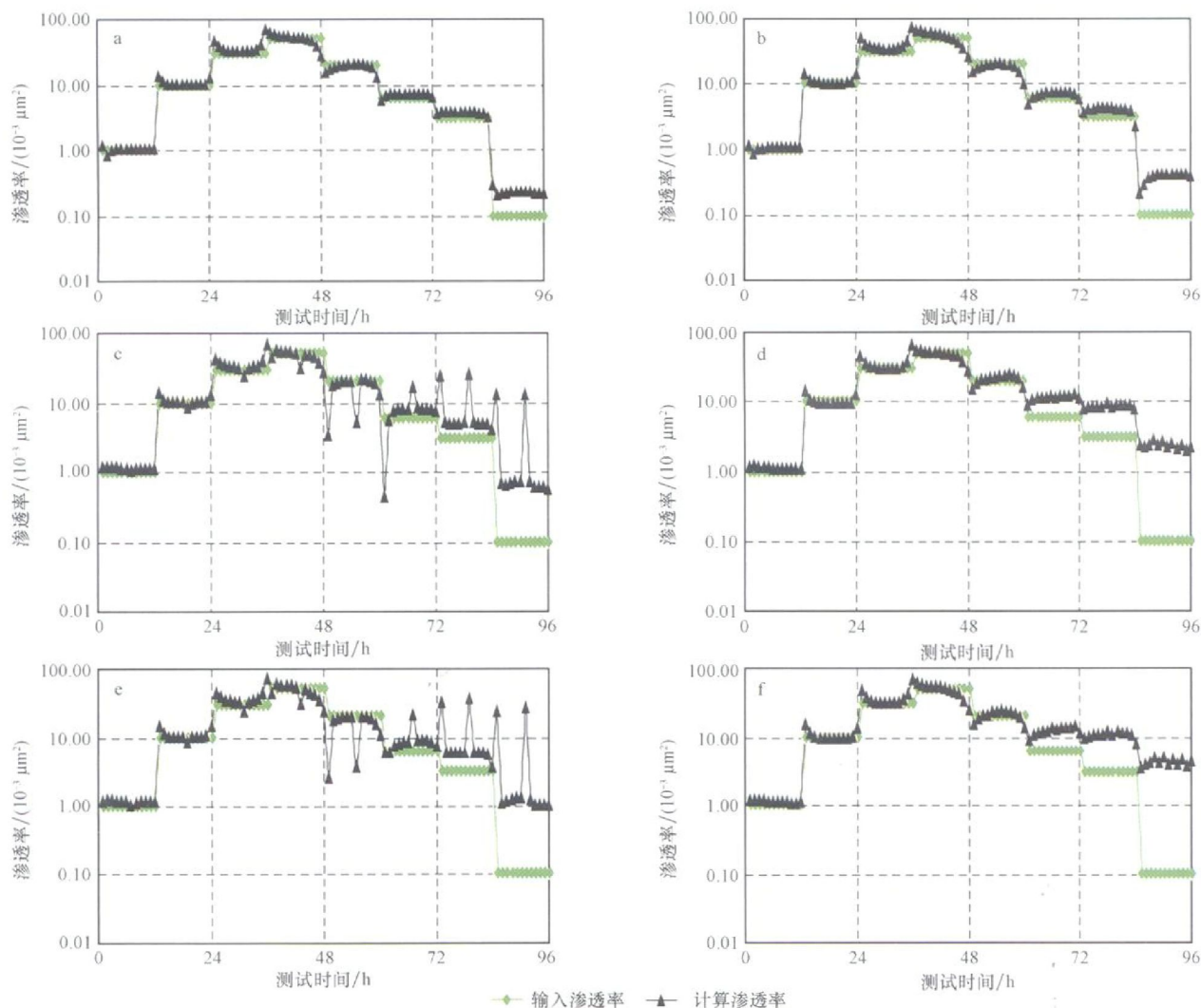


图 3 模型计算渗透率和输入渗透率对比

Fig. 3 The model-calculated vs input permeability

- a. 井底压力稳定, 钻速稳定; b. 井底压力稳定, 钻速递减; c. 井底压力阶梯式变化, 钻速稳定;
d. 井底压力正弦变化, 钻速稳定; e. 井底压力阶梯式变化, 钻速递减; f. 井底压力正弦变化, 钻速递减

参 考 文 献

- 1 陈志海, 刘常红, 杨坚, 等. 缝洞性碳酸盐岩油气藏开发对审 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 623~629
- 2 谢泽华. 天然气成藏模式与勘探方法——以川西天然气藏为例 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 144~147
- 3 Vefring E H, Nygaard G, Fjelle K K, et al Reservoir characterization during underbalanced drilling methodology, accuracy, and necessary data [A]. SPE 77530 2002
- 4 Fan J Gao C L, Shi T H, et al A comprehensive model and computer simulation for underbalanced drilling in oil and gas wells [A]. SPE 68495 2001
- 5 Larsen L Nilsen F. Inflow predictions and testing while underbalanced drilling [A]. SPE 56684 1999
- 6 Hunt J L, Rester S. Reservoir characterization during underbalanced drilling a new model [A]. SPE 59743 2000
- 7 Kneissl W. Reservoir characterization while underbalanced drilling [A]. SPE 67690 2001
- 8 Kardolus C B. Testing while underbalanced drilling [A]. SPE 38754 1997
- 9 Fraim M L, Wattenbarger R A. Gas reservoir decline-curve analysis using type curves with real gas pseudo-pressure and normalized time [J]. SPEFE, 1987, 12: 671~682
- 10 Vinsome P K W, Westerveld J A. A simple method for predicting cap and base rock heat losses in thermal reservoir simulators [J]. J Can Pet Tech, 1980, 19(3): 87~90
- 11 Ansah J, Shayegi S, Ibrahim E. Maximizing reservoir potential using enhanced analytical techniques with underbalanced drilling [A]. SPE 90196 2004
- 12 Biswas D, Suryanarayana P V, Frink P J, et al. An improved model to predict reservoir characteristics during underbalanced drilling [A]. SPE 84176 2003

(编辑 董立)