

底水碳酸盐岩油藏数值试井模型及其应用

杨 坚¹, 姚 军¹, 王子胜¹, 路 涛²

(1 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061;

2 中国石化集团胜利石油管理局 钻井工程技术公司, 山东 东营 257064)

摘要:为了解决有限底水碳酸盐岩油藏的试井解释问题,建立了底水碳酸盐岩油藏三维油水两相数值试井模型,采用不完全 LU 分解共轭梯度法进行了求解,并分析了油藏中各参数对底水碳酸盐岩油藏试井解释曲线的影响。结果表明,油井到裂缝的距离决定了底水对油井压力影响响应的早晚,底水体积的大小决定了压力导数曲线的下降程度和下降时间的长短。塔河油田底水油藏油井的试井解释结果与地质及生产状态符合程度较高。

关键词:底水碳酸盐岩油藏;数值试井;油水两相流

中图分类号: TE353.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2006)06-0063-03

高承泰^[1]研究了 3 层油藏中存在窜漏的垂向干扰试井的理论和解释方法;宋付权和刘慈群^[2-3]对低渗透垂直补给油藏水平井流动动态和低渗透油藏中含压力梯度水平井的生产动态进行了分析;马建国等^[4-8]对多层油藏问题也进行了研究。但是,目前在底水油藏的试井解释过程中仍认为底水是无限大的,即油藏底边界为定压边界,而其压力导数曲线则在井筒存储过渡期后迅速下降。

开发生产过程证明,塔河油田奥陶系油藏为多期构造破裂与古岩溶共同作用下形成的溶洞-裂缝型底水块状油藏^[9],底水多通过裂缝和油藏沟通,但其体积不大,不能将其假设为定压边界。为此,对该类油藏的试井解释问题进行研究十分必要。

1 三维油水两相数值试井模型

根据塔河油田的油藏及生产实际,建立了底水碳酸盐岩油藏的试井解释物理模型(图 1),其上层为油层,下层为水层,中间仅通过高渗透裂缝带沟通,有的裂缝带穿过油井(图 1a),而有的则离井一定的距离(图 1b)。

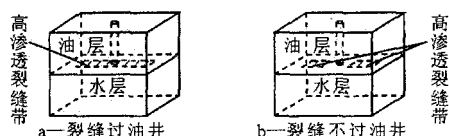


图 1 底水碳酸盐岩油藏试井解释物理模型

假设条件为:①油藏中存在油水两相;②油藏中岩石和流体均可压缩;③油藏中流体渗流符合达西定律;④油藏中岩石具有各向异性和非均质性;⑤考虑重力和毛细管压力的影响。

裂缝介质中油水的渗流方程为

$$\nabla \cdot \left[\frac{\rho_l k_f K_{rf}}{\mu_l} \nabla (p_{lf} + \alpha \rho_l g D) \right] + q_{lf} + \tau_{mf} = \frac{\partial(\phi_f \rho_l S_{lf})}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ρ_l 为油或水的密度, g/cm^3 ; k_f 为裂缝的绝对渗透率, μm^2 ; K_{rf} 为裂缝中油或水的相对渗透率; μ_l 为地层油或水的粘度, $mPa \cdot s$; p_{lf} 为裂缝中油或水的压力, $10^{-1} MPa$; α 为转换系数, 其值为 0.1; g 为重力加速度, m/s^2 ; D 为深度, m ; q_{lf} 为油井的产油量或产水量, g/s ; τ_{mf} 为裂缝和基岩之间油或水的窜流量, g/s ; ϕ_f 为裂缝孔隙度; S_{lf} 为裂缝的含油或含水饱和度; t 为时间, s 。

辅助条件为

$$p_{cf} = p_{of} - p_{wf} \quad (2)$$

$$S_{of} + S_{wf} = 1 \quad (3)$$

式中: p_{cf} 为裂缝中的毛细管压力, $10^{-1} MPa$; p_{of} 为裂缝中的油相压力, $10^{-1} MPa$; p_{wf} 为裂缝中的水相压力, $10^{-1} MPa$; S_{of} 为裂缝的含油饱和度; S_{wf} 为裂缝的含水饱和度。

初始条件为

$$p_i|_{t=0} = p_i \quad (4)$$

收稿日期 2006-08-03; 改回日期 2006-10-13。

作者简介: 杨坚, 男, 高级工程师, 1988年毕业于中国地质大学(武汉)石油地质专业, 现为中国石油大学(华东)油气田开发专业在读博士研究生, 主要从事油藏管理和试井解释工作。联系电话: 13999102322, E-mail: yangjian8888@sina.com。

$$S_{wf}|_{t=0} = S_{wfi} \quad (5)$$

式中: p_i 为裂缝中流体压力, 10^{-1} MPa; p_i 为地层原始压力, 10^{-1} MPa; S_{wfi} 为裂缝原始含水饱和度。

对于封闭油藏, 其外边界条件为

$$\frac{\partial p_i}{\partial \Gamma} = 0 \quad (6)$$

式中: Γ 为油藏外边界。

定产量的内边界条件即在井点所在网格差分方程中直接加上产量项。在计算出井点压力后, 可以将其转换到拉氏空间考虑表皮系数和井筒存储效应, 再采用数值反演方法将其反演到真实空间。

而基质岩块中的流体向裂缝介质中的拟稳态窜流则完全是由于基质岩块的弹性压缩引起的。根据 Kazemi 的拟稳态窜流理论^[10], 可以得到基岩介质中流体的连续性方程

$$-\tau_{mfl} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l \phi_m S_m) \quad (7)$$

式中: ϕ_m 为基岩孔隙度; S_m 为基岩的含油或含水饱和度。

其辅助方程为

$$S_{om} + S_{wm} = 1 \quad (8)$$

$$p_{cwm} = p_m - p_{wm} \quad (9)$$

式中: S_{om} 为基岩的含油饱和度; S_{wm} 为基岩的含水饱和度; p_{cwm} 为基岩中油水毛细管压力, 10^{-1} MPa; p_m 为基岩中油相压力, 10^{-1} MPa; p_{wm} 为基岩中水相压力, 10^{-1} MPa。

窜流量和形状系数的计算公式为

$$\tau_{mfl} = \sigma \rho_l \frac{k_m K_{rm}}{\mu_l} (p_m - p_{lf}) \quad (10)$$

$$\sigma = 4 \left(\frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} + \frac{1}{L_z^2} \right) \quad (11)$$

式中: σ 为形状因子, cm^{-2} ; k_m 为基岩的绝对渗透率, μm^2 ; K_{rm} 为基岩中油或水的相对渗透率; p_m 为基岩中油或水的压力, L_x, L_y 和 L_z 分别为岩块在 x, y 和 z 方向上的尺寸, cm 。

式 (1) ~ (11) 构成了双重孔隙介质底水油藏完整的三维油水两相数值试井问题的数学模型。采用不完全 LU 分解共轭梯度方法对该数学模型进行求解, 得到测试井关井后的压力响应, 再对该压力响应与实测压力数据进行拟合, 即得到试井解释参数。

2 试井解释参数敏感性

2.1 水体体积对压力及压力导数的影响

当水体体积不同时, 油藏的压力及压力导数曲

线有着很大的不同 (图 2)。当压力波传播到底水时, 引起底水对油藏的能量供给, 所以压力变化趋势变缓, 即在油藏得到能量补充后, 压力导数曲线下降, 底水体积不同, 其补充能量的程度也不相同, 导致压力导数曲线的下降程度和持续时间不同; 在底水和油藏共同达到拟稳态后, 压力导数曲线会出现水平段。

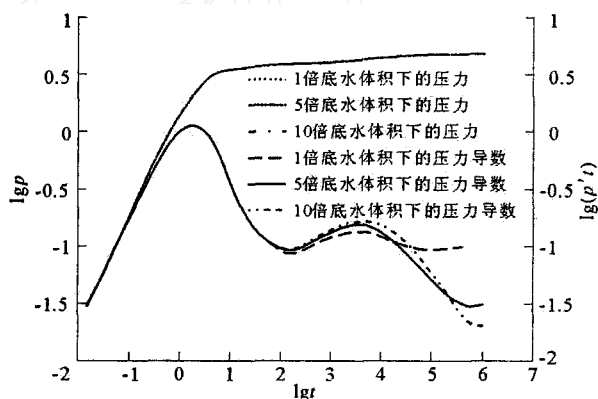
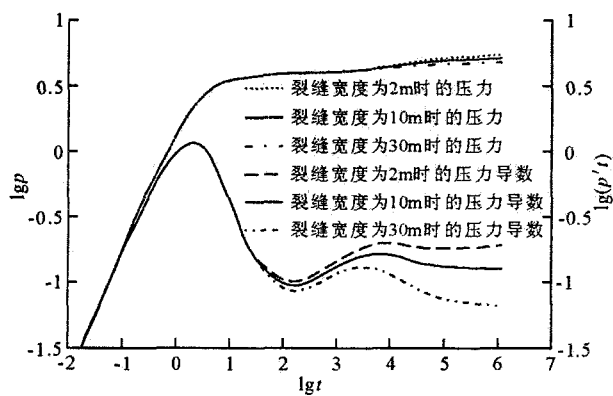


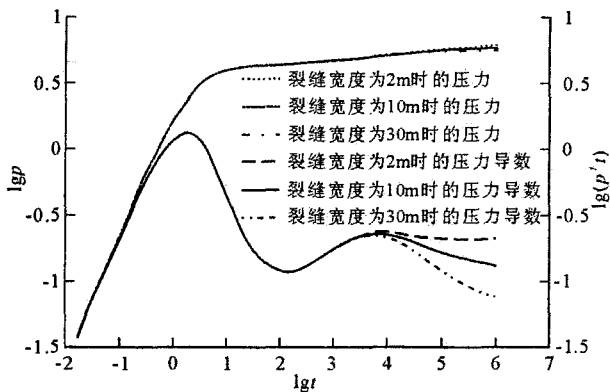
图 2 裂缝不过油井油藏不同底水体积对压力及压力导数的影响

2.2 高渗透带对压力及压力导数的影响

当裂缝穿过油井时, 裂缝宽度与压力及压力导数的关系曲线表明 (图 3a), 当裂缝较窄时, 由于其导流能力的限制, 底水对油藏的供给速度有限, 所以



a—裂缝和油井相交



b—裂缝离井一定距离

图 3 裂缝宽度对压力及压力导数的影响

压力导数曲线的下降速度和程度较小;当裂缝较宽时,底水补充油藏能量的速度较大,压力导数曲线下降的速度和程度也较大。

当裂缝离油井一段距离时,裂缝宽度与压力及压力导数的关系曲线显示(图 3b),由于裂缝导流能力的影响,宽度较小的裂缝对压力及压力导数的影响较小;宽度较大的裂缝对压力及压力导数的影响较大。虽然图 3a 和图 3b 非常相似,但仔细对比发现,图 3a 中底水的影响早在窜流阶段甚至在井筒储存阶段就已经发生了,而图 3b 中底水的影响则是在窜流结束之后才发生的,这是由于裂缝离井一定距离时,压力需要一定的时间才能到达裂缝,而底水通过裂缝对油藏能量的补充也相应地滞后。

3 实例应用

塔河油田 T739 井钻探时漏失密度为 $1.15 \sim 1.16 \text{ g/cm}^3$ 的泥浆达 500 m^3 ,完井期间漏失泥浆量为 28 m^3 。之后用 230 m^3 密度为 $1.01 \sim 1.02 \text{ g/cm}^3$ 的清水替喷,排出油水混合物达 45 m^3 后投产。

基本参数包括:平均产油量为 $72 \text{ m}^3/\text{d}$,油藏厚度为 5 m ,油层总孔隙度为 5% ,综合压缩系数为 $9.53 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$,地层原油粘度为 $2.722 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,地层原油体积系数为 $1.048 \text{ m}^3/\text{m}^3$,井筒半径为 0.075 m ,地层水密度为 1.140 g/cm^3 ,地层原油密度为 0.912 g/cm^3 。

通过分析压力及压力导数曲线,并结合该井所处构造、岩性特征及完井方式,表明该油藏具有极强的非均质性。在裸眼完井获得油气流后,一直采用 6 mm 油嘴生产,该井稳产 12 d ,产液量和含水率变化不大,表明该井有充足的能量补充。利用新建模型进行了解释及压力拟合(图 4)。解释结果为:井筒储存系数为 $0.00067 \text{ m}^3/\text{MPa}$,水平渗透率为 $34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,表皮系数为 9.90 ,垂向渗透率为 $72 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。由于该井在钻井过程中漏失高密度泥浆较多,因此,解释的表皮系数较大和渗透率较低与实际

情况相符,并且产量和流压与稳定产能公式的计算结果一致,解释结果符合生产情况。

4 结论

底水体积的大小及其与油藏的连通方式对该类油藏试井解释的压力及压力导数曲线有着很大的影响,压力波到达底水后,底水对油藏进行能量补充,使得压力变化变缓,即压力导数曲线下降。底水体积的大小决定了压力导数曲线后期下降的程度,而裂缝的宽度则影响着压力导数曲线下降的速度和程度,油井和裂缝的相对距离决定了压力导数曲线下降的早晚。这之前文献中直接假设底水为定压边界,压力导数曲线急速下降,不存在后期水平段有着很大的区别。

在塔河油田的实际应用结果证实,新方法具有很强的实用性,能为底水碳酸盐岩油藏的研究提供指导。在对底水碳酸盐岩油藏油井的测试过程中,要尽可能地测试到后期径向流的出现,这样在试井解释的过程中才可以对底水水体的体积进行有效的判断。

参考文献:

- [1] 高承泰. 串漏垂向干扰试井的特征及解释方法[J]. 石油学报, 1994, 4(2): 65 - 73.
- [2] 宋付权, 刘慈群. 低渗透垂直补给油藏中水平井流态分析[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(4): 35 - 37.
- [3] 宋付权, 刘慈群. 低渗油藏中含启动压力梯度水平井生产动态[J]. 西安石油学院学报, 1999, 14(3): 11 - 14.
- [4] 马建国. 多分层试井技术研究[J]. 油气井测试, 1999, 8(4): 32 - 35.
- [5] 孙长东, 张同义, 邹艳华, 等. 水平井试井分析方法研究及应用[J]. 石油仪器, 2004, 18(5): 1 - 4.
- [6] 范学平, 黄建民, 唐愉拉, 等. 用边界元方法分析射孔完井非稳定渗流问题[J]. 西南石油学院学报, 1996, 18(3): 57 - 66.
- [7] 张德志, 王子胜, 姚军. 三重介质油藏干扰试井压力动态特征[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(1): 74 - 76.
- [8] 刘静, 康毅力, 陈锐, 等. 碳酸盐岩储层损害机理及保护技术研究现状与发展趋势[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(1): 99 - 101.
- [9] 李培廉, 张希明, 陈志海. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 113 - 172.
- [10] Kazemi H. Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fractured distribution[J]. SPEJ, 1969, 246(12): 452 - 462.

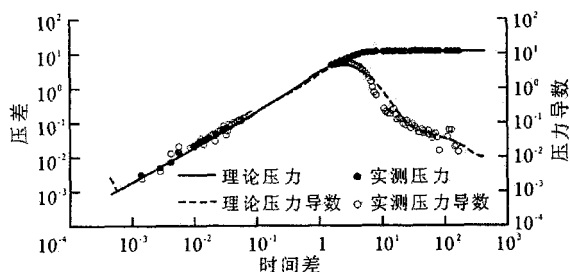


图 4 T739 井压力及压力导数双对数拟合曲线

编辑 常迎梅

theory of high resolution sequence stratigraphy can classify the reservoir inner episode. The practice proves that the precision of that can meet the demands of reservoir development.

Key words: glutenite, high resolution, sequence stratigraphy, fan delta, reservoir inner episode

Li Hui, Geological Scientific Research Institute, Shengli Oilfield Company of SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China

Liu Shuhui, Jia Yuru. Evaluation on the quality of 3D seismic data in Jiyang Depression. *PCRE*, 2006, 13(6): 52 ~ 54
By the end of 2004, the total area of 3D seismic data is 21 154. 72 km² in Jiyang Depression, which covers the whole area in the main hydrocarbon accumulation zones. The data are collected in different time with various qualities. 3D seismic data of 161 blocks are evaluated using quantitative calculation and qualitative evaluation according to different depressions. Seismic data of 24 blocks are I type, seismic data of 107 blocks are II type, and seismic data of 30 blocks are III type. Secondary seismic acquisition will be made in the area of III type data and great exploration potential.

Key words: migration data, quality, 3D seismic, Jiyang Depression

Liu Shuhui, Geological Scientific Research Institute, Shengli Oilfield Company of SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China

Yan Jianping, Shou Xiangyun, Li Zunzhi. Application of secondary logging interpretation models in reserves standard exchange. *PGRE*, 2006, 13(6): 55 ~ 58

During the reserves standard exchange of each Chinese petroliferous province, secondary interpretation model is built with the idea of well logging information calibrated by core analysis. That is, using the method of mathematical statistics makes the relations between the well logging data and core information, then quantitative interpretation and computer process can be made using these relations. Key technical problems of the secondary interpretation model are discussed which is built on core analysis and well - logging information. For example, single unit and multiple regression analysis, well log correction and information normalization method and depth matching. The key reservoir parameters are calculated for more than 80 wells in Chenjiazhuang area of Shengli petroliferous province based on their data of core, testing and logging. The average absolute errors is all lower than 1.3% and coincidence degree of the interpretation is up to 89%. The interpretation precision of the formed secondary interpretation models may meet the demands of reserve standard exchange.

Key words: reserve standard exchange, secondary logging in-

terpretation, regression analysis of single unit, multiple regression analysis

Yan Jianping, Faculty of Geo - resources and Information, China University of Petroleum (East China), Dongying City, Shandong Province, 257061, China

Ran Qiyou, Hu Jianguo, Xiao Yuru. No selectivity of waterflooding characteristic curve to crude oil viscosity—how to use waterflooding characteristic curve correctly. *PGRE*, 2006, 13(6): 59 ~ 62

Waterflooding characteristic curve has an important role in calibrating recoverable reserves in China. The key is how to understand and use waterflooding characteristic curve correctly. An argument whether or not waterflooding characteristic curve is selective to crude oil viscosity for a long time has some influences on using the waterflooding characteristic curve widely. Based on lots of oil reservoir cases, the relationship between the waterflooding characteristic curve and the crude oil viscosity is studied in different views, and it proves that the waterflooding characteristic curve is not selective to the crude oil viscosity.

Key words: waterflooding characteristic curve, crude oil viscosity, selectivity

Ran Qiyou, Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 100083, China

Yang Jian, Yao Jun, Wang Zisheng et al. Numerical well test model of carbonate oil reservoirs with bottom water and its application. *PGRE*, 2006, 13(6): 63 ~ 65

A well - test model of 3D oil/water two phases for carbonate oil reservoirs with bottom water is established and solved by the incomplete LU decomposition conjugate gradient method. The effect of the reservoir parameters on the well test interpretation curves of the carbonate oil reservoirs with bottom water is analyzed. The results show that: the distance between the fracture and the oil well determines the response time of the influence of bottom water on oil well pressure, and the volume of the bottom water determines the drop degree and the time of the pressure derivative curve. The well test interpretation results of the oil wells in the bottom water oil reservoir of Tahe Oilfield tallies with the geology and production state well.

Key words: carbonate oil reservoir with bottom water, numerical well test, oil/water two phase flow

Yang Jian, Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying City, Shandong Province, 257061, China

Mou Zhenbao, Fan Tailiang. Mathematical model with unsteady - state filtering flow of vertically fractured well with varying conductivity for closed circle oil reservoir. *PGRE*,