

文章编号: 1000-4874(2007)03-0332-06

带启动压力梯度的双孔压敏介质 压力动态及其应用研究*

张允¹, 王子胜¹, 姚军¹, 张德志^{1,2}

(1. 中国石油大学开发系, 山东东营 257061;

2. 中国石化胜利油田有限公司地质科学研究院, 山东东营 257015)

摘 要: 通过在流动方程中加入启动压力梯度, 并考虑地层渗透率随压力的变化发生变化, 建立了带启动压力梯度的双孔压敏介质油藏试井解释模型; 通过隐式格式对所形成的非线性抛物型方程进行了线性化, 采用追赶法进行了求解; 通过对参数的敏感性分析表明: 启动压力梯度和渗透率变化模数都对压力及压力导数有着很大的影响, 导致径向流段不复存在, 压力及压力导数曲线在后期上翘; 将形成的方法在胜利油田的低渗透潜山油藏进行了应用, 解释结果更加符合地质实际, 表明了该方法的正确性和实用性。

关 键 词: 启动压力梯度; 压敏介质; 双重孔隙; 压力动态; 实际应用

中图分类号: TE312 **文献标识码:** A

Study and application of pressure transient of naturally fractured reservoirs with stress-sensitive and start pressure grade

ZHANG Yun¹, WANG Zi-sheng¹,YAO Jun¹, ZHANG De-zhi^{1,2}

(1. China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Geological Scientific Research Institute, Shengli Oilfield Co., Ltd.
Dongying 257015, China)

Abstract: Adding the term of the start pressure grade to the flow equations and considering the variation of permeability via pressure the welltesting interpretation model of naturally fractured reservoirs with stress-sensitive and start pressure grade was established. The nonlinear equations formed above were linearized through the implicit format and were resolved by the LU decomposition. The analysis of parameter sensitivity showed that the start pressure grade and the permeability modulus affected the pressure and pressure derivative strongly. Then the radial flow section no longer existed. The pressure and pressure derivative went up in the later sections. The methods were used in the under-mountain reservoirs with low permeability of the Shengli Oilfield. The results showed that it agrees with the geological facts and the present method is valid and practical.

* 收稿日期: 2006-12-02 (2007-01-25 修改稿)

作者简介: 张允(1978—), 男, 山东临沂人, 博士生。

Key words: start pressure grade; stress-sensitive; dual porosity; pressure transient; application

1 前言

石油在多孔介质中低速渗流时,其中的表面活性物质(沥青、胶质、酚、酯等)会与岩石之间产生吸附作用,或在粘土矿物表面形成水化膜,从而对流体的流动产生极大的阻力,因此必须有一个启动压力梯度来克服吸附层的阻力或引起水化膜的破坏,促使流体流动。同时在低渗透油藏的生产中,由于地层压力下降,导致储集层骨架变形,使油层的孔隙度和渗透率降低,这种现象称为压敏效应。具有这一特点的油藏称为压敏介质油藏。冯文光^[1~3]等对低渗透的非达西渗流进行了研究;Pedrosa^[4~5]等对压敏介质的压力动态进行了研究,其后又有很多的学者^[6~17]对低渗、压敏单一、双重和三重介质进行了研究,但目前对带启动压力梯度的双孔压敏介质的研究较少。

2 带启动压力梯度的双孔压敏介质油藏试井解释模型

2.1 物理模型

考虑低渗透双重孔隙介质油藏由基岩和裂缝两种连续介质组成,基岩系统向裂缝发生拟稳态窜流,而流体通过裂缝系统流向井筒,如图1所示。

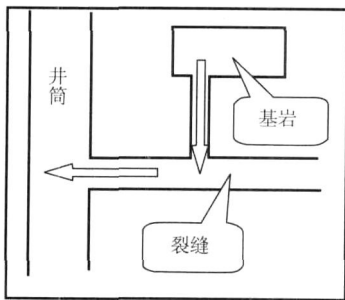


图1 低渗透双重介质油藏模型示意图

考虑单层油藏中一口井的情况,并作如下假设:

- ①油井以定产量生产;
- ②流体在地层流动为等温流动;
- ③油井半径为 r_w , 考虑井筒储存和表皮效应的影响;
- ④油井生产前,地层中各点的压力均匀分布,均为 p_i ;
- ⑤忽略重力和毛管力的影响;

⑥每种介质(基岩或裂缝)的孔隙度与另一种介质的压力变动相对独立;

⑦地层流体为单相微可压缩,且压缩系数为常数,流动满足非达西渗流定律;

⑧地层岩石微可压缩,且压缩系数为常数,但其压缩可引起地层渗透率的显著变化。

2.2 数学模型

2.2.1 运动方程

假设启动压力梯度为 λ , 则如上所述的渗流特征用数学方程可表示为:

$$\begin{cases} v_f = 0 & \frac{\partial p_f}{\partial r} < \lambda \\ v_f = -\frac{k_f}{\mu} \left(\frac{\partial p_f}{\partial r} - \lambda \right) & \frac{\partial p_f}{\partial r} \geq \lambda \end{cases} \quad (1)$$

2.2.2 状态方程

对于低渗透双重介质油藏,不考虑基岩的变形,仅考虑裂缝渗透率随压力的变化而变化,类似于压缩系数的定义,假设一个裂缝渗透率模数:

$$\gamma = -\frac{1}{k_f} \frac{\partial k_f}{\partial p_f} \quad (2)$$

假设裂缝渗透率模数在测试过程中保持不变,则对(2)式进行积分可以得到:

$$k_f = k_{f0} e^{-\gamma(p_i - p_f)} \quad (3)$$

2.2.3 数学模型的建立

将以上式(1)和式(3)代入双孔介质连续性方程,再加上初始条件、内边界和无限大外边界条件,经过无因次化可以得到如下的试井解释模型——裂缝中流体流动的无因次方程:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D e^{-\gamma_D p_{Df}} \frac{\partial p_{Df}}{\partial r_D} \right) - D \gamma_D e^{-\gamma_D p_{Df}} \frac{\partial p_{Df}}{\partial r_D} + \\ & \frac{1}{r_D} e^{-\gamma_D p_{Df}} D + \lambda_{mf} (p_{Dm} - p_{Df}) = \omega \frac{\partial p_{Df}}{\partial t_D} \end{aligned} \quad (4)$$

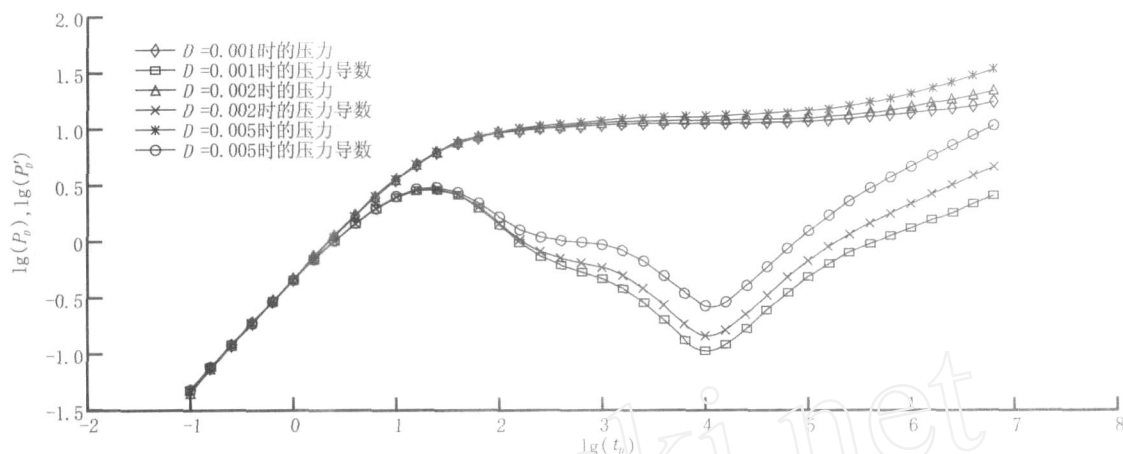


图2 变形双孔非达西渗流模型不同的启动压力梯度对比图

基岩中流体流动的无因次方程:

$$D = \frac{K_{f0} h r_w}{1.842 \times 10^{-3} q_{fB}} \lambda,$$

$$-\lambda_{mf} (p_{Dm} - p_{Df}) = \omega_m \frac{\partial p_{Dm}}{\partial t_D} \quad (5)$$

$$y_D = \frac{K_{f0} h}{1.842 \times 10^{-3} q_{fB}} y, \quad \lambda_{mf} = \frac{\alpha K_m r_w^2}{k_{f0}}$$

初始条件:

$$p_{Dm}(r_D, 0) = p_{Df}(r_D, 0) = 0 \quad (6)$$

无因次内边界条件:

$$\begin{cases} C_D \frac{\partial p_{wD}}{\partial t_D} - e^{-y_D p_{Df}} \left(\frac{\partial p_{Df}}{\partial r_D} + D \right)_{r_D=1} = 1 \\ p_{wD} [p_{Df} - S e^{-y_D p_{Df}} \left(\frac{\partial p_{Df}}{\partial r_D} + D \right)]_{r_D=1} \end{cases} \quad (7)$$

无因次无限大外边界条件:

$$p_{Df}(\infty, t_D) = p_{Df}(\infty, t_D) = 0 \quad (8)$$

其中无因次量的定义如下:

$$r_D = \frac{r}{r_w}, \quad t_D = \frac{3.6 K_{f0}}{\phi \mu C_{f0} r_w^2} t,$$

$$p_{Dj} = \frac{K_{f0} h}{1.842 \times 10^{-3} q_{fB}} (p_i - p_j) \quad (j = m, f),$$

$$\omega_f = \frac{\phi C_{f0}}{\phi C_{f1}}, \quad C_D = \frac{C}{2\pi \phi h C_{f1} r_w^2},$$

方程(4)~(8)组成了带启动压力梯度的双孔压敏介质油藏的无因次试井解释模型。该模型为典型的非线性抛物型方程,类似的比如非线性扩散方程,反应-扩散方程,粘性流体力学方程组等也都是典型的非线性抛物型方程,可以采用隐式格式对其进行线性化,之后采用追赶法进行求解^[15]。

3 参数敏感性分析

3.1 启动压力梯度的影响

启动压力梯度的大小标志着流体在地层中产生流动的难易程度,所以启动压力梯度越大,则在定产量的情况下,测试过程中压力的变化就越大、越快,表现在压力及压力导数曲线上则是启动压力梯度越大,压力及压力导数曲线位置越高,导数曲线已不存在径向流水平直线段,而是呈上升的趋势,如图2所示。

3.2 渗透率变化模数的影响

渗透率变化模数的大小影响着在生产和测试过程中渗透率变化的快慢,渗透率模数越大,表明当地层压力下降时,渗透率下降的速度越快;当油井以定产量生产时,渗透率越小则压力降越大,压力降落速度也就越快,这又反过来加速了渗透率的减小;表现在压力及压力导数曲线上就是两者都出现了抬升的

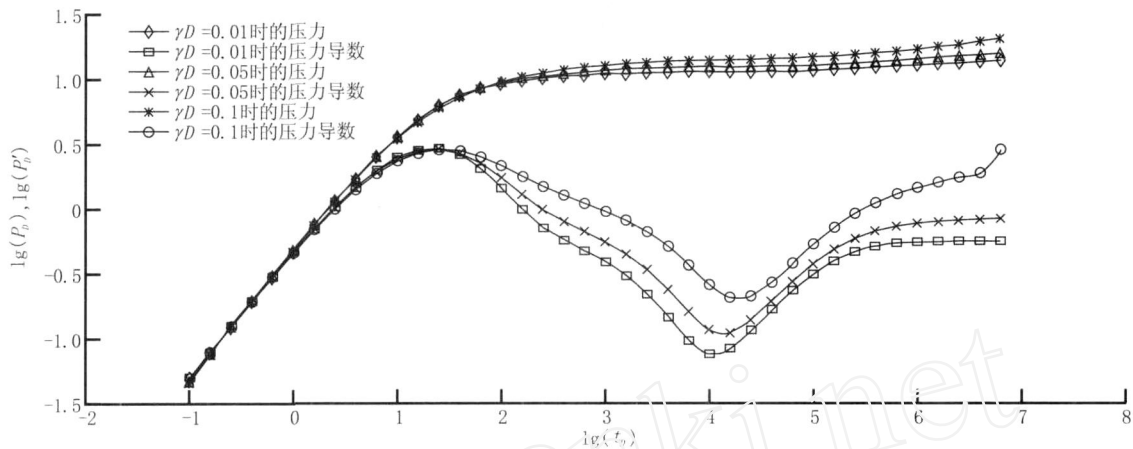


图3 不同渗透率模数对比图

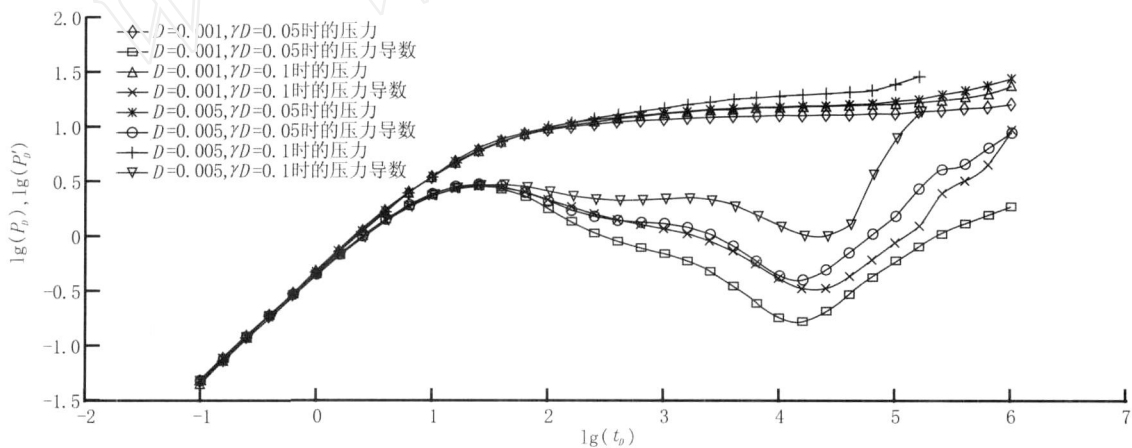


图4 不同的启动压力梯度对应不同的渗透率模数的压力对比图

现象,导数曲线上径向流水平段也不复存在,如图3所示。

3.3 启动压力梯度和渗透率变化模数影响对比

由对启动压力梯度和渗透率模数对压力动态的影响的分析可以看出,两者会导致压力及压力导数呈现上升的趋势,在导数曲线上的径向流水平线段消失,两者的影响非常相似,如图4所示,所以在实际应用时,要结合实际的地质和岩石物理特征,对具体的影响因素做出正确的判断。

4 实例应用

4.1 测试井基本情况

4.1.1 构造特征

某井是老河口地区的第一口探井,该井构造位置位于济阳拗陷沾化凹陷东北,埕东潜山披覆构造带的

北东倾没部位,东界桩西潜山披覆构造,南西接埕东潜山,北西方向与埕北洼陷相邻。由于受埕东、桩西、埕北三个潜山带及。多期断裂活动影响,使本区断裂发育,构造比较复杂,有大小断层十余条。

4.1.2 储层特征

该井自上而下钻遇三套油层:沙一段、沙三段和沙四段。沙一段是碳酸盐岩(以白云岩及生物灰岩为主),沙三段为粉细砂岩及灰质砂岩,沙四段以细砂岩、含砾砂岩为主。

该井测试井段为沙三段下部储层,岩性为浅灰色荧光灰质粉砂岩以及棕褐色油斑灰质粉砂岩。该层虽然是灰质砂岩较致密,但能形成较发育的裂缝(钻井至3306.08m发生井涌及油气浸),从而成为较好的储集空间。电阻以中阻、高阻为特征。

4.2 测试井基本数据

试井解释过程中所选用的基础数据见表1。

表 1 某井基础参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
孔隙度	0.10	地层原油黏度 (mPa · s)	0.5
井半径 (m)	0.07	总压缩系 (10 ⁻³ MPa ⁻¹)	16.7
油层有效厚度 (m)	9.4/4 层	地层原油体积系数	1.2105
原油相对密度 (g/ cm ³)	0.6908	关井前产量 m ³ / d	18.22

4.3 测试情况

该井于 1989 年 4 月 15 日至 4 月 24 日对沙三段下部 3305.8 m~3318.3 m(9.4 m/4 层)进行了压降试井,测得了一条非常好的压降曲线。

4.4 曲线特征分析与解释模型选择

图 5 是压降曲线的双对数图。曲线早期是井筒储存和表皮的影响,随后表现为径向流现象,接着压力导数曲线先上翘后下跌,类似封闭边界的影响或组合边界的影响。

采用 Saphir3.10 软件解释时,需要加两条 13 m 的近距离的封闭边界和一条 34 m 的等压边界来拟合后期的压力导数曲线变化,这和地质实际是不相符的。

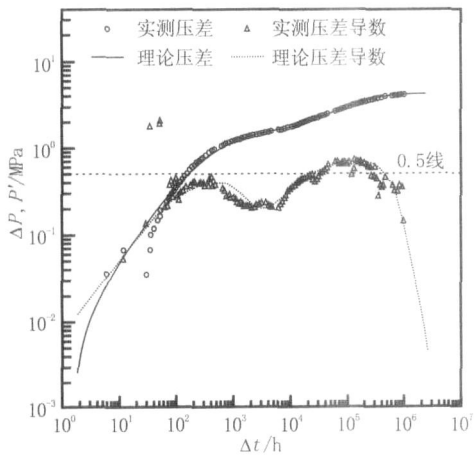


图 5 某井压降双对数拟合图

考虑到本地区断层及裂缝发育,且钻井过程中漏失大量泥浆这一事实,并且渗透率极低,采用“井筒储存+表皮+双重介质油藏+启动压力梯度+介质变形+等压边界”的试井解释模型,拟合得到的双对数

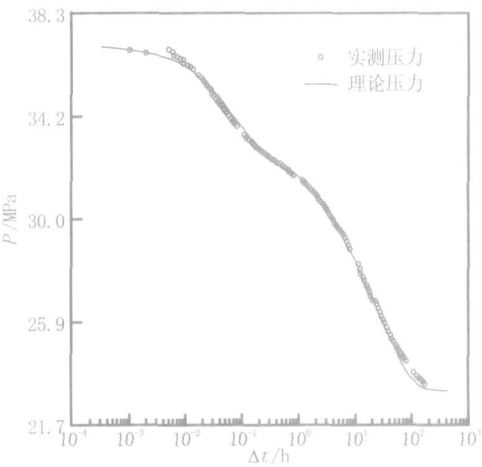


图 6 某井压降半对数拟合曲线
曲线如图 5 和图 6 所示。

4.5 解释结果对比与分析

表 2 给出了采用本文的方法所得出的试井解释结果。从表 2 的解释结果来看,油藏渗透率都非常低;采用 Saphir 软件解释得到的结果具有两条 13 m 的不渗透边界,和地质实际有着较大的出入;考虑启动压力梯度和介质变形因素的影响,采用本文方法所解释出的 70 m 定压边界则正好和距离其较近的油水界面相呼应。

5 结论

通过在流动方程中加入启动压力梯度,并考虑在生产过程中渗透率随压力的变化,建立了带启动压力梯度的双孔压敏介质油藏试井解释模型。

采用隐式格式对所形成的非线性方程组进行了线性化处理,并采用追赶法进行了求解。

对压力动态的参数敏感性分析表明:启动压力梯度和渗透率模数对压力及压力导数都有着很大影响,

表2 某井不同模型的解释参数对比

解释参数	Saphir 3.0	本文方法
渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	1.50	0.65
表皮系数	-1.35	-3.6
裂缝弹性储容比	/	0.124 8
窜流系数	/	1.088×10^{-4}
井筒储存系数 ($10^{-6}\text{m}^3/\text{MPa}$)	2.46	2.78
封闭边界距离 (m)	13、13	/
等压边界 (m)	34	70
启动压力梯度	/	0.02
渗透率模数	/	0.03

会导致曲线后期上翘。

将该方法在胜利油田的低渗透潜山油藏进行了实际应用,其解释结果更加符合油田的地质实际,说明了该理论和方法的正确性和实用性。

参 考 文 献:

[1] 冯文光.非达西低速渗流的研究现状与展望[J]. 石油勘探与开发,1986,13(4):76-80.
[2] 宋付权,刘慈群.低渗透油藏启动压力梯度的简单测量[J]. 特种油气藏,2000,7(1):23-25.

[3] 刘建军,刘先贵,胡雅祯.低渗透岩石非线性渗流规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(4):556-561.
[4] PEDROSA O A Jr. Pressure transient response in stress-sensitive formations [R]. Paper SPE 15115, 1986. 213-221.
[5] KIKANIJ, PEDROSA O A Jr. Perturbation analysis of stress-sensitive reservoir[J]. SPEFE, 1991, 6(3):379-386.
[6] 冯文光,葛家理.单一介质、双重介质中非定常非达西低速渗流问题[J]. 石油勘探与开发,1985,(1):35-37.
[7] 程时清,李跃刚.低速非达西渗流试井模型的数值解及其应用[J]. 天然气工业,1995,16(3):27-30.
[8] 姚军,王子胜,孙鹏等.超完善井条件下三重介质试井解释模型求解方法[J]. 石油大学学报(自然科学版),2005,29(3):61-64.
[9] 赵冬梅,姚军,王子胜.压敏三重介质油藏压力响应特征[J]. 计算物理,2005,22(5):444-448.
[10] 王子胜,姚军.缝洞向井筒供液时三重压敏介质油藏压力响应特征研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑,2006,21(1):84-89.
[11] 杨坚,姚军,王子胜.三重介质复合油藏压力动态特征研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑,2005,20(4):418-425.
[12] 雷征东,李相方,蒋维军.低速非达西双渗油藏 DST 段塞流测试渗流模型及应用[J]. 水动力学研究与进展, A 辑,2006,21(1):69-75.
[13] 高春光,侯晓春,刘慈群等.双重介质二维不定常渗流研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑,2005,20(6):755-760.
[14] 殷代印,蒲辉,吴应湘.低渗透裂缝油藏渗吸法采油数值模拟理论研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑,2004,19(4):440-445.
[15] 郭永存,卢德唐,马凌霄.低渗透油藏渗流的差分法数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, A 辑,2004,19(3):288-293.
[16] SAMANIEGO V F, et al. An investigation of transient flow of reservoir fluids considering pressure dependent rock and fluid properties [J]. SPEJ, 1977, (April):140-150.
[17] 同登科,姜东梅,陈钦雷.变形双重介质油藏动态特征[J]. 石油大学学报(自然科学版),2001,25(5):53-56.
[18] 陆金甫,关治.偏微分方程数值解法[M]. 北京:清华大学出版社,1987. 182-194.