[**文章编号**] 1001-246X(2005)05-0444-05

压敏三重介质油藏压力响应特征

赵冬梅, 姚 军, 王子胜

(石油大学(华东),山东东营 257061)

[摘 要] 建立由基岩系统、裂缝系统和溶洞系统组成,并考虑溶洞渗透率随压降的增加呈指数减小的压敏三 重介质油藏试井解释模型,采用隐式差分格式对考虑井筒储存和污染效应的情况进行了求解.研究表明:无因 次渗透率模数导致压力及压力导数明显增大,窜流系数影响窜流阶段出现的早晚,弹性储容比影响压力导数曲 线"凹陷"的宽度和深度,外边界条件的影响则和普通三重介质明显不同,表皮系数主要影响全部压力和压力 导数早期的"凸起",而无因次渗透率模数则主要影响压力和压力导数的后期.

[关键词] 应力敏感;三重介质;压力响应

[中图分类号] TE353 [文献标识码] A

0 引言

所谓压敏介质^[11],指容易发生部分或者全部不可逆变形的介质,这种变形对介质的物性产生明显影响. 早在 1928 年,地下水力学研究者 Meinzr^[2]指出多孔介质在一定的条件下存在塑性变形,后来著名学者 Raghavan 和 Miller^[3]提出了" 拟压力 "模型,并进行了数值求解;Samaniego^[4~6]等采用数值方法研究压敏介质渗 流问题,计算了瞬态产量递减曲线,给出了长时间渐进解式并将其应用于变流量常规试井分析之中; Pedrosa^[7]引入渗透率变异关系式,用小扰动方法求解压敏介质非线性渗流数学模型,给出了点源的一阶近似 解,Kikani 和 Pedrosa^[8]用小扰动方法进一步给出了二阶近似解式;应用 Kikani 和 Pedrosa 的研究结果,Zhang^[9] 等扩展了渗透率变异模型;同登科^[10]等对双重变形介质采用 Douglas-Jones 预估 - 校正方法进行求解;迄今为 止还没有发现对压敏三重介质的研究.

在新疆塔河油田,由于其地层属于碳酸盐岩且埋深达到将近 6 000 m;在生产过程中油井的初期产量很高,而后迅速的衰减,表现出压敏介质的特征.

1 压敏三重介质数学模型的建立和求解

1.1 数学模型的建立

描述流体在地层中的不稳态流动时,一般都假设渗 透率保持不变.实际上岩石的物理性质随着孔隙压力变 化是不断变化的,对于裂缝型油藏由于裂缝孔隙尺寸较 大,渗透率随压力的变化比普通油藏渗透率的变化要大 得多.通常,地层孔隙压力的降低会导致有效应力的增 加,导致渗透率减小.

基岩孔隙系统、裂缝系统和溶洞系统组成的三重介 质油藏如图 1 所示. 在考虑试井过程中的一般假设的基 础上,又作如下额外的假设:

地层岩石可压缩,并因此引起渗透率的变化;



图 1 物理模型 Fig. 1 Sketch map of the flow system

[[]收稿日期] 2004 - 06 - 01; [修回日期] 2004 - 12 - 13

[[]作者简介] 赵冬梅(1963 -),女,山西,高级工程师,从事提高油气采收率理论与技术方面的研究,北京朝阳区惠新东街甲6号中国石化 股份有限公司油田事业部,100029.

每种介质(基岩、裂缝或溶洞)的孔隙度与另一种介质的压力变化无关;

溶洞与井筒连通,忽略裂缝和基岩向井筒的供液,而基岩和裂缝只作为"源"项.基岩和溶洞之间以及 裂缝与溶洞之间发生拟稳态窜流.

定义一个和压缩系数类似的渗透率随压力变化模数,并假设其在生产过程中保持不变,

$$= \frac{1}{k_v} \frac{\mathrm{d}k_v}{\mathrm{d}p_v}.$$
 (1)

对(1)式进行积分,可以得到

$$k_{\rm v}/k_{\rm v0} = {\rm e}^{-(p_{\rm i}-p)}.$$
(2)

在无限大三重介质油藏溶洞与井筒连通情况下无因次试井解释模型为

$$\left| \frac{1}{r_{\rm D}} \frac{\partial}{\partial r_{\rm D}} \right| r_{\rm D} e^{-D^{\rm P}_{\rm Dv}} \frac{\partial p_{\rm Dv}}{\partial r_{\rm D}} \right| - m \frac{\partial p_{\rm Dm}}{\partial t_{\rm D}} - f \frac{\partial p_{\rm Dv}}{\partial t_{\rm D}} = v \frac{\partial p_{\rm Dv}}{\partial t_{\rm D}},$$

$$- mv \left(p_{\rm Dm} - p_{\rm Dv} \right) = m \frac{\partial p_{\rm Dm}}{\partial t_{\rm D}},$$

$$- v \left(p_{\rm Df} - p_{\rm Dv} \right) = f \frac{\partial p_{\rm Df}}{\partial t_{\rm D}},$$

$$- v \left(p_{\rm Df} - p_{\rm Dv} \right) = f \frac{\partial p_{\rm Df}}{\partial t_{\rm D}},$$

$$p_{\rm Dj} \left(r_{\rm D}, t_{\rm D} \right) |_{t_{\rm D}} = 0 = 0 \quad (j = m, f, v), \quad 1 \quad r_{\rm D} + v,$$

$$C_{\rm D} \frac{d p_{\rm wD}}{d t_{\rm D}} - e^{-D^{\rm P}_{\rm Dv}} \frac{\partial p_{\rm Dv}}{\partial r_{\rm D}} \Big|_{r_{\rm D}} = 1,$$

$$p_{\rm wD} = \left[p_{\rm Dv} - s e^{-D^{\rm P}_{\rm Dv}} \frac{\partial p_{\rm Dv}}{\partial r_{\rm D}} \right]_{r_{\rm D}} = 1,$$

$$\lim_{r_{\rm D}} p_{\rm Dv} \left(r_{\rm D}, t_{\rm D} \right) = 0.$$
(3)

对于有界圆形封闭地层,外边界条件为

$$\frac{\partial p_{\mathrm{Dv}}}{\partial r_{\mathrm{D}}} \Big|_{r_{\mathrm{D}} = r_{\mathrm{e}\mathrm{D}}} = 0 , \qquad (4)$$

对于有界圆形定压力地层,外边界条件为

$$p_{\rm Dv}(r_{\rm eD}, t_{\rm D}) = 0.$$
 (5)

这里

$$r_{\rm D} = \frac{r}{r_{\rm w}}, \quad r_{\rm eD} = \frac{r_{\rm e}}{r_{\rm w}}, \quad t_{\rm D} = \frac{3.6 \, k_{\rm v0}}{\mu r_{\rm w}^2 \, \phi_{\rm t} \, C_{\rm t}} t , \quad {}_{\rm D} = \frac{1.842 \, \times 10^{-3} \, q\mu B}{k_{\rm v0} \, h} ,$$
$$p_{\rm Dj} \left(r_{\rm D} \, , t_{\rm D} \right) = \frac{k_{\rm v0} \, h}{1.842 \, \times 10^{-3} \, q\mu B} \left[p_{\rm i} - p_{\rm j} \left(r \, , t \right) \right] \qquad (j = {\rm m} \, , {\rm f} \, , {\rm v}) \, ,$$
$$= \frac{\phi_{\rm i} c_{\rm i}}{\phi_{\rm t} \, c_{\rm t}} \quad (j = {\rm m} \, , {\rm f} \, , {\rm v}) \, , \qquad {}_{j{\rm v}} = \frac{-i k_{\rm i} r_{\rm w}^2}{k_{\rm v0}} \quad (j = {\rm m} \, , {\rm f}) \, , \quad C_{\rm D} = \frac{C}{2 \, \phi_{\rm t} \, c_{\rm t} \, h r_{\rm w}^2} ,$$

式中,下标 m,f,v,t 分别代表基岩、裂缝、溶洞和总系统, k_{v0} 为溶洞初始渗透率(μ m²);k 为渗透率(μ m²);p = p(r,t)为地层瞬时压力(MPa); ϕ 为孔隙度,小数;c 为压缩系数(MPa⁻¹); mv, _{vf}分别为基岩系统和裂缝系统 与溶洞系统之间的窜流系数; 为弹性储容比,无因次; μ 为流体粘度(MPa s); r_v 为井筒半径(m); r_c 为外边 界半径(m);h 为油层有效厚度(m);q 为地面流量(m³ d⁻¹); p_i 为原始地层压力(MPa); _D 为渗透率变化模 数,无因次,c 为井筒存储系数(m³ (MPa)⁻¹);s 为表皮系数,无因次.

压敏介质和一般应力不敏感介质的差别表现在数学模型(3)中的第一个方程中,如果为压敏介质则第1 项含有一个由于渗透率变化所引起的指数项,而应力不敏感介质则不存在.

1.2 数学模型的求解

数学方程组(3)中的非线性扩散方程为典型的非线性抛物型方程^[12],采用全隐式的差分格式进行求解, 此处不再赘述.

2 参数影响分析

446

2.1 无因次渗透率模数 。的影响

溶洞渗透率模数表示渗透率的变化程度,当其值小到一定程度,即溶洞的渗透率变化不明显时,压敏介 质和普通介质的压力曲线差别不大;研究表明,当渗透率模数小到0.01时,其压力之间几乎没有差别(图2). 溶洞渗透率模数越大,则溶洞渗透率在压力变化的过程中变化越快,相应导致压力的变化越大,这表现在压 力及压力导数曲线上则是压力曲线较高,相应的压力导数越大(图3).



2.2 窜流系数对压力动态的影响



to the pressure transient (log-log)



Fig. 5 Effect of the inter-porosity flow factor to the pressure transient (semi-log)

2.3 介质弹性储容比对压力动态的影响

7

弹性储容比的大小影响窜流发生的程度和时间的长短.如果两种介质之间的弹性储容比相差较小,则两 者之间的窜流程度较小,窜流时间较短;如果两种介质之间的弹性储容比相差较大,则两者之间的窜流程度 较大,窜流时间较长;这在图 6 中表现得很清楚.图 6 中溶洞的弹性储容比没有发生变化,均为 0.01. 当裂缝 的弹性储容比为 0.02 时,压力导数双对数曲线上第 1 个" 凹陷 '明显较浅较窄,表示此时裂缝向溶洞的窜流 程度较小和时间较短,而第 2 个" 凹陷 '明显变深变宽则表示基岩(当裂缝弹性储容比为 0.02 时,由于溶洞的 弹性储容比不变,所以基岩的弹性储容比相应的变大)向缝动系统的窜流时间较长;当裂缝弹性储容比为 0.07 时正好相反.

2.4 外边界条件对压力动态的影响

油井在无限大油藏中生产时最终会达到无限作用径向流段,此时压力的变化同样会导致渗透率的变化,进而 又影响压力的变化;而在有限油藏中生产时则会受到边 界的影响,封闭边界由于其不渗透性而导致地层的压力 达到拟稳定状态,在地层渗透率不变的情况下,压力的变 化率为常数,而渗透率变化会改变这种压力变化率为常 数的现象,加大压力的变化率;定压边界由于其对地层能 量的供给作用会使得压力达到稳定的状态,即压力保持 不变,所以即使渗透率会随压力发生变化,但是当地层中 的流动达到稳态时,也不会再有影响(图7).



2.5 无因次渗透率模数和表皮系数对压力动态影响的差别

无因次渗透率模数对压力及压力导数的影响和表皮系数的影响有很大不同.表皮系数对压力的影响是整个过程,对压力导数则是影响早期的"凸起",而不会影响窜流和径向流的部分;无因次渗透率模数对压力的影响则存在于后期,并且对压力导数窜流和径向流部分的影响也相当大,因为只有当压力降达到一定的程度才会对渗透率产生明显的影响,如图 8 所示.







图 8 无因次渗透率模数和表皮系数对压力响应影响的区别

Fig. 8 Effect of the permeability modulus and wellbore skin to the pressure transient

3 结论

7

通过以上的分析,可以得到如下结论:

1) 压力敏感油藏只有当其无因次渗透率模数大于 0.01 时,其压力动态才能够和不考虑压敏效应的介质的渗透率的压力动态有明显的区别;

2) 当无因次渗透率模数大于 0.01 时,压力的变化幅度会随着无因次渗透率模数增加,其变化幅度越来越大;

3)无因次渗透率模数对三重介质的窜流阶段没有影响,只是在相同的条件下,其无因次压力值要明显高于不考虑压敏效应的介质的无因次压力;

4)外边界条件对压敏三重介质的影响也和普通的三重介质不同,无限大油藏时径向流段的导数曲线已 经不再是 0.5 线;圆形封闭油藏时其边界反应也要更强烈,而不是普通油藏压力导数成一条斜率为 0.5 的直 线;当为圆形定压边界时,其导数曲线的反应仍然是下掉;

5) 无因次渗透率模数对压力及其压力导数的影响和表皮参数不同,表皮系数对整个压力曲线有影响,压

力导数曲线的只在前期"凸起"处有影响;而无因次渗透率模数对压力及压力导数的后期产生较大的影响;

6) 当油井定产量生产时,由于压力降的逐渐增加导致了近井地带的渗透率的急剧减小,而渗透率的急剧 减小也就导致了压力降更加强烈的增加,最终导致裂缝、溶洞等一些和油井连通好的油流通道的闭合,所以 也就出现了产量的迅速衰减.

- [参考文献]
- Pu Huaqing, Wang Yupu. Technology of well test interpretation in complicated oil reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.100 - 103.
- [2] Meinzer O E. Compressibility and elasticity of artesian aquifers [J]. Econ Geol, 1928, 23:263 271.
- [3] Raghavan R, Miller F G. An investigation by numerical methods of the effect of pressure dependent rock and fluid properties on well flow tests [A]. Paper SPE 2671,1969.
- [4] Samaniego V F, et al. An investigation of transient flow of reservoir fluid considering pressure dependent rock and fluid properties [J].
 SPEJ, 1977(4):140 150.
- [5] Samaniego V F, Cinco-Ley H. Production rate decline in pressure-sensitive reservoirs [J]. JCPT, 1980(3):75 86.
- [6] Samaniego V F, Cinco-Ley H. On the determination of the pressure-dependent characteristic of a reservoir through transient pressure testing [A]. Paper SPE 19774, 1989.
- [7] Pedrosa O A Jr. Pressure transient response in stress sensitive formations [A]. Paper SPE 15115, 1986.
- [8] Kikani J, Pedrosa O A Jr. Perturbation analysis of stress sensitive reservoirs [J]. SPEFE, 1991, 379 386.
- [9] Zhang M Y, et al. New insights in pressure transient analysis for stress sensitive reservoirs [A]. Paper SPE 28420, 1994.
- [10] Tong Dengke, Jiang Dongmei, Wang Ruihe. Flow analysis in tress sensitive dual-medium[J]. Journal of the Applied Mechanics, 2002, 19(2):56 - 60.
- [11] Yao Jun, Dai Weihua, Wang Zisheng. Well test interpretation method of triple-meduim reservoir with variable wellbore storage [J]. Journal of the University of Petroleum China, 2004, 28(1):46 51.
- [12] Lu Jinfu, Guan Zhi. Numerical solution of partial derivative equation [M]. Beijing: The Press of Tsinghua University, 1987, 187 189.
- [13] Tong Dengke. The behavior of dual-permeability model with order two gradient [J]. Chinese J Computational Physics, 2002(2).

The Pressure- Transient Characteristics of a Stress-Sensitive Triple-Medium Reservoir

ZHAO Dong mei, YAO Jun, WANG Zi-sheng (University of Petroleum, Dong Ying 257061, China)

Abstract: A test well interpretation model consisting of matrix, fractures and vugs is presented in which the permeability of vugs decreases exponentially with pressure drop. A mathematical model which takes into account the effect of wellbore storage and skin factor is calculated in a fully-implicit finite-difference scheme. It is shown that the dimensionless permeability modulus causes a increase of pressure and its derivative. The interprosity-flow factor determines the time of the interprosity flow. The storativity-ratio influences the width and depth of the "concave " in the pressure derivative. The effect of the outer-boundary differs from that of a normal triple medium. The skin factor affects the whole pressure and the "heave " in the pressure derivative curve, while the dimensionless permeability modulus mainly affects the later pressure and pressure derivative.

Key words: stress-sensitive; triple-medium reservoirs; pressure transient

Received date: 2004 - 06 - 01; Revised date: 2004 - 12 - 13

448