2006年1月

文章编号:1000-4874(2006)01-0084-06

缝洞向井筒供液时三重压敏介质 油藏压力响应特征研究

王子胜, 姚军

(中国石油大学(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,并考虑溶洞渗透率和裂缝渗透率随压降的增加呈指数减小的三 重压敏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。讨论了溶洞和裂缝无因 次渗透率模数、介质间窜流、弹性储容比、外边界条件及表皮系数对压力响应的影响。结果表明:无因次渗透率模数导致压力 及压力导数明显上升,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: 压力敏感; 三重介质; 压力响应 中图分类号: TV139.1 **文献标识码**:A

Study of pressure-transient characteristic for stress-sensitive triple-medium reservoirs with fractures and vugs conveying fluids to wellbore

WANG Zi-sheng, YAO Jun

(College of Petroleum Engineering of University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract : A welltest interpretation model consisting of matrix, fractures and vugs is presented considering permeability of vugs and fractures decreases exponentially. The mathematical model which takes into account the effects of wellbore storage and skin parameter is calculated using the fully-implicit finite-difference form. Effects of permeability modulus, interporosity flow parameter, storativity-ratio, outer-boundary and skin parameter to the pressure response are discussed. The results indicate that permeability modulus causes the increase of pressure and pressure derivative, interporosity flow parameter determines the time of the interporosity flow, storativity-ratio influences the width and depth of the "concave" on the pressure derivative curve, the effect of the outer-boundary is different from the normal triple medium, skin parameter worked on the whole time of the pressure and the "heave" of the pressure derivative, but the permeability modulus mainly worked on the late time of the pressure and pressure derivative.

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

^{*} 收稿日期: 2005-04-26(2005-07-05 修改稿) 作者简介: 王子胜(1980~),男,河南原阳人,博士生。

1 前言

所谓压敏介质^[1],指容易发生部分或者全部可逆 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,地下水力学方面的研究者 Meinzr^[2]曾经指出多孔介质在一定的条件下存在弹 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^[4,5,6] 等人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]等人扩 展了渗透率变异模型;同登科^[10]等人对双重变形介 质采用 Douglas Jones 预估-校正方法进行了求解;迄 今还没有人对缝洞向井筒供液三重压敏介质的压力 动态进行研究。

新疆塔河油田奥陶系属于碳酸盐岩地层,其埋深 达到 6000 多米;该油田在生产的过程中,油井初期的 产量普遍较高,但生产一段时间之后,其产量迅速下 降,甚至没有产能,表现出压敏介质的特征。

2 缝洞向井筒供液三重压敏介质数学 模型的建立和求解

2.1 数学模型的建立

基岩系统、裂缝系统和溶洞系统组成的三重介质 油藏,其简化物理模型如图(1)所示,图中 *p*为地层 与孔隙之间形成的净压差,并作如下假设:

油井以定产量生产; 地层流体为单相微可压 缩,且压缩系数为常数; 地层岩石可压缩,并因此引 起渗透率的变化; 地层流体在三个渗流场内流动满 足达西定律; 考虑井筒储存和表皮效应的影响; 油井测试前地层中各点的压力均匀; 忽略重力和毛 管力的影响,并设地层中的压力梯度比较小; 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、裂缝与井筒连通,忽略基岩向井 筒的供液,基岩只作为"源"项;裂缝与溶洞、基岩和裂 缝以及基岩和溶洞之间发生拟稳态窜流。



图 1 透率的变化模数和溶洞渗透率的变化模数,其定义和 压缩系数的定义相类似,如下:

$$= \frac{1}{K_f} \frac{\partial K_f}{\partial P_f} \tag{1}$$

$$v = \frac{1}{K_v} \frac{\partial K_v}{\partial P_v}$$
(2)

假设裂缝和溶洞的渗透率变化模数在生产过程 中保持不变,则对(1)式和(2)式进行积分可以得到:

$$\frac{K_f}{K_{f0}} = e^{-f(P_i - P_f)}$$
(3)

$$\frac{K_{\nu}}{K_{\nu 0}} = e^{-\nu (P_i - P_{\nu})}$$
(4)

对图(1)所示的物理模型的数学描述,即无限大 三重压敏介质油藏溶洞和裂缝向井筒供液情况下无 因次试井解释数学模型^[11],可由方程(5)~(12)构 成:

溶洞系统中流体的渗流方程:

$$K_{\nu}^{0} \frac{1}{r_{D}} \frac{\partial}{\partial r_{D}} \left(e^{-D_{\nu}P_{D\nu}} r_{D} \frac{\partial P_{Df}}{\partial r_{D}} \right) + m_{\nu} \left(P_{Dm} - P_{D\nu} \right) +$$

$$v_f e^{-D_f P_{D_f}} (P_{D_f} - P_{D_v}) = v \frac{\partial P_{D_v}}{\partial t_D}$$
(5)

裂缝系统中流体的渗流方程:

85

在这个模型中,假设两个渗透率模数,即裂缝渗

$$K_{f}^{0} \frac{1}{r_{D}} \frac{\partial}{\partial r_{D}} \left(e^{-D_{f}P_{Df}} r_{D} \frac{\partial P_{Df}}{\partial r_{D}} \right) + m_{f} \left(P_{Dm} - P_{Df} \right) -$$

$$v_f e^{-D_f P_{D_f}} (P_{D_f} - P_{D_v}) = v \frac{\partial P_{D_f}}{\partial t_D}$$
(6)

基岩系统中流体的拟稳态窜流方程:

$$- mf (P_{Dm} - P_{Df}) - mv (P_{Dm} - P_{Dv}) = m \frac{\partial P_{Dm}}{\partial t_D}$$
(7)

方程(8)和(9)表示考虑井筒储存和表皮系数的 内边界条件:

$$C_{D} \frac{\mathrm{d} P_{wD}}{\mathrm{d} t} - \left(K_{f}^{0} \mathrm{e}^{-D_{f}} P_{Df} \frac{\partial P_{Df}}{\partial r_{D}} + K_{v}^{0} \mathrm{e}^{-D_{v}} P_{Dv} \frac{\partial P_{Dv}}{\partial r_{D}} \right) = 1$$

$$(8)$$

$$P_{wD} = [P_{Dv} - S_v e^{-Dv} \frac{\partial P_{Dv}}{\partial r_D}]_{r_D=1} =$$

$$[P_{Df} - S_f e^{-D_f P_{Df}} \frac{\partial P_{Df}}{\partial r_D}]_{r_D = 1}$$
(9)

系统的初始条件:

2

$$P_{Dv}(r_D, 0) = P_{Df}(r_D, 0) = P_{Dm}(r_D, 0) = 0$$
(11)

对于无限大油藏,系统的外边界条件为:

$$\lim_{r_D} P_{Dv} (r_D, t_D) = \lim_{r_D} P_{Df} (r_D, t_D) =$$
$$\lim_{r_D} P_{Dm} (r_D, t_D) = 0$$
(12)

另外,对于有界圆形封闭地层,系统的外边界条 件为:

$$\frac{\partial P_{Dv}}{\partial r_D} / r_D = r_{eD} = \frac{\partial P_{Df}}{\partial r_D} / r_D = r_{eD} = \frac{\partial P_{Dm}}{\partial r_D} / r_D = r_{eD} = 0$$
(13)

对于有界圆形定压力地层,系统的外边界条件 为:

$$P_{Dv}(r_{eD}, t_D) = P_{Df}(r_{eD}, t_D) = P_{Dm}(r_{eD}, t_D) = 0$$
(14)

这里:

$$r_D = \frac{r}{r_w}$$
,

$$P_{Df}(r_{D}, t_{D}) = \frac{(K_{f0} + K_{v0})h}{1.842 \times 10^{-3} d\mu B} [P_{i} - P(r, t)]$$

$$(j = m, f, v)$$

$$t_{D} = \frac{3.6(K_{f0} + K_{v0})}{rC_{t}\mu r_{w}^{2}} t,$$

$$K_{f}^{0} = \frac{K_{f0}}{K_{f0} + K_{v0}}, \quad K_{v}^{0} = 1 - K_{f}^{0}$$

$$D_{f} = \frac{1.842 \times 10^{-3} d\mu B}{(K_{f0} + K_{v0})h} f,$$

$$m_{f} = \frac{m_{f} K_{m} r_{w}^{2}}{K_{f0} + K_{v0}}, \quad v_{f} = \frac{vr K_{f0} r_{w}^{2}}{K_{f0} + K_{v0}},$$

$$v = \frac{-vC_{v}}{rC_{t}}, \quad f = \frac{-rC_{f}}{rC_{t}}$$

$$m = \frac{-mC_m}{tC_t} = 1 - f - v,$$

$$C_D = \frac{C}{2 t C_t h r_w^2}$$

界条 式中,下标 m、f、v 分别代表基岩系统、裂缝系统和溶洞系统,K₀、K₀分别为溶洞和裂缝的初始渗透率,um²; K 为渗透率,um²; P = P(r, t) 为地层瞬时压力,MPa; 为孔隙度,小数;C 为压缩系数,MPa⁻¹; ,为地层总的孔隙度,无因次;C 为地层总的压缩系(13)数,MPa⁻¹; mv、vf、mf分别为基岩和溶洞、裂缝和溶洞以及基岩和裂缝之间的窜流系数,无因次;为弹

性储容比,无因次; *u* 为流体粘度, mPa ·s; *r_w* 为井筒 半径, m; *r_e* 为外边界半径, m; *h* 为油层有效厚度, m; *q* 为地面流量, m³/d; *P_i* 为原始地层压力, MPa; *D_f* 、 *D_v* 分别为裂缝和溶洞的无因次渗透率变化模数, 无 因次; *C* 为井筒存储系数, m³/MPa; *S* 为表皮系数, 无因次。

2.2 数学模型的求解

方程(5)~(12)组成的无限大油藏缝洞向井筒供 液的三重压敏介质试井解释数学模型为典型的非线 性抛物型方程^[12],采用全隐式的差分格式进行求解; 对于有限封闭和定压边界的情况则分别用方程(13) 或(14)代替方程(12)即可。

3 地层参数对缝洞向井筒供液的三重 压敏介质压力动态的影响分析

下面就各无因次参数对井筒中地层中部位置的 压力(以下简称"压力")和压力对时间对数导数(以下 简称"压力导数"),即 dp/dlnt 的影响进行分析。

3.1 无因次渗透率模数 _D 的影响

由于在压降(压恢)的过程中压力的降低(升高), 使得地层溶洞和裂缝渗透率变小(变大);所以在测试 的过程中,压力变化的速度会越来越快,同一时刻相 应的压力变化值也会较大;表现在压力及压力导数曲 线上则是压力和压力导数曲线都同时升高,如图2所 示。



图 2 不同渗透率模数下三重压敏介质的压力响应

3.2 窜流系数对压力动态的影响

2

窜流系数表征了介质之间窜流发生的难易程度, 当窜流系数逐渐变大时,裂缝向溶洞发生窜流的时间



越早,在双对数导数曲线上其表现为窜流阶段的导数 曲线"凹陷"出现时间较早,并且由于井筒储存对压力 响应曲线早期的影响,使得其部分掩盖了裂缝向溶洞 的窜流。在实际的试井测试数据的获取中更是如此, 由于地层和井筒条件的复杂性以及压力计记录等方 面的问题,所以所取得的早期数据会出现不准确或者 不全面的问题,这也就导致了在实际的试井曲线上往 往第一个"凹陷"不出现的情况;由于渗透率模数对裂 缝和溶洞的渗透率有着很大的影响,所以其相应的也 就影响了窜流阶段。

3.3 溶洞渗透率比对压力响应的影响



图 4 溶洞渗透率比对压力响应的影响 (_{Df} = _{Dv} = 0.05)

由图 4 可以明显的看出,溶洞的渗透率比越大, 即溶洞和裂缝渗透率之间的差别越大,在压力导数双 对数曲线上,第一个"凹陷"-裂缝向溶洞窜流阶段越 深;而当溶洞和裂缝渗透率之间的差别逐渐变小、甚 至相等时,导数曲线上的第一个"凹陷"逐渐消失,此 时溶洞和裂缝理论上属于同一种的介质。

3.4 外边界条件对压力响应的影响



图 5 外边界条件对压力响应的影响 (_{Df} = _{Dy} = 0.05)

由图 5 可以看出,当缝洞向井筒供液三重压敏介 质外边界条件对压力及压力导数的影响也和不考虑 压敏时不同;当外边界条件为无限大时,径向流阶段 的压力导数曲线值大于 0.5 线,并且随着无因次渗透 率模数的变化而变化;当外边界条件为圆形封闭边界 时,外边界反应阶段的压力导数曲线也不是一条斜率 为 1.0 的直线,其斜率也随着无因次渗透率模数的变 化而变化;而当外边界条件为圆形定压边界时,外边 界反应阶段的压力导数曲线和不考虑压敏的介质一 样下掉,只是下掉的幅度不同。



图 6 无因次渗透率变化模数和 表皮系数对压力响应的影响

2

3.5 无因次渗透率变化模数和表皮系数对压力响应 影响的区别

由图 6 可以看出,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存在着很大的不同。 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",而不会影响其窜流和径向流的部 分;无因次渗透率模数对压力的影响则是存在于后 期,并且其对压力导数窜流和径向流部分的影响也相 当大,其原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。

4 结论

通过以上的分析,可以得到如下的几个结论:

(1)建立了裂缝和溶洞向井筒供液的三重压敏 介质油藏试井解释模型,并采用数值方法进行了求 解;

(2) 压力的变化幅度会随着无因次渗透率变化 模数的增加,变化幅度越来越大;

(3) 窜流系数和渗透率对比压力及压力导数的 影响和普通三重介质相同,只是由于渗透率模数对窜 流部分有影响,相应的也就影响了窜流阶段曲线的形态;

(4)外边界条件对三重压敏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1.0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 影响和表皮系数不同,表皮系数影响着整个的压力曲线,但是只对压力导数曲线的前期"凸起"处有影响; 而无因次渗透率模数则只是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剧烈的增加,最终导 致裂缝、溶洞等一些和油井连通好的油流通道不同程 度的闭合,所以也就出现了产量的迅速衰减,这和新 疆塔河油田的实际情况相符合。

参考文献:

- [1] 巢华庆,王玉普. 复杂油藏试井技术[M]. 北京:石油工 业出版社,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[R]. Paper SPE2671,1969.
- [4] SAMANIEGO V F, et al. An investigation of transient flow of reservoir fluid considering pressure dependent rock and fluid properties[J]. SPEJ, 1997. (Apr.): 140-150.
- [5] SAMANIEGO V F, CINCO-LEY H. Production rate decline in pressure-sensitive reservoirs [J]. JCPT, 1980, (July-Sept.): 75-86.

- [6] SAMANIEGO V F & CINCO-LEY H. On the determination of the pressure-dependent characteristic of a reservoir through transient pressure testing [R]. Paper SPE 19774, 1989.
- [7] PEDROSA O A. Pressure transient response in stresssensitive formations[R]. Paper SPE 15115, 1986.
- [8] KIKANIJ & PEDROSA O A. Perturbation analysis of stress sensitive reservoirs[J]. SPEFE, 1991, (Sept.): 379-386.
- [9] ZHANGM Y, et al. New insights in pressure-transient analysis for stress-sensitive reservoirs [R]. Paper SPE 28420, 1994.
- [10] 同登科,姜东梅,王瑞和. 变形双重介质广义流动分析[J]. 应用力学学报,2002,19(2):56-60.
- [11] 姚军,戴卫华,王子胜. 变井筒储存的三重介质油藏试井 解释方法研究[J]. 石油大学学报,2004,28(1):46-51.
- [12] 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. 187-189.