

文章编号:1000-5870(2005)03-0061-04

超完善井条件下三重介质试井解释模型求解方法

姚 军¹, 王子胜¹, 孙 鹏², 李 宁³

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东东营 257061; 2. 中国石化西北石油局, 新疆乌鲁木齐 830011;
3. 胜利油田滨南采油厂, 山东滨州 256600)

摘要:无论是均质油藏还是碳酸盐岩油藏试井解释模型, 求解时负表皮系数会引起早期数据的不稳定。将 Ramey 提出的无限大均质油藏负表皮系数计算方法推广至具有边界的多重介质油藏, 即引入折算半径的同时, 对无因次时间、井筒储存系数、窜流系数以及测试井到边界的距离进行修正。计算结果表明, 利用该方法求解解释模型, 早期数据不发散、稳定性好。

关键词: 超完善井; 负表皮系数; 三重介质油藏; 试井; 解释模型; 求解方法

中图分类号: TE 353 **文献标识码:** A

Solving methods of triple-medium well testing interpretation model for super-perfect wells

YAO Jun¹, WANG Zi-sheng¹, SUN Peng², LI Ning³

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. North West Petroleum Bureau, China National Petrochemical Corporation, Urmqi 830011, China;
3. Binnan Oil Production Plant of Shengli Oilfield, Binzhou 256600, China)

Abstract: When well testing interpretation models applied to sandstone or carbonate reservoirs were solved, the instability of early phase data was caused by negative skin coefficient. The solving method, suitable for infinite homogeneity reservoirs proposed by Ramey, was extended to the multi-medium reservoir with boundary. The effective radius was introduced, and the parameters including dimensionless time, wellbore storage coefficient, crossflow coefficient and the distance from testing well to boundary were revised. The calculation results show that the stability of early phase data was improved greatly by the new solving method.

Key words: super-perfect well; negative skin coefficient; triple-medium reservoir; well testing; interpretation model; solving method

碳酸盐岩油藏往往发育有天然裂缝和溶蚀孔洞等孔隙类型, 在对这类油藏的试井数据进行解释时, 一般采用多重介质模型, 并且其表皮系数常为绝对值较大的负值。Barenblatt 等^[1-9]对双重介质或三重介质进行了理论研究, 但对多重介质的实际应用以及在此过程中出现的负表皮现象却都没有提及。笔者将 Ramey 提出的无限大均质油藏负表皮系数计算方法推广至具有边界的三重介质油藏, 即在引入折算半径的同时, 不仅对无因次时间和井筒储存系数进行修正, 而且对窜流系数、测试井到边界的距离等参数进行修正, 弹性储容比的定义与半径无关, 因此不必对其进行修正。

1 三重孔隙介质的物理和数学模型

1.1 物理模型

采用三重孔隙介质(基岩、裂缝和溶洞)模型(图 1), 考虑单层无限大油藏中 1 口井以定产量生产的情况, 并假设: (1) 地层流体和地层岩石微可压缩, 流体为单相, 且压缩系数为常数; (2) 地层流体在 3 个渗流场中的渗流均符合达西定律; (3) 油井测试前地层中各点压力相等; (4) 忽略重力和毛管压力的影响, 地层中的压力梯度较小; (5) 只有裂缝向井筒供液, 基岩和溶洞作为源向裂缝窜流, 其间的窜流为拟稳态窜流。

收稿日期: 2005-01-15

作者简介: 姚军(1964-), 男(汉族), 山东平邑人, 教授, 博士, 博士生导师, 从事油气田开发工程方面的教学与科研工作。

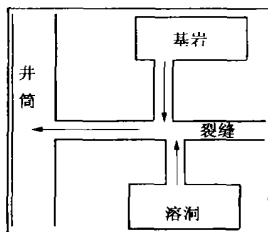


图 1 物理模型

1.2 数学模型

在物理模型及其假设的基础上,可以得到不考虑井筒储存系数和表皮效应的无因次试井解释数学模型。各渗流方程为

裂缝:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial p_{Df}}{\partial r_D} \right) - \omega_m \frac{\partial p_{Dm}}{\partial t_D} - \omega_v \frac{\partial p_{Dv}}{\partial t_D} = \omega_f \frac{\partial p_{Df}}{\partial t_D},$$

基质:

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

溶洞:

$$-\lambda_{vf}(p_{Dv} - p_{Df}) = \omega_v \frac{\partial p_{Dv}}{\partial t_D},$$

初始条件:

$$p_{Dj}(r_D, 0) = 0, \quad 1 \leq r_D \leq +\infty, \quad j = m, f, v,$$

外边界条件:

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} p_{Dj}(r_D, t_D) = 0,$$

内边界条件:

$$\left. \frac{\partial p_{Df}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = -1.$$

其中的无因次量定义如下:

$$r_D = \frac{r}{r_w}, \quad \lambda_{mf} = a_m r_w^2 \frac{k_m}{k_f}, \quad \lambda_{vf} = a_v r_w^2 \frac{k_v}{k_f},$$

$$t_D = \frac{3.6 k_f t}{\mu r_w^2 (\phi_m C_m + \phi_f C_f + \phi_v C_v)},$$

$$p_{Dj} = \frac{k_f h (p_i - p_j)}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B},$$

$$\omega_j = \frac{\phi_j C_j}{\phi_m C_m + \phi_f C_f + \phi_v C_v}, \quad j = m, f, v.$$

式中,下标 m, f, v 分别代表基岩、裂缝和溶洞系统; k 为渗透率, μm^2 ; $p = p(r, t)$ 为地层瞬时压力, MPa ; ϕ 为孔隙度, 小数; C 为压缩系数, MPa^{-1} ; λ_{mf} , λ_{vf} 分别为基岩系统和溶洞系统向裂缝系统的窜流系数; ω 为弹性储容比; μ 为流体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; r_w 为井筒半径, m ; h 为油层有效厚度, m ; q 为地面流量, m^3/d ; p_i 为原始地层压力, MPa 。

2 数学模型的求解

2.1 解析求解

对数学模型进行 Laplace 变换^[10], 假设:

$$\overline{p_{Dj}}(r, t) = \int_0^\infty \exp(-st) p(r, t) dt,$$

则可以得到拉氏空间的压力解为

$$\overline{p_{Dj}}(r_D, s) = \frac{K_0(\sqrt{sf(s)} r_D)}{s \sqrt{sf(s)} K_1(\sqrt{sf(s)})}.$$

其中

$$f(s) = \frac{a(s + \xi_1)(s + \xi_2)}{(s + \delta_1)(s + \delta_2)},$$

$$\xi_i = \frac{1}{2a} [-b + (-1)^i \sqrt{b^2 - 4ac}] \quad (i = 1, 2),$$

$$a = \omega_f, \quad \delta_j = \frac{\lambda_j}{\omega_j} \quad (j = m, f, v), \quad c = \frac{\lambda_{mf} \lambda_{vf}}{\omega_m \omega_v},$$

$$b = \frac{\lambda_{mf}}{\omega_m} (1 - \omega_m) + \frac{\lambda_{vf}}{\omega_v} (1 - \omega_v).$$

式中, s 为 Laplace 变量; $K_0(x)$, $K_1(x)$ 分别为 0 阶和 1 阶的第 2 类虚宗量 Bessel 函数。

2.2 考虑井筒储存系数和表皮系数时的压力求解

在实际生产过程中,由于钻井、作业中的外部液体的侵入,导致井筒附近地层的渗透率发生变化,并且由于井筒中的液体充满、相重新分布、液体的压缩性等原因,会产生井筒储存现象。可以在 Laplace 空间利用 Duhamel 原理进行快速压力响应计算^[11], 计算公式为

$$\overline{p_{wD}}(s) = \frac{s \overline{p_D}(s) + S}{s \{1 + C_D s [\overline{p_D}(s) + S]\}}. \quad (1)$$

式中, C_D 为无因次井筒储存系数; S 为表皮系数, 无因次。

式(1)就是考虑井筒储存和表皮效应的 Laplace 空间内的无因次井底压力解, 可以通过 Stehfest 数值 Laplace 反演方法把 $\overline{p_{wD}}(s)$ 反演到真实空间, 最后得到一组真实空间的考虑井筒储存和表皮效应的无因次井底压力解。

用上述方法在 $S > 0$ 的情况下计算时, 可以得到正确的结果, 文献[4]只考虑了这种情况; 但是当 $S < 0$ 时, 计算出来的压力曲线的早期会出现严重的发散现象, 如果不对这种情况进行处理, 则会给试井解释结果造成很大的误差。

3 负表皮系数在计算中的处理

早在 20 世纪 70 年代, R. J. Ramey^[12, 13] 就针对无限大均质油藏提出了负表皮系数的计算方法, 笔者将该方法推广到具有断层或边界的多重介质油

藏。先引入等效半径的概念:

$$r_{ewD} = r_{wD} \exp(-S)$$

式中, r_{ewD} 为无因次有效井筒半径; r_{wD} 为无因次井筒半径。

对无因次时间、无因次井筒储存系数以及介质之间的窜流系数^[14]进行如下修正:

$$t_D'' = t_{D\exp}(2S), C_D'' = C_{D\exp}(2S),$$
$$\lambda_{mf}'' = \lambda_{mf} \exp(-2S), \lambda_{vf}'' = \lambda_{vf} \exp(-2S).$$

由于在试井计算中边界的距离与压力波到达时间的平方根成正比^[15],对测试井到边界的距离 d 进行修正:

$$d'' = d \exp(-S).$$

对以上参数进行处理后,假设表皮系数 $S = 0$, 用以上的参数计算完压力之后,再将表皮系数还原得到其真实值,这样就可以得到表皮系数为负数时的压力值。

图 2,3 是利用 $C_D = 4500, S = -5, \lambda_{vf} = 1.0 \times 10^{-6}, \lambda_{mf} = 1.0 \times 10^{-8}, \omega_m = 0.80, \omega_f = 0.13, \omega_v = 0.07$ 这组参数计算出来的数据所做的压力和压力导数的双对数曲线图。

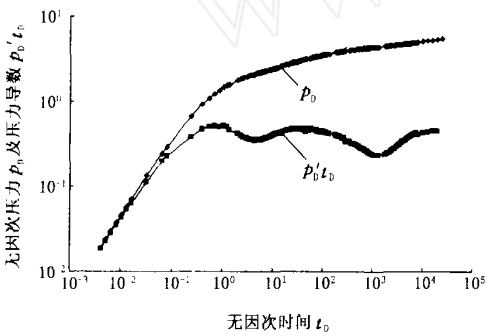


图 2 经过负表皮处理的压力及压力导数的双对数曲线

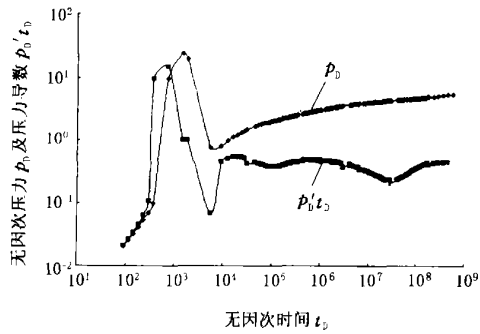


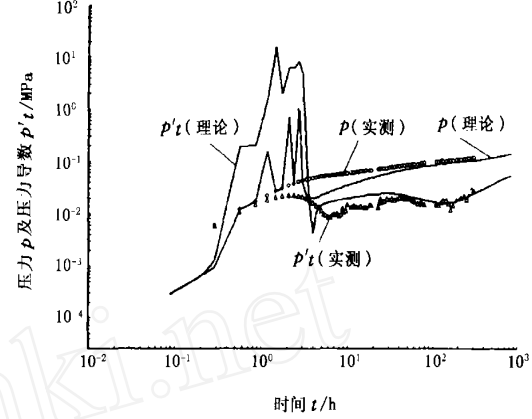
图 3 未经过负表皮处理的压力及压力导数的双对数曲线

图 2 为经过负表皮处理过的数据,曲线非常光滑;图 3 是未经过负表皮处理的数据,曲线早期出现

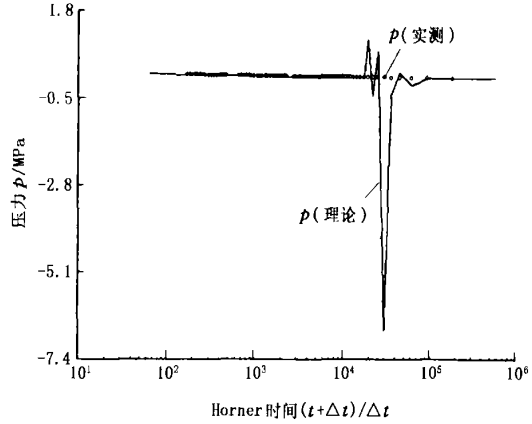
了数值发散的现象。

4 现场应用

某油田的 1 口油井的实测压力数据为:油井半径 0.12 m,生产时间 30 h,产量 214.6 m³/d,油层厚度 32 m,孔隙度 6.5%,原油粘度 10 mPa·s,体积系数 1.25。选用裂缝-井筒连通的三重孔隙介质模型对其进行解释。得出的拟合结果如图 4,5 所示。



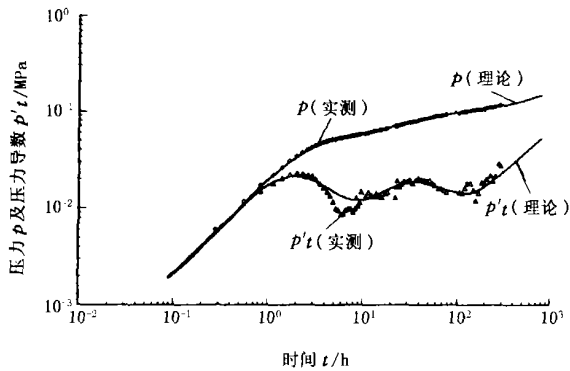
(a) 压力恢复测试双对数曲线



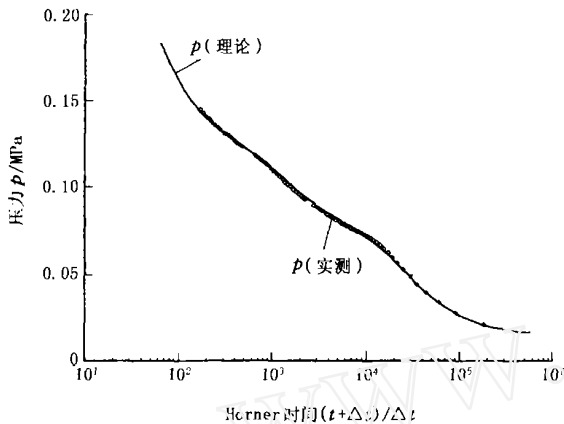
(b) 压力恢复 Horner 曲线

图 4 未经负表皮处理的拟合曲线

在采用常规试井解释方法和现场进行结果对比得出准确的渗透率值之后,曲线的高低只能由对表皮系数进行调节才能很好地拟合,但是当表皮系数小于一定数值之后,便会出现如图 4 所示的情况,并且在拟合中采用了变井筒储存的技术。解释结果为:井筒储存系数 3.617 m³/MPa,表皮系数 -8.48,裂缝渗透率 3.992 μm²,基岩向裂缝的窜流系数 4.74 × 10⁻⁹,基岩弹性储容比 0.9581,裂缝弹性储容比 0.0107,变井筒参数 α_D = -6.220, β_D = 39.68,溶洞向裂缝的窜流系数 6.30 × 10⁻⁹,平行不渗透率边界长 1020.0 m。这些参数与现场实际的地质数据吻合很好。



(a) 压力恢复测试双对数曲线



(b) 压力恢复 Horner 曲线

图 5 经表皮处理过后的拟合结果

5 结束语

在对多重介质油藏试井解释模型进行求解时, 如果不对表皮系数进行处理, 压力值在早期会发散, 从而得出错误的结果。提出的处理方法有效地避免了上述问题的发生, 并且得出了理想的结果。现场实测井的数据解释结果与实际的地质情况对比表明, 该方法正确、可靠, 稳定性好。

参考文献:

- [1] BARENBLATT G L, ZHEL TOV Yu P and KOCINA. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [J]. Soviet J App Math and Mech, 1960, 5 (XXIV): 1283 - 1303.
- [2] WARREN J E and ROOT P J. The behavior of naturally fracture reservoirs [R]. SPE 426, 1962.
- [3] ODEH A S. Unsteady-state behavior of naturally fractured reservoirs [J]. SPEJ, 1965, 5 (1): 60 - 64.
- [4] KAZEMI H. Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fractured distribution [J]. SPEJ, 1969, 9 (4): 451 - 462.
- [5] De SWAAN O. Analytic solutions for determining naturally fractured reservoir properties by well testing [J]. SPEJ, 1976, 16 (3): 117 - 122.
- [6] MAVOR M J and CINCO H L. Transient pressure behavior of naturally fractured reservoirs [R]. SPE 7977, 1979.
- [7] SERRA K, REYNOLDS A C and RAGHAVAN R. New pressure transient analysis methods for naturally fractured reservoirs [J]. JPT, 1983, 35 (10): 1902 - 1914.
- [8] DODDY Abdassah and IRAJ Ershaghi. Triple-porosity systems for representing naturally fractured reservoirs [R]. SPE 13409, 1986.
- [9] 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 (自然科学版), 2004, 28 (1): 46 - 51.
YAO Jun, DAI Wei-hua and WANG Zi-sheng. Well test interpretation method for triple medium reservoir with variable wellbore storage [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28 (1): 46 - 51.
- [10] EVERDINGEN A F Van and HURST W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs [J]. Trans AIME, 1949, 186: 305 - 324.
- [11] 姚军, 李爱芬. 单孔隙介质渗流问题的同一解 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 1999, 14 (3): 317 - 324.
YAO Jun and LI Ai-fen. General solution for seepage flow in single porous medium [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser A), 1999, 14 (3): 317 - 324.
- [12] AGARWAL R C and RAMEY H J. An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: analytical treatment [R]. SPE 2466, 1969.
- [13] WATTENBARGER A and RAMEY H J. An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: finite difference treatment [R]. SPE 2467, 1969.
- [14] 刘能强. 实用现代试井解释方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992. 98 - 119.
- [15] 刘尉宁. 砂岩油藏现代试井分析方法的进展及应用 [M]. 北京: 石油工业部科学技术情报研究所, 1987. 9 - 22.

(编辑 李志芬)