

油气勘探与开发

三重介质油藏非牛顿液不稳定渗流压力变化特征研究

王子胜, 姚 军, 张 凯

(中国石油大学(华东), 山东 东营 257061)

摘 要 文章对缝洞型碳酸盐岩油藏中非牛顿流体渗流时的压力动态特征进行了求解和特征分析, 对比了非牛顿流体和牛顿流体的差别, 并对影响压力动态的参数, 如幂律流指数、表皮系数、弹性储容比以及窜流系数和外边界条件等进行了分析。结果表明, 非牛顿流体的压力及压力导数都明显高于牛顿流体; 幂律流指数越小则压力和压力导数越大; 表皮系数和非牛顿流体幂律流指数对压力响应的有着明显的不同; 而弹性储容比和窜流系数的影响和普通三重介质相同, 只是由于非牛顿流体的影响其“凹陷”的位置升高; 外边界的影响也和牛顿流体的情况明显不同。

关键词 非牛顿流体 不稳定渗流 压力动态

1 前言

Van Poolen^[1]、Odeh^[2]、Ikoku^[3]等在 20 世纪 60、70 年代就对非牛顿液在均质油藏中的不稳定渗流进行了研究; 80 年代, 栾志安^[4]采用拉普拉斯变换和围道积分的方法, 对双重孔隙介质油藏中非牛顿液的不稳定渗流进行了计算。但是在新疆塔河和塔里木油田的地质研究中, 发现地层中不仅存在着基岩和裂缝, 同时还存在着较大的溶蚀孔洞, 使得双重介质对该类地层已不再适应。姚军^[5-7]等对三重介质进行了详细的研究。这些油田都存在着不少的稠油油藏, 所以对这类流体在三重介质中的渗流规律进行研究非常必要。

2 三重介质油藏非牛顿流体试井解释模型的建立和求解

描述稠油这类非牛顿液的方程多种多样, 在此采取了常用的幂律模型^[8]:

$$v_r^n = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1)$$

由上式可知, 其流量可以表示为:

$$q = 2\pi r h \left(\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \right)^{1/n} \quad (2)$$

对于三重介质^[9]油藏中流体的渗流, 由于基质的低渗透性和溶洞较差的连续性, 所以在此假设只有裂缝和井筒连通并向其供液, 而基岩和溶洞只是作为源向裂缝进行拟稳态的窜流。经过无因次化等一系列的推导, 并假设地层中的压力梯度比较小,

可以得出非牛顿液在上述三重介质油藏中的无因次渗流方程为:

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{n}{r} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) + \lambda_m r_D^{1-n} (p_{Dm} - p_D) + \\ \lambda_v r_D^{1-n} (p_{Dv} - p_D) = \omega_f r_D^{1-n} \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \\ - \lambda_m (p_{Dm} - p_D) = \omega_m \frac{\partial p_{Dm}}{\partial t_D} \\ - \lambda_v (p_{Dv} - p_D) = \omega_v \frac{\partial p_{Dv}}{\partial t_D} \end{cases} \quad (3)$$

对于考虑表皮系数和井筒存储的内边界条件可以表示为:

$$C_D \frac{dp_{wD}}{dt_D} - \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} = 1 \quad (4)$$

$$p_{wD} = \left[p_D - S \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right]_{r_D=1} \quad (5)$$

初始条件为:

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

对于无限大地层, 外边界条件为:

$$\lim_{r_D \rightarrow r_{oD}} p_{Dm}(r_D, t_D) = \lim_{r_D \rightarrow r_{oD}} p_D(r_D, t_D) = \lim_{r_D \rightarrow r_{oD}} p_{Dv}(r_D, t_D) = 0 \quad (7)$$

对于有界圆形封闭地层, 外边界条件为:

$$\frac{\partial p_{Dm}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{oD}} = \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{oD}} = \frac{\partial p_{Dv}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{oD}} = 0 \quad (8)$$

作者简介: 王子胜, 2002 年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 目前在中国石油大学(华东)攻读博士学位, 主要从事试井解释和数值模拟方法的研究工作。

对于有界圆形定压力地层, 外边界条件为:
 $p_{Dm}(r_{eD}, t_D) = p_{Df}(r_{eD}, t_D) = p_{Dv}(r_{eD}, t_D) = 0$ (9)
 以上无因次参数的定义及参数的意义如下:

$$t_D = \frac{t}{Gr_w^{3-n}}, r_D = \frac{r}{r_w}, p_{Df} = \frac{p_i - p_f}{\left(\frac{q}{2\pi h}\right)^n \frac{\mu}{k_f} r_w^{1-n}},$$

$$\omega_v = \frac{\phi_v C_{tv}}{\phi_f C_{tf}}, \omega_f = \frac{\phi_f C_{fv}}{\phi_f C_{ff}}$$

$$\lambda_{mf} = \frac{n\alpha_{mf} r_w^{3-n}}{k_f} \left(\frac{q}{2\pi h}\right)^{n-1}, \lambda_{vf} = \frac{n\alpha_{vf} r_w^{3-n}}{k_f} \left(\frac{q}{2\pi h}\right)^{n-1},$$

$$G = n\phi_f C_{fv} \frac{\mu}{k_f} \left(\frac{2\pi h}{q}\right)^{1-n}$$

式中: r_w ——井筒半径, m;
 k_f ——裂缝系统的渗透率, μm^2 ;
 ω ——各种介质的弹性储容比, 无因次;
 p ——压力, MPa;
 λ_{mf} ——基岩向裂缝的窜流系数, 无因次;
 λ_{vf} ——溶洞向裂缝的窜流系数, 无因次;
 h ——油层厚度, m;
 q ——油井产量, m^3/d ;

ϕ ——各种介质的孔隙度, 无因次;
 C_t ——压缩系数, MPa^{-1} ;
 S ——表皮系数, 无因次;
 C_D ——无因次井筒储存;
 下标 m——基岩;
 下标 f——裂缝;
 下标 v——溶洞;
 下标 t——总系统。

由方程 (3)~(9) 组成的数学模型可以采用数值方法进行求解^[10]。

3 敏感性参数分析

3.1 牛顿流体和非牛顿流体对压力响应的影响

从图 1 可以看出, 当非牛顿流体幂律流指数为 0.8 时, 其压力及压力导数都明显高于牛顿流体, 这是因非牛顿流体的流动规律与牛顿流体不同而导致的。非牛顿流体在流动过程中, 流速和压力梯度呈指数关系变化, 在流速和流量相同的情况下, 造成的压力降及压力变化速度都要高于牛顿流体。

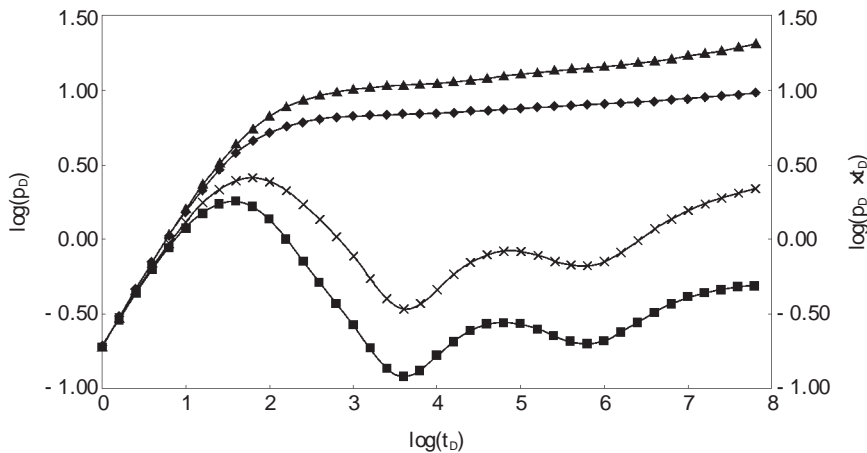


图 1 牛顿液和非牛顿液压力响应的对比

◆ 牛顿流体压力; ■ 牛顿流体压力导数; ▲ 非牛顿流体压力; × 非牛顿流体压力导数

3.2 幂律流指数对压力响应的影响

幂律流指数的大小决定着流体非牛顿性的强弱, 当幂律流指数为 1 时即为牛顿流体, 而当其越小时则表明流体的非牛顿性越强, 则其流体在流动过程中造成的压力降及压力变化速度越大。表现在压力及压力导数双对数曲线上则是幂律流指数越小, 其压力及压力导数曲线越高, 如图 2 所示。

3.3 溶洞弹性储容比对压力响应的影响

溶洞的弹性储容比表征着溶洞中的弹性储量

占总系统弹性储量的大小。溶洞弹性储容比越大, 则其向裂缝进行窜流的时间越长, 窜流程度越高; 而溶洞弹性储容比越小, 则其窜流时间越短, 窜流程度越小。由于裂缝的弹性储容比不变, 所以在第二个窜流阶段——基岩向缝洞窜流阶段正好和第一个窜流阶段相反, 即溶洞弹性储容比越小则缝洞系统的弹性储容比越小, 基岩的弹性储容比越大, 其窜流时间越长, 窜流程度越高; 否则相反。如图 3 所示。

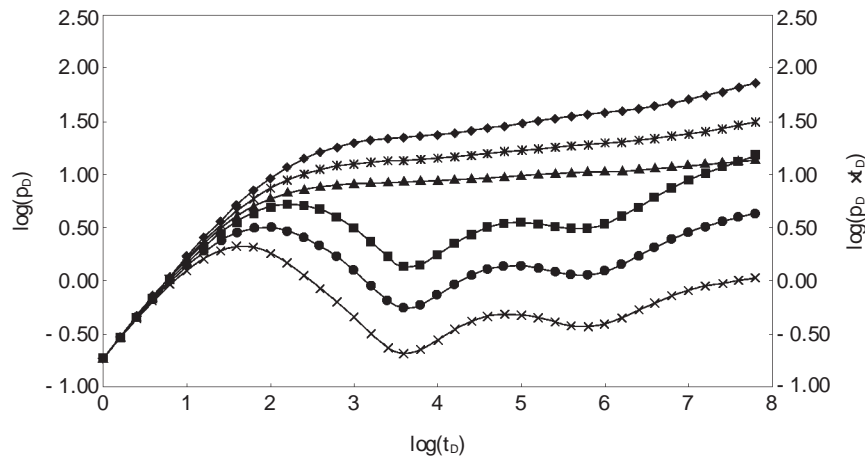


图 2 不同流体幂律流指数对压力响应的影响

◆ 幂律流指数为 0.5 时压力; ■ 幂律流指数为 0.5 时压力导数; ▲ 幂律流指数为 0.7 时压力;
 × 幂律流指数为 0.7 时压力导数; * 幂律流指数为 0.9 时压力; ● 幂律流指数为 0.9 时压力导数

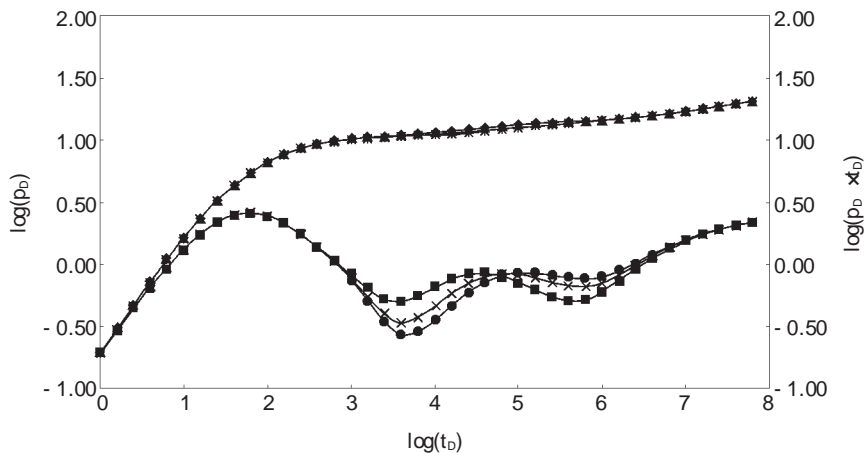


图 3 溶洞弹性储容比对压力响应的影响

◆ $\omega_f=0.1, \omega_v=0.3$ 时压力; ■ $\omega_f=0.1, \omega_v=0.3$ 时压力导数; ▲ $\omega_f=0.1, \omega_v=0.6$ 时压力;
 × $\omega_f=0.1, \omega_v=0.6$ 时压力导数; * $\omega_f=0.1, \omega_v=0.9$ 时压力; ● $\omega_f=0.1, \omega_v=0.9$ 时压力导数

3.4 缝洞系统窜流系数对压力响应的影响

窜流系数的大小决定着两种介质之间窜流发生的容易程度和出现时间的早晚, 窜流系数越大, 介质之间越容易发生窜流, 窜流出现的时间也就越早。缝洞窜流系数的大小决定着溶洞向裂缝进行窜流的容易程度和时间的早晚, 如果其窜流系数过大, 还很容易被井筒储存掩盖, 如图 4 所示。

3.5 幂律流指数和表皮系数对压力响应影响的区别

幂律流指数和表皮系数都会对压力及压力导数产生较大影响, 同时也会导致压力降增加。但它们对压力及压力导数的影响还存在很大差别, 表皮系数主要是影响全程的压力及压力导数由井储向

径向流的过渡区; 而幂律流指数也影响压力的全过程, 但其不但对压力有着明显影响, 同时因其改变了压力变化的速度, 所以对压力导数全程也有着较大影响, 使得压力导数呈上升趋势, 如图 5 所示。

3.6 外边界对压力响应的影响

在此主要考虑无限大、圆形封闭和圆形定压三种外边界。对于非牛顿流体, 由于其渗流规律不再符合达西定律, 无限大油藏达到径向流时其压力导数曲线已不是一条值为 0.5 的水平线, 而是一条逐渐上升的直线, 其上升速度和幂律流指数有关; 而封闭边界和定压边界其压力导数仍然是上升和下降, 只是程度与牛顿流体有所不同。如图 6 所示。

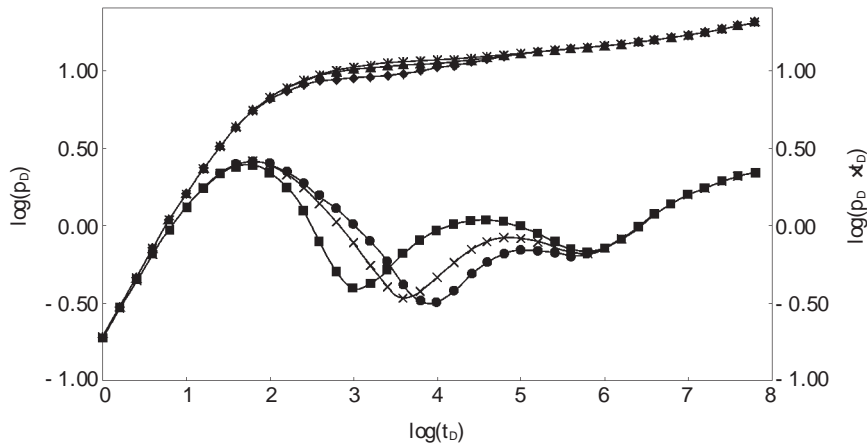


图 4 缝洞窜流系数对裂缝弹性储容比的影响

◆缝洞窜流系数为 $5.0e^{-5}$ 时压力; ■缝洞窜流系数为 $5.0e^{-5}$ 时压力导数; ▲缝洞窜流系数为 $1.0e^{-5}$ 时压力;
 ✕缝洞窜流系数为 $1.0e^{-5}$ 时压力导数; ✖缝洞窜流系数为 $5.0e^{-6}$ 时压力; ●缝洞窜流系数为 $5.0e^{-6}$ 时压力导数

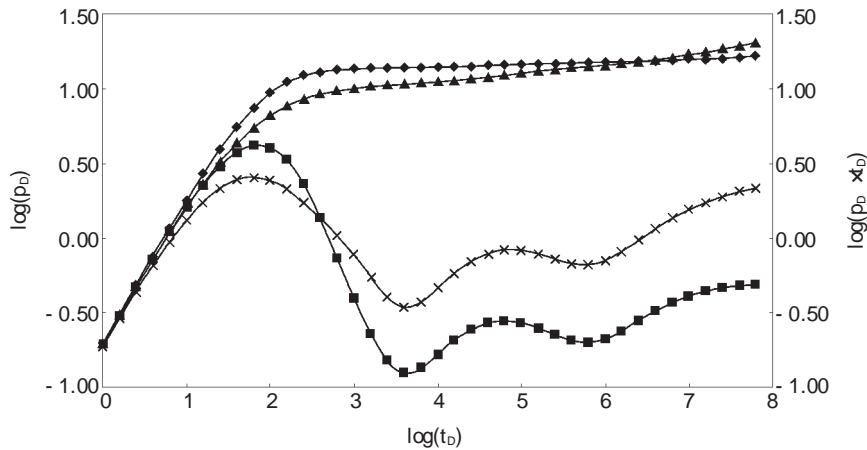


图 5 幂律流指数和表皮系数对压力响应影响的差别

◆牛顿流体 $S=8.0$ 时压力; ■牛顿流体 $S=8.0$ 时压力导数;
 ▲非牛顿流体 $n=0.8, S=1.0$ 时压力; ✕非牛顿流体 $n=0.8, S=1.0$ 时压力导数

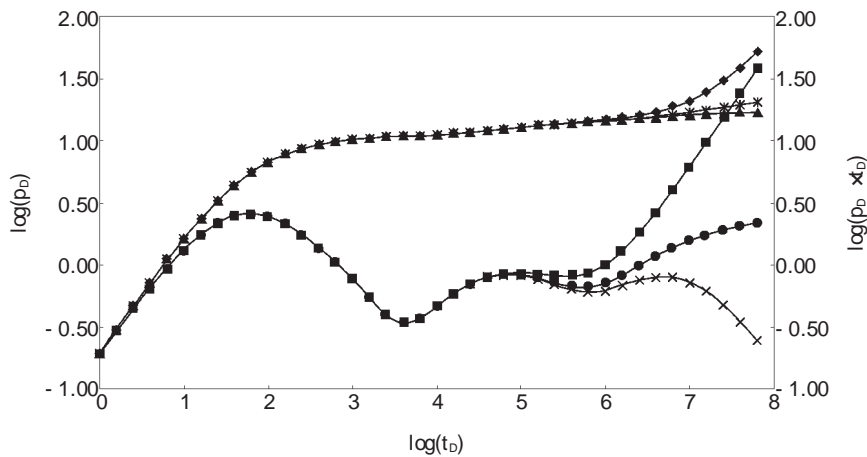


图 6 非牛顿流体时外边界条件对压力响应的影响

◆封闭边界压力; ■封闭边界压力导数; ▲定压边界压力;
 ✕定压边界压力导数; ✖无限大边界压力; ●无限大边界压力导数

4 结论

非牛顿流体和牛顿流体的压力响应有着明显区别, 前者的压力及压力导数要明显高于后者。同时幂律流指数也对压力及压力导数有着较大的影响, 幂律流指数越小, 非牛顿性越强, 其压力及压力导数曲线也就越高。

窜流系数和介质的弹性储容比对压力响应的的影响与牛顿流体的影响相似, 只是由于非牛顿流体的影响, 窜流所造成的“凹陷”的位置要高于牛顿流体。

外边界条件的影响也与牛顿流体存在不同, 无限大油藏的径向流段, 其压力导数不再是一条值为 0.5 的水平线, 而是一条随幂律流指数的不同呈上升趋势的曲线; 封闭边界和定压边界的上升程度和下掉程度也与牛顿流体存在着明显不同。

参考文献:

- 1 H K van Poolen, J R Jargon. Steady- State and Unsteady- State Flow of Non- Newtonian Fluids Through Porous Media. SPEJ, 1969(3): 80 -88
- 2 A S Odeh, H T Yang. Flow of Non- Newtonian Power- Law Fluids Through Porous Media. SPEJ, 1979(6): 155 -163
- 3 C U Ikoku, H J Jr Ramey. Transient Flow of Non- Newtonian Power- Law Fluids in Porous Media. SPEJ, 1979(6): 164 -174
- 4 栾志安. 双重介质非牛顿液不稳定渗流解析解. 石油学报, 1981, 2(4): 75 -79
- 5 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. 石油大学学报, 2004, 28(1): 46 -51
- 6 常学军, 姚军, 戴卫华等. 裂缝和洞与井筒连通的三重介质油藏试井解释方法研究. 水动力学研究与进展, 2004, 19(3): 339 -346
- 7 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. 水动力学研究与进展, 2006, 21(1): 84 -89
- 8 葛家理. 现代油藏渗流力学原理(上册). 北京: 石油工业出版社, 2003. 293 -297
- 9 罗蜚谭, 王允诚. 我国主要碳酸盐岩油气田储层孔隙结构的研究和进展. 石油勘探与开发, 1981(5): 40 -51
- 10 陆金甫, 关治. 偏微分方程数值解法. 北京: 清华大学出版社, 1987. 187 -189

(编辑 任应录)

The Characteristic of Transient Pressure of Non-Newtonian Fluids Transient Flow in Triple-Media Reservoirs

Wang Zisheng, Yao Jun, Zhang Kai

(China University of Petroleum, Shandong Dongying 257061)

[Abstract] The paper described the fluid flow of heavy oil in triple-media reservoirs and analyzed the characteristic of transient pressure. The pressures of newtonian fluid and non-newtonian fluid were compared and the sensitivity of parameters such as power index, skin factor, storativity ratio, inter-porosity flow factor and outer-boundary were analyzed. The results showed that the pressure and pressure derivative of non-newtonian fluid is higher than newtonian one; The power index is more smaller, the pressure and pressure derivative is more higher; The effect of skin factor on transient was different from that of power index; The storativity ratio and inter-porosity flow factor is just same as the newtonian fluid, and the effect of outer-boundary on transient pressure is different from that of newtonian fluid.

[Keywords] non-newtonian fluid; transient flow; pressure transient