

文章编号:1000-4874(2005)04-0418-08

三重介质复合油藏压力动态特征研究^{*}

杨坚, 姚军, 王子胜
(中国石油大学, 山东东营 257061)

摘要: 建立了三重介质复合油藏试井解释模型, 采用数值方法对模型进行了求解。讨论了地层的内外渗透率比、内径的大小以、窜流系数、弹性储容比、外边界条件以及表皮系数等参数对于这种类型油藏压力响应动态的影响。表明: 当油藏内外区的渗透率不同时, 类似于在井的周围存在封闭边界或者定压边界; 内区的大小决定着反应外区渗透率影响的压力响应出现的早晚; 窜流系数影响着窜流阶段出现的早晚; 弹性储容比影响着导数曲线上“凹陷”的深度和宽度; 而外边界的影响则由于油藏内外区渗透率的差异而和普通的三重介质油藏不同; 表皮系数对压力动态的影响与内外区域渗透率比对压力动态的影响也有着很大的差别。

关键词: 复合油藏; 三重介质; 压力动态

中图分类号: TE312 **文献标识码:** A

Study of pressure-transient characteristic for triple-medium composite reservoirs

YANG Jian, YAO Jun, WANG Zi-sheng
(China University of Petroleum, Shandong Dongying 257061, China)

Abstract: A Well Test interpretation model of triple-media composite-reservoir is established. The mathematical model is solved numerically. The effects of permeability ratio of inner to that of outer zones, radius of inner zone, inter-porosity flow factor, storativity ratio, outer boundary and wellbore skin on pressure transient are discussed. The results show: when the permeability of inner zone is not equal to that of outer zone, the pressure transient is just like the there is a closed fault or a fluid bank around the well. In this case, the radius of inner zone determines the in coming time of pressure transient reflecting the effect of outer permeability, inter-porosity flow factor determines the time of occurrence of the inter-porosity flow, storativity ratio decides the width and depth of the “hollow” on the derivative curve, the effect of outer boundary on this kind of composite reservoir is different from that of a normal triple-media reservoir and the effect of wellbore skin on the pressure transient is distinct from the effect of the permeability ratio of inner zone to outer zone.

Key words: composite reservoirs; triple-media system; pressure transient

* 收稿日期: 2004-07-06(2004-10-25 修改稿)

作者简介: 杨坚(1968~), 男, 河南省郑州市人, 博士研究生。

1 前言

本文研究的是近井周围的渗透率与地层渗透率不同而形成的复合油藏。复合油藏可以对水驱、化学驱、聚合物驱、混相气驱以及蒸汽驱早期的注入井等动态进行模拟;亦可对由于钻井液的污染、压裂、酸化等复合油藏的动态进行模拟。因此,复合油藏的研究既有理论意义又具实际意义^[1]。

新疆塔河油田奥陶系属于典型的碳酸盐岩油藏,地质取芯表明该地层中含有明显发育的裂缝和溶洞;而该油田中很多井初始没有产能,经压裂后才能取得较好的常量,或者油井初始产量很高,但生产一段时间之后锐减;所有这些地质特点和生产特征都表明该地层具有明显的三重介质复合油藏的特征。

一些学者,如:Carshaw^[2]、Hurst^[3]、Loucks^[4]、Carter^[5]、Merrill^[6]、Closmann^[7]、Bixel^[8]、Satman^[9]以及Brown^[10]、Olarewaju^[11]等人对均质复合油藏进行了研究,其中有关于地层性质的复合油藏,也有流体性质的复合油藏,或者二者兼而有之;1984年D. C. C. Poon^[12]对含有均一裂缝系统的复合油藏的压力动态进行了研究;目前,还没有人对三重介质复合油藏的压力动态进行系统研究;另外Warran-Root^[13]以及Streltsova^[14]等人对双重介质的提出,也拉开了多重介质研究的大幕,而国内姚军^[15]、曾昭英^[16]、同登科^[17,18]等人也在试井方面做了不少的工作。

2 三重介质复合油藏渗流物理模型、数学模型及其求解

2.1 三重介质复合油藏基本假设及渗流物理模型

研究由基岩孔隙系统、裂缝系统和溶洞系统组成的三重介质复合油藏,如图1所示。作如下假设:

(1) 复合油藏的内外区域中为单相流体,且流体和岩石微可压缩,压缩系数为常数;

(2) 忽略重力和毛管力的影响,并且假设地层中的压力梯度比较小;

(3) 油藏为水平、等厚的单层油藏,且中心一口油井;

(4) 油井以定产量生产,生产前地层压力均匀分

布;

(5) 地层流体在基岩孔隙系统、裂缝系统和溶洞系统的流动服从达西定律;

(6) 考虑井筒储存和表皮效应的影响;

(7) 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;

(8) 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;

(9) 只考虑三重介质内外两区的渗透率不同,其他参数如:孔隙度、压缩系数等参数不发生变化;但内外区域中介质之间的窜流系数可以不相同。

2.2 三重介质复合油藏的数学模型

基于上述三重介质复合油藏的渗流物理模型和基本假设,其数学模型如下^[15]:

$$K_{v1}^0 \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial P_{Dm1}}{\partial r_D} \right) - m \frac{\partial P_{Dm1}}{\partial t_D} -$$

$$f \frac{\partial P_{Df1}}{\partial t_D} = v \frac{\partial P_{Dv1}}{\partial t_D} \quad (1a)$$

$$- m_{v1} (P_{Dm1} - P_{Dv1}) = m \frac{\partial P_{Dm1}}{\partial t_D} \quad (1b)$$

$$- v_{f1} (P_{Df1} - P_{Dv1}) = f \frac{\partial P_{Df1}}{\partial t_D} \quad (1c)$$

公式的(1a)、(1b)、(1c)中的 r_D 满足 $1 < r_D < R_{1D}$ 。

$$K_{v2}^0 \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial P_{Dm2}}{\partial r_D} \right) - m \frac{\partial P_{Dm2}}{\partial t_D} -$$

$$f \frac{\partial P_{Df2}}{\partial t_D} = v \frac{\partial P_{Dv2}}{\partial t_D} \quad (1d)$$

$$- m_{v2} (P_{Dm2} - P_{Dv2}) = m \frac{\partial P_{Dm2}}{\partial t_D} \quad (1e)$$

$$- v_{f2} (P_{Df2} - P_{Dv2}) = f \frac{\partial P_{Df2}}{\partial t_D} \quad (1f)$$

公式(1d)、(1e)、(1f)中的 r_D 满足 $r_D > R_{1D}$ 。

内边界条件:

$$C_D \frac{dP_{wD}}{dt_D} - \frac{\partial P_{Dv1}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} = 1 \quad (2)$$

$$P_{wD} = \left[P_{Dv1} - S \frac{\partial P_{Dv1}}{\partial r_D} \right]_{r_D=1} \quad (3)$$

内外区衔接条件:

$$P_{Dv1} = P_{Dv2} \quad (r = R_{1D}) \quad (4)$$

$$K_{v1} \frac{\partial P_{Dv1}}{\partial r} = K_{v2} \frac{\partial P_{Dv2}}{\partial r} \quad (r = R_{1D}) \quad (5)$$

初始条件:

$$P_{Dm1}(r_D, 0) = P_{Dm2}(r_D, 0) = P_{Df1}(r_D, 0) =$$

$$P_{Df2}(r_D, 0) = P_{Dv1}(r_D, 0) = P_{Dv2}(r_D, 0) = 0 \quad (6)$$

对于无限大地层,外边界条件:

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} P_{Dm2}(r_D, t_D) = \lim_{r_D \rightarrow \infty} P_{Df2}(r_D, t_D) =$$

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} P_{Dv2}(r_D, t_D) = 0 \quad (7)$$

对于有界圆形封闭地层,外边界条件为:

$$\frac{\partial P_{Dm2}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{eD}} = \frac{\partial P_{Df2}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{eD}} =$$

$$\frac{\partial P_{Dv2}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (8)$$

对于有界圆形定压力地层,外边界条件为:

$$P_{Dm2}(r_{eD}, t_D) = P_{Df2}(r_{eD}, t_D) =$$

$$P_{Dv2}(r_{eD}, t_D) = 0 \quad (9)$$

这里:

$$r_w = \frac{r}{r_w}, \quad r_{eD} = \frac{r_e}{r_w}, \quad t_D = \frac{3.6(K_{v1} + K_{v2})}{\mu r_w^2 \phi_i C_t} t$$

$$P_{D1j}(r_D, t_D) = \frac{(K_{v1} + K_{v2})h}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B} \cdot$$

$$[P_i - P_{1j}(r, t)] \quad (j = m, f, v)$$

$$P_{D2j}(r_D, t_D) = \frac{(K_{v1} + K_{v2})h}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B} \cdot$$

$$[P_i - P_{2j}(r, t)] \quad (j = m, f, v)$$

$$j = \frac{\phi_i C_i}{(\phi C)_i} \quad (j = m, f, v)$$

$$m_{vj} = \frac{j K_{mj} r_w^2}{K_{v1} + K_{v2}} \quad (j = 1, 2)$$

$$v_{fj} = \frac{j K_{fj} r_w^2}{K_{v1} + K_{v2}} \quad (j = 1, 2)$$

$$C_D = \frac{C}{2 \phi_i C_i h r_w^2}, \quad K_{v1}^0 = \frac{K_{v1}}{K_{v1} + K_{v2}}$$

$$K_{v2}^0 = 1 - K_{v1}^0$$

式中,下标 m, f, v, t 分别代表基岩系统、裂缝系统、溶洞系统以及地层总的性质, K_{v1} 为油藏内圆溶洞初始渗透率, μm^2 ; K_{v2} 为油藏内圆溶洞初始渗透率, 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} ; m_{v1} 、 v_{f1} 分别为内区域基岩系统和裂缝系统与溶洞系统之间的窜流系数, m_{v2} 、 v_{f2} 无因次; 分别为外区域基岩系统和裂缝系统与溶洞系统之间的窜流系数, 无因次; ω 为弹性储容比, 无因次; μ 为流体粘度, $mPa \cdot s$; 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, m^3/d ; P_i 为原始地层压力, MPa; C 为井筒存储系数, m^3/MPa ; S 为表皮系数, 无因次, R_{1D} 内区域的无因次半径, 无因次。

2.3 三重介质复合油藏渗流数学模型的求解

首先,假设 $x = \ln r_D$, 则对方程组(1)中的第一式进行化简和差分^[16],可以得到:

$$\frac{K_{v1}^0}{e^{2i \cdot x}} \cdot \frac{P_{Dv1i+1}^{j+1} - 2P_{Dv1i}^{j+1} + P_{Dv1i-1}^{j+1}}{x^2} -$$

$$m \frac{P_{Dm1i}^{j+1} - P_{Dm1i}^j}{t_{Dj}} - f \frac{P_{Df1i}^{j+1} - P_{Df1i}^j}{t_{Dj}} =$$

$$\frac{P_{Dv1i}^{j+1} - P_{Dv1i}^j}{t_{Dj}} \quad (10)$$

对方程组(1)中的第二、三式进行差分可以得到:

$$P_{Dm1i}^{j+1} = \frac{m}{m + mv1} P_{Df1i}^j + \frac{mv1 t_{Dj}}{m + mv1 t_{Dj}} P_{Dv1i}^{j+1} \quad (11)$$

$$P_{Df1i}^{j+1} = \frac{f}{f + vf1} P_{Df1i}^j + \frac{vf1 t_{Dj}}{f + vf1 t_{Dj}} P_{Dv1i}^{j+1} \quad (12)$$

将(11)式和(12)式代入方程(10),并令 $m = \frac{t_{Dj}}{e^{2u-i} u^2}$,可以得到:

$$K_{v1}^0 m P_{Dv1i-1}^{n+1} - (v + 2 K_{v1}^0 m + \frac{m - mv1 t_{Dj}}{m + mv1 t_{Dj}} + \frac{f - vf1 t_{Dj}}{f + vf1 t_{Dj}}) \cdot P_{Dv1i}^{n+1} + K_{v1}^0 m P_{Dv1i+1}^{n+1} = -v P_{Dv1i}^n - \frac{m - mv1 t_{Dj}}{m + mv1 t_{Dj}} \cdot P_{Dm1i}^n - \frac{f - vf1 t_{Dj}}{f + vf1 t_{Dj}} P_{Df1i}^n \quad (13)$$

同理,对方程组(1)的后三式化简也可以得到:

$$K_{v2}^0 m P_{Dv2i-1}^{n+1} - (v + 2 K_{v2}^0 m + \frac{m - mv2 t_{Dj}}{m + mv2 t_{Dj}} + \frac{f - vf2 t_{Dj}}{f + vf2 t_{Dj}}) \cdot P_{Dv2i}^{n+1} + K_{v2}^0 m P_{Dv2i+1}^{n+1} = -v P_{Dv2i}^n - \frac{m - mv2 t_{Dj}}{m + mv2 t_{Dj}} \cdot P_{Dm2i}^n - \frac{f - vf2 t_{Dj}}{f + vf2 t_{Dj}} P_{Df2i}^n \quad (14)$$

对其内边界条件(2)式和(3)式进行差分,可以得到:

$$[\frac{C_D}{t_{Dj}} (\frac{S}{x} + 1) \frac{1}{x}] P_{Dv10}^{s+1} - [\frac{C_D}{t_{Dj}} \frac{S}{x} + \frac{1}{x}] P_{Dv11}^{s+1} = 1 + \frac{C_D}{t_{Dj}} P_{wD}^j \quad (15)$$

对接处条件进行差分化简可以得到:

$$\frac{K_{v1}^0}{(1 - K_{v1}^0) P_{Dv1NU1-1}^0} \cdot \left[1 + \frac{K_{v1}^0}{(1 - K_{v1}^0)} \right] P_{Dv1NU1}^{j+1} + P_{Dv2NU1+1}^{j+1} = 0 \quad (16)$$

对于无限大外边界条件可以简化为:

$$K_{v2}^0 m P_{Dv2i-1}^{n+1} - (v + 2 K_{v2}^0 m + \frac{m - mv2 t_{Dj}}{m + mv2 t_{Dj}} + \frac{f - vf2 t_{Dj}}{f + vf2 t_{Dj}}) \cdot P_{Dv2i}^{n+1} = -v P_{Dv2i}^n - \frac{m - mv2 t_{Dj}}{m + mv2 t_{Dj}} \cdot P_{Dm2i}^n - \frac{f - vf2 t_{Dj}}{f + vf2 t_{Dj}} P_{Df2i}^n \quad (17)$$

式中:下标 $i = 1, 2, \dots, NU$,表示空间上的位置, NU 表示在空间上所划分的总步长数;上标 $j = 1, 2, \dots, NT$,表示时间, NT 表示在时间上所划分的总步长数; $NU1$ 表示内外区域交界处的空间步长数。

由方程(13)、(14)、(15)、(16)以及(17)组成了一个线性三对角方程组,可以用追赶法进行求解,对于其他两种外边界条件,只要对第(17)式进行必要的修改即可。

3 地层参数对三重介质复合油藏压力动态的影响分析

3.1 内外区渗透率比对三重介质复合油藏压力动态的影响

由图2可以看出,内区渗透率为外区渗透率的9

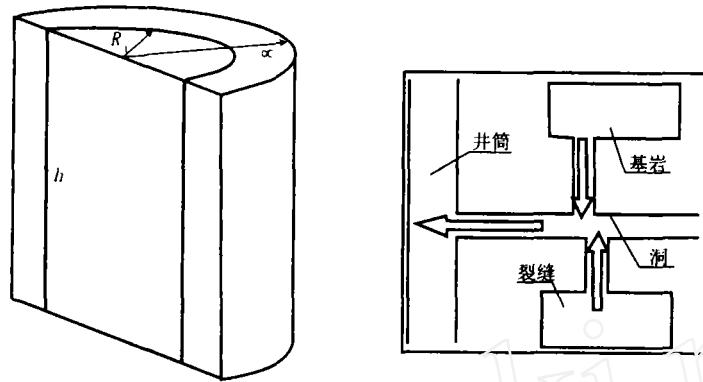


图1 三重介质复合油藏渗流物理模型示意图

- ◆ 压力-内外区渗透率相等 ■ 压力导数-内外区渗透率相等
- ▲ 压力-内外区渗透率比9:1 × 压力导数-内外区渗透率比9:1
- ✱ 压力-内外区渗透率比1:9 ○ 压力导数-内外区渗透率比1:9

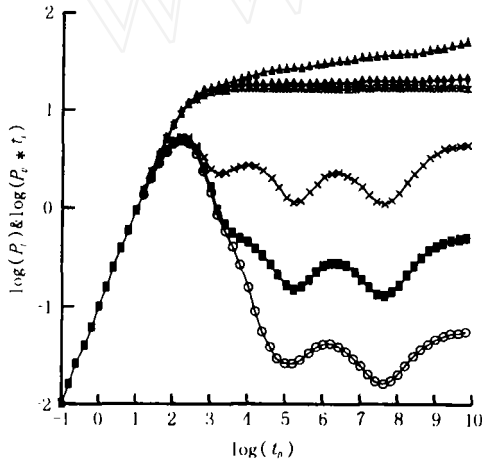


图2 三重介质复合油藏内外区域渗透率比对压力动态的影响

- ◆ 压力-不考虑复合油藏 ■ 压力导数-不考虑复合油藏
- ▲ 压力-无因次内区半径400 × 压力导数-无因次内区半径400
- ✱ 压力-无因次内区半径8100 ○ 压力导数-无因次内区半径8100

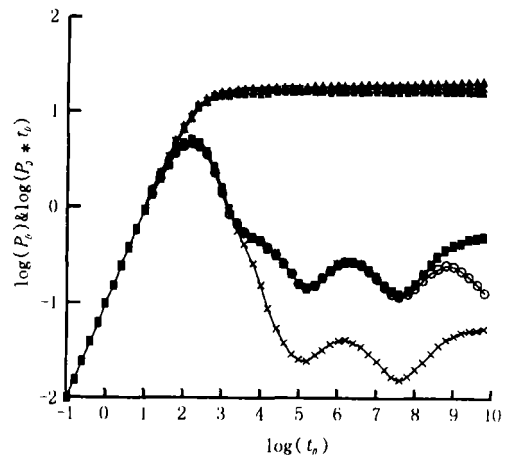


图3 三重介质复合油藏区域半径不同对压力动态的影响

倍时,当压力传播到内外区的交界处时,类似于遇到一个封闭的断层,压力降变大,并且由于内区渗透率较大所以压力降很快的达到交界处,压力导数曲线出现第一次上升,之后产生裂缝向溶洞的窜流,在导数曲线上出现一个“凹陷”在第一个窜流阶段完成之后,出现了基岩向溶洞的窜流,即在导数曲线上出现第三个“凹陷”,在基岩向裂缝的窜流阶段完成之后,整个油藏系统趋向径向流阶段,表现在导数曲线上则是曲线变平,但是由于复合油藏的影响其又不落在0.5线上;当内区的渗透率为外部渗透率的1/9时,则当压力波传播到外区域时相当于遇到一个供给边界,导数曲线下滑,但是由于内区的渗透率较小,所以其传播

到交界处的时间相对于上面的情况较晚。

3.2 内区半径对三重介质复合油藏压力动态的影响

由图3可以看出,当内区无因次半径为400时,并且内区的渗透率为外区的渗透率的1/9时,压力波在裂缝向溶洞的窜流还没有完成之前就达到了交界处,压力导数曲线明显低于不考虑复合油藏时的压力导数曲线;当内区无因次半径为8100时,此时内区的渗透率仍为外区渗透率的1/9,压力波在基岩完成向溶洞的窜流之后才遇到交界处,表现在导数曲线上则为前期和考虑复合油藏的压力导数曲线完全重合,而在第二个“凹陷”之后下滑。

3.3 裂缝向溶洞窜流系数对三重介质复合油藏压力动态的影响

由图 4 可看出,当裂缝向溶洞的窜流系数增加时,基岩向溶洞发生窜流的时间提前,并且相应时刻的压力导数曲线要高于窜流系数较小时的压力导数曲线,这时由于窜流时间发生的早晚和压力波遇到渗透率较大的外区域共同决定的,在此图中内区域的渗透率为外区域渗透率的 1/9。

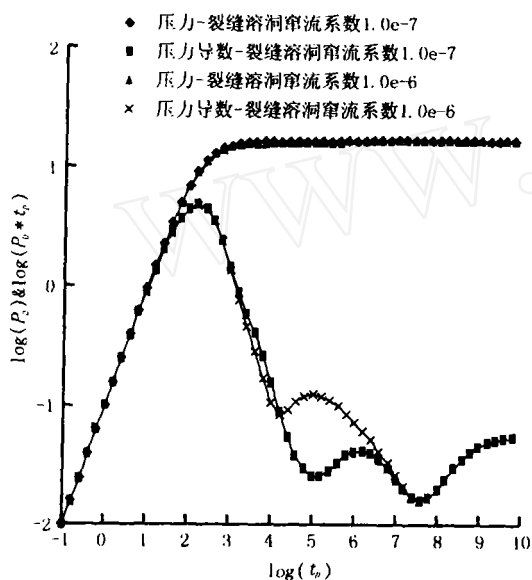


图 4 三重介质复合油藏裂缝向溶洞窜流系数不同时对压力动态的影响

3.4 裂缝弹性储容比对三重介质复合油藏压力动态的影响

在图 5 中,溶洞的弹性储容比保持不变,改变裂缝弹性储容比的同时也就改变了基岩的弹性储容比。当裂缝的弹性储容比增加时,裂缝向溶洞窜流阶段的“凹陷”变得越来越深、越宽,即裂缝向溶洞的窜流越明显,表明裂缝向溶洞发生窜流的时间越长;裂缝弹性储容比的增加就意味着基岩弹性储容比的减小,所以在基岩向溶洞的窜流阶段,在导数曲线上表现为第二个“凹陷”,会由于基岩弹性储容比的减小而变得较浅较窄,即表明基岩向溶洞发生窜流的时间较短,窜流不明显。

3.5 外边界对三重介质复合油藏压力动态的影响

由图 6 可以看出,当油井周围存在圆形定压边界或者圆形封闭边界时,其对压力的相应非常明显。图 6 中当油井周围存在封闭边界时,内区域的渗透率为外区域渗透率的 1/9,由图可以看出,由于遇到了定压外边界的影响,压力导数曲线在早期就低于无限大外边界不考虑复合油藏时的

- ◆ 压力-裂缝弹性储容比 0.02
- ▲ 压力-裂缝弹性储容比 0.06
- × 压力-裂缝弹性储容比 0.10
- 压力导数-裂缝弹性储容比 0.02
- × 压力导数-裂缝弹性储容比 0.06
- 压力导数-裂缝弹性储容比 0.10

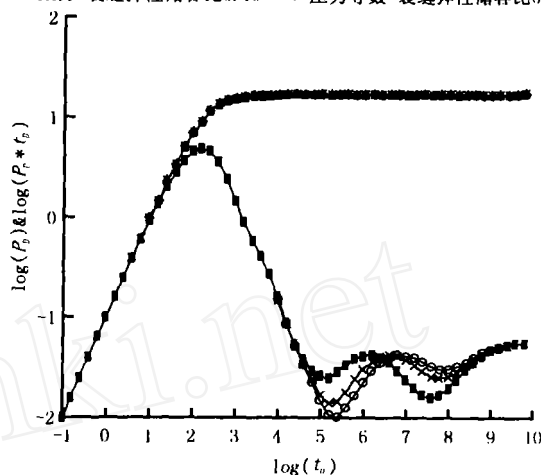


图 5 三重介质复合油藏裂缝弹性储容比不同时对压力动态的影响

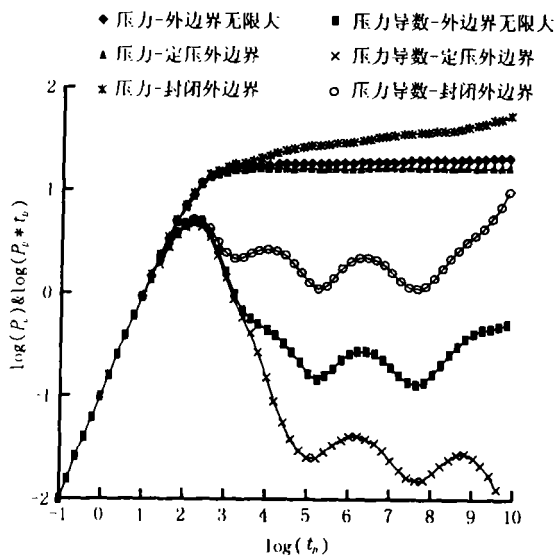


图 6 三重介质复合油藏外边界不同时对压力动态的影响

为外区域渗透率的 9 倍,由图可以明显地看出,压力和压力导数曲线在井筒存储阶段结束之后就明显的高于无限大外边界不考虑复合油藏的压力和压力导数曲线,并在遇到封闭外边界之后,压力和压力导数曲线进一步的上翘;而当油井周围存在定压外边界时,内区域的渗透率为外区域渗透率的 1/9,由图可以看出,由于遇到了定压外边界的影响,压力导数曲线在早期就低于无限大外边界不考虑复合油藏时的

压力导数曲线,在遇到定压边界以后,压力导数曲线进一步的下掉。

3.6 内外区渗透率和表皮系数对三重介质复合油藏压力动态影响差异

图7中复合油藏考虑内外区渗透率比9:1,表皮系数为10,而普通三重介质油藏则考虑表皮系数等于20,其它参数相同。当内区的渗透率大于外区的渗透率时,压力波相当于遇到一个不渗透的边界,会导致压力降的上升,当其上升是在压力波传播到内外区域交界处并返回到油井才出现的;而表皮系数则不同,其影响着压力降的整个过程,无论是早期或者晚期,但是表皮系数对压力导数的影响只是存在于早期的“凸起”出,而内外区域渗透率的不同则还影响着后期的压力导数曲线,使得压力导数曲线上升。

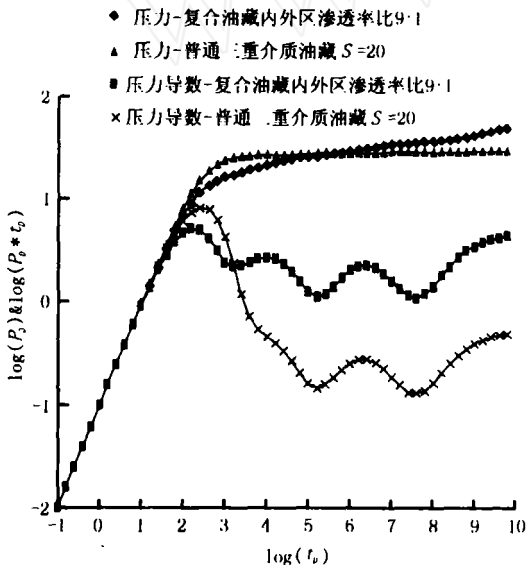


图7 三重介质复合油藏和均一三重介质油藏压力动态的对比

4 结论

(1) 建立了一个三重介质复合油藏试井解释模型,可以考虑内外区域渗透率的不同和内外区域中介质窜流系数的不同;

(2) 研究表明:当内区域的渗透率大于外区域的渗透率时,压力波传播到交界处时类似于遇到一个不渗透的边界,导致压力降上升;而当内区域的渗透率小于外区域的渗透率时,压力波传播到交界处时类似于遇到一个定压边界,表现在导数曲线上则是出现下

滑;

(3) 内区域半径的大小影响着压力波出现异常的时间的早晚和剧烈程度;

(4) 窜流系数决定该窜流阶段出现的早晚,而介质的弹性储容比则决定着该类介质向其他介质发生窜流时间的长短和明显程度;

(5) 复合油藏对压力动态的影响和表皮系数不同,表皮系数主要是影响着整个试井阶段的压力以及压力导数曲线早期的“凸起”;而复合油藏则是当压力波达到交界处并反馈到油井之后才会对井底压力产生影响;

(6) 本文研究成果对三重介质复合油藏的试井解释奠定了理论基础。

参 考 文 献:

- [1] OLAREWAJU J S, LEE W J. A comprehensive application of a composite reservoir model to pressure transient analysis[R]. SPE 16345, 1987.
- [2] CARSLAW H S and JAGEGER J C. Conduction of Heat in Solids[M]. Clarendon Press, Oxford. 1959.
- [3] HURST W. Interference between oil fields[J]. Trans., AIME, 1960, 219(175):520-527.
- [4] LOUCKS T L and GUERRERO E T. Pressure drop in a composite reservoir [J]. Soc. Pet. Eng. J., 1961, (Sept): 170-176.
- [5] CARTER R D. Pressure behavior of a limited circular composite reservoir [J]. Soc. Pet. Eng. J., 1966, (Dec): 328-334.
- [6] MERROLL L S, KASSEMI H and GOGARTY W B. Pressure falloff analysis in reservoirs with fluid banks [J]. J. Pet. Tech., 1974, (July): 809-818.
- [7] CLOSMANN P J and RATLIFF N W. Calculation of transient oil production in a radial composite reservoir [J]. Trans., AIME, 1967, 240(355): 623-629.
- [8] BIXEL H C and VAN POOLLEN H K. Pressure drawdown and buildup in the presence of radial discontinuities[J]. Soc. Pet. Eng. J., 1967, (Sept): 301-309.
- [9] SATMAN A. An analytical study of interference in composite reservoir[J]. Soc. Pet. Eng. J., 1985, (April): 281-290.
- [10] BROWN L P. Pressure transient behavior [R]. SPE 14316, 1985.
- [11] OLAREWAJU J S. and LEE W J. A comprehensive application of a composite reservoir model to pressure transient analysis[R]. SPE 16345, 1987.

- [12] WARREN J E and ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs [J]. SPEJ., 1963, (Sept.): 245-252.
- [13] STREL TSOVA T D. Well pressure behavior of a naturally fractured reservoir [J]. SPEJ., 1983, (Oct.): 769-780.
- [14] POON D C C. Pressure transient analysis of a composite reservoir with uniform fracture distribution [R]. SPE 13384, 1984.
- [15] 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.
- [16] 曾昭英,张大为,翟云芳. 利用脉冲试井确定油层垂向渗透率的数学模型及分析方法[J]. 水动力学研究与进展, A辑, 1994, 9(3): 257-261.
- [17] 同登科,陈钦雷. 分形油藏渗流问题的精确解及动态特征[J]. 水动力学研究与进展, A辑, 1999, 14(2): 201-209.
- [18] 同登科,王瑞和. 分形油藏非牛顿幂律流的精确解及动态特征[J]. 水动力学研究与进展, A辑, 2000, 15(3): 342-350.
- [19] 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.

www.cnki.net