

基于三参数非线性渗流的致密气藏数值试井分析

欧阳伟平^{1,2}, 张 冕¹, 刘曰武³, 万义钊³, 袁冬蕊¹, 李杉杉¹

(1. 中国石油川庆钻探长庆井下技术作业公司, 陕西 西安 710018;

2. 中国石油大学(北京)博士后流动站, 北京 102249;

3. 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘要:目前在低渗透储层的试井模型中,常采用具有平均启动压力梯度的拟线性渗流方程,然而拟线性渗流方程只能反映低渗透流动的启动压力梯度特征,不能描述流动的非线性特征。三参数非线性渗流方程既反映了启动压力梯度特征,也描述了非线性凹形曲线。为了提高致密气藏试井资料的解释精度,完善低渗透非线性试井理论,建立了一种基于三参数非线性渗流方程的致密气藏数值试井模型。利用有限差分方法求解模型,获得了井底压力响应曲线及储层压力分布。分析了压力响应曲线和压力分布特征,对比了三参数非线性模型与拟线性模型的结果,并研究了最小启动压力梯度和平均启动压力梯度的影响。研究表明:系统径向流阶段的压力导数曲线偏离 0.5 线,压降曲线的上翘幅度取决于平均启动压力梯度,压力恢复曲线的上翘幅度取决于平均启动压力梯度与最小启动压力梯度的差值。外边界响应的早晚和动边界扩展速度取决于最小启动压力梯度。
关键词:致密气藏;非线性渗流;数值试井;最小启动压力梯度;平均启动压力梯度;压力响应曲线

中图分类号:TE37 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2016)11-2030-07

引用格式:Ouyang Weiping, Zhang Mian, Liu Yuewu, *et al.* Numerical well test analysis of tight gas reservoirs based on the three parameter nonlinear seepage[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(11):2030-2036. [欧阳伟平, 张冕, 刘曰武, 等. 基于三参数非线性渗流的致密气藏数值试井分析[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(11):2030-2036.]

0 引言

1856 年,法国工程师达西在解决第戎城市供水问题时,通过实验总结了流速与压力梯度为线性关系的达西定律。然而在低渗透储层中,流体的流动不再满足线性(达西)定律,而是呈现具有启动压力梯度的低速非线性渗流特征。启动压力梯度的概念最早是在 1951 年由前苏联学者在研究致密泥岩和硬黏土中的渗流问题时首次提出的^[1,2]。国内学者阎庆来等^[3]最早通过实验证明了低渗透储层流体的流动存在启动压力梯度。黄延章^[4]对低速非线性渗流进行了全面的总结。启动压力梯度多产生于低渗透油藏中,但在渗透率低且含水饱和度高的致密气

藏中,同样存在明显的启动压力梯度效应,这一现象已有多名学者进行过论证^[5-7]。

根据大量低渗透实验结果,国内学者提出了多种渗流方程来描述低渗透储层中流动速度与压力梯度之间的关系^[8]。邓英尔等^[9]最早提出利用三参数连续函数来描述非线性渗流规律,采用连续函数能够准确地描述非线性凹形曲线和直线段,避免了分段函数需要确定临界点的问题,该三参数连续方程主要的缺点在于 3 个参数缺乏物理意义。最近,黄延章等^[10]在经过多年低渗透非线性研究后提出了一种新的三参数连续函数来表示非线性渗流方程,该方程中的 3 个参数分别为最小(真实)启动压力梯度、平均(拟)启动压力梯度和拟线性斜率,各参数均

收稿日期:2016-02-26;修回日期:2016-04-01.

基金项目:国家自然科学基金(编号:51404232);国家重大科技专项课题(编号:2011ZX05038-003)联合资助.

作者简介:欧阳伟平(1986-),男,江西萍乡人,博士后,主要从事渗流力学与油气井试井研究. E-mail:ouywp56@163.com.

由实验直接得出,物理意义明确。

根据低渗透非线性渗流理论来建立渗流模型的研究已有很多^[11-20],但目前基本还停留在采用平均启动压力梯度的拟线性渗流方程来考虑低渗透流动对井底压力响应曲线的影响。平均启动压力梯度的拟线性渗流方程只能反应低渗透流动时具有启动压力梯度的特征,不能描述非线性凹形曲线,并且当压力梯度较低时计算得到的渗流速度偏小。

为了提高致密气藏试井解释的精度,完善低渗透非线性试井理论,本文基于黄延章等^[10]提出的三参数非线性渗流方程,建立一种致密气藏非线性数值试井模型,利用有限差分方法计算非线性模型的数值解,获得致密气藏非线性渗流的井底压力响应曲线及储层压力分布,分析压力响应曲线特征及压力分布特征,对比三参数非线性模型与拟线性模型的差别,研究最小启动压力梯度和平均启动压力梯度的影响,并分别讨论低渗透非线性渗流的压降曲线和压力恢复曲线特征。

1 非线性渗流方程

通过室内低渗透岩心驱替实验测试得到的流体流动速度与压力梯度关系如图 1 所示,描述该低速非线性渗流特征具有不同的方式,目前可选用的数学方程大概可以分为 4 种。

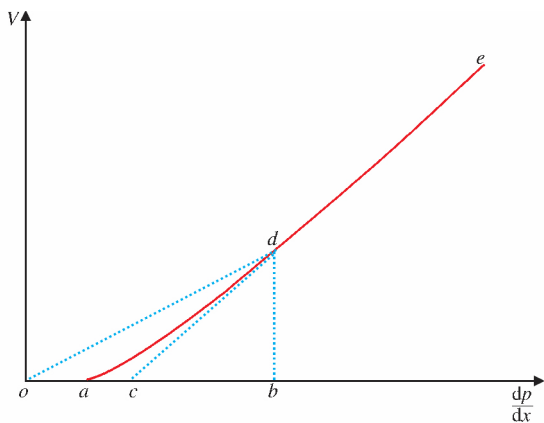


图 1 低渗透储层中渗流速度与压力梯度之间的关系示意

Fig. 1 The relationship between flow velocity and pressure gradient in low permeability reservoir

1.1 两线性段组合

采用线段 od 和线段 de 2 个斜率线性段来代替 ade 曲线^[8],这种方法在数学计算上较简便。但是该方法没有反映出渗流过程本质性的启动压力问题,且计算的渗流速度要比实际值高。

$$v = -\left(\frac{K}{\mu}\right)_1 \frac{dp}{dx} \quad 0 \leq \frac{dp}{dx} \leq \lambda_b \quad (1)$$

$$v = -\left(\frac{K}{\mu}\right)_2 \frac{dp}{dx} \quad \frac{dp}{dx} > \lambda_b$$

1.2 具有平均启动压力梯度的拟线性方程

采用线段 oc 和线段 ce 来代替实际的 ade 曲线^[8],该方法能够反映启动压力梯度,但是没有描述 ad 段的非线性渗流特征,当压力梯度较低时计算得到的渗流速度偏小。这种描述方程是目前试井模型最常用的方程。

$$v = 0 \quad \frac{dp}{dx} \leq \lambda_c \quad (2)$$

$$v = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} - \lambda_c \right) \quad \frac{dp}{dx} > \lambda_c$$

1.3 幂律方程

利用三分段函数来描述,其中非线性段 ad 采用幂律关系^[8],该方法既可反映启动压力梯度,又能体现非线性渗流特征。这种方法比较精确,但是数学处理比较麻烦,不太适合于工程应用。

$$v = 0 \quad \frac{dp}{dx} \leq \lambda_a$$

$$v = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} - \lambda_a \right)^n \quad \lambda_a < \frac{dp}{dx} \leq \lambda_b \quad (3)$$

$$v = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} - \lambda_b \right) \quad \frac{dp}{dx} > \lambda_b$$

1.4 三参数连续函数

邓英尔等^[9]最早提出利用三参数连续函数来描述非线性渗流规律,式(4)中的 3 个参数 a_1 、 a_2 、 b 由实验确定。采用连续函数能够准确的描述非线性凹形曲线和直线段,避免了分段函数需要确定临界点的问题。该方法主要的缺点在于 3 个参数缺乏物理意义。

$$v \left(a_1 + \frac{a_2}{1 + b v} \right) = -\frac{dp}{dx} \quad (4)$$

黄延章等^[10]提出了一个新的三参数连续函数来表述非线性渗流方程,公式(5),能够很好描述 ade 曲线,式中的 3 个参数为最小启动压力梯度 λ_a 、平均启动压力梯度 λ_c 、拟线性斜率 $\left(\frac{K}{\mu}\right)_0$,各参数均由实验直接得出,其物理含义明确。

$$v = -\left(\frac{K}{\mu}\right)_0 \frac{dp}{dx} \left(1 - \frac{\lambda_c}{dp/dx + \lambda_c - \lambda_a} \right) \quad (5)$$

式(1)~式(5)中: v 为渗流速度, cm/s; $\frac{dp}{dx}$ 为压力梯度, MPa/cm; K 为渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ 为流体

黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; λ_a 为最小启动压力梯度, MPa/cm ; λ_b 为最大启动压力梯度, MPa/cm ; λ_c 为平均启动压力梯度, MPa/cm 。

2 数学模型及求解

2.1 数学模型

将三参数非线性渗流方程(5)和气体状态方程带入到连续性方程,再结合无量纲定义,可得到致密气藏非线性流动的无量纲控制方程:

$$(1 - \xi) \frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} + \zeta \frac{\lambda_{cD} e^{-S}}{r_D} = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \quad (6)$$

内边界条件:

开井(压降)时:

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = -1 - \lambda_{cD} e^{-S} \zeta \Big|_{r_D=1} + \frac{\partial p_{wD}}{\partial T_D} \quad (7)$$

关井(压恢)时:

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = -\lambda_{cD} e^{-S} \zeta \Big|_{r_D=1} + \frac{\partial p_{wD}}{\partial T_D} \quad (8)$$

外边界条件:

封闭边界:

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=R_D} = -\lambda_{aD} e^{-S} \quad (9)$$

$$1 < R_D(T_D) \leq R_{eD}$$

定压边界:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=R_D} = -\lambda_{aD} e^{-S} \\ 1 < R_D(T_D) \leq R_{eD} \\ p_D \Big|_{r_D=R_{eD}} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

无量纲参数:

$$p_D = \frac{784.9Kh(\psi_i - \psi)}{Q_{sc} T_f};$$

$$T_D = \frac{t_D}{C_D};$$

$$t_D = \frac{3.6 \times 10^{-3} Kt}{\Phi \mu c_i r_w^2};$$

$$C_D = \frac{0.159 2C}{h \Phi c_i r_w^2};$$

$$r_D = \frac{r}{r_w e^{-S}};$$

$$\lambda_{aD} = \frac{Khr_w \lambda_a}{1.842 Q_{sc} \mu B_g};$$

$$\lambda_{cD} = \frac{Khr_w \lambda_c}{1.842 Q_{sc} \mu B_g};$$

$$\psi = 2 \int_{p_m}^p \frac{p}{\mu Z} dp;$$

$$\xi = \frac{\lambda_{cD} e^{-S} (\lambda_{cD} e^{-S} - \lambda_{aD} e^{-S})}{(\lambda_{cD} e^{-S} - \lambda_{aD} e^{-S} - \partial p_D / \partial r_D)^2};$$

$$\zeta = \frac{1}{1 - \frac{\lambda_{cD} e^{-S} - \lambda_{aD} e^{-S}}{\partial p_D / \partial r_D}}$$

式中: p_D 为无量纲压力; T_D 为无量纲有效时间; t_D 为无量纲时间; C_D 为无量纲井筒存储系数; r_D 为无量纲坐标; λ_{aD} 为无量纲最小启动压力梯度; λ_{cD} 为无量纲平均启动压力梯度; ξ 和 ζ 为低渗透非线性渗流参数; R_{eD} 为无量纲外边界半径; R_{iD} 为无量纲动边界半径; B_g 为气体体积系数, m^3/m^3 ; C 为井筒存储系数, m^3/MPa ; c_i 为总压缩系数, $1/\text{MPa}$; h 为地层有效厚度, m ; K 为储层渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; ψ 为拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$; Q_{sc} 为气体标况下的总流量, m^3/d ; r_w 为井筒半径, m ; S 为表皮系数; t 为时间, h ; T_f 为储层温度, K ; Φ 是储层孔隙度; μ 是储层中流体的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; λ_a 最小启动压力梯度, MPa/m ; λ_c 平均启动压力梯度, MPa/m 。

Pascal^[21] 和刘慈群^[22] 在较早就指出,当存在启动压力梯度时,非定常渗流过程中压力扰动的传播不应假定为瞬时到达无穷远,而是存在一个动边界,该动边界为压力扰动的外边界。以上建立的模型中 R_{iD} 为动边界半径,需利用数值迭代方法确定。忽略动边界能够简化模型求解的难度,但不能准确反应低渗透地层压力扰动的传播规律,也得不到准确的井底压力值^[17]。

当假定最小(真实)启动压力梯度等于平均启动压力梯度时,即 $\lambda_{aD} = \lambda_{cD}$,控制方程式(6)简化为常采用的具有平均启动压力梯度的低渗透拟线性模型[方程式(11)],说明目前常采用的拟线性模型是本文非线性模型的特例。

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{cD} e^{-S}}{r_D} = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \quad (11)$$

2.2 模型求解

由于建立的方程为非线性方程,无法获取其解析解。利用有限差分法对式(6)一式(10)组成的定解问题进行求解,有限差分离散格式为:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{2(1-\xi^n)}{(\Delta R_{i-1} + \Delta R_i) \Delta R_{i-1}} - \frac{1}{R_i \Delta R_{i-1}} \right) p_{i-1}^{n+1} + \\ & \left(\frac{1}{R_i \Delta R_{i-1}} - \frac{2(1-\xi^n)}{\Delta R_{i-1} \Delta R_i} - \frac{1}{C_D e^{2S} \Delta T_n} \right) p_i^{n+1} + \\ & \frac{2(1-\xi^n)}{(\Delta R_{i-1} + \Delta R_i) \Delta R_i} p_{i+1}^{n+1} = - \frac{p_i^n}{C_D e^{2S} \Delta T_n} - \\ & \frac{\zeta^n \lambda_{cd} e^{-S}}{R_i} \left(\frac{1}{\Delta R_0} + \frac{1}{\Delta T_n} \right) p_0^{n+1} - \frac{1}{\Delta R_0} p_1^{n+1} = \\ & 1 + \zeta^n \lambda_{cd} e^{-S} + \frac{1}{\Delta T_n} p_0^n \\ & p_N^{n+1} = p_{N-1}^{n+1} - \lambda_{ad} e^{-S} \Delta R_{N-1} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

式中: ΔR_i 为空间步长, ΔT_n 为时间步长。该方程组的未知数和方程数均为网格结点数, 计算中采用的空间步长和时间步长均不是等步长, 空间网格在井筒附近进行加密处理, 时间步长按照对数分布, 为了保证精度每个对数周期设置 30 个时间点。根据方程组(12)建立三对角矩阵, 并采用追赶法求解, 即可获得模型的解。动边界半径 R_{fd} 随时间而变化, 需采用迭代求解的方法确定。数值计算中对于某 T_D 时刻选取动边界半径值 R_{fd} 为一系列的定值, 当计算得到的 R_{fd} 位置处的无量纲压力绝对值小于小量 ϵ 时, 即可认为所选取的 R_{fd} 是正确的, 本文 ϵ 取值为 10^{-5} 。

3 计算结果及分析

3.1 模型结果验证

为了验证本文建立模型及计算方法的正确性, 令最小启动压力梯度等于平均启动压力梯度, 即非线性模型退化为目前文献常采用的拟线性模型。图 2 为本文计算得到的不同时刻动边界半径与李凡华等^[12] 计算结果的对比图, 从结果对比可以发现, 本文计算得到的数值解与李凡华等^[12] 计算得到的数值解吻合一致, 从而验证了本文模型及计算方法的正确性。

3.2 压降阶段的井底压力响应曲线及压力剖面

图 3 为利用三参数非线性模型计算得到压降阶段的井底压力响应曲线, 并同目前常用的拟线性模型($\lambda_{ad} = \lambda_{cd}$) 结果进行对比, 其中 $C_D e^{2S}$ 为 100, 外边界 R_{eD} 为 1 000。从计算结果可知, 在启动压力梯度的影响下, 井底压力响应曲线在径向流阶段偏离 0.5 线, 呈现上翘趋势。对比 2 条曲线可知, 径向流阶段拟线性模型的上翘幅度稍微高于三参数非线性模

型, 这是由于相同速度(低速)下, 拟线性模型所需的压力梯度要高于三参数非线性模型(图 1)。此外, 由于拟线性模型中将平均启动压力梯度作为流动的最小梯度, 使得其动边界扩展速度要小于考虑最小(真实)启动压力梯度的三参数模型, 因此拟线性模型的外边界响应时间要晚于三参数非线性模型, 如图 3 所示。

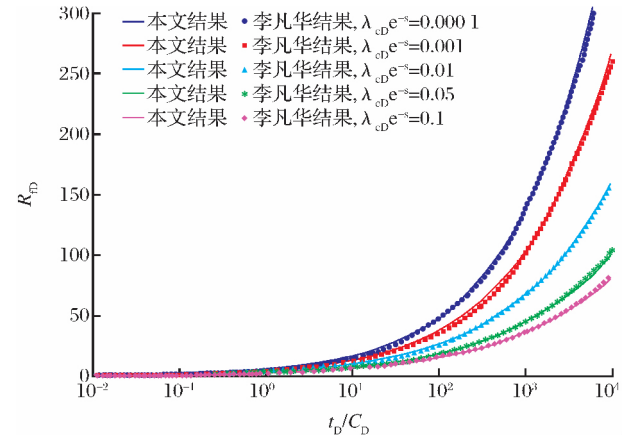


图 2 本文数值计算得到的动边界与前人结果对比^[12]
Fig. 2 Comparison of moving boundary results using different methods^[12]

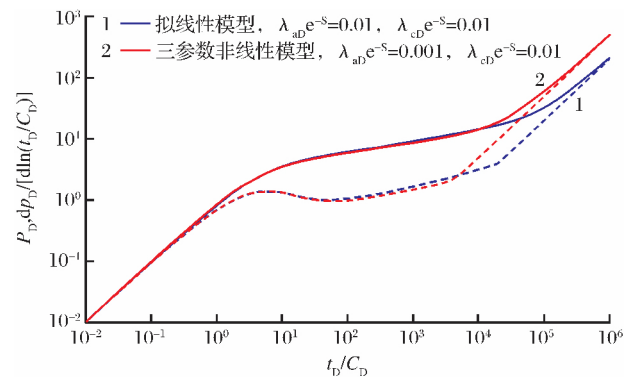


图 3 压降阶段的井底压力响应曲线
Fig. 3 Pressure response curves in pressure drop stage

图 4 为不同最小启动压力梯度和平均启动压力梯度的井底压力响应曲线, $C_D e^{2S}$ 均为 10, 外边界 R_{eD} 均为 1 000, 图中箭头标示外边界响应大概的时间点。曲线 1 和曲线 2 的平均启动压力梯度相等, 而最小启动压力梯度不相等, 2 条曲线在遇到外边界前基本重合, 但曲线 1 的外边界响应较早。曲线 1—曲线 4 的最小启动压力梯度逐渐增加, 外边界响应时间也增加, 由此说明最小启动压力梯度主要影响外边界响应的早晚。另外, 平均启动压力梯度越大, 压力导数曲线上翘幅度越大。通过 4 条曲线的对比可知: 压力导数曲线偏离 0.5 线的大小(上翘的

幅度),主要取决于平均启动压力梯度;而外边界响应的早晚,主要取决于最小启动压力梯度。

图 5 为时间 T_D 等于 10^4 时不同启动压力梯度的储层压力剖面对比图。从图中可以看到:

- (1) 平均启动压力梯度越大,压力剖面越尖锐越陡。
- (2) 在最小启动压力梯度大于 0 的情况下,压力剖面线与 x 轴不再相切,而是呈一定斜率,该斜率等于最小启动压力梯度,因此曲线 4 的斜率最大最明显。
- (3) 最小启动压力梯度越大,动边界扩展的速度越慢,外边界响应越晚。

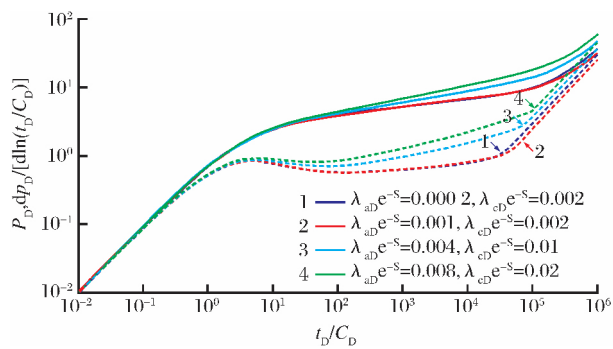


图 4 压降阶段不同启动压力梯度的井底压力响应曲线
Fig. 4 Pressure response curves of different start-up pressure gradient in pressure drop stage

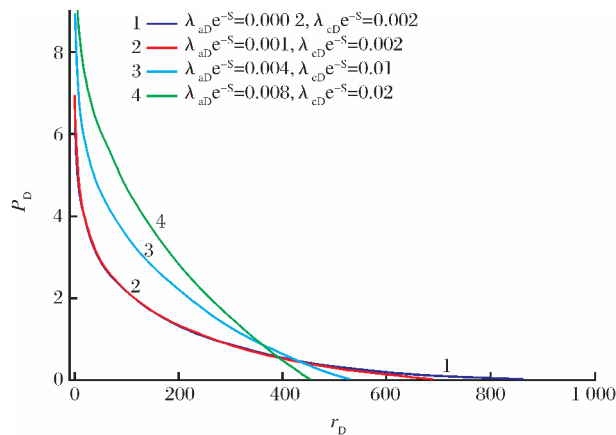


图 5 压降阶段不同启动压力梯度的压力剖面
($T_D = 10^4$)

Fig. 5 Pressure profile of different start-up pressure gradient in pressure drop stage ($T_D = 10^4$)

3.3 压恢阶段的井底压力响应曲线

在低渗透储层中,关井压力恢复阶段的井底压力响应曲线与开井压降阶段的井底压力响应曲线有着较大的不同。图 6 为压力恢复阶段的井底压力响

应曲线,其中 $C_D e^{2S}$ 为 10,外边界 r_{eD} 为 3 000,开井无量纲时间为 10^4 。从计算结果可知,拟线性模型的压恢曲线并不存在压力导数上翘的现象,而实测压恢曲线会出现上翘现象,这是拟线性模型的缺陷。采用三参数非线性模型计算得到的曲线会出现上翘,不同的是压恢曲线上翘的幅度没有压降曲线那么大。

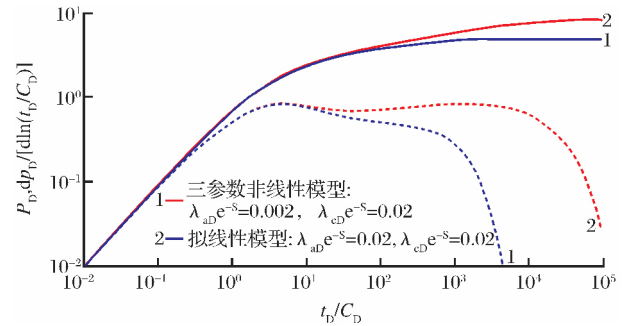


图 6 压恢阶段的井底压力响应曲线

Fig. 6 Pressure response curves in pressure buildup stage

图 7 为压力恢复阶段不同启动压力梯度的井底压力响应曲线。图中曲线 1 和曲线 2 的平均启动压力梯度与最小启动压力梯度的差值相等,2 条曲线在早期阶段基本重合,在后期最小启动压力梯度大的曲线 2 下掉的早。相比曲线 1 和曲线 2,曲线 3 上翘的幅度较小,下掉的时间更早。通过分析 4 条曲线的启动压力梯度值,可以发现:(1)压力恢复阶段压力导数曲线的上翘幅度不是由平均启动压力梯度决定,而是由平均启动压力梯度与最小启动压力梯度的差值决定,差值越大,上翘幅度越大。(2)最小启动压力梯度越大,压力导数曲线下掉的越早,即储层中的流体越早达到静止。

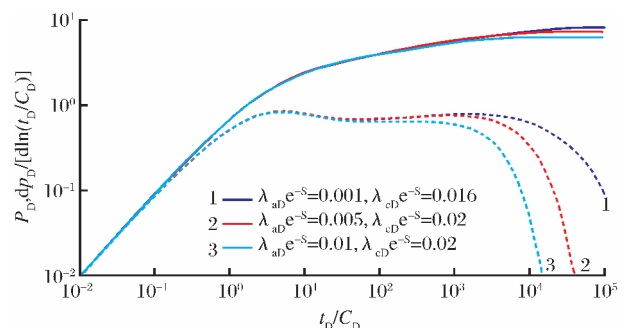


图 7 压恢阶段不同启动压力梯度的井底压力响应曲线
Fig. 7 Pressure response curves of different start-up pressure gradient in pressure buildup stage

4 结论

采用三参数低渗透非线性渗流方程,建立了一

种致密气藏非线性数值试井模型,采用有限差分方法进行求解,获得了低渗透非线性渗流的井底压力响应曲线及储层压力分布。对井底压力响应曲线及储层压力分布的研究表明:

(1)对比拟线性模型和三参数非线性模型可知,2种模型计算的结果有较大的差别,三参数非线性模型的计算结果更准确,尤其是在压力恢复阶段时。

(2)具有启动压力梯度的井底压力响应曲线在系统径向流阶段偏离0.5线。在压降曲线中,偏离0.5线的大小主要取决于平均启动压力梯度;在压力恢复曲线中,偏离0.5线的大小主要取决于平均启动压力梯度与最小启动压力梯度的差值大小。

(3)外边界响应的早晚,主要取决于最小启动压力梯度。最小启动压力梯度越大,动边界扩展的速度越慢,同等测试时间,调查半径越小。

(4)平均启动压力梯度越大,压力剖面的梯度越大,在最小启动压力梯度大于0的情况下,压力剖面曲线与x轴不再相切,而是呈一定斜率,该斜率等于最小启动压力梯度。

参考文献 (References)

- [1] Ge Jiali. Reservoir Seepage Mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982: 29-31. [葛家理. 油气层渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982: 29-31.]
- [2] Zhu Weiyao, Song Hongqing, He Dongbo, *et al.* Low-velocity Non-Darcy gas seepage model and productivity equations of low-permeability water-bearing gas reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(5): 685-689. [朱维耀, 宋洪庆, 何东博, 等. 含水低渗气藏低速非达西渗流数学模型及产能方程研究[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(5): 685-689.]
- [3] Yan Qinglai, He Qiuxuan, Wei Ligang, *et al.* A laboratory study on percolation characteristics of single phase flow in low-permeability reservoirs[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute; Nature Science Edition, 1990, 5(2): 1-6. [闫庆来, 何秋轩, 尉立岗, 等. 低渗透油层中单相液体渗流特征的实验研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 1990, 5(2): 1-6.]
- [4] Huang Yanzhang. Percolation Mechanism in Low Permeability Reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998. [黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.]
- [5] Ren Xiaojuan, Yan Qinglai, He Qiuxuan, *et al.* The experimental study of characteristics of gas flow in tight formation[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute; Nature Science Edition, 1997, 12(3): 22-25. [任晓娟, 闫庆来, 何秋轩, 等. 低渗气层气体的渗流特征实验研究[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 1997, 12(3): 22-25.]
- [6] He Wei, Feng Xi, Zhong Fuxun. Discussion on the special percolation mechanism of low permeability reservoir and the performance characteristics of low permeability gas well[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(supplement 1): 91-94. [贺伟, 冯曦, 钟孚勋. 低渗透层特殊渗流机理和低渗透气井动态特征探讨[J]. 天然气工业, 2002, 22(增刊 1): 91-94.]
- [7] Yang Zhaopeng, Li Xingmin, Liu Shangqi, *et al.* Threshold pressure effect of low permeability tight gas reservoirs in Sulige Gasfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 347-354. [杨朝蓬, 李星民, 刘尚奇, 等. 苏里格低渗透致密气藏阈压效应[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 347-354.]
- [8] Huang Yanzhang. Nonlinear percolation feature in low permeability reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1997, 4(1): 9-14. [黄延章. 低渗透油层非线性渗流特征[J]. 特种油气藏, 1997, 4(1): 9-14.]
- [9] Deng Ying'er, Liu Ciqun. Mathematical model of nonlinear flow law in low permeability porous media and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4): 72-77. [邓英尔, 刘慈群. 低渗油藏非线性渗流规律数学模型及其应用[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 72-77.]
- [10] Huang Yanzhang, Yang Zhengming, He Ying, *et al.* Nonlinear porous flow in low permeability porous media[J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(5): 1-8. [黄延章, 杨正明, 何英, 等. 低渗透多孔介质中的非线性渗流理论[J]. 力学与实践, 2013, 35(5): 1-8.]
- [11] Cheng Shiqing, Li Yuegang. Numerical solution of well testing model for low-speed non-Darcy flow and its application[J]. Natural Gas Industry, 1996, 16(3): 27-30. [程时清, 李跃刚. 低速非达西渗流试井模型的数值解及其应用[J]. 天然气工业, 1996, 16(3): 27-30.]
- [12] Li Fanhua, Liu Ciqun. Pressure transient analysis for unsteady porous flow with start-up pressure derivative[J]. Well Testing, 1997, 6(1): 1-4. [李凡华, 刘慈群. 含启动压力梯度的不定常渗流的压力动态分析[J]. 油气井测试, 1997, 6(1): 1-4.]
- [13] Liu Yuwu, Ding Zhenhua, He Fengzhen. Three kinds of methods for determining the start-up pressure gradients in low permeability reservoir[J]. Well Testing, 2002, 11(4): 1-4. [刘曰武, 丁振华, 何凤珍. 确定低渗透油藏启动压力梯度的三种方法[J]. 油气井测试, 2002, 11(4): 1-4.]
- [14] Liu Qiguo, Yang Xueming, Wei Hongmei, *et al.* Study of well-test model of low permeability's dual-pore media with flowing boundary in oil and gas[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004(5): 30-33. [刘启国, 杨旭明, 魏红梅, 等. 动边界影响的低渗双重介质油气藏试井解释模型[J]. 西南石油学院学报, 2004(5): 30-33.]
- [15] Guo Yongcun, Lu Detang, Zeng Qinghong, *et al.* Mathematical model of fluid flow in porous media related to start-up pressure gradients[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2005(4): 492-498. [郭永存, 卢德唐, 曾清红, 等. 有启动压力梯度渗流的数学模型[J]. 中国科学技术大学学报, 2005(4): 492-498.]
- [16] Zhang Xianmin, Tong Dengke. Nonlinear flow analysis of methane in low permeability coal seams[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(10): 219-223. [张先敏, 同登科. 低渗透煤层

- 气非线性流动分析[J]. 工程力学, 2010, 27(10): 219-223.]
- [17] Wang Xiaodong, Hou Xiaochun, Hao Mingqiang, *et al.* Pressure transient analysis in low-permeable media with threshold gradients[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 847-851. [王晓冬, 侯晓春, 郝明强, 等. 低渗透介质有启动压力梯度的不稳态压力分析[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 847-851.]
- [18] Yao Jun, Liu Shun. Well test interpretation model based on mutative permeability effects for low-permeability reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(3): 430-433. [姚军, 刘顺. 基于动态渗透率效应的低渗透油藏试井解释模型[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 430-433.]
- [19] Jiang Ruizhong, Li Linkai, Xu Jianchun, *et al.* A nonlinear mathematical model for low-permeability reservoirs and well-testing analysis[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 264-268. [姜瑞忠, 李林凯, 徐建春, 等. 低渗透油藏非线性渗流新模型及试井分析[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 264-268.]
- [20] Zheng Likun. Establishment of trinomial productivity equation for non-Darcy effect low permeability gas reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(1): 146-149. [郑丽坤. 低渗透气藏非达西渗流三项式产能方程的建立[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 146-149.]
- [21] Pascal H. Nonsteady flow through porous media in the presence of a threshold gradient[J]. *Acta Mechanica*, 1981, 39(3/4): 207-224.
- [22] Liu Ciqun. The approximate solution of solidify with threshold ratio decline[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1982, 4(3): 107-109. [刘慈群. 有起始比降固结问题的近似解[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(3): 107-109.]

Numerical well test analysis of tight gas reservoirs based on the three parameter nonlinear seepage

Ouyang Wei-ping^{1,2}, Zhang Mian¹, Liu Yue-wu³, Wan Yi-zhao³, Yuan Dong-ru¹, Li Shan-shan¹

(1. *Changqing Downhole Technology Company, Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd., CNPC, Xi'an 710018, China;*

2. *Postdoctoral Research Station, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;*

3. *Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics,*

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The well testing models in low permeability reservoir are normally realized by using pseudo-linear flow equation with the average start-up pressure gradient. However, the pseudo-linear flow equation can only reflect the characteristics of start-up pressure gradient in low permeability reservoir. It cannot describe the characteristic of nonlinear flow. The three-parameter nonlinear seepage flow equation not only reflects the characteristics of the starting pressure gradient, also describes the non-linear concave curve. In order to improve the interpretation accuracy of the well test data in tight gas reservoir and perfect the nonlinear well testing theory, this paper presents a nonlinear numerical well testing model based on the three-parameter nonlinear seepage flow equation. With the model, the wellbore pressure response curves and pressure fields were obtained by using finite difference method. The characteristics of pressure response curves and pressure fields were analyzed. Effects of minimum start-up pressure gradient and average start-up pressure gradient on pressure response curves and pressure fields were studied. The results proved that the pressure derivative curves in radial flow phase deviating from the 0.5 line. The upward amplitude of pressure drop curves depends on the average start-up pressure gradient; the upward amplitude of pressure buildup curves depends on the difference between the average start-up pressure gradient and the minimum start-up pressure gradient. Response time of the out boundary depends on the minimum starting pressure gradient.

Key words: Tight gas reservoir; Nonlinear flow; Numerical well test; The minimum start-up pressure gradient; The average start-up pressure gradient; Pressure response curves