

文章编号: 1000-4750(2006)07-0040-05

变形介质双渗模型非线性流动模拟

田 冀^{1,2}, *同登科³

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 胜利油田有限公司孤东采油厂, 山东 东营 256504; 3. 石油大学, 山东 东营 257061)

摘 要: 在碳酸盐油藏和低渗油藏的渗流问题研究中, 传统的研究方法都是假设地层渗透率是常数, 然而对于地层渗透率是压力敏感的, 这样的假设, 对压力的变化将导致较大的误差。研究了应力敏感地层中双渗流动模型的压力不稳定响应, 不仅考虑了储层的双渗特征, 而且考虑了应力敏感地层中介质的变形, 建立了应力敏感地层双孔隙度、双渗透率流动的数学模型, 渗透率依赖于孔隙压力变化的流动方程是强非线性的, 采用 Douglas-Jones 预估-校正法获得了圆井定产量生产和定压生产时无限大地层情况下的数值解, 并探讨了变形参数和双重介质参数变化时压力变化规律, 给出了典型压力曲线图版和应用实例。

关键词: 变形介质; 双渗模型; 渗透率模数; 压力曲线图版; 数值解

中图分类号: O345; TE312 **文献标识码:** A

THE NONLINEAR FLOW SIMULATION USING DOUBLE PERMEABILITY MODEL IN DEFORMED MEDIA

TIAN Ji^{1,2}, *TONG Deng-ke³

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China; 2. Gudong Petroleum Factory of Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong 256504, China; 3. Petroleum University, Dongying, Shandong 257061, China)

Abstract: Fluid flow in hydrocarbon and low permeability reservoirs is traditionally analyzed by assuming that the formation permeability is constant. However, the assumption can result in significant errors in the estimation of temporal and spatial variation of pressures when the formation permeability is pressure sensitive. The transient pressure response of a double porosity and double permeability media that is stress-sensitive is studied. Not only the double permeability feature of oil reservoir but also the deformation of medium in stress-sensitive reservoir is considered, and the mathematical model of the deformation double porosity/double permeability medium is constructed. The dependence of permeability on pore pressure makes the flow equation strongly nonlinear. The numerical solution of a constant-rate production of a finite radius well is obtained by the Douglas-Jones predictor-corrector in an infinitely large system. The change rule of pressure is discussed when the parameters of double porous medium and the parameters of deformation change. The plots of typical pressure variation are given in a few cases, and an application example of the proposed method is also given.

Key words: deformed medium; the double porosity/double permeability model; Permeability modulus; the plots of pressure variation; numerical solution

传统的渗流力学都是把地层看成是均质的, 而且地层渗透率是常数, 它不随压力发生变化, 这样的假设在许多情况下可获得很好的结果。但是真实

油气层地质因素十分复杂, 地层渗透率不是常数, 而是压力的函数, 通常叫变形介质, 这在一些碳酸盐岩的纯裂缝地层、致密性油藏中表现的尤为明

收稿日期: 2004-10-08; 修改日期: 2005-01-19

基金项目: 国家 973 项目(2002CB211708)和山东省自然科学基金资助项目(Y2003F01)

作者简介: 田 冀(1963), 男, 江西瑞昌人, 高级工程师, 从事油气田开发理论及应用研究(E-mail: tianji@cnooc.com.cn);

*同登科(1963), 男, 陕西延安人, 教授, 博士, 从事渗流理论及其应用研究(E-mail: tongdk@hdpu.edu.cn)。

显。在这些储层中,随着地下原油开采量的增加,常渗透率的假定已不再合适了,原因是在致密油藏中,随孔隙压力的减小,将会导致岩石有效应力的增加,因而孔隙尺寸将会减小以维持平衡,结果会导致渗流阻力的增加。另一方面,地层是裂缝性储层,且具有双孔隙度/双渗透率特征。由此双重介质油藏渗流理论得以发展并得以在实际中应用。

Pedrosa^[1,2]建立了均质变形介质圆柱系统的流动模型,并用扰动技巧求解了流动方程,分析了流动特征, Yeung^[3]考虑了均质变形介质球向流动问题,建议一种简单的技巧获得近似解析解,但精度较低。同登科^[4,5]建立了分形介质渗透率敏感于地层压力的数学模型,获得应力敏感于地层渗透率的分形介质的近似解,并眼储集和表皮效应对压力动态的影响被考虑。同登科^[6-8]建立了应力敏感地层双重介质的流动模型。采用数值方法求解了渗流模型,探讨了其渗流规律。苏玉亮^[9]利用解析法和数值法对变形介质中一维线性-弹性直线渗流的数学模型进行求解,与常规的线性-弹性不稳定渗流解进行了比较,并着重分析了渗透率的变化对地层压力分布的影响。而他们都未考虑压力敏感于地层渗透率的双渗模型,且实际生产中存在着大量的双渗流动。因而研究变形双渗流动模型更有理论价值和实际意义。在现在的研究中,我们不仅考虑了介质的双渗流动特征,而且考虑了介质的变形,引入了双渗的渗透率模数,建立了应力敏感地层双渗介质圆柱对称系统的流动方程。采用数值方法求解了有限半径井定产量生产和定压生产时无限大地层情况,探讨了其渗流规律。

1 数学模型

碳酸盐岩储层往往是由无数裂缝以及被裂缝所分割的无数具有一般多孔介质结构的岩块所组成的双重孔隙介质。裂缝是流体在地层中流动的主要通道,岩块则是流体在地层中的主要储集空间。可把裂缝系统和岩块组成的系统看作是同一空间复合着的两个彼此独立而又互相联系的水动力场。设裂缝和岩块的孔隙度、渗透率分别为 $\varphi_f, \varphi_m, k_f, k_m$,压力分别为 P_f, P_m ,在生产过程中裂缝和岩块同时发生形变。裂缝和岩块的渗透率模数类似于压缩系数可定义如下^[1]:

$$\beta = \frac{1}{k_f} \frac{dk_f}{dP_f} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{1}{k_m} \frac{dk_m}{dP_m} \quad (2)$$

系数 β 在裂缝系统、 γ 在岩块系统的有效应力影响渗透率中起着重要作用,是渗透率依赖于裂缝压力和岩块压力的量度,对于实际用途可假定 β, γ 为常数,则

$$k_f = k_0 e^{-\beta(P_0 - P_f)} \quad (3)$$

$$k_m = k_1 e^{-\gamma(P_0 - P_m)} \quad (4)$$

无限大地层双孔隙度、双渗透率微可压缩液体向中心一口井流动。其运动方程分别为:

$$\begin{cases} v_f = -\frac{k_f}{\mu} \frac{\partial P_f}{\partial r} \\ v_m = -\frac{k_m}{\mu} \frac{\partial P_m}{\partial r} \end{cases} \quad (5)$$

连续方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\varphi_f \rho)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_f) - q^* = 0 \\ \frac{\partial(\varphi_m \rho)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_m) + q^* = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中 μ, ρ 分别为流体粘度和密度。

窜流方程为:

$$q^* = \frac{\rho \alpha k_m}{\mu} (P_m - P_f) \quad (7)$$

α 为岩块形状参数。

将方程(3)~方程(5),方程(7)代入方程(6)可得:

$$\begin{aligned} \varphi_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \varphi_f}{\partial t} - \frac{\rho}{\mu r} k_0 e^{-\beta(P_0 - P_f)} \frac{\partial P_f}{\partial r} - \\ \frac{k_0 e^{-\beta(P_0 - P_f)}}{\mu} \frac{\partial \rho}{\partial P_f} \left(\frac{\partial P_f}{\partial r} \right)^2 - \frac{k_0 \beta e^{-\beta(P_0 - P_f)}}{\mu} \left(\frac{\partial P_f}{\partial r} \right)^2 - \\ \frac{k_0 e^{-\beta(P_0 - P_f)}}{\mu} \frac{\partial^2 P_f}{\partial r^2} - \frac{\rho \alpha k_1 e^{-\gamma(P_0 - P_m)}}{\mu} (P_m - P_f) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_m c_{i2} \frac{\partial P_f}{\partial t} - \frac{1}{r \mu} k_1 e^{-\gamma(P_0 - P_m)} \frac{\partial P_m}{\partial r} - \\ (c_L + \gamma) \frac{k_1 e^{-\gamma(P_0 - P_m)}}{\mu} \frac{\partial \rho}{\partial P_m} \left(\frac{\partial P_m}{\partial r} \right)^2 - \\ \frac{k_1 e^{-\beta(P_0 - P_m)}}{\mu} \frac{\partial^2 P_m}{\partial r^2} + \frac{k_1 e^{-\gamma(P_0 - P_m)}}{\mu} (P_m - P_f) = 0 \end{aligned}$$

$$\text{其中 } c_f = \frac{1}{\varphi_f} \frac{\partial \varphi_f}{\partial P_f}, c_L = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P_f},$$

$$c_{i1} = c_f + c_L, c_m = \frac{1}{\varphi_m} \frac{\partial \varphi_m}{\partial P_f},$$

$$c_{Lm} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P_m}, c_{i2} = c_m + c_{Lm}$$

无量纲变量定义为

$$P_{Di} = \frac{2\pi(k_0 + k_1)h(P_0 - P_i)}{\mu q}, (i = f, m), r_D = \frac{r}{r_w},$$

$$t_D = \frac{(k_0 + k_1)t}{\mu r_w^2 (\varphi_f c_{i1} + \varphi_m c_{i2})}, \omega = \frac{\varphi_f c_{i1}}{\varphi_f c_{i1} + \varphi_m c_{i2}},$$

$$\lambda = \alpha r_w^2 \frac{k_1}{(k_0 + k_1)}, D = \frac{k_1}{k_0}, \beta_D = \frac{\mu q \beta}{2\pi(k_0 + k_1)h},$$

$$\gamma_D = \frac{\mu q \gamma}{2\pi(k_0 + k_1)h}$$

r_w 是井眼半径, h 是储层厚度, q 是油井流量。则得无因次形式流动方程为:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{1+D} \left[\frac{\partial^2 P_{Df}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial P_{Df}}{\partial r_D} - \beta_D \left(\frac{\partial P_{Df}}{\partial r_D} \right)^2 \right] + \\ & \lambda e^{\beta_D P_{Df} - \gamma_D P_{Dm}} (P_{Dm} - P_{Df}) = e^{\beta_D P_{Df}} \omega \frac{\partial P_{Df}}{\partial t_D} \\ & \frac{D}{1+D} \left[\frac{\partial^2 P_{Dm}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial P_{Dm}}{\partial r_D} - \gamma_D \left(\frac{\partial P_{Dm}}{\partial r_D} \right)^2 \right] + \\ & \lambda (P_{Df} - P_{Dm}) = e^{\gamma_D P_{Dm}} (1-\omega) \frac{\partial P_{Dm}}{\partial t_D} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

2.1 变形介质定产生产双渗模型

无限大地层中心一口井定产量生产时,由(8)~(12)式组成数学模型 I:

$$\left[\frac{D}{D+1} e^{-\gamma_D P_{Dm}} \frac{\partial P_{Dm}}{\partial r_D} + \frac{1}{D+1} e^{-\beta_D P_{Df}} \frac{\partial P_{Df}}{\partial r_D} \right]_{r_D=1} = -1 \quad (9)$$

$$P_{Df} \Big|_{r_D=1} = P_{Dm} \Big|_{r_D=1} \quad (10)$$

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} P_{Df} = \lim_{r_D \rightarrow \infty} P_{Dm} = 0 \quad (11)$$

$$P_{Df} \Big|_{t_D=0} = P_{Dm} \Big|_{t_D=0} = 0 \quad (12)$$

对数学模型 I 作变换

$$P_{Df} = \xi, P_{Dm} = \eta, x = \ln r_D$$

得

$$(I) \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\partial^2 \eta}{\partial x} - \gamma_D \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \right] + \lambda \frac{1+D}{D} e^{2x} (\xi - \eta) = \\ & e^{\gamma_D \eta} \frac{1+D}{D} (1-\omega) e^{2x} \frac{\partial \eta}{\partial t_D} \\ & \left[\frac{\partial^2 \xi}{\partial x} - \beta_D \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 \right] + \lambda (1+D) e^{2x} e^{\beta_D \xi - \gamma_D \eta} (\eta - \xi) = \\ & e^{\beta_D \xi} (1+D) e^{2x} \omega \frac{\partial \xi}{\partial t_D} \\ & \left[\frac{D}{D+1} e^{-\gamma_D \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{D+1} e^{-\beta_D \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} \right]_{x=0} = -1 \\ & \eta \Big|_{x=0} = \xi \Big|_{x=0} = 0 \\ & \lim_{x \rightarrow \infty} \eta = \lim_{x \rightarrow \infty} \xi = 0 \\ & \eta \Big|_{x=0} = \xi \Big|_{x=0} \end{aligned} \right.$$

1.2 变形介质定压生产双渗模型

无限大地层中心一口井定压生产时,由式(8)和式(11)~式(13)组成数学模型 II:

$$P_{Df} \Big|_{r_D=1} = P_{Df} \Big|_{r_D=1} = 1 \quad (13)$$

模型 I 和模型 II 都是非线性问题,求不出解析解,下面采用数值方法求解。

2 数值模拟方法

2.1 数值格式

Ikoku 和 Ramey^[10]利用 Douglas-Jones 预估—校正法得到了均质油藏中单向幂律流体的不稳定流动方程的数值解。在这个推导中时间每增加半个单位,有限差分方程就会推进解式。

根据预估—校正法,可推出方程的预估格式为:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\eta_{i+1}^{j+1/2} - 2\eta_i^{j+1/2} + \eta_{i-1}^{j+1/2}}{(\Delta x)^2} = \gamma_D \left(\frac{\eta_{i+1}^j - \eta_{i-1}^j}{2\Delta x} \right)^2 - \\ & \frac{\lambda(1+D)e^{2(i-1)\Delta x}}{D} (\xi_i^j - \eta_i^j) + \\ & \frac{1+D}{D} (1-\omega) e^{2(i-1)\Delta x} e^{\gamma_D \eta_i^j} \frac{\eta_i^{j+1/2} - \eta_i^j}{\Delta t / 2} \\ & \frac{\xi_{i+1}^{j+1/2} - 2\xi_i^{j+1/2} + \xi_{i-1}^{j+1/2}}{(\Delta x)^2} = \beta_D \left(\frac{\xi_{i+1}^j - \xi_{i-1}^j}{2\Delta x} \right)^2 - \\ & \lambda(1+D) e^{2(i-1)\Delta x} e^{\beta_D \xi_i^j - \gamma_D \eta_i^j} (\eta_i^j - \xi_i^j) + \\ & \omega(1+D) e^{2(i-1)\Delta x} e^{\beta_D \xi_i^j} \frac{\xi_i^{j+1/2} - \xi_i^j}{\Delta t / 2} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

校正格式为:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2} (\eta_{i+1}^{j+1} - 2\eta_i^{j+1} + \eta_{i-1}^{j+1}) + \frac{1}{2} (\eta_{i+1}^j - 2\eta_i^j + \eta_{i-1}^j) = \\ & \frac{(\Delta x)^2}{\gamma_D \left(\frac{\eta_{i+1}^{j+1/2} - \eta_{i-1}^{j+1/2}}{2\Delta x} \right)^2} - \frac{\lambda(1+D)e^{2(i-1)\Delta x}}{D} \\ & (\xi_i^{j+1/2} - \eta_i^{j+1/2}) + \\ & \frac{1+D}{D} (1-\omega) e^{2(i-1)\Delta x} e^{\gamma_D \eta_i^{j+1/2}} \frac{\eta_i^{j+1} - \eta_i^j}{\Delta t} \\ & \frac{1}{2} (\xi_{i+1}^{j+1} - 2\xi_i^{j+1} + \xi_{i-1}^{j+1}) + \frac{1}{2} (\xi_{i+1}^j - 2\xi_i^j + \xi_{i-1}^j) = \\ & \frac{(\Delta x)^2}{\beta_D \left(\frac{\xi_{i+1}^{j+1/2} - \xi_{i-1}^{j+1/2}}{2\Delta x} \right)^2} - \\ & \lambda(1+D) e^{2(i-1)\Delta x} e^{\beta_D \xi_i^{j+1/2} - \gamma_D \eta_i^{j+1/2}} (\eta_i^{j+1/2} - \xi_i^{j+1/2}) + \\ & \omega(1+D) e^{2(i-1)\Delta x} e^{\beta_D \xi_i^{j+1/2}} \frac{\xi_i^{j+1} - \xi_i^j}{\Delta t} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

(其中 $i=1,2,3,\dots,N+1$ 和 $j=1,2,3,\dots$)

初始条件

$$\eta_i = 0, \xi_i = 0 \quad (j=0) \quad (16)$$

定产生产内边界条件(预估格式)

$$\begin{cases} \frac{D}{1+D} e^{-\gamma_D \eta_i} \frac{\eta_2^{j+1/2} - \eta_0^{j+1/2}}{2 \Delta x} + \\ \frac{1}{1+D} e^{-\beta_D \xi_i} \frac{\xi_2^{j+1/2} - \xi_0^{j+1/2}}{2 \Delta x} = -1 \\ \eta_1^{j+1/2} = \xi_1^{j+1/2} \end{cases} \quad (17)$$

定产生产内边界条件(校正格式)

$$\begin{cases} \frac{D}{1+D} e^{-\gamma_D \eta_i^{j+1/2}} \frac{\eta_2^{j+1} - \eta_0^{j+1}}{2 \Delta x} + \\ \frac{1}{1+D} e^{-\beta_D \xi_i^{j+1/2}} \frac{\xi_2^{j+1} - \xi_0^{j+1}}{2 \Delta x} = -1 \\ \eta_1^{j+1} = \xi_1^{j+1} \end{cases} \quad (18)$$

外边界条件:

$$\eta_i \rightarrow 0, \xi_i \rightarrow 0 \quad (i \rightarrow \infty) \quad (j=0,1,2,\dots) \quad (19)$$

预估格式中 $j+1/2$ 时间层是未知的,但方程组是线性的,校正格式中 $j+1$ 时间层是未知的,方程组还是线性的,且是三对角的,将初边值条件代入后可用追赶法求解。Douglas-Jones 方法的精度为 2 阶。

3 结果分析

由数值解可看出无限大地层双渗模型的完整降压曲线由三个不同的流动区组成:(1) 初时直线段,此时流动只发生在裂缝系统中;(2) 过渡段,在初时直线段结束时出现,由于在流动过程中岩块参与的增加,过渡段裂缝系统的降压减缓;(3) 晚期直线段,在裂缝和岩块之间的压力达到平衡时出现。从图 1~图 6 中可看出影响压力曲线形态的基本参数有 5 个:变形介质渗透率模数 β_D , γ_D , 储集系数 ω , 介质间流动参数 λ , 岩块系统与裂缝系统的渗透率的比值 D 。它们的影响表现为:

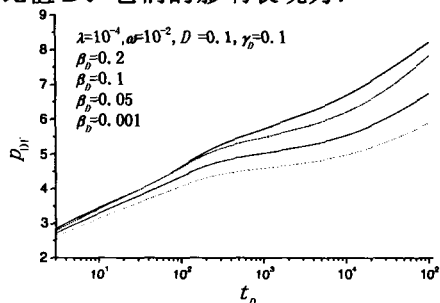


图 1 依赖于 β_D 的压力与时间半对数图

Fig.1 Plots of pressure versus time depending on β_D

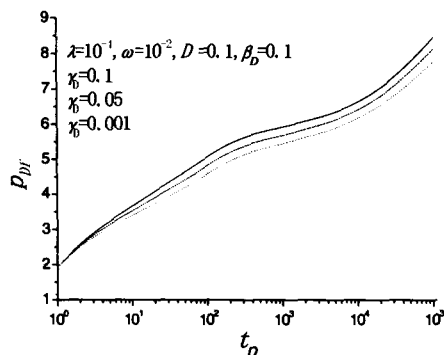


图 2 依赖于 γ_D 的压力与时间半对数图

Fig.2 Plots of pressure versus time depending on γ_D

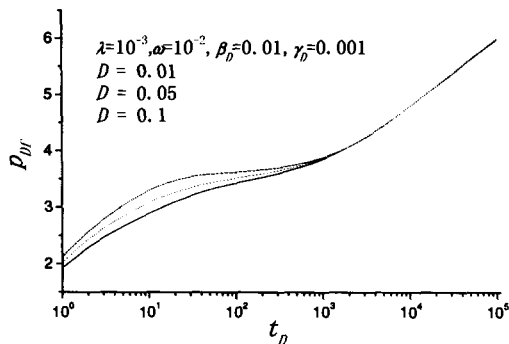


图 3 依赖于 D 的压力与时间半对数图

Fig.3 Plots of pressure versus time depending on D

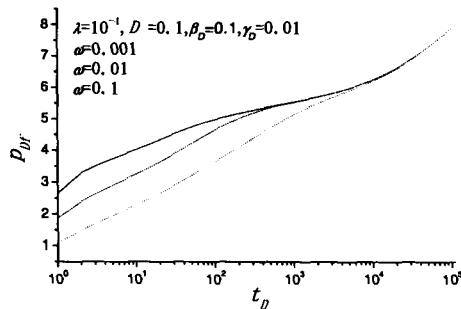


图 4 依赖于 ω 的压力与时间半对数图

Fig.4 Plots of pressure versus time depending on ω

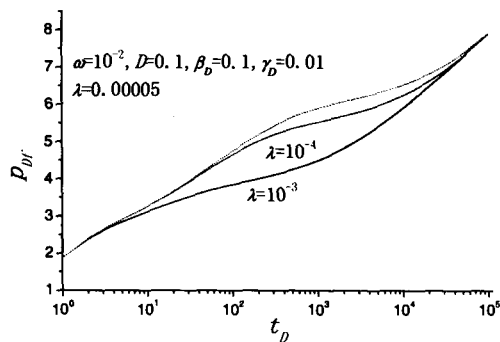
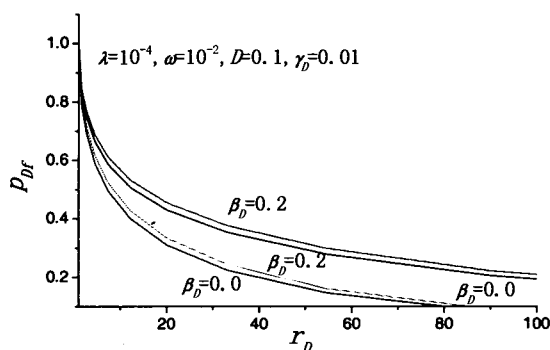


图 5 依赖于 λ 的压力与时间半对数图

Fig.5 Plots of pressure versus time depending on λ

图6 依赖于 β_D 的压力与 r_D 曲线图Fig.6 Plots of pressure versus r_D depending on β_D

在整个流动过程中， β_D 在整个流动过程中都影响着压力的变化， β_D 越小，无因次压力越小； β_D 对初时阶段的压力影响较小，随着时间的增加，其影响越来越大。而随着 β_D 的增加压力也同时增大，过渡段的出现不依赖于 β_D ，而 β_D 对压力的影响要比 γ_D 的影响大的多(如图1)。 γ_D 的影响只在过渡段和晚期直线段， γ_D 越大，无因次压力越小；初时阶段的压力及过渡段的出现不依赖于 γ_D (如图2)。

D 的影响主要在初时段和过渡段， D 越小，压力越大，在晚期阶段，压力不依赖于 D 值；且在初时段的压力曲线几乎平行。 ω 决定早期直线段和晚期直线段的距离，较小的 ω 值将导致较早的出现过渡段和较大的压力降。在初时段和过渡段间， ω 越小，压力越大；在晚期阶段，压力不依赖于 ω 值。 λ 决定过渡段出现的时间和高度， λ 越大，过渡段出现的时间越早，其压力值越小。初时压力和晚期压力不依赖于 λ 的值。

在定产量生产中，对于较小的 r_D 值，应力敏感地层对压力的影响是很重要的，特别是对较长的时间。从图中可看出，随着 β_D 的增加，压力曲线间的差异很大。无因次压力随着无因次时间 t_D 的增加和空间变量 r_D 的减少而增加，因此当分析井眼附近区域的地层的压力分布时必须考虑应力敏感地层对压力的影响(参照图6)。

4 实例分析

对某一油田实际数据利用本文模型I采用遗传算法拟合效果比较好，如图7所示。

利用遗传算法对本模型和实际数据拟合得到各种参数如下：存储比 ω ：0.001099，介质间流动参

数 λ ：0.000050，裂缝渗透率模数 β ：0.058312，基岩渗透率模数 γ ：0.051948，裂缝渗透率：0.112400，基岩渗透率：0.017830，裂缝总体压缩系数：0.001609，裂缝孔隙度：0.001468。

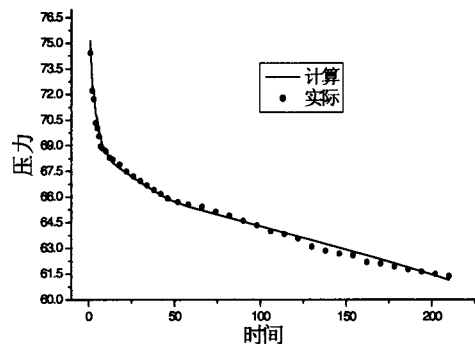


图7 压力曲线匹配图

Fig.7 Comparison of the pressure curves

参考文献:

- [1] Kikani J, Petrosa Jr. Perturbation analysis of stress-sensitive reservoir [J]. Soc. Pet. Eng. Form. Eval., 1991, 6(3): 379~386.
- [2] Petrosa O A Jr. Pressure transient response in stress-sensitive formation [A]. Paper SPE15115, presented at the 1986 SPE California regional meeting, Oakland, April, 2~4.
- [3] Yeung K, Chakrabarty C. An approximate analytical study of aquifers with pressure-sensitive permeability [J]. Water Resource Research, 1993, 29(10): 3495~3501.
- [4] 同登科. 具有应力敏感于地层渗透率的分形油藏渗流问题的近似解析研究[J].石油勘探与开发, 1999, 26(3): 53~57.
Tong Dengke. An approximate analytical study of fluids flow in fractal reservoir with pressure-sensitive formation permeability[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(3): 53~57.(in Chinese)
- [5] 同登科, 李萍. 压力依赖于地层渗透率的分形油藏的数值研究[J].西安石油学院学报, 2001, 16(2): 21~24.
Tong Dengke, Li Ping. A study on the fractal reservoir of formation pressure depending on its permeability by numerical method [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 2001, 16(2): 21~24.(in Chinese)
- [6] 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.
Tong Dengke, Jiang Dongmei, Wang Ruihe. Generalized flow analysis of fluid in deformed reservoir with double-porosity media [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2002, 19(2): 56~60.(in Chinese)

表 7 各阶模态振动的示功向量

Table 7 Modal-work-index vectors

f/Hz	5.39	7.12	10.07	14.10
方向	$x_1 \sim x_3$	x_2	x_4	$x_1 \sim x_3$
x_1	27.64	0	0	72.36
x_2	0	100	0	0
x_3	72.36	0	0	27.64
x_4	0	0	100	0

4 结论

在对已有的基于振动系统的耦合刚度、振型向量和“模态动能”分布的三种模态振动解耦程度评价方法进行系统分析的基础上,指出了各种方法的物理意义和不足之处,证明了原有的基于“模态动能”分布评价方法中的“动能”实际上是惯性力或弹性力在各自由度上所做的功,从而基于功的概念修正了该评价方法。

修正后的基于模态示功向量的模态振动解耦程度评价方法不仅继承了原有能量方法所具有的量纲统一的优点,而且物理意义准确、能够评价具有非零惯性积并具有不同类型广义坐标振动系统的振动解耦程度,克服了原有方法的不足并使其完善。计算实例表明,以模态示功向量的各个分量的相对大小判断各个自由度之间的振动耦合程度是可行的。

参考文献:

- [1] 吕振华, 冯振东, 方传流. 粘性阻尼线性振动系统的复模态特征值问题的一种新的矩阵摄动解法[J]. 应用数学和力学, 1991, 12(8): 719~728.
Lu Zhenhua, Feng Zhendong, Fang Chuanliu. A new matrix perturbation method for analytical solution of the complex modal eigenvalue problem of viscously damped linear vibration systems [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1991, 12(8): 719~728. (in Chinese)
- [2] Racca S R. How to select power-train isolators for good performance and long service life [C]. SAE Technical Paper Series 821095, 1982.
- [3] 户原春彦. 防振橡胶及其应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1982.
Huyuan Chunyan. Vibration Isolation Rubber and Their Applications [M]. Beijing: China Railway Press, 1982. (in Chinese)
- [4] 严济宽. 机械振动隔离技术[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1985.
Yan Jikuan. Mechanical Vibration Isolation Technology [M]. Shanghai: Shanghai scientific & Technical Publishers, 1985. (in Chinese)
- [5] 吕振华, 罗捷, 范让林. 汽车动力总成悬置系统隔振设计分析方法[J]. 中国机械工程, 2003, 14(3): 265~269.
Lu Zhenhua, Luo Jie, Fan Ranglin. Design and analysis method for improving vibration isolation performance of automotive powerplant mounting systems [J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(3): 265~269. (in Chinese)
- [6] 吕振华, 范让林, 冯振东. 汽车动力总成隔振悬置布置的设计思想论析[J]. 内燃机工程, 2004, 25(3): 37~43.
Lu Zhenhua, Fan Ranglin, Feng Zhendong. A survey of design methods for automotive engine mounting system [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(3): 37~43. (in Chinese)
- [7] David M F. An analysis and application of a decoupled engine mounting systems for idle isolation [C]. SAE Trans, 850976, 1985.
- [8] Jeong T, Singh R. Analytical methods of decoupling the automotive engine torque roll axis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 234(1): 85~114.
- [9] Cho S. Configuration and sizing design optimization of powertrain mounting systems [J]. International Journal of Vehicle Design, 2000, 24(1): 34~47.
- [10] 郑兆昌. 机械振动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1978.
Zheng Zhaochang. Mechanical Vibration [M]. Beijing: China Machine Press, 1978. (in Chinese)
- [7] 同登科, 姜东梅, 陈钦雷. 变形双重介质油藏动态特征[J]. 石油大学学报, 2001, 25(5): 53~56.
Tong Dengke, Jiang Dongmei, Chen Qinlei. Dynamic characteristics of reservoir with deformed double-porosity medium [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2001, 25(5): 53~56. (in Chinese)
- [8] 同登科, 张海英. 变形双重介质分形油藏流动分析[J]. 石油大学学报, 2003, 27(4): 76~79.
Tong Dengke, Zhang Haiying. Flow analysis of fluid in fractal reservoir with deformed double-porosity medium [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2003, 27(4): 76~79. (in Chinese)
- [9] 苏玉亮. 变形介质油藏开发特征[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 51~55.
Su Yuliang. A study on development characteristics for deformed reservoir [J]. Acta Petroleum Sinica, 2000, 21(2): 51~55. (in Chinese)
- [10] Ikoku C U, Ramey H J Jr. Pressure behavior during polymer flow in petroleum reservoirs [J]. Jour. Ener. Resour. Tech., 1982, 104: 149~156.

(上接第 44 页)