

页岩气藏部分压开压裂井压力动态分析

任俊杰¹, 郭平¹, 胡永强², 王德龙³

1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500
2. 中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司采气一厂, 新疆克拉玛依 834000
3. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710021

摘要 压裂井因为能够提高单井产量和降低成本在页岩气藏的开发过程中得到了广泛应用, 然而在实际生产过程中由于页岩储层普遍厚度较大, 难以被完全压开。为此, 综合考虑页岩气的解吸、扩散和渗流特征, 建立了页岩气藏部分压开压裂井的渗流模型, 应用 Laplace 变换、Fourier 变换和 Duhamel 原理, 结合 Stehfest 数值反演对模型进行求解, 绘制了相应的压力特征曲线并对其进行了流动阶段的划分, 讨论了相关参数对压力动态的影响。研究表明, 页岩气藏部分压开压裂井的压力特征曲线存在 7 个主要流动阶段; 裂缝的压开程度主要影响球形流阶段表现的明显程度及压力导数曲线前期位置的高低, 解吸系数主要影响压力导数曲线下凹的深度, 无因次储容系数主要影响压力导数曲线下凹的宽度和深度, 无因次窜流系数主要影响解吸扩散阶段出现的早晚。所获得的结果可为利用压裂井合理高效地开发页岩气藏提供理论支持。

关键词 页岩气; 部分压开压裂井; 解吸; 扩散; 渗流

中图分类号 TE33

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.21.009

Transient Pressure Analysis of Partial Open Fractured Wells in Shale Gas Reservoirs

REN Junjie¹, GUO Ping¹, HU Yongqiang², WANG Delong³

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
2. No. 1 Gas Production Plant, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China
3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China

Abstract Fractured wells find widespread applications in the development process of shale gas reservoirs because of the enhancement of the per well production and the reduction of the cost. However, the reservoir is difficult to be completely opened in practice because of the large thickness of the shale gas reservoir. In this paper, according to the characteristics of desorption, diffusion and seepage, a seepage model of partial open fractured wells in shale gas reservoirs is established. The Laplace transform, the Fourier transform and the principle of Duhamel in combination with the Stehfest numerical inversion algorithm are used to obtain solutions based on the model. The pressure characteristic curves are obtained. The flowing phases are divided in the pressure characteristic curves. The influence of the relevant parameters on the pressure dynamic characteristics is analyzed. It is shown that there are seven main flow stages in the pressure characteristic curves for partial open fractured wells in shale gas reservoirs. The open degree has a main effect on the appearance of the spherical flow period and the position of the pressure derivative curve in the early time. The desorption coefficient has a primary effect on the depth of the dip in the pressure derivative curve. The dimensionless storativity ratio has a major effect on the depth and width of the dip in the pressure derivative curve. The dimensionless transmissivity ratio has a primary effect on the starting time of the desorption and the diffusion in shale reservoirs. The results can provide a theoretical support for the high-efficiency development of shale gas reservoirs using fractured wells.

Keywords shale gas; partial open fractured well; desorption; diffusion; seepage

收稿日期: 2013-02-06; 修回日期: 2013-04-19

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05013)

作者简介: 任俊杰, 博士研究生, 研究方向为渗流力学理论及其应用, 电子邮箱: renjunjie1900@126.com; 郭平(通信作者), 教授, 研究方向为气田开发理论与方法, 电子邮箱: guopingswpi@vip.sina.com

0 引言

页岩气藏在全世界范围内有着广泛分布,其开发潜力非常巨大^[1,2]。在页岩气储层中 20%~80%的气体是以吸附态储存在页岩基质颗粒表面,其余则以游离态储存在于孔隙和裂缝中,因此页岩气存在特有的解吸、扩散特征^[3]。由于页岩气在储层中解吸、扩散和渗流相互作用,使得对页岩气藏的渗流机理及压力动态分析等方面的研究变得更加复杂。

近年来,随着压裂技术的发展,压裂井在页岩气藏的开发过程中发挥了越来越重要的作用,为此国内外学者对页岩气藏压裂井的渗流理论相继开展了部分研究工作^[4-6],但是这些研究主要是针对完全压开储层的情况,而目前尚未见到关于页岩气藏部分压开压裂井的研究成果。然而目前发现的页岩储层的厚度普遍较大,有时垂向厚度达到几百米,以现有的压裂技术很难完全压开如此厚的储层,因此有必要研究页岩气藏部分压开压裂井的渗流规律,进而更加高效地利用压裂井开发页岩气藏。

目前能够较好地描述页岩气在储层中解吸、扩散和渗流相互作用的模型是双孔隙双机制模型^[7,8]。本文在该模型的基础上综合考虑页岩气解吸、扩散和渗流特征,建立页岩气藏部分压开压裂井的渗流模型,分析研究部分压开压裂井的压力特征及其关键影响因素。

1 页岩气藏部分压开压裂井模型

1.1 物理模型

页岩气藏部分压开压裂井的物理模型如图 1 所示,假设条件如下:

- (1) 页岩气藏的厚度为 h ,初始条件下地层各处的压力为 p_i ,储层具有双孔介质特征;
- (2) 无限大页岩气藏中有一口部分压开压裂井,人工裂缝关于井筒对称,人工裂缝为无限导流裂缝;
- (3) 人工裂缝为矩形裂缝,裂缝长度为 $2x_f$,裂缝高度为 $2h_w$,裂缝中心距储层下边界的垂直距离为 z_w ;
- (4) 页岩气为单相可压缩气体;
- (5) 页岩气解吸满足 Langmuir 等温吸附方程,扩散满足 Fick 第一定律,渗流满足达西定律;
- (6) 考虑表皮效应和井筒储集效应的影响,但忽略重力及毛管力的影响。

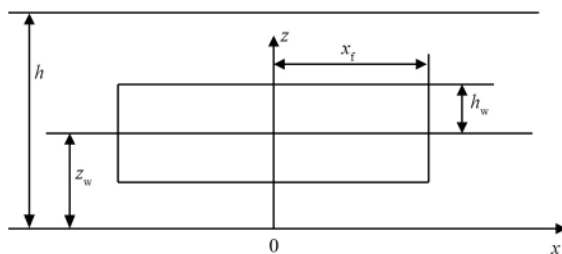


图 1 部分压开压裂井物理模型

Fig. 1 Physical model of a partial open fractured well

1.2 数学模型

考虑页岩气在储层中的扩散和渗流作用,可以得到

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_v}{k_h} \frac{p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{\phi c_g p}{Z k_h} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{p_s T}{k_h T_{sc}} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1)$$

式中, p 为地层压力, Pa; r 为径向距离, m; μ 为气体黏度, Pa·s; Z 为气体偏差因子; z 为空间坐标变量, m; ϕ 为孔隙度; c_g 为气体压缩系数, Pa⁻¹; k_h 为水平渗透率, m²; k_v 为垂向渗透率, m²; t 为时间, s; p_{sc} 为地面标准状况下的压力, Pa; T 为储层温度, K; T_{sc} 为地面标准状况下的温度, K; V 为页岩气浓度, m³/m³。

为降低式(1)的非线性,使用拟压力为

$$\psi(p) = \frac{\mu_i Z_i}{p_i} \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu Z} dp \quad (2)$$

式中, ψ 为拟压力, Pa; μ_i 为原始地层压力下气体黏度, Pa·s; Z_i 为原始地层压力下气体偏差因子; p_i 为原始地层压力, Pa; p_0 为参考压力, Pa。

将式(2)代入式(1)得

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_v}{k_h} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = \frac{\phi \mu c_g}{k_h} \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{p_s T}{k_h T_{sc}} \frac{\mu_i Z_i}{p_i} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3)$$

根据 Fick 第一定律^[9],单位时间内单位体积球形页岩基质的扩散量为

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{6\pi^2 D}{R^2} (V_E - V) \quad (4)$$

式中, D 为扩散系数, m²/s; R 为球形基质半径, m; V_E 为平衡状态下页岩气浓度, m³/m³。

定义无因次变量如下:

无因次拟压力为

$$\psi_D = \frac{2\pi k_h h}{q_{sc} B_g \mu_i} (\psi_i - \psi)$$

无因次时间为

$$t_D = \frac{k_h t}{\Lambda x_f^2}$$

其中,

$$\Lambda = \phi \mu c_g + \frac{2\pi k_h T Z_i h p_{sc}}{q_{sc} T_{sc} B_g p_i}$$

无因次距离为

$$r_D = \frac{r}{x_f} \quad x_D = \frac{x}{x_f} \quad y_D = \frac{y}{x_f} \quad z_D = \frac{z}{h} \quad x_{wD} = \frac{x_w}{x_f} \quad y_{wD} = \frac{y_w}{x_f}$$

$$z_{wD} = \frac{z_w}{h} \quad h_D = \frac{h}{x_f} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} \quad h_{wD} = \frac{h_w}{h}$$

无因次储容系数为

$$\omega = \frac{\phi \mu c_g}{\Lambda}$$

无因次窜流系数为

$$\lambda = \frac{k_h \sigma}{\Lambda x_f^2}$$

其中,

$$\tau = \frac{R^2}{6\pi^2 D}$$

解吸系数为

$$\alpha = \frac{q_{sc} B_{gi} \mu_i}{2\pi k_{hi} h} \frac{V_L \psi_L}{(\psi_L + \psi)(\psi_L + \psi_i)}$$

无因次浓度为

$$V_D = V - V_i$$

无因次井筒储集系数为

$$C_D = \frac{C}{2\pi \phi c_g h x_i^2}$$

上述各式中, 下标 D 表示无因次; h 为储层厚度, m; q_{sc} 为地面标准状况下的产量, m^3/s ; B_{gi} 为原始地层压力下的体积系数; ψ_i 为原始地层拟压力, Pa; x_i 为人工裂缝半长, m; x, y, z 为空间坐标变量, m; h_w 为人工裂缝半高, m; z_w 为裂缝中心距储层下边界的垂直距离, m; x_w, y_w 为裂缝中心在水平面内的坐标, m; τ 为解吸时间, s; ψ_L 为 Langmuir 拟压力, Pa; V_L 为 Langmuir 体积, m^3/m^3 ; α 为解吸系数; λ 为无因次窜流系数; ω 为无因次储容系数; C 为井筒储集系数, m^3/PA 。

因此, 式(3)、式(4)的无因次形式分别为

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} (r_D \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D}) + \frac{1}{h_D^2} \frac{\partial^2 \psi_D}{\partial z_D^2} = \omega \frac{\partial \psi_D}{\partial t_D} - (1-\omega) \frac{\partial V_D}{\partial t_D} \quad (5)$$

$$\frac{\partial V_D}{\partial t_D} = \frac{1}{\lambda} (V_{ED} - V_D) \quad (6)$$

并根据 Langmuir 等温吸附公式^[10], 可以得到

$$V_{ED} = -\alpha \psi_D \quad (7)$$

页岩气藏部分压开压裂井点源渗流模型的初始条件和边界条件:

$$\psi_D|_{t=0} = 0 \quad (8)$$

$$\lim_{\varepsilon_D \rightarrow 0} \left[\lim_{r_D \rightarrow 0} \int_{z_w - \frac{\varepsilon_D}{2}}^{z_w + \frac{\varepsilon_D}{2}} r_D \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} dz_D \right] = \begin{cases} -1 & |z_D - z_w| \leq \varepsilon_D/2 \\ 0 & |z_D - z_w| > \varepsilon_D/2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\psi_D|_{r_D \rightarrow \infty} = 0 \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial \psi_D}{\partial z_D} \right|_{z_D=0} = 0 \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial \psi_D}{\partial z_D} \right|_{z_D=1} = 0 \quad (12)$$

式中,

$$r_D = \sqrt{(x_D - x_{wD})^2 + (y_D - y_{wD})^2}$$

对式(5)~(12)进行 Laplace 变换、Fourier 变换和 Fourier 反演, 可以得到无限大页岩气藏连续点源 (x_{wD}, y_{wD}, z_{wD}) 在 Laplace 空间的压力响应:

$$\bar{\psi}_D = \frac{1}{s} K_0(\varepsilon_D r_D) + \frac{2}{s} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\beta_n z_D) \cos(\beta_n z_{wD}) K_0(\varepsilon_n r_D) \quad (13)$$

式中, $\bar{\psi}_D$ 为 Laplace 空间的无因次拟压力; s 为 Laplace 变量; K_0 为 0 阶修正第二类贝塞尔函数; $\beta_n = n\pi$;

$$\varepsilon_n = \sqrt{f(s) + \frac{\beta_n^2}{h_D^2}} \quad f(s) = \omega s + \frac{\alpha(1-\omega)s}{1+\lambda s}$$

对于部分压开压裂井而言, 由于假设产量在裂缝面内均匀分布, 可以运用连续点源叠加原理, 对式(13)在裂缝面内叠加积分, 即对点源解式(13)在 $[z_{wD} - h_{wD}, z_{wD} + h_{wD}]$ 上对 z_{wD} 积分, 再在 $[-1, 1]$ 上对 x_{wD} 积分, 同时取 $y_D = y_{wD} = 0$, 可以得到页岩气藏部分压开压裂井在 Laplace 空间的压力响应:

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_D = & \frac{1}{2s} \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{(x_D - \alpha)^2} \varepsilon_0) d\alpha + \\ & \frac{1}{2s h_{wD}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[\sin[\beta_n(z_{wD} + h_{wD})] - \sin[\beta_n(z_{wD} - h_{wD})]]}{\beta_n} \\ & \cos(\beta_n z_D) \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{(x_D - \alpha)^2} \varepsilon_n) d\alpha \quad (14) \end{aligned}$$

由于石油工程中人们关心的是井底压力, 对于压力参考点的处理则采用积分平均方法^[11]:

$$\bar{\psi}_{wD} = \frac{1}{4h_{wD}} \int_{-1}^1 \int_{z_w - h_{wD}}^{z_w + h_{wD}} \bar{\psi}_D(x_D, z_D, s) dz_D dx_D \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可以得到

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_{wD} = & \frac{1}{4s} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{(x_D - \alpha)^2} \varepsilon_0) d\alpha dx_D + \\ & \frac{1}{8s} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{[\sin[\beta_n(z_{wD} + h_{wD})] - \sin[\beta_n(z_{wD} - h_{wD})]]}{h_{wD} \beta_n} \right\}^2 \\ & \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{(x_D - \alpha)^2} \varepsilon_n) d\alpha dx_D \quad (16) \end{aligned}$$

根据叠加原理, Laplace 空间中考虑井筒储集和表皮效应影响的井底压力响应为

$$\bar{\psi}_{wD} = \frac{s \bar{\psi}_{wD} + S}{s + C_D s^2 (s \bar{\psi}_{wD} + S)} \quad (17)$$

式中, $\bar{\psi}_{wD}$ 为不考虑井筒储集和表皮效应的 Laplace 空间无因次井底拟压力; $\bar{\psi}_{wD}$ 为考虑井筒储集和表皮效应的 Laplace 空间无因次井底拟压力; S 为表皮系数。

运用 Stehfest 数值反演方法^[12]进行数值反演, 可得到实空间中的井底压力及压力导数的双对数曲线。

2 典型曲线特征及影响因素分析

2.1 典型曲线特征

绘制的页岩气藏部分压开压裂井压力特征曲线如图 2 所示。可以看出压力特征曲线划分为 7 个流动阶段。

第 1 阶段为早期纯井筒储集阶段, 其特征为压力和压力导数曲线呈现出相互重合的直线, 其直线斜率值为 1, 该阶段主要受井筒储集效应的影响。

第 2 阶段为井筒储集后的过渡阶段, 其特征为压力导数曲线在出现驼峰峰值后向下掉落, 该阶段反映了表皮效应和井筒储集效应共同对压力动态特征的影响。

第 3 阶段为裂缝线性流阶段, 其特征为压力导数曲线表现为一条直线段, 该直线段斜率值为 1/2。

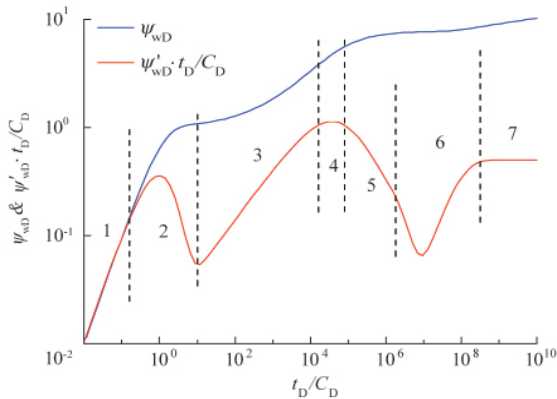
第 4 阶段为早期径向流阶段, 其特征为压力导数曲线表现为一条水平直线段。

第 5 阶段为球形流阶段, 其特征为压力导数曲线表现为

斜率为-1/2 的直线段。该阶段主要受到压开程度的影响,当裂缝完全压开时,该流动阶段将会消失。

第 6 阶段为解吸扩散阶段,其特征为压力导数曲线表现为下凹曲线。该阶段反映了吸附于基质中的页岩气开始解吸扩散出来,相当于双重介质的窜流阶段。

第 7 阶段为晚期径向流阶段,其特征为压力导数曲线表现出值为 1/2 的直线段。



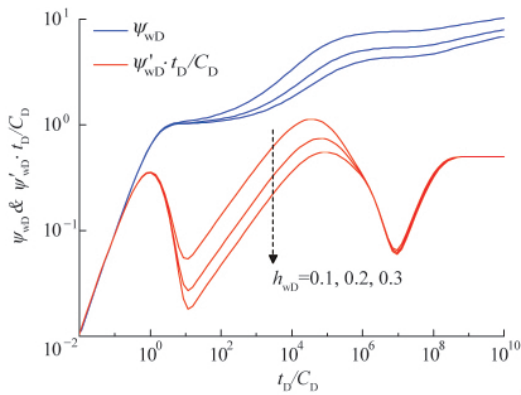
$h_D=10, h_{mD}=0.1, z_{mD}=0.5, S=1, C_D=10^{-6}, \lambda=100, \omega=0.1, \alpha=5$

图 2 页岩气藏部分压开压裂井的压力特征曲线

Fig. 2 Pressure characteristic curve for a partial open fractured well in shale gas reservoirs

2.2 影响因素分析

压开程度对页岩气藏部分压开压裂井压力特征曲线的影响如图 3 所示。从图中可以看出,压开程度越低,压力导数曲线前期位置越高,球形流阶段表现得越明显;但是压开程度对中对后期的解吸扩散阶段和晚期径向流阶段的影响不大。

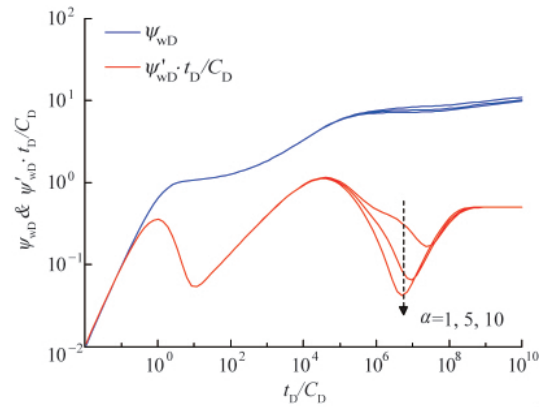


$h_D=10, z_{mD}=0.5, S=1, C_D=10^{-6}, \lambda=100, \omega=0.1, \alpha=5$

图 3 压开程度对压力特征曲线的影响

Fig. 3 Effect of open degree on the pressure characteristic curves

解吸系数对页岩气藏部分压开压裂井压力特征曲线的影响如图 4 所示。从图中可以看出,解吸系数主要影响解吸扩散阶段的压力特征曲线,解吸系数越大,压力导数曲线上解吸扩散阶段的下凹越深,说明此时解吸扩散作用对其压力动态影响越大。

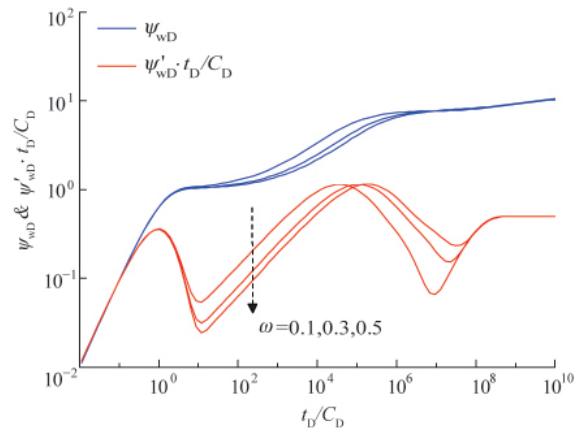


$h_D=10, h_{mD}=0.1, z_{mD}=0.5, S=1, C_D=10^{-6}, \lambda=100, \omega=0.1$

图 4 解吸系数对压力特征曲线的影响

Fig. 4 Effect of desorption coefficient on the pressure characteristic curves

无因次储容系数对页岩气藏部分压开压裂井压力特征曲线的影响如图 5 所示。从图中可以看出,无因次储容系数主要影响从裂缝线性流阶段到解吸扩散阶段,随着无因次储容系数的增加,裂缝线性流的持续时间将增加,而解吸扩散作用的程度将减弱,具体表现为压力导数曲线上反映解吸扩散的下凹将越浅越窄。

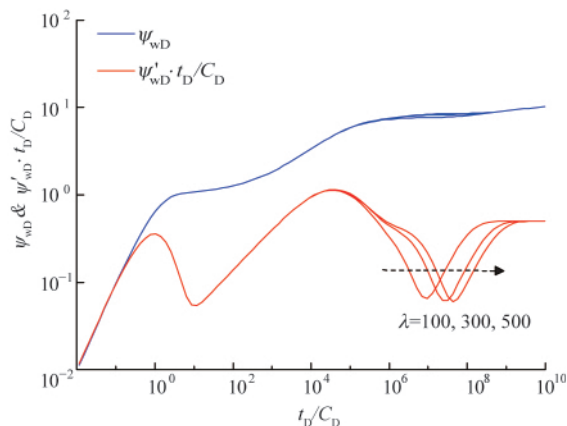


$h_D=10, h_{mD}=0.1, z_{mD}=0.5, S=1, C_D=10^{-6}, \lambda=100, \alpha=5$

图 5 无因次储容系数对压力特征曲线的影响

Fig. 5 Effect of dimensionless storativity ratio on the pressure characteristic curves

无因次窜流系数对页岩气藏部分压开压裂井压力特征曲线的影响如图 6 所示。从图中可以看出,无因次窜流系数主要影响解吸扩散阶段出现时间的早晚,无因次窜流系数越大,解吸扩散作用发生的时间越晚,因此压力导数曲线上反映解吸扩散的下凹出现得越晚。



$h_D=10, h_{wD}=0.1, z_{wD}=0.5, S=1, C_D=10^{-6}, \omega=0.1, \alpha=5$

图6 无因次窜流系数对压力特征曲线的影响

Fig. 6 Effect of dimensionless transmissivity ratio on the pressure characteristic curves

3 结论

(1) 本文综合考虑页岩气的解吸、扩散和渗流特征,建立了页岩气藏部分压开压裂井渗流数学模型,绘制了相应的压力特征曲线,对其进行了流动阶段的划分,并讨论了影响压力特征曲线的相关因素。

(2) 页岩气藏部分压开压裂井的压力特征曲线存在7个流动阶段,即早期纯井筒储集阶段、井筒储集后的过渡阶段、裂缝线性流阶段、早期径向流阶段、球形流阶段、解吸扩散阶段和晚期径向流阶段。

(3) 裂缝的压开程度主要影响球形流阶段表现的明显程度及压力导数曲线前期位置的高低;解吸系数主要影响压力导数曲线下凹的深度;无因次储容系数主要影响压力导数曲线下凹的宽度和深度;无因次窜流系数主要影响解吸扩散阶段出现的早晚。

参考文献 (References)

- [1] 胡文瑞, 翟光明, 李景明. 中国非常规油气的潜力和发展[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 25-29.
Hu Wenrui, Zhai Guangming, Li Jingming. Chinese Engineering Science, 2010, 12(5): 25-29.
- [2] 江怀友, 宋新民, 安晓璇, 等. 世界页岩气资源与勘探开发技术综述[J]. 天然气技术, 2008, 2(6): 26-30.
Jiang Huaiyou, Song Xinmin, An Xiaoxuan, et al. Natural Gas Technology, 2008, 2(6): 26-30.
- [3] Fathi E, Akkutlu I Y. Matrix heterogeneity effects on gas transport and adsorption in coalbed and shale gas reservoirs [J]. Transport in Porous Media, 2009, 80(2): 281-304.
- [4] Bello R O, Wattenbarger R A. Rate transient analysis in naturally fractured shale gas reservoirs [C]. CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference, Calgary, Canada, June 16-19, 2008.
- [5] 段永刚, 李建秋. 页岩气无限导流压裂井压力动态分析 [J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 26-29.
Duan Yonggang, Li Jianqiu. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 26-29.
- [6] 段永刚, 魏明强, 李建秋, 等. 页岩气藏渗流机理及压裂井产能评价[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(4): 62-66.
Duan Yonggang, Wei Mingqiang, Li Jianqiu, et al. Journal of Chongqing University, 2011, 34(4): 62-66.
- [7] Ozkan E, Raghavan R, Apaydin O. Modeling of fluid transfer from shale matrix to fracture network [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, September 19-22, 2010.
- [8] Guo J J, Zhang L H, Wang H T, et al. Pressure transient analysis for multi-stage fractured horizontal wells in shale gas reservoirs[J]. Transport in Porous Media, 2012, 93(3): 635-653.
- [9] King G R, Turgay E, Fred C S. Numerical simulation of the transient behavior of coal-seam degasification wells[J]. SPE Formation Evaluation, 1986, 1(2): 165-183.
- [10] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum [J]. Journal of American Chemical Society, 1918, 40: 1361-1370.
- [11] Kuchuk F J, Goode P A, Wilkinson D J, et al. Pressure-transient behavior of horizontal wells with and without gas cap or aquifer[J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(1): 86-94.
- [12] Stehfest H. Numerical inversion of Laplace transforms[J]. Communications of the ACM, 1970, 13(1): 47-49.

(责任编辑 韩星明)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。