

引用格式:邢翠巧,尹洪军,张野,等.存在部分渗透断层的条带状复合油藏试井解释模型[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):215-222.

XING Cuiqiao, YIN Hongjun, ZHANG Ye, et al. Well test analysis model for ribbon-shaped composite reservoirs with partially permeable faults[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 215-222.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.010

存在部分渗透断层的条带状复合油藏试井解释模型

邢翠巧^{1,2}, 尹洪军^{1,2}, 张野³, 付京⁴

(1.东北石油大学石油工程学院,黑龙江大庆163318;2.东北石油大学提高油气采收率教育部重点实验室,黑龙江大庆163318;
3.中国石油大庆油田有限责任公司采油工程研究院,黑龙江大庆163453;4.科罗拉多矿业学院,科罗拉多戈尔登80401)

摘要:条带状复合油藏中断层是多种多样的,储层中断层的存在影响了井底压力变化特征,断层的位置以及井位更是加大了试井解释模型建立与求解的难度。因此,亟需建立具有一定渗透能力的断层且井位于条带状油藏任意位置的试井解释模型。基于断层的部分渗透性,考虑流体性质及复合储层的性质,分别建立了井位于条带状复合油藏断层和储层中任意位置时的试井物理模型和数学模型,利用Fourier变换和Laplace变换方法,得到了考虑部分渗透断层的试井数学模型拉氏空间解。绘制了压力及压力导数试井典型曲线,进行了试井典型曲线的特征和敏感性分析。通过对井位于任意位置时的试井典型曲线特征的说明,充分阐述了考虑断层部分渗透性及井位置的重要性,对考虑部分渗透断层的条带状复合油藏试井解释方法研究具有重要意义。

关键词:部分渗透断层;条带状复合油藏;试井解释;典型曲线;敏感性分析

中图分类号:TE33

文献标志码:A

Well test analysis model for ribbon-shaped composite reservoirs with partially permeable faults

XING Cuiqiao^{1,2}, YIN Hongjun^{1,2}, ZHANG Ye³, FU Jing⁴

(1. Department of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery (Northeast Petroleum University), Ministry of Education, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

3. Production Engineering Research Institute of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163453, China;

4. Colorado School of Mines, Golden, Colorado 80401, USA)

Abstract: There are many kinds of faults in ribbon-shaped composite reservoirs, which affects the change of bottom hole pressure. The location of faults and wells make it more difficult to establish and solve the model of well test analysis. Therefore, it is urgent to establish a well testing analysis model with partially permeable faults and in any location of wells in ribbon-shaped reservoir. Based on the partial permeability of the fault and considering the properties of the fluid and the composite reservoir, the physical model and the mathematical model of the ribbon-shaped composite fault and reservoir are established respectively. And then, the Laplace space solution considering partial permeability fault is obtained by Fourier transform and Laplace transform. The pressure and pressure derivative curves are drawn. The characteristics and sensitivity of the typical curves and the influence of well location on the typical curves of well testing are analyzed. And the importance of considering the partial permeable of the faults and well location is fully explained. It is of great significance to the research on well test interpretation method for ribbon-shaped composite reservoirs with partially permeable faults.

Keywords: partially permeable fault; ribbon-shaped composite reservoir; well test analysis; typical curve; sensitivity analysis

收稿日期:2021-08-18。

第一作者简介:邢翠巧(1991—),女,在读博士研究生,从事油气渗流理论与应用方面的研究。地址:黑龙江省大庆市高新技术产业开发区学府街99号,邮政编码:163318。E-mail: xingcq888@126.com

通信作者简介:尹洪军(1964—),女,博士后,教授,博士生导师,从事油气渗流理论与应用方面的研究。地址:黑龙江省大庆市高新技术产业开发区学府街99号,邮政编码:163318。E-mail: yinhj7176@126.com

基金项目:国家科技重大专项“致密油体积压裂试井方法研究”(2017ZX05071005);黑龙江省自然科学基金“考虑复杂裂缝系统的致密油藏渗流理论及产能分析方法研究”(LH2022E023)。

由于条带状复合油藏中断层的存在,致使其试井解释模型的建立与求解更加困难,井位的不同,极大地影响井底压力变化。由于河道沉积作用等,形成的条带状油藏中的断层往往具有一定的渗透能力。因此,对存在非封闭断层的复合油藏试井资料,不能利用封闭性断层的试井解释模型进行解释,试井解释得到的结果往往是不合理的^[1-4]。

目前,众多学者对条带状复合油藏和存在一定渗透性的断层进行了研究。传统的“镜像”反映方法只研究封闭断层的情况,而非封闭断层的试井解释需要考虑断层的导流能力,断层距离及连通度等因素。WANG等^[5-6]基于Laplace变换和正交变换的方法,对线性复合油藏的渗流数学模型进行了求解。ZHANG等^[7-8]利用Fourier变换和Laplace变换,得到了两区线性复合油藏中线源的解析解,讨论了试井曲线的敏感性。利用源函数理论和格林函数公式,RAGHAVAN等^[9]考虑存在裂缝和水平井的复合油藏渗流模型的建立及求解,并对试井典型曲线进行了分析。王洪宇等^[10]分析了反向断层和反转断层的控藏机理,认为塔木察格盆地发育反向断层背靠低隆起油气成藏和反转断层控制次生油气成藏2种成藏模式,以反向断层遮挡的油气藏为主。王子健等^[11]强调了断层解释在油气勘探和开发中的作用,基于深度学习算法实现断层检测,生成训练数据,并构建了完备的训练样本库。罗建新等^[12]建立了两区线性复合油藏渗流模型,同时考虑了表皮效应和井筒储集效应的影响,所建立的模型没有考虑两区界面的性质。曾杨等^[13-15]通过考虑界面表皮对断层部分连通性质的影响,将断层等效为一个无限薄的表皮边界,建立了条带状复合油藏模型,井可以位于复合油藏中的任意位置。多数情况下,利用Fourier变换等方法和Stehfest数值反演算法可以对数学模型进行变换和求解,通过编程绘制试井典型曲线。

现有关于条带状油藏的物理模型考虑了油藏中不同的流体性质,而流体在断层内部的流动并未提及,未对条带状油藏中井位于断层内部的情况进行说明,井只位于两区储层,没有将模型应用于实测数据解释。但对于断块油田等具有条带状油藏构造形态的油藏来说,井往往向着断裂内部进行钻进,以获得更高的产量。对于存在有限导流断层的情况,在考虑井筒储集和表皮系数的前提下,通过引入界面表皮的概念,考虑断层内部流体的流动特点^[16-22]及复

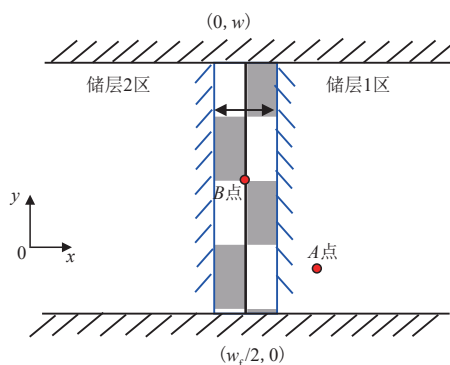
合油藏储层特征,建立了复合油藏中井位于不同位置的物理模型和渗流数学模型,求解得2种情况的井底压力变化曲线,并进行了对比说明。通过现场实测数据的应用,说明了该文模型对于分析存在平行或近似平行断层的断块油藏实测试井数据的实用性,同时也适用于渗透性具有分区特征的油藏实测数据的分析。

1 物理模型

在条带状复合油藏中,考虑存在部分渗透断层,断层宽度为 w ,断层左右两侧的断裂面均考虑为部分渗透性,渗流物理模型见图1。

井可以位于复合油藏中 A 点 (x_A, y_A) 或者断层中 B 点 (x_B, y_B) 的任意位置(图1)。渗流物理模型假设条件如下:

- 1) 考虑断裂面两侧储层的岩石及流体性质的不同,储层各向同性,渗透率和孔隙度等参数为常数。
- 2) 不考虑渗流过程中的化学和温度变化,流体流动服从达西渗流规律。
- 3) 考虑井筒储集效应和表皮效应的影响。
- 4) 不考虑重力和毛管力的影响。
- 5) 考虑断裂面与各个储层之间的连通性。
- 6) 单相微可压缩流体。
- 7) 井以定产量 q 生产。



注: w 为 y 方向断层的宽度, m ; w_x 为 x 方向断层的宽度, m 。

图1 存在部分渗透断层的条带状复合油藏物理模型(俯视图)

Fig. 1 Physical model for ribbon-shaped composite reservoirs with partially permeable faults (Top view)

2 数学模型

2.1 数学模型的建立

根据给出的条带状复合油藏物理模型和假设条件,考虑断层的部分渗透性,建立对应的试井数学模型,首先定义如下无因次量。

无因次压力:

$$p_{1D} = \frac{2\pi K_1 h_1}{q\mu_1} (p_i - p_1) \quad (1)$$

$$p_{2D} = \frac{2\pi K_2 h_2}{q\mu_2} (p_i - p_2) \quad (2)$$

$$p_{fD} = \frac{2\pi K_f h_f}{q\mu_f} (p_i - p_f) \quad (3)$$

无因次时间:

$$t_D = \frac{K_1}{\varphi_1 \mu_1 C_{11}} \frac{t}{r_w^2} \quad (4)$$

无因次储层导压系数:

$$\eta_D = \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad (5)$$

无因次断层导压系数:

$$\eta_{fD} = \frac{\eta_f}{\eta_1} \quad (6)$$

无因次断层导流能力:

$$F_{CD} = \frac{K_f w_f}{K_1 r_w} \quad (7)$$

无因次流量比:

$$M_D = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (8)$$

无因次储层厚度:

$$h_D = \frac{h_2}{h_1} \quad (9)$$

无因次距离:

$$\begin{cases} w_D = \frac{w}{r_w}; x_{AD} = \frac{x_A}{r_w}; y_{AD} = \frac{\pi}{w_D} \frac{y_A}{r_w} \\ x_{BD} = \frac{x_B}{r_w}; y_{BD} = \frac{\pi}{w_D} \frac{y_B}{r_w}; w_{fD} = \frac{w_f}{r_w} \end{cases} \quad (10)$$

式(1)~式(10)中: C_1 为综合压缩系数,1/MPa; h 为储层有效厚度,m; K 为渗透率, μm^2 ; p 为压力,MPa; p_i 为原始地层压力,MPa; r_w 为井径,m; q 为产量, m^3/d ; x_A 和 y_A 为A点井的距离坐标,m; x_B 和 y_B 为B点井的距离坐标,m; μ 为流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; φ 为孔隙度; η 为导压系数, $(\mu\text{m}^2\cdot\text{MPa})/(\text{mPa}\cdot\text{s})$; λ 为流量, $\mu\text{m}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$;

下标f,1,2分别代表断层,储层1区,储层2区; p_D 为无因次压力; t_D 为无因次时间; η_D 为无因次储层导压系数; η_{fD} 为无因次断层导压系数; F_{CD} 为无因次断层导流能力; M_D 为无因次流量比; h_D 为无因次储层厚度; w_D 为y方向的断层宽度; w_{fD} 为x方向断层宽度; x_{AD} 和 y_{AD} 为A点井的无因次距离坐标; x_{BD} 和 y_{BD} 为B点井的无因次距离坐标。

利用上述定义的无因次量,得到无因次试井数学模型。

井位于A点时,储层1区($x_D > w_D/2$)渗流控制方程:

$$\frac{\partial^2 p_{1D}}{\partial x_D^2} + \left(\frac{\pi}{w_D}\right)^2 \frac{\partial^2 p_{1D}}{\partial y_D^2} + \frac{2\pi^2}{w_D} \delta(x_D - x_{AD}) \delta(y_D - y_{AD}) = \frac{\partial p_{1D}}{\partial t_D} \quad (11)$$

储层2区($x_D < -w_D/2$)渗流控制方程:

$$\frac{\partial^2 p_{2D}}{\partial x_D^2} + \left(\frac{\pi}{w_D}\right)^2 \frac{\partial^2 p_{2D}}{\partial y_D^2} = \frac{1}{\eta_D} \frac{\partial p_{2D}}{\partial t_D} \quad (12)$$

井位于B点时,断层内($-w_D/2 < x_D < w_D/2$)流体渗流控制方程:

$$\left(\frac{\pi}{w_D}\right)^2 \frac{\partial^2 p_{fD}}{\partial y_D^2} + \frac{1}{F_{CD}} \left(\frac{\partial p_{1D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = \frac{w_D}{2}} - M_D h_D \frac{\partial p_{2D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = -\frac{w_D}{2}} \right) + \frac{2\pi^2}{w_D} \delta(x_D - x_{BD}) \delta(y_D - y_{BD}) = \frac{1}{\eta_{fD}} \frac{\partial p_{fD}}{\partial t_D} \quad (13)$$

初始条件:

$$p_D(x_D, y_D, 0) = p_{1D}(x_D, y_D, 0) = p_{2D}(x_D, y_D, 0) \quad (14)$$

边界条件:

x方向无限大:

$$p_{1D}(+\infty, y_D, t_D) = p_{2D}(+\infty, y_D, t_D) \quad (15)$$

y方向:

$$\frac{\partial p_D}{\partial y_D} \Big|_{y_D = \pi} = \frac{\partial p_D}{\partial y_D} \Big|_{y_D = 0} = 0 \quad (16)$$

衔接条件:

$$(p_{1D} - p_{fD})_{x_D = \frac{w_D}{2}} = S_f \frac{\partial p_{1D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = \frac{w_D}{2}} \quad (17)$$

$$(p_{fD} - p_{2D})_{x_D = -\frac{w_D}{2}} = M_D h_D S_f \frac{\partial p_{2D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = -\frac{w_D}{2}} \quad (18)$$

式(11)~(18)中: S_f 为断层表皮系数; δ 为Dirac delta函数,表示定产量井; x_D, y_D 为无因次距离坐标。

当井位于A点(储层1区/储层2区的任意位置)时,式(11)中的 δ 函数不为零;当井位于B点(断层

内部的任意位置)时,式(13)中的 δ 函数不为零;式(11)一式(18)的渗流控制方程和边界条件形成的方程组,为考虑部分渗透断层的条带状复合油藏无因次试井数学模型,数学模型推导过程中将存在的部分渗透断层可等效为部分渗透断层边界。

2.2 数学模型的求解

基于已建立的无因次试井数学模型,通过Laplace变换和Fourier变换方法对无因次试井数学模型进行变换求解。

首先进行关于时间 t_D 的Laplace变换:

$$\frac{\partial^2 \bar{p}_{1D}}{\partial x_D^2} + \left(\frac{\pi}{w_D}\right)^2 \frac{\partial^2 \bar{p}_{1D}}{\partial y_D^2} + \frac{2\pi^2}{uw_D} \delta(x_D - x_{AD}) \delta(y_D - y_{AD}) = u\bar{p}_{1D} \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{p}_{2D}}{\partial x_D^2} + \left(\frac{\pi}{w_D}\right)^2 \frac{\partial^2 \bar{p}_{2D}}{\partial y_D^2} = \frac{u}{\eta_D} \bar{p}_{2D} \quad (20)$$

$$\left(\frac{\pi}{\omega_D}\right)^2 \frac{\partial^2 \bar{p}_{1D}}{\partial y_D^2} + \frac{1}{F_{CD}} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = \frac{w_D}{2}} - M_D h_D \frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = -\frac{w_D}{2}} \right) +$$

$$\frac{2\pi^2}{uw_D} \delta(x_D - x_{BD}) \delta(y_D - y_{BD}) = \frac{u}{\eta_{1D}} \bar{p}_{1D} \quad (21)$$

$$\bar{p}_{1D}(x_D, y_D, 0) = \bar{p}_{1D}(x_D, y_D, 0) = \bar{p}_{2D}(x_D, y_D, 0) \quad (22)$$

$$\bar{p}_{1D}(+\infty, y_D, u) = \bar{p}_{2D}(+\infty, y_D, u) \quad (23)$$

$$\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial y_D} \Big|_{y_D = \pi} = \frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial y_D} \Big|_{y_D = 0} = 0 \quad (24)$$

$$\left(\bar{p}_{1D} - \bar{p}_{1D}\right)_{x_D = \frac{w_D}{2}} = S_f \frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = \frac{w_D}{2}} \quad (25)$$

$$\left(\bar{p}_{1D} - \bar{p}_{2D}\right)_{x_D = -\frac{w_D}{2}} = M_D h_D S_f \frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = -\frac{w_D}{2}} \quad (26)$$

式中: u 为Laplace变量;上标“ $-$ ”表示参数经过Laplace变换后。

关于 y_D 进行Fourier变换。

Fourier变换:

$$F\left[\bar{p}_n(x, y, u)\right] = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}_n(x, y, u) e^{-i\omega y} dy = \hat{\bar{p}}_n(x, \omega, u) \quad (27)$$

式中: ω 为Fourier变量; e 为自然对数的底数; \bar{p}_n 为Laplace变换后的参数; $\hat{\bar{p}}_n$ 为Fourier变换后的参数;下标 n 为式中的所有压力(包括 p_{1D}, p_{2D}, p_{1D})。

基于上述Laplace变换和Fourier变换的方法,对无因次试井数学模型求解后得到拉氏空间无因次井底压力解。

井位于A点:

$$\hat{\bar{p}}_{1D} = -\frac{\alpha_3}{2\sqrt{\alpha_1}} \left[e^{-\sqrt{\alpha_1}} + \frac{(C_p \sqrt{\alpha_1} - C'_p)}{(C'_p + C_p \sqrt{\alpha_1})} e^{-\sqrt{\alpha_1}(2x_{AD} - 1)} \right] \quad (28)$$

井位于B点:

$$\hat{\bar{p}}_{1D} = \frac{1}{F_{CD} \alpha_4} \left(-C_1 \sqrt{\alpha_1} e^{-\frac{w_D}{2} \sqrt{\alpha_1}} - M_D h_D C_2 \sqrt{\alpha_2} e^{-\frac{w_D}{2} \sqrt{\alpha_2}} \right) - \frac{\alpha_3}{\alpha_4} \quad (29)$$

其中: $C_1 = -\alpha_3 F_{CD} - C_2 C_4$

$$C_2 = \frac{\alpha_3 F_{CD} - \alpha_3 F_{CD} C_3 \sqrt{\left[\sqrt{\alpha_1} e^{-\left(\frac{w_D}{2}\right) \sqrt{\alpha_1}} \right]}}{C_4 C_3 \sqrt{\left[\sqrt{\alpha_1} e^{-\left(\frac{w_D}{2}\right) \sqrt{\alpha_1}} \right]} - M_D h_D \sqrt{\alpha_2} e^{-\left(\frac{w_D}{2}\right) \sqrt{\alpha_2}}}$$

$$C_3 = \left(\sqrt{\alpha_1} e^{-\frac{w_D}{2} \sqrt{\alpha_1}} + S_f F_{CD} \alpha_4 \sqrt{\alpha_1} e^{-\frac{w_D}{2} \sqrt{\alpha_1}} \right)$$

$$C_4 = \left(M_D h_D \sqrt{\alpha_2} e^{-\frac{w_D}{2} \sqrt{\alpha_2}} + F_{CD} \alpha_4 e^{-\frac{w_D}{2} \sqrt{\alpha_2}} + F_{CD} \alpha_4 M_D h_D S_f \sqrt{\alpha_2} e^{-\frac{w_D}{2} \sqrt{\alpha_2}} \right)$$

$$C'_p = F_{CD} \alpha_4 \left(M_D h_D S_f \sqrt{\alpha_2} + 1 \right) + M_D h_D \sqrt{\alpha_2}$$

$$C_p = S_f \left(M_D h_D \sqrt{\alpha_2} + C'_p \right) + 1$$

$$\alpha_1 = \left[u + \left(\frac{m\pi}{w_D} \right)^2 \right] \quad \alpha_2 = \left[\frac{u}{\eta_D} + \left(\frac{m\pi}{w_D} \right)^2 \right]$$

$$\alpha_3 = -\frac{2\pi^2}{uw_D} \cos(my_D) \quad \alpha_4 = \frac{u}{\eta_{1D}} + \left(\frac{m\pi}{w_D} \right)^2$$

式中: $C_1, C_2, C_3, C_4, C_p, C'_p, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 表示中间变量。

Fourier逆变换:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{\bar{p}}_n(x, \omega, u) e^{i\omega y} d\omega =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\cos \omega y + i \sin \omega y) \hat{\bar{p}}_n(x, \omega, u) d\omega \quad (30)$$

通过式(30)的Fourier逆变换公式对式(28)和式(29)进行变换后,进一步得到考虑井筒储集效应和表皮效应的无因次拉氏空间井底压力:

$$\bar{p}_{wD}(u) = \frac{u\bar{p}_{1D} + S}{u \left[1 + u C_D (u\bar{p}_{1D} + S) \right]} \quad (31)$$

式中: C_D 为无因次井筒储集系数, S 为表皮系数。

利用式(31)可绘制存在部分渗透断层的条带状复合油藏的试井典型曲线。

3 试井典型曲线特征分析

利用Stehfest数值反演算法,将数学模型求解得

到的拉氏空间井底压力解进行数值反演,得到实空间井底压力与时间的关系,进而绘制并分析井位于油藏中的不同位置的双对数试井典型曲线,划分流动阶段。图2为井位于A点的试井典型曲线。

井位于A点时的试井典型曲线可划分为6个流动阶段:

第I阶段:井筒储集效应和表皮效应阶段。试井典型曲线的早期呈斜率为1的直线,主要受井筒储集系数大小的影响。考虑表皮效应的压力导数曲线出现驼峰,驼峰的陡度受表皮系数大小影响。

第II阶段:1区储层径向流动阶段。反映了储层中流体以径向方式向井筒供液,压力导数曲线表现为一条水平线。

第III阶段:断层面反映阶段。模型中设置井在断层的不远处,压力导数曲线上翘,说明压力波已传播到断层面。反映了断层表皮系数的大小,即断层面的渗透性。

第IV阶段:垂直于断层的线性流动阶段。断层内外流体通过断层面,以线性方式流向井筒,压力导数曲线表现为一条上升的直线。断层的导流能力越大,双对数曲线越向下移。断层内部导压系数越小,流体越容易存在于断层内部,流体流动需要消耗的能量就越小。

第V阶段:2区储层流体流向断层内部的阶段。压力导数曲线出现下掉。反映了2区储层流体向断层内部流动的能力,此阶段出现得越早,流体越早越容易流向断层。

第VI阶段:系统整体的边界反映阶段。试井典

型曲线后期为系统整体的线性流动反映阶段,压力及压力导数曲线斜率为1/2。

井位于B点的试井典型曲线见图3。

对井位于B点的试井典型曲线进行流动阶段划分,可划分为5个流动阶段:

第I阶段:井筒储集效应和表皮效应阶段。此阶段主要受井筒储集系数和表皮系数大小的影响。

第II阶段:断层内部的线性流动阶段。压力及压力导数曲线出现1/2斜率直线。

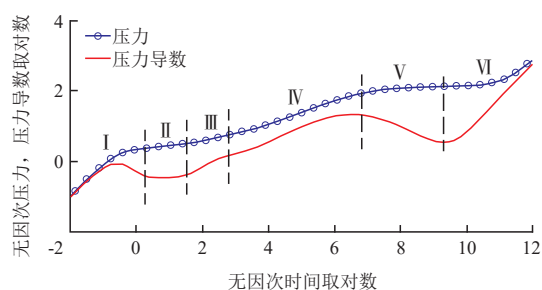
第III阶段:双线性流动阶段。模型中设置断层内部性质比外部储层性质好,断层内外流体以线性方式流向井筒,压力及压力导数曲线出现直线。

第IV阶段:断层面反映阶段。断层内部压力波传播到断裂面,曲线开始上翘,曲线上翘的程度受断层表皮系数大小的影响。

第V阶段:系统线性流动阶段。压力及压力导数后期曲线斜率为1/2。

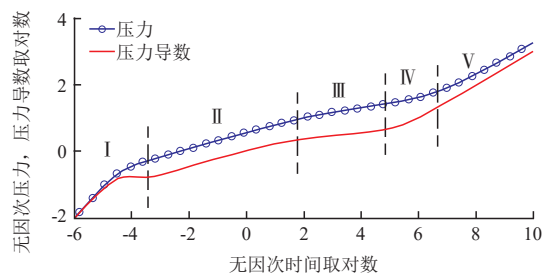
对比图2和图3的试井典型曲线可以发现:考虑井筒储集系数和表皮系数影响时,井位于A点(储层)和B点(断层)的试井典型曲线前期(第I阶段)有相同的反映特征。试井典型曲线后期反映的是外部储层中流体流向断层内部的过程(第III阶段和第IV阶段),主要受到外部储层性质的影响。随着时间的增加,试井典型曲线上压力及压力导数曲线出现上翘的直线,是对系统整体线性流的反映。

井位于断层内部时,考虑断层内部的线性流动,出现图3中的线性流动阶段。与之不同的是,若井所处的储层性质不如附近条带储层性质好,则压力及



注:绘制曲线时模型里参数取值 $w_D=100, M_D=1, F_{CD}=10^{14}, h_D=\eta_D=1, S=10, S_F=2, C_D=0.1, \eta_D=10^6$ 。

图2 井位于A点的试井典型曲线
Fig. 2 Typical curves of well testing for the well located in point A



注:绘制曲线时模型里参数取值 $w_D=2000, M_D=1, F_{CD}=10, h_D=\eta_D=1, S=0.01, S_F=1, C_D=0.01, \eta_D=10^6$ 。

图3 井位于B点的试井典型曲线
Fig. 3 Typical curves of well testing for the well located in point B

压力导数曲线会出现碰见边界的反映(图2)。由于断裂性的地质活动形成的油藏中存在复杂的多变形油藏形状,以条带状油藏为主,通过试井解释得到油藏边界位置,判断边界距离、边界性质及井周围储层性质具有重要的应用意义。

4 敏感性分析

针对井位于A点(储层内部的任意位置)和井位于B点(断层内部的任意位置)的情况,对影响试井曲线形态的参数进行了敏感性分析。该文主要区别了井位于储层内部和断层内部情况的试井典型曲线。因此,重点说明了断层参数对试井曲线的影响效果,分别绘制并分析了断层导流能力、断层表皮系数对井位于A点和井位于B点时试井曲线的影响。

4.1 断层导流能力的影响

当井位于A点时,断层导流能力对试井曲线的影响见图4。从图4中可知,导流能力(F_{cd})主要影响压力及压力导数曲线的后期。 F_{cd} 越大,说明断层内部运移流体的能力越好,储层2区中流体向断层内部流动发生的时间越早,第V反映阶段越早结束,后期系统整体的线性流出现时间也越早,压力及压力导数曲线越靠下。

当井位于B点时,断层导流能力对试井曲线的影响见图5。此时,井位于断层内部,直接受断层导流能力的影响, F_{cd} 的值对压力及压力导数曲线的整个阶段均有明显影响。 F_{cd} 越大,断层内部,井筒周围储层性质越好,流体越容易流动,流动过程需要消耗的压力损失就越小,压力及压力导数曲线越靠下。

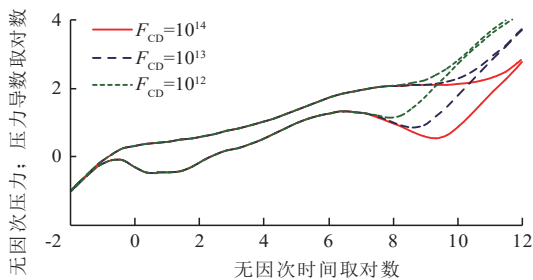


图4 F_{cd} 对试井典型曲线的影响(井位于A点)
Fig. 4 Influence of F_{cd} on well testing curves
(Well located in point A)

4.2 断层表皮系数的影响

当井位于A点时,断层表皮系数对试井曲线的影响见图6。表皮系数(S_f)主要影响试井曲线的中期及后期阶段。 S_f 越大,说明断层允许流体通过的能力越差,断层性质也越差,储层2区中流体越不容易通过断层流入储层1区。随着 S_f 的增大,流体流动通过断层时需要消耗的压力损失就越大,断层内部线性流持续时间越长,储层2区的反映阶段越晚结束,因此,压力及压力导数曲线越靠上。

当井位于B点时,断层表皮系数对试井曲线的影响见图7。由于井位于断层内部,断层表皮系数主要对第II阶段产生影响。随着 S_f 的增大,断层内部线性流出现的时间越晚,压力及压力导数曲线越靠下,距离也越大,流体流动需要消耗的能量就越大,与井位于A点的情况对试井曲线的影响效果一致。

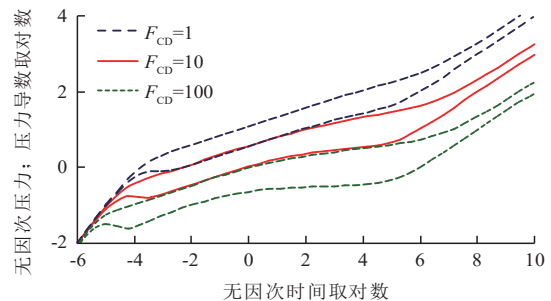


图5 F_{cd} 对试井典型曲线的影响(井位于B点)
Fig. 5 Influence of F_{cd} on well testing curves
(Well located in point B)

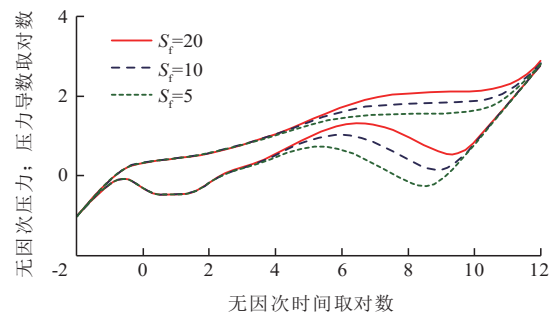


图6 S_f 对试井典型曲线的影响(井位于A点)
Fig. 6 Influence of S_f on well testing curves
(Well located in point A)

5 实例分析

A油藏一口勘探油井,断层发育,含油带窄。完钻井深5600 m,储层有效厚度 $h=12$ m,原油体积系数 $B=1.15$ m³/m³,综合压缩系数 $C_i=1.34\times 10^{-4}$ MPa⁻¹,原油黏度 $\mu=2.54$ mPa·s,孔隙度 $\varphi=0.20$,井筒半径 $r_w=0.1$ m。该井于2003年2月关井测压力恢复,关井520 h,关井前稳定生产1556 h,产量90 m³/d,关井时井底压力50.78 MPa。采用该文建立的井位于储层中,考虑部分渗透断层的条带状复合油藏模型对该井实测压力数据进行试井解释。该生产井理论双对数曲线与实测双对数曲线拟合图见图8。

通过理论曲线与实测曲线的双对数拟合,可得到实测井的试井解释结果:井筒储集系数 $C=0.8405$ m³/MPa;表皮系数 $S=-1.6682$;渗透率为 5.126 μm²,储层物性好,为高渗透储层;地层流动系数 $Kh=38.4420$ μm²·m;断层距离 $a=60.0740$ m;导流

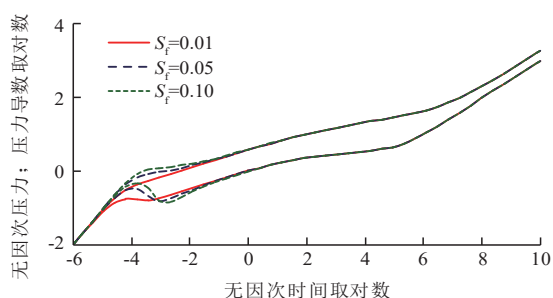


图7 S_f 对试井典型曲线的影响(井位于B点)
Fig. 7 Influence of S_f on well testing curves
(Well located in point B)

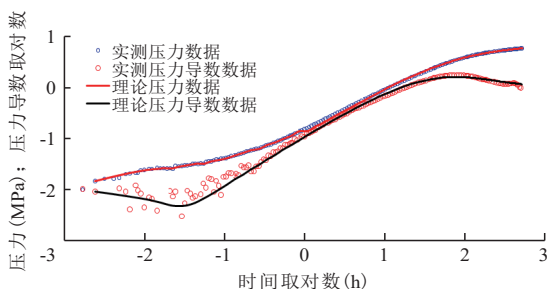


图8 理论双对数曲线与实测双对数曲线拟合图
Fig. 8 Log-log matching curves of theoretical curves and actual curves

能力 $F_c=946.2947$ μm²·m,断层内部为流体储存和流动的主要空间;断层表皮系数 $S_f=5.0$,反映出所测试的边界具有部分渗透性,存在一定的污染。

6 结论

基于Fourier变换和Laplace变换等方法,建立并求解了考虑储层性质、部分渗透性断层、井位于不同位置的条带状复合油藏试井数学模型。给出了经过Fourier变换的压力解,利用考虑井筒储集系数和表皮系数的拉氏空间井底压力解绘制并分析了存在部分渗透断层的条带状复合油藏试井典型曲线,得出以下主要结论:

1) 条带状油藏中的断层需要考虑渗透性,断层表皮系数值越大,说明流体越不容易通过断层,压力及压力导数曲线靠上方移动。

2) 井位于条带状油藏中的断层内部时,井周围流体更容易流动,能更准确地测到条带状油藏的边界形状,确定边界距离。

3) 井位于条带状复合储层任意位置时,储层性质远不如断层中储层性质好,试井典型曲线会出现边界反映。井位于断层内部时,由于断层储层性质好,考虑断层内部流体的流动特征,试井典型曲线会出现线性流动反映。

该文提出的条带状复合油藏试井解释模型建立与求解方法,弥补了条带状油藏在分析压力传播方面的不足,对于研究此类油藏的压力波传播规律具有重要的研究意义。

参考文献

- [1] 刘海龙,王冠,吴淑红.条带状断块油藏不稳定渗流压力传播规律研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2016,38(5):135-142.
LIU Hailong, WANG Guan, WU Shuhong. A study on pressure transmission of unsteady fluid flow in banded fault block reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(5): 135-142.
- [2] 曾焱,王本成,聂仁仕.线性复合油藏多级压裂水平井渗流模型[J].石油学报,2017,38(6):687-720.
ZENG Yan, WANG Bencheng, NIE Renshi. The porous flow model of multi-stage fractured horizontal well in linear composite oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(6): 687-720.
- [3] 马承杰.多尺度边缘检测技术在断层识别及裂缝发育带预测中的应用——以车排子地区排691井区为例[J].油气地质与

- 采收率, 2021, 28(2): 85-90.
- MA Chengjie. Application of multi-scale edge detection technology to fault recognition and fracture zone prediction: A case study of Block Well P691, Chepaizi area[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(2): 85-90.
- [4] 刘娟. 苏北老油田复杂断块油藏低序级断层识别技术研究[J]. *辽宁化工*, 2021, 50(5): 744-746.
- LIU Juan. Low-level internal faults identification technology of complex fault-block in Subei old oilfield[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2021, 50(5): 744-746.
- [5] WANG J C, XU J W, WANG Y Q, et al. Productivity of hydraulically-fractured horizontal wells in tight oil reservoirs using a linear composite method[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 164: 450-458.
- [6] KUCHUK F J, HABASHY T. Pressure behavior of laterally composite reservoirs[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1997, 12(1): 47-56.
- [7] ZHANG L H, GUO J J, LIU Q G. A new well test model for a two-zone linear composite reservoir with varied thicknesses[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, 22(6): 804-809.
- [8] MOLINA O M, ZEIDOUNI M. Detection of fault reactivation in compartmentalized reservoirs using pressure transient analysis [C]// Paper SPE-190130-MS presented at the SPE Western Regional Meeting, Garden Grove, California, USA, April 2018.
- [9] RAGHAVAN R, OZKAN E. Flow in composite slabs[J]. *SPE Journal*, 2011, 16(2): 374-387.
- [10] 王洪宇, 陈沫, 孟令东. 塔木察格盆地反向断层与反转断层控藏机理[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(2): 72-79.
- WANG Hongyu, CHEN Mo, MENG Lingdong. Controlling mechanism of antithetic fault and reverse fault on hydrocarbon accumulations in Tamtsag Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(2): 72-79.
- [11] 王子健, 伍新明, 杜玉山, 等. 基于深度学习的地震断层检测与断面组合[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(1): 69-79.
- WANG Zijian, WU Xinming, DU Yushan, et al. Deep learning-based seismic fault detection and surface combination[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(1): 69-79.
- [12] 罗建新, 张烈辉, 赖南君, 等. 两区线性复合油藏产能典型理论曲线分析[J]. *深圳大学学报理工版*, 2011, 28(5): 384-388.
- LUO Jianxin, ZHANG Liehui, LAI Nanjun, et al. Typical deliver ability curve analysis in bi-zonal linear composite reservoirs[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2011, 28(5): 384-388.
- [13] 曾杨, 康晓东, 唐恩高, 等. 存在有限导流断层的复合油藏试井模型及井底压力动态分析[J]. *东北石油大学学报*, 2018, 42(2): 103-108.
- ZENG Yang, KANG Xiaodong, TANG Engao, et al. Well testing model and pressure dynamics of wells located near a finite conductivity fault in composite reservoirs[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2018, 42(2): 103-108.
- [14] 曾杨, 康晓东, 谢晓庆, 等. 存在部分连通断层的条带状油藏试井解释新模型[J]. *陕西科技大学学报*, 2017, 35(6): 104-108.
- ZENG Yang, KANG Xiaodong, XIE Xiaoqing, et al. Transient pressure behavior analysis in a banded reservoir with partially communicating faults[J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2017, 35(6): 104-108.
- [15] 曾杨, 张烈辉, 康晓东, 等. 存在有限导流断层的条带状油藏试井新模型[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(5): 155-162.
- ZENG Yang, ZHANG Liehui, KANG Xiaodong, et al. Well testing interpretation model for strip reservoirs with finite diversion faults[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2017, 39(5): 155-162.
- [16] 迟颖, 李顺初, 李全勇. 基于相似结构的分形复合油藏非线性渗流模型解[J]. *钻采工艺*, 2011, 34(2): 46-48.
- CHI Ying, LI Shunchu, LI Quanyong. Nonlinear flow solution of fractal composite reservoir model based on similar structure[J]. *Drilling and Production Technology*, 2011, 34(2): 46-48.
- [17] HUANG Y, CHENG S Q, YU H Y, et al. A semi-analytical approach to estimate fracture closure and formation damage of vertically fractured wells in tight gas reservoir[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 150: 85-90.
- [18] DUAN Y G, REN K Y, FANG Q T, et al. Pressure transient analysis for a horizontal well in heterogeneous carbonate reservoirs using a linear composite model[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, (1): 1-16.
- [19] 齐亚东, 雷群, 杨正明, 等. 条带状特低渗透断块油藏布井方案评价与优选[J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(4): 66-70.
- QI Yadong, LEI Qun, YANG Zhengming, et al. Evaluation and optimization of well patterns designed for banding faulted block reservoirs with extremely low permeability[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(4): 66-70.
- [20] 李辉. 基于改进 AlexNet 模型的断层识别方法[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(1): 107-112.
- LI Hui. Fault recognition method based on improved AlexNet [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(1): 107-112.
- [21] 王端平, 柳强. 复杂断块油田精细油藏描述[J]. *石油学报*, 2000, 21(6): 111-116.
- WANG Duanping, LIU Qiang. Fine reservoir description of complex fault-block oil field[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2000, 21(6): 111-116.
- [22] 刘炳官, 林波, 王智林, 等. 水驱后期断块油藏 CO₂ 气顶与人工边水组合驱压力恢复规律[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(5): 87-93.
- LIU Bingguan, LIN Bo, WANG Zhilin, et al. Pressure recovery of CO₂ gas cap and artificial edge water combined flooding in fault-block reservoirs at late stage of water flooding[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(5): 87-93.