

采用 Laplace 空间源函数方法的复杂离散缝网半解析试井模型

雷霆

中国地质大学(武汉)资源学院 湖北武汉 430074

通讯作者: Email: leiting@ cug. edu. cn

项目支持: 国家科技重大专项“缝洞型碳酸盐岩油藏提高采收率关键技术”(2016ZX05014)

引用: 雷霆. 采用 Laplace 空间源函数方法的复杂离散缝网半解析试井模型[J]. 油气井测试, 2023, 32(1): 1-7.

Cite: LEI Ting. Pressure transient analysis for discrete fracture network with semi-analytical method[J]. Well Testing, 2023, 32(1): 1-7.

摘要 分段压裂水平井的常规试井模型仅考虑主要的水力裂缝, 忽略了在压裂过程中产生的大量次级裂缝。为了更准确的描述包括次级裂缝在内的复杂缝网对压力动态的影响, 采用源函数方法建立了描述复杂离散裂缝网络的地层压力半解析模型。该模型由地层模型和裂缝模型两部分组成。地层模型将裂缝视为直线源, 采用格林函数法累加多条裂缝的影响。裂缝模型将单条裂缝离散化, 在每个小单元上使用 Laplace 空间的条带源函数, 在考虑单个裂缝的压力动态时避免了繁琐的累加过程。使用该模型计算了单一裂缝、多条裂缝、复杂缝网三种情况下的压力动态。在单一裂缝情况下, 考虑裂缝对称分布和不对称分布两种情况, 计算结果与文献中的已有结果基本一致。在多条裂缝和复杂缝网情况下, 计算结果显示次级裂缝的存在会使得压力动态偏离典型的双线性流或线性流。与现有模型的对比表明, 考虑复杂缝网的模型能够更准确的描述导数曲线早期段。

关键词 离散裂缝网络; 多段压裂水平井; 格林函数源函数; 半解析模型; 试井解释; 缝洞型碳酸盐岩油藏; 格林函数; 压力动态模型

中图分类号: TE353

文献标识码: A

DOI: 10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2023. 01. 001

Pressure transient analysis for discrete fracture network with semi-analytical method

LEI Ting

China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract: The conventional well test model of staged fracturing horizontal wells only considers the main hydraulic fractures, ignoring the large number of secondary fractures generated during the fracturing process. In order to more accurately describe the influence of complex fracture networks including secondary fractures on pressure dynamics, a semi-analytical model of formation pressure describing complex discrete fracture networks was established by using the source function method. The model consists of two parts: the formation model and the fracture model. The formation model takes fractures as line sources and uses the Green's function method to accumulate the effects of multiple fractures. The fracture model discretizes a single fracture and uses the strip source function of Laplace space on each small cell, avoiding the tedious accumulation process when considering the pressure dynamics of a single fracture. Using this model, the pressure dynamics of single fracture, multiple fractures and complex fracture network are calculated. In the case of a single fracture, considering both the symmetrical distribution and asymmetric distribution of the fractures, the calculated results are basically consistent with the existing results in the literature. In the case of multiple fractures and complex fracture networks, the calculation results show that the presence of secondary fractures can cause the pressure dynamics to deviate from typical bilinear or linear flow. The comparison with the existing models shows that the model considering the complex seam network can describe the early segment of the derivative curve more accurately.

Keywords: discrete fracture network; multi-stage fractured horizontal well; Green's function source function; semi-analytical model; well test analysis; fracture-cavity carbonate reservoir; Green's function; pressure dynamic model

分段压裂水平井技术在石油工业中已经得到了广泛的应用。除了页岩气藏中大量使用外, 在缝洞型碳酸盐岩油藏中也大量使用分段压裂水平井, 比如塔河油田和顺北油田。碳酸盐岩油藏中

发育有不同尺度的天然裂缝。在压裂过程中,除了水力压裂缝之外,压裂过程可能沟通或扩展地层中已经存在的天然裂缝,形成次级裂缝。这些次级裂缝与水力裂缝一起形成了井筒附近的复杂裂缝网络,并对水平井的产量和压力动态产生重要影响。

Gringarten 将源函数和格林函数的方法用于求解非稳态渗流问题,并给出无限导流裂缝的压力解^[1-2]。Cinco-Ley^[3]将裂缝分段,采用格林函数和源函数方法,得出有限导流裂缝的压力解。Ozkan^[4]提出 Laplace 空间的源函数解,使得源函数方法和 Laplace 变换可以结合起来。Chen^[5]在 Ozkan 的工作基础上,给出 Laplace 空间的条带地层直线源和条带源的解。在垂直裂缝井的各种压力解中,都假设井位于裂缝的中心。Beruman^[6]给出了井两侧裂缝不对称情况下的压力解。Yang^[7]应用 Laplace 空间的条带源来求解分段压裂水平井的压力解。Wang^[8]提出一种通用计算框架,可以计算任意分布的垂直裂缝网络的压力解。该方法假设裂缝内部不存在流体压缩,从而忽略了裂缝内流体累积项;并且计算过程较为繁琐。也有多位作者采用数值试井方法^[9-11]对离散裂缝模型进行解释。数值试井方法依赖于地质模型,在调整裂缝方位等参数时需要更改地质模型,较为繁琐。相比之下,半解析模型在调整参数方面具有简单灵活的优势。

文中采用 Laplace 空间条带源函数方法,建立了考虑复杂离散裂缝网络的非稳态压力模型 Complex Discrete Fracture Network (CDFN)。CDFN 模型基于条带源函数,避免了繁琐的累加过程,计算简便,结果准确。

1 模型建立

考虑水平无限大地层中有一口水平井。水平井采用分段压裂的方式,在地层中压出多条裂缝。这些裂缝可以彼此相交,也可以不相交。裂缝垂直贯穿整个地层,采用离散裂缝的方式对裂缝进行描述。考虑到裂缝渗透率远大于地层渗透率,忽略地层向井筒的流动,仅考虑裂缝向井筒的流入。忽略井筒内的压力降,即认为井筒是无限导流的。

物理模型如图 1 所示,将其划分为地层模型和裂缝模型两个部分。分别建立模型后再联立求解。

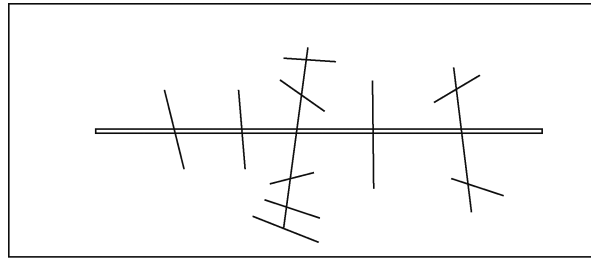


图 1 水平井多段压裂缝示意图

Fig. 1 Schematic graph of fractures in a multi-fractured horizontal well (MFHW)

1.1 地层模型

Ozkan 给出在 Laplace 空间的垂直线源解为

$$\Delta \bar{p} = \frac{1.842 \times 10^{-3} q \mu}{k_m h} K_0(r_D \sqrt{s}) \quad (1)$$

式中: \bar{p} 为 Laplace 空间的地层压力, MPa; q 为单位线源长度上的流量, m^3/d ; μ 为地层流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; h 为地层厚度, m ; k_m 为地层渗透率, μm^2 ; r_D 为距离, m ; s 为 Laplace 变量; K_0 为零阶第二类修正贝塞尔函数。

定义无因次变量如下

$$p_D = \frac{2\pi k_m h \Delta p}{q_{\text{ref}} \mu}$$

$$q_{\text{mD}} = \frac{q_{\text{mf}}}{q_{\text{ref}}} L_{\text{ref}}$$

$$L_{\text{fD}} = \frac{L_f}{L_{\text{ref}}}$$

$$t_D = \frac{k_m t}{\phi_m \mu c_{\text{tm}} L_{\text{ref}}^2}$$

式中: q_{ref} 为任意参考产量, m^3/d ; q_{mf} 为单位裂缝长度的产量, m^3/d ; L_f 为裂缝长度, m ; ϕ 为孔隙度; c_t 为压缩系数, $1/\text{MPa}$; t 为时间, h 。下标: m 表示地层, f 表示裂缝, D 表示相应变量的无因次形式。

将上式沿裂缝积分并转换为无因次形式,即得到有一条裂缝时地层中任一点的压力,即

$$\bar{p}_{\text{mD}}(x_D, y_D) = \int_0^{t_{\text{mD}}} q_D K_0(\sqrt{s} \sqrt{\tilde{x}_D^2 + \tilde{y}_D^2}) d\alpha \quad (2)$$

其中 $\tilde{x}_D = x_D - x_{\text{od}} - u \cos \theta$

$$\tilde{y}_D = y_D - y_{\text{od}} - u \sin \theta$$

式中: $x_{\text{od}}, y_{\text{od}}$ 为裂缝起始点的坐标, m ; θ 为裂缝倾角; x_D, y_D 为所要求解压力点的坐标。

考虑地层中存在 N_f 条裂缝。对于第 j 条裂缝 ($j = 1, \dots, N_f$), 其长度为 L_{fj} , 倾角为 θ_j 。则上式扩展为

$$\bar{p}_{\text{mb}}(x_{\text{D}}, y_{\text{D}}) = \sum_{j=1}^{N_f} \int_0^{L_{\text{mj}}} \bar{q}_{\text{mfj}}(u) \cdot K_0(\sqrt{s} \sqrt{x_{\text{D}}^2 + y_{\text{D}}^2}) du \quad (3)$$

其中 $\tilde{x}_{\text{D}} = x_{\text{D}} - x_{\text{odj}} - u \cos \theta_j$

$\tilde{y}_{\text{D}} = y_{\text{D}} - y_{\text{odj}} - u \sin \theta_j$

1.2 裂缝模型

对于如图2所示裂缝,采用有限导流模型,沿裂缝流量压力均不相等。裂缝内为一维线性流动。裂缝两端为封闭界面。沿裂缝壁面,地层向裂缝内的流量为 q_{mf} 。裂缝可以与其它裂缝相交,交点位于 d_{ff} ,在交点处流量为 q_{ff} 。对于第 j 条裂缝,此类交点共有 N_{ej} 个。如果裂缝与井筒相交,交点位于 d_{fw} ,流量为 q_{fw} 。

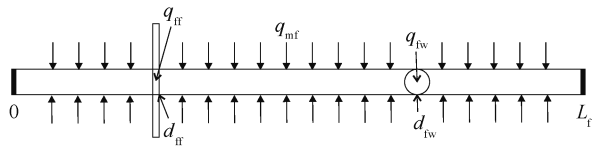


图2 裂缝内流动示意图

Fig. 2 Schematic graph of fluid flow inside a fracture

井筒内压力可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 p_f}{\partial x^2} - \frac{1}{\lambda_f w h} \sum_{i=1}^{N_{\text{ej}}} q_{\text{ff}}(t) \delta(x - d_{\text{ff}}) - \\ \frac{1}{\lambda_f w h} q_{\text{fw}}(t) \delta(x - d_{\text{fw}}) + \frac{1}{\lambda_f w h} q_{\text{mf}}(x, t) \\ = \frac{1}{\eta_f} \frac{\partial p_f}{\partial t} \quad 0 < x < L_{\text{fj}} \quad (4) \end{aligned}$$

其中 $\lambda_f = k_f / \mu$; $\eta_f = k_f / \phi_f \mu c_{\text{ff}}$

式中: q_{mf} 为地层沿单位长度裂缝壁面向裂缝内提供的流量, m^3/d ; d_{ff} 为两条裂缝交点位置, m ; q_{ff} 为两条裂缝交点处的流量, m^3/d ; d_{fw} 为井筒与裂缝交点位置, m ; q_{fw} 为裂缝与井筒之间的流量, m^3/d ; w 为裂缝宽度, m ; t 为时间, h 。

式(4)中,裂缝内的压力由裂缝壁面的流量、裂缝与裂缝交点的流量、裂缝与井筒交点的流量3个部分构成,这3个部分可分别用 Laplace 空间的源函数表示。根据叠加原理,裂缝内的无因次压力可以表示为以上3个无因次压力的和,即

$$p_{\text{D}} = p_{\text{mD}} + p_{\text{ffD}} + p_{\text{fwD}} \quad (5)$$

式中: p_{D} 为裂缝内的无因次压力; p_{mD} 为裂缝壁面流量产生的无因次压力; p_{ffD} 为两条裂缝交点流量产生的无因次压力; p_{fwD} 为裂缝与井筒交点产生的无因次压力。

1.2.1 裂缝壁面的流量

考虑到裂缝两端为封闭界面,沿裂缝壁面的流量

可以看作是条带形地层内的条带源。考虑到沿裂缝流量不相等,采用 Cinco-Ley 等的处理方法,将裂缝离散为 N_s 个小段。在每个小段内认为流量相等。对于每个小段,可以视为条带形地层内的条带源。

应用 Chen 等给出的 Laplace 空间条带形地层内条带源的源函数,对于第 i 个小段其源函数为

$$\begin{aligned} S(x_{\text{D}}, s_{\text{D}}) = \frac{2}{L_{\text{ref}}} \{ \cosh(L_{\text{Di}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}}) \times \\ \cosh[(L_{\text{D}} - x_{\text{D}}) \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}}] \times \\ \sinh(\Delta x_{\text{D}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}}) \} / [s_{\text{D}} \sinh(L_{\text{D}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}})] \quad (6) \end{aligned}$$

其中 $\eta_{\text{D}} = \eta_f / \eta_m$; $\Delta x_{\text{D}} = \frac{L_{\text{D}}}{2N_s}$; $L_{\text{Di}} = \frac{i - 0.5}{N_s} L_{\text{D}}$

式中: Δx_{D} 为每个小段的无因次半长的一半; L_{Di} 为每个小段的中点; L_{D} 为每个小段的无因次长度; s_{D} 为 Laplace 变量; x_{D} 为压力求解点到边界的无因次距离。

则裂缝壁面流量产生的无因次压力表示为

$$\begin{aligned} \bar{p}_{\text{Dmf}}(x_{\text{D}}, s_{\text{D}}) = \frac{2\pi\phi_m c_m}{w_{\text{D}}\phi_f c_f} \left\{ \sum_{i=1}^{N_s} \bar{q}_{\text{mfD}}(x', \tau) \frac{2}{L_{\text{ref}}} \times \right. \\ \left. [\cosh(L_{\text{Di}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}}) \cosh((L_{\text{D}} - x_{\text{D}}) \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}}) \times \right. \\ \left. \sinh(\Delta x_{\text{D}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}})] / [s_{\text{D}} \sinh(L_{\text{D}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}})] \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

式中: ϕ_m 为地层孔隙度; c_m 为地层压缩系数, $1/\text{MPa}$; ϕ_f 为裂缝孔隙度; c_f 为裂缝压缩系数, $1/\text{MPa}$; 变量上的短横线表示该变量为 Laplace 空间的变量。

1.2.2 裂缝与裂缝交点的流量

裂缝与裂缝的交点可以视为裂缝中的一条直线源。Chen 等给出了 Laplace 空间条带形地层内直线源的源函数为

$$\begin{aligned} S(x_{\text{D}}, s_{\text{D}}) = \frac{1}{L_{\text{ref}}} \times \\ \frac{\cosh(d_{\text{D}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}}) \cosh((L_{\text{D}} - x_{\text{D}}) \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}})}{\eta_{\text{D}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}} \sinh(L_{\text{D}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}})} \quad (8) \end{aligned}$$

式中: d_{D} 为裂缝交点到裂缝边界的无因次距离。

则裂缝与裂缝的交点在裂缝内产生的无因次压力表示为

$$\begin{aligned} \bar{p}_{\text{Dff}}(x_{\text{D}}, s_{\text{D}}) = \frac{2\pi\phi_m c_m}{w_{\text{D}}\phi_f c_f} \bar{q}_{\text{ffD}}(\tau) \times \\ \frac{\cosh(d_{\text{D}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}}) \cosh((L_{\text{D}} - x_{\text{D}}) \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}})}{\eta_{\text{D}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}} \sinh(L_{\text{D}} \sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}})} \quad (9) \end{aligned}$$

1.2.3 裂缝与井筒交点的流量

裂缝与井筒的交点同样可以视为裂缝中的一条直线源。则裂缝与井筒的交点在裂缝内产生的无因次压力表示为

$$\bar{p}_{\text{Dfw}}(x_{\text{D}}, s_{\text{D}}) = \frac{2\pi\phi_m c_m}{w_{\text{D}}\phi_f c_f} \bar{q}_{\text{fwD}}(\tau) \times \frac{\cosh(d_{\text{fwD}}\sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}}) \cosh((L_{\text{D}} - x_{\text{D}})\sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}})}{\eta_{\text{D}}\sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}} \sinh(L_{\text{D}}\sqrt{s_{\text{D}}/\eta_{\text{D}}})} \quad (10)$$

式中: d_{fwD} 为裂缝与井筒交点到裂缝边界的无因次距离。

将式(7)、式(9)、式(10)代入式(5)中,即可得裂缝内的无因次压力。

1.3 辅助方程

1.3.1 对裂缝与裂缝交点的处理

对于裂缝 i 与裂缝 j 的交点,其流量分别表示为 q_{fij} 和 q_{fji} 。显然,这两个流量的数值相等,符号相反。因此,有

$$q_{\text{fij}} + q_{\text{fji}} = 0 \quad (11)$$

式中: q_{fij} 表示裂缝 i 与裂缝 j 的交点的流量, m^3/d 。

在此交点上显然压力相等,即

$$p_{\text{fij}} = p_{\text{fji}} \quad (12)$$

式中: p_{fij} 表示裂缝 i 与裂缝 j 的交点的压力, MPa。

对于多条裂缝交于同一点的情况,则针对此交点存在物质平衡方程,即

$$\sum_{i=1}^N q_{\text{fi}} = 0$$

式中: q_{fi} 为通过此交点的第 i 条裂缝提供的流量, m^3/d 。

在此交点上多条裂缝亦压力相等,即

$$p_{\text{fi1}} = p_{\text{fi2}} = \cdots = p_{\text{fiN}}$$

1.3.2 对裂缝与井筒交点的处理

假设井筒与 N_{wf} 条裂缝相交。则所有裂缝与井筒交点的流量之和应等于井筒的流量,并假设各交点处的流量相等,即

$$q_{\text{fwDj}} = \frac{q_{\text{w}}}{N_{\text{wf}}} \quad (j = 1, \cdots, N_{\text{wf}}) \quad (13)$$

式中: q_{w} 为井筒流量, m^3/d ; q_{fwDj} 为与井筒相交的第 j 条裂缝中的无因次流量; N_{wf} 为与井筒相交的裂缝数量, 无因次。

2 模型求解

整个数学模型由式(3)、式(5)、式(11)、式(12)、式(13)构成。在裂缝处,认为地层压力与裂缝压力相

等,即 $p_{\text{fD}} = p_{\text{mD}}$ 。因此,系统中未知量为 $p_{\text{f}}, q_{\text{mf}}, q_{\text{fw}}, q_{\text{ff}}$ 和 p_{w} 。假设地层中共有 N_{f} 条裂缝,每条裂缝离散为 N_{s} 个小段。整个系统内,裂缝与裂缝的交点共 N_{ff} 个,裂缝与井筒的交点共 N_{fw} 个。则未知量数量为 $N_{\text{f}} \times N_{\text{s}}$ 个 $p_{\text{f}}, N_{\text{f}} \times N_{\text{s}}$ 个 $q_{\text{mf}}, N_{\text{ff}}$ 个 $q_{\text{ff}}, N_{\text{fw}}$ 个 q_{fw} 。

将裂缝离散后,对每个小段可以分别列出式(3)和式(5),因此这2个方程各有 $N_{\text{f}} \times N_{\text{s}}$ 个。式(11)、式(12)描述裂缝与裂缝的交点,共有 N_{ff} 个。式(13)描述裂缝与井筒的交点,有 N_{fw} 个。因此,方程总数与未知量总数相等,系统可解。

总系统可以写为 $\mathbf{M} \times \mathbf{X} = \mathbf{B}$ 的形式。其中 \mathbf{X} 为未知量矩阵,其形式为

$$\vec{\mathbf{X}} = (\vec{p}_{\text{fD}}, \vec{q}_{\text{mfD}}, \vec{q}_{\text{ffD}}, \vec{q}_{\text{fwD}}, \vec{p}_{\text{wD}})^T \quad (14)$$

由于模型是在 Laplace 空间求解,因此各未知量均为 Laplace 空间的变量,需进行 Stehfest 数值反演得到实空间的变量值。

此模型求解后可以得到裂缝处的流量 \bar{q}_{mfD} ,代入式(3)中,再进行 Stehfest 数值反演可以得到地层中任一点的压力。由于模型中引入了井底压力 p_{wD} ,因此如果计算目标是井底压力,则已经直接得到,不必再代入式(3)中。

3 对井筒储集和表皮效应的处理

通过以上方法得到的井底压力 \bar{p}_{mD} 没有考虑井筒储集效应和表皮系数的影响。在 Laplace 空间采用 Duhamel 原理,可以采用式(15)得到包含井筒储集和表皮系数的井底压力 \bar{p}_{wD} ,然后用 Stehfest 数值反演可以得到实空间的井底压力 p_{wD} 。由于井筒储集效应会掩盖早期压力特征,为了展示早期压力导数曲线特征,文中的例子均未考虑井筒储集效应。

$$\bar{p}_{\text{wD}} = \frac{\bar{s} \bar{p}_{\text{mD}} + S_{\text{k}}}{s[1 + C_{\text{D}} s(\bar{s} \bar{p}_{\text{mD}} + S_{\text{k}})]} \quad (15)$$

式中: C_{D} 为无因次井筒储集系数; S_{k} 为表皮系数, 无因次; \bar{p}_{wD} 为考虑井筒储集效应和表皮系数的无因次井底压力; \bar{p}_{mD} 为不考虑井筒储集效应和表皮系数的无因次井底压力。

4 实例验证

为了验证模型的准确性和有效性,使用 CDFN 模型分别计算了单一裂缝、多条裂缝和复杂缝网三种情况下的压力动态。

4.1 单一裂缝

在仅有一条裂缝的情况下, CDFN 模型等同于

有限导流垂直裂缝井模型。对此类井,Cinco-Ley 提供了裂缝对称分布的压力解,Berumen 提供了裂缝不对称分布的压力解。为描述不对称裂缝,Berumen 定义了系数 $\xi = x_w/x_f$ 。当井位于裂缝中心时, $\xi = 0$;当井位于裂缝末端时, $\xi = 1$ 。采用无限大油藏模型,将 CDFN 模型计算的井底压力与 Cinco-Ley 和 Berumen 的模型进行对比(见图 3)。

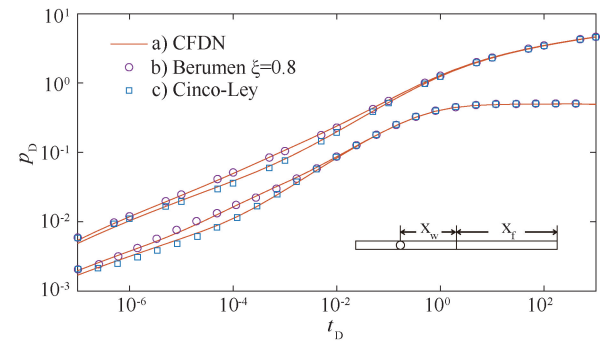


图 3 单一裂缝无因次井底压力双对数图
Fig. 3 Log-log plot of bottom-hole pressure of single-fracture wells

图 3 中实线为 CDFN 模型,圆形符号为 $\xi = 0.8$ 的 Berumen 模型,方形符号为 Cinco-Ley 模型。从图中可见,CDFN 模型与 Cinco-Ley 模型和 Berumen 模型基本一致。图中对称模型曲线可以识别出双线性流、线性流和拟径向流 3 种流动形态。与不对称裂缝曲线相比,不对称裂缝的影响主要表现在双线性流结束时间提前。图 4 为使用 CDFN 模型计算的地层压力分布,分别为无因次时间 $t_D = 0.01$ 和 100 时,以及 $\xi = 0.8$ 和 0 时的情况。

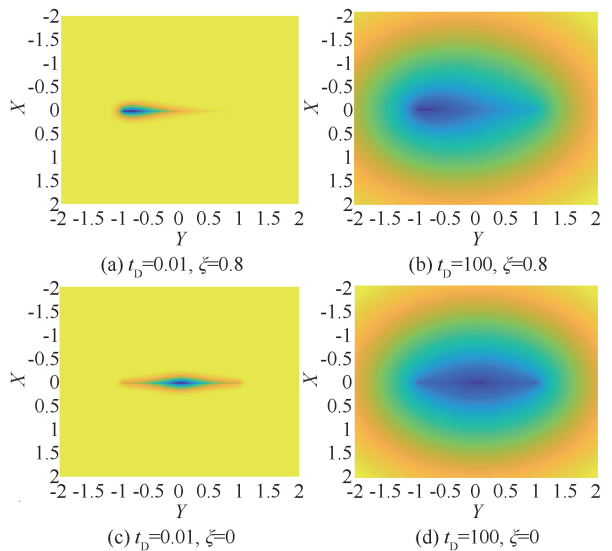


图 4 单一裂缝无因次地层压力分布图
Fig. 4 Dimensionless pressure field map of single-fracture wells

从图 4 中可见, $\xi = 0.8$ 时在流动早期 ($t_D = 0.01$),地层压力具有明显的不对称分布。而随着时间的增加,这种不对称的影响逐渐减小。在双对数图上的反应就是 $t_D = 10$ 之后两条压力曲线基本重合。

4.2 多条裂缝

无限大地层中一口分段压裂水平井有 3 条主裂缝,每条主裂缝有 6 条次级裂缝,如图 5 所示。以次级裂缝的长度为参考长度 L_f ,主裂缝长度为 $3L_f$,主裂缝之间的距离为 d 。无因次井底压力和压力导数见图 6。

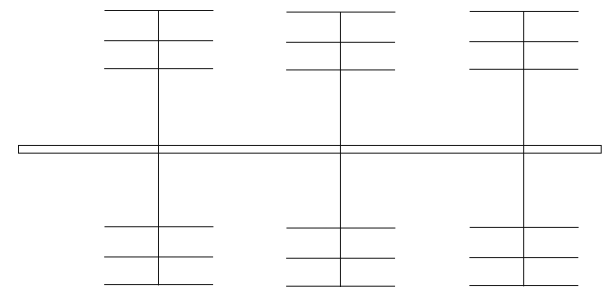


图 5 水平井分段多级压裂
Fig. 5 Schematic graph a multi-fractured horizontal well

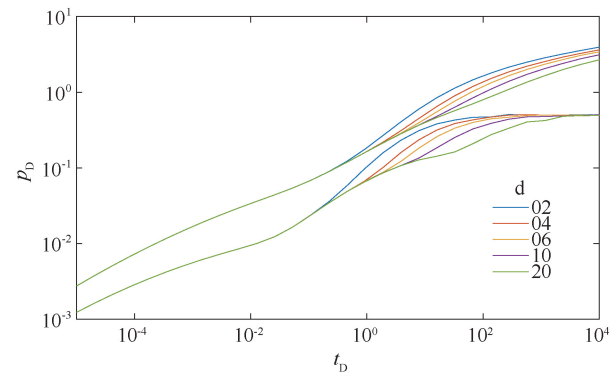


图 6 分段压裂水平井无因次井底压力双对数图
Fig. 6 Effect of d on the bottom-hole pressure of the MFHW

图 6 中出现的流动形态分别为:双线性流、线性流和拟径向流。随着主裂缝距离 d 的增加,压力导数在线性流之后出现了一个附加的水平段,即单一裂缝的拟径向流。这是因为随着距离 d 增加,主裂缝互相间的影响减小。这个附加水平段对应着每条主裂缝附近的拟径向流。图 7 为采用 CDFN 模型计算的地层压力分布图。从图 7 中可以看出,早期流动主要在裂缝内部和裂缝附近,具有线性流特征;晚期流动扩展到地层范围,具有拟径向流特征。

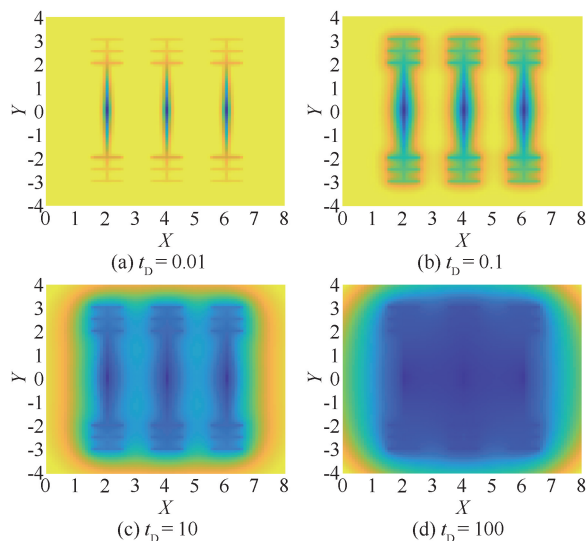


图7 分段压裂水平井地层压力分布图

Fig. 7 Dimensionless pressure field map of MFHW

4.3 复杂缝网

某油田一口压裂水平井,水平段长度为1 240 m,地层厚度为10.1 m。根据微地震数据获得压裂缝和天然裂缝的分布如图8所示。

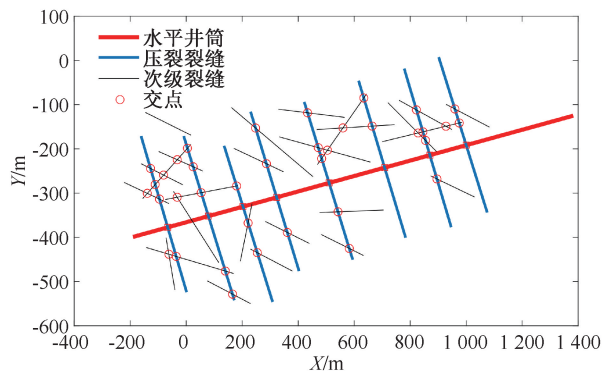


图8 压裂水平井裂缝分布图

Fig. 8 Fracture distribution of a real MFHW

该井水力压裂缝与天然裂缝形成了复杂的裂缝网络。如果采用常规分段压裂水平井模型,仅考虑水力压裂缝,将产生较大的误差。基于无限大地层假设,采用CDFN模型对此复杂缝网系统进行计算,将结果与仅考虑水力裂缝的结果进行对比,见图9。

从图中可见,考虑天然裂缝后,压力导数曲线早期段偏离了典型的1/4斜率,从线性流阶段开始两条曲线基本一致,说明天然裂缝的影响主要集中在早期阶段。图10是采用CDFN模型计算的不同时间地层压力的分布情况。

从图10可见,在早期阶段裂缝形态清晰可见,此时流动以裂缝内线性流或双线性流为主;在 $t_D =$

100后,地层压力基本连为一体,此时流动以地层拟径向流为主,在压力导数曲线上反应为拟径向流水平段。

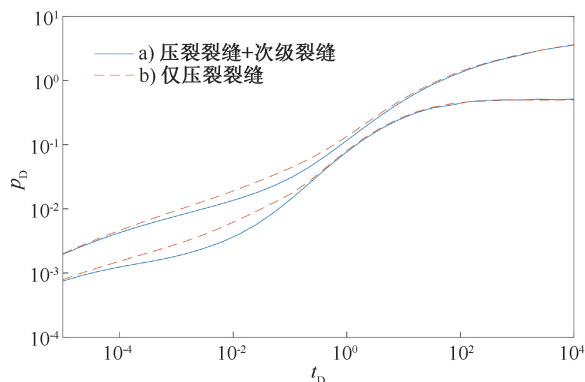


图9 分段压裂水平井无因次井底压力双对数图

Fig. 9 Log-log plot of bottom-hole pressure of the real MFHW

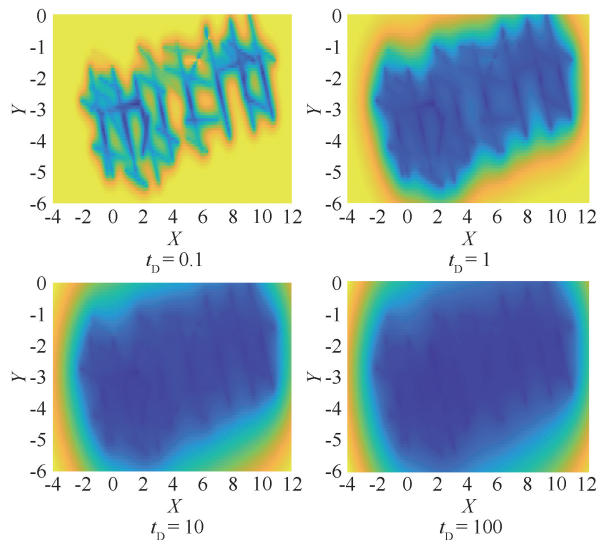


图10 分段压裂水平井地层压力分布图

Fig. 10 Dimensionless pressure field map of the real MFHW

5 结论

(1) 本文提出一种计算复杂离散裂缝网络地层压力分布的数学模型CDFN。该模型基于Laplace空间的条带源函数,能够描述任意分布的离散裂缝生产时井底压力变化情况,以及地层内任一点的压力。CDFN模型为无限大地层,但可以很容易修改为封闭边界或定压边界。该模型适用于具有复杂裂缝分布的地层中分段压裂水平井的不稳定试井解释,如缝洞型碳酸盐岩油藏。该模型也可以用于计算存在复杂缝网情况下地层压力分布情况。

(2) 根据模型计算结果,对于存在复杂缝网的水平井,早期压力导数偏离双线性流特征。如果仅考虑主要水力裂缝,计算结果存在较大误差。对比计算结果表明 CDFN 模型能够更准确的描述井底压力变化情况。

致谢:感谢国家科技重大专项“缝洞型碳酸盐岩油藏提高采收率关键技术”(2016ZX05014)提供技术支持。

参考文献

- [1] GRINGARTEN A C, JR H J RAMEY. The use of source and green's functions in solving unsteady-flow problems in reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1973, 13(5): 285-296.
- [2] GRINGARTEN A C, JR H J RAMEY, R RAGHAVAN. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1974, 14(4): 347-360.
- [3] CINCO L H, F SAMANIEGO V, N DOMINGUEZ A. Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1978, 18(4): 253-264.
- [4] OZKAN E, R RAGHAVAN. New solutions for well-test-analysis problems: part 1-analytical considerations (includes associated papers 28666 and 29213)[J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(3): 359-368.
- [5] CHEN H Y, S W POSTON, R RAGHAVAN. An application of the product solution principle for instantaneous source and green's functions[J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(2): 161-167.
- [6] BERUMEN S, D TIAB, F RODRIGUEZ. Constant rate solutions for a fractured well with an asymmetric fracture[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2000, 25(1): 49-58.
- [7] YANG D, et al. Performance evaluation of a horizontal well with multiple fractures by use of a slab-source function[J]. SPE Journal, 2015, 20(3): 652-662.
- [8] WANG J, A JIA, Y WEI. A generalized framework model for simulating transient response of a well with complex fracture network by use of source and Green's function[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 55: 254-275.
- [9] 郑海军,毛新军,毕全福,等. 非结构网格数值方法优化水平井多段压裂[J]. 油气井测试, 2015, 24(4): 1-6. ZHENG Haijun, MAO Xinjun, BI Quanfu, et al. Unstructured grid numerical method to optimize horizontal well with multiple fractures[J]. Well Testing, 2015, 24(4): 1-6.
- [10] 谢德湘,靳凯,易志东,等. 考虑多效应作用的页岩气变流量压力数据分析方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(3): 14-21. XIE Dexiang, JIN Kai, YI Zhidong, et al. Pressure data analysis method for shale gas in production with variable rate with consideration of multi-effect[J]. Well Testing, 2018, 27(3): 14-21.
- [11] 李道伦,徐春元,卢德唐,等. 多段压裂水平井的网格划分方法及其页岩气流动特征研究[J]. 油气井测试, 2013, 22(1): 13-16. LI Daolun, XU Chunyuan, LU Detang, et al. Grid and pressure transient analysis for multi-stage fractured horizontal well in shale gas reservoir[J]. Well Testing, 2013, 22(1): 13-16.
- [12] 姚军,刘丕养,吴明录. 裂缝性油气藏压裂水平井试井分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 107-113, 119. YAO Jun, LIU Piyang, WU Minglu. Well test analysis of fractured horizontal well in fractured reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(5): 107-113, 119.

编辑 穆立婷

第一作者简介:雷霆,男,1973年出生,博士,2007年获中国地质大学(北京)博士学位,现主要从事油气藏开发方向研究工作。电话:027-67883105,18086430905; Email: leiting@cug.edu.cn。通信地址:湖北省武汉市中国地质大学(武汉)资源学院,邮政编码:430074。