

多段压裂水平井不均匀产油试井模型

何佑伟^{1,2}, 程时清^{1,2}, 胡利民^{1,2}, 方冉^{1,2},
李双³, 汪洋^{1,2}, 黄瑶^{1,2}, 于海洋^{1,2}

(1. 中国石油大学油气资源与工程国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249;
3. 中海油能源发展股份有限公司工程技术深圳分公司, 广东深圳 518607)

摘要:针对某条或多条裂缝产油量较小或不产油这一问题,运用 Green 函数、Newman 乘积方法和叠加原理,建立多段压裂水平井不均匀产油试井模型,将裂缝内流动划分为远离井筒的变质量线性流和靠近井筒的径向流表征裂缝有限导流,利用 Stehfest 数值反演得到考虑井筒存储和表皮效应的实空间井底压力解,绘制典型图版,并分析不均匀产油和裂缝参数对井底压力的影响。结果表明:多段压裂水平井均匀产油和不均匀产油的压力和压力导数特征差异明显;两端裂缝产油量越大,压裂裂缝间距越大,裂缝半长越小,裂缝呈纺锤形分布时,缝间干扰越小,早期径向流越明显,在系统拟径向流之前出现一个新平台。与试井软件 Saphir 中的经典多级压裂水平井数值模型对比,结果证明了提出的模型的正确性。

关键词:水平井; 不均匀产油; 试井分析; 格林函数; Newman 乘积方法; 典型曲线

中图分类号:TE 353 **文献标志码:**A

引用格式:何佑伟,程时清,胡利民,等. 多段压裂水平井不均匀产油试井模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017,41(4):116-123.

HE Youwei, CHENG Shiqing, HU Limin, et al. A pressure transient analysis model of multi-fractured horizontal well in consideration of unequal production of each fracture [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(4):116-123.

A pressure transient analysis model of multi-fractured horizontal well in consideration of unequal production of each fracture

HE Youwei^{1,2}, CHENG Shiqing^{1,2}, HU Limin^{1,2}, FANG Ran^{1,2}, LI Shuang³,
WANG Yang^{1,2}, HUANG Yao^{1,2}, YU Haiyang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
3. Engineering Technology Shenzhen Branch, CNOOC Energy Technology & Services Limited, Shenzhen 518607, China)

Abstract: In this study, the effect of unequal production of each fracture (UPEF) on well testing behavior was considered in order to develop a pressure transient analysis (PTA) model for multi-fractured horizontal wells (MFHW), and semi-analytical solutions were given based on the Green's function, the Newman's product method and superposition principles. The flow in a hydraulic fracture is divided into two flow regimes (i. e. a variable-mass linear flow far from the horizontal wellbore and a radial flow near the horizontal wellbore) to characterize the finite conductivity flow within the fractures. Then, characteristic pressure curves were obtained using a numerical Stehfest inversion algorithm, and sensitivity analysis (e. g. UPEF, fracture and parameters) was further conducted. The analysis results indicate that there are obvious differences among the type curves obtained via assuming an equal production of each fracture (EPEF) and the UPEF. The early-radial flow behaves as a horizontal line in the pressure derivative curves when the fractures located at the ends of wellbore contribute much more to

total oil production than those at the middle section, or when the fractures are wide-spaced and short, or when the fractures behave as spindle shape. In comparison with the classic PTA model of the MFHW in Saphir software, the accuracy and reliability of the newly proposed model has been proven.

Keywords: horizontal well; unequal production of fractures; pressure transient analysis; Green's function; Newman's product method; type curves

压裂水平井技术已成为低渗、致密油气藏开发的关键技术,而试井分析则是评价多段压裂水平井动态参数的重要手段^[14]。Giger^[5]首先研究了压裂水平井稳定流动的渗流场和压力分布规律。随后,很多学者^[6-12]研究了无限导流和有限导流垂直裂缝条件下生产的压裂水平井不稳定压力特征。李笑萍^[13]、刘振宇等^[14]研究了具有多条垂直裂缝的压裂水平井试井分析;姚军等^[15]给出了不同边界条件下裂缝性油气藏压裂水平井的压力解;王本成等^[16]建立了考虑裂缝倾角不同、纵向上未完全穿透储层等情况的多段压裂水平井试井模型;其他一些学者也开展了多段压裂水平井不稳定压力分析^[17-19]。但现有的试井模型中几乎均未考虑多段压裂水平井不均匀产油对压力动态特征的影响。笔者针对一条或多条裂缝产油量较小或不产油这一问题,采用Green函数、Newman乘积方法和叠加原理,建立多段压裂水平井不均匀产油试井模型,绘制典型图版,并分析不均匀产油和裂缝参数对井底压力响应的影响,并与经典压裂水平井试井解析解对比以证明模型的正确性。

1 水平井压裂裂缝不均匀产油试井解释模型

1.1 物理模型

如图1所示,均质无限大油藏中存在一口多段压裂水平井,水平井筒长为 L ,水平井筒平行于 x 轴,压裂裂缝条数为 N ,其中第 i 条裂缝与水平井筒相交于点 (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) 处。地层孔隙度为 φ ,地层原始压力为 p_i ,综合压缩系数为 C_t ,流体黏度为 μ 。

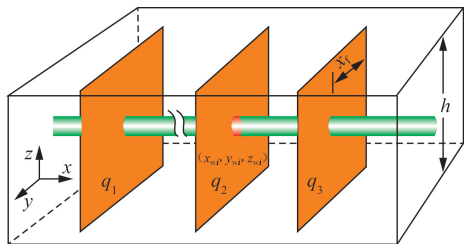


图1 多段压裂水平井不均匀产油物理模型

Fig.1 Physical model of multi-fractured horizontal well with unequal production of each fracture

基本假设条件为:①油藏顶底封闭,水平方向上无穷大;②油藏各向异性,且水平方向渗透率为 $k_x = k_y = k_h$,垂向渗透率为 $k_z = k_v$;③裂缝沿水平井井筒均匀分布,且贯穿整个油藏,裂缝高度等于油藏厚度 h ,裂缝对称分布;④只考虑流体从裂缝向井筒的流动,而不考虑流体从基质向井筒的流动^[10];⑤只考虑单相流体,且不考虑毛细管力和重力的作用。

1.2 多段压裂水平井井底压力解

由源函数可知,通过对无限大空间点源解积分能得到无限大空间的线源解,再由无限大空间线源解积分能得到无限大空间条带源解^[20]。对于顶底封闭,水平方向无限大油藏,根据镜像反映原理,贯穿且垂直于整个油层的单条裂缝可看作是无限大空间的条带源,通过多个条带源叠加可以求得多段压裂水平井任意一点处的压力^[21]。

1.2.1 单条压裂裂缝压降求解

对于单条压裂裂缝,根据无限大空间点源的渗流控制方程,考虑到地层渗透率的各向异性,结合边界条件,得到无限大空间瞬时点源解的表达式为

$$G(x, y, z, t - \tau) = \frac{dV}{\varphi C_t 4 [\pi \eta_h (t - \tau)]} \times \exp\left(-\frac{(x - x_w)^2 + (y - y_w)^2}{4 \eta_h (t - \tau)}\right) \frac{1}{2 [\pi \eta_v (t - \tau)]^{1/2}} \times \exp\left(-\frac{(z - z_w)^2}{4 \eta_v (t - \tau)}\right). \quad (1)$$

其中

$$\eta_h = k_h / \varphi \mu C_t, \eta_v = k_v / \varphi \mu C_t.$$

式中, dV 为单位体积采出液量, m^3/s ; x_w, y_w 和 z_w 为点源坐标; x, y 和 z 为油藏中任意一点位置; η_h 和 η_v 分别为水平方向和垂直方向上的导压系数。

无限大空间直线源可以看作是无无穷个无限空间点源组成,无限大空间直线源可由无限大空间点源积分得到

$$\tilde{p}(x, y, t) = p_i - \frac{ds}{\varphi C_t 4 [\pi \eta_h (t - \tau)]} \times \exp\left(-\frac{(x - x_w)^2 + (y - y_w)^2}{4 \eta_h (t - \tau)}\right). \quad (2)$$

对式(2)从时间域0到 t 进行积分,得到无限大空间持续线源的压力分布为

$$p(x, y, t) = p_i - \frac{1}{\varphi C_t} \int_0^t q_1(\tau) \times \frac{\exp\left(-\frac{(x-x_w)^2 + (y-y_w)^2}{4\eta_h(t-\tau)}\right)}{4[\pi\eta_h(t-\tau)]} d\tau. \quad (3)$$

同理,若无限大空间条带源的分布区域的宽度为 $2x_f$,区域中点在 $y=y_w$ 处,且单位宽度条带区域在 $t=\tau$ 瞬时产出的液量为 dl ,其中 $dl=ds/dy$ 。无限大空间持续条带源的压力分布为

$$p(x, y, t) = p_i - \frac{dl}{2\varphi C_t} \int_0^t \frac{\exp\left(-\frac{(x-x_w)^2}{4\eta_h\tau}\right)}{\sqrt{4\pi\eta_h\tau}} \times \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x_f + (y-y_w)}{\sqrt{4\eta_h\tau}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{x_f - (y-y_w)}{\sqrt{4\eta_h\tau}}\right) \right] d\tau. \quad (4)$$

1.2.2 多条无限导流裂缝压降求解

假设流体均匀流入裂缝,即单位宽度、单位长度地层流入裂缝的流量相等,该条件满足无限大空间条带源的基本假设条件,因此顶底封闭水平方向上无限大,具有一口多段压裂水平井的油藏中任意一点地层压力可用无限大空间条带源迭加得到。假设地层存在 N 条裂缝,且沿水平井筒均匀分布,两条裂缝之间的间距为 $d=L/N$,水平井筒两端的裂缝与井筒两端的距离为 $0.5d$,则第 i 条裂缝的中点横纵坐标分别为

$$x_{wi} = \left(i - \frac{1}{2}\right)d, y_{wi} = 0. \quad (5)$$

假设地层流体均匀流入裂缝,裂缝壁面任一点的流量相等,则第 i 条裂缝的每个点源函数的流量为

$$dV = q_{fi}/2x_{fi}h. \quad (6)$$

式中, q_{fi} 为第 i 条裂缝的流量; x_{fi} 为第 i 条裂缝的裂缝半长。

运用叠加原理,由式(4)~(6)得到具有多条无限导流裂缝的压裂水平井地层中任意一点的压力为

$$p(x, y, t) = p_i - \sum_{i=1}^N \frac{q_{fi}}{4x_{fi}h\varphi C_t} \int_0^t \frac{\exp\left(-\frac{(x-x_{wi})^2}{4\eta_h\tau}\right)}{\sqrt{4\pi\eta_h\tau}} \times \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x_f + y}{\sqrt{4\eta_h\tau}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{x_f - y}{\sqrt{4\eta_h\tau}}\right) \right] d\tau. \quad (7)$$

1.2.3 多条有限导流裂缝模型建立及求取

上述推导中假设流体在裂缝中流动不存在压力降。但实际上,流体在裂缝内流动产生的压力降不能忽略。很多学者认为流体在裂缝内流动的压降是一个定值,等于半径为 $h/2$ 的稳态径向流的压降

值^[22-25]。实际压裂裂缝半长要远大于油藏厚度,将流体在裂缝内流动产生的压力降等同于半径为 $h/2$ 的径向流所产生的压力降会导致较大的误差^[26]。本文将裂缝内流动分为两段:①远离井筒的变质量线性流段;②靠近井筒的以 $h/2$ 为半径的径向流段,如图2所示。流体在裂缝中产生的压力降为井筒远端裂缝内线性流所产生的压力降与井筒近端径向流所产生的压力降之和。该流动模型中,油藏厚度为 h ,裂缝半长为 x_f ,裂缝端点处压力为 p_f ,靠近井筒径向流动段边界处的压力为 p_r 。

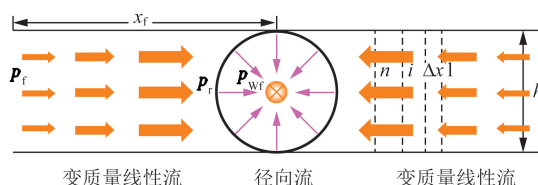


图2 流体在裂缝内流动示意图

Fig. 2 Schematic of flow in fracture

将单翼缝变质量线性流动区域划分为 n 等份,每一等份从地层流向裂缝的流量相等,根据达西定律计算每一等份的压降值,通过压降叠加计算出每一条裂缝内线性流的压降为

$$p_f - p_r = \frac{n+1}{4n} \frac{q_f u B (x_f - h/2)^2}{k_f w h x_f}. \quad (8)$$

对式(8)右端 n 取极限,则可简化为

$$p_f - p_r = \frac{1}{4} \frac{q_f u B (x_f - h/2)^2}{k_f w h x_f}. \quad (9)$$

对于靠近井筒处的半径为 $h/2$ 的径向流动,流量为 q_f ,径向流阶段的压降为

$$p_r - p_{wf} = \frac{q_f u B}{2\pi k_f w} \ln \frac{h}{2r_w}. \quad (10)$$

对于单条裂缝,流体在裂缝内流动形成的压力降为线性流动段压力降与径向流动段压力降之和:

$$p_f - p_{wf} = \frac{1}{4} \frac{q_f u B (x_f - h/2)^2}{k_f w h x_f} + \frac{q_f u B}{2\pi k_f w} \ln \frac{h}{2r_w}. \quad (11)$$

利用叠加原理,得到 N 条有限导流压裂裂缝水平井不均匀产液的井底压力的表达式为

$$p_{wf} = p_i - \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{q_{fi}}{4x_{fi}h\varphi C_t} \int_0^t \frac{\exp\left(-\frac{(x-x_{wi})^2}{4\eta_h\tau}\right)}{\sqrt{4\pi\eta_h\tau}} \times \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x_f + y}{\sqrt{4\eta_h\tau}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{x_f - y}{\sqrt{4\eta_h\tau}}\right) \right] d\tau - \frac{1}{4} \frac{q_{fi} u B (x_f - h/2)^2}{k_f w h x_f} - \frac{q_{fi} u B}{2\pi k_{fi} w} \ln \frac{h}{2r_w} \right\}. \quad (12)$$

定义如下无量纲量:

$$t_D = \frac{k_h t}{\varphi \mu C_i L^2} = \eta \frac{t}{L^2}, p_D = \frac{2\pi k_h h [p_i - p(x, y, z, t)]}{q \mu B},$$

$$x_{fD} = \frac{x_f}{L}, x_D = \frac{x}{L}, y_D = \frac{y}{L}, x_{wiD} = \frac{x_{wi}}{L},$$

$$q_{fD} = \frac{q_{fi}}{q}, r_{wD} = \frac{r_w}{L}, h_D = \frac{h}{L}, w_D = \frac{w}{L}, k_D = \frac{k_h}{k_f}.$$

将无量纲量代入式(12)则有

$$p_{wD} = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\sqrt{\pi} q_{fD}}{2x_{fD}} \int_0^{t_D} \frac{\exp\left[-\frac{(x_D - x_{wiD})^2}{4\tau_D}\right]}{\sqrt{4\tau_D}} \times \operatorname{erf}\left(\frac{2x_{fD}}{\sqrt{4\tau_D}}\right) d\tau_D + \frac{\pi}{2} \frac{q_{fD}}{w_D} \frac{(x_D - h_D/2)^2}{k_D x_{fD}} + \frac{q_{fD} h_D}{k_D w_D} \ln \frac{h_D}{2r_{wD}} \right\}. \quad (13)$$

此外,考虑井储效应后井底无量纲压降^[27]为

$$p_{wDc} = \int_0^{t_D} \left[1 - C_D \frac{dp_{wDc}}{dt_D} \right] \frac{dp_D(t - \tau)}{d\tau} d\tau. \quad (14)$$

其中

$$C_D = \frac{C}{2\pi h \varphi C_i L^2}.$$

为了表征表皮效应, van Everdingen 引入了一个无量纲常量 S 刻画附加压力降^[28]。考虑表皮效应影响时,无因次井底压力可写为

$$p_{wDs}(C_D, S, t_D) = \frac{1}{L_D} \left(1 - C_D \frac{dp_{wDs}}{dt_D} \right) S. \quad (15)$$

在考虑表皮效应和井筒储集效应的共同作用下,无因次井底压力为

$$p_{wD}(t_D) = p_{wDc}(t_D) + p_{wDs}(t_D). \quad (16)$$

利用 Laplace 及其导数变换公式对式(16)进行

求解,得到拉氏空间中压裂水平井在考虑表皮效应和井储效应的压降为

$$\bar{p}_{wD}(C_D, S, u) = \frac{\bar{p}_D(u) + S/uL_D}{1 + uC_D S/L_D + u^2 C_D \bar{p}_D(u)}. \quad (17)$$

对式(17)进行 Stehfest 反演^[29],计算出实空间的井底流压 p_{wD} ,绘制出典型图版。

2 典型图版和流动阶段

假设沿水平井筒有 3 条裂缝,各裂缝的无因次流量分别为 0.45、0.1、0.45,得到多段压裂水平井试井典型图版,如图 3 所示。根据压力及压力导数曲线特征,多段压裂水平井不均匀产油试井典型图版可分为 6 个阶段:①井筒储集阶段,由于流体的可压缩性,关井后仍有流体流入井筒,从而影响井底压力,这一阶段压力和压力导数曲线均表现为斜率为 1 的直线段;②过渡阶段,由井筒储集阶段向地层渗流阶段过渡,过渡阶段的时间取决于表皮系数和井筒储集系数;③第一线性流动阶段,裂缝附近流体以垂直于裂缝壁面方向流入裂缝,裂缝间干扰很小,裂缝内靠近井筒处流体以径向流方式流入井筒,远离井筒处流体以线性流方式流入井筒;④早期径向流动阶段,随着压力传播范围的扩大,流体以径向流形式流入裂缝,压力导数曲线为 $0.5/N^*$ (均匀产油时 $N^*=N$;不均匀产油时 $N^* \neq N$, N 为裂缝条数, N^* 为实际生产的裂缝条数)水平段;⑤第二线性流阶段,远处地层流体以线性流方式流向裂缝区域,压力导数曲线在图版上呈斜率为 0.36 的直线段;⑥系统径向流动阶段,压力导数曲线在图版上表现为 0.5 水平段。

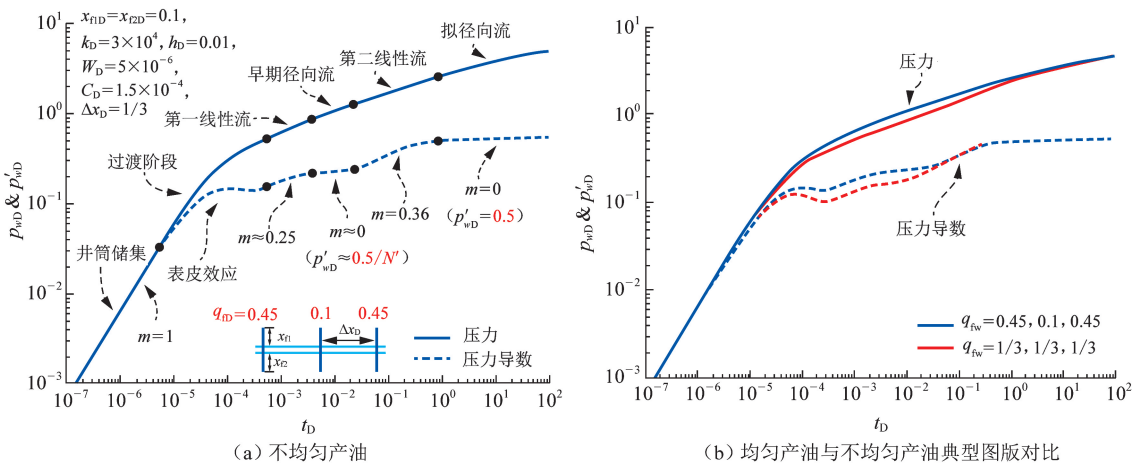


图 3 多段压裂水平井试井典型图版

Fig. 3 Type curves of multi-fractured horizontal well

均匀产油和不均匀产油试井典型曲线的对比图($q_{\text{fnd}}=0.45, 0.1, 0.45$ 表示从水平井筒跟端到趾端3条裂缝的无量纲流量分别为0.45、0.1和0.45,以下图中表示方法相同)如图3(b)所示。多段压裂水平井均匀产油和不均匀产油在压力导数曲线上存在明显差异,主要体现在过渡流,第一线性流和早期径向流阶段,这为不均匀产油特征的识别提供了可能。

3 参数敏感性

与直井或水平井相比,多段压裂水平井的压力响应曲线影响因素更多,本文中针对裂缝条数、裂缝间距、裂缝半长、裂缝流量和裂缝形式等进行敏感性分析。

3.1 裂缝条数

假定水平段长度为1000 m(敏感性分析中均采用该长度),且每条裂缝流量相等,裂缝在水平井筒均匀分布,不同裂缝条数下的多段压裂水平井试井典型曲线如图4所示。裂缝条数增加,压裂改造范围增大,井筒附近渗透性变好,早期压降更小,因此压力和压力导数曲线位置越低。当裂缝条数为2时,早期径向流动阶段在压力导数曲线上表现为近似0.25的水平段。随着裂缝条数增加,缝间干扰增强,早期径向流动阶段越不明显,第二线性流动阶段持续时间越长。

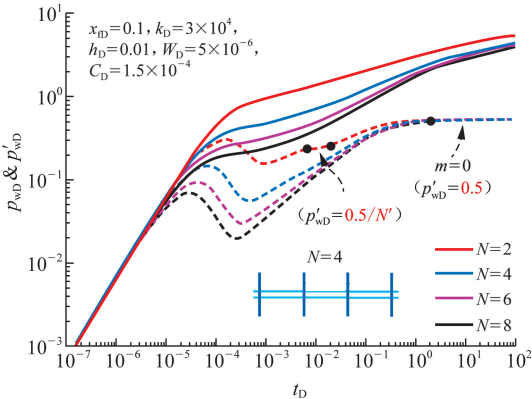


图4 不同裂缝条数下多段压裂水平井试井典型曲线
Fig. 4 Type curves of multi-fractured horizontal well with different number of fractures

3.2 裂缝间距

相邻裂缝无因次距离为 $\Delta x_D = (x_{w2} - x_{w1})/L$,且裂缝半长和流量相等,不同裂缝间距下多段压裂水平井试井典型曲线如图5所示。裂缝间距对井储和第一线性流动阶段无影响。裂缝间距越大,早期径向流持续时间越长,第二线性流动和系统径向流动出现时间越晚,同时早期径向流呈 $0.5/N$ 的水平段

(如 $\Delta x_D=0.5$ 时,水平段值为 $0.5/3$)。若把 $0.5/N$ 的水平段当作系统径向流,最终解释出的渗透率与真实值存在 N 倍的差异。

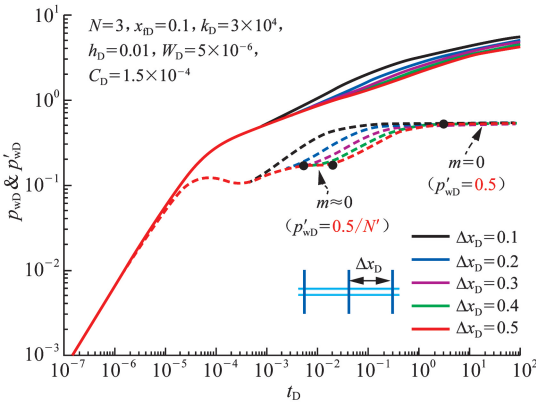


图5 不同裂缝间距下多段压裂水平井试井典型曲线
Fig. 5 Type curves of multi-fractured horizontal well with different dimensionless fracture spacing

3.3 裂缝半长

以裂缝条数 $N=4$ 为例,裂缝在水平井筒上均匀分布,各裂缝流量相等,得到不同无因次裂缝半长下的多段压裂水平井试井典型曲线如图6所示。裂缝半长主要影响第一线性流、早期径向流和第二线性流动段。裂缝半长越长,早期径向流动特征越不明显甚至消失,且压力和压力导数曲线位置越低,这主要是因为压裂改造范围越大,水平井筒附近地层渗透率越高,渗流阻力越小,压降越小。

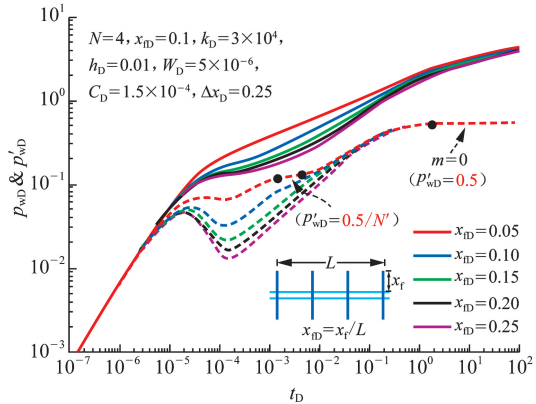


图6 不同无因次裂缝半长下多段压裂水平井试井典型曲线

Fig. 6 Type curves of multi-fractured horizontal well with different dimensionless fracture half-length

3.4 裂缝形式

裂缝条数 $N=3$,裂缝均匀分布且流量相等,裂缝形式分别为等长型、纺锤型和哑铃型,取裂缝总长度相等,得到不同裂缝形式对多段压裂水平井试井典型曲线的影响,如图7所示。裂缝形式主要影响

第一线性流、早期径向流和第二线性流段。随着裂缝半长增大,早期径向流特征越不明显,之后第一线性流段和第二线性流段连续出现。采用哑铃型裂缝生产时压降最小,因此压力及压力导数曲线位于最下方;由于纺锤形裂缝减小了裂缝间的干扰,所以能明显看到早期径向流段 $0.5/N$ 的水平线,而哑铃型和等长型裂缝的早期径向流则不明显。

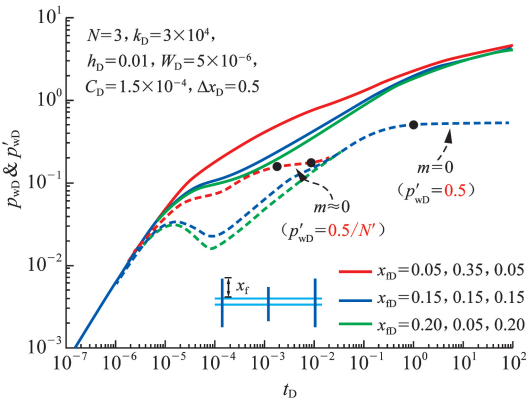


图 7 不同裂缝形式下多段压裂水平井试井典型曲线
Fig. 7 Type curves of multi-fractured horizontal well with different fracture pattern

3.5 各裂缝流量

当水平井筒长度一定,总流量 q 相等时,取裂缝条数为 $N=4$,且在水平井筒上均匀分布,得到不同裂缝流量下的多段压裂水平井不均匀产油试井典型曲线,如图 8 所示。

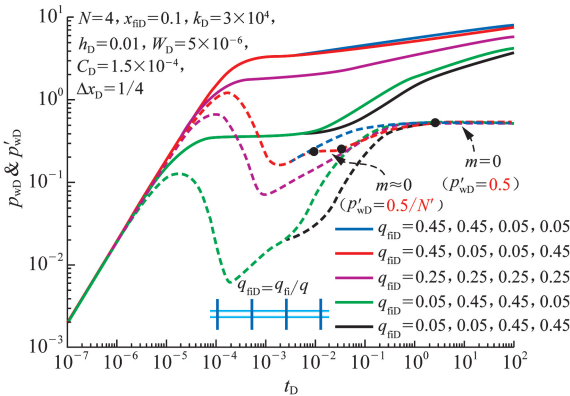


图 8 不同裂缝流量下多段压裂水平井不均匀产油试井典型曲线
Fig. 8 Type curves of multi-fractured horizontal well with different dimensionless production rate of fractures

各裂缝流量不同时,压力和压裂导数存在明显差异。两端裂缝产液量越大,中间裂缝产液量越小时,裂缝间干扰越小,所以早期径向流越明显,压力导数曲线为 $0.5/N^*$ (均匀产油时: $N^*=N$; 不均匀产油时: $0 < N^* < N$) 水平段。如果早期径向流水平段被

当作系统径向流段,解释的渗透率将与真实值存在 N^* 倍的差异。多段压裂水平井跟端流量大,趾端流量小时,压力及压力导数曲线在图 8 中位于最上方,反之亦然。当 4 条裂缝均匀产油时,其压力及压力导数位于图版的中间位置。鉴于多段压裂水平井不均匀产油在压力和压力导数上有明显的特征,因此可以诊断和识别不均匀产油现象,确定故障裂缝位置,为下一步的重复压裂或酸化解堵等增产措施的制定提供理论依据。

4 模型验证

为了验证本文中模型的准确性,将本文中模型简化后(即考虑裂缝均匀产油)与权威 Saphir 试井软件中的多级压裂水平井数值模型进行对比。基本参数:储层厚度为 20 m,渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,原始地层压力为 30 MPa;水平井筒长 800 m,水平井筒半径为 0.1 m,裂缝条数为 3,裂缝半长为 60 m,裂缝等间距且为无限导流,井储系数和表皮系数均为 0,产量为 $20 \text{ m}^3/\text{d}$,综合压缩系数为 $6 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ 。对比结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出简化后的本文模型与 Saphir 数值模型具有较好的一致性,表明本文中提出的模型可靠性强。

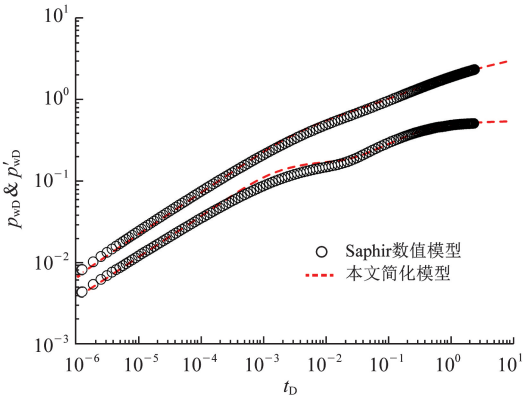


图 9 本文中模型与 Saphir 数值模型对比
Fig. 9 Comparison of model proposed in this paper and numerical model in Saphir

5 结论

- (1) 多段压裂水平井均匀产油和不均匀产油的压力和压力导数特征差异明显,在进行试井解释时应该考虑不均匀产油对压力响应特征的影响。
- (2) 两端裂缝产油量越大,压裂裂缝间距越大,裂缝半长越小,裂缝呈纺锤形分布时,缝间干扰越小,早期径向流越明显,此时早期径向流呈现压力导数为 $0.5/N^*$ (均匀产油 $N^*=N$; 不均匀产油 $0 < N^* < N$) 水平段。

N)的新平台。

(3) 如果早期径向流水平段被当作系统径向流段进行解释, 解释的渗透率将与真实值存在 N^* 倍的差异。

(4) 与试井软件 Saphir 中的多级压裂水平井数值模型对比结果证明了新模型的正确性。新模型对多段压裂水平井不均匀产油诊断及解释、重复压裂及解堵等措施的制定具有指导意义。

参考文献:

- [1] 曾保全, 程林松, 李春兰, 等. 特低渗透油藏压裂水平井开发效果评价[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 791-796.
ZENG Baoquan, CHENG Linsong, LI Chunlan, et al. Development evaluation of fractured horizontal wells in ultra-low permeability reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 791-796.
- [2] 李廷礼, 李春兰, 吴英, 等. 低渗透油藏压裂水平井产能计算新方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(2): 48-52.
LI Tingli, LI Chunlan, WU Ying, et al. A new way to calculate fractured horizontal wells productivity in low permeability oil reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(2): 48-52.
- [3] 孙致学, 姚军, 樊冬艳, 等. 基于离散裂缝模型的复杂裂缝系统水平井动态分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 109-115.
SUN Zhixue, YAO Jun, FAN Dongyan, et al. Dynamic analysis of horizontal wells with complex fractures based on a discrete-fracture model [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(2): 109-115.
- [4] HE Y, CHENG S, LI L, et al. Waterflood direction and front characterization with four-step work flow: a case study in Changqing oil field, China [R]. SPE 178053-PA, 2016.
- [5] GIGER F M. Low-permeability reservoirs development using horizontal wells [R]. SPE 16406, 1987.
- [6] LARSEN L, HEGRET M. Pressure-transient behavior of horizontal wells with finite-conductivity vertical fractures [R]. SPE 22076, 1991.
- [7] LARSEN L, HEGRET M. Pressure transient analysis of multi-fractured horizontal wells [R]. SPE 28389, 1994.
- [8] HORNER N, TEMENGK O. Relative productivities and pressure transient modeling of horizontal wells with multiple fractures [R]. SPE 29891, 1995.
- [9] GUO G, EVANS R D. Pressure-transient behavior and in-flow performance of horizontal wells intersecting discrete fractures [R]. SPE 26446, 1993.
- [10] al RBEAWI S J H, DJEBBAR T. Transient pressure analysis of a horizontal well with multiple inclined hydraulic fractures using type-curve matching [R]. SPE 149902-MS, 2012.
- [11] RAGHAVAN R S, CHEN C C, BIJAN A. An analysis of horizontal wells intercepted by multiple fractures [J]. SPE Journal, 1997, 2(3): 235-245.
- [12] YANG D, ZHANG F, STYLES J A, 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.
- [13] 李笑萍. 穿过多条垂直裂缝的水平井渗流问题及压降曲线[J]. 石油学报, 1996, 17(2): 91-97.
LI Xiaoping. Fluid flow through pay zones in relation to draw-down profiles in a horizontal well intersecting several vertical fractures [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(2): 91-97.
- [14] 刘振宇, 方亮, 安艳明, 等. 穿越多条裂缝水平井的井底压力变化特征[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(4): 341-343.
LIU Zhenyu, FANG Liang, AN Yanming, et al. Pressure behavior of horizontal well with multiple transversal fractures [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(4): 341-343.
- [15] 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.
YAO Jun, LIU Piyang, WU Minglu. Well test analysis of fractured horizontal well in fractured reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 107-113.
- [16] 王本成, 贾永禄, 李友全, 等. 多段压裂水平井试井模型求解新方法[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1150-1156.
WANG Bencheng, JIA Yonglu, LI Youquan, et al. A new solution of well test model for multistage fractured horizontal wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1150-1156.
- [17] 樊冬艳, 姚军, 王子胜. 基于有限元的低渗透油藏水平井试井分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 80-84.
FAN Dongyan, YAO Jun, WANG Zisheng. Horizontal well testing analysis in low-permeability reservoirs based on finite element method [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(2): 80-84.

- [18] 王晓冬,罗万静,侯晓春,等. 矩形油藏多段压裂水平井不稳态压力分析[J]. 石油勘探与开发,2014,41(1):74-78.
WANG Xiaodong, LUO Wanjing, HOU Xiaochun, et al. Transient pressure analysis of multiple-fractured horizontal wells in boxed reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014,41(1):74-78.
- [19] 樊冬艳,姚军,孙海,等. 页岩气藏分段压裂水平井不稳定渗流模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(5):116-123.
FAN Dongyan, YAO Jun, SUN Hai, et al. Transient flow model of stage-fractured horizontal wells in shale gas reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(5):116-123.
- [20] GRINGARTEN A C, RAMEY H J. The use of source and Green's functions in solving unsteady-flow problems in reservoirs [J]. SPE Journal, 1973,13(5):285-296.
- [21] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2010.
- [22] MUKHERJEE H, ECONOMIDES M J. A parametric comparison of horizontal and vertical well performance [J]. SPE Form Eval, 1991,6(2):209-216.
- [23] HUDSON P J, MATSON R P. Hydraulic fracturing in horizontal wellbores[R]. SPE 23950,1992.
- [24] HEGRE T M, LEIF L. Productivity of multifractured horizontal wells[R]. SPE 28845,1994.
- [25] 宁正福,韩树刚,程林松,等. 低渗透油气藏压裂水平井产能计算方法[J]. 石油学报,2002,23(2):68-71.
NING Zhengfu, HAN Shugang, CHENG Linsong, et al. Productivity calculation method of fractured horizontal wells in low permeability oil or gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002,23(2):68-71.
- [26] HE Y, CHENG S, LI S, et al. A semianalytical methodology to diagnose the locations of underperforming hydraulic fractures through pressure-transient analysis in tight gas reservoir [R]. SPE 185166-PA, 2016
- [27] van EVERDINGEN A F, HURST W. The application of the laplace transformation to flow problems in reservoirs [J]. Journal of Petroleum Technology, 1949,1(12):305-324.
- [28] van EVERDINGEN A F. The skin effect and its influence on the productive capacity of a well [J]. Journal of Petroleum Technology, 1953,5(6):171-176.
- [29] STEHFEST H. Algorithm 368: numerical inversion of Laplace transforms [J]. Communications of the Acm, 1970,13(1):47-49.

(编辑 李志芬)