

低渗透油藏水平井分段压裂半解析产能计算 与影响因素研究

李勇明¹,周文武¹,赵金洲¹,张玲玲²

(1.西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610500;

2.中国石油青海油田公司勘探开发研究院,甘肃敦煌736202)

摘要:低渗透油藏渗透率极低,往往存在启动压力梯度,其分段压裂水平井的渗流机理复杂,影响产能的因素多。基于双重介质渗流微分方程,采用点源理论和压降叠加原理,同时考虑启动压力梯度和水力裂缝导流能力,建立了低渗透油藏水平井分段压裂半解析产能计算模型,进行了产量求解与数值反演,并结合实例进行了计算与分析。结果表明:启动压力梯度对产能影响较大,启动压力梯度越大,产量越低;水力裂缝与井筒间夹角对产量有一定影响,但不明显,夹角呈90°时产量最高;水力裂缝导流能力对初期产量有明显影响,但后期影响不大;水平井两端的水力裂缝对产量的影响大于中部的水力裂缝,应尽量在水平井两端增加压裂段数和裂缝长度;储容比和窜流系数主要影响中期产能,储容比越大,产量下降越快,窜流系数越大,产量越高。研究结果不仅深化了对低渗透油藏分段压裂水平井渗流规律的认识,而且对水平井分段压裂的优化设计提供了重要指导与建议。

关键词:压裂水平井;启动压力梯度;双重介质;半解析;产能;优化设计

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Semi-analytical productivity calculation and sensitive factors for the multi-stage fractured horizontal well in low permeability reservoirs

Li Yongming¹, Zhou Wenwu¹, Zhao Jinzhou¹ and Zhang Lingling²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Research Institute of Exploration, Qinghai Oilfield, CNPC, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: A low permeability reservoirs usually have threshold pressure gradient with extremely low permeability. The seepage mechanism of multi-stage fractured horizontal wells are complex and the productivity are affected by many factors. Based on the dual-porosity medium seepage differential equation, applying point source theory and superposition principle, a semi-analytical productivity model for the multi-stage fractured horizontal wells is established, considering the threshold pressure gradient and hydraulic fracture conductivity. Then the calculation of production and the numerical inversion are conducted, following by the analyses of the influence factors combining specific examples. The study results show that the threshold pressure gradient has great effect on productivity. The larger the threshold pressure gradient is, the lower the production will be. The angle between the hydraulic fracture and wellbore has a little influence on production, but not obvious, and the highest production appears when the angle is 90°. The conductivity of the hydraulic fracture has obvious effect on the initial production, but a little influence on that in the later period. The hydraulic fracture at both ends of the horizontal wells affect more than that in the middle, so the fractured horizontal well's stages and the length of the fracture should be increased. The storage ratio and cross flow coefficient mainly affect the medium-term productivity. The larger the storage ratio is, the faster the production will decrease. And the larger the cross flow coefficient is, the higher the production will be. The results of this study not only contributes to the deep understanding of the multi-stage fractured horizontal well's seepage laws in the low permeability reservoirs, but also provides some important guidance and advice for the optimization design of the multi-stage fractured horizontal wells.

Key words: fractured horizontal well, threshold pressure gradient, dual-porosity medium, semi-analytical, productivity, optimization design

收稿日期:2017-06-17。

第一作者简介:李勇明(1974—),男,教授,博士生导师,油气藏增产改造教学与研究。

基金项目:四川省青年科技创新研究团队专项计划项目“页岩气体压裂排液控制技术”(2017TD0013);国家自然科学基金重大项目“页岩地层动态随机裂缝控制机理与无水压裂理论”(51490653)。

近年来,随着水平井分段压裂技术的不断发展,分段压裂水平井在低渗透油藏中取得了显著的开发效果^[1-2],而产能计算对水平井分段压裂的优化设计至关重要。目前,常用的分段压裂水平井产能计算方法有解析法、数值模拟法和半解析法^[3-5]。其中,半解析法是一种新兴的压裂水平井产能计算方法,该方法既能够克服解析法应用范围狭窄等多种不足,同时又在计算时比数值模拟法更加快捷、有效,具有明显的优势^[6]。Larsen等^[7]研究了压裂水平井的压力动态和流动阶段特征问题,并提出了确定压裂水平井产能的方法。Cvetkovic等^[8]运用Laplace变换和格林函数,通过离散每条裂缝的数学模型,从而研究多条裂缝的产能。曾凡辉等^[9]根据复位势理论和势叠加原理,得出了考虑裂缝干扰的压裂水平井产能预测模型。杨正明等^[10]应用Green函数和Newman乘积原理,推导出了分段压裂水平井非稳态条件下的产能公式。但是,上述模型都基于单一孔隙介质油藏,而低渗透油藏中天然裂缝大量发育^[11],同时存在启动压力梯度,这将对压裂水平井的产能产生重要影响^[12-13]。另外,基于简化的线性流模型,国内外进行了一些双重介质油气藏的压裂水平井产能研究,提出了三线性、五线性及多线性能模型^[14-17]。然而,这些模型都无法考虑裂缝与井筒不垂直、不同裂缝间距、不同裂缝长度等情形,与实际情况不符,产能计算误差较大。

因此,基于双重介质渗流微分方程,采用点源理论和压降叠加原理,同时考虑启动压力梯度和水力裂缝导流能力,建立了低渗透油藏水平井分段压裂半解析产能计算模型,求得了产量的拉氏空间解,再通过Stehfest数值反演,得到真实空间产量。结合具体实例,分析了裂缝夹角、裂缝导流能力、裂缝不等长、储容比、窜流系数对产量的影响,并对水平井分段压裂的优化设计提出合理的建议。

1 模型假设

分段压裂水平井位于无限大油藏中部,水力裂缝数量为 M 条,各条水力裂缝可不等间距,不等长度,如图1所示。

假设条件:

1) 油藏为裂缝—孔隙型双重介质,且流体从基质向天然裂缝的窜流为拟稳态窜流;2) 水力裂缝与

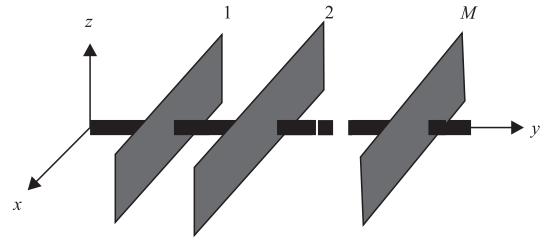


图1 分段压裂水平井示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-stage fractured horizontal well

水平井筒夹角为 α ,且完全穿透油层;3) 油藏中流体流动过程为:基质→天然裂缝→水力裂缝→水平井筒;4) 忽略重力和毛细管力。

2 模型建立

为了便于推导,定义各无因次变量如下:

$$p_D = \frac{2\pi k_f h (p_i - p_i)}{q_{sc} \mu}; q_{D0} = \frac{q_i}{q_{sc}}; r_D = \frac{r}{L_{ref}};$$

$$t_D = \frac{k_f t}{\mu(c_f \phi_f + c_m \phi_m) L_{ref}^2}; x_D = \frac{x}{L_{ref}}; y_D = \frac{y}{L_{ref}};$$

$$\omega = \frac{c_f \phi_f}{c_f \phi_f + c_m \phi_m}; \lambda = \sigma \frac{k_m}{k_f} L_{ref}^2; C_{FD} = \frac{k_f w_F}{k_f h};$$

$$G_D = \frac{2\pi k_f h L_{ref} G}{q_{sc} \mu}$$

2.1 油藏数学模型

在低渗透油藏中,考虑启动压力梯度的非达西渗流方程为^[18]:

$$V = -k \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G \right) \quad (1)$$

对于无限大双重介质油藏,采用Warren-Root模型,通过连续性方程结合上式推导出其双重介质渗流微分方程,然后将无因次压力、无因次压力梯度等引入渗流偏微分方程和定解条件后得到如下方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p_m}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_m}{\partial r_D} + \frac{G_D}{r_D} - \omega \frac{\partial p_m}{\partial t_D} + \lambda(p_m - p_m) = 0 \\ (1 - \omega) \frac{\partial p_m}{\partial t_D} + \lambda(p_m - p_m) = 0 \\ r_D \left(\frac{\partial p_m}{\partial r_D} + G_D \right) \Big|_{r_D \rightarrow 0} = -1 \\ p_m \Big|_{r_D \rightarrow \infty} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

对上式作拉氏变换后得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r_D} - s D \bar{p} = -\frac{G_D}{s r_D} \\ r_D \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial r_D} + \frac{G_D}{s} \right) \Big|_{r_D \rightarrow 0} = -\frac{1}{s} \\ \bar{p} \Big|_{r_D \rightarrow \infty} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: $D = \frac{\lambda + \omega(1-\omega)s}{\lambda + (1-\omega)s}$

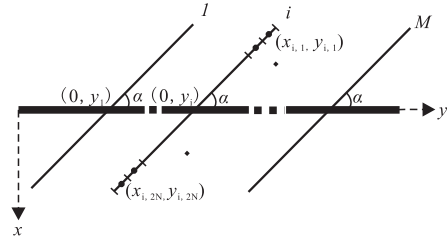


图2 水力裂缝等分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of discretization of hydraulic fracture

2.2 水力裂缝数学模型

流体从水力裂缝不断流向水平井筒的过程可以看成平面径向流^[9],其流动方程为:

$$p_i - p_w = \frac{q_i \mu}{2\pi k_F w_F} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_{fk} + x_{fr})h/\pi}}{r_w} \right) \quad (4)$$

将无因次压力、无因次裂缝产量和无因次裂缝导流能力引入上式并作拉氏变换后得到:

$$\bar{p}_m - \bar{p}_{wd} = -\frac{\bar{q}_{mD}}{C_{FD}} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_{fk} + x_{fr})h/\pi}}{r_w} \right) \quad (5)$$

3 模型求解

由油藏渗流方程和定解条件求得压力点源解:

$$\begin{aligned} \bar{p}_m = & \frac{1}{s} K_0(\sqrt{sD} r_D) + \frac{G_D}{s} K_0(\sqrt{sD} r_D) \int_0^{r_D} I_0(\sqrt{sD} \tau) d\tau + \\ & \frac{G_D}{s} I_0(\sqrt{sD} r_D) \int_{r_D}^{\infty} K_0(\sqrt{sD} \tau) d\tau \end{aligned} \quad (6)$$

因此,无限大双重介质低渗透油藏一点汇(x_{wD} , y_{wD})以定产量 q_i 在点(x_D , y_D)产生的压降为:

$$\begin{aligned} \bar{p}_m = & \bar{q} \left[K_0(\sqrt{sD} R_D) + G_D K_0(\sqrt{sD} R_D) \int_0^{R_D} I_0(\sqrt{sD} \tau) d\tau + \right. \\ & \left. G_D I_0(\sqrt{sD} R_D) \int_{R_D}^{\infty} K_0(\sqrt{sD} \tau) d\tau \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{其中: } R_D = \sqrt{(x_D - x_{wD})^2 + (y_D - y_{wD})^2}$$

设水平井井轴为 y 方向,水力裂缝与水平井筒的夹角为 α 。将分段压裂水平井的第 i 条水力裂缝均分成 $2*N$ 等份,则每一份可以看做一个点汇,如图2所示。假设水力裂缝左右两翼等长,则第 i 条水力裂缝的第 j 个点汇的中点坐标为: $(-\frac{2N-2j+1}{2N} x_{fiD} \sin \alpha, y_{fi} + \frac{2N-2j+1}{2N} x_{fiD} \cos \alpha)$,第 k 条水力裂缝的尖端点坐标为: $(-x_{fkD} \sin \alpha, y_{dk} + x_{fkD} \cos \alpha)$ 。

通过压降叠加原理,得到所有水力裂缝在任意一条水力裂缝尖端处的压降:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{wd} = & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{2N} \frac{\bar{q}_{mD}}{2N} \left[K_0(\sqrt{sD} R_{Di}) + G_D K_0(\sqrt{sD} R_{Di}) \int_0^{R_{Di}} I_0(\sqrt{sD} \tau) d\tau + \right. \\ & \left. G_D I_0(\sqrt{sD} R_{Di}) \int_{R_{Di}}^{\infty} K_0(\sqrt{sD} \tau) d\tau \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } R_{Di} = & \sqrt{(x_D - x_{wDi})^2 + (y_D - y_{wDi})^2} \\ = & \left[-x_{fkD} \sin \alpha + \frac{2N-2j+1}{2N} x_{fiD} \sin \alpha \right]^2 + \\ & \left(y_{dk} + x_{fkD} \cos \alpha - y_{di} - \frac{2N-2j+1}{2N} x_{fiD} \cos \alpha \right)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

将上式代入水力裂缝流动方程(5),得第 k 条水力裂缝井底压力:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{wd} = & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{2N} \frac{\bar{q}_{mD}}{2N} \left[K_0(\sqrt{sD} R_{Di}) + G_D K_0(\sqrt{sD} R_{Di}) \int_0^{R_{Di}} I_0(\sqrt{sD} \tau) d\tau + \right. \\ & \left. G_D I_0(\sqrt{sD} R_{Di}) \int_{R_{Di}}^{\infty} K_0(\sqrt{sD} \tau) d\tau \right] + \frac{\bar{q}_{mD}}{C_{FD}} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_{fk} + x_{fr})h/\pi}}{r_w} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

由所有水力裂缝产量之和等于总产量,无因次化并拉氏变换后得:

$$\sum_{i=1}^M \bar{q}_{mD} = \frac{1}{s} \quad (10)$$

令:

$$\begin{aligned} A_{k,i} = & \sum_{j=1}^{2N} \frac{1}{2N} \left[K_0(\sqrt{sD} R_{Di}) + G_D K_0(\sqrt{sD} R_{Di}) \int_0^{R_{Di}} I_0(\sqrt{sD} \tau) d\tau + \right. \\ & \left. G_D I_0(\sqrt{sD} R_{Di}) \int_{R_{Di}}^{\infty} K_0(\sqrt{sD} \tau) d\tau \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$e_k = \frac{1}{C_{FD}} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_{fk} + x_{fr})h/\pi}}{r_w} \right) \quad (12)$$

假设忽略流体在井筒中的流动压降,即 $\bar{p}_{w1D} = \bar{p}_{w2D} = \dots = \bar{p}_{wD}$,得到以下方程组:

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} + e_1 & A_{1,2} & \dots & A_{1,M} & -1 \\ A_{2,1} & A_{2,2} + e_2 & \dots & A_{2,M} & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{M,1} & \dots & A_{M,M} + e_M & -1 & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{q}_{mD} \\ \bar{q}_{mD} \\ \dots \\ \bar{q}_{mD} \\ \bar{p}_{wD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1/s \end{bmatrix} \quad (13)$$

求解上述线性方程组即得到 \bar{p}_{wd} , 考虑井筒储集系数和表皮系数的影响, 根据 Duhamel 定理得到拉氏空间下无因次井底压力为:

$$\bar{p}_{whd} = \frac{s\bar{p}_{wd} + s_c}{s + s^2 C_{wd}(s\bar{p}_{wd} + s_c)} \quad (14)$$

根据 Van Everdingen 和 Hurst^[20] 的研究表明, 拉氏空间下定井底压力的无因次产量与定产量的无因次井底压力有以下关系:

$$\bar{q}_D = \frac{1}{s^2 \bar{p}_{whd}} \quad (15)$$

求得拉氏空间下的无因次产量, 然后通过 stehfest 数值反演^[21], 即得到真实空间下的产量。

4 实例计算与影响因素分析

以某低渗透油藏分段压裂水平井为例, 主要参数为: 油藏厚度 50 m, 渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储容比 0.01, 窜流系数 0.000 1, 启动压力梯度 0.001 MPa/m, 分三段压裂, 每段间距 100 m, 水力裂缝半长 30 m, 夹角 90° , 导流能力 $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。计算并得到无因次产能曲线如图 3 所示。

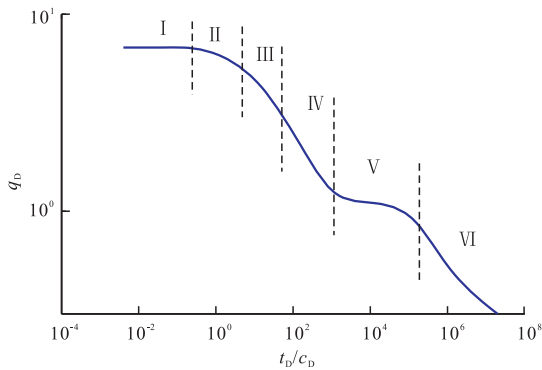


图3 产能曲线

Fig. 3 Productivity curves

从图 3 可以看出, 随着渗流规律的变化, 产能曲线可以划分为六个阶段:

I 为井筒储集阶段。此阶段由于井筒储集作用, 产量几乎保持不变; II 为表皮系数影响阶段。此阶段产量开始下降; III 为水力裂缝线性流阶段。此阶段持续时间较短, 产量迅速下降; IV 为地层和水力裂缝线性流阶段。此阶段由于渗流区域扩大, 渗流阻力增加, 产量进一步下降; V 为地层窜流阶段。此阶段双重介质地层中的基质开始向天然裂缝补充流体, 产量递减趋势减弱, 出现一个平稳段; VI 为拟径

向流阶段。此阶段渗流区域进一步扩大, 产量继续下降。

4.1 启动压力梯度

图 4 为不同无因次启动压力梯度下的无因次产能曲线。可以看出, 启动压力梯度对产能影响较大, 启动压力梯度越大, 产量越低。因此, 低渗透油藏压裂水平井的产能计算不能忽略启动压力梯度的影响。

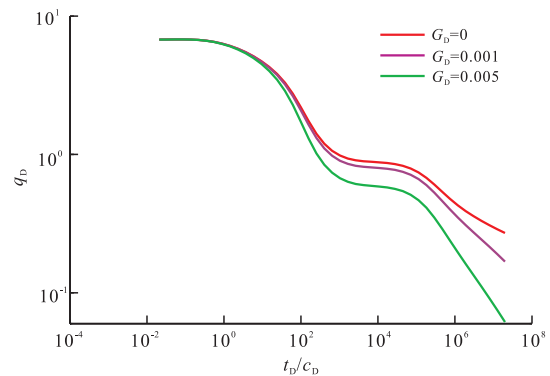


图4 启动压力梯度对产能曲线的影响

Fig. 4 Effect of threshold pressure gradient on productivity curves

4.2 裂缝夹角

图 5 为不同裂缝夹角下的无因次产能曲线。可以看出, 裂缝夹角对产量有一定影响, 但不明显。裂缝与井筒夹角越大, 各裂缝之间的干扰越弱, 产量越高。夹角为 90° 时, 产量最高。因此, 水平井压裂施工时应尽量使水力裂缝与井筒垂直。

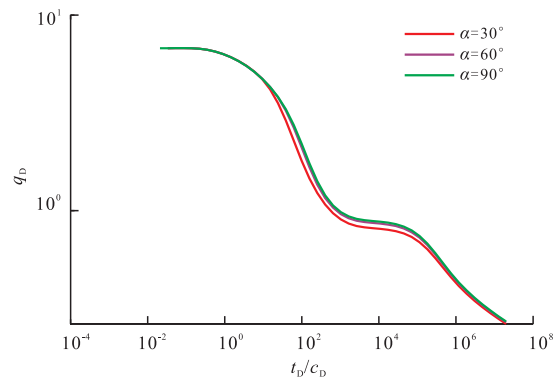


图5 裂缝夹角对产能曲线的影响

Fig. 5 Effect of hydraulic fracture angle on productivity curves

4.3 裂缝导流能力

图 6 为不同无因次裂缝导流能力下的无因次产

能曲线。可以看出,裂缝导流能力对初期产量有明显影响,但后期影响不大。裂缝导流能力越大,流体在水力裂缝中的流动阻力越小,产量越高。但是,随着导流能力的增加,产量增加幅度越来越小。因此,盲目地增大导流能力是不经济的,这会大幅增加施工成本,导流能力存在一个经济最优值。

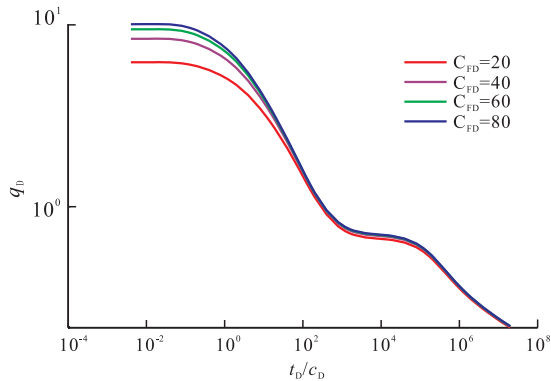


图6 裂缝导流能力对产能曲线的影响

Fig. 6 Effect of hydraulic fracture conductivity on productivity curves

4.4 裂缝不等长

考虑水力裂缝不等长的情况,取四条裂缝,分以下三种情形进行产能计算,产能曲线如图7所示。

情形1: $x_{n1} = x_{n2} = x_{n3} = x_{n4} = 15$ m

情形2: $x_{n1} = 15$ m, $x_{n2} = 30$ m, $x_{n3} = 30$ m, $x_{n4} = 15$ m

情形3: $x_{n1} = 30$ m, $x_{n2} = 15$ m, $x_{n3} = 15$ m, $x_{n4} = 30$ m

由图7可以看出,水力裂缝越长,裂缝沟通的泄油区域越大,产量越高;水平井中部的水力裂缝对产量的影响小于两端的水力裂缝,靠近水平井两端的水力裂缝越长,产量越高。因此,水平井分段压裂时,应尽量在水平井两端增加压裂段数和裂缝长度。

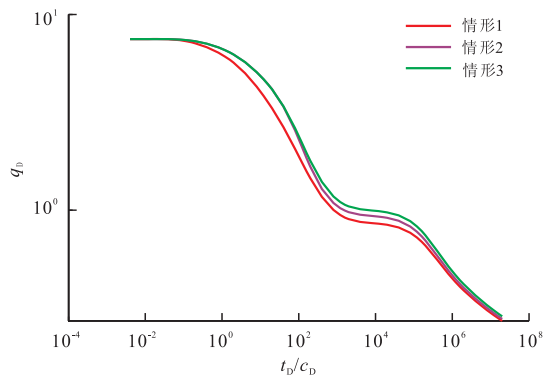


图7 裂缝不等长对产能曲线的影响

Fig. 7 Effect of hydraulic fracture unequal length on productivity curves

4.5 储容比

图8为不同储容比下的无因次产能曲线。可以看出,储容比越大,中期(IV、V)产量越高,但是产量下降快,稳产时间短。这是因为储容比越大,则天然裂缝系统储存的流体越多,基质系统中储存的流体越少,因而基质系统向天然裂缝系统补充的流体就少,所以产量下降快。

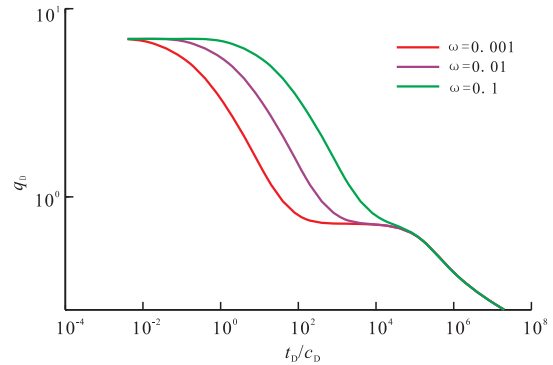


图8 储容比对产能曲线的影响

Fig. 8 Effect of storage ratio on productivity curves

4.6 窜流系数

图9为不同窜流系数下的无因次产能曲线。可以看出,窜流系数越大,窜流出现时间越早,中期(IV、V)产量越高。这是因为窜流系数越大,基质与天然裂缝渗透率差别越小,基质中的流体越容易窜入天然裂缝系统,及时补充天然裂缝系统中的流体,所以窜流出现时间早,产量高。

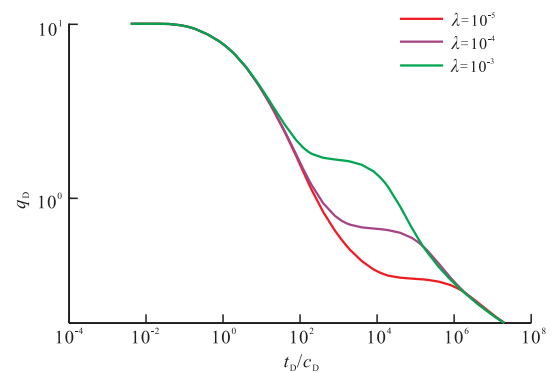


图9 窜流系数对产能曲线的影响

Fig. 9 Effect of cross flow coefficient on productivity curves

5 结论

1) 结合 Warren-Root 双重介质模型,采用点源理论和压降叠加原理,同时考虑启动压力梯度和水

力裂缝导流能力,建立了低渗透油藏水平井分段压裂半解析产能计算模型,求得了产量的Laplace空间解,再通过Stehfest数值反演,得到真实空间产量并绘制了产能曲线。

2) 通过计算与分析表明:启动压力梯度对产能影响较大,水力裂缝的夹角、导流能力及几何形态都会对产能产生一定影响。水平井分段压裂施工时应尽量使水力裂缝与井筒垂直,适当提高水力裂缝的导流能力,同时尽量在水平井两端增加压裂段数和裂缝长度。

3) 地层的储容比与窜流系数主要影响分段压裂水平井中期窜流阶段的产量高低与稳产时间。储容比越大,产量下降越快,稳产时间越短,窜流系数越大,产量越高。因此,天然裂缝的发育对低渗透油藏的高产与稳产十分重要。

4) 低渗透油藏水平井分段压裂的优化设计不仅要考虑裂缝夹角、导流能力等裂缝参数的影响,同时也要关注启动压力梯度、储容比、窜流系数等地层参数的影响。

符号注释

p_i 为原始地层压力, Pa; p_f 为压力, Pa; p_w 为无因次压力, 无量纲; \bar{p}_w 为拉氏空间下的无因次压力, 无量纲; k_f 为渗透率, m^2 ; r 为渗流半径, m; r_D 为无因次渗流半径, 无量纲; r_w 为井筒半径, m; L_{ref} 为参考长度, m; t 为时间, s; t_D 为无因次时间, 无量纲; ω 为储容比, 无量纲; λ 为窜流系数, 无量纲; q_w 为定油井产量, m^3/s ; q_f 为裂缝产量, m^3/s ; q_w 为无因次裂缝产量, 无量纲; \bar{q}_w 为拉氏空间下的裂缝无因次产量, 无量纲; G_D 为无因次启动压力梯度, 无量纲; h 为油藏厚度, m; μ 为流体黏度, Pa·s; k_f 为水力裂缝渗透率, m^2 ; w_f 为水力裂缝宽度, m; C_{fd} 为无因次水力裂缝导流能力, 无量纲; x_{fL} 为裂缝左翼长度, m; x_{fR} 为裂缝右翼长度, m; I_0 为第一类修正贝塞尔数, 无量纲; K_0 为第二类修正贝塞尔数, 无量纲; s 为拉氏变量, 无量纲; p_w 为井底压力, Pa; p_{wf} 为无因次井底压力, 无量纲; C_{wD} 为无因次井筒储集系数, 无量纲; s_e 为表皮系数, 无量纲; q_0 为无因次产量, 无量纲。下角标 l 取 f 或 m, 分别代表天然裂缝和地层基质。

参考文献

[1] 李春芹. 水平井分段压裂在特低渗透油藏开发中的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(6): 85-88.
 [2] 熊友明, 刘理明, 张林, 等. 我国水平井完井技术现状与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(1): 1-6.
 [3] Horne R N, Temeng K O. Relative productivities and pressure transient modeling of horizontal wells with multiple fractures [C]// paper SPE-29891-MS presented at the Middle East Oil Show, 11-14 March 1995, Bahrain.
 [4] 唐汝众, 温庆志, 苏建, 等. 水平井分段压裂产能影响因素研

究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(2): 80-83.

- [5] 何军, 范子菲, 赵伦, 等. 点汇离散法在压裂水平井产能评价中的应用[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 134-141.
 [6] 李伟超, 吴晓东, 安永生, 等. 压裂水平井半解析产能预测方法在低渗透油藏中的应用[J]. 钻采工艺, 2009, 32(3): 41-43.
 [7] Larsen L, Hegre T M. Pressure transient analysis of multifractured horizontal wells[C]// paper SPE-28389-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 25-28 September 1994, New Orleans, Louisiana, America.
 [8] Cvetkovic B, Halvorsen G, Sagen J, et al. Modelling the productivity of a multifractured-horizonal well[C]// paper SPE-71076-MS presented at the SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, 21-23 May 2001, Keystone, Colorado, America.
 [9] 曾凡辉, 郭建春, 徐严波, 等. 压裂水平井产能影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 474-477.
 [10] 杨正明, 杨惟文, 王学武. 分段压裂水平井非稳态渗流产能分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(1): 65-69.
 [11] 郝明强, 胡永乐, 刘先贵. 裂缝性低渗透油藏特征综述[J]. 特种油气藏, 2007, 14(3): 12-15.
 [12] 张永平. 考虑启动压力梯度的特低渗透油藏压裂水平井产能预测模型[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(3): 57-61.
 [13] 郭慧玲, 汤勇, 漆国权, 等. 考虑启动压力梯度的低渗气藏压裂水平井产能计算[J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(4): 29-32.
 [14] Brown M, Ozkan E, Raghavan R, et al. Practical solutions for pressure-transient responses of fractured horizontal wells in unconventional shale reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2009, 14(6): 663-676.
 [15] Stalgorova E, Mattar L. Practical analytical model to simulate production of horizontal wells with branch fractures[C]// paper SPE-162515-MS presented at the SPE Canadian Unconventional Resources Conference, 30 October-1 November 2012, Calgary, Alberta, Canada.
 [16] 张芮菡, 张烈辉, 卢晓敏, 等. 低渗透裂缝性油藏压裂水平井产能动态分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(16): 41-48.
 [17] Yuan B, Su Y, Moghanloo R G, et al. A new analytical multi-linear solution for gas flow toward fractured horizontal wells with different fracture intensity[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2015, 23: 227-238.
 [18] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2010.
 [19] Mukherjee H, Economides M J. A parametric comparison of horizontal and vertical well performance[J]. Spe Formation Evaluation, 1991, 6(2): 209-216.
 [20] 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.
 [21] 同登科, 陈钦雷. 关于Laplace数值反演Stehfest方法的一点注记[J]. 石油学报, 2001, 22(6): 91-92.

(编辑 杨友胜)