

基于离散裂缝模型的复杂裂缝系统水平井动态分析

孙致学¹, 姚 军¹, 樊冬艳¹, 王月英¹, 张矿生²

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西西安 710021)

摘要:针对目前人工压裂裂缝存在倾斜、分支及不对称分布等情况,提出复杂裂缝系统下水平井渗流数值计算方法。首先对裂缝系统进行显式处理,分别建立基岩和复杂裂缝系统的数学模型,利用有限元方法对模型进行求解,并基于离散裂缝模型对裂缝系统进行显式降维处理,以减少数值计算量。与 Odeh 和 Zerzar 模型对比验证数值算法的正确性,并对复杂裂缝系统下的水平井进行计算。结果表明:压裂水平井除常见的 4 种流动形态(不包括外边界),早期还可能存在裂缝内的径向流动;定产量生产时早期裂缝内径向流动不再出现,且外部裂缝产量所占比例增大;水平井定井底流压生产时,裂缝分支增加了储层改造体积,能大幅度提高压裂水平井产量。

关键词:油藏; 动态分析; 复杂裂缝系统; 压裂水平井; 离散裂缝模型; 有限元数值方法

中图分类号:TE 312

文献标志码:A

Dynamic analysis of horizontal wells with complex fractures based on a discrete-fracture model

SUN Zhi-xue¹, YAO Jun¹, FAN Dong-yan¹, WANG Yue-ying¹, ZHANG Kuang-sheng²

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Oil & Gas Technology Research Institute of Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China)

Abstract: In a hydraulically fractured horizontal well, a complex fracture system can be formed, in which inclined and bifurcated fractures can be generated, and their distribution is asymmetric. A numerical method was developed for the dynamic analysis of horizontal wells with complex fractures. Firstly, the mathematic models were established to describe micro-fractures in matrix and the complex fractures hydraulically generated respectively. The models were solved using a finite element method. Then based on a discrete-fracture model (DFM), the dimension of the fracture system was reduced from 3D to 2D, in order to reduce the load in numerical calculation. The accuracy of the new method was verified by comparing the results obtained using the Odeh and Zerzar analytical solution. Finally, a dynamic analysis for the flow in a horizontal well with the complex fractures system was conducted. The results show that radical flows within the fractures, along with the four common flow forms (i. e. line flow in fracture, radical flow in fracture, line flow in formation and radical flow in formation, not including flow from outside the simulated reservoir volume (SRV)), may appear at the early stage of the production. But the early radical flow in fractures will disappear when the well is restricted at a constant production rate, and the contribution to the productivity from the fractures outside the SRV increases. When the bottom hole pressure is kept constant, the productivity of the horizontal well can be greatly enhanced due to the branched fractures that can increase the SRV.

Key words: reservoir; dynamic analysis; complex fractures; fractured horizontal well; discrete fracture model; finite element numerical method

水平井结合水力压裂技术已成为油田增储上产的
的必要措施,特别是对于低渗透以及非常规油气藏

的开采^[1-3]。国内外大量学者对压裂水平井的流动
形态及非稳态产能进行了研究,其中解析解主要以

收稿日期:2013-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(11102237);国家科技重大专项(2011ZX05005-006-007HZ);山东省自然科学基金项目(2013ZRE28068);国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室开放基金项目(MRE201207)

作者简介:孙致学(1979-),男,讲师,博士,主要从事油气田开发工程的 Teaching 和研究。E-mail: szx1979@126.com。

实空间及 Laplace 空间点源解为出发点^[4-9],假定裂缝面流量均匀分布,再用附加压降的方式建立有限导流压裂水平井模型,该方法并非把基岩和裂缝真正耦合求解,仅对均质地层的横向或纵向人工裂缝解析方法较为实用;由于地层构造及压裂工艺的复杂多样,人工裂缝并非规则延伸,而是在周围存在分支、倾斜和不对称等复杂分布的情况^[10-12],此时解析方法往往较难,求解过程繁琐。其次,对于常用的有限差分数值方法^[13-15],需要对人工裂缝进行局部网格加密处理,导致计算量巨大,且结构化网格无法准确刻画人工裂缝的复杂分支结构,因此笔者针对裂缝网络采用有限元非结构化网格进行剖分,且利用离散裂缝模型的思想^[16-20]对人工裂缝进行降维处理,减小数值计算量;考虑人工裂缝内流动,对基岩和裂缝的压力值进行同时耦合求解,验证算法的正确性并分析复杂裂缝系统下压裂水平井的非稳态流动。

1 复杂裂缝系统水平井模型的建立

1.1 物理模型

由于实际地质构造及压裂工艺的多样性,水平井进行多段压裂改造,周围往往出现复杂的裂缝系统。为了更准确地模拟水平井压裂改造后的流动形态及产量变化,模拟三维盒状封闭油藏内一口压裂水平井,其中裂缝存在分支、交错、倾斜等复杂形态;油藏在 x 、 y 和 z 方向的长度分别为 X_e 、 Y_e 和 h ,水平井长度为 L 。

假设:对水平井段进行人工压裂,裂缝条数为 N_f ,在裂缝扩展过程中可能产生复杂的分支小裂缝;岩石和流体均微可压缩,且压缩系数为常数 C_i ;裂缝为有限导流,假定地层和裂缝内流体均服从达西渗流规律;水平井裸眼或射孔完井,若定井底流量生产时可分析水平井的不稳定压力动态,或者定井底流压生产可得到水平井的动态产能;油藏等温渗流,油层较薄不考虑重力的影响。

1.2 数学模型

基于离散裂缝模型的思想,分别建立流体在基岩和裂缝系统的数学模型,由于均服从达西渗流规律,故基岩和裂缝系统的控制方程可统一写为

$$\varphi_l C_i \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{K}_l}{\mu} \nabla p_l \right) = q_l \delta(M - M'). \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{K}_l = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{yz} & k_{zz} \end{bmatrix}_{l=m,f}.$$

式中, $l=m, f$ 分别代表基岩系统和裂缝系统; φ_l 为基岩或裂缝系统的孔隙度,当裂缝系统无填充时 $\varphi_f = 1$, 否则 $0 < \varphi_f < 1$, 因此该模型可以考虑人工裂缝被支撑剂充填的影响; C_i 为综合压缩系数, 10 MPa^{-1} ; p_l 为基岩或裂缝系统的压力值, 10^{-1} MPa ; $\mathbf{K}_l$ 为基岩系统或人工裂缝系统渗透率张量, μm^2 ; q_l 为点源单位体积流量, s^{-1} ; $\delta(M - M')$ 为 Delta 函数, $M = M'$ 时等于 1, 其他情况等于 0。

定义无因次参数为

$$x_D = x/L, \quad y_D = y/L, \quad z_D = z/L, \quad t_D = \frac{k_e t}{\varphi_m \mu C_i L^2},$$

$$h_D = h/L, \quad x_{eD} = x_e/L, \quad y_{eD} = y_e/L, \quad x_{fD} = x_f/L.$$

式中, k_e 为参考渗透率值, 本文取 $k_e = k_{xx,m}$, 即基岩在 x 方向的主渗透率值。

定井底流量生产时, 无因次压力和流量的定义为

$$p_{fD} = \frac{2\pi h k_e (p_i - p_l)}{\mu q_{\text{total}}}; \quad q_{fD} = q_l / q_{\text{total}}.$$

定水平井井底流压生产时, 无因次流量和压力的定义为

$$q_{fD} = \frac{\mu q_l}{2\pi k_e h (p_i - p_w)}; \quad p_{fD} = (p_i - p_l) / (p_i - p_w).$$

化简得到基岩系统的无因次数学模型为

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\mathbf{K}_{mD} \nabla p_{mD}) = \frac{\partial p_{mD}}{\partial t_D} - 2\pi h_D q_{mD} \delta(M_D - M'_D), \\ p_{mD}(x_D, y_D, z_D; t_D = 0) = 0, \\ \left. \frac{\partial p_{mD}}{\partial x_D} \right|_{x_D=x_{eD}} = \left. \frac{\partial p_{mD}}{\partial y_D} \right|_{y_D=y_{eD}} = \left. \frac{\partial p_{mD}}{\partial z_D} \right|_{z_D=z_{eD}} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中, q_{mD} 为地层流入井筒的流量值, 若不考虑地层往水平井筒内的流动, 则 $q_{mD} = 0$; 否则在水平井射孔处或裸眼完井处, 设置不同的流量值。 $\mathbf{K}_{mD} =$

$$\frac{1}{k_e} \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{yz} & k_{zz} \end{bmatrix}_m \text{ 为基岩的无因次渗透率值, 由于}$$

采用有限元数值算法, 故可以考虑地层非均质的情况。

人工裂缝系统的无因次数学模型为

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\mathbf{K}_{fD} \nabla p_{fD}) = \varphi_{fD} \frac{\partial p_{fD}}{\partial t_D} - 2\pi h_D q_{fD} \delta(M_D - M'_D), \\ p_{fD}(x_D, y_D, z_D; t_D = 0) = 0, \\ p_{fD}|_{\partial\Omega_f} = p_{mD}. \end{cases}$$

其中

$$\mathbf{K}_{\text{ID}} = \frac{1}{k_c} \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}_f$$

式中, $\mathbf{K}_{\text{ID}}$ 为人工裂缝内的无因次渗透率值; $\varphi_{\text{ID}} = \varphi_f/\varphi_m$ 为无因次裂缝孔隙度, 即裂缝和基岩孔隙度比值; q_{ID} 为人工裂缝流入水平井筒的流量值。

2 复杂裂缝系统水平井模型的求解

在岩石力学中通常把裂缝描述为光滑平行板模型, 裂缝中流体符合 Navier-Stokes 方程, 当流动为层流时, 可把其流量写成等效的达西定律形式, 即著名的立方定律^[21], 由此得到裂缝的等效渗透率以及沿裂缝开度的渗流速度, 此时沿压裂缝开度方向流动参数及相关的物理量为常数, 因此可对裂缝进行降维处理, 建立离散裂缝模型。在三维问题中, 裂缝简化为二维的面单元, 如图 1 所示。为了保证积分值相等, 须在面积分前乘以裂缝开度, 该方法大大减少了网格剖分数目, 提高了数值计算效率。

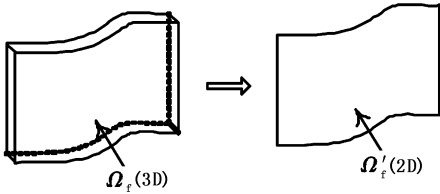


图 1 离散裂缝模型示意图

Fig.1 Schematic of discrete-fracture model

此时, 油藏 Ω 分为基岩 Ω_m 和裂缝 Ω_f 两部分, 用 F 代表油藏的流动方程, 则其积分形式可表示为

$$\iint_{\Omega} F d\Omega = \iint_{\Omega_m} F d\Omega_m + \iint_{\Omega_f} F d\Omega_f \quad (3)$$

对于离散裂缝模型, 其相应的积分形式简化为

$$\iint_{\Omega} F d\Omega = \iint_{\Omega_m} F d\Omega_m + a_f \iint_{\Omega'_f} F d\Omega'_f \quad (4)$$

式中, a_f 为无因次裂缝开度值。

首先, 对基岩系统进行单元特性分析, 采用三维四面体单元进行剖分, 并选取一次单元形函数, 则基岩系统任一点的压力值可近似为

$$p_m \approx \sum_{i=1}^4 N_i p_{i,m} = \mathbf{N}_{e,m} \mathbf{P}_{e,m}$$

其中

$$\mathbf{N}_{e,m} = [N_1, N_2, N_3, N_4], \quad \mathbf{P}_{e,m} = [p_1, p_2, p_3, p_4]^T$$

式中, $\mathbf{N}_{e,m}$ 为单元的形函数; $\mathbf{P}_{e,m}$ 为该单元节点处的压力值。

对方程(2) 中的控制方程单元积分, 并利用高斯分部积分公式可得到四面体单元的特性矩阵为

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega_{e,m}} \nabla \mathbf{N}_{e,m}^T \mathbf{K}_{\text{ID}} \nabla \mathbf{N}_{e,m} d\Omega_{e,m} \mathbf{P}_{e,m} + \\ & \iint_{\Omega_{e,m}} \mathbf{N}_{e,m}^T \mathbf{N}_{e,m} d\Omega_{e,m} \frac{\partial \mathbf{P}_{e,m}}{\partial t} = 2\pi h_D \iint_{\Omega_{e,m}} \mathbf{N}_{e,m}^T q_{\text{ID}} \delta(M_D - M'_D) d\Omega_{e,m} \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\nabla \mathbf{N}_{e,m} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} \end{bmatrix}$$

同理, 对复杂裂缝系统采用二维三角形单元进行剖分, 可得裂缝的单元特性矩阵为

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega_{e,f}} \nabla \mathbf{N}_{e,f}^T \mathbf{K}_{\text{ID}} \nabla \mathbf{N}_{e,f} d\Omega_{e,f} \mathbf{P}_{e,f} + \iint_{\Omega_{e,f}} \mathbf{N}_{e,f}^T \mathbf{N}_{e,f} d\Omega_{e,f} \times \\ & \frac{\partial \mathbf{P}_{e,f}}{\partial t} = 2\pi h_D \iint_{\Omega_{e,f}} \mathbf{N}_{e,f}^T q_{\text{ID}} \delta(M_D - M'_D) d\Omega_{e,f} \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_{e,f} &= [N_1, N_2, N_3], \\ \nabla \mathbf{N}_{e,f} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

把基岩和人工裂缝单元矩阵和列阵进行组合得到油藏的整体矩阵和列阵, 如图 2 所示。油藏结点

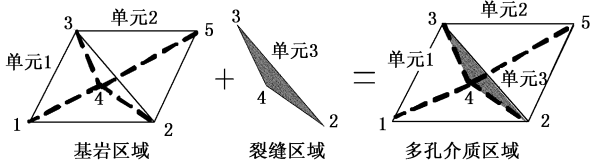


图 2 基岩和裂缝单元组合示意图

Fig.2 Schematic of implementation for matrix and fracture element

总数为 N_p , $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_{N_p}]^T$, 为了方便起见, 油藏的整体方程组记为

$$\mathbf{A} \mathbf{P} + \mathbf{R} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} = \mathbf{Q}$$

系数矩阵包括基岩和裂缝两部分, 即

$$\mathbf{A} = \iint_{\Omega_m} \nabla \mathbf{N}_m^T \mathbf{K} \nabla \mathbf{N}_m d\Omega_m + a_f \iint_{\Omega_f} \nabla \mathbf{N}_f^T \mathbf{K} \nabla \mathbf{N}_f d\Omega_f, \quad (7)$$

$$\mathbf{R} = \iint_{\Omega_m} \mathbf{N}_m^T \mathbf{N}_m d\Omega_m + a_f \varphi_f \varphi_D \iint_{\Omega_f} \mathbf{N}_f^T \mathbf{N}_f d\Omega_f, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Q &= 2\pi h_D \iint_{\Omega_m} N^T q_{mD} \delta(M_D - M'_D) d\Omega_m + \\ &2\pi h_D a_f \iint_{\Omega_f} N^T q_{fD} \delta(M_D - M'_D) d\Omega_f. \end{aligned} \tag{9}$$

在时间上对方程(9) 采用隐式向后差分格式,则得到相应的有限元法支配方程为

$$\left\{ A \frac{1}{t^{n+1} - t^n} R \right\} P^{n+1} = \frac{1}{t^{n+1} - t^n} R P^n + Q^{n+1}. \tag{10}$$

若水平井定产量生产,则方程组(10) 右边项已知,直接求解方程组得到水平井井底的压力值。若定井底流压生产,则在井点处采用 Peaceman 方程^[22] 对产量进行处理,首先得到各点的压力值,再代入方程求解得到井底对应各节点处的流量值。

3 模型的验证及动态分析

3.1 模型的正确性验证

为了验证新模型有限元求解的正确性,对常规的压裂水平井模型进行求解,如图 3 所示。在此分别计算了水平井压裂前和压裂后的流动形态,其中盒状封闭油藏水平井和人工裂缝的无因次参数为:油藏 $X_{eD} = 12, Y_{eD} = 12, h_D = 0.1$,水平井长度 $L_D = 1$,三条裂缝在 x 方向无因次坐标 $(-0.4, 0, 0.4)$,无因次裂缝半长 $x_{fD} = 0.05$,裂缝渗透率 $k_f/k_m = 1000$,无因次裂缝开度 $a_f = 10^{-5}$ 。

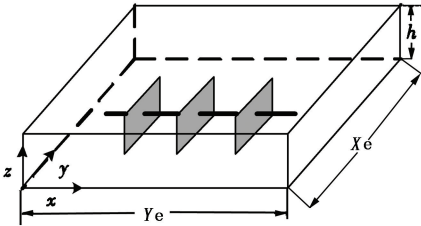


图 3 常规压裂水平井示意图

Fig.3 Schematic of conventional fractured horizontal well

首先,水平井压裂前无需考虑人工裂缝,此时与经典的 Odeh 水平井模型^[23] 解析解进行对比,设置新模型中人工裂缝渗透率为 0,计算结果如图 4 所示,可见新模型的有限元数值解与解析解结果一致,一方面说明了编制的有限元数值算法正确,同时新模型也适用于未压裂水平井的模拟计算。

其次,对水平井进行人工压裂,假设只有裂缝向水平井井筒供液,与 Zerzar^[5] 利用 Laplace 空间点源得到裂缝流量均匀分布时压裂水平井解析解进行对比,其中新模型假定裂缝内流体服从达西渗流规律,此时得到的压裂水平井流动形态对比如图 5 所示,由图 5 可见两模型的流动形态基本一致,都存在裂

缝线性流、裂缝径向流、地层线性流及地层径向流 4 个流动阶段,但由于新模型中裂缝内部为达西渗流,所以存在裂缝内部的径向流动阶段,因此在新模型下压裂水平井的流动过程包括边界影响为 6 个流动阶段:A——裂缝内径向流、B——裂缝线性流、C——裂缝径向流、D——地层线性流、E——地层径向流、F——到达边界的拟稳态。

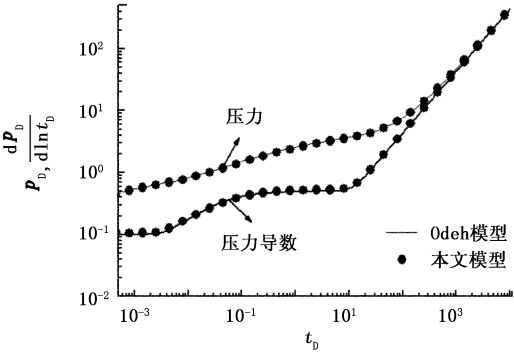


图 4 本文模型与 Odeh 模型对比

Fig.4 Comparison of presented model and Odeh model

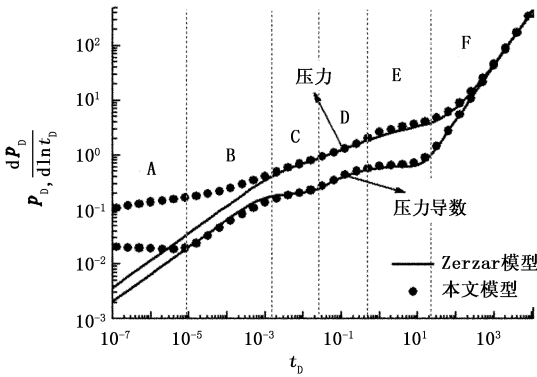


图 5 本文模型与 Zerzar 模型的压裂水平井流动形态对比

Fig.5 Comparison of presented model and Zerzar model for fractured horizontal well flowing performance

3.2 复杂裂缝系统下水平井动态分析

依据实际地质构造及分支裂缝延伸情况,本文中构造了一口水平井周围存在复杂的分支裂缝,该模型更符合实际油藏中水平井压裂后的裂缝展布,其剖面如图 6 所示,各分支裂缝由 2 阶贝塞尔曲线在 z 方向上延伸得到,由于在 z 方向裂缝全部穿透地层,故只给出各节点平面上的无因次坐标值(表 1)。若能通过微地震等现代检测技术得到水平井周围实际的裂缝分布,也可以构造相应的水平井裂缝系统,并对其进行压力及产能动态分析。

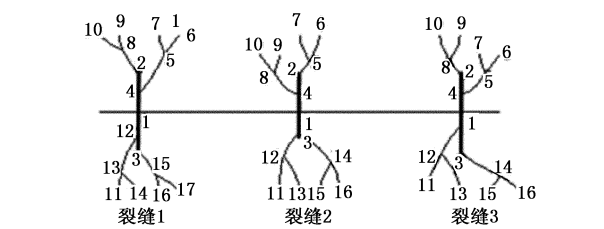


图 6 复杂裂缝系统下水平井剖面图

Fig. 6 Profile map of horizontal well with complex fracture system

表 1 各裂缝分支的无因次平面坐标

节点标号	裂缝 1	裂缝 2	裂缝 3
1	(-0.4, 0)	(0, 0)	(0.4, 0)
2	(-0.4, 0.1)	(0, 0.1)	(0.4, 0.1)
3	(-0.4, -0.1)	(0, -0.05)	(0.4, -0.1)
4	(-0.4, 0.05)	(0, 0.05)	(0.4, 0.05)
5	(-0.35, 0.125)	(0.025, 0.13)	(0.46, 0.1)
6	(-0.3, 0.2)	(0.05, 0.2)	(0.5, 0.15)
7	(-0.35, 0.2)	(0, 0.2)	(0.45, 0.15)
8	(-0.44, 0.16)	(-0.064, 0.1)	(0.37, 0.135)
9	(-0.45, 0.2)	(-0.05, 0.15)	(0.4, 0.2)
10	(-0.5, 0.2)	(-0.1, 0.15)	(0.35, 0.2)
11	(-0.45, -0.2)	(-0.05, -0.2)	(0.32, -0.17)
12	(-0.4, -0.054)	(-0.04, -0.11)	(0.354, -0.1)
13	(-0.446, -0.154)	(0, -0.2)	(0.4, -0.2)
14	(-0.4, 0.2)	(0.078, -0.126)	(0.5, -0.162)
15	(-0.36, -0.16)	(0.05, -0.2)	(0.45, -0.2)
16	(-0.35, -0.2)	(0.1, -0.2)	(0.55, -0.2)
17	(-0.3, -0.2)		

3.2.1 压力动态分析

若假定水平井定产量生产,水平井射孔完井,流体只能通过裂缝流入水平井井筒,且裂缝和地层均服从达西渗流规律。盒状封闭油藏水平井和人工裂缝的无因次参数为:油藏 $X_{\text{eD}}=12, Y_{\text{eD}}=12, h_{\text{D}}=0.1$, 水平井长度 $L_{\text{D}}=1$, 3 条裂缝在 x 方向无因次坐标 $(-0.4, 0, 0.4)$, 无因次裂缝半长 $x_{\text{fD}}=0.05$, 裂缝渗透率 $k_{\text{f}}/k_{\text{m}}=1\,000$, 无因次裂缝开度 $a_{\text{f}}=10^{-5}$ 。基于离散裂缝模型把裂缝简化为面单元,水平井为线单元,利用四面体单元和三角形单元对模型进行剖分,且为了在较小的时间步长下结果更准确,对裂缝周围进行加密处理,得到压裂水平井周围的网格剖分图,如图 7 所示。

为了方便对比,把复杂裂缝系统下水平井和常规压裂水平井的无因次流量及压力动态进行对比得到图 8、9。由图 8 可见,随裂缝分支的增加,外部裂缝所占流量的比例增大,内部裂缝的流量比例相对减小,总体来说相对流量的变化并不是很大;但由图 9 可见复杂裂缝压力值一直小于常规压裂水平井,

由于裂缝分支增加了地层的改造体积,减少了渗流阻力,因此复杂裂缝条件下压裂水平井总产量增大;其次相对于常规压裂水平井的流动形态,复杂裂缝情况下裂缝内的径向流动和裂缝线性流不再出现,而是很快过渡到裂缝周围的径向流动,到达地层线性流后,与常规压裂水平井压力及压力导数曲线逐渐靠近,且同时达到地层径向流动阶段,说明压裂水平井裂缝扩展的复杂性,对压裂水平井晚期的流动影响不大,早期影响比较明显。

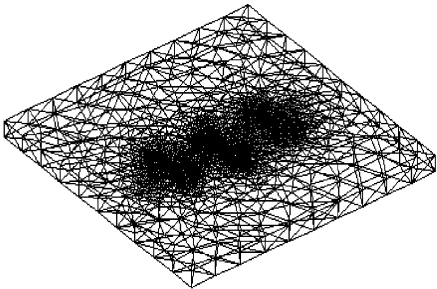


图 7 复杂裂缝系统下水平井网格剖分

Fig. 7 Meshing diagram of horizontal well with complex fracture system

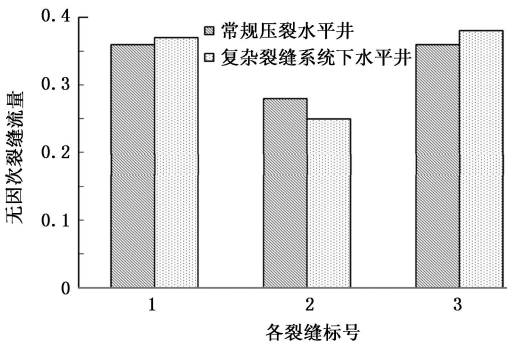


图 8 水平井各裂缝无因次流量对比

Fig. 8 Dimensionless flux distribution of horizontal well fractures

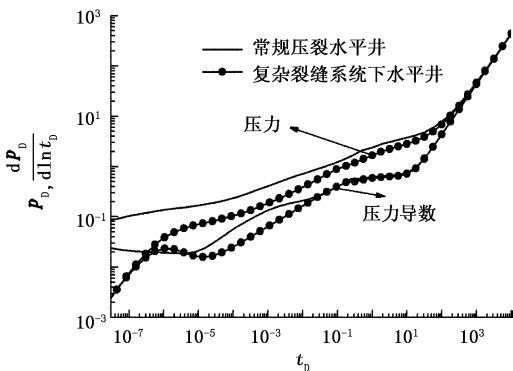


图 9 复杂与常规压裂水平井流动形态对比

Fig. 9 Inflow performance comparison of complex and conventional fractured horizontal well

3.2.2 不稳定产能

为了说明分支裂缝对水平井压裂产量的影响,

假定复杂裂缝系统下水平井定井底流压生产,水平井射孔完井,流体只能通过裂缝流入水平井井筒,且裂缝和地层均服从达西渗流规律,得到复杂和常规压裂水平井的产量(图10);此时油藏及裂缝的基本参数为:油藏尺寸 $600\text{ m}\times 600\text{ m}\times 5\text{ m}$,水平井长 300 m ,利用无因次定义可得到分支裂缝参数,人工裂缝开度 3 mm ,地层初始压力 14.6 MPa ,井底流压 10 MPa ,地层平均渗透率 $0.1\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,人工裂缝内的渗透率为 $10\text{ }\mu\text{m}^2$ 。

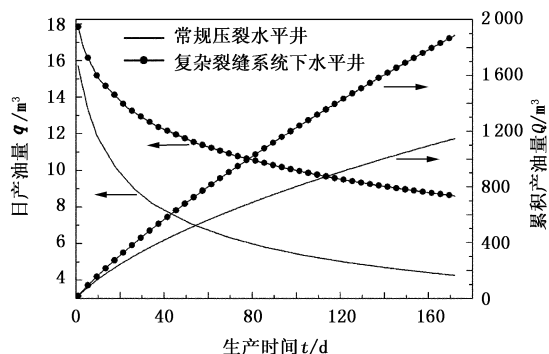


图10 复杂与常规压裂水平井日产量和累积产量对比

Fig.10 Productivity and cumulative yield comparison of complex and conventional fractured horizontal well

由图10可见,压裂水平井日产量随生产时间逐渐减小,同时复杂裂缝系统下产量明显高于常规压裂水平井的产量,主要由于裂缝分支扩大了储层改造体积(SRV),减小了流体流入井筒的渗流阻力,大大增加了压裂水平井的产量值;常规压裂水平井生产三个月后的产量大约有 $4\text{ m}^3/\text{d}$,而复杂裂缝系统下水平井产量为 $8\text{ m}^3/\text{d}$,可见分支裂缝不但增加了油井产量也延缓了水平井产量递减的速度,水平井压裂过程中对裂缝分支的研究非常必要。

4 结 论

(1) 与常规压裂水平井Zerzar模型解析解对比结果说明了数值算法的正确性,同时指出压裂水平井到达边界前,除了裂缝周围线性流、裂缝周围径向流、地层线性流和地层径向流动之外,还可能在最早期出现裂缝内的径向流动。

(2) 定井底流量生产时,裂缝分支对压裂水平井晚期的流动影响不大,早期影响比较明显,外部裂缝产能所占比重相对增加;定井底流压生产时,复杂裂缝大大增加了储层改造体积,减小了渗流阻力,提高了水平井产量,同时延缓了产量递减速度。

参考文献:

[1] 姜瑞忠,蒋廷学,汪永利.水力压裂技术的近期发展及

展望[J].石油钻采工艺,2004,26(4):52-56.

JIANG Rui-zhong, JIANG Ting-xue, WANG Yong-li. Present development and prospecting of hydraulic fracturing technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004,26(4):52-56.

[2] 张卫东,郭敏,杨延辉.页岩气钻采技术综述[J].中外能源,2010,15(6):35-40.

ZHANG Wei-dong, GUO Min, YANG Yan-hui. Shale gas drilling technologies at a glance[J]. Sino-Global Energy, 2010,15(6):35-40.

[3] 唐颖,张金川,张琴,等.页岩气井水力压裂技术及其应用分析[J].天然气工业,2010,30(10):33-38.

TANG Ying, ZHANG Jin-chuan, ZHANG Qin, et al. An analysis of hydraulic fracturing technology in shale gas wells and its application[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(10):33-38.

[4] ZERZAR A, BETTAM Y. Interpretation of multiple hydraulically fractured horizontal wells in closed systems[R]. SPE 84888,2003.

[5] ZERZAR A, TIAB D, BETTAM Y. Interpretation of multiple hydraulically fractured horizontal wells[R]. SPE 88707,2004.

[6] 孙海,姚军,廉培庆,等.考虑基岩向井筒供液的压裂水平井非稳态模型[J].石油学报,2012,33(1):117-122.

SUN Hai, YAO Jun, LIAN Pei-qing, et al. A transient reservoir/wellbore coupling model for fractured horizontal wells with consideration of fluid from base rocks into wellbores[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(1):117-122.

[7] LIN Jia-jing, ZHU Ding. Predicting well performance in complex fracture systems by slab source method[R]. SPE 151960,2012.

[8] RBEAWI S A, TIAB D. Transient pressure analysis of a horizontal well with multiple inclined hydraulic fractures using type-curve matching[R]. SPE 149902,2012.

[9] 樊冬艳,姚军,王子胜,等.基于不同倾角的压裂水平井试井解释[J].水动力学研究与进展,2009,24(6):705-712.

FAN Dong-yan, YAO Jun, WANG Zi-sheng, et al. Well testing on fractured horizontal well with different dip angles[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2009,24(6):705-712.

[10] 张广清,陈勉.水平井水力裂缝非平面扩展研究[J].石油学报,2005,26(3):95-97.

ZHANG Guang-qing, CHEN Mian. Non-planar propagation of hydraulica fracture near horizontal wellbore[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(3):95-97.

[11] 翁定为,雷群,胥云,等.缝网压裂技术及其现场应用

- [J]. 石油学报, 2011, 32(2): 280-284.
- WENG Ding-wei, LEI Qun, XU Yun, et al. Network fracturing techniques and its application in the field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 280-284.
- [12] 陈作, 薛承谨, 蒋廷学, 等. 页岩气井体积压裂技术在我国的应用建议 [J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 30-32.
- CHEN Zuo, XUE Cheng-jin, JIANG Ting-xue, et al. Proposal for the application of fracturing by stimulated reservoir volume (SRV) in shale gas wells in China [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 30-32.
- [13] HEGRE T M. Hydraulically fractured horizontal well simulation[R]. SPE 35506, 1996.
- [14] MAVADDAT M, SOLEIMANI A, RASAEI M R, et al. Well test analysis of multiple hydraulically fractured horizontal wells (MHFW) in gas condensate reservoirs[R]. SPE 144345, 2011.
- [15] RASHEED O B. Rate transient analysis and investigation of unit slopes in multistage hydraulically fractured tight carbonate reservoirs[R]. SPE 147798, 2011.
- [16] MOINFAR A, WAYNE N, HUI M H, et al. Comparison of discrete-fracture and dual-permeability models for multiphase flow in naturally fractured reservoirs[R]. SPE 142295, 2011.
- [17] 姚军, 黄朝琴, 王子胜, 等. 缝洞型油藏的离散缝洞网络流动数学模型[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 815-824.
- YAO Jun, HUANG Zhao-qin, WANG Zi-sheng, et al. Mathematical model of fluid flow in fractured vuggy reservoirs based on discrete fracture-vug network[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 815-824.
- [18] ZENG F, ZHAO G, LIU H. A new model for reservoirs with a discrete-fracture system[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2012, 51(2): 127-136.
- [19] 姚军, 王子胜, 张允, 等. 天然裂缝性油藏的离散裂缝网络数值模拟方法[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 284-288.
- YAO Jun, WANG Zi-sheng, ZHANG Yun, et al. Numerical simulation method of discrete fracture net work for naturally fractured reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 284-288.
- [20] LI L Y, SEONG H L. Efficient field-scale simulation of black oil in a naturally fractured reservoir through discrete fracture networks and homogenized media[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2008, 11(4): 750-758.
- [21] WITHERSPOON P A, WANG J S, IWAI K, et al. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture[J]. Water Resources Research, 1980, 16(6): 1016-1024.
- [22] CHEN Zhangxin, HUAN Guanren, MA Yuanle. Computational methods for multiphase flows in porous media[M]. USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006: 445-475.
- [23] ODEH A, BABU D K. Transient flow behavior of horizontal well: pressure drawdown and buildup analysis[R]. SPE 18802, 1992.

(编辑 李志芬)