生物、工程及交叉力学

基于离散裂缝的多段压裂水平井数值试井模型及应用[1)]

万义钊 *, 2)　刘曰武 †　吴能友 *　胡高伟 *

* (青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071)

† (中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘要　水平井压裂技术已经成为开发低渗透油气藏、页岩气藏和致密气场等非常规油气藏的关键技术. 基于离散裂缝模型, 对裂缝进行简化, 建立了二维多段压裂水平井有限导流裂缝数值试井模型, 利用有限元方法求解模型, 获得多段压裂水平井试井理论曲线和压力场特征. 分析表明: 多段压裂水平井的试井理论曲线一共分为 7 个阶段: 井筒储存段、裂缝线性流段、裂缝–地层双线性流段、裂缝干扰段、地层线性流段、系统径向流段和边界作用段, 其中裂缝–地层双线性流段和裂缝干扰段是其典型特征. 分析了裂缝数量、裂缝间距、裂缝不对称、裂缝不等长和裂缝部分缺失等因素对试井理论曲线的影响, 结果表明: 裂缝数量和裂缝间距对试井理论曲线的影响最大. 较多的裂缝、较大裂缝间距、对称的裂缝和等长的裂缝有利于降低压裂水平井井底的流动阻力, 提高产能. 将建立的数值试井模型应用于四川盆地一口多段压裂水平井的压力恢复测试的数值试井解释, 结果表明: 本文建立的模型可以较好地拟合压力恢复测试数据, 可以获得裂缝的导流能力和裂缝长度, 为压裂效果评价和压裂设计提供指导.

关键词　多段压裂水平井, 离散裂缝模型, 数值试井, 有限元, 渗流

中图分类号：TE353　　**文献标识码**：A　　doi：10.6052/0459-1879-17-319

A NUMERICAL WELL TEST MODEL FOR MULTI-FRACTURED HORIZONTAL WELLS BASED ON DISCRETE-FRACTURE MODEL AND ITS APPLICATION[1)]

Wan Yizhao *, 2)　Liu Yuewu †　Wu Nengyou *　Hu Gaowei *

* (*Qingdao Institute of Marine Geology*, *Qingdao* 266071, *Shandong*, *China*)

† (*Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems*, *Institute of Mechanics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*)

Abstract　Horizontal well fracturing technology has become a key technology in the development of low permeability oil and gas reservoir, shale gas, tight gas, and other unconventional reservoirs. This paper developed a numerical well test model for multi-fractured horizontal wells based on discrete-fracture model which simplifies the fractures as lines. The finite element method was applied to solve the mathematical model and get the type curves and pressure profiles. The log-log type curve of bottom hole pressure can be divided into seven stages: wellbore storage, fractures linear flow, fractures-formation bilinear flow, fractures interacting flow, formation linear flow, radial flow, and boundary domain

2017–09–18 收稿, 2017–11–02 录用, 2017–11–03 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (41474119).

2) 万义钊, 博士后, 主要研究方向: 页岩气、煤层气、天然气水合物等非常规油气渗流及数值模拟. E-mail: yizhao_wan@126.com

引用格式: 万义钊, 刘曰武, 吴能友, 胡高伟. 基于离散裂缝的多段压裂水平井数值试井模型及应用. 力学学报, 2018, 50(1): 147-156

Wan Yizhao, Liu Yuewu, Wu Nengyou, Hu Gaowei. A numerical well test model for multi-fractured horizontal wells based on discrete-fracture model and its application. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(1): 147-156

flow. Among them, the fractures-formation bilinear flow and fractures interacting flow are the two typical features. The effect of fractures' numbers, distance of fractures, asymmetry of fractures, fractures with unequal length, and some fracturing failure on the transient pressure and derivative responses were also studied. The analysis results showed that the number of fractures and the distance between fractures have the greatest influence on the type curves. More fractures, fractures with larger distance, symmetrical fractures with equal length were propitious to reduce the flow resistance of bottom hole and increase production capacity. The multi-fractured well test model proposed in this paper was applied in the interpretation of build-up tests of multi-fractured horizontal wells. The results of a field case in Sichuan Basin shown that the model matched with the tested data very well. The developed numerical well test model can be used to obtain the parameters of reservoirs and fractures, and to provide technical support for the design and evaluation of hydraulic fracturing.

Key words multi-fractured horizontal well, discrete-fracture model, numerical well test, finite element method, seepage flow

引 言

水平井多段压裂是开发低渗透油气藏、页岩气藏和致密气藏等非常规油气藏的有效方法[1-2]. 压裂的设计、压裂后裂缝参数的获取和压裂效果的评价是水平井多段压裂需要解决的问题[3]. 试井测试是评价压裂效果和获取裂缝及储层参数的重要手段.

1993 年, Guo 和 Evans[4-7]建立了一种均匀流量裂缝的多段压裂水平井模型, 该模型假设流体只能通过裂缝流入井筒, 不考虑水平井筒的流动阻力, 因此可以简化为二维问题. 采用格林函数、源函数和叠加原理, 得到了多裂缝压裂水平井的井底压力解. 该模型采用流量平均的假设对于井底压力响应的分析精度不够, 且没有考虑裂缝间的流动干扰, 只能适用于早期流动描述. 1994 年, Larsen 和 Hegre[8]建立了有限导流能力裂缝模型的多裂缝压力水平井模型, 裂缝的处理采用 Cinco-Ley[9]处理有限导流能力裂缝的方法. 该模型得到多裂缝水平井井底压力响应的四个流动阶段: 裂缝径向流、径向–线性流、底层线性流和系统径向流. 1995 年, Horne 和 Temeng[10]采用格林函数和源函数方法建立了考虑井筒储存、表皮效应和裂缝间干扰的均匀流量多裂缝压裂水平井模型. 对于无井储的情况, 该模型得到的井底压力响应可以分为四个阶段: 第一线性流、第一拟径向流、第二线性流和第二拟径向流. 1991 年, Ozkan 和 Raghavan[11]给出了考虑不同井类型、不同边界类型、不同油藏类型的广泛解. 1997 年, Chen 和 Raghavan[12]建立了矩形油藏中多段压裂水平井的试井模型, 采用 Ozkkan 和 Raghavan 基本点源解, 其裂缝处理方法与 Horne 和 Temeng 的方法类似, 但其裂缝为有限导流裂缝. 该模型的流动段划分与 Horne 和 Temeng 相比多了早期的双线性流. 2009 年, Ozkan 和 Brown 等[13-14]提出三线性流模型, 该模型计算简单, 但无法表征压裂水平井的各个流动阶段.

1996 年, 李笑萍[15]最早研究了压裂水平井井底压力响应动态特征, 其模型的裂缝为有限导流裂缝, 采用积分变换方法获得井底压力解, 但其没有考虑井筒储存和表皮效应. 2011 年, 姚军等[16]利用三线性流模型研究了低渗透具有启动压力梯度的压裂水平井井底压力动态响应, 分析启动压力梯度、裂缝导流能力、裂缝间距、裂缝储能等因素的影响. 2013 年, 王本成等[17]建立了综合考虑无限导流能力裂缝、裂缝倾角、裂缝间距不等、裂缝纵向未完全贯穿地层等多重情况建立了多段压裂水平井的解析试井模型. 利用源函数理论、三维特征值和正交变化等分析方法对模型进行了求解. 2014 年, 王晓冬等[18]通过确定导流能力影响函数, 给出了有限导流垂直裂缝井不稳定渗流的解析解, 再利用叠加原理得到了多段压裂水平井的不稳定压力分析模型, 模型计算结果表明, 试井曲线表现的流动特征是早期双线性流–早期线性流–中期径向流–中期线性流–晚期拟径稳态流. 2014 年, 欧阳伟平等[19-20]建立了无限导流能力裂缝的压裂水平井数值试井模型, 模型考虑了水平井筒的流量, 分析了不同裂缝条数下的射孔产率比, 得到了最佳压裂段数的计算公式. 孙致学等[21]基于离散裂缝模型研究了复杂裂缝系统的水平井动态特征, 研究了分支裂缝对井底压力动态特征的影响. 许多其他学者也都针对不同的压裂水平井特征建立了试井模型[22-28], 分析了水平井的流动阶段.

目前的压裂水平井的研究方法多以解析解为主, 而解析解只能处理简单的裂缝情况, 目前多数的多段压裂水平井模型未能考虑裂缝间的干扰对试井理论曲线的影响. 实际水力压裂产生的裂缝非常复杂, 裂缝不对称、裂缝长度不等、某段压裂失败造成裂缝缺失等情况都可能存在. 对于这些复杂裂缝情况, 只能采用数值解的方法建立数值试井模型进行描述. 本文基于离散裂缝模型, 建立了复杂裂缝情况的多段压裂水平井数值试井模型, 得到了多段压裂水平井试井理论曲线和压力场分布, 分析了裂缝不等长、裂缝不对称、裂缝导流能力等因素对试井理论曲线的影响, 给出压裂设计时需考虑的因素. 基于建立的模型, 对现场一口多段压裂水平井压力恢复测试的数据进行了试井解释, 获得了裂缝和储层参数.

1　物理模型

为建立数学模型, 作如下假设:

(1) 考虑二维情况, 储层均质. 水平井筒长度 L_w, 井筒半径 r_w. 裂缝间距相等为 d, 裂缝全长 x_f, 裂缝不等长, 关于井筒不对称, 裂缝的不对称系数为 α, α 定义为井筒两边短裂缝与长裂缝的比值. 裂缝为有限导流裂缝, 其渗透率为 K_f, 宽度为 e, 裂缝条数为 n. 基于离散裂缝模型, 将裂缝简化为线, 其宽度 e 不体现在物理模型当中. 模型示意图如图 1 所示.

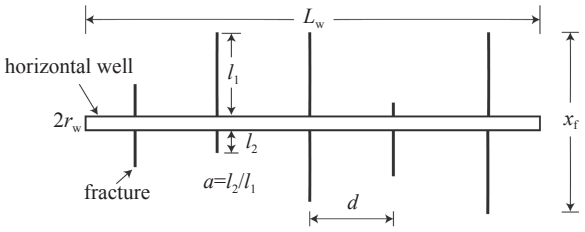


图 1　多段压裂水平井物理模型示意图

Fig. 1　Conceptual model of multi-fractured horizontal well

(2) 储层中流体为弱可压缩、定常黏度的单相牛顿流体, 流体在储层中流动状态为层流, 符合达西定律.

(3) 假设井筒具有无限大导流能力, 即流体在井筒中流动没有阻力, 水平井井筒的压力处处相等.

2　数学模型及其求解

2.1　数学模型

由于裂缝宽度较小, 其数值通常是毫米量级. 因此, 如果基于真实的裂缝宽度建立几何模型进行网格划分, 则网格数量大, 网格质量差, 计算中可能存在震荡和不收敛情况. 为简化裂缝建模, 利用离散裂缝模型, 忽略裂缝中垂直于裂缝方向的流动, 将裂缝中的流动简化为一维, 裂缝采用线来描述[29-30].

系统的控制方程在离散裂缝模型简化前可表示为

$$\int_{\Omega} FEQ\mathrm{d}\Omega = \int_{\Omega_m} FEQ\mathrm{d}\Omega_m + \int_{\Omega_f} FEQ\mathrm{d}\Omega_f \tag{1}$$

其中, FEQ 表示流动控制方程, Ω 表示整个研究区域, Ω_f 为裂缝区域, Ω_m 为基质区域. 离散裂缝模型简化之后的控制方程为

$$\int_{\Omega} FEQ\mathrm{d}\Omega = \int_{\Omega_m} FEQ\mathrm{d}\Omega_m + e\cdot\int_{\Omega'_f} FEQ'\mathrm{d}\Omega'_f \tag{2}$$

式中, Ω_f' 为离散裂缝模型中裂缝区域.

因此, 整个模型的控制方程分为二维的储层区域和一维的裂缝区域.

储层流动控制方程为

$$\frac{K_m}{\mu}\frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} + \frac{K_m}{\mu}\frac{\partial^2 p_m}{\partial y^2} = \phi_m C_t \frac{\partial p_m}{\partial t} \tag{3}$$

其中, K_m 储层渗透率, m^2; μ 为流体黏度, Pa·s; p_m 储层压力, Pa; ϕ_m 为储层孔隙度; C_t 为综合压缩系数, Pa^{-1}; t 为时间, s.

裂缝流动控制方程为

$$\frac{K_f}{\mu}\frac{\partial^2 p_f}{\partial l^2} = \phi_f C_t \frac{\partial p_f}{\partial t} \tag{4}$$

其中, p_f 为裂缝压力, Pa; K_f 为裂缝的渗透率, m^2; l 为裂缝的一维局部坐标, 其与整体坐标的关系如图 2 所示.

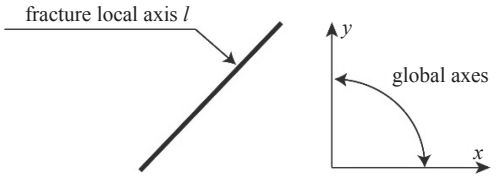


图 2　裂缝局部坐标与全局坐标关系图

Fig. 2　Relationship of the local coordinates of fractures and global coordinates

初始条件

$$p_m = p_i, \quad p_f = p_i \tag{5}$$

内边界条件

$$-\sum_{j=1}^{N} L_j h \frac{K}{\mu}\frac{\partial p_j}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_i} = Bq + C\frac{\mathrm{d}p_w}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

$$p_j = p_{\mathrm{w}} \tag{7}$$

外边界条件

$$\text{定压边界}\quad p|_{\Gamma_o} = p_{\mathrm{i}} \tag{8}$$

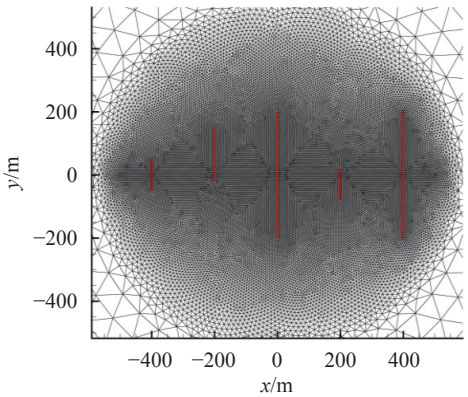
或

$$\text{封闭边界}\quad \left.\frac{\partial p}{\partial n}\right|_{\Gamma_o} = 0 \tag{9}$$

其中, p_{i} 为原始地层压力, Pa; L_j 井筒内边界上离散单元的边长, m; h 为储层有效厚度, m; B 为流体体积系数; q 为井筒的总流量, $\mathrm{m^3/s}$; C 井筒储存系数, $\mathrm{m^3/Pa}$; p_{w} 为井底压力, Pa; N 为内边界离散单元的边数.

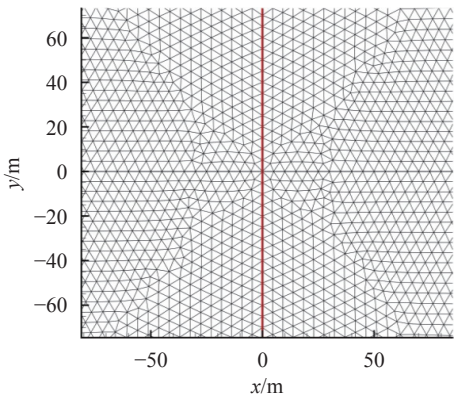
2.2 有限元方法求解

利用有限元方法求解模型, 首先需要对模型进行网格剖分. 图 3 是有限元计算使用的网格图. 储层采用二维三角形单元离散, 裂缝采用一维线单元离散. 由于井筒和裂缝附近压力梯度很大, 为提高计算精度, 在水平井筒和裂缝附近进行局部网格加密.



(a) 井筒和裂缝区域网格

(a) Mesh around the wellbore and fractures



(b) 裂缝局部网格

(b) Mesh around fractures

图 3 储层和裂缝网格图

Fig. 3 Mesh of the physical model

在图 3 所示的二维三角形单元和一维线单元上推导有限元方程. 采用 Garlerkin 加权余量法, 可得储层流动控制方程的 Garlerkin 方程为

$$\iint_A \left(\frac{K_{\mathrm{m}}}{\mu}\frac{\partial^2 p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}}{\partial x^2} + \frac{K_{\mathrm{m}}}{\mu}\frac{\partial^2 p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}}{\partial y^2} + \phi_{\mathrm{m}} C_{\mathrm{t}} \frac{\partial p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}}{\partial t} \right) \delta p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}} \mathrm{d}A = 0 \tag{10}$$

其弱形式为

$$\iint_A \left(\frac{K_{\mathrm{m}}}{\mu}\frac{\partial p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}}{\partial x}\frac{\partial \delta p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}}{\partial x} + \frac{K_{\mathrm{m}}}{\mu}\frac{\partial p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}}{\partial y}\frac{\partial \delta p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}}{\partial y} + \phi_{\mathrm{m}} C_{\mathrm{t}} \frac{\partial p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}}{\partial t} \delta p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}} \right) \mathrm{d}A = \int_s \delta p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}} \frac{K_{\mathrm{m}}}{\mu}\frac{\partial p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}}{\partial n} \mathrm{d}s \tag{11}$$

其中 $p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}$ 为储层网格单元压力, 表达式为

$$p_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}} = N_{\mathrm{m}i} p_{\mathrm{m}i}^{\mathrm{e}} + N_{\mathrm{m}j} p_{\mathrm{m}j}^{\mathrm{e}} + N_{\mathrm{m}k} p_{\mathrm{m}k}^{\mathrm{e}} \tag{12}$$

式中, $p_{\mathrm{m}i}^{\mathrm{e}}$, $p_{\mathrm{m}j}^{\mathrm{e}}$, $p_{\mathrm{m}k}^{\mathrm{e}}$ 为单元结点上的压力值.

N_{m} 为单元线性插值函数, 表达式为

$$N_{\mathrm{m}j} = a_j + b_j x + c_j y \tag{13}$$

将式 (12) 和式 (13) 代入式 (11), 可得储层有限元单元刚度方程为

$$\begin{aligned} &A\left(\frac{K_{\mathrm{m}}}{\mu}b_i^2 + \frac{K_{\mathrm{m}}}{\mu}c_i^2 + \frac{\phi_{\mathrm{m}}C_{\mathrm{t}}}{6\Delta t}\right) p_{\mathrm{m}i}^{\mathrm{e},n+1} + \\ &A\left(\frac{K_{\mathrm{m}}}{\mu}b_i b_j + \frac{K_{\mathrm{m}}}{\mu}c_i c_j + \frac{\phi_{\mathrm{m}}C_{\mathrm{t}}}{12\Delta t}\right) p_{\mathrm{m}j}^{\mathrm{e},n+1} + \\ &A\left(\frac{K_{\mathrm{m}}}{\mu}b_i b_k + \frac{K_{\mathrm{m}}}{\mu}c_i c_k + \frac{\phi_{\mathrm{m}}C_{\mathrm{t}}}{12\Delta t}\right) p_{\mathrm{m}k}^{\mathrm{e},n+1} - \\ &\frac{L}{3}\frac{\partial p_{\mathrm{m}i}^{\mathrm{e},n+1}}{\partial n} - \frac{L}{6}\frac{\partial p_{\mathrm{m}(j,k)}^{\mathrm{e},n+1}}{\partial n} = \\ &\frac{\phi_{\mathrm{m}}C_{\mathrm{t}}}{6\Delta t} p_{\mathrm{m}i}^{\mathrm{e},n} + \frac{\phi_{\mathrm{m}}C_{\mathrm{t}}}{12\Delta t} p_{\mathrm{m}j}^{\mathrm{e},n} + \frac{\phi_{\mathrm{m}}C_{\mathrm{t}}}{12\Delta t} p_{\mathrm{m}k}^{\mathrm{e},n} \end{aligned} \tag{14}$$

裂缝单元弱形式的流动控制方程为

$$\begin{aligned} &\int_l \left(\frac{K_{\mathrm{f}}}{\mu}\frac{\partial p_{\mathrm{f}}^{\mathrm{e}}}{\partial l}\frac{\partial \delta p_{\mathrm{f}}^{\mathrm{e}}}{\partial l} + \phi_{\mathrm{f}} C_{\mathrm{t}} \frac{\partial p_{\mathrm{f}}^{\mathrm{e}}}{\partial t} \delta p_{\mathrm{f}}^{\mathrm{e}} \right) \delta p_{\mathrm{f}}^{\mathrm{e}} \mathrm{d}l = \\ &\delta p_{\mathrm{f}}^{\mathrm{e}} \frac{K_{\mathrm{f}}}{\mu}\frac{\partial p_{\mathrm{f}}^{\mathrm{e}}}{\partial l}\Big|_1^2 \end{aligned} \tag{15}$$

其中 $p_{\mathrm{f}}^{\mathrm{e}}$ 裂缝单元压力, 表达式为

$$p_{\mathrm{f}}^{\mathrm{e}} = N_{\mathrm{f}i} p_{\mathrm{f}i}^{\mathrm{e}} + N_{\mathrm{f}j} p_{\mathrm{f}j}^{\mathrm{e}} \tag{16}$$

其中, $p_{\mathrm{f}i}^{\mathrm{e}}$ 和 $p_{\mathrm{f}j}^{\mathrm{e}}$ 为裂缝单元上结点的压力值.

N_{f} 为裂缝单元的插值函数, 表达式为

$$N_{\mathrm{f}i} = \frac{l_j - l}{L_{\mathrm{f}}},\ N_{\mathrm{f}j} = \frac{l - l_i}{L_{\mathrm{f}}} \tag{17}$$

将式 (16) 和式 (17) 代入式 (15) 可得裂缝有限

元单元刚度方程为

$$\left(\frac{K_\mathrm{f}}{\mu}\frac{1}{L_\mathrm{f}}+\frac{\phi_\mathrm{f}C_\mathrm{t}}{3\Delta t}\right)p_{\mathrm{f}i}^{\mathrm{e},n+1}+\left(-\frac{K_\mathrm{f}}{\mu}\frac{1}{L_\mathrm{f}}+\frac{\phi_\mathrm{f}C_\mathrm{t}}{3\Delta t}\right)p_{\mathrm{f}j}^{\mathrm{e},n+1}=\frac{\phi_\mathrm{f}C_\mathrm{t}}{3\Delta t}p_{\mathrm{f}i}^{\mathrm{e},n}+\frac{\phi_\mathrm{f}C_\mathrm{t}}{6\Delta t}p_{\mathrm{f}j}^{\mathrm{e},n} \tag{18}$$

从上式可知, 裂缝流动控制方程经有限元方法离散后, 空间变量 (即裂缝局部坐标) 变为裂缝单元的长度, 而裂缝单元的长度是已知的. 因此, 不需要将裂缝的局部坐标向全局坐标进行转换.

由内边界流量之和等于产量可得

$$\sum_{j=1}^{N}L_jh\frac{K}{\mu}\frac{\partial p_j^{n+1}}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_i}+\frac{p_\mathrm{w}^{n+1}}{\Delta t}=-Bq+C\frac{p_\mathrm{w}^{n}}{\Delta t} \tag{19}$$

内边界各点压力相等, 可得

$$p_j=p_\mathrm{w} \tag{20}$$

联立式 (14)、式 (18)、式 (19)、式 (20), 根据结点编号规则, 将裂缝线单元刚度方程和储层面单元刚度方程组装成总体刚度方程, 其组装方式如图 4 所示[31-32]. 利用 SuperLU[33-34]求解有限元总体刚度方程可得各时刻网格结点的压力值.

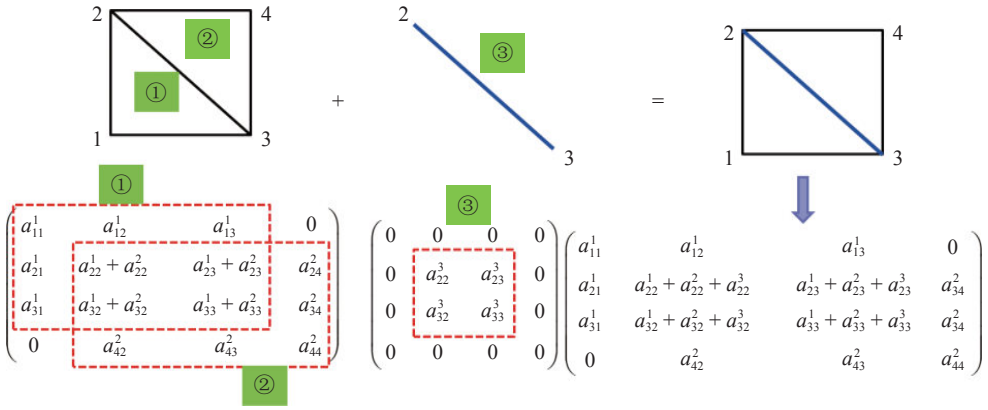


图 4　三角形单元和线单元的叠加处理过程图 (1, 2, 3, 4 为结点编号; ①, ②为储层三角形单元, ③为裂缝线单元)

Fig. 4　The superposition process of triangle elements and line elements(1, 2, 3, 4 are the node number, ① and ② are triangle elements, ③ is a line element)

3　计算结果及分析

3.1　井底压力响应曲线及储层压力扩散特征

利用有限元方法对建立的模型进行求解, 为分析其井底压力响应特征, 先考虑裂缝等长、关于井筒对称且等间距的情况. 图 5 为该情况下的底压力响应曲线, 从曲线特征上可以看出, 井底流动可以分为 7 个阶段:

(1) 井筒储存阶段. 该阶段主要反映井筒流体压缩特征, 压力和压力导数呈现斜率为 1 的直线.

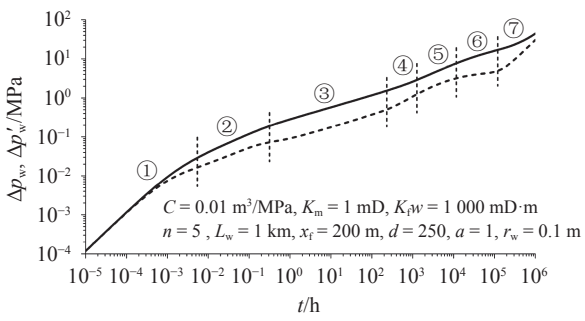


图 5　多段压裂水平井试井理论曲线

Fig. 5　Well test type curves of the multi-fractured horizontal wells

(2) 裂缝线性流阶段. 本文模型假设裂缝为有限导流能力裂缝, 因此, 在井筒储存系数较小情况下, 在流动到达裂缝端部以前, 流体沿着裂缝向井筒流动, 形成裂缝的线性流动阶段. 如图 6(a) 所示. 压力和压力导数曲线表现为斜率为 1/2 的平行线.

(3) 裂缝–地层双线性流动阶段. 流体沿裂缝向井筒流动, 同时地层中流体向裂缝流动, 形成裂缝–地层的双线性流, 其压力分布如图 6(b) 所示. 该阶段的压力和压力导数平行, 斜率为 1/4.

(4) 裂缝干扰阶段. 随着压力扩展, 相邻裂缝之间的压力产生相互干扰, 压力导数开始上翘, 压力和压力导数之间的距离减小. 从图 6(c) 所示的压力场图可以看出, 裂缝之间的压力等直线开始关联, 表明流动受裂缝之间相互干扰.

(5) 地层线性流阶段. 压力继续向外扩展, 流体形成垂直于水平井筒且平行于裂缝面的线性流动, 压力场如图 6(d) 所示. 该阶段的压力和压力导数表现为斜率等于 1/2 的平行线.

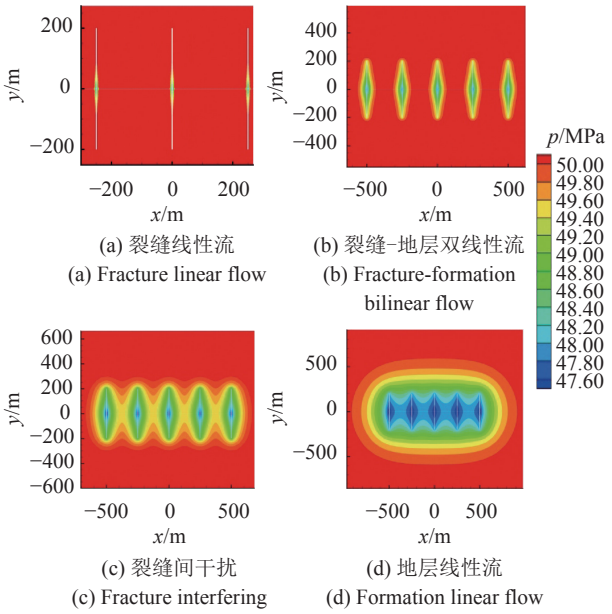


图 6 多段压裂水平井的压力场扩展特征

Fig. 6 Pressure field of the multi-fractured horizontal well

(6) 系统径向流阶段. 压力扩展到远处时, 整个压裂水平井可以看作一个点, 流体的流程整体上呈现出径向流动. 此时压力导数为水平直线.

(7) 边界反映段. 当压力扩展到达封闭边界时, 逐渐过渡到拟稳态流动, 压力和压力导数开始上翘, 最终两者均为斜率为 1 的直线.

需要说明的是, 以上各个流动阶段并不是全部都可以在试井理论曲线上表现出来, 在某些参数组合下, 许多特征都会被其他特征掩盖. 例如, 井筒储存系数较大时, 井筒储存效应会掩盖裂缝的线性流; 裂缝间距离较小的情况下, 裂缝间流动干扰可能会掩盖地层–裂缝双线性流. 但整体上多段压裂水平井表现出的主要特征是线性流特征.

3.2 裂缝数量对试井理论曲线的影响

图 7 是裂缝条数分别为 1 条、3 条和 5 条情况下的试井理论曲线. 从图 7 可以看出, 裂缝条数越多, 裂缝间距越小, 裂缝间出现干扰的时间越早, 干扰幅度越大, 曲线上表现为压力导数越早偏移双线性流, 偏离幅度越大; 裂缝条数多的井底压力值远大于裂缝条数少的井底压力值, 说明相同产量下, 裂缝越多, 井底压降越小, 即井筒的流动阻力越小.

3.3 裂缝间距对试井理论曲线的影响

图 8 是不同裂缝间距下的试井理论曲线. 裂缝间距分别为 50 m, 100 m 和 250 m. 从图 8 可以看出, 裂缝间距主要影响试井理论曲线的第三阶段, 即裂

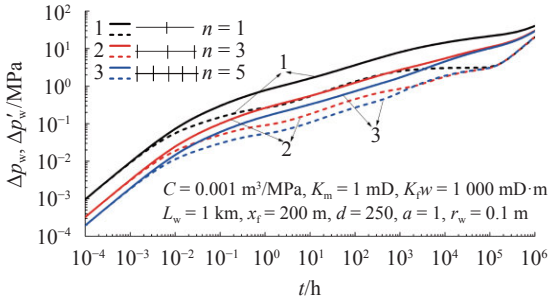


图 7 不同裂缝数量的多段压裂水平井试井理论曲线

Fig. 7 Well test type curves at different numbers of fractures

缝干扰段. 裂缝间距越小, 干扰出现越早, 干扰程度越大, 曲线上表现为压力导数越早偏离 1/2 斜率线, 且偏离幅度越大. 裂缝间距小的井底压力值比裂缝间距大的井底压力值大, 说明裂缝间距越大, 改造的储层范围越大, 井底流动阻力越小. 因此, 当确定了压裂段数后, 应尽量使各压裂段之间的距离最大.

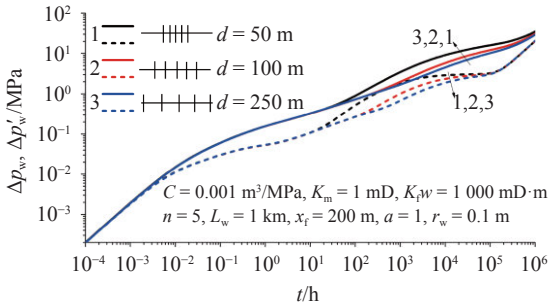


图 8 不同裂缝间距的多段压裂水平井试井理论曲线

Fig. 8 Well test type curves at different spacing of fractures

3.4 裂缝间距对试井理论曲线的影响

图 9 是裂缝不对称情况下的试井理论曲线. 各组曲线的裂缝全长 x_f 相同, 裂缝的不对称系数依次为 1/19、1/3 和 1. 从图 9 可知, 裂缝不对称主要影响裂缝线性流段和裂缝–地层双线性流段, 裂缝的不对称程度越大, 裂缝线性流段持续时间越长, 且由于裂缝不对称的影响, 裂缝–地层双线性流段的早期压力导数斜率偏小. 裂缝对称情况下压力值比裂缝不对称的压力值小, 说明裂缝对称时井底流动阻力小, 因此, 在压裂施工过程中应尽量保证裂缝对称, 以减小井底的流动阻力, 提高产能.

3.5 裂缝不等长对试井理论曲线的影响

图 10 是裂缝不等长情况下的试井理论曲线. 三组曲线均为 5 条裂缝, 裂缝总长度均为 1 km. 三组曲线的裂缝长度分别为: 380 m 按线性递减到 20 m、

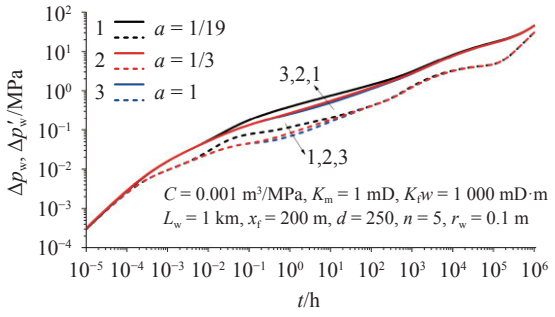


图 9　不对称裂缝的多段压裂水平井试井理论曲线

Fig. 9　Well test types curves of asymmetrical fractures

300 m 按线性递减到 100 m 和等长 200 m. 从图 10 可知, 裂缝长度不等时同样影响裂缝的线性流段和裂缝–地层双线性流段. 在裂缝总长一样的情况下, 裂缝等长时井底的流动阻力小于裂缝不等长, 因此压裂时建议尽量保证裂缝等长, 但裂缝不等长对试井理论曲线的影响比裂缝的不对称要小得多.

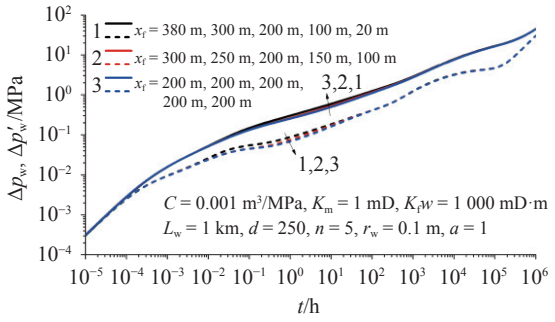


图 10　不等长裂缝的多段压裂水平井试井理论曲线

Fig. 10　Well test types curves at different length of fractures

3.6　部分裂缝缺失对试井理论曲线的影响

压裂施工过程中, 可能某些压裂段压裂不成功, 不能在水平井筒的某些位置形成有效裂缝. 图 11 是进行五段压裂水平井中两段压裂失效情况下的试井理论曲线, 其中曲线 1 裂缝失效位置为从左至右的第 1 段和第 2 段, 曲线 2 裂缝失效位置为第 1 段和第 3 段, 曲线 3 裂缝失效位置为第 2 段和第 3 段. 由图 11 可知, 在裂缝参数和缺失裂缝数量一样的情况下, 裂缝缺失对试井理论曲线的影响主要反映在裂缝干扰段和裂缝地层线性流段. 某段裂缝缺失后, 裂缝间距发生变化, 造成裂缝间的干扰程度不一样, 其对试井的影响与裂缝间距类似. 多段压裂水平井进行试井解释时, 可以结合压裂施工的过程, 进一步验证裂缝的失效情况.

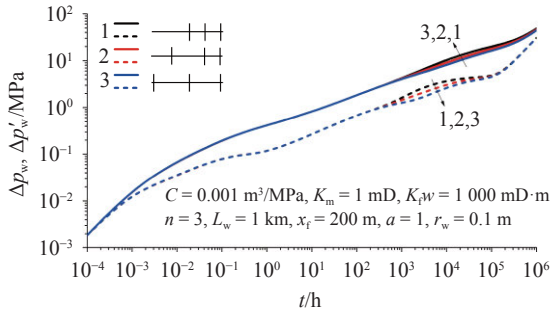


图 11　部分裂缝缺失情况的多段压裂水平井试井理论曲线

Fig. 11　Well test types curves of some fractures lost

4　实例分析

利用建立的数值试井模型对四川盆地多口压裂水平井进行了试井解释, 以其中一口井 A 为例说明试井解释的过程和结果. A 井的基础参数如表 1 所示.

表 1　A 井基础参数

Table 1　The basic parameters of well-A

Parameters	Value
h/m	38.00
p_i/MPa	32.31
φ/%	4.85
r_w/mm	69.85
L_w/m	1530.00

该井进行了压力恢复测试, 关井前以 9.1×10^4 m³/d 的产量生产 201 d, 关井约 363.97 h. 压力恢复测试的压力历史如图 12 所示. A 井本次测试关井时测点

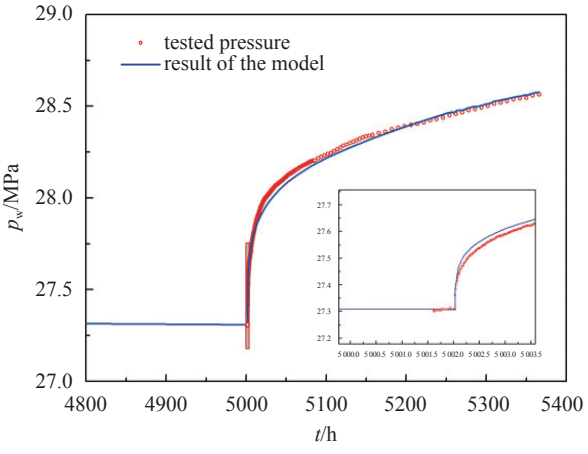


图 12　A 井压力恢复历史拟合图

Fig. 12　The pressure history matching of well-A

流压为 27.35 MPa, 关井约 363.97 h, 压力恢复至 28.61 MPa, 恢复幅度为 1.26 MPa; 实测关井压力恢复曲线直观反映: 整个关井压力恢复过程恢复缓慢, 后期压力仍然呈上升趋势, 表明储层整体的渗流能力较差.

做出压力恢复的双对数压力和压力导数曲线, 如图 13 所示. 从图 13 可以看出, A 井的压力恢复双对数曲线特征主要是线性流段, 与本文建立的模型相符.

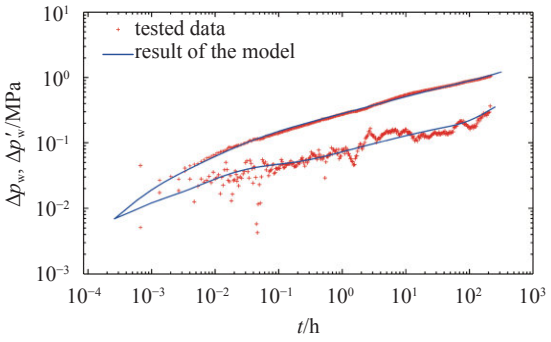


图 13 A 井压力恢复测试双对数曲线拟合图

Fig. 13 The log-log type curves matching of well A

该井分 17 段进行了水力加砂压裂, 整个压裂过程消耗的总液量 26 905.18 m^3、总砂量 934.50 m^3, 各段加砂量见表 2. 数值试井解释过程中, 需要先建立储层的几何模型, 即需要已知裂缝的位置及裂缝长度信息, 同时为了提高拟合效率和拟合精度, 也需要给定裂缝几何参数的初始值. 裂缝长度的初始值利用下面的公式由加砂量估算

$$V_p = \frac{\pi}{5} x_f w_f h_w \tag{21}$$

其中, V_p 为总砂量; x_f 为裂缝长度; w_f 为近井地带裂缝宽度, 取值 8 mm; h_w 为裂缝垂向高度, 取储层的厚度. 该计算方法即认为加入的砂填满整个裂缝, 裂缝形态为一定厚度的椭圆. 利用该式初步计算裂缝的半长, 如表 2 所示. 从表中计算结果可以看出, 用该方法估算的裂缝长度基本在 100 m 左右, 其中第 10 段裂缝长度偏小的原因是未加入线性胶, 导致加砂量不足.

以表 2 中估算得到的裂缝长度参数为基础, 建立几何模型进行网格划分, 并在井筒周围及裂缝上对网格进行加密. 划分网格如图 14 所示, 网格单元

表 2 A 压裂施工数据及试井解释的裂缝参数

Table 2 The fracturing data and parameters of fractures of well-A from the well test interpreation

Index	Bridge plug seating position/m	Sand injection/m^3	Fracture length computed from Eq.(19)/m	Fracture length from well test interpration/m	Fracture conductivity from well test interpretation/(mD·m)
1		51.10	118.90	83.00	65.90
2	4035.70	59.50	138.45	108.00	91.50
3	3940.00	60.70	141.24	92.60	91.50
4	3852.00	50.50	117.50	102.30	90.15
5	3756.00	61.60	143.33	94.70	90.50
6	3669.00	61.10	142.17	107.70	89.10
7	3583.30	51.50	119.83	112.50	131.40
8	3492.00	59.80	139.14	96.60	125.10
9	3402.00	51.30	119.37	85.20	92.70
10	3313.00	14.60	33.97	39.30	311.40
11	3224.00	61.70	143.57	124.50	107.70
12	3134.00	66.00	153.57	125.30	139.50
13	3044.00	54.50	126.81	85.10	95.10
14	2954.00	57.10	132.86	124.20	90.50
15	2864.00	56.30	131.00	91.40	109.50
16	2774.00	56.40	131.23	115.80	91.50
17	2685.00	60.80	141.47	109.80	91.50

数为 25 238, 网格结点数为 13 139.

以图 14 所示的网格为基础, 利用数值计算获得井底压力的双对数曲线, 通过调整渗透率、井筒储存系数、裂缝长度和裂缝导流能力等参数拟合实测双对数曲线. 需要指出的是, 调整裂缝长度参数后, 需要重新进行几何建模和网格划分. 最终的双对数曲线拟合图如图 13 所示, 压力历史拟合图如图 12 所示. 解释得到的裂缝参数信息见表 2, 储层相关参数见表 3. 从解释结果上看, 该井压裂形成的裂缝长度均在 100 m 左右, 导流能力也均在 100 mD·m 左右, 表明该井压裂效果较好.

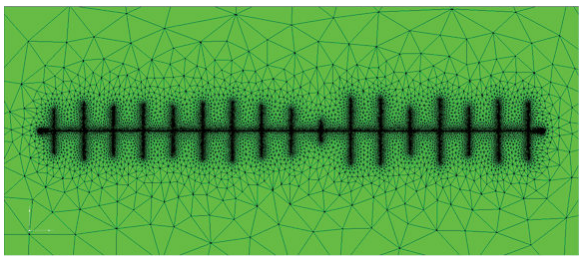


图 14　A 井数值试井解释模型网格图

Fig. 14　The mesh of the numerical well test model of well-A

表 3　A 井试井解释所得的储层参数

Table 3　The parameters of reservoirs of well-A from well test interpreation

Parameters	Value
K_m/mD	0.58
C/(m^3/MPa)	0.881
p_i/MPa	32

5　结 论

(1) 建立了一种多段压裂水平井的数值试井模型, 采用离散裂缝模型对裂缝进行简化, 利用有限元方法求解试井模型, 得到了多段压裂水平井的试井理论曲线和压力分布场. 通过对试井理论曲线和压力场的分析, 将多段压裂水平井的流体流动分为了七个阶段: 井筒储存段、裂缝线性流段、裂缝–地层双线性流段、裂缝干扰段、地层线性流段、系统径向流段和边界反映段.

(2) 裂缝条数对试井理论曲线有较大影响. 裂缝条数越多, 对储层改造程度越大, 试井理论曲线中压力值更小, 即井底的流动阻力越小.

(3) 裂缝间距主要影响试井理论曲线的裂缝干扰段, 裂缝间距越小, 干扰段出现的时间越早, 干扰幅度越大, 且裂缝间距越小, 井底流动阻力越大. 因此, 为减小流动阻力, 提高产能, 在确定压裂段数的情况下应尽可能增大裂缝间距离.

(4) 裂缝关于井筒不对称主要影响早期裂缝的线性流和裂缝–地层双线性流段. 相同裂缝长度的条件下, 裂缝不对称时的井底流动阻力比裂缝对称时井底流动阻力大. 因此, 压裂施工时尽可能保证裂缝关于井筒的对称性.

(5) 裂缝不等长对试井理论曲线的影响与裂缝关于井筒不对称的影响类似, 裂缝间长度差别越大, 井底流动阻力也越大. 因此, 在裂缝总长度一样的情况下, 尽量保持裂缝长度一致. 但与裂缝关于井筒不对称相比, 裂缝不等长的影响要小得多.

(6) 部分裂缝缺失对试井理论曲线的影响与裂缝间距类似, 可以结合试井解释和压裂施工对裂缝失效情况进行判断.

参　考　文　献

1　柳占立, 庄茁, 孟庆国等. 页岩气高效开采的力学问题与挑战. 力学学报, 2017, 49(3): 507-516 (Liu Zhanli, Zhuang Zhuo, Meng Qingguo, et al. Problems and challenges of mechanics in shale gas efficient exploitation. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(3): 507-516 (in Chinese))

2　孙可明, 张树翠. 含层理页岩气藏水力压裂裂纹扩展规律解析分析. 力学学报, 2016, 48(5): 1229-1237 (Sun Keming, Zhang Shucui. Hydraulic fracture propagation in shale gas bedding reservoir analytical analysis. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(5): 1229-1237 (in Chinese))

3　郭建春, 苟波, 任山等. 川西页岩–砂岩交互水平井压裂参数优化设计. 石油学报, 2014, 35(3): 511-518 (Guo Jianchun, Gou Bo, Ren Shan, et al. Fracturing parmameters optimization degign for horizontal well with shale and sandstone interbeds in western Sichuan. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(3): 511-518 (in Chinese))

4　Guo GL, Evans RD. Pressure transient behavior and inflow performance of horizontal wells intersecting discrete fractures. SPE 26446, 1993

5　Guo GL, Evans RD. Inflow performance and production forecasting of horizontal wells with multiple hydraulic fractures in low-permeability gas reservoirs. SPE 26169, 1993

6　Guo GL, Envans RD. Inflow performance a horizontal well intersecting natural fractures. SPE 25501, 1993

7　Guo GL, Evans RD. Pressure-transient behavior for a horizontal well intersecting multiple random dicrete fractures. SPE 28390, 1994

8　Larsen L, Hegre TM. Pressure tansient analysis of multifractured horizontal wells. SPE 28389, 1994

9　Cinco-Ley H, SananiegoVF, Dominguez AN. Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture. *SPE Journal*, 1978, 18(4): 253-264

10　Horne RN, Temeng KO. Relative productivities and pressure transient modeling of horizontal wells with multiple fractures. SPE 29891, 1995.

11 Ozkan E, Raghavan R. New solutions for well-test-analysis problems. Part2. Computational considerations and applications. *SPE Formation Evaluation*, 1991, 6(3): 369-378

12 Chen CC, Raghavan R. Multiply-fractured horizontal well in rectangular drainage region. *SPE Journal*, 1997, 2(4): 455-465

13 Ozkan E, Raghavan R, Kazemi H. Comparison of fractured Horizontal-well performance in conventional and unconventional reservoirs. SPE 121290, 2009

14 Brown M, Ozkan E, Raghavan R, et al. Practical solutions for pressure transient responses of fractured horizontal wells in unconventional reservoirs. SPE 125043, 2009

15 李笑萍. 穿过多条垂直裂缝的水平井渗流问题及压降曲线. 石油学报, 1996, 17(2): 91-97 (Li Xiaoping. Fluid flow through pay zones in realtion to draw-down profilese in a horizontal well intersecting several vertical fractures. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, 17(2): 91-97 (in Chinese))

16 姚军, 殷修杏, 樊冬艳等. 低渗透油藏的压裂水平井三线性流试井模型. 油气井测试, 2011, 20(5): 1-5 (Yao Jun, Yin Xiuxing, Fan Dongyan, et al. Trilinear flow well test model for fractured horizontal well in low permeability reservoir. *Well Testing*, 2011, 20(5): 1-5 (in Chinese))

17 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. 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. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1150-1156 (in Chinese))

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. 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. *Protroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 74-78 (in Chinese))

19 欧阳伟平. 煤层非定常渗流及热场渗流规律研究. [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2014 (Ouyang Weiping. A study of unsteady and non-isothermal flow in porous coalbed media. [PhD Thesis]. Beijing: Inistitute of Mechanics, Chinese Academy of Science, 2014 (in Chinese))

20 Ouyang WP, Liu YW, Zhao PH, et al. Well test type curve analyzing for horizontal well with multi-fractures//2012 International Conference & Exhibition on Reservoir Surveillance and Management, Beijing, 2012

21 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. 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. *Journal of China University of Petroleum*(*Edition of Natural Science*), 2014, 38(2): 109-115 (in Chinese))

22 李树松, 杨志兴, 刘成林. 带有多条2D裂缝的压裂水平井试井分析. 断块油气田, 2007, 14(5): 88-90 (Li Shusong, Yang Zhixing, Liu Chenglin. Well test analysis of fractured horizontal well with multiple 2D fractures. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2007, 14(5): 88-90 (in Chinese))

23 刘晓旭, 杨学锋, 陈远林等. 页岩气分段压裂水平井渗流机理及试井分析. 天然气工业, 2013, 33(12): 77-81 (Liu Xiaoxu, Yang Xuefeng, Chen Yuanlin, et al. Seepage behavior and well testing in horizontal shale gas wells under multi-stage fracturing. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(12): 77-81 (in Chinese))

24 王贵生, 聂仁仕. 多段压裂水平井试井曲线特征分析. 石油化工应用, 2014, 33(08): 8-11 (Wang Guisheng, Nie Renshi. Well test type curve analyzing for horizontal well with multi-fractures. *Petrochemical Industry Application*, 2014, 33(08): 8-11 (in Chinese))

25 何易东, 任岚, 赵金洲等. 页岩气藏体积压裂水平井产能有限元数值模拟. 断块油气藏, 2017, 24(4): 550-556 (He Yidong, Ren Lan, Zhao Jinzhou, et al. Finite element numerical simulation of shale gas production of hydraulically fractured horizontal well with stimulated reservoir volume. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2017, 24(4):550-556(in Chinese))

26 姚同玉, 王明, 朱维耀等. 低渗油层压裂水平井两相流研究. 力学与实践, 2011, 33(1): 66-69 (Yao Tongyu, Wang Ming, Zhu Weiyao, et al. Analysis of two-phase percolation of fractured horizontal wells in low permeability oil reservoirs. *Mechanics in Engineering*, 2011, 33(1): 66-69 (in Chinese))

27 欧阳伟平, 张冕, 孙虎. 井筒气液两相流对致密气压裂水平井试井的影响. 力学学报, 2016, 48(2): 464-472 (Ouyang Weiping, Zhang Mian, Sun Hu. Effect of wellbore gas-liquid two-phase flow on well test of fractured horizontal wells in tight gas reservoir. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(2): 464-472 (in Chinese))

28 朱光普, 姚军, 樊冬艳等. 页岩气藏压裂水平井试井分析. 力学学报, 2015, 47(6): 945-954 (Zhu Guangpu, Yao Jun, Fan Dongyan, et al. Pressure transient analysis of fractured horizontal well in shale gas reservoir. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 945-954 (in Chinese))

29 Wan YZ, Liu YW, Ouyang WP, et al. Numerical investigation of dual-porosity model with transient transfer function based on discrete-fracture model. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(5): 611-626

30 Wan YZ, Liu YW, Liu WC, et al. A numerical approach for pressure transient analysis of a vertical well with complex fractures. *Acta Mechanica Sinica*, 2016, 32(4): 640-648

31 万义钊. 缝洞型碳酸盐岩油藏渗流规律及应用研究. [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2016 (Wan Yizhao. Research on fluid flow mechanics in fractured-cavernous carbonate reservoirs and its application [PhD Thesis]. Beijing: Inistitute of Mechanics, Chinese Academy of Science, 2016(in Chinese))

32 万义钊, 刘曰武. 缝洞型油藏三维离散缝洞数值试井模型. 力学学报, 2015, 47(6): 1000-1008 (Wan Yizhao, Liu Yuewu. Three dimensional discrete-fracture-cavity numerical well test model for fractured-cavity reservoir. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 1000-1008 (in Chinese))

33 Demmel JW, Eisenstat SC, Gilbert JR, et al. A supernodal approach to sparse partial pivoting. *Siam Journal on Matrix Analysis & Applications*, 1999, 20(3): 720-755

34 Li XS. An overview of superLU: Algorithms, implementation, and user interface. *Acm Transactions on Mathematical Software*, 2005, 31(3): 302-325