

A Study on Production Analysis of Multi-Fractured Horizontal Wells in Tight Gas Reservoirs

Ermeng Zhao¹, Long Wang², Chuncheng Yang³

¹College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang

²Bohai Oil Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin

³No.3 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Limited Company, Daqing Heilongjiang

Email: 18745953495@163.com

Received: Apr. 25th, 2016; accepted: May 9th, 2016; published: May 13th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A new production analysis model of multi-fractured horizontal wells in tight gas reservoir is established, the solution is obtained by Galerkin finite element method. The dimensional production and its derivative curves are plotted by computer programming, and a sensitivity analysis is conducted to study impacts on production curves. The results show that there are six different flow regimes observed in production curves. The hydraulic fracture conductivity mainly affects the early-to-mid flow regimes, and the bigger the value is, the higher the production is. With the increase of hydraulic fracture half-length, the fracture radial flow becomes shorter, but the production is bigger in fracture radial flow and elliptical flow regimes. The number of hydraulic fractures has great effect on the whole flow regimes, and the production will be bigger for more hydraulic fractures. With the increase of hydraulic fracture spacing, the time of interference between the hydraulic fractures will be latter, then the occurrence of hydraulic fractures radial flow regime will postpone, and the production will be bigger in the corresponding flow regimes. The new model and obtained results can play a guiding role in analyzing production for multi-fractured horizontal well in tight gas reservoirs.

Keywords

Tight Gas Reservoirs, Multi-Fractured Horizontal Well, Production Model, Production Analysis, Galerkin Finite Element Method

致密气藏分段压裂水平井产能研究

赵二猛¹, 王 龙², 杨春城³

¹东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆

²中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津

³大庆油田有限责任公司第三采油厂, 黑龙江 大庆

Email: 18745953495@163.com

收稿日期: 2016年4月25日; 录用日期: 2016年5月9日; 发布日期: 2016年5月13日

摘 要

建立了致密气藏分段压裂水平井产能模型, 使用伽辽金有限元方法对模型进行求解, 最后通过编程计算绘制了产能及产能导数曲线, 并对曲线的形态特征及影响曲线形态的因素进行了分析。研究表明: 产能曲线主要分为6个流动阶段; 水力裂缝导流能力主要影响压裂水平井早中期产能大小, 导流能力越大, 产能越大; 裂缝半长越大, 裂缝径向流持续的时间越短, 但裂缝径向流及椭圆流阶段的产能越大; 裂缝条数对整个生产阶段的产能都有重要影响, 压裂裂缝条数越大, 压裂水平井产能也越大; 裂缝间距越大, 压裂裂缝之间发生干扰的时间就越晚, 裂缝径向流结束的就越晚, 而且产能越大。研究结果可为致密气藏分段压裂水平井产能分析提供科学依据。

关键词

致密气藏, 分段压裂水平井, 产能模型, 产能分析, 伽辽金有限元

1. 引言

我国致密气资源丰富, 开发前景广阔[1]-[3], 但是致密气藏渗透率低, 分段压裂水平井已成为开发此类气藏的有效手段[4]。国内外学者围绕分段压裂水平井渗流模型做了很多研究工作, Gringarten (1973)首次使用 Green 函数和 Newman 乘积方法求解了分段压裂水平井渗流模型[5]; Ozkan (1988)在此基础上建立 Laplace 空间的渗流模型[6]; Zerzar (2003)将 Laplace 变换和点源函数结合求解了分段压裂水平井的渗流问题[7]; 姚军(2013)利用 Green 函数及叠加原理建立并求解了裂缝性油藏渗流模型[8]。近年来, 自 Ozkan 和 Brown (2009, 2011)建立了压裂水平井三线性流模型[9] [10]后, Stalgorova (2012)在此基础上对此模型进行改进分别建立了三区复合模型[11]和五区复合模型[12], 苏玉亮(2014)建立了复合流动模型[13], 使模型更加接近实际情况, 赵超[14]建立了产能预测复合模型, 将压裂改造区假设为三重孔隙介质, 但上述线性流动模型基于线性流动假设, 不能反映分段压裂水平井所有的流动阶段。本文基于离散裂缝模型建立了致密气藏分段压裂水平井产能模型, 并使用伽辽金有限元方法对模型进行求解, 最后编制计算机程序绘制了产能及产能导数曲线并对影响产能曲线的参数进行分析。

2. 数学模型

2.1. 数学模型的建立

盒状致密气藏中心一口水平井长度为 L , 经过压裂之后形成 n_f 条人工裂缝, 裂缝半长为 x_f , 间距为

d_f , 在推导数学模型之前做出如下假设: (1) 气藏外边界封闭; (2) 人工垂直裂缝完全贯穿储层; (3) 气体流动为单相等温渗流。

气体渗流控制方程为

$$K\Delta\psi - \frac{2p}{Z}q\delta(M - M') = \phi\mu C_t \frac{\partial\psi}{\partial t} \quad (1)$$

式中: 拟压力函数 $\psi(p) = 2\int_{p_0}^p \frac{p}{\mu Z} dp$, K 为渗透率, m^2 ; p 为压力, Pa; ϕ 为孔隙度; μ 为粘度, Pa.s; Z 为气体偏差因子, 无量纲; C_t 为综合压缩系数, Pa^{-1} ; q 为单位气体单位体积流量, s^{-1} ; Δ 为 Laplace 算符; δ 为 Dirac-delta 函数, 如果 $M = M'$, $\delta(M - M')$ 为 1, 否则为 0。

将整个区域分为水力裂缝区域与气藏区域, 由此可得水力裂缝区域渗流方程为

$$K_F\Delta\psi_F - \frac{2p}{Z}q\delta(M - M') = \phi_F\mu C_{tF} \frac{\partial\psi_F}{\partial t} \quad (2)$$

初始条件为

$$\psi_F|_{t=0} = \psi_i \quad (3)$$

式中: ψ_i 为原始条件下拟压力。

水力裂缝与气藏区域压力相等条件为

$$\psi_F|_{\partial\Omega_R \cap \partial\Omega_F} = \psi_R|_{\partial\Omega_R \cap \partial\Omega_F} \quad (4)$$

式(2)~(4)组成了水力裂缝区域的数学模型。

同理可得气藏区域渗流数学模型为

$$\begin{cases} K_R\Delta\psi_R = \phi_R\mu C_{tR} \frac{\partial\psi_R}{\partial t} \\ \psi_R|_{t=0} = \psi_i \\ \psi_R|_{\partial\Omega_R \cap \partial\Omega_F} = \psi_F|_{\partial\Omega_R \cap \partial\Omega_F} \\ \frac{\partial\psi_R}{\partial x}\Big|_{x=x_e} = \frac{\partial\psi_R}{\partial y}\Big|_{y=y_e} = \frac{\partial\psi_R}{\partial z}\Big|_{z=z_e} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

定义如下无量纲变量

$$\psi_{jD} = \frac{\pi K_f h T_{sc}}{q_{sc} p_{sc} T} (\psi_i - \psi_j) \quad (j = F, R), \quad t_D = \frac{K_R t}{\phi_R \mu C_{tR} L^2},$$

$$x_D = \frac{x}{L}, \quad y_D = \frac{y}{L}, \quad z_D = \frac{z}{L}, \quad q_D = \frac{q Z_{sc} T_{sc} p_{wf}}{q_{sc} Z T p_{sc}} h L^2$$

将上述无量纲变量代入水力裂缝区域数学模型可得无量纲渗流模型为

$$\begin{cases} \frac{K_F}{K_R} \Delta\psi_{FD} + 2\pi q_D \delta(M_D - M'_D) = \frac{\phi_F C_{tF}}{\phi_R C_{tR}} \frac{\partial\psi_{FD}}{\partial t_D} \\ \psi_{FD}|_{t_D=0} = 0 \\ \psi_{FD}|_{\partial\Omega_R \cap \partial\Omega_F} = \psi_{RD}|_{\partial\Omega_R \cap \partial\Omega_F} \end{cases} \quad (6)$$

同理可得气藏区域无量纲渗流模型为

$$\begin{cases} \Delta \psi_{RD} = \frac{\partial \psi_{RD}}{\partial t_D} \\ \psi_{RD} \Big|_{t_D=0} = 0 \\ \psi_{RD} \Big|_{\partial\Omega_R \cap \partial\Omega_F} = \psi_{FD} \Big|_{\partial\Omega_R \cap \partial\Omega_F} \\ \frac{\partial \psi_{RD}}{\partial x_D} \Big|_{x_D=x_{eD}} = \frac{\partial \psi_{RD}}{\partial y_D} \Big|_{y_D=y_{eD}} = \frac{\partial \psi_{RD}}{\partial z_D} \Big|_{z_D=z_{eD}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

2.2. 数学模型的求解

本文采用伽辽金加权余量有限元方法对数学模型进行求解, 对于人工裂缝, 使用离散裂缝模型进行降维处理, 将三维的裂缝单元简化为二维裂缝面单元, 为了保持积分值相等, 须在面积分前乘以人工裂缝宽度 w [15].

水力裂缝区域采用二维三角形单元进行剖分, 并选取一次单元形函数, 则裂缝区域任一点的拟压力值可近似为:

$$\psi_{FD}^e = N_{F1}\psi_{FD1}^e + N_{F2}\psi_{FD2}^e + N_{F3}\psi_{FD3}^e \quad (8)$$

式中: ψ_{FD1}^e 、 ψ_{FD2}^e 与 ψ_{FD3}^e 三角形单元三个节点的拟压力, N_{F1} 、 N_{F2} 、 N_{F3} 为三角形单元形函数

式(6)中的渗流方程使用 Green 第一公式进行积分并结合式(8)可得

$$\begin{aligned} w \frac{K_F}{K_f} \iint_{\bar{\Omega}_{F,e}} \nabla N_{e,F}^T \nabla N_{e,F} d\bar{\Omega}_{F,e} \psi_{FD}^e + w \frac{\phi_f C_{if}}{\phi_m C_{im} + \phi_f C_{if}} \iint_{\bar{\Omega}_{F,e}} N_{e,F}^T N_{e,F} d\bar{\Omega}_{F,e} \frac{\partial \psi_{FD}^e}{\partial t_D} \\ - 2\pi w \iint_{\bar{\Omega}_{F,e}} N_{e,F}^T q_{FD} \delta(M_D - M_D') d\bar{\Omega}_{F,e} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

储层区域采用四面体单元进行剖分, 并选取一次单元形函数, 则储层区域任一点的拟压力值可近似为:

$$\psi_{RD}^e = N_{R1}\psi_{RD1}^e + N_{R2}\psi_{RD2}^e + N_{R3}\psi_{RD3}^e + N_{R4}\psi_{RD4}^e \quad (10)$$

同理式(9)中的渗流方程使用 Green 第一公式进行积分并结合式(10)可得

$$\iiint_{\Omega_{R,e}} \nabla N_{e,R}^T \nabla N_{e,R} d\Omega_{R,e} \psi_{RD}^e + \iiint_{\Omega_{R,e}} N_{e,R}^T N_{e,R} d\Omega_{R,e} \frac{\partial \psi_{e,RD}}{\partial t_D} = 0 \quad (11)$$

式(9)与式(11)进行简化可得水力裂缝区域与储层区域的单元有限元方程, 最后将人工裂缝区域和储层区域中的单元有限元方程按照区域剖分时单元节点号与总体节点号之间的关系进行叠加, 从而形成总体有限元方程:

$$\mathbf{A}^R \psi_{RD} + \mathbf{B}^R \frac{\partial \psi_{RD}}{\partial t_D} = \mathbf{Q}^f \quad (12)$$

此处:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^R &= \sum_{e=1}^{N_R} \iiint_{\Omega_{R,e}} \nabla N_{e,R}^T \nabla N_{e,R} d\Omega_{R,e} + w \frac{K_F}{K_R} \sum_{e=1}^{N_F} \iint_{\bar{\Omega}_{F,e}} \nabla N_{e,F}^T \nabla N_{e,F} d\bar{\Omega}_{F,e} \\ \mathbf{B}^R &= \sum_{e=1}^{N_R} \iiint_{\Omega_{R,e}} N_{e,R}^T N_{e,R} d\Omega_{R,e} + \frac{w\phi_f C_{if}}{\phi_R C_{iR}} \sum_{e=1}^{N_F} \iint_{\bar{\Omega}_{F,e}} N_{e,F}^T N_{e,F} d\bar{\Omega}_{F,e} \end{aligned}$$

$$Q^R = 2\pi w \sum_{e=1}^{N_F} \iint_{\bar{\Omega}_{F,e}} N_{e,F}^T q_{FD} \delta(M_D - M'_D) d\bar{\Omega}_{F,e}$$

对于时间导数项, 采用向前差分格式, 最终得到数学模型的解为

$$\left(A^R + \frac{B^R}{\Delta t_n} \right) \psi_{RD}^{n+1} = Q^R + \frac{B^R}{\Delta t_n} \psi_{RD}^n \quad (13)$$

此处: Δt_n 为时间步长。

3. 致密气藏分段压裂水平井产能动态分析

在进行产能分析计算时, 选取的基本参数如下: 储层渗透率 $K = 1.5 \times 10^{-3} \text{ um}^2$, 孔隙度 $\phi = 0.10$, 气体黏度 $\mu = 0.057 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 气藏厚度 $h = 15 \text{ m}$, 原始地层压力 $p_i = 37.89 \text{ MPa}$, 井底流压 $p_{wf} = 33.75 \text{ MPa}$, 水平井筒长度 $L = 1400 \text{ m}$, 裂缝条数 $n_f = 5$, 裂缝间距 $d_f = 300 \text{ m}$, 裂缝半长 $x_f = 50 \text{ m}$, 水力裂缝渗透率 $K_F = 30 \text{ um}^2$, 水力裂缝宽度 $w = 5 \text{ mm}$ 。

3.1. 产能曲线流动阶段划分

图 1 为根据以上参数计算的无量纲产能及产能导数曲线, 根据曲线形态划分为 6 个主要流动阶段。(1) 裂缝线性流阶段: 早期生产气体以线性流动方式沿水力裂缝流向水平井井底; (2) 双线性流阶段: 产能及产能导数曲线相互平行, 由垂直于水力裂缝的线性流和沿着水力裂缝的线性流组合而成; (3) 裂缝径向流阶段: 随着压力波逐渐向外扩散, 水力裂缝周围气体以径向流动方式流向水力裂缝; (4) 椭圆流阶段: 产能导数曲线逐渐接近水平线, 水力裂缝控制区域以外的气体以椭圆流动形式向压裂区域渗流; (5) 拟径向流阶段: 随着生产时间增加, 气体由椭圆流动变为径向流动; (6) 边界反映阶段: 产能及导数曲线迅速下掉, 压力波已传播到封闭边界。

3.2. 产能曲线影响因素分析

由图 2 可知: 裂缝导流能力对压裂水平井早中期产能大小影响非常明显, 导流能力越大, 裂缝线性流阶段、双线性流阶段、裂缝径向流阶段以及椭圆流阶段的产能越大, 而且导流能力越小, 其影响作用就越大。这是由于水力裂缝导流能力为水力裂缝渗透率与裂缝宽度之积, 其数值大小反映了人工裂缝允许流体通过的能力, 导流能力越大, 流体渗流阻力就越小。

图 3 反应了水力裂缝半长对致密气藏分段压裂水平井产能大小的影响, 从图中可以看出, 裂缝半长主要影响裂缝径向流及椭圆流阶段的产能大小及持续时间, 裂缝半长越大, 裂缝径向流持续的时间越短, 裂缝径向流及椭圆流阶段的产能也就越大, 这是因为半长越大, 裂缝控制的生产区域就越大, 压力传播的范围就越大。

由图 4 可知, 压裂水力裂缝条数对整个生产阶段的产能都有重要影响, 压裂裂缝条数越大, 压裂水平井产能也越大, 这是由于增加裂缝条数可以减少流体渗流阻力, 在同样的压差下获得更高的产能。从图中还可以看出, 随着裂缝条数的增加, 压裂水平井产能增加的幅度逐渐减少, 因此对于一个特定的气藏, 存在最优的裂缝条数, 必须要进行裂缝条数优化。

图 5 反映了压裂裂缝间距对压裂水平井产能的影响。从图中可以看出, 裂缝间距主要对裂缝径向流末期、椭圆流及拟径向流阶段产生影响, 裂缝间距越大, 裂缝径向流结束的就越晚, 而且产能越大。这是由于裂缝间距越大, 压裂裂缝之间发生干扰的时间就越晚, 而缝间干扰发生以后会在中间区域产生一个低压区, 使得其中的气体流动阻力大大增加。当压力波及到裂缝区域之外时, 这种作用就会减弱。

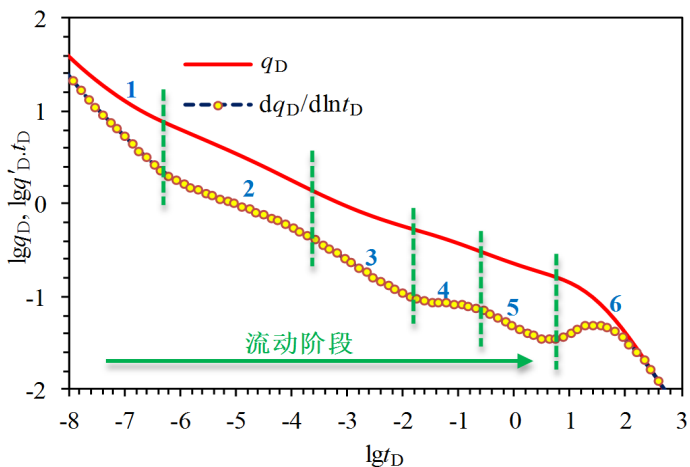


Figure 1. The division of different flow stages on production curves
图 1. 产能曲线不同流动阶段的划分

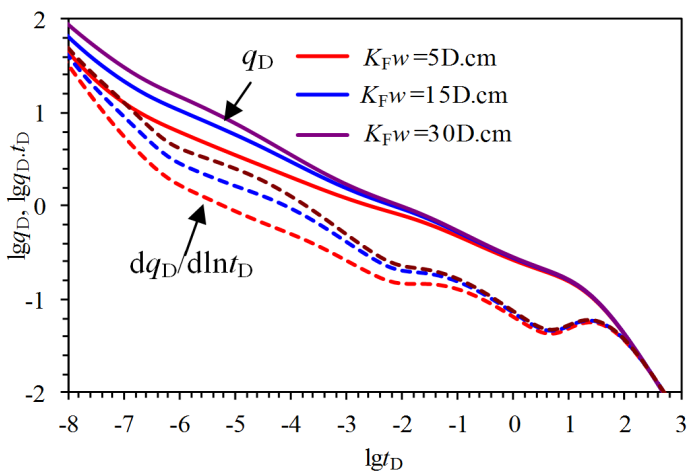


Figure 2. Effect of fracture conductivity on production and its derivative curves
图 2. 水力裂缝导流能力对产能及产能导数曲线的影响

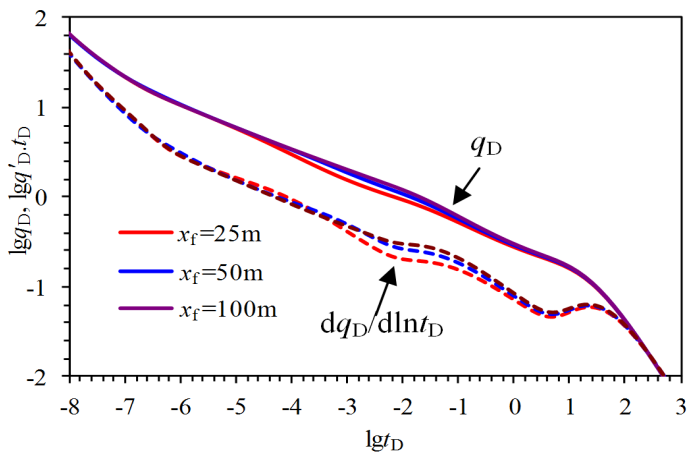


Figure 3. Effect of hydraulic fracture half-length on production and its derivative curves
图 3. 水力裂缝半长对产能及产能导数曲线的影响

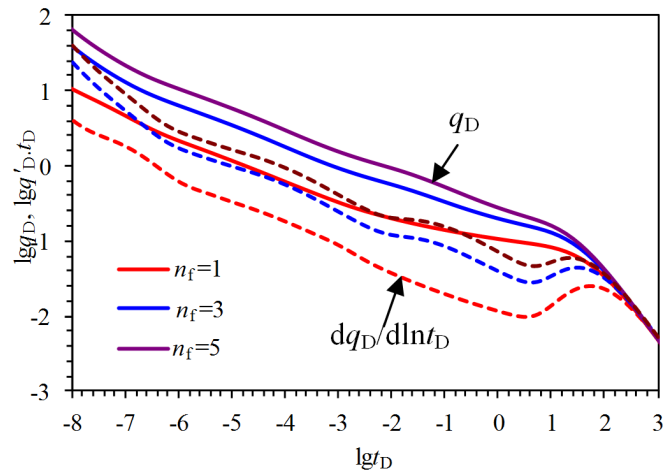


Figure 4. Effect of hydraulic fracture number on production and its derivative curves

图 4. 水力裂缝条数对产能及产能导数曲线的影响

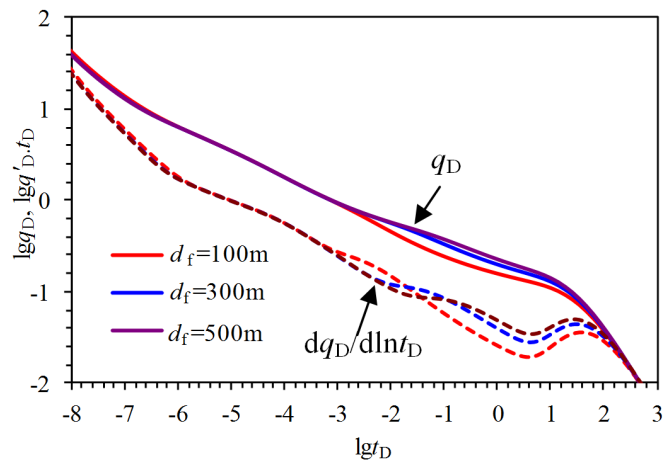


Figure 5. Effect of hydraulic fracture spacing on production and its derivative curves

图 5. 水力裂缝间距对产能及产能导数曲线的影响

4. 结论

1) 建立了致密气藏分段压裂水平井产能模型，水力裂缝基于离散裂缝模型进行表征，并使用伽辽金有限元方法进行求解，极大地丰富了致密气藏分段压裂水平井产能分析模型。

2) 根据求解结果通过编制程序绘制了产能及产能导数曲线，根据曲线特点将产能递减曲线分为早期裂缝线性流、双线性流、裂缝径向流、椭圆流、拟径向流和边界反映 6 个主要流动阶段。

3) 分析了水力裂缝导流能力、裂缝半长、裂缝条数及裂缝间距对产能递减曲线的影响，研究结果可为致密气藏分段压裂水平井产能分析提供理论依据。

4) 模型目前还不能考虑体积压裂形成的改造体积(Stimulated Reservoir Volume)，考虑改造体积之后，模型的应用范围将更广泛，这也是下一步工作的目标。

基金项目

中国石油和化学工业联合会科技项目(2014-01-02)。

参考文献 (References)

- [1] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
- [2] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
- [3] 李建忠, 郭彬程, 郑民, 等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 607-615.
- [4] 吴奇, 胥云, 张守良, 等. 非常规油气藏体积改造技术核心理论与优化设计关键[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 706-714.
- [5] Gringarten, A.C. and Ramey, H.J. (1973) The Use of Source and Green's Function in Solving Unsteady-Flow Problem in Reservoir. *SPE Journal*, **13**, 285-296.
- [6] Ozkan, E. (1988) Performance of Horizontal Wells. Ph.D. Dissertation, The University of Tulsa, Tulsa.
- [7] Zerzar, A., Bettam, Y. and Tiab, D. (2003) Interpretation of Multiple Hydraulically Fractured Horizontal Wells in Closed Systems. *Canadian International Petroleum Conference*, Calgary, 8-10 June 2003, SPE 84888.
- [8] 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.
- [9] Ozkan, E., Brown, M., Raghavan, R., *et al.* (2009) Comparison of Fractured Horizontal Well Performance in Conventional and Unconventional Reservoirs. *SPE Western Regional Meeting*, San Jose, 24-26 March 2009, SPE121290-MS.
- [10] Ozkan, E., Brown, M., Raghavan, R., *et al.* (2011) Comparison of Fractured-Horizontal Well Performance in Tight Sand and Shale Reservoirs. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **14**, 248-259.
- [11] Stalgorova, E. and Mattar, L. (2012) Practical Analytical Model to Simulate Production of Horizontal Wells with Branch Fractures. *Canadian Unconventional Resources Conference*, Calgary, 30 October-1 November 2012, SPE 162515.
- [12] 尹洪军, 赵二猛, 付京, 等. 页岩气藏压裂水平井五区复合模型产能分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(3): 9-16.
- [13] 苏玉亮, 王文东, 盛广龙. 体积压裂水平井复合流动模型[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 504-510.
- [14] 赵超. 致密气藏多段压裂水平井非稳态复合产能模型[J]. 断块油气田, 2015, 22(5): 651-655.
- [15] Karimi-Fard, M. and Firoozabadi, A. (2003) Numerical Simulation of Water Injection in Fractured Media Using the Discrete-Fracture Model and the Galerkin Method. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **6**, 117-126.