

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

Ermeng Zhao^{1,2}, Hongjun Yin^{1,2*}

¹Northeast Petroleum University Key Laboratory of Ministry of Education PRC, Daqing Heilongjiang

²State Key Laboratory Cultivation Base Jointly-Constructed by Heilongjiang Province and the Ministry of Science and Technology, Northeast Petroleum University Accumulation and Development of Unconventional Oil and Gas, Daqing Heilongjiang

Email: *18745953495@163.com

Received: Oct. 27th, 2015; accepted: Nov. 13th, 2015; published: Nov. 19th, 2015

Copyright © 2015 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

Due to the low permeability and poor reservoir properties in tight oil reservoir, multi-fractured horizontal wells technology have become an efficient way to produce from this kind of unconventional reservoirs. A production analysis model of multi-fractured horizontal wells in tight oil reservoir is established in this paper, the dimension of artificial hydraulic fracture is reduced based on the discrete fracture model, and the solution is obtained by Galerkin finite element method. Eventually, a field example verified the reliability and practicability of the model. The result shows that the production and cumulative production will increase with the producing pressure drop increases, at the same time, too large producing pressure drop will cause the degassing process of oil, so the producing pressure drop should keep a reasonable level in the actual production. The bigger the effective permeability of the matrix is, the greater the production and cumulative production is. The bigger the conductivity of artificial hydraulic fracture is, the greater the production and cumulative production is, however, the growth rate of production and cumulative production will decrease with the conductivity of artificial hydraulic fracture increases. The results achieved can provide theoretical basis in the study of production analysis for multi-fractured horizontal wells in tight oil reservoirs.

Keywords

Tight Oil Reservoir, Multi-Fractured Horizontal Wells, Production Analysis Model, Galerkin Finite Element Method, Discrete Fracture Model

*通讯作者。

致密油藏分段压裂水平井产能模型研究

赵二猛^{1,2}, 尹洪军^{1,2*}

¹东北石油大学提高采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆

²东北石油大学非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室培育基地, 黑龙江 大庆

Email: *18745953495@163.com

收稿日期: 2015年10月27日; 录用日期: 2015年11月13日; 发布日期: 2015年11月19日

摘要

致密油藏渗透率低、储层物性差, 因此需要采取水平井分段压裂技术进行开采。为此本文建立了致密油藏分段压裂水平井产能模型, 人工裂缝基于离散裂缝模型进行降维处理, 使用伽辽金有限元方法对数学模型进行求解, 最后, 通过某油田实例研究验证了本模型的可靠性与实用性。研究结果表明: 生产压差越大, 产量和累积产量也越大, 但压差过大会导致原油脱气, 因此在实际生产过程中, 应合理控制生产压差; 基质渗透率越大, 产量和累积产量也越大; 裂缝导流能力越大, 产量及累积产量越大, 但随着压裂缝导流能力的增加, 产量增幅逐渐变小。研究结果可为致密油藏产能分析提供理论支持。

关键词

致密油藏, 分段压裂水平井, 产能模型, 有限元, 离散裂缝模型

1. 引言

致密油藏孔隙度小、渗透率低, 不经过压裂改造自然产能极低或基本没有自然产能[1]-[3], 实现致密油藏的商业化开采主要依赖于水平井及分段压裂技术[4] [5]。近年来, 国内外学者针对分段压裂水平井不稳定渗流模型进行了深入研究。2009年, Brown等建立了多级压裂水平井三线性流模型[6]; 2012年、2013年, Stalgorova等先后建立了三区复合流动模型[7]和五区复合流动模型[8]; 2014年, 苏玉亮等应用复合流动模型对致密油藏进行了产能预测[9], 模型虽然计算简单, 但流体在每个区域内均是基于线性流动, 不能真实反映流体渗流规律。为此, 本文基于离散裂缝模型[10] [11], 建立了致密油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, 将模拟计算结果与油田实际生产数据进行对比验证了模型的可靠性, 最后对影响产能动态的参数进行了敏感性分析。

2. 物理模型

矩形致密油藏中心一口水平井, 经过压裂之后形成 N 条人工裂缝, 如图 1 所示, 在推导数学模型之前做出如下假设: (1) 油藏外边界封闭; (2) 人工垂直裂缝完全贯穿储层, 裂缝高度等于储层有效厚度; (3) 岩石和流体均微可压缩, 且压缩系数为常数; (4) 流体流动为单相等温渗流; (5) 油层较薄不考虑重力的影响。

3. 数学模型

3.1. 数学模型的建立

油藏中流体渗流基本微分方程为

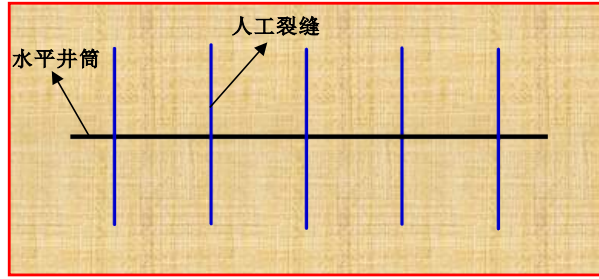


Figure 1. Physical model schematic diagram of multi-fractured horizontal well

图 1. 分段压裂水平井物理模型示意图

$$\frac{K_m}{\mu} \left(\frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_m}{\partial y^2} \right) = \phi_m C_{tm} \frac{\partial p_m}{\partial t} \quad (1)$$

初始条件为

$$p_m|_{t=0} = p_i \quad (2)$$

内边界条件为基质区域与人工裂缝交界处压力相等

$$p_m|_{\Omega_{mf}} = p_f|_{\Omega_{mf}} \quad (3)$$

外边界条件为

$$\frac{\partial p_m}{\partial n} \Big|_{\Omega_o} = 0 \quad (4)$$

式(1)~(4)组成了基质中流体渗流数学模型。

压裂水平井以定井底流压生产, 由此可得人工裂缝中流体渗流数学模型为

$$\begin{cases} \frac{K_f}{\mu} \frac{\partial^2 p_f}{\partial l^2} - q_f \delta(M - M') = \phi_f C_{tf} \frac{\partial p_f}{\partial t} \\ p_f|_{t=0} = p_i \\ p_f|_{\Omega_f} = p_w \\ p_f|_{\Omega_{mf}} = p_m|_{\Omega_{mf}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: q_f 为源汇单位体积流量, s^{-1} ; $\delta(M - M')$ 为 Delta 函数, 当 $M = M'$ 时等于 1, 否则等于 0。

3.2. 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, 将二维的裂缝面单元简化为一维裂缝线单元, 为了保持积分值相等, 须在线积分前乘以人工裂缝宽度。假设整个油藏区域由基质和人工裂缝两个区域组成, 故整个油藏控制方程 F 的积分形式可表示为

$$\iint_{\Omega(2D)} F d\Omega = \iint_{\Omega_m(2D)} F d\Omega_m + \iint_{\Omega_f(2D)} F d\Omega_f \quad (6)$$

对于离散裂缝模型, 其相应的积分表达式可简化为

$$\iint_{\Omega(2D)} F d\Omega = \iint_{\Omega_m(2D)} F d\Omega_m + w \int_{\Omega'_f(1D)} F d\Omega'_f \quad (7)$$

基质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, 则基质区域任一点的压力值可近似为:

$$p_m^e = N_{mi} p_{mi}^e + N_{mj} p_{mj}^e + N_{mk} p_{mk}^e \quad (8)$$

式中: p_{mi}^e 、 p_{mj}^e 、 p_{mk}^e 分别为三角形单元三个节点对应的压力; N_{mi} 为三角形单元形函数, 其线性形式为

$$N_{mi} = a_i + b_i x + c_i y \quad (9)$$

对基质区域流动方程(1)使用 Green 第一公式进行积分, 并结合封闭边界条件可得

$$\frac{K_m}{\mu} \iint_{\Omega} \left(\frac{\partial(\delta p_m^e)}{\partial x} \frac{\partial p_m^e}{\partial x} + \frac{\partial(\delta p_m^e)}{\partial y} \frac{\partial p_m^e}{\partial y} \right) d\Omega + \phi_m C_{tm} \iint_{\Omega} \delta p_m^e \frac{\partial p_m^e}{\partial t} d\Omega = 0 \quad (10)$$

取 $\delta p_m^e = N_{mi}$, 由此可得

$$\frac{K_m}{\mu} \iint_{\Omega} \left(\frac{\partial N_{mi}}{\partial x} \frac{\partial N_{mj}}{\partial x} + \frac{\partial N_{mi}}{\partial y} \frac{\partial N_{mj}}{\partial y} \right) d\Omega p_{m,j}^e + \phi_m C_{tm} \iint_{\Omega} N_{mi} N_{mj} d\Omega \frac{\partial p_{m,j}^e}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

化简可得

$$A_{ij}^{e,m} p_{m,j}^e + B_{ij}^{e,m} \frac{\partial p_{m,j}^e}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

$$\text{式中: } A_{ij}^{e,m} = \frac{K_m}{\mu} (b_i b_j + c_i c_j) \Delta^e, \quad B_{ij}^{e,m} = \begin{cases} \phi_m C_{tm} \frac{\Delta^e}{6} & (i = j) \\ \phi_m C_{tm} \frac{\Delta^e}{12} & (i \neq j) \end{cases}$$

对于时间导数项, 采用向前差分格式, 即

$$\frac{\partial p_m^e}{\partial t} = \frac{p_m^{e,n+1} - p_m^{e,n}}{t^{n+1} - t^n} \quad (13)$$

由此可得基质区域的单元有限元方程为

$$\left(A_{ij}^{e,m} + \frac{B_{ij}^{e,m}}{t^{n+1} - t^n} \right) p_m^{e,n+1} = \frac{B_{ij}^{e,m}}{t^{n+1} - t^n} p_m^{e,n} \quad (14)$$

人工裂缝区域采用一维线单元进行剖分, 并选取一次单元形函数, 则人工裂缝区域任一点的压力值可近似为:

$$p_f^e = N_{fi} p_{fi}^e + N_{fj} p_{fj}^e \quad (15)$$

式中: p_{fi}^e 、 p_{fj}^e 分别为线单元两个节点对应的压力; N_{fi} 为线单元形函数, 其线性形式为

$$N_{fi} = c_i + d_i l \quad (16)$$

同理可得人工裂缝区域的单元有限元方程为

$$\frac{K_f}{\mu} \int_{\Gamma} \frac{\partial N_{fi}}{\partial l} \frac{\partial N_{fj}}{\partial l} d\Gamma p_{f,j}^e + \phi_f C_{tf} \int_{\Gamma} N_{fi} N_{fj} d\Gamma \frac{\partial p_{f,j}^e}{\partial t} + \int_{\Gamma} q_f N_{fi} \delta(M - M') d\Gamma = 0 \quad (17)$$

化简可得

$$\left(A_{ij}^{e,f} + \frac{B_{ij}^{e,f}}{t^{n+1} - t^n} \right) p_f^{e,n+1} = \frac{B_{ij}^{e,f}}{t^{n+1} - t^n} p_f^{e,n} + C_i^{e,f} \quad (18)$$

$$\text{式中: } A_{ij}^{e,f} = \begin{cases} w \frac{K_f}{\mu} \frac{1}{\Delta l^e} & (i=j) \\ -w \frac{K_f}{\mu} \frac{1}{\Delta l^e} & (i \neq j) \end{cases}, \quad B_{ij}^{e,f} = \begin{cases} w \phi_f C_{if} \frac{\Delta l^e}{3} & (i=j) \\ w \phi_f C_{if} \frac{\Delta l^e}{6} & (i \neq j) \end{cases}, \quad C_i^{e,f} = w \frac{\Delta l^e}{2} q_f \delta (M - M')$$

最后将基质区域和人工裂缝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, 最终求得数学模型的解。

4. 致密油分段压裂水平井产能动态分析

以某油田致密油开发试验区一口水平井为例, 分 12 段 34 簇压裂, 簇间距平均 20 m, 投入开发以后以定井底流压 2 MPa 生产 110 天, 由于某种原因关井 41 天, 然后又以井底流压 2 MPa 生产 43 天, 储层和流体参数见表 1。将参数代入所建立的模型进行模拟计算, 并将模拟结果与实际数据进行对比, 对比结果如图 2 所示, 误差较小, 说明了本模型的可靠性强。

图 3 对比了不同生产压差对致密油藏压裂水平井的产量及累积产量的影响。其它参数不变, 只改变井底压力大小, 从图中可以看出, 在生产初期产量很高, 但产量下降很快, 随着生产时间的增加, 产量下降缓慢趋于稳定。此外, 生产压差越大, 相同时间内产量和累积产量也越大, 但生产压差过大, 当井底压力低于泡点压力时, 会导致原油脱气, 增加原油粘度, 大大增加流体渗流阻力。因此在实际生产过程中, 应综合考虑实际情况, 合理控制生产压差。

图 4 对比了不同基质渗透率对致密油藏压裂水平井的产量及累积产量的影响。其它参数不变, 只改变基质渗透率大小, 从图中可以看出, 基质渗透率越大, 相同时间内产量和累积产量也越大, 而且基质渗透率对产量及累积产量的影响贯穿整个生产周期, 对于致密油藏, 渗透率低, 因此产量也低, 甚至没有自然产能, 因此可通过水平井分段压裂技术增大产量, 实现致密油藏的经济开发。

图 5 对比了不同人工裂缝导流能力对致密油藏压裂水平井的产量及累积产量的影响。其它参数不变, 只改变导流能力大小, 从图中可以看出, 人工裂缝导流能力越大, 压裂水平井产量及累积产量越大, 递减速度也越快, 但随着压裂缝导流能力的增加, 产量增幅逐渐变小。其主要原因在于, 当压裂缝导流能力过低时, 而油层供给能力比较强, 使得在裂缝附近流体聚集, 产生附加阻力, 这时如果增加裂缝导流能力, 解除这部分附加阻力, 产量明显上升; 当压裂缝导流能力过高时, 而油层供给跟不上, 出现“抽空”现象, 表现为导流能力的增加, 产量增幅减小。因此, 需要优化压裂缝的导流能力, 使得裂缝导流能力与油层供给能力相一致。

Table 1. Basic parameters of reservoir and fluid

表 1. 储层及流体的基础数据表

名称	数值	单位	名称	数值	单位
基质渗透率	9.07	$10^{-3} \mu\text{m}^2$	原油粘度	57.6	mPa·s
裂缝导流能力	30	$\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$	裂缝半长	150	m
有效厚度	3	m	综合压缩系数	6.7×10^{-4}	MPa^{-1}
井筒半径	0.1	m	水平井长度	600	m
孔隙度	0.12	小数	原油体积系数	1.046	无因次
原始地层压力	16	MPa	流体密度	872	kg/m^3

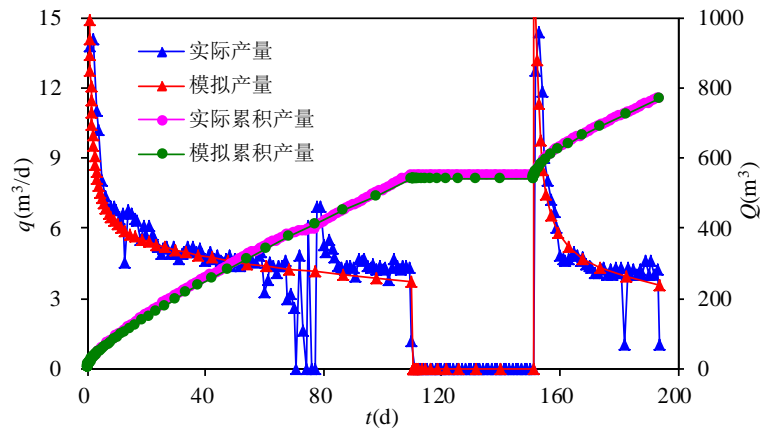


Figure 2. Matching of the field data with the model established in this paper
图 2. 模拟结果与实际数据对比图

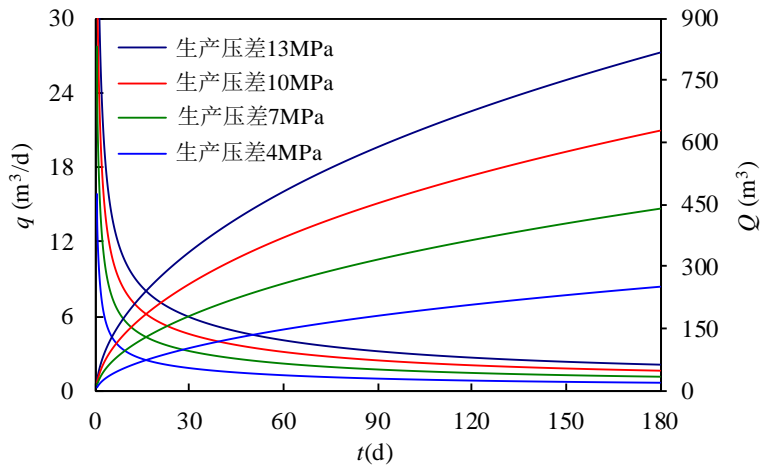


Figure 3. The effect of producing pressure drop on production and cumulative production curves
图 3. 生产压差对产量及累积产量的影响

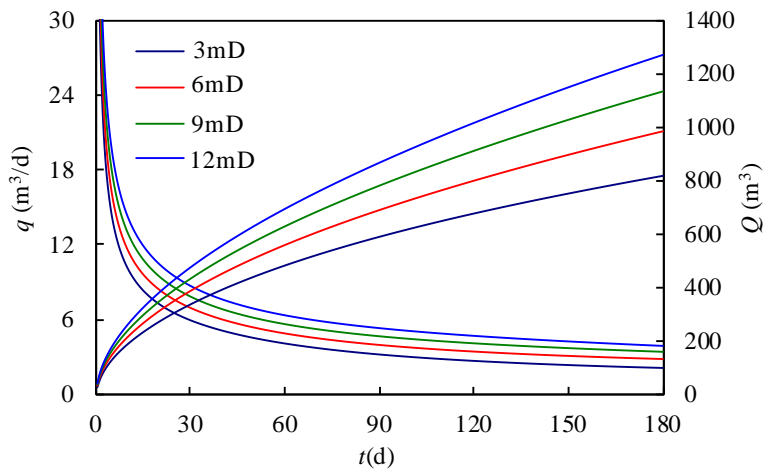


Figure 4. The effect of permeability of the matrix on production and cumulative production curves
图 4. 基质渗透率对产量及累积产量的影响

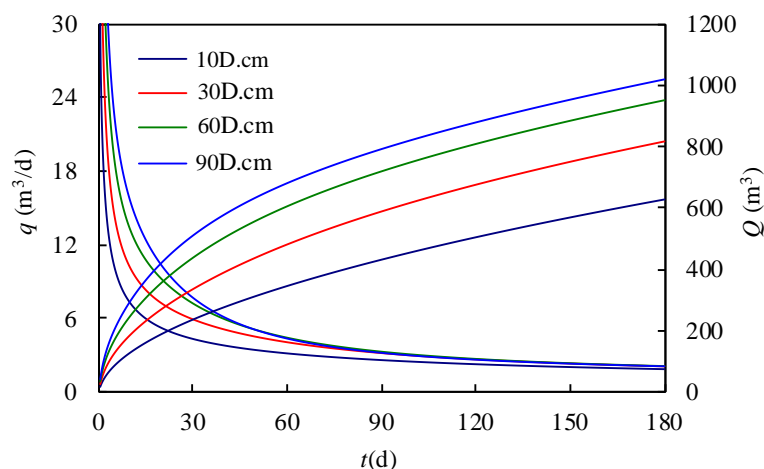


Figure 5. The effect of conductivity of hydraulic fracture on production and cumulative production curves

图 5. 人工裂缝导流能力对产量及累积产量的影响

5. 结论

(1) 针对分段压裂水平井的特征, 基于离散裂缝模型对人工裂缝进行降维处理, 使用伽辽金有限元方法建立并求解了致密油藏分段压裂水平井产能模型; 将模拟计算结果与某区块实际生产数据进行对比, 说明了所建模型的可靠性。

(2) 生产压差越大, 产量和累积产量也越大, 但压差过大会导致原油脱气, 因此在实际生产过程中, 应合理控制生产压差; 基质渗透率越大, 产量和累积产量也越大; 裂缝导流能力越大, 产量及累积产量越大, 递减速度也越快, 但随着压裂缝导流能力的增加, 产量增幅逐渐变小。

参考文献 (References)

- [1] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012(3): 343-350.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 杨正明, 张仲宏, 刘学伟, 等. 低渗/致密油藏分段压裂水平井渗流特征的物理模拟及数值模拟[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 85-92.
- [5] 魏漪, 宋新民, 冉启全, 等. 致密油藏压裂水平井非稳态产能预测模型[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(1): 67-72.
- [6] Brown, M., Ozkan, E., Raghavan, R., et al. (2009) Practical Solutions for Pressure Transient Responses of Fractured Horizontal Wells in Unconventional Reservoirs. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Louisiana, 4-7 October 2009, Document ID: SPE-125043-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/125043-MS>
- [7] Stalgorova, E. and Matter, L. (2012) Practical Analytical Model Simulate Production of Horizontal Wells with Branch Fractures. *SPE Canadian Unconventional Resources Conference*, Calgary, 30 October-1 November 2012, Document ID: SPE-162515-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/162515-MS>
- [8] Stalgorova, E. and Matter, L. (2013) Analytical Model for Unconventional Multifractured Composite Systems. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **16**, 246-256. <http://dx.doi.org/10.2118/162516-PA>
- [9] 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.
- [10] Karimi-Fard M. and Firoozabadi A. (2001) Numerical Simulation of Water Injection in 2d Fractured Media Using Discrete-Fracture Model. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Louisiana, 30 September-3 October 2001, Document ID: SPE-71615-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/71615-MS>
- [11] 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(2): 109-115.