

多裂缝水平井试井理论曲线特征分析

欧阳伟平¹, 刘曰武¹, 赵培华², 门相勇², 苏中良¹, 刘永茜¹

1 中国科学院力学研究所, 北京, 100190

2 中石油煤层气有限责任公司, 北京, 100028

Well Test Type Curve Analyzing for Horizontal Well with Multi-fractures

Weiping Ouyang¹, Yuewu. Liu¹, Peihua. Zhao², Xiangyong Meng², Zhongliang Su¹, Yongqian Liu¹

1 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 Coalbed methane Ltd. Company, Petrochina, Beijing 100028, China

Copyright 2012, Shaanxi Petroleum Society

This paper was prepared for presentation at the 2012 International Conference & Exhibition on Reservoir Surveillance and Management held in Beijing, China, 8-10 August 2012.

This paper was selected for presentation by the ICRSM Committee following review of information contained in an abstract submitted by the author(s). Contents of the paper, as presented, have not been reviewed by the ICRSM Committee and are subject to correction by the author(s). The material does not necessarily reflect any position of the ICRSM Committee, its members. Papers presented at the Conference are subject to publication review by Professional Committee of Petroleum Engineering of Shaanxi Petroleum Society. Electronic reproduction, distribution, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of Shaanxi Petroleum Society is prohibited. Permission to reproduce in print is restricted to an abstract of not more than 300 words; illustrations may not be copied. The abstract must contain conspicuous acknowledgment of ICRSM. Contact email: info@icrsm.org.

Abstract

The technology of fracturing horizontal well has become a key technology for exploiting the low permeability reservoir, coalbed gas reservoir, and shale gas reservoir and other kind of hydrocarbon reservoirs. The fracture characteristics of horizontal well after hydraulically fracturing are the key parameters to evaluate the effect of hydraulically fracturing and forecast the productivity of the horizontal well with multi-fractures. A new numerical well test model for horizontal well with multi-fractures has been developed by after analyzing the fracture forming conditions. The well test type curves for horizontal well are proposed by using numerical calculating method on three-dimensional well test model. The influence of number of fractures, distance between fractures, fracture length etc on well test type curve are studied in detail in this paper. Features of well test type curves are analyzed in deferent situation. A method to estimate parameters of the fractures are proposed by comparing the type curve with that of the horizontal well single fracture and/or without fracture, which provides the basic theory to distinguish the fractures. Some important parameters such as number of fractures, fracture length can be got by using the comparing method, which provide theoretical mechanism and technology for analyzing the well test data in staged/segmental fracturing horizontal well.

Key words : Horizontal well, well test, hydraulic fracturing, multi-fracture, FEM

摘要

水平井压裂技术已成为低渗透及特低渗油气藏、煤层气藏以及页岩气藏等烃类储层开发的关键技术。水平井水力压裂后的裂缝特征是评价压裂效果和预测单井产能的关键参数。本文通过裂缝形成条件的分析,建立了一种多条裂缝水平井三维数值试井模型。通过 3 维数值试井模型的理论计算,获得了多条裂缝水平井的试井理论曲线,分析了裂缝条数、裂缝间距、裂缝长度等诸多因素对试井理论曲线的影响,给出了不同条件下试井理论曲线的特征分析。提出了一种通过与单一裂缝和/或无裂缝水平井的理论曲线特征的对比,确定了判断形成多条裂缝特征参数的方法,这也是识别多条裂缝的理论基础。通过利用对比分析方法,可以获得压裂形成条数、裂缝长度等重要参数,这为多级/分段压裂水平井井测试资料的分析提供了理论基础和技术手段。

关键词: 水平井, 试井, 水力压裂, 多裂缝, 三维有限元

一、前言

对于低渗透油气藏仅采用压裂或水平井开发往往达不到预期的效果,而通过水平井多级分段压裂技术产生多条裂缝,能够大幅度提高水平井的产能。水平井水力压裂后的裂缝特征是评价压裂效果和预测单井产能的关键参数。对多裂缝水平井的试井分析是获取裂缝参数的重要手段。

目前国内外对常规水平井试井模型已做大量的研究[1-3],且对于水力压裂形成单一垂直裂缝的直井也有较好的研究成果[4~7],而对于具有多条裂缝的压裂水平井的非定常渗透研究较少,主要以半解析解的方法为主[8-10],多裂缝水平井的结构复杂,半解析解的局限性较大。本文根据水平井分段压裂物理过程和形成裂缝的特征,在分析油气藏开发特征的基础上,建立了一种分段压裂水平井的三维非定常渗流数值模型,利用三维有限元方法对所建立的非定常渗流模型进行了求解,得到了分段压裂水平井的不稳定试井理论曲线以及反映非定常渗流特征的渗流场。这些成果对于分段压裂油气藏中水平井的产能预测以及不稳定试井资料分析有积极的意义,可以为利用分段水平井压裂技术进行开发的油气藏的合理开发提供有力的技术支撑。

二、物理模型描述

随钻成像测井系统已被应用于解决水平井测井存在的一些问题。应用该系统可以在整个井筒长度范围内进行电阻率成像和井筒地层倾角分析。成像测井提供构造信息、地层信息和力学特性信息,用于优化完井作业。成像能够将地层天然裂缝和钻井诱发裂缝进行比较,帮助作业者确定射孔和油井增产的最佳目标。多级滑套封隔器分段压裂的水平井示意图如图 1 所示[11]。

根据水平井水力压裂后的裂缝发育状态,对油气藏中多裂缝水平井的非定常渗流模型做以下假设:地层为均匀各向异性介质,水平方向的渗流为 K_r ,垂直方向的渗透率 K_z ;地层中的流体为弱可压缩、定常粘度的牛顿流体,流体在地层中的流动为层流状态,遵从达西定律;水平井与顶底边界平行,顶部和底部均为不渗透边界,水平井井筒符合无限导流特征;水平井压裂产生的是横向裂缝,裂缝有一定的宽度且具有无限大导流能力,即裂缝中没有压差;忽略重力和温度变化对流动的影响,且不考虑其它物理化学的影响。



图1 多级滑套封隔器分段压裂

三、数学模型及其求解

3.1 数学模型

水平井及各条裂缝都具有无限大导流能力，可将水平井筒以及裂缝面作为模型的内边界。水平井和裂缝中各点的流量不相等，故内边界的压力法向导数值是未知的，但是各点的压力值是相等的，且水平井和裂缝中流量的总和是一定的。因此将压力导数作为未知数，并已知水平井筒和裂缝各点压力相等，联立方程组。

$$\text{控制方程: } \frac{\partial^2 p_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial y_D^2} + \frac{k_z}{k_r} \frac{\partial^2 p_D}{\partial z_D^2} = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \quad (1)$$

$$\text{初始条件: } p_D = 0 \quad (2)$$

边界条件:

$$\text{内边界条件: } \sum_{j=1}^N A_{jD} \left(\frac{\partial p_{jD}}{\partial n} \right) \Big|_{\Gamma_{in}} = 2\pi h_D \left(1 - \frac{dp_{wD}}{dT_D} \right) \quad (3)$$

$$p_{jD} = p_{wD} \quad (4)$$

外边界条件:

$$\text{无限大边界条件: } p_D \Big|_{x,y \rightarrow \infty} = 0 \quad (5)$$

$$\text{定压边界条件: } p_D \Big|_{\Gamma_{out}} = 0 \quad (6)$$

$$\text{封闭边界: } \frac{\partial p_D}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{out}} = 0 \quad (7)$$

其中:无量纲量: T_D 是无量纲有效时间, $T_D = \frac{t_D}{C_D}$; t_D 是无量纲时间, $t_D = \frac{3.6kt}{\phi\mu c_t r_w^2}$; x_D 、 y_D 、

z_D 是无量纲坐标 $x_D = \frac{x}{r_{we}}$; h_D 为无量纲储层厚度 $h_D = \frac{h}{r_{we}}$; r_{we} 是有效井径, $r_{we} = r_w \cdot e^{-S}$; p_D

是无量纲压力, $p_D = \frac{kh(p_i - p)}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}$; C_D 是无量纲井筒存储系数, $C_D = \frac{1.592C}{\phi h C_t r_w^2}$; A_{jD} 为内

边界离散单元面的面积； $\frac{\partial p_{jD}}{\partial n}$ 为内边界无量纲压力的法向导数， p_{jD} 为内边界离散单元的无量纲压力

值， p_{wD} 为井筒无量纲压力值， N 为内边界离散单元面数，内边界包括所有裂缝面及水平井筒面。

有量纲量： B 是体积系数，单位是 m^3/m^3 ； C 是井筒存储系数，单位是 m^3/MPa ； C_t 是总压缩系数，单位是 $1/MPa$ ； h 是地层有效厚度，单位是 m ； k 是地层渗透率，单位是 μm^2 ； p 是地层压力，单位是 MPa ； p_i 是地层原始压力，单位是 MPa ； p_w 是井底压力，单位是 MPa ； q 是生产率，单位是 m^3/Day ； r_w 是井筒半径，单位是 m ； S 是表皮系数，单位是无量纲量； t 是时间，单位是 hr ； ϕ 是地层孔隙度，单位是无量纲量（小数）； μ 是地层中流体的粘度，单位是 $mPa \cdot s$ 。

3.2 有限元方法求解

利用伽辽金加权余量法，令其权函数为差值函数 $N_i = a_i + b_i x + c_i y + d_i z$ $i=1, 2, 3, 4$

$$\text{则有：} \iiint_V N_i^e \left(\frac{\partial^2 p_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial y_D^2} + \frac{k_z}{k_r} \frac{\partial^2 p_D}{\partial z_D^2} - \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \right) dV = 0$$

其弱表示形式为：

$$\iiint_V \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x_D} \frac{\partial p_D}{\partial x_D} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y_D} \frac{\partial p_D}{\partial y_D} + \frac{k_z}{k_r} \frac{\partial N_i^e}{\partial z_D} \frac{\partial p_D}{\partial z_D} + \frac{N_i^e}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \right) dV = \iint_{S^+} N_i^e \frac{\partial p_D}{\partial n} dS$$

单元压力为 $p_D^e = p_1^e N_1^e + p_2^e N_2^e + p_3^e N_3^e + p_4^e N_4^e$ ，其中 $p_1^e, p_2^e, p_3^e, p_4^e$ 为单元节点压力值，离散后得到有限元方程：

$$\begin{aligned} & \left(b_i^2 + c_i^2 + \frac{k_z}{k_r} d_i^2 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{10\Delta T_D} \right) p_i^{e,n+1} + \left(b_i b_j + c_i c_j + \frac{k_z}{k_r} d_i d_j + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{20\Delta T_D} \right) p_j^{e,n+1} \\ & + \left(b_i b_k + c_i c_k + \frac{k_z}{k_r} d_i d_k + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{20\Delta T_D} \right) p_k^{e,n+1} + \left(b_i b_l + c_i c_l + \frac{k_z}{k_r} d_i d_l + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{20\Delta T_D} \right) p_l^{e,n+1} \\ & - \frac{A}{6V} \frac{\partial p_i}{\partial n} - \frac{A}{12V} \frac{\partial p_{jkl}}{\partial n} - \frac{A}{12V} \frac{\partial p_{kllj}}{\partial n} \\ & = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{10\Delta T_D} p_i^{e,n} + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{20\Delta T_D} p_j^{e,n} + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{20\Delta T_D} p_k^{e,n} + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{20\Delta T_D} p_l^{e,n} \end{aligned}$$

$$\text{由内边界总流量等于生产量知：} \frac{\sum_{j=1}^N A_{jD} \left(\frac{\partial p_{jD}}{\partial n} \right) \Big|_{\Gamma_{in}}}{2\pi h_D} + \frac{1}{\Delta T_D} p_{wD}^{e,n+1} = 1 + \frac{1}{\Delta T_D} p_{wD}^{e,n}$$

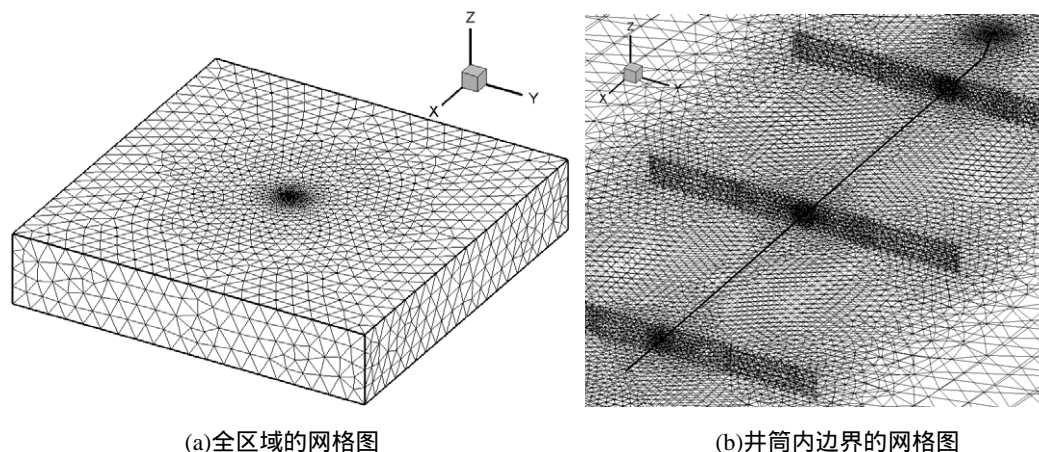
内边界各点的压力相等： $p_{jD} = p_{wD}$

$$\text{其中：四面体的体积 } V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix},$$

$$b_i = -\frac{1}{6V} \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad c_i = \frac{1}{6V} \begin{vmatrix} 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_k & z_k \\ 1 & x_l & z_l \end{vmatrix} \quad d_i = -\frac{1}{6V} \begin{vmatrix} 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \\ 1 & x_l & y_l \end{vmatrix} \quad (i, j, k, l) = \{1, 2, 3, 4\}$$

A 为四面体其中一个面的面积，可以利用海伦公式求得。联立上列方程，由单元方程组组装系统方程组，求解系统方程组，既可得到任意网格点 (x_D, y_D, z_D) 上 $n+1$ 时刻的压力值 $p_D(x, y, z)$ 。

为了进行有限元计算，需对计算区域进行离散，采用非结构四面体网格，外边界可为不同规则的边界，内边界由横向裂缝及水平井筒组成，其中横向裂缝为多条，裂缝面为矩形，裂缝的长度不定。以 3 条垂直裂缝为例，整个计算区域的网格图及水平井筒和多条裂缝网格的局域放大图如图 2 所示。



(a) 全区域的网格图

(b) 井筒内边界的网格图

图 2. 地层的非结构网格图

四、结果分析讨论

根据所建立的数学模型和推导出的有限元方程，利用所划分的有限元网格计算出了分段压裂水平井的不稳定试井理论曲线，得到了分段压裂水平井渗流场分布，分析了不同。

4.1 分段压裂水平井的不稳定试井理论曲线特征分析

计算所得的分段压裂水平井的不稳定试井理论曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出：分段压裂水平井的不稳定试井理论曲线基本可以分为 6 段。

(1) 井筒存储控制阶段，在此阶段井筒中流体的压缩性起了决定性作用，表现为压力和压力导数曲线都是斜率为 1 的直线段；

(2) 表皮效应控制段，在井筒存储控制流体弹性作用完成后，地层中流体流入井筒，由于井壁在钻井中的污染或增产措施改造，使得井筒附近存在额外的压力损失 / 增益，表现为表皮效应在压力导数曲线上的凸起；

(3) 裂缝线性流阶段，流动与裂缝面垂直，各裂缝间还未形成干扰，由于裂缝均为无限导流裂缝，故此阶段的压力与压力导数曲线的斜率为 1/2；

(4) 裂缝干扰阶段，随着时间增长，压力波逐渐扩展，裂缝与裂缝间产生干扰，在压力导数曲线上表现为曲线斜率大于 1/2，流动由原来垂直于裂缝面的单向流动逐渐变为平行于裂缝面流动，此阶段是多裂缝存在的主要特征，可以作为识别多裂缝存在的主要判据；

(5) 椭圆流动阶段，在多裂缝和水平井筒周围形成椭圆形流动，此阶段为单一流动趋于系统径向流动的过渡阶段；

(6) 系统径向流段，在远离裂缝处整个系统的流动演变为径向流动，压力导数曲线是 0.5 的直线段，表明

整个系统是径向流动。

不同参数下得到的试井理论曲线的特征有所不同，在某些参数的组合下，有些流动阶段的特征可能被掩盖或者出现新的流动段，例如井筒储存严重的压裂水平井可能掩盖其裂缝线性流特征，而在裂缝较短，裂缝间距较大的情况下，可能会出现围绕着裂缝的拟径向流阶段。

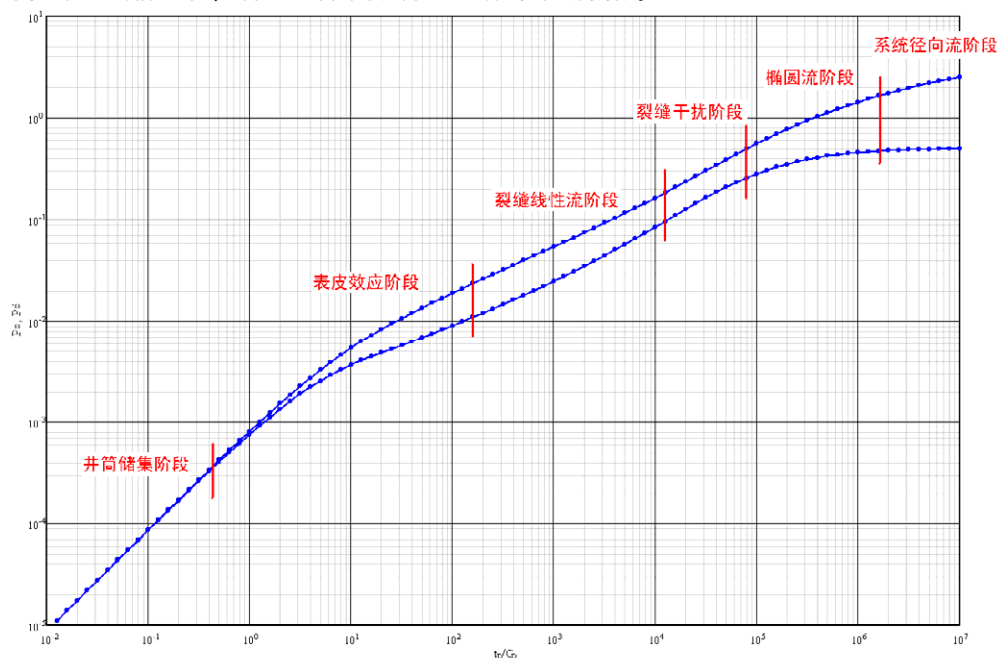
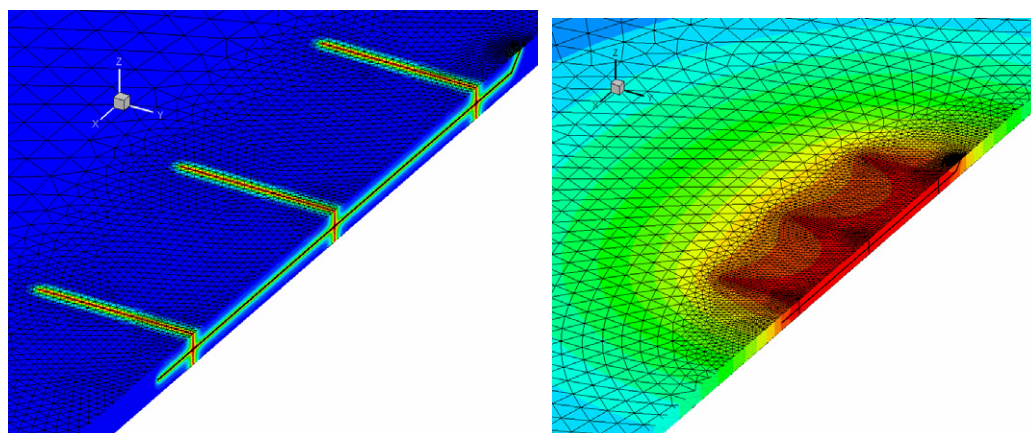


图3 分段压裂水平井的不稳定试井理论曲线

4.2 分段压裂水平井的渗流场特征分析

计算所得的分段压裂水平井的渗流场如图4所示。从图4(a)可以看出：(1)早期流动主要为垂直于裂缝面的线性流动；(2)部分流体围绕水平井流动，但裂缝面积远大于水平井筒面积，故裂缝线性流动起主导作用。从图4(b)可以看出：(1)晚期在裂缝周围形成椭圆形流动；(2)远离裂缝处为整个系统的径向流动。



(a)早期的压力场分布图

(b)晚期的压力场分布图

图4 分段压裂水平井的渗流场

4.3 分段压裂水平井与水平井对比

图5为计算得到的多裂缝水平井与压裂前无裂缝水平井的试井理论曲线对比图，从图可知，没进行水力压裂的水平井试井理论曲线主要特征为压力导数曲线存在两个水平直线段，即两个径向流动，早期的径

向流动为围绕着水平井筒的垂直面径向流，晚期的径向流为水平面的系统径向流。压裂后的多裂缝水平井的试井理论曲线已不存在早期的径向流动特征，取而代之的为裂缝线性流动，两者的差别很大，故通过试井理论曲线可以较为清晰的判断出水平井有无裂缝的存在。另外，在试井理论曲线中，无裂缝水平井的无量纲压力值明显大于多裂缝水平井的无量纲压力值，说明产出同产量情况下，无裂缝水平井的井底压降要大于多裂缝的压降，这是由于多裂缝存在增大了井底的泄流面积，降低了流动阻力。

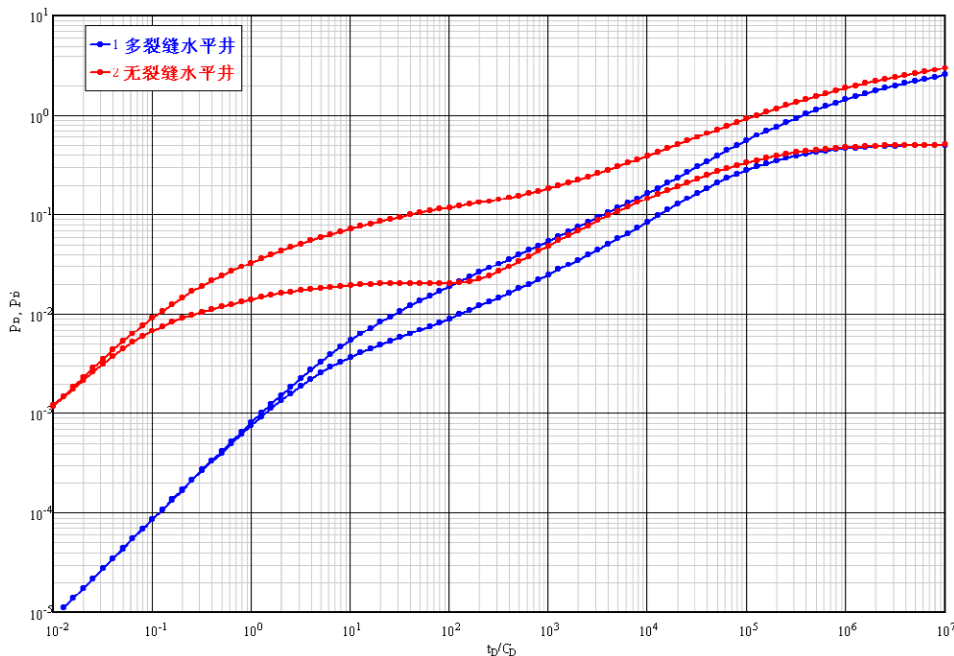


图 5 多裂缝水平井与无裂缝水平井的对比图

4.4 裂缝条数的影响

图 6 为同一水平井不同裂缝条数的试井理论曲线图，其中每条裂缝的长度相同。从图可知，裂缝条数越多，即裂缝间距越短，裂缝间出现干扰的时间越早，干扰的影响越大，如曲线 3 比曲线 2 的 1/2 斜率段结束的越早，上翘的越早，且上翘幅度越大，即干扰越大。曲线 1 为在一条裂缝存在下情形，此时的裂缝线性流阶段时间最长，且不出在裂缝间的干扰。此外，裂缝条数越多，无量纲压力值越小，井底流动阻力越小，但是裂缝条数增多，裂缝间的干扰越大，裂缝增产的效果会降低，故裂缝条数存在一个最优值，裂缝数的最优值需要根据水平井长度、裂缝长度、裂缝导流能力等因素综合考虑。

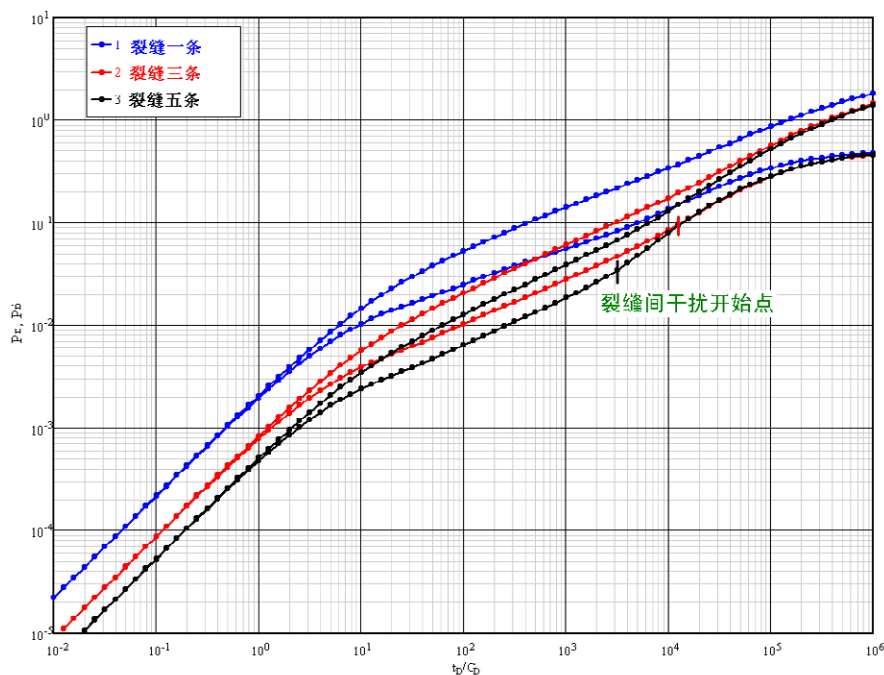


图 6 不同裂缝条数的试井理论曲线

4.5 裂缝长度的影响

确定裂缝长度是评价压裂施工质量的重要参数，相同的裂缝数，不同的裂缝长度在试井理论曲线上有比较明显的区别，可以通过试井分析拟合得到裂缝的长度。如图 7 为裂缝条数为 3 条，裂缝无量纲长度 L_D

分别为 200、500 的计算结果，其中 $L_D = \frac{L}{r_{we}}$ 。从图可知，裂缝长度越长，无量纲压力值越小，说明井底的流动阻力越小。

裂缝越长，裂缝间产生干扰的影响越大，在试井理论曲线表现为压力导数上翘的斜率越大。

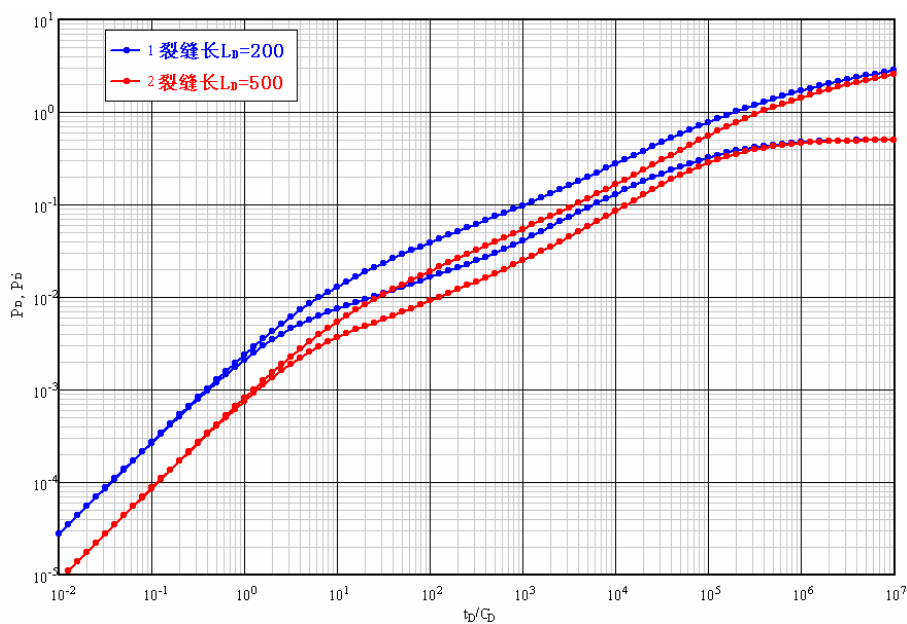


图 7 不同裂缝长度的试井理论曲线

五、结论

1. 根据水平井分段压裂物理过程和形成裂缝的特征,建立了一种分段压裂水平井的三维非定常渗流数值模型,利用三维有限元方法对模型进行了求解,获得了多裂缝存在条件下的压裂水平井试井理论曲线;
2. 通过对压裂水平井试井理论曲线以及渗流场的分析,明确了压裂水平井不同的流动阶段及其特征;
3. 压裂水平井试井理论曲线与常规无裂缝的水平井试井理论曲线具有很大的区别,无裂缝条件下的水平井的主要特征为两阶段的径向流动,而压裂水平井主要表现为裂缝线性流动特征,压裂效果越好,裂缝特征表现的越明显;
4. 多裂缝的存在增加了泄流面积,降低了井底周围的流动阻力,能够大幅度增加产量,裂缝条数,裂缝间距和裂缝长度对试井理论曲线具有较大的影响,裂缝条数越多或者裂缝间距越小,裂缝产生干扰的时间越早,裂缝干扰阶段越明显,这可以作为识别多裂缝的依据。

参考文献

- [1].Daviau, F., et al., Pressure analysis for horizontal wells. SPE 14251, 1985.
- [2].Goode, P.A. and R.K.M. Thambynayagam, Pressure drawdown and buildup analysis of horizontal wells in anisotropic media. SPE Formation Evaluation, 1987. 2(4): p. 683-697.
- [3].王晓冬与刘慈群, 双重介质封闭油藏水平井试井分析方法. 油气井测试, 1992(2): 1-6+74.
- [4].Gringarten A C. Ramey Jr H J. Raghavan R: Pressure analysis for fractured wells[J], Paper SPE, 4051, 1972.
- [5].Cinco L H, Samaniego V F, Dominguez A N. Transient pressure behavior for a well with a finite conductivity vertical fracture[C]. SPE 6014, 1978
- [6].刘慈群. 垂直裂缝地层中流体的渗流[J]. 石油勘探与开发,1987,(03):69-73
- [7].刘曰武, 刘慈群. 无限导流垂直裂缝井的一种快速试井分析方法[J]. 大庆石油地质与开发, 1993, (04):55-60
- [8].Horne, R.N. and K.O. Temeng, Relative productivities and pressure transient modeling of horizontal wells with multiple fractures, in Proceedings of the Middle East Oil Show. 1995: Richardson, TX, United States. p. 563-574.
- [9].Chen, C.C. and R. Raghavan, Multiply-fractured horizontal well in a rectangular drainage region, in Proceedings - SPE International on Horizontal Well Technology. 1996: Calgary, Alberta, Can. p. 311-319.
- [10].李树松等, 压裂水平井多裂缝系统的试井分析. 大庆石油地质与开发, 2006(3): 67-69+78+108.
- [11].George Dozier, Jack Elbel, Eugene Fielder. Refracturing works. Oilfield Review. 2003.

References

- [1]. Daviau, F., et al., Pressure analysis for horizontal wells. SPE 14251, 1985.
- [2] Goode, P.A. and R.K.M. Thambynayagam, Pressure drawdown and buildup analysis of horizontal wells in anisotropic media. SPE Formation Evaluation, 1987. 2(4): p. 683-697.
- [3]. wang Xiaodong, Liu Ciqun, Well test analysis method for horizontal well in closed dual-porosity reservoir, Well Testing, 1992(2): 1-6+74.
- [4]. Gringarten A C. Ramey Jr. H J. Raghavan R: Pressure analysis for fractured wells. [J], Paper SPE, 4051, 1972.
- [5]. Cinco L H, Samaniego V F, Dominguez A N. Transient pressure behavior for a well with a finite conductivity vertical fracture[C]. SPE 6014, 1978

- [6]. Liu Ciqun, Seepage flow for vertical fractured well,[J], Petroleum Exploration & Development, 1987,(03):69-73
- [7]. Liu Yuewu, Liu Ciqun, A quick well test method for fractured well with infinite conductivity fracture [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1993, (04):55-60
- [8].Horne, R.N. and K.O. Temeng, Relative productivities and pressure transient modeling of horizontal wells with multiple fractures, in Proceedings of the Middle East Oil Show. 1995: Richardson, TX, United States. p. 563-574.
- [9].Chen, C.C. and R. Raghavan, Multiply-fractured horizontal well in a rectangular drainage region, in Proceedings - SPE International on Horizontal Well Technology. 1996: Calgary, Alberta, Can. p. 311-319.
- [10].Li Shusong, et al., Well test analysis for fractured horizontal well with multifracture, [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006(3): 67-69+78+108.
- [11]. George Dozier, Jack Elbel, Eugene Fielder. Refracturing works. Oilfield Review. 2003.

作者简介及联系方式:

作者简介：刘曰武，男，研究员，中国科学院力学研究所，1988年毕业于大庆石油学院，1999年力学所博士后出站，留中国科学院力学研究所工作。一直从事渗流力学和油气藏工程的理论研究及矿场应用。

姓名：刘曰武

邮件：Lywu@imech.ac.cn

地址：北京市北四环西路 15#力学所，100190

Corresponding author:

Author a brief introduction：Yuewu Liu, Male, Professor. Work at Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Get master degree in 1988 at Daqing Petroleum University. After finished Post PhD in 1999, keep working at Institute of Mechanics. The main interests are fundamental research and applications of fluid flow mechanics in porous media and reservoir engineering.

Name：Yuewu. Liu

Enmail：Lywu@imech.ac.cn

Address：No.15 Beisihuanxi Road, Beijing, China(100190)