

The Research on the Productivity Prediction for Fracturing Wells in Ultra-low Permeability Reservoirs

Qingming Gan^{1,2}, Ruiquan Liao^{1,3}, Mengxia Li^{1,3}, Zhicheng Zhao^{1,3}

¹School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan Hubei

²Research Institute of Oil and Gas Technology, Changqing Oilfield Company PetroChina, Xi'an Shaanxi

³The Multiphase Flow Laboratory of Gas Lift Innovation Center, CNPC, Wuhan Hubei

Email: ganqm_cq@petrochina.com.cn

Received: Jan. 25th, 2019; accepted: Mar. 21st, 2019; published: Apr. 15th, 2019

Abstract

In consideration to the problems of oil productivity prediction for vertical fracturing wells in ultra-low permeability reservoirs, based on elliptical flow physical model, a theoretical equation was derived by introducing permeability variation coefficient and viscosity variation coefficient in consideration of starting pressure gradient. The results of computation based on oilfield data from 23 wells in S Oilfield indicate that the mean relative error between predicted value and measured value is about -78.7%. Based on the actual measuring data, the permeability variation coefficient is modified into formation variation coefficient. The calculation results show that the mean relative error between predicted value and measured value is reduced to -0.9%.

Keywords

Ultra-low Permeability Reservoir, Vertical Fracturing Well, Productivity Prediction, Elliptical Flow Physical Model, Permeability Variation Coefficient, Viscosity Variation Coefficient

特低渗油藏压裂井产能预测方法研究

甘庆明^{1,2}, 廖锐全^{1,3}, 李梦霞^{1,3}, 赵志成^{1,3}

¹长江大学石油工程学院, 湖北 武汉

²中石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西 西安

³中国石油天然气集团公司气举试验基地多相流研究室, 湖北 武汉

作者简介: 甘庆明(1977-), 男, 高级工程师, 博士生, 从事采油工程理论与技术研究工作。

Email: ganqm_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2019年1月25日; 录用日期: 2019年3月21日; 发布日期: 2019年4月15日

摘要

针对特低渗透油藏垂直裂缝井的产能预测问题, 基于椭圆型流动物理模型, 考虑启动压力, 引入渗透率变异系数和黏度变异系数, 导出油井产能预测理论公式。用S油田23口油井的实际生产测试资料进行验算, 结果表明, 理论公式的计算值与实际值相对误差达-78.7%。基于实测数据将渗透率变异系数修正为地层变异系数, 新的油井产能预测公式预测相对误差降至-0.9%。

关键词

特低渗透油藏, 垂直裂缝井, 产能预测, 椭圆型流动物理模型, 渗透率变异系数, 黏度变异系数

Copyright © 2019 by author(s), Yangtze University 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

1. 前言

压裂是有效开发特低渗透油藏的常用技术。压裂井产能预测是油井压裂设计和效果预测的重要依据。杨满平[1]、王玉英[2]、宋付权[3]、柴汝宽[4]等都对低渗透油藏油井的产能预测开展了研究, 在考虑应力敏感等因素的基础上提出了产能预测方法, 但这些方法都没有考虑压裂情况。尹洪军等[5]采用椭圆型流动物理模型导出了低渗透油藏压裂井产能预测方法, 但该方法只考虑了启动压力梯度, 没有将应力敏感考虑进去。笔者基于椭圆型流动物理模型, 考虑启动压力, 并引入渗透率变异系数和黏度变异系数, 导出压裂井产能理论预测方法。针对具体油藏, 引入地层变异系数, 导出更符合油田实际的压裂井产能预测方法。

2. 油井产能预测理论公式的导出

假定一口垂直压裂井位于一边水油藏的中心, 油流从地层到井底的流动分成由地层流向裂缝和由裂缝流向井底两部分[6]。油井以定产量 Q 生产一段时间后, 油藏渗流达到稳定。基于椭圆型流动物理模型, 考虑启动压力, 并引入渗透率变异系数和黏度变异系数, 导出油井产能预测理论公式。

$$Q = -h\pi \frac{K_i}{\mu_i} \frac{1}{\alpha_c} \frac{e^{-G\alpha_c R} - e^{-\alpha_c(p_e - p_w)}}{(A_0 - A_1) - G\alpha_c(B_0 - B_1) + \frac{(G\alpha_c)^2}{2}(C_0 - C_1) - \frac{(G\alpha_c)^3}{6}(D_0 - D_1)}$$

其中:

$$\alpha_c = \alpha_K - \alpha_\mu$$

$$A_0 = \frac{1}{2} \ln(L+b)$$

$$B_0 = \frac{1}{4} [(L+b) - (L+b) \ln(L+b)]$$

$$C_0 = \frac{1}{8} \left[\frac{1}{2} (L+b)^2 - 2(L+b)(L+b) + (L+b)^2 \ln(L+b) \right]$$

$$D_0 = \frac{1}{16} \left[\frac{1}{3} (L+b)^3 - \frac{3}{2} (L+b)(L+b)^2 + 3(L+b)^2(L+b) - (L+b)^3 \ln(L+b) \right]$$

$$A_1 = \frac{1}{2} \ln(L+b+2R)$$

$$B_1 = \frac{1}{4} [(L+b+2R) - (L+b) \ln(L+b+2R)]$$

$$C_1 = \frac{1}{8} \left[\frac{1}{2} (L+b+2R)^2 - 2(L+b)(L+b+2R) + (L+b)^2 \ln(L+b+2R) \right]$$

$$D_1 = \frac{1}{16} \left[\frac{1}{3} (L+b+2R)^3 - \frac{3}{2} (L+b)(L+b+2R)^2 + 3(L+b)^2(L+b+2R) - (L+b)^3 \ln(L+b+2R) \right]$$

式中: Q 为油井产量, m^3/d ; G 为启动压力梯度, MPa/m ; α_K 为渗透率变异系数, MPa^{-1} ; α_μ 为原油黏度变异系数, MPa^{-1} ; p_e 、 p_w 分别为供给边界和井底处的压力, MPa ; K_i 为初始渗透率, mD ; μ_i 为初始时刻原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; L 为裂缝半长, m ; b 为裂缝半宽, m ; h 为油层厚度, m ; R 为油井供给半径, m 。

3. 产能预测公式的验证与修正

3.1. 产能预测公式的验证

通过对实际油藏计算结果的对比, 对推导出的低渗透压裂井产能预测公式进行验证。

以 S 油藏为例, 该油藏为特低渗、高饱和岩性油藏, 普遍存在微裂缝。原始地层压力 18.1 MPa, 压力因数 0.86, 地层温度 73.4°C, 气油比 78.6~108.0 m^3/t 。用 S 油藏实际岩心和原油试验数据得出启动压力梯度与初始渗透率的关系如下:

$$G = 0.0622K_i^{-0.914}$$

对 20 个岩心实测的应力敏感试验数据进行回归, 得到渗透率变异系数与原始渗透率的关系如下:

$$\alpha_K = 0.0194K_i^{-0.4472}$$

原油黏度与压力的拟合关系式如下:

$$\mu = 3.9646e^{-0.0606\Delta p}$$

式中: μ 为原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; Δp 为压差, MPa 。

用 23 口井的实测数据进行计算与分析对比, 理论公式的平均计算误差达-78.7%。

3.2. 产能预测方法的修正

渗透率变异系数和黏度变异系数等参数对产量都有影响。一个油层的原油性质基本相同, 黏度和渗透率都会对流度产生影响, 考虑到渗透率变异系数可以将天然裂缝等因素的影响包括其中, 因此选定渗透率变异系数作为修正的基本参数, 修正后的参数称为地层变异系数。

表 1 为 23 口试验井地层变异系数与渗透率变异系数拟合结果对比, 可以看出, 生产数据拟合出的地层变异系数与试验数据拟合出的渗透率变异系数的比值平均值为 5.5。

Table 1. The comparison of matching results between formation variation coefficient and permeability variation coefficient

表 1. 地层变异系数与渗透率变异系数拟合结果对比

序号	井号	初始渗透率/ mD	拟合值/1		地层变异系数与渗透率 变异系数的比值/1
			地层变异系数	渗透率变异系数	
1	S26-26	0.936	0.122	0.019982	6.105379
2	S31-44	0.358	0.09	0.030712	2.93047
3	S22-28 (05)	0.774	0.165	0.021755	7.584504
4	S23-24	1.02	0.06	0.019229	3.120294
5	S25-28	1.17	0.22	0.018085	12.16504
6	S25-31	0.457	0.21	0.027535	7.62662
7	S34-42	0.416	0.11	0.028717	3.830447
8	S31-42	1.46	0.113	0.01638	6.898828
9	S25-34	0.184	0.205	0.041359	4.956541
10	S28-36	0.577	0.125	0.024809	5.038556
11	S29-39	0.409	0.17	0.028936	5.875027
12	S29-30	0.638	0.143	0.023718	6.029067
13	S31-29	0.598	0.15	0.024415	6.143704
14	S31-39	0.848	0.225	0.020884	10.77356
15	S30-44	0.239	0.11	0.036794	2.989582
16	S33-36	0.761	0.038	0.02192	1.733553
17	S22-28 (06)	0.828	0.15	0.021109	7.106123
18	S29-36	0.552	0.2	0.025305	7.903572
19	S32-36	0.796	0.151	0.021484	7.028514
20	S34-42 (07)	0.236	0.13	0.037003	3.51324
21	S31-39 (07)	0.896	0.06	0.020376	2.944569
22	S29-32	1.19	0.002	0.017948	0.111433
23	S31-42 (07)	1.4	0.06	0.01669	3.594992
平均值					5.5

图1是地层变异系数与渗透率变异系数分布图,可以看出地层变异系数的分布范围在0.05~0.25之间,而渗透率变异系数的分布范围均在0.05以下。因此在试验拟合方程的基础上乘以两者之间的倍数平均值5.5,对渗透率变异系数进行修正而得到地层变异系数,以适应生产过程中地层中存在裂缝等问题的实际情况。

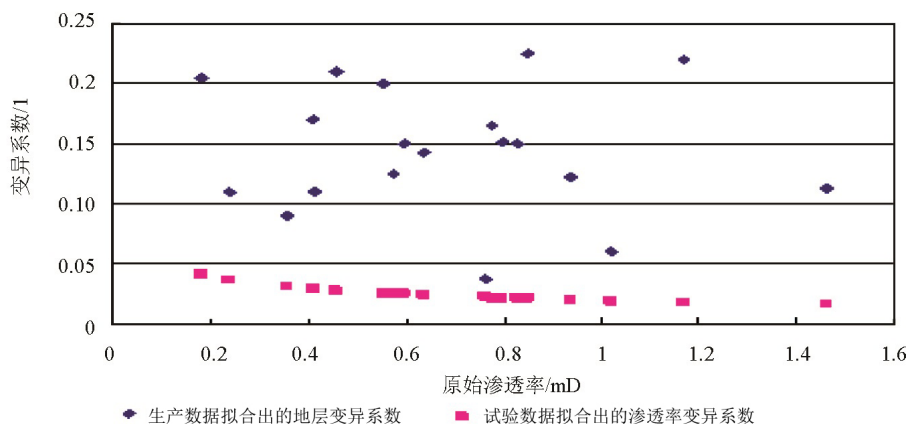


Figure 1. The distribution of formation variation coefficient and permeability variation coefficient
图1. 地层变异系数与渗透率变异系数分布图

修正后的压裂井产能公式的预测相对误差平均值降为-0.9%,均方误差降为2.16,能够满足工程精度要求。

4. 结论

1) 基于椭圆型流动物理模型,考虑启动压力、渗透率变异系数和黏度变异系数,导出压裂井产能预测理论公式。直接将试验得出的渗透率变异系数等参数代入理论公式进行计算,得出的油井产量与实际油井产量的相对误差可达-78.7%。

2) 选定渗透率变异系数作为修正的基本参数,将实际数值代入到产能预测理论公式,拟合出地层变异系数。修正后的压裂井产能预测公式计算误差降至-0.9%。

参考文献

- [1] 杨满平. 低渗透变形介质油藏合理生产压差研究[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(5): 41-43.
- [2] 王玉英, 王晓冬, 王一飞, 等. 变形介质储层油井合理压差及产能分析[J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29(4): 51-54.
- [3] 宋付权. 变形介质低渗透油藏的产能分析[J]. 特种油气藏, 2002, 9(4): 33-35.
- [4] 柴汝宽, 刘月田, 王俊强, 等. 基于两相启动压力梯度和应力敏感的油藏油井产能模型研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2018, 33(3): 44-50.
- [5] 尹洪军, 刘宇, 付春权. 低渗透油藏压裂井产能分析[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(3): 285-287.
- [6] 赵志成. 基于椭圆流模型的变形介质油藏产能研究[J]. 复杂油气藏, 2009, 2(4): 37-39.

[编辑] 帅群

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2471-7185，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org