

低渗透油藏压裂井产能分析

张晓亮¹, 李 娣², 孙君书³, 于荣泽⁴, 宫汝祥⁵, 梁 涛²

1. 中海油研究总院, 北京 100027
2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266555
3. 中化石油勘探开发公司, 北京 100031
4. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
5. 中海油田服务股份有限公司油田生产事业部, 天津 300450

摘要 为了研究启动压力梯度、压力敏感性、人工裂缝导流能力衰减对低渗透油藏压裂井产能的影响,以油藏工程数值计算方法为基础,提出了一种弹性产能变化规律分析方法。以矿场实际数据进行算例分析,并将不同产能影响因素下的预测结果进行对比分析。结果表明:井底流压越低、拟启动压力梯度越小、介质变形系数越小、裂缝导流能力衰减系数越大,初始产量越高,产量递减越快。最后,应用该产能分析方法对实际油井进行产能预测,预测结果与实际生产数据吻合较好,验证了该产能分析方法的正确性。

关键词 低渗透油藏; 拟启动压力梯度; 裂缝导流能力; 产量递减

中图分类号 TE348

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.19.008

Fractured Well Productivity of Low Permeability Reservoir

ZHANG Xiaoliang¹, LI Di², SUN Junshu³, YU Rongze⁴, GONG Ruxiang⁵, LIANG Tao²

1. China National Offshore Oil Corporation Research Institute, Beijing 100027, China
2. Petroleum Engineering College, China University of Petroleum, Qingdao 266555, Shandong Province, China
3. Sinochem Petroleum Exploration & Production, Beijing 100031, China
4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
5. Production Optimization, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300450, China

Abstract A new productivity analysis method for the fractured well in low-permeability reservoir is derived on the basis of reservoir engineering and numerical calculation. The starting pressure gradient, reservoir pressure sensitivity, and the conductivity attenuation of the artificial fractures are all taken into account in the well productivity analysis. A calculation instance was performed and the comprehensive analysis of the predicted result was provided to study the effect of different factors on the well productivity. The result shows that with the decrease of bottom-hole pressure, pseudo-startup pressure gradient, the deformation coefficient, and the increase of oil production in the early stage, the production declines rapidly. At the same time, with the increase of the artificial fracture conductivity attenuation coefficient, the oil production in the early stage also increases and then declines rapidly as well. At last, the productivity analysis method was applied to the field applications. There is a quite good agreement between the predicted result and the actual production data, the fact has verified the correctness of production analysis method.

Keywords low permeability reservoirs; pseudo-startup pressure gradient; fracture conductivity; production decline

0 引言

在中国近几年探明的石油储量中,低渗透油藏所占的比例越来越大^[1]。低渗透油藏初期注水开发比较困难,一般采取

压裂方式。压裂投产后,产能变化规律复杂,不但受到压敏效应和启动压力梯度的影响^[2-3],同时还受地层能量和压裂裂缝导流能力动态衰减^[4-5]的影响。常规分析多是以统计分析为主

收稿日期: 2011-03-31;修回日期: 2011-05-30

作者简介: 张晓亮,工程师,研究方向为油田开发前期设计和低渗透油田开发,电子信箱: zhangxl16@cnoc.com.cn

的递减分析方法,并无实质物理意义。2002年,宋付权等^[6-7]综合考虑启动压力梯度和介质变形的影响,研究了低渗透油藏中直井产量的变化规律。2006年,贾振岐等^[8]通过理论分析得到了低渗透油藏井间的压力分布公式以及油井的产量公式,但对压裂井产能变化规律研究相对较少。2008年,杨勇等^[9-12]研究了低渗透压敏油藏产量递减动态预测方法,将裂缝等效为井的表皮,对压裂井产能预测存在近似。本文考虑启动压力梯度、压力敏感性和压裂裂缝有效期对低渗透油藏弹性开发的影响,提出了低渗透油藏弹性开发产能变化规律的方法,并对影响产能变化规律的影响因素进行分析。该方法对低渗透油田开发方案的制定有一定指导意义。

1 低渗透油藏压裂井产能预测方法

人工裂缝低渗透油藏弹性开发过程是非稳态过程,对于其产能规律的分析可采用逐次稳态替换的方法,因此,首先提出稳态产能的分析方法,并以此为基础分析非稳态产能变化规律。

1.1 稳态产能预测

假定低渗透油藏中心存在一口垂直井,以定产量生产,考虑了变形介质和启动压力梯度的稳定渗流油井径向压力分布为

$$p_e - p = -\frac{1}{\alpha_k} \ln \left[1 - \frac{\alpha_k q \mu}{2\pi K_0 h} e^{\alpha_k G r_e} \left[\ln \frac{r_e}{r} - \alpha_k G (r_e - r) \right] \right] + G (r_e - r) \quad (1)$$

对应产量公式

$$q = \frac{2\pi K_0 h}{\alpha_k \mu} \frac{1 - e^{-\alpha_k [p_i - p_{wf} - G(r_e - r_i)]}}{\ln \left[\frac{r_e}{r_w} - \alpha_k G (r_e - r_w) \right] e^{\alpha_k G r_e}} \quad (2)$$

其中, p_e 为地层边界压力; α_k 为渗透率变化系数; K_0 为初始渗透率; h 为油层厚度; μ 为原油黏度; G 为拟启动压力梯度; r_e 为油藏边界; r 为泄油半径内任一点到井中心的距离; p 为 r 处对应的地层压力; p_{wf} 为井底流压; p_i 为原始地层压力; K_0 为 p_i 下的地层渗透率; r_w 为井半径。

式(2)的预测方法仅适用于低渗透均质油藏。对于人工裂缝井,由于裂缝的存在,低渗透储层在近井区和远井区具有不同的渗流特征^[13]。井筒附近地层由于增产作业激活,具有较高的渗透率。油井径向渗流区域被分割成近井区的中高渗透率区域和远井区的低渗透率区域。根据稳态渗流理论,在低渗透区域,由油井供给半径流入增产激活区(远井区域)的流量为

$$Q = \frac{CK_f h}{\alpha_k \mu} \frac{1 - e^{-\alpha_k [p_i - p_{wf} - G(r_e - r_i)]}}{\ln \left[\frac{r_e}{r_f} - \alpha_k G (r_e - r_f) \right] e^{\alpha_k G r_e}} \quad (3)$$

在中高渗透层,基于达西渗流的平面径向稳定渗流的压力分布,得到近井区域的流量表达式

$$Q_i = \frac{CK_f h (p_i - p_{wf})}{\mu \ln \frac{r_i}{r_w}} \quad (4)$$

根据径向流任意过流断面流量相等,结合式(3)、式(4),

可得

$$\frac{K_i}{\alpha_k} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha_k [p_i - p_{wf} - G(r_e - r_i)]}}{\ln \frac{r_e}{r_f}} = \frac{K_f (p_i - p_{wf})}{\ln \frac{r_i}{r_w}} \quad (5)$$

其中, r_f 为油井增产作业激活折算半径; p_i 为油井增产作业激活区压力; K_f 为增产激活区平均渗透率。

整理式(5)得出

$$b - a e^{\alpha_k p_i + C} = p_f \quad (6)$$

其中, $C = -\alpha_k [p_i - G(r_e - r_i)]$,为单位换算系数,工程中常取 $C =$

$$542.87; a = \frac{1}{\alpha_k C_k} \frac{\ln \frac{r_i}{r_w}}{\ln \frac{r_e}{r_f}}; C_k = \frac{K_f}{K_i}; b = a + p_{wf}。$$

对于任意实例,式(6)可用牛顿迭代法求解。当经过迭代求出压力后,可以将此压力值代入式(2),求取预测产量。

1.2 非稳态产能预测

低渗透油藏弹性开发过程属非稳态过程,它的开发产能变化规律可由逐次稳态替换法确定^[14]。该方法认为:在非稳态流中任一时刻的压力分布和产量都采用对应影响半径的稳态流相关公式确定,只是稳态公式中的 r_e 用 $r(t)$ 代替。影响半径随时间的推移逐渐增大,但受启动压力梯度的影响,其压力波传播过程及影响半径随时间的变化规律与常规油藏差别很大,只有当影响半径处的压力梯度达到启动压力梯度时,压降漏斗才会继续向外扩展。同时,随着生产时间 T 的增加,压裂裂缝导流能力 C_{fd} 逐渐衰减,可通过实验综合确定。本文考虑为指数衰减,衰减模型为

$$C_{fd} = \frac{K_f e^{-\alpha d}}{x_f K_i} \quad (7)$$

其中, α 为导流能力衰减系数; d 为裂缝宽; x_f 为裂缝半长。

产能规律求解步骤如下:

(1) 将单井泄油范围按柱坐标径向划分 N 个网格,每个网格尺寸 Δr ,给定初始影响半径 $r_0 (r_0 > r_f)$ 。

(2) 由式(7)确定人工裂缝激活区渗透率,对式(6)利用牛顿迭代方法求出压力 p_i ,进而通过式(3)或式(4)确定该影响半径对应下产量 q 。

(3) 生产 Δt 后,泄油范围内平均地层压力下降值为

$$\Delta p_i = \frac{q \Delta t}{\pi r_i^2 h C_i} \quad (8)$$

其中, C_i 为综合压缩系数。

平均地层压力的下降必将导致边界压力的下降,根据稳态流平均地层压力与边界地层压力的关系,对应边界地层压力的下降值为

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \cdot \frac{2 \ln \frac{R_e}{R_w}}{2 \ln \frac{R_e}{R_w} - 1} \quad (9)$$

其中, R_e 为供油半径; R_w 为井径,影响半径向外扩展的条件是影响半径处压力梯度达到拟启动压力梯度,即

$$\frac{\Delta p_2}{r} = G \quad (10)$$

联立式(8)—式(10)可求得 Δt , 并累计 Δt 为生产时间 T ;

(4) 影响半径扩展至 $r+\Delta r$, 重复步骤(1)一(3), 直至 T 达到预测时间或日产量小于某生产界限。

2 算例分析

某油田低渗透油藏区块的基础参数如表 1 所示,应用本文建立的方法,在其他参数不变的条件下,分别改变井底流压、拟启动压力梯度、介质变形系数和裂缝导流能力对产能变化规律的影响进行研究分析。

表 1 油藏基础参数表

Table 1 Table of oil reservoir parameters

参数	取值	参数	取值
$\mu/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	1.5	x_t/m	65
体积系数 B_0	1.2	d/m	0.01
$K/\mu\text{m}^2$	0.01	$G/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	0.01
h/m	10.0	p_{wf}/MPa	25
R_e/m	500	介质变形系数	0.02
p_i/MPa	50	裂缝渗透率初值/ μm^2	5
R_w/m	0.1	裂缝渗透率衰减系数	0.002
C_i/MPa^{-1}	5×10^{-4}	原油密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	800

2.1 井底流压

图 1 为不同井底流压对应的产量递减规律,可以看出,在开发初期油井产量递减较快,中后期变化相对趋于平稳;其他条件不变的情况下,改变井底流压对产量变化影响较大,井底流压越小,油井的产量相对越高;井底流压对油井产能变化规律趋势影响不大。

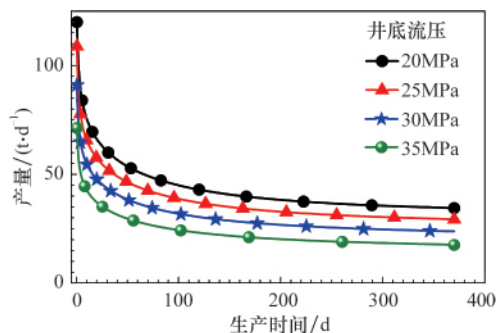


图 1 井底流压对产量递减规律的影响
Fig. 1 Impact of bottom-hole pressure on the oil production decline

2.2 拟启动压力梯度

图2为拟启动压力梯度不同时对应的产量递减规律,可以看出,拟启动压力梯度越小,初始产量越高,产量下降也较慢;反之,拟启动压力梯度越大,初始产量越低,产量下降也较快。

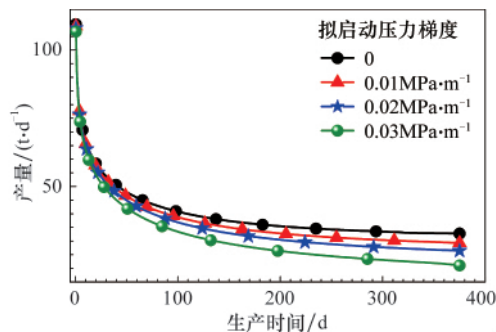


图 2 拟启动压力梯度对产量递减规律的影响

Fig. 2 Impact of starting pressure gradient on the oil production decline

2.3 介质变形系数

图 3 为不同介质变形系数对应的产量变化规律,可以看出,介质变形系数越大,产量越低,递减越慢。这是因为压敏地层投入开发后,井眼附近的压力下降很快,相应的渗透率下降也很快,近井地带的渗流阻力急剧增加,导致产量急剧减小。

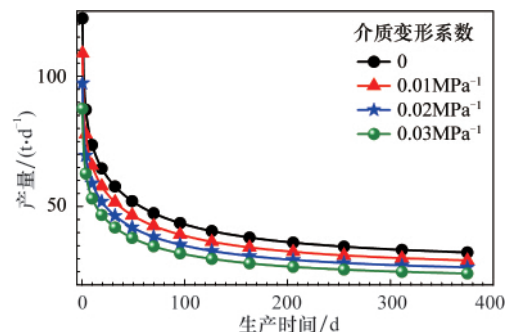


图 3 介质变形系数对产量递减规律的影响

Fig. 3 Impact of distortion coefficient on the oil production decline

2.4 裂缝导流能力

图4为不同导流能力衰减系数对应的产量递减规律,可以看出,不同的裂缝导流能力对油井产量的影响较大,裂缝导流能力衰减系数越小,则地层产量下降越慢;当裂缝导流能力失效后,产量保持在一个较低的水平。

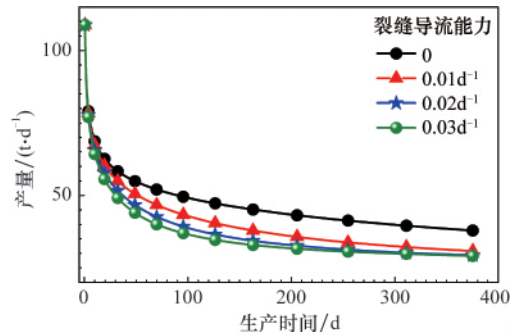


图 4 裂缝导流能力衰减系数对产量递减规律的影响

Fig. 4 Impact of fracture conductivity on oil production decline

3 实例应用

图 5 所示为一口生产井实际生产数据与预测数据对比资料,该井一直处于弹性开发阶段,应用本文建立的方法对其产能变化规律进行分析,参数如表 1 所示。由图 5 可知,拟合效果较好,验证了本方法的正确性。同时,可通过该方法对未来一段时间内的生产动态进行预测。

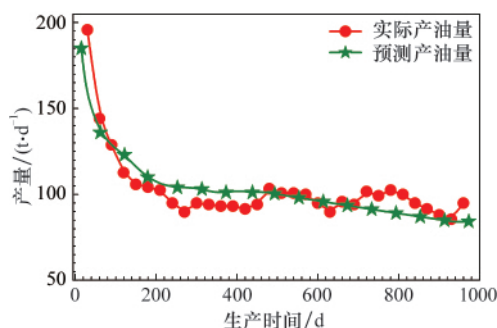


图 5 A 井产量拟合

Fig. 5 Oil production fitting of well A

4 结论

(1) 考虑低渗透油藏的渗流特征和人工压裂缝导流能力逐渐衰减,建立了产能变化规律的分析方法。

(2) 实际应用表明,井底流压越低、拟启动压力梯度越小、介质变形系数越小、裂缝导流能力衰减系数越大,初始产量越高,产量递减越快,与低渗透油藏实际开发动态相吻合。

(3) 本文建立的分析方法较常规递减分析方法具有物理内涵,考虑了各种因素,适用于产能规律的分析 and 动态预测。

参考文献 (References)

- [1] 才汝成, 李晓清. 低渗透油藏开发新技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2003: 9-14, 87-95.
Cai Rucheng, Li Xiaqing. New technology of low permeability reservoir development [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2003: 9-14, 87-95.
- [2] 王江, 王玉英. 异常、高压特低渗透油藏储层压力敏感性研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 10(22): 28-31.
Wang Jiang, Wang Yuying. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 10(22): 28-31.
- [3] 李松泉, 程林松, 李秀生, 等. 特低渗透油藏非线性渗流模型 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 606-612.
Li Songquan, Cheng Linsong, Li Xiusheng, et al. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 606-612.
- [4] 李生, 李霞, 曾志林, 等. 低渗透油藏垂直裂缝井产能评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1): 54-56.
Li Sheng, Li Xia, Zeng Zhilin, et al. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(1): 54-56.
- [5] 任勇, 郭建春, 赵金洲, 等. 压裂井裂缝导流能力研究 [J]. 河南石油, 2005, 19(1): 46-49.
Ren Yong, Guo Jianchun, Zhao Jinzhou, et al. Henan Petroleum, 2005, 19(1): 46-49.

- [6] 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.
Song Fuquan. Special Oil & Gas Reservoirs, 2002, 9(4): 33-35.
- [7] 宋付权, 李画眉. 变形介质油藏中的不稳定渗流 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(1): 93-98.
Song Fuquan, Li Huamei. Journal of Hydrodynamics: Ser A, 2007, 22(1): 93-98.
- [8] 贾振岐, 王志平, 赵辉. 低渗透油藏非线性渗流下的油井产能[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(1): 101-103.
Jia Zhenqi, Wang Zhiping, Zhao Hui. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(1): 101-103.
- [9] 杨勇. 低渗透压敏油藏产量递减动态预测方法研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(3): 64-67.
Yang Yong. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(3): 64-67.
- [10] 陈明强, 蒲春生, 赵继勇, 等. 变形介质低渗透油藏油井真实产能计算与分析[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2006, 21(2): 18-22.
Chen Mingqiang, Pu Chunsheng, Zhao Jiyong, et al. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2006, 21(2): 18-22.
- [11] 郑维师, 刘易非. 低渗透砂岩气藏中压敏效应对产能的影响[J]. 天然气工业, 2004, 24(12): 113-115.
Zheng Weishi, Liu Yifei. Natural Gas Industry, 2004, 24(12): 113-115.
- [12] 李转红, 任晓娟. 特低渗透层应力敏感性对油井产量的影响[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2005, 20(4): 60-64.
Li Zhuanhong, Ren Xiaojuan. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2005, 20(4): 60-64.
- [13] 郑祥克, 陶永建, 门承全, 等. 低速非达西渗流产能方程的建立[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(2): 158-160.
Zheng Xiangke, Tao Yongjian, Men Chengquan, et al. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(2): 158-160.
- [14] 姜瑞忠, 张晓亮. 低渗透油藏弹性采收率计算方法研究[J]. 特种油气藏, 2008, 15(4): 70-72.
Jiang Ruizhong, Zhang Xiaoliang. Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, 15(4): 70-72.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。