

文章编号: 1006 - 6535(2006)05 - 0056 - 03

裂缝性底水油藏含水率及产量变化规律研究

吕爱民, 姚 军

(中国石油大学, 山东 东营 257061)

摘要: 将部分打开底水油藏内的流动视为上部平面径向流动和下部垂直单向流动的组合, 利用上部的平面流动确定地层内压力分布的差异, 而在下部流动中考虑地层内的压力差异和重力作用, 导出了部分打开裂缝性底水油藏的水相分流量方程, 可准确描述不同生产压差下的含水变化规律。水相分流量方程结合无因次采油(液)指数便可对油藏的产量变化规律进行预测。该理论的建立为底水油藏开发中的动态分析和预测提供了依据。

关键词: 裂缝性底水油藏; 含水率; 产量; 变化规律; 分流量公式; 产量预测

中图分类号: TE349 **文献标识码:** A

引 言

目前对底水油藏的临界产量、见水时间方面的研究较多^[1], 而对其含水及产量变化规律的研究相对较少, 对含水和产量的预测主要根据水淹厚度来粗略估算^[2,3], 远远不能满足现场的要求。

1 底水油藏描述及压力分布

部分打开的圆形底水油藏如图 1 所示。油藏顶部及四周封闭, 打开厚度为 b , 油井半径为 R_w , 油藏半径为 R_c , 油藏避水高度为 H 。在油井以产量 Q 生产时, 该油藏内的流动可视为图中 2 种流动的组合, 即油藏底部到虚线位置垂直向上的线性流动和虚线以上部位由油藏四周到井壁的平面径向流动。

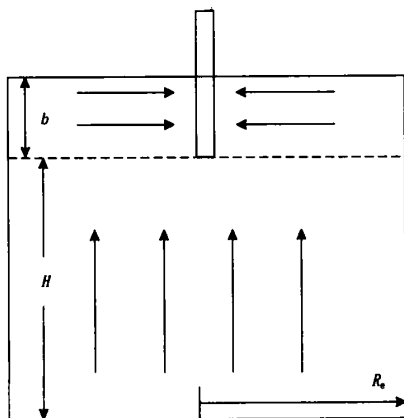


图 1 部分打开的底水油藏流动示意图

Fig. 1 Sketch of fluid flow in some perforated reservoirs with bottom water

对于四周封闭的平面径向流动, 其压力分布公式和产量公式可分别由式(1)、(2)表示^[4]:

$$Q = \frac{2 K_h b (p_e - p_w)}{\mu \left(\ln \frac{R_c}{R_w} - \frac{1}{2} \right)} \quad (1)$$

$$p(r) = p_w + \frac{Q\mu}{2 K_h b} \left(\ln \frac{r}{R_w} - \frac{r^2}{2R_c^2} \right) \quad (2)$$

式中: p_e 、 p_w 、 $p(r)$ 分别为油藏的边缘压力、井底压力和 r 处的压力, 10^{-1} MPa; Q 为油井产量, cm^3/s ; R_c 、 R_w 、 r 分别为油藏半径、井的半径及距井轴的径向距离, cm; K_h 为油藏水平方向的渗透率, μm^2 ; μ 为地下流体粘度, mPa·s。

将式(1)代入式(2), 得上部平面径向流动区域距离井轴 r 处的压力表达式:

$$p(r) = p_w + \frac{p_e - p_w}{\ln \frac{R_c}{R_w} - \frac{1}{2}} \left(\ln \frac{r}{R_w} - \frac{r^2}{2R_c^2} \right) \quad (3)$$

由式(3)可见, 在油藏上部平面径向流动区域各点的压力随井轴距离 r 的变化而变化。若将原始的油水界面视为等压边界, 则在油藏下部渗流区域内不同 r 处的生产压差不同, 其压差可由式(4)表示:

$$p(r) = p_{owi} - p(r) = p_{owi} - p_w - \frac{p_e - p_w}{\ln \frac{R_c}{R_w} - \frac{1}{2}} \left(\ln \frac{r}{R_w} - \frac{r^2}{2R_c^2} \right) \quad (4)$$

式中: p_{owi} 为油水界面处的压力, 10^{-1} MPa。

收稿日期: 2006 - 03 - 15; 改回日期: 2006 - 06 - 09

基金项目: 本文受国家 863 项目“海上油田矢量井网研究”资助(项目编号: 2004AA616170)

作者简介: 吕爱民(1970 -), 男, 讲师, 博士, 1994 年毕业于石油大学(华东)油藏工程专业, 现主要从事油气田开发方面的教学和研究工作。

2 裂缝性底水油藏油水运动方程

对于裂缝性油藏而言,毛管力的作用较小,一般可忽略。而对于块状底水油藏,则必须考虑重力的作用。不可压缩、粘度不变和垂直一维的情况,在忽略毛管力作用而只考虑重力作用时两相渗流的运动方程为:

$$v_w = - \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{-p}{H} - \frac{w}{1000} \right) \quad (5)$$

$$v_o = - \frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} \left(\frac{-p}{H} - \frac{o}{1000} \right) \quad (6)$$

式中: K_v 为油藏的垂向渗透率, μm^2 ; p 为底水油藏避水段内垂向上的生产压差, 10^{-1}MPa ; o 、 w 分别为油藏条件下油、水的相对密度。

3 裂缝性底水油藏水相分流量方程的导出

在图 1 的下部渗流区域 r 处取与井轴同心的圆环作为渗流微元,则圆环面积即微元的渗流面积 ($dA = 2\pi r dr$),综合考虑式(4)和式(6),可得总油相流量为:

$$Q_o = \frac{2}{\mu_o} \frac{K_v K_{ro}}{R_w} \left[\frac{p_{owi} - p_w}{H} - \frac{p_e - p_w}{H \left(\ln \frac{R_e}{R_w} - \frac{1}{2} \right)} \right] \left(\ln \frac{r}{R_w} - \frac{r^2}{2R_e^2} \right) - \frac{o}{1000} \pi r dr \quad (7)$$

对式(7)积分,并考虑到 $R_e \gg R_w$,忽略无穷小项,则油相流量为:

$$Q_o = \frac{R_e^2 K_v K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{p_{owi} - p_w}{H} - \frac{o}{1000} + \frac{p_e - p_w}{H} \cdot \frac{\left(\ln \frac{R_w}{R_e} + \frac{3}{4} \right)}{\left(\ln \frac{R_e}{R_w} + \frac{1}{2} \right)} \right] \quad (8)$$

同理,可得水相流量为:

$$Q_w = \frac{R_e^2 K_v K_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{p_{owi} - p_w}{H} - \frac{w}{1000} + \frac{p_e - p_w}{H} \cdot \frac{\left(\ln \frac{R_w}{R_e} + \frac{3}{4} \right)}{\left(\ln \frac{R_e}{R_w} + \frac{1}{2} \right)} \right] \quad (9)$$

定义油藏中水的分流量方程为:

$$f_w = \frac{Q_w}{Q_w + Q_o} \quad (10)$$

将式(8)、(9)代入式(10),整理得:

$$f_w = \frac{K_{rw}}{K_{rw} + \frac{1}{\mu_r} K_{ro}} \quad (11)$$

其中

$$= 1 + \frac{\left(\frac{w}{1000} - \frac{o}{1000} \right) H}{100} \quad (12)$$

$$p_1 = \frac{w}{100} H - p \cdot \frac{\ln \frac{R_e}{R_w} - 0.75}{\ln \frac{R_e}{R_w} - 0.5}$$

$$p_1 = p_{owi} - p_w \quad (13)$$

$$p = p_e - p_w \quad (14)$$

由于将原始的油水界面视为等压边界,则 p_1 与 p 之间的关系为:

$$p_1 = p + \frac{H}{100} \quad (15)$$

式中: α 为油藏的压力系数。

将式(15)代入式(12),整理得:

$$= 1 + \frac{\left(\frac{w}{1000} - \frac{o}{1000} \right) H}{\frac{25}{\ln \frac{R_e}{R_w} - 0.5} p - \left(\frac{w}{1000} - \frac{o}{1000} \right) H} \quad (16)$$

4 给定生产压差下的产量变化规律

若采用任意压差生产,则可根据相渗关系和水的分流量方程做出无因次的采油、采液指数曲线。无因次的采油、采液指数的计算公式如下^[6]:

$$J_o(f_w) = \frac{K_{ro}(S_w)}{K_{ro}(S_{wi})} \quad (17)$$

$$J_1(f_w) = \frac{J_o(f_w)}{1 - f_w} = \frac{K_{ro}(S_w)}{K_{ro}(S_{wi})(1 - f_w)} \quad (18)$$

由于 f_w 的变化规律随生产压差的不同而异,因此无因次采液指数也随生产压差的不同而呈现不同的规律。根据式(1)确定的压差 p 下的初始产油量 Q_{oi} ,进而可确定以压差 p 生产时不同含水率下的产油量及产液量:

$$Q_o(f_w) = Q_{oi} J_o(f_w) \quad (19)$$

$$Q_1(f_w) = Q_{oi} J_1(f_w) \quad (20)$$

5 计算实例

塔河油田 4 区为典型的裂缝性底水油藏,地层水为高矿化度卤水,地层压力系数为 1.117 7。其

S48 井为一口部分打开井,相应的地层及流体参数 见表 1,相渗曲线见图 2。

表 1 塔河油田 4 区 S48 井参数

Tab. 1 Parameters of Well S48 in the 4th area of Tahe Oilfield

油层厚度 /m	钻开厚度 /m	水平渗透率 / $10^{-3}m^2$	地层原油粘度 /mPa·s	地层水粘度 /mPa·s	地层水密度 / (g/cm^3)	地层原油密度 / (g/cm^3)	泄油半径 /m	油井半径 /m
100	7.0	3.55	21.7	0.64	1.154	0.8604	1000	0.0746

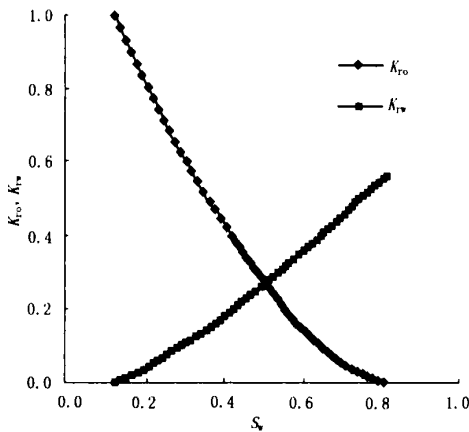


图 2 塔河油田 4 区相对渗透率曲线

Fig. 2 Relative permeability in the 4th area of Tahe Oilfield

由(16)式可计算得到不同生产压差下的值,将其代入式(11)便可利用相对渗透率曲线计算水的分流量曲线。塔河油田 4 区 S48 井不同生产压差下的分流量曲线见图 3。

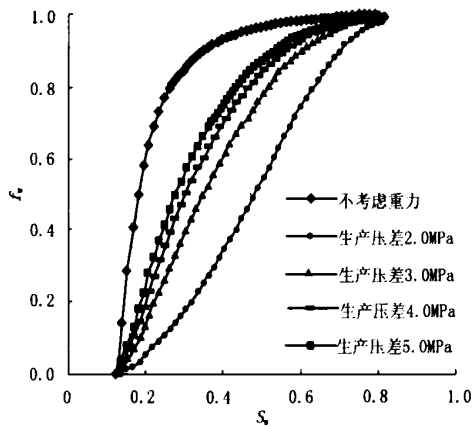


图 3 塔河油田 4 区 S48 井不同生产压差下的分流量曲线
Fig. 3 Fractional flow curve under different producing pressure differential of Well S48 in the 4th area of Tahe Oilfield

由图 3 可见,在底水油藏的开发中重力有利于改善开发效果,且生产压差越小,含水上升越平缓,相对应的开发效果越好。

由式(17)、(18)可计算出不同生产压差不同含水条件下的无因次采油(液)指数,塔河油田 4 区 S48 井不同生产压差下的无因次采油(液)指数曲

线见图 4。由图 4 可见,在不考虑重力时,随着含水的上升,无因次采油指数下降,无因次采液指数快速上升。考虑重力影响时,情况变化较大:无因次采液指数出现先降后升的现象,且压差越大,无因次采液指数初期下降幅度越小,后期上升幅度越大;在生产压差为 2 MPa 时,随着含水的上升,不但无因次采油指数下降,而且无因次采液指数也始终低于初始值。这一规律与塔河油田 4 区随含水上升,产油量和产液量均出现递减的生产实际非常吻合。

得到不同生产压差下的无因次采油(液)指数曲线后,可应用式(19)、(20)较为容易地预测油田的产油量和产液量,其变化规律与该压差下无因次采油(液)指数的变化规律一致,此不赘述。

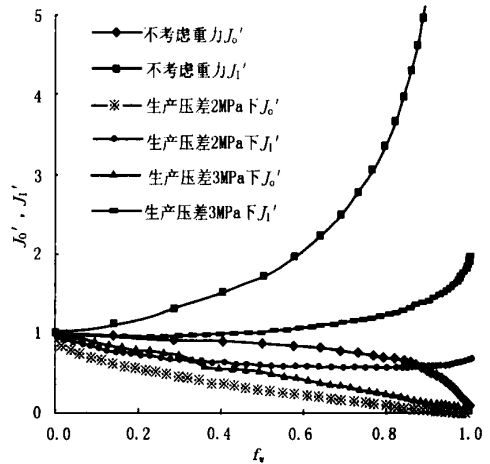


图 4 S48 井不同生产压差下的无因次采油(液)指数曲线
Fig. 4 Dimensionless PI curve of Well S48 under different producing pressure differential

6 结 论

(1) 在底水油藏的开发中重力有利于改善开发效果,且生产压差越小,含水上升越平缓,相对应的开发效果越好。

(2) 底水驱油藏无因次采液指数均出现先后升的现象,且压差越大,无因次采液指数初期下降幅度越小,后期上升幅度越大。(下转第 61 页)

3 算例分析

某压裂气井,裂缝半长为 106.7 m,储层原始有效渗透率为 $0.75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,地下气藏温度为 364.87 K,井距为 1 200 m,原始气藏压力为 27.41 MPa,气藏有效厚度为 7.7 m。渗透率模数取 $0.4 \times 10^{-4} \text{ mPa} \cdot \text{s}/\text{MPa}^2$,拟启动压力梯度取 $8 \text{ MPa}^2/\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。该井压后系统试井得到的无阻流量为 $11.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而计算得无阻流量为 $11.12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,误差为 5.8%。

4 结论

(1) 根据扰动椭圆的概念和等价的发展矩形的思想,推导了考虑拟启动压力梯度和介质变形影响的低渗透气藏垂直裂缝井产能公式,绘制并分析了产能理论曲线。

(2) 通过分析可知,启动压力梯度、渗透率模数以及压裂井的裂缝半长均对产能存在不同程度的影响,并且拟启动压力梯度越大,渗透率模数越大和裂缝半长越小,气井的产能越小,因此,在对低渗透气藏压裂井合理配产时,必须考虑启动压力梯度以及介质变形的影响。

参考文献:

- [1] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999:272~278.
- [2] 蒋廷学,单文文,杨艳丽. 垂直裂缝井稳态产能的计算

- [J]. 石油勘探与开发,2001,28(2):61~63.
- [3] 汪永利,蒋廷学,曾斌. 气井压裂后稳态产能的计算[J]. 石油学报,2003,24(4):65~68.
- [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.
- [5] 尹洪军,刘宇,付春权. 低渗透油藏压裂井产能分析[J]. 特种油气藏,2005,12(2):55~56.
- [6] 杨正明,张松,张训华,等. 气井压后稳态产能公式和压裂数值模拟研究[J]. 天然气工业,2003,23(4):74~76.
- [7] 郭建春,罗天雨,赵金洲,等. 气井压后稳态产能模型及求取无阻流量的变系数一点法[J]. 特种油气藏,2005,12(2):52~54.
- [8] 蒋廷学,李安启,姜东. 考虑井筒流动的垂直裂缝井稳态产能计算模型[J]. 石油钻采工艺,2001,23(4):50~53.
- [9] 宋军政,郭建春. 计算气井压后产能新方法的应用研究[J]. 钻采工艺,2005,28(5):47~49.
- [10] 岳建伟,段永刚,青绍学,等. 含多条垂直裂缝的水平压裂气井产能研究[J]. 天然气工业,2004,24(10):102~104.
- [11] 邓英尔,刘慈群,王允诚. 垂直裂缝井两相非达西椭圆渗流特征线解、差分解及开发指标计算方法[J]. 石油勘探与开发,2000,27(1):60~63.
- [12] 同济大学应用数学系主编. 高等数学[M]. 北京:高等教育出版社,2002:276~278.

编辑 姜 岭

(上接第 58 页)

(3) 底水驱油藏在一定压差下生产,随着含水的上升,可能出现无因次采液指数低于初始值的情况。

参考文献:

- [1] 黄炳光,刘蜀知. 实用油藏工程与动态分析方法[M]. 北京:石油工业出版社,1998:190~203.
- [2] 姜汉桥,姚军,姜瑞忠. 油藏工程原理与方法[M]. 东

- 营:石油大学出版社,2003:76~77.
- [3] 桓冠仁,陈素珍. 灰岩底水油田油水界面及产量预测[A]. 中国石油学会编. 碳酸盐岩油气田开发[C]. 北京:石油工业出版社,1988:61~63.
- [4] 张建国,雷光伦,张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营:石油大学出版社,1998:101~102.
- [5] 才汝成,李阳,孙焕泉. 油气藏工程方法与应用[M]. 东营:石油大学出版社,2002:150~151.

编辑 姜 岭

Change of water cut and oil production in fractured reservoir with bottom water

LU Ai - min , YAO Jun

(*China University of Petroleum , Dongying , Shandong 257061 , China*)

Abstract : Fluid flow in partially perforated reservoir with bottom water is regarded as the combination of planar radial flow in the upper part and vertical unflux in the lower part. Water fractional flow equation of partially perforated , fractured reservoir with bottom water has been derived by using the difference of pressure distribution determined by upper planar flow and by considering pressure difference and action of gravity in lower flow. This equation can accurately describe the change of water cut under different producing pressure differential. Oil production can be predicted by combination of water fractional flow equation and dimensionless productivity index. This provides basis for performance analysis and prediction in development of reservoirs with bottom water.

Key words : fractured reservoir with bottom water ; water cut ; production ; fractional flow equation ; production prediction

Productivity analysis of fractured well in low permeability gas reservoir

HE Ying - fu1 , XU Lian - yu2 , LU Wan - yi3 , YANG Zheng - Ming1 , HAO Ming - qiang1

(1. *Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Langfang , Hebei 065007 , China* ; 2. *Daqing Oilfield Co. , Ltd. , PetroChina , Daqing , Heilongjiang 163712 , China* ; 3. *Huabei Oilfield Company , PetroChina , Renqiu , Hebei 062552 , China*)

Abstract : On the basis that the permeability of low permeability gas reservoirs shows as an exponential function along with pseudopressure , the productivity calculation method for wells with vertical fractures has been studied according to the concept of disturbed ellipse and the thought of equivalent developing rectangle with consideration of threshold pressure gradient. Theoretical productivity curve is drawn and analyzed. The result shows that permeability modulus , threshold pressure and fracture length all have effect on the productivity of fractured gas well. The higher the permeability modulus , the threshold pressure and the shorter the fractures are , the lower the productivity of gas well is.

Key words : low permeability gas reservoir ; deformation medium ; threshold pressure ; vertical fracture well ; productivity analysis

Development practice and understanding of the shallow hard- to - recover heavy oil reserves in Shengtuo Oilfield

GUO Long^{1,2}

(1. *China University of Petroleum , Dongying , Shandong 257061 , China* ;

2. *Shengli Petroleum Administration Bureau , SINOPEC , Dongying , Shandong 257002 , China*)

Abstract : Reservoirs in Dongying formation of Shengtuo Oilfield produce heavy oil , the productivity is low and sand production is serious. Development practices including natural energy depletion , waterflooding , nitrogen foam injection and cyclic steam stimulation have been carried out in accordance with differences in oil property , petrophysical property , reservoir distribution , energy state , and water breakthrough in different units on the basis of process technology breakthrough. The effectiveness is notable. These contribute to understanding and experience in developing such hard - to - recover reserves.

Key words : shallow heavy oil reservoir ; hard - to - recover reserves ; development practice ; evaluation result ; Shengtuo Oilfield

Calculation method of relative permeability curve in low permeability reservoir

RAN Li , ZHANGLie - hui , ZHOU Ming

(*Southwest Petroleum University , Chengdu , Sichuan 610500 , China*)

Abstract : On the basis of percolation mechanism analysis for low permeability reservoir , average water cut has been obtained through analyzing the impact of starting pressure gradient on percolation , and thus matched relative permeability curve. This is a new method which obtains relative permeability curve through production data (not only relative permeability , but also the ratio of relative permeability) . The calculation result is reasonable and practical.

Key words : low permeability reservoir ; percolation ; water cut ; relative permeability curve ; calculation method