

变形介质边水稠油油藏见水时间预测方法

余 洋¹ 曹 杰²

1. 中国石化河南油田新疆采油厂, 新疆 奎屯 833200;
2. 中国石化河南油田采油二厂, 河南 南阳 473132

摘 要:世界上稠油资源极为丰富,有很大部分符合幂律型流体特征,且油藏具有充足的边水能量。而在稠油油藏中,有部分储层岩石表现出明显的变形介质特征。边水舌进是变形介质边水稠油油藏开发过程中的一个重要问题,准确预测其中油井的见水时间对实际生产具有一定的指导意义。基于油水两相渗流理论,综合考虑介质变形以及稠油幂律特征的影响,推导出变形介质边水稠油油藏见水时间的预测公式,并进行了实例及影响因素分析。结果表明,利用该公式进行变形介质边水稠油油藏见水时间的预测是可行的,对油藏工程设计和理论研究具有一定的指导意义。

关键词:稠油;变形介质;幂律特征;边水;见水时间

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2018.05.015

Method for Estimating Water Breakthrough Time in Heavy Oil Reservoir with Deformed Media and Edge-Water

Yu Yang¹, Cao Jie²

1. Xinjiang Oil Production Plant of Henan Oilfield, Sinopec, Kuitun, Xinjiang, 833200, China;
2. No. 2 Oil Production Plant of Henan Oilfield, Sinopec, Nanyang, Henan, 473132, China

Abstract: The earth is abundant in heavy oil resources. Most of it presents power law feature and oil reservoir is characterized by active edge water. Moreover, rock deformation is evident in some above mentioned heavy oil reservoirs. Edge-water tonguing is an important issue in the development of heavy oil reservoirs with deformed media and edge water. Accurately estimating water breakthrough time is helpful to the practical production. Based on the theory of fluids flow in porous media, a formula of estimating water breakthrough time which includes the effect of deformed media and power law feature is deduced. Then the real case and relative influential factors are analyzed. Results show that using this formula for the prediction of water breakthrough time of vertical well in heavy oil reservoir with deformed media and edge water is feasible. And this method is also useful for oil reservoir engineering design and the theoretical study of such kind of reservoirs.

Keywords: Heavy oil; Deformed media; Power law feature; Edge water; Water breakthrough time

收稿日期:2018-02-28

基金项目:国家科技重大专项“低渗-超低渗油藏提高储量动用关键工艺技术”(2017 ZX 05013-005)

作者简介:余 洋(1992-),男,河南南阳人,助理工程师,硕士,主要从事油气田开发方面研究。

0 前言

在边底水油气藏的开发过程中,存在着底水锥进和边水舌进的问题,一旦生产井见水,含水可能会急剧上升,严重影响到生产效果,因此有必要准确预测生产井的见水时间,及时调整生产措施。目前针对底水气藏^[1-3]、底水油藏^[4-7]、边水气藏^[8-10]中生产井见水时间的研究较多,而针对边水油藏中油井见水时间的研究相对较少^[11],尤其是变形介质边水稠油油藏。对于变形介质边水稠油油藏来说,油水两相在地下的渗流不符合常规的线性达西定律,需要考虑介质变形以及稠油渗流特征的影响。在稠油油藏中,幂律流体型稠油油藏是非常重要的一类^[12-17],为此,基于油水两相渗流理论,综合考虑介质变形以及幂律特征的影响,推导出一种变形介质边水稠油油藏见水时间的预测公式,并进行了实例分析与影响因素分析,对现场生产具有一定的指导作用。

1 模型建立及公式推导

某一变形介质边水稠油油藏见图1,其中一口生产油井为B井,原始油水边界近似为一直线,且原始油水边界与B井相距 a ,若B井开始生产,则油水分界面开始向井底移动。假设在原始油水边界上有一水质点,以平面径向流进行流动,在时间 t 后渗流到A点,A点与B井间的距离记为 r_a 。为简化推导过程且满足物理变化过程,假设如下:

- 1) 储集层水平、均质等厚且各向同性。
- 2) 水驱油过程为活塞式驱替。
- 3) 忽略毛管力及重力的影响。
- 4) 油相渗流考虑介质变形及幂律特征的影响,水相渗流考虑介质变形的影响。

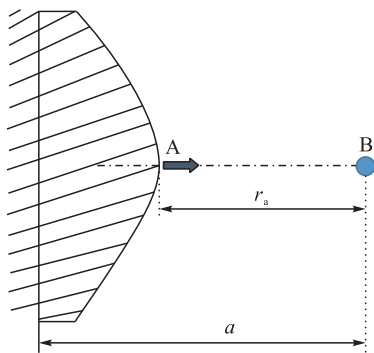


图1 变形介质边水稠油油藏中直井生产示意图

对于变形介质边水稠油油藏来说,介质变形对渗透率的影响可以用式(1)表示^[18]:

$$K = K_i e^{-\alpha\phi(p_i - p)} \quad (1)$$

式中: K 为渗透率, μm^2 ; K_i 为初始渗透率, μm^2 ; α 为介质变形系数, MPa^{-1} ; ϕ 为孔隙度; p_i 为初始地层压力,MPa; p 为当前压力,MPa。

基于式(1),参考前人应用的考虑稠油幂律特征的流体运动方程^[19-20],推导出幂律流体型变形介质稠油油藏中流体的运动方程为:

$$\nu = \frac{K_i}{\mu_b} e^{-\frac{\alpha\phi(n+1)}{2}(p_i - p)} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2)$$

式中: ν 为渗流速度, m/s ; μ_b 为幂律流体的视黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; n 为幂律指数; r 为距离, m 。

式(2)中

$$\mu_b = F_i \nu^{n-1} \quad (3)$$

$$F_i = \frac{C}{12} \left(9 + \frac{3}{n}\right)^n (1.5 \times 10^5 K_i \phi)^{\frac{1-n}{2}} \quad (4)$$

式中: F_i 为幂律流体的基准黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; C 为稠度系数, $\text{mPa} \cdot \text{s}^n$ 。

稳态渗流时,平面径向渗流方程为:

$$\left(\frac{Q}{2\pi h}\right)^n r^{-n} = \frac{K_i}{F_i} e^{-\frac{\alpha\phi(n+1)}{2}(p_i - p)} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5)$$

式中: Q 为油井产量, m^3/d ; h 为油层厚度, m 。

令

$$H = e^{-\frac{\alpha\phi(n+1)}{2}(p_i - p)} \quad (6)$$

$$A = \frac{\alpha\phi(n+1)}{2} \left(\frac{Q}{2\pi h}\right)^n \frac{F_i}{K_i} \quad (7)$$

则式(5)可变换为如下形式:

$$\frac{A}{r^n} = \frac{\partial H}{\partial r} \quad (8)$$

利用分离变量法,对式(8)从供给边界 r_e 处到当前位置 r 处积分可得:

$$H = 1 + \frac{A}{1-n} (r^{1-n} - r_e^{1-n}) \quad (9)$$

将式(6)代入式(9),便可求得地层中距离B井为 r 处的压力方程为:

$$p = p_i + \frac{2}{\alpha\phi(n+1)} \ln \left[1 + \frac{A}{1-n} (r^{1-n} - r_e^{1-n}) \right] \quad (10)$$

对于本文所建立的模型,在边水推进的过程中,油水两相的运动方程分别为:

$$\nu_o^n = \frac{K_o}{F_i} e^{-\frac{\alpha\phi(n+1)}{2}(p_i - p_o)} \frac{\partial p_o}{\partial r} \quad (11)$$

$$\nu_w = \frac{K_w}{\mu_w} e^{-\alpha\phi(p_i - p_w)} \frac{\partial p_w}{\partial r} \quad (12)$$

式中: ν_o 为油相渗流速度, m/s ; ν_w 为水相渗流速度, m/s ; K_o 为油相初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_w 为水相初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ_w 为水相黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; p_o 为 r 处油相的压力,MPa; p_w 为 r 处水相的压力,MPa。

根据假设条件,在水舌突进点A点处,油水两相质点的压力梯度相同,则在A点处有如下关系:

$$\left. \frac{dp_o}{dr} \right|_{r=r_a} = \left. \frac{dp_w}{dr} \right|_{r=r_a} \quad (13)$$

$$p_o = p_w = p \quad (14)$$

式中: r_a 为水舌突进点 A 点与直井 B 井之间的距离, m。

根据式(11)~(14)可得水舌突进点 A 点处的水相渗流速度为:

$$v_w = \frac{F_i K_w}{\mu_w K_o} e^{\frac{\alpha \phi (n-1)}{2} (p_i - p)} v_o^n \quad (15)$$

根据水质点多孔介质中运动时间与运动距离的关系,并考虑束缚水等因素的影响,可得水舌突进点 A 点移动 dr 的距离所用的时间 dt 为:

$$dt = \frac{dr \phi (1 - S_{wi} - S_{of})}{v_w} = \frac{dr \phi (S_{wf} - S_{wi})}{v_w} \quad (16)$$

式中: S_{wi} 为束缚水饱和度; S_{of} 为水驱前缘含水饱和度; S_{wf} 为水驱前缘含水饱和度。

则见水时间可由式(17)计算:

$$T_{bt} = \int_0^a \frac{dr \phi (S_{wf} - S_{wi})}{v_w} \quad (17)$$

式中: T_{bt} 为见水时间, d。

将式(15)代入式(17)可得:

$$T_{bt} = B \times \int_0^a r^n \left[1 + \frac{A}{1-n} (r^{1-n} - r_e^{1-n}) \right]^{\frac{n-1}{n+1}} dr \quad (18)$$

式(18)中:

$$B = \frac{\phi (S_{wf} - S_{wi}) \mu_w K_o}{F_i K_w} \left(\frac{2\pi h}{Q} \right)^n \quad (19)$$

式(18)即为变形介质边水稠油油藏见水时间的计算公式。该计算公式难以直接求出解析解,可通过数值积分的方法进行计算。

若考虑储层岩石为弹性介质,且原油符合幂律流体特征,则边水油藏见水时间公式变为如下形式:

$$T_{bt} = \frac{B}{n+1} \times a^{n+1} \quad (20)$$

若考虑原油符合牛顿流体特征,则边水油藏见水公式变为如下形式:

$$T_{bt} = \frac{K_o \mu_w \pi h \phi (S_{wf} - S_{wi})}{K_w \mu_o Q} \times a^2 \quad (21)$$

式(20)、(21)即为式(18)的特例公式。

2 实例分析

以某符合幂律特征的变形介质边水稠油油藏为例进行分析,相关参数如下:油藏厚度 11.7 m, 储层渗透率 $2\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙度 32%, 平均原油黏度 480 mPa·s, 地层水黏度 0.7 mPa·s, 原油体积系数约为 1.02, 介质变形系数 0.03 MPa^{-1} , 幂律指数 0.96。油藏中一口油井距边水的距离为 600 m, 该井无水生产时间为 212 d, 见水前油井平均日产量为 $32 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

图 2 为油井生产动态曲线图,由图 2 可知,在实际生产过程中,该口油井在 212 d 左右开始产水,之后含水率

迅速上升,日产油量大幅度降低。应用式(18)计算得见水时间为 222 d,与该井的实际无水生产时间较为接近,预测效果良好。应用式(20)计算得见水时间为 299 d,造成偏差的原因是该公式未考虑变形介质的影响。应用式(21)计算得见水时间为 360 d,造成偏差的原因是该公式将流体视为牛顿流体,未考虑稠油幂律特征的影响。

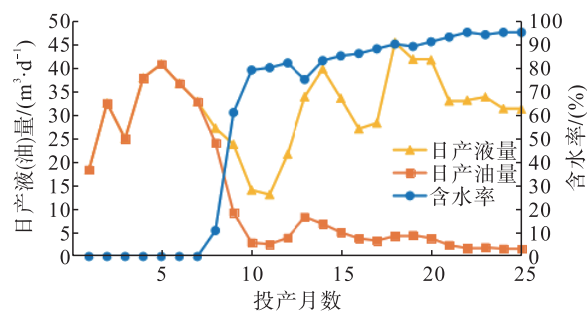


图 2 油井生产动态曲线

3 敏感性分析

为了进一步分析各个因素对见水时间的影响,以该油藏的相关参数作为基础,假定某些因素的变化值,应用式(18)计算见水时间。

3.1 产量及介质变形系数的影响

不同产量下的见水时间计算结果见图 3。由图 3 可知,介质变形系数越大,油井见水越早,因为在相同的产量条件下,介质变形系数越大,地层中产生的压降越大,导致边水更早地突破到井底;产量越高,油井见水越早,因为在介质变形系数相同的情况下,产量越高,生产压差越大,导致边水更早地突破到井底;但在产量较低的情况下,介质变形系数的改变对油井见水时间影响较小。

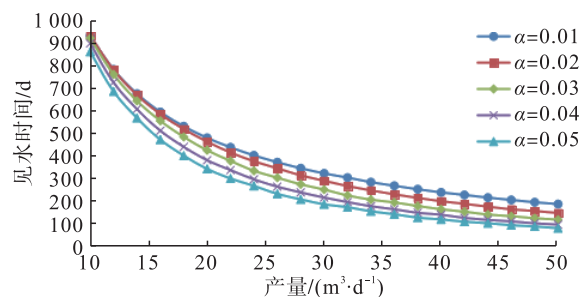


图 3 产量及介质变形系数对见水时间的影响

3.2 油井距边水距离及幂律指数的影响

不同边水距离条件下的见水时间计算结果见图 4。由图 4 可知,幂律指数越小,油井见水越早,因为幂律指数越小,原油的非牛顿流体特性越强,要达到相同产量所需的生产压差越大,导致边水更早地发生突破;油井距边水的距离增大,则边水到井底的路程变长,在其它条件不变时见水时间增大;随着油井距边水的距离增大,幂律指数对见水时间的影响也逐渐增大。

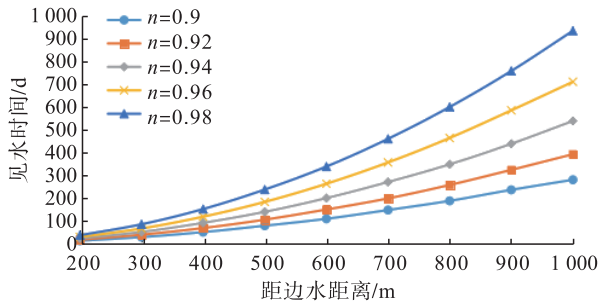


图4 油井距边水距离及幂律指数对见水时间的影响

4 对生产的指导

由图3可知,在产量较高时,产量变化引起的见水时间变化较小,而随着产量的降低,见水时间增加的速度加快。因此,在实际生产过程中,若产能优化设计的结果取值较低,可在满足生产要求的条件下适当减小产量,尽量延长无水采油期;若取值较高,可首先考虑其他因素的影响,并及时做好防水控水措施。由图4可知,随着幂律指数的增加,见水时间增加的幅度变大,且这种趋势随着油井距边水距离的增加变得愈发明显。实际生产过程中,油井距边水距离的确定需要综合考虑多方面的因素,若部井距边水较远,采取改善原油非牛顿特性的生产措施对延长该类油藏的无水采油期将会有显著效果;若部井距边水较近,可首先考虑其他因素的影响,并及时做好防水控水措施。

针对具体的变形介质边水稠油油藏,在准确确定相关储层物性、流体属性等参数后,可通过文中所述公式计算出不同边水距离、不同产量等情况下的油井见水时间,绘制相应图版或者表格。据此,可通过要求或设计的无水采油期反查油井距边水的距离以及产量,为开发方案编制提供参考。

5 结论

1) 变形介质边水稠油油藏中油井见水时间的预测需考虑储层介质变形以及稠油幂律特征的影响,否则会使计算结果偏大。

2) 油井距边水距离、流体属性、油井产能及储层物性等对变形介质边水稠油油藏见水时间影响较大,计算时需准确确定相关参数。

3) 针对具体的变形介质边水稠油油藏,可绘制出不同边水距离、不同产量等情况下的油井见水时间图版或表格,再通过要求或设计的无水采油期反查油井距边水距离以及产量,为开发方案编制提供参考。

参考文献:

[1] 张庆辉,李相方,张磊,等.考虑启动压力梯度的低渗底水气藏见水时间预测[J].石油钻探技术,2012,40(5):96-99.

Zhang Qinghui, Li Xiangfang, Zhang Lei, et al. Prediction of Water Breakthrough Time in Low Permeability Gas Reservoirs with Bottom Water in Consideration of Threshold Pressure [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40 (5): 96-99.

- [2] 朱维耀,黄小荷,岳明.底水气藏水平井见水时间研究[J].科技导报,2014,32(8):27-31.
Zhu Weiyao, Huang Xiaohe, Yue Ming. Prediction of Water Breakthrough Time of Horizontal Wells in Gas Reservoirs with Bottom Water [J]. Science & Technology Review, 2014, 32 (8): 27-31.
- [3] 王会强,李晓平,杨琪,等.底水气藏见水时间预测方法[J].新疆石油地质,2007,28(1):92-93.
Wang Huiqiang, Li Xiaoping, Yang Qi, et al. A Prediction of Water Breakthrough Time in Gas Reservoirs with Bottom Water [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28 (1): 92-93.
- [4] 赵新智,朱圣举.低渗透带隔板底水油藏油井见水时间预测[J].石油勘探与开发,2012,39(4):471-474.
Zhao Xinzhi, Zhu Shengju. Prediction of Water Breakthrough Time for Oil Wells in Low-Permeability Bottom Water Reservoirs with Barrier [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39 (4): 471-474.
- [5] 李传亮.半渗透隔板底水油藏油井见水时间预报公式[J].大庆石油地质与开发,2001,20(4):32-33.
Li Chuanliang. Prediction Formula for Water Breakthrough Time of Semipermeable Partition Bottom Water Reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20 (4): 32-33.
- [6] 朱圣举.低渗透无隔板底水油藏油井见水时间预测[J].新疆石油地质,2001,22(2):153-154.
Zhu Shengju. A Study for Predicting Water Breakthrough Time of Oil-Well in Low Permeability Bottom Water Reservoir With no Barrier [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2001, 22 (2): 153-154.
- [7] 于蓬勃.底水稠油油藏水平井见水特征及影响因素[J].天然气与石油,2015,33(5):36-40.
Yu Pengbo. Water Breakthrough Characteristics and Influence Factors of Horizontal Well in Heavy Oil Reservoir with Bottom Water [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (5): 36-40.
- [8] 王会强,李晓平,吴锋,等.边水气藏气井见水时间预测方法[J].特种油气藏,2008,15(4):73-74.
Wang Huiqiang, Li Xiaoping, Wu Feng, et al. Prediction of Water Breakthrough Time in Gas Reservoir with Edge Water [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, 15 (4): 73-74.
- [9] 杨芙蓉,樊平天,贺静,等.边水气藏高产气井见水时间预测方法[J].科学技术与工程,2013,13(29):8745-8747.
Yang Furong, Fan Pingtian, He Jing, et al. An Approach to Predict Water Breakthrough Time in High Gas Rate Wells of

