

注水见效时间和影响因素数值模拟研究

刘华林,熊 伟,高树生,刘华勋

中国科学院渗流流体力学研究所,河北廊坊 065007

摘要 压力在地层中的传播是瞬间完成的,基于此,重新定义注水见效时间为受到注水压力影响的采油井产能与弹性开采的采油井产能之差,达到弹性开采的采油井产能的 1%时所需的时间。从新的定义出发,运用数值模拟方法研究了 5 点注采井网系统中,采油井为无限导流垂直裂缝井、注水井为直井的单相流注水见效问题及其影响因素。渗透率对注水见效时间影响很大,尤其当渗透率小于 10 md 时,注水见效时间随着渗透率的减小急剧增加;随着井距的增加,见效时间增加,井距等量增加,见效时间增加越来越大;随着注水强度增加,见效时间减小,注水强度等量增加,见效时间减少越来越小;当渗透率很小时,可以考虑超前注水,适当减小井距、加大注水强度。

关键词 注水见效;数值模拟;垂直裂缝井;注水强度

中图分类号 TE341

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)22-0063-03

Study on Water Flooding Response and Its Affecting Factors by Numerical Simulation

LIU Hualin, XIONG Wei, GAO Shusheng,
LIU Huaxun

*Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese
Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China*

Abstract Because the pressure propagation in earth completes instantly, the water flooding response is re-defined as the time when the ratio of the result of flood development deliverability minus resilience development deliverability and resilience development deliverability reaches one percent. With the modified definition, the single phase flow's water flooding response and its affecting factors in a five-spot water flooding pattern are studied by numerical simulations when the production well is an infinite conductivity vertical fracture well and the injection well is a straight well. Permeability greatly affects the water flooding response, and water flooding response sharply increases with decrease of permeability, especially when the permeability is smaller than 10 md. The bigger the well spacing, the longer the water flooding response, and the

increase of water flooding response is getting faster with spacing's increase. The higher the injection volume, the shorter the water flooding response, and the decrease of water flooding response is getting smaller with injection volume's increase. Measures can be taken such as injection ahead of time, with smaller well spacing and higher injection volume when permeability is too small.

Keywords water flooding response; numerical simulation; vertical fracture well; injection volume

0 引言

注水是油田开发中广泛使用的方法。向地层注水,可以起到驱替地层油和保持地层压力的作用,注入水产生的压力沿着流线自水井向油井不断传播,传播到油井的时间称作注水见效时间。基于物质平衡理论,运用稳态逐次替换法,前人推导了注水见效时间的理论计算式^[1-6],而实际上,压力在地层中的传播是瞬间完成的,水井注水,油井即受到影响,只是初始影响很小。本文对注水见效时间的定义进行了修改,用数值模拟的方法研究了 5 点注采井网中,采油井为垂直裂缝井,注水井为直井的注水见效问题,并研究了渗透率、井距、注水强度对注水见效时间的影响。

1 裂缝井产能计算数值模拟方法

修改后的注水见效时间定义为:受到注水压力影响的采油井产能与弹性开采的采油井产能之差,达到弹性开采的采

收稿日期:2009-09-28

基金项目:国家重大油气专项(2008ZX05013-002)

作者简介:刘华林,博士研究生,研究方向为油气田开发,电子信箱:liuhualin24@163.com;熊伟(通信作者),高级工程师,研究方向为油层物理、渗流力学和油气田开发,电子信箱:xiongwei69@petrochina.com.cn

油井产能的 1% 时所需时间。

根据注水见效时间新的定义,将注水与不注水两种不同开采方式下油井的产能相比,容易得到注水见效时间。

为了简化,考虑单相流,即地层中流体与注入的流体相同。基本假设如下:① 地层均质等厚,各向同性,岩石及流体可压缩;② 流体流动过程等温;③ 裂缝具有无限导流能力;④ 水井定流量注入。

5 点注采井网中,取一个 5 点井网单元,如图 1 所示。

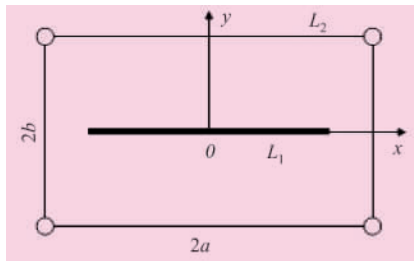


图 1 5 点井网单元

Fig. 1 Five-spot pattern unit

图 1 中, $2a$ 、 $2b$ 分别为单元的长与宽, 即井排距, m ; L_1 为粗线(垂直裂缝井)所示边界, L_2 为细线及轴线所示边界。

规则的 5 点注采井网中,近似地认为:任一 5 点井网单元的边界是不渗透的,单元中任何一点的压力只受到油井、单元角点上注水井的影响;注水井被看成位于角点上的点源,除了该角点外,单元中任何一点的压力都满足渗流基本微分方程,注水井附近地层为稳定渗流,注水井所在角点压力由平面径向稳定流压力公式给出。

图 1 中,由于对称性,取 5 点单元的 1/4,除注水井所在角点外,井网单元中任何一点满足基本微分方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{\mu_0 \phi C_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} & 0 < x < a, 0 < y < b, t > 0 \\ p|_{L_1} = p_w & t > 0 \\ \frac{\partial p}{\partial n}|_{L_2} = 0 & t > 0 \\ p|_{t=0} = p_e & 0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b \end{cases} \quad (1)$$

式中, p 为地层动态压力, Pa ; μ_0 为流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; ϕ 为孔隙度, C_t 为综合压缩系数, Pa^{-1} ; k 为渗透率, md ; p_w 、 p_e 分别为井底和原始地层压力, Pa ; t 为时间, s ; n 为边界上任何一点的法向。

对微分方程进行 5 点法隐式差分,差分方程为

$$p_{i,j}^{N+1} \left(4 + \frac{l^2 \mu_0 \phi C_t}{\tau k} \right) = p_{i,j}^{N+1} + p_{i,j+1}^{N+1} + p_{i-1,j}^{N+1} + p_{i+1,j}^{N+1} - \frac{l^2 \mu_0 \phi C_t}{\tau k} p_{i,j}^N \quad (2)$$

式中, i, j 分别为纵向、横向网格序列; N 为时间序列; l 为空间步长,横向与纵向的空间步长相同, m ; τ 为时间步长, s 。

注水井所在角点压力由平面径向稳定渗流压力公式给出,有

$$p_{\frac{b}{l}, \frac{a}{l}}^{N+1} = \frac{10^{10}}{864} \frac{q \mu}{2 \pi k h} \ln \frac{l}{r_w} + \frac{1}{2} p_{\frac{b}{l}, \frac{a}{l}}^{N+1} + \frac{1}{2} p_{\frac{b}{l}, \frac{a}{l}}^{N+1} \quad (3)$$

式中, q 为注入强度, m^3/d ; h 为地层厚度, m ; r_w 为注入井半径, m 。

对初始条件和边界条件进行差分并代入式(2)、式(3),可以算得地层压力动态分布。

求得地层压力动态分布后,可以计算裂缝井产能。产能计算方法:认为裂缝井的产能全部来自流入裂缝的流体,在裂缝附近,流体速度方向与裂缝垂直,对与裂缝正对的第二排网格点上的压力进行平均(模拟证明这些网格点上的压力相差很小),减去裂缝上压力,再除以网格空间步长得裂缝处压力梯度,压力梯度乘以流动系数、4 倍裂缝半长即为裂缝井产能。即

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{\left(\frac{L_f}{l}\right)+1} p_{i,2}^N}{l} \left[\left(\frac{L_f}{l} \right) + 1 \right]^{-p_n} \frac{k}{\mu} 4 L_f h \quad n=1, 2, \dots \quad (4)$$

式中, Q 为裂缝产能, m^3/s ; L_f 为裂缝半长, m 。

对于弹性开发的裂缝井产能,计算公式与式(4)相同,不同之处在于认为 5 点井网单元中所有点都满足方程组(1),包括注水井所在的角点,从而没有方程(3)。

2 注水见效时间和影响因素

编程算得注水开发与弹性开发方式下的压力动态分布,应用式(4)可以求得不同时间注水开发与弹性开发裂缝井的产能,当二者之差与弹性开发产能之比为 1% 时,即为注水见效时间。

考虑单相油在地层中的流动,地层基本参数为 $a=250 \text{ m}$, $b=160 \text{ m}$, $h=10 \text{ m}$, $L_f=100 \text{ m}$, $p_e=21.0 \text{ MPa}$, $p_w=6.5 \text{ MPa}$, $k=10 \text{ md}$, $C_t=41 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, $\phi=0.12$, $\mu_0=8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $q=15 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

图 2 为以上给定地层参数条件下,不同时间“注水”开发与弹性开发产能之差,与弹性产能之比,图中看到注水见效时间(比值为 1% 时)为 49 d。

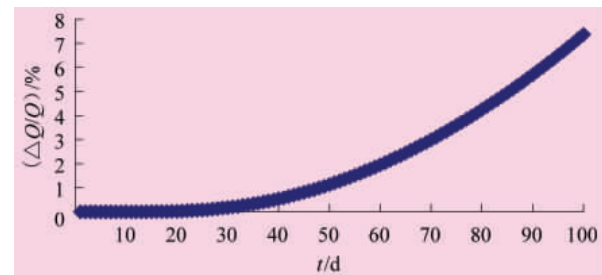


图 2 注水对产能的影响

Fig. 2 Impact of water injection on deliverability

2.1 渗透率对注水见效时间的影响

地层其他各项参数不变,改变渗透率,当渗透率分别为 50、25、10、5、1 和 0.5 md 时,注水见效时间如图 3 所示。

从图 3 可以看出,渗透率对注水见效时间的影响很大。渗透率分别为 50、10 和 0.5 md 时,注水见效时间分别为 17、49 和 470 d。随着渗透率的减小,注水见效时间增加很快,尤

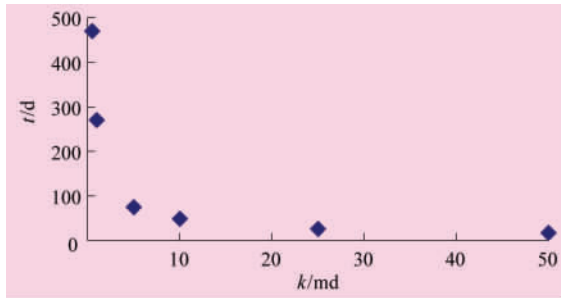


图3 渗透率对注水见效时间的影响

Fig. 3 Impact of permeability on water flooding response

其是当渗透率小于 10 md 时,见效时间急剧增加。当渗透率很小时,可以考虑超前注水,在开井生产之前让地层压力得到提高。

2.2 井排距对注水见效时间的影响

地层其他各项参数不变,改变井距,当 $2a$ 分别为 350、400、450、500、550 和 600 m 时,注水见效时间如图 4 所示。

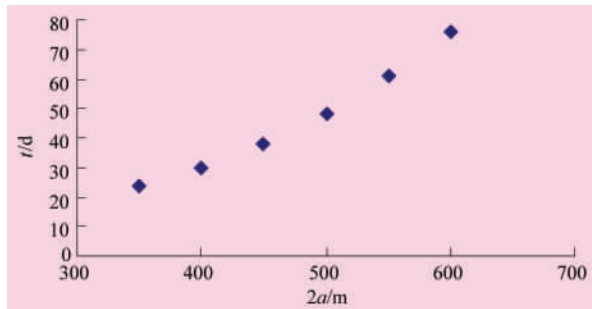


图4 井距对注水见效时间的影响

Fig. 4 Impact of well spacing on water flooding response

从图 4 可以看出,随着井距的增加,注水见效时间也将增加。 $2a$ 分别为 350、450 和 600 m 时,注水见效时间分别为 24、38 和 76 d,井距等长增加,见效时间增加越来越大。

2.3 注水强度对注水见效时间的影响

地层其他各项参数不变,改变注水强度,当 q 分别为 5、7.5、10、12.5、15 和 17.5 m^3/d 时,注水见效时间如图 5 所示。

从图 5 中可看到,随着注水强度的增加,注水见效时间将减少。注水强度分别为 5、12.5 和 17.5 m^3/d 时,注水见效时间分别为

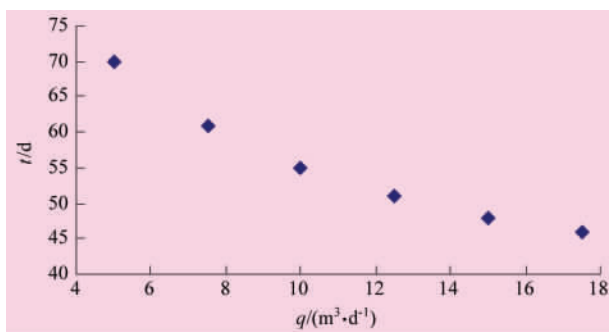


图5 注水强度对注水见效时间的影响

Fig. 5 Impact of injection rate on water flooding response

70、51 和 46 d,注水强度等量增加,见效时间减少越来越小。

3 结论

1) 根据压力传播在地层中瞬间完成,修改了注水见效时间的定义,新定义很好地量化了注水见效时间。

2) 规则井网单元可以认为是封闭的,地层压力只受单元内油井及角点上注水井的影响,比较注水开发与弹性开发油井产能得到注水见效时间。

3) 地层渗透率对注水见效时间影响很大,尤其当渗透率小于 10 md 时,注水见效时间随着渗透率的减小急剧增加;随着井距的增加,见效时间增加,井距等量增加,见效时间增加越来越大;随着注水强度增加,见效时间减小,注水强度等量增加,见效时间减少越来越小;当渗透率很小时,可以考虑超前注水,适当减小井排距,加大注水强度。

参考文献 (References)

- [1] 朱玉双, 曲志浩, 孙卫, 等. 低渗、特低渗油田注水开发见效时间影响因素分析——以鄯善油田、丘陵油田为例[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2003, 33(3): 311–314.
Zhu Yushuang, Qu Zhihao, Sun Wei, et al. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2003, 33(3): 311–314.
- [2] 李云娟, 胡永乐. 低渗透砂岩油藏注水见效时间与井距关系[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(3): 84–86.
Li Yunjuan, Hu Yongle. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(3): 84–86.
- [3] 修乃岭, 熊伟, 高树生, 等. 低渗透油藏不稳定渗流注水见效时间与井距的关系[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(1): 55–57.
Xiu Nailong, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. *Petroleum Geology and Engineering*, 2008, 22(1): 55–57.
- [4] 靖伟, 王建波, 王科战. 十屋油田注采井距与注水见效时间研究[J]. 内蒙古石油化工, 2009, 19(13): 143–144.
Jing Wei, Wang Jianbo, Wang Kezhan. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2009, 19(13): 143–144.
- [5] 黄爽英, 陈祖华, 刘京军, 等. 引入启动压力梯度计算低渗透砂岩油藏注水见效时间[J]. 河南石油, 2001, 15(5): 22–24.
Huang Shuangying, Chen Zuhua, Liu Jingjun, et al. *Henan Petroleum*, 2001, 15(5): 22–24.
- [6] 曾丽, 江涛, 丁玉强, 等. 张店叠瓦状油藏注水见效特征研究及对策[J]. 河南石油, 2005, 19(3): 27–31.
Zeng Li, Jiang Tao, Ding Yuqiang, et al. *Henan Petroleum*, 2005, 19(3): 27–31.

(责任编辑 齐志红)

《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目由《中华读书报》“书评周刊”主编王洪波先生主持,发表图书评论文章,被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主,兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容的图书。欢迎投稿,择优刊登。每篇书评以 2 100 字左右为宜,需配书影,并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑:陈广仁;投稿邮箱:chenguangren@cast.org.cn。