

周期注水渗流机理及其影响因素 评价数值模拟研究*

陈朝晖

(西南石油学院石油工程系, 四川南充 637001)

杜志敏

(天然气中心)

摘要 提出了一个适合于研究非均质油藏周期注水渗流机理的数值模拟模型, 将微观剩余油储油可流动空间列为第二级渗流系统, 采用两套空间重叠的网格描述油藏的非均质性。运用该模型模拟计算油水驱替运动过程, 对比分析影响周期注水效果的油藏地质因素和人工注水方式参数, 研究周期注水的驱油机理及适宜采用周期注水的油藏条件和合理的注水方式参数, 为周期注水的决策及方式参数的优化提供参考

主题词 非均质油气藏; 注水; 周期性注入; 数值模拟; 渗流; 机理; 评价

中图分类号 TE 357.6

前言

我国已开发油田大多具有非均质性严重的特点^[1,2], 注水波及系数低。进入“八五”后, 主要油田综合含水已上升到 80% - 90%, 井网相对较密, 继续提高排液量和加密井网的余地不大, 原注水条件下广泛应用的措施效率越来越低, 急需有效的新方法改善水驱油效果。周期注水五、六十年代在前苏联和美国广泛采用, 七十年代已成为国外改善注水开发油田效果的主要方法之一, 相对于其它方法而言, 该调整方法较简便, 投资少, 风险小, 经济效益显著, 易于大规模推广。

周期注水利用时停时注或时大时小的注水方式对油藏施加“脉冲作用”^[3], 使油层处于不稳定的压力状态, 造成了原油从低渗透带或小孔道流出来的条件, 而且常规注水最为不利的因素——储层的非均质性, 对周期注水在某种程度上来说正是其增产的一个有利因素。针对我国油田的实际情况, 在当前深入全面研究周期注水很有现实意义^[4,5]。

1 周期注水数值模拟方法

根据对非均质储层渗流规律的分析, 作以下假设和简化:

(1) 由于渗透率分布的差异, 注入水往往优先沿高渗透层带流动(易流动储油空间), 突破后, 在低渗透层带(难流动储油空间, 包括死孔道和极细孔道)中将残留相当多的剩余油。在连续稳定的注水方式下, 这些剩余油很难被采出。根据这种实际情况, 将渗流空间分为一、二两级渗流系统, 把二级渗流系统视为被一级渗流系统切割的互不连通的单元体所组成的集合, 一级渗流系统作为主要的油流通道, 二级渗流系统只与一级渗流系统间发生流体质量交换(如图 1 所示);

* 1996 - 11 - 20 收稿

陈朝晖, 男, 1970 年生, 硕士, 主要从事油气藏数值模拟研究

(2) 油藏中油、气、水三相渗流均服从达西定律, 且为等温渗流过程;

(3) 油水、气水两相间互不相溶;

(4) 岩石、流体可压缩。

1.1 数学模型

1.1.1 流动方程

由三相质量守恒和达西公式可得两级渗流系统中三相渗流偏微分方程组^{[6][7]}

其中:

一级渗流系统流动方程为:

$$\text{油相: } \nabla \cdot \left[\frac{K K_{ro}}{\mu_o} (\nabla P_o - \rho_o \nabla D) + I_o - Q_o \right] = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_o S_o)_1 \quad (1)$$

$$\text{气相: } \nabla \cdot \left[\frac{K K_{rg}}{\mu_g} (\nabla P_g - \rho_g \nabla D) + I_g - Q_g + Q_{ig} \right] = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g S_g)_1 \quad (2)$$

$$\text{水相: } \nabla \cdot \left[\frac{K K_{rw}}{\mu_w} (\nabla P_w - \rho_w \nabla D) + I_w - Q_w + Q_{iw} \right] = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w S_w)_1 \quad (3)$$

忽略二级渗流系统的流动项和源汇项, 其流动方程为:

$$\text{油相: } -I_o = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_o S_o)_2 \quad (4)$$

$$\text{气相: } -I_g = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g S_g)_2 \quad (5)$$

$$\text{水相: } -I_w = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w S_w)_2 \quad (6)$$

1.1.2 窜流方程

两级渗流系统之间的渗吸交换项为:

$$I_l = \left[\frac{K K_{rl}}{\mu_o} (\nabla P_o - \rho_o \nabla D) + I_o - Q_o \right] \cdot (1 - b_l) \quad (7)$$

$$\text{其中: } \quad (8)$$

$$\quad (9)$$

窜流系数 由二级渗流系统岩块形状决定, 根据 Kazemi 公式:

$$= 4 \cdot \left(\frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} + \frac{1}{L_z^2} \right) \quad (10)$$

1.2 模型求解

利用有限差分方法, 将流动方程离散化。令:

$$P^{n+1} = P^n + \Delta P, \quad S^{n+1} = S^n + \Delta S \quad (11)$$

隐式压力, 显式饱和度, 可分别得到两级渗流系统三相差分方程, 化简后得:

一级渗流系统油方程:

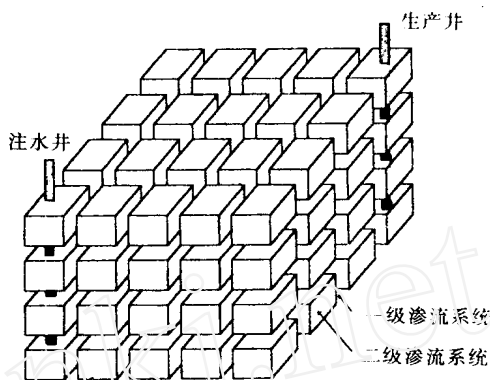


图1 两级渗流系统示意图

$$T_o^n P_1 + T_{o2}^n (P_2 - P_1) + C_{o4} = C_{o1} P + C_{o2} S_w + C_{o3} X \quad (12)$$

一级渗流系统气方程:

$$T_{gd}^n P_1 + T_g^n P_1 + T_{gd2}^n (P_2 - P_1) + T_{g2}^n (P_2 - P_1) + C_{g4} = C_{go1} P + C_{g2} S_w + C_{g3} X \quad (13)$$

一级渗流系统水方程:

$$T_w^n P_1 + T_{w2}^n (P_2 - P_1) + C_{w4} = C_{w1} P + C_{w2} S_w + C_{w3} X \quad (14)$$

二级渗流系统油方程:

$$- T_{o2}^n (P_2 - P_1) + C_{o2} = C_{o21} P_2 + C_{o22} S_{w2} + C_{o23} X_2 \quad (15)$$

二级渗流系统气方程:

$$- T_{gd2}^n (P_2 - P_1) - T_{g2}^n (P_2 - P_1) + C_{g2} = C_{g21} P_2 + C_{g22} S_{w2} + C_{g23} X_2 \quad (16)$$

二级渗流系统水方程:

$$- T_{w2}^n (P_2 - P_1) + C_{w2} = C_{w21} P_2 + C_{w22} S_{w2} + C_{w23} X_2 \quad (17)$$

$$\text{式中:} \quad X_1 = P_b, \quad X_2 = P_{b2} \quad (\text{两相状态}) \quad (18)$$

$$X_1 = P_g, \quad X_2 = P_{g2} \quad (\text{三相状态}) \quad (19)$$

三个二级渗流系统差分方程通过乘以适当的系数,相加消去 X_2 , S_{w2} , 得到一个只含有 P_1 , P_2 的压力方程,将 P_2 表示成 P_1 的单值函数,代入到一级渗流系统差分方程,即将双渗流系统问题简化成了单渗流系统差分方程的形式,经整理得到压力方程:

$$S_{i,j,k} P_{k-1} + B_{i,j,k} P_{j-1} + W_{i,j,k} P_{i-1} + C_{i,j,k} P_{i,j,k} + E_{i,j,k} P_{i+1} + F_{i,j,k} P_{j+1} + N_{i,j,k} P_{k+1} = G_{i,j,k} \quad (20)$$

采用交替方向线松弛法求解压力,及一步压力多步饱和度法求解相饱和度。

1.3 参数处理

(1) 井点参数: 径向流公式计算井底流压及产 / 注入量, 其中格块折算半径由 Peaceman 公式计算。当井穿过多个网格时, 各层分流量按各层流度与压差乘积分配。

(2) 润湿滞后: 对于周期注水, 由于油藏中流体饱和方向经常改变, 是否考虑渗吸与排驱的差异对整个油藏开发生态的模拟结果有较大影响^[8,9]。本模拟器采用的处理方法为: 在计算出相饱和度后, 判断如果润湿相饱和度增加, 则采用渗吸曲线, 如果润湿相饱和度减少或不变, 则采用排驱曲线。

2 周期注水影响因素分析与评价

2.1 机理模型的建立

以相接触小层的层间渗流量作为建模基础, 用孔、渗、厚度及润湿性不同的高、低渗两层模型反映实际储层的层状不均质性, 高渗层覆盖大部分一级渗流系统, 含有少量难流动储油空间(二级渗流系统), 低渗层覆盖大部分二级渗流系统, 含有少量易流动储油空间(一级渗流系统)。这样做既能简化问题研究的过程, 又能正确反映问题的实质。

2.2 确定评价指标及方案可比性原则

这里需要作两个方面的评价, 一是评价地层参数对周期注水效果的相对影响程度, 选择

适宜采用周期注水的油藏条件,为注水方式的决策提供依据;二是在客观油藏条件固定了的情况下,评价不同周期注水方式之间,以及与常规连续注水之间开发动态的差别,为周期注水方式优化提供参考。本文确定了两个评价指标:

(1) 二级渗流系统注水增量

定义为:相对于常规注水,等时等量周期注水能够多进入二级渗流系统中的水量。如果其值为正,则说明在该注水方式下,周期注水提高了注入水利用率,优于采用常规注水,且该值越大越好。

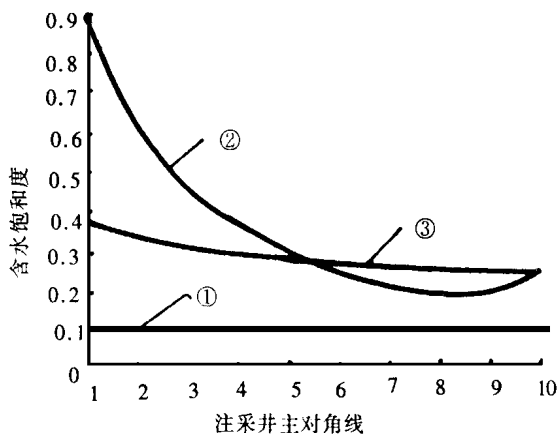
(2) 交渗流量

定义为:注水开发一段时间后关井,在该阶段从二级渗流系统进入一级渗流系统的油量。在一定范围内改变油藏流体参数,计算出的可比交渗流量越大,则具有该参数范围的储层采用周期注水收效越大。由此可定量确定各参数变化对开发动态的影响趋势。

方案评价的可比性原则为:根据注采平衡原则,周期注水阶段平均注水量应与常规注水阶段平均注水量相等。

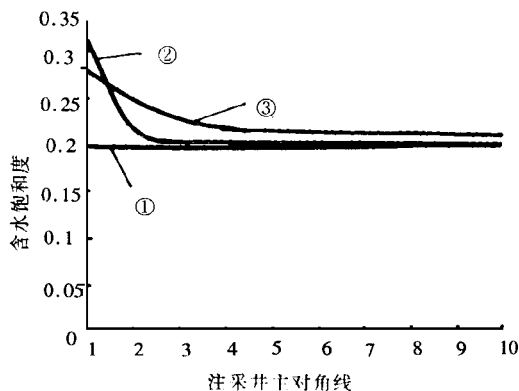
2.3 机理模拟分析

图2,图3和图4分别展示了注水0.2PV后再关井相等时间,注采井主对角线上含水饱和度分布的变化及高低渗透层间流体对流现象。在注水采油阶段,高、低渗透层含水增加,高渗层增幅较大;关井后,低渗透层含水继续上升,但升幅逐渐减弱,高渗层含水开始下降。随着关井的延续,高低渗透层间逐渐趋于平衡,其流体对流逐渐减弱。



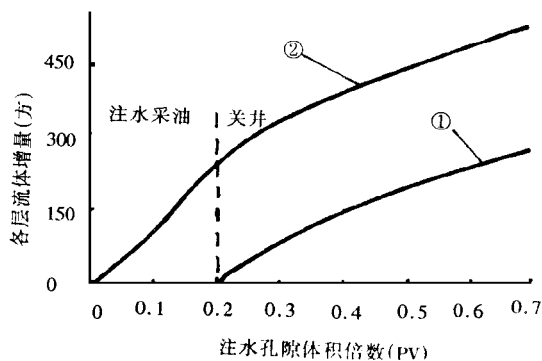
原始分布 注水 0.2 PV 关井

图2 高渗层含水饱和度分布变化



原始分布 注水 0.2 PV 关井

图3 低渗层含水饱和度分布变化



高渗层含油增量 低渗层含水增量

图4 开关井高低渗层流体置换对流指标图

微观驱替效率取决于岩石孔道的几何形状及界面边界条件之间的相互作用。在孔喉结构差异大而导致渗透性差异大的并联孔道中,由于粘滞力和毛管力的综合作用,两侧油水界面运移的速度不同。当所施加的压力形成较大压力梯度,粘滞力相对占优势,大孔道中的液流加快,小孔道中的油被捕集下来,所以注水阶段高渗层含水增幅较大;若施加压力过小,毛管力占优势,并控制油水界面运动的速度和方向^[10,11]。

对于亲水油藏,高渗水淹层的水被吸入低渗层,驱出其中的剩余油。周期注水正是利用注入量时大时小,人为造成了地层中压力分布的不稳定性,在注入量降低或停注的半个周期,由于毛管力作用占主导地位,大部分或全部地驱出小孔道中被捕集的剩余油。另外还由于“贾敏效应”形成了“液滴锁孔”现象,在采油周期,由于地层流体的反向流动又会使被锁孔道打开^[12,13]。

随着关井的延续,高低渗透层间逐渐趋于平衡,其流体置换对流逐渐减弱。

2.4 影响因素分析

2.4.1 地层参数

(1) 储层非均质性

周期注水不会提高均质储层的注水波及效率。对于非均质储层,存在一个最佳受效的非均质程度,非均质程度太小,周期注水在高低渗层引起的压力扰动差距较小,交渗流动的动力不足;非均质程度太大,低渗储层中注水不易进入,其剩余油驱替效率较低。总储量不变的情况下,低渗层储量越大,向高渗层流动油量的潜力就越大,周期注水的效果相对越好。

(2) 裂缝性油藏

裂缝密度越大,周期注水效果相对越好,基岩注入水的增大幅度相对于常规连续注水远小于交渗流量的增大幅度。说明在裂缝发育的情况下,采用低速连续注水,同样能够相当大程度地驱出基岩系统中的油。基岩储量越大,裂缝系统的后备油源越充分,采用周期注水方式,其优势也越能发挥出来。

(3) 小层连通程度

用垂向连通系数表示各小层渗透接触面积与油层整个接触面积的比例关系。模拟结果表明周期注水的效果随储层中不渗透隔层分布范围的扩大而减小。交渗流量的降低与连通系数的减小并不一致。

(4) 储层弹性

采用储层综合弹性压缩系数来表示储层的弹性,随着地层弹性的降低,储层流体对压力扰动的响应减弱,削弱了周期注水优势的发挥。

(5) 油水粘度比

油水粘度比的增加对周期注水开发是一个不利因素。粘度比越大,高低渗层间的交渗流动高峰期延续时间越短,油水粘度比的影响主要集中在某一取值范围内。

(6) 润湿性

采用相渗曲线形状法评价润湿性的影响。模拟表明,均质润湿性储层周期注水收效不大,以低渗层亲水效果最佳;对于低渗层水湿,就交渗流量而言,高渗层亲水时最大,就低渗层注水量的增幅而言,高渗层亲油最大。考虑润湿滞后效应的交渗流量较高。

2.4.2 周期注水方式参数

(1) 相对注水时间

周期注水开始的相对时间,其实质是在储层具有什么样的含水饱和度水平及其分布下,采用周期注水可获得最大效果。模拟表明,若在含水率低于50%左右开始,含水率与关井前相比降幅不大或只是升幅减小;若在含水率高于70%开始,停注后含水率将大幅下降;但随着关井时间延续,低渗层注水量增多,使油水交渗流动的面积减小,含水率降幅又开始减小。这表明,周期注水开始的时间以常规连续注水开发到中高(50%~80%)含水期为佳。还说明,水驱高渗层自身内部的油的过程和驱替从低渗层进入高渗层的油的过程是不同的。

(2) 注水量波动幅度

波幅与效果成正比。连续注水时间越长,周期注水受效的注水波幅范围越宽。因此最优的注水波幅在整个过程中应该是一个变值。在注水初期,注水波幅要足够大;当高渗层含水饱和度较高时,注水波幅可适当减小。

(3) 周期延续时间

周期延续时间反映了注水量的波动频率。若以某一交渗流量值作为关井时间下限,以生产井某一含水率值作为关井时间上限,在中高含水期开展的周期注水,其合理周期延续时间应该是逐渐缩短的;对于早期开展的周期注水,其合理间注周期应当是逐渐延长的。但当高渗层含水达到一定程度后,生产井很快见水,再注水高渗层波及程度不再增加。这时高低渗层的交渗流动面积达到最大值,之后这一面积将随着低渗层注水波及程度的增加而减小。因此这时合理的间注周期应该是逐渐缩短的。

3 结论与建议

(1) 文献调研表明,周期注水在我国有很广的应用前景;

(2) 本文提出的双渗流系统模型能够正确处理特殊非均质储层中,周期注水的特殊水驱油渗流过程,仿真性强,求解稳定,收敛速度快;

(3) 机理模拟分析表明,在有利的条件下周期注水可提高原油采收率,但提高幅度取决于各类孔隙的储油比例、储层润湿性及纵向上的非均质程度;

(4) 通过对模拟结果的定量对比分析,进一步加深了对周期注水过程中水驱油机理的认识,并研究了适宜采用周期注水的油藏条件和合理的注水方式参数;

(5) 建议进行物理模拟实验,进一步加深对毛管力驱油机理及润湿性效应的认识;

(6) 周期注水动态性很强,要求施工中严密组织,并加强动态监测和数模跟踪。

符号说明

式中变量:

C —— 压缩系数;	D —— 油层某一基准面的深度,向下为正;
g —— 重力加速度;	I —— 高、低渗系统之间的渗吸交换项;
K —— 绝对渗透率;	K_r —— 相对渗透率;
L —— 低渗系统岩块的尺寸;	P —— 压力;
Q —— 产量或注入量;	t —— 时间;
S —— 饱和度;	$V_{ijk} = X_i Y_j Z_k$ —— 单元网格块 (i, j, k) 的体积

希腊字母:

—— 相密度;

—— 孔隙度;

(下转第 63 页)

5 结 论

砾岩油藏由于孔喉结构的复杂性与特殊性,水驱过程中表现出种种与其它油藏不同的驱替特征:水的指进现象突出、细长喉道中油水以大量的段塞交替运移、油滴经过细小喉道时发生小孔分散现象等。驱替结束后,模型中有大量的剩余油,驱油效率较低。为较大幅度地提高砾岩油藏采收率,必须降低油水界面张力,同时改善流度比,作者利用该模型进行了三元复合体系驱和聚合物驱,通过分析对比认为,三元复合体系驱不失为一条较大幅度提高砾岩油藏采收率的有效途径。

参 考 文 献

- 1 高永利,何秋轩等.高凝油油藏注水开发中的冷伤害研究.流体力学进展,北京:石油工业出版社,1996
- 2 阎庆来,何秋轩,高永利.多孔介质的微观可视化.第8届国际地质力学及计算方法会议,V.2,A.A. BAL KEMA,1994
- 3 郭尚平等.物理化学渗流微观机理.北京:科学出版社,1990
- 4 Mast R F. Microscopic Behavior of Foam in Porous Media. SPE AIME, 1972
- 5 Wardlaw N C. The Effects of Pore Structure on Displacement Efficiency in Reservoir Rock and in Glass Micromodels. SPE of AIME, 1980

(编辑 何苏)

(上接第59页)

- | | |
|---------------|----------|
| μ —— 粘 度; | —— 相对密度; |
| —— 势函数; | —— 窜流系数; |
- 式中下标:
- | | |
|----------------------|----------------------|
| g —— 气组分; | g_d —— 溶解气; |
| h —— 高渗系统; | i —— 注入井; |
| l —— o, g, w 组分; | L —— 低渗系统; |
| o —— 油组分; | o_g —— 含气油组分(地下油); |
| w —— 水组分; | |

参 考 文 献

- 1 陈永升著.油田非均质对策论.北京:石油工业出版社,1992
- 2 苏 沙尔巴托娃.状不均质油层周期注水开发.北京:石油工业出版社,1988
- 3 汪家联.扶余油田西区应用周期注水.石油勘探与开发,1992
- 4 习传学.王场油田单井吞吐实验.石油勘探与开发,1991
- 5 李允,杜志敏等编译.油藏数值模拟原理.四川:成都科技大学出版,1992
- 6 韩大匡等编著.油藏数值模拟基础.北京:石油大学出版社,1993
- 7 朗兆新.油藏工程基础.北京:石油大学出版社,1993
- 8 何更生.油层物理.北京:石油工业出版社,1988
- 9 苏 K. C. 巴斯林耶夫.地下流体力学.北京:石油工业出版社,1989
- 10 美 M 霍纳波.油藏相对渗透率.北京:石油工业出版社,1989
- 11 苏 R. E. 科林斯.流体通过多孔材料的流动.北京:石油工业出版社,1988
- 12 墨 诺曼 R. 莫罗.石油开采中的界面现象.北京:石油工业出版社,1989 (编辑 张鸾清)

persion. There is functional relationship between specific surface of argillaceous rock and its expansive pressure on hydrate trend. It characterizes the indexes of hydrate properties or swell increment. Currently, there are many methods of swell surface testing. This paper selects two available methods and are compared each other. It shows that CST - methods is easy, time - saving and accuracy.

Key words: Clay swelling; Mudstone; Shale; Specific surface; Analytical method; Determination; Laboratory testing

The Cyclic Water Flooding Numerical Simulation for Its Seepage Mechanism and Effective factors, **JSWPI**, 1997, 19(3) :54 ~ 59

Chen Xiaohui(Dept. of Petroleum Engineering, SWPI, Sichuan, 637001)

In this paper, a numerical model for the cyclic water flooding in the heterogeneous reservoir is founded by studying its seepage mechanism. The store room for the residual oil seepage in microcosmic is named the second seepage system. Two series of block system lapped in space is applied to describe the heterogeneous of reservoir. The course of water displacing oil is simulated with this model, and some factors that effect the cyclic flooding, such as the geological and manual are analysed by contrasting. It is suggested to make policy and optimize manual means that the mechanism of water displacing oil in the course of cyclic flooding and the best conditions and manual means in reservoir.

Key words: Heterogeneous reservoir; Cyclic injection; Numerical simulation; Mechanism; Seepage evaluation

Visualization Study of Pore - level Displacement of Oil by Water in a Conglomerate Reservoir, **JSWPI**, 1997, 19(3) :60 ~ 63

Gao Yongli (Dept. of Petroleum Engineering, Xi'an Petroleum Institute, Xi'an, 710065), **He Qixuan**

Pore - level study of fluid flow in porous media is important in that it can provide valuable information about the behavior of fluids flowing through porous media, and thus the mechanism of fluids displacement in subsurface reservoirs could be better understood. In this paper, the results of experimental displacement studies on scaled layer model of a Karamay conglomerate reservoir are reported. The experimental setup is described, and the mechanism of displacement of oil by water in the conglomerate reservoir is discussed in detail.

Key words: Conglomerate; Oil reservoirs; Water drive; Characteristics

Research and Manufacture and application of Rod Pump Used in Horizontal Well, **JSWPI**, 1997, 19(3) :64 ~ 69

zhong gongxiang (Dept. of Petroleum Engineering, SWPI, Sichuan, 637001) **liang zheng etc.**

this paper has introduced three kinds of rod pump used in thick oil horizontal well: the rod pump with hydraulic balance cylinder, the rod pump with suction valve of guide function and the rod pump with armular valve. According to review the principle of work and characteristic of the rod pumps, writer has studied the leaking calculating method of the annulus clearance of rod pump used in horizontal well. Through analysing the field experiment, it is explained that the new made for horizontal wells have good property: smooth and steady, dependable and effective and it can be applied in heavy oil wells very well. the efficiency of pump reached above 41 - 43 %.

Key words: Horizontal well; Rod pump; Fluid leaked volume; Heavy oil