

# 水驱砂岩油藏储层参数变化三维网络模拟

冯其红<sup>1</sup>, 韩晓冬<sup>1</sup>, 王守磊<sup>2</sup>, 董业良<sup>1,3</sup>, 周文胜<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中海油研究总院, 北京 100027;

3. 中国石油大庆油田有限责任公司, 黑龙江 大庆 163453)

**摘要:** 疏松砂岩油藏在水驱过程中, 储层渗透率和孔隙度会发生变化, 这些变化对油藏开发具有重要的影响。基于符合疏松砂岩储层典型特征的网络模型, 综合考虑储层孔喉内微粒的脱落、捕集、运移等微观变化机理, 建立了储层参数变化三维网络模拟方法, 并模拟研究了不同条件下孔隙度和渗透率等物性参数的变化规律。模拟结果表明: 在长期注水驱替过程中, 由于孔喉内微粒会发生脱落, 且部分微粒随注入流体流出储层, 导致孔喉半径分布范围发生小幅变化, 孔喉半径总体呈增大趋势, 储层连通性增强; 渗透率和孔隙度逐渐增大, 且增大的幅度逐渐减小; 注水强度和粘土胶结程度通过影响微粒的脱落速率, 进而影响储层渗透率和孔隙度的变化幅度。

**关键词:** 疏松砂岩油藏 注水开发 储层参数变化 网络模拟 颗粒运移

中图分类号: TE319

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)04-0079-04

注水驱油是目前油田开发中提高采收率常用的方法。长期注水开发会使储层参数(渗透率、孔隙度、孔喉半径等)发生较大变化, 进而对开发效果产生较大影响<sup>[1]</sup>。储层参数变化规律的研究方法主要有2种: ①通过室内岩心驱替实验与压汞实验交替进行的分析测试方法, 研究岩样在不同水驱倍数下宏观物性的演化模式<sup>[2-3]</sup>; ②通过测井评价, 研究不同开发阶段完钻井储层物性参数的变化特点, 并建立其随水驱开发过程的演化模式<sup>[4]</sup>。这2种方法都只是从宏观角度对储层参数的变化规律进行研究, 无法揭示其变化的根本原因和基本规律。为了正确地认识储层参数的变化规律和影响因素, 实现对油田开发过程中水驱砂岩储层物性的改变情况进行描述和控制, 采用孔隙网络模拟方法研究流体在多孔介质中的微观流动机理、多相渗流以及剩余油的微观分布等, 从微观角度对不同的变化机理进行模拟研究<sup>[5-8]</sup>。笔者通过建立符合疏松砂岩典型特征的三维网络模型, 模拟水驱过程中微粒的脱落、捕集和运移等过程, 从微观上对注采强度以及粘土矿物胶结程度对孔隙度、渗透率的影响规律进行研究, 以期对油田进一步挖潜、三次采油方案的制订和注水开发效果的改善等提供参考。

## 1 孔喉内微粒的变化机理

疏松砂岩在长期水驱过程中, 由于各种水动力

学或者化学因素的影响, 导致孔喉内的粘土矿物发生脱落、捕集、运移等变化, 引起储层孔喉半径和孔渗性质的变化, 进而导致储层参数发生变化。分析总结疏松砂岩水驱过程中粘土矿物微粒的不同微观变化机理, 并对孔喉内微粒的脱落、捕集、运移等机理进行定量描述。

### 1.1 脱落机理

岩石孔喉内流体的流动会对壁面的微粒产生拉拽和摩擦等作用, 当这些力的作用达到某种程度时, 微粒从壁面脱落, 并随流体在孔喉内流动。随着注入速率的增大, 微粒脱落的速率也越大。采用 Khlar 提出的计算公式对微粒的释放速率进行描述<sup>[9-10]</sup>, 即

$$v_{ri} = \alpha_i (v_i - v_c) c_{bi} \quad (1)$$

式中:  $v_{ri}$  为单位孔喉表面积下的微粒释放速率,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\alpha_i$  为释放系数, 当微粒释放速率小于临界流速时其值为0;  $v_i$  为孔喉内流体流速,  $\text{m/s}$ ;  $v_c$  为临界流速, 即当孔喉内流体流速大于该值时微粒才开始释放,  $\text{m/s}$ ;  $c_{bi}$  为孔喉壁面可脱离微粒的质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 1.2 捕集机理

随流体进入储层的微粒, 在重力、电荷引力等作用下可能沉降到储层孔喉壁面上, 导致孔喉半径减小, 甚至会堵塞储层喉道, 使储层连通性变差。捕集机理主要包括直接堵塞、壁面沉积和架桥堵

收稿日期: 2013-05-15。

作者简介: 冯其红, 男, 教授, 从事调剖堵水与油藏工程研究。联系电话: (0532)86981165, E-mail: fengqihong@126.com。

基金项目: “十二五”中海油重大专项“海上稠油油藏高含水期剩余油分布机理研究”(2011ZX05024-002-002)。

塞<sup>[11]</sup>。模拟孔喉内微粒的捕集过程时,应首先判断流经该喉道的流体中携带的微粒是否将喉道直接堵塞。若不能直接堵塞,则计算微粒半径与该喉道半径的比值,以判断是否发生架桥堵塞;若喉道未发生堵塞,则计算该时间步长内喉道微粒的沉积量,用于计算每个时间步长结束时孔喉内流体和壁面处微粒的浓度。

**直接堵塞** 当微粒半径大于或者等于喉道半径时,微粒会直接堵塞所流经的喉道,使孔喉配位数降低,网络连通性变差。

**壁面沉积** 在流体流动过程中,部分流体中悬浮的微粒在重力等作用下,沉积于孔喉壁面,使孔喉半径减小。关于微粒的沉积,中外学者提出很多表征方法,笔者采用Jalel提出的公式<sup>[11]</sup>对微粒沉积速率进行计算。

**架桥堵塞** 当微粒半径小于喉道半径时,流经喉道的微粒可通过多个微粒架桥的方式将喉道堵塞,降低孔喉网络连通性。通常微粒半径大于喉道半径的1/3时,则可通过架桥的方式将喉道堵塞<sup>[12]</sup>。

### 1.3 运移机理

Leichtberg等通过实验研究发现,当微粒与孔喉半径之比达到0.95时,微粒在孔喉内运移的速率与孔喉内流体的速率之差可忽略不计<sup>[13]</sup>,即可以认为孔喉内微粒的流速与流体流速是相同的。

## 2 储层参数变化的网络模拟

建立能够反映疏松砂岩孔喉性质的网络模型,并结合孔喉内微粒脱落、捕集、运移等变化机理,得到数学模型,从而研究储层参数随水驱进行而发生的变化。

### 2.1 孔隙网络模型

孔隙网络模型是用模型化的网络来替代多孔介质内复杂的孔隙空间,从微观角度研究流体的渗流规律<sup>[5-6]</sup>。喉道半径、喉道长度、孔喉比和截面的形状因子均采用截断威布尔分布来确定<sup>[6]</sup>。以喉道半径的确定为例,得到最大和最小喉道半径后,网络中喉道半径的计算公式为

$$r = (r_{\max} - r_{\min}) \left\{ -\delta \ln \left[ x(1 - e^{-1/\delta}) + e^{-1/\delta} \right] \right\}^{1/\gamma} + r_{\min} \quad (2)$$

式中:  $r$  为喉道半径,  $m$ ;  $r_{\max}$  和  $r_{\min}$  分别为最大和最小喉道半径,  $m$ ;  $\delta$  和  $\gamma$  为截断威布尔分布特征参数;  $x$  为0和1之间的随机数。

采用形状因子表征孔喉的截面形状,其表达式为

$$G = \frac{A}{P^2} \quad (3)$$

式中:  $G$  为形状因子;  $A$  为横截面积,  $m^2$ ;  $P$  为周长,  $m$ 。

孔隙内切圆半径的计算公式为

$$r_p = \max \left[ \alpha \frac{\sum_{i=1}^n r_{t,i}}{n}, \max(r_{t,i}) \right] \quad (4)$$

式中:  $r_p$  为孔隙内切圆半径,  $m$ ;  $\alpha$  为孔隙的孔喉比;  $n$  为与孔隙相连的喉道数;  $r_{t,i}$  为与孔隙相连不同喉道的半径,  $m$ 。

### 2.2 数学模型

根据多孔介质的渗流特征以及研究需要,假设:①喉道、孔隙以及流体均等温、不可压缩;②流体渗流符合Poiseuille方程,管壁处无滑脱;③孔喉壁面上微粒的脱落、捕集符合微粒脱落和捕集机理;④微粒在孔隙中的浓度分配按流入不同喉道的流量确定;⑤单个孔隙或喉道内流体中的微粒浓度相同。

对于单个孔喉,考虑微粒运移时的物质平衡方程,应满足

$$c_i \sum_{in} Q_i - c_f \sum_{out} Q_j = \frac{\Delta c_f V}{\Delta t} + \frac{\Delta c_b V}{\Delta t} \quad (5)$$

式中:  $Q_i$  为流体流入流量,  $m^3/s$ ;  $c_i$  为流入流体中微粒的质量浓度,  $kg/m^3$ ;  $Q_j$  为流体流出流量,  $m^3/s$ ;  $c_f$  为孔喉内流体中微粒的质量浓度,  $kg/m^3$ ;  $V$  为孔喉体积,  $m^3$ ;  $t$  为驱替时间,  $s$ ;  $c_b$  为孔喉壁面微粒的质量浓度,  $kg/m^3$ 。

对于2个相邻孔隙,通过其连接喉道的流量为

$$Q_{ij} = \frac{\pi r^4 (p_i - p_j)}{8\mu L} \quad (6)$$

式中:  $Q_{ij}$  为通过连接第  $i$  和第  $j$  个孔隙喉道的流量,  $m^3/s$ ;  $p_i$  和  $p_j$  分别为相邻孔隙处的压力,  $MPa$ ;  $\mu$  为地层流体粘度,  $mPa \cdot s$ ;  $L$  为孔隙间距,  $m$ 。

对于非边界处的所有孔隙节点,满足流量守恒,即

$$\sum_{j=1}^{Z_i} Q_{ij} = 0 \quad (7)$$

式中:  $Z_i$  为孔隙  $i$  的配位数。

将式(6)代入式(7)中得到以孔隙*i*处压力为未知数的方程,将所有孔隙的方程联立得方程组。求解方程组,得到各孔隙处压力,进而求取不同孔隙内流体流速以及模型渗透率等参数。模拟疏松砂岩储层参数随水驱进行而发生变化的过程(图1)。

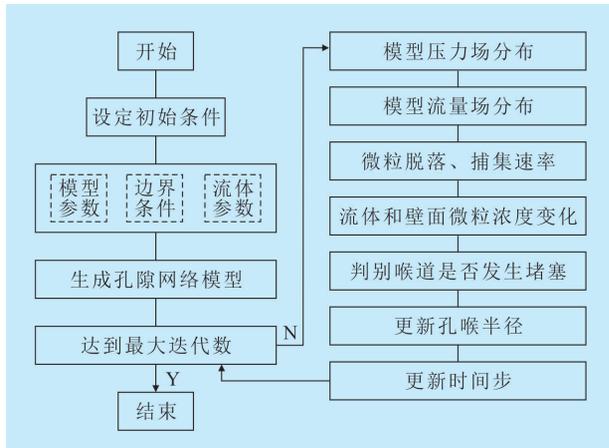


图1 储层参数变化网络模拟流程

### 3 不同条件下储层参数变化规律

建立  $20 \times 20 \times 10$  的三维网络模型,其喉道半径为  $1 \sim 11 \mu\text{m}$ ,孔喉比为  $1.5 \sim 3.0$ ,喉道长度为  $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 。

#### 3.1 驱替压力梯度

物理模拟结果表明,注采强度越大,作用在岩石颗粒上的压力梯度越大,孔喉内部微粒越容易脱落,微粒流出量越大,故注采强度会对储层孔喉半径及渗透率、孔隙度等参数的变化产生较大影响。

首先设定模拟过程中的驱替压力梯度为  $0.10 \text{ MPa/m}$ ,得到驱替前后模型孔喉半径分布(表1),结果表明,驱替后孔喉半径分布范围有小幅变化,且孔喉半径总体呈增大趋势。随着驱替的不断进行,孔喉内部的粘土矿物微粒不断脱落离开壁面,导致孔喉半径逐渐增大;同时脱落微粒在孔喉壁面处发生沉积,导致个别孔喉半径减小,故驱替前后孔喉半径范围会有小幅变化。虽然驱替过程中部分微粒在孔喉壁面沉积,导致孔喉发生堵塞或者变小,

取值	驱替前		驱替后	
	孔隙半径	喉道半径	孔隙半径	喉道半径
最大值	24.40	11.00	24.10	11.80
最小值	7.58	1.18	8.14	1.14
平均值	14.20	6.15	15.00	6.20

但总体上孔喉半径变大、连通性增强。将驱替压力梯度分别设置为  $0.05, 0.10$  和  $0.15 \text{ MPa/m}$ ,随水驱的不断进行,渗透率和孔隙度变化曲线符合逐渐增大的趋势(图2);这是因为随着注入水的不断冲刷,孔喉壁面的微粒脱落进入流体中,导致孔喉半径增大,孔喉连通性变好,进而导致渗透率和孔隙度不断增大。采用不同的驱替压力时,随着驱替压力梯度增大,孔喉内微粒的脱落速率加快,孔喉半径增大越快,渗透率和孔隙度也增加越快。

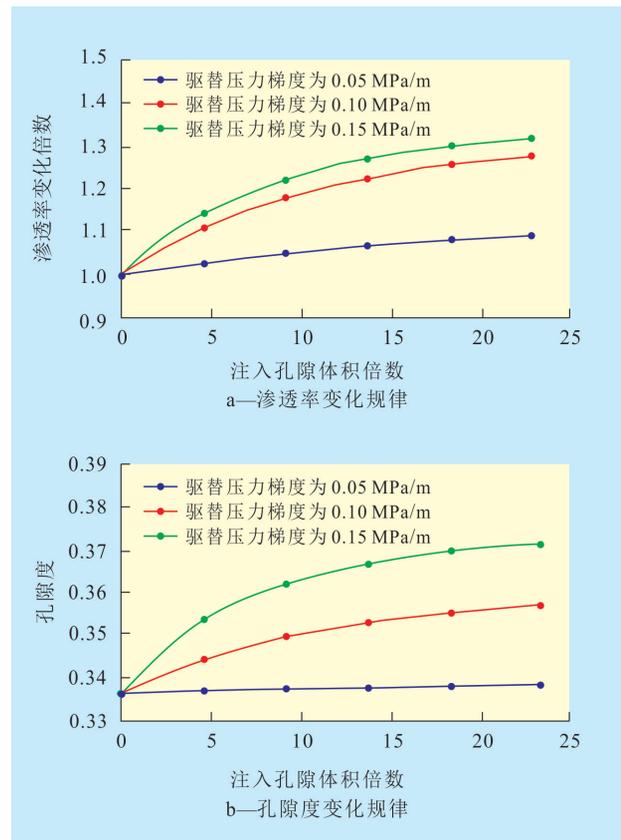


图2 不同驱替压力梯度下渗透率和孔隙度变化规律

#### 3.2 胶结程度

孔喉内部的粘土矿物具有不同的胶结程度,胶结程度越大,抵抗流体冲击的能力越强。在考虑微粒的脱落机理时,用临界流速来表征微粒的抗拉拽能力;故粘土矿物胶结程度越大,微粒脱落的临界流速也越大。对不同胶结程度下储层参数的变化规律进行模拟,边界条件设定为定驱替压力梯度,其值为  $0.10 \text{ MPa/m}$ 。临界流速设定为  $3 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-5}$  和  $7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。模拟结果表明(图3),渗透率和孔隙度变化曲线具有逐渐增大的变化规律,但是胶结程度越小,临界流速也越小微粒越容易脱落离开孔喉壁面,即孔喉内微粒脱落速率越大,导致渗透率和孔隙度的变化幅度增大。

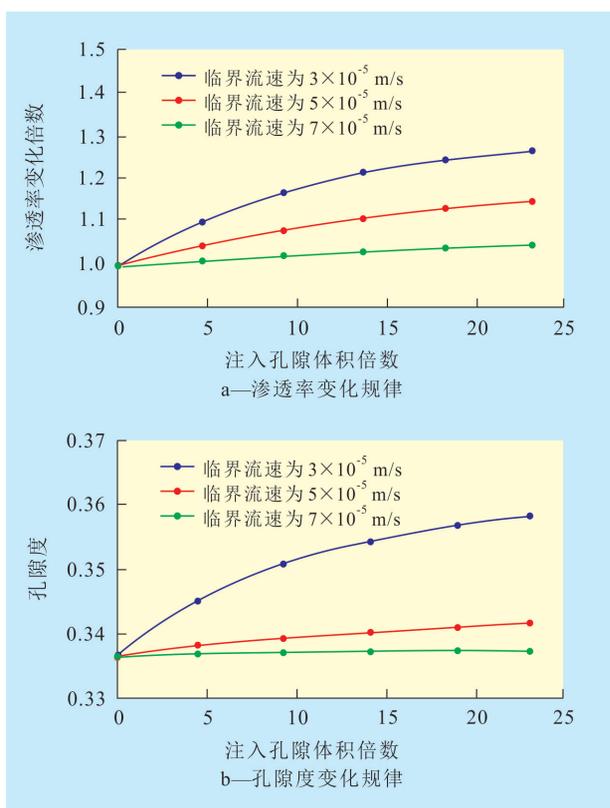


图3 不同胶结程度下渗透率和孔隙度变化规律

## 4 结论

综合考虑多孔介质中不同的微粒变化机理,建立了储层参数变化网络模拟方法,并对不同条件下储层参数变化规律进行了模拟。结果表明:长期注水冲刷后,孔喉半径分布范围有小幅变化,孔喉半径总体呈增大趋势,储层连通性增强;储层渗透率和孔隙度随驱替进行逐渐增大,驱替压力梯度越大,孔喉内流体流速越大,微粒脱落越快,储层渗透率和孔隙度增大越快;砂岩中粘土矿物的胶结程度

越大,其反抗流体冲击的能力越强,微粒脱落速率越小,储层渗透率和孔隙度变化幅度越小。

### 参考文献:

- [1] 林光荣,陈付星,邵创国,等.马岭油田长期注水对油层孔隙结构的影响[J].西安石油学院学报:自然科学版,2001,16(6):33-35.
- [2] 吴素英.长期注水冲刷储层参数变化规律及其对开发效果的影响[J].大庆石油地质与开发,2006,25(4):35-37.
- [3] 张金庆,孙福街,安桂荣.水驱油田含水上升规律和递减规律研究[J].油气地质与采收率,2011,18(6):82-85.
- [4] 吴欣松,苏小军,吴宗来.注水开发过程中储层参数变化规律的测井地质评价[J].测井技术,2002,26(4):311-314.
- [5] 姚军,陶军,李爱芬.利用三维随机网络模型研究油水两相流动[J].石油学报,2007,28(2):94-97.
- [6] 唐晓红.埕岛油田中高含水期综合调整对策研究[J].油气地质与采收率,2011,18(6):90-93.
- [7] 冯其红,白军伟.驱替压力梯度对相对渗透率影响的网络模拟[J].大庆石油地质与开发,2011,30(2):84-88.
- [8] 刘显太.中高渗透砂岩油藏储层物性时变数值模拟技术[J].油气地质与采收率,2011,18(5):58-62.
- [9] 尤启东,陆先亮,栾志安.疏松砂岩中微粒迁移问题的研究[J].石油勘探与开发,2004,31(6):104-107.
- [10] Khlar K C, Fogler H S. Water sensitivity of sandstones [J]. SPEJ, 1983, 23(1):55-64.
- [11] Faruk Civan. Formation damage mechanisms and their phenomenological modeling—an overview [C]. Proceedings of the European Formation Damage Conference, Scheveningen, Netherlands, 2007.
- [12] Jalel O, Jean-Francois V. A two-dimensional network model to simulate permeability decrease under hydrodynamic effect of particle release and capture [J]. Transport in Porous Media, 1999, 37(3):303-325.
- [13] Leichtberg S, Pfeffer R, Weinbaum S. Stokes flow past finite coaxial clusters of spheres in a circular cylinder [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1976, 3(2):147-169.

编辑 王星

欢迎订阅《油气地质与采收率》