

'94 国际石油与石油
化工科技研讨会论文

应用统计模拟技术 确定注入水中的固相颗粒含量

吴 湛 罗平亚
— (西南石油学院)

1994 年 9 月 北京

应用统计模拟技术确定注入水中的固相颗粒含量

摘 要

由于注入水中含有固相颗粒,颗粒在孔隙内随机沉降导致流动阻力增加,渗透率下降。本文根据不同的孔隙形态,建立了具有孔隙特征的网络模型,运用 Monte Carlo 方法模拟颗粒在孔隙中随机运移与沉降后渗透率下降的规律,探讨了确定水质标准与油层的特性流体性质之间的相互关系。为制定水质标准提供了理论依据。

前 言

在油田注水工艺中,必须确定一个合理的水质标准,使地层尽可能地减少损害,而又不致于造成处理注入水过程费用过多。已有许多研究人员试图建立水质与储层性质之间的相互关系,但要定量制定一个能与油层相匹配的水质标准还有一定的困难,尤其是可允许的颗粒大小和数量标准还没有严格地确定。目前一般利用相同或相似的油藏注水作业中使用水质标准的经验,采用岩心流动实验建立井污染预测模型。然而这些方法有一定的局限性。本文的研究目的就是根据孔隙所具有的形态与结构,建立具有储层特征的网络模型,运用随机模拟方法计算颗粒在孔隙内随机运移与沉降导致的油层损害,以及确定与储层相配伍的水质标准。

多孔介质网络模型

用岩心流动实验建立的污染模型来预测产层的损害,其不足之处在于:①难以选择具有代表性的岩心做实验,或难以选择足够数量的岩心以代表注水层内的各种变化;②岩心制备技术还不可能做到所制备的岩心与实际油层的孔隙结构完全一致;③各次岩心试验结果不一致,且工作量大;④无法了解颗粒在孔隙内沉降后的分布规律。除此之外,常规计算颗粒进入地层造成的伤害是基于宏观的连续模型,它忽略了孔隙的具体形态以及孔隙之间的相互连通性,借助 Kozeny-Carmn

方程,由孔隙率的变化间接地求渗透率。但实际上,许多具有相同孔隙率的岩心,即使注入同等数量的颗粒,渗透率下降的规律也是截然不同的。

利用统计模型中的一种——多孔介质网络模型可以较好地处理该问题。Todd^[1]最早引用了网络模型来模拟外来颗粒进入孔隙网络内随机运移与沉降所导致的渗透率下降,运用这种方法可以直接由 Darcy 计算渗透率的变化,而无需借用 K-C 公式。

网络模型是将多孔介质视为一相互连通的网路,大的孔隙由半径较小的喉道相互连接而成,每个孔隙所连接的通道数为配位数(Coordination number)。常用的网络类型有以下几种,如图 1 所示^[2]。Todd 首先利用“随机步法”模拟颗粒在网络内的随机行走。后来 Rege^[3]等人提出了“有偏流量法”模拟颗粒在流场作用下的运移,它比无规行走更能精确地描述颗粒在孔隙内的运移。但他们所引用的毛管络是由圆柱体毛管组成。然而实际孔隙单元应该是从喉道半径到孔隙半径有一个扩大的过程,由于颗粒沉降在毛管的不同部位,渗透率的损害也不一样。如果颗粒沉降是在园柱形毛管中进行的,则渗透率损害将与沉降位置无关,这与实际不符。针对现有网络模型的不足,笔者开发了一种具有孔隙特征的三维网络模型^[3],并运用该网络模型模拟颗粒在孔隙内运移沉降。

为了对现有网络模型进行改进,文中引用两种几何体来模拟孔隙的基本形态。图 2a 是抛物体;图 2b 为波纹管,最小部分为喉道,宽部分为孔隙。从喉道到孔隙半径逐渐增大,由于孔隙与喉道组成的孔隙单元不再是个圆柱体,水利传导率

计算发生了变化,笔者推导了一个近似计算水利传导率的方法^[3]。

对于抛物体,壁面函数满足

$$y = kx^2 + r_0 \quad (1)$$

式中: r_0 为喉道半径;水利传导率

$$g = \frac{\pi b^4}{8\mu l} \quad (2)$$

即

$$I = \frac{1}{2a^2(n-1)} \left[\frac{z}{z^2 + a^2} + (2n-3)I_{n-1} \right] \quad (3)$$

其中:

$$I_1 = \frac{1}{a} \arctg \frac{z}{a} \quad (4)$$

$$a = \frac{r_0}{k} \quad (5)$$

如果孔隙单元为波纹管,则

$$r = a - b \cos \frac{\pi}{l} \quad (6)$$

$$I = \frac{A \sin x}{(a - b \cos x)} + B \int \frac{dx}{(a - b \cos x)^{n-1}} + C \int \frac{dx}{(a - b \cos x)^{n-2}} \quad (7)$$

$$I_1 = \frac{2}{a-b} \sqrt{\frac{a+b}{a-b}} \arctg \left[\sqrt{\frac{a+b}{a-b}} \operatorname{tg} \frac{x}{2} \right] \quad (8)$$

如果喉道半径满足 Raleigh 分布,则概率密度函数为

$$f(r) = \frac{r}{\delta} \exp \left(-\frac{r^2}{2\delta} \right) \quad (9)$$

有了描述喉道分布的概率密度函数 $f(r)$,由孔喉比即可确定孔隙半径。采用图 1 中的立方体网络,配位数为 6,每个结点处有

$$\sum g_{ij} \Delta P_{ij} = 0 \quad (10)$$

将上式写成迭代式,为

$$P_i^{t+1} = (1-w)P_i^{(t)} + w \left[\sum_{j < i} g_{ij} P_j^{(t+1)} + \sum_{j > i} g_{ij} P_j^{(t)} \right] / \sum_j g_{ij} \quad (11)$$

由于计算流场是在有限空间内进行的,为了消除边界效应,在网络两边采用了周期边界条件。这样模拟结果便可以代表无穷大的真实油藏系统。

颗粒的随机运移与沉降

颗粒进入网络后,将以与流体相同的速度沿

毛管内运动,颗粒沉降的概率可由式^[4]

$$P_r = 4[(\theta a/R_0)^2 - (\theta a/R_0)^3] + (\theta a/R_0)^4 \quad (12)$$

来计算。式中: a 为颗粒半径; R_0 为颗粒沉降处毛管的半径;

$$\theta = \theta_0 \exp \left(\frac{-V}{V^*} \right) \quad (13)$$

影响 θ 的因素有流体速度、离子强度及 PH 值等。式中: θ_0 是由离子强度决定的常数, V 为流体平均速度, V^* 为临界速度。颗粒沉降有四种可能情况:①颗粒半径大于喉道半径,颗粒被捕获;②颗粒半径大于喉道半径,通过喉道后沉降;③颗粒半径小于喉道半径,通过喉道后沉降;④颗粒半径小于喉道半径,但未通过喉道就发生沉降。颗粒运行到孔隙处,有三个可能的行走方向,本文应用偏流量法来选择颗粒行走的方向,颗粒向某一方向行走的概率为:

$$P_k = q_k / \sum_{i=1}^2 q_i \quad (14)$$

由拟随机发生器产生一均匀分布数,如果产生值小于 P_k ,则颗粒向该方向运动。颗粒沉降后,会导致流动阻力的增加,颗粒压力降为

$$\Delta P^* = \frac{24 D_d \mu V}{D_p^2} \left(1 - \frac{(D_p - 2b)^2}{D_p^2} \right) \cdot \left(1 + \frac{9}{16} \frac{D_d}{2b} \right) \quad (15)$$

式中: b 是颗粒中点到毛管壁之间距离的两倍,沉降后 $D_d = b$,因此,颗粒沉降后毛管压力变为

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P^* \quad (16)$$

其中: ΔP_0 为颗粒未沉降前毛管压力降, ΔP 为颗粒沉降后的压降。此时,由式(2)重新计算毛管喉道半径。计算程序如下:

(1)由喉道分布概率密度函数,利用拟随机发生器产生一个系列随机数 r_i ,使 r_i 值等于每个毛管半径。

(2)由式(2)计算毛管传导率,求解方程组得各结点压力,进而求出每根毛管内流量。再由 Darcy 求渗透率。

(3)由注入端注入半径满足高斯分布的颗粒,可以随机选择入口进入毛管网络。

(4)颗粒进入网络后,由式(12)判别是否沉降,如果沉降,则由式(15)求出压力降。然后重新计算网络渗透率。如果颗粒不沉降,则用式(14)判定走向。

(5)如果颗粒到达边界还未沉降,则认为该粒

子不再沉降,令其消失,由注入端重新注入一个新颗粒。

结果分析与讨论

我们采用的模型是,网络大小为 $40 \times 30 \times 1$,毛管形状为抛物体,整个注入过程均采用定压边界条件。利用该模型,我们模拟了颗粒在网络内随机沉降所造成的渗透率下降情况,以及用六种不同颗粒半径值注入后渗透率的变化状况。图 3 中曲线 A、B、C、D、E、F 分别对应 1.5、2.5、3.5、4.5、5.0、5.5 μm 的注入颗粒半径。从曲线中可以看出,注入颗粒半径小于 4.5 μm 是对应于该颗粒的浓度、孔隙结构、流体性质、注入参数引起渗透率损害较为严重的颗粒半径,这是因为颗粒半径增大,颗粒在毛管内更易沉降,但由于具有相同重量浓度的颗粒流体,颗粒半径越大,意味着在单位时间内注入孔隙介质内的颗粒减少,因而从总体效果上看,渗透率下降的速度反而减小。但颗粒沉降是一个累积的过程,当注入孔隙倍数足够大时,含有较大颗粒的流体还是能引起较为严重的渗透率损害,如图 4 所示。

具有相同微观结构参数的抛物体组成的孔隙单元与波纹管组成的孔隙单元,颗粒沉降后,渗透

率下降速度是不一样的。如图 5 所示,注入相同的颗粒,抛物体形状孔隙组成的网络渗透率下降速度更快一些。这表明孔隙形状对颗粒的沉降有影响,从而导致渗透率的损害程度不同。

同样,颗粒浓度也会对渗透率的损害有较大影响,如图 6 所示,颗粒浓度增大了 2 倍,渗透率下降速度更为迅速(曲线 B),可见控制注入颗粒浓度,也能有效地防止油层损害的程度。

模拟分析得出的以上几个结论,使我们对颗粒在孔隙内沉降后带来的油层损害有了更深的认识。特别是在制定水质标准时,必须与注入控制参数,流体性质,颗粒大小分布,孔隙形态同时考虑,才能制定出一个合理的水质颗粒标准。

参考文献

- 1 Todd A C. The application of depth of formation damage measurements in prediction water injectivity decline, SPE 12489
- 2 Roge S D et al. A network model for deepbed filtration of solid particles and emulsion drops, aiche J 34, 1988, 1761
- 3 吴湛. 三维网络模型构造及微粒运移的计算机模拟, 西南石油学院博士论文, 1994
- 4 Rege S D et al. Network model for straining dominated particle entrapment in porous media. Chem. Eng. Sci, 1987, (7): 1553

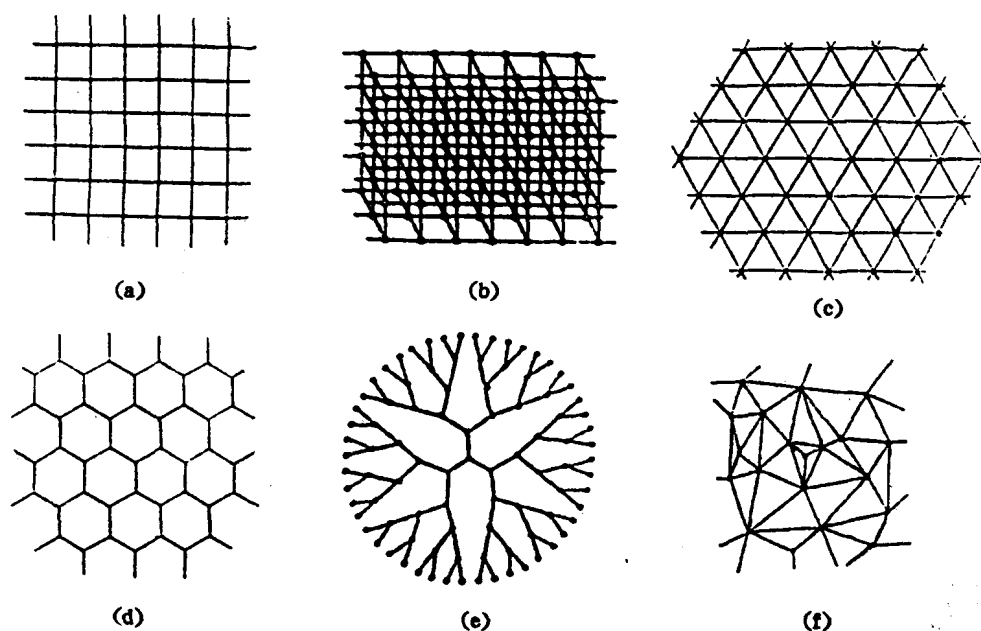


图 1 多孔介质网络

(a)正方形网络; (b)立方体网络; (c)三角形网络;
(d)蜂房形网络; (e)贝塞尔网络; (f)Vornoi 网络

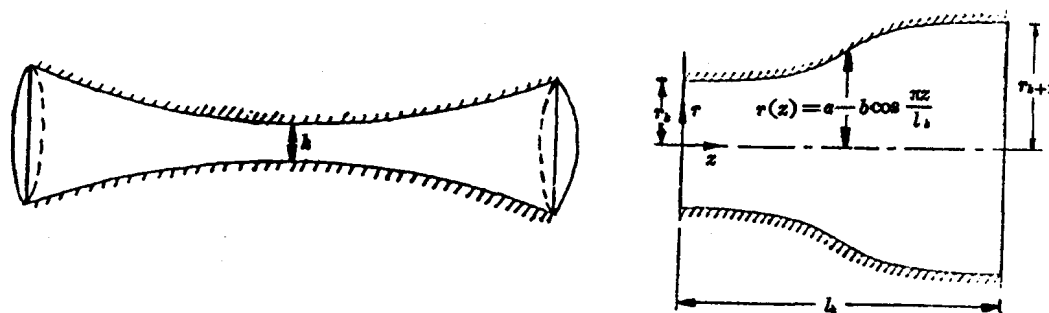


图 2 孔隙单元体

(左)抛物体; (右)波纹管

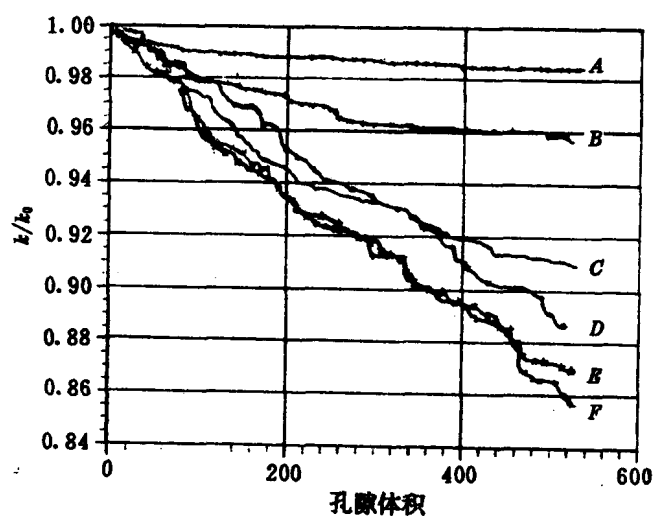


图 3 颗粒半径对渗透率的影响

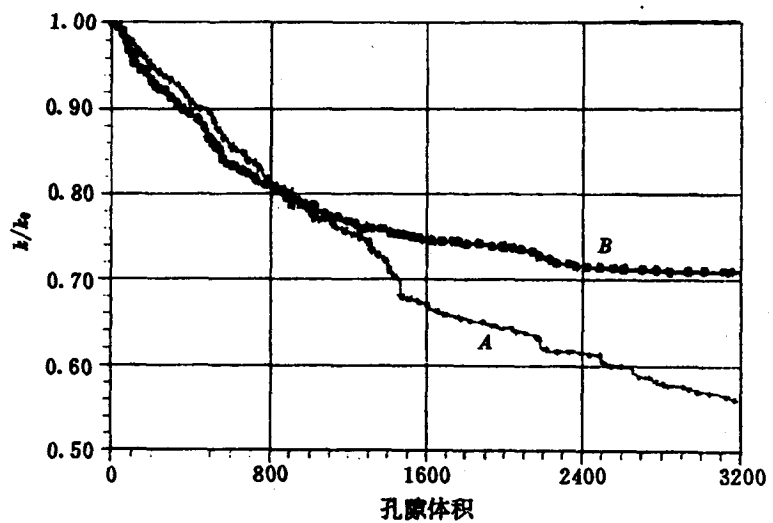


图 4 颗粒半径对渗透率的影响

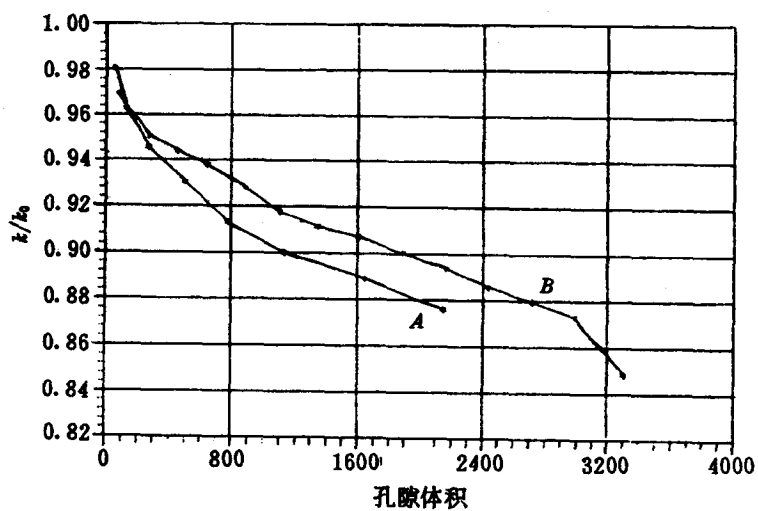


图 5 渗透率与注入孔隙倍数的关系

曲线 A 对应孔隙形态为波纹管；曲线 B 对应孔隙形态为抛物体

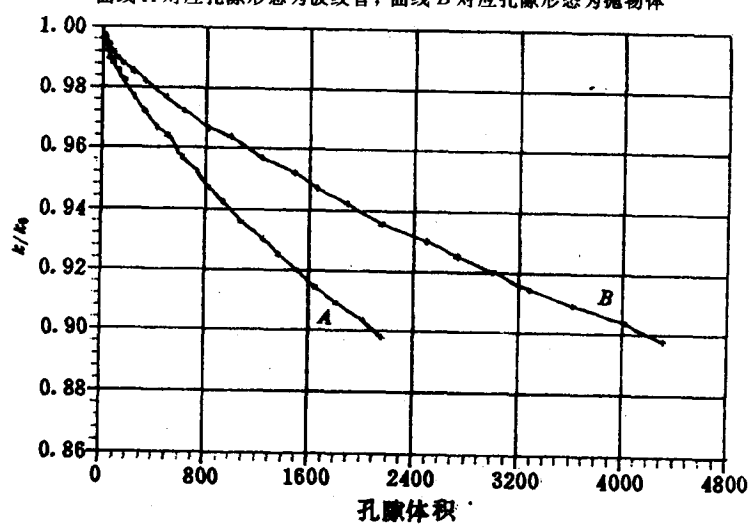


图 6 注入浓度对渗透率的影响

曲线 B 比 A 的颗粒浓度增大 2 倍

石油物探局制图印刷厂
照排印刷