

文章编号: 1009-0747(2003) 04-0108-03

# 砾石充填层孔喉结构可视化模拟

薄启炜, 董长银, 张琪, 李志芬, 赵东伟

(石油大学(华东))

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“水平井砾石充填动态模型与应用研究”(50274055)

**摘要:** 砾石充填是防止疏松砂岩油藏在开采中出砂的主要方法之一, 砾石层孔喉结构是选择砾石尺寸并预测其挡砂效果的重要参考依据。给定砾石颗粒的总数量, 不考虑重力压实作用, 在未沉降颗粒中随机抽取颗粒, 进行沉降模拟, 模拟过程包括沉降初始化、确定碰撞砾石颗粒、判断颗粒稳定性条件和运动趋势。统计模拟结果可得到充填层的可视化结构及孔喉直径的分布状况。用此方法两次模拟直径为 0.4~0.8mm 砾石随机沉降的二维充填, 结果砾石层孔喉尺寸分布不符合正态分布规律, 需要进一步探索其分布规律。对于同种砾石应多次模拟, 将各次模拟结果加权平均后作为最终结果。图 4 表 1 参 5

**关键词:** 防砂; 砾石充填; 孔喉分布; 孔隙结构; 计算机模拟; 可视化

中图分类号: TE358 文献标识码: A

## 0 引言

砾石充填是目前我国疏松砂岩油藏的主导防砂方法之一, 砾石尺寸的选择是其设计成功的关键。选择砾石尺寸的重要依据是砾石层孔喉结构分布, 如果清楚砾石层的孔喉尺寸分布情况, 可直接预测地层砂对砾石层的侵入情况, 分析挡砂效果<sup>[1]</sup>。另外, 除了采用常用的 Saucier 方法选择砾石尺寸外, 还可直接根据地层砂的粒度分布, 根据防砂所需的最小、最大孔喉尺寸, 确定相应的砾石尺寸分布<sup>[2]</sup>。

目前计算砾石层孔喉尺寸是将全部砾石颗粒视为直径为粒度中值的均匀颗粒<sup>[3,4]</sup>, 根据排列方式计算理想状态下的平均孔喉尺寸; 或者直接根据砾石层孔隙度和粒度中值回归得到经验公式<sup>[3]</sup>。砾石尺寸通常在一定范围, 其沉降堆积是随机的, 因此其孔喉尺寸也是在一定的范围内变化的。本文通过随机模拟, 得到砾石层的可视化充填结构及其孔喉结构, 进而计算其孔喉尺寸的分布情况, 可用于砂侵分析和砾石尺寸的选择。

## 1 砾石孔喉结构的可视化模拟

### 1.1 基本假设

模拟砾石随机沉降堆积过程的假设为: 砾石颗粒视为球形; 砾石与已沉降颗粒发生碰撞时不出现弹跳作用; 只考虑充填的结构稳定性, 忽略由于重力压实引起结构重组效应; 每次下落一个颗粒; 二维模拟, 模拟容器为一矩形区域, 将砾石尺寸范围分为若干个更小的范围, 每个小尺寸范围内的颗粒直径相等。

常用的砾石尺寸分布一般符合正态分布规律。给定砾石颗粒的总数量后, 根据正态分布函数可得到不

同粒径的颗粒数量。模拟过程中, 在未沉降颗粒中随机抽取将沉降的颗粒。

### 1.2 砾石沉降过程模拟

模拟步骤为: ① 初始化充填第一层; ② 随机抽取一个颗粒, 随机给定初始  $x$  坐标; ③ 搜索可能与下落颗粒首先碰撞的颗粒; ④ 判断下落颗粒受碰撞后的稳定性; ⑤ 若不稳定, 判断颗粒运动趋势, 向左或右滚动一个颗粒位置后重新判断稳定性, 依此反复, 直到颗粒稳定为止; ⑥ 记录颗粒的稳定位置坐标及半径; ⑦ 判断是否充填完毕, 如果是, 计算孔喉参数后结束模拟, 如果不是, 返回第 ④步。

#### 1.2.1 随机沉降的初始化

圆形砾石颗粒在落到容器底部时, 总是完全覆盖其底部后才重叠桥架。因此, 首先随机抽取颗粒依次将容器底部填满, 直到最后一个颗粒边缘与容器壁的距离小于最小颗粒直径时, 即完成了沉降的初始化过程。

#### 1.2.2 确定碰撞砾石颗粒

与下落颗粒首先发生碰撞的颗粒必定在已沉降颗粒的最顶层, 因此应确定顶层颗粒序号, 方法是: ① 在所有  $R_{\min} < X_i < R_{\max}$  的颗粒中,  $Y_i$  值最大的颗粒是顶层左侧第一个颗粒。② 第一个颗粒确定后, 搜索所有在右侧与之相切的符合条件 ① 的砾石颗粒, 条件为:

$$\begin{cases} (X_i - X_A)^2 + (Y_i - Y_A)^2 = (R_i + R_A)^2 \\ X_i \geq X_A \end{cases} \quad (1)$$

③ 顶层颗粒中有些不可能与下落颗粒发生碰撞, 判断这些颗粒的条件为:

$$\sqrt{(X_i - X_{i+2})^2 + (Y_i - Y_{i+2})^2} - (R_i + R_{i+2}) < 2R_0 \quad (2)$$

这些颗粒应屏蔽掉(见图 1)。1/4 在顶层颗粒中, 符合条件  $X_i + R_i < X_0 < X_{i+1} - R_{i+1}$  的颗粒为与下降颗粒首先接触的 2 个颗粒。

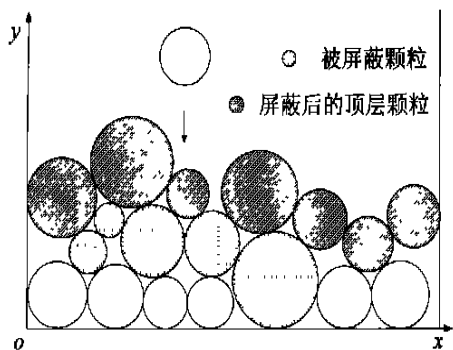


图 1 顶层颗粒及屏蔽颗粒示意图

### 1.2.3 颗粒稳定性条件及运动趋势判断

取图 2 所示坐标系, 沉降颗粒的稳定性有 3 种情况: ① 被左侧容器壁和 1 个颗粒共同支撑, 当  $X'_0 < X_B$  时颗粒达到稳定状态; ② 被 2 个颗粒共同支撑, 当  $X_A < X'_0 < X_B$  时颗粒达到稳定状态; ③ 被右侧容器壁和 1 个颗粒共同支撑, 当  $X_A < X'_0$  时达到稳定状态。

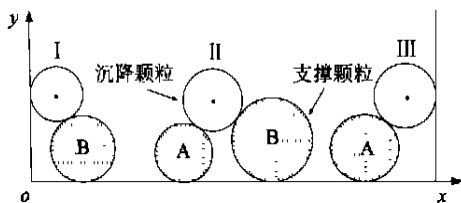


图 2 颗粒稳定的 3 种情况

确定出首先与下沉颗粒发生碰撞的 2 个颗粒(或容器壁和 1 个颗粒)后, 根据几何原理可计算出首次碰撞后的颗粒位置, 并判断其稳定性。若结构稳定, 则记录其稳定位置坐标、编号及颗粒半径, 再随机充填下一个颗粒, 直到充填完所有的颗粒为止。若结构不稳定, 则当  $X'_0 > X_m > X_n$  颗粒向右侧滚动, 若  $X'_0 < X_n < X_m$  颗粒向左侧滚动。颗粒发生滚动后, 再次与 2 个颗粒或与容器壁及 1 个颗粒接触, 重新判断其稳定性。依此反复, 直到颗粒达到稳定位置为止。记录稳定颗粒编号、稳定位置坐标、半径等, 模拟下一个颗粒的沉降。

## 2 孔喉结构参数计算

模拟砾石充填过程, 可以得到如图 3 所示的砾石沉降后的分布图像, 以及全部砾石颗粒的面积及坐标, 据此可计算砾石充填层的孔隙度、渗透率及孔喉尺寸分布等结构参数。

### 2.1 砾石层孔隙度

砾石颗粒所占总面积为:

$$A_f = \sum_{i=1}^{N_1} \pi R_i^2 \quad (3)$$

充填表观面积为:

$$A_T = \sum_{k=1}^{M-1} (X_{J_{k+1}} - X_{J_k}) Y_k + \frac{1}{2} (X_{J_{k+1}} - X_{J_k}) (Y_{J_{k+1}} - Y_{J_k}) + \frac{1}{2} \pi R_{J_M}^2 + X_{J_1} Y_{J_1} + X_{J_M} Y_{J_M} \quad (4)$$

二维模拟中, 砾石充填后的孔隙度为孔隙面积与充填表观面积的比值:

$$\phi = \frac{A_T - A_f}{A_T} \quad (5)$$

由于实际砾石为三维充填, 因此需校正二维模拟结果。根据实验以及标准工业砾石数据<sup>[2]</sup>, 回归得到孔隙度校正公式<sup>[5]</sup>为:

$$\phi = \phi_+ 0.11 \quad (6)$$

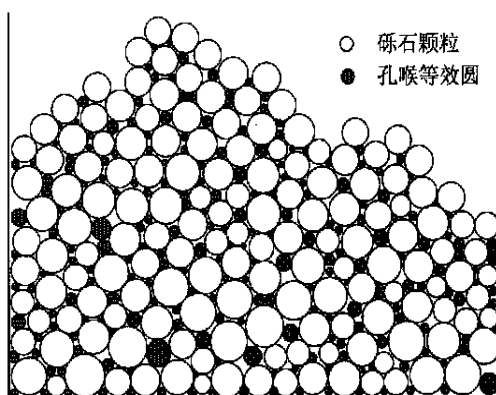


图 3 砾石沉降模拟图像

### 2.2 孔喉尺寸分布

沉降模拟结束后, 根据砾石颗粒的位置坐标及半径, 可计算不同颗粒组合形成的平面孔隙中可容纳的最大圆直径(孔喉直径), 计算全部孔隙容纳圆的位置和半径后, 即可进行统计分析, 得到其孔喉结构分布规律。

## 3 算例分析

选用目前砾石充填常用的砾石尺寸范围进行模拟计算。砾石直径 0.4~ 0.8mm, 砾石总数为 154, 分 9 个等级, 根据正态分布规律  $d \sim N(0.6, 0.05^2)$ , 计算得到砾石尺寸及数量(见表 1)。利用模拟软件对这些砾石进行了 2 次沉降模拟, 由于是随机模拟, 两次模拟结果略有不同。图 3 为第一次模拟得到的图像, 图 4 为两次模拟得到的孔喉直径分布图。加权平均两次模拟结果, 得到充填最大孔喉直径为 0.37mm, 最小孔喉直径为 0.055mm, 平均孔喉直径为 0.1448mm, 砾石层孔隙度为 32.9%。

表1 砾石尺寸分布

粒径(mm)	百分比(%)	数量
0.40	2.76	4
0.45	6.63	10
0.50	12.38	19
0.55	18.02	28
0.60	20.42	32
0.65	18.02	28
0.70	12.38	19
0.75	6.63	10
0.80	2.76	4

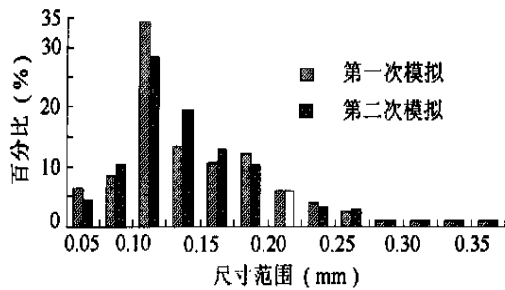


图4 砾石层孔喉尺寸分布

通常,当地层砂粒直径大于砾石层孔喉直径的1/2时能够发生桥架作用,达到挡砂目的。对于给定粒径的地层砂,可以根据砾石沉降模拟得到的孔喉尺寸选择砾石尺寸,选择原则为砾石层的平均孔喉直径或大多数孔喉的直径不小于地层砂粒径的2倍。由图4可见,主要孔喉(占总孔喉数量的70%左右)直径为0.1~0.2mm。因此,0.4~0.8mm的砾石层能够阻挡粒径大于0.05~0.1mm的地层砂。当地层砂粒径小于0.05mm时,则地层砂可能侵入或穿透砾石层而达不到挡砂效果。

图4所示的砾石层孔喉分布规律看似符合正态分布,但在 $\mu$ 取值为0.125mm时,经试算始终得不到合适的 $\delta$ 值,使其服从 $N(\mu, \delta^2)$ 的正态分布。因此,砾石层孔喉尺寸分布规律有待进一步研究。

#### 4 结论与建议

数值模拟砾石沉降过程可以得到直观的砾石层孔喉结构图像和孔喉直径分布状况,是了解砾石层内部孔隙结构的有效手段,模拟结果可用于计算砾石层孔隙度、判断砂侵情况和选择砾石尺寸。2次模拟粒径为0.4~0.8mm砾石沉降过程,结果其平均孔喉直径约为0.145mm,孔喉直径为0.1~0.2mm的占70%左右。为了得到更有代表性和普遍性的结果,对于同种砾石,应进行多次模拟计算,将每次计算结果的加权平均值作为最终模拟结果,模拟次数越多,结果越具代表性。

由于本文研究的是二维充填模拟,并且没有考虑砾石的重力压实作用,因此模拟得到孔喉尺寸可能普

遍高于实际值,需要修正结果。此外,砾石层孔喉尺寸分布并不符合正态分布,其分布规律有待进一步探索。

符号注释:

$R_{\min}, R_{\max}$ ——砾石颗粒最小、最大半径,mm; $X_i, Y_i, R_i$ ——编号为*i*的颗粒沉降稳定后的*x, y*坐标及半径,mm; $X_A, Y_A, R_A$ ——顶层最左侧颗粒的横、纵坐标及半径,mm; $X_0, R_0$ ——正沉降的颗粒初始随机*x*坐标和半径,mm; $X_A, X_B$ ——颗粒A、B的*x*坐标,mm; $X'_0$ ——沉降颗粒首次与2个已沉降颗粒或容器壁与1个颗粒接触后的位置的*x*坐标,mm; $m, n$ ——与下降颗粒首次接触的两个已沉降颗粒的左、右侧颗粒序号; $N_t$ ——总颗粒数; $J_k$ ——充填完毕后最顶层颗粒的序号, $k=1, \dots, M$ ; $M$ ——顶层颗粒数; $\mu, \delta$ ——正态分布函数中的位置参数和形状系数。

参考文献:

- [1] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001. 340-341.
- [2] Guo Ren, Oyeneyin M B. 3D modeling of gravel-pack structure and its application to optimum gravel-size selection[A]. SPE 24999, 1992.
- [3] C. J. 科伯利. 防砂[M]. 周惟英(译). 北京: 石油工业出版社, 1985. 2-16.
- [4] Oyeneyin M B, Peden J M. Factors to consider in the effective management and control of fines migration in high permeability sands[A]. SPE 30112, 1995.
- [5] 万仁溥, 等. 采油技术手册(第七分册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991. 31.

第一作者简介: 薄启炜(1970), 男, 山东垦利人, 现为石油大学(华东)油气田开发工程专业博士研究生。地址: 山东省东营市, 石油大学(华东)石油工程学院采油研究所, 邮政编码: 257061。

收稿日期: 2002-10-22

(编辑、绘图 郭海莉)

#### Visual simulation of porous structure in packed gravels

BO Qiwei, DONG Chang-yin, ZHANG Qi, LI Zhifeng, ZHAO Dongwei (University of Petroleum, Shandong 257061, P. R. China)

**Abstract:** A certain number of suspending gravels are randomly selected to visually simulate sediment precipitation process. While sediment compaction due to gravity is not taken into consideration, the simulation procedures include precipitation initiation, selection of colliding grains, stability analysis, and moving trend prediction. The porous structure and throat size distribution can be derived from statistical analysis of the simulation data. In the present experiment, the simulation was conducted twice on gravels of 0.4-0.8 mm in diameter. Both sets of data indicate that the throat size did not demonstrate normal distribution. For a specific grain size, multiple simulations must be conducted and the data should be statistically treated in order to arrive at a reliable result.

**Key words:** sand control; gravel pack; throat distribution; porous structure; simulation; visual