

# 基于三维网络模型的聚合物驱后 微观剩余油研究

李夏宁 张九然 张 伟

(东北石油大学石油工程学院,大庆 163318)

**摘要** 利用三维网络模型模拟了饱和油、水驱和聚驱三个驱替过程。研究了聚驱后的微观剩余油分布状态。分析了孔隙半径、配位数、形状因子、润湿性等孔隙结构参数对聚驱后剩余油分布的影响。结果表明:随着孔隙半径、配位数、形状因子的增大,聚驱后剩余油百分含量降低;水湿油层的聚驱采收率高于油湿油层的聚驱采收率。

**关键词** 三维网络模型 聚合物驱 剩余油 微观分布

**中图分类号** TE357.3; **文献标志码** A

研究剩余油分布、采用何种方法提高原油采收率已经是各个石油生产国普遍关注的问题。国内外许多专家学者在剩余油分布的研究领域做了大量工作并取得了一定的研究成果<sup>[1,2]</sup>。到目前为止,剩余油的研究可以分为宏观与微观两大类。在宏观领域剩余油分布的研究方法主要包括:地震技术、测井技术、油藏数值模拟技术、开发地质学方法和油藏工程方法<sup>[3]</sup>。在微观领域,剩余油的研究方法主要有岩心磨片荧光分析技术、核磁共振成像技术、密闭取心岩心分析方法、可视化微观模型和构建网络模型来研究剩余油<sup>[4-7]</sup>。杨勇<sup>[8]</sup>运用数值模拟技术对剩余油的影响因素进行了研究;宋荣华等<sup>[9]</sup>将荧光显微图像技术用于判断储层流体的性质上,可用来研究剩余油分布;孙尚如等<sup>[10]</sup>利用核磁成像技术对聚合物驱后剩余油分布特征进行了实验研究。网络模型是近些年来利用计算机模拟多孔介质内渗流规律的一种微观数值模拟技术。网络模型发展到目前,主要以油水两相的网络模型为主<sup>[11]</sup>,对聚合物驱油的网络模型建立的较少。本

文采用三维网络模型模拟了聚合物驱后的剩余油分布,便捷的构造出研究所需要的孔隙结构特征与润湿特性,与实验方法相比具有可重复性、可控制性的特点,适合于对特定问题的研究,对聚驱后采取四次采油方案的实施具有理论研究价值。

## 1 网络模型的建立

本文建立了孔隙个数为 $10 \times 10 \times 10$ 的正方体三维网络模型,各孔隙中心设节点,相连的两个节点间距离相等,为相邻两个孔隙的半径与连接这两个孔隙的喉道长度之和,网络模型整体外观仍呈正方体。喉道与孔隙半径均按照随机分布原则,在最大、最小半径范围内按概率随机赋值。注入液方向为左进右出式,液体注入面与出液面上各孔隙节点压力相同,注入面上为注入压力,出液面压力为0。除边界面上各孔隙外,模型内部各孔隙配位数理想值为6,模型内部孔隙所连通的喉道总数为2 700个。

### 1.1 孔隙大小分布

本文采用 Haring-Greenkorn 分布函数进行孔隙、喉道半径概率分布的计算,该函数参数简单,应用方便,计算精度在要求范围内。

$p(r) = K(R_{\max} - r)(r - R_{\min}) \exp[(\bar{R}^2 - r^2)/2\sigma^2]$  (1)  
式(1)中,  $K$  为常数,  $R_{\max}$  及  $R_{\min}$  为最大、最小半径,  $\bar{R}$  为平均半径,  $\sigma$  为概率分布宽度。应用该概率函数, 即可得出此半径的概率密度, 乘以总的孔隙(喉道)数, 可求出半径为  $r$  的孔隙(喉道)数量, 并随机的分布在网络模型中。

## 1.2 孔隙度

孔隙度是指岩石中孔隙体积(或岩石中未被固体物质充填的空间体积)与岩石总体积的比值, 其表达式为:

$$\varphi = \frac{V_1}{V_2} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中:  $V_1$  为总的孔隙体积,  $\mu\text{m}^3$ ;  $V_2$  为岩石的表观体积,  $\mu\text{m}^3$ 。

孔隙度反应了储集层储集流体的能力, 储层的孔隙度越大, 能容纳流体的数量就越多, 储集性能就越好。对于网络模型中孔隙度的计算, 等于总的孔隙体积加上总的喉道体积与网络模型总体积的比值公式为:

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} A_i L_i + \sum_{i=1}^{n_2} V_i}{V} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中:  $\varphi$  为孔隙度;  $A_i$  为每个喉道截面积,  $\mu\text{m}^2$ ;  $L_i$  为每个喉道的长度,  $\mu\text{m}$ ;  $V_i$  为每个孔隙的体积,  $\mu\text{m}^3$ ;  $V$  为网络模型的体积,  $\mu\text{m}^3$ ;  $n_1$  为网络模型中总的喉道数;  $n_2$  为网络模型中总的孔隙数。

## 1.3 形状因子

在网络模型的模拟中, 将真实储层岩石的孔隙/喉道截面简化为三角形、正方形和圆形三种情况。用形状因子  $G$  来描述孔隙/喉道截面的形状, 形状因子  $G$  定义为:

$$G = \frac{A}{P^2} \quad (4)$$

式(4)中:  $A$  为某孔隙/喉道的截面面积,  $\mu\text{m}^2$ ;  $P$  为此孔隙/喉道的截面周长,  $\mu\text{m}$ 。

## 1.4 配位数

配位数是指与孔隙连通的喉道的个数, 是表示储集层连通程度的参数, 配位数的个数越多, 说明孔隙的连通性能越好, 流体的流动通道就越多。网

络模型采用了孔隙的最大配位数为 6 来模拟不同驱替阶段剩余油的分布。

## 2 液体微观驱替过程模拟

利用三维网络模型模拟了饱和油、水驱和聚驱三个驱替过程, 根据流体在孔隙中的分布状态, 饱和油过程的驱替方式主要为活塞式驱替; 水驱过程和聚驱过程的驱替方式比较复杂, 有活塞式、卡断式和孔隙体填充三种。

### 2.1 饱和油过程

在进行饱和油过程模拟之前, 网络模型中所有的孔隙和喉道都呈强水湿状态, 所以在饱和油过程中只发生活塞式驱替, 驱替的原则是只有接触到非润湿相油的孔隙或者喉道才可以发生驱替, 驱替过程完成后网络模型中的油都为连续相。在网络入口处施加一定初始压力并克服毛管阻力, 使孔隙达到原始储层含油饱和度。

在网络模型的构建中, 只有一小部分的喉道截面为圆形, 大部分的喉道截面为多边形, 在计算截面为多边形的喉道的毛管压力就变得非常复杂, 由 Mayer、Stowe 和 Prince 推导出进入毛细管压力  $p_c$  为:

$$p_c = \frac{\sigma \cos \theta_r (1 + 2 \sqrt{\pi G})}{r} F_d(\theta_r, G) \quad (5)$$

式(5)中:  $\sigma$  为油水界面张力,  $\text{dyn/cm}$ ;  $\theta_r$  为油水接触角,  $\text{rad}$ ;  $G$  为形状因子;  $r$  为喉道截面半径,  $\text{cm}$ ;  $F_d(\theta_r, G)$  为  $\theta_r, G$  的函数。

在两相流模拟过程中, 在饱和油阶段, 由于原始喉道为强水湿, 所以取  $\theta_r = 0$ 、 $F_d(\theta_r, G) = 1$ , 所以由上式可以得到在饱和油阶段, 进入毛细管压力为:

$$p_c = \frac{\sigma_r (1 + 2 \sqrt{\pi G})}{r} \quad (6)$$

### 2.2 水驱过程

饱和油过程使部分孔隙表面或者喉道表面的润湿性发生了改变, 不再呈强水湿, 且有些角隅中还残留有水, 因而水驱的液体流动比饱和油

复杂。根据模型中水湿、油湿和部分水湿系统中液体流动状态的不同,可将液体驱替方式归结为三种类型:活塞式排驱、孔隙体填充、以及卡断式驱替。

在饱和油过程中,由于初始孔隙、喉道中的润湿性都为强水湿,所以在油侵的时候接触角全部为零,即全部发生油浸的喉道为强制性驱替。而在模拟一次水驱时,部分原始喉道由于发生油浸使原来的喉道润湿性发生改变,所以水驱时的活塞式驱替与油侵时不同,可以分为自发性驱替和强制性驱替。

### 2.3 聚驱过程

聚合物溶液是非牛顿流体,在进行模拟时,假设模型中忽略气相的存在,流体为油、水两相,聚合物仅溶于水中,各组分间没有化学反应发生。在网络模拟时,与水驱不同的是主要考虑聚合物溶液在不同剪切速率下黏度的变化。毛细管中压差为 $\Delta p$ ,流量为 $Q_m$ ,则 $\mu_{\text{eff}}$ 为:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 L_b Q_m} \quad (7)$$

式(7)中: $R$ 为喉道半径, $\mu\text{m}$ ;  $L_b$ 为喉道长度, $\mu\text{m}$ 。

### 3 网络模型的求解

在网络模型中,用 $g(i,j,k)$ 、 $g(i,j,k,n)$ 表示孔隙和喉道的导流能力,所以孔隙和喉道之间有效导流能力可以按下式计算(以孔隙 $(i,j,k)$ 与孔隙 $(i+1,j,k)$ 为例):

$$\frac{R(i,j,k) + R(i+1,j,k) + L(i,j,k,2)}{g} = \frac{R(i,j,k)}{g(i,j,k)} + \frac{R(i+1,j,k)}{g(i+1,j,k)} + \frac{L(i,j,k,2)}{g(i,j,k,2)} \quad (8)$$

式(8)中: $g$ 为孔隙体 $(i,j,k)$ 、 $(i+1,j,k)$ 之间的导流系数; $R(i,j,k)$ 、 $R(i+1,j,k)$ 为孔隙 $(i,j,k)$ 、 $(i+1,j,k)$ 的半径, $\mu\text{m}$ ;  $L(i,j,k,2)$ 为喉道 $(i,j,k,2)$ 的长度, $\mu\text{m}$ 。

设孔隙 $(i,j,k)$ 、 $(i+1,j,k)$ 的压力分别为 $p_{(i,j,k)}$ 和 $p_{(i+1,j,k)}$ ,则在孔隙 $(i,j,k)$ 、 $(i+1,j,k)$ 之间的流量 $Q$ 为:

$$Q = g(p_{(i,j,k)} - p_{(i+1,j,k)})/L \quad (9)$$

根据体积守恒定律,对于网络中任意一个孔隙,流入、流出的液体体积相等,即:

$$\sum_{i=0}^6 Q_i = 0 \quad (10)$$

将网络模型中所有孔隙的流量列成大型线性方程组,求解方程得到孔隙各点的压力。

## 4 模拟结果与讨论

本文以压汞实验所得到的岩心的孔隙特征参数为依据建立三维网络模型,通过三维网络模型模拟了饱和油、水驱油和聚合物溶液的驱油过程,模拟参数见表1。

表1 网络模型参数表

参数	取值
网络中孔隙个数	10 × 10 × 10
孔隙半径/ $\mu\text{m}$	1 ~ 14.98
平均半径/ $\mu\text{m}$	7.31
喉道长度/ $\mu\text{m}$	25
水相密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1
油相密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.85
形状因子	0 ~ 0.079 6
平均形状因子	0.04
初始接触角/ $(^\circ)$	0
未饱和油喉道接触角/ $(^\circ)$	0
油湿平衡接触角/ $(^\circ)$	90 ~ 120
水湿平衡接触角/ $(^\circ)$	70 ~ 90
饱和油喉道水湿油湿比例	1:3
油水界面张力/ $(\text{dyn} \cdot \text{cm}^{-1})$	30
配位数	6

### 4.1 孔隙半径

孔隙半径是表征孔隙大小的储层微观参数,借助网络模型分别讨论了岩石的润湿性为水湿和油湿比例不同的情况下,孔隙半径的变化对聚驱后剩余油百分含量的影响,见图1。

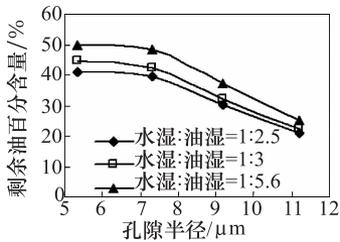


图1 孔隙半径变化对剩余油百分含量的影响

由图1可知,当岩石的润湿性为水湿比例逐渐增加的情况下,剩余油百分含量逐渐降低,在岩石的润湿性比例相同的情况下,随着孔隙半径的增加,剩余油百分含量逐渐降低。这是因为在岩石的孔隙为水湿的条件下,毛管力是驱油的动力,喉道中对驱替液体有自吸能力,驱替液借助毛管力的作用驱出孔隙中的残余油;在油湿的情况下,毛管力是驱油的阻力。故水湿比例增加时,剩余油含量降低。但随着孔隙半径的增加,毛管力逐渐减小,孔隙中的原油易被驱出而不易形成剩余油,孔隙中存在剩余油的概率也越小,增加了聚合物溶液的驱油效率。

#### 4.2 配位数

配位数指与孔隙连通的喉道个数,是表征储层连通程度的微观参数。配位数越大,表示连通性越好,流体的流动通道越多。在三维网络模型模拟中,在表1所列出的基础数据基础上,更改网络模型的配位数,分别采用了四种配位数对聚驱效果加以分析,见图2。

由图2可知,随着配位数的增加,三维网络模型中的剩余油百分含量减少。说明配位数越大,与孔隙连通的喉道越多,网络模型中的渗流通道就越多,利于流体的流动,流体被捕集的机会减少,从而使形成剩余油的概率下降;在较小的配位数的情况下,聚合物溶液驱替该孔隙中原油的机会减少,有些孔隙甚至成为盲端,而使剩余油形成的概率增大。

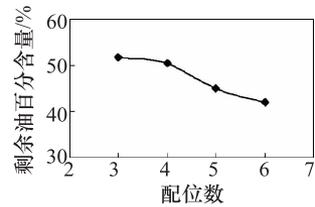


图2 配位数对剩余油百分含量的影响

#### 4.3 形状因子

真实储层中的孔隙空间的形状是非常复杂的,所以在网络模型中采用等价的规则几何形状来近似描述。在三维网络模型中,喉道的截面形状有圆形、正方形和三角形。圆形截面形状因子为0.0796;正方形形状因子为0.0625;三角形形状因子的范围是0~0.0481,其中三角形截面更能接近实际孔隙空间。在三维网络模拟中,在原数据的基础上通过改变三种截面的比例从而达到改变形状因子的大小而得到形状因子的变化与驱替效果的关系,见图3。

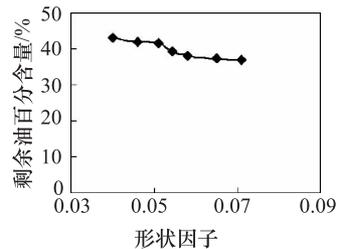


图3 形状因子对剩余油百分含量的影响

由图3可知,随着形状因子的增大,剩余油百分含量有所降低,这是因为形状因子越大,孔隙形状越规则,角隅越少,微观孔隙结构越均质,流体流动的越通畅,从而提高了原油采收率,降低了聚驱后剩余油百分含量。

#### 4.4 润湿性

岩石的润湿性特征指的是它亲油、亲水性质,是岩石、盐水、原油多组分体系综合作用的结果。在表1原数据的基础上通过改变网络模型的润湿性得到润湿角度的变化与剩余油百分含量的关系,见图4。

油藏岩石的润湿性是控制岩石孔隙中微观油水分布及油水运动规律的主要因素,它对驱油效率有重要的影响。在水湿岩心中,毛管力为驱油动力,但随着润湿角度的增加,驱油动力逐渐减小,当润湿角增加到油湿的情况下,毛管力为驱油的阻力,润湿角越大,驱油阻力逐渐加大,最后使孔隙中剩余油百分含量增加,采收率下降。

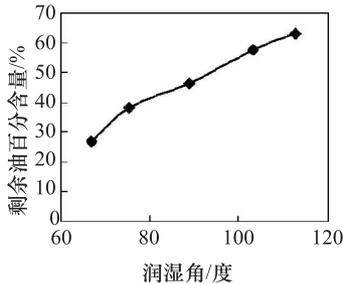


图4 润湿性对剩余油百分含量的影响

## 5 结论

(1) 在润湿性相同的情况下,随着孔隙半径的增加,聚驱后剩余油百分含量降低。

(2) 岩石孔隙的配位数越大,聚驱后剩余油百分含量越低。

(3) 孔隙的平均形状因子越大,聚驱后剩余油百分含量越低。

(4) 水湿油层的聚驱采收率高于油湿油层的聚驱采收率。

## 参 考 文 献

- 1 俞启泰. 关于剩余油研究的探讨. 石油勘探与开发, 1997; (2): 46—50
- 2 罗红芳. 剩余油的形成与分布研究现状. 延安职业技术学院学报, 2009; (3): 81—82
- 3 高博禹, 彭仕宓, 王建波. 剩余油形成与分布的研究现状及发展趋势. 特种油气藏, 2004; (4): 7—11
- 4 刘宝珺, 谢俊, 张金亮. 我国剩余油技术研究现状与进展. 西北地质, 2004; (4): 1—5
- 5 冉启佑. 剩余油研究现状与发展趋势. 油气地质与采收率, 2003; (5): 49—51
- 6 李洪玺, 刘全稳, 温长云, 等. 剩余油分布及其挖潜研究综述. 特种油气藏, 2006; (3): 8—10
- 7 焦雪峰, 陈明强, 金维鹤. 剩余油分布技术研究. 新西部(下半年), 2007; (4): 227—228
- 8 杨勇. 剩余油分布规律影响因素分析研究. 石油天然气学报, 2009; (1): 100—103
- 9 宋荣华, 王军, 何艳辉, 等. 荧光显微图像技术判断储层流体性质研究. 油气井测试, 2000; (4): 28—32
- 10 孙尚如, 何先华, 邬侠, 等. 聚合物驱后剩余油分布核磁共振成像实验研究. 大庆石油地质与开发, 2003; (4): 61—63
- 11 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. 石油学报, 2007; 28(2), 94—97

# The Research on Residual Oil Distribution after Polymer Flooding Based on Three-dimensional Network Model

LI Xia-ning, ZHANG Jiu-ran, ZHANG Wei

(The Petroleum Engineering college, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, P. R. China)

[Abstract] Using the three-dimensional network model, the saturating oil, water flooding and polymer flooding processes are simulated and the residual oil distribution pattern is studied. The influences of pore size, coordination number, shape factor and wettability on the residual oil distribution are analyzed. The results show that: with the increasing of the pore size, coordination number and shape factor, the residual oil after polymer flooding decrease; the oil recovery of water wet reservoir is higher than that of oil wet reservoir.

[Key words] three-dimensional network model polymer flooding residual oil microscopic distribution