

岩石三维网络模型构建的实验和模拟研究

侯健^{①②*}, 李振泉^③, 张顺康^④, 曹绪龙^③, 宋新旺^③, 高德波^②

① 中国石油大学(北京)化学科学与工程学院, 北京 102249;

② 中国石油大学(华东)石油工程学院, 东营 257061;

③ 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 东营 257015;

④ 中国石化江苏油田地质科学研究院, 扬州 225009

* E-mail: hujian@hpu.edu.cn

收稿日期: 2007-10-24; 接受日期: 2008-06-02

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10302021, 10772200)

摘要 岩石网络模型的构建是实现微观渗流实验和模拟研究有机结合的关键技术之一. 提出了基于 CT 扫描图像的三维网络模型的构建方法. 借助工业用微焦点 CT 系统, 获取一系列的能够真实描述岩石的微观孔隙结构和流体分布的 CT 切片图像. 在提取孔隙空间骨架、喉道信息以及孔隙信息的基础上建立相应的网络模型, 实现 CT 三维图像信息向孔隙/喉道大小分布以及拓扑信息的转化. 这种方法的特点在于能够在保持几何学特征和流动特征不变的情况下用简单的几何形状的孔隙和喉道来表征岩石内复杂的孔隙空间. 将水驱和聚合物驱 CT 实验与网络模拟结果对比, 所建三维网络模型计算参数与室内实验获得的孔隙度、绝对渗透率、相渗曲线和微观剩余油分布等结果吻合较好, 表明该网络模型能很好地表征岩石微观的孔喉尺寸和拓扑性质.

关键词

CT 实验
网络模型
水驱
聚合物驱
微观渗流

自从 1956 年 Fatt 提出网络模型以后, 网络模型已经发展成为研究微观渗流规律的一个有力工具. Øren 和 Blunt 等人^[1~3]在利用网络模型研究润湿性的影响、三相渗流以及预测毛细管压力和宏观传导特性等方面做了大量的研究工作. 同时, 网络模型的应用已广泛渗透到非达西渗流、泡沫在多孔介质中的流动、地层伤害、非牛顿流体流动等油气田开发的各研究领域^[4~6].

如果要获取能够代表实际岩心中微观孔隙结构的网络模型, 实现微观实验和模拟的有机结合, 那么需要解决的关键技术在于岩石三维网络模型的构建. 也就是说, 利用孔喉结构构建技术进行储层岩石的孔喉结构微观描述和网络模型的建立, 实现 CT 三维图像信息向孔隙/喉道大小分布以及拓扑信息的转化. 该技术不同于一般的三维图像重建技术, 后者只是实现由一个序列的二维轮廓线重构三维形体, 进行三维数据场的可视化.

孔喉结构构建技术包括两个核心环节: 建立多孔介质三维数据体、孔隙/喉道大小以及拓扑信息的提取. 20 世纪 80 年代国外学者就开始了三维孔喉结构构建的研究, 到了 90 年代中期以后掀起了研究热潮, 国外一大批学者在这两方面开展了研究工作, 而国内开展的相应研究较少.

在建立多孔介质三维数据体研究方面, Vogel 等人^[7]对土壤样品进行了 CT 扫描并建立了三维孔隙模型, 在此基础上对土壤中孔隙大小的分布进行了统计并得到了不同类型的土壤对孔隙连通性质的影响; Hidajat 等人^[8]根据薄片的二维图像中岩石颗粒尺寸分布的统计结果建立起多孔介质三维数据体; Coker 等人^[9]利用 X 射线层析技术得到了岩石三维重建图像; Manwart 等人^[10]在随机建模方法的基础上, 建立了多孔介质三维数据体; 而在孔隙/喉道大小以及拓扑信息的提取研究方面, Jerauld, Salter, Blunt 和 King 以及 Dixit 用立方体格子和圆柱形毛细管构建了网络模型并进行了不同配位数条件下的网络模拟; Adler 和 Thovert 研究了用球体来模拟岩石形成过程; Lindquist 和 Venkatarangan^[11]根据多孔介质三维数据体采用图像处理技术获得了孔隙空间的拓扑结构; Latham, Øren 和 Bakke 根据过程算法建立了多孔介质三维数据体, 并进一步用细化算法得到相关的孔隙/喉道大小分布以及拓扑信息.

本文在工业用微焦点 CT 系统微观实验的基础上, 进行岩石三维孔喉结构的构建研究^[12], 获得能够反映岩石孔隙喉道大小和拓扑结构的数据, 建立了相应的网络模型. 通过微观模拟技术模拟水驱油和聚合物驱油过程, 同微观实验结果对比验证了建立的三维网络模型的有效性.

1 CT 驱替实验

1.1 实验装置和步骤

实验装置是从美国 BIR 公司引进的 ACTIS-225FFi CT/DR/RTR 工业用微焦点 CT 系统. 该系统专门为油田领域 CT 应用研究设计, 不同于一般的医用 CT 系统. 主要特点表现在: (i) 系统配有两个 X 射线源, 一个是穿透能力很强的 PANTAK 320 kV 小焦点源, 一个是 FeinFocus 225 kV 微焦点源. 该系统是国内分辨率最高的一套微焦点 CT 系统之一, 它对直径为 4.8 mm 的物体成像, 空间分辨率可以达到 10 μm . (ii) 系统的检测器系统采用的是 Toshiba 三视野图像增强器, 它是一种面积检测器, 可以实现真正的体积层析(VCT), 一次扫描最多可以重建 100 个图像, 因而可以更准确地观察油水三维运移过程. (iii) 系统中有两个机械转台, 立式转台用于扫描岩心静态特征及进行微观成像, 卧式转台专门设计用于对岩心流动试验装置进行扫描, 它采用的是物体旋转的三代扫描方式. 图 1 为 CT 扫描设备的系统组成.

在实际操作过程中, 利用 ACTIS 系统自带的驱替装置按照事先设计好的驱替流程进行驱替, 同时利用 CT 扫描设备对岩心中的岩石骨架、流体分布进行扫描, 进而获取不同驱替阶段过程中岩心模型内部的油水分布信息.

为了保持水驱和聚合物驱微观实验过程中孔喉结构的可对比性, 采用同一人工石英砂充填岩心模型进行水驱和聚合物驱两部分实验. 水驱实验首先将岩心模型抽真空饱和水, 再用油驱水建立岩心束缚水状态, 然后注水驱替至残余油状态, 即产出液含水率达到 98%. 在水驱实验结束后, 通过清洗岩心, 再直接利用该模型进行聚合物驱实验, 该实验包括饱和水、饱和

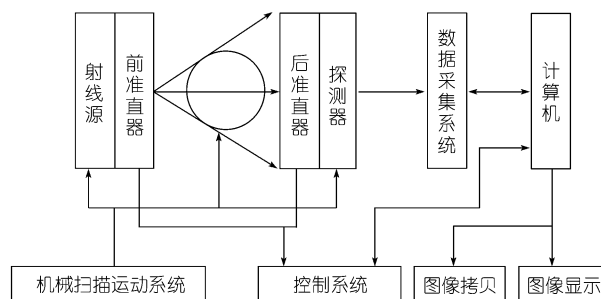


图 1 工业用微焦点 CT 的系统组成

油、注入 2 PV 水、注入 0.35 PV 聚合物、后续水驱至残余油等操作步骤。

考虑到 CT 扫描系统开机时间长了会造成图像模糊等负面影响, 以及室内实验的可操作性, 设计了水驱和聚合物驱驱替实验过程中不同的 CT 扫描时刻, CT 扫描时刻的选取力求具有一定的驱替阶段代表性。根据实验设计, 在驱替过程中分别对水驱不同驱替时刻(饱和水结束时刻、饱和油结束时刻、水驱 2 PV 时刻、水驱至残余油等 4 个时刻)和聚合物驱不同驱替时刻(注入 0.35 PV 聚合物时、聚合物驱至残余油等 2 个时刻)进行 CT 切片扫描。

在设计的每个 CT 扫描过程中对实验岩心目标区域按等间距连续扫描 100 张切片图像。岩心扫描总长度确定为 2.5 mm, 每两张 CT 切片之间的间隔为 0.025 mm。在 6 个 CT 扫描时刻总共获得了 600 张切片的扫描, CT 扫描切片效果如图 2 所示。从切片图像上来看, CT 扫描图像画面比较清晰, 孔隙空间和岩石颗粒之间的轮廓界限分明。

实验材料包括: 岩心模型为人工石英砂岩心模型, 利用粒径为 70~80 目人工石英砂制作, 岩心渗透率为 $8.38 \mu\text{m}^2$, 孔隙度为 27.6%, 模型尺寸为直径 5 mm, 长度 5 cm; 配置水溶液密度为 1.022 g/cm^3 , 矿化度为 20000 mg/L; 配置聚合物溶液浓度为 1500 mg/L, 黏度为 20 mPa·s; 模拟油密度为 0.88 g/cm^3 , 黏度为 72 mPa·s。

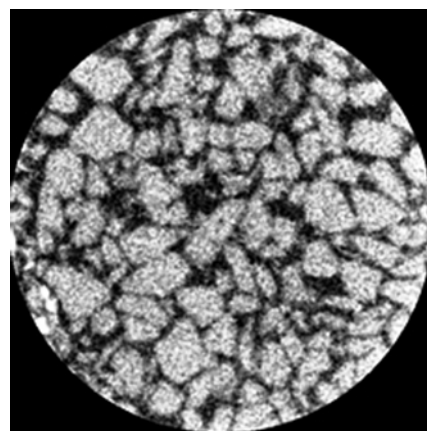


图 2 饱和水结束时刻某 CT 扫描切片图像(512×512 像素)

1.2 CT 图像的处理

对实际获得的 CT 扫描图像进行了图像预处理、图像插值、图像分割及三维重建等操作^[13]。需指出的是, 由于在 CT 扫描时切片图像间的距离比切片图像平面内像素间的距离大, 因此需要用图像插值方法在原来的切片图像之间再插值生成一些中间切片图像, 要求经插值后在纵向上切片的间距等于平面上切片图像内像素间距。根据岩心模型的二维切片图像分辨率以及 CT 扫描切片图像之间的间距, 该模型 6 个 CT 扫描时刻获得的每 100 张 CT 切片扫描图像需分别

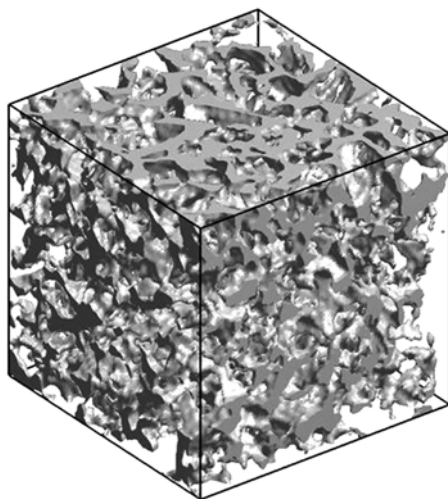


图3 岩心模型孔隙空间图像三维重建结果
(模型物理尺寸: 2.45 mm×2.45 mm×2.45 mm)

进行插值处理各得到 331 张图像。

CT扫描获取的是一组序列的二维切片图像, 经过二维图像处理后得到的岩石颗粒、孔隙空间、流体分布信息可通过三维重建工作完成二维图像向三维图像的转换, 构成三维图像的数据场, 从而实现三维可视化。本文采用Lorensen和Cline^[14]提出的移动立方体算法实现CT切片图像的三维重建。图3为孔隙空间的三维重建结果, 灰色部分代表孔隙空间。

2 三维网络模型的构建

2.1 孔喉结构的建立

网络模型的构建是在 CT 三维重建图像的基础上进行。为了便于描述和抽取三维图像特定区域的特征, 对那些物体区域通常需要采用相关算法进行处理, 得到与原来物体区域形状近似的由简单的弧或曲线组成的图形来代替, 这些图形就形成了三维物体空间中的骨架或者中轴, 岩石的中轴反映了它的孔喉结构特征。

Baldwin等人^[15]提出了用细化算法提取中轴, 对于孔隙空间中的每个体素, 可以根据其到最近的岩石颗粒距离的大小来做一个距离标记。想象一下用一把火同时在所有的孔隙空间与岩石颗粒的接触面上点燃。如果让火以固定的速度“燃烧”到孔隙中相邻的下一层对应的体素中, 这样就一层一层地逐渐减小孔隙空间, 最终火熄灭的位置对应的体素构成的集合就形成了骨架。

在进行细化算法操作以后, 就可以确定出相应的节点以及路径, 而节点处的燃烧数就表示了该点的最大内嵌球半径, 同样, 在沿着路径的方向上可以确定出所有体素中的最小内嵌球半径, 此时最小内嵌球半径对应的体素就是喉道截面所在的位置, 此时, 可以通过定义一个局部圆柱形的搜索区域的方法来确定出喉道的形状。

网络模型的基本组成单元就是孔隙和喉道, 而其基本思路是利用简单的具有一定形状的孔隙和喉道来代替复杂的孔隙空间。在提取到节点和路径以后, 其拓扑结构仍然具有一定的复杂性, 并不能直接用于网络模拟, 需要进行一定的修正后提取喉道和孔隙的信息, 如半径、长度、形状因子等。

2.2 喉道信息的提取

研究表明, 在细化算法基础上得到的岩心模型中的喉道与网络模拟中使用的喉道存在一定的差异, 需对获取的喉道信息进行修正, 包括以下几个方面:

(i) 网络模型中每个喉道对应有一组唯一的孔隙和它相连, 而岩心模型中不同的喉道可能会对对应到同一组孔隙, 也就是说, 在两个孔隙之间可能会存在多个喉道相连, 如图4所示。

如图4(a)所示, 对于孔隙间存在两个喉道的情况, 设喉道1和喉道2的长度分别为 L_{t1} 和

L_{t2} , 喉道截面积分别为 A_{t1} 和 A_{t2} , 形状因子分别为 G_{t1} 和 G_{t2} .

本文采用Mason和Morrow^[16]提出的形状因子 G 来描述孔隙截面的几何形状. 形状因子 G 定义为

$$G = \frac{A}{P^2}, \quad (1)$$

式中, A 为某元素(孔隙或喉道)截面面积, P 为周长. 由(1)式可知圆的形状因子 $G = \frac{\pi r^2}{(2\pi r)^2} =$

$\frac{1}{4\pi} = 0.0796$, 正方形元素的形状因子为 0.0625, 三角形元素的形状因子的变化范围是 0.0~0.0481. 孔隙形状越规则, 形状因子就越大, 圆的形状因子最大.

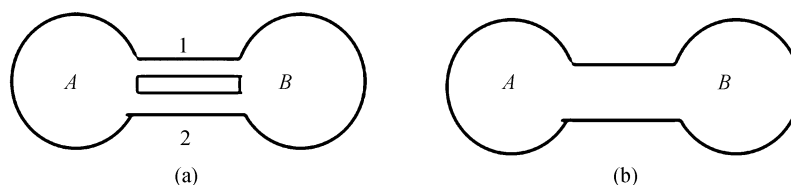


图 4 岩心模型和网络模型中孔隙之间喉道数目示意图

(a) 岩心模型; (b) 网络模型

根据 Poiseuille 定律, 考虑形状因子的影响, 喉道导流能力 g_t 为

$$g_t = k \frac{A_t^2 G_t}{\mu L_t}, \quad (2)$$

式中, k 为常数, μ 为流体黏度.

对于三角形截面的喉道, k 为 0.6; 对于圆形截面的喉道, k 为 0.5; 对于正方形截面的喉道, k 为 0.5623. 由(2)式分别计算喉道 1 和喉道 2 的导流能力 g_{t1} 和 g_{t2} . 假设若 $g_{t1} \geq 3g_{t2}$, 那么认为在进行网络模拟时只有喉道 1 中的流体发生流动, 喉道 2 中的流体不流动, 令 $L_t = L_{t1}$, $G_t = G_{t1}$, $A_t = A_{t1}$; 如果 $g_{t2} \geq 3g_{t1}$, 认为在进行网络模拟时只有喉道 2 中的流体发生流动, 喉道 1 中的流体不流动, 令 $L_t = L_{t2}$, $G_t = G_{t2}$, $A_t = A_{t2}$.

但如果上述两个条件都不满足, 则认为在网络模拟中喉道 1 和喉道 2 对流体流动都会产生影响, 此时喉道等效截面积 A_t , 喉道等效形状因子 G_t , 喉道等效长度 L_t 的计算公式分别为

$$A_t = A_{t1} + A_{t2}, \quad (3)$$

$$G_t = \frac{A_{t1}^2 G_{t1} + A_{t2}^2 G_{t2}}{A_{t1}^2 + A_{t2}^2}, \quad (4)$$

$$\frac{A_t^2 G_t}{L_t} = \frac{A_{t1}^2 G_{t1}}{L_{t1}} + \frac{A_{t2}^2 G_{t2}}{L_{t2}}, \quad (5)$$

首先由(3)和(4)式计算出喉道等效截面积 A_t , 喉道等效形状因子 G_t , 再利用(5)式计算喉道等效长度 L_t , 该式使喉道的等效导流能力 g_t 等于喉道 1 和喉道 2 的导流能力 g_{t1} 和 g_{t2} 之和.

对于孔隙之间存在两个以上喉道的时候, 那么, 首先将各喉道按导流能力大小排序, 可先找到导流能力最大的喉道与按导流能力大小排序第 2 的喉道进行等效. 得到等效参数后, 再与按导流能力大小排序第 3 的喉道进行等效, 依此类推, 直到喉道的等效导流能力大于 3 倍的待等效喉道的导流能力即可停止计算.

(ii) 岩心模型中的喉道长度是对应的孔隙中心之间的实际长度, 它包括了一部分孔隙半径的长度, 而网络模型中喉道的长度不包含孔隙半径的长度. 如图 5 所示, 设 A 和 B 分别是对应孔隙的中心位置, 在岩心模型中 AB 的长度即为喉道的长度, 如图 5(a)所示; 而在网络模型中喉道的长度应为 CD 的长度, AC 和 DB 长度应作为孔隙半径, 而不能看作是喉道长度的一部分, 如图 5(b)所示.

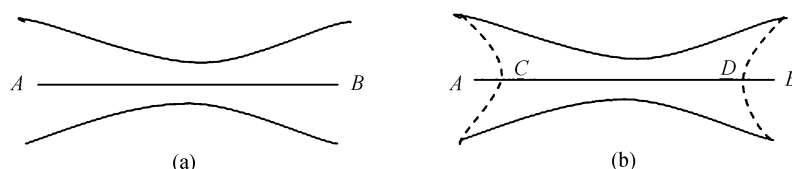


图 5 岩心模型和网络模型中喉道长度示意图

(a) 岩心模型; (b) 网络模型

如图 6 所示, 设 A 和 B 分别表示对应孔隙的中心, L_{AM} , L_{NB} , L_{CD} , L_{MN} , L_{AB} 分别表示 AM , NB , CD , MN 以及 AB 之间的距离, 孔隙 A 和 B 的半径分别为 R_A 和 R_B , 喉道的半径为 r . 那么包括以下两种情况:

i) 若 $L_{AB} > R_A + R_B$, 则

$$L_{CD} \approx L_{MN} = L_{AB} - L_{AM} - L_{NB} = L_{AB} - \sqrt{R_A^2 - r^2} - \sqrt{R_B^2 - r^2}, \quad (6)$$

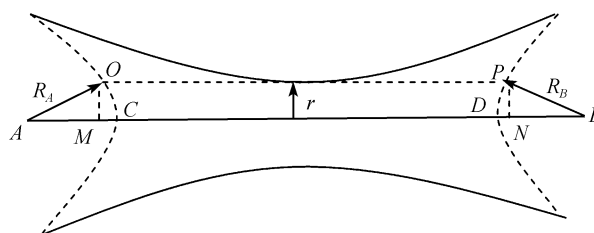


图 6 喉道长度的计算

ii) 若 $L_{AB} \leq R_A + R_B$, 则设喉道的长度为 0.5 倍的 CT 物理分辨率的尺寸.

(iii) 从形状因子的定义来看, 由于岩心模型中喉道截面的形状是不规则的, 形状因子的取值范围为 0~0.08 左右. 而网络模型中为了简化研究, 利用三种形状来描述喉道截面, 即三角

形、正方形和圆形, 其中三角形对应的形状因子的分布范围为 $0 \sim 0.0481$, 而正方形对应的形状因子数值为 0.0625 , 圆形喉道对应的形状因子数值为 0.0796 , 如图 7 所示.

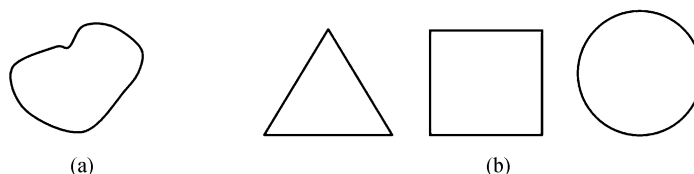


图 7 岩心模型和网络模型中喉道截面形状示意图

(a) 岩心模型; (b) 网络模型

根据网络模型使用的 3 种形状喉道截面(三角形、正方形和圆形)的形状因子, 对岩心模型计算喉道截面形状因子进行修正. 如果 $0.0481 < G_t \leq 0.0625$, 那么 G_t 赋值为 0.0625 ; 而如果 $G_t > 0.0625$, 赋值为 0.0796 .

2.3 孔隙信息的提取

在确定喉道的信息以后, 就可以进一步确定孔隙的信息分布.

(i) 形状因子的确定

每个孔隙总是和多个喉道连通的, 在计算孔隙的形状因子的时候, 设其配位数为 n , 对应的各喉道的截面积和形状因子分别为 A_{ti} 以及 G_{ti} , 那么该孔隙的形状因子 G_p 为

$$G_p = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{ti} \cdot G_{ti})}{\sum_{i=1}^n A_{ti}}. \quad (7)$$

同样, 假设网络模型中孔隙的截面只有三角形、正方形以及圆形 3 种, 那么可采用类似处理喉道形状因子的方法来计算的孔隙截面的形状因子进行修正.

(ii) 孔隙半径的确定

设网络模型中孔隙空间(包括孔隙和喉道)的总体积为 V , V 可以根据网络模型的孔隙度来确定. 其中, 喉道的总体积为 V_t , 那么孔隙的总体积 $V_p = V - V_t$. 在提取中轴以后, 每个节点对应到一个孔隙半径 R'_i , 可以求出每个节点 i 对应的孔隙体积 V_{pi0} 以及所有节点对应孔隙的总体积 V_{p0} . 如果利用 V_p 对其进行修正, 那么修正以后的各孔隙 i 的体积 V_{pi} 为

$$V_{pi} = V_{pi0} \cdot \frac{V_p}{V_{p0}}. \quad (8)$$

根据网络模型中不同形状截面孔隙的体积计算公式可确定其孔隙半径.

3 三维网络模拟方法

基于油水两相流网络模拟原理, 综合考虑聚合物渗流机理(如增黏、扩散、吸附、捕集及剪切降解等)建立聚合物驱微观模拟方法^[17].

3.1 油水两相流微观模拟

假设孔隙内的流体为不可压缩、不混溶。模拟时为消除末端效应, 网络入口的一端同含有驱替流体的储层相连, 网络出口的一端同含有被驱替流体的储层相连, 中间部分为模拟微观渗流过程以及求解宏观参数的测试区。

初始状态下, 网络被水充满呈强水湿性。利用初次排液过程模拟原油运移形成油藏过程, 当原油侵入网络后, 部分网络的润湿性发生改变。初次排液后进行吸液, 模拟一次水驱过程。

在排液开始之前, 网络饱含被驱替流体(水), 排液开始时, 从入口端注入驱替流体(油), 并逐渐增大驱替流体的压力, 使其逐渐进入网络驱替被驱替流体, 直到预先给定的含水饱和度或者毛细管压力达到为止。驱替过程中的每一步采用侵入逾渗算法^[18]: 选择具有最低进入毛细管压力的元素(孔隙或喉道)进行驱替。由MS-P方法, 进入毛细管压力 P_c 为

$$P_c = \frac{\sigma_{ow} (1 + 2\sqrt{\pi G}) \cos \theta_r}{r} F_d(\theta_r, G), \quad (9)$$

式中 σ_{ow} 为油水界面张力; r 为管壁内半径; θ_r 为后退角; F_d 是关于 θ_r 和 G 的函数。

对于截面为多边形的元素(如三角形、正方形), 即使被油排驱后, 仍然有一部分水残留在角隅中, 这一部分水保证了网络中的水总能够找到通向出口的路径。随着毛细管进入压力的升高, 角隅中的水将逐渐减少, 直到达到最后的残余饱和度为止。如果再增大压力, 各相的饱和度几乎不再有任何改变。

初次排液结束后进行水驱油的吸液过程。由于经过初次排液之后, 部分孔隙表面的水湿性发生了改变, 而且有些角隅中还残留有水, 因而水驱的力学机制比初次排液复杂得多。Lenormand等人^[19]描述了在水湿和部分水湿系统中孔隙规模水驱的力学机制, 归纳为3种类型驱替方式: 活塞式排驱、孔隙体充填、以及节流。

3.2 聚合物驱微观机理

聚合物是一种具有黏弹性的非牛顿流体。由于聚合物的加入, 聚合物驱表现出与纯水驱不同的驱油特性, 它是聚合物驱微观机理的宏观体现。为了模拟聚合物驱过程, 在油水两相流微观模型基础上, 重点考虑对流和扩散双重作用下聚合物浓度的计算、聚合物溶液黏度的变化及其在孔喉流动过程中的剪切降解、聚合物由于吸附和捕集作用形成的滞留。

在模型中, 忽略气相的存在, 流体为油、水两相, 聚合物仅溶于水; 考虑三种组分: 水、油、聚合物, 各组分间没有化学反应产生, 但考虑聚合物溶液中存在的剪切降解, 以及扩散、吸附作用的影响。

假定聚合物仅溶于水, 则可认为聚合物溶液的压力即水相压力。按照驱替规则选取驱替元素, 分别计算压力、饱和度和浓度场, 考虑浓度和剪切速度的影响修正聚合物溶液的黏度。重复上述过程, 直到所有的元素都被驱替或者没有满足条件的元素为止。

4 结果与讨论

在建立孔喉结构的基础上, 对孔隙和喉道信息进行了提取, 最终建立的网络模型如图8所

示,图中球体代表孔隙,线段代表喉道,球体的大小反映出孔隙具有不同的空间尺寸. 网络模型建立尺寸为 2.45 mm×2.45 mm×2.45 mm, 共包含有 24826 个孔隙、28966 个喉道.

在网络模型构建的基础上,通过网络模拟进行了孔隙度、绝对渗透率、相对渗透率曲线的拟合. 在拟合过程中,适当调整相关的模拟参数,如孔隙结构参数、表面性质参数等. 网络模拟计算得到的孔隙度为 27.4%, 绝对渗透率为 8.559 μm^2 , 与实际岩心测试数据较为吻合. 网络模拟基本参数如表 1 所示.

相对渗透率曲线计算结果如图 9 所示,散点为利用网络模拟得到的吸液过程油水相对渗透率曲线计算值,而实线为趋势线. 计算出的束缚水以及残余油饱和度分别为 23.7%和 44.3%, 而根据驱替实验得出

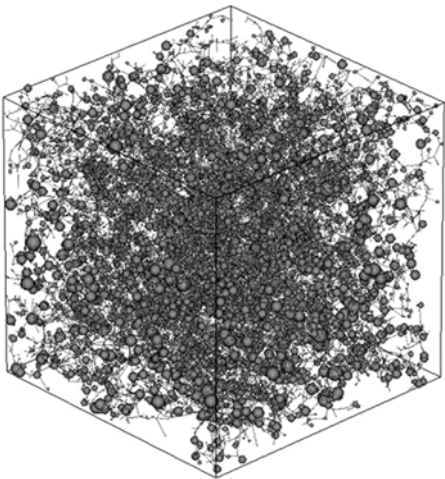


图 8 基于 CT 切片图像构建的网络模型

表 1 网络模型模拟参数取值

参数名称	参数取值	参数名称	参数取值
网络尺寸	2.45 mm×2.45 mm×2.45 mm	泥质含量	7%
孔隙半径	5.88~196.5 μm	初始接触角	0°
喉道半径	7.41~66.69 μm	平衡接触角	69°~109°
喉道长度	7.41~625.6 μm	油水界面张力	30 mN·m ⁻¹
孔喉比	0.14~28.4	水的密度	1.0 g·cm ⁻³
平均配位数	2.35	油的密度	0.88 g·cm ⁻³
孔隙度	27.4%	水的黏度	1.0 mPa·s
绝对渗透率	8.559 μm^2	油的黏度	72.0 mPa·s

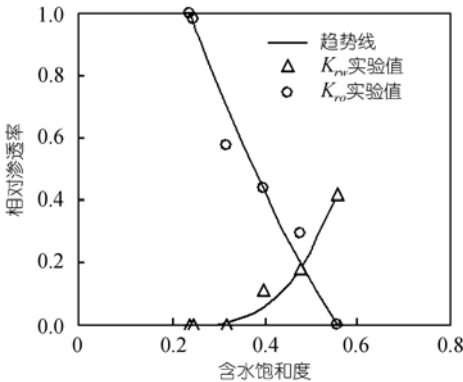


图 9 相对渗透率曲线模拟计算结果

通过网络模拟得到的剩余油分布规律与 CT 实验结果分布大体一致. 以下从剩余油微观分布形态和剩余油饱和度分布两方面定量对比实验和模拟结果.

的束缚水以及残余油饱和度分别为 22.2%和 44.4%, 两者基本一致.

将水驱至残余油以及聚合物驱至残余油阶段的网络模拟结果和对应的剩余油 CT 三维重建图像进行对比, 如图 10 和 11 所示, 图 10(a)和 11(a)为剩余油 CT 三维重建图像, 直观反映出剩余油在孔喉中的分布, 红色部分为油, 黄色部分代表未被剩余油填充的孔隙空间, 实际上即为水占据的空间部分; 图 10(b)和 11(b)为网络模拟结果, 它表明了网络模型孔喉中含油饱和度的分布, 右方调色条表示网络模型孔喉中含油饱和度的大小. 图 10 和 11 定性地反映出

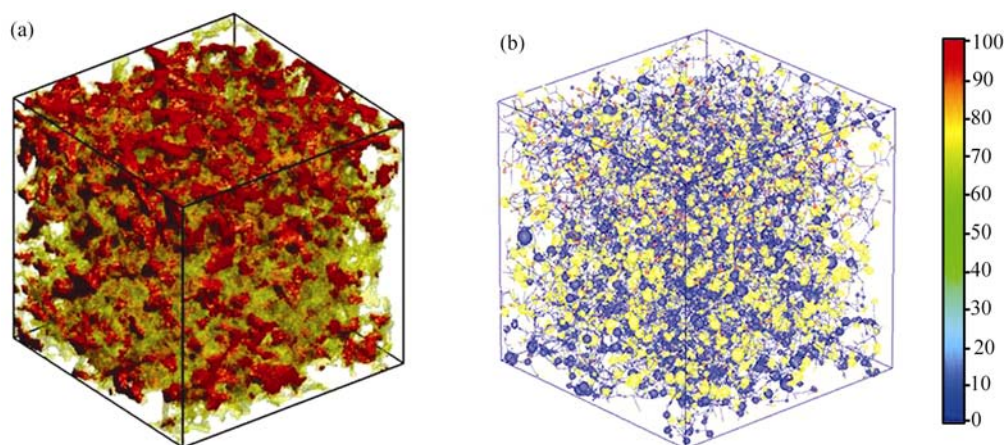


图 10 微观实验与网络模拟的剩余油分布对比(水驱至残余油阶段)

(a) CT 三维重建; (b) 网络模拟

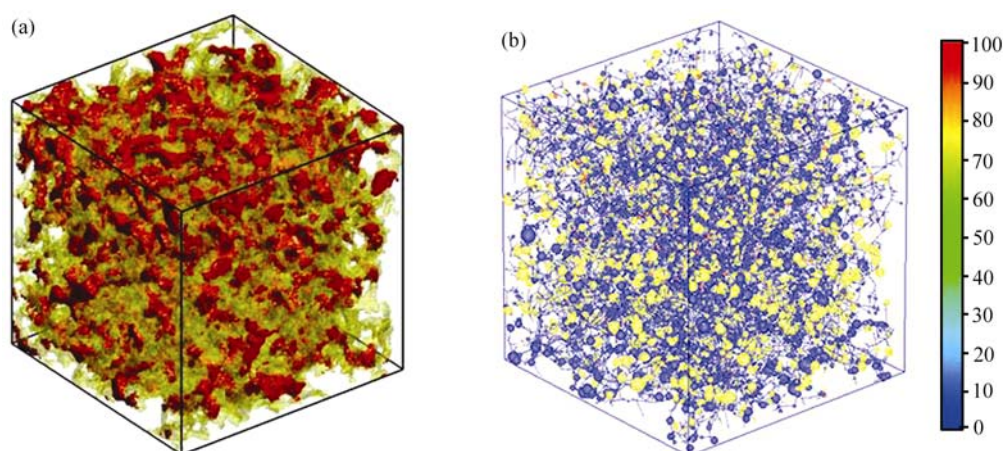


图 11 微观实验与网络模拟的剩余油分布对比(聚合物驱至残余油阶段)

(a) CT 三维重建; (b) 网络模拟

4.1 剩余油微观分布形态

孔喉网络中剩余油分布的形式是多样的, 剩余油存在的模式 [20]可归纳为以下几种: (i) 孤粒、孤滴状. 孔喉中剩余油分布零散, 常分布在独立的孔喉中; (ii) 斑块状. 部分孔喉空间充满剩余油, 呈斑块状形态分布, 剩余油局部分布在少数连通的孔喉中; (iii) 网络状. 剩余油在孔喉网络中大部分空间充满, 所占据的孔隙和喉道较多; (iv) 油水混合状态. 剩余油与水同存于孔喉中, 以油水同流等形式存在.

为了描述CT三维重建图像中剩余油微观分布形态, 定义三维图像空间中剩余油的形状因子 G' 为

$$G' = V / S^{1.5}, \quad (10)$$

式中 V 为单块连片剩余油的体积; S 为单块连片剩余油的表面积. 剩余油形状因子越小, 表明剩余油形状越不规则.

进行统计时, 分别计算每块相互连接剩余油的表面积和体积, 然后进一步计算每块剩余油的形状因子. 根据形状因子对每块剩余油进行了统计并分类. 根据三维图像中 26-相邻意义上的连通性原理, 将剩余油分为孤粒/孤滴状($G' > 0.45$)、斑块状($0.01 \leq G' \leq 0.45$)和网络状($G' < 0.01$), 统计结果如图 12(a)所示. 由于油水混合状态在三维图像无法统计, 统计结果中不包含油水混合状态剩余油.

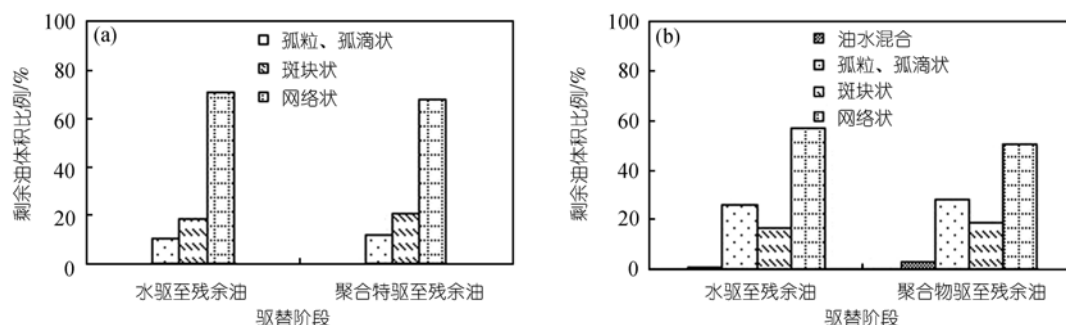


图 12 不同驱替阶段剩余油微观分布形态统计

(a) CT 三维重建; (b) 网络模拟

为了便于统计网络模拟中剩余油类型且具有一定的代表性, 对 4 种典型的剩余油分布形式进行如下定义: 剩余油的统计在含水饱和度 S_w 小于 85% 的孔喉中进行, 含水饱和度 S_w 介于 15% 与 85% 之间孔喉中存在的剩余油认为呈油水混合状态分布; 而 S_w 小于 15% 的孔喉中的剩余油依据其所占据的连通孔隙个数 n_c , 划分为孤粒/孤滴状($n_c = 1$)、斑块状($2 \leq n_c \leq 5$)和网络状($n_c > 5$)等 3 种分布形态, 统计结果如图 12(b)所示.

统计结果表明, 聚合物驱至残余油阶段网络状剩余油所占比例减小, 说明聚合物驱比水驱使剩余油分布更为分散, 但网络状剩余油仍占据了相对主导的分布比例. 微观实验和网络模拟的统计结果规律基本一致, 由于三维重建图像统计中忽略了油水混合状态剩余油, 使剩余油更容易连接成片, 构成斑块状甚至网络状剩余油, 因此, 统计结果显示三维重建图像统计的孤粒、孤滴状剩余油相对较少, 而斑块状、网络状剩余油相对较多.

4.2 剩余油饱和度分布

为了进一步验证网络模拟结果并考虑随机模拟的统计意义, 将网络模型以及相应的三维重建图像在 X , Y , Z 三个方向上各均匀分成了 5 等份, 这样就把网络模型和三维重建图像划分了 125 个三维空间区域, 分别统计两者对应空间区域中含油饱和度的分布.

统计结果如图 13 所示, 可以看出, 在水驱至残余油和聚合物驱至残余油的驱替阶段, 网络模型各区域中的含油饱和度与三维重建图像中相应区域含油饱和度之间存在一种统计对应

关系, 反映两者之间关系的散点分布在对角线周围.

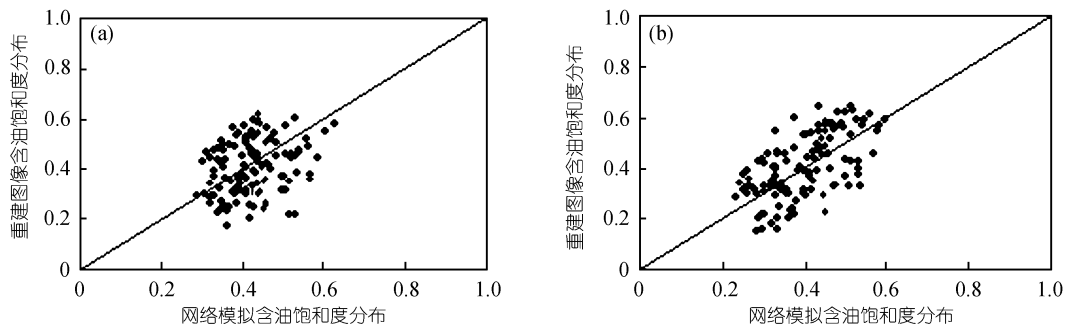


图 13 网络模拟和 CT 三维重建图像分区含油饱和度对比

(a) 水驱至残余油; (b) 聚合物驱至残余油

5 结论

(i) 借助工业用微焦点 CT 系统, 结合图像预处理、图像插值、图像分割、三维重建等图像处理技术, 能够获取有用的岩心内部孔隙、岩石颗粒以及流体的分布信息, 实现岩石孔隙结构和流体分布的三维可视化, 为微观渗流实验和模拟研究提供必要的基础资料.

(ii) 提出了基于 CT 扫描图像的三维网络模型的构建方法. 在提取孔隙空间骨架、喉道信息以及孔隙信息的基础上建立相应的网络模型, 实现 CT 三维图像信息向孔隙/喉道大小分布以及拓扑信息的转化.

(iii) 利用描述水驱/聚合物驱过程的三维网络模拟方法进行模拟计算, 与渗透率、孔隙度、相对渗透率曲线等实验结果的拟合修正网络模型. 从剩余油微观分布趋势、微观分布形态、饱和度分布等方面统计对比分析, 验证了建立网络模型的有效性.

参考文献

- 1 Øren P E, Bakke S. Reconstruction of Berea sandstone and pore-scale modeling of wettability effects. *J Pet Sci Eng*, 2003, 39: 177—199^[DOI]
- 2 Blunt M J, Jackson M D, Piri M et al. Detailed physics, predictive capabilities and macroscopic consequences for pore-network models of multiphase flow. *Adv Water Res*, 2002, 25: 1069—1089^[DOI]
- 3 Øren P E, Bakke S, Arntzen O J. Extending predictive capabilities to network models. In: *Proceedings of the 1997 SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1997. 369—381
- 4 Cannella W J, Huh C, Seright S R. Prediction of xanthan rheology in porous media. In: *Proceedings of the 1988 SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Richardson: Society of Petroleum Engineers of AIME, 1988. 353—368
- 5 Sorbie K S, Clifford P J, Jones E R W. The rheology of pseudo-plastic fluids in porous media using network modeling. *J Colloid Interface Sci*, 1989, 130(2): 508—534^[DOI]
- 6 Lorgez X, Vavatne P H. Predictive network modeling of single-phase non-Newtonian flow in porous media. *J*

- Colloid Interface Sci, 2000, 261(1): 256—265
- 7 Vogel H J, Roth K. A new approach for determining effective soil hydraulic functions. *Eur J Soil Sci*, 1997, 49(4): 547—556[DOI]
- 8 Hidajat I, Rastogi A, Singh M, et al. Transport properties of porous media from thin-sections. *SPE J*, 2002, 7(1): 40—48
- 9 Coker D A, Torquato S, Dunsmuir J H. Morphology and physical properties of Fontainebleau sandstone via a tomographic analysis. *J Geophys Res-Solid Earth*, 1996, 101: 17497—17506[DOI]
- 10 Manwart C, Torquato S, Hilfer R. Stochastic reconstruction of sandstones. *Phys Rev E*, 2000, 62: 893—899[DOI]
- 11 Lindquist W B, Venkatarangan A B. Investigating 3D geometry of porous media from high resolution images. *Phys Chem Earth Part A-Solid Earth Geod*, 1999, 24(7): 593—599[DOI]
- 12 Hou J, Zhang S K, Sun R Y, et al. Reconstruction of 3D network model through CT scanning. In: *Proceedings of the SPE Europe/EAGE Annual Conference and Exhibition*. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2007. 1—10
- 13 侯健, 张顺康, 袁士宝. 聚合物驱微观渗流实验剩余油分布的定量分析研究. *水动力学研究与进展(A 辑)*, 2006, 21(1): 41—45
- 14 Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *Comp Graphics*, 1987, 21(4): 163—169[DOI]
- 15 Baldwin C A, Sederman A J, Mantle M D, et al. Determination and characterization of the structure of a pore space from 3D volume images. *J Colloid Interface Sci*, 1996, 181: 79—92[DOI]
- 16 Mason G, Morrow N R. Capillary behavior of a perfectly wetting liquid in irregular triangular tubes. *J Colloid Interface Sci*, 1991, 141(1): 262—274[DOI]
- 17 侯健, 李振泉, 陈月明. 利用三维网络模型研究滞留聚合物微观分布规律. *计算力学学报*, 2006, 23(4): 453—458
- 18 Wilkinson D, Willemsen J F. Invasion percolation: A new form of percolation theory. *J Phys A*, 1983, 16: 3365—3376[DOI]
- 19 Lenormand R, Zarcone C, Sarr A. Mechanism of the displacement of one fluid by another in a network of capillary ducts. *J Fluid Mech*, 1983, 135: 337—353[DOI]
- 20 侯健, 李振泉, 关继腾, 等. 基于三维网络模型的水驱油微观渗流机理研究. *力学学报*, 2005, 37(6): 783—787