

文章编号: 0455-2059(2011)-0207-05

基于孔隙网络模型的微小喉道对岩芯驱油特征的影响分析

张旭辉, 鲁晓兵

中国科学院力学研究所, 北京 100190

摘要: 喉道半径微小与分布非均匀性是低渗透油藏岩石孔隙结构的特征, 微小喉道孔隙是低渗透油藏岩芯驱油的关键控制因素之一. 利用三维准静态孔隙网络模型模拟了按照Thamama油田岩石分类的五种喉道半径分布孔隙结构特征, 考察了微小喉道孔隙份额大小对低渗透油藏驱油的相对渗透率以及共流区影响. 结果表明: 对于非均匀喉道孔隙结构, 微小喉道占的份额越大, 毛管压力逐渐控制流动, 水相对渗透率越小, 驱油效率越低. 通过与实验结果对比验证了三维准静态模型模拟低渗透油藏驱油的有效性.

关键词: 低渗透; 微小喉道孔隙; 三维准静态孔隙网络; 相对渗透率

中图分类号: TV432

文献标识码: A

Numerical simulation on influences of micro pore throats to oil displacement for low permeability reservoirs based on pore-scale network model

ZHANG Xu-hui, LU Xiao-bing

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Pore structures in low permeability reservoirs are characteristic of the micro pore throats and a heterogeneous distribution in low permeability reservoirs, and micro pore throat is one of the most important factors controlling oil displacement. A three dimensional and quasi-static network model was developed, and five pore throat structures in Thamama reservoirs are used to investigate the effects of micro pore throat fraction in total pore throats on relative permeability curves and co-flowing areas. The results show that the water relative permeability and efficiency of oil displacement decrease with the increasing of the micro pore throat fraction in heterogeneous porous media. Through comparisons, the simulated results of relative permeability obtained from the three dimensional and quasi-static network modeling are in a good agreement with that of experiments.

Key words: low permeability; micro pore throat; three dimensional and quasi-static pore network; relative permeability

我国陆上油藏已探明未动用储量主要为低渗透、特低渗透油藏. 因此开展低渗透油藏微观机理研究, 对我国未来油藏开发利用具有重要意义. 低渗油藏由于孔隙结构的原因, 渗流特征表现出许多不同于中高渗油藏的特点, 例如非达西渗流现象、压力敏感性等. 杨普华^[1]、沈平平^[2]等研究表明低渗油藏孔隙结构表现为喉道半径狭小,

孔喉分布非均匀性. 由于低渗透油藏的结构特征, 孔隙中流体边界层影响大, 固液界面分子作用力强, 出现启动压力梯度, 渗流规律表现为非线性, 不满足达西渗透定律. 同时, 喉道及孔穴的半径差别很大, 出现毛管压力的剧烈变化, 以及驱替过程中压力场的复杂多变, 因此将包含复杂信息的孔隙空间理想化为均匀的易于数学描述的模型对于

收稿日期: 2011-06-08

基金项目: 国家重点基础研究计划项目(2005cb221304, 2006CB705800)

作者简介: 张旭辉(1982-), 男, 助理研究员, 博士, e-mail: zxx424@163.com, 研究方向为岩土力学、低渗透油藏微观渗流机制、二氧化碳埋存和水合物开采关键力学.

低渗透油藏孔隙结构的影响研究具有重要的适用价值。

孔隙网络模型是采用理想化的网络代替复杂的孔隙介质内的孔隙空间, 基于统计物理中逾渗理论的基本思路以及孔隙介质中的微观渗流物理机制, 通过微观水平的具有蒙特卡罗性质的随机模拟来研究孔隙介质中的渗流及驱替规律. Duillien^[3]利用孔隙网络模型针对孔隙结构的不均匀性、孔隙连通性、配位数、不同孔隙半径分布等因素对宏观参数的影响开展了研究; Ioannidis 等^[4]利用三维孔隙网络模型对孔隙几何拓扑结构对相对渗透率的影响进行了研究; Man^[5]利用孔隙网络开展了孔隙结构对网络电阻特性及毛管压力的影响研究; Jerauld 等^[6], Blunt^[7]开展孔隙结构不均匀性、润湿性等对毛管压力及相对渗透率的研究; Chandler 等^[8]比较系统地描述毛管压力控制孔隙流体流动的逾渗模型, 并用于获得相应的相对渗透率曲线。

在以上工作的基础上, 本文利用准静态孔隙网络模型针对微小喉道比例不同的五种喉道孔隙半径分布对岩芯驱油特征的影响进行探索性研究。

1 孔隙结构的分类及定义

Abu Dhabi 油藏孔隙结构根据喉道孔隙大小分为三类^[9-10]: 大孔隙喉道半径大于 $4\ \mu\text{m}$, 小喉道半径在 $0.3\sim 4\ \mu\text{m}$ 之间, 微喉道半径小于 $0.3\ \mu\text{m}$, 这种喉道孔隙结构的变化是控制油水驱替的关键性因素. 基于这三种喉道孔隙分类, Thamama 油田可以用五种类别来描述: 谷状灰岩, 其喉道半径大于 $4\ \mu\text{m}$; 泥粒灰岩/谷粒灰岩, 其喉道半径介于 $0.3\ \mu\text{m}\sim 4\ \mu\text{m}$; 泥粒灰岩其喉道半径介于 $0.3\sim 4\ \mu\text{m}$ 之间; 玄武岩其喉道半径在 $0.3\ \mu\text{m}$ 左右; 泥岩其喉道半径小于 $0.3\ \mu\text{m}$. 文中孔隙网络模型采取的是根据 Thamama 油田的五种分类来确定孔隙和喉道分布, 如图 1。

2 孔隙网络模型

自从 Fatt^[11-13]利用二维静态孔隙网络模型得到与实验吻合很好的毛管压力曲线以来, 不同半径分布、不同网络配位数、不同单元型式及不同喉道单元截面形状的二维网络和三维网络模型发展起来. Blunt 等^[14]利用三维孔隙网络模型计算了两相相对渗透率, Ioannidis 等^[4]进行了三维孔隙网络模型研究几何拓扑结构的影响性. 下面介绍本文建立的孔隙网络模型。

2.1 模型建立

本文用 1 个立方体单元由 8 个孔穴排列成立方体和 28 根圆柱形喉道连接孔穴组成, 如图 2, 3。

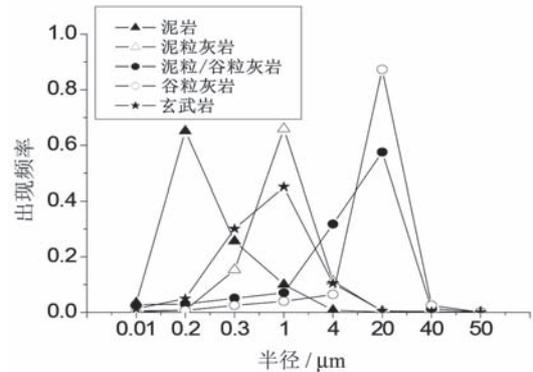


图 1 网络模型中五种喉道孔隙半径分布

Figure 1 Distributions of five pore throats in network modeling

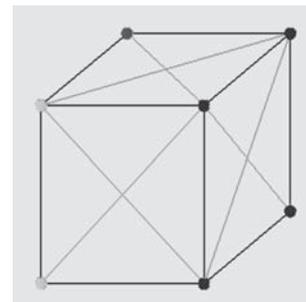


图 2 立方体小单元体

Figure 2 Cubic element

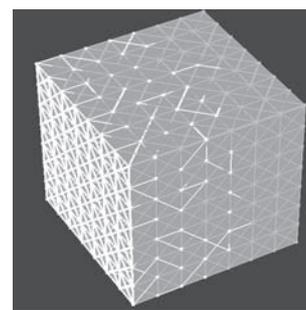


图 3 三维孔隙网络

Figure 3 3-D pore network

2.2 驱替准则

采用如下假设: 两相流体不可压缩且不互溶; 流体流动为小雷诺数问题, 惯性效应忽略不计, 孔隙中流动为圆柱管道内的 Poiseuille 流动; 不考虑界面流动时表面张力的动力学效应部分; 若单管道界面数目大于 2, 则流量为零。

孔隙中的流动符合如下准则:

单相流体流动公式为

$$q_{ij} = -\frac{r_{ij}^2}{8\mu_{ij}L_{ij}}(p_j - p_i); \quad (1)$$

两相单界面流动公式为

$$q_{ij} = -\frac{r_{ij}^2}{8\bar{\mu}L_{ij}}(p_j - p_i - p_c); \quad (2)$$

两相多界面流动公式为

$$q_{ij} = -\frac{r_{ij}^2}{8\bar{\mu}L_{ij}}(p_j - p_i - p_c) \times 10^{-5}. \quad (3)$$

引入多界面流动公式定义为

$$q_{ij} = -\frac{r_{ij}^2}{8\bar{\mu}L_{ij}}(p_j - p_i - p_c) \times 10^{-5},$$

目的是产生小流量从而消除建立流量矩阵与压力矩阵运算时的奇异性, 即避免了矩阵不能分解, 又保证精度.

其中: $p_c = \pm \frac{2\sigma \cos \theta}{r}$. 上述公式中参数的定义为: 对于节点 i 和 j , 管道的长度 L_{ij} , 连接节点 i 和 j 之间的距离; 管道的半径 r_{ij} , 服从特定分布; 管道的走向角 ϕ_{ij} , 管道与水平面所形成的角度(笛卡儿坐标系); 孔穴的半径 R_i , 服从均匀分布, q_{ij} 为流体通过截面单位面积的通量; μ_{ij} 为流体的动力黏滞系数; ρ_{ij} 为流体的密度.

2.3 流量压力方程

由于流体的不可压缩性假设, 根据连续介质力学的质量守恒定律, 在任一时间步长通过每一个节点的流量 Q_{ij} 之和是零:

$$\sum_{j \in N_i} Q_{ij}^{n+1} = 0. \quad (4)$$

根据该方程即可形成各节点的压力方程并求解.

2.4 孔隙结构参数

本文三维孔隙网络数值模拟采用的五种结构喉道半径服从截断正态分布, 孔穴半径服从中值半径为 $300 \mu\text{m}$ 的均匀分布, 且定义微小喉道份额为 λ , 5 种结构的参数如表 1, 与 Thamama 油田岩石孔隙结构五种类型类似, 在本文中分别简称为泥岩、玄武岩、泥粒灰岩、泥粒灰岩/谷粒灰岩、谷粒灰岩类型.

表 1 孔隙结构参数

孔隙结构	孔隙率/%	中值半径/ μm	λ
泥岩	12.3	0.2	0.9
玄武岩	12.4	1.9	0.6
泥粒灰岩	13.3	3.6	0.3
泥粒灰岩/谷粒灰岩	15.4	14.2	0.1
谷粒灰岩	14.8	20.2	0.1

3 模拟结果及分析

两相相对渗透率是两相渗透的重要宏观参数, 孔隙网络模型得到五种喉道孔隙结构的相对渗透率曲线, 分析微小喉道孔隙对驱油特征的影响.

图 4 给出了谷粒灰岩和泥岩情况下的相对渗透率曲线. 谷粒灰岩喉道半径均大于 $4 \mu\text{m}$ 属于较高渗透岩芯, 微小喉道份额 $\lambda = 0.1$; 泥岩均小于 $0.3 \mu\text{m}$ 属于特低渗透岩芯, 微小喉道份额 $\lambda = 0.9$. 可以看出, 两种喉道半径的分布特征均是在中值半径附近离散性小. 两种岩芯的相对渗透率曲线的交点处饱和度相近, 但前者共流区大且水相相对渗透率大.

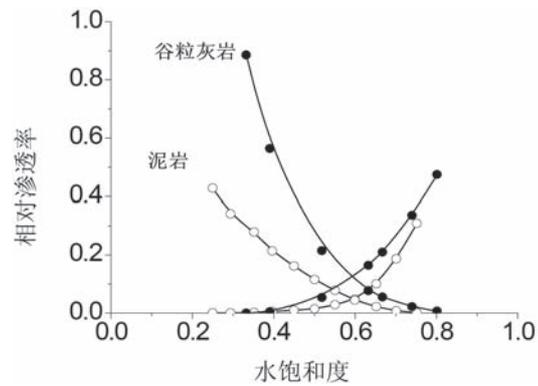


图 4 相对渗透率曲线

Figure 4 Relative permeability curves

图 5 给出了泥粒灰岩/谷粒灰岩、泥粒灰岩和玄武岩三种情况下的相对渗透率曲线. 泥粒灰岩/

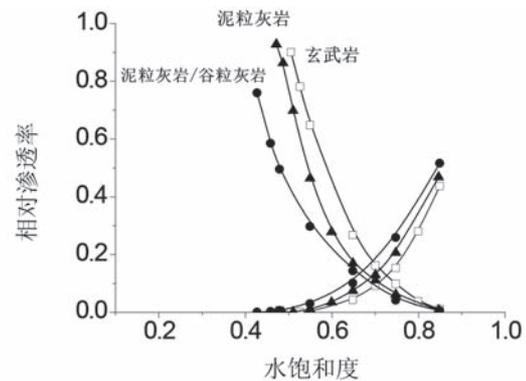


图 5 相对渗透率曲线

Figure 5 Relative permeability curves

谷粒灰岩喉道半径介于 $0.3 \mu\text{m} \sim 4 \mu\text{m}$ 之间, 微小喉道份额 $\lambda = 0.1$, 泥粒灰岩喉道半径介于 $0.3 \sim 4 \mu\text{m}$ 之间, 微小喉道份额 $\lambda = 0.3$, 玄武岩喉道半径在 $0.3 \mu\text{m}$ 左右微小喉道份额 $\lambda = 0.6$. 三种喉道半径分布中值半径附近离散性大. 可以看出, 三种结构的交点饱和度随着微小孔隙占的比例增大而增大, 水相相对渗透率减小, 说明微小喉道多由于毛管压

力的主导作用增强从而影响驱油效率。

图6给出了大庆和长庆油田的相对渗透率曲线的实验对比,以说明不同喉道半径分布的影响。大庆岩芯峰值半径小,峰值半径含量高,喉道的分布比较集中均匀,而长庆峰值半径含量显著较小,喉道半径分布范围宽^[15]。从图6可以看出,随着微小喉道份额的增多,水相相对渗透率减小,交点饱和度增大,共流区减小。这个结论与前述孔隙网络模拟获得的相对渗透率曲线的变化趋势是一致的。

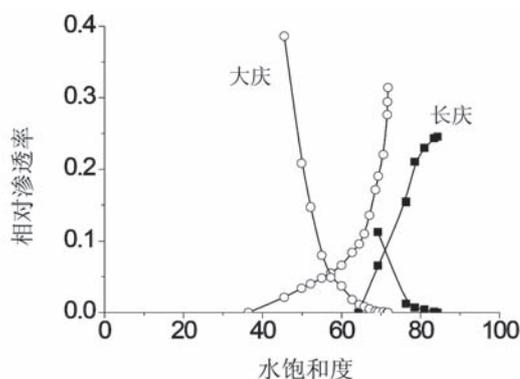


图6 大庆高渗与长庆低渗岩芯相对渗透率曲线的比较
Figure 6 Comparison of relative permeability curves between Daqing and Changqing cores

图7给出了用模型中的玄武岩近似模拟长庆低渗岩芯孔隙喉道半径分布下,相对渗透率与实验结果的对比情况。可以看出,两者在相对渗透率曲线交点水饱和度这一关键点处接近,总的趋势上是一致的。

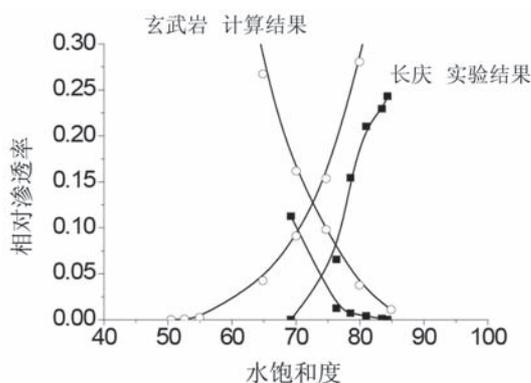


图7 模型计算结果与长庆低渗岩芯相对渗透率曲线实验结果比较
Figure 7 Comparison of relative permeability curves between the quasi-static pore network and the Changqing experiment results

4 结语

微小喉道是低渗透油藏岩芯驱油的重要控制因素之一。本文用三维准静态孔隙网络模型模拟

Thamama 油田五种喉道分布情况下的相对渗透率变化。结果表明:对于较均匀分布的喉道孔隙结构,中值半径越小,渗透率越小,而水相交点处饱和度变化不大;对于非均匀喉道孔隙结构,微小喉道占的份额越大,毛管压力逐渐控制流动,水相对渗透率越小,驱油效率越低。同时通过三维准静态孔隙网络模拟结果与长庆低渗岩芯实验结果对比,证实了模型模拟低渗透油藏驱替的可行性,以及微小喉道在低渗驱替中的流动控制作用。因此开发低渗透油藏,通过物理化学方法降低毛管压力的作用是关键。

参考文献

- [1] 杨普华. 孔隙结构对水驱油机理影响研究[J]. 石油学报, 1980(10): 25-29.
- [2] 沈平平. 砂岩孔隙结构对水驱油采收率的影响及分类[C]//国际油田开发技术座谈会论文集, 北京: 石油工业出版社, 1982.
- [3] DULLIEN F A L. Porous media: fluid transport and pore structure[M]. New York: Academic press, 1979.
- [4] IOANNIDIS M A, CHATZIS I. On the geometry and topology of 3D stochastic porous media[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2000, 229(2): 323-334.
- [5] MAN H N, JING X D. Network modelling of wettability and pore geometry effects on electrical resistivity and capillary pressure[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999, 24: 255-267.
- [6] JERAULD G R, SALTER S J. The effect of pore structure on hysteresis in relative permeability and capillary pressure: pore-level modeling[J]. Transport in Porous Media, 1990, 5(2): 103-151.
- [7] BLUNT M J. effects of heterogeneity and wetting on relative permeability using pore level modeling[J]. SPE Journal, Society of Petroleum Engineers, 1997, 2(1): 70-87.
- [8] CHANDLE R, KOPLIK J, LERMAN K, et al. Capillary displacement and percolation in porous media[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 119: 249-267.
- [9] MARZOUK I, TAKEZAKI H, MIWA M. Geologic controls on wettability of carbonate reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers, 1995(7): 11-14.

应力,验证了复合锚杆的承载力主要取决于钢绞线—复合材料界面的强度。

致谢 感谢敦煌研究院李最雄研究员、王旭东研究员的指导和帮助。

参考文献

- [1] 李国维,黄志怀,张丹,等. 玻璃纤维增强聚合物锚杆承载特征现场试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2240-2246.
- [2] 任非凡,谌文武,张景科,等. 南竹加筋复合锚杆施工工艺优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009(S2): 3789-3794.
- [3] 李最雄,王旭东,张鲁. 南竹加筋复合锚杆[P]. 200520107950.0.
- [4] 冶金部建筑研究总院. 土层锚杆设计与施工规范[S]. 北京, 1991.
- [5] 重庆市建设委员会. 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京, 2002.

(责任编辑:张勇)

(上接第210页)

- [10] OSETO K, AL-AMOUDI A, SUZUKI M. Comprehensive approach of core analysis to predict waterflooding performance in a heterogeneous carbonate reservoir, offshore Abu Dhabi[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi: Curran Associates Inc, 2006: 5-8.
- [11] FATT I. The network model of porous media I. Capillary pressure characteristics[J]. Petroleum Transactions, AIME, 1956, 207: 144-159.
- [12] FATT I. The network model of porous media II. Dynamic properties of a single size tube network[J]. Petroleum Transactions, AIME, 1956, 207: 160-163.
- [13] FATT I. The network model of porous media III. Dynamic properties of networks with tube radius distribution[J]. Petroleum Transactions, AIME, 1956, 207: 164-181.
- [14] BLUNT M, KING P. Relative permeabilities from two- and three-dimensional pore-scale network modelling[J]. Transport in Porous Media, 1991, 6(1): 407-433.
- [15] 胡志明,把智波,熊伟,等. 低渗透油藏微观孔隙结构分析[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(3): 51-53.

(责任编辑:张勇)

(上接第213页)

- [3] 张铁军,洪振舜,邓东升,等. 水泥固化粉质土的无侧限抗压强度预测[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2008, 38(5): 839-843.
- [4] 汤怡新,刘汉龙,朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554.
- [5] 储诚富,洪振舜,刘松玉,等. 用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 643-649.
- [6] 冯玉国,朱家东,宋彬斌. 东营港经济开发区吹填土现场固化试验[J]. 岩土工程技术, 2008, 22(2): 101-104.

(责任编辑:张勇)