

文章编号: 2095-4980(2018)05-0897-05

数字岩心渗流路径的特征研究

王子强¹, 郭慧英¹, 魏云¹, 何磊², 滕奇志^{*2}

(1.中石油新疆油田分公司 实验检测研究院, 新疆 克拉玛依 834000;
2.四川大学 电子信息学院 图像信息研究所, 四川 成都 610065)

摘 要: 岩心的渗流特征决定了油气的分布规律和储藏信息, 利用数字岩心技术建立孔隙网络模型, 对真实岩心孔隙结构进行驱替模拟和渗流分析具有重要意义。然而孔隙结构的宏观渗流特性由其微观特征所决定, 因此研究渗流路径特征具有重要意义。为了从微观层面来分析孔隙结构的渗流特性, 研究了连通路和渗流路径的搜索算法; 给出渗流路径特征相关参数的定义和计算公式; 最后给出孔隙网络模型的路径搜索结果, 以及渗流路径特征参数结果。

关键词: 渗流路径; 数字岩心; 孔隙网络模型; 驱替模拟

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201805.0897

Characteristics of digital core percolation paths

WANG Ziqiang¹, GUO Huiying¹, WEI Yun¹, HE Lei², TENG Qizhi^{*2}

(1.Research Institute of Experimental Detection, CNPC Xinjiang Petroleum, Karamay Xinjiang 834000, China;
2.Institute of Image Information, School of Electronics and Information, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: The percolation characteristics of the core determine the distribution of oil and gas and storage information. Using digital core technology to establish the pore network model is very important for the simulation and percolation analysis of the true core pore structure. The macroscopic percolation characteristics of the pore structure are determined by their microscopic characteristics, so it is important to study the characteristics of the percolation path. In order to analyze the seepage characteristics of the pore structure on the microscopic level, the search algorithms of the connected path and the percolation path are studied. Then, the definition and calculation formula of the relevant parameters of the percolation path characteristics are put forward. Finally, the path search results of the pore network model and the percolation path characteristic parameters are presented.

Keywords: percolation paths; digital core; pore network model; displacing simulation

真实岩心孔隙的三维模型中存在由众多孔隙连接而成的通道, 这些通道为相关流体的渗流提供了物理基础。在进行驱替模拟实验之前, 为了计算流体在动力学规则下的运动规律, 将喉道分割后的孔隙结构中的孔隙和喉道抽象成规则的几何形状, 使得经典物理学公式可以适用。孔隙网络模型虽然可以表现孔隙结构的拓扑机构和孔喉大小^[1], 但不能显示驱替模拟过程中的渗流路径特征。渗流路径是指驱替过程中油驱水或者水驱油的驱替路径^[2]。在驱替过程中, 并不是每条连通路都发生驱替事件^[3], 而是由于毛管力的存在, 驱替剂会选择性地进入孔隙和喉道^[4]。

因为实物性实验很难反应渗流路径的微观特性, 所以本文借助数字岩心技术重建孔隙结构的三维孔隙网络模型, 然后对其进行驱替模拟, 最后搜索出每一条渗流路径并计算每条路径的迂曲度和合流分流统计情况等渗流路径特征参数。

1 路径搜索原理

岩心内部的孔隙结构由众多孔隙和喉道经孔喉链路相互连接而成, 将其抽象为孔隙网络模型。在进行驱替

收稿日期: 2017-07-21; 修回日期: 2017-08-30

*通信作者: 滕奇志 email:nic5602@scu.edu.cn

模拟之前, 将孔隙网络的入口孔隙和出口孔隙标记出来, 一个入口孔隙和一个出口孔隙之间可能存在一条路径。连通路程定义为从一个入口孔隙到一个出口孔隙所经过的由孔隙和喉道连接的路径。连通路程是进行驱替模拟的基础, 因此, 进行渗流路径特征研究的前提是先找出所有的连通路程, 然后筛选出发生驱替事件的连通路程即为渗流路径。

1.1 基于深度优先的连通路程搜索

寻找连通路程的大体思路是, 先对所有的孔隙进行标记, 然后从入口孔隙开始, 深入当前的邻接孔隙并记录位置, 直至出口孔隙。深度优先搜索的算法非常契合本文的想法, 深度优先搜索算法简称 DFS 算法, 属于图论算法的一种^[5-6]。如图 1 所示, 假设节点 k 是要寻找的目标节点。从初始节点 $start$ 开始, 搜索下一层任意的一个节点, 判断当前是否为叶节点(无后继节点)或者已遍历的状态节点(有后继节点), 若为状态节点, 则尽可能深地搜索新状态节点。若为叶节点, 则返回上一层搜索新状态节点。重复上述操作, 直至搜索出目标节点。

借助深度优先搜索算法, 结合连通路程搜索的实际需求, 给出具体的算法步骤:

步骤 1: 对所有孔隙进行标记, 让每一个位置的孔隙都有唯一的编号。

步骤 2: 找到一个入口孔隙, 记录其编号, 并标记为已遍历, 接着深入到一个未遍历的邻接孔隙。

步骤 3: 将上述邻接孔隙标记为已遍历, 再搜索其未遍历的邻接孔隙。

步骤 4: 判断有无下一个邻接孔隙, 若无, 则说明此时已遍历至出口孔隙; 否则, 继续深入搜索跳转至步骤 3。

步骤 5: 遍历到出口孔隙时, 记录从步骤 2 的入口孔隙到出口孔隙经过的每一个孔隙, 所有孔隙的编号顺序排列即为一条连通路程。然后跳转至步骤 2, 直至搜索出所有的连通路程。

对于一些较复杂的孔隙网络结构, 逐条搜索每条连通路程可能效率比较低。实际实验中, 可以同时从多个入口孔隙开始深入遍历, 这将大大提高算法的执行效率。

1.2 渗流路径搜索

如图 2 所示, 从一个入口孔隙到一个出口孔隙之间有多条连通路程, 但不是每条连通路程都可以发生模拟驱替, 只有驱替剂通过的路径才是渗透路径, 即只有渗透路径才会发生驱替事件, 没有渗透路径的岩心其内部是不能进行驱替模拟的, 所以渗透路径直接反映了驱替模拟的过程和方式。因此, 对渗透路径的特征进行研究, 能更好地描述岩心孔隙结构特征, 对岩层进行驱油实验具有重要的指导意义。

在孔隙网络模型的基础上进行驱替模拟^[7], 以油驱水为例。以孔隙网络模型充满水为初始条件, 然后在模型入口处开始不断注入油, 入口处的毛管力将不断增加, 当毛管力达到邻接的孔隙或者喉道的毛管力时, 便会进行活塞驱替。当有多个邻接孔隙均满足驱替条件时, 首先是毛管力较小的孔隙进行驱替, 直至孔隙网络模型中所有孔隙驱替完成。油驱水过程如图 3 所示。

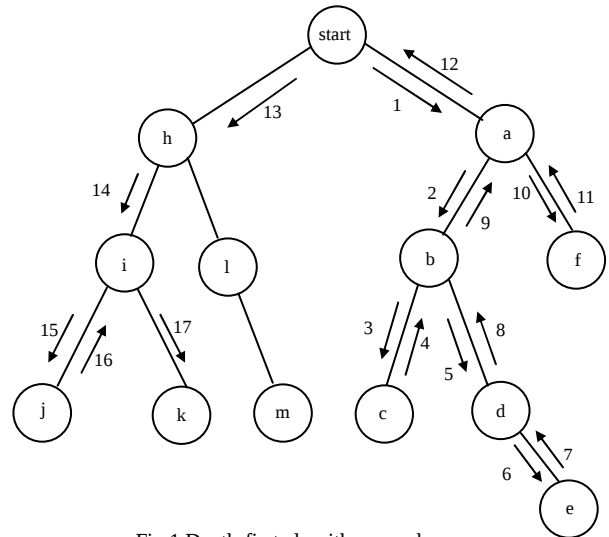


Fig.1 Depth-first algorithm search process
图 1 深度优先算法搜索过程

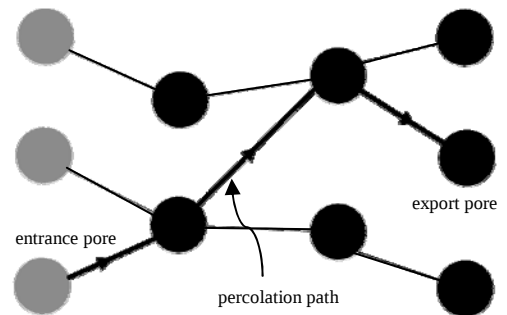


Fig.2 Percolation path diagram
图 2 渗流路径示意图

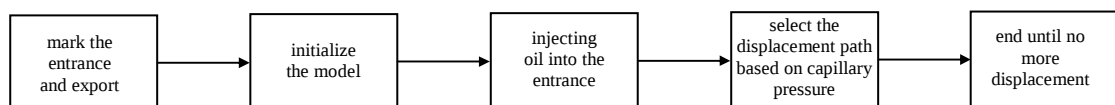


Fig.3 Diagram of oil driving water process
图 3 油驱水过程示意图

在整个驱替过程中, 驱替剂根据孔隙和喉道的毛管力选择驱替路径。毛管力的计算也是近年来国内外研究

的热点。孔隙网络模型已经将真实岩心孔隙结构抽象成了圆形，方便了孔喉毛管力的计算。对于圆形管道，通过对 Young-Laplace^[8]方程简化，可得到计算毛管压力的公式：

$$P_c = P_o - P_w = \frac{2\sigma \cos \theta_r}{r} \quad (1)$$

式中： P_c, P_o, P_w 分别表示入口毛管力、油相压力和水相压力； σ 是油水界面张力； r 是圆形管道半径； θ_r 是油水两相接触角中的后退角^[9]。

渗流路径就是发生了驱替事件的连通路程。图 1 中存在许多条连通路程，却只有一条路径发生了驱替事件。研究渗流路径特征的第一步是搜索出所有的渗流路径。从前文的介绍可知，所有的渗流路径都是连通路程，且一定发生了驱替事件。所以渗流路径的搜索范围是在所有的连通路程之中，并根据连通路程孔隙发生驱替事件的时间先后关系，筛选出渗流路径。具体算法步骤如下：

步骤 1：选取一条连通路程，遍历这条路径上的每一个孔隙。

步骤 2：若路径上有任何一个孔隙未发生驱替事件或者发生驱替事件的时间早于上一级的孔隙，都被标记为非渗流路径，否则标记为渗流路径。

步骤 3：跳转到步骤 1，直至所有的连通路程遍历完全。

步骤 4：记录下每条渗流路径上孔隙编号的顺序排列，搜索完毕。

2 渗流路径的特征

正确获得渗流路径之后，对于渗流路径的特征还需要一些参数进行描述。下面针对渗流路径的路径合流分流统计、路径长度、迂曲度等参数对渗流路径特征做一些分析。

2.1 路径合流分流统计

孔隙网络模型内部存在许多渗流路径相互交叉，渗流路径交叉意味着孔隙会发生合流和分流的情况。当渗流路径一个孔隙的上级的 2 个及以上的孔隙都有驱替剂通过，则该孔隙发生了合流。当渗流路径一个孔隙的下级的 2 个及以上的孔隙都有驱替剂通过，则该孔隙发生了分流。孔隙上发生的合流分流情况越多，说明经过该孔隙的渗流路径就越多，因此路径合流分流统计能够反映路径交叉情况以及孔隙网络模型的连通性。

如图 4 所示，A0 有 3 个邻接孔隙，在 A0 发生驱替事件之前有 A1 和 A2 发生了驱替事件，所以 A0 发生了合流。B0 有 3 个邻接孔隙，在 B1 发生驱替事件之后有 B1 和 B2 发生了驱替事件，所以 B0 发生了分流。因此可以得出合流分流发生的 2 个条件：a) 此孔隙已经发生了驱替事件；b) 在该孔隙之前/后有 2 个及以上发生了驱替事件。

下面给出合流分流统计的具体算法：

步骤 1：依次读取每一条渗流路径并遍历其每一个孔隙，记录每个孔隙发生驱替事件的时间。

步骤 2：读取其中一条渗流路径，并判断每一个孔隙节点除了路径上邻接节点之外的邻接节点是否发生了驱替事件。如果发生了，就比较其时间。若孔隙发生驱替事件的时间晚于邻接孔隙，则发生了合流。若孔隙发生驱替事件的时间早于邻接孔隙，则发生了分流，记录下结果。

步骤 3：若步骤 2 的第一次判断为否，则读取下一条渗流路径。

步骤 4：跳转到步骤 2，直到所有渗流路径遍历完全。

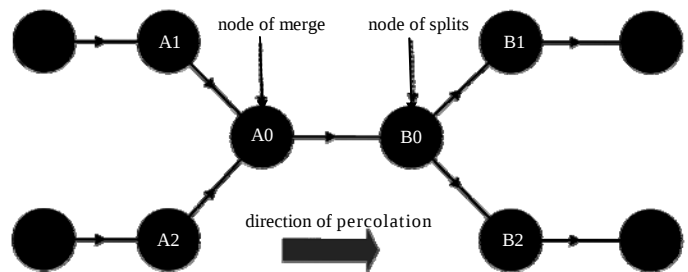


Fig.4 Confluence and diversion
图 4 合流分流情况示意图

2.2 路径长度和迂曲度计算

一条渗流路径由许多孔隙和喉道经孔喉链路连接而成，如图 5 所示，路径长度可以看作是孔隙网络模型中每条孔喉链路叠加的长度，路径长度的计算就是求孔喉链路长度的总和。

在孔隙网络模型中，孔喉链路由体素点沿着邻接 2 个孔隙的真实连接通道的中轴线排列而成，计算 2 个体素点之间的欧氏距离^[10]。若有 2 个体素点 $W_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $W_2(x_2, y_2, z_2)$ ，则两者之间的欧氏距离为：

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (2)$$

孔喉链路长度的计算方法是依次累加邻接体素点之间的距离, 最后再累加孔隙之间的孔喉链路长度, 得到整个路径长度。入口孔隙与出口孔隙的直线距离的计算是求入口孔隙中心点和出口孔隙中心点的欧氏距离。

用迂曲度来表征渗流路径的迂曲性对流动阻力的影响, 迂曲度是指渗流路径的长度与入口孔隙和出口孔隙之间直线距离的比值:

$$\tau = \frac{\lambda}{l} \quad (3)$$

式中: l 表示入口孔隙和出口孔隙之间的直线距离; λ 表示整个路径的长度。如图 6 所示, 迂曲度 τ 越大, 说明渗流路径的连通性越差, 路径越曲折。

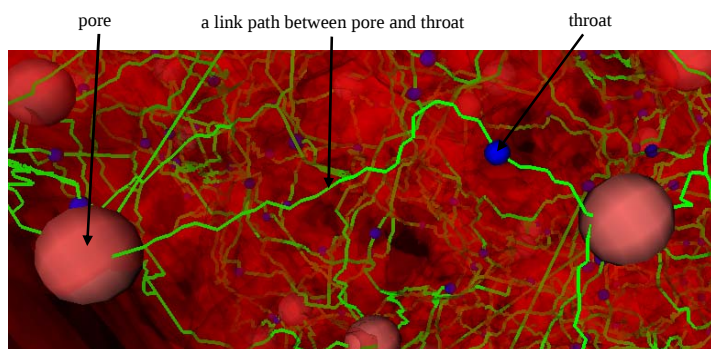


Fig.5 Pore and throat path
图 5 孔喉链路

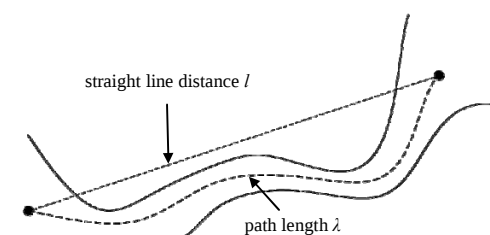


Fig.6 Degree of tortuosity
图 6 迂曲度示意图

3 路径搜索结果

根据算法和渗流路径特征参数的定义, 可以搜索出孔隙网络模型的有效渗流路径, 以及计算出渗流路径的迂曲度和合流分流统计等参数。图 7 为孔隙网络模型中的一条渗流路径分流合流情况分布, 其中索引 0-3 是从入口到出口渗流路径依次通过的孔隙, 该路径通过 4 个孔隙, 后 2 排数据是各个孔隙对应的合流与分流的发生次数。索引 0 和 3 分别对应入口孔隙和出口孔隙, 可以看出入口孔隙的合流数为 0, 出口孔隙的分流数为 0, 与实际情况相符。

如图 8 所示, 孔隙网络模型共有 96 条有效渗流路径, 分别展示了模型最长和最短的渗流路径, 以及渗流路径的路径长度和迂曲度等相关参数。

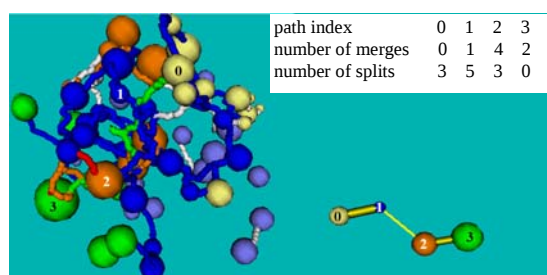


Fig.7 Confluence and diversion of percolation path
图 7 渗流路径合流分流分布统计

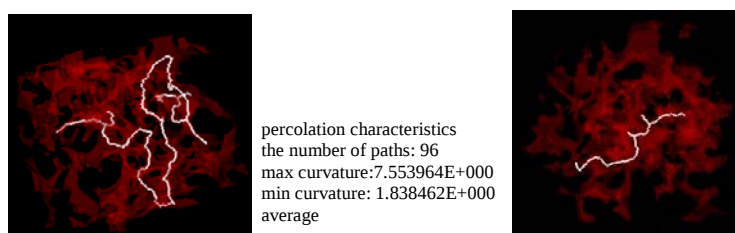


Fig.8 Parameter of percolation path
图 8 渗流路径特征参数

4 结论

本文在孔隙网络模型的基础上, 通过并行的方式借助深度优先搜索算法来高效地搜索连通路程。利用驱替模拟的结果从连通路程中筛选出渗流路径, 并通过计算路径迂曲度和合流与分流情况等参数来表征渗流路径的特征。这些特征参数能够反映渗流路径的交叉情况以及整个孔隙网络模型的连通性, 对研究岩心孔隙结构的宏观特性有重要意义。

参考文献:

- [1] 杨永飞, 张文杰, 姚军, 等. 基于孔隙网络模型的三相相对渗透率模拟计算方法[J]. 中国科技论文, 2016, 11(9): 977-

981. (YANG Yongfei,ZHANG Wenjie,YAO Jun,et al. Simulation method for three-phase relative permeability based on pore-scale network model[J]. China Science Paper, 2016,11(9):977-981.)
- [2] 吕建荣,谭锋奇,许长福,等. 克拉玛依砾岩油藏储层分类特征及水驱油规律[J]. 东北石油大学学报, 2015,39(4):21-30. (LYU Jianrong,TAN Fengqi,XU Changfu, et al. Reservoir classification characteristics and water displaced oil laws of conglomerate reservoir in Karamay oilfield[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015,39(4):21-30.)
- [3] 郭亮,滕奇志. 基于 SURF 算法的微观驱替图像配准[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):271-276. (GUO Liang,TENG Qizhi. Microscopic displacement image registration based on SURF algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):271-276.)
- [4] 李元生,李相方,滕赛男,等. 考虑孔喉与流体分子相互作用及毛管力的相平衡计算[J]. 石油学报, 2015,36(4):511-515. (LI Yuansheng,LI Xiangfang,TENG Sainan,et al. Phase equilibrium calculation considering the interaction between pore and molecules and the capillary pressure effect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015,36(4):511-515.)
- [5] 李均利,陈爽,王秀英. 三维欧氏距离变换快速算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012,24(12):1559-1567. (LI Junli,CHEN Shuang,WANG Xiuying. A fast 3D Euclidean distance transformation[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012,24(12):1559-1567.)
- [6] 龚建华. 深度优先搜索算法及其改进[J]. 现代电子技术, 2007,30(22):90-92. (GONG Jianhua. Depth priority algorithm and its improvement[J]. Modern Electronics Technique, 2007,30(22):90-92.)
- [7] 武爱兵. 地质封存条件下残余气形成过程的岩心驱替模拟实验研究[D]. 北京:中国地质大学, 2016. (WU Aibing. Simulation experiment research on the core displacement of residual gas formation process under the condition of geological storage[D]. Beijing:China University of Geosciences, 2016.)
- [8] CHEN T,CHIU M S,WENG C N. Derivation of the generalized Young-Laplace equation of curved interfaces in nanoscaled solids[J]. Journal of Applied Physics, 2006,100(7):65.
- [9] PIRI M,BLUNT M J. Three-dimensional mixed-wet random pore-scale network modeling of two-and three-phase flow in porous media. I. Model description[J]. Physical Review E 71, 2005,71(2):026301-1-026301-30.
- [10] YU Y,LI K L. Parallel depth first search algorithm on multicore-CPU and GPU[J]. Application Research of Computers, 2014,31(10):2982-2985.

作者简介:



王子强(1981-), 男, 山东省青岛市人, 硕士, 工程师, 主要从事油藏渗流特征和储层保护的生产和科研工作 .email:wangzq_81@126.com.

郭慧英(1986-), 女, 青海省海东市人, 硕士, 工程师, 主要从事油藏渗流特征和储层保护的生产和科研工作.

魏 云(1986-), 女, 陕西省汉中市人, 硕士, 工程师, 主要从事油藏渗流特征和储层保护的生产和科研工作.

何 磊(1993-), 男, 湖南省邵阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为图像处理.

滕奇志(1961-), 女, 重庆市人, 博士, 教授, 主要研究方向为图像处理、模式识别.