

# Research and Development on Micro Seepage

Qingyu Li, Qian Wang, Xianzhi Xu

University of Science and Technology of China, Hefei  
Email: [liqy@mail.ustc.edu.cn](mailto:liqy@mail.ustc.edu.cn), [wqwq90@mail.sutc.edu.cn](mailto:wqwq90@mail.sutc.edu.cn), [xuxz@ustc.edu.cn](mailto:xuxz@ustc.edu.cn)

Received: Apr. 15<sup>th</sup>, 2014; revised: May 17<sup>th</sup>, 2014; accepted: May 21<sup>st</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

With the development of seepage mechanics in various fields, many problems demand the flow process of micro seepage such as the movement of gas-liquid interface in porous medium. In this paper, the problems and solutions of the single phase and multi phase micro seepage based on the classical seepage mechanics, CT scanning technique, percolation theory, micro seepage simulation technique and topology network model in porous medium are expounded. Also the characteristics of each method were analyzed, and the future development was prospected.

## Keywords

Micro Seepage, Porous Medium, Classical Seepage Mechanics, CT Scanning Technique, Percolation Theory, Topology Network Model

---

## 细观渗流的研究与进展

李清宇, 王 乾, 徐献芝

中国科学技术大学, 合肥  
Email: [liqy@mail.ustc.edu.cn](mailto:liqy@mail.ustc.edu.cn), [wqwq90@mail.sutc.edu.cn](mailto:wqwq90@mail.sutc.edu.cn), [xuxz@ustc.edu.cn](mailto:xuxz@ustc.edu.cn)

收稿日期: 2014年4月15日; 修回日期: 2014年5月17日; 录用日期: 2014年5月21日

---

## 摘 要

随着渗流力学在各个领域的发展, 很多问题需求描述细观的渗流过程例如多孔介质中气液界面的运动。

本文基于多孔介质，阐述了经典渗流力学、CT扫描建模技术、逾渗理论、微观渗流仿真模拟技术和拓扑网络模型等若干方法对细观单相渗流与多相渗流的描述与解决方法，并对每种方法的特点进行总结分析，展望了发展前景。

## 关键词

细观渗流，多孔介质，经典渗流力学，CT扫描技术，逾渗理论，拓扑网络模型

## 1. 引言

多孔介质中的渗流问题是流体力学中的经典问题之一[1]，广泛地存在于环境、水文、地质等领域。随着石油开采、海水入侵、污染物迁移、燃料电池等工程问题的进一步深化，要求描述更为细观的渗流过程，比如油水驱替前沿的具体形状[2]、气体扩散电极内气液界面形状[3]等。

很多学者先后提出多种细观描述多孔介质的方法，比如经典渗流力学、CT扫描建模技术、逾渗理论、网络模型、微观渗流仿真模拟技术、拓扑网络模型等。

## 2. 经典渗流力学

Darcy 定律(Darcy's Law)是渗流力学中最基本的定律，其表达式为

$$Q = \frac{KFh}{L}$$

式中  $Q$  为单位时间渗流量， $F$  为过水断面， $h$  为总水头损失， $L$  为渗流路径长度。Darcy 定律表明渗流速度与水力坡度一次方成正比。说明水力坡度与渗流速度呈线性关系，故又称线性渗流定律。

经典渗流力学建立在 Darcy 定律之上将多孔介质简化为连续介质。连续介质理论[4]首先是对多孔介质骨架和孔隙进行简化，提出了特征体元的概念。特征体元包含了足够多的孔隙，是一种可以代表多孔介质性质的最小单元体。特征体元同时包含了孔隙和骨架，然后把与流动相关的参数赋予连续介质上，如图 1 所示。在处理实际问题时，通过 Darcy 定律，建立压力和流量的关系，可以解决大量工程问题。

### 2.1. 单相渗流

单相渗流是渗流力学中最为基础的问题，典型的稳态流动包括平面平行流、平面径向流、球形向心流等。

经典渗流力学在解决单相渗流问题时，对于稳态或者非稳态流动，均在 Darcy 定律的基础上，建立压力与流量的关系，忽略管道内的具体流动，得出压力分布、界面流量、渗流速度等，但是缺少液体在介质中的具体流动过程。

以平面平行流为例，认为流线是一组互相平行的直线，设定介质长度为  $L$ ，截面积为  $A$ ，供给边缘压力为  $p_e$ ，排液道（流出端）压力为  $p_w$ ，则方程和定解条件可写成

$$\begin{cases} \frac{d^2 p}{dx^2} = 0 \\ p(x=0) = p_e \\ p(x=L) = p_w \end{cases}$$

容易得到压力分布，界面流量  $Q$  和渗流速  $V$  分别为：

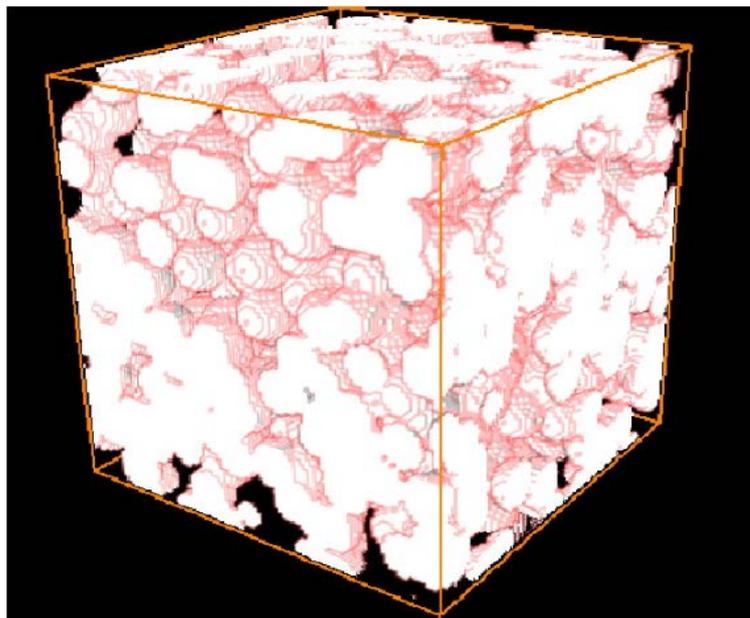


Figure 1. The representative volume element  
图 1. 特征体元

$$p(x) = p_e - (p_e - p_w) \frac{x}{L}$$

$$Q = \frac{AK(p_e - p_w)}{\mu L}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{K(p_e - p_w)}{\mu L}$$

得出对于稳态平面平行流，压力沿流动方向呈线性分布，流量和流速与两端压差呈正比。

经典渗流力学在处理单相渗流时所得到的结果是建立在特征体元上的，即认为多孔介质是一个连续性的介质，因此所得的数据并不能体现出多孔介质每个孔隙内的流体的压力分布、流量和流速与两端压力差的关系，也就是说无法细观地描述液体在多孔介质内的流动。

## 2.2. 两相渗流

经典多两相渗流的研究主要在于通过实验建立毛细力和流体的饱和度的关系。流体的饱和度是多相渗流的一个非常重要的参数。当多孔介质的孔隙空间被两种或两种以上的流体所占据是，每一种流体所占据的孔隙的比例即为该流体的饱和度。而多孔介质的毛细力概念沿用了单根管毛细力的定义。

毛细力与饱和度的关系曲线简称毛细力曲线，是多相渗流的一个重要关系曲线。该曲线通常采取实验确定，如图 2 所示。

在毛细力曲线确定后，当需要曲线计算饱和度时，首先确定介质的多个压力分布，寻找多相之间的压力差，注入边界条件和初始条件，在曲线上获取饱和度，如图 3 所示。

在解决两相渗流问题时，分别建立两相的 Darcy 定律方程，边界条件为毛细力曲线，利用数值解法如差分法、有限元法、格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method, LBM)[5]等对压力分布、界面流量、渗流速度进行计算。因为毛细力和饱和度的关系曲线在某一区间变化及其剧烈，在这一区间内取值会存在一定的误差，因此在处理两相渗流问题时，在毛细力和饱和度变化较为剧烈的情形，很难给出合适的

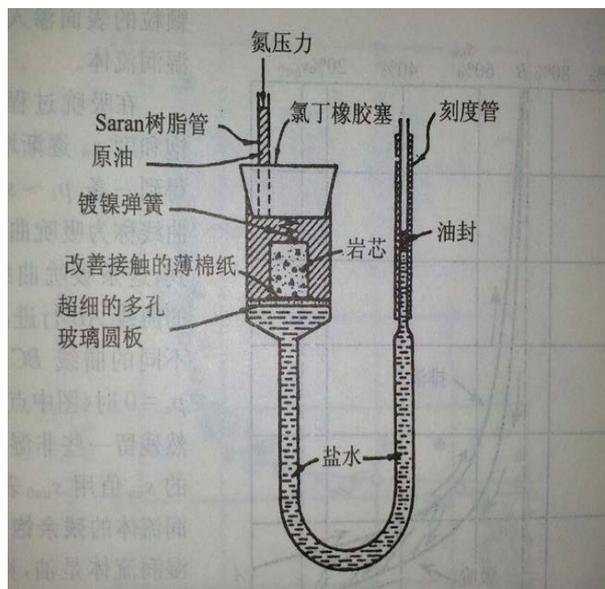


Figure 2. Device for the capillary force curve

图 2. 毛管力曲线测定装置图

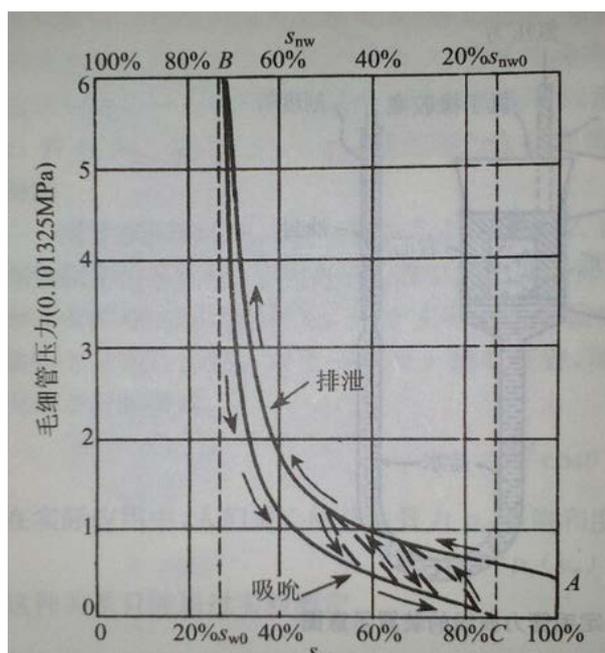


Figure 3. The capillary force curve

图 3. 毛管力曲线图

结果[6]。在这些特定场合下，迄今为止连续介质理论仍无法细致地描述多孔介质内油水驱替等细观渗流问题，这也是经典渗流力学力求解决的重要问题之一。

经典渗流力学在处理油藏模拟等实际应用问题时，通常在解析试井的基础上采用数值试井技术。解析模型使用起来简单快捷，但是通常只是处理较为简单或理想的情况，对于复杂模型如多相流、非均质、非平面或复杂边界等情况，通常要借助数值模型。数值试井是对整个复杂区域内用适合的离散方法如差分法、LBM 方法等对渗流方程组进行离散，求解离散方程组，并将得出的压力数值与实测压力数据进行

比较。数值试井与解析试井相互补充，彼此校验，可以解决大量实际应用问题。

综上所述，经典渗流力学不论在单相渗流还是多相渗流问题上，都有着成熟的解决方案。经典渗流力学的基础是连续介质理论，将整个多孔介质看成一个由大量特征体元所组成连续介质，因此在细观渗流领域中目前尚难以给出每个孔隙内具体的界面分布、流动图形和管道内的流动。

### 3. CT 扫描建模技术

CT 扫描建模技术[7]一般采用 X 射线层析成像仪(X-CT)和核磁共振成像仪(MRI 或 NMRI)得到多孔介质孔隙图形。X-CT 的工作原理是 X 射线透过被测物体时，其密度差异引起 X 射线有不同程度的衰减，由此可观察被测物体的内部结构、多孔介质的孔隙和裂缝分布及其分形参数。MRI[8]的工作原理是先获得被测物体的核磁成像信息，根据其弛豫时间的差异，再由计算机以 Fourier 变换[9] [10]重建法等方法成像，如图 4 所示。这些方法都是从二维的断层扫描经过计算机重建得到三维模型，所得模型还原度很高，可以在纳米尺度上描述多孔介质的内部构造。CT 扫描过程流程图如图 5 所示。

如图 6 所示，可以看出 CT 扫描建模技术得到的是多孔介质的固体骨架部分，对于液体在骨架内的具体流动过程暂时是无法通过扫描得出的，只能通过数值模拟计算，但是多孔介质孔隙内部的边界条件是非常复杂的，在处理孔隙内部边界条件时已耗去大量计算资源，如果再考虑多相流体的流动，完成一项较为复杂的流动过程模拟，目前的计算机基本上是难以完成的。随着计算机技术的发展，当计算机的计算能力足以满足 CT 扫描技术的要求时，该技术将会有及其广阔的前景。

现在比较常用的处理细观渗流问题的方法是三维重建模拟方法[11]。该方法将经典渗流力学与 CT 扫描建模技术相结合，在 CT 扫描建模技术基础上,从多孔介质数据库中调取数据，利用数学建模，建立三维有限元模型[12]。借助连续介质理论[13]，沿用经典渗流力学的处理方案，将整个三维有限元模型看作是一个连续介质模型，在模型中解决相关渗流问题。

图 7 所示的就是 LBM 应用于三维重建模拟方法的一个示例。首先将 CT 扫描所得到的模型进行分割，将其转化为由大量立方体特征体元所组成的复合体。每个体元都包含一定的孔隙和骨架，其物理性质由 CT 扫描得出的数据库赋予，并通过一定计算方法如 D3Q19 或 D3Q27 等，得出所需的界面流量与压力分布等数据。

### 4. 逾渗理论

逾渗[14]就是指在一元或多元体系中，体系以外的一种介质通过一定的路径进入体系内的过程。

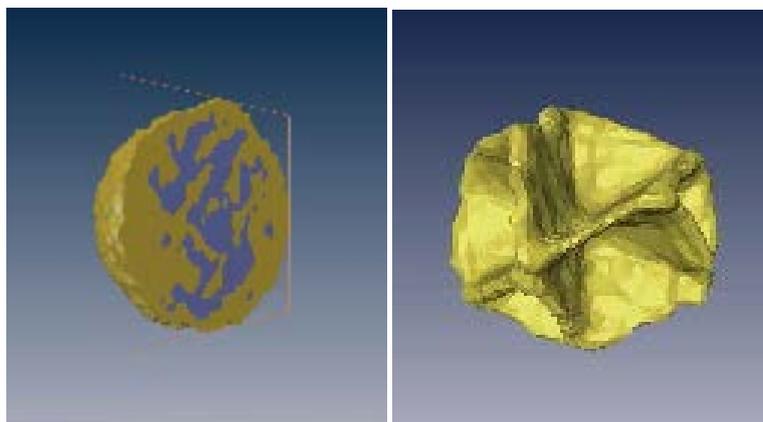


Figure 4. Reconstruction by computed tomography  
图 4. 断层扫描重建成像

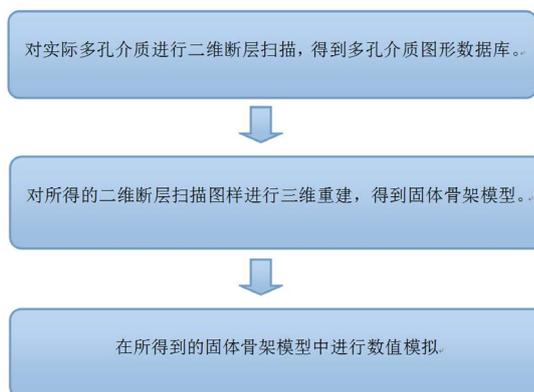


Figure 5. The flow chart of CT scanning technique  
图 5. CT 扫描技术流程图

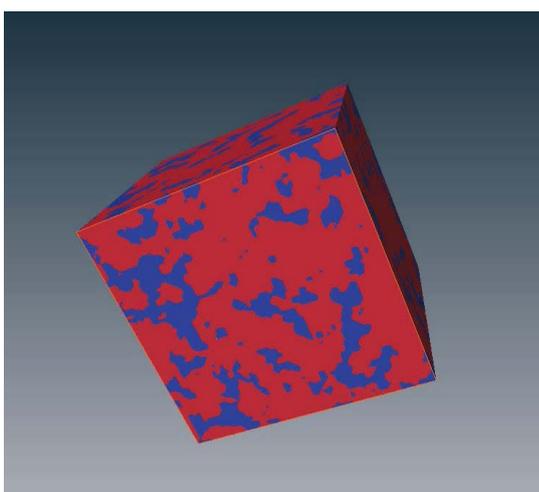


Figure 6. An achievement of CT scanning technique  
图 6. CT 扫描成果图

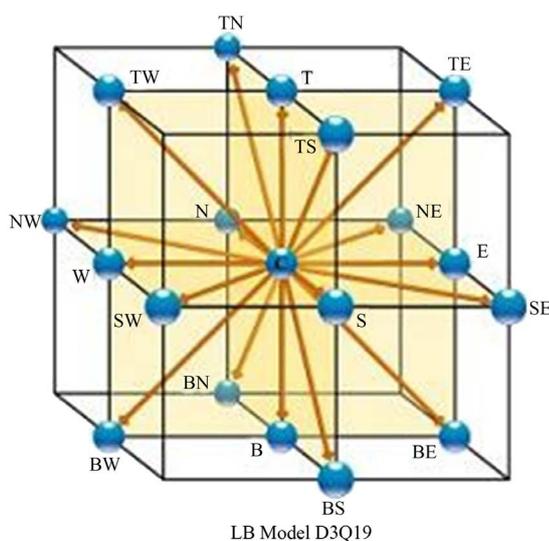


Figure 7. An example of 3D reconstruction with LBM  
图 7. LBM 在三维重建模拟中的示例

逾渗概念是由 S.R.Broadbent 和 J.M.Hammersley 于 1957 年首先引入的, 用于描述流体在无序多孔介质中流动。最早的逾渗模型是由 Kirkpatrick、Zallen 等借用 Flory 凝胶理论提出的一种描述导电网络形成的模型。该模型是一个基于统计学的理论, 主要研究填料的临界浓度附近的导电率的变化规律。随着逾渗理论不断发展, 逾渗理论现在广泛地应用于多孔介质内的流动、群体中疾病的传播、导体和绝缘体的复合材料的电导率以及螺旋状星系中恒星的形成等问题, 有着重要的研究意义。

逾渗理论是处理强无序和具有随机几何结构系统常用的理论方法之一[15], 现在对多孔介质渗透概率的研究大都采用逾渗理论进行研究。该理论在解决多孔介质中的渗流问题时, 认为多孔介质中的孔隙部分的性质是完全无序随机或者区域性随机的, 将孔隙部分转化为网格, 忽略了固体骨架, 建立起一个几何模型, 过程如图 8 所示。这种无序随机的几何模型分为两种: 一种是网格大小是有限的, 用以描述孔隙数目较少的多孔介质或者较为复杂的多孔介质内的一个区域, 另一种网格是无穷大或者趋于无穷大, 用以描述和研究整个复杂多孔介质的渗透概率和逾渗阈值处系统物理性质发生的变化[16]。

所谓逾渗阈值, 如图 9 所示, 图示为  $100 \times 100$  网格中液体渗透通过模型的概率与模型亲水性材料比例之间的曲线。我们可以看出当模型的某一个性质发生改变时, 液体的渗透概率也会产生一定的类似图 8 所示的变化曲线。随着模型网格数目增大时, 该曲线的上升速率会逐渐增大, 当模型趋近无穷大时, 曲线会变成在某一点从 0 直线上升至 1, 这一点就是逾渗阈值。整个模型在逾渗阈值附近是极其敏感的, 微小的变化也会带来物理性质的波动。

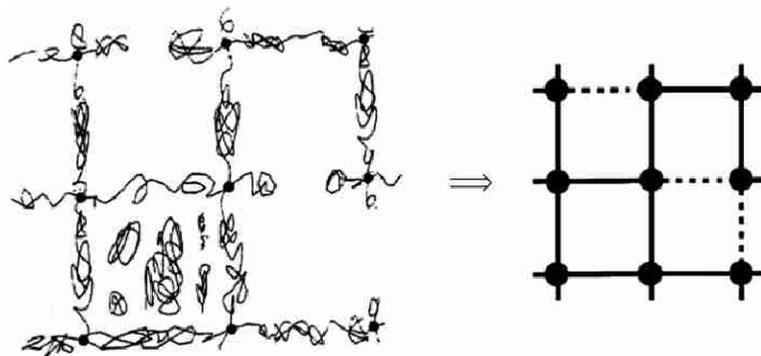


Figure 8. Transformation thinking of percolation theory  
图 8. 逾渗理论的转化思想

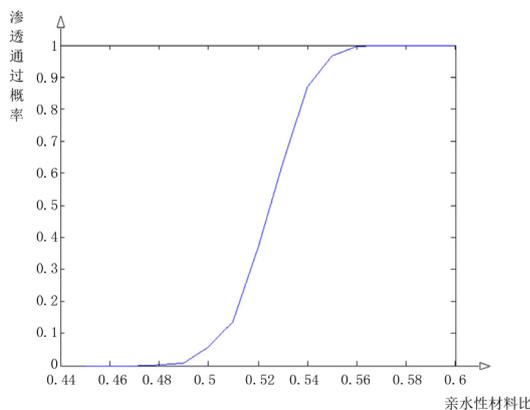


Figure 9. The percolation threshold  
图 9. 逾渗阈值

逾渗理论为解决微观渗流问题提出了一个很好的几何模型。该模型在解决微观渗流问题时首先建立每个节点的方程，给定边界条件，继而与 Darcy 定律联立求解。逾渗理论提出的模型是最接近微观渗流问题的模型，但是逾渗理论提出的模型大都是无序随机的，侧重点在于计算渗透概率和逾渗阈值附近的某些数值变化等这些数学问题，在解决实际的多孔介质渗流过程如两相界面运动这类问题上涉猎较少。

### 5. 微观渗流仿真模拟技术

微观渗流仿真模拟技术[17]是采取实验方法，对玻璃薄片模型进行随机性腐蚀，建立一个自制的二维多孔介质模型。然后在该模型中模拟渗流问题，通过显微镜观察玻璃片内的液体流动。

微观渗流仿真模拟技术在真正意义上观察并模拟了多孔介质孔隙内的具体流动细节，并得到了多相渗流的流动界面，在微观渗流方面做出了巨大贡献。

### 6. 网络模型

网络模型是对多孔介质薄片进行图样采集和数字化处理，得到孔隙的具体参数，通过分析将所得到的孔隙结构转化为二维微观网络，建立矩形颗粒的多孔隙网络模型[18]，如图 10 所示。

### 7. 拓扑网络模型

对网络模型进一步改进简化，借助逾渗理论对多孔介质简化的思想，提出了一种拓扑网络模型来研究多孔介质内的微观渗流过程。该模型采用欧拉解决“七桥问题”的拓扑思想，忽略了每个孔隙的具体空间形状，将孔隙部分简化为管道和节点，这些管道和节点按一定规律分布于计算区域中，以此构成拓扑网络基本结构，其中骨架部分不参与流动，直接简化为网络以外的部分，如图 11 所示。

在同一多孔介质中，毛细管的性质可以是不同的[19]：有的毛细管可以直接流通液体，有的可能不是很容易通过液体，有的甚至可能不通。不同介质中亲水性材料的比例不同，液体通过的情况也不同。将毛细管简化为最简单的两种情况：液体可以通过或液体不能通过。这样整个介质中的毛细管可以看成是一个拓扑网络中的横、竖线，液体在其中寻找能流通至另一侧的通道。

拓扑网络模型在解决渗流问题时，首先将多孔介质中的孔隙部分转化为网络中的节点与管道，不参与流动的固体骨架部分简化为网络外的部分，建立起与多孔介质相对应的拓扑网络模型。通过这种转化将复杂的渗流问题转化为较为简单的短程管流问题，如图 12 所示。

以气体扩散电极为例，气体扩散电极是一种典型的多孔介质[20]，气体扩散电极在制作过程中同时加入亲水介质与憎水介质，因此电极内部的毛细管会呈现不同的亲憎水性。建立一个如下图所示的拓扑网络模型，该模型取毛细管的间隔为 10 微米，毛细管中亲水管道的比例为 50%，通过随机分布得出的一个

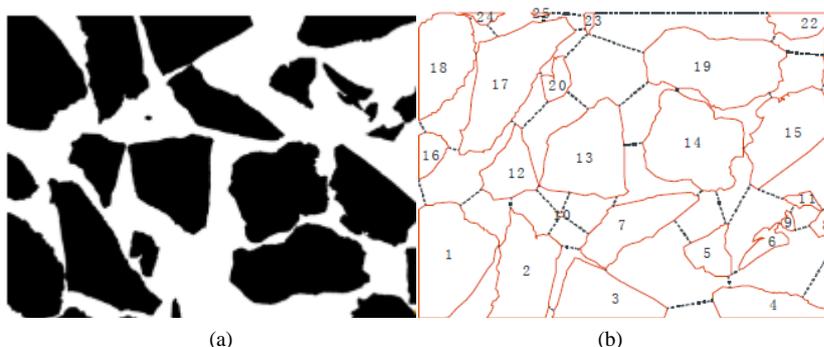


Figure 10. The transformation of the network model  
图 10. 网络模型的转化过程

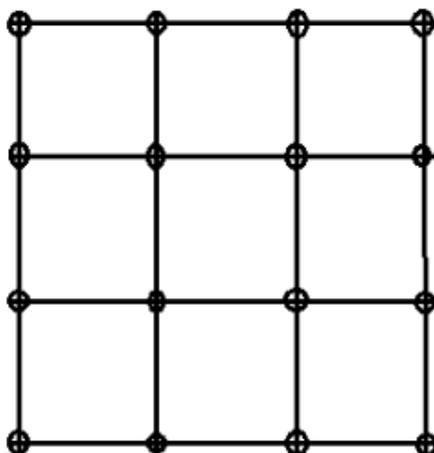


Figure 11. Simple diagram of topology network model, lines between the nodes represent the capillaries, and the blank area is the skeleton

图 11. 拓扑网络模型的简单示意图，节点之间的连线代表毛细管，空白区域为骨架

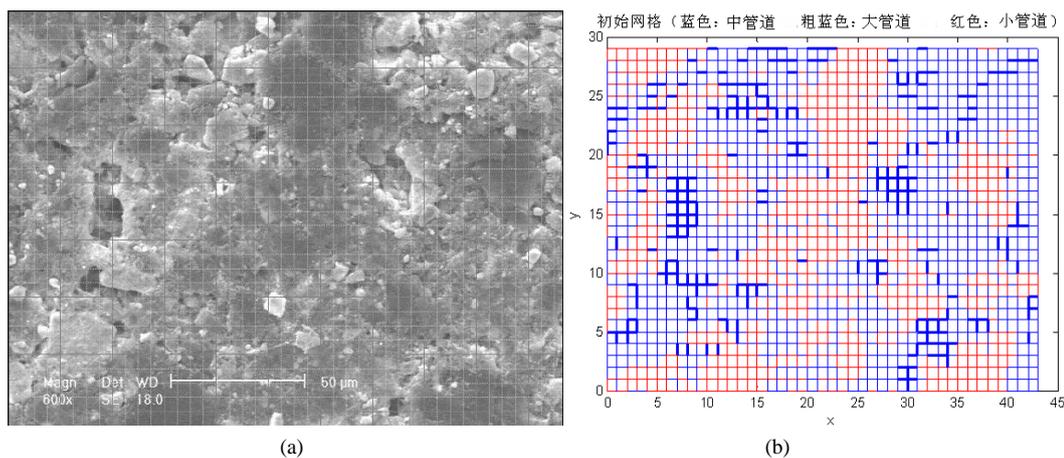


Figure 12. The transformation of topology network mode

图 12. 拓扑网络模型转化过程

简化多孔介质模型[21]，如图 13 所示。

假定网格的下方是液体，上方是气体，液体在表面张力的作用下从网格的最下面向上渗透，最终整个网格中形成一定的气 - 液分布。

液体是一层一层从一侧向另一侧渗透，所以每个节点是否有液体通过与它周围的点都有关系。通过一层一层的判断液体的流动，看最终是否能渗透到另一侧，并得出最终的气液分布界面。图 14 所示为液体在图 12 所示的拓扑网络中的气液分布图。

拓扑网络模型在模拟实际多孔介质内的流动时，通过 CT 扫描技术等对实际多孔介质进行扫描，知晓管道的具体性质如管阻等，然后对拓扑网络中管道的管阻等进行赋值，使其达到与真实管道的流动性一致，更加真实的模拟液体在多孔介质中的流动。因此，拓扑网络模型可以模拟很多实际细观渗流问题，比如多孔介质内的气液分布界面、油田开采过程中的压力与流量问题等[22]，为这些问题提供了一种新的解决思路。

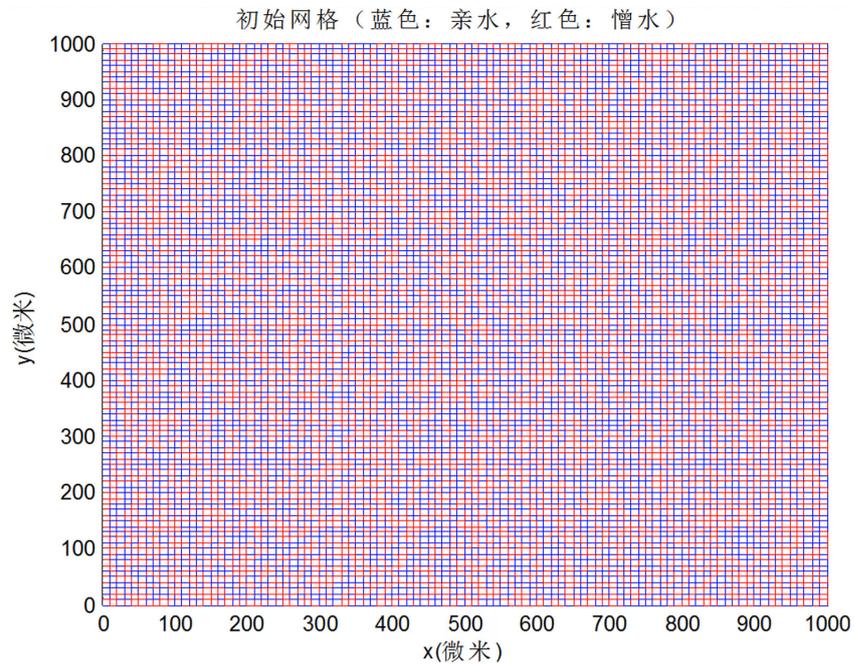


Figure 13. Structure diagram of 50% hydrophilic medium and 50% hydrophobic medium

图 13. 50%亲水, 50%憎水介质的结构图

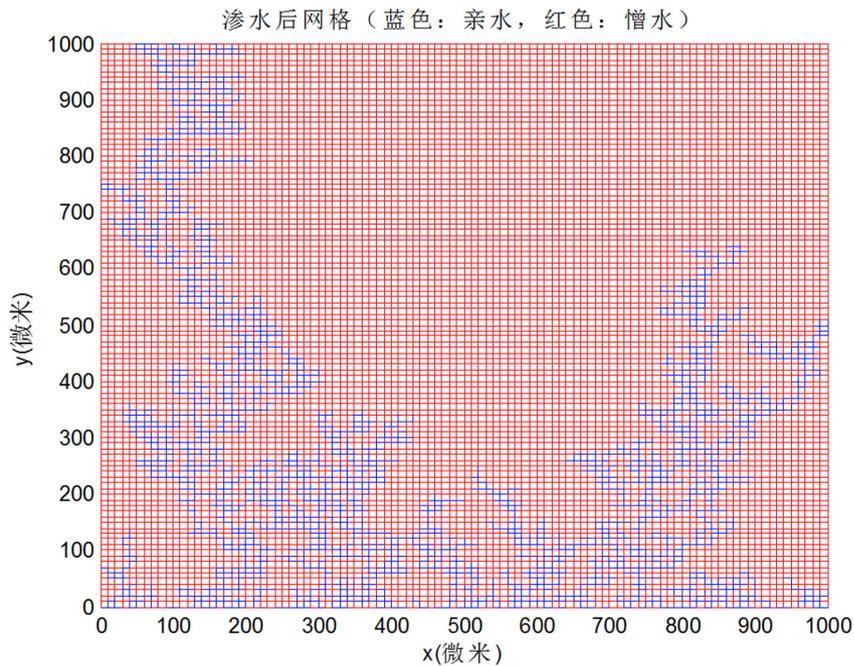


Figure 14. 50% hydrophilic and 50% hydrophobic, gas-liquid distribution interface

图 14. 50%亲水, 50%憎水介质的气液分布界面图

拓扑网络模型的中心思想是将复杂的渗流问题转化为较为简单的短程管流问题。通过建立转化原则，将多孔介质的孔隙部分进行转化，把不规则的孔隙边界转化为规则的管道边界，减少了在孔隙边界上的计算时间，建立大量的短程管流方程组来计算流体在拓扑网络中的流场分布问题。拓扑网络中的节点和

管道是由实际多孔介质中的孔隙部分转化而来，依赖于多孔介质。

拓扑网络模型虽然不能完全真实的模拟出液体在多孔介质内的流动与分布，但是在很多情况下，我们所需要的并不是每个孔隙内液体的具体分布形状，而是液体在多孔介质内的一个流场分布。拓扑网络模型可以给出多孔介质内的大致气液分布界面与压力分布、流量、渗透概率等，满足大部分微观渗流问题的需要。

## 8. 结论

### 经典渗流力学

是渗流力学的基础，无论是在理论方面还是在实际应用方面都有着完善的解决方案，但是由于经典渗流力学基于连续介质理论，忽略了多孔介质内部孔隙的形状，迄今为止在多孔介质内对孔隙内液体的流动描述尚不够具体，对多相流动的流动界面形状也涉及较少，这也正是经典渗流力学现在力求解决的问题之一。

### CT 扫描建模技术

是描述微观渗流最直观的方法，给出了最为接近真实多孔介质的模型。但是该技术只能提供还原度极高的固体骨架，无法通过扫描给出流动过程中液体的具体流动图形。而通过数值模拟过程模拟液体在多孔介质中流动时，在处理孔隙边界条件时耗费了大量计算资源，随着计算机技术的发展与计算机计算性能的提高，会使该方法具有广阔的发展前景及应用范围。

### 三维重建模拟方法

是现在比较常用的方法，应用于解决很多实际问题，但是在建模过程中忽略和简化了很多孔隙内的细节，随着经典渗流力学在微观渗流力学方面的发展，该方法会在将来可以解决更多关于微观渗流方面的问题。

### 逾渗理论

提出的是一个数学模型，主要解决的是键值变化导致的整个网络模型的性质变化。该理论在处理微观渗流问题时，建立每个节点的方程，对压力分布等问题有着很好的解决方案。逾渗理论侧重点是整个模型的通透与否和逾渗阈值附近模型物理性质的变化，在多孔介质每个孔隙内的流动与多相界面并没有细致的研究，随着逾渗理论的进一步发展，在微观流动方面会有更加完善的结论。

	优点	缺点	主要应用领域
经典渗流力学	有成熟的解决方案,应用范围广	没有将孔隙和骨架区分开来	计算渗流过程中的流量、流速与压力分布
CT 扫描建模技术	所得固体骨架还原度极高	计算量大, 耗时间长	提供多孔介质图形数据库并模拟液体流动过程
三维重建模拟方法	可对实际多孔介质进行模拟计算	无法得出具体流动图形与界面分布	模拟计算实际多孔介质中的渗流过程
逾渗理论	区分了孔隙和骨架,提出了数学模型	在流动图形和界面运动方面研究不多	研究模型的通透性与逾渗阈值附近的性质
微观渗流仿真模拟技术	真正意义上模拟了微观渗流过程	对较为复杂的模型无法进行模拟	模拟并观察较为简单的微观渗流问题
拓扑网络模型	给出了液体的流动趋势与分布	无法完全真实的还原微观渗流	模拟渗流过程中的流动图形与界面分布

Figure 15. Summary of each method

图 15. 各种方法的总结

### 微观渗流仿真模拟技术

在微观渗流方面能够模拟孔隙内的具体液体流动和多相界面的运动，是真正意义上的微观渗流模拟过程，在实际应用方面可以解决很多不太复杂的微观问题，但是对于油田等规模较大、孔隙繁多的模型，现在很难建立与原模型相对应的多孔介质模型，可以预见的是随着微观制作工艺的提高，在将来微观渗流仿真模拟技术将更加完善的模拟复杂模型中的渗流问题。

### 拓扑网络模型

在网络模型的基础上进一步简化，借助拓扑思想，可以微观地模拟多孔介质中的渗流问题，虽然仍然无法完全真实的还原微观渗流，但是给出了渗流过程中流体的大致趋势与多相分布，可以解决大多数微观渗流问题。以上几种方法的总结如图 15 所示。

### 参考文献 (References)

- [1] Touma, J. and Vauclin, M. (1986) Experimental and numerical analysis of two-phase infiltration in a partially saturated soil. *Transport in Porous Media*, **1**, 27-55.
- [2] Leverett, M.C. (1939) Flow of oil-water mixtures through unconsolidated sands. *Transactions of the Iron and Steel Society of AIME*, **132**, 149.
- [3] Kolyagin, G.A., Kornienko, V.L., Kuznetsov, B.N. and Chesnokov, N.V. (2005) Electrical conductivity of hydrophobized electrodes fabricated from thermally expanded graphite and their activity in electroreduction of oxygen. *Russian Journal of Applied Chemistry*, **10**, 1625-1630.
- [4] Paganin, V.A., Ticianelli, E.A. and Gonzalez, E.R. (1996) Development and electrochemical studies of gas diffusion electrodes for polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Applied Electrochemistry*, **26**, 297-304.
- [5] Jahanshaloo, L., Pouryazdanpanah, E. and Sidik, N.A.C. (2013) A review on the application of the lattice Boltzmann method for turbulent flow simulation. *Numerical Heat Transfer Part A—Applications*, **11**, 938-953.
- [6] 孔祥言 (2012) 高等渗流力学. 中国科学技术大学出版社, 合肥, 708-796.
- [7] Gerard Girvin, F. and Gupta, D. (2006) Peach stone ileus: CT appearances of impacted fruit stones. *European Journal of Radiology Extra*, **57**, 75-77.
- [8] Boero, G., Frounchi, J., Furrer, B., et al. (2001) Fully integrated probe for proton nuclear magnetic resonance magnetometry. *Review of Scientific Instruments*, **72**, 2764-2768.
- [9] Yang, W.T., Feng, Z.M., Liu, W.Z. and Zou, X.C. (2007) Blurred defocused image restoration based on FRFT. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, **3**, 496-500.
- [10] Qi, L., Tao, R., Zhou, S.Y. and Wang, Y. (2004) Detection and parameter estimation of multicomponent LFM signal based on the fractional fourier transform. *Science in China Series F: Information Sciences*, **2**, 184-198.
- [11] Pollefeys, M., Nistér, D., Frahm, J.-M., Akbarzadeh, A., Mordohai, P., Clipp, B., Engels, C., Gallup, D., Kim, S.-J., Merrell, P., Salmi, C., Sinha, S., Talton, B., Wang, L., Yang, Q., Stewénius, H., Yang, R., Welch, G. and Towles, H. (2008) Detailed real-time urban 3D reconstruction from video. *International Journal of Computer Vision*, **2-3**, 143-167.
- [12] Weiss, J.A., Gardiner, J.C., Ellis, B.J., Lujan, T.J. and Phatak, N.S. (2005) Three-dimensional finite element modeling of ligaments: Technical aspects. *Medical Engineering and Physics*, **27**, 845-861.
- [13] Noll, W. (1958) A mathematical theory of the mechanical behavior of continuous media. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, **1**, 197-226.
- [14] Gubbels, F., Jerome, R., Teyssie, P., et al. (1994) Selective localization of carbon black in immiscible polymer blends: A useful tool to design electrical conductive composites. *Macromolecules*, **27**, 1972-1974.
- [15] Lux, F. (1993) Models proposed to explain the electrical conductivity of mixtures made of conductive and insulating materials. *Journal of Materials Science*, **28**, 285-301.
- [16] Sumita, M., Kayaki, H. and Miyasaka, K. (1986) Effect of melt viscosity and surface tension of polymers on the percolation threshold of conductive-particle-filled polymeric composites. *Journal of Macromolecular Science: Physics*, **B25**, 171.
- [17] 郭尚平等 (1990) 物理化学渗流微观机理. 科学出版社, 78-122.
- [18] 杨建, 陈家军, 田亮 (2007) 基于孔隙结构的二维微观网络模型. 中国科技论文在线.
- [19] Chakkaravarthy, C., Waheed, A.K. and Udupa, H.V.K. (1981) Zinc—Air alkaline batteries—A review. *Journal of*

*Power Sources*, **6**, 203-228.

- [20] Prabal, S. and Honggon, K. (2009) Zinc-air fuel cell, a potential candidate for alternative energy. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **15**, 445-450.
- [21] 王乾, 李清宇等 (2012) 气体扩散电极的拓扑网络模型数值研究. *应用物理*, **2**, 163-174.
- [22] 安勇 (2007) 油田开采过程中环境影响分析要点. 2007 *中国环境科学学会学术年会优秀论文集(下卷)*.