

碳酸盐岩双重孔隙网络模型 与微观气水流动研究



重庆大学硕士学位论文 (学术学位)

学生姓名：赵星圆

指导教师：李勇 副教授

学科门类：工 学

学科名称：安全科学与工程

研究方向：数字岩心-多尺度渗流力学

答辩委员会主席：司鹄 教授

授位时间：2025 年 06 月

Study on dual-pore-network model and microscopic gas-water flow in carbonate rocks



A Thesis Submitted to Chongqing University
In Partial Fulfillment of the Requirement for the
Master's Degree of Safety science and engineering

By

Xingyuan Zhao

Supervised by Assoc. Prof. Yong Li

June, 2025

学位论文独创性声明

本人声明所呈交的硕士学位论文《碳酸盐岩双重孔隙网络模型与微观气水流动研究》是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本文所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：赵星圆 签字日期：2025.6.3

导师签名：李勇 签字日期：2025.6.3

学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解重庆大学有关保留、使用学位论文的规定。学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编学位论文，可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版。

作者签名：赵星圆 导师签名：李勇
2025年6月3日

研究生学号：202220021038

所属学院：资源与安全学院

毕业院校：重庆大学 毕业年月：2025 年 6 月

*作者联系电话：15290225862

*作者 E_mail：2226770337@qq.com

说明：本授权书用于学位论文电子版时“*”部分内容可不填写。

摘 要

二氧化碳地质封存是实现我国“碳达峰、碳中和”双碳战略的重要途径之一，准确预测二氧化碳在储层介质，如枯竭油气藏和深部咸水层中的流动与传输行为对封存的安全性和有效性至关重要。然而，储层介质普遍存在的多尺度孔隙结构给微观渗流机理研究带来了巨大挑战。因此，本研究旨在发展多尺度数字岩心渗流模拟技术，选取具有代表性多尺度孔隙结构的碳酸盐岩为研究对象，建立了高效的双重孔隙网络数学模型及求解器。研究了双重孔隙网络模型对单相、两相渗流参数，如绝对渗透率、毛管力和相对渗透率曲线的预测能力，并提出了优化方案。开展了全岩心二氧化碳和盐水的两相渗流模拟研究，预测了微孔区非均质和不同接触角对毛管力圈闭和相渗曲线的影响，揭示了多尺度孔隙结构对二氧化碳毛管力圈闭的影响机制。主要研究结论如下：

(1) 当假设微孔区均质（统一的平均孔径）时，双重孔隙网络模型可以较好的预测绝对渗透率和地层因子。然而，对于真实的碳酸盐岩，即微孔区非均质的孔径分布，双重孔隙网络模型低估绝对渗透率超过一个数量级。为了提高模型的预测精度，我们测试了两种方法，包括基于微孔单元内体素个数的算术平均求解单元平均孔径以及基于侵入压力对微孔区的分类。这两种方法都能显著提高双重孔隙网络模型对绝对渗透率（提升了 60%）的预测性能。

(2) 基于侵入压力对微孔区进行分类的双重孔隙网络模型优化方法，显著提升了模型对两相渗流参数，即毛细管力和相对渗透率曲线的预测能力。优化后模型计算所得曲线与实验数据吻合良好，证明该优化方法的可靠性与适用性。

(3) 二氧化碳和盐水两相驱替、渗吸数值模拟结果表明，在水湿条件下，二氧化碳残余饱和度随着初始二氧化碳饱和度的增加而增加。此外，基于真实微孔区非均质的碳酸盐岩建立的双重孔隙网络模型，计算得到的 Land 模型圈闭系数与经验公式计算数值较为吻合。

本研究建立的高效定量的双重孔隙网络模型，可以协助实验室或现场实验开展研究，预测多尺度孔隙结构储层中的单相、两相渗流参数，为二氧化碳地质封存研究提供一种数值工具。

关键词：双重孔隙网络模型；孔隙网络-连续介质模型；多尺度数字岩心；多孔介质；二氧化碳封存

Abstract

Carbon dioxide geological storage is one of the important ways to realize China's dual-carbon strategy of "carbon peak and carbon neutral", and accurate prediction of CO₂ flow and transport behavior in reservoir media, such as depleted oil and gas reservoirs and deep saline aquifers, is crucial to the safety and effectiveness of storage. However, the prevalence of multiscale pore structures in reservoir media poses a great challenge to the study of microscopic seepage mechanisms. Therefore, this study aims to develop a multiscale digital core seepage simulation technique. Carbonate rocks with representative multiscale pore structures are selected as the research object, and an efficient dual-pore-network mathematical model and solver are established. The prediction ability of the dual-pore-network model for single-phase and two-phase seepage parameters, such as absolute permeability, capillary pressure and relative permeability curves, was investigated, and an optimization scheme was proposed. A simulation study of two-phase seepage of CO₂ and brine in the full core was carried out, and the effects of heterogeneity in microporous regions and different contact angles on the capillary pressure traps and relative permeability curves were predicted, and the mechanism of the influence of the multiscale pore structure on the CO₂ capillary pressure traps was revealed. The main research conclusions are as follows:

(1) When a homogeneous microporous region (uniform average pore size) is assumed, the dual-pore-network model predicts absolute permeability and formation factors better. However, for real carbonates, i.e., microporous regions with heterogeneous pore size distributions, the dual-pore-network model underestimates absolute permeability by more than an order of magnitude. To improve the prediction accuracy of the model, we tested two methods, including solving for unit-averaged pore size based on arithmetic averaging of the number of voxels within a microporous unit and classifying microporous regions based on entry capillary pressure. Both methods significantly improved the predictive performance of the dual-pore-network model for absolute permeability.

(2) The dual-pore-network model optimization method, which classifies microporous regions based on entry capillary pressure, significantly improves the model's ability to predict two-phase seepage parameters, i.e., capillary pressure and relative permeability curves. The curves calculated by the optimized model are in good agreement

with the experimental data, which proves the reliability and applicability of the optimization method.

(3) The results of numerical simulations of two-phase drainage, imbibition of carbon dioxide and brine show that the residual carbon dioxide saturation increases with the increase of initial carbon dioxide saturation under water-wet conditions. In addition, the calculated Land model trap coefficients based on the dual-pore-network model established based on the heterogeneous carbonate rocks in the real microporous region are in better agreement with the values calculated by empirical formulas.

The efficient and quantitative dual-pore-network model developed in this study can assist laboratory or field experiments to carry out studies to predict single-phase and two-phase seepage parameters in multiscale pore structured reservoirs, and provide a numerical tool for carbon dioxide geologic sequestration studies.

Keywords: Dual-pore-network model; Pore-network-continuum model; Multiscale digital core; Porous media; Carbon dioxide sequestration

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
1 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 岩心成像技术研究现状.....	3
1.2.2 双重孔隙网络模型研究现状.....	6
1.2.3 CO ₂ -水两相渗流参数研究现状.....	10
1.3 存在的主要问题.....	12
1.4 研究内容和技术路线.....	13
1.4.1 主要研究内容.....	13
1.4.2 技术路线.....	13
2 碳酸盐岩多尺度数字岩心精细表征与双重孔隙网络提取.....	15
2.1 微米 CT 图像与微孔区孔渗参数计算.....	15
2.1.1 微米 CT 图像.....	15
2.1.2 微孔区孔隙率计算.....	16
2.1.3 微孔区渗透率计算.....	17
2.2 基于图像的双重孔隙网络提取.....	19
2.3 基于图像的孔隙网络-连续介质计算网格提取.....	24
2.4 本章小结.....	25
3 双重孔隙网络模型对绝对渗透率与地层因子的预测能力研究.....	27
3.1 双重孔隙网络模型.....	27
3.2 模型对比设置.....	30
3.2.1 模型尺寸与网格参数设置.....	30
3.2.2 参考模型数值验证.....	32
3.3 对比结果与分析.....	34
3.3.1 绝对渗透率对比结果与分析.....	34
3.3.2 地层因子对比结果与分析.....	37
3.4 图像分辨率对渗透率预测的影响.....	37
3.5 双重孔隙网络模型优化研究.....	40

3.6 本章小结	43
4 碳酸盐岩毛管力与相渗曲线数值研究	44
4.1 准静态两相渗流模型介绍	44
4.1.1 初次驱替过程中的模型设置	45
4.1.2 主渗吸过程中的模型设置	50
4.1.3 模型设置总结	54
4.2 模型验证	55
4.2.1 模型相关参数设置	55
4.2.2 模型对比验证	56
4.3 CO ₂ 毛细管力圈闭与相渗曲线	62
4.4 本章小结	68
5 结论与展望	69
5.1 主要结论	69
5.2 论文创新点	69
5.3 工作展望	70
参考文献	72
附 录	80
A. 作者在攻读学位期间发表的论文目录	80
B. 作者在攻读学位期间取得的科研成果目录	80
C. 学位论文数据集	81
D. 补充信息	82
致 谢	87

1 绪论

1.1 研究背景及意义

目前，全球面临的气候变暖问题日益加剧，二氧化碳被认为是造成温室效应的最大元凶而备受关注。面对全球日益增长的能源需求，并且世界上 90% 的主要能源仍然来自化石燃料^[1]，二氧化碳排放量的增长以及造成的相关危害急需解决。因此，我国提出了“碳达峰、碳中和”的应对战略，而二氧化碳地质封存^[2,3]是实施这一战略的关键过程之一。二氧化碳在储层介质中封存机制大体分为^[2,4]：构造和地层封存、毛细管力圈闭封存、溶解封存以及矿化封存，各种封存机制随着时间的变化如图 1.1 所示。

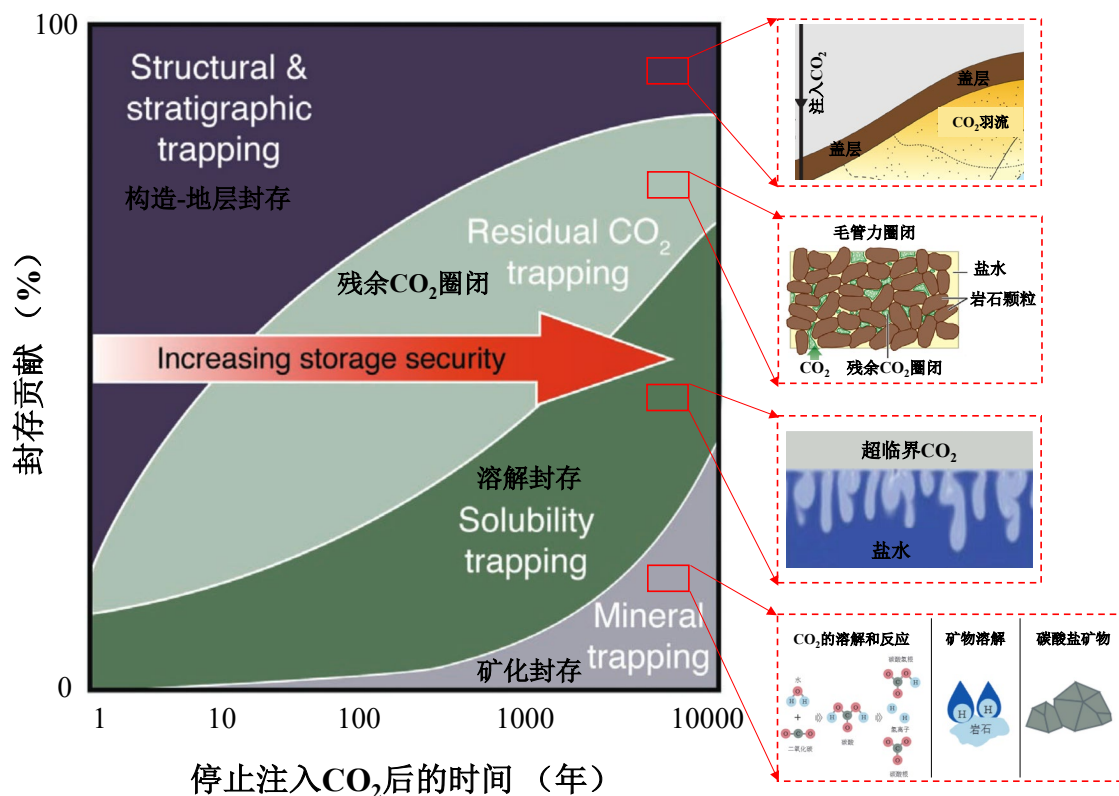


图 1.1 封存机制随时间演化的一般表征^[4-8]

Fig.1.1 A general characterization of the evolution of trapping mechanisms over time

探究二氧化碳在深部咸水层、煤层以及枯竭油气藏等不同地质储层中的流动机制，包括其运移、分布、残余饱和度及流动能力，对于确保封存的安全性、效率和长期稳定性至关重要^[9-11]。通常探究储层介质中二氧化碳和水的两相流动^[12]机制分为实验研究和数值模拟。然而，用于二氧化碳地质封存的多孔介质，例如碳酸盐

岩、页岩等，通常呈现复杂的孔隙结构，具有从纳米到米级别的多尺度孔隙^[13]，不同孔隙之间的连通通道复杂，同时还有裂缝的影响以及岩心图像表征中的图像分辨率和视域之间的矛盾^[14,15]等一系列复杂的因素，使得用于封存的多孔介质孔隙结构难以表征。相较于数值模拟研究，针对实验开展二氧化碳地质封存研究具有很大的挑战，例如实验研究中的时间尺度不好把控，封存过程可能持续数百年，但实验需在几天到几个月内完成，可能引入非真实动力学效应；并且，实验过程中可能会破坏岩石真实的孔隙结构。因此，本研究基于数值模拟建模开展，建立精细表征碳酸盐岩多尺度孔隙结构的数值模型，并结合相关实验数据为参考，减弱模型简化的不确定性。

针对碳酸盐岩这种具有多尺度孔隙结构的多孔介质，如图 1.2 所示 (<https://www.digitalrockportal.org/projects/58>)，传统的孔隙尺度数值建模分为直接数值模拟^[16-19] (DNS) 和孔隙网络模型^[20,21] (PNM)，然而，直接数值模拟计算量大，在实现具有代表性的岩样尺寸 (REV) 方面面临着挑战，特别是对于复杂多相流动。并且传统的孔隙网络模型难以表征多尺度孔隙结构，因此本文建立包含碳酸盐岩可分辨 (大孔) 和亚分辨孔隙 (微孔) 的双重孔隙网络模型，探究二氧化碳和水两相流动中的渗流参数，例如毛细管力和饱和度曲线、相对渗透率曲线、不同束缚和残余饱和度以及接触角的影响等。通过上述关键渗流参数的研究，进一步明确二氧化碳在复杂地质储层中的流动分布特征，探究二氧化碳在地层中的运移路径，揭示影响二氧化碳圈闭量、封存效率以及安全性和长期性的关键参数，对解决多尺度孔隙结构中二氧化碳地质封存的关键科学问题有重要的指导意义和实际意义。

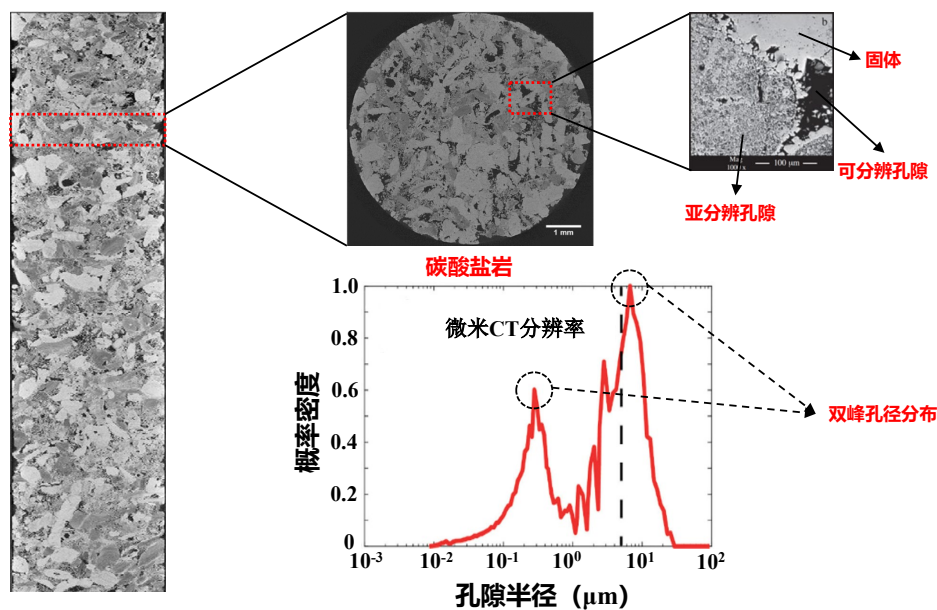


图 1.2 碳酸盐岩多尺度孔隙结构示意图

Fig.1.2 Multiscale pore structure diagram of carbonate rock

1.2 国内外研究现状

1.2.1 岩心成像技术研究现状

复杂多孔介质内部孔隙结构的精细表征是进行二氧化碳地质封存的重要物理过程之一^[22]。近年来,随着计算机成像技术的发展,数字岩心技术被广泛应用于岩心内部结构分析,基本原理是基于三维 CT 扫描图像或二维扫描电镜(SEM)图像,运用计算机图像处理技术,通过一定的算法完成数字岩心重构^[23-28]。因此,岩心成像技术的好坏对于岩石内部结构的表征起决定性作用,建立表征碳酸盐岩多尺度孔隙结构的双重孔隙网络模型同样是基于岩心图像提取真实孔隙空间结构,所以,岩心图像能否精细准确表征岩石内部孔隙空间,对于模型提取的准确与否起决定性作用。

目前常用的岩心成像技术^[29]主要有,X 射线计算机断层扫描^[28](X-ray)、核磁共振成像^[30](NMR)、扫描电子显微镜^[23](SEM)、聚焦离子束-扫描电子显微镜^[23](FIB-SEM)、光学显微镜以及超声波成像等。不同的成像技术适用于不同的地质场景,各自的优劣势如表 1.1 所示。

X 射线计算机断层扫描工作原理为当 X 射线穿过岩心样品时,不同组分(固体、孔隙、流体)因密度和原子序数差异对 X 射线的吸收(衰减)程度不同,从而展示出来的图像灰度值不同。例如,固体的密度大于孔隙,所以在 CT 图像中固体比孔隙区域看起来更亮。

核磁共振成像工作原理为基于原子核在外加磁场中的磁化与弛豫行为,通过检测流体在孔隙中的信号响应,定量分析孔隙结构、流体分布及动态输运特性。

扫描电子显微镜工作原理为使用发射器向样品观测面发射高能电子(如二次电子、背散射电子),通过接收器接收高能电子激发的多种信号,进而实现纳米级孔隙结构的成像。

聚焦离子束-扫描电子显微镜工作原理为将聚焦离子束与场发射扫描电子显微镜耦合,既可用于二维成像,也可用于三维成像。结合了离子束的纳米级加工能力和电子束的高分辨率成像能力,其单次离子束切割的厚度最低可为 3 nm,扫描生成的二维图像的分辨率可达 0.9 nm。

光学显微镜工作原理为基于可见光与岩心样品的相互作用,通过光学放大系统观测孔隙的结构与分布,其中根据不同的岩石样品选择不同的成像模式。例如,岩石具有较强的非均质性可以选择偏光(PL)成像模式。

超声波成像工作原理为基于高频声波在多孔介质中的传播特性差异,通过分析声波速度、衰减及反射信号来区分不同的孔隙区域,流体分布等,通常与孔隙率结合分析。

表 1.1 不同岩心成像技术的优劣势

Table 1.1 Advantages and disadvantages of different core imaging techniques

岩心成像技术	优势	劣势
X 射线计算机断层扫描	1.非破坏性，保持岩心完整 2.提供较高分辨率图像 3.适用于多种岩心类型	1.设备昂贵，操作复杂 2.分辨率和视域矛盾 3.数据处理和重建耗时
核磁共振成像	1.非破坏性，保持岩心完整 2.提供孔隙流体信息 3.对含水岩心效果显著	1.分辨率较低，难以精细表征 2.对低含水岩心效果差 3.设备昂贵，操作复杂
扫描电子显微镜	1.提供高分辨率二维图像，适合分析微观结构 2.结合能谱分析，获取化学成分信息	1.破坏性，需对岩心进行切割和抛光 2.仅提供表面信息，无法获取三维结构 3.样品制备复杂，耗时长
聚焦离子束-扫描电子显微镜	1.提供高分辨率三维图像，适合分析微观孔隙结构 2.能逐层切割和成像，重建三维结构	1.破坏性，需对岩心进行切割 2.数据处理和重建耗时 3.设备昂贵，操作复杂
光学显微镜	1.设备成本低，操作简单 2.提供直观的二维图像，适合初步分析	1.分辨率有限，难以分析微观结构 2.仅提供表面信息，无法获取三维结构 3.对不透明岩心效果差
超声波成像	1.非破坏性，能保持岩心完整 2.提供内部结构信息，适合检测裂缝和孔隙	1.分辨率较低，难以获取精细结构 2.复杂结构成像效果有限 3.数据处理和解释复杂

基于上述表格中不同岩心成像技术的优劣势，在进行复杂多孔介质成像时，应结合具体岩石内部孔隙结构、实验或模拟重点关注的对象以及实验或模拟适用的场景等多种因素分析，从而选择最精确的岩心成像技术进行研究。不同岩心成像技术设备以及岩心图像示意图如图 1.3 所示。

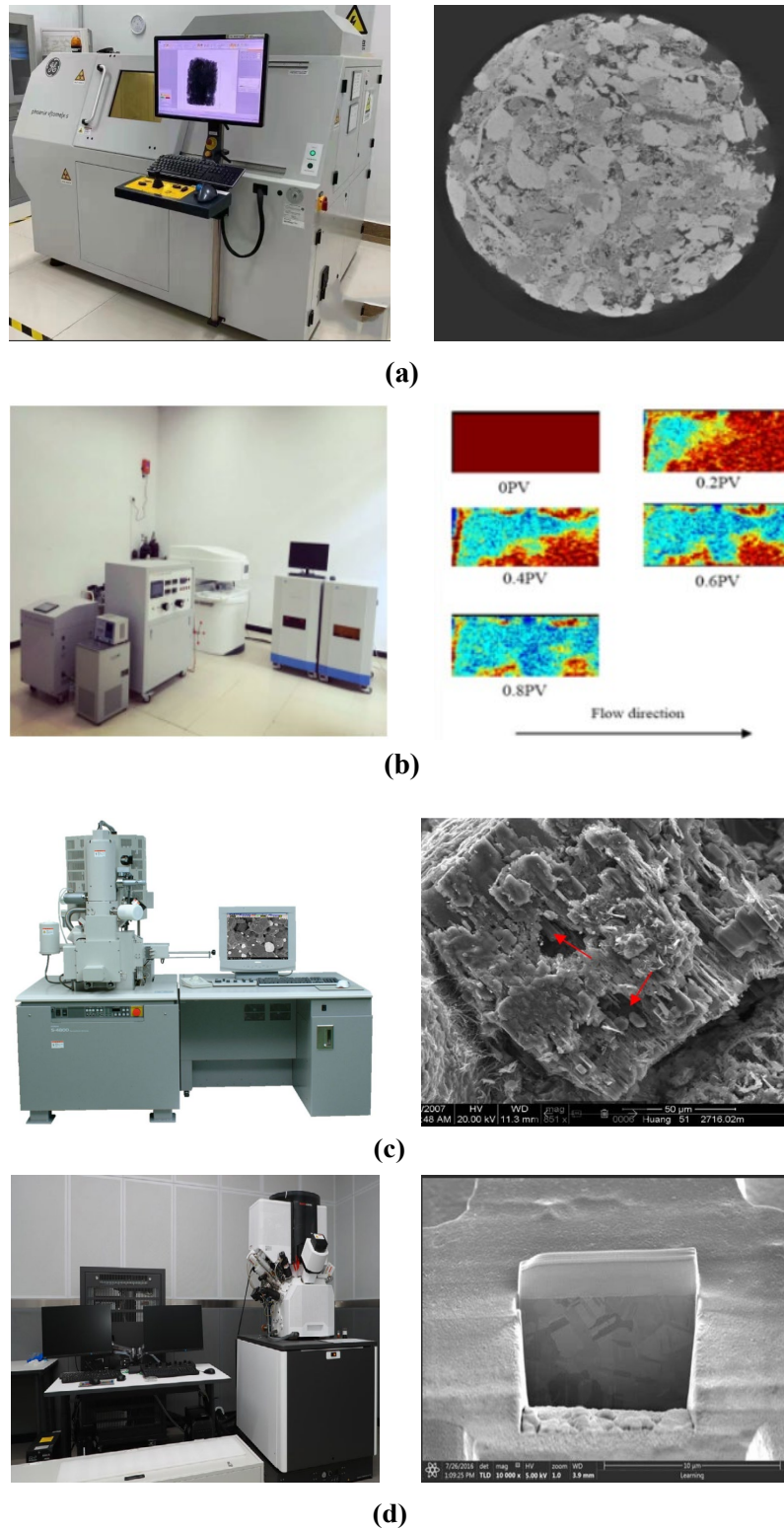


图 1.3 (a) CT 扫描系统以及岩心 CT 图像^[31]; (b) 核磁共振系统及其岩心扫描图像^[30]; (c) 扫描电子显微镜及其岩心扫描图像^[23]; (d) 聚焦离子束-扫描电子显微镜及其岩心扫描图像^[29]

Fig.1.3 (a) CT scanning system and core CT images; (b) NMR system and core scanning images; (c) SEM system and core scanning images; (d) FIB-SEM system and core scanning images

1.2.2 双重孔隙网络模型研究现状

三维孔隙网络模型是进行多孔介质微观多相流研究的基础，孔隙网络模型能够基于真实的岩心扫描图像再现复杂的孔隙空间，在提取的孔隙网络模型中模拟微观流动，不仅可以降低实验成本，缩短实验数据获取周期，还可以得到实验室内难以测量的实验数据^[32-36]，对 CO₂-水两相渗流参数的研究具有重要的意义。在 1956 年，Fatt^[20]首次提出了如何利用孔隙网络模型来模拟和描述多孔介质中的复杂孔隙结构，以及这些模型在研究和预测多孔介质中流体流动、传质和其他传输现象中的应用，但是最初提出的孔隙网络模型是较为规则拓扑结构的网络模型。本文中是基于真实岩心孔隙结构扫描图提取的双重孔隙网络模型，即具有真实孔隙拓扑空间结构的网络模型，目前建立这种孔隙网络模型的方法有：Voronoi 多面体法^[20]、孔隙空间居中轴线法^[36]、最大球法^[34]、孔喉形态学算法（PTM）^[37]以及基于标记的分水岭分割法（SNOW）^[33,38]。

由于真实的多孔介质中通常具有复杂多尺度的孔隙结构，传统的孔隙网络模型已经无法满足要求，因此有大量的学者围绕双重孔隙网络模型展开了许多研究与讨论。

（1）双重孔隙网络模型概念的提出

2000 年，Ioannidis^[39]等人提出了一种用于描述孔洞性碳酸盐岩孔隙结构的双重孔隙网络模型，分别模拟基质孔隙（较小的孔隙）和孔洞（较大的溶蚀孔隙），基质孔隙网络用于描述较小的孔隙空间，而孔洞网络则用于描述较大的溶蚀孔隙，两个网络通过连接点（节点）相互关联，以反映实际岩石中基质孔隙与孔洞之间的连通性。基质孔隙与孔洞系统有着不同的渗透率和孔隙度，该模型能够对溶洞型油藏中多尺度孔隙的传输性质和毛管现象进行简单的分析，为孔洞性碳酸盐岩的孔隙结构表征提供了新的方法，但是模型有些过于简化。

2005 年，Békri^[40]等人首次较为具体的提出了双重孔隙网络模型进行多孔介质的传输特性（如渗透率）和电学特性（如电导率）的模拟。详细介绍了不同孔隙区域内的网络模型各种参数的计算，例如孔隙率、水力传导系数、电导率，以及两相流动中毛细管力和相对渗透率的计算。该方法提供了一种基于微观孔隙结构的数值模拟方法，能够有效预测岩石的宏观特性，并且能够弥补实验方法的局限性，特别是在复杂孔隙结构的岩石中，但是该方法并未进行动态的多相流模拟。

（2）双重孔隙网络模型的构建方法

Z. Jiang(2013)^[41]等人通过多重成像技术，基于不同分辨率的岩心 CT 扫描图像对可分辨和亚分辨孔隙区域分别提取孔隙网络，采用低分辨率扫描仪器对大孔区域进行成像，高分辨率扫描仪器对微孔区域成像，对微孔区域提取孔隙网络模型之后，通过数值方法生成与大孔区域同等尺寸的微孔网络，最终将微孔孔隙网络耦合

到大孔孔隙网络中形成双重孔隙网络模型。该方法微孔区域孔隙网络的数值生成方法需要可靠,并且该模型的微孔网络数量太多,计算成本过大。该方法的流程图如图 1.4 所示。

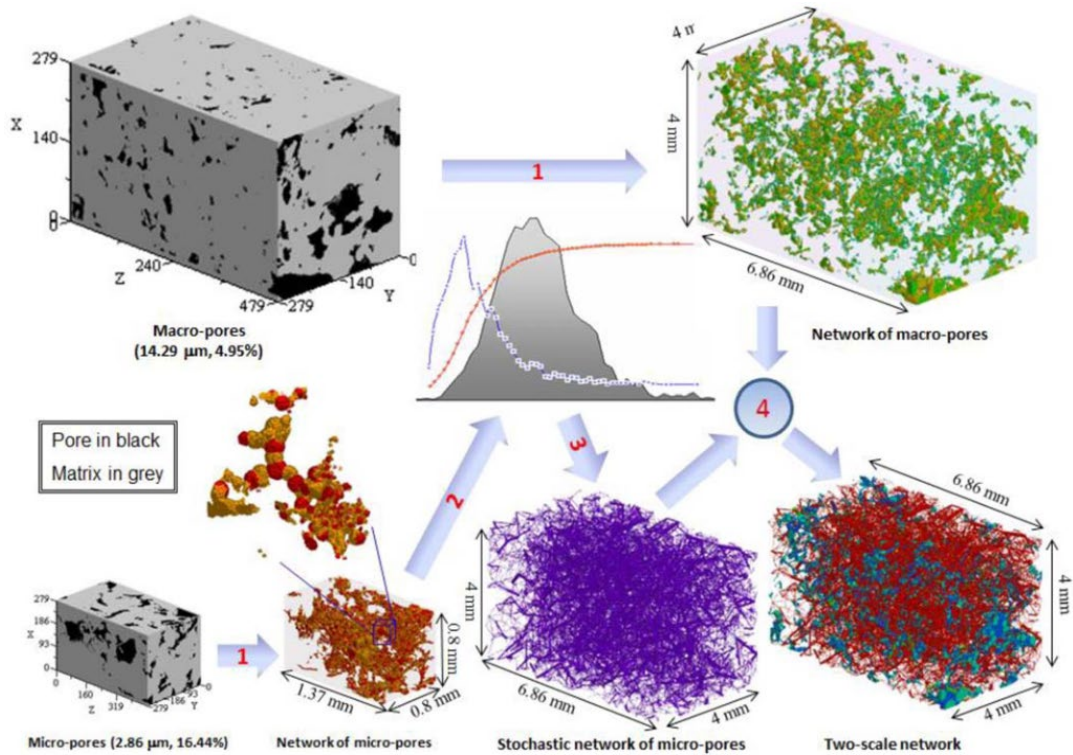


图 1.4 构建双重孔隙网络模型的流程图^[41]

Fig.1.4 Flow chart of constructing dual pore network model

Ayaz Mehmani, Maša Prodanović (2014)^[42]采用将大孔网络缩小一定的数量级,例如本文采取的是 5 个数量级,然后将生成的微孔网络放在指定的微孔区域,最后将微孔与大孔网络连接,生成新的双重孔隙网络模型。微孔填充的双重孔隙网络构建示意图如图 1.5 所示。图中粒间孔隙网络表现为较大的蓝色圆圈。对于指定的微孔区域,以适当的长度比重新缩放一个与可用图像/数据中观察到的类似的网络,并映射到微孔区域,左图中晶粒为微孔,右图中小孔隙为微孔。识别跨越两个网络已知边界来生成连接两个网络的喉道,并以红色显示,最终得到包含两个长度尺度的单个孔隙网络,即双重孔隙网络模型。其关键特征是两个长度尺度之间的连接可以是非平面的(和任意复杂的)。

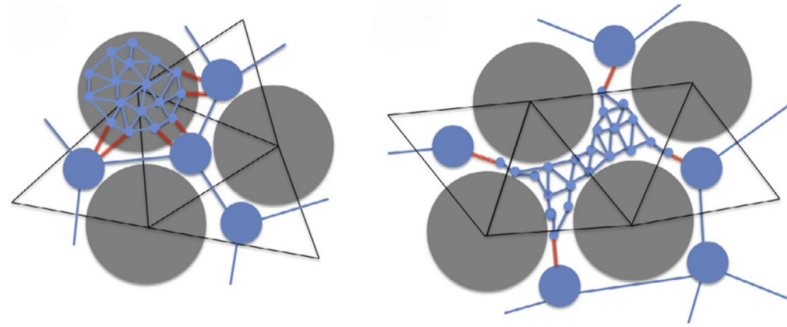
图 1.5 微孔填充的双重孔隙网络构建示意图^[42]

Fig.1.5 Schematic of dual pore network construction with micropore filling

Bultreys(2015)^[31]等人提出了一种微链接(Micro-link)形式的双重孔隙网络，用微孔填充大孔，然后把与同一个微孔区域相连的两个大孔用新的连接方式连通起来，即微链接^[43]，要重点关注其截止长度。该方法提出了一种基于多尺度 micro-CT 成像建立双重孔隙网络模型，通过将微孔区域相连的大孔区域之间添加新的流动通道，从而能够更准确的模拟非均质岩石中的排水过程。微链接的示意图如图 1.6 所示。

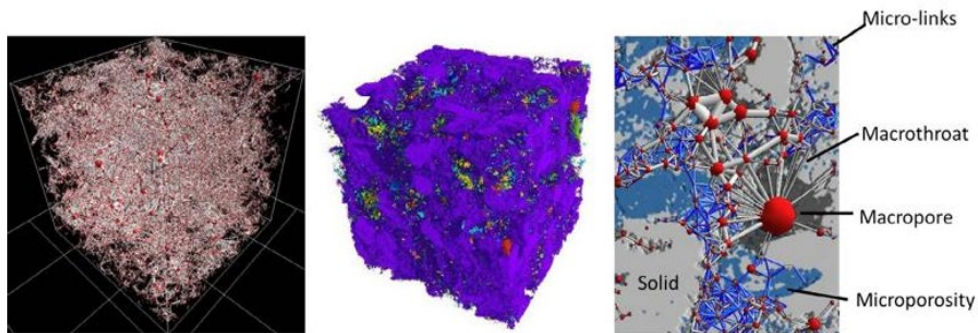
图 1.6 微链接的示意图^[31]

Fig.1.6 Schematic of the micro-link

Moslemipour(2021)^[44]等人主要基于 Micro-CT 与 Medical-CT 对碳酸盐岩的微孔以及大孔属性参数的提取，例如，孔隙直径、喉道直径、配位数等参数，然后通过数值生成的方法重新生成新的随机孔隙网络，将大孔与微孔的属性参数导入孔隙网络，生成新的双重孔隙网络。在生成双重孔隙网络时，数值生成算法还通过实验数据来判别生成的网络是否正确，例如通过岩石孔隙率以及渗透率来控制生成的双重孔隙网络的准确性。

Khan(2024)^[38,45]等人基于获取的岩心 CT 扫描图像，分别对大孔和微孔区域运用基于标记的分水岭分割算法，通过图像中提取的孔隙连接拓扑关系合并两个分

割后的孔隙图像，定义两个孔隙区域连接处的标签，分别提取两个孔隙区域的孔隙网络，依据孔隙之间的连接关系来合并网络，最终生成双重孔隙网络模型。不同孔隙区域之间的分割以及合并图如图 1.7 所示，左图表示大孔区域分割图，中间表示微孔区域分割图，右图为合并后的孔隙分割图。

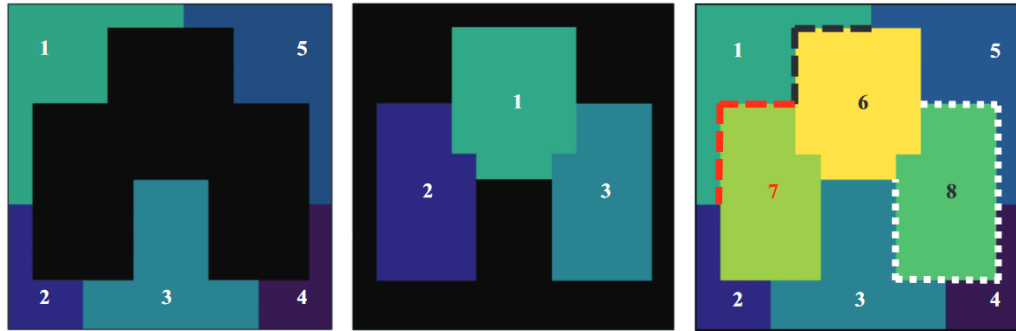


图 1.7 不同孔隙区域的分割以及合并图^[45]

Fig.1.7 Segmentation and merging of different pore regions

此外，还有学者尝试将双重孔隙网络模型扩展到多重孔隙网络模型，进而可以表征具有更加复杂孔隙结构的多孔介质。Rabbani(2020)^[46]等人构建了表征裂缝、微孔和中孔三种不同尺度的三重孔隙网络模型(T-PNM)，使用分水岭分割算法的两个阶段从多孔材料的半真实微观断层图像中提取所需的数据，进而在提取的三重孔隙网络上模拟气体和液体流动，并将计算的渗透率与双重孔隙网络模型(D-PNM)和解析解进行比较。计算结果显示，三重孔隙网络在更致密孔隙的多孔介质中具有更加精确的计算结果，并且该模型还考虑了裂隙对于流体流动的影响，能够综合考虑不同尺度的孔隙结构和流动机制，有望更准确地预测流体在复杂多孔介质中的流动行为。三重孔隙网络模型的示意简图如图 1.8 所示。

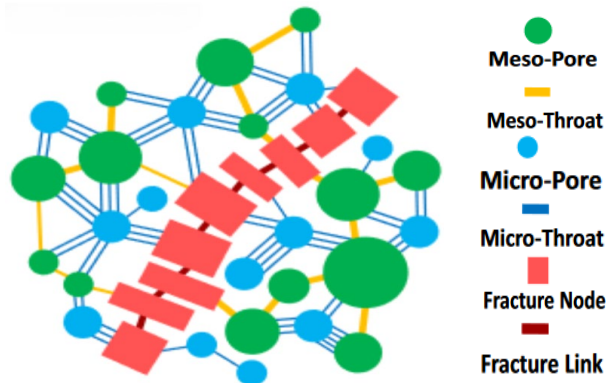


图 1.8 三重孔隙网络模型简图^[46]

Fig.1.8 Schematic diagram of the triple pore network model

1.2.3 CO₂-水两相渗流参数研究现状

二氧化碳地质封存过程中, 对于 CO₂-水两相渗流参数的研究至关重要, 其中毛管力曲线和相对渗透率曲线是描述二氧化碳和水两相渗流行为的核心参数^[47,48], 对封存过程的效率、安全性和长期稳定性具有重要意义。毛管力曲线描述了毛细管力与流体饱和度之间的关系, 反映了多孔介质中两相流体 (CO₂和水) 的分布和流动特性, 具体意义^[1,4]体现在: (1)毛管力决定了 CO₂和水的分布, 尤其是在注入初期和封存后期, 通过毛管力曲线, 可以预测 CO₂在地层中的运移路径和空间分布; (2)毛管力影响 CO₂的捕集机制 (如圈闭捕集和溶解捕集), 进而影响封存效率, 了解毛管力曲线有助于优化注入策略, 提高 CO₂的封存量; (3)毛管力曲线可以帮助确定 CO₂注入时的临界压力, 避免因压力过高导致地层破裂或 CO₂泄漏; (4)毛管力随时间和饱和度的变化会影响 CO₂的长期封存稳定性, 通过毛管力曲线, 可以评估 CO₂是否会从封存层中迁移或泄漏。

综上所述, 毛管力和饱和度曲线是探究 CO₂-水两相渗流的关键参数, 目前关于气-水两相流动中毛管力曲线的两个经典模型分别为 Brooks-Corey^[49]模型和 van Genuchten^[50]模型。两个模型的毛管力曲线如下图所示。

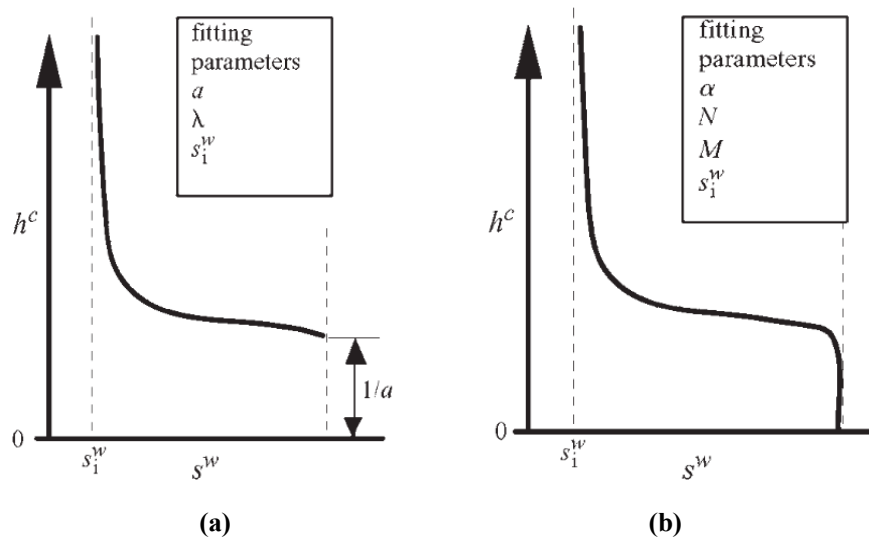


图 1.9 毛细管力和饱和度曲线图^[51]: (a) Brooks-Corey 模型; (b) van Genuchten 模型

Fig.1.9 Capillary pressure and saturation curves: (a) Brooks-Corey model; (b) van Genuchten model

图中纵坐标表示毛管力水头, 横坐标为润湿相饱和度, 可以看出, van Genuchten 模型比 Brooks-Corey 模型多了一个拟合参数, 并且 Brooks-Corey 模型在初次驱替的起始阶段是存在侵入压力的, 而 van Genuchten 模型从图像上看是连续的, 不存在侵入压力, 并且两个模型都考虑了束缚水和残余油饱和度, 下面从两

个模型的具体表达式来分析其中的区别。Brooks-Corey 模型的表达式为：

$$S_e^w = \begin{cases} (ah^c)^{-\lambda} & ah^c > 1 \\ 1 & ah^c \leq 1 \end{cases} \quad (1.1)$$

其中， a [1/L]是侵入压力水头的倒数， λ 为与孔径分布相关的无量纲参数， h^c 是毛管力水头， S_e^w 是润湿相有效饱和度， S_i^w 是束缚水饱和度，即驱替后还残存在多孔介质内部润湿相的饱和度。van Genuchten 模型的表达式为：

$$S_e^w = [1 + (ah^c)^N]^{-M} \quad (1.2)$$

其中， a [1/L]是与侵入压力水头的倒数相关的参数， N 是一个与孔径分布有关的无量纲参数， M 通常用 N 表示，即 $M = 1 - 1/N$ ，其他参数与 Brooks-Corey 模型中参数的含义一样。从上述表达式中可以看出，VG 模型比 BC 模型具有更广泛的适用范围，因为它有一个额外的拟合参数，并且在饱和度范围内连续可微。

二氧化碳地质封存机制中的其中之一就是毛管力圈闭封存，随着注入过程的进行，CO₂ 的饱和度逐渐增加，但当注入停止后，部分 CO₂ 会被捕获并滞留在岩石孔隙中，形成稳定的封存状态。这种机制主要发生在多孔介质的细小孔隙中，CO₂ 被水相包围并固定，无法自由流动。Land^[52]圈闭模型是应用最广泛的圈闭模型，将最大残余饱和度与最大初始饱和度联系起来，后续的许多圈闭模型都是基于 Land 模型开展的。基于已发表的水湿砂岩岩心实验数据，该模型建立了以初始含气饱和度为函数的圈闭含气饱和度预测模型^[53]。在 Land 模型中，被圈闭的非润湿相饱和度表达式为：

$$S_{gr}^* = \frac{S_{gi}^*}{1 + CS_{gi}^*} \quad (1.3)$$

$$C = \frac{1}{(S_{gr}^*)_{\max}} - 1 \quad (1.4)$$

其中， S_{gi}^* ， S_{gr}^* 和 $(S_{gr}^*)_{\max}$ 分别为有效初始含气饱和度、有效残余含气饱和度和最大残余含气饱和度， C 为 Land 模型圈闭系数。

CO₂-水两相渗流研究的另外一个关键参数为相对渗透率曲线，相对渗透率曲线描述了 CO₂ 和水的相对渗透率与饱和度之间的关系，反映了两相流体在多孔介质中的流动能力。相对渗透率曲线直接影响流体的流动速度，通过该曲线，可以评估 CO₂ 注入过程中两相流体的流动特性，优化注入速率和压力^[51]。同时，可以用于预测 CO₂ 的残余饱和度（即 CO₂ 被水相捕集的比例），这是评估封存效率的重要参数^[2]。

多孔介质中油、气、水三相相对渗透率的实验研究起源于上世纪 40 年代。目

前主要采用稳态或非稳态实验方法进行相对渗透率测定研究^[54]。1941年, Leverett 和 Lewis^[55]测量了油、气、水三相相对渗透率, 采用了非稳态法忽略末端效应和滞后现象; 发现了水相和气相的相对渗透率只与本相饱和度有关, 与其它相无关; 但是油相相对渗透率与油、气、水三相饱和度都有关系。随后又采用同样的办法, 考虑了初次驱替和二次渗吸的滞后现象, 测得了三相相对渗透率。测量结果发现水、油和气三相相对渗透率与其它相的饱和度存在耦合关系^[56]。随着计算机成像技术的发展, Perrin 和 Benson^[57,58]利用 X 射线计算机断层扫描获得了两相流动中流体在孔隙中的分布图像, 并且通过毛管力曲线和经验公式计算得到相渗曲线。Di He^[59]等人通过孔隙尺度的计算流体动力学(CFD)模拟, 研究超临界二氧化碳(scCO₂)在水饱和多孔介质中的驱替过程, 探究在不同的接触角、表面张力、粘度比下 CO₂-水相对渗透率曲线的分布。研究表明, scCO₂ 驱替水的过程表现出明显的非均匀性, scCO₂ 优先通过大孔隙和高渗透率通道流动。在小孔隙中, 毛管力占主导地位, 导致水相滞留, 形成残余水饱和度, 并且在高注入速率下, 粘性力占主导, scCO₂ 形成指进现象; 在低注入速率下, 毛管力占主导, scCO₂ 分布更加均匀。

影响相对渗透率的因素有很多^[51], 其中主要有粘度比(毛管力和粘性力的竞争)、接触角(不同相流体之间的润湿性的改变)、界面张力、孔径分布(影响毛管力曲线的分布)和压力梯度。综上所述, 无论是毛管力曲线还是相渗曲线, 都是 CO₂-水两相渗流研究中的关键参数, 对 CO₂ 地质封存过程的效率、安全性和长期稳定性具有重要意义, 亟需开展研究。

1.3 存在的主要问题

(1) 双重孔隙网络模型本身预测能力的研究比较欠缺

碳酸盐岩具有复杂多尺度的孔隙结构, 孔隙类型丰富多样, 例如原生孔隙、次生孔隙、微纳尺度的微孔隙以及裂缝孔隙等; 同时碳酸盐岩的孔隙结构具有显著的多尺度特征, 从纳米级到厘米级均有分布; 并且岩石内部孔隙连通性复杂, 伴随着非均质孔径分布的影响等等一系列因素导致其孔隙结构难以表征。近年来, 针对这种多尺度孔隙结构开发了三种表征混合模型, 包括微连续介质模型、双重孔隙网络模型以及孔隙网络-连续介质模型, 本文主要探究双重孔隙网络模型。

当前研究主要聚焦建立双重孔隙网络模型的方法, 并未针对模型本身的预测能力进行进一步的研究。本研究中, 以微孔区未粗化的孔隙网络-连续介质模型为参考模型, 参考模型已经通过直接数值模拟和实验数据对比验证可靠, 探究双重孔隙网络模型微孔区在均质和非均质孔径分布下, 网格平均化对单相及两相流动计算结果的影响有多大, 进一步提出了微孔区非均质性较强时, 提高双重孔隙网络模型预测能力的方法。

(2) 多尺度孔隙结构中的微观流动机理研究比较欠缺

基于多尺度碳酸盐岩储层进行二氧化碳地质封存, 探究这种多尺度孔隙结构中的微观流动机理至关重要。然而, 多尺度孔隙结构中的微观流动机理是一个涉及毛细力、表面张力、润湿性、多相流体相互作用以及孔隙网络连通性等的复杂问题。本文主要探究其中核心的两相渗流参数, 即毛细管力和饱和度以及相对渗透率曲线。它们反映了 CO_2 在多孔介质中的运移路径和空间分布, 揭示毛细力对 CO_2 圈闭封存机制, 以及探究影响气水两相流动的参数等。本研究中, 基于建立的双重孔隙网络准静态两相渗流模型, 进行 CO_2 毛细力圈闭封存研究, 为二氧化碳地质封存提供理论指导。

1.4 研究内容和技术路线

1.4.1 主要研究内容

本文针对多尺度孔隙结构中的微观气水流动问题, 以多尺度 Estailades 石灰岩为研究对象, 建立了基于图像的双重孔隙网络数学模型及求解器, 研究了该模型对单相以及两相渗流参数的预测能力, 并最终应用于二氧化碳封存中两相渗流参数的研究。具体研究内容如下:

(1) 碳酸盐岩多尺度孔隙结构的精细表征

基于岩心 CT 图像, 研究可分辨孔隙与亚分辨孔隙的空间分布特征, 考虑孔隙非均质孔径分布的影响, 探究亚分辨孔隙区域的渗流参数包括渗透率、电导率等, 建立融合亚分辨孔隙区域渗流参数的碳酸盐岩双重孔隙网络数学模型。

(2) 双重孔隙网络模型及渗流参数的预测能力研究

基于双重孔隙网络模型开展单相及两相流动研究, 计算得到的单相渗流参数如绝对渗透率和地层因子, 与参考模型和实验数据对比验证, 提出了微孔区非均质性较强时模型的优化方法。同时, 基于该模型进行了两相准静态驱替和渗吸流动研究, 与参考模型和实验数据对比验证计算得到的毛细力曲线和相对渗透率曲线, 进一步探究单相流动时模型的优化方法是否适用于两相流动。岩心 CT 图像分辨率和视域之间的矛盾基于该模型也进行了研究与讨论。

(3) 二氧化碳地质封存下气水两相流动研究

基于优化后全岩心尺寸的双重孔隙网络模型, 计算 CO_2 -水两相流动的毛细力曲线和相对渗透率曲线, 研究二氧化碳毛细力圈闭机制, 进一步分析影响二氧化碳圈闭量的渗流参数, 如接触角、初始含气饱和度等参数, 并最终为二氧化碳地质封存提供理论指导。

1.4.2 技术路线

本文围绕碳酸盐岩多尺度孔隙结构构建了包含可分辨和亚分辨孔隙的双重孔

隙网络模型及求解器，并以孔隙网络-连续介质模型为参考模型对比验证，验证模型在单相、两相流动研究中的预测能力，提出模型优化方法，并最终用于二氧化碳封存下气水微观流动机理研究，为二氧化碳地质封存提供理论指导。在学位论文研究过程中，开展的主要实物工作量统计见表 1.2，相关的技术路线如图 1.10 所示。

表 1.2 论文研究开展和完成的主要实物工作量

Table 1.2 The main physical workload carried out and completed in the research paper

序号	具体内容	数量
1	围绕多孔介质中流动与传输、多尺度数字岩心等关键词调研学术 (学位) 论文与专著	300 余篇
2	围绕学位论文进行团队开题、中期及进展等相关汇报	10 次
3	国内外学术会议报告及海报展示	3 次
4	参与研究课题相关纵向和横向项目	2 个
5	双重孔隙网络模型以及相关单相、两相流动求解代码	2000 余行
6	双重孔隙网络与混合模型建模岩样	4 个
7	岩心扫描图像数据处理	2 T
8	发表研究课题相关 SCI 论文和专利	2 篇
9	数值模拟基础理论学习、模型调试、模拟开展、数据云图后处理	360 个工作时

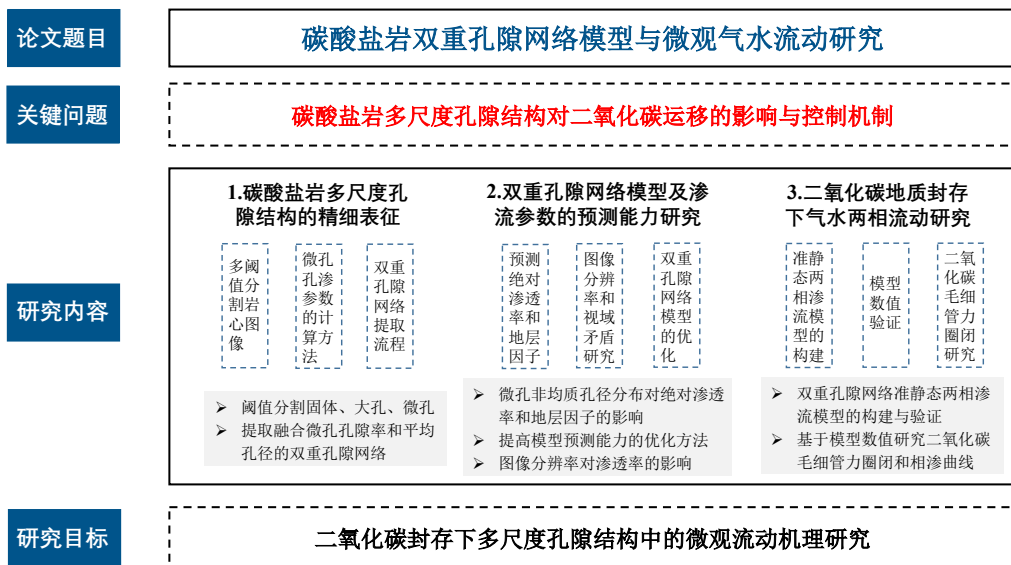


图 1.10 技术路线图

Fig.1.10 Technology roadmap

2 碳酸盐岩多尺度数字岩心精细表征与双重孔隙网络提取

本章详细阐述了针对碳酸盐岩复杂多尺度孔隙结构（包括从微纳米到厘米级的孔缝洞特征）的多尺度渗流模型的数据准备与计算网格生成方法。首先，提供了研究所用岩心 CT 图像的详细基本数据，如孔隙率、图像分辨率以及实验与模拟渗流参数。接着，阐述了微孔区域体素孔隙率和渗透率的计算方法。随后，详细说明了如何通过岩心 CT 图像分割区分可分辨孔隙（大孔）、亚分辨孔隙（微孔）和固体区域。在此基础上，本章重点阐述了如何针对可分辨和亚分辨孔隙区域，结合采用基于标记的分水岭分割算法、多重卷积粗化算法以及 PoreSpy 开源软件，分别提取了本研究采用的两种多尺度渗流模型的计算网格，即双重孔隙网络模型和孔隙网络-连续介质模型。上述计算网格提取的细节将在本章的后续部分进行详细阐述。

2.1 微米 CT 图像与微孔区孔渗参数计算

2.1.1 微米 CT 图像

我们从数字岩心门户网站 (<https://www.digitalrockportal.org/>) 上选择了三个碳酸盐岩样品，它们在空间分辨率和孔隙结构上各有不同。碳酸盐岩主要分为石灰岩和白云岩两大类^[60]，石灰岩主要为碳酸钙矿物组成，如方解石和少量黏土矿物，而白云岩主要为碳酸镁矿物组成，如白云石等。本文中选取的三个碳酸盐岩都是由 99% 的方解石组成^[61-63]，具有多尺度孔隙结构，因此具体划分为 Estailades 石灰岩。它们的岩心三维 CT 图像显示具有孔径双峰分布的可分辨大孔和亚分辨微孔（位于图像分辨率之下的孔隙区域）^[64-67]。岩心图像数据使用根特大学 X 射线断层扫描中心的微米 CT (EMCT) 扫描仪获得^[31,68,69]，该设备是目前世界上比较先进的 CT 扫描设备，得到的扫描图像数据比较精确，基于数字岩心网站获取的三个 Estailades 石灰岩样品原始 CT 扫描图像如图 2.1 所示。

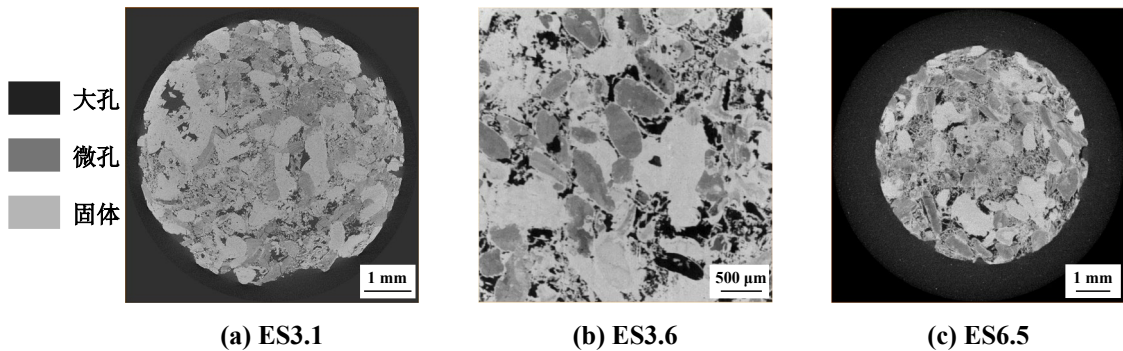


图 2.1 三个 Estailades 石灰岩 CT 图像

Fig.2.1 Three Estailades limestone CT images

从三个岩样 CT 图像可以看出,呈现出多尺度的孔隙结构,孔径大小分布广泛,并且从 CT 成像的原理可得,图像灰度值的大小与物质密度相关,大孔中矿物最少,密度最低,而固体密度最高,因此从大孔到固体区域的灰度值是从暗到亮。

表 2.1 列出了本研究中使用的三种 Estailades 石灰岩的基本参数。并且,它们来自不同的岩心样本,也就是说这是三个石灰岩样品,而且是在不同的分辨率下得到的岩心 CT 扫描图像。样品的选择有利于后续两种多尺度渗流模型的对比,并且选择同一类岩石的三个不同分辨率下的样品,有利于基于双重孔隙网络模型开展图像分辨率和视域矛盾之间的研究。

表 2.1 三个 Estailades 石灰岩的图像和物理参数

Table 2.1 The image and physical parameters of the three Estailades limestone

样品编号	图像分辨率 (μm)	图像尺寸 (voxels)	总孔隙率 (%)	绝对渗透率 (mD)
				实验值
ES3.1 ^[31]	3.1	2000×2000×1725	25	260 ± 60
ES3.6 ^[62]	3.6	1000×1000×1000	29	/
ES6.5 ^[13]	6.5	1316×1316×1087	25	202.4 ± 86.9

采用压汞法(Mercury intrusion porosimetry)测定了 ES3.1 样品(ES 为 Estailades, 空间分辨率为 3.1 μm)的总孔隙度,实验渗透率是通过在 5³ cm³ 测试块上使用 Tiny Perm II 便携式探针渗透率仪对获得 15 个测量值取平均值来确定的^[31]。ES3.6 的总孔隙度由氦气孔隙度计测定,参考文献中未给出渗透率信息^[62,63]。ES3.1 和 ES3.6 样品的微孔隙区域的渗流参数如孔隙率和渗透率等未被表征,而 ES6.5 样品通过饱和盐水图像和干燥图像的差分成像^[13],对微孔隙区域进行了精细表征,并且通过孔隙率分类和侵入压力分类的两种分类方法对微孔隙区域进行区域划分,通过微渗仪测得实验渗透率数值为 (202.4 ± 86.9) mD,正负取值是因为仪器本身存在的固有误差。

基于碳酸盐岩微米 CT 图像,其中在图像中可以清晰分辨的孔隙,即大孔区的流动行为可以用 Navier-Stokes (NS)方程描述,而微孔区常被视作连续介质,采用宏观的连续介质模型(如达西定律)来描述其流动行为,其内部流动行为可以通过统计平均的方法进行描述。因此,需要对微孔区的表征参数如孔隙率、渗透率进行计算。

2.1.2 微孔区孔隙率计算

由于微孔区本质上是多孔介质,内部包含孔隙和其他固体物质,因此每个微孔

体素都具有一定的孔隙率。在本文中，基于 CT 图像的灰度值与孔隙率成正比例的关系来计算微孔体素孔隙率，我们定义大孔区域的孔隙率为 1，固体区域的孔隙率为 0，那么微孔区体素孔隙率则为 0~1^[13,14,70]。微孔区每个体素孔隙率计算公式为：

$$\varepsilon_k = \frac{\bar{I}^S - I_k^{CT}}{\bar{I}^S - \bar{I}^V} \quad (2.1)$$

其中， ε_k 表示微孔体素 k 的孔隙率， I_k^{CT} 为微孔体素 k 的 CT 图像灰度值， $\bar{I}^S$ 为固体区域的平均灰度值， $\bar{I}^V$ 为大孔区域的平均灰度值。注意，在本文中所采用的三个岩样中，ES3.1 和 ES3.6 两个样品参考文献中并未给出微孔区孔隙率的分布，采用上述方法计算的微孔区孔隙，结合图像大孔孔隙率从而得到图像总的孔隙率数值，并且计算的孔隙率数值与表 2.1 中孔隙率实验数值匹配良好。而 ES6.5 样品微孔区体素孔隙率则参考文献^[13]中饱和盐水-干燥图像的差分成像得到。基于上述公式计算得到的岩心孔隙率分布的示意图如图 2.2 所示。图中可以看到，大孔区孔隙率为 1，固体区域孔隙率为 0，微孔区体素孔隙率位于 0~1。

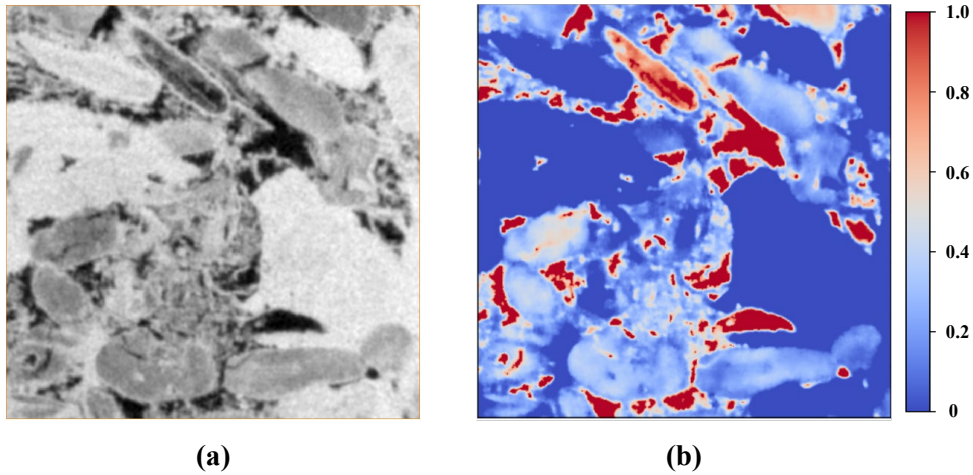


图 2.2 (a) 岩心灰度图像；(b) 微孔区体素孔隙率分布图

Fig.2.2 (a) Grayscale slice of ES6.5; (b) Voxel porosity distribution map in microporous region

2.1.3 微孔区渗透率计算

本文基于 Katz-Thompson^[71]公式计算微孔区渗透率，计算公式如下：

$$K_i = \frac{\varphi_i \bar{r}_i^2}{32\tau^2} \quad (2.2)$$

其中， K_i 表示体素 i 的渗透率， φ_i 表示体素 i 的孔隙率，参考 2.1.2 小节中的计算公式， $\bar{r}_i$ 为体素 i 的平均孔径， τ 为迂曲度，在本文中设置为常数，1.75^[72]。从公式中可以看出，求解渗透率唯一一个未知的参数为平均孔径，而微孔区平均孔径可

可以分为统一的均质的平均孔径和非均质的平均孔径。对于均质的平均孔径，我们可以通过压汞曲线^[31]（Mercury Intrusion Porosimetry）来计算，首先，对于给定的 MIP 曲线，通过 Young-Laplace 方程将毛细管压力转化为孔隙半径，得到汞饱和度与孔隙半径的关系曲线，如图 2.3 所示。然后，我们假设内切半径小于体素尺寸（即图像分辨率）的孔隙属于微孔隙。在本研究中，如图 2.3 所示，3.1 μm 、3.6 μm 和 6.5 μm 分别对应 S_1 、 S_2 和 S_3 的汞饱和度。 S_0 表示上限为 0.98。最后，均匀平均孔径^[73,74] 计算为：

$$r_n = \frac{\int_{S_0}^{S_n} R(s) ds}{S_0 - S_n} \quad n = 1, 2, 3 \quad (2.3)$$

其中， r_n 为微孔体素的平均孔径， $R(s)$ 为汞饱和度和孔隙半径的关系曲线得出。

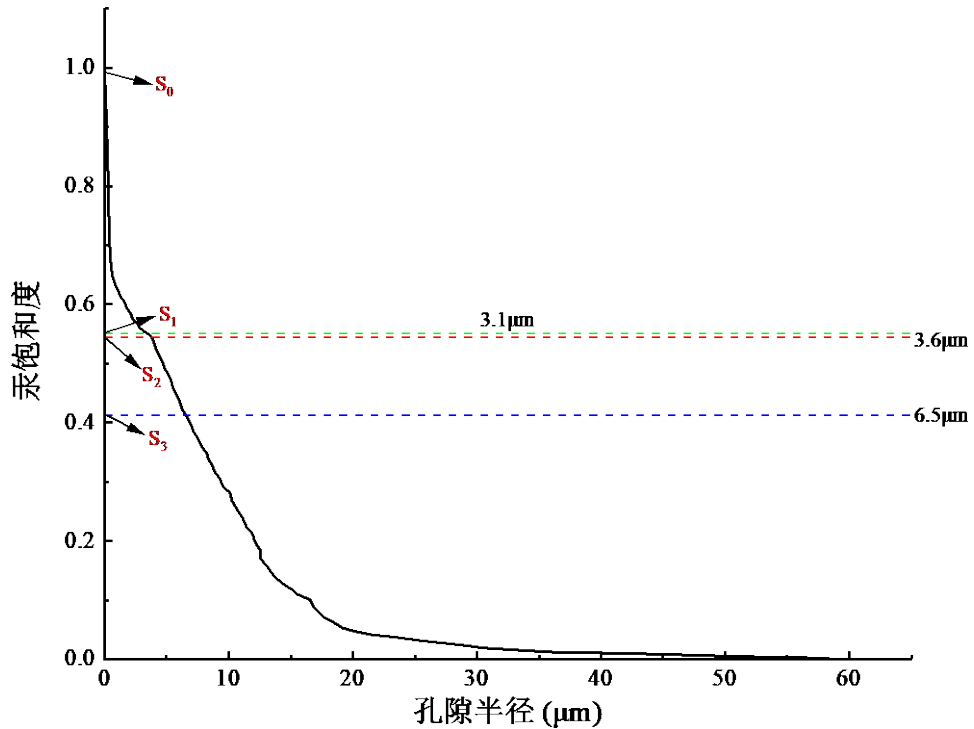


图 2.3 压汞实验中汞饱和度与孔隙半径的关系

Fig.2.3 Relationship between mercury saturation and pore radius from the MIP test

针对微孔区采用非均质的孔径分布，对于 ES6.5 样品，基于文献^[13]中侵入毛细管压力图谱（Entry capillary pressure map），以及实验表面张力和接触角数据，结合 Young-Laplace 方程，计算得到微孔体素的平均孔径。

$$\bar{r}_i = \frac{2\sigma \cos \theta}{P_i^c} \quad (2.4)$$

其中, $\bar{r}_i$ 表示微孔体素 i 的平均孔径, σ 为实验表面张力, 数据大小为 0.0483 N/m , θ 为接触角, 数据大小为 0 度, P_i^c 为微孔体素 i 的非润湿相侵入毛细管压力大小。侵入毛细管压力图谱和对应的微孔区孔径分布示意图如图 2.4 所示。

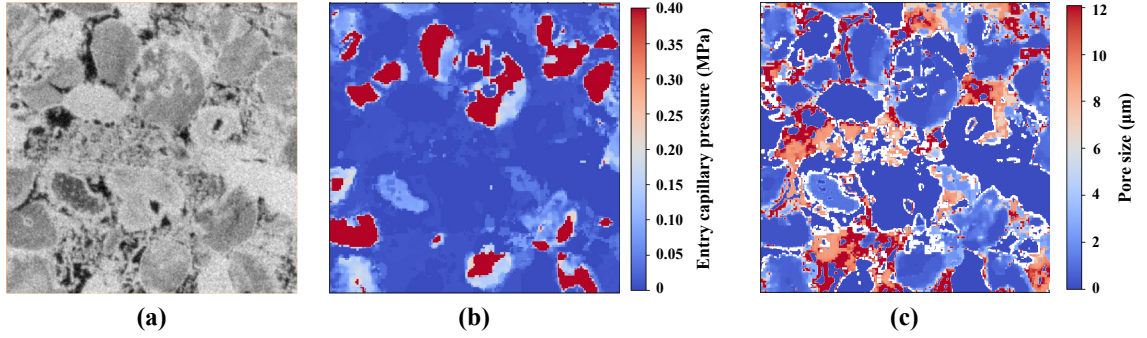


图 2.4 (a) ES6.5 岩样的 400×400 的灰度图像切片; (b) 微孔区侵入压力图谱; (c) 根据侵入压力计算的微孔体素平均孔径

Fig.2.4 (a) A 400×400 grayscale image slice of ES6.5 rock sample; (b) Invasion capillary pressure map of microporosity; (c) Mean pore size of microporosity according to invasion capillary pressure

综上所述, 当微孔区平均孔径计算出来后, 根据公式 2.2 计算出微孔体素的渗透率, 结合微孔体素孔隙率, 为下面模型微孔区计算网格的孔渗参数的处理提供基础。

2.2 基于图像的双重孔隙网络提取

基于图 2.1 和表 2.1 中三个不同分辨率下的 Estailades 石灰岩图像数据, 对原始 CT 图像进行预处理, 即图像滤波和降噪。Micro-CT 扫描设备在扫描岩石介质时, 由于设备、环境或样本本身的原因, 岩心图像可能会出现噪声、伪影、对比度不够等缺陷, 而岩心 CT 扫描图像质量的好坏直接影响基于图像建立的多尺度渗流模型是否能够反映真实的孔隙空间结构。因此, 对岩心 CT 图像进行滤波和降噪处理, 可以在去除噪声的同时, 增强关键特征的对比度, 并尽可能保留图像的细节信息, 如不同孔隙区域之间的连接拓扑关系, 为后续的渗流模型建立提供高质量的数据基础。一般常用的滤波技术为高斯滤波 (Gaussian filter) 和非局部均值滤波 (Non-local mean filtering)。

高斯滤波 (Gaussian filter) 包含许多种, 包括低通、带通和高通等, 我们通常图像上所说的高斯滤波, 指的是高斯模糊 (Gaussian Blur), 是一种高斯低通滤波, 其过滤掉图像高频成分 (图像细节部分), 保留图像低频成分 (图像平滑区域), 因此对图像进行高斯模糊后, 图像会变得比较平滑。高斯模糊的原理本质上是以每

个像素点为中心，取其 3×3 区域内所有像素灰度值的加权平均作为中心点的灰度值，距离越近的点权重越大，距离越远的点权重越小，本质上就是利用高斯函数生成的高斯核(高斯模板)对图像进行卷积操作。一个二维的高斯分布函数如下：

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.5)$$

其中， (x, y) 表示点的坐标值， σ 表示标准差，在计算每个像素时，都把当前中心点看作坐标原点，可以使得均值 $\mu = 0$ ，从而可以简化计算。

非局部均值滤波^[75] (Non-local mean filtering) 与高斯滤波有一定的相似之处，也是图像灰度值根据某种相似度进行加权平均后得到新的灰度值，从而使得滤波后图像清晰度高，并且不丢失细节。但是与高斯滤波不同的是，高斯滤波通过像素点之间的距离计算权重，而非局部均值滤波通过块之间的相似度计算权重。两种滤波方式在空间中计算权重的距离示意图如图 2.5 所示。

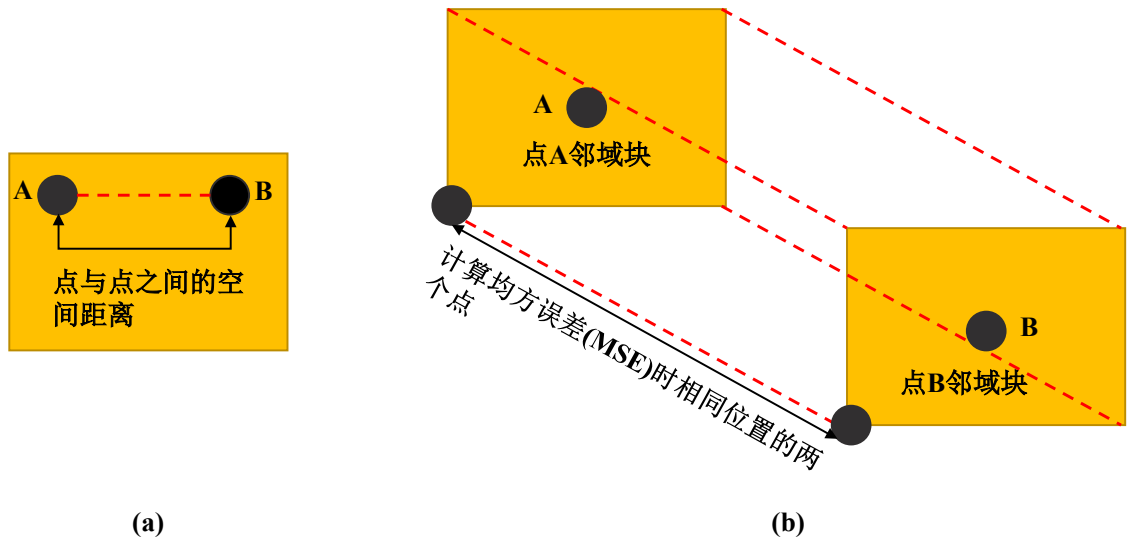


图 2.5 (a) 高斯滤波空间距离；(b) 非局部均值滤波相似度

Fig.2.5 (a) Gaussian filter space distance; (b) Non-local mean filtering similarity

非局部均值滤波算法就是使用 MSE 来计算两个邻域块的相似度。邻域块的行列相同，假设均为 m 行 n 列，那么 MSE 的计算如下式：

$$MSE(A, B) = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (A(i, j) - B(i, j))^2 \quad (2.6)$$

其中， $A(i, j)$ 为点 A 邻域块中的点 (i, j) 的像素值， $B(i, j)$ 为点 B 邻域块中的相同位置点的像素值。两种滤波方式后的图像展示如图 2.6 所示。

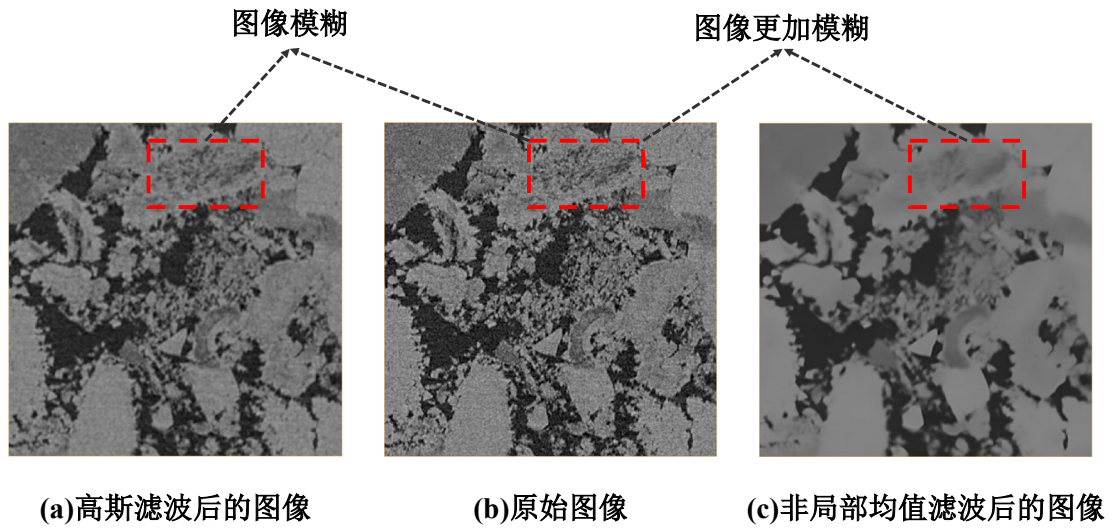


图 2.6 原始岩心 CT 图像及两种滤波方式滤波后的图像

Fig.2.6 CT image of original core and image filtered by two filtering methods

从图 2.6 中可以看出，非局部均值滤波会使得图像更为模糊，可能会丢失一些细节信息，但是需要注意的是两种滤波方法没有好坏之分，只是适用场景不同。

在对图像进行预处理之后，进行第二步对图像进行阈值分割的操作，由于 CT 图像中不同位置的密度不同导致图像中的灰度值不同，最直观的反映在图像的明暗程度不同，因此通过阈值分割将图像分为可分辨孔隙区域（标记为 2）、亚分辨孔隙区域（标记为 1）、固体区域（标记为 0）。ES6.5 样品严格按照参考文献^[13]中饱和盐水-干燥图像的差分成像方法得到微孔区域，而 ES3.1 和 ES3.6 样品未提供饱和盐水图像，采用图像灰度值与孔隙率成正比例关系，求出微孔区域孔隙率，叠加大孔孔隙率与实验孔隙率相匹配，进而更加精确的分割微孔区域，具体细节参考第 2.1.2 小节中计算微孔孔隙率部分。

基于分割后的三相 CT 图，结合开源软件 PoreSpy，分别对可分辨孔隙区域和亚分辨孔隙区域采用基于标记的分水岭分割算法^[33,38,45,76,77]，我们可以生成单个的大孔和微孔孔隙区域，并建立所有孔隙的连通性图（即网络）。注意，当采用基于标记的分水岭分割算法时，其中一些关键参数(例如高斯滤波器的参数 σ 和检索半径的大小以及检索峰值点的最大迭代次数等)需要关注，参考文献^[33]中默认设置 σ 为 0.35，计算半径大小为 5 个体素网格，但是在本文提取中，4 个体素网格大小的检索半径较为合适。同时，基于图像的分析可以得到每个孔隙的体积、表面积、等效半径、内切半径，以及相邻两个孔隙之间二维界面的横截面积、内切半径、等效半径和周长。最后，构建了包含空间坐标、几何信息和各孔隙连通性的大孔和微孔双孔网络，即双重孔隙网络模型，模型计算网格提取的流程简图如图 2.7 所示。

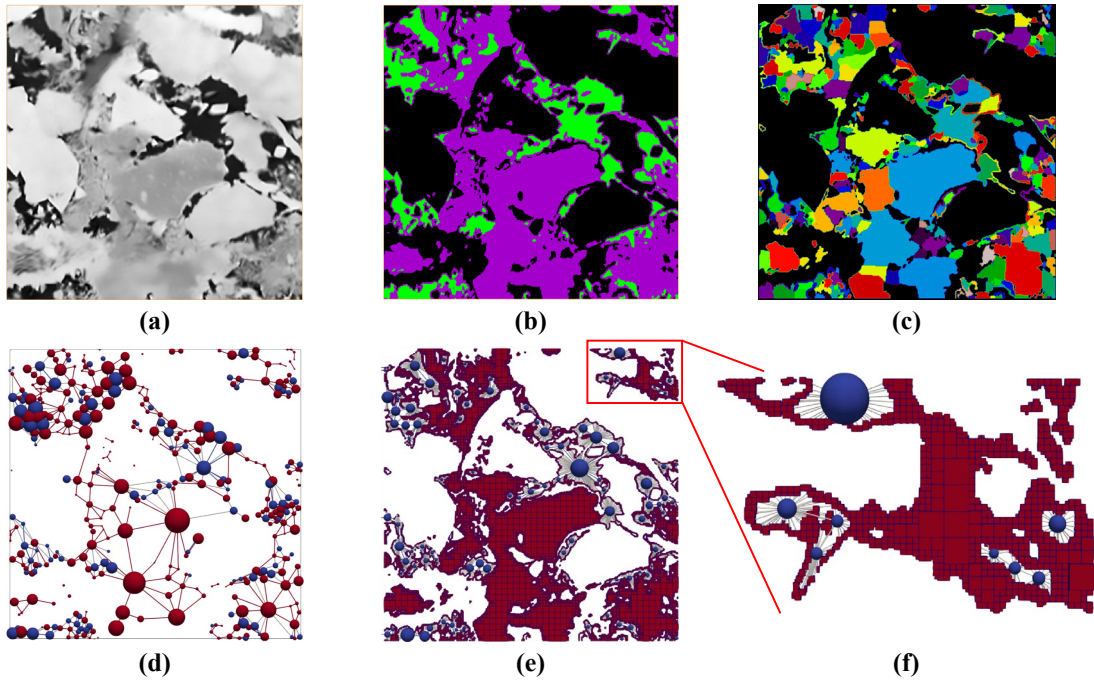


图 2.7 基于图像的双重孔隙网络提取及孔隙网络-连续介质模型计算网格生成示意图：(a) ES3.1 的 400×400 大小的灰度图像切片；(b) 阈值分割后的三相像；(c) 孔隙空间（即大孔隙）和微孔隙分割后的单个孔隙；(d) 由 PoreSpy 提取的双重孔隙网络；(e) 孔隙网络-连续介质模型的计算网格；(f) 计算网格的放大图

Fig.2.7 Schematic of the image-based extraction of dual-pore-network and the generation of computational mesh for the pore-network-continuum model: (a) A 400×400 grayscale slice of ES3.1; (b) The ternary image after threshold segmentation; (c) The individual watersheds of both void spaces (i.e., macropores) and microporosity; (d) The extracted dual-pore-network by PoreSpy; (e) The computational mesh for the pore-network-continuum model; (f) The zoom-in of the computational mesh

图 2.7(b)中，黑色为固体，紫色为亚分辨微孔隙，绿色为可分辨孔隙；图 2.7(d)中，大孔和微孔元素分别为蓝色和红色；图 2.7(e)中原始微孔隙体素被大大粗化，以减少计算工作量，可以看到经过三次卷积粗化之后， 1×1 的体素网格被粗化为 8×8 的体素网格。

基于图像提取双重孔隙网络后，如图 2.7(d)中微孔单元的孔隙率和渗透率的计算值得注意，下面将具体介绍计算细节。

基于 2.1.2 小节中公式 2.1 计算得到微孔区每个体素的孔隙率，当微孔区经过基于标记的分水岭分割之后，每个微孔单元包含若干个体素网格，因此，将每个微孔单元中包含的所有体素的孔隙率求取平均值作为该微孔单元的孔隙率。

$$\phi_i = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} \varepsilon_k}{N_i} \quad (2.7)$$

其中， ϕ_i 为微孔单元 i 的孔隙率， N_i 为微孔单元 i 包含的体素网格数，该公式计算过程的示意简图如图 2.8 所示。

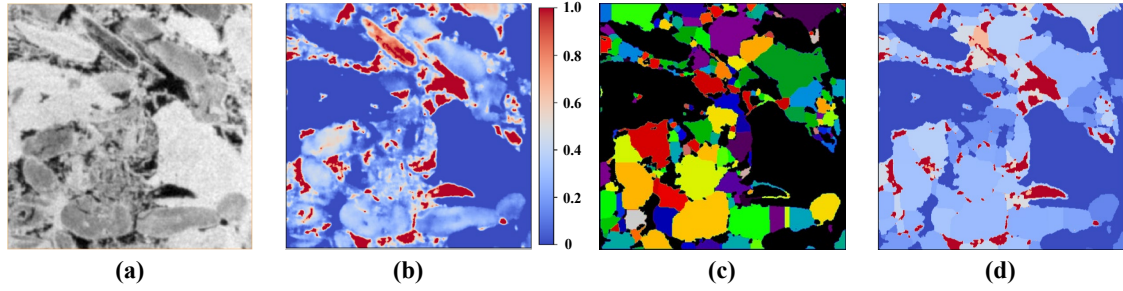


图 2.8 微孔单元孔隙率计算示意图：(a) ES6.5 的 400×400 灰度切片；(b) 孔隙率分布图，固体孔隙率为 0，大孔孔隙率为 1，微孔体素孔隙率为 0~1；(c) 分割后的 185 个微孔单元；(d) 微孔单元的平均孔隙率分布

Fig.2.8 Schematic of the porosity calculation of microporosity watersheds: (a) A 400×400 grayscale slice of ES6.5; (b) The porosity distribution where 0 for solid, 1 for resolved macropores, and 0~1 for microporosity; (c) The 185 microporosity watersheds; (d) The mean-porosity distribution of watersheds

微孔单元平均孔径的计算过程如下，基于 2.1.3 小节中微孔体素非均质孔径的计算，可以得到每个微孔体素的平均孔径，经过基于标记的分水岭分割之后，每个微孔单元包含很多体素网格，为了求出每个微孔单元的平均孔径，这里我们采用总孔隙体积除以总孔隙数量求平均孔径的方法。

$$M_k = \frac{V_k \varepsilon_k}{4\pi r_k^3 / 3} \quad (2.8)$$

$$\bar{r}_i = \left(\frac{3}{4\pi} \frac{\sum_{k=1}^{N_i} V_k \varepsilon_k}{\sum_{k=1}^{N_i} M_k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.9)$$

其中， r_k 为微孔体素 k 的平均孔径， V_k 为体素 k 的体积， ε_k 为体素 k 的孔隙率，提取的微孔单元为孔隙网络球棍模型，因此， M_k 为体素 k 包含的孔隙数量，所以最终计算得到球形微孔单元 i 的平均孔径， $\bar{r}_i$ 。

当每个微孔单元的平均孔径计算出来后，基于公式 2.2 得到每个微孔单元的渗透率，因此，本节中我们基于岩心图像提取了双重孔隙网络的计算网格单元，并且

融合了微孔单元的孔渗参数，为后续流体流动模拟提供基础。

2.3 基于图像的孔隙网络-连续介质计算网络提取

双重孔隙网络模型因其对微孔区体素网格的平均化而具有高计算效率，但是其计算精确度还有待研究，本文以课题组团队开发的孔隙网络-连续介质模型^[78,79]为参考模型（大孔提取为孔隙网络，微孔视作连续介质，为提高计算效率，对微孔区体素进行多重卷积粗化），进一步探究微孔区平均化的影响。参考模型的可靠性已经在本文第三章第四章以及前人的工作^[78,79]中验证过，并且选择该模型为参考模型是因为我们对两个模型大孔区进行一样的操作，例如设置一样的检索半径大小等，进而可以更好地探究双重孔隙网络微孔平均产生的影响。

孔隙网络-连续介质模型计算网络提取流程前半部分与双重孔隙网络一样，如图 2.7 (a) ~ (d)，基于岩心灰度图像阈值分割得到大孔、微孔和固体区域，然后对大孔区进行基于标记的分水岭分割操作，结合 PoreSpy 提取大孔孔隙网络，但是对于微孔区有很大不同，图 2.7 (e)和(f)可以看出，微孔区视作连续介质模型，并进行多重卷积粗化操作，具体细节如下。

首先，对图 2.7(b)中标记为微孔的体素网格进行三次卷积计算，卷积核大小设为 $2 \times 2 \times 2$ ，权重系数为 1，前两次卷积步长设置为 2，第三次卷积步长为 1，得到第三级粗化矩阵，对粗化矩阵进行阈值分割提取满足粗化条件的区域，卷积计算中阈值分割的公式为：

$$A_i(x, y, z) = \begin{cases} A_i(x, y, z) & A_i(x, y, z) = T_i \\ 0 & A_i(x, y, z) < T_i \end{cases} \quad (T_1 = 8, T_2 = 64, T_3 = 512) \quad (2.10)$$

其中， $A_i(x, y, z)$ 为第 i 次卷积计算得到的单位矩阵在坐标点 (x, y, z) 位置的卷积值， T_i 为判断 A_i 矩阵中卷积值是否满足粗化条件所设置的阈值， $i=1, 2, 3$ 。在进行阈值分割之后，有些粗化矩阵还需进行腐蚀计算，主要目的是通过形态学操作提取、分离或分析岩心微观结构中的特定特征（如孔隙、裂缝等），此处针对微孔体素，它为后续的定量分析（如孔隙度计算、渗透率评估）提供了重要的预处理支持，同时也可以用于去除噪声、平滑边缘和增强对比度。

然后对图 2.7(b)中标记为微孔的体素网格进行 X, Y, Z 方向上的卷积计算，卷积核大小分别为 $2 \times 2 \times 1$ 、 $2 \times 1 \times 2$ 、 $1 \times 2 \times 2$ ，权重系数均为 1，步长为 1，得到三个三维矩阵。下一步，遍历所有粗化矩阵中满足粗化条件的卷积值所映射的微孔区矩阵中的体素进行标记，标记完的体素对应卷积值设置为 0，防止当再遍历到该卷积值时，就会判断其不满足粗化条件，避免重复粗化操作，直到所有矩阵的所有微孔体素遍历完成。对粗化矩阵中未参与粗化的微孔体素进行标记，也就是体素值为 1

的微孔体素，最终生成微孔区粗化后的网格单元信息和连接关系，然后将大孔区的孔隙网络与微孔区的网格单元合并，构成孔隙网络-连续介质模型计算网格^[79]。模型微孔体素网格和大孔孔隙网络的连接关系简图如图 2.9 所示。

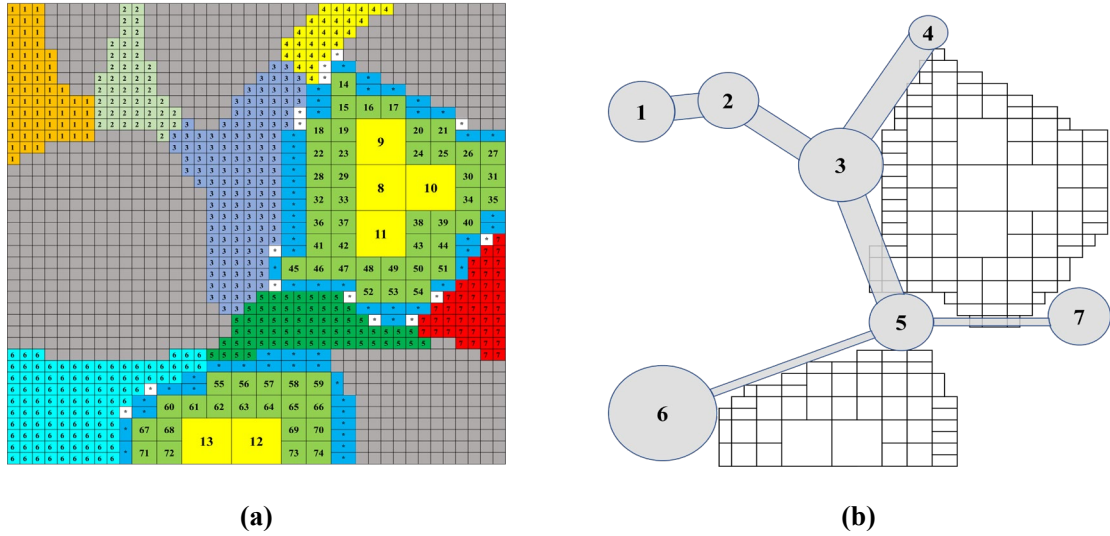


图 2.9 大孔隙的孔隙网络与微孔隙的计算网格融合示意图^[79]：(a) 分水岭体素、微孔隙网格及其连接关系；(b) 最后的计算网格由孔隙网络和微孔隙网格组成

Fig.2.9 Schematic of the fusion of the pore network of macropores and the computational grids of microporosity: (a) Watersheds voxels, microporosity grids, and their connections; (b) The final computational mesh which composes the pore network and the microporosity grids

结合图 2.7 (f)和图 2.9 (b)可以看出，微孔区体素网格在进行多重卷积粗化之后，一个体素网格合并成两个、四个、八个网格，大大减少了计算网格数量，从而在保证计算精度的同时提高了计算效率。

并且孔隙网络-连续介质对于微孔单元的孔隙率和渗透率参数的融合与双重孔隙网络一样，如公式 2.7 计算微孔单元的平均孔隙率，微孔单元的平均孔径也是采用总孔隙体积除以总孔隙数量（公式 2.9）的方法，用每个微孔单元总的孔隙体积除以微孔单元包含的孔隙数量得到每个微孔单元的平均孔隙体积，进而得到平均孔径，最终基于公式 2.2 计算得到微孔单元的渗透率。综上所述，两个模型微孔单元孔隙率和渗透率计算方法一样，从而可以更加精确的对比，探究双重孔隙网络对渗流参数的预测能力。

2.4 本章小结

本章主要介绍了所用岩样的微米 CT 图像及其相关数据，基于现有数据计算微

孔区孔渗参数，从而提取融合了微孔区渗流参数的双重孔隙网络和孔隙网络-连续介质计算网格。

(1) 通过计算机断层扫描设备 (Micro-CT) 获取碳酸盐岩三维微米 CT 灰度图像，对图像预处理进行滤波和降噪，通过阈值分割和差分图像得到大孔、微孔和固体区域，基于图像和实验数据计算微孔体素的孔渗参数，如孔隙率和渗透率，为下一步模型的计算网格提取提供基础信息。

(2) 基于描述不同孔隙特征的岩心三维 CT 图像，分别提取双重孔隙网络和孔隙网络-连续介质计算网格。首先，针对双重孔隙网络，大孔区和微孔区均采用基于标记的分水岭分割算法，结合 PoreSpy 软件，生成双重孔隙网络计算网格，并且基于微孔体素的孔渗参数，计算微孔单元的孔隙率和渗透率赋予双重孔隙网络微孔区域。而孔隙网络-连续介质大孔区与双重孔隙网络一样，采用基于标记的分水岭分割算法生成孔隙网络，微孔区视作连续介质，并且为了保证计算精度的同时提高计算效率，对微孔体素网格进行多重卷积粗化。最终将大孔区的孔隙网络与微孔区的网格单元合并，生成孔隙网络-连续介质模型的计算网格，并且微孔单元的孔渗参数计算与双重孔隙网络保持一致，为接下来的流体流动模拟提供基础。

3 双重孔隙网络模型对绝对渗透率 与地层因子的预测能力研究

本章主要探究双重孔隙网络模型 (Dual-pore-network model, DPNM) 对绝对渗透率和地层因子 (被流体所饱和的多孔介质的电阻率与该流体的电阻率的比值) 的预测能力, 以微孔区体素未经过多重卷积粗化的孔隙网络-连续介质模型 (Pore-network-continuum model, PNCM) 为参考模型进行对比研究。首先, 介绍了双重孔隙网络模型对绝对渗透率和地层因子的数值求解控制方程, 孔隙网络-连续介质模型的求解过程见附录 D。然后, 介绍模型如何进行对比以及参考模型的验证, 分析与讨论模型对比结果, 进而研究双重孔隙网络模型预测能力的优化, 同时探究了图像分辨率对模型渗透率预测的影响。

3.1 双重孔隙网络模型

基于双重孔隙网络求解绝对渗透率, 即单相不可压缩流动, 质量守恒方程为:

$$\sum_{j=1}^{N_i} Q_{ij} = \sum_{j=1}^{N_i} T_{ij} (p_i - p_j) = 0 \quad (3.1)$$

其中, 下标 i 和 j 表示孔隙体的索引, ij 是连接孔隙体的喉道的索引, N_i 为孔隙体 i 的配位数, Q_{ij} [m^3/s] 为通过孔喉的体积流量, T_{ij} [$\text{m}^4 \cdot \text{s}/\text{kg}$] 为两个孔隙体之间的总传导率, p [Pa] 为流体压力。在我们的双重孔隙网络模型中, 不同孔隙区域之间存在三种几何连通性, 即大孔-大孔、大孔-微孔和微孔-微孔。如图 3.1 所示, 假设每个大孔或微孔单元都由孔隙体和半孔喉两部分组成 (注意, 微孔单元的所谓孔隙体或孔喉是名义上的, 实际上是一个亚分辨率多孔区)。另一半孔喉来自于连通的大孔或微孔单元。注意, 只有孔隙体分配了体积, 孔喉的设计是为了考虑运输阻力。

图 3.1 中理想孔隙体和孔喉均是基于岩心 CT 扫描图像提取的孔喉信息, 从而可以获得真实孔隙空间及其连接关系。孔隙体等效半径为基于分水岭分割后每个孔隙区域体素数及其图像体素尺寸, 可以求得该孔隙区域的体积, 进而可以求得该孔隙体的等效半径。类似还可以求得孔隙体的内切半径、外接半径以及周长等信息。而喉道的等效半径则是基于其连接的两个孔隙区域交界面的面积计算得到。关于提取的更多孔喉信息可以参考文献^[33]中获得。

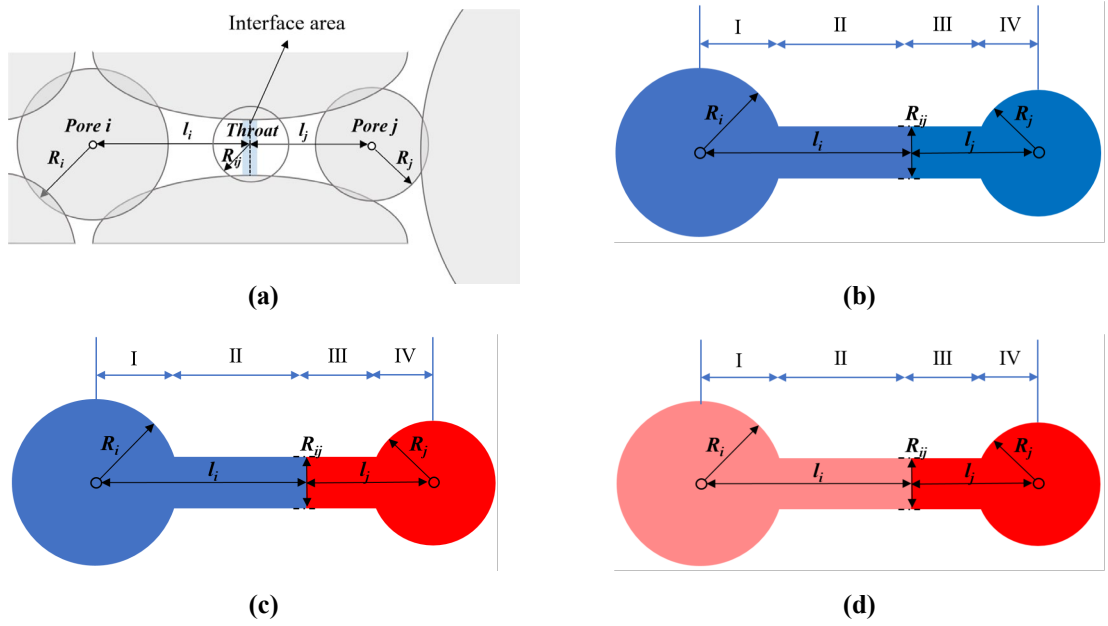


图 3.1 双重孔隙网络模型中使用的理想孔隙体和孔喉概念的二维示意图：(a) 孔隙体 i 和 j ，它们的等效半径和它们到界面的距离。每个分水岭由两部分组成：孔隙体和孔喉的一半。孔喉的另一半来自连通的分水岭；(b) 两个大孔连接的孔隙体和孔喉；(c) 大孔（蓝色）和微孔单元（红色）连接的孔体和孔喉；(d) 两个微孔单元连接的孔体和孔喉

Fig.3.1 2D schematic of the concept of idealized pore bodies and pore throats used in the DPNM: (a) Watersheds i and j , their equivalent radii, and their distances to the interface. Each watershed consists of two parts: pore body and half of the pore throat. The other half of the pore throat comes from the connected watershed; (b) Pore bodies and pore throat of the two macropore watersheds; (c) Pore bodies and pore throat of the macropore (blue) and microporosity (red) watersheds; (d) Pore bodies and pore throat of the two microporosity watersheds

基于图 3.1 中理想化孔隙单元的概念，可将公式 3.1 中的传导率计算为：

$$T_{ij} = \frac{a_i a_{ij}^L a_{ij}^R a_j}{a_i a_{ij}^L a_{ij}^R + a_i a_{ij}^L a_j + a_i a_{ij}^R a_j + a_{ij}^L a_{ij}^R a_j} \quad (3.2)$$

其中， a_i 和 a_j 分别为孔隙体 i 和 j 的水力传导系数， a_{ij}^R 为孔喉 ij 右半侧的水力传导系数，作为分水岭 j 的一部分，同样 a_{ij}^L 为孔喉 ij 左半侧的水力传导系数，作为分水岭 i 的一部分。四个水力传导系数的计算在表 3.1 中列出，其中 k_i 和 k_j 为微孔单元 i 和 j 的绝对渗透率， R_i 和 R_j 分别为孔隙体 i 和 j 的等效半径， R_{ij} 为孔喉 ij 的等效半径， l_i 和 l_j 分别为孔隙体 i 和 j 的质心到孔喉质心的欧氏距离， μ 为动力粘度。由于孔隙单元的理想化，喉道的左侧和右侧长度 ($l_i - R_i$, $l_j - R_j$) 可能会出现负值，因此将图像像素尺寸作为该长度的下限。在本工作中，我们使用 Katz-Thompson 公式

计算微孔单元的渗透率，参考 2.1.3 小节中微孔体素渗透率的计算以及 2.2 节中微孔单元渗透率的计算。我们注意到，除了 Katz-Thompson 模型外，还可以使用其他一些经验模型，如 Kozeny-Carmen 模型^[80]计算渗透率，参考 2.2 和 2.3 小节中两个模型微孔单元均采用一样的公式计算渗透率，因此渗透率模型的选择并不影响我们对 DPNM 和 PNCM 进行比较的主要结论。

表 3.1 公式 3.2 和 3.5 传导率计算中的水力传导系数和电导系数

Table 3.1 Hydraulic conductance and electrical conductance in the calculation of transmissibility in

Eq. 3.2 and Eq. 3.5

传导系数	大孔	微孔单元
水力传导系数		
a_i	$\pi R_i^4 / (8\mu R_i)$	$k_i \pi R_i^2 / (\mu R_i)$
a_j	$\pi R_j^4 / (8\mu R_j)$	$k_j \pi R_j^2 / (\mu R_j)$
a_{ij}^L	$\pi R_{ij}^4 / [8\mu(l_i - R_i)]$	$k_i \pi R_{ij}^2 / [\mu(l_i - R_i)]$
a_{ij}^R	$\pi R_{ij}^4 / [8\mu(l_j - R_j)]$	$k_j \pi R_{ij}^2 / [\mu(l_j - R_j)]$
电导系数		
b_i	$\sigma_w \pi R_i^2 / R_i$	$\sigma_{w,i}^{eff} \pi R_i^2 / R_i$
b_j	$\sigma_w \pi R_j^2 / R_j$	$\sigma_{w,j}^{eff} \pi R_j^2 / R_j$
b_{ij}^L	$\sigma_w \pi R_{ij}^2 / (l_i - R_i)$	$\sigma_{w,i}^{eff} \pi R_{ij}^2 / (l_i - R_i)$
b_{ij}^R	$\sigma_w \pi R_{ij}^2 / (l_j - R_j)$	$\sigma_{w,j}^{eff} \pi R_{ij}^2 / (l_j - R_j)$

对于微孔单元的平均孔隙率计算可以参考 2.1.2 和 2.2 小节中公式 2.1 和 2.7 的计算过程，结合 2.1.3 和 2.2 小节中对于微孔单元的孔径计算，通过 Katz-Thompson 公式计算得到微孔单元的渗透率，即上述表格中的 k_i 和 k_j 。

我们沿流动方向施加进出口压力边界条件，其余部分施加无流边界条件。然后，由质量守恒方程，即公式 3.1，得到一组未知孔隙体压力的线性代数方程，本工作使用开源的特征解算器^[81]（Eigen）。一旦压力场已知，我们就可以得到入口或出口的体积流量。最后，根据 Darcy 方程得到数字岩石的绝对渗透率：

$$K = \frac{Q_{in} \mu L}{A \Delta p} \quad (3.3)$$

其中, K [m^2] 为绝对渗透率, Q_{in} [m^3/s] 为入口处体积流量, L [m] 为数字岩石沿流动方向的长度, A 为数字岩石横截面面积, Δp 为沿流动方向的压降。

地层因子^[81,82]定义为被流体饱和的多孔介质的电阻率与填充其孔隙的流体的电阻率^[83]之比。对于地层因子的求解, 我们求解双重孔隙网络模型中的电势场, 电流守恒方程如下:

$$\sum_{j=1}^{N_i} I_{ij} = \sum_{j=1}^{N_i} T_{ij}^e (U_i - U_j) = 0 \quad (3.4)$$

其中, I_{ij} [A] 为通过孔喉 ij 的电流, T_{ij}^e [S] 为两个孔隙体之间总的传导率, U [V] 为电势。类似于公式 3.2, 我们提出了计算公式 3.4 中传导率的一般化公式:

$$T_{ij}^e = \frac{b_i b_{ij}^L b_{ij}^R b_j}{b_i b_{ij}^L b_{ij}^R + b_i b_{ij}^L b_j + b_i b_{ij}^R b_j + b_{ij}^L b_{ij}^R b_j} \quad (3.5)$$

其中, b_i 和 b_j 分别为孔隙体 i 和 j 的电导, b_{ij}^R 为孔喉 ij 右半侧的电导, 作为分水岭 j 的一部分, 同样 b_{ij}^L 为孔喉 ij 左半侧的电导, 作为分水岭 i 的一部分。四个电导系数的计算在表 3.1 中列出, 其中 σ_w 为盐水的电导率, $\sigma_{w,i}^{eff}$ 为被盐水饱和的微孔单元 i 的有效电导率, 由公式^[80] $\sigma_{w,i}^{eff} = \sigma_w \phi_i^2 / \tau$ 计算得到。

求解公式 3.4 采用与单相流动相同的数值求解器, 一旦得到电势场, 就可以计算出整个数字岩石的有效电导率:

$$\sigma_{network} = \frac{I_{in} L}{A \Delta U} \quad (3.6)$$

其中, I_{in} 为入口总电流, ΔU 为整个模型区域的电势差。最终, 地层因子的计算公式为:

$$FF = \frac{\sigma_w}{\sigma_{network}} \quad (3.7)$$

其中, FF 为地层因子, σ_w 为盐水电导率, $\sigma_{network}$ 为数字岩石的有效电导率。

3.2 模型对比设置

3.2.1 模型尺寸与网格参数设置

为了更好的探究双重孔隙网络对绝对渗透率和地层因子的预测能力, 在本文中, 考虑到孔隙网络-连续介质模型的计算效率, 从表 2.1 中列出的每个原始图像中提取 400^3 体素大小的岩样分别建立双重孔隙网络和孔隙网络-连续介质模型。之所以选择这个尺寸大小, 是由于孔隙网络-连续介质模型计算效率的限制, 虽然有

可能没达到 REV 尺寸, 但是不影响模型的对比。在建立模型过程中, 为了更好地对比双重孔隙网络微孔区平均化的影响, 两个模型大孔区设置一样的提取孔隙网络参数, 如检索半径大小为 4 个体素、高斯滤波器的参数 σ 为 0.35 以及 SNOW 算法的最大迭代次数为 20 次等。其中, 检索半径的大小与岩石孔径大小分布以及图像分辨率密切相关, 检索半径过大或者偏小都会造成孔隙单元分割的不准确。在进行基于标记的分水岭分割之后, 可以根据原始灰度图像与分割图像进行对比, 判断孔隙是否被过度分割, 进而相应的调整检索半径大小。

表 3.2 列出了两种模型 (DPNM 和 PNCM) 提取的孔隙数量及计算网格信息。可以看出, 在 DPNM 中, 相较于原始图像的体素网格, 大孔和微孔单元数量都大大减少, 可以有效的提高计算效率, 并且在 PNCM 中, 微孔体素的多重卷积粗化大大减少了 85% 以上的计算网格。图 3.2 为 ES3.1、ES3.6、ES6.5 这三个数字岩石的灰度图像、基于图像提取的双重孔隙网络及孔隙网络-连续介质计算网格。根据原始灰度图像可以看到, 不同区域的灰度值不同导致图像的明暗程度不同。基于原始灰度图像提取的两种模型的计算网格分别对应图像中的大孔和微孔区域, 如蓝色代表提取的大孔孔隙网络, 红色为微孔。可以直观的看到, 在 DPNM 中, 微孔提取为孔隙网络单元, 而在 PNCM 中, 微孔被视作连续介质, 并且为了提高计算效率, 对微孔体素网格进行了多重卷积粗化。网格提取时将固体区域设置为背景, 所以图 3.2 中两个模型计算网格中未展示固体区域。

表 3.2 三种模拟数字岩石的原始图像体素数, 以及两种数值模型的孔隙体数和计算网格数

Table 3.2 The numbers of original voxels in the three simulated digital rocks, and the numbers of pore bodies and computational grids in the two numerical models

样品子体积 400 ³	孔隙区域	原始图像体 素数	体积分数 (%)	双重孔隙网络 模型 ^a	孔隙网络-连续 介质模型 ^b
ES3.1	大孔	6332318	9.9%	3569	3569
	微孔单元	21562493	33.7%	8375	3929815
ES3.6	大孔	5040267	7.9%	2172	2172
	微孔单元	32676964	51.1%	13228	4494989
ES6.5	大孔	3694907	5.8%	3827	3827
	微孔单元	40618405	63.5%	7930	4147069

^a 双重孔隙网络模型中提取的大孔和微孔单元的数量

^b 孔隙网络-连续介质模型中提取的大孔孔隙体的数量和粗化后微孔网格的数量

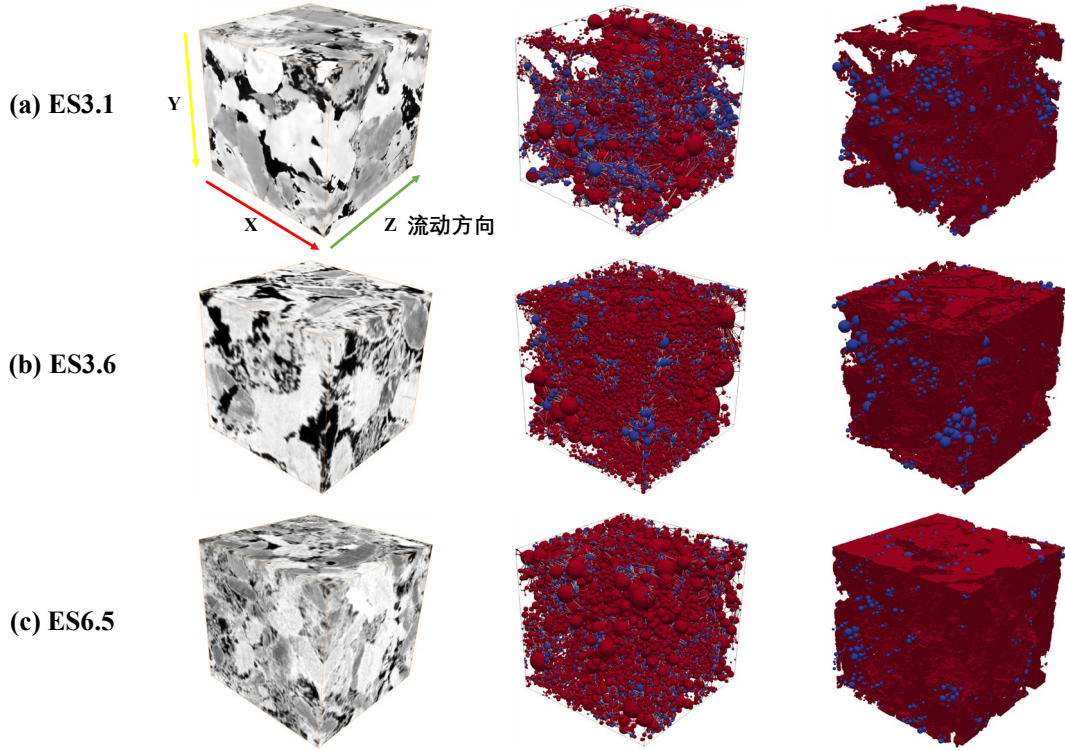


图 3.2 (a) ES3.1, (b) ES3.6, (c) ES6.5, 三块碳酸盐岩数字岩石的灰度图 (400^3)、双重孔隙网络及孔隙网络-连续介质模型计算网格。蓝色代表大孔, 红色代表微孔。

Fig.3.2 Grayscale images (400^3), the dual-pore-networks, and the computational meshes for the pore-network-continuum model of the three digital rocks of Estailades carbonate, namely, (a) ES3.1, (b) ES3.6, and (c) ES6.5. Blue for macropores, red for microporosity.

3.2.2 参考模型数值验证

在进行模型对比数值计算之前, 我们采用直接数值模拟 (DNS), 即基于商业软件 Ansys Fluent 的有限体积求解器和 LBM 内置的求解器来验证本文的参考模型, 即微孔区未进行多重卷积粗化的孔隙网络-连续介质模型。验证分为微孔区采用均质渗透率和非均质渗透率两部分。

首先, 针对微孔区采用均质渗透率, 我们首先考虑具有均匀微孔渗透率的多尺度数字岩石。从 Berea 砂岩数值合成的多尺度数字岩石中提取了 $100 \times 100 \times 200$ 尺寸大小的岩样^[79]。基于 Ansys Fluent 的直接数值模拟和参考模型中微孔区设置同样的均质渗透率, 如表 3.3 所示, 与 DNS 相比, 参考模型在低微孔渗透率和高微孔渗透率下均能较好地预测渗透率, 且相对差异较小 (低微孔渗透率为 6.8%)。模拟压力分布图如图 3.3 所示, 由于大孔提取为孔隙网络, 而微孔均为原始图像体素网格, 只有很小的差异可以看到。

表 3.3 假设均质微孔渗透率的模型验证

Table 3.3 Model verification assuming homogeneous microporosity permeability

微孔渗透率	直接数值模拟 (mD)	参考模型 (mD)	相对偏差
10 mD	237	221	6.8%
100 mD	304	295	3%

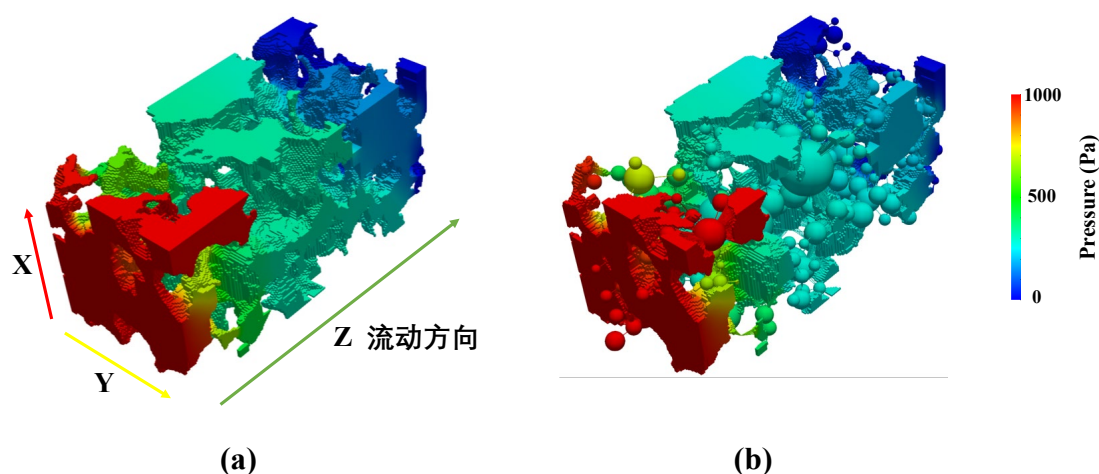


图 3.3 (a) 基于商用软件 Ansys Fluent 预测的压力场；(b) 参考模型预测的压力场

Fig.3.3 (a) Pressure field predicted by the commercial solver Ansys Fluent (DNS); (b) Pressure field predicted by the reference model

然后，针对微孔区采用非均质渗透率，我们进一步考虑具有非均质微孔隙度的多尺度数字岩石，即表 2.1 中的 ES6.5。如上所述，ES6.5 的微孔隙度已经进行了实验表征，包括基于体素的孔隙度和绝对渗透率（Katz-Thompson 模型）。为了减少计算量，从原始图像中提取 400^3 尺寸进行建模，如表 3.2 所示，参考模型提取的大孔隙约为 370 万个体素，微孔隙约为 4060 万个体素。采用 LBM 内置求解器对参考模型的绝对渗透率进行了模拟，通过修改 LBM 中的平衡分布函数和力项来考虑微孔隙中的达西项（即线性阻力）^[84]。结果表明，参考模型预测的渗透率为 174 mD，与 LBM 预测的 186 mD 相吻合，相对误差为 6.5%。综上所述，参考模型（即微孔区未进行多重卷积粗化的孔隙网络-连续介质模型）已经在 Ansys Fluent 中的 DNS 和 LBM 中得到了很好的验证。LBM 与参考模型预测的压力场云图如图 3.4 所示。

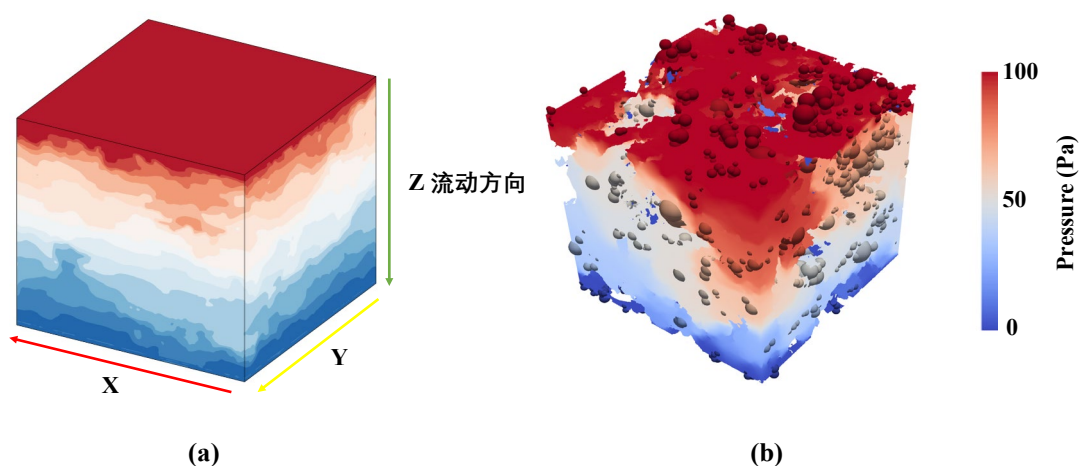


图 3.4 (a) 基于 LBM 预测的压力场；(b) 参考模型预测的压力场

Fig.3.4 (a) Pressure field predicted by the LBM; (b) Pressure field predicted by the reference model

3.3 对比结果与分析

基于图 3.2 和表 3.2 中图像数据以及提取的两种模型，将参考模型预测的值作为基准，对两种模型预测的绝对渗透率和地层因子进行了比较，对比结果如下。

3.3.1 绝对渗透率对比结果与分析

为了比较两种模型的渗透率预测结果，我们进行了四个案例研究，基于双重孔隙网络模型和微孔区进行多重卷积粗化的孔隙网络-连续介质模型预测的绝对渗透率结果如表 3.4 所示。

表 3.4 DPNM、PNCM 和参考模型预测绝对渗透率的比较

Table 3.4 Comparisons of the absolute permeability predicted by the DPNM, the PNCM, and the reference model

岩石样品 (400 ³)	微孔平均孔径 (μm)	reference model		参考模型 ^c (mD)
		双重孔隙网络模型 (mD)	孔隙网络-连续介质模型 ^b (mD)	
ES3.1	0.61	109	116	117
ES3.6	0.74	34	37	37
ES6.5-1	1.81	28	18	18
ES6.5-2 ^a	基于侵入压力的非均质孔径	12	128	174

^a 每个微孔隙体素的平均孔径通过实验表征，而不是给所有微孔隙分配一个恒定的平均孔径^[13]

^b 微孔区体素网格经过多重卷积粗化

^c 微孔区体素网格没有经过多重卷积粗化

上述表格中前三行微孔恒定的平均孔径通过 2.1.3 小节中公式 2.3 计算得到，

最后一行微孔非均质孔径分布由 2.2 小节中公式 2.9 计算得到。图像分析表明，数字岩石样品的大孔隙在整个流动方向上是相互连接的，参考模型预测 ES3.1 的连通性最好，渗透率最大，为 117 mD。表 3.4 列出了 DPNM 和 PNCM 预测的渗透率值。参考模型预测 ES6.5-2 的渗透率为 174 mD，与表 2.1 中 202 mD 的实验值吻合。对于前 3 个微孔采用均质平均孔径的数字岩石，PNCM 预测的渗透率值与参考模型预测的渗透率值相同，尽管通过粗化微孔区体素减少了 85% 以上的计算网格。此外，在微孔区采用均质的平均孔径时，DPNM 也能较好地预测渗透率，并且误差较小。然而，对于 ES6.5-2 样品，PNCM 低估了渗透率约 26%，而 DPNM 明显低估了渗透率超过一个数量级（约 92%）。并且，本文 DPNM 模型预测的 12 mD 与参考文献中^[13]基于孔隙率的岩石分型的 DPNM 模型预测的 9.54 mD 较为接近。

因此，至关重要的是要探究在微孔采用非均质孔径分布的情况下，DPNM 在预测渗透率方面表现不佳的根本原因（在本工作中为 ES6.5-2）。首先，我们解释为什么 PNCM 和 DPNM 对于微孔体素的粗化以及平均化的情况下，非均质孔隙率分布不会显著影响它们的渗透率预测，即表 3.4 前三行数据，两个模型预测值都与参考模型相差不大。图 3.5(a) 为 ES6.5-1 时原始图像微孔体素、DPNM 微孔单元和 PNCM 粗化微孔网格孔隙率的累计分布曲线。

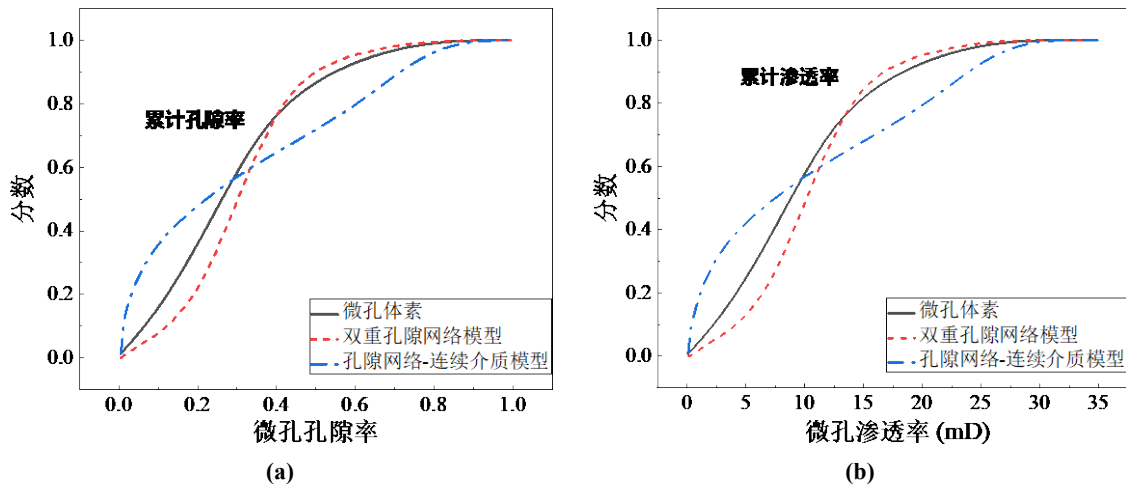


图 3.5 ES6.5-1 岩样中微孔体素，双重孔隙网络模型微孔单元，孔隙网络-连续介质模型中粗化的微孔网络的累计分布曲线：(a) 孔隙率累计分布曲线；(b) 渗透率累计分布曲线

Fig.3.5 (a) Cumulative distributions of the porosities and (b) the cumulative distributions of the permeability of the original microporosity voxels, the microporosity watersheds in the DPNM, and the coarsened microporosity grids in the PNCM for ES6.5-1

由于体素孔隙率的局部平均，粗化微孔隙体素网络的分布曲线比原始微孔隙

体素的曲线更平坦，这与预期设想一致。值得注意的是，DPNM 的微孔单元孔隙率累计曲线比 PNCM 更接近原始图像微孔体素孔隙率累计曲线。这可能是因为孔隙率的分布呈现块状集中区域，较为均质，如图 2.8 所示。PNCM 对微孔体素网格划分更为精细，但是平均时容易受极端值的影响，而 DPNM 微孔单元较为平均化，没有这方面因素的影响。相应的，原始图像微孔体素、DPNM 微孔单元、PNCM 粗化微孔网格渗透率的累计分布曲线如图 3.5(b)所示。此外，由于假设平均孔径均匀，微孔渗透率仅跨越一到两个数量级。

其次，我们假设渗透率预测的差异主要是由于 PNCM 中微孔网格粗化以及 DPNM 中的微孔单元平均所计算的微孔平均孔径（公式 2.9）。图 3.6(a)显示了原始微孔体素、DPNM 微孔单元和 PNCM 粗化微孔网格的平均孔径累计分布曲线。可以看出，粗化后的微孔网格分布曲线与原始微孔体素的参考曲线有轻微偏差，而双重孔隙网络模型微孔单元的平均孔径分布曲线与参考曲线偏差较大，大多数平均孔隙半径小于 $2\mu\text{m}$ 。因此，DPNM 的微孔渗透率被严重低估，如图 3.6(b)所示，这可以很好地解释为什么 DPNM 低估了 ES6.5-2 的渗透率超过一个数量级。此外，微孔平均孔径的非均质性与孔隙率的非均质性共同导致微孔渗透率跨越 3~4 个数量级。

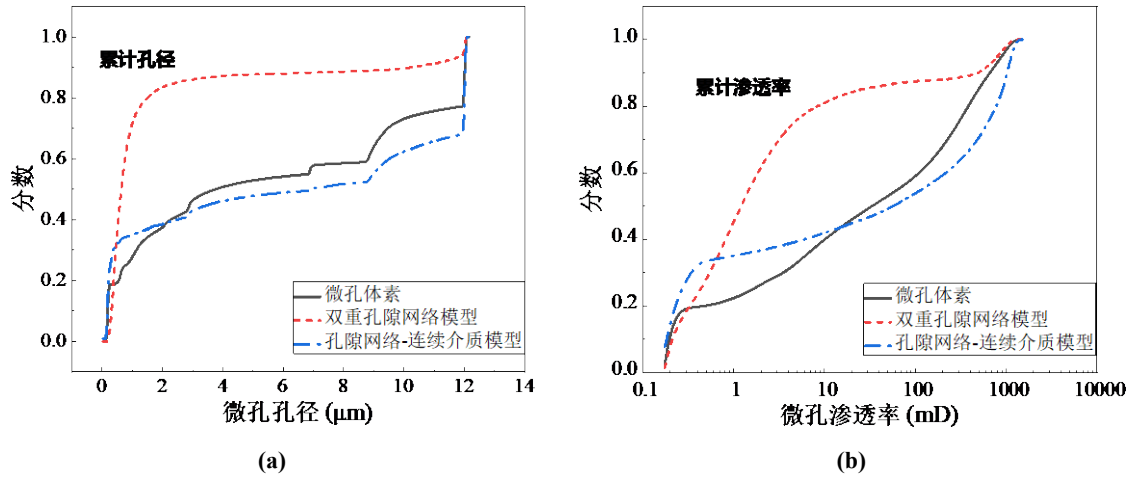


图 3.6 ES6.5-2 岩样中微孔体素，双重孔隙网络模型微孔单元，孔隙网络-连续介质模型中粗化的微孔网格的累计分布曲线：(a) 平均孔径累计分布曲线；(b) 渗透率累计分布曲线。每个微孔网格或单元的平均孔径由公式 2.9 计算

Fig.3.6 (a) Cumulative distributions of the mean pore sizes and (b) the cumulative distributions of the permeability of the original microporosity voxels, the watersheds in the DPNM, and the coarsened microporosity grids in the PNCM for ES6.5-2. The mean pore size of each microporosity grid or watershed is calculated by Eq. 2.9

3.3.2 地层因子对比结果与分析

基于绝对渗透率模型对比的基础上,对3种数字岩石的地层因子进行了模拟。注意,电阻取决于微孔的孔隙率,而不是微孔的平均孔径,这点可以参考微孔电导的计算公式(见表3.1)。因此,我们在地层因子模拟中不区分ES6.5-1和ES6.5-2。表3.5列出了DPNM、PNCM和参考模型预测的地层因子,与ES3.1、ES3.6和ES6.5-1这3个数字岩石绝对渗透率预测结果一致,DPNM和PNCM都能很好地再现参考模型给出的地层因子。基于地层因子计算公式可以看出,其主要与微孔孔隙率相关,与微孔平均孔径非均质性关系不大,而参考图3.5,两个模型微孔平均孔隙率均能很好的匹配微孔体素孔隙率,因此,两个模型均能很好的预测地层因子。

表 3.5 DPNM、PNCM 和参考模型预测地层因子的比较

Table 3.5 Comparisons of the formation factor predicted by the DPNM, the PNCM, and the reference model

岩石样品 (400 ³)	双重孔隙网络模型	孔隙网络-连续介质	参考模型 (-)
	(-)	模型 (-)	
ES3.1	17.24	19.61	19.23
ES3.6	23.81	23.81	23.26
ES6.5	18.52	20.41	19.23

3.4 图像分辨率对渗透率预测的影响

通常,岩心扫描图像分辨率和视域是成反比的,对于分辨率较高的图像一般无法兼顾图像有足够的尺寸。对于多尺度数字岩石分析,我们假设降低图像分辨率会降低大孔隙的体积分数,而增加微孔隙的体积分数,从而导致渗透率的低估。为了定量研究这种影响,我们使用双重孔隙网络模型分析了ES3.1、ES3.6和ES6.5-1这三个数字岩石,基本数据结果总结如表3.6所示。利用DPNM的高计算效率,采用表2.1中列出的微孔区采用统一的平均孔径,模拟了更大尺寸的数字岩石。通过对大孔的孔隙网络(PNM)预测渗透率(即假定微孔作为固体不渗透)和DPNM预测渗透率的比较,可以看出ES3.1的大孔连通性最好,贡献渗透率的大部分,而ES6.5-1的大孔连通性最差,在整个流动方向上几乎不连通。

岩石灰度图像被导入到AVIZO中,并重新采样以产生分辨率降低的图像。这是通过将分辨率减半(即将原始图像体素大小增加一倍)并进一步将其减少两倍(即将原始体素大小增加四倍)来实现的。在重采样过程中,每个新体素的灰度值是其对应区域内所有原始体素灰度值的加权平均值,使用Lanczos插值^[85,86]方法计

算。为了保持一致性,对原始图像和重采样图像都采用相同的阈值进行分割,微孔隙中的平均孔隙率由公式 2.1 计算,图 3.7 为 3 个数字岩石的重采样示意图。直接观察表明,一些小的大孔随着体素分辨率的降低而消失,大孔的形状变得不那么明显,在 ES6.5-1 中,紫色微孔远比绿色大孔丰富,这种差异解释了 ES6.5-1 的渗透率极低,主要受微孔渗透率控制。

表 3.6 分辨率研究中使用的 3 种数字岩石的图像尺寸及其渗透率值

Table 3.6 The image sizes and their permeability values of the three digital rocks used in the resolution study

岩石样品	图像尺寸-体素数	大孔隙网络	双重孔隙网络
ES3.1	1000×1000×1001	271 mD	283 mD
ES3.6	1000×1000×1000	142 mD	170 mD
ES6.5-1	600×600×600	5 nD	8 mD

图 3.8 显示了使用 DPNM 降低图像分辨率对渗透率预测的影响。对于每一块数字岩石,预测渗透率随着图像分辨率的降低而降低,同时,大孔隙体积分数减小,微孔隙体积分数增大。这一趋势在 ES3.6 中最为明显,渗透率从 3.6 μ m 分辨率下的 170 mD 显著下降到 14.4 μ m 分辨率下的 14 mD。相比之下,ES3.1 和 ES6.5-1 的变化幅度则相对较小。可见,在 ES3.1 和 ES6.5-1 中,Lanczos 插值方法对保持大孔和微孔的边界起着至关重要的作用。然而,在 ES3.6 中并没有达到同样的效果。虽然我们已经分析了大孔和微孔的孔径分布,以及大孔和微孔之间的界面区域,但确定确切的原因仍然具有挑战性。在回顾三种数字岩石之间的差异时,我们发现主要区别在于它们的大孔连通性和体积分数。ES3.1 的大孔隙连通性最好,其渗透率主要由大孔隙连通性决定,而 ES6.5-1 大孔隙体积分数最低,渗透率以微孔为主。ES3.6 介于这两种情况之间。基于我们的初步研究,我们假设当大孔隙与丰富的微孔隙连通良好或连通不良时,图像分辨率的影响最小。这为平衡视域和图像分辨率提供了有用的指导。最后,为了更深入地理解图像分辨率对预测渗透率的影响,还需要利用各种图像特征和参数进行聚类和相关性分析,以开展进一步的研究。

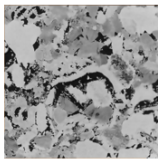
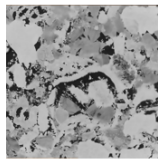
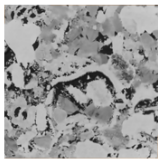
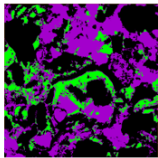
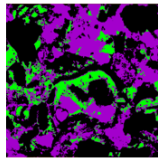
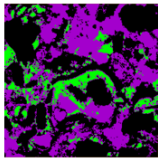
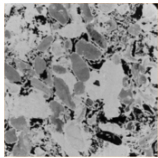
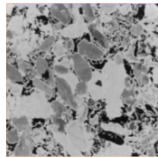
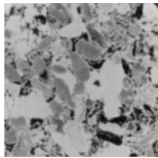
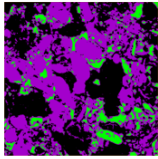
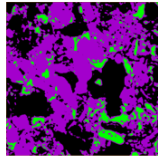
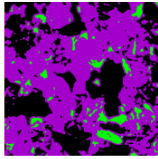
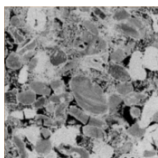
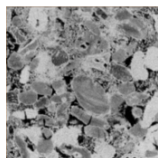
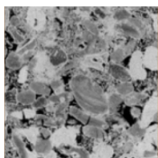
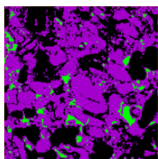
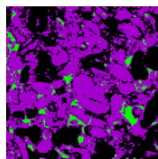
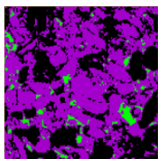
样品编号	体素尺寸 (μm)	3.1	6.2	12.4
ES3.1	灰度图像			
	分割图像			
ES3.6	体素尺寸 (μm)	3.6	7.2	14.4
	灰度图像			
	分割图像			
ES6.5-1	体素尺寸 (μm)	6.5	13	26
	灰度图像			
	分割图像			

图 3.7 ES3.1、ES3.6 和 ES6.5-1 这三块数字岩石的灰度图像重采样示意图，在分割图像中，固体、大孔和微孔分别为黑色、绿色和紫色

Fig.3.7 Schematic of the resampling of the grayscale images of the three digital rocks, namely, ES3.1, ES3.6, and ES6.5-1. In the segmentation, solid, macropores, and microporosity are in black, green, and purple, respectively

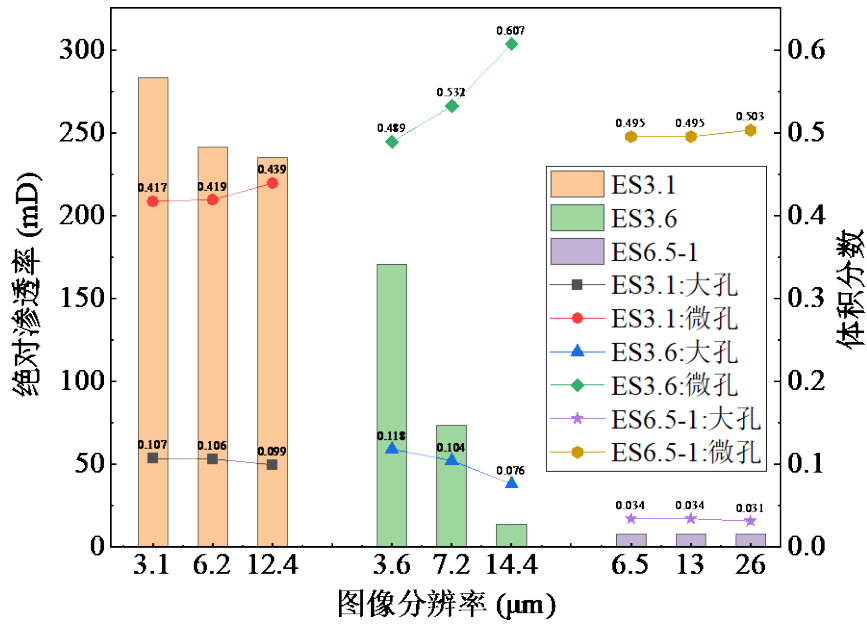


图 3.8 研究了图像分辨率对 ES3.1、ES3.6 和 ES6.5-1 这 3 组数字岩石渗透率（DPNM 预测）和分割大孔、微孔体积分数的影响

Fig.3.8 The impact of image resolution on the permeability (predicted by the DPNM) and the volume fractions of segmented macropores and microporosity for the three digital rocks, namely, ES3.1, ES3.6, and ES6.5-1

3.5 双重孔隙网络模型优化研究

基于 3.3.1 小节中，我们已经证明 DPNM 在处理微孔隙中非均质平均孔径时渗透率预测效果较差。为了解决这个问题，我们提出了两种方法来提高 DPNM 的性能。假设已知微孔隙体素平均孔径的空间分布，我们可以不使用公式 2.9，而是通过对一个微孔单元所包含的体素的平均孔径的算术平均来计算每个微孔单元的平均孔径：

$$\bar{r}_i = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} r_k}{N_i} \quad (3.8)$$

值得注意的是，基于上述公式计算微孔单元平均孔径，DPNM 预测的 205 mD 渗透率略高于参考模型预测的渗透率 174 mD，这可以用微孔单元平均孔径和渗透率的分布来解释。如图 3.9(a)所示，DPNM 中平均孔径的累计分布向右偏移，表明与参考模型中的微孔体素相比，平均孔径的估计过高。因此，这会导致对微孔渗透率的高估，如图 3.9(b)所示。

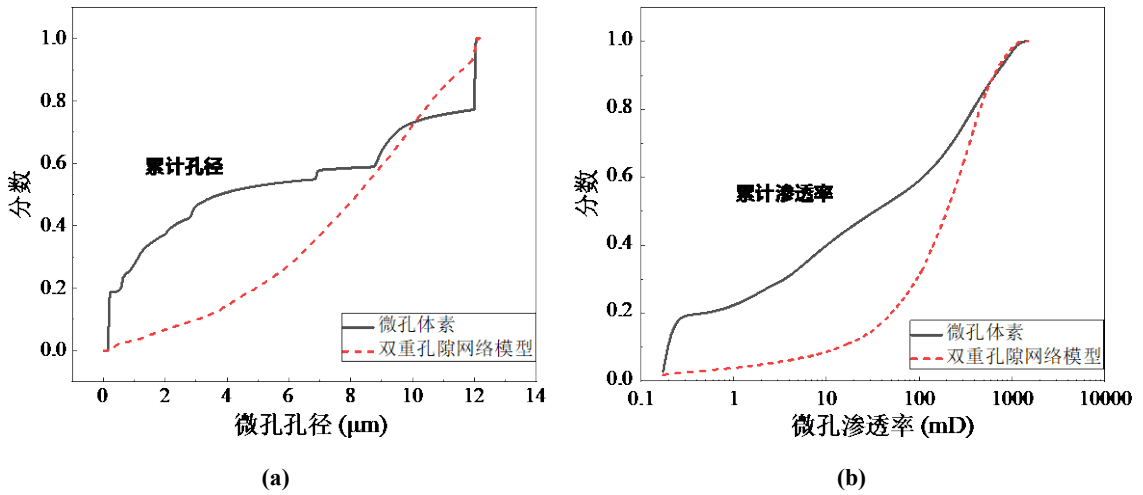


图 3.9 ES6.5-2 岩样中微孔体素，双重孔隙网络模型微孔单元的累计分布曲线：(a) 平均孔径累计分布曲线；(b) 渗透率累计分布曲线。每个微孔网格或单元的平均孔径由公式 3.8 计算
Fig.3.9 (a) Cumulative distributions of the mean pore sizes and (b) the cumulative distributions of the permeability of the original microporosity voxels and the watersheds in the DPNM for ES6.5-2.

The mean pore size of each microporosity watershed is calculated by Eq. 3.8.

第二种方法是基于 Wang^[13]等人提出的基于侵入压力的岩石分类来计算微孔单元的平均孔径。根据 14、80、180、220、400 kPa 这 5 个入口压力值，得到 5 种亚分辨孔隙岩石类型。图 3.10 显示了 ES6.5 截面上的 5 个微孔区域。根据 Young-Laplace 方程，对应的孔隙半径分别为 0.24、0.44、0.54、1.21 和 6.9 μm。通过使用 PoreSpy 开源软件，我们可以提取出 5 个微孔区域的 5 个单独的孔隙网络，然后将它们合并在一起形成微孔隙的孔隙网络，进一步对微孔孔隙网络和大孔孔隙网络进行基于图像的合并，形成双重孔隙网络。利用提取的双重孔隙网络和 5 个微孔平均孔径的分布，DPNM 预测 ES6.5-2 的渗透率为 112 mD。由于采用的岩石分型方法避免了在 DPNM 中对微孔单元平均孔径的逼近，因此预测精度有了显著提高。图 3.11(a)为 DPNM 中原始微孔体素和微孔单元平均孔径的累计分布。综上所述，原始微孔隙体素的平均孔径的连续分布近似于五个离散的平均孔径。5 个离散的平均孔径与微孔平均孔隙率（图 3.5(a)）结合，得到了 DPNM 微孔区渗透率的累计分布如图 3.11(b)所示，与原始微孔体素的累计分布相匹配，远好于图 3.6(b)。

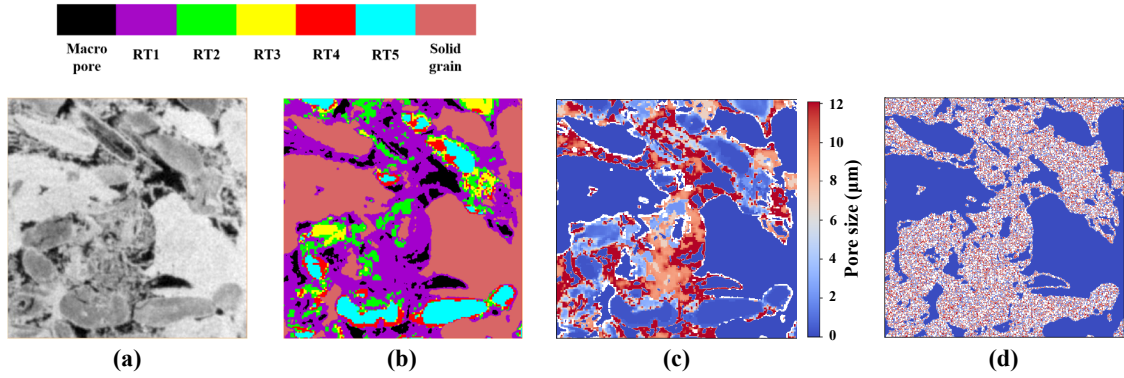


图 3.10 基于侵入压力的岩石类型示意图：(a) ES6.5-2 的 400×400 灰度切片；(b) 5 个微孔区域，大孔和固体，RT1 ~ RT5 为侵入毛细管压力最低到最高的微孔区域；(c) 基于侵入毛细管压力的微孔孔径；(d) 随机分布的微孔孔径

Fig.3.10 Schematic of the entry-pressure-based sub-rock typing: (a) A 400×400 grayscale slice of ES6.5-2; (b) The five sub-rock types of microporosity, the macropores, and the solid, RT1 to RT5 represent lowest to highest entry-capillary-pressure microporosity regions; (c) Microporous pore size based on entry-capillary-pressure; (d) Randomly distributed microporous pore size

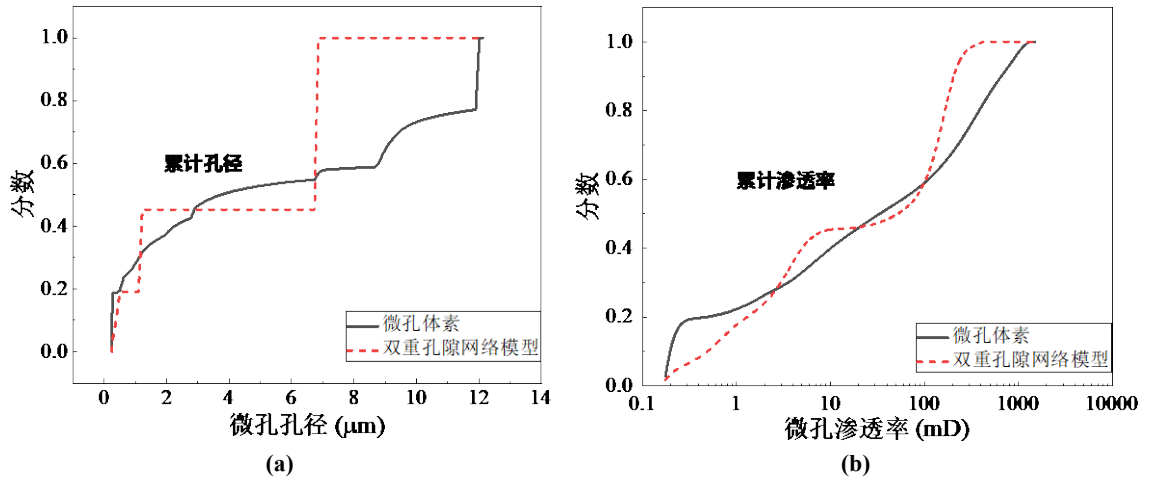


图 3.11 ES6.5-2 岩样中微孔体素，双重孔隙网络模型微孔单元的累计分布曲线：(a) 平均孔径累计分布曲线；(b) 渗透率累计分布曲线，基于侵入压力的岩石分类用于表征微孔的平均孔径

Fig.3.11 (a) Cumulative distributions of the mean pore sizes and (b) the cumulative distributions of the permeability of the original microporosity voxels and the watersheds in the DPNM for ES6.5-2.

The entry-pressure-based sub-rock typing is used to characterize the mean pore sizes of microporosity.

在多尺度多孔介质中，微孔孔隙率相对容易表征^[14,70,87]。然而，获得微孔平均孔径的三维图像是昂贵的，甚至是具有挑战性的，这可能是令人望而却步的。另一种方法是使用 MIP 或核磁共振（NMR）T2 谱来获得平均孔径的分布，这些平均孔径可以分配给微孔隙体素。为了验证这种方法，我们将 ES6.5-2 的平均孔径作为假设的 MIP 数据，然后将其随机分配给 10 个随机生成的微孔孔径分布（图 3.10(d)）。结果发现，预测的平均绝对渗透率为 45 mD，偏差为 10 mD。如图 3.10(b) 所示，低估的原因是随机分布忽略了平均孔径的相关长度，这表明结合平均孔径的分布和相关长度可以提高预测性能。

3.6 本章小结

本章主要探究双重孔隙网络模型对绝对渗透率和地层因子的预测能力，以微孔区未粗化的孔隙网络-连续介质为参考模型，对比计算结果，并分析当微孔采用非均质孔径分布时，双重孔隙网络模型预测绝对渗透率能力差的原因。进而，针对双重孔隙网络模型预测能力的优化进行了研究，提出了提高渗透率预测效果的两种微孔单元平均孔径计算方法。同时，基于双重孔隙网络模型还探究了图像分辨率对渗透率计算的影响。基于上述研究，得出以下主要结论：

（1）DPNM 和 PNCM 均能较好地预测微孔为均质的平均孔径和非均质微孔孔隙率的多尺度数字岩石的绝对渗透率和地层因子。在这种情况下，DPNM 由于其计算效率而优于 PNCM。

（2）对于微孔区为非均质平均孔径和孔隙率的多尺度数字岩石，PNCM 在预测绝对渗透率方面仍然是准确的。相比之下，DPNM 明显低估了绝对渗透率超过一个数量级，较差的性能源于微孔单元孔径的平均，大大低估了微孔单元的实际平均孔径。为了提高 DPNM 的预测精度，我们测试了两种方法，包括微孔单元内平均孔径的算术平均和基于侵入压力的岩石分类。这两种方法都能显著提高双重孔隙网络模型对绝对渗透率的预测性能。

（3）针对多尺度数字岩石，适当的图像下采样插值方法可以有效地保留大孔隙和微孔隙的边界。当大孔隙连通性良好或连通不良且微孔隙丰富时，图像分辨率对渗透率预测的影响最小。

4 碳酸盐岩毛管力与相渗曲线数值研究

碳酸盐岩储层因其分布广泛、孔隙度较高、封存潜力巨大,被认为是二氧化碳地质封存的理想场所。然而,碳酸盐岩复杂的孔隙结构和强烈的非均质性使得二氧化碳在其中的运移和封存机制十分复杂。因此碳酸盐岩微观气水流动研究对于二氧化碳地质封存具有重要意义^[88-90],为揭示二氧化碳运移机制、评估封存潜力、以及优化注入方案等提供依据。

本章主要基于碳酸盐岩毛管力与相渗曲线开展数值研究。首先,介绍本章所开发的准静态两相渗流模型,基于该模型开展准静态两相流动模拟。针对第三章中改进的双重孔隙网络模型验证其对准静态两相渗流参数的预测能力,即对于毛细管力和相渗曲线的预测能力。然后,基于验证后的双重孔隙网络模型,提取更大尺寸的岩心图像(第二、三章模型对比中 DPNM 具有计算高效的优势),开展全岩心模拟,探究微孔区非均质性对毛细管力和相渗曲线的影响。最终应用于二氧化碳毛细管力圈闭与相渗曲线的研究,探究影响二氧化碳毛细管力圈闭封存的参数,如接触角和初始含气饱和度等,进一步为二氧化碳圈闭封存研究提供理论基础。

4.1 准静态两相渗流模型介绍

二氧化碳毛细管力圈闭封存过程中,探究二氧化碳和水两相流动特性至关重要,其中毛细管力曲线、相对渗透率曲线是评估微观气水两相流动特性的重要参数。许多学者做了很多研究,常用的研究方法^[2]包括实验方法、数值模拟和理论分析,通过实验手段进行测量,实验室尺度难以反映实际地质条件,并且实验通常在较短时间内完成,难以反映长期封存过程中的动态变化。而理论模型通常基于高度简化的假设(如均质介质、稳态流动等),难以反映实际复杂条件。适用范围有限,解析解通常只适用于简单几何形状和边界条件,难以处理非线性问题,即两相流动中的非线性效应(如毛细管力、相对渗透率变化)难以通过理论分析完全描述。

因此,为了更好的探究这一问题,本节开发了双重孔隙网络准静态两相渗流模型,使用 Katz-Thompson 公式(公式 2.2)来计算微孔单元的渗透率、Van Genuchten 模型描述毛细管力和相对渗透率曲线、Land 模型和 Killough 模型描述非完全饱和情况下渗吸导致的毛细管力和相对渗透率曲线滞后、Leverett J 函数来描述非均质微孔区中毛细管力曲线的变化。通过耦合大孔孔隙网络和微孔单元的流动模型,构建大孔-大孔、大孔-微孔、微孔-微孔间的侵入模式,实现了碳酸盐岩多尺度孔隙结构的准静态两相流动模拟。

通过将二氧化碳注入储层中,此时发生初次驱替(Primary Drainage),当二氧

化碳在储层中发生羽流迁移时，其尾部将会被残留的润湿水相渗吸（Main Imbibition）圈闭，因此对这两个过程的探究至关重要。由于双重孔隙网络模型将微孔区域平均化为微孔单元，所以需要将微孔区的岩石物理性质作为参数输入，从而考虑微孔区对流动的影响。类比第三章中单相流动求解过程，微孔区需要计算的参数有，孔隙度（ ϕ ），渗透率（ k ），平均孔径（ r ），地层因子（ F ），毛管力曲线（ P^c-S^w Curve），相对渗透率曲线（ K_r-S^w Curve）。在驱替过程中，非润湿相的压力会逐步增加，通过计算每个毛细管压力下的大孔孔网和微孔单元的饱和度之和得到岩心的饱和度，从而得到毛细管力曲线。通过计算不同孔隙区域之间的润湿相和非润湿相的水力传导系数，结合单相不可压缩流动控制方程组装矩阵，最后通过达西方程求解表观渗透率，得到不同饱和度下的相对渗透率曲线。

4.1.1 初次驱替过程中的模型设置

（1）可分辨孔隙中的初次驱替

1）理想化孔隙单元

理想化孔隙单元，即双重孔隙网络中孔隙体形状和喉道的截面形状取决于所研究的流动和传输过程的类型，因为本构关系和局部物理规则依赖于所使用的理想孔隙单元^[91]。真实的岩石内部结构都是非均质的，不规则的孔隙和喉道结构使得流体渗流过程中，尤其是多相流驱替过程中允许角隅流动的存在，从而更能准确的模拟喉道中残余状态润湿相和非润湿相的变化，因此对于第三章中单相流动中球形孔隙的假设并不完全适用于此处两相流动的研究。如图 4.1 所示，根据截面的形状因子将复杂的可分辨孔隙结构简化为三种等截面的直管，即三角形截面管，正方形截面管和圆形截面管。我们根据 Mason 和 Morrow^[92] (1991) 的形状因子定义：

$$G = \frac{A}{P^2} \quad (4.1)$$

其中， A [m^2] 为孔隙的横截面积， P [m] 为孔隙的周长。

注意，正如单相流动模拟一样，没有对孔喉分配任何体积。它们主要用于解释相邻孔隙体之间的流动阻力，所以在孔隙度的标定中没有考虑。此外，孔喉尺寸对于决定非润湿相在孔隙中的捕获至关重要。

由于真实的岩石内部孔隙非均质性较强，孔隙结构复杂，两相流动中单纯的采用第三章中球形孔隙的假设不是很适用，而采用图 4.1 中三种情形的孔隙截面形状简化，能够更加真实的反映多孔介质内部孔隙的真实形态。并且，对于下文中各种渗流参数的计算，如侵入压力、不同孔隙之间的水力传导系数以及相对渗透率曲线的计算更加精确。

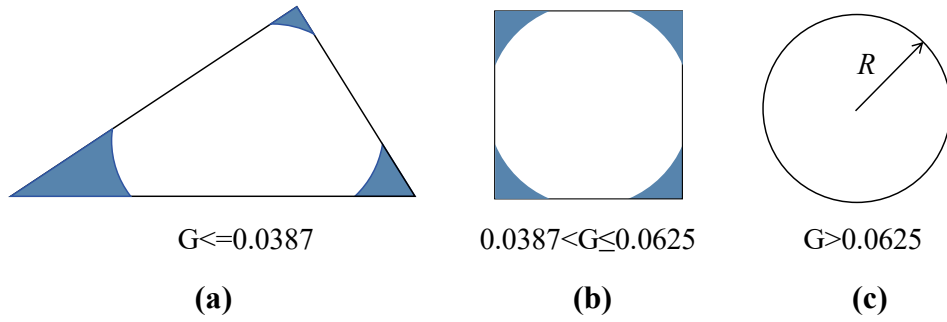


图 4.1 三种理想化孔隙单元的横截面示意图及其形状因子范围，蓝色表示润湿相

Fig.4.1 Schematic cross-section of three idealized pore elements and their shape factor ranges, with blue indicating the wetting phase

2) 孔喉侵入压力

不同截面形状的孔隙单元，在驱替时其内部流体的分布状态不同，如图 4.1 所示，对于圆形孔喉截面，其界面不存在水膜，仅允许单相流体存在。因此在被侵入后，单个孔隙中的非润湿饱和度为 1。而对于截面为多边形的孔喉，在被侵入后其角隅可能被润湿相占据，形成水膜，如图 4.1(a)(b)所示。在驱替过程中，不同截面形状的孔喉侵入压力采用 Young-Laplace 方程进行计算：

$$P_{entry}^c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (4.2)$$

其中， σ 为界面张力， θ 为接触角， r 为孔喉内切圆半径（参考文献^[33]中驱替模拟时采用内切半径效果更好）。

对于截面为多边形的孔喉，例如图 4.1(a)，其侵入压力和内部非润湿相流体横截面积计算采用 MS-P 理论，具体计算过程参考^[91]（Qin et al., 2019）。

3) 水力传导系数

为了计算润湿相和非润湿相流体随饱和度变化的相对渗透率曲线，类比第三章中绝对渗透率的求解过程，需要计算不同侵入状态、截面形状和饱和度下孔隙体和孔喉的水力传导系数。如果一个孔隙被非润湿相或润湿相完全填充，水力传导系数由 Patzek and Kristensen^[93] (2001a)给出：

$$g = \begin{cases} 0.6GS^2 & \text{三角形} \\ 0.5632GS^2 & \text{正方形} \\ 0.5GS^2 & \text{圆形} \end{cases} \quad (4.3)$$

当一个孔隙同时被非润湿相和润湿相所占据，对于润湿相和非润湿相的水力传导系数应分别计算，具体计算过程参考^[91]（Qin et al., 2019）。

当上述孔喉中润湿相和非润湿相水力传导系数计算完成后，类比第三章中图

3.1, 对孔隙体 i 和 j 以及相连的孔喉 ij 采用调和平均计算水力传导系数:

$$K_{ij} = 1 / \left(\frac{l_i}{2g_i} + \frac{l_j}{2g_j} + \frac{l_{ij}}{g_{ij}} \right) \quad (4.4)$$

其中, l 为长度[m], g [$\text{m}^4/\text{Pa}\cdot\text{s}$]为水力传导系数, 然后基于达西方程计算出润湿相和非润湿相的渗透率。

(2) 亚分辨微孔单元中的初次驱替

1) 毛管力曲线

针对微孔单元毛管力和饱和度曲线的计算, 首先, 基于实验或数字岩心重构技术获得亚分辨孔隙相关物理参数, 例如孔径分布和孔隙率分布等。然后基于传统孔隙网络模型对微孔区进行两相流动模拟得到毛管力曲线和相渗曲线。采用经典的气水两相流动 van Genuchten 经验模型对微孔区毛管力曲线进行拟合:

$$S_e^w = \left[1 + (ah^c)^N \right]^{-M} \quad (4.5)$$

其中, $a[1/L]$ 是与侵入压力水头的倒数相关的参数, h^c 是毛管力水头, N 是一个与孔径分布有关的无量纲参数, M 通常用 N 表示, 即 $M = 1 - 1/N$, S_e^w 为结合岩心束缚饱和度和真实饱和度归一化计算得到的有效饱和度, 表达式为:

$$S_e^w = \frac{S^w - S_i^w}{1 - S_i^w} \quad (4.6)$$

其中, S^w 为岩心含水饱和度, S_i^w 为束缚水饱和度, 即初次驱替完成后残留在岩石内部的润湿相饱和度。

对于微孔区分布较为均质的情况下, 根据公式 4.5 拟合得到的相关参数代入微孔单元中进行模拟。而针对微孔区非均质情况下, 可以将基于上述公式模拟出来的微孔区毛管力曲线作为参考值。然后通过 Leverett J 公式作为标定方程计算非均质微孔单元的毛管力, 标定方程表达式为:

$$P^c = P_{ref}^c \left(\frac{k_{ref}}{k} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ref}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.7)$$

其中, P_{ref}^c 、 k_{ref} 、 ε_{ref} 为参考的毛管力、渗透率和孔隙率数值, P^c 、 k 、 ε 为通过参考值换算得来的微孔单元的毛管力、渗透率和孔隙率。微孔单元的渗透率和孔隙率的计算过程参考 2.2 小节。

针对毛细管力曲线还有两个重要的参数, 即侵入压力和逾渗阈值压力^[94]。由于 van Genuchten 模型从图 1.9(b)可以看出, 该函数是连续的, 因此在本文中参考文献中实验和模拟数值, 将润湿相饱和度为 0.98 时对应的毛管力设置为侵入压力,

即该饱和度下非润湿相开始进入微孔单元 (VG 经验模型中 a 与侵入压力水头的倒数相关)。而逾渗阈值压力, 即从非润湿相开始侵入到到达与微孔单元相连的下一个单元界面时的毛细管力, 根据微孔区两相流动模拟得到的逾渗阈值压力, 然后整个微孔区所有同类单元采用同样的逾渗阈值压力。一般来说, 逾渗阈值压力大于侵入压力, 因为当非润湿相侵入微孔单元后, 并不一定已经突破该单元形成连通流动路径, 通常增加压力才能突破。侵入压力和逾渗阈值压力示意图如图 4.2 所示。

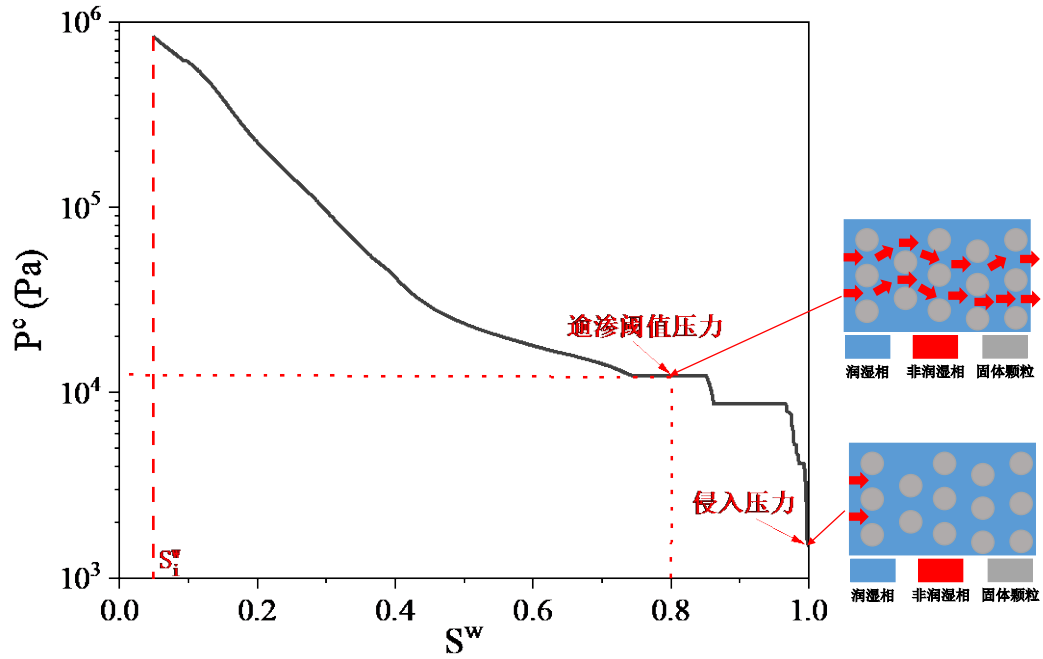


图 4.2 侵入压力和逾渗阈值压力示意图

Fig.4.2 Schematic diagram of entry pressure and percolation threshold pressure

2) 相对渗透率曲线

基于 van Genuchten 模型拟合相渗曲线的表达式为^[51]:

$$k_{rel}^w(s_e^w) = (s_e^w)^\kappa \left[1 - (1 - s_e^{w(1/M)})^M \right]^2 \quad (4.8)$$

$$k_{rel}^n(s_e^w) = (1 - s_e^w)^\varsigma \left[1 - s_e^{w(1/M)} \right]^{2M} \quad (4.9)$$

其中, k_{rel}^w 和 k_{rel}^n 分别为润湿相和非润湿相渗透率, κ 是一个与迂曲度相关的孔隙连通性参数, 可能为正值, 也可能为负值, ς 是非润湿相的孔隙连通性参数。值得注意的是, 计算出来的渗透率都做了归一化处理, 因此得到的渗透率数值都是相对于驱替起点和终点的润湿相和非润湿相的相对渗透率。

3) 水力传导系数

基于上述 van Genuchten 模型拟合出来的毛管力和饱和度曲线, 然后根据该曲

线通过公式 4.8 和 4.9 可以拟合出不同饱和度下两相的相对渗透率, 结合 Katz-Thompson 公式计算出来的微孔单元绝对渗透率可以得到微孔单元的真实渗透率, 最后通过第 3.1 小节中表 3.1 中的微孔单元水力传导系数的公式计算得到水力传导系数, 然后类比公式 3.2 调和平均得到两相的水力传导系数。之后结合大孔孔网可以得到整个双重孔隙网络的润湿相和非润湿相的水力传导系数, 类比 3.1 节中质量守恒方程求解压力矩阵, 基于达西方程可以求得不同饱和度下两相的渗透率, 最终得到相对渗透率曲线。

(3) 大孔与微孔区界面处的初次驱替

类比 3.1 小节中图 3.1, 两相流动中双重孔隙网络也是由大孔-大孔, 大孔-微孔, 微孔-微孔三种连接关系, 而针对大孔和微孔连接时, 大多是由大孔侵入到微孔单元, 但是当大孔区域通过微孔单元连通时, 也会存在由微孔单元侵入到大孔中的模式。对于大孔侵入到微孔单元, 毛管力大于侵入压力才会发生, 而对于微孔侵入到大孔则需毛管力大于逾渗阈值压力非润湿相才会侵入大孔。

在计算大孔-微孔连接被侵入后, 基于 4.1.1 中的 (1) 和 (2) 小节分别求出大孔和微孔各自的水力传导系数, 然后基于 3.1 小节中来调和平均计算得到水力传导系数。

基于双重孔隙网络进行准静态两相流动模拟, 通过设置模型进口和出口处压力边界条件, 通过逐步提高进口压力, 使得非润湿相逐渐侵入实现岩心驱替模拟, 初次驱替计算的具体流程如下:

- 1) 初始化计算网格, 设定模型进口和出口处的压力边界条件, 假定润湿相完全占据除进口边界以外的大孔和微孔单元, 而进口单元则被非润湿相占据;

- 2) 准静态流动下是毛管力为主导, 粘性力忽略。因此查找所有与非润湿相侵入的大孔和突破的微孔单元相连的喉道, 由于喉道主要是提供流动阻力, 所以最大喉道尺寸代表侵入压力最小的喉道, 而由微孔单元侵入大孔则由逾渗阈值压力来判断;

- 3) 比较毛管力与最小侵入压力, 若毛管力大于侵入压力则继续进行下述步骤, 若否则终止步骤并计算饱和度和相对渗透率等参数;

- 4) 将侵入的孔隙和喉道做出标记, 防止重复操作出现错误;

- 5) 从进口和出口分别检索与其相连的非润湿相占据和润湿相占据的孔喉单元, 未被检索到的孔喉标记为圈闭, 不再参与后续的侵入判断循环, 继续推进非润湿相侵入步骤 2);

- 6) 计算模型总饱和度和相对渗透率;

- 7) 判断非润湿相侵入压力和束缚饱和度是否达到初始的设定值, 若达到则终止计算, 若未达到, 继续重复上述侵入操作步骤, 直到达到设定值。

4.1.2 主渗吸过程中的模型设置

(1) 可分辨孔隙中的主渗吸

1) 活塞式驱替

润湿相驱替非润湿相的渗吸过程中, 孔喉内的润湿相流动模式可分为图 4.3 中的活塞运移和角膜填充两种。如图 4.1 所示, 圆形截面的孔喉中不存在角膜, 而正三角形和正方形角落里存在润湿相残留角膜。因此在圆形截面孔喉中仅存在活塞驱替, 侵入压力采用公式 4.2 计算, 对于截面为三角形和正方形的孔喉则需要考虑角膜填充, 其发生活塞驱替的侵入压力采用 MS-P 理论进行计算, 具体计算细节参考^[91] (Qin et al., 2019)。

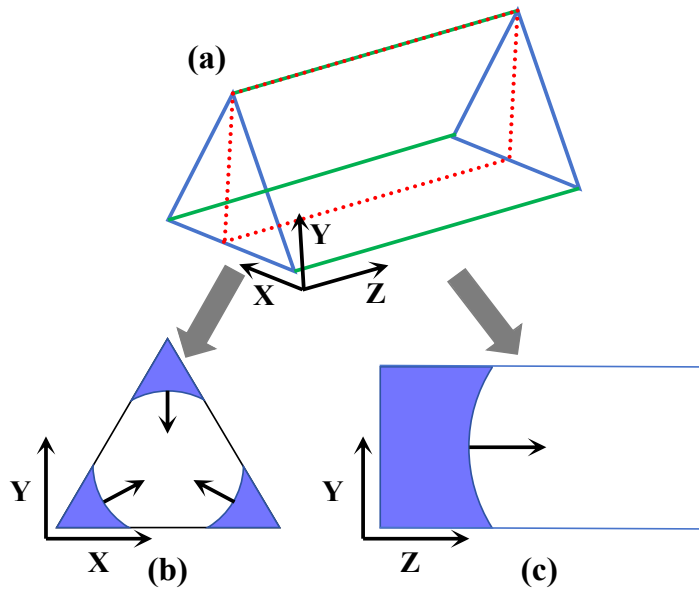


图 4.3 (a) 截面为正三角形的孔喉单元; (b) 角膜填充; (c) 活塞驱替

Fig.4.3 (a) The pore throat element is regular triangle section; (b) Arc menisci (AMs) filling; (c) Piston displacement

值得注意的是, 活塞驱替与角膜填充之间是相互竞争的, 当角膜增大导致圈闭发生后, 活塞驱替无法再发生; 而当活塞驱替发生后直接合并并在孔喉角落累计的润湿相, 从而不用再考虑角膜填充。

2) 卡断和圈闭

在润湿相驱替非润湿相时, 随着时间的增加, 润湿相在某一孔喉单元中体积增加, 并且毛管力也相应增加, 因此导致孔喉中的角膜厚度会逐渐增加, 当任意边界上的角膜发生接触时卡断发生, 孔隙中剩余的非润湿相被圈闭, 如图 4.4(a)所示。被圈闭的非润湿相将不再参与后续的流动与传输, 图 4.4(b)以截面为三角形为示例,

探讨满足圈闭的条件：

$$b_1 + b_3 < l_{A_0 C_0} \quad (4.10)$$

$$b_1 + b_2 < l_{A_0 B_0} \quad (4.11)$$

$$b_2 + b_3 < l_{B_0 C_0} \quad (4.12)$$

其中， l 表示边长，当不满足上式中一个或多个不等式，则发生卡断并圈闭非润湿相，这部分被圈闭在孔隙中的非润湿相将不会在参与后续的流动与传输。

基于双重孔隙网络模拟中，卡断圈闭会导致大量的非润湿相残余，因此，润湿相驱替非润湿相渗吸过程发生卡断还是活塞式驱替，不仅决定了两相流动的流型，更直观的反映在两相流相对渗透率曲线特征和饱和度分布表现明显的差异^[95]。

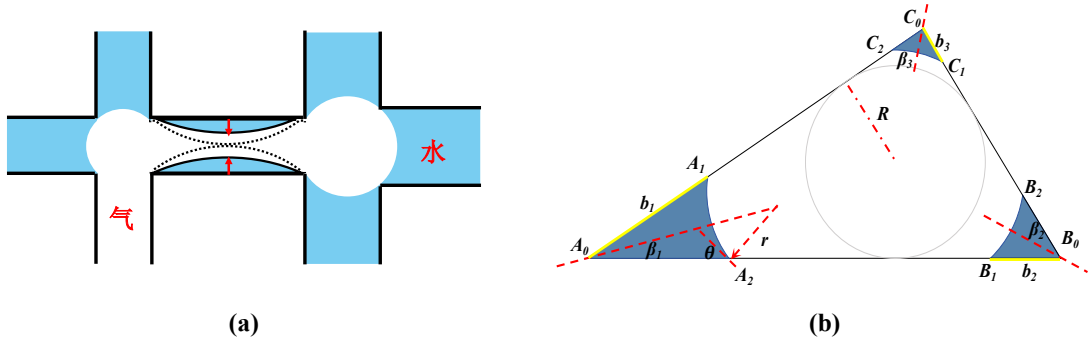


图 4.4 (a) 卡断示意图；(b) 润湿相(蓝色)分布在孔隙单元中，其截面为三角形

Fig.4.4 (a) Schematic of snap-off; (b) Wetting phase (in blue) distributions in a pore element, which has a triangular cross-section

3) 协同填充

初次驱替之后，大部分孔隙和喉道是被非润湿相填充的（考虑束缚水饱和度），当进行渗吸时，润湿相侵入某一孔隙过程，受到与其相连的充满润湿相的孔喉数量的影响，但由于难以考虑相连喉道的空间位置，使得协同填充下孔隙的侵入压力难以被确定。本文采用（Martin J. Blunt, 1998; Øren et al, 1998）^[69,96,97]提出的参数模型对侵入压力进行计算，其将相连的润湿相占据的喉道看作侵入的不利因素：

$$P^c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r + \sum_{i=1}^n C_i x_i r_i} \quad (4.13)$$

其中， r 表示内切圆半径， n 是与孔隙相连的被润湿相占据的喉道的数量， C_i 为输入参数， x_i 为 0~1 之间的随机数， r_i 为相连润湿相喉道的内切圆半径。协同填充示意图如图 4.5 所示。

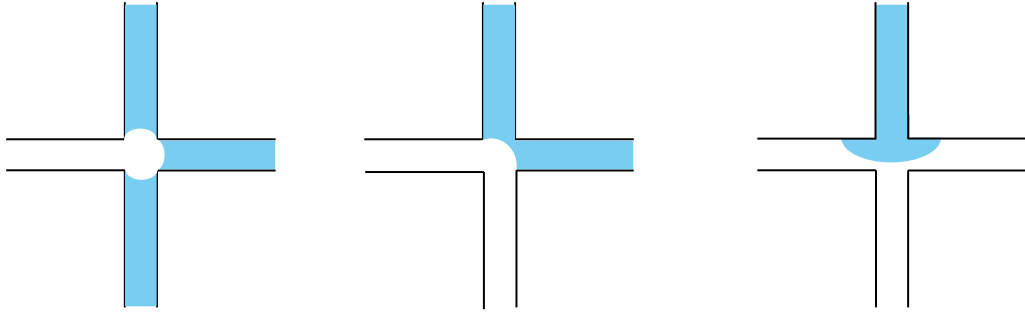


图 4.5 协同填充示意图

Fig.4.5 Schematic of cooperative filling

基于上述过程计算不同模式下孔隙侵入压力，得到不同饱和度下大孔孔隙和喉道的毛管力侵入压力，然后按照毛细管侵入压力逐步递减的顺序对于非润湿性进行驱替。类比前几小节中初次驱替过程，同样计算大孔中不同相的水力传导系数，同时进行调和平均。

(2) 亚分辨微孔单元中的主渗吸

准静态两相流动渗吸过程，由于初次驱替之后多孔介质内部存在束缚水饱和度，采用 VG 模型拟合的毛管力曲线始终在初次驱替过程的下方，即毛细管滞后现象。该现象产生原因包括非润湿相在渗吸过程中被润湿相圈闭、接触角滞后、孔隙结构不规则性、流体滞留和界面张力变化等。毛细管滞后对相对渗透率、残余饱和度和流体分布有显著影响。因此，针对亚分辨微孔单元，需要采用合适的本构方程来描述。

1) 毛管力曲线

Land (1968) ^[52]模型是一种常用于描述残余非润湿相饱和度 (Residual Non-wetting Phase Saturation) 和毛细管压力与饱和度关系的模型，特别适用于多孔介质中的两相流动问题。该模型考虑了初次驱替后残留在多孔介质内的束缚水饱和度，并且在计算渗吸过程中的毛管力曲线考虑了 4.1.2 中的 (1) 小节中润湿相对非润湿相的圈闭现象。从而可以更准确地描述初次驱替和主渗吸过程中的差异。两个过程的毛管力示意图如图 4.6 所示。

图 4.6 中可以看到初次驱替后残留的润湿相束缚饱和度 (S_i^w) 以及主渗吸后残留的非润湿相残余饱和度 ($S_r^n = 1 - S^w$)，可以看到明显的毛细管滞后现象。此时采用 VG 模型对曲线进行拟合，与初次驱替不同的是，渗吸过程归一化的有效饱和度以及基于 Land 模型表示非润湿相初始饱和度和残余饱和度的关系：

$$S_e^w = \frac{S^w - S_i^w}{1 - S_i^w - S_r^n} \quad (4.14)$$

$$S_r^n = \frac{1 - S_i^w}{1 + C(1 - S_i^w)} \quad (4.15)$$

$$C = \frac{1}{S_r^{n,\max}} - 1 \quad (4.16)$$

其中，公式中所有饱和度均为有效饱和度， C 为 Land 系数， $S_r^{n,\max}$ 为非润湿相最大残余饱和度。基于 Land 模型计算的渗吸过程的毛管力曲线如图 4.7 所示。

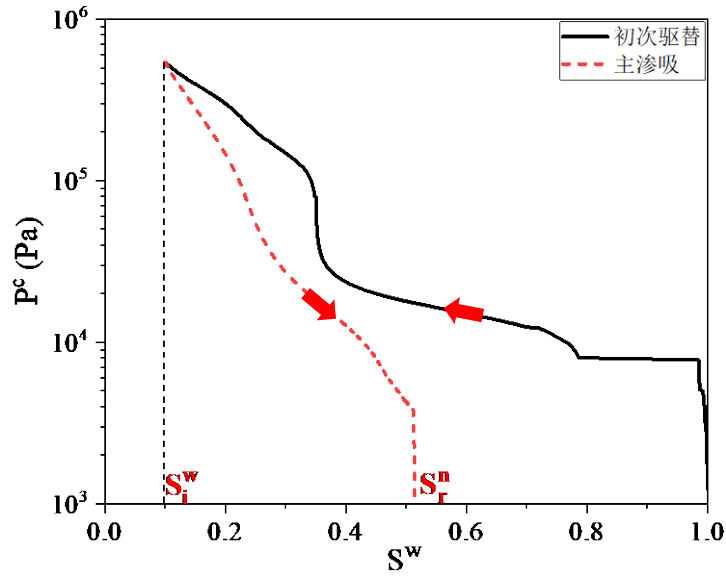


图 4.6 初次驱替和主渗吸毛管力曲线示意图

Fig.4.6 Schematic diagram of primary drainage and main imbibition capillary pressure curves

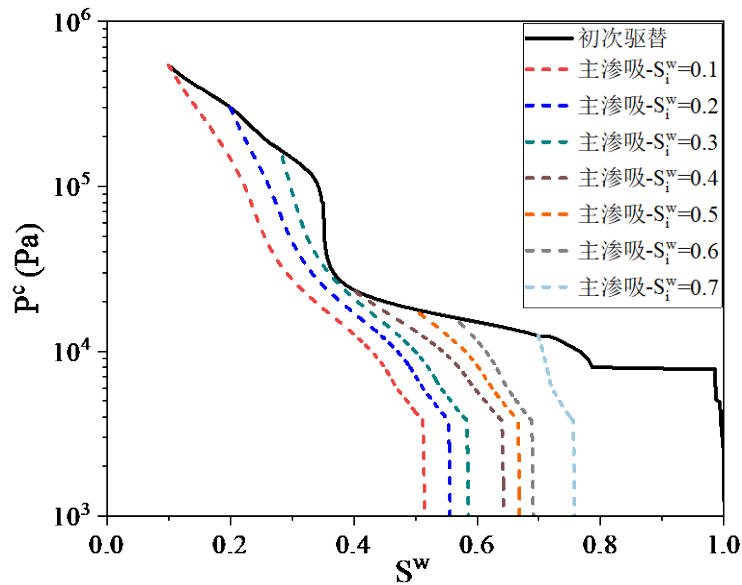


图 4.7 基于 Land 滞后模型的渗吸毛管力曲线

Fig.4.7 Capillary pressure curve of main imbibition based on Land hysteresis model

2) 相对渗透率曲线

Killough (1976)^[98]提出的相对渗透率滞后模型用来描述渗吸过程中的由于毛细管滞后现象导致相对渗透率曲线的差异。其提出了两种模型来计算非润湿相相对渗透率的中间值,即插值法和归一化法,本文采用归一化法来进行计算。Killough模型的核心思想是通过历史饱和度路径来修正相对渗透率曲线,从而描述相对渗透率滞后现象。通过实验测得的初次驱替毛管力曲线作为参考曲线,根据驱替曲线和历史饱和度路径进行修正,从而得到考虑了非润湿相被圈闭情况下的相对渗透率曲线。注意,对于润湿相和非润湿相的相对渗透率曲线,计算过程是不同的,更多具体的细节可以查看参考文献^[98]。

3) 水力传导系数

基于上述滞后模型计算得到不同饱和度下毛管力曲线和相对渗透率曲线,可以得到微孔单元的渗透率,结合 3.1 节中微孔单元水力传导系数的计算公式,得到润湿相和非润湿相的水力传导系数,并调和平均得到不同连通区域的水力传导系数,用于后续两相流的计算。

(3) 大孔与微孔区界面处的主渗吸

如 4.1.1 中的 (2) 小节中所述,当大孔被微孔单元包围依靠微孔单元连通时,流体从微孔单元能否侵入到大孔区域的判别准则为毛管力是否大于逾渗阈值压力,见图 4.2 中关于侵入压力和逾渗阈值压力的区别。渗吸过程中若润湿相无法从微孔单元侵入到大孔,则该部分非润湿相流体不再参与后续的流动与传输计算。

当大孔和微孔单元的不同饱和度下渗透率得到之后,可以计算得到大孔和微孔单元中不同相的水力传导系数,参考图 3.1 中大孔和微孔单元的水力传导系数的调和平均,计算得到大孔和微孔单元的水力传导系数,用于后续计算。

4.1.3 模型设置总结

本节中介绍了基于双重孔隙网络的准静态两相渗流模型,分别从大孔和微孔单元以及大孔和微孔单元的连接来阐述初次驱替和主渗吸过程中不同相的渗流参数的计算,即毛管力和相对渗透率曲线。同时,还考虑了初次驱替后的渗吸过程中毛细管滞后现象对微孔单元的影响,采用了经典的毛管力和相渗曲线的滞后模型来描述。最终类比单相渗透率的计算过程,基于不同两相驱替过程和不同孔隙区域之间的连接关系,对润湿相和非润湿相的水力传导系数进行调和平均,结合质量守恒方程,求解压力矩阵,通过达西方程计算得到不同饱和度下润湿相和非润湿相的渗透率。针对毛管力曲线,主要通过 Young-Laplace 方程计算,但是对于微孔单元,4.1.1 中的 (2) 小节中叙述了经典的 VG 模型来拟合微孔单元的毛管力曲线。

值得注意的是,参考第三章中用于对比参考的孔隙网络-连续介质模型,其准静态两相流动的求解思路与上述过程一样,不同的在于微孔单元其处理为连续介

质,因此提取的微孔单元的参数会有所不同,从而计算出来的毛管力和相渗曲线也会有所不同。针对双重孔隙网络计算出来的毛管力和相渗曲线,会在下一节模型验证中,基于参考模型计算出来的曲线以及参考文献中实验数据对比,来探究双重孔隙网络的预测能力,并提出优化方法。

4.2 模型验证

基于上述双重孔隙网络准静态两相渗流模型的建立,结合第三章中绝对渗透率对比结果可得,ES3.1、ES3.6、ES6.5 这三个岩样当微孔区假设为均质的平均孔径时,双重孔隙网络模型预测绝对渗透率很准确,当 ES6.5 岩样微孔区采用侵入压力计算的非均质孔径分布时,双重孔隙网络模型低估渗透率的预测。根据 3.3.1 小节中可以看到,渗透率低估的主要原因是微孔单元平均孔径的低估。

二氧化碳地质封存的实际过程中,用于封存的多孔介质岩石通常呈现复杂的孔隙结构,具有很强的非均质性。因此,本节中直接采用 ES6.5 岩样微孔区基于侵入压力计算的非均质孔径,开展双重孔隙网络准静态两相流动模拟,计算得到的毛管力曲线、相渗曲线与实验数据和参考模型进行对比验证。进一步地,基于 3.5 小节中双重孔隙网络模型的优化方法,探究是否可以改善模型对准静态两相流动渗流参数的预测能力。并且基于优化后的双重孔隙网络模型,提取更大尺寸的 ES6.5 岩样 (REV 尺寸的影响),进行后续二氧化碳毛管力圈闭封存研究。探究不同接触角和初始 CO_2 饱和度对残余 CO_2 饱和度的影响,以及基于相渗曲线研究 CO_2 的流动能力,综合毛管力和相渗曲线探究 CO_2 毛管力圈闭封存机制。

4.2.1 模型相关参数设置

基于 4.1 小节中可知亚分辨微孔单元在初次驱替和主渗吸过程中,无论采用哪种模型拟合毛管力和相渗曲线,都是基于相关模拟和实验参数拟合的。因此本文根据参考文献^[13,31,68,69]中实验和模拟的毛管力和相渗曲线,针对初次驱替过程,采用 van Genuchten 模型拟合毛管力和相渗曲线,针对主渗吸过程,采用 Land 模型拟合毛管力曲线,Killough 模型拟合相渗曲线,并且对同一类微孔单元采用相同的参数进行拟合。

基于上述过程拟合得到的微孔单元相关参数,如 N 、 M 等参数的值如表 4.1 所示。其中,微孔单元的束缚和残余饱和度根据相关实验数据来设置,侵入和逾渗阈值压力的饱和度由经验参数给出。微孔单元相关渗流参数的设置如下表 4.1 所示。

表 4.1 微孔单元渗流参数设置

Table 4.1 Seepage parameter setting of microporous units

亚分辨微孔单元	初次驱替	主渗吸
a [1/L]	$\frac{r}{2\sigma \cos \theta}$	$\frac{2.1r}{2\sigma \cos \theta}$
侵入压力 (P_{entry})	$\frac{\left(0.98^{\frac{1}{M}} - 1\right)^{\frac{1}{N}}}{a}$	
逾渗阈值压力 ($P_{percolation}$)	$\frac{\left(0.80^{\frac{1}{M}} - 1\right)^{\frac{1}{N}}}{a}$	
N	5.8	2.68
M	0.83	0.63
κ	6.32	-1.69
ζ	0.37	-0.068
渗透率 (k)	$\frac{\phi r^2}{32\tau^2}$	
孔隙率 (ε)	公式 2.1 和 2.7	

基于上述微孔单元渗流参数开展双重孔隙网络准静态两相渗流模拟。首先，基于 3.2.1 小节模型对比中 400^3 大小的 ES6.5 岩样，微孔区采用非均质孔径（基于实验^[13]得到的侵入压力计算的孔径），双重孔隙网络模型计算的毛管力和相渗曲线与实验数据和参考模型对比，探究 3.5 小节中的改进方法是否适用于两相流动。若适用，则提取更大尺寸的 ES6.5 岩样的双重孔隙网络，再次验证大尺寸的双重孔隙网络预测毛管力和相渗曲线的准确性。

4.2.2 模型对比验证

类比第三章中双重孔隙网络模型对绝对渗透率和地层因子的对比预测研究，本节首先根据参考的孔隙网络-连续介质模型探究微孔区是否需要精细表征的微孔孔径分布来计算两相渗流参数。因此，我们计算了参考模型在基于侵入压力图谱计算的微孔孔径，以及基于压汞曲线计算的微孔区三个随机分布孔径的毛管力曲线，该过程为初次驱替，如图 4.8 所示。

从图 4.8 中可以看出，当 PNCM 采用侵入压力计算得到的微孔体素孔径，如图 2.4(c)，计算结果与实验数据较为匹配。当微孔区孔径基于真实的微孔体素孔径随机分布时（图 3.10(d)），毛管力曲线非常偏离实验数据，因此，在下文验证计算

中, ES6.5 岩样微孔区均采用侵入压力计算得到的微孔体素孔径分布。

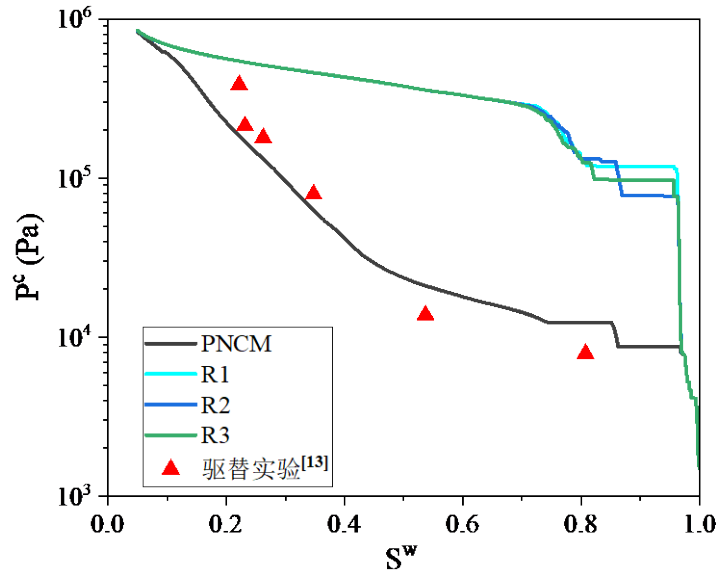


图 4.8 PNCM 计算的毛管力曲线与初次驱替实验数据, R1、R2、R3 为基于压汞曲线计算得到的三个随机分布的微孔孔径

Fig.4.8 The capillary pressure curve calculated by PNCM and the primary drainage experiment data, R1, R2 and R3 are three randomly distributed micropore sizes calculated based on the MICP^[31]

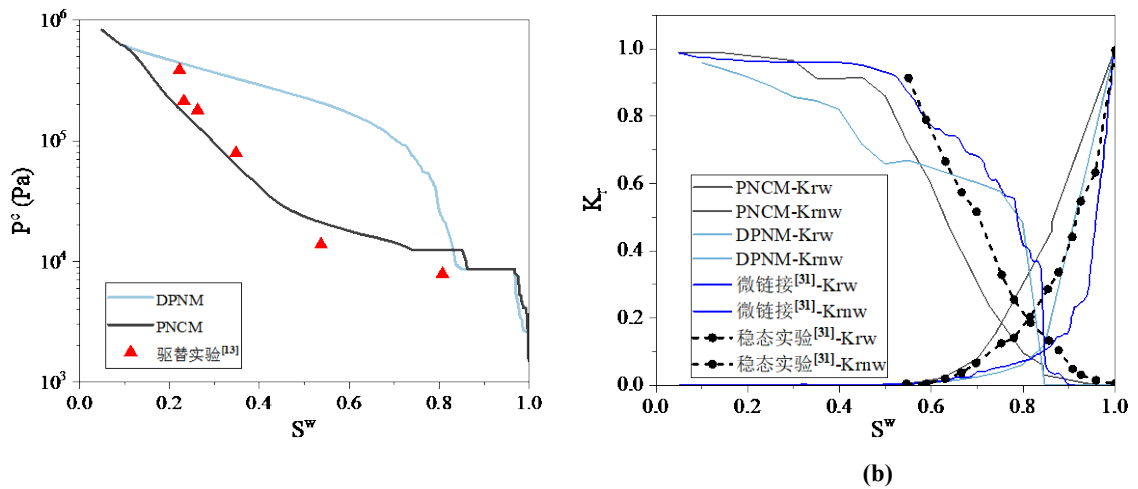


图 4.9 (a) DPNM 和 PNCM 计算的毛管力曲线以及初次驱替实验数据; (b) DPNM 和 PNCM 计算的相对渗透率曲线, 微链接为参考文献中^[31]模拟的双重孔隙网络数据, 以及稳态实验测得的相渗曲线

Fig.4.9 (a) The capillary pressure curves calculated by DPNM and PNCM and primary drainage experiment data; (b) The relative permeability curves calculated by DPNM and PNCM, the micro-links are the simulated dual pore network data in the references, and the relative permeability curves measured by steady-state measurements

参考表 3.2 和图 3.2 中 400^3 大小的 ES6.5 岩样, 分别计算 DPNM 和 PNCM 的毛管力和相渗曲线, 通过与实验数据(同一类岩石)对比, 探究模型预测的准确性。注意此处 DPNM 和 PNCM 微孔单元孔径的平均都采用公式 2.9 计算。计算结果如图 4.9 所示。

如图 4.9(a)所示, 根据第三章中图 3.6(a)可以看到, 采用公式 2.9 得到的微孔单元平均孔径普遍小于体素孔径, 因此采用 DPNM 计算的毛细管力普遍大于实验和参考模型数据。从相渗曲线图中可以看出, PNCM 计算的润湿相 (K_{rw}) 和非润湿相 (K_{rnw}) 相对渗透率曲线与稳态法实验测得的数据较为匹配, 但曲线交点的位置与实验数据有偏差, 我们猜测与微孔区束缚水饱和度有关, 后续有相关探究。而 DPNM 预测的相渗曲线与文献中微链接预测的曲线较为接近, 曲线交点均低于实验数据, 并且与毛管力曲线一样, 均与实验数据偏差较大。

针对上述双重孔隙网络预测的低估, 基于 3.5 小节提出的两种提高双重孔隙网络预测能力的微孔单元平均孔径的计算方法, 将这两种平均方法计算的微孔单元平均孔径用于双重孔隙网络毛管力和相渗曲线的计算, 计算结果如图 4.10 所示。

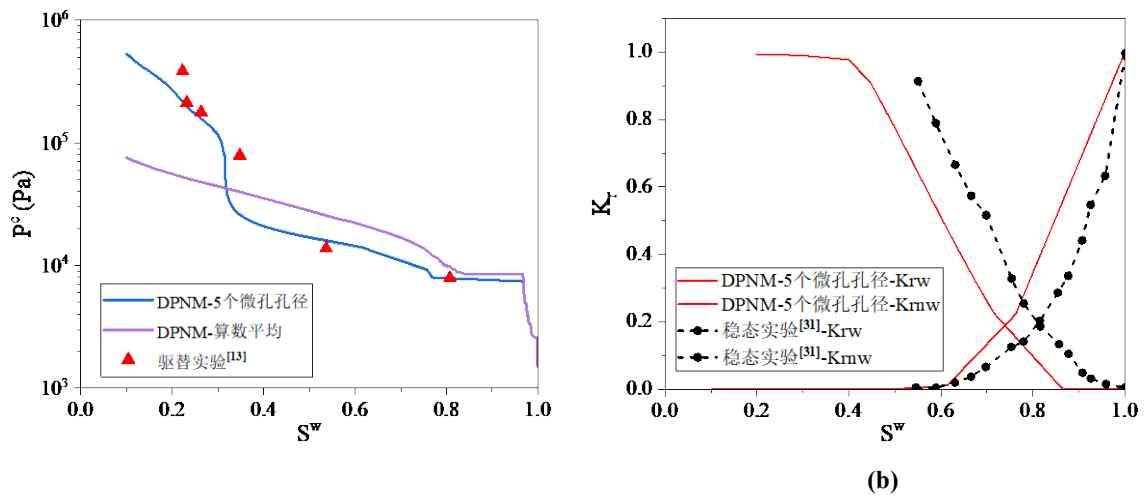


图 4.10 (a) 微孔单元两种平均孔径计算方法计算的 DPNM 的毛管力曲线和初次驱替实验数据; (b) 5 个微孔孔径计算的 DPNM 的相渗曲线和稳态法测得的相渗曲线

Fig.4.10 (a) The capillary pressure curves of DPNM calculated by two microporosity mean pore size calculation methods and the data of primary drainage experiment were obtained; (b) Relative permeability curves of DPNM calculated from 5 microporous mean pore sizes and measured by steady-state measurements

从上图 4.10(a)中可以看出, 当微孔单元采用算数平均(公式 3.8)方法得到平均孔径时, 同等润湿相饱和度下计算得到的毛细管力偏小, 因为从图 3.9(a)可以看

到该方法计算得到的微孔单元平均孔径普遍大于微孔体素孔径，所以导致计算的毛细管力偏小。

当采用 3.5 小节中基于侵入压力对微孔区域划分为 5 个岩石分类时，对相应的区域赋予 5 个微孔孔径时，从图 4.10(a)可以看到计算得到的毛管力曲线大部分与实验数据相匹配，少部分不匹配的地方可能是因为计算的岩石尺寸与实验的尺寸不一样。并且从图 4.10(b)中也可以看出基于该优化方法计算得到的相渗曲线与稳态实验测得的数据较为匹配，其中细微的偏差可能是由于岩样的尺寸以及微孔区束缚水饱和度的设置偏小。

针对上述 DPNM 的微孔单元三种平均孔径的计算方法，即总孔隙体积除以总孔隙数量（公式 2.9）、算术平均以及划分 5 个微孔区域并赋予相应的微孔孔径，以及采用公式 2.9 计算微孔网格平均孔径的 PNCM，下图 4.11 中展示了它们在不同的非润湿相饱和度下，各自大孔和微孔中非润湿相饱和度分布云图。

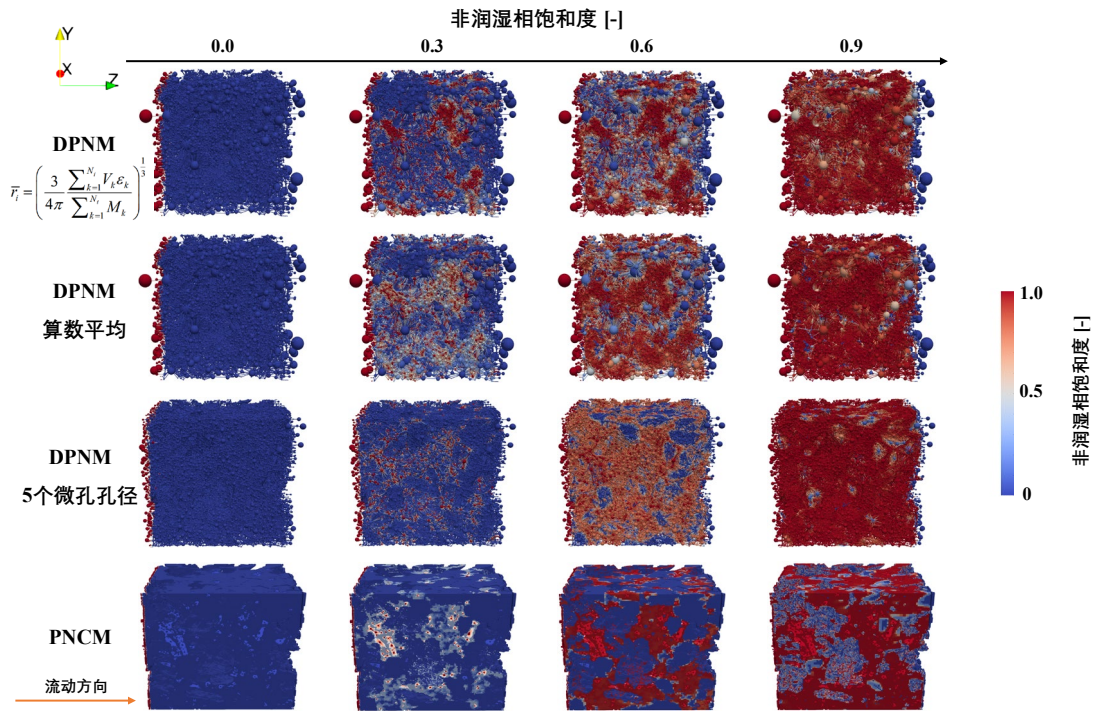


图 4.11 非润湿相饱和度分布云图：DPNM 中三种计算微孔单元平均孔径的方法以及公式 2.9 计算微孔网格平均孔径的 PNCM

Fig.4.11 Nonwetting phase saturation distribution cloud: three methods for calculating the mean pore size of microporosity in DPNM and PNCM for calculating the mean pore size of microporous grids by equation 2.9

从图 4.11 中可以直观地看到，采用对微孔区域划分为 5 个岩石分类，并且分

别提取孔隙网络，最后与大孔孔隙网络合并为双重孔隙网络，其微孔单元划分数量大于总孔隙体积除以总孔隙数量（公式 2.9）和算数平均计算微孔单元平均孔径的微孔单元数量。并且，例如当非润湿相饱和度都为总体饱和度的 0.6 时，四个饱和度云图中非润湿相饱和度在大孔和微孔中的分布也不一样。其中，DPNM 中采用公式 2.9 计算的微孔单元孔径最小，因此侵入微孔中的非润湿相分布最少，而采用同样平均方法的 PNCM，由于图 3.6(a)中微孔孔径与微孔体素孔径分布很接近，因此微孔中侵入的非润湿相分布更加广泛。而采用算术平均的 DPNM，由于得到的微孔单元平均孔径普遍偏大，因此相较于采用公式 2.9 的 DPNM，其微孔单元中非润湿相侵入更为广泛。当采用 5 个微孔孔径的 DPNM，其微孔单元中非润湿相侵入更加广泛，但是单个微孔单元中侵入的非润湿相饱和度有所降低，因为微孔区域划分更为精密，同等饱和度下侵入更多微孔单元，则单个微孔单元饱和度有所下降。并且由于划分了 5 个微孔区域，每个微孔区域赋予同样的孔径，所以非润湿相的侵入呈现一个区域的侵入现象。

基于上述图 4.10 可得，采用将微孔区域划分为 5 个岩石分类，针对每一类微孔区域赋予实验测得的孔径大小，可以较为准确的预测准静态两相流动中毛管力和相渗曲线。该方法不仅可以优化双重孔隙网络模型对绝对渗透率的预测能力，也可用于其对两相渗流参数的预测。因此，由于双重孔隙网络模型计算高效，我们针对微孔采用非均质孔径分布的 ES6.5 岩样，提取更大尺寸的岩心，构建双重孔隙网络，微孔平均孔径采用 5 个岩石分类的计算方法，然后再次数值对比验证构建的全岩心尺寸的双重孔隙网络模型。提取双重孔隙网络的示意图如下图 4.12 所示。

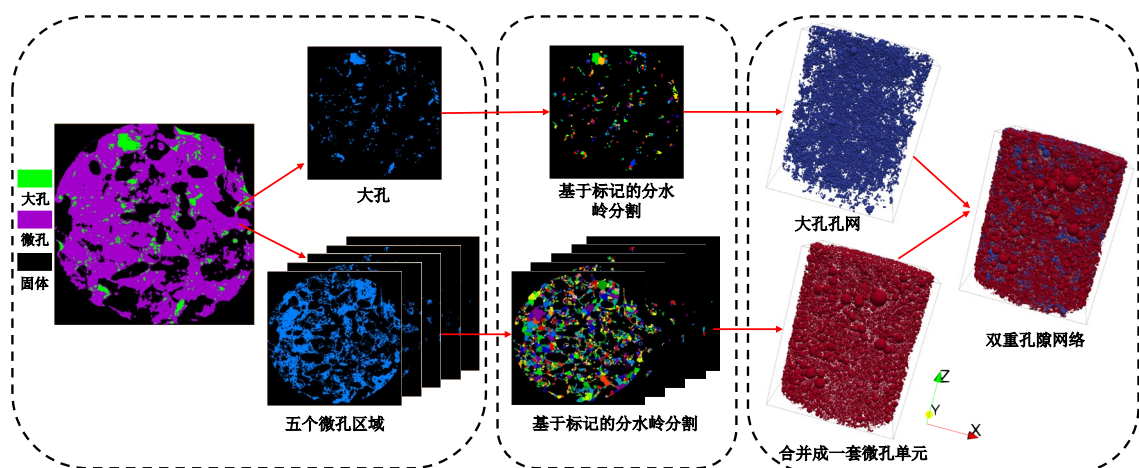


图 4.12 ES6.5 岩样全岩心尺寸的双重孔隙网络，微孔采用 5 个分类区域

Fig.4.12 Dual-pore-network with full core size of ES6.5 sample, five sub-rock typing for microporosity

基于上图中大尺寸的 ES6.5 岩样, 非均质微孔孔径分布, 采用将微孔区域划分为 5 个亚岩石区域, 每个区域基于 Young-Laplace 方程赋予统一的平均孔径, 进行准静态两相流动模拟。ES6.5 岩样 400^3 尺寸大小已经验证过微孔采用分类可以较好的预测两相渗流参数, 而由于岩心图像尺寸的影响, 400^3 体素大小的图像可能没有达到 REV (representative elementary volume), 因此为了减弱图像尺寸对模拟结果的影响, 对 ES6.5 岩样全岩心尺寸提取了双重孔隙网络, 计算得到的毛管力和相渗曲线如图 4.13 所示。

图中可以看到, 无论是毛细管力和饱和度曲线还是相对渗透率曲线, 采用全岩心尺寸的双重孔隙网络模拟结果与实验数据都较为匹配。结合图 4.10(a), 首先进一步证明微孔区域采用 5 个分区的方法可以提高模型预测精度, 并且全岩心尺寸计算得到的毛管力曲线比 400^3 体素大小的计算结果与实验数据更加匹配。不仅证明了 3.5 小节中微孔分区优化方法的有效性, 并且还考虑了岩心图像尺寸的影响, 证明了该方法在全岩心尺寸下预测两相渗流参数的适用性, 消除了偶然因素的影响, 再次证明该方法具有可靠性, 因此在此优化方法的基础上展开下一步气水两相流动研究。

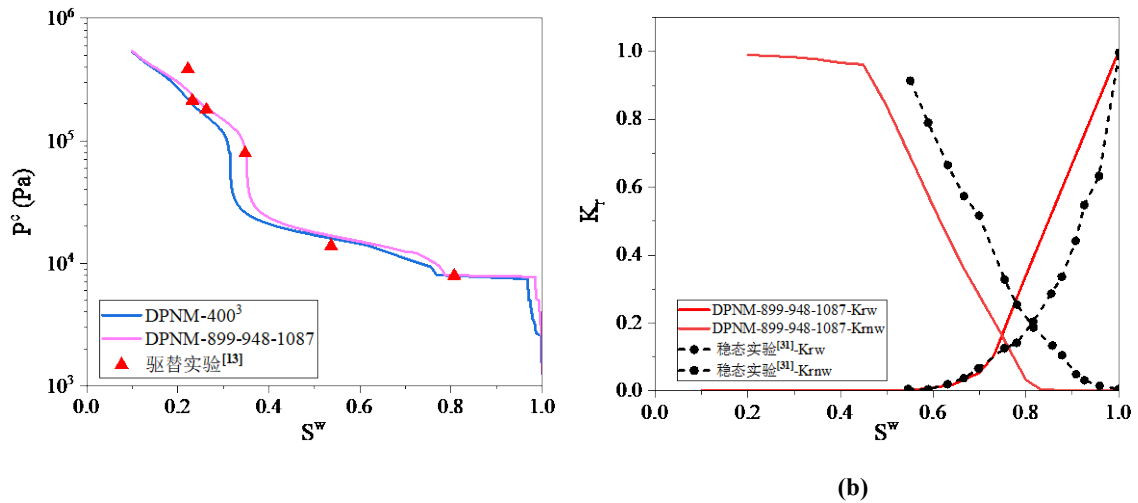


图 4.13 (a) ES6.5 岩样全岩心尺寸下毛管力曲线和初次驱替实验数据; (b) 全岩心尺寸下相对渗透率曲线和稳态法实验数据

Fig.4.13 (a) ES6.5 Capillary pressure curves at full core size of rock samples and experimental data on primary drainage; (b) Relative permeability curves at full core size and experimental data from the steady-state measurements

通过图 4.10(b)和图 4.13(b)中 DPNM 模拟的相对渗透率曲线和实验数据对比可得, 模拟的曲线与实验数据趋势基本匹配, 但曲线的交点总是有一定的差别。为

此，我们猜想是否由于微孔区束缚水饱和度^[99,100]设置过小，所以我们改变微孔区束缚水饱和度进行了模拟，计算结果如图 4.14 所示。

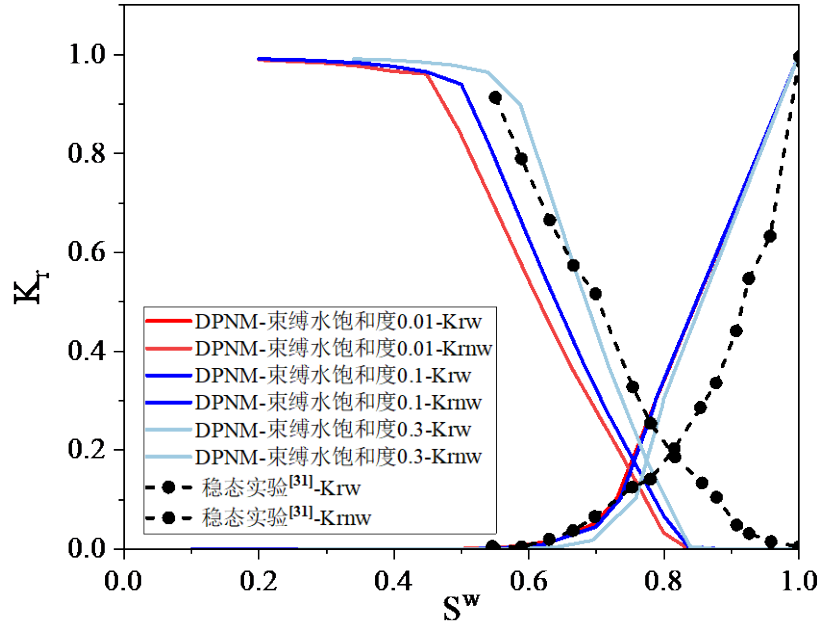


图 4.14 改变微孔束缚水饱和度的相对渗透率曲线

Fig.4.14 The relative permeability curve of microporous irreducible water saturation is changed

通过将微孔区束缚水饱和度从 0.01 增加到 0.3，可以明显地看到曲线的交叉点向右偏移，并且越来越接近稳态实验测得的相渗曲线的交叉点。所以，当得到实验或模拟的准确的束缚水饱和度参数，基于微孔分区的双重孔隙网络模型可以很好的预测毛管力和相渗曲线，因此基于微孔分区的双重孔隙网络模型用于后续二氧化碳毛管力圈闭封存研究。

4.3 CO₂ 毛细管力圈闭与相渗曲线

本节基于上述已经验证过的改进的双重孔隙网络模型，针对碳酸盐岩这种具有跨尺度孔隙结构的岩石，开展毛细管力圈闭研究。计算二氧化碳和水两相流动渗流参数，即毛细管力和相渗曲线，分析不同接触角和初始含气饱和度的条件下，以及二氧化碳的相对渗透率，对二氧化碳圈闭封存的影响，为工程应用提供理论指导。

毛细管力圈闭封存^[5,47,53,101-103]相较于构造封存、溶解与矿化封存有一定的独特优势。首先，与构造圈闭封存相比，毛细管力圈闭不依赖完整的地质构造，可利用更广泛的地层空间，大大提高了封存潜力；其次，相较于溶解封存，毛细管力圈闭具有更快的封存速度和更高的封存效率；并且与矿化封存对比，毛细管力圈闭具有更短的封存周期。矿化封存需要数十年甚至上百年才能完成化学反应，而毛细管力圈闭可

即时实现封存，更适合大规模快速封存需求。

传统的毛细管力圈闭研究主要聚焦在提高采收率方面，并且在注入非润湿相流体前，假设多孔介质内充满另一种流体。而随着人们对 CO_2 地质封存的进一步研究，人们的关注点已经转向理解和优化毛细管捕集机制。并且也不再局限于多孔介质内部初始状态只存在一种流体的情况，如 CO_2 注入枯竭油气藏封存等。已有研究针对毛细管力圈闭 CO_2 的机制研究比较少，因此，探究 CO_2 毛细管圈闭捕集过程至关重要。

基于微孔区 5 个分区的优化的双重孔隙网络模型，针对 ES6.5 全岩心尺寸的岩样计算微孔区采用均质和非均质孔径分布的毛管力和相渗曲线，基于 Land^[52]模型计算水湿条件下不同接触角（两相流动中，润湿相流体和岩石固体表面的接触角是一个动态分布的过程，下文的研究中假设为统一的静态接触角）与不同初始二氧化碳含量对残余二氧化碳饱和度的影响。基于计算得到的润湿相和非润湿相的相对渗透率曲线，探究二氧化碳的流动能力，从而可以更好地优化注入方案。二氧化碳毛管力圈闭封存的示意简图如图 4.15 所示。

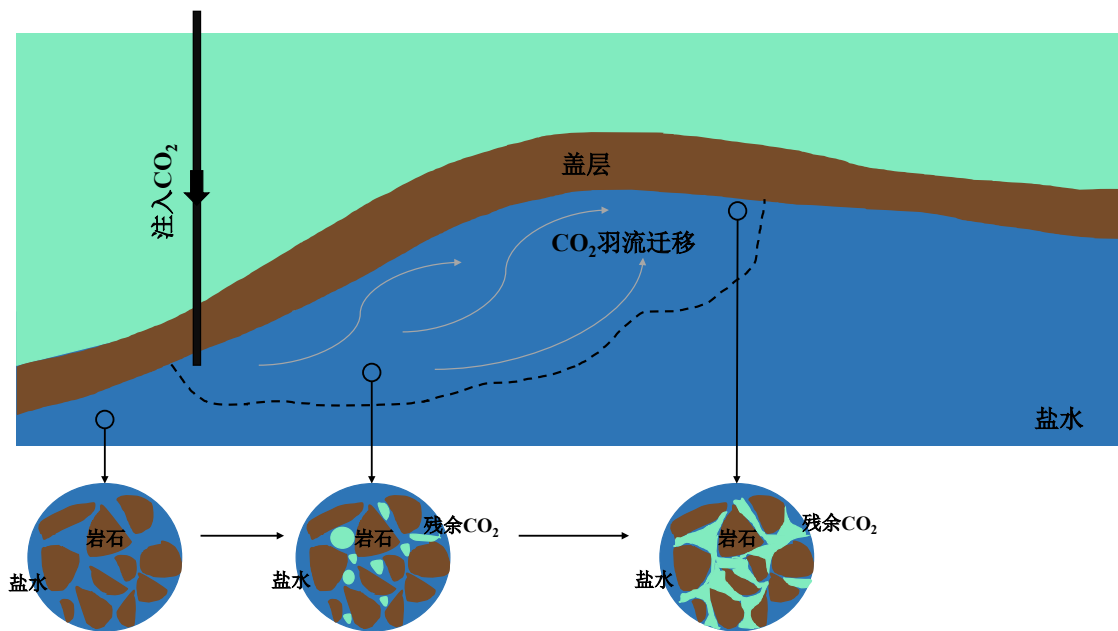


图 4.15 CO_2 毛细管力圈闭封存示意图

Fig.4.15 Schematic of capillary pressure trapping for CO_2

当 ES6.5 全岩心尺寸岩样微孔区采用均质孔径分布时，根据 Young-Laplace 方程计算毛管力以及 VG 模型拟合微孔区毛管力曲线可得，微孔区采用均质孔径导致计算得到的毛管力曲线相较于微孔非均质孔径分布更加平缓，毛管力变化范围更小。并且当进行渗吸过程时，由于微孔均质孔径，毛管力在一段饱和度范围内变

化很小然后迅速下降，计算结果如图 4.16 所示。

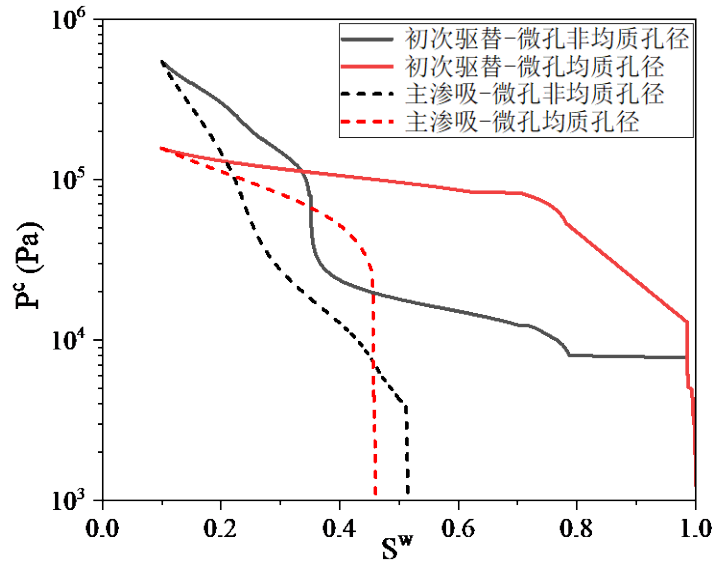


图 4.16 ES6.5 岩样微孔区采用均质和非均质孔径分布的毛管力曲线

Fig.4.16 The capillary pressure curves with homogeneous and heterogeneous pore size distribution were used in the microporosity of ES6.5 rock sample

为了探究毛管力圈闭过程中二氧化碳初始含量对圈闭量的影响，分别基于微孔区采用均质和非均质孔径分布的 ES6.5 岩样，改变初次驱替结束后的束缚水饱和度，然后进行了不同束缚水饱和度下的渗吸流动模拟，得到多组驱替和渗吸毛管力曲线，计算结果如下图 4.17 所示：

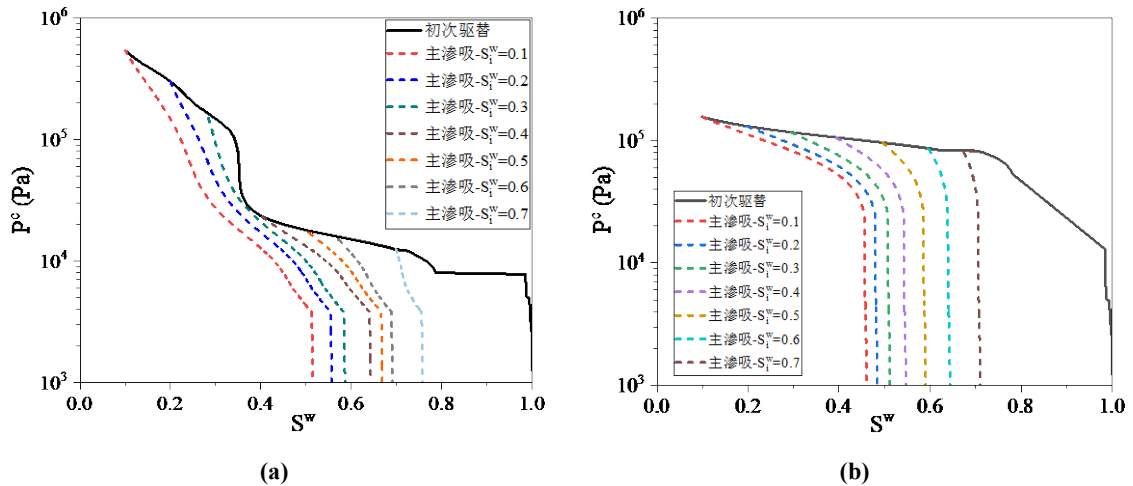


图 4.17 不同束缚水饱和度下 ES6.5 岩样毛细管力曲线：(a) 微孔为非均质孔径；(b) 微孔为均质孔径

Fig.4.17 Capillary pressure curves of ES6.5 rock sample under different irreducible water saturation: (a) heterogeneous pore size for microporosity; (b) homogeneous pore size for microporosity

从上图中可以看出,强水湿(接触角为 0 度)条件下,改变初次驱替后束缚水饱和度从 0.1 到 0.7,微孔区无论采用非均质还是均质孔径分布,残余 CO_2 饱和度都是随着初始 CO_2 含量的增加而增加。并且,微孔均质孔径分布的驱替和渗吸毛管力曲线变化范围更小,变化趋势平缓。

并且,由于相对渗透率曲线也是 CO_2 圈闭封存的重要渗流参数,因此还计算了强水湿(接触角为 0 度)和束缚水饱和度为 0.1 的条件下,微孔采用非均质和均质孔径分布下润湿相和非润湿相的相对渗透率曲线。从计算结果可以得出,驱替和渗吸过程中由于存在毛细滞后现象,所以两个过程中的相渗曲线有所差异,并且当微孔区假设为均质孔径时,毛细滞后现象比较弱。因为微孔均质孔径分布比较单一,毛细管力变化趋于平缓,减少了局部毛细管力差异导致的滞后效应。

微孔为非均质和均质孔径下的非润湿相(这里指 CO_2)的相对渗透率较大,表明其流动能力较强,在一定的注入压力下,可以实现更高的注入速率。并且,流动性好的 CO_2 可以更容易地在储层中运移,从而实现储层中更广泛区域的 CO_2 毛管力圈闭。计算得到的相渗曲线如下图 4.18 所示:

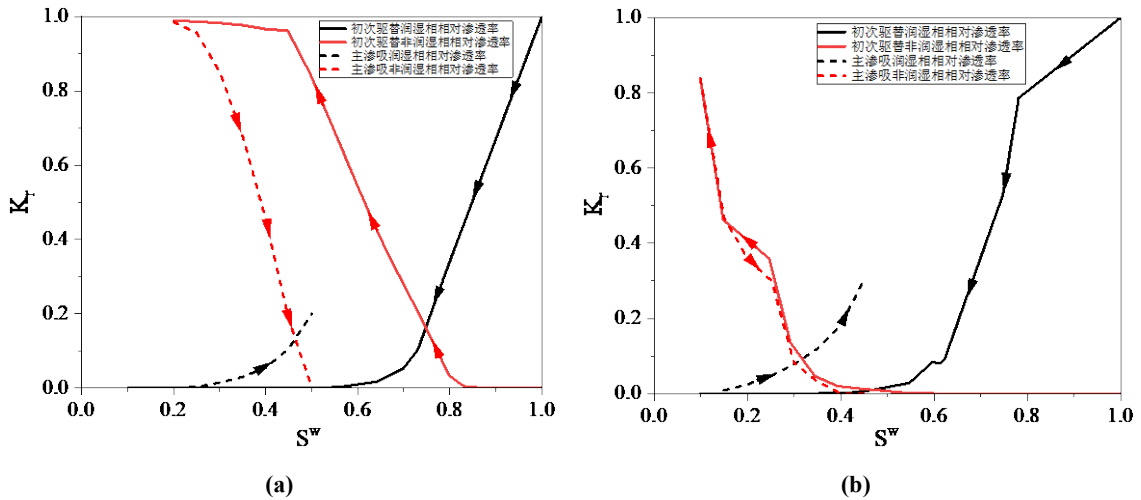


图 4.18 接触角为 0 度,束缚水饱和度为 0.1 时的相对渗透率曲线: (a) 微孔为非均质孔径; (b) 微孔为均质孔径

Fig.4.18 Relative permeability curves for a contact angle of 0 degrees and a irreducible saturation of 0.1: (a) heterogeneous pore size for microporosity; (b) homogeneous pore size for microporosity

同时,基于水湿条件下还改变了接触角的大小,基于 Land 模型探究不同接触角下 CO_2 初始含量对残余 CO_2 饱和度的影响,并且拟合了微孔为均质和非均质孔径分布的 Land 圈闭系数。并且,还探究了残余 CO_2 饱和度随着接触角变化而变化的趋势,基于不同束缚水饱和度和不同接触角下计算得到的残余 CO_2 饱和度,观

察微孔为非均质和均质孔径下，残余 CO_2 饱和度随着接触角的变化而产生怎样的变化趋势。

在 Land 模型^[52]中，被圈闭的非润湿相饱和度表达式为：

$$S_{gr}^* = \frac{S_{gi}^*}{1 + CS_{gi}^*} \quad (4.18)$$

$$C = \frac{1}{(S_{gr}^*)_{\max}} - 1 \quad (4.19)$$

其中， S_{gi}^* ， S_{gr}^* 和 $(S_{gr}^*)_{\max}$ 分别为有效初始含气饱和度、有效残余含气饱和度和最大残余含气饱和度， C 为 Land 模型圈闭系数。不同接触角大小的情况下， CO_2 初始含量和残余圈闭量之间的关系图如图 4.19 所示。

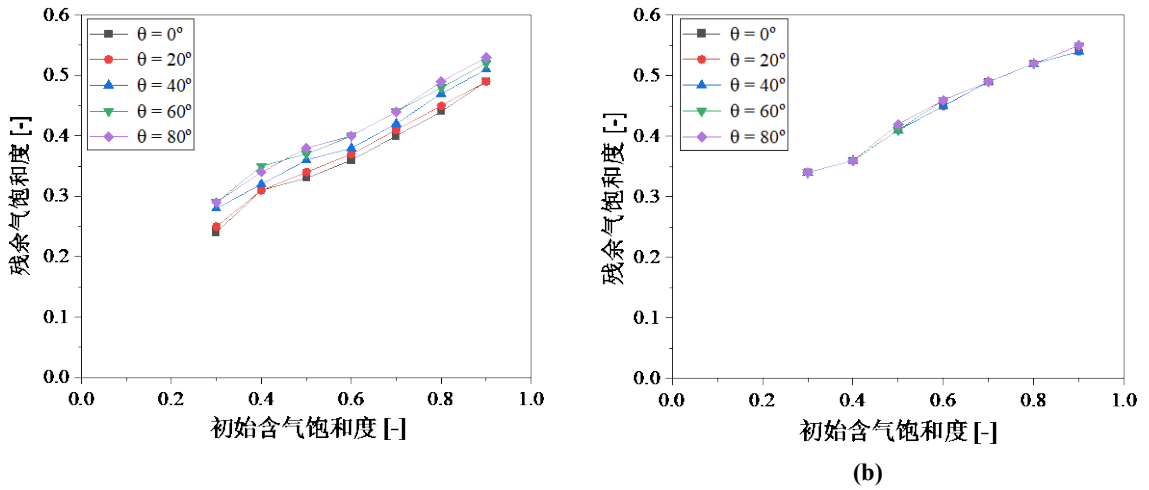


图 4.19 不同接触角下 ES6.5 岩样初始和残余气饱和度的关系曲线：(a) 微孔为非均质孔径；
(b) 微孔为均质孔径

Fig.4.19 The relationship between initial and residual gas saturation of ES6.5 rock samples at different contact angles: (a) heterogeneous pore size for microporosity; (b) homogeneous pore size for microporosity

从上图中可以看出，当接触角从 0 度变化到 80 度，残余气饱和度（这里指 CO_2 ）随着初始含气饱和度的增加而增加，但是微孔区采用均质孔径分布时，改变接触角，初始和残余气饱和度几乎不变化，图中可以看到曲线基本重合。计算得到的残余气饱和度（这里指 CO_2 ）随着接触角的变化趋势如下图 4.20 所示：

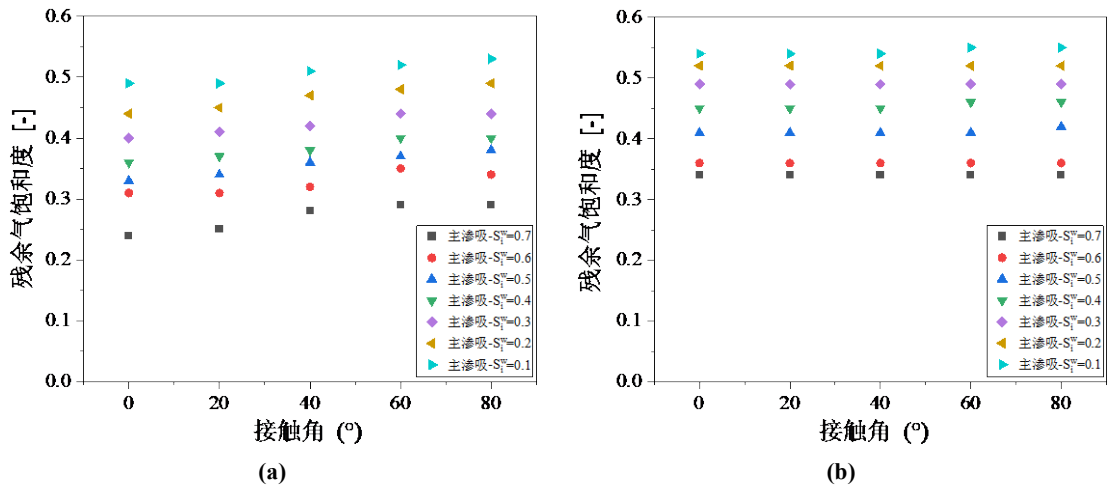


图 4.20 ES6.5 岩样残余气饱和度随接触角的变化图: (a) 微孔为非均质孔径; (b) 微孔为均质孔径

Fig.4.20 Variation diagram of residual gas saturation with contact angle of ES6.5 rock sample: (a) heterogeneous pore size for microporosity; (b) homogeneous pore size for microporosity

从上图中可以看出, 微孔为非均质和均质孔径时, 残余气饱和度随接触角的变化都不是一个单一的线性关系。表明 CO_2 的圈闭过程是一个复杂的过程, 涉及的影响因素非常多, 例如强水湿条件下, 增大接触角, CO_2 圈闭量反而增加, 可能的原因为强水湿条件下 CO_2 难以进入微小孔隙, 反而降低圈闭量。并且当微孔假设为均质孔径时, 残余气饱和度随着接触角的变化不大, 与图 4.19 (b) 计算结果一致。

基于图 4.19 的计算结果拟合的 Land 圈闭系数如下图 4.21 所示:

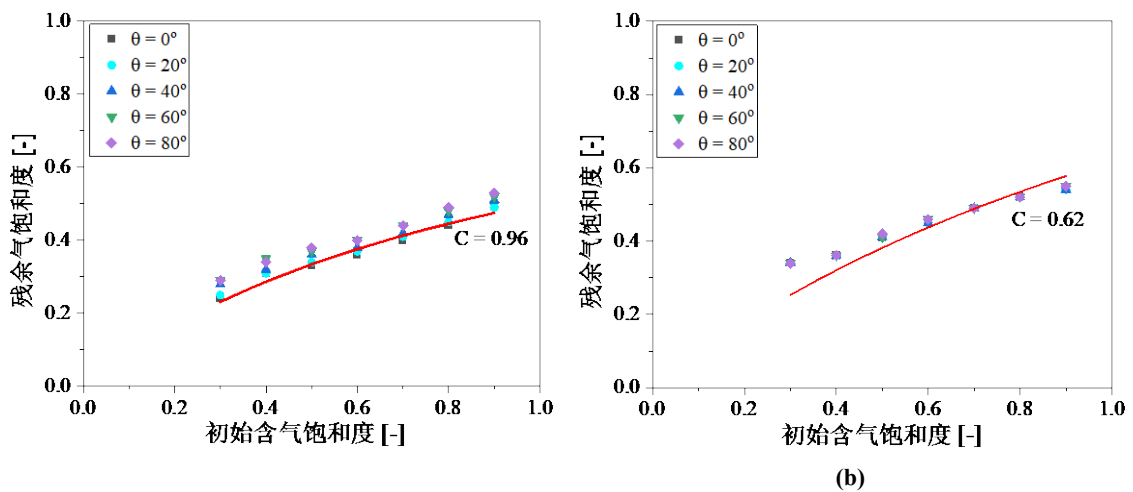


图 4.21 Land 圈闭系数的拟合曲线: (a) 微孔为非均质孔径; (b) 微孔为均质孔径

Fig.4.21 Fitting curve of Land trapping coefficient: (a) heterogeneous pore size for microporosity; (b) homogeneous pore size for microporosity

微孔为均质和非均质孔径分布下，基于双重孔隙网络准静态两相渗流模型计算得到的初始含气饱和度与残余气饱和度的关系与参考文献^[5,52,102,104]中二者数据库中曲线趋势很吻合。并且微孔为非均质孔径分布拟合的圈闭系数值 0.96 与方程 4.19 计算的值 0.90 非常接近，但微孔为均质孔径时拟合的圈闭系数值 0.62 与方程 4.19 计算的值 0.82 偏差较大。

4.4 本章小结

本章主要建立了双重孔隙网络准静态两相渗流模型，并采用 ES6.5 岩样对模型进行了验证，基于验证后的模型开展二氧化碳和水两相流动研究。探究影响二氧化碳毛管力圈闭封存的渗流参数，如接触角以及初始含气饱和度，同时计算了润湿相和非润湿相的相渗曲线，探究了二氧化碳的流动能力，为优化注入方案提供基础。并根据 Land 模型拟合圈闭系数，与经验公式计算数值对比，进一步为基于双重孔隙网络模型进行二氧化碳毛管力圈闭封存提供理论基础。基于上述研究，得出以下主要结论：

（1）基于侵入压力对微孔区进行分类的双重孔隙网络模型优化方法，显著提升了模型对两相渗流参数，即毛细管力和相对渗透率曲线的预测能力。通过对 ES6.5 岩样全岩心尺寸提取数据进行的模拟验证，优化后模型计算所得曲线与实验数据吻合良好，证明该优化方法的可靠性与适用性。

（2）基于优化后全岩心尺寸的双重孔隙网络模型进行 CO₂ 毛管力圈闭研究，结果表明，在水湿条件下，残余 CO₂ 饱和度随着初始 CO₂ 饱和度的增加而增加。此外，基于真实微孔区非均质的碳酸盐岩建立的双重孔隙网络模型，计算得到的 Land 模型圈闭系数与经验公式计算数值较为吻合。

5 结论与展望

5.1 主要结论

针对二氧化碳地质封存下碳酸盐岩多尺度孔隙结构中的微观流动机理研究这一工程背景,论文围绕“碳酸盐岩储层多尺度孔隙结构对二氧化碳运移的影响与控制机制”关键科学问题开展研究,建立了表征碳酸盐岩多尺度孔隙结构的双重孔隙网络数学模型及求解器,研究了该模型对单相以及两相渗流参数的预测能力,并最终应用于二氧化碳封存中两相渗流参数的研究,得到具体的结论如下:

(1) 双重孔隙网络模型(DPNM)和孔隙网络-连续介质模型(PNCM)均能较好地预测微孔为均质的平均孔径和非均质微孔隙率的多尺度数字岩石的绝对渗透率和地层因子。在这种情况下,DPNM 由于其计算效率而优于 PNCM。针对多尺度数字岩石,适当的图像下采样插值方法可以有效地保留大孔隙和微孔隙的边界。当大孔隙连通性良好或连通不良且微孔隙丰富时,图像分辨率对渗透率预测的影响最小。

(2) 对于微孔区为非均质平均孔径和孔隙率的多尺度数字岩石,PNCM 在预测绝对渗透率方面仍然是准确的。相比之下,DPNM 明显低估了绝对渗透率超过一个数量级,较差的性能源于微孔单元孔径的平均,大大低估了微孔单元的实际平均孔径。为了提高 DPNM 的预测精度,我们测试了两种方法,包括微孔单元内平均孔径的算术平均和基于侵入压力的岩石分类。这两种方法都能显著提高双重孔隙网络模型对绝对渗透率的预测性能。

(3) 基于侵入压力对微孔区进行分类的双重孔隙网络模型优化方法,显著提升了模型对两相渗流参数,即毛细管力和相对渗透率曲线的预测能力。优化后模型计算所得曲线与实验数据吻合良好,证明该优化方法的可靠性与适用性。

(4) 基于优化后全岩心尺寸的双重孔隙网络模型进行 CO₂ 毛管力圈闭研究,结果表明,在水湿条件下,二氧化碳残余饱和度随着初始二氧化碳饱和度的增加而增加。此外,基于真实微孔区非均质的碳酸盐岩建立的双重孔隙网络模型,计算得到的 Land 模型圈闭系数与经验公式计算数值较为吻合。

5.2 论文创新点

本文在围绕碳酸盐岩双重孔隙网络模型与微观气水流动研究展开的研究过程中,凝练了 2 项创新性研究成果,具体如下:

(1) 研究了双重孔隙网络模型对单相及两相渗流参数的预测能力

碳酸盐岩具有复杂多尺度的孔隙结构,孔隙类型丰富多样,近年来,针对这种

多尺度孔隙结构开发了三种表征混合模型,包括微连续介质模型、双重孔隙网络模型以及孔隙网络-连续介质模型。然而,基于双重孔隙网络模型的研究主要聚焦在如何建立表征这种多尺度孔隙结构的模型,针对双重孔隙网络模型本身预测能力的研究比较欠缺。本文以微孔区未粗化的孔隙网络-连续介质模型为参考模型,通过直接数值模拟与实验数据对参考模型进行了数值验证,进而以参考模型为基准,对比双重孔隙网络模型在单相及两相渗流参数的预测能力。通过对比双重孔隙网络模型与参考模型计算的绝对渗透率、地层因子、毛细管力曲线以及相对渗透率曲线等渗流参数,探究双重孔隙网络模型在微孔区均质和非均质孔径分布下对这些渗流参数的预测能力如何。并且针对微孔非均质孔径分布,双重孔隙网络模型低估绝对渗透率的情况给出了模型优化方法,即基于侵入压力对微孔区进行分类,该方法同样可以提高模型对两相渗流参数的预测能力。

(2) 揭示碳酸盐岩多尺度孔隙结构对二氧化碳毛细管力圈闭的作用机制

本文针对碳酸盐岩这种包含可分辨和亚分辨孔隙的多尺度孔隙结构,建立了双重孔隙网络数学模型及求解器,基于优化后的全岩心尺寸的模型,进行二氧化碳毛细管力圈闭研究。探究了微孔区采用均质和非均质孔径分布下,毛细管力和相对渗透率曲线分布规律的不同。此外,基于 Land 模型探究了不同接触角和初始含气饱和度对残余二氧化碳饱和度的影响。结果表明,在水湿条件下,残余圈闭 CO_2 量随初次驱替后初始 CO_2 饱和度的增加而增加,并且微孔采用非均质孔径分布拟合出来的圈闭系数更接近经验公式计算的数值。因此,本研究为更好地模拟和理解二氧化碳封存过程中的微观气水两相流动提供了一种高效、准确的模拟工具,为二氧化碳地质封存实践提供了重要的理论依据。

5.3 工作展望

研究二氧化碳地质封存中多尺度孔隙结构中的微观流动机理是一项具有挑战性的复杂课题。其挑战性不仅体现在多尺度孔隙结构的精细表征常受限于成像技术和模型构建的计算效率,同时也体现在如何将这些精细表征模型有效地应用于复杂的微观气水两相流动模拟。本研究针对碳酸盐岩的多尺度孔隙结构特征,构建了双重孔隙网络数学模型及求解器,并开展了微观气水流动数值研究,为该领域的研究奠定了一定的基础。尽管本研究取得了一定进展,但鉴于研究领域的复杂性和本论文的范围限制,部分问题未能进行更深入的探讨。因此,基于本工作的成果,未来研究可以在以下几个方面进行深入探索,以进一步完善和扩展本研究的发现:

(1) 当由于实验条件的限制,无法获取微孔区域精细的侵入压力图谱时,可以尝试将孔径分布与微孔区域的相关长度相结合,进而实现简便而又精细的表征微孔孔径分布,优化双重孔隙网络模型的预测能力。

(2) 本文只进行了准静态两相流动模拟, 后续的研究中可以加入时间项, 实现动态双重孔隙网络两相流动模拟, 从而更加精细全面的进行二氧化碳毛细管力圈闭的影响与控制机制的研究。

参 考 文 献

- [1] Abidoye L K, Khudaida K J, Das D B. Geological Carbon Sequestration in the Context of Two-Phase Flow in Porous Media: A Review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2015, 45(11): 1105-1147.
- [2] Raza A, Rezaee R, Bing C H. Carbon dioxide storage in subsurface geologic medium: A review on capillary trapping mechanism[J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2016, 25(3): 367-373.
- [3] Li W, Cao J, Liang Y, et al. Evaluation of CO₂ storage and enhanced gas recovery potential in gas shale using kerogen nanopore systems with mesopores and micropores[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 486: 150225.
- [4] Benson S M, Cole D R. CO₂ Sequestration in Deep Sedimentary Formations[J]. Elements, 2008, 4(5): 325-331.
- [5] Hefny M, Qin C, Saar M O, et al. Synchrotron-based pore-network modeling of two-phase flow in Nubian Sandstone and implications for capillary trapping of carbon dioxide[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, 103: 103164.
- [6] Huppert H E, Neufeld J A. The fluid mechanics of carbon dioxide sequestration[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46(1): 255-272.
- [7] Feng D, Chen Z, Wu K, et al. A comprehensive review on the flow behaviour in shale gas reservoirs: Multi-scale, multi-phase, and multi-physics[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2022, 100(11): 3084-3122.
- [8] 马馨蕊, 梁杰, 李清, 等. 多类型岩石二氧化碳矿化封存机制研究——以玄武岩与砂岩为例[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(3): 56-64.
- [9] 杨骥, 杨懿婷, 陈磊, 等. 准噶尔盆地深部咸水层 CO₂ 地质封存适宜条件分析[J]. 天然气勘探与开发, 2024, 47(6): 105-115.
- [10] Moghadasi R, Goodarzi S, Zhang Y, et al. Pore-scale characterization of residual gas remobilization in CO₂ geological storage[J]. Advances in Water Resources, 2023, 179: 104499.
- [11] Zhang G, Rgeaieg M, Blunt M J, et al. Primary drainage and waterflood capillary pressures and fluid displacement in a mixed-wet microporous reservoir carbonate[J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 130022.
- [12] 孔祥言, 卢德唐. 渗流力学的理论应用及其前沿研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(10): 126205.
- [13] Wang S, Ruspini L C, Øren P, et al. Anchoring Multi-Scale Models to Micron-Scale Imaging of Multiphase Flow in Rocks[J]. Water Resources Research, 2022, 58(1): 333-351.

- [14] Ling Q, Al-khulaifi Y, Blunt M J, et al. Quantification of sub-resolution porosity in carbonate rocks by applying high-salinity contrast brine using X-ray microtomography differential imaging[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 96: 306-322.
- [15] Ruspini L C, Øren P E, Berg S, et al. Multiscale Digital Rock Analysis for Complex Rocks[J]. *Transport in Porous Media*, 2021, 139(2): 301-325.
- [16] Carrillo F J, Bourg I C. A Darcy-Brinkman-Biot Approach to Modeling the Hydrology and Mechanics of Porous Media Containing Macropores and Deformable Microporous Regions[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(10): 8096-8121.
- [17] Horgue P, Soulaire C, Franc J, et al. An open-source toolbox for multiphase flow in porous media[J]. *Computer Physics Communications*, 2015, 187: 217-226.
- [18] Carrillo F J, Bourg I C, Soulaire C. Multiphase flow modeling in multiscale porous media: An open-source micro-continuum approach[J]. *Journal of Computational Physics: X*, 2020, 8: 100073.
- [19] Guo B, Ma L, Tchelepi H A. Image-based micro-continuum model for gas flow in organic-rich shale rock[J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 122: 70-84.
- [20] Fatt I. The Network Model of Porous Media[J]. *Transactions of the AIME*, 1956, 207(01): 144-181.
- [21] Mehmani A, Verma R, Prodanovic M. Pore-scale modeling of carbonates[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104141.
- [22] 刘昌富. 基于 CT 技术的碳酸盐岩气水两相渗流规律研究[D]. 中国石油大学(华东), 2022.
- [23] Su Y, Zha M, Jiang L, et al. Pore structure and fluid distribution of tight sandstone by the combined use of SEM, MICP and X-ray micro-CT[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 109241.
- [24] Liao Q, You S, Cui M, et al. Digital Core Permeability Computation by Image Processing Techniques[J]. *Water*, 2023, 15(11): 1995.
- [25] Blunt M J, Bijeljic B, Dong H, et al. Pore-scale imaging and modelling[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 197-216.
- [26] Auenhammer R M, Jeppesen N, Mikkelsen L P, et al. Robust numerical analysis of fibrous composites from X-ray computed tomography image data enabling low resolutions[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 224: 109458.
- [27] Krygier M C, Labonte T, Martinez C, et al. Quantifying the unknown impact of segmentation uncertainty on image-based simulations[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5414.
- [28] Liu X, Wang J, GE L, et al. Pore-scale characterization of tight sandstone in Yanchang Formation Ordos Basin China using micro-CT and SEM imaging from nm- to cm-scale[J]. *Fuel*, 2017, 209:

- 254-264.
- [29] Lai J, Wang G, Wang Z, et al. A review on pore structure characterization in tight sandstones[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 177: 436-457.
- [30] Guo X, Huang Z, Zhao L, et al. Pore structure and multi-fractal analysis of tight sandstone using MIP, NMR and NMRC methods: A case study from the Kuqa depression, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 178: 544-558.
- [31] Bultreys T, Van Hoorebeke L, Cnudde V. Multi-scale, micro-computed tomography-based pore network models to simulate drainage in heterogeneous rocks[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 78: 36-49.
- [32] 王晨晨. 碳酸盐岩介质双孔隙网络模型构建理论与方法[D]. 中国石油大学（华东）, 2015.
- [33] Gostick J T. Versatile and efficient pore network extraction method using marker-based watershed segmentation[J]. *Physical Review E*, 2017, 96(2): 023307.
- [34] Dong H, Blunt M J. Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images[J]. *Physical Review E*, 2009, 80(3): 036307.
- [35] Liu J, Zhang T, Sun S. A new pixel-free algorithm of pore-network extraction for fluid flow in porous media: Flashlight search medial axis[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2024, 13(1): 32-41.
- [36] Lindquist W B, Lee S M, Coker D A, et al. Medial axis analysis of void structure in three-dimensional tomographic images of porous media[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B4): 8297-8310.
- [37] Xu Z, Lin M, Jiang W, et al. Identifying the comprehensive pore structure characteristics of a rock from 3D images[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 187: 106764.
- [38] Khan Z A, Gostick J T. Enhancing pore network extraction performance via seed-based pore region growing segmentation[J]. *Advances in Water Resources*, 2024, 183: 104591.
- [39] Ioannidis M A, Chatzis I. A Dual-Network Model of Pore Structure for Vuggy Carbonates[J]. 2000.
- [40] Bekri S, Laroche C, Vizika O. Pore Network Models to Calculate Transport and Electrical Properties of Single or Dual-Porosity Rocks[J]. *Toronto: International Symposium of the Society of Core Analysts*, 2005.
- [41] Jiang Z, Van Dijke M I J, Sorbie K S, et al. Representation of multiscale heterogeneity via multiscale pore networks: Representation of Multiscale Heterogeneity[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(9): 5437-5449.
- [42] Mehmani A, PRODANOVIĆ M. The effect of microporosity on transport properties in porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 63: 104-119.

- [43] Foroughi S, Bijeljic B, Gao Y, et al. Incorporation of Sub-Resolution Porosity Into Two-Phase Flow Models With a Multiscale Pore Network for Complex Microporous Rocks[J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(4): e2023WR036393.
- [44] Moslemipour A, Sadeghanjad S. Dual-scale pore network reconstruction of vugular carbonates using multi-scale imaging techniques[J]. *Advances in Water Resources*, 2021, 147: 103795.
- [45] Khan Z A, Tranter T, Agnaou M, et al. Dual network extraction algorithm to investigate multiple transport processes in porous materials: Image-based modeling of pore and grain scale processes[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, 123: 64-77.
- [46] Rabbani A, Babaei M, Javadpour F. A Triple Pore Network Model (T-PNM) for Gas Flow Simulation in Fractured, Micro-porous and Meso-porous Media[J]. *Transport in Porous Media*, 2020, 132(3): 707-740.
- [47] Krevor S, Blunt M J, Benson S M, et al. Capillary trapping for geologic carbon dioxide storage – From pore scale physics to field scale implications[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 221-237.
- [48] 田键, 康毅力, 游利军, 等. 致密砂岩孔隙尺度下气-水界面动态演化可视化实验研究[J]. *力学学报*, 2024, 56(3): 862-873.
- [49] R. H. Brooks and A. T. Corey. Hydraulic Properties of Porous Media and Their Relation to Drainage Design[J]. *Transactions of the ASAE*, 1964, 7(1): 0026-0028.
- [50] Van Genuchten M Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [51] Pinder G F, Gray W G. Essentials of Multiphase Flow and Transport in Porous Media: Pinder/Multiphase Flow[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2008[2023-03-01]. <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470380802>.
- [52] Land C S. Calculation of Imbibition Relative Permeability for Two- and Three-Phase Flow From Rock Properties[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1968, 8(02): 149-156.
- [53] Spiteri E J, Juanes R, Blunt M J, et al. Relative Permeability Hysteresis: Trapping Models and Application to Geological CO₂ Sequestration[C]. SPE-96448-MS[2025-01-08]. <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings/05ATCE/05ATCE/SPE-96448-MS/89262>.
- [54] Honarpour M, Mahmood S M. Relative-Permeability Measurements: An Overview[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1988, 40(08): 963-966.
- [55] Leverett M C, Lewis W B. Steady Flow of Gas-oil-water Mixtures through Unconsolidated Sands[J]. *Transactions of the AIME*, 1941, 142(01): 107-116.
- [56] Leverett M C. Capillary Behavior in Porous Solids[J]. *Transactions of the AIME*, 1941, 142(01): 152-169.

- [57] Perrin J C, Krause M, Kuo C W, et al. Core-scale experimental study of relative permeability properties of CO₂ and brine in reservoir rocks[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 3515-3522.
- [58] Perrin J C, Benson S. An Experimental Study on the Influence of Sub-Core Scale Heterogeneities on CO₂ Distribution in Reservoir Rocks[J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 82(1): 93-109.
- [59] He D, Jiang P, Lun Z, et al. Pore scale CFD simulation of supercritical carbon dioxide drainage process in porous media saturated with water[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2019, 41(15): 1791-1799.
- [60] Weger R J, Eberli G P, Baechle G T, et al. Quantification of pore structure and its effect on sonic velocity and permeability in carbonates[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(10): 1297-1317.
- [61] Alyafei N, Blunt M J. The effect of wettability on capillary trapping in carbonates[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 90: 36-50.
- [62] Spurin C, Bultreys T, Bijeljic B, et al. Intermittent fluid connectivity during two-phase flow in a heterogeneous carbonate rock[J]. *Physical Review E*, 2019, 100(4): 043103.
- [63] Spurin C, Bultreys T, Bijeljic B, et al. Mechanisms controlling fluid breakup and reconnection during two-phase flow in porous media[J]. *Physical Review E*, 2019, 100(4): 043115.
- [64] Menke H P, Gao Y, Linden S, et al. Using Nano-XRM and High-Contrast Imaging to Inform Micro-Porosity Permeability During Stokes–Brinkman Single and Two-Phase Flow Simulations on Micro-CT Images[J]. *Frontiers in Water*, 2022, 4: 935035.
- [65] Tanino Y, Blunt M J. Capillary trapping in sandstones and carbonates: Dependence on pore structure: CAPILLARY TRAPPING-DEPENDENCE ON PORE STRUCTURE[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(8)[2023-10-09]. <http://doi.wiley.com/10.1029/2011WR011712>.
- [66] 屈海洲, 郭新宇, 徐伟, 等. 碳酸盐岩微孔隙的分类、成因及对岩石物理性质的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1102-1117.
- [67] 王晨晨, 姚军, 杨永飞, 等. 碳酸盐岩双孔隙数字岩心结构特征分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(2): 71-74.
- [68] Bultreys T, Stappen J V, Kock T D, et al. Investigating the relative permeability behavior of microporosity-rich carbonates and tight sandstones with multiscale pore network models[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(11): 7929-7945.
- [69] Bultreys T, Van Hoorebeke L, Cnudde V. Simulating secondary waterflooding in heterogeneous rocks with variable wettability using an image-based, multiscale pore network model: waterflooding simulations with multi-scale PNM[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(9): 6833-6850.
- [70] Lin Q, Bijeljic B, Rieke H, et al. Visualization and quantification of capillary drainage in the pore space of laminated sandstone by a porous plate method using differential imaging X-ray

- microtomography[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(8): 7457-7468.
- [71] EL-DIEB A S, Hooton R D. Evaluation of the Katz-Thompson model for estimating the water permeability of cement-based materials from mercury intrusion porosimetry data[J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(3): 443-455.
- [72] Fu J, Thomas H R, LI C. Tortuosity of porous media: Image analysis and physical simulation[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 212: 103439.
- [73] Zhang G, Foroughi S, Raeini A Q, et al. The impact of bimodal pore size distribution and wettability on relative permeability and capillary pressure in a microporous limestone with uncertainty quantification[J]. *Advances in Water Resources*, 2023, 171: 104352.
- [74] Askarinezhad R. A new statistical approach to pore/throat size distribution of porous media using capillary pressure distribution concept[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 75(1-2): 100-104.
- [75] Buades A, Coll B, Morel J M. A Non-Local Algorithm for Image Denoising[C]. 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05): volume 2. San Diego, CA, USA: IEEE, 2005: 60-65[2025-02-23].
- [76] Khan Z A, Elkamel A, Gostick J T. Efficient extraction of pore networks from massive tomograms via geometric domain decomposition[J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 145: 103734.
- [77] Khan Z A, Salaberri P A G, Heenan T M M, et al. Probing the Structure-Performance Relationship of Lithium-Ion Battery Cathodes Using Pore-Networks Extracted from Three-Phase Tomograms[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, 167(4): 040528.
- [78] Zhang L. A hybrid pore-network-continuum modeling framework for flow and transport in 3D digital images of porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2024, 190: 104753.
- [79] Shi B, Jiang H, Guo B, et al. Modeling of flow and transport in multiscale digital rocks aided by grid coarsening of microporous domains[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 633: 131003.
- [80] Tiab D, Donaldson E C. *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*[M]. Fourth edition. Amsterdam; Boston: Elsevier/GPP, Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, 2016.
- [81] Hakimov N, Syed F I, Muther T, et al. Pore-scale network modeling approach to study the impact of Microporosity's pore space topology[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2022, 338: 111918.
- [82] Li M, Tang Y B, Bernabe Y, et al. Pore connectivity, electrical conductivity, and partial water saturation: Network simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(6): 4055-4068.

- [83] 田瀚, 王贵文, 王克文, 等. 碳酸盐岩储层孔隙结构对电阻率的影响研究[J]. 地球物理学报, 2020, 63(11): 4232-4243.
- [84] Guo Z, Zhao T S. Lattice Boltzmann model for incompressible flows through porous media[J]. Physical Review E, 2002, 66(3): 036304.
- [85] Frangos M, Jaimoukha I M. Adaptive Rational Interpolation: Arnoldi and Lanczos-like Equations[J]. European Journal of Control, 2008, 14(4): 342-354.
- [86] Jahnvi M, Rao D R, Sujatha A. A Comparative Study Of Super-Resolution Interpolation Techniques: Insights For Selecting The Most Appropriate Method[J]. Procedia Computer Science, 2024, 233: 504-517.
- [87] Ruspini L C, Lindkvist G., Bakke S., et al. A Multi-Scale Imaging and Modeling Workflow for Tight Rocks[C]//All Days. Denver, Colorado, USA: SPE, 2016: SPE-180268-MS[2023-09-03].
- [88] 美合日阿依·穆太力普, 李涛, 顾文波, 等. 基于孔隙网络模型的气液渗流特性[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2802-2812.
- [89] 蒋兰兰. CO₂地质封存多孔介质内气液两相渗流特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [90] 美合日阿依·穆太力普. CO₂地质封存气-液-固相界面特性及其对渗流的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [91] Qin C Z, Van Brummelen H. A dynamic pore-network model for spontaneous imbibition in porous media[J]. Advances in Water Resources, 2019, 133: 103420.
- [92] Mason G, Morrow N R. Capillary behavior of a perfectly wetting liquid in irregular triangular tubes[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1991, 141(1): 262-274.
- [93] Patzek T W, Kristensen J G. Shape Factor Correlations of Hydraulic Conductance in Noncircular Capillaries[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2001, 236(2): 305-317.
- [94] 兰盈伯, 程东会, 项琳, 等. 逾渗理论在多孔介质渗透性能研究中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2024, 53(8): 41-44.
- [95] 陈猛. 致密油储层水驱油实验及动态网络模拟研究[D]. 西南石油大学, 2017.
- [96] Blunt M J. Physically-based network modeling of multiphase flow in intermediate-wet porous media[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1998, 20(3-4): 117-125.
- [97] Øren P E, Bakke S, Arntzen O J. Extending Predictive Capabilities to Network Models[J]. SPE Journal, 1998, 3(04): 324-336.
- [98] Killough J E. Reservoir simulation with history-dependent saturation functions[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1976, 16(01): 37-48.
- [99] Li Y, Zhang Z, Hu S, et al. Evaluation of irreducible water saturation by electrical imaging logging based on capillary pressure approximation theory[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 224: 211592.

- [100] EL-HUSSEINY A, Vega S, Nizamuddia S. The effect of pore structure complexity and saturation history on the variations of acoustic velocity as function of brine and oil saturation in carbonates[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 179: 180-191.
- [101] Amooie A. A pore-network modeling perspective on the dynamics of residual trapping in geological carbon storage[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2024, 136: 104200.
- [102] Kimbrbe E J H. The effect of original and initial saturation on residual nonwetting phase capillary trapping efficiency[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, 120: 103578.
- [103] Purswani P. Impact of wettability on capillary phase trapping using pore-network modeling[J]. *Advances in Water Resources*, 2024, 184: 104606.
- [104] Mansoori S K A, Itsekiri E, Iglaure S, et al. Measurements of non-wetting phase trapping applied to carbon dioxide storage[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(2): 283-288.

附 录

A. 作者在攻读学位期间发表的论文目录

- [1] **Zhao, X.**, Shi, B., Wang, X. et al. Modeling of permeability and formation factor of carbonate digital rocks: dual-pore-network and pore-network-continuum models[J]. Transport in Porous Media, 2025, 152(6): 37. (对应论文第 3 章)
- [2] **Zhao, X.**, Shi, B., Wang, X. et al. Application of dual-pore-network model in CO₂ capillary trapping storage: validation using pore-network-continuum model and Experimental Data. (In preparation, 对应论文第 4 章)

B. 作者在攻读学位期间取得的科研成果目录

1. 专利

- [1] 秦朝中, **赵星圆**, 史博文, 田键. 一种基于双尺度孔隙网络模型的碳酸盐岩渗透率计算方法[P]. 重庆市: CN118150430A, 2024-06-07. (实质审查中)

2. 科研项目

- [1] 页岩气微纳尺度非线性流动模型开发与渗流机理研究, 西南油气田页岩气研究院。
- [2] 国家自然科学基金联合基金项目(重点支持项目), 深层页岩气藏非线性渗流机理与产能智能预测(U23A20595)。

C. 学位论文数据集

关键词		密级		中图分类号	
双重孔隙网络模型；孔隙网络-连续介质模型；多尺度数字岩心；多孔介质；二氧化碳封存		公开		X9	
学位授予单位名称	学位授予单位代码	学位类别		学位级别	
重庆大学	10611	学术学位		硕士	
论文题名		并列题名		论文语种	
碳酸盐岩双重孔隙网络模型与微观气水流动研究		无		中文	
作者姓名	赵星圆	学号		202220021038	
培养单位名称		培养单位代码			
重庆大学		10611			
学科专业	研究方向	学制		学位授予年	
安全科学与工程	数字岩心-多尺度渗流力学	3		2025 年	
论文提交日期	2025.06	论文总页数		88	
导师姓名	李勇	职称		副教授	
答辩委员会主席		司鹄 教授			
电子版论文提交格式					
文本（√） 图像（） 视频（） 音频（） 多媒体（） 其他（）					

D. 补充信息

1. 孔隙网络-连续介质模型求解绝对渗透率和地层因子

在 PNCM 中, 我们使用微孔体素作为计算网格, 而不是 DPNM 中使用分水岭分割后的微孔单元。此外, 我们对微孔区域体素做了多重卷积粗化, 在保证计算精度的情况下减少计算网格, 如图 2.7(f) 以及表 3.2 中粗化后微孔网格数量所示。基于第三章中公式 3.1 的质量守恒方程, 对于 PNCM, 微孔与微孔体素网格之间的传导率^[79]调和平均计算公式为:

$$T_{ij} = \frac{a_i a_j}{a_i + a_j} \quad a_i = \frac{A_i k_i}{\mu d_i} \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{f}_i \quad a_j = \frac{A_j k_j}{\mu d_j} \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{f}_j \quad (\text{D1})$$

其中, a_i 是网格 i 的传导率, a_j 是网格 j 的传导率, A_i 是两个网格之间的接触面积, 与 A_j 相等, k_i 是网格 i 的渗透率 (在 DPNM 中, k_i 是分割后微孔单元 i 的渗透率), d_i 为交界面与网格 i 的质心之间的距离, $\mathbf{n}_i$ 为网格 i 内界面法线方向的单位向量, $\mathbf{f}_i$ 是网格 i 的质心到界面质心连线方向的单位矢量。对于大孔和微孔网格界面上传导率的调和平均为:

$$T_{ij} = \frac{a_i a_j}{a_i + a_j} \quad a_i = \frac{\pi R_i^4}{8 \mu R_i} \quad a_j = \frac{A_j k_j}{\mu d_j} \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{f}_j \quad (\text{D2})$$

其中, a_i 是孔隙体 i 的水力传导系数, a_j 为微孔网格 j 的传导率。一般情况下, 界面处大孔中的阻力略微被低估。

在地层因子 (FF) 计算中, 对于一对大孔隙, 采用公式 3.5 计算总传导率。对于一对微孔网格, 总传导率计算公式为:

$$T_{ij}^e = \frac{b_i b_j}{b_i + b_j} \quad b_i = \frac{A_i \sigma_{w,i}^{eff}}{d_i} \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{f}_i \quad b_j = \frac{A_j \sigma_{w,j}^{eff}}{d_j} \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{f}_j \quad (\text{D3})$$

大孔与微孔网格界面传导率计算公式为:

$$T_{ij}^e = \frac{b_i b_j}{b_i + b_j} \quad b_i = \frac{\pi R_i^2 \sigma_w}{R_i} \quad b_j = \frac{A_j \sigma_{w,j}^{eff}}{d_j} \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{f}_j \quad (\text{D4})$$

最后, 采用达西方程和双重孔隙网络模型中的有效电导率方程 (公式 3.3 和 3.6) 计算绝对渗透率和地层因子。关于 PNCM 数值计算绝对渗透率和地层因子的更多细节, 可以参考相关参考文献^[78,79]。

2. 模型及求解伪代码

表 D1 双重孔隙网络模型及孔喉信息提取伪代码

双重孔隙网络模型及孔喉信息提取伪代码	
输入:	岩心分割后 CT 图像, 0-固体、1-微孔、2-大孔, 体素孔隙率与侵入压力分布图
输出:	双重孔隙网络模型文件 (DPNM.VTP), 孔喉信息文本 (Pore.txt, Throat.txt)
1:	基于大孔和微孔进行距离变换与高斯滤波
2:	设定检索半径 R, 寻找真峰值点, 基于标记的分水岭分割得到大孔、微孔单元数, N_1, N_2
3:	基于体素孔隙率和侵入压力计算微孔单元平均孔隙率和平均孔径
4:	基于 PoreSpy 开源软件, 提取孔隙和喉道基本参数信息
5:	标记孔隙类型: 0-大孔、1-微孔, 孔隙连接关系: 大孔-大孔、大孔-微孔、微孔-微孔, 将标记信息写入孔隙网络, 生成 DPNM.VTP
6:	生成 m 行, n 列以及 i 行, j 列的孔隙和喉道二维存储信息数组
7:	设定检索厚度与边界长度, 提取进出口边界信息
8:	行、列合并模型孔隙、喉道与进出口边界信息
9:	生成孔喉信息文本 Pore.txt 与 Throat.txt

X坐标	Y坐标	Z坐标	等效 半径	半配 位数	累计半 配位数	孔隙 类型	孔隙 率	平均 孔径	喉道相连两 个孔隙编号	等效 半径	经过喉道质 心的总长度	
385.1303	255.9681	-15.6978	6.3391	1	106	0	1.0000	1.0000	2139	7805	1.1284	22.2801
394.2521	76.3950	-9.8275	3.8444	1	107	0	1.0000	1.0000	2139	7830	2.7640	20.0995
392.2359	6.2093	-7.8165	4.1574	1	108	0	1.0000	1.0000	2139	7877	1.3820	29.3476
398.0612	7.5612	-8.8732	2.8601	1	109	0	1.0000	1.0000	2140	2177	0.9772	10.5748
1.3834	2.3005	-8.5327	3.5850	1	110	1	0.6760	3.5389	2140	2189	1.5958	11.4395
1.3267	13.7933	-10.9122	3.2961	1	111	1	0.3231	2.7670	2140	7326	2.2568	32.5000
7.1114	55.7456	-20.4366	9.2227	1	112	1	0.1097	1.9300	2140	7496	5.4990	12.4808
8.0231	178.8566	-22.4749	12.3509	1	113	1	0.1614	2.1956	2140	7599	6.6756	38.9331
3.7370	253.4419	-13.1167	5.1102	1	114	1	0.1338	2.0622	2141	7346	4.6524	36.8881
1.6056	331.3611	-5.7886	3.5026	1	115	1	0.3172	2.7500	2141	7696	3.0383	14.6406
0.9697	366.1970	-8.7412	2.5070	1	116	1	0.3859	2.9357	2141	7886	4.8860	33.1243
1.5376	372.7527	-9.2771	2.8106	1	117	1	0.2539	2.5533	2142	7346	2.4592	40.5871
1.9675	380.9958	-10.4013	5.5290	1	118	1	0.1144	1.9572	2142	7696	3.9088	14.4426
1.5476	395.6667	-9.6956	2.7168	1	119	1	0.0606	1.5836	2142	7886	3.9088	35.5139
5.0791	203.2109	-14.2201	8.4239	1	120	1	0.2706	2.6081	2143	7243	4.8204	17.8108
2.0056	267.0278	-10.2108	3.5026	1	121	1	0.1276	2.0298	2143	7513	3.8265	9.8409
6.5982	257.8843	-12.3538	8.5499	1	122	1	0.2556	2.5591	2143	7683	3.4318	11.2366
5.3271	367.4246	-10.7872	4.6859	1	123	1	0.2926	2.6768	2143	8335	10.2335	51.9937
4.0600	326.9440	-9.8279	3.9080	1	124	1	0.3680	2.8896	2144	2268	1.8712	14.2459
4.8226	394.5263	-10.8073	4.9660	1	125	1	0.1223	2.0016	2144	7436	2.4592	9.9487
6.5448	78.1962	-14.1319	8.9191	1	126	1	0.1541	2.1619	2144	7521	1.4927	7.1828
5.8516	92.5312	-9.7606	3.1264	1	127	1	0.0361	1.3324	2144	7546	2.9316	14.5436
3.8999	315.8285	-13.2143	5.5832	1	128	1	0.2990	2.6964	2144	7600	0.9772	23.8631
7.0752	335.9666	-12.6146	4.4090	1	129	1	0.2672	2.5971	2144	7956	2.8209	17.7950
7.6679	238.0760	-19.2162	9.2246	1	130	1	0.2495	2.5384	2145	2166	4.5135	13.6601
8.0884	268.7269	-8.0090	4.9172	1	131	1	0.3225	2.7653	2145	7440	2.4592	8.8262
8.1840	284.0770	-15.6655	6.3351	1	132	1	0.2526	2.5489	2145	7525	3.2410	18.1244
8.1386	298.4633	-11.5741	6.1345	1	133	1	0.2718	2.6119	2145	7674	3.0902	10.2883
10.1793	386.5241	-9.9985	4.7004	1	134	1	0.0955	1.8432	2145	7732	6.6277	17.4426
11.3168	106.9109	-10.3324	2.8890	1	135	1	0.0345	1.3131	2145	7884	2.7640	20.3445
17.9720	200.3098	-18.9312	9.3863	1	136	1	0.3701	2.8951	2145	8138	3.4318	21.8168
15.4571	288.1238	-9.8342	2.9266	1	137	1	0.4331	3.0508	2145	8189	5.5566	41.9683
19.0579	53.7759	-14.9939	6.8221	1	138	1	0.1965	2.3442	2145	8622	1.5958	61.3282
17.0537	271.3232	-14.0240	7.2314	1	139	1	0.3503	2.8425	2146	2182	5.4990	12.7828
									2146	2232	1.8712	11.7787
									2146	7090	4.6524	34.5165
									2146	7302	4.1459	17.7518
									2146	7500	2.5854	29.5665
									2146	7624	3.0902	14.2151

单相-Pore.txt

单相-Throat.txt

单相-Pore.txt

单相-Throat.txt

图 D1 单相流动孔隙和喉道信息提取

X坐标	Y坐标	Z坐标	内切圆 半径	形状 因子	孔隙 长度	三角形 截面 β_1	三角形 截面 β_2	三角形 截面 β_3	截面形 状标记	半配 位数	全配 位数	全配 位数	全配 位数	微孔单元 孔隙率	微孔单元 平均孔径
7.2923e-04	2.4387e-03	2.5626e-03	2.3436e-05	5.9635e-02	6.9500e-05	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	5»	41540»	7»	63511»	8.4902e-02	1.7722e-06
7.2955e-04	2.5307e-03	6.9527e-04	2.9787e-05	5.5542e-02	9.8274e-05	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	4»	41544»	9»	63520»	2.5286e-01	2.5498e-06
7.1521e-04	3.1043e-05	1.1422e-03	3.9000e-05	4.9786e-02	1.5162e-04	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	4»	41548»	10»	63530»	2.3918e-01	2.5030e-06
7.1992e-04	4.1500e-04	1.3595e-04	4.1110e-05	4.7798e-02	1.2993e-04	4.6818e-01	5.4658e-01	5.604e-01	1»	5»	41553»	20»	63550»	5.8446e-01	3.3713e-06
7.2191e-04	5.2597e-04	1.6391e-04	2.2517e-05	5.1357e-02	8.3552e-05	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	2»	41555»	10»	63560»	6.3230e-01	3.4609e-06
7.4653e-04	6.3929e-04	1.1145e-03	2.3436e-05	4.4416e-02	7.6840e-05	3.5537e-01	5.2698e-01	6.8845e-01	1»	2»	41557»	7»	63567»	1.8168e-01	2.2838e-06
7.4548e-04	9.1039e-04	2.1329e-03	2.6800e-05	3.4337e-02	9.9937e-05	2.0846e-01	5.6534e-01	7.9700e-01	1»	6»	41563»	13»	63580»	2.5725e-01	2.5645e-06
7.3343e-04	9.1609e-04	3.0869e-05	3.5004e-05	3.9389e-02	1.2187e-04	2.7296e-01	5.1373e-01	7.8411e-01	1»	9»	41572»	17»	63597»	3.6103e-01	2.8712e-06
7.2972e-04	9.4172e-04	1.2943e-04	2.2517e-05	4.4460e-02	7.3789e-05	3.6228e-01	5.0669e-01	7.0182e-01	1»	5»	41577»	12»	63609»	3.6115e-01	2.8715e-06
7.2298e-04	1.0055e-03	2.1659e-03	3.3144e-05	4.3607e-02	1.0967e-04	3.3359e-01	5.5189e-01	6.8532e-01	1»	3»	41580»	6»	63615»	3.6030e-02	1.3318e-06
7.2131e-04	1.2624e-03	2.2768e-05	2.2517e-05	5.4982e-02	7.5427e-05	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	2»	41582»	4»	63619»	1.5953e-01	2.1869e-06
7.3136e-04	1.4044e-03	9.1062e-04	1.4534e-05	5.5680e-02	4.7777e-05	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	1»	41583»	6»	63625»	6.0856e-01	3.4170e-06
7.5709e-04	1.6117e-03	1.4045e-03	2.0555e-05	4.0959e-02	7.0179e-05	3.4334e-01	3.9544e-01	8.3201e-01	1»	4»	41587»	10»	63635»	4.9932e-01	3.1990e-06
7.4291e-04	1.6339e-03	2.3714e-03	4.1110e-05	5.2099e-02	1.4930e-04	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	3»	41590»	9»	63644»	7.9689e-02	1.7352e-06
7.4318e-04	1.7631e-03	1.7555e-03	2.9787e-05	3.7779e-02	1.0589e-04	2.5688e-01	4.8625e-01	8.2767e-01	1»	9»	41599»	21»	63665»	2.9455e-01	2.6829e-06
7.2578e-04	1.6731e-03	2.1409e-03	6.6287e-05	4.7772e-02	2.0956e-04	4.8914e-01	4.9702e-01	5.8463e-01	1»	8»	41607»	23»	63688»	2.0717e-01	2.3860e-06
7.3638e-04	1.8397e-03	1.7586e-03	1.9500e-05	4.6915e-02	6.2209e-05	4.2307e-01	5.3743e-01	6.1030e-01	1»	5»	41612»	16»	63704»	5.8585e-01	3.3740e-06
7.2607e-04	1.8467e-03	1.0683e-03	2.6000e-05	2.9755e-02	1.0415e-04	1.7518e-01	4.6102e-01	9.3460e-01	1»	7»	41619»	16»	63720»	2.4248e-01	2.5144e-06
7.4004e-04	1.9259e-03	3.3434e-04	1.9500e-05	3.8518e-02	6.8656e-05	2.5491e-01	5.6208e-01	7.5380e-01	1»	2»	41621»	4»	63724»	4.1735e-02	1.3987e-06
7.1679e-04	1.9969e-03	1.0800e-03	2.7577e-05	4.4235e-02	9.0602e-05	3.6796e-01	4.7865e-01	7.2419e-01	1»	4»	41625»	9»	63733»	3.2007e-01	2.7582e-06
7.4204e-04	2.5278e-03	3.7781e-04	1.3000e-05	1.4506e-02	7.4583e-05	6.6574e-02	6.0874e-01	8.9548e-01	1»	5»	41630»	10»	63743»	2.6379e-01	2.5860e-06
7.3358e-04	2.5609e-03	5.3633e-04	1.9500e-05	4.8774e-02	7.8181e-05	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	1»	41631»	6»	63749»	3.2329e-01	2.7675e-06
7.2460e-04	2.5395e-03	1.4760e-03	7.1500e-05	3.3456e-02	2.7011e-04	2.4817e-01	3.3579e-01	9.8683e-01	1»	4»	41635»	19»	63768»	3.0047e-01	2.7008e-06
7.3791e-04	1.3463e-04	1.6853e-03	2.3436e-05	3.4954e-02	8.6617e-05	2.4105e-01	4.0549e-01	9.2426e-01	1»	7»	41642»	16»	63784»	4.5147e-01	3.0933e-06
7.3550e-04	2.2450e-04	1.8109e-03	1.9500e-05	3.8769e-02	6.8432e-05	2.6427e-01	5.1591e-01	7.9062e-01	1»	2»	41644»	5»	63789»	2.7667e-01	2.6275e-06
7.0588e-04	6.4479e-04	6.2594e-04	5.0767e-05	4.8268e-02	2.0675e-04	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	2»	41646»	12»	63801»	3.8553e-01	2.9347e-06
7.2764e-04	8.8414e-04	3.9938e-04	2.9787e-05	5.7395e-02	9.3554e-05	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	2»	41648»	9»	63810»	5.3371e-01	3.2667e-06
7.3705e-04	9.8400e-04	4.2406e-04	2.0555e-05	5.5660e-02	6.7600e-05	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	2»	41650»	8»	63818»	2.6774e-01	2.5989e-06
7.2932e-04	1.0383e-03	2.2655e-03	1.4534e-05	1.8509e-02	7.3821e-05	8.8429e-02	6.4746e-01	8.3490e-01	1»	5»	41655»	10»	63828»	2.8445e-01	2.6519e-06
6.8312e-04	1.4234e-03	1.1159e-03	4.1620e-05	3.7302e-02	1.4891e-04	2.5133e-01	4.8377e-01	8.3570e-01	1»	2»	41657»	25»	63853»	2.7272e-01	2.6149e-06
7.5978e-04	1.4891e-03	7.1390e-04	2.6000e-05	2.5844e-02	1.1175e-04	1.4045e-01	4.9140e-01	9.3894e-01	1»	3»	41660»	8»	63861»	1.6459e-01	2.2098e-06
7.4249e-04	1.5694e-03	1.5484e-03	1.9500e-05	6.2017e-02	5.4528e-05	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	3»	41663»	6»	63867»	2.7433e-01	2.6200e-06
7.4228e-04	1.7080e-03	1.1613e-03	1.4534e-05	3.7591e-02	5.1800e-05	2.6245e-01	4.5161e-01	8.5673e-01	1»	1»	41664»	1»	63868»	2.2378e-02	1.1363e-06
7.1913e-04	1.8174e-03	9.7230e-04	5.5556e-05	5.6293e-02	1.7957e-04	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	6»	41670»	17»	63885»	2.1475e-01	2.4147e-06
7.5117e-04	1.9628e-03	1.3969e-03	3.3144e-05	4.8852e-02	1.3256e-04	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2»	5»	41675»	13»	63898»	1.9041e-01	2.3198e-06
7.3686e-04	2.0318e-03	4.6412e-04	1.5922e-05	4.1714e-02	5.3867e-05	3.0954e-01	5.0618e-01	7.5508e-01	1»	1»	41676»	6»	63904»	4.3449e-01	3.0541e-06
7.2421e-04	2.5613e-03	2.6787e-04	1.4534e-05	3.5811e-02	5.3072e-05	2.2785e-01	5.2258e-01	8.2036e-01	1»	1»	41677»	3»	63907»	2.6398e-01	2.5867e-06
7.4826e-04	2.5812e-03	2.5875e-03	1.3000e-05	4.4953e-02	4.2368e-05	3.8809e-01	4.7416e-01	7.0855e-01	1»	5»	41682»	5»	63912»	4.8370e-02	1.4692e-06

准静态两相-Pore.txt

图 D2 准静态两相流动孔隙信息提取

喉道相连两 个孔隙编号	喉道 形状	喉道长度/减去两个 孔隙半径后的长度	经过喉道质 心的总长度	形状因子	三角形截面 β_1	三角形截面 β_2	三角形截面 β_3	内切半径
0»	138»1»	1.3000e-05	5.6506e-05	4.2632e-02	3.2053e-01	5.2659e-01	7.2368e-01	1.3000e-05»
1»	343»1»	1.3000e-05	5.6039e-05	4.3562e-02	3.7581e-01	4.3489e-01	7.6010e-01	1.3000e-05»
2»	468»1»	1.3000e-05	6.4207e-05	2.3080e-02	1.2161e-01	4.6731e-01	9.8187e-01	1.1258e-05»
3»	479»1»	1.3000e-05	5.9925e-05	4.5807e-02	3.8638e-01	5.3943e-01	6.4499e-01	1.4534e-05»
4»	489»1»	1.3000e-05	6.6746e-05	4.1902e-02	3.4403e-01	4.2554e-01	8.0123e-01	1.5922e-05»
5»	496»1»	1.3000e-05	7.9709e-05	4.0798e-02	3.5015e-01	3.8172e-01	8.3893e-01	1.9500e-05»
6»	554»2»	1.3000e-05	7.3202e-05	5.5660e-02	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	2.0555e-05»
7»	563»2»	1.3000e-05	5.4975e-05	5.7249e-02	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	1.4534e-05»
8»	605»1»	1.3000e-05	8.5281e-05	3.4751e-02	2.7471e-01	3.2567e-01	9.7042e-01	1.9500e-05»
9»	646»3»	1.3000e-05	4.6705e-05	7.1032e-02	3.1416e+00	3.1416e+00	3.1416e+00	1.3000e-05»
10»	678»3»	1.3000e-05	4.7893e-05	8.2843e-02	3.1416e+00	3.1416e+00	3.1416e+00	1.4534e-05»
11»	691»1»	1.3000e-05	8.2571e-05	2.5007e-02	1.4369e-01	3.7929e-01	1.0478e+00	1.5922e-05»
12»	709»1»	1.3000e-05	6.5759e-05	3.6236e-02	2.4082e-01	4.7069e-01	8.5928e-01	1.4534e-05»
13»	710»1»	1.3000e-05	1.0970e-04	3.6675e-02	2.2861e-01	6.6760e-01	6.7459e-01	2.6800e-05»
14»	881»1»	1.3000e-05	1.4721e-04	1.7919e-02	9.9764e-02	2.7313e-01	1.1979e+00	2.6000e-05»
15»	884»1»	1.3000e-05	1.2577e-04	3.3314e-02	1.9546e-01	6.3213e-01	7.4320e-01	2.9787e-05»
16»	914»1»	1.3000e-05	8.8361e-05	4.2625e-02	3.1546e-01	5.5357e-01	7.0177e-01	2.2517e-05»
17»	930»1»	1.3000e-05	9.6148e-05	3.2097e-02	1.8377e-01	6.7198e-01	7.1505e-01	2.1558e-05»
18»	940»1»	1.3000e-05	9.5072e-05	3.2944e-02	1.9304e-01	6.0384e-01	7.7391e-01	2.1558e-05»
19»	953»1»	1.3000e-05	7.4662e-05	4.7751e-02	4.9159e-01	4.9241e-01	5.8679e-01	1.9500e-05»
20»	971»2»	1.3000e-05	6.4340e-05	6.1228e-02	7.8540e-01	7.8540e-01	7.8540e-01	1.8385e-05»

准静态两相-Throat.txt

图 D3 准静态两相流动喉道信息提取

表 D2 基于双重孔隙网络模型求解渗透率伪代码

基于双重孔隙网络模型求解渗透率伪代码	
输入:	常量参数设置: 时间步长、体素和模型尺寸大小、孔喉以及进出口边界单元数量, 边界压力
输出:	写入基本信息的压力文件 (Pressure_VTK), 渗透率文本 (Permeability.txt)
1:	初始化模拟器, 构造好需要调用的各个模块
2:	动态分配内存并初始化变量
3:	读取提取的孔喉信息文本 (Pore.txt, Throat.txt)
4:	不同孔隙区域的水力传导系数计算: 大孔-大孔、大孔-微孔、微孔-微孔
5:	基于对角线组装压力求解矩阵
6:	设定残差和迭代步数, 使用 Eigen 库求解线性方程组, 得到每个节点压力
7:	计算模型总流量, 基于 Darcy 公式求解模型渗透率
8:	将孔喉基本信息写入压力文件 Pressure_VTK

3. DPNM 和 PNCM 求解绝对渗透率压力云图

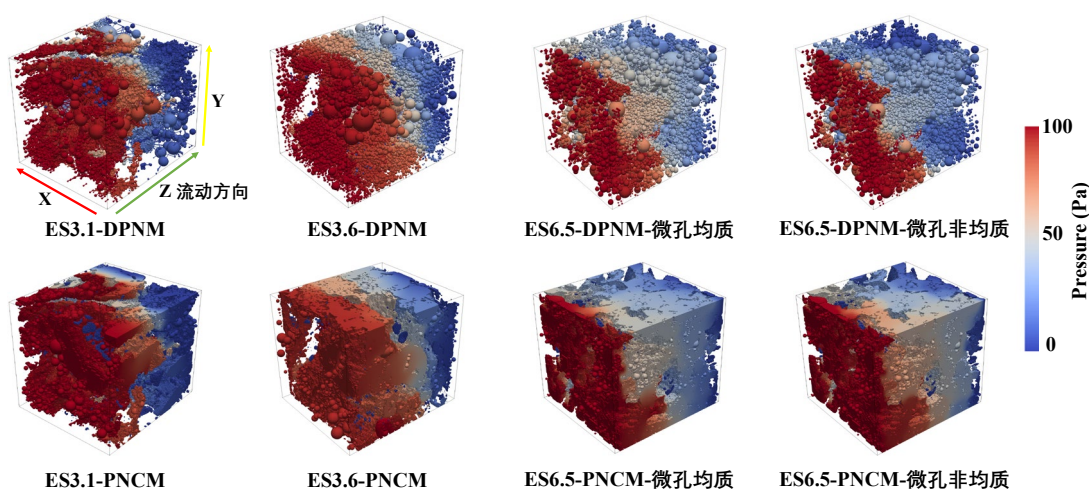


图 D4 DPNM 和 PNCM 求解绝对渗透率压力云图

基于上述压力云图可以看出, 当 DPNM 和 PNCM 微孔区采用均质孔径时, 压力分布几乎没有差别, 在文章 3.3.1 节中绝对渗透率对比结果看到, 微孔为均质孔径时二者计算结果差别不大。当 ES6.5 岩样微孔为非均质孔径时, 可以看到 DPNM 压力下降的特别快, 根据孔径累计分布曲线可得, 微孔单元采用公式 2.9 计算得到的孔径大多小于 $2\text{ }\mu\text{m}$, 导致了侵入毛细管压力过大, 从而压力下降的特别快。

4. 基于 MICP^[31]计算的孔径分布

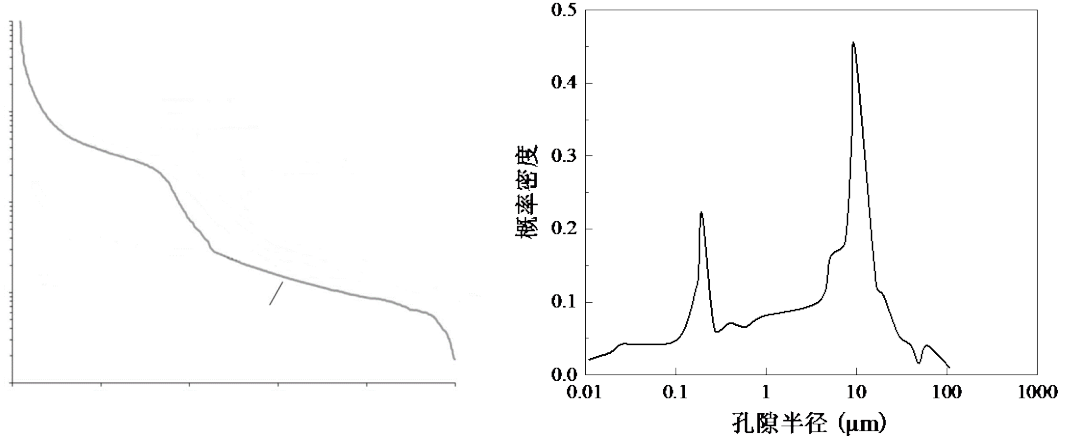


图 D5 参考文献中压汞实验曲线和基于实验曲线计算的孔径分布

基于文献^[31]中压汞实验得到的毛细管力曲线，参考公式：

$$-P^c \frac{dS^w}{dP^c} \quad (D5)$$

其中， P^c 为毛细管力， S^w 为润湿相饱和度，进而计算得到孔径分布的概率密度函数，结合 Young-Laplace 方程，在润湿相饱和度为 1 时计算得到最大孔隙尺寸，在束缚水饱和度处计算得到最小孔隙尺寸。值得注意的是，对于某些孤立的孔隙，汞无法侵入，应在实际计算中有特定的处理。

致 谢

岁月如梭，白驹过隙，转眼间在重庆大学三年的研究生学习即将画上句号。回首三年的学习与生活，我收获了许多美好的回忆，在此期间，我收到了来自老师、同学、学校、家人等多方面的关心与指导，值此论文完成之际，我在此诚挚地向关心、教导我的老师、家人和同学表示由衷的感谢！

首先，非常感谢我的导师李勇副教授对我的接纳与指导，感谢李老师为我提供了研究生学习的机会，为我提供了良好的科研学习平台。感谢李老师在我学习过程中的帮助与照顾，李老师总是会主动的关心学生的进度，尽可能地用最简便的流程帮助学生完成科研与学习任务。并且，李老师严谨求实的工作精神以及换位思考的能力深深地感染着我，为我的科研和生活树立了榜样。

同时，感谢秦朝中教授接纳我进入课题组团队学习，刚开始进入重大这个陌生的环境，是秦老师让我感受到了家人般的关心与指导。秦老师事无巨细的指导我在科研上的学习，一遍又一遍不辞辛苦的指导我修改论文，用自己专业的知识引领我具备独立思考与科研的能力，不断地训练我用更加全面、更加专业的角度去解决问题。在秦老师的身上，我学习到了做事情一丝不苟的态度，面对困难迎难而上的勇气，永无止境追求新的知识的学者风范。除此之外，在生活上秦老师也是十分的关心学生，不仅主动关心学生后续规划，还会尽自己所能帮助学生，无论学生选择就业还是继续深造。非常感谢秦老师三年来对我的帮助、关心与指导。

并且，我也非常感谢史博文师兄非常细致的指导我的科研学习，感谢史师兄带我建立了一个良好的钻研专业知识的思维与习惯。并且，非常感谢史师兄在生活上对我的帮助，使我能够更好的平衡科研与生活。

除此之外，非常感谢团队中的田键老师和蒋函老师，他们总是会在我最需要的时刻给予我最专业的帮助，帮助我修改报告，指导我参加会议，出差在外时刻关心学生的安全，针对我的研究方向从他们擅长的地方给予我最专业的建议，感谢他们对我的帮助与关心。

此外，在三年的学习与生活中，感谢课题组同学们的陪伴，感谢王馨师姐、张怀军师兄、贾桂齐师兄、王志伟师兄对我学习上的指导，感谢荣健淇、高梓函、朱琳、李志颖、邢春旺、王佳辰、王明杰、田超、王笑天等朋友们的帮助与陪伴，感谢各位的一路陪伴、支持和帮助，让我这三年研究生生涯变得更加多姿多彩。

在此我也要感谢我的家人，是他们的无私奉献，我才能没有后顾之忧的安心求学，感谢我的父母对我无私的付出，感谢他们对我生活上的关心与照顾，衷心的感谢我的家人的付出。

最后，衷心地感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授，祝你们身体健康，工作顺利！

赵星圆

二〇二五年六月 于重庆