



重庆大学
CHONGQING UNIVERSITY



2026年中国地球科学联合学术年会 (CGU-2026)

深层煤岩岩心裂隙系统的(原位)CT表征 与渗流数值模拟

秦朝中, 朱琳, 侯浩楠

多孔介质与渗流研究团队

煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室

资源与安全学院, 重庆大学

煤矿动力学灾害与控制
全国重点实验室



重庆大学科学中心

01

研究团队介绍

02

研究背景与问题

03

中轴面提取与渗流模型

04

全岩心裂隙系统渗透率预测

05

结论与展望

多孔介质与渗流研究团队 – 全职人员



秦朝中

- 2019.11~至今，重庆大学资源与安全学院，重庆大学百人计划学者、教授、博士生导师
- 2016.11~2019.10，荷兰埃因霍温理工大学（机械工程），达西研究中心，执行主管
- 2005.09~2016.10，西安交通大学学士、中国科学技术大学硕士、荷兰乌特列支大学/通用汽车欧洲研究院博士、博士后
- 从事数字岩心分析技术、多尺度渗流力学等方面的研究，主持或参与国家自然科学基金（面上、国际合作交流、区域联合重点基金和中美战略合作研究项目）、国家外国专家项目、重庆市新能源专项、煤炭重大专项子课题和头部能源企业委托项目多项，参与德国科学基金会（DFG）面上项目和合作研究中心项目。以主要作者发表学术论文60多篇，现担任Earth Energy Science杂志执行副主编、InterPore Journal主编、InterPore中国分会委员、InterPore MS-05分会场召集人。



田 键

- 重庆大学资源与安全学院，副教授
- 2021年，博士毕业于西南石油大学油气井工程，从事油气储层保护与开发，致密油气藏提高采收率理论与技术
- 主持（研）国家自然科学基金、博士后基金等多项科研项目，在石油学报、Physics of fluids、Journal of Petroleum Science and Engineering等顶级期刊发表论文20余篇



蒋 函

- 重庆大学资源与安全学院，讲师、助理研究员
- 2021年，博士毕业于澳大利亚新南威尔士大学石油工程专业，从事数字岩心分析技术与渗流理论研究
- 主持（研）国家自然科学基金、博士后基金等多项科研项目，在Water Resources Research、Physical Review E、Journal of Petroleum Science and Engineering等顶级期刊发表论文10余篇

团队网站: <http://czqin.github.io>

多孔介质与渗流研究团队 – 客座与兼职教授



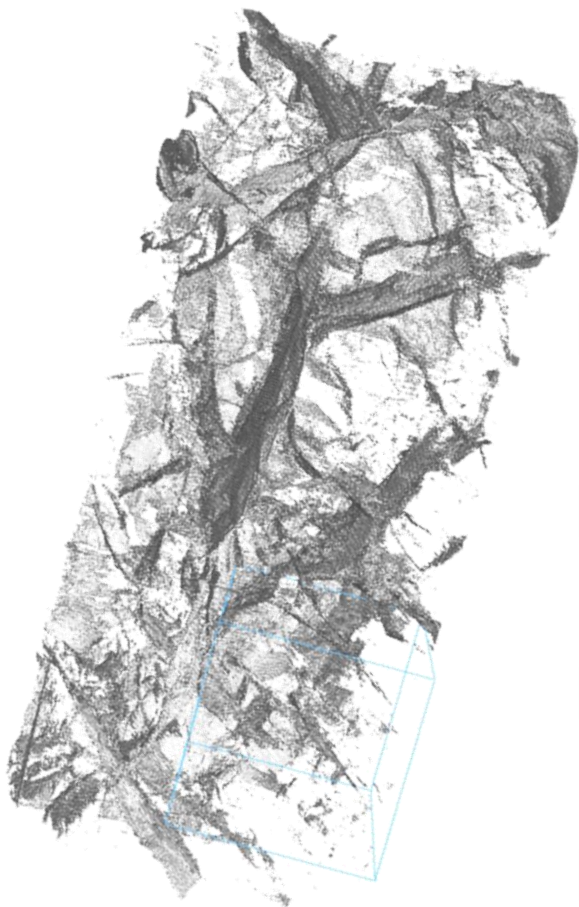
Majid Hassanizadeh 院士
荷兰乌特列支大学教授
重庆大学客座教授
国际多孔介质学会执行主管
渗流理论研究



Nima Shokri
德国汉堡科技大学教授
重庆大学客座教授
InterPore Journal 主编
水文学、气候驱动工程技术研究



徐石城
怀柔实验室燃料电池研究团队
重庆大学兼职教授
2024年入选火炬计划青年人才
燃料电池膜电极研究



全岩心裂隙系统

01

研究团队介绍

02

研究背景与科学问题

03

中轴面提取与渗流模型

04

全岩心裂隙系统渗透率预测

05

结论与展望

研究背景与科学问题：研究背景

本研究依托深地国家科技重大专项项目“深部特殊空间探测与利用关键技术及示范”课题6：**深部煤层CO₂高效存储利用与安全监测技术**。

深部煤层/煤层气：

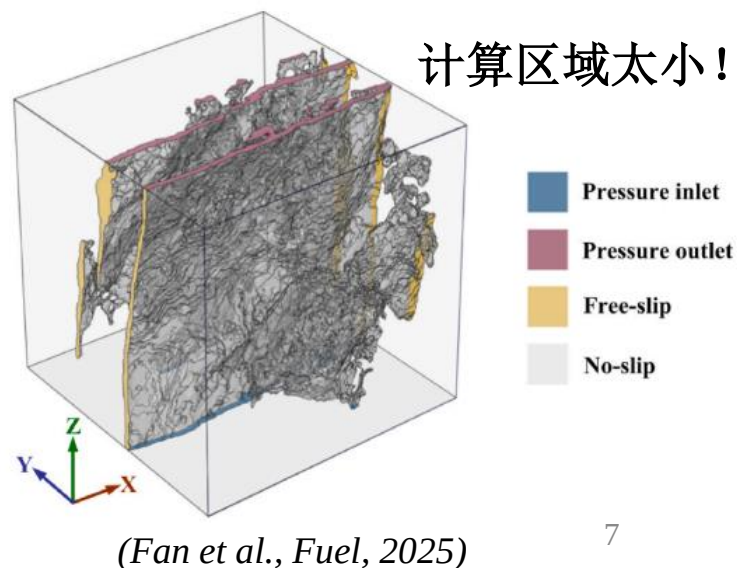
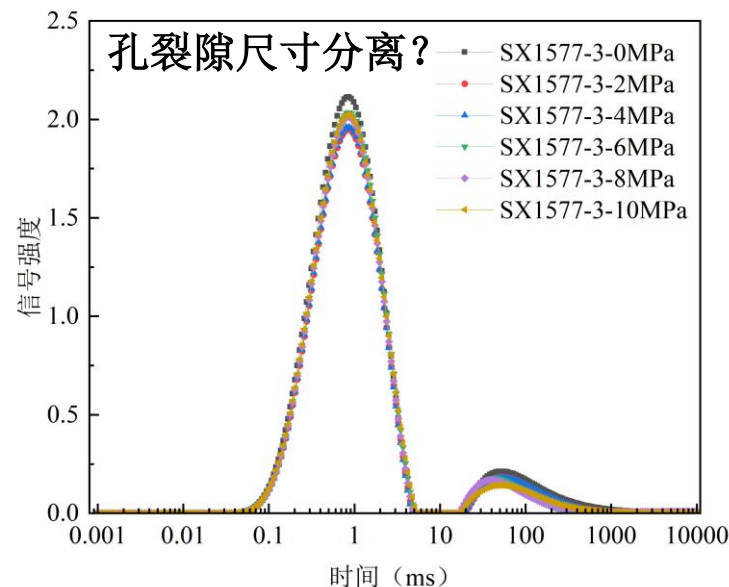
- ❑ 高地应力、高温、高压，应力状态转变，强耦合等
- ❑ CO₂封存中的水岩反应特征（含有方解石和白云石等）
- ❑ 裂缝特征：构造裂缝、**割理/裂缝系统（主要流动通道）**
- ❑ 应力敏感性特征（注采过程）
- ❑ 水力压裂改造中的增透扩容
- ❑ CO₂运移监测与泄露预警技术
- ❑ **“深部”的定义是什么？**

煤岩岩心裂隙系统研究：

1. 多级裂隙系统的表征
2. 裂隙开度的应力响应
3. 有效应力作用下裂隙流动主控通道的演化

CT成像与数值模拟的挑战：

1. 煤岩裂隙系统表征中分辨率与视域的矛盾
($\sim 2000^3$ voxels)
2. 有效应力下裂隙闭合导致分辨率不足
3. 计算量的问题（上亿的网格数）



Outline



01

研究团队介绍

02

研究背景与科学问题

03

中轴面提取与渗流模型

04

全岩心裂隙系统渗透率预测

05

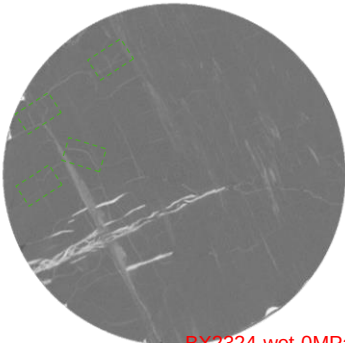
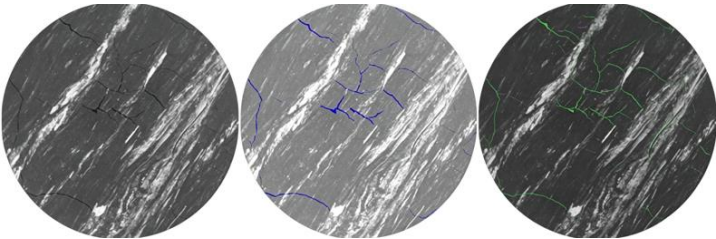
结论与展望

煤岩样品与CT成像

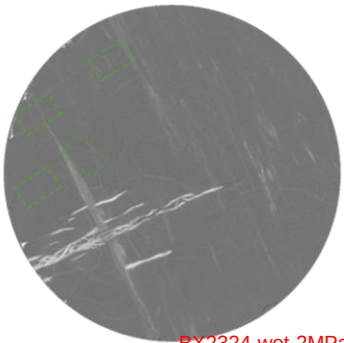
序号	层位	埋深	Mad水分(%)	Aad灰分(%)	Vdaf挥发分(%)	固定碳(%)	镜质组反射率R _o (%)	渗透率(mD)
BX2324	本溪	2942.52-2944.32	0.47	4.67	7.59	87.74	2.77	1.310
BX1577	本溪	2814.93-2816.86	0.46	9.36	10.57	80.07	2.75	1.609
SX1577	山西	2780.42-2782.25	0.27	39.09	15.48	45.43	1.94	0.612
SX1572	山西	2573.45-2715.56	0.59	13.13	9.25	77.62	2.08	1.119

煤岩样品信息

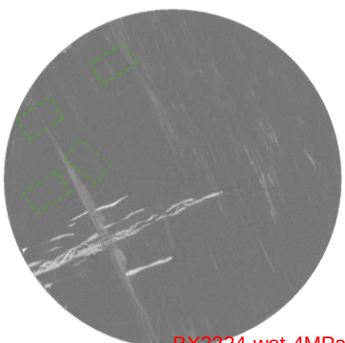
扫描电压：130 kV
扫描电流：180 μ A
分辨率：12.08 μ m



BX2324-wet-0MPa



BX2324-wet-2MPa



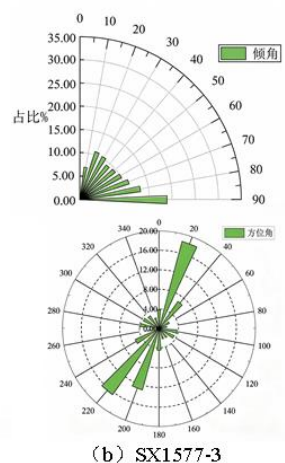
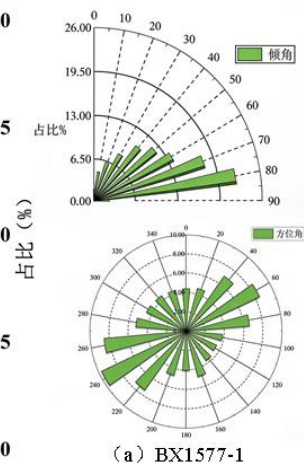
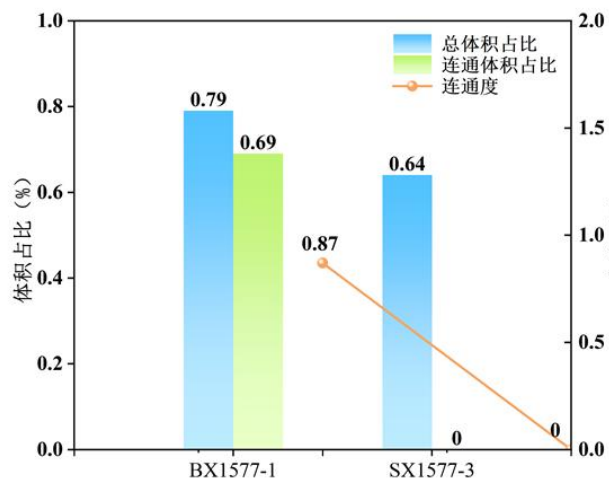
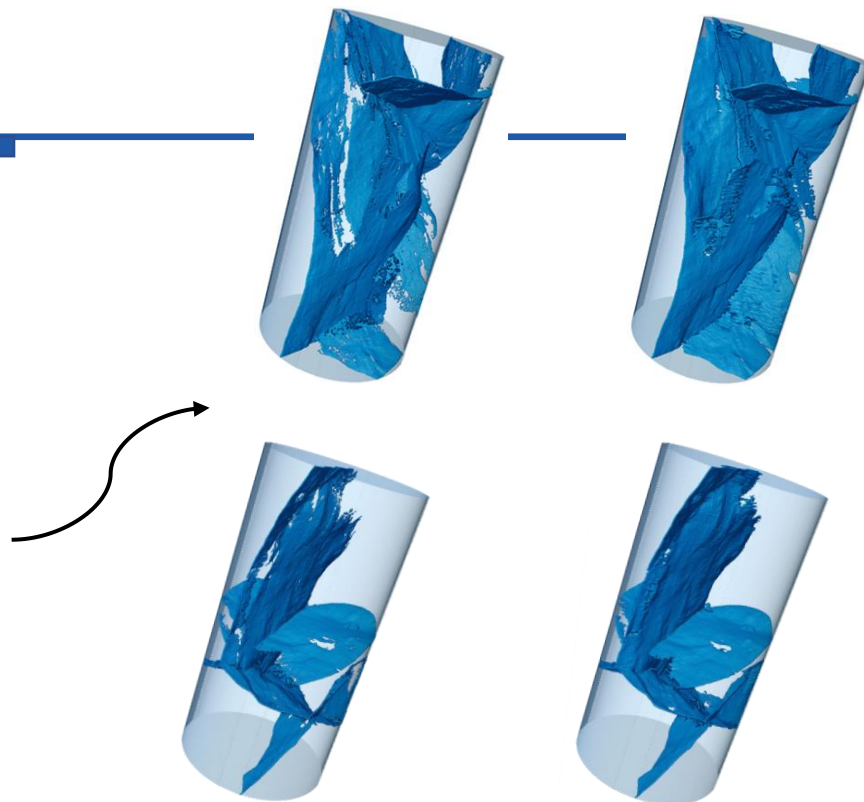
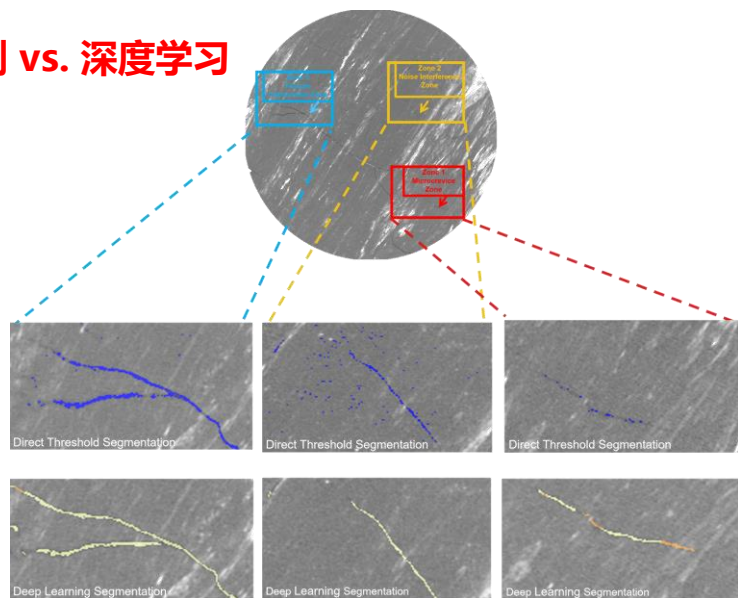
BX2324-wet-4MPa

原位CT扫描:

1. 随着围压，裂隙闭合，可识别性变差
2. 裂隙区域KI灰度在改变，与裂缝开度有一定相关性

裂隙分割与特征分析

阈值分割 vs. 深度学习



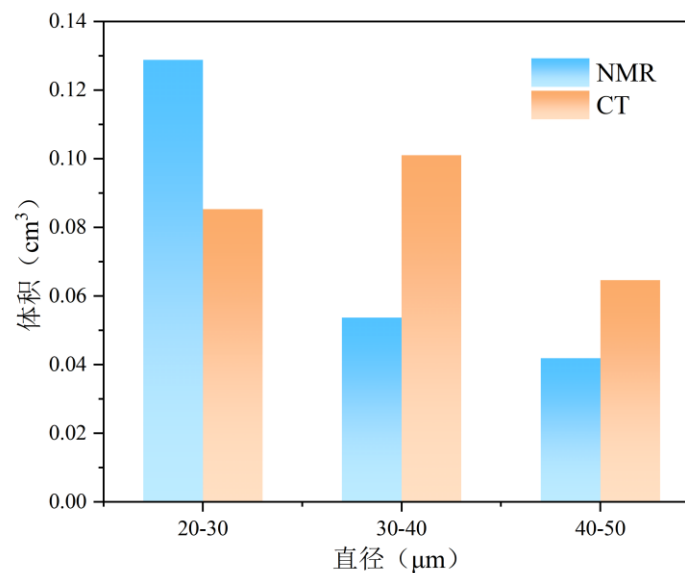
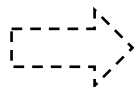
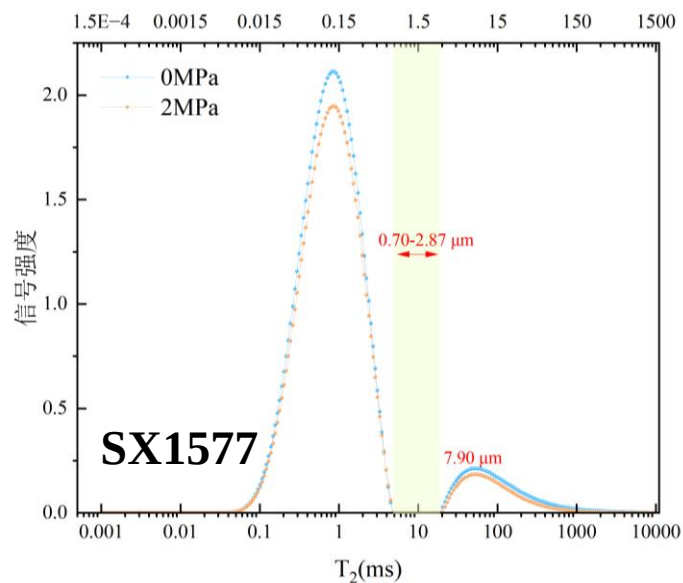
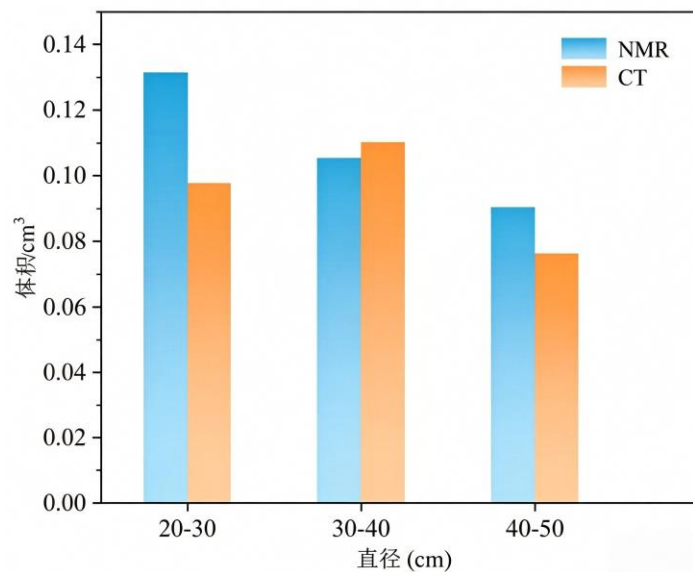
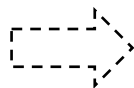
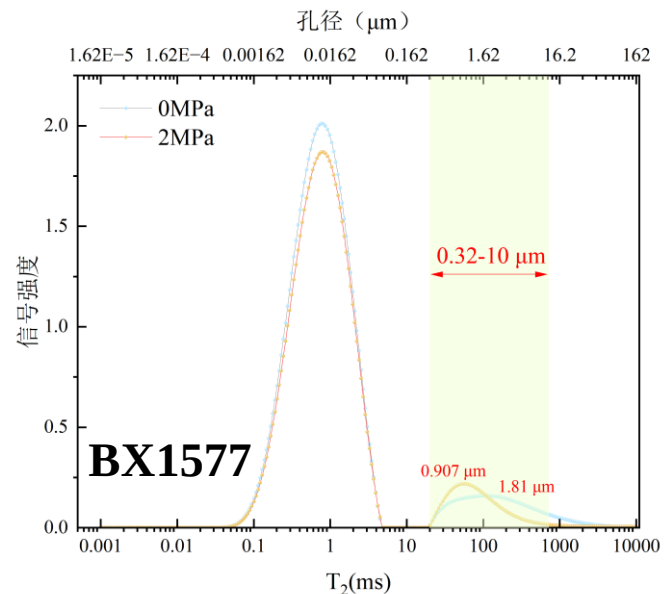
裂隙垂向分布为主

裂隙占比小于1%

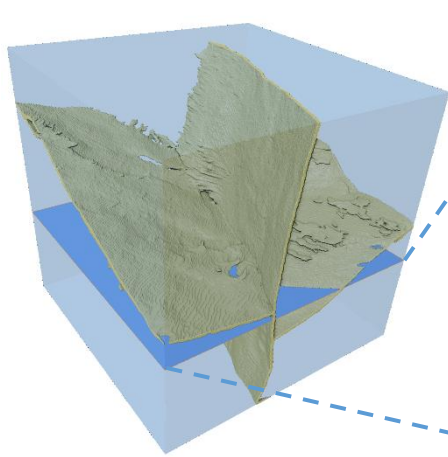
山西组样品可分辨裂隙不连通

裂隙分割与特征分析

无围压情况下对比



中轴面提取技术



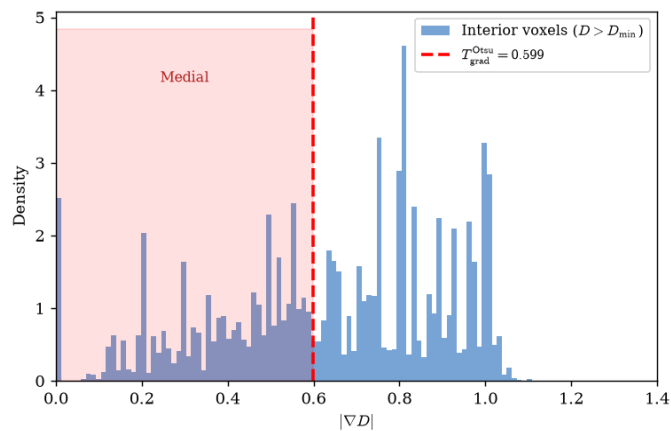
(1) 局部裂缝结构



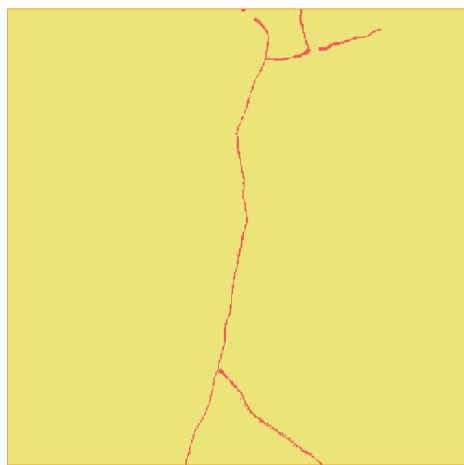
(2) XY方向裂缝切片



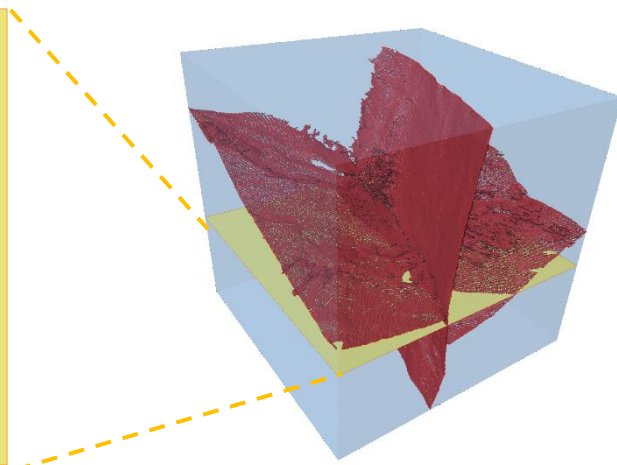
(3) 距离场 $D(x)$



(4) Otsu阈值选取



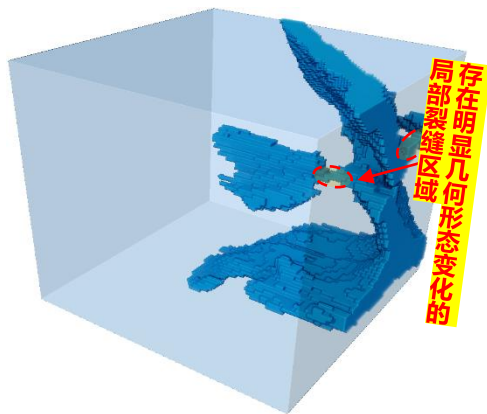
(5) XY方向中轴面切片



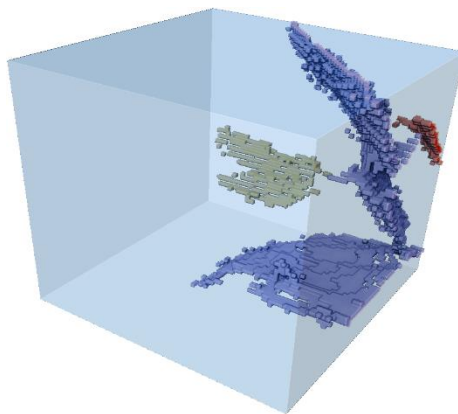
(6) 裂缝中轴面

中轴面提取技术

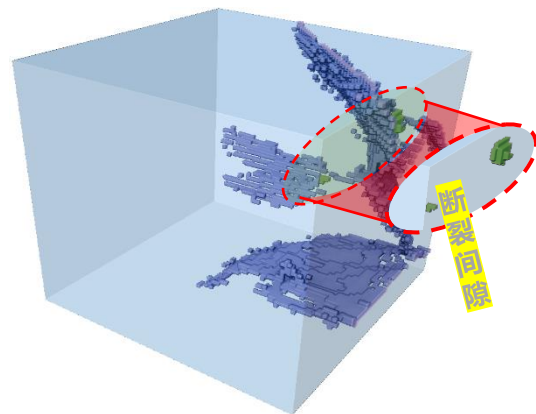
视域与分辨率的相互制约导致：沿开度方向裂隙体素较少，挑战现有中轴面提取方法
新技术：基于Voronoi法定位中轴面断裂间隙并利用散度判据确定桥接体素



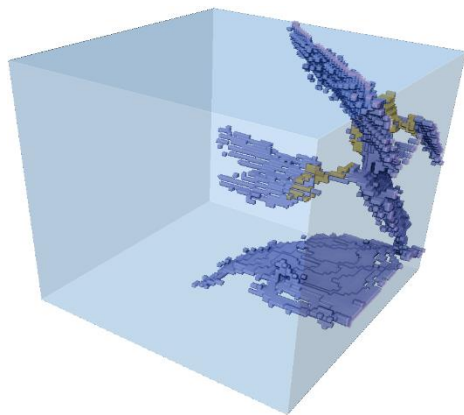
(a)原始裂隙



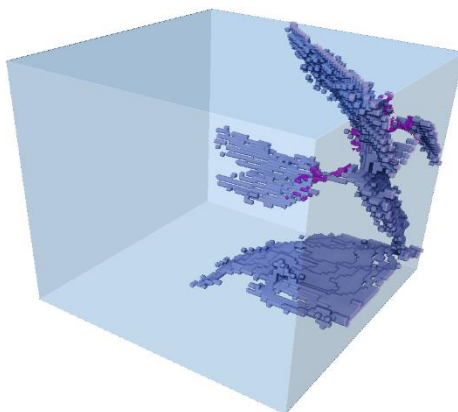
(b)初始裂缝中轴面



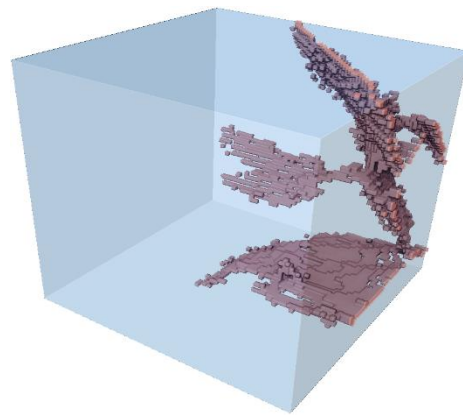
(c)中轴面断裂间隙



(d)扩展后的候选断裂间隙



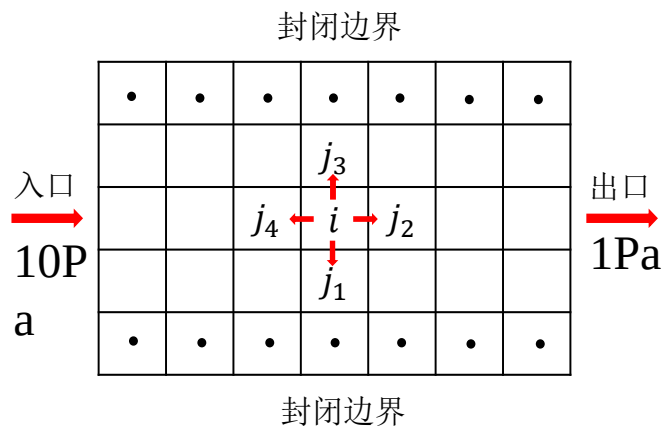
(e)桥接体素



(f)最终裂缝中轴面

渗流模型与验证：渗流模型

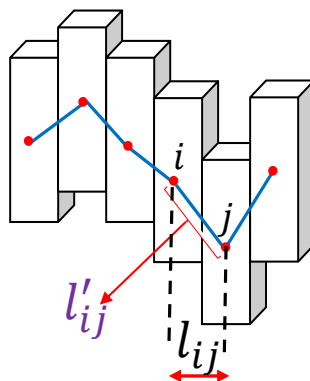
单相流动：



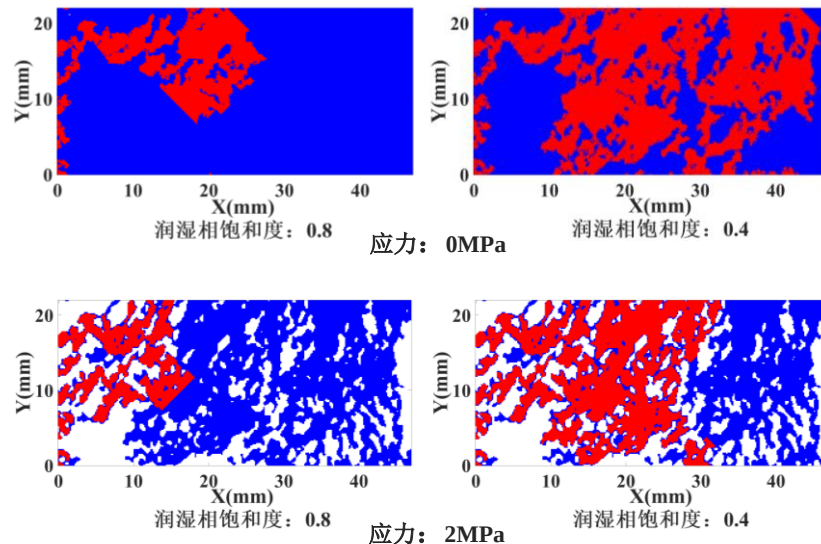
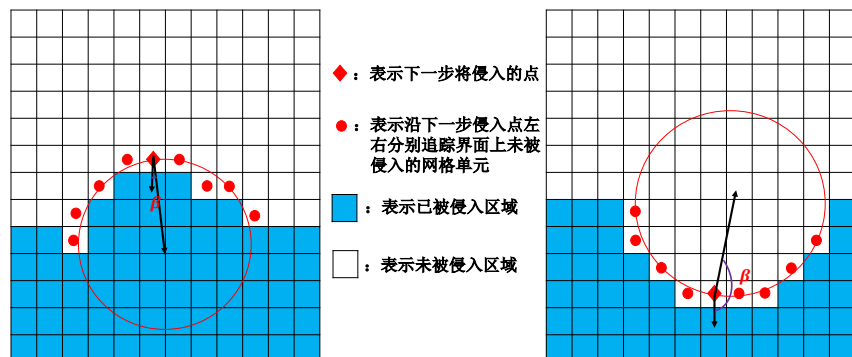
立方定律：

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{N_i} Q_{ij} = 0 \\ Q_{ij} = \frac{g_{ij}}{l_{ij}} (P_i - P_j) \end{cases}$$

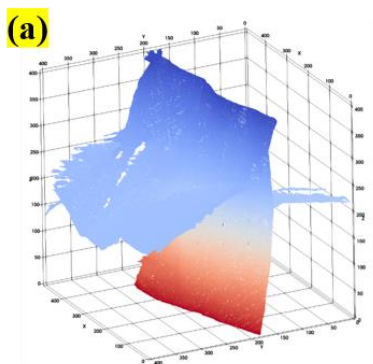
$$Q_{ij} = \left(\frac{l_i + l_j}{l'_{ij}} \right) \frac{g_{ij}}{l_{ij}} (P_i - P_j)$$



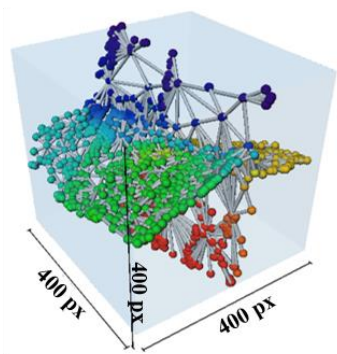
准静态两相流动：



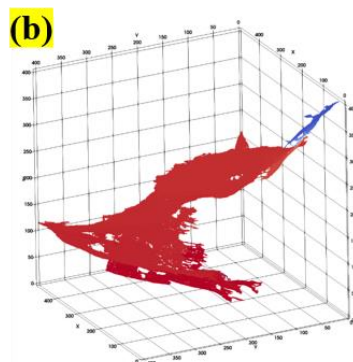
渗流模型与验证：验证



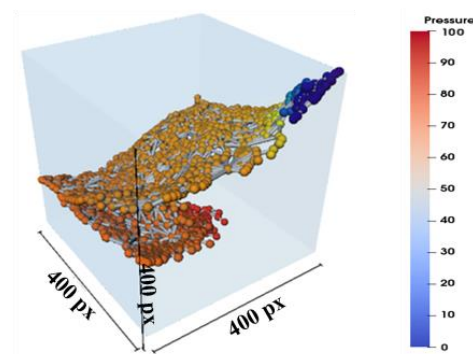
(a) 中轴面开度模型



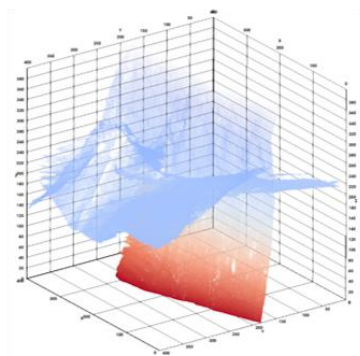
(b) 孔隙网络模型



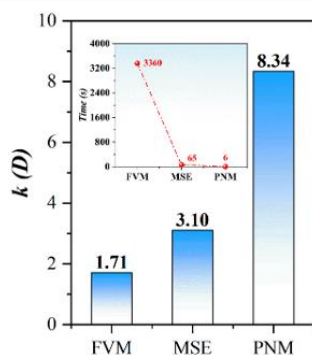
(a) 中轴面开度模型



(b) 孔隙网络模型

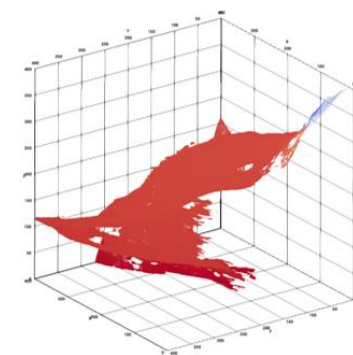


(c) 有限体积法

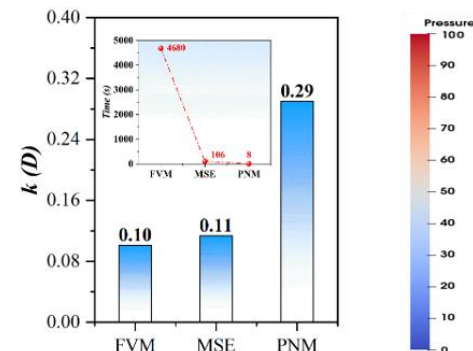


(d) 计算结果与效率

提速近2个量级



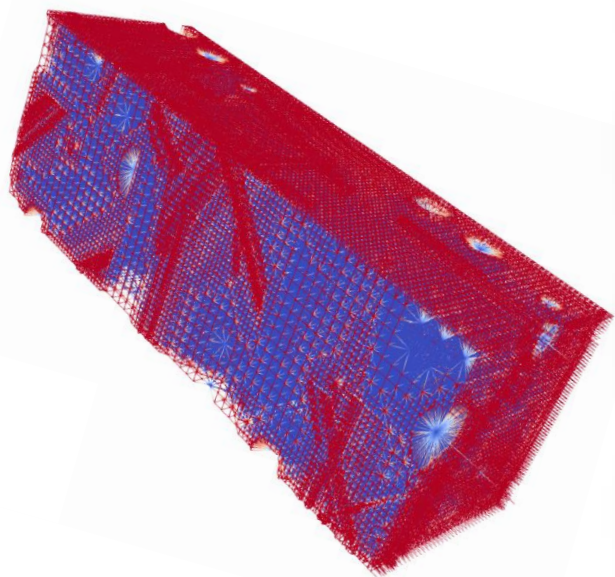
(c) 有限体积法



(d) 计算结果与效率

孔隙网络模型和有限体积法都是基于AVIZO计算模块

中轴面渗流模型为C++自主开发求解器（CPU，单核计算）



数字岩心渗流模拟技术

01

研究团队介绍

02

研究背景与科学问题

03

中轴面提取与渗流模型

04

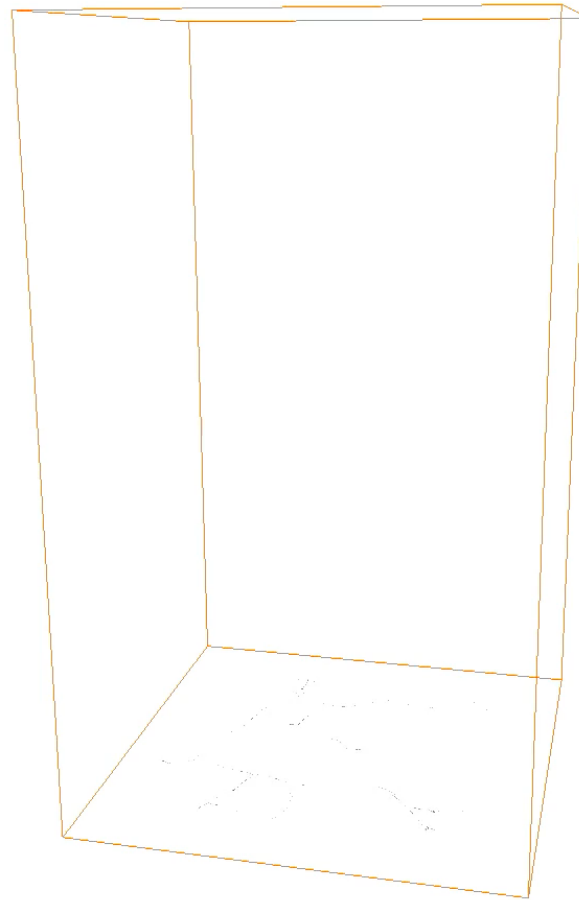
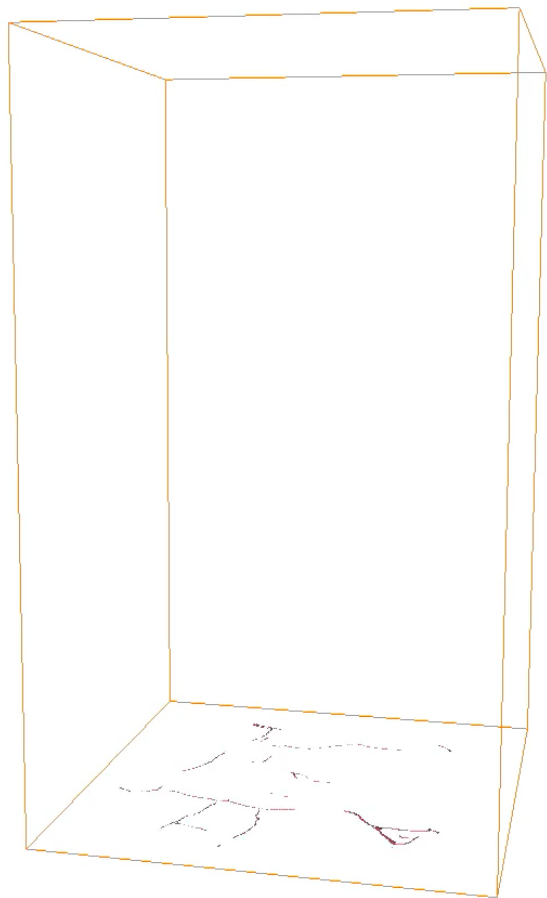
全岩心裂隙系统渗透率预测

05

结论与展望

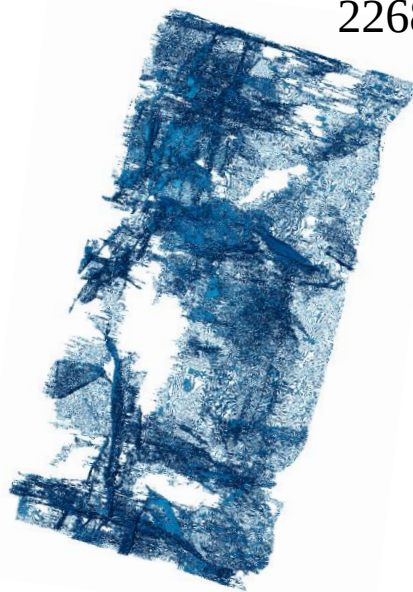
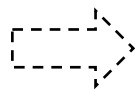
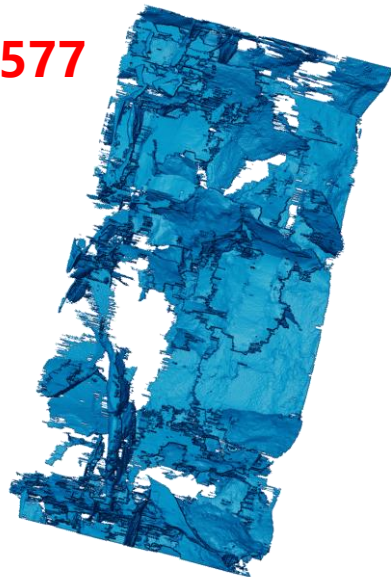
绝对渗透率预测：全岩心

BX1577 (D25 × L50 mm)

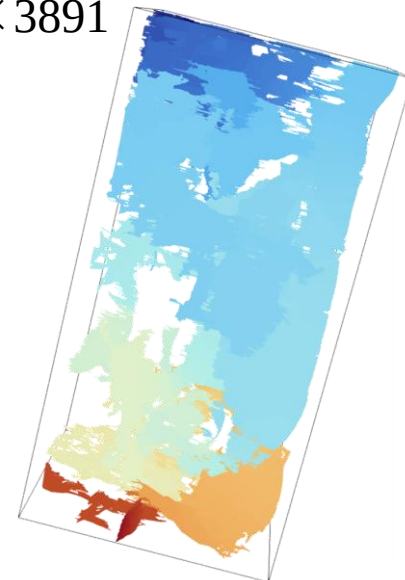
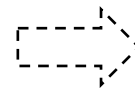


绝对渗透率预测：无围压下可识别裂隙

BX1577

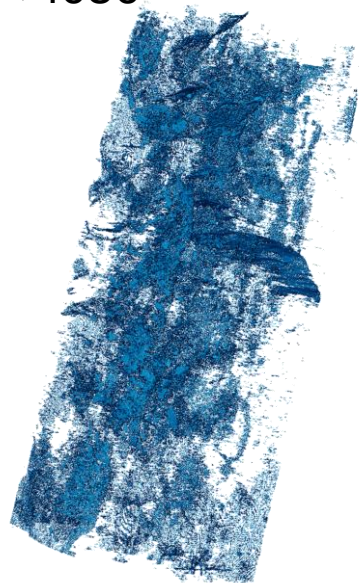
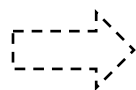


$2268 \times 2268 \times 3891$



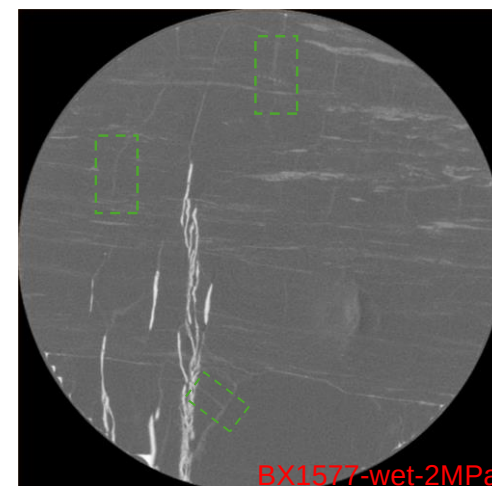
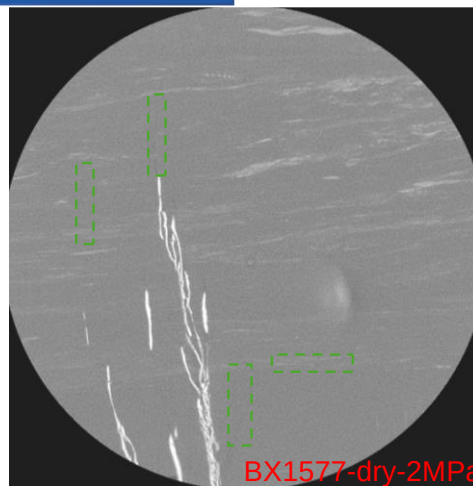
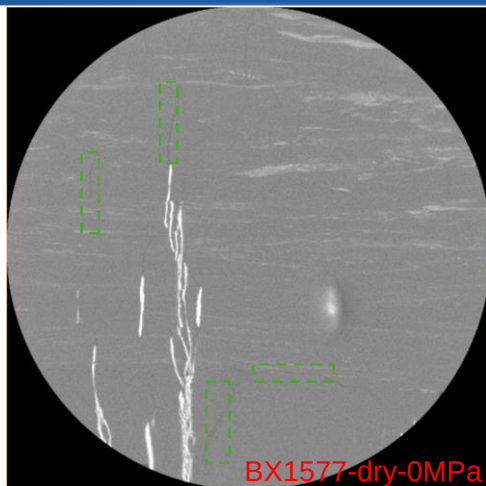
$1887 \times 1887 \times 4056$

SX1577

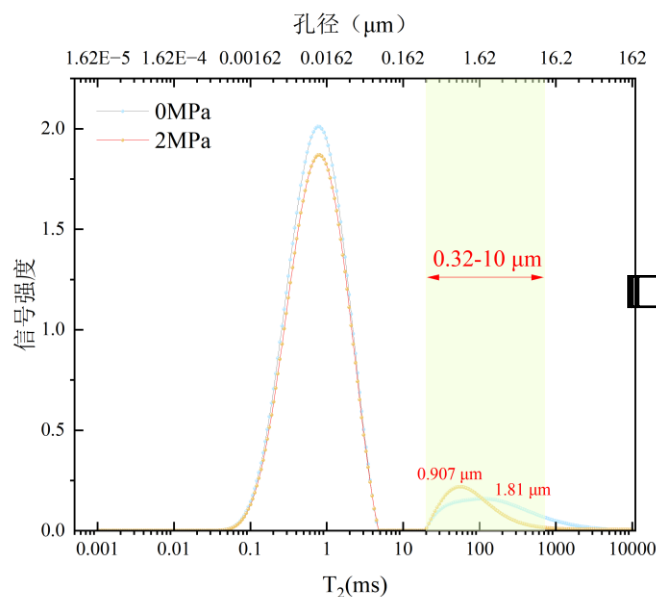


样品	体素网格	中轴面	渗透率
BX1577	~1.3 B	~32 M	~0.2 D
SX1577	~0.9 B	~22 M	/

绝对渗透率预测：应力影响

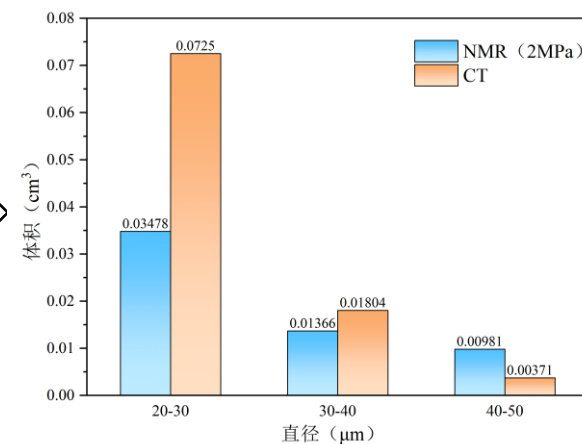


干燥扫描，明显发现围压下，**大量裂隙不再可以识别**。饱和KI溶液下扫描，仍可以识别裂隙，**但无法获取裂隙开度！**

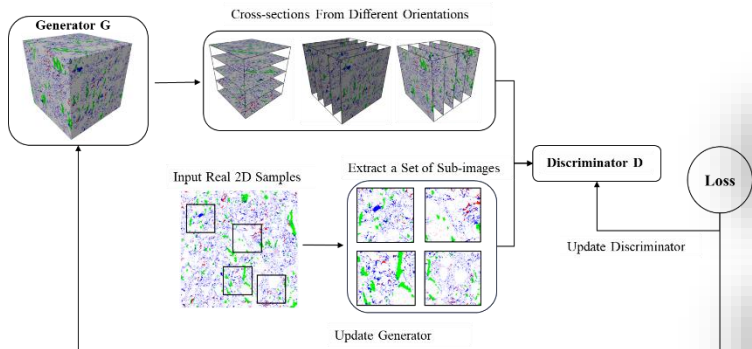


1. 将flux与开度变化进行相关性处理
2. 最大flux对应的开度减少90%，线性化到最小flux
3. 忽略裂隙方向性影响

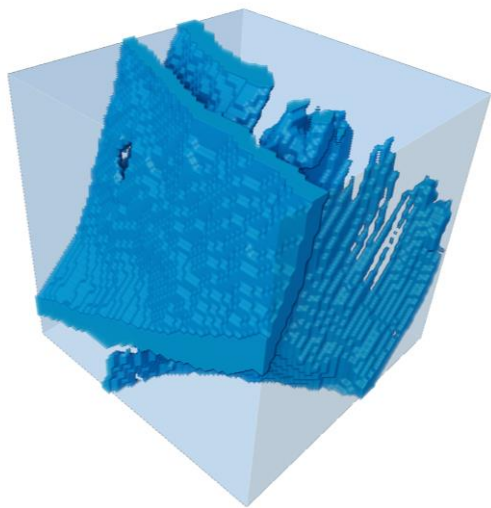
1 mD vs. 1.6 mD (exp.)



Outline



生成式物理AI技术



01

研究团队介绍

02

强非均质、跨尺度孔隙结构

03

多尺度孔隙结构精细表征

04

数字岩心渗流模拟技术

05

结论与展望

深层煤岩裂隙系统对流动与传输非常重要；

我们建立了基于中轴面的裂隙系统数值模拟方法，预测了全岩心裂隙系统的渗透率；

受视域与分辨率互相制约影响，裂隙应力敏感性的可视化研究比较有挑战，可以利用间接方法并配合数值模拟来研究应力作用下煤岩裂隙演化及流动控制规律。

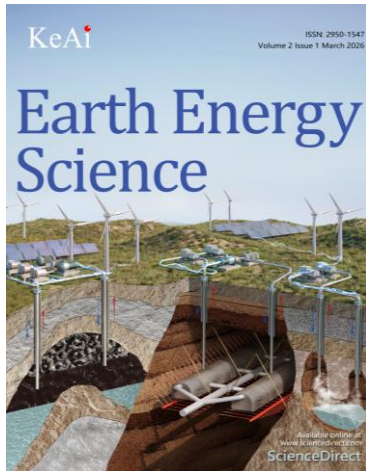
亚分辨率裂缝开度与灰度关联性；

扩展到基质-裂隙数字岩心；

扩展到多组分多相数值模拟；

生成式物理AI数字岩心构建。

《Earth Energy Science》 : Open Access and Free



Earth Energy Science

Emerging journal that serves the national "dual-carbon" strategy and pays special attention to the frontier research of earth energy

Editor-in-Chief



Yiyu Lu



Ranjith P. G.



Derek Elsworth

Associate Editors



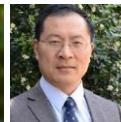
Baisheng Nie



Zhaolong Ge



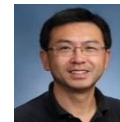
Michael Hood



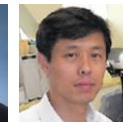
Ting Ren



Majid Hassanizadeh



Jeffrey Gu



Yujing Jiang

Journal Focus: Green mining technology and mineral processing, energy and resource engineering geomechanics, underground energy storage, oil and gas exploration and development, geothermal energy development and utilization, CCUS and other related fields.

Journal features:

Global OA publishing, free of APC
Key journal promoted by KeAi press
ScienceDirect (Elsevier) spread platform
Editorial Manager submission system

Journal progress (2023.12-2026.3)

- ✓ It has been included in **Ei**, **Scopus**, **DOAJ**, **CAS**, **INSPEC** and **OARL** databases, and ESCI collections are under review.
- ✓ The editorial board and young editorial team composed of renowned scholars from both domestic and international backgrounds have been established.
- ✓ **7 issues (39 articles)** have been published, **10 manuscripts** have been accepted, and the journal is published quarterly.
- ✓ The first **International Conference on earth energy science** was successfully held in 2023, and the second conference was successfully held in November 2025.
- ✓ It was selected as **the high starting point new journal of the excellent action plan of Chinese Sci tech journals** in 2024.

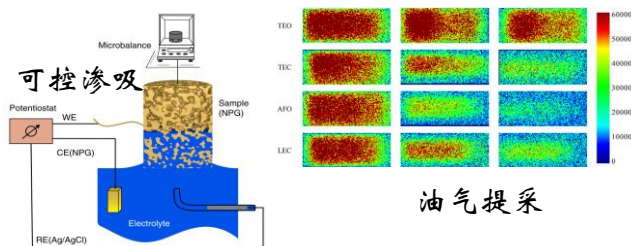


Thank you for
your attention!

一、自发渗吸微观模型开发与机理研究

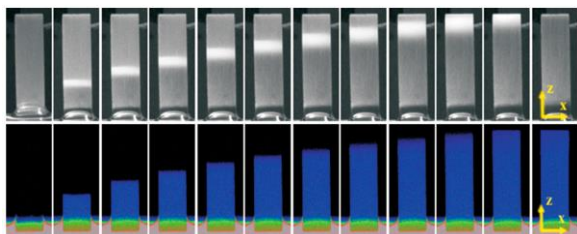
建立了**高效定量**的自发渗吸动态孔隙网络模型及求解器，准确预测**真实孔隙结构**的渗吸速率和毛管力圈闭；提出了非平衡相渗经验模型，**升尺度微观动力学**并在达西尺度准确预测渗吸过程。

Cheng, et al., 2018, Energy & Fuels



Xue, et al., 2014, Nature Commu.

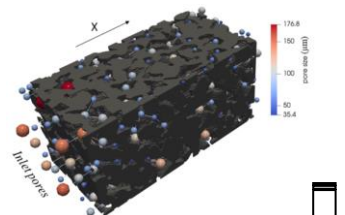
渗吸前缘演化



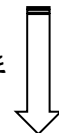
(Gruener, et al., 2012, PNAS)

自发渗吸是很多应用的关键物理过程

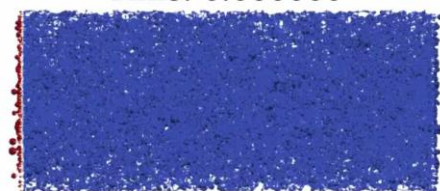
微纳米CT扫描与孔隙网络提取



实验验证

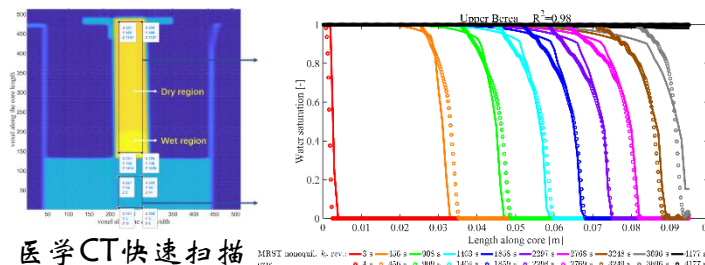


Time: 0.000000 S



900 × 900 × 2000 image

达西尺度预测渗吸过程



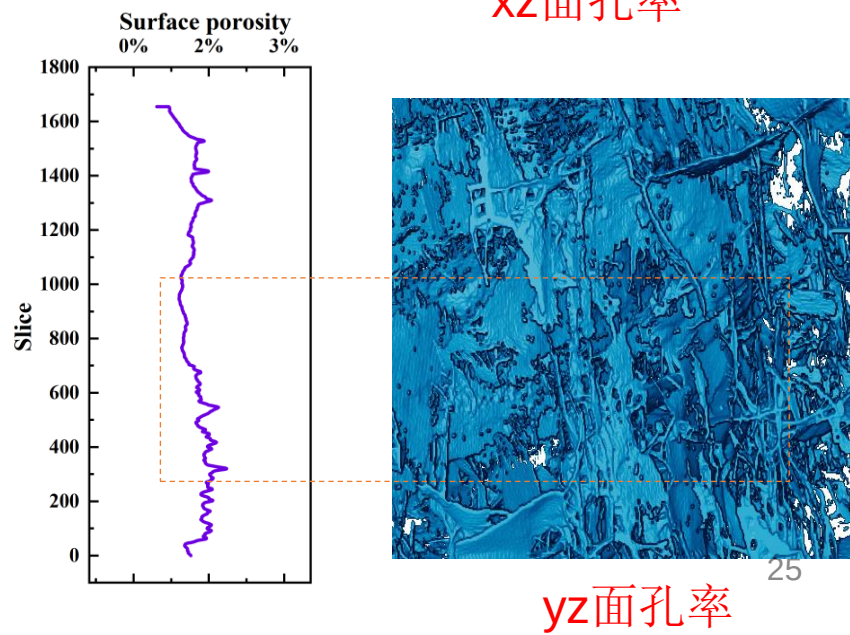
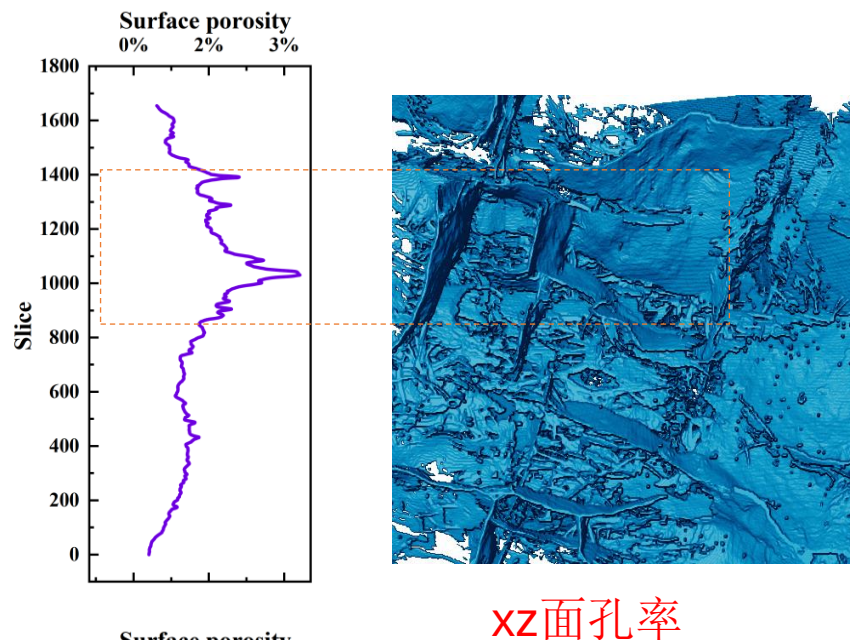
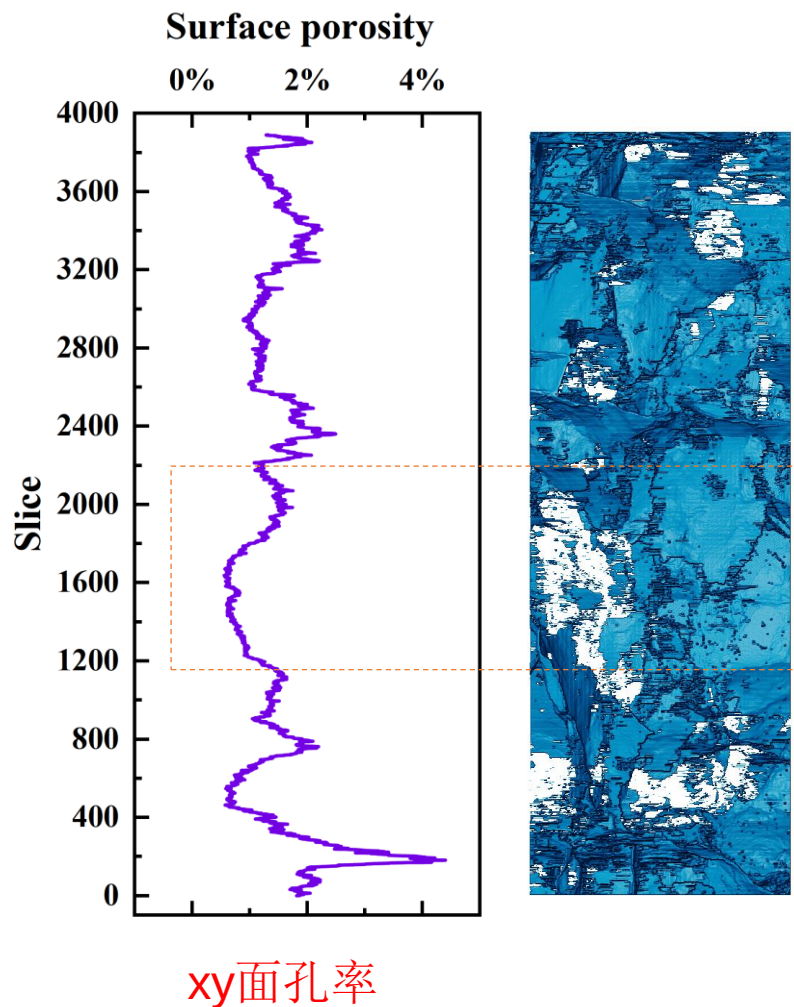
医学CT快速扫描

高效定量的数学模型及求解器、达西尺度准确预测

成果推广应用情况：①非常规油气渗吸提采如页岩油；②工业多孔介质优化如热管吸液芯、可控渗吸芯片设计。

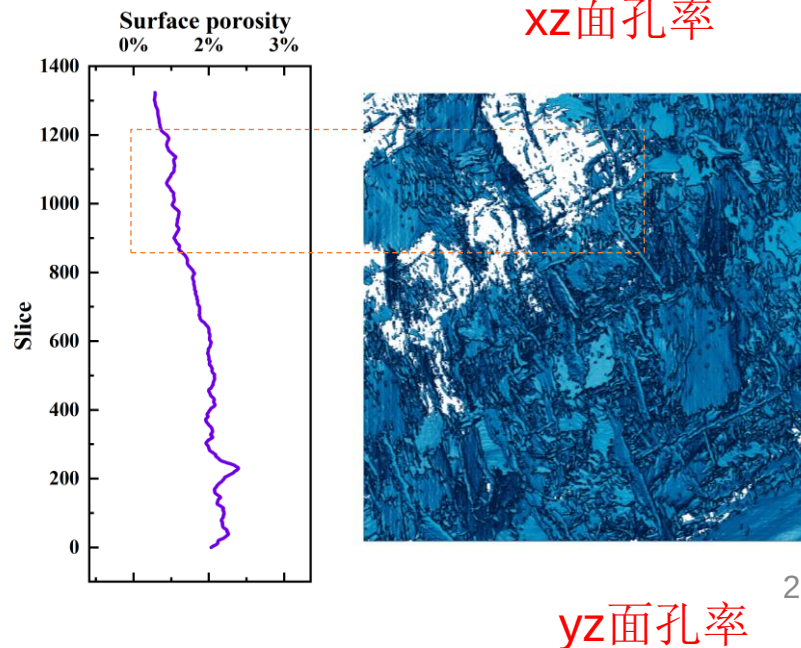
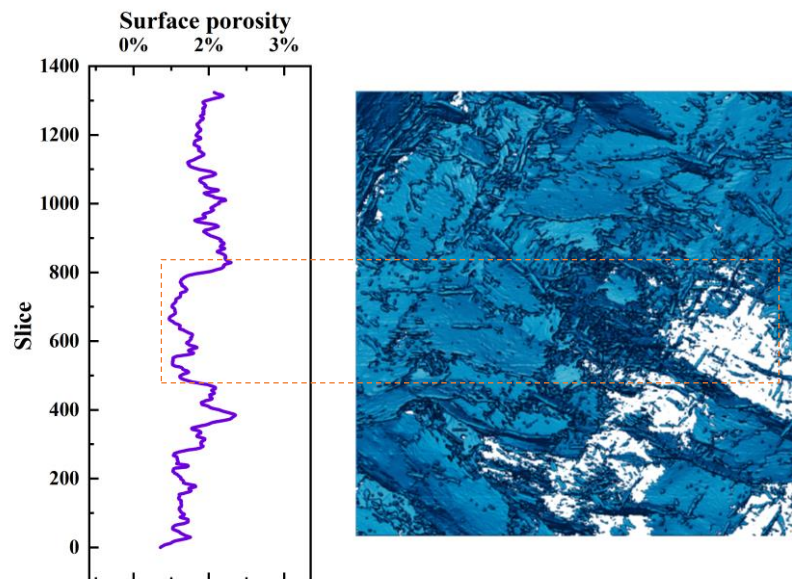
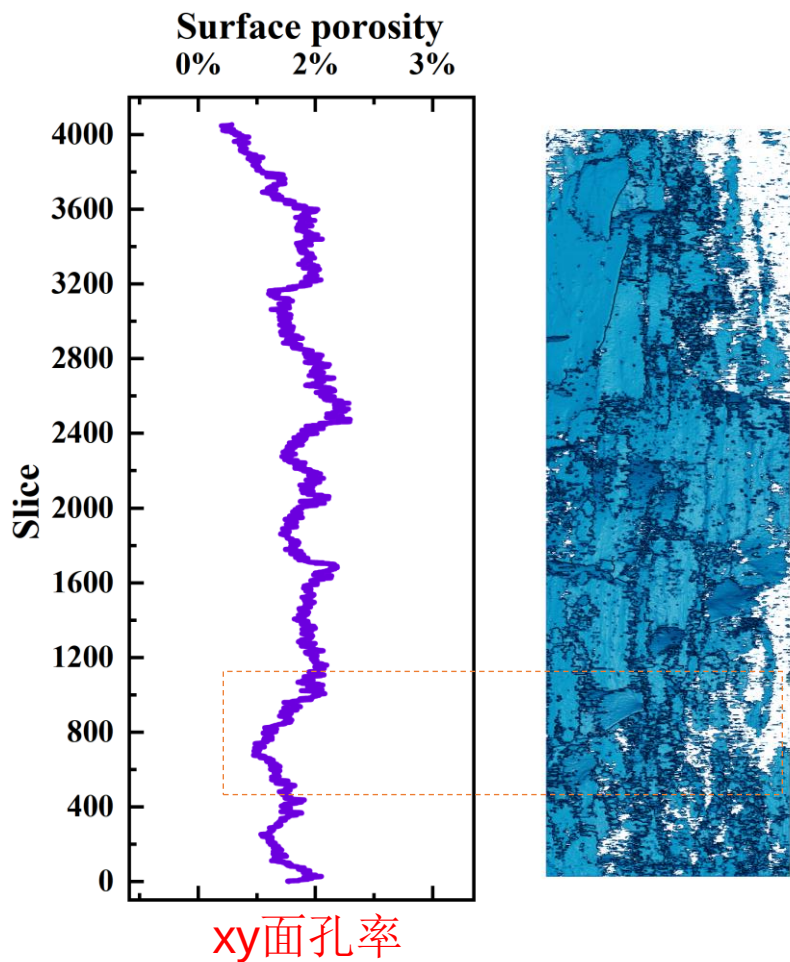
绝对渗透率及各向异性

BX1577 (1656*1656*3891)



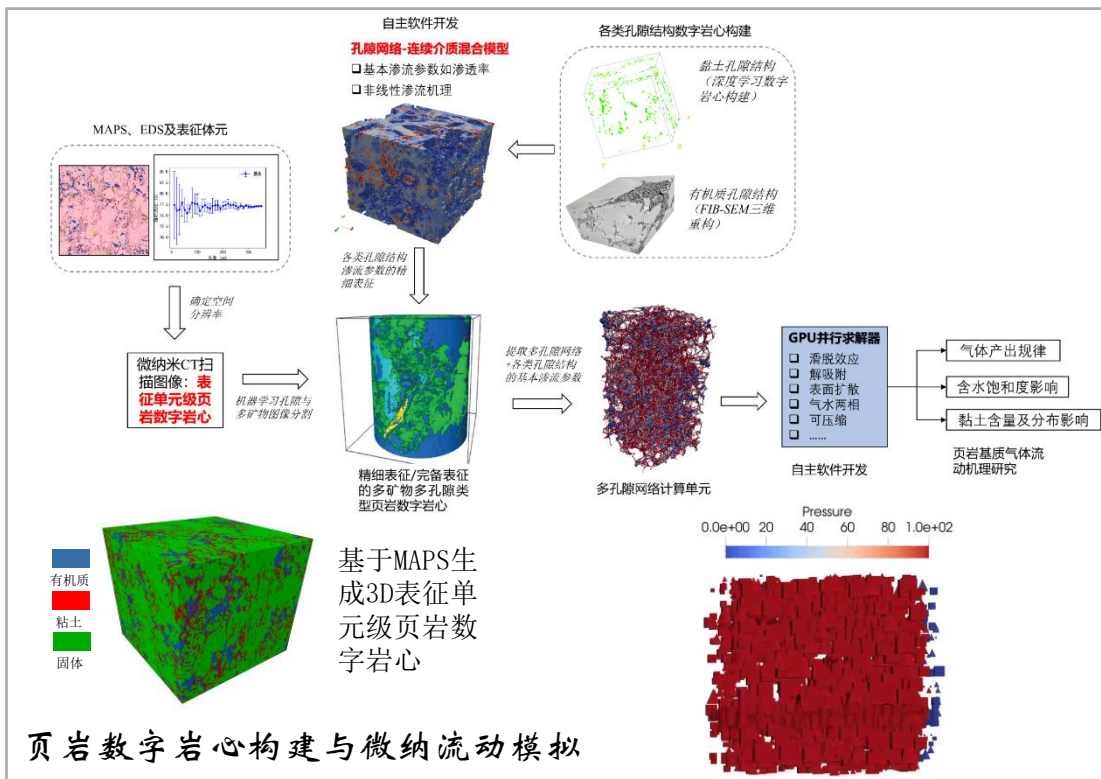
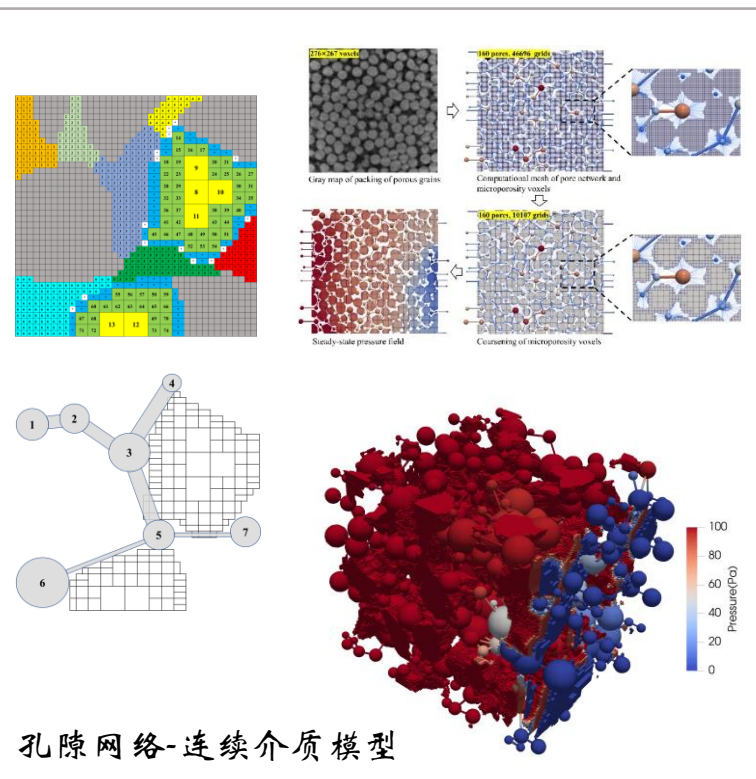
绝对渗透率及各向异性

SX1577(1325*1325*4056)



二、页岩、致密砂岩等多尺度孔隙结构表征与数字岩心模拟技术

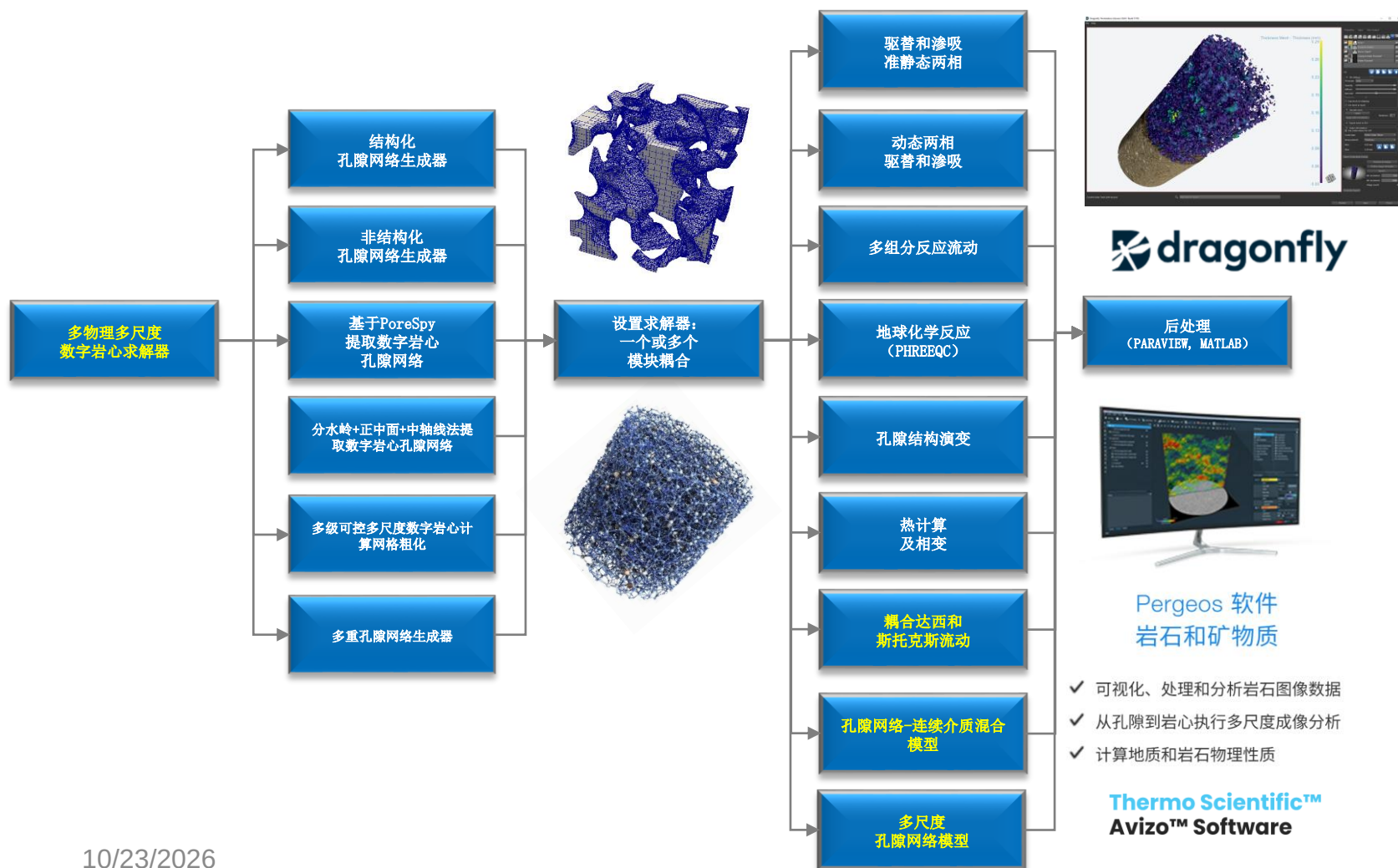
提出了多尺度数字岩心精细表征的**多源信息融合技术**，建立了多尺度数字岩心的渗流混合模型包括**多尺度孔隙网络模型与孔隙网络-连续介质模型**，从微纳尺度揭示**多尺度孔隙结构与润湿性对流**动传输的控制机制。



成果推广应用情况：①多级有序的孔隙结构优化与设计如催化剂；②页岩油气、致密油气、地下储氢密闭性评估。

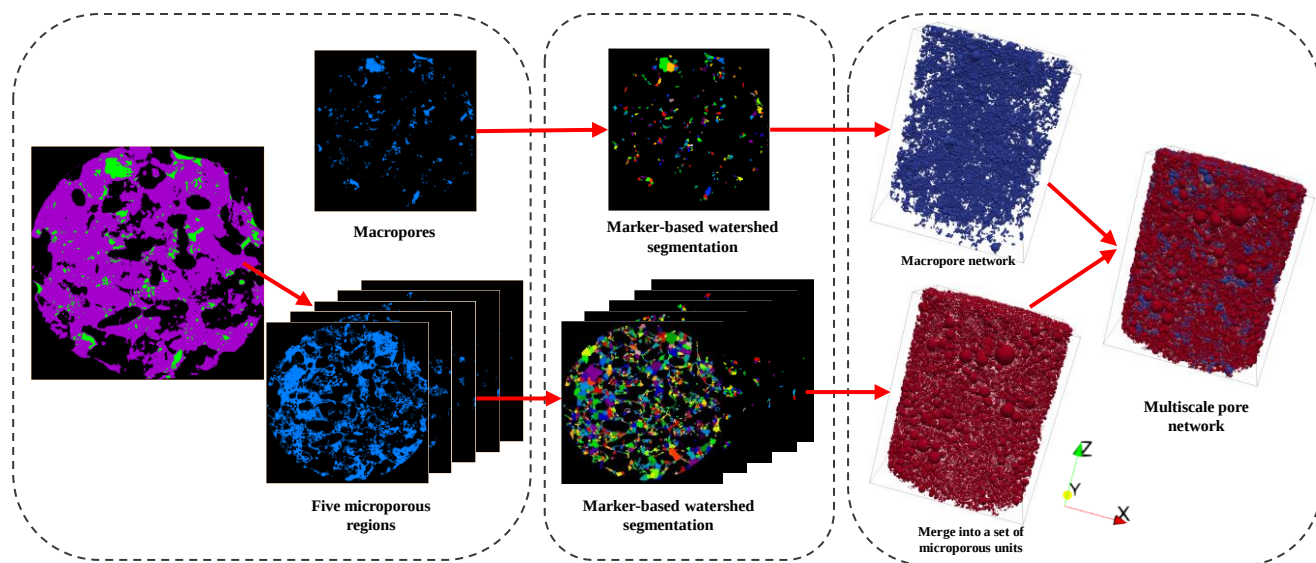
代表性成果三：多物理多尺度数字岩心模型与求解器开发

相比商业软件Avizo和dragonfly，建立了**更先进**的多物理场耦合数字岩心渗流模型及并行求解器，为**渗流机理**、**岩石物理属性**预测提供了研究平台，已被国内外多个合作研究团队使用。



代表性成果三：多物理多尺度数字岩心模型与求解器开发

相比商业软件Avizo和dragonfly，建立了**更先进**的多物理场耦合数字岩心渗流模型及并行求解器，为**渗流机理、岩石物理属性**预测提供了研究平台，已被国内外多个合作研究团队使用。



成果推广应用情况：①开发多孔介质分析与模型的工业软件并市场推广；②开发数模与AI协同技术，拓展应用领域。

