

# 基于X射线断层扫描和纳米压痕测试的砂岩微孔隙与微弹模分布特征研究

奚亚男

河海大学力学与工程科学学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年10月20日; 录用日期: 2025年11月11日; 发布日期: 2025年11月25日

## 摘 要

本文结合X射线断层扫描和纳米压痕测试对砂岩(红砂岩、灰砂岩)微孔隙和微弹模的分布特征开展研究。结果表明, 砂岩微孔隙和微弹模分布都呈近似高斯函数, 且微孔隙和微弹模之间的数学关系满足指数型半经验模型。

## 关键词

砂岩, X射线断层扫描, 纳米压痕测试, 微孔隙, 微弹模

# Research on the Distribution Characteristics of Micro-Pores and Micro-Elastic Modulus in Sandstone Based on X-Ray Tomography and Nanoindentation Testing

Yanan Xi

College of Mechanics and Engineering Science, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Received: October 20, 2025; accepted: November 11, 2025; published: November 25, 2025

## Abstract

This study investigates the distribution characteristics of micro-pores and micro-elastic modulus in sandstone (red sandstone and gray sandstone) by integrating X-ray tomography and nanoindentation testing. The results indicate that the distributions of both micro-pores and micro-elastic modulus in sandstone approximately follow a Gaussian function, and the mathematical relationship be-

tween micro-pores and micro-elastic modulus conforms to an exponential semi-empirical model.

## Keywords

Sandstone, X-Ray Tomography, Nanoindentation Testing, Micro-Pores, Micro-Elastic Modulus

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

砂岩属于自然界地表岩层中分布最为广泛的沉积岩之一(约占沉积岩总量三分之一),仅次于含量第一的泥岩。它是人类使用最为广泛的石材,同时也是一种岩土工程中经常遇到的沉积岩。砂岩主要由碎屑颗粒和胶结物构成,颗粒直径范围在 0.05 mm~2 mm,石英是其含有的主要矿物成分,同时掺杂少量的长石、白云母等矿物,结构较为稳定,一般呈淡褐色或红色,主要含有硅、钙、铝和铁等化学元素。砂岩密度通常介于 2.1 g/cm<sup>3</sup>~2.6 g/cm<sup>3</sup>,孔隙率变化显著(2%~40%),吸水率与胶结类型直接相关:硅质胶结砂岩吸水率可低于 2.5%,而泥质胶结者可达 6%以上。砂岩在建筑装饰、基础设施、材料制造、能源开发等领域都有重要的应用价值。

从材料科学的角度看,包括砂岩在内的岩石属于典型的非均匀介质,其具有复杂的内部结构如微孔隙分布。研究人员尝试利用多种先进材料测试表征技术对岩石内部的微孔隙分布特征开展研究,如气体吸附法[1]、压汞法[2]、扫描电镜技术[3]、低场核磁共振技术[4]、X 射线断层扫描技术[5]-[15]等。其中,X 射线断层扫描技术(X-ray Computed Tomography, XCT)通过利用 X 射线的特性和计算机处理技术,实现对物体内部结构的高分辨率三维成像[16]。XCT 技术具有无损、高分辨率、三维可视化的优势。在岩石研究领域,通过 XCT 动态扫描,研究人员可以获取岩石内部孔隙分布、裂纹演化等的三维图像,再结合理论推导与数值计算,从而深入了解岩石的破裂机理以及物理性能。Hu 等[17]利用 XCT 技术重构数字岩心,通过数值模拟方法,系统研究了注水速度、油水黏度比、润湿性条件等因素对孔隙尺度油水流动特性及采收率的影响。Elkhoury 等[5]基于 XCT 技术,对来源于印第安纳州的石灰岩和砂岩进行系统分析,研究中使用不同的分割算法提取孔隙结构,并分析影响结论的各个因素。Lei 等[11]针对火山岩复杂的裂隙分布情况,提出交互式图像分割技术处理 XCT 图像,并将传统阈值分割方法获得的结果与使用深度学习技术获得的结果进行了比较。然而,传统 XCT 数据分析依赖灰度图像阈值分割法区分物相,其受主观误差影响较大,因而局限性显著。鉴于此,本文根据 XCT 成像原理,建立灰度值-微观孔隙结构的直接映射关系,以规避阈值分割引入的不确定性。

随着微观力学测试表征技术的发展,纳米压痕[18]-[30]、原子力显微镜[31]等在岩石研究中展现出日益重要的应用价值。其中,纳米压痕技术作为一种高精度的微观力学测试手段,能够在 1 nm~100 nm 尺度范围内获取材料的弹模、硬度、蠕变和断裂韧度等关键力学参数。该技术通过金刚石压头在材料表面施加  $\mu\text{N}$ ~ $\text{mN}$  级载荷,同时以 nm 级分辨率实时监测压入深度,结合接触力学理论,实现对材料微观力学性能的定量表征。纳米压痕技术最初聚焦于金属、薄膜、涂层、陶瓷、玻璃及聚合物等均质材料的微观力学表征。随着技术迭代与跨学科融合,该技术通过与扫描电镜、原子力显微镜、X 射线断层扫描等显微分析技术联用,显著拓展至多相多尺度非均质材料的力学解析领域,实现了从单一力学参数测试向微观结构-性能关联研究的跨越。例如,Luo 等[32]开发了基于统计纳米压痕技术的跨

尺度力学表征方法，该研究通过引入先进的数据分析算法，建立了从纳米尺度单相特性到宏观尺度整体性能的力学参数关联体系，为页岩这类多尺度多相态非均质材料的本构关系研究提供了新的技术路径。

## 2. 材料与实验

### 2.1. 样品来源

本文砂岩样品取自四川省自贡市，采集深度处于距离地表 120 m~150 m 的范围，包括红砂岩以及灰砂岩两种。两种砂岩采集试样的标准尺寸为直径 50 mm，高度 100 mm。样品的矿物组分如表 1 所示。

Table 1. Mineral components of sandstones

表 1. 砂岩矿物组分

| 类型  | 石英  | 钠长石 | 方解石 | 蒙脱石 | 微斜长石 | 伊利石 | 绿泥石 | 赤铁矿 | 钾长石 |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 红砂岩 | 61% | 14% | 9%  | 6%  | 4%   | 4%  | 1%  | 1%  | /   |
| 灰砂岩 | 50% | 18% | 12% | 9%  | /    | 6%  | 4%  | /   | 1%  |

### 2.2. XCT 实验

为便于进行 XCT 测试，进一步从标准试样的中心部位钻取直径 8 mm、高度 10 mm 的样品，再手工打磨至直径 4 mm、高度 5 mm。岩石样品测试使用的是 SKYSCAN 1272 型 X 射线显微镜。对尺寸为直径 4 mm、高度 5 mm 的岩石样品以 100 kV 的 X 射线峰值能量和 100  $\mu$ A 的电流进行。样品距射线源和探测器分别为 60 mm、212 mm。每次扫描获得 1200 帧二维 XCT 图像。对岩石样品，每个投影的曝光时间为 2.3 s，XCT 图像像素的空间分辨率为 4  $\mu$ m。对不同砂岩图像顺序截取 128 帧二维 XCT 图像(512  $\times$  512  $\mu$ m<sup>2</sup>)，将其重构成三维 XCT 图像。图 1 所示为岩石样品的三维 XCT 重构图像(512  $\times$  512  $\times$  512  $\mu$ m<sup>3</sup>)，其像素灰度值的变化范围为 0~255。

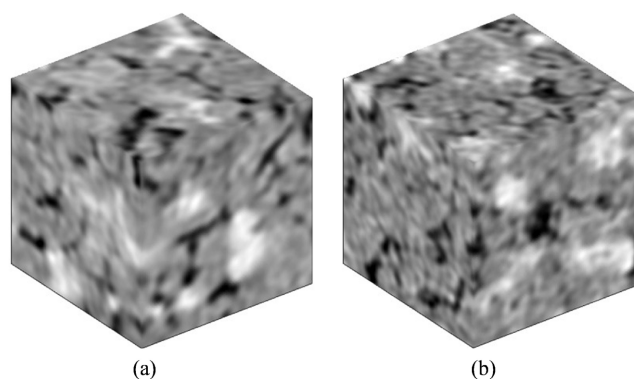


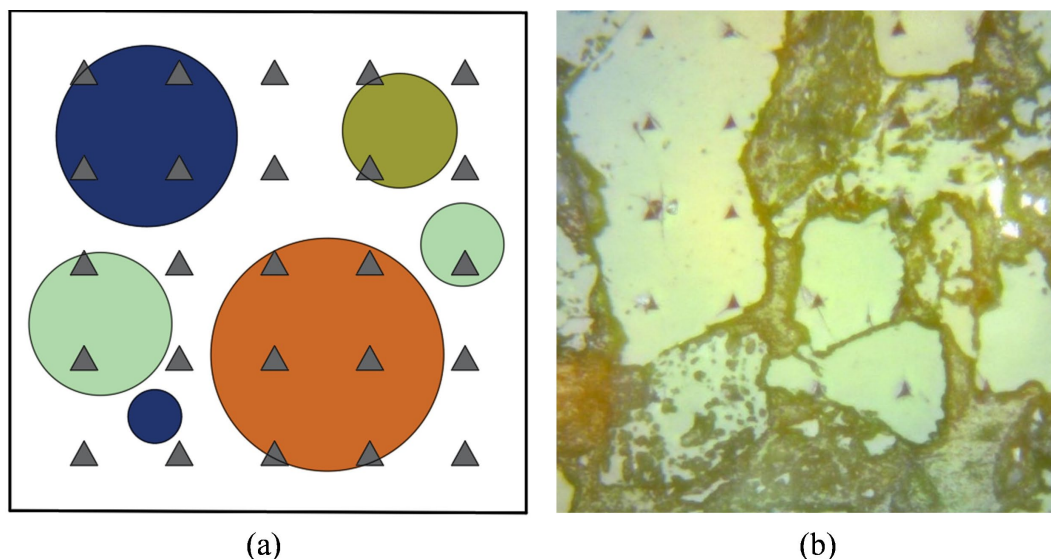
Figure 1. 3D XCT image of, (a) red sandstone; (b) gray sandstone

图 1. 砂岩三维 XCT 图像，(a) 红砂岩；(b) 灰砂岩

### 2.3. 纳米压痕测试

为便于进行纳米压痕测试，首先应用线切割机从原始样品中切出尺寸为 20 mm  $\times$  10 mm  $\times$  10 mm 的长方体试样，然后依次使用 500、1000、2000、5000 和 7000 目碳化硅砂纸打磨测试样品表面，最后再使用抛光膏进行抛光获得用以纳米压痕测试的样品。值得指出的是，在打磨和抛光过程中，将测试样品镶

嵌于环氧树脂中,这样可以避免样品操作过程中的开裂现象,与此同时,环氧树脂作为一种均质的物质,试验人员也可以通过电子显微镜观察其划痕的变化来评价抛光的进程,即将样品固定后,通过样品不同的放置方向可以使得划痕趋于均匀,保证各方向样品打磨均匀。



**Figure 2.** Nanoindentation test lattice, (a) schematic diagram; (b) real image

**图 2.** 纳米压痕测试点阵, (a) 示意图; (b) 实拍图

本文使用美国 KLA 公司生产的纳米压痕仪(iMicro), 选用连续刚度法测试砂岩的力学性能[19]。连续刚度法(Continuous Stiffness Measurement, CSM)是一种用于纳米压痕测试的动态力学性能表征技术, 通过在压头准静态加载过程中叠加一个高频振荡信号实时获取材料硬度和弹性模量随压入深度的连续变化曲线。在压头压入过程中叠加固定频率(通常为 10 Hz~100 Hz)的微幅振荡(振幅 1 nm~2 nm), 通过测量压头响应信号计算动态接触刚度。该方法无需传统准静态测试的卸载步骤, 可在单次加载过程中实时计算每个压入深度点的刚度值, 进而推导硬度和弹性模量。纳米压痕测试系统由两部分组成, Berkovich 压头用于压痕试验和原位扫描成像。测试时, 在固定的加载应变率(0.2/s)下将载荷施加至最大载荷 500 mN, 最大深度设置为 2  $\mu\text{m}$ , 泊松比  $\nu$  设为 0.2, 热漂移率小于 0.05 nm/s, 以减小蠕变和环境波动对测量精度的影响。在达到最大载荷后, 保持载荷 15 s, 这一保持荷载过程的主要目的在于消除加载过程中的应变滞后现象[33]。在纳米压痕用于研究力学性能的使用方式上, 一种方法是将纳米压头与光学或扫描电子显微镜(SEM)相结合, 可用于定位感兴趣的单个相。另一种方法是进行大量等距压痕并进行统计评估。为研究砂岩这类非均质材料的力学性能分布, 本文采用统计网格压痕法。参考 Constantinides 对复合介质的研究思路[34], 如图 2 所示, 在每个测试样品表面, 随机选择 35 个不重叠的区域进行测试, 每个区域布置一个  $5 \times 5$  的压痕矩阵[19], 点阵间距 50  $\mu\text{m}$ (该距离大于 10 倍的最大压痕深度, 以确保测量之间不会相互干扰), 每个样品均采用 875 个测试点, 对所有数据进行统计分析。此外, 记录压头加载过程中荷载随深度变化的实时曲线, 如图 3 所示, 典型的纳米压痕测试记录荷载-深度曲线包含三个阶段: 加载阶段、保持阶段和卸载阶段。在加载阶段, 压头以恒定速率压入材料表面, 荷载-深度曲线呈非线性上升, 反映测试样品的弹塑性变形特性; 在保持阶段, 测试样品在恒定的荷载作用下产生蠕变, 反映着测试样品的粘弹性变形特性; 在卸载阶段, 荷载逐渐减小至零, 深度部分恢复, 荷载-深度曲线呈近似线性下降, 反映着测试样品的弹性变形特性。

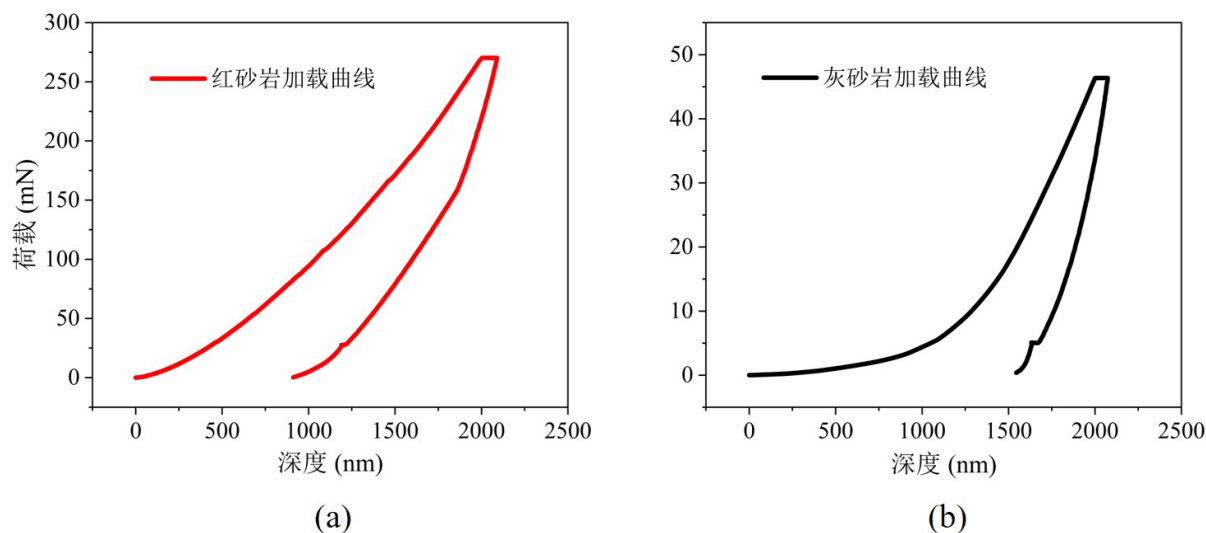


Figure 3. Typical nanoindentation test load-depth curve, (a) red sandstone; (b) gray sandstone

图 3. 典型的纳米压痕测试荷载-深度曲线, (a) 红砂岩; (b) 灰砂岩

### 3. 数据处理方法

#### 3.1. 微孔隙

当 X 射线穿透测试样品时, 由于光电效应、康普顿效应、电子对效应及瑞利散射等复杂物理过程的影响, X 射线部分被反射、散射以及吸收, 使得 X 射线经过测试样品后的强度发生衰减。样品中物质组成的成分不同, 其对 X 射线的吸收系数也不同。一般来说, 样品吸收 X 射线的多少取决于样品中各种成分的物理密度[35] [36], 因此可以通过测定对 X 射线的吸收系数来判定物质的组分。X 射线透过单组分材料后, 其衰减规律由 Beer 定律给出:

$$I = I_0 \cdot e^{(-\mu x)} \quad (1)$$

式中,  $I_0$  和  $I$  分别表示穿透测试样品前后的 X 射线强度,  $\mu$  是样品的线性衰减系数,  $x$  是 X 射线在测试样品内穿透的厚度。如果待测样品包含多种物质组分, 式(1)变成:

$$I = I_0 \cdot e^{\sum_i (-\mu_i x_i)} \quad (2)$$

式中,  $\mu_i$  是测试样品中第  $i$  种组分的线性衰减系数,  $x_i$  是第  $i$  种组分在 X 射线穿透路径上的长度。X 射线强度与 XCT 图像的像素灰度值呈正比关系, 即:

$$I = h_v I_0 \quad (3)$$

式中,  $h_v = g_v / 255 \in (0, 1)$  代表像素的归一化灰度值,  $g_v$  代表像素的灰度值。对于砂岩的三维 XCT 图像, 依据像素灰度值可计算微孔隙对应的局部孔隙率。假定每个像素包含一定的微孔隙, 其对应的局部孔隙率  $f_v$  定义如下:

$$f_v = \frac{1 - h_v}{1 - \langle h_v \rangle} f_s \quad (4)$$

式中,  $\langle h_v \rangle$  代表关于图像内所有像素归一化灰度的平均值,  $f_s$  为测试样品的整体孔隙率。显然, 当  $h_v = 1$  时,  $f_v = 0$ ; 当  $h_v = 0$  时,  $f_v = f_s / (1 - \langle h_v \rangle)$  以及  $\langle f_v \rangle = f_s$ 。

### 3.2. 微弹模

Oliver-Pharr 模型是在纳米压痕测试中最常用的计算测试样品弹模和硬度的方法，它基于卸载曲线的初始斜率计算弹模，并结合最大载荷和压痕深度计算硬度。Oliver-Pharr 模型的接触刚度方程如下式：

$$S = \frac{dF}{dh} = \frac{2\beta}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A_c} \quad (5)$$

式中， $E_r$  为折合模量， $A_c$  为接触投影面积， $\beta$  为与压头形状相关的修正系数。折合模量  $E_r$  取决于测试样品和压头的弹性参数，即：

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_0^2}{E_0} \quad (6)$$

式中， $E$ 、 $E_0$  表示测试样品和压头的杨氏弹模， $\nu$ 、 $\nu_0$  表示测试样品和压头的泊松比。接触深度  $h_c$  的计算根据：

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon \frac{F_{\max}}{S} \quad (7)$$

系数  $\varepsilon$  取值与压头形状相关(Berkovich 压头取值 0.75)。接触深度通过面积函数  $A_c = f(h_c)$  确定  $A_c$ 。计算测试样品硬度  $H$  的表达式为：

$$H = \frac{F_{\max}}{A_c} \quad (8)$$

Oliver-Pharr 模型中的各参数如图 4 所示。

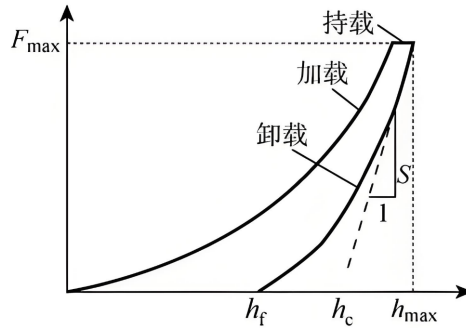


Figure 4. Schematic illustration of parameters in Oliver-Pharr model for the nanoindentation test

图 4. 纳米压痕测试 Oliver-Pharr 模型参数示意图

纳米压痕测试不仅能表征压痕局部的材料力学性能，还可反映压痕周围 3~5  $h_{\max}$  ( $h_{\max}$  为最大压痕深度)尺度范围内的微观结构特征[10][37]。这一压痕深度与相互作用长度(及体积)的比例关系已在之前的研究中得到验证[38][39]。为确保纳米压痕数据与 XCT 扫描结果的可比性，需根据 XCT 扫描分辨率调整纳米压痕的相互作用体积。对 4  $\mu\text{m}$  分辨率的两种砂岩样品，采用 800 nm~1320 nm 位移区间获取平均弹性模量数据。这一测试方案的设计确保了不同表征方法所得数据在空间尺度上的一致性，为后续统计分析提供了可靠基础。

## 4. 结果与讨论

本文所考虑两种砂岩样品的微孔隙和微弹模分布进行统计分析，发现其具有典型的峰值特征，并呈

近似高斯函数,如图5所示、图6所示。红砂岩和灰砂岩中的微孔隙和微弹模分布范围基本一致,但红砂岩的微孔隙分布区间相对集中,灰砂岩则更为分散,这与二者的矿物组成差异(灰砂岩中黏土矿物含量较高)密切相关。其中,红砂岩的微弹模分布区间大于灰砂岩,且红砂岩微弹模的均值 65.4 GPa 大于灰砂岩微弹模的均值 46.7 GPa,通过对两组微弹模变异系数(CV)的对比,可以得到红砂岩的微弹模分布的离散程度略小于灰砂岩。

对于微孔隙和微弹模分布函数与高斯函数之间的偏差, Lura 等[40]提出可以使用高斯函数集代替单一的高斯函数对数据分布进行拟合,具体而言,高斯函数集的数学表达式如下:

$$B(\zeta) = B_i \cdot e^{-\left(\frac{\zeta - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2 \ln 2} \quad (9)$$

其中,  $B(\zeta)$  代表第  $i$  种组分对应的高斯函数,  $B_i$ 、 $\mu_i$ 、 $\sigma_i$  属于单一高斯函数的三个参数。基于最小二乘法,即可确定高斯函数集。鉴于本研究中使用单一高斯函数的拟合程度都在 0.85 上,故省却使用高斯函数集对两种砂岩样品的微孔隙和微弹模分布进行拟合。

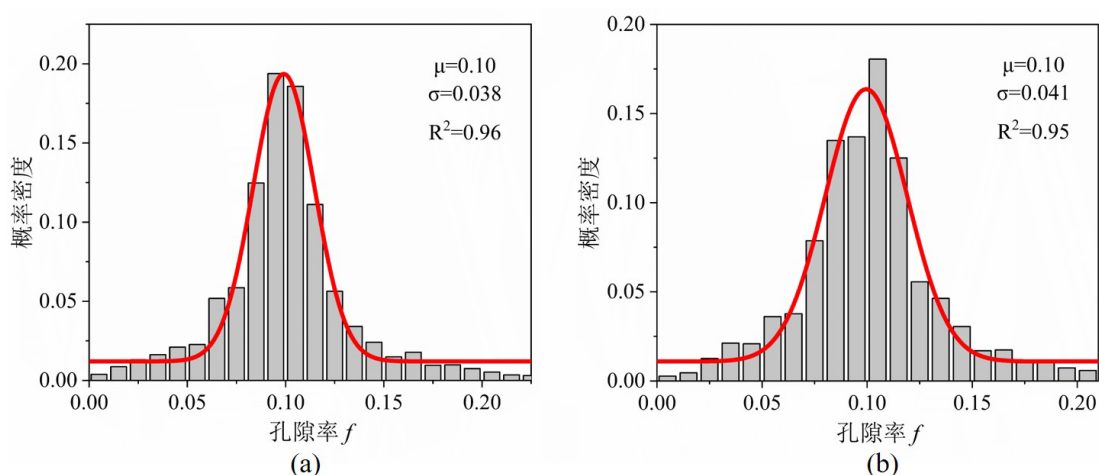


Figure 5. Statistical distribution of micro-porosity in, (a) red sandstone; (b) gray sandstone

图5. 砂岩微孔隙分布统计, (a) 红砂岩; (b) 灰砂岩

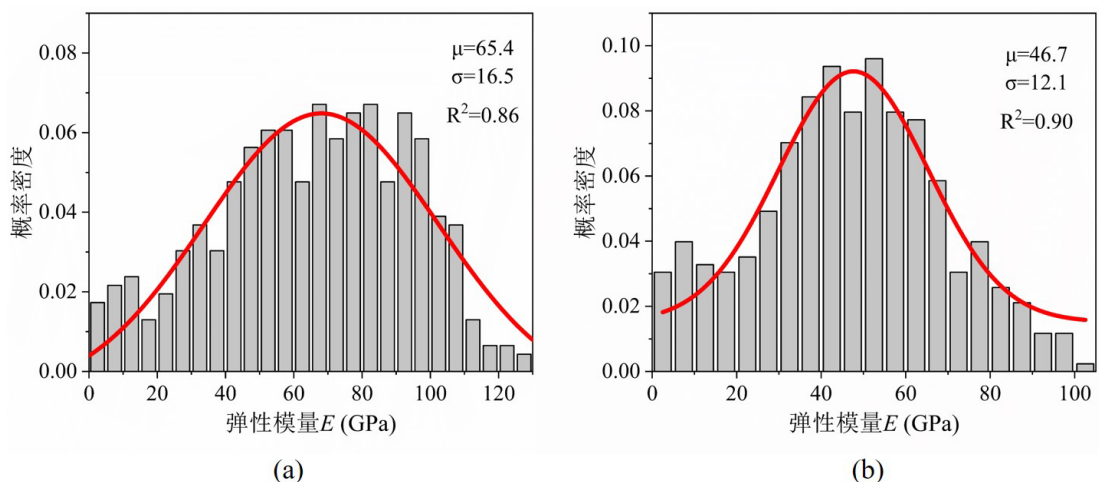


Figure 6. Statistical distribution of micro-elastic modulus in, (a) red sandstone; (b) gray sandstone

图6. 砂岩微弹模分布统计, (a) 红砂岩; (b) 灰砂岩

对于微孔隙与微弹模之间的数学关系,较为常用的有半经验指数型函数关系,即 Spriggs 方程,其数学表达式如下:

$$E = E_0 e^{(-\alpha f)} \tag{10}$$

其中,  $E$  表示弹模,  $E_0$  表示基准弹模即 0 孔隙率时的弹模,  $E_0$  取决于矿物相组分;  $\alpha$  为经验常数;  $f$  为孔隙率。基于最小二乘法的回归分析可确定其 Spriggs 方程中的拟合参数,如表 2 所示。对于红砂岩,  $E_0 = 162 \text{ GPa}$ ,  $\alpha = 8.0$ , 其主要以高弹模的石英矿物为骨架,因而具有较高的  $E_0$ , 较大的  $\alpha$  值则反映红砂岩中微孔隙对其微弹模的高敏感性;对于灰砂岩,  $E_0 = 124 \text{ GPa}$ ,  $\alpha = 8.7$ , 其  $E_0$  较低,这与灰砂岩中高含量黏土矿物的低模量特性有关,同样较大的  $\alpha$  值也反映灰砂岩中微孔隙对其微弹模的高敏感性,更高的  $\alpha$  值说明其力学性能受孔隙影响更显著。

本文采用如图所示的经典指数型函数 Spriggs 模型,该模型形式简洁,便于初步分析,但由于其对材料力学行为的过度简化,也存在固有的理论局限。该模型本质上是线性的,其数学结构中未包含任何可反映非线性响应的项,因此无法描述材料在不同载荷水平下力学行为的差异,这一局限性限制了该模型在复杂加载条件下的适用性与预测精度。

**Table 2.** Fitted parameters of Spriggs formula in porosity-modulus relation for sandstones  
**表 2.** 基于 Spriggs 半经验模型的砂岩孔隙 - 弹模关系拟合参数

| 类型  | $E_0$   | $E_0$ 误差限 | $\alpha$ | $\alpha$ 误差限 |
|-----|---------|-----------|----------|--------------|
| 红砂岩 | 162 GPa | 9.1 GPa   | 8.0      | 0.74         |
| 灰砂岩 | 124 GPa | 7.3 GPa   | 8.7      | 0.62         |

5. 结论

本文结合 X 射线断层扫描和纳米压痕测试对两种砂岩(红砂岩、灰砂岩)样品中微孔隙和微弹模的分布特征开展研究。主要结论如下:

(1) 两种砂岩样品中的微孔隙和微弹模分布呈近似高斯函数。红砂岩和灰砂岩中的微孔隙和微弹模分布范围基本一致,但红砂岩的微孔隙分布区间相对集中,灰砂岩则更为分散,这与二者的矿物组成差异(灰砂岩中黏土矿物含量较高)密切相关。其中,红砂岩的微弹模分布区间大于灰砂岩,且红砂岩微弹模的均值 65.4 GPa 大于灰砂岩微弹模的均值 46.7 GPa,通过对两组微弹模变异系数(CV)的对比,可以得到红砂岩的微弹模分布的离散程度略小于灰砂岩。

(2) 微孔隙和微弹模之间的数学关系满足指数型半经验 Spriggs 模型。对于红砂岩,  $E_0 = 162 \text{ GPa}$ ,  $\alpha = 8.0$ , 其主要以高弹模的石英矿物为骨架,因而具有较高的  $E_0$ , 较大的  $\alpha$  值则反映红砂岩中微孔隙对其微弹模的高敏感性;对于灰砂岩,  $E_0 = 124 \text{ GPa}$ ,  $\alpha = 8.7$ , 其  $E_0$  较低,这与灰砂岩中高含量黏土矿物的低模量特性有关,而灰砂岩中更高的  $\alpha$  值说明其力学性能受孔隙影响更显著。

基金项目

在此衷心感谢国家自然科学基金(项目编号: U2040222、52078123)的资助。

参考文献

[1] Ríos-Parada, V., Jiménez-Quero, V.G., Valdez-Tamez, P.L. and Montes-García, P. (2017) Characterization and Use of an Untreated Mexican Sugarcane Bagasse Ash as Supplementary Material for the Preparation of Ternary Concretes. *Construction and Building Materials*, **157**, 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.060>

- [2] Liu, F., Huang, S., Liu, G. and Yu, S. (2024) Estimation of Unfrozen Water Content of Saturated Sandstones Using Nuclear Magnetic Resonance, Mercury Intrusion Porosimetry, and Ultrasonic Tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **16**, 3465-3484. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.02.026>
- [3] Wei, Y., Cao, X., Wang, G., Zhang, M. and Lv, Z. (2023) Study on Carbon Fixation Ratio and Properties of Foamed Concrete. *Materials*, **16**, Article 3441. <https://doi.org/10.3390/ma16093441>
- [4] Zhang, A., Yang, W., Ge, Y., Wang, Y. and Liu, P. (2020) Study on the Hydration and Moisture Transport of White Cement Containing Nanomaterials by Using Low Field Nuclear Magnetic Resonance. *Construction and Building Materials*, **249**, Article 118788. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118788>
- [5] Elkhoury, J.E., Shankar, R. and Ramakrishnan, T.S. (2019) Resolution and Limitations of X-Ray Micro-CT with Applications to Sandstones and Limestones. *Transport in Porous Media*, **129**, 413-425. <https://doi.org/10.1007/s11242-019-01275-1>
- [6] Chung, S., Kim, J., Stephan, D. and Han, T. (2019) Overview of the Use of Micro-Computed Tomography (Micro-Ct) to Investigate the Relation between the Material Characteristics and Properties of Cement-Based Materials. *Construction and Building Materials*, **229**, Article 116843. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116843>
- [7] Kariem, H., Hellmich, C., Kiefer, T., Jäger, A. and Füssl, J. (2018) Micro-CT-Based Identification of Double Porosity in Fired Clay Ceramics. *Journal of Materials Science*, **53**, 9411-9428. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2281-9>
- [8] Li, Y., Wang, B., Ren, Z., Zuo, J., Liu, S. and Liu, D. (2024) Effect of Microstructure Heterogeneity on Shale Strength: Insights from Micro-CT Imaging and Numerical Simulations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **58**, 225-244. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04135-7>
- [9] Guo, F., Zhang, Z. and Yang, Z. (2024) A Continuous Hydration Model for Cement Paste with Realistic CT Image-Based Particles and Simulation of Microstructural Evolution. *Cement and Concrete Research*, **184**, Article 107607. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107607>
- [10] Zhang, H., Šavija, B., Luković, M. and Schlangen, E. (2019) Experimentally Informed Micromechanical Modelling of Cement Paste: An Approach Coupling X-Ray Computed Tomography and Statistical Nanoindentation. *Composites Part B: Engineering*, **157**, 109-122. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.102>
- [11] Lei, J. and Fan, Y. (2024) Rock CT Image Fracture Segmentation Based on Convolutional Neural Networks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **57**, 5883-5898. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-03824-7>
- [12] Qajar, J., Mohammadi, M. and Aghaei, H. (2021) An Investigation on the Robustness and Accuracy of Permeability Estimation from 3D M-CT Images of Rock Samples Based on the Solution of Laplace's Equation for Pressure. *Computers & Geosciences*, **155**, Article 104857. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104857>
- [13] Sinka, I.C., Burch, S.F., Tweed, J.H. and Cunningham, J.C. (2004) Measurement of Density Variations in Tablets Using X-Ray Computed Tomography. *International Journal of Pharmaceutics*, **271**, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2003.11.022>
- [14] Zhang, M. and Jivkov, A.P. (2016) Micromechanical Modelling of Deformation and Fracture of Hydrating Cement Paste Using X-Ray Computed Tomography Characterisation. *Composites Part B: Engineering*, **88**, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.007>
- [15] 张天付, 谢淑宇, 鲍征宇, 等. 基于高分辨率 CT 的孔隙型白云岩储层孔隙系统分形与多重分形研究[J]. 地质科技情报, 2016, 35(6): 55-62.
- [16] Wang, Y., Yang, W., Li, Z., *et al.* (2019) Review on Microstructure Study of Cementitious Materials with XCT Technology. *Materials Reports*, **33**, 2902-2909.
- [17] Hu, B., Chai, G., Liu, X., Wen, X., Gu, Z., Xie, L., *et al.* (2023) Insights into the Microscopic Oil-Water Flow Characteristics and Displacement Mechanisms during Waterflooding in Sandstone Reservoir Rock Based on Micro-CT Technology: A Pore-Scale Numerical Simulation Study. *Materials*, **16**, Article 3555. <https://doi.org/10.3390/ma16093555>
- [18] Ban, H., Karki, P. and Kim, Y. (2014) Nanoindentation Test Integrated with Numerical Simulation to Characterize Mechanical Properties of Rock Materials. *Journal of Testing and Evaluation*, **42**, 787-796. <https://doi.org/10.1520/jte20130035>
- [19] Li, Y., Luo, S., Lu, M., Wu, Y., Zhou, N., Wang, D., *et al.* (2021) Cross-Scale Characterization of Sandstones via Statistical Nanoindentation: Evaluation of Data Analytics and Upscaling Models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **142**, Article 104738. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104738>
- [20] Liu, K., Ostadhassan, M. and Bubach, B. (2016) Applications of Nano-Indentation Methods to Estimate Nanoscale Mechanical Properties of Shale Reservoir Rocks. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **35**, 1310-1319. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.09.068>
- [21] Liu, X., Xu, D., Li, S., Qiu, S. and Jiang, Q. (2023) An Insight into the Mechanical and Fracture Characterization of

- Minerals and Mineral Interfaces in Granite Using Nanoindentation and Micro X-Ray Computed Tomography. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **56**, 3359-3375. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03221-6>
- [22] Ma, Z., Pathegama Gamage, R. and Zhang, C. (2020) Application of Nanoindentation Technology in Rocks: A Review. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, **6**, 769-776. <https://doi.org/10.1007/s40948-020-00178-6>
- [23] Sun, C., Li, G., Gomah, M.E., Xu, J. and Sun, Y. (2020) Creep Characteristics of Coal and Rock Investigated by Nanoindentation. *International Journal of Mining Science and Technology*, **30**, 769-776. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.08.001>
- [24] Velez, K., Maximilien, S., Damidot, D., Fantozzi, G. and Sorrentino, F. (2001) Determination by Nanoindentation of Elastic Modulus and Hardness of Pure Constituents of Portland Cement Clinker. *Cement and Concrete Research*, **31**, 555-561. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00505-6](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00505-6)
- [25] Liu, X., Xu, D., Li, S., Duan, S., Xu, H., Jiang, Q., et al. (2024) Estimating the Mechanical Properties of Rocks and Rock Masses Based on Mineral Micromechanics Testing. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **57**, 5267-5278. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-03796-8>
- [26] Constantinides, G. and Ulm, F. (2004) The Effect of Two Types of C-S-H on the Elasticity of Cement-Based Materials: Results from Nanoindentation and Micromechanical Modeling. *Cement and Concrete Research*, **34**, 67-80. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(03\)00230-8](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(03)00230-8)
- [27] 唐旭海, 许婧璟, 张怡恒, 等. 基于微观岩石力学试验和 NWA13618 陨石的小行星岩石力学参数分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1157-1163.
- [28] 张兆鹏, 张士诚, 石善志, 等. 基于纳米压痕实验和均匀化方法评价砾岩多尺度力学性质——以玛湖凹陷南斜坡致密砾岩储层为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 926-940.
- [29] Li, L., Huang, B., Tan, Y., Li, X. and Ranjith, P.G. (2022) Using Micro-Indentation to Determine the Elastic Modulus of Shale Laminae and Its Implication: Cross-Scale Correlation of Elastic Modulus of Mineral and Rock. *Marine and Petroleum Geology*, **143**, Article 105740. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105740>
- [30] Li, Y., Chen, J., Yang, J., Liu, J. and Tong, W. (2022) Determination of Shale Macroscale Modulus Based on Microscale Measurement: A Case Study Concerning Multiscale Mechanical Characteristics. *Petroleum Science*, **19**, 1262-1275. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.10.004>
- [31] 张妹珠, 许婧璟, 江权, 等. 基于原子力显微镜的板岩杨氏模量宏观跨尺度表征方法研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(A1): 245-257.
- [32] Luo, S., Lu, Y., Wu, Y., Song, J., DeGroot, D.J., Jin, Y., et al. (2020) Cross-Scale Characterization of the Elasticity of Shales: Statistical Nanoindentation and Data Analytics. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **140**, Article 103945. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.103945>
- [33] 何智海, 倪雅倩, 杜时贵, 等. 纳米压痕技术在岩石材料中的应用与研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(10): 2045-2066.
- [34] Constantinides, G., Ravi Chandran, K.S., Ulm, F.-J. and Van Vliet, K.J. (2006) Grid Indentation Analysis of Composite Microstructure and Mechanics: Principles and Validation. *Materials Science and Engineering: A*, **430**, 189-202. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.125>
- [35] Blanchard, R., Morin, C., Malandrino, A., Vella, A., Sant, Z. and Hellmich, C. (2016) Patient-Specific Fracture Risk Assessment of Vertebrae: A Multiscale Approach Coupling X-Ray Physics and Continuum Micromechanics. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, **32**, 1-11. <https://doi.org/10.1002/cnm.2760>
- [36] Hounsfield, G.N. (1973) Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography): Part 1. Description of System. *The British Journal of Radiology*, **46**, 1016-1022. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-46-552-1016>
- [37] Chen, J.J., Sorelli, L., Vandamme, M., Ulm, F. and Chanvillard, G. (2010) A Coupled Nanoindentation/SEM-EDS Study on Low Water/Cement Ratio Portland Cement Paste: Evidence for C-S-H/Ca(OH)<sub>2</sub> Nanocomposites. *Journal of the American Ceramic Society*, **93**, 1484-1493. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03599.x>
- [38] Krakowiak, K.J., Thomas, J.J., Musso, S., James, S., Akono, A. and Ulm, F. (2015) Nano-Chemo-Mechanical Signature of Conventional Oil-Well Cement Systems: Effects of Elevated Temperature and Curing Time. *Cement and Concrete Research*, **67**, 103-121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.08.008>
- [39] Deirich, A., Ortega, J.A., Ulm, F.-. and Abousleiman, Y. (2012) Nanochemomechanical Assessment of Shale: A Coupled WDS-Indentation Analysis. *Acta Geotechnica*, **7**, 271-295. <https://doi.org/10.1007/s11440-012-0185-4>
- [40] Lura, P., Trtik, P. and Münch, B. (2011) Validity of Recent Approaches for Statistical Nanoindentation of Cement Pastes. *Cement and Concrete Composites*, **33**, 457-465. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.01.006>