

# 基于三维数字岩心的油页岩裂解孔隙重构及表征研究

王斌<sup>1,2</sup>, 孙廉贺<sup>2</sup>, 杨睿月<sup>1,2\*</sup>, 杨兵<sup>3</sup>, 王海柱<sup>1,2</sup>, 张云鹏<sup>2</sup>, 王全<sup>2</sup>, 刘铭盛<sup>2</sup>

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

3 西安石油大学石油工程学院, 西安 710018

\* 通信作者, yangruiyue@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-09-14

国家青年科学基金项目“粗糙迂曲缝内超临界CO<sub>2</sub> 微细支撑剂携带机理研究”(52204021)和国家自然科学基金专项项目“页岩油储层超临界CO<sub>2</sub> 聚能压裂与封存基础研究”(52341401)联合资助

**摘要** 油页岩孔隙结构作为油气渗流的主要通道, 高温热解过程中将产生复杂变化, 然而其变化规律不明严重制约储集层分类评价和高效开发。因此, 开展不同温度及不同有机质含量条件下油页岩热解对孔隙结构影响的研究对于油页岩的有效开发具有重要意义。针对热解前后油页岩孔缝结构变化精细表征难的问题, 本文通过编程方法提出了一种基于三维数字岩心重构的裂缝及孔隙结构表征新方法, 定量分析了热解过程中样品裂缝宽度、裂缝方向、分形维数及孔隙度等参数的变化规律。研究结果表明: (1) 本文所提出的裂缝性数字岩心精细化处理方法结合等位精细化中面提取算法, 在准确计算岩石物性参数的基础上可实现对缝宽及裂缝方向分布的精确计算, 可达到对裂缝孔隙精细表征的目的; (2) 随着热解温度的升高, 油页岩样品孔隙度由 18.3% 升至 20.9%, 且裂缝宽度不断增大, 油页岩样品物性得到持续改善, 但当热解进行到一定程度后油页岩孔隙结构变化趋势放缓; (3) 相同温度条件下随着有机质含量的升高, 热解后油页岩样品孔隙度由 12.1% 升至 29.3%, 但 4 种样品分形维数未随着有机质含量升高呈现出单调递增趋势, 表明热解裂缝复杂性除受有机质含量影响外, 也受到样品中有机质初始分布的影响。本文可为油页岩热解后孔隙结构精细表征提供新思路。

**关键词** 数字岩心; 三维重构; 油页岩; 高温热解; 孔隙结构表征

**中图分类号**: P618.13; TE311

## Characterization of oil shale pore and fractures during pyrolysis using digital rock reconstruction

WANG Bin<sup>1,2</sup>, SUN Lianhe<sup>2</sup>, YANG Ruiyue<sup>1,2</sup>, YANG Bing<sup>3</sup>, WANG Haizhu<sup>1,2</sup>, ZHANG Yunpeng<sup>2</sup>, WANG Quan<sup>2</sup>, LIU Mingsheng<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

引用格式: 王斌, 孙廉贺, 杨兵, 杨睿月, 王海柱, 张云鹏, 王全, 刘铭盛. 基于三维数字岩心的油页岩裂解孔隙重构及表征研究. 石油科学通报, 2024, 04: 648-658

WANG Bin, SUN Lianhe, YANG Ruiyue, YANG Bing, WANG Haizhu, ZHANG Yunpeng, WANG Quan, LIU Mingsheng. Characterization of oil shale pore and fractures during pyrolysis using digital rock reconstruction. Petroleum Science Bulletin, 2024, 04: 648-658. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.049

3 College of Petroleum Engineering, Xi'an University of Petroleum, Xi'an 710018, China

Received: 2023-06-21; Revised: 2023-09-14

**Abstract** As the primary conduit for oil and gas seepage, the pore and fracture structure of oil shale undergoes intricate changes during pyrolysis. However, the lack of understanding regarding its variations hinders effective reservoir classification and development. Therefore, it is important to investigate the influence of oil shale pyrolysis on pore structure at different temperatures and organic matter content. This paper proposes a new method based on 3D digital core reconstruction to quantify fractures and pore structures. The methodology employs parameters such as fracture width, fracture orientation, fractal dimension, and porosity to assess changes in pore and fracture structures throughout the pyrolysis process. The findings are as follows: (1) The proposed digital rock processing method and midplane extraction algorithm for fractured rock can accurately calculate fracture width and fracture orientation distribution. (2) As pyrolysis temperature increased, the porosity of oil shale samples rose from 18.3% to 20.9%, with a corresponding increase in fracture width, indicating improvements in the physical properties of the samples. However, the rate of change in pore and fracture structures decreased after pyrolysis (3) For fractured oil shale samples, porosity increased from 12.1% to 29.3% with higher organic matter content at consistent temperatures. However, Fractal analysis shows that pyrolysis fracture complexity is governed by both the content and, importantly, the initial spatial distribution of organic matter. This provides a new perspective for the precise characterization of pore structure after fracturing oil shale.

**Keywords** digital rock; 3D reconstruction; oil shale; high temperature pyrolysis; pore structure characterization

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.049

## 0 引言

在油气工业的勘探开发领域,我国已经实现了从常规油气向非常规油气的跨越式发展,非常规油气占全国累计探明油气储量的41%<sup>[1]</sup>,是我国重要的油气战略接替资源。油页岩作为一种典型的非常规油气资源,油气成熟度低,其开发利用必须依靠高温使岩石内部的干酪根熟化裂解,进而产生可动用油气。我国油页岩资源丰富,分布相对集中,据地质局调查数据,我国油页岩探明储量约9723.2亿t<sup>[2]</sup>。因此,加快油页岩资源的高效开发利用,对满足我国能源需求、优化能源结构、保障能源安全等方面有重大政治、经济意义。

原位热解是油页岩开发利用过程中的一项重要技术,其主要通过注热使油页岩在原位条件下发生热解以产生油气,较传统开发方式而言具有诸多优点,目前常用方法包括:对流加热、传导加热、反应加热以及辐射加热等<sup>[3-5]</sup>。在原位热解过程中,油页岩的孔隙结构将发生不可逆的变化,进而对油页岩储层孔渗及力学特性产生深远影响<sup>[6]</sup>。耿毅德<sup>[7]</sup>等人通过利用自研设备研究了不同热解条件下油页岩的渗透率变化规律,实验发现渗透率随温度呈阶段性变化。徐兴倩<sup>[3]</sup>等人通过控制热解条件研究了弹性模量在不同热解程度下的变化规律,并基于实验规律提出了油页岩热解过程中弹性模量计算模型。前人的研究大多从宏观角度揭示油页岩热解过程中物性的变化规律,而微观机理研究仍有不足。因此,从微观角度揭示油页岩热解

后渗流及力学特性的变化对其高效开发至关重要。

对于油页岩热解前后孔隙结构的表征,前人多采用CT扫描法、高压压汞法、核磁共振法或多种方法相结合的手段开展相关研究<sup>[7]</sup>。Tarik Saif<sup>[8-9]</sup>通过CT成像实验发现当温度在390~400℃时孔隙结构发生了显著变化,当热解温度在400~500℃时形成了沿干酪根层状结构发育的微孔道。刘志军<sup>[10]</sup>采用低场核磁共振技术获取不同热解温度条件下油页岩T2谱线图,并分析得到多种孔隙参数。Gaofei Liu<sup>[11]</sup>通过AIP-SEM观察发现鄂尔多斯盆地油页岩样品在不同的热模拟阶段具有不同的孔隙类型。Haibo Tang<sup>[12]</sup>等人基于不同温度热解后油页岩CT图像发现不同温度条件下热解裂缝形态在统计学方面与分形规律相符。由前人研究可知,与传统实验方法相比,采用CT扫描法进行油页岩数字岩心重构可实现油页岩微观结构的可视化及多种物性参数的定量分析,具有较好的应用前景。

此外,原位热解过程中油页岩内部微裂缝的产生为油气渗流提供了高效途径,因此实现裂缝网络的准确分析评价也尤为重要。采用CT扫描法重构数字岩心可对裂缝参数进行定量分析,何强<sup>[13]</sup>对压裂前后油页岩样品开展CT扫描重构,并分析了不同实验条件下裂缝分形维数的变化。Bing Yang<sup>[14]</sup>等人采用4种不同压裂液开展压裂实验后,采用CT扫描的方式对压裂结果进行成像,并基于CT数据获取了裂缝分型维数、面积比及裂缝体积等参数。由前人研究可知,基于数字岩心开展裂缝定量分析是实现热解裂缝评价的有效方法,但目前的研究中缺乏对裂缝方向的精确计算,并且关

于油页岩热解微裂缝的精细表征研究较少。

综上所述,数字岩心可实现油页岩复杂孔隙空间的可视化以及孔喉参数的定量计算,但前人基于数字岩心对裂缝参数的研究存在不足,无法全面分析热解过程中油页岩孔隙结构的变化,同时由于目前商业软件无法有效计算数字岩心裂缝宽度及方向分布,因此本研究通过新提出的数字岩心重构和定量分析方法对油页岩孔缝结构进行了精细的量化分析,证明该方法可行性,为油页岩的量化分析提供了新的思路。

## 1 裂缝性数字岩心重构及定量分析方法

CT扫描设备从多角度拍摄岩石样品一系列二维投影图片,通过将二维投影堆叠,可获得岩石样品的三维CT数据,实现岩石孔隙结构的精细三维可视化,并且由于岩石中不同组分具备不同的密度和X射线衰减特性,因此各组分在CT图像中具备不同的灰度值,岩石中组分密度越大的地方图像灰度值越高显示越亮<sup>[14-16]</sup>。

图1为我们关于裂缝性数字岩心处理及分析工作流程示意图,获取岩石三维图像后,首先采用Avizo

标准化算法完成图像降噪及分割,后续工作基于Python语言通过编程方式提取裂缝中面开展缝宽计算,随后在裂缝中面数据的基础上将中面转化为点云计算裂缝方向分布。

### 1.1 图片预处理

在岩心图像数字化过程中由于设备及环境的影响,CT扫描图像可能存在伪影及噪声,因此为了在尽可能保持图像特征不变的前提下消除图片中的噪声,许多学者大多使用非局部均值滤波、高斯滤波以及中值滤波等多种降噪算法中的一种或几种以达到优化图片质量,增强图像信噪比的目的<sup>[17-18]</sup>。样品在高分辨率扫描条件下获得时,非局部均值滤波算法对于图像的滤波降噪具有较好效果,该算法基于图像的非局部相似特性,在处理图像时以不同像素点邻域相似性为主,将领域像素相似性大的划为一相,从而在尽可能保持图像特征的前提下达到降低噪声的目的<sup>[19-20]</sup>。该方法基本原理为<sup>[20-21]</sup>:

$$NL(i) = \frac{1}{C(i)} \sum_{j \in \Omega, j \in (i)} \omega(i, j) I(j) \quad (1)$$

式中 $I(j)$ 为降噪前像素点 $i$ 处的灰度值, $NL(i)$ 为降噪后像素的 $i$ 处的灰度值, $C(i)$ 为标准化系数, $(i)$ 为搜索窗

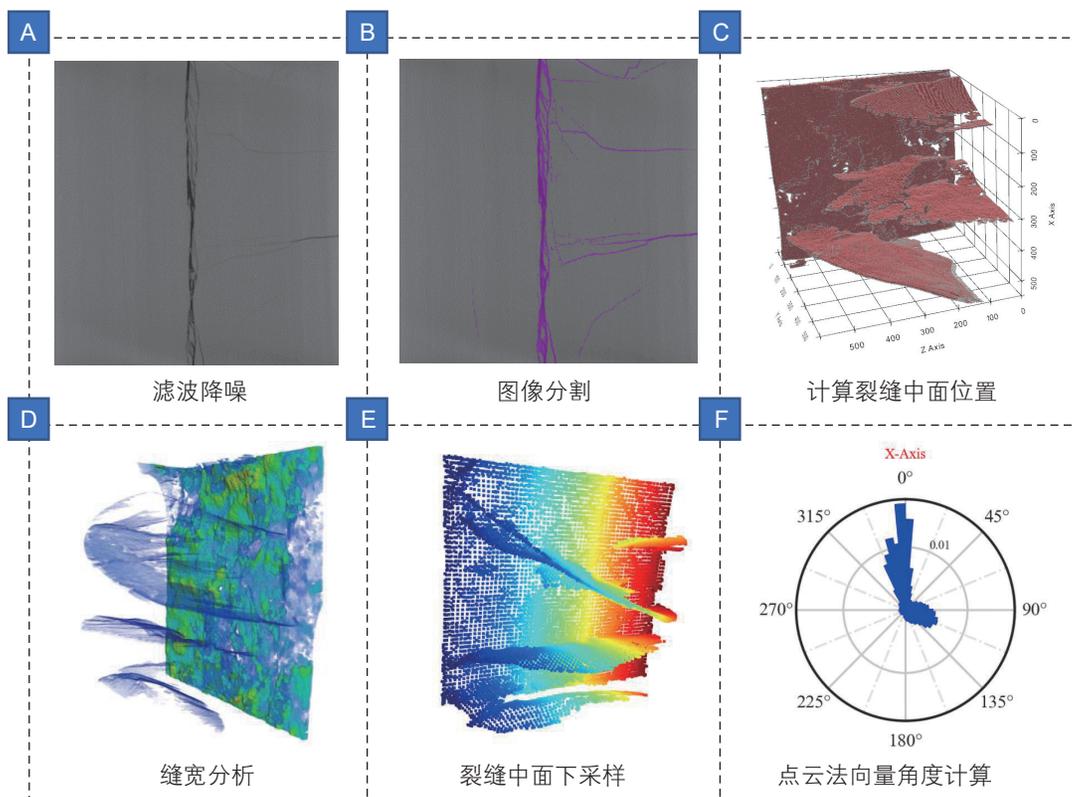


图1 裂缝性数字岩心分析示意图

Fig. 1 Diagram of fracture digital core analysis

口,  $\omega(i, j)$  为权重,  $\omega(i, j)$  表达式为:

$$\omega(i, j) = \exp\left(\frac{-\|N_i - N_j\|_{2,\alpha}^2}{h^2}\right) = \exp\left(\frac{-\sum_{l=0}^{f-1} \sum_{m=0}^{f-1} [I_i(l, m) - I_j(l, m)]^2 G_a(l, m)}{h^2}\right) \quad (2)$$

式中  $N_i$  为像素点  $i$  处邻域块,  $N_j$  为像素点  $j$  处邻域块,  $h$  为滤波系数,  $G_a(l, m)$  为二维高斯平滑核。

### 1.2 裂缝分割重构及缝面特征分析

图像分割是数字岩心处理过程中至关重要的一步, 目前常用的分割算法包括阈值分割法、区域生长法以及分水岭算法等<sup>[22]</sup>, 本研究中主要采用阈值分割法进行不同相之间的分割操作, 该方法的原理主要基于图像二值化思想, 根据阈值的不同将输入图像的灰度值划分为 0 或 1, 其基本原理如式 3:

$$g(i, j) = \begin{cases} 1, f(i, j) \geq T \\ 0, f(i, j) < T \end{cases} \quad (3)$$

式中  $g(i, j)$  为输出结果,  $f(i, j)$  为输入图像在坐标  $(i, j)$  处灰度值,  $T$  为阈值, 由式 3 可知, 选择合适的阈值将三维数字岩心中不同相分别进行标记, 即可实现三维数字岩心孔隙结构与岩石基质的准确分割<sup>[17]</sup>, 完整获取样品孔隙结构后删除孤立孔隙便可重构出裂缝的三维形态。

进行缝面特征分析时粗糙度及复杂性是重要参考指标, 而分形维数是裂缝复杂性分析中常用的定量参数。分形维数是一个比率, 在三维空间中分形维数是进行表面粗糙度以及曲面复杂程度计算和比较的有效工具, 同时对于三维结构而言, 分形维数大于 2 且严格小于 3, 在本文研究中采用盒计数法进行裂缝分形维数的测量, 其数学表达式为<sup>[14]</sup>:

$$FD = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\ln(N_h)}{\ln(1/h)} \quad (4)$$

式中  $h$  为盒子大小,  $N_h$  为为盒子数量。

### 1.3 裂缝缝宽分析方法

在三维裂缝的精细表征中裂缝宽度是实现裂缝三维数字化后的一个重要测量参数, 传统计算两曲面间距离的方法为统计两曲面对应点之间的正交距离, 但该方法对于复杂裂缝网络误差较大, 因此在本文的研究中我们采用了 T Hildebrand<sup>[23]</sup> 等人所提出的局部厚度统计方法(如图 2)来计算裂缝宽度, 假设  $\Omega \subset \mathbb{R}^3$  为

三维结构中所有点的集合, 并且  $p \in \Omega$  为结构中的任意一点, 将包含点  $p$  且不超过结构边界的最大球体直径定义为局部厚度  $\tau(p)$ , 其表达式为:

$$\tau(p) = 2 \cdot \max\left\{\{r \mid p \in \text{sph}(x, r) \subseteq \Omega, x \in \Omega\}\right\} \quad (5)$$

式中  $\text{sph}(x, r)$  为以  $x$  为中心、 $r$  为半径的球体内的点集。

然而在进行裂缝宽度计算时, 为避免相邻位置不同体素局部厚度重复叠加, 本文在进行缝宽计算前首先提取出裂缝中面(如图 1C), 该中面到裂缝上下边距距离相等, 并且保留了原始裂缝的几何属性, 本文主要采用等位精细化算法从原始裂缝的二值图像中提取裂缝中面, 并将中面包含体素的局部厚度值作为该点处裂缝宽度<sup>[14]</sup>。

### 1.4 裂缝方向分析方法

为分析裂缝方向特性, 首先需要计算各裂缝中面体素的质心位置, 并将裂缝中面转化为点云数据集。获取点云数据后使用开源软件 Open3D<sup>[24]</sup> 求取点云中各点的法向量, 为节约计算成本, 可在不影响裂缝属性计算的前提下对原始点云数据进行下采样, 减少点云中点的数量(如图 1E)。得到点云数据集后, 分别求取点云中各点处的法向量, 然后将点云法向量分别投影至空间中与  $Z$  轴平行的平面及与  $XOY$  平面所平行的平面中, 并分别计算  $X$  轴及  $Z$  轴沿顺时针方向与向量投影间的夹角, 各点法向量投影与  $Z$  轴及  $X$  轴夹角  $\theta$ <sup>[14]</sup>:

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\overline{n_f \cdot n_p}}{\|n_f\| \|n_p\|}\right) \quad (6)$$

式中向量  $n_f$  为裂缝中面点云法向量的投影向量, 向量  $n_p$  为在三维空间中选定的方向向量, 计算原理如图 3 所示。

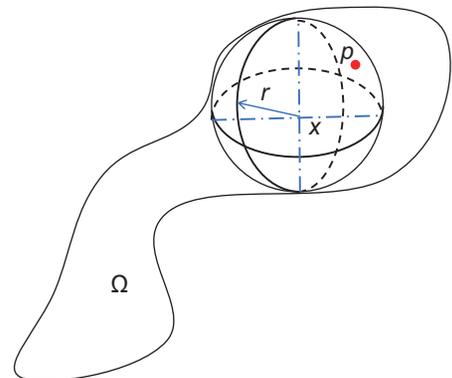


图 2 局部厚度计算原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of local thickness calculation principle

## 2 油页岩裂解孔隙结构表征

为验证本文所提出的基于三维数字岩心重构的裂缝及孔隙结构精细表征新方法的准确性及可行性, 本文选用8组开源油页岩CT数据, 分别分析了油页岩孔隙结构随热解温度的演化规律及有机质含量对油页岩热解后孔缝结构的影响。

### 2.1 热解温度对孔缝特征的影响

不同热解温度数据为同一油页岩样品在绝对压强 0.1 kPa 条件下, 利用定制加热炉从 20 °C 加热至

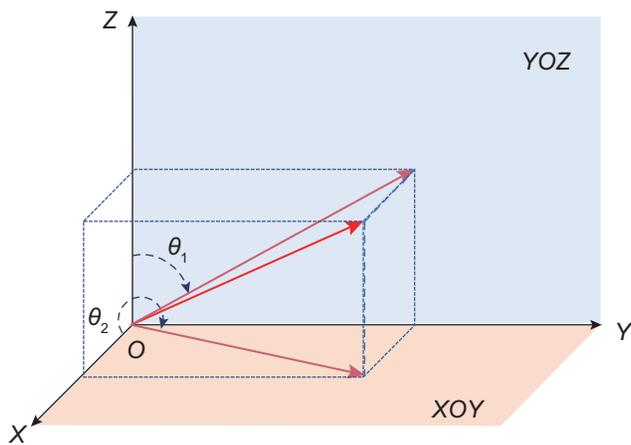


图3 裂缝角度计算原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of crack angle calculation principle

500 °C 进行热解, 并在热解过程中同时采用钻石光源 I13-2 光束以 2 μm 分辨率开展同步辐射实时CT扫描所获得(实验方法如图4), 本节选取 400 °C、450 °C、470 °C、500 °C 4组数据开展分析。

根据 1.2 中分形维数计算方法求出样品在 400 °C、450 °C、470 °C、500 °C 时分形维数分别为 2.596、2.608、2.618、2.624, 由计算结果可知 500 °C 时油页岩样品分形维数最高, 表明随着热解过程的不断深入, 油页岩样品所产生裂缝的复杂度随之升高, 导致该结果的原因为随着热解温度升高裂缝不断扩展导致缝网复杂度有升高的趋势。

微裂缝宽度可由CT数据基于 1.3 节所述方法计算得到, 图5为缝宽云图叠加中面切片示意图。缝宽分布云图如图6, 由缝宽分布云图可以看出, 随着热解温度的升高, 微裂缝数量不断增加。图7为4种温度条件下油页岩样品裂缝宽度分布统计结果, 由计算结果可知, 4种热解温度条件下微裂缝宽度均分布在 0.01~0.08 mm 之间, 而随着温度的升高微裂缝宽度峰值逐渐向右偏移, 表明随着温度的升高有机质不断热解, 微裂缝宽度也随之增加, 可有效增大油气的流动通道, 提升油气在基质中的渗流能力。

用 1.4 中裂缝方向分析方法, 计算了平行于Z轴及 XOY 平面的平面中裂缝方向的分布, 图8为4种热解温度条件下样品中裂缝方向计算结果, 由计算结果可以看出, 在与Z轴平行的平面中, 4种热解温度条件下裂缝方向均主要分布在 0°~15° 及 165°~180° 之间, 随

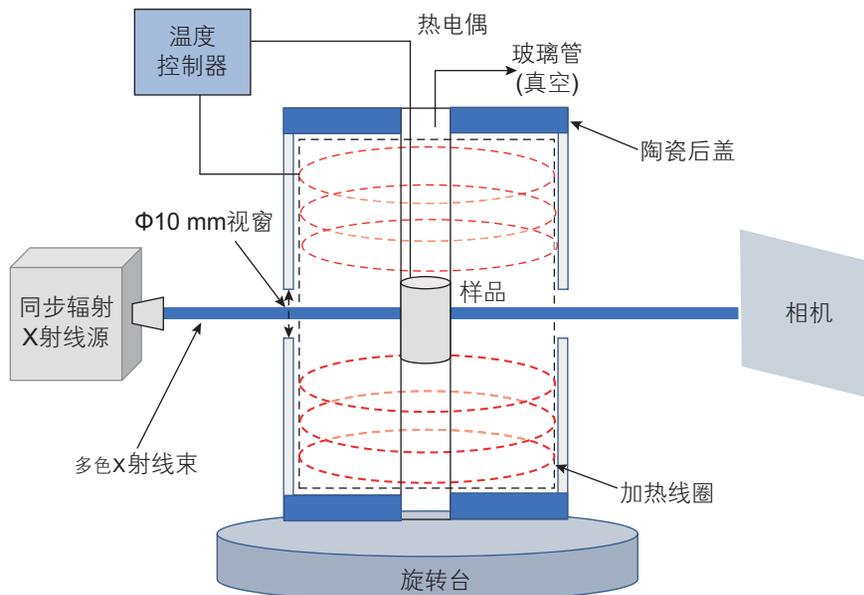


图4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

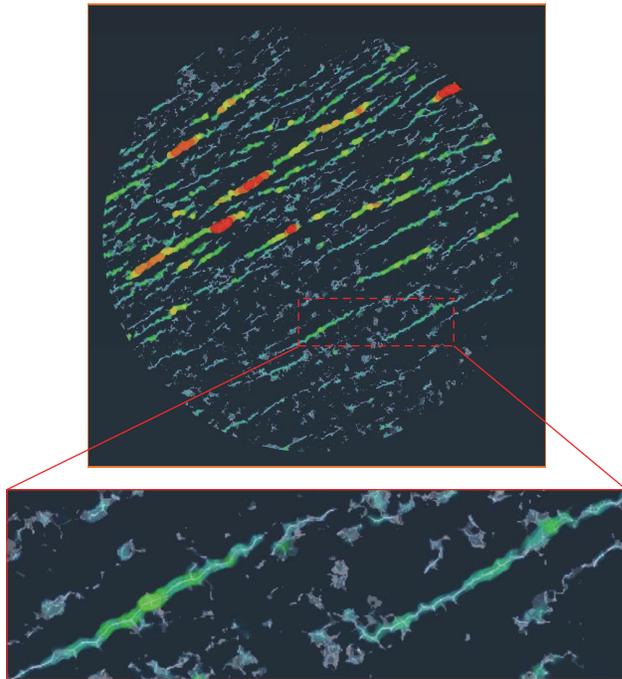


图5 缝宽云图切片(白色为裂缝中面)

Fig. 5 Cloud image slice of fracture width (white represents the middle surface of the crack)

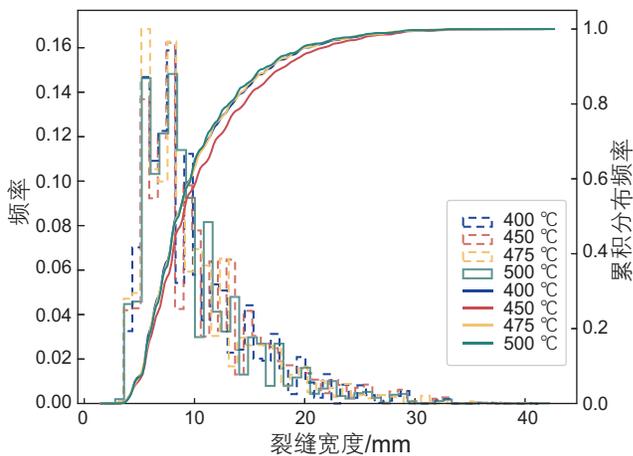


图7 4种温度条件下油页岩样品裂缝宽度分布统计图

Fig. 7 Distribution statistics of fracture width of oil shale samples at four temperatures

随着热解温度的升高裂缝方向及裂缝方向分布频率无明显差异；在与XOY平面平行的平面中，4种热解温度条件下裂缝方向均主要分布在 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 、 $265^{\circ}\sim 285^{\circ}$ 及 $345^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 之间，随着热解温度的升高裂缝方向分别无明显变化，而温度由 $400^{\circ}\text{C}$ 上升至 $500^{\circ}\text{C}$ 的过程中分布在 $265^{\circ}\sim 285^{\circ}$ 及 $345^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 之间的裂缝方向分布频率由0.66%上升至0.80%，表明沿这两个方向分布的裂缝数量升高。由计算结果可知，随着样品热解温度的升高，裂缝发育方向受初始裂缝和层理方向控制。

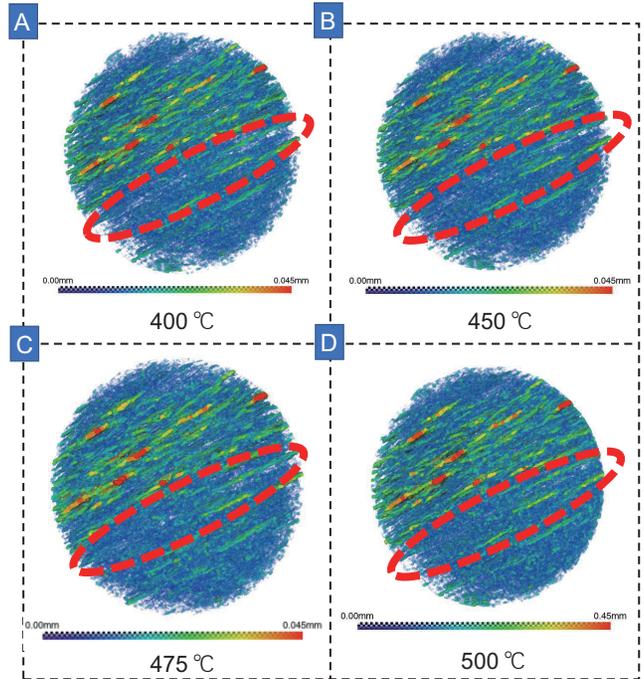


图6 4种温度条件下油页岩样品裂缝宽度计算结果

Fig. 6 Calculation results of fracture width of oil shale samples under four temperature conditions

图9A、9B为油页岩热解后数字岩心X方向与Y方向切片示意图，图中灰色部分为 $400^{\circ}\text{C}$ 热解条件下已开启裂缝，蓝色部分为油页岩热解至 $500^{\circ}\text{C}$ 时新增裂缝面积，由裂缝面积变化可知当热解进行到一定程度后该油页岩样品热解裂缝主要沿垂直干酪根纹层初始分布方向继续起裂，而缝长变化较小。图9C为4种热解温度条件下样品孔隙率计算结果，在 $400^{\circ}\text{C}$ 、 $450^{\circ}\text{C}$ 、 $475^{\circ}\text{C}$ 、 $500^{\circ}\text{C}$ 时样品平均孔隙度由18.3%上升至20.9%，在图9C中我们绘制出4种不同温度油页岩热解样品沿Z轴方向(A到B)面孔隙率分布变化曲线，从图中可以看出随着温度的升高油页岩样品各层切片渗透率均有所提高，与图9A、9B观测结果一致，由前文分析可知产生该结果的主要原因为随着温度升高样品中有机质热解使得样品中孔隙数量增多且孔隙尺寸增大，样品中孔隙所占比例随之增大，同时随着热解温度的升高样品中生成的油气聚集在孔隙中使得微裂隙体积膨胀，孔隙度在多种因素共同作用下逐渐升高。

## 2.2 有机质含量对孔隙特征的影响

本节选取在0.1 kPa、 $500^{\circ}\text{C}$ 热解条件的4组不同有机质含量样品热解后CT数据进行分析，每组CT数据物理尺寸约为直径 $2\text{ mm}$ ×高 $3.5\text{ mm}$ ，分辨率为 $2\text{ }\mu\text{m}$ ，样品有机质含量排序为： $\text{OM4} > \text{OM3} > \text{OM2}$

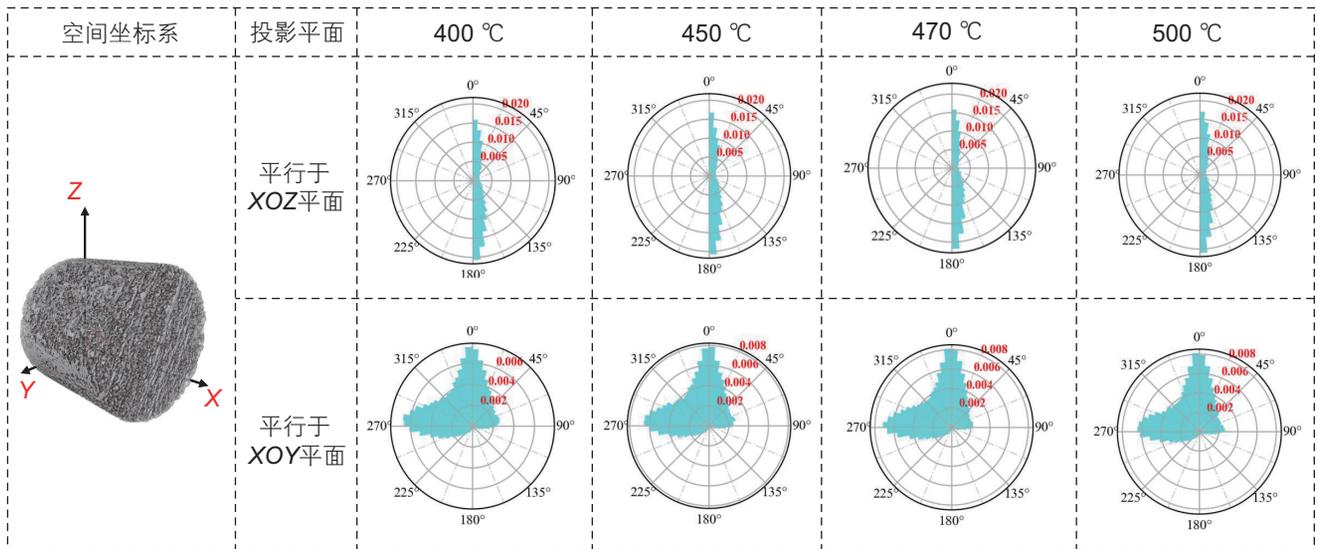


图 8 4 种温度条件下油页岩样品裂缝方向玫瑰图

Fig. 8 Rose diagram of fracture directions of oil shale samples under four temperature condition

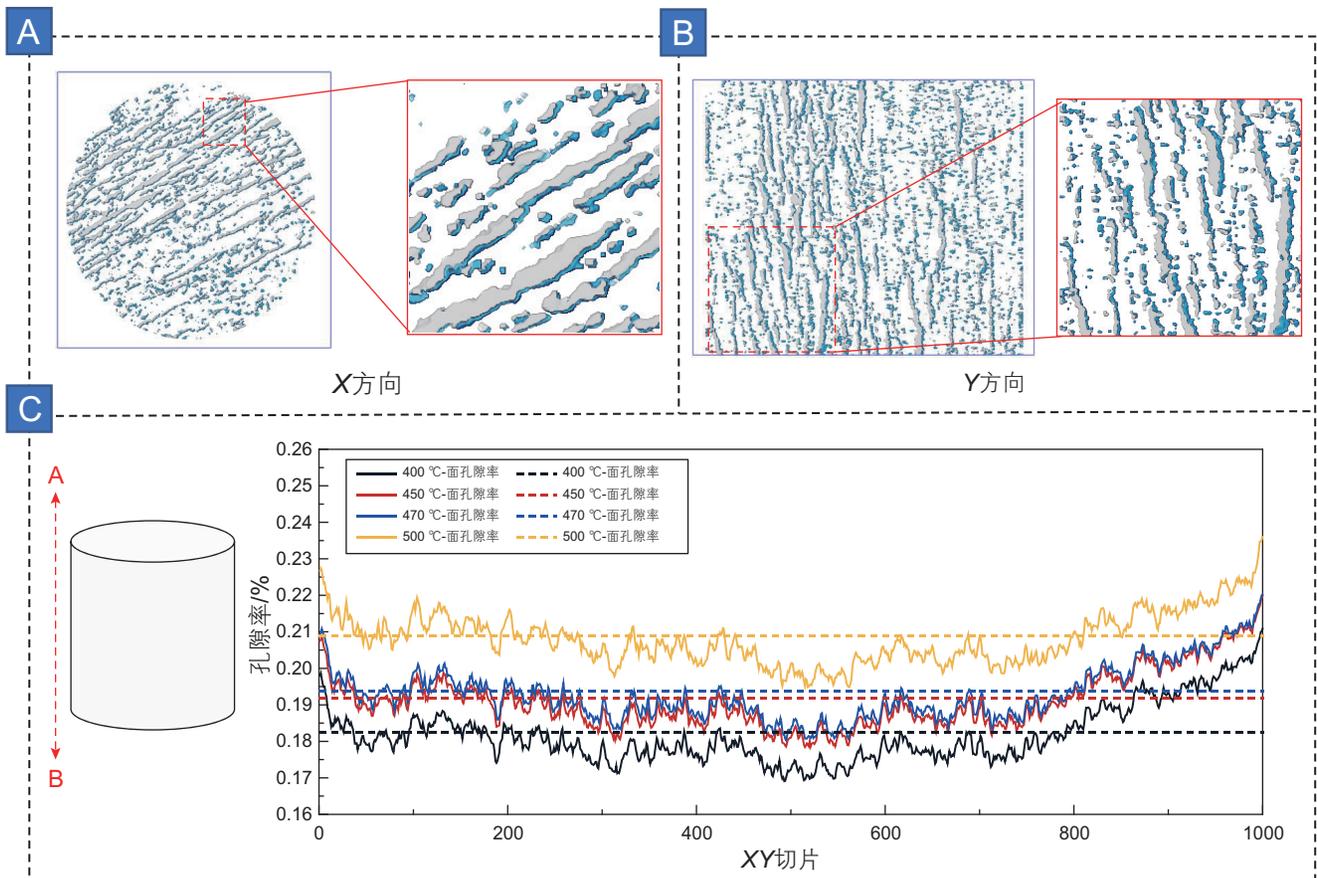


图 9 4 种温度条件下样品从 A 至 B 面孔隙率分布

Fig. 9 Porosity distribution of samples from A to B at four temperature conditions

>OM1, 基于 1.2 中分形维数计算方法求得 OM1、OM2、OM3、OM4 样品分形维数分别为 2.29、2.44、2.37、2.43, 由计算结果可知随着样品有机质含量的增加, 裂缝复杂性呈现出先“增大—减小—增大”的趋

势, 导致该结果的主要原因为样本量不足, 样本间存在个体差异, 与样品矿物初始分布的相关。

4 种有机质含量油页岩样品在 500 °C 条件下热解产生裂缝宽度分布云图如图 10 所示。由缝宽分布统计

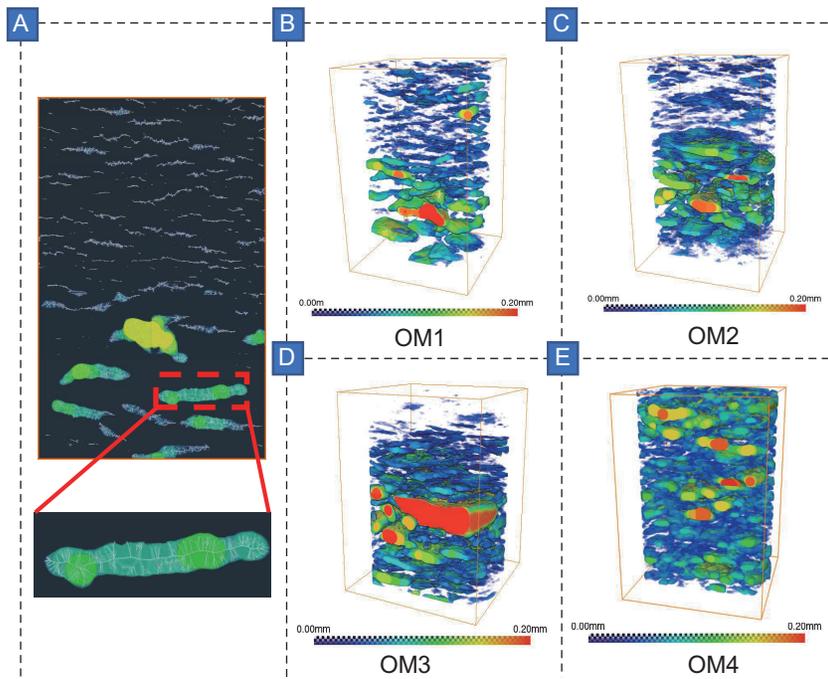


图 10 4 种有机质含量油页岩样品裂隙宽度计算结果

Fig. 10 Calculation results of fracture width of oil shale samples with four organic matter contents

结果(图 11)可知样品 OM1、OM2、OM4 热解后裂隙宽度范围分布在 0.01~0.30 mm 之间, 而样品 OM3 样品热解后裂隙宽度范围分布在 0.01~0.40 mm 之间, 并且从图 10B-E 可以看出随着有机质含量的增加热解后样品裂隙数量明显增加, 但裂隙宽度未呈现出随有机质含量递增的趋势, 产生这种现象的原因为随着油页岩样品有机质含量的增加, 有机质分布更广使得热解后裂隙数量上升, 而裂隙宽度由于有机质非均匀聚集导致缝宽未呈现出明显变化规律。

图 12 为 4 种有机质含量样品中裂隙方向计算结果, 裂隙方向分布玫瑰图中红线为干酪根纹层初始分布方向, 由计算结果可以看出, 在与 Z 轴平行的平面中, 样品 OM1、OM2、裂隙方向均主要分布在  $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$  及  $135^{\circ}\sim 180^{\circ}$  之间, 样品 OM3、OM4 裂隙方向均主要分布在  $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 、 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$  及  $160^{\circ}\sim 180^{\circ}$  之间, 随着有机质含量的升高, 热解后裂隙方向及裂隙方向分布频率未表现出明显变化趋势; 在于 XOY 平面平行的平面中, 4 种有机质油页岩样品裂隙方向主要分布在

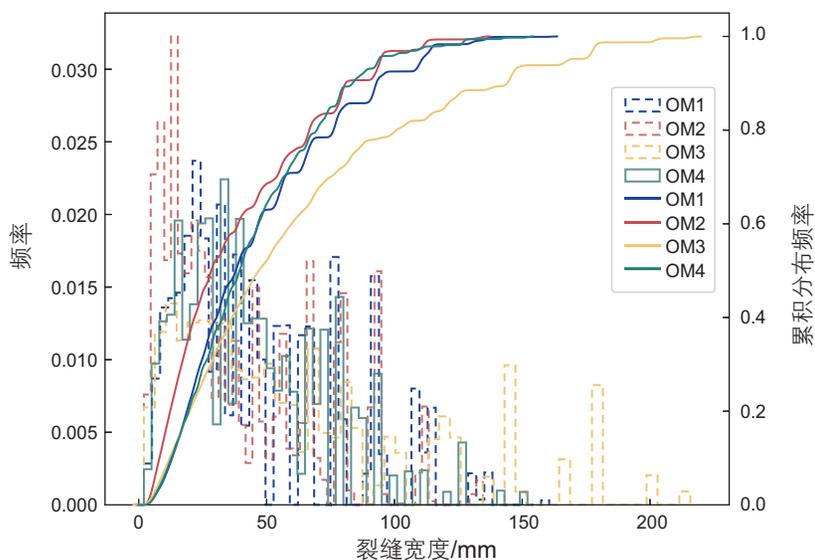


图 11 4 种有机质含量油页岩样品裂隙宽度分布统计图

Fig. 11 Distribution statistics of fracture width of oil shale samples with four organic matter contents

0°~15°及 345°~360°之间, 其中样品OM2、OM3 在 270°方向上也发育有少量裂缝, 而样品OM4 在 180°发育裂缝数量明显高于其与 3 块样品。由于 3 组样品选自油页岩样品不同区域, 因此样品中有机质初始分

布状态存在差异, 导致热解后裂缝方向的差异性, 但裂缝方向分布统计结果表明本研究所采用的 3 组样品起裂方向主要与干酪根纹层初始分布方向垂直。

图 13 图为 4 种有机质含量油页岩样品在 500 °C

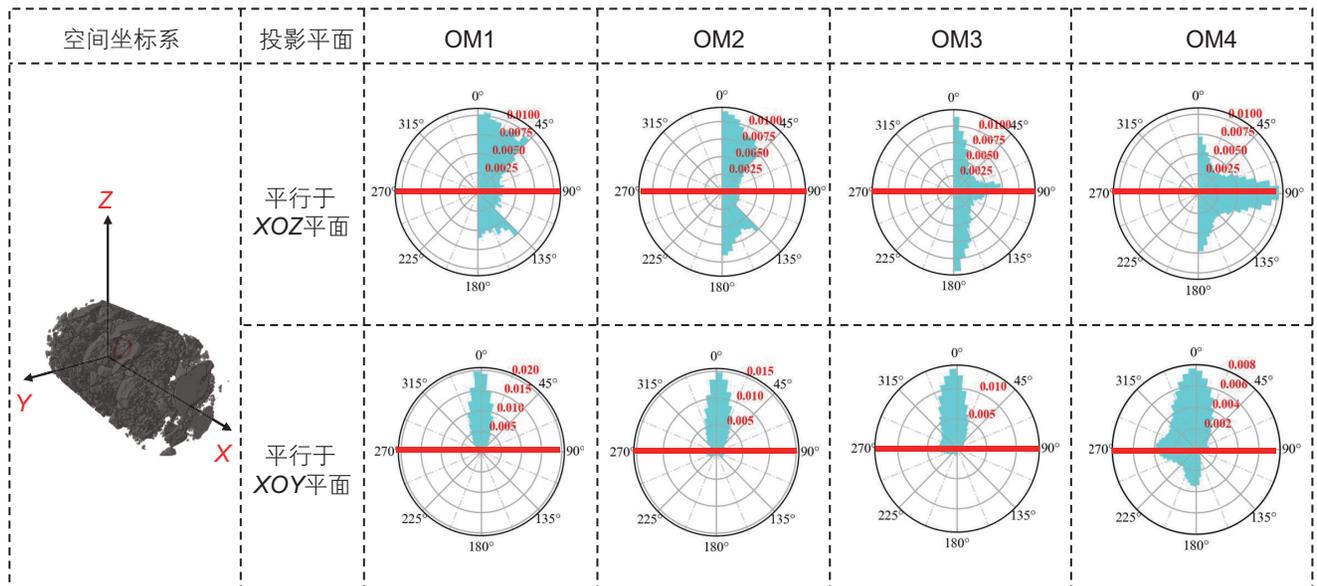


图 12 4 种有机质含量油页岩样品裂缝方向玫瑰图

Fig. 12 Rose diagram of fracture directions of oil shale samples with four organic matter contents

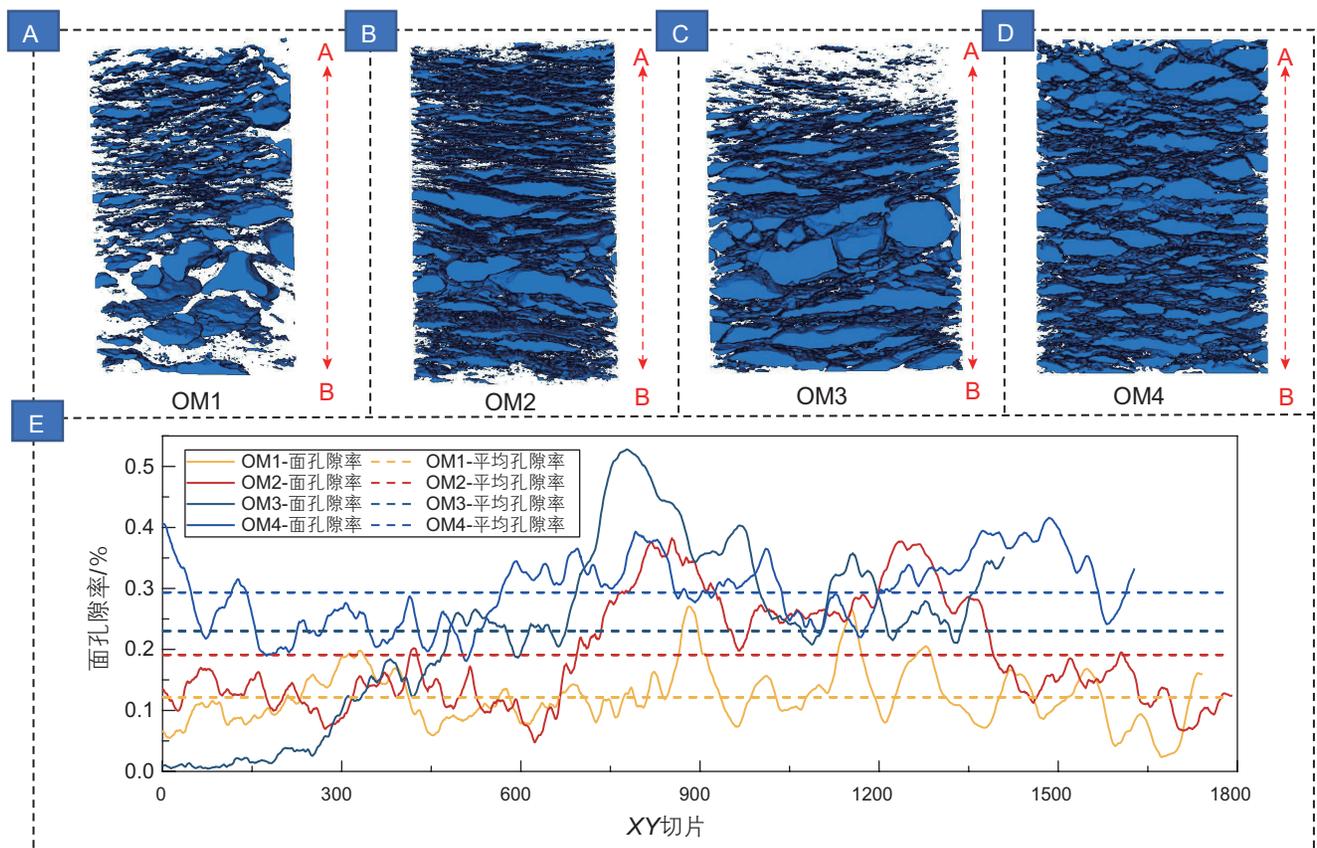


图 13 4 种有机质含量条件下样品从 A 至 B 面孔隙率分布

Fig. 13 Porosity distribution of samples from A to B at four organic matter content conditions

条件下样品孔隙率计算结果, 4种样品平均孔隙度分别为12.1%、19.1%、23.0%、29.3%, 表明在同一热解温度条件下, 热解后油页岩样品孔隙度随着有机质含量的升高而增大, 主要原因为随着样品中有机质含量的增多, 样品热解后所产生的孔隙就越多, 样品中孔隙所占比例也越大。

### 3 结论

本文基于数字岩心重构技术与Python编程相结合的方式, 提出了三维数字岩心裂缝及孔隙结构精细处理新方法, 并利用开源油页岩CT数据, 开展了数字岩心孔隙结构分析, 验证了三维数字岩心裂缝及孔隙结构精细表征方法的准确性及可行性, 主要结论如下:

(1) 本文所提出的三维数字岩心裂缝及孔隙结构精细处理方法在准确计算CT扫描样品孔隙度及分形维数等多种孔隙结构物性参数的基础上, 创新性的结合等位精细化算法提取裂缝中面数据开展裂缝宽度及裂缝方向的计算, 可实现对样品裂缝网络宽度分布进行三维可视化及方向分布的准确统计, 表明采用本方法可

以实现CT数据精细表征的目的。

(2) 热解温度对油页岩样品热解后孔隙物性参数变化具有重要作用。由于本文所选用样品热解温度均大于390℃, 因此随着热解温度的继续升高, 油页岩样品中孔隙度及裂缝宽度等参数虽然仍呈现出增大趋势, 但变化幅度较小, 且热解产生的裂缝形态基本不变, 表明当热解进行到一定程度后, 温度继续升高对岩石孔隙结构影响较小。

(3) 不同有机质含量油页岩样品热解后孔隙存在明显差异, 当有机质含量较低时热解产生的孔隙多为平行于层理面的狭长型裂缝, 随着有机质含量的升高, 有机质间相互连接, 热解后产生的裂缝部分区域呈现块状空隙特征。相同热解温度条件下油页岩样品热解后孔隙度主要受样品有机质含量的影响, 随着样品有机质含量的升高, 热解后油页岩样品最终孔隙度也随之升高, 但样品热解后分形维数分布与样品有机质含量未表现出正相关变化趋势, 表明除有机质含量外, 样品中有机质初始分布对热解后样品裂缝参数也具有重要影响。

### 参考文献

- [1] 高阳. 我国页岩气产业发展分析[R]. 北京: 国土资源部油气资源战略研究中心, 2015. [GAO Y. Analysis on the development of my country's shale gas industry[R]. Beijing: Oil and Gas Resources Strategy Research Center of the Ministry of Land and Resources, 2015.]
- [2] 全国石油天然气资源勘查开采通报[R]. 北京: 自然资源部, 2020. [National petroleum and natural gas resources exploration and exploitation bulletin[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2020.]
- [3] 徐兴倩, 刘剑, 屈新, 等. 热解过程中油页岩弹性模量变化规律[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(3): 110-114. [XU X Q, LIU J, QU X, et al. Variation rules of elastic modulus of oil shale during pyrolysis[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(3): 110-114.]
- [4] 徐金泽, 陈掌星, 周德胜, 等. 油页岩原位转化热解反应特征研究综述[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 220-226. [XU J Z, CHEN Z X, ZHOU D S, et al. Review on the characteristics of pyrolysis during in-situ conversion of oil shale[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2021, 43(5): 220-226.]
- [5] GU J, DENG S, SUN Y, et al. Pyrolysis behavior and pyrolysate characteristics of Huadian oil shale kerogen catalyzed by nickel-modified montmorillonite[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2024, 11(3).
- [6] 耿毅德, 梁卫国, 刘剑, 等. 高温及三轴应力条件下抚顺油页岩渗透规律试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(3): 272-278. [GENG Y D, LIANG W G, LIU J, et al. Experimental study on the law with permeability of Fushun oil shale under high temperature and triaxial stresses[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(3): 272-278.]
- [7] 刘志军, 杨栋, 胡耀青, 等. 油页岩原位热解孔隙结构演化的低温氮吸附分析[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(5): 737-742. [LIU Z J, YANG D, HU Y Q, et al. Low temperature nitrogen adsorption analysis of porestructure evolution in in-situ pyrolysis of oil shale[J]. Journal of XI'AN University of Science and Technology, 2018, 38(5): 737-742.]
- [8] SAIF T, LIN Q, SINGH K, et al. Dynamic imaging of oil shale pyrolysis using synchrotron X-ray microtomography[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(13): 6799-6807.
- [9] SAIF T, LIN Q, BIJELJIC B, et al. Microstructural imaging and characterization of oil shale before and after pyrolysis[J]. Fuel, 2017, 197: 562-574.
- [10] 刘志军, 杨栋, 邵继喜, 等. 基于低场核磁共振的抚顺油页岩孔隙连通性演化研究[J]. 波谱学杂志, 2019, 36(3): 309-318. [LIU Z J, YANG D, SHAO J X, et al. Evolution of pore connectivity in the Fushun oil shale by low-field nuclear magnetic resonance spectroscopy]

- copy[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2019, 36(3): 309–318.]
- [11] LIU G, LIU R, DU J, et al. Study on pore structure and fractal characterization during thermal evolution of oil shale experiments[J]. ACS omega, 2022, 7(15): 12922–12936.
- [12] TANG H, ZHAO Y, KANG Z, et al. Investigation on the fracture-pore evolution and percolation characteristics of oil shale under different temperatures[J]. Energies, 2022, 15(10): 3572.
- [13] 何强, 李凤霞, 史爱萍, 等. 基于三维CT重构的油页岩复杂水力裂缝网络分形表征[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5): 116–123. [HE Q, LI F X, SHI A P, et al. Fractal characterization of complex hydraulic fracture networks of oil shale via 3D CT reconstruction[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 116–123.]
- [14] YANG B, WANG H Z, Wang B, et al. Digital quantification of fracture in full-scale rock using micro-CT images: A fracturing experiment with N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 107682.
- [15] BLUNT M J, BIJELJIC B, DONG H, et al. Pore-scale imaging and modelling[J]. Advances in Water resources, 2013, 51: 197–216.
- [16] 苟启洋, 徐尚, 郝芳, 等. 纳米CT页岩孔隙结构表征方法——以JY-1井为例[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1253–1261. [GOU Q Y, XU S, HAO F, et al. Characterization method of shale pore structure based on nano CT: A case study of Well JY-1[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(11): 1253–1261.]
- [17] 刘志辉. 基于CT扫描技术的裂缝精细评价研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019. [LIU Z H. Fine evaluation of fractures based on CT scanning technology[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.]
- [18] 赵建鹏, 崔利凯, 陈惠, 等. 基于CT扫描数字岩心的岩石微观结构定量表征方法[J]. 现代地质, 2020, 34(6): 1205–1213. [ZHAO J P, CUI L K, CHEN H, et al. Quantitative characterization of rock microstructure of digital core based on CT scanning[J]. Geoscience, 2020, 34(6): 1205–1213.]
- [19] 张琦. 基于数字岩心的砂岩油藏微观剩余油研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016. [ZHANG Q. Study on micro distribution of residual oil in sandstone[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.]
- [20] 耿冲, 杨永飞, 高莹. 不同分辨率岩石CT图像的优化处理方法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(2): 1–4. [GENG C, YANG Y F, GAO Y. Optimization processing method of rock CT images with different resolutions[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(2): 1–4.]
- [21] BUADE A, COLL B, MOREL J M. A review of image denoising algorithms, with a new one[J]. Multiscale modeling & simulation, 2005, 4(2): 490–530.
- [22] 廖强. 致密砂岩数字岩心重构及渗流模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [LIAO Q. Digital core reconstruction and seepage simulation of tight sandstone[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.]
- [23] HILDEBRAND T, RUEGSEGGER P. A new method for the model - independent assessment of thickness in three - dimensional images[J]. Journal of microscopy, 1997, 185(1): 67–75.
- [24] ZHOU Q Y, PARK J, KOLTUN V. Open3D: A modern library for 3D data processing[J]. arXiv preprint arXiv: 1801.09847, 2018.

(编辑 杨雅露)