



## 高温作用下油页岩热解性、裂隙演化与渗流规律研究

丁鑫 高菲彤 崔景智 杜牧

### 引用本文：

丁鑫, 高菲彤, 崔景智, 等. 高温作用下油页岩热解性、裂隙演化与渗流规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 175–182.

DING Xin, GAO Feitong, CUI Jingzhi. Investigation on pyrolytic, fracture evolution and seepage of oil shale under high temperature[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 175–182.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1591>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 济源盆地上三叠统潭庄组油页岩段构造裂缝特征及主控因素分析

Characteristics and main factors controlling development of tectonic Fractures In Oil-Shale Member of Upper Triassic Tanzhuang Formation In Jiyuan Basin

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 206–215 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d8211030-076e-48f8-8de5-dd8fef632ff5>

##### 冻融循环下页岩孔裂隙和渗透率演化特征研究

Research on evolution characteristics of shale pore–fracture and permeability under freeze–thaw cycles

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 18–26 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.QNTK21-1135>

##### 考虑动态滑脱的页岩微裂隙表观渗透率演化机制

Evolution mechanism of shale microfracture apparent permeability considering dynamic slippage

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 129–138 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0090>

##### 高温处理后花岗岩应力作用下渗透特性演化研究

Study on evolution of granite permeability under stress after high temperature exposure

煤炭科学技术. 2021, 49(7): 45–50 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/67bb9ehf-c74a-4589-b37c-9afa33dde0ea>

##### 黔北地区页岩孔隙结构特征及水渗流演化规律研究

Study on characteristics of shale pore structure and water seepage evolution laws in northern Guizhou

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d3da5962-39d5-4a4b-ab2e-877ea3a390a6>

##### 高低温循环冲击作用下砂岩孔裂隙结构的演化特征

Evolutionary characteristics of sandstone pore–fracture structure under the action of high and low temperature cyclic impact

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 139–147 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1774>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

丁 鑫,高菲彤,崔景智,等.高温作用下油页岩热解性、裂隙演化与渗流规律研究[J].煤炭科学技术,2023,51(S2): 175-182.

DING Xin, GAO Feitong, CUI Jingzhi, et al. Investigation on pyrolytic, fracture evolution and seepage of oil shale under high temperature[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 175-182.

## 高温作用下油页岩热解性、裂隙演化与渗流规律研究

丁 鑫<sup>1,2</sup>,高菲彤<sup>1</sup>,崔景智<sup>1</sup>,杜 牧<sup>1</sup>

(1.辽宁工程技术大学 力学与工程学院,辽宁 阜新 123000;2.辽宁工程技术大学 辽宁省矿山环境与灾害力学重点实验室,辽宁 阜新 123000)

**摘要:**我国油页岩资源丰富,受热后其内部以干酪根为主的有机物转化为页岩油,有望弥补石油资源短缺的能源结构“短板”。探索受热解终温与高温作用时长影响下,油页岩内部孔隙、裂隙演化与流体运移规律对推进我国油页岩原位商业化开采具有重要的科学价值。以油页岩为研究对象,考虑多个热解终温和受热时长影响,运用物理试验方法并引入电子显微镜观测技术(SEM),开展油页岩试样热解及气体渗流试验,研究其热解性、孔裂隙演化规律及渗透率规律。结果表明:随着试样所受热解温度升高,油页岩内部以干酪根为主的有机物热解率呈指数函数增大,受热对油页岩内部结构重塑既存在有机物热解产生的孔洞,也有无机质非均匀变形形成的裂纹;二值化处理的电子扫描结果显示,原本呈离散性斑点状分布的热解区相互联通而深色面积不断扩大,热解与非热解区域物质的不均匀变化在二者交界区域产生裂隙,热解过程具有“小尺度非连续状裂隙—贯穿型分布裂隙—贯穿型主裂隙”的发育过程,提高了油页岩储层内部的裂隙率;受滑脱效应影响,热解后的油页岩试样渗透率随注气压力升高均呈指数函数规律降低,渗透率随着受热温度升高近似呈“S”型增大,其规律几乎与“巴里坤油页岩热解的TG曲线”具有反向变化趋势,在450~500℃范围内油页岩内部有机质具有最高的热解效率且有效渗透能力增强。

**关键词:**油页岩;高温热解;细观观测;孔裂隙演化;渗透率

**中图分类号:**TD315      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2023)S2-0175-08

### Investigation on pyrolytic, fracture evolution and seepage of oil shale under high temperature

DING Xin<sup>1,2</sup>, GAO Feitong<sup>1</sup>, CUI Jingzhi<sup>1</sup>, DU Mu<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Mining Environment and Disaster Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Oil shale resources are rich in China, and kerogen-dominated organic matter in the oil shale is transformed into shale oil after heating, which is expected to make up the “short board” of China’s energy structure. It is of great scientific value to exploring the evolution of pores, fractures and the law of fluid migration in oil shale under the influence of pyrolysis final temperature and high temperature to promote the commercial development of it in-situ exploitation in China. In this paper, the influence of multiple pyrolysis final temperature and heating duration was considered, the physical experiment method and the introduction of electron microscope observation technology (SEM) are used, the pyrolysis of oil shale samples and gas seepage tests were carried out, and the pyrolysis property, pore and fissure evolution and permeability were investigated. The results show that, with the increase of pyrolysis temperature, the pyrolysis rate of organic matter mainly kerogen increases exponentially, the remolding of the internal structure of oil shale heated include the pores produced by organic pyrolysis and cracks formed by non-uniform deformation of inorganic materials. The SEM results showed that the pyrolytic areas originally distributed in discrete spots are connected with each other, and the dark area keeps expanding. The uneven change of the materials in the pyrolytic and non-pyrolytic areas leads to cracks at the interface between them. The pyrolysis process had a development process

收稿日期:2022-09-30      责任编辑:黄小雨      DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1591

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52204218, 52274203);国家级大学生创新创业训练计划联合资助项目(202210147003)

作者简介:丁 鑫(1990—),男,辽宁凌源人,副教授,博士。E-mail: dingx9054@163.com

of “small-scale discontinuous fissure -- penetrating distributed fissure -- penetrating main fissure”, which improves the fracture rate in oil shale reservoir. Under the influence of Klinkenberg effect, the permeability of oil shale after pyrolysis decreases with the increase of gas injection pressure in an exponential function law, and it increases with the heating temperature in an approximate “S” shape, which is almost opposite to the TG curve of Balikun oil shale pyrolysis. Organic matter in oil shale has the highest pyrolysis efficiency and enhanced effective permeability in the range of 450–500 °C. The research results provide a certain experimental basis for improving the theory of oil shale pyrolysis mining.

**Key words:** oil shale; high-temperature pyrolysis; mesoscopic observation; fracture evolution; permeability

## 0 引言

我国油页岩资源约为 7 199.37 亿 t, 居世界第 2 位, 受热条件下其内部干酪根成分发生化学反应转化为页岩油, 提炼制取煤油、汽油、柴油等产物有望弥补我国石油资源短缺的能源结构“短板”<sup>[1]</sup>。油页岩受热后固体结构中形成的油气产物运移通道直接控制着储层的产出效率, 积极探索受热解终温与高温作用时长影响下, 油页岩内部孔隙、裂隙演化与流体运移规律对推进我国油页岩原位开采商业化发展具有重要的科学价值。

随着油页岩资源日益受到各国的广泛关注, 许多学者对油页岩受热后内部孔裂隙结构演化规律开展了试验与理论探索工作。康志勤<sup>[2]</sup>、孟巧荣<sup>[3]</sup>、GENG<sup>[4]</sup>、RABBANI<sup>[5]</sup>等利用高精度 CT 分析, 加热过程油页岩内部热破裂的裂缝孕育发展规律, 提出有机质热解得的膨胀压力是裂缝发育关键; 韩向新等<sup>[6]</sup>发现油页岩燃烧过程中孔隙表面粗糙度决定了孔隙比表面积的大小; SUN 等<sup>[7]</sup>通过 N<sub>2</sub> 等温吸附测量, 将油页岩热解过程孔隙结构形成分为 3 个温度阶段; SAIF 等<sup>[8-11]</sup>发现热解后孔隙率分布会随着含油率变化而极端不均匀; YANG 等<sup>[12]</sup>使用压汞试验发现油页岩平均孔径、孔隙率和总孔体积均随着温度升高而显著增大, 最高达初始孔隙率的 8.3 倍; 董付科等<sup>[13]</sup>试验获得油页岩的渗透率变化阈值温度在 350~400 °C; 杨栋等<sup>[14-15]</sup>发现油页岩渗透系数与体积应力、孔隙压关系服从指数规律变化; 赵丽梅<sup>[16]</sup>、耿毅德<sup>[17]</sup>均发现干馏后油页岩的渗透率随终温升高在 400 °C 前后呈先增后降的趋势, 而赵静<sup>[18]</sup>、李强<sup>[19]</sup>认为热解过程油页岩渗透率随温度升高呈阶段性变化, 孔隙压力对渗透率的影响主要体现在高温阶段。

国内学者针对油页岩热解过程中内部裂隙发育、渗流规律研究对推动油页岩高效开采具有重要作用, 但目前对油页岩热解后裂隙演化过程与流体运移能力间的关系仍需要深入探索, 以掌握其定量化关系。基于此, 笔者以油页岩为研究对象, 运用物理试验方

法, 并引入电子显微镜观测技术(SEM), 开展多温度与作用时长影响下的油页岩试样热解及气体渗流试验, 研究其在温度和受热时长影响下的裂隙与渗流演化规律, 以期为完善油页岩热解开采理论提供试验基础。

## 1 试样制备与试验方案

以某矿煤炭开采伴生的油页岩作为研究对象, 采样深度 330 m, 样品工业分析和元素分析结果见表 1。在现场原位选取油页岩块体用保鲜膜密封后运输至实验室, 切割成  $\phi 20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  的圆柱试样并编号, 如图 1 所示。用磨砂纸进行手工打磨保证上下端面平整度误差在  $\pm 0.02 \text{ mm}$  内, 为防止样品内部所含微量天然水分对试验产生影响, 先将试样置于烘干箱中, 保持箱内温度 105 °C 烘干 24 h, 随后测量各试样质量、体积并编号。

表 1 油页岩试样工业分析与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of oilshale samples

工业分析/%					元素分析/%				
$M_{\text{ad}}$	$V_{\text{ad}}$	$A_{\text{ad}}$	$FC_{\text{ad}}$	$C_{\text{ad}}$	$H_{\text{ad}}$	$N_{\text{ad}}$	$S_{\text{ad}}$	$O_{\text{ad}}$	
2.25	21.13	73.82	2.80	14.71	2.36	1.02	0.46	5.11	

注: ad为空气干燥基。



图 1 切割、打磨后的油页岩试样  
Fig.1 Oil shale sample after cutting and grinding

对处理后的标准油页岩试样开展相关试验, 试验内容与方案如下。

### 1.1 油页岩热解试验

根据文献 [2,5] 的研究结论, 文中参照油页岩热解温度区间设置试验方案, 实验时对油页岩试样热

解设定6个温度: 250、300、350、400、450、500 °C, 以及在各温度下的3种加热时长: 1、2、4 h。分别将切割好的油页岩试样随机分为5组进行不同温度热解试验, 同时在每组的6块试样中以2块为一子试验组, 开展热解温度、作用时长影响的热解试验。

选择高精度数控马弗炉, 该设备温度误差为:  $\pm 2$  °C, 为使试样不因温度升高体积不均匀膨胀而破裂影响试验效果, 用铜皮包裹提供初始应力并置于坩埚中进行加热, 如图2所示。分别在加热前和冷却后对各试样称重, 获得热解前后的质量变化。

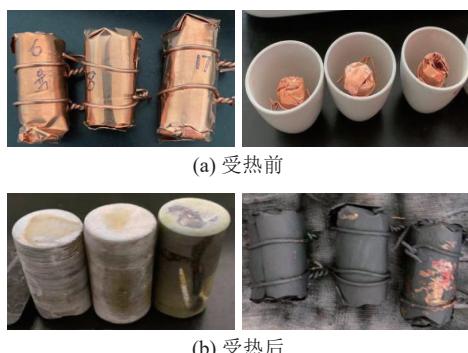


图2 热解前后油页岩试样

Fig.2 Oil shale sample before and after pyrolysis

## 1.2 油页岩孔隙细观观测试验

热解试验结束后, 分别选取各子试验组中的1个试样和未加热对照组试样, 运用非金属超声检测分析仪测试试样整体裂隙性发育情况, 随后置于QUANTA-250型扫描电子显微镜下, 选取试样多个位置观测局部孔裂隙情况并对比, 电镜放大倍数分别为10 000×、5 000×、2 500×、1 000×、500×、100×, 设备如图3所示。

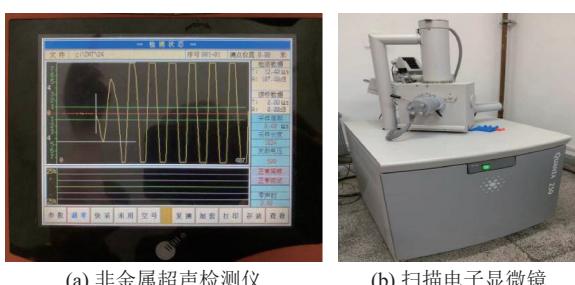


图3 测试装备

Fig.3 Testing equipment

## 1.3 热解后油页岩气相介质渗流试验

热解试验结束后, 选择各子试验组中的另1个试样及未热解试样, 置于自主研发的恒温岩石渗透率测试系统, 通过水泵加载保持压力为10 MPa净水压受载状态, 温度保持为80 °C(其目的是排除加压

过程水温过低导致裂隙闭合), 运用气体脉冲法测量温度和热解时长影响下油页岩渗透率演化规律, 试验气体介质为N<sub>2</sub>, 其脉冲压力分别为2、4、6、8 MPa, 试验装置如图4所示, 相应的渗透率计算公式如式(1):

$$k = \frac{\varphi_a c \mu_g L^2}{\vartheta_1^2} \quad (1)$$

$$F_R = 1 - \frac{(p_{c0} - p_c)(1 + \lambda)}{p_{c0} - p_{s0}} \quad (2)$$

式中:  $\varphi_a$  为油页岩内渗流气体吸附于基质表面引起的孔隙率增加量, cm<sup>3</sup>/s;  $\mu_g$  为气体动力黏度, (N·s)/m<sup>2</sup>;  $L$  为试样长度, cm;  $s$  为  $\ln(F_R)$  对时间  $t$  的拟合斜率;  $F_R$  为剩余气体与总气体之比, 如式(2);  $c$  为气体压缩性系数;  $\vartheta_1$  为方程的第一根:  $\tan \theta = \lambda \theta$ ,  $\lambda$  为压力腔体积与孔隙体积之比;  $p_c$  为压力衰减量, MPa;  $p_{c0}$  为压力腔中的初始压力, MPa;  $p_{s0}$  为试样中的初始压力, MPa。

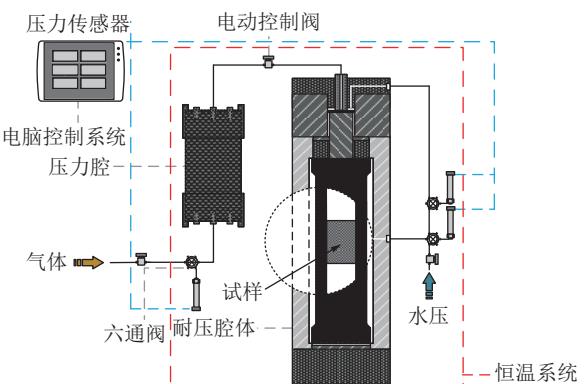


图4 恒温岩石渗透率测试系统

Fig.4 Oil shale sample before and after pyrolysis

## 2 油页岩热解试验结果分析

### 2.1 高温作用下油页岩质量变化规律

分别将多温度与温度作用时长下的油页岩质量变化及体积变化进行统计, 其质量变化率和随加热时间增长各温度下的热解增长率如图5中散点和拟合曲线所示。

试验结果表明, 随着试样所受热解温度升高, 油页岩内部干酪根热解率呈指数函数增加(图5中平均值及拟合曲线), 即热解温度越高, 单位时间内热解率越大, 当温度超过350 °C后热解率增长量逐渐增大, 特别是500 °C时热解率增长了近3倍。为进一步确定油页岩热解效率, 将受热时长分3个时间段: 0~1 h、1~2 h和2~4 h, 同时将第2、3阶段的热解量与前一阶段作比, 则获得了加热时长影响

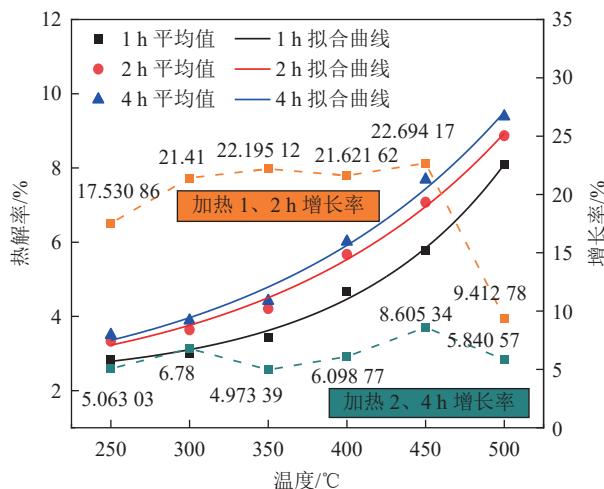


图 5 多温度和加热时长影响的油页岩热解结果

Fig.5 Results of oil shale pyrolysis affected by multi temperature and heating time

热解量增长率(图 5 中虚线),总体而言,加热 1~2 h 热解量约占总量 20%,2~4 h 热解量约占总量 8%,这表明油页岩中的 65% 以上的干酪根在 1 h 内就已发生热解;同时两条增长率曲线均呈“先缓慢升高后陡然降低”的趋势,转化临界温度为 450 °C,说明在加热至临界温度前,油页岩中相当部分的干酪根热解会在第 2、第 3 甚至更长时间内才发生,其热解率依赖于加热时长;而当加热超越临界温度,第 1 阶段热解量接近总量的 85%,由此认为 450~500 °C 为试验所用试样的最佳热解温度区间,且具有最佳的热解效率。

## 2.2 高温作用下油页岩孔隙演化规律

运用非金属超声探测仪分别对各试样裂隙性进

行监测,其测试原理为超声波在相同长度试样内传播时间越长,试样不均匀性越高即裂隙越多,相应测试结果平均值如图 6 所示。

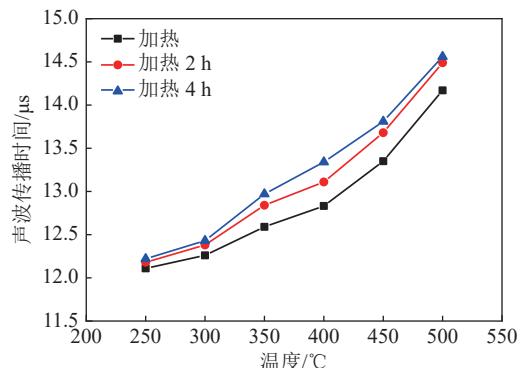


图 6 超声波在热解后油页岩试样中传播时间

Fig.6 Movement time of ultrasonic wave in oil shale sample after pyrolysis

图 6 中结果表明,随着油页岩热解温度逐渐升高(加热前测得试样的平均传播时间为 11.89 μs),超声波在试样中的传播时间逐渐增加且增长趋势与图 5 中热解率具有相同变化规律,当试样中所含的孔裂隙越多,超声波会在其内部的固(固相基质)、气(裂隙中的空气)介质中交替传播,则具有更长的传播时间,由此可进一步得出,随着热解时间和温度升高,油页岩具有更大的热解效率而在内部形成更多裂隙,也是对前节试验结果的验证。

图 7 为受热前油页岩放大 100×表面情况和热解后试样在不同放大尺度下的典型观测结果(该结果为 350 °C 加热、1 h 后的试样观测所得)。

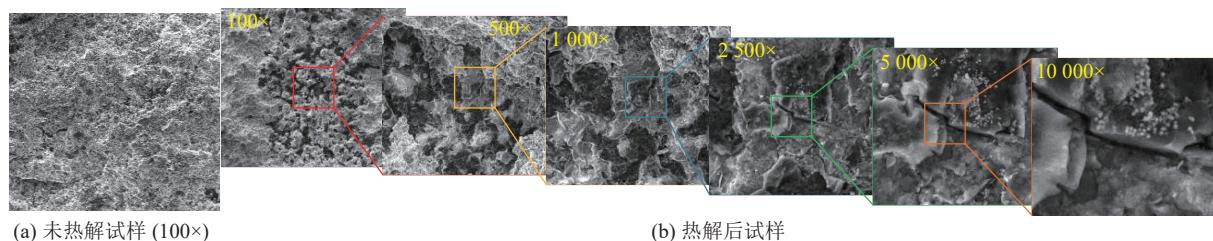


图 7 典型油页岩热解前、后电镜多尺度观测结果

Fig.7 Typical multiscale observation results of electron microscope before and after pyrolysis of oil shale

由图 7a 中试验结果可以看出,油页岩受热前表面光滑且极少有明显裂纹出现,表明该试样均质性良好;在温度 350 °C 的环境中热解后,100×尺度观测下,试样表面出现了大量黑色热解区域,该区域具有非连续散斑状矿物缺失孔洞,进一步放大后发现颜色深浅度不一且层片状参差分布,这说明作为主要热解物的干酪根在油页岩中分布不均匀,热解后的

孔洞区域也离散性产生,此外还有受热引起化学反应产生散点分布的矿物质结晶;与此同时,在其内部还有明显的小尺度裂纹产生,认为油页岩受热内部有机组分热解的同时,无机矿物基质颗粒间还因不均匀受热膨胀与冷却收缩而相对错动形成内力,导致其形成了不同尺度的裂纹,而为流态产物运移提供了通道。综上可知,受热对油页岩内部结构重塑

既有机物热解产生的孔洞,也有无机质非均匀变形形成的裂纹。

为研究温度和受热时长影响下的矿物质热解和孔裂隙发育情况,选择6种热解终温加热1 h后的试样观测其表面变化情况,对各扫描结果设定同一灰度值并进行二值化处理,统计、计算热解区域像素与总像素比值,则获得热解区域面积占比及其增长率,分析结果如图8所示。

随加热温度不断升高,在图8a—图8f的扫描图中,原本呈离散性斑点状分布的热解区相互联通而

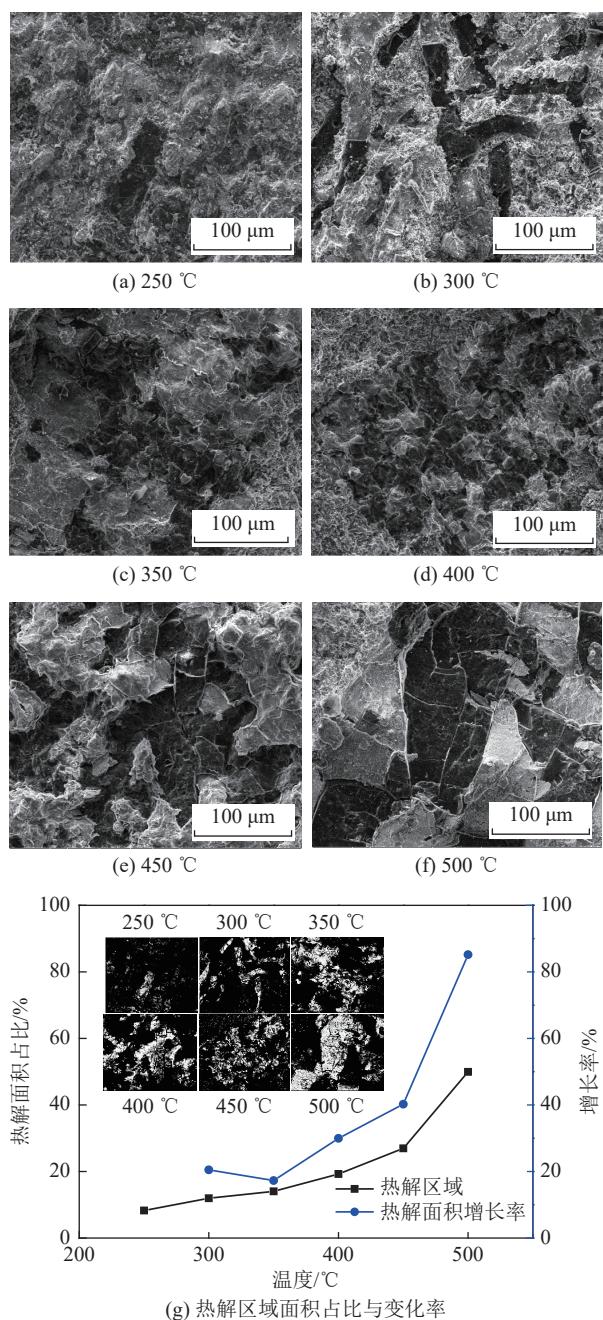


图8 不同热解终温下油页岩表面观测及热解面积增长率

Fig.8 Oil shale surface observation and pyrolysis area growth rate affected by final temperature

深色面积不断扩大,直至温度达400~500 °C热解区呈片状分布,进一步说明该温度具有较高的热解率;根据图8g中处理获得的热解区域面积占比和增长率结果所示,在较低温度下(250 °C),热解区域面积仅占总面积8.28%,而随着温度升高增长率曲线呈斜率增加的升高趋势,在高温下(500 °C),热解面积达总面积的1/2;与此同时,随着温度升高,热解面积增长率也逐渐增加,在400~500 °C时,增长率普遍在40%以上,进一步表明在适宜的温度下,油页岩具有更高的热解效率。同时,在深色热解区以及深、浅色交界区域具有明显的多条裂隙将各区域分割,并且在热解区内部还有多个尺度不同的孔洞出现,认为受温度影响,热解与非热解区域物质的不均匀变化必然会在二者交界区域产生裂隙,这为流态产物提供了良好的迁移通道。

分别对450 °C下受热1、2、4 h的试样表面黑色热解区域进一步放大至2 500×,获得了试样在多个受热时长下的细观裂隙变化情况,如图9所示。

如图9中结果所示,受热1小时后,主要热解区域主要为小尺度非连续状裂隙和小孔洞分布,裂隙

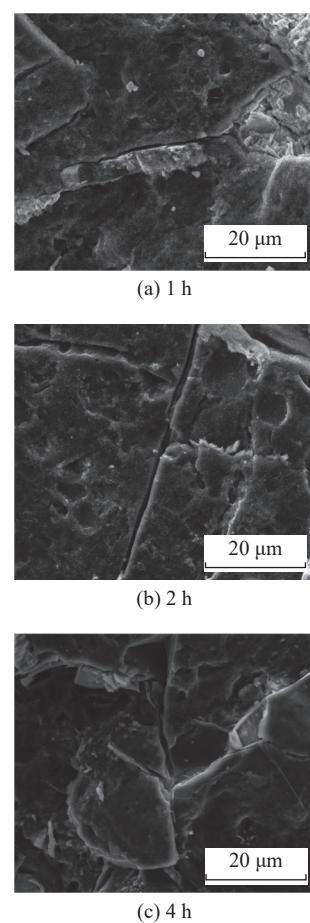


图9 不同加热时间下油页岩表面观测结果

Fig.9 Oil shale surface under different heating time

大小约为  $1\text{ }\mu\text{m}$ 、孔洞尺寸普遍小于  $4\text{ }\mu\text{m}$ ；当受热  $2\text{ h}$  后，裂隙呈贯穿型分布且裂隙张开度明显增加，非破裂区分布的孔洞尺度较前一阶段明扩大，裂隙大小约为  $1\text{~}2\text{ }\mu\text{m}$ 、孔洞尺寸在  $3\text{~}10\text{ }\mu\text{m}$  分布；受热至  $4\text{ h}$  时，贯穿型主裂隙张开尺度继续增加并沿侧向进一步扩展，在电镜观测下的裂纹条数和尺度、非破裂区孔洞的尺度与数量均显著提升，裂隙大小在  $1\text{~}3\text{ }\mu\text{m}$  间分布，孔洞尺寸在  $3\text{~}10\text{ }\mu\text{m}$  并出现了矿物质崩解现象。综合以上观测结果，认为延长热解时间提高了油页岩储层内部的裂隙率并增加了流体产物运移通道数量与尺度。

### 2.3 高温作用下油页岩渗透率演化规律

为确定油页岩受热终温和时长影响后的储层流体运移能力，分别将热解后及未受热的试样放置于夹持器中，运用气相脉冲法获得了相应的渗透率演化规律，试验结果如图 10、图 11 所示。

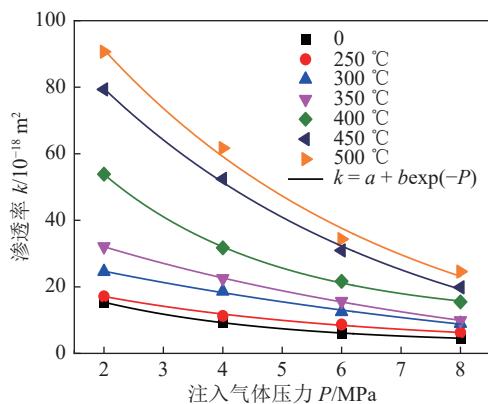


图 10 热解终温与时长影响的油页岩渗透率演化规律

Fig.10 Permeability of oil shale after pyrolysis affected by final temperature and pyrolysis duration

试验结果表明，随着注气压力升高，具有不同终热温度热解后的油页岩试样渗透率随注气压力升高均呈指数函数规律降低，这主要是由于滑脱效应的存在使得所用油页岩孔隙中运移的气体分子流速在孔道中心和孔道壁处无明显差别，而随孔隙内气体压力升高，滑脱效应逐渐消失、气体流速降低，则就导致了随孔隙压力升高而渗透率逐渐降低的现象，由此也说明在发生热解过程中油页岩储层的孔隙尺度短时间内不会发生较大变化，仍为低渗透储层。

由图 11a 中结果可知，在不同热解终温作用下，所用油页岩试样随着受热温度增加其渗透率逐渐升高，总体近似呈“S”型增长。在较低温度下( $0\text{~}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ )，渗透率增长量较小，当热解终温在  $250\text{~}450\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，油页岩渗透率呈增长量变大的升高趋势，特别是在  $400\text{~}450\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内，渗透率变化量最大；

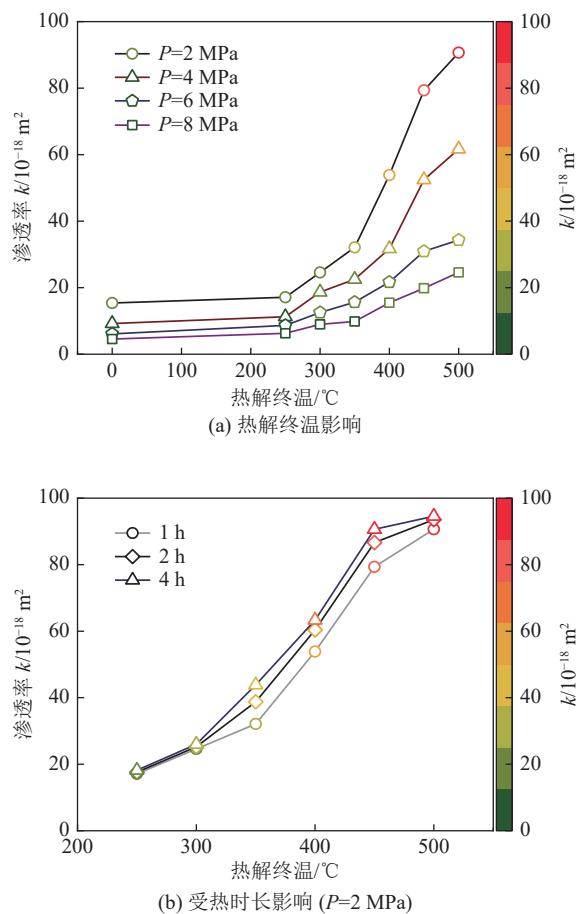


图 11 热解终温与时长影响的油页岩渗透率演化规律

Fig.11 Permeability of oil shale after pyrolysis affected by final temperature and pyrolysis duration

随着热解终温由  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  继续升高至  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其渗透率增长量呈变小趋势。由于试验方案设定原因，热解终温大于  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  的油页岩试样渗透率变化情况进行研究，但文献 [20] 所获试验结果与本文试验终温在  $0\text{~}500\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内的渗透率结果相一致，由此验证了所获规律的准确性，同时还可推断当终温超过  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  后，也会与文献 [20] 中相同其渗透率逐渐趋于同一值。与此同时，根据图 11b 中结果可知，油页岩在不同高温作用时间影响下的渗透率变化规律相一致，并表现出在  $350\text{~}500\text{ }^{\circ}\text{C}$  终温区间内渗透率随温度升高而增加的趋势，但在各温度下的变化量相对较小。

结合前文中所得规律，试验所用油页岩试样渗透率随温度的变化规律主要是源于油页岩内部有机质被热解所致，受高温作用以干酪根为主的有机质热解为流态产物并逐渐运移至试样外部并在原位形成缺陷，因而当被热解的有机质量越大其内部的孔隙量越多、尺度增大，则为气体(试验结果为气测渗透率)提供了更多的运移通道，宏观上为渗透率增

加;此外,有机质热解是以相当的温度为前提,则文中试样在450~500℃范围内具有最大的渗透率增长率,同时发现试验中所获变化规律几乎与“巴里坤油页岩热解的TG曲线”<sup>[21]</sup>具有反向变化趋势,如图12所示,均在450~500℃范围内有较大的变化量,这进一步表明,在最佳热解温度下,油页岩内部有机质具有最高的热解效率和有效的渗透能力增强。

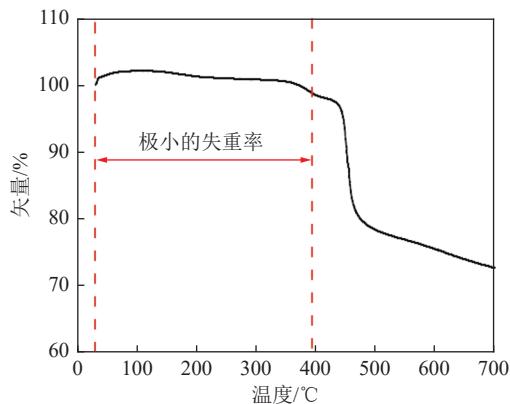


图12 巴里坤油页岩热解的TG曲线<sup>[21]</sup>

Fig.12 TG curve for pyrolysis of Balikun oil shale<sup>[21]</sup>

### 3 结 论

1)随着试样所受热解温度升高,油页岩内部以干酪根为主的有机物热解率呈指数函数增加。当温度超过350℃后热解率增长量逐渐增大,特别是500℃时热解率增长近3倍,450~500℃为试验所用试样的最佳热解温度区间和解效率,第1阶段热解量接近总量的85%。

2)受热对油页岩内部结构重塑既有有机物热解产生的孔洞,也有无机质非均匀变形形成的裂纹。二值化处理后的电子扫描结果表明,随加热温度不断升高,原本呈离散性斑点状分布的热解区相互联通而深色面积不断扩大,直至温度达500℃热解区呈片状分布且热解面积增长率在40%以上。

3)受温度影响,热解与非热解区域物质的不均匀变化必然会在二者交界区域产生裂隙,随受热时间延长,热解过程具有“小尺度非连续状裂隙-贯穿型分布裂隙-贯穿型主裂隙”的发育过程,提高了油页岩储层内部的裂隙率,增加了流体产物运移通道数量与尺度。

4)受滑脱效应影响,热解后的油页岩试样渗透率随注气压力升高均呈指数函数规律降低,且储层孔隙尺度短时间内不会发生较大变化,仍为低渗透储层。渗透率随着受热温度近似呈“S”型增长,其规律几乎与“巴里坤油页岩热解的TG曲线”具有反向

变化趋势,均在450~500℃范围内有较大变化量,此时油页岩内部有机质具有最高的热解效率并有效渗透能力增强。

### 参考文献(References):

- [1] 中国煤炭网.十八大以来我国能源发展状况[Z].[2016-3-21].[http://nyj.guizhou.gov.cn/xwzx/xydt/201704/t20170426\\_27673639.html](http://nyj.guizhou.gov.cn/xwzx/xydt/201704/t20170426_27673639.html).
- [2] 康志勤,赵阳升,孟巧荣,等.油页岩热破裂规律显微CT实验研究[J].地球物理学报,2009,52(3):842-848  
KANG Zhiqin, ZHAO Yangsheng, MENG Qiaorong, et al. Micro-CT experimental research of oil shale thermal cracking laws[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(3): 842-848.
- [3] 孟巧荣,康志勤,赵阳升,等.油页岩热破裂及起裂机制试验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(4):95-98,104.  
MENG Qiaorong, KANG Zhiqin, ZHAO Yangsheng, et al. Experiment of cracking and crack initiation mechanism of oil shale[J]. Journal of China University of Petroleum, 2010, 34(4): 95-98, 104.
- [4] GENG Y, LIANG W, LIU J, et al. Evolution of pore and fracture structure of oil shale under high temperature and high pressure[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(10): 7b01071.
- [5] RABBANI A, BAYCHEV T G, AYATOLLAHI S, et al. Evolution of pore-scale morphology of oil shale during pyrolysis: a quantitative analysis[J]. Transport in Porous Media, 2017: 1-20.
- [6] 韩向新,姜秀民,崔志刚,等.油页岩颗粒孔隙结构在燃烧过程中变化[J].中国电机工程学报,2007,27(2):26-30.  
HAN Xiangxin, JIANG Xumin, CUI Zhigang, et al. Evolution pore structure of oil shale particles during combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 26-30.
- [7] SUN L, TUO J, ZHANG M, et al. Formation and development of the pore structure in Chang 7 member oil-shale from Ordos Basin during organic matter evolution induced by hydrous pyrolysis[J]. Fuel, 2015, 158(1): 549-557.
- [8] SAIF T, LIN Qingyang, BRANKO B, et al. Microstructural imaging and characterization of oil shale before and after pyrolysis[J]. Fuel, 2017, 197: 562-574.
- [9] 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: 6799-6807.
- [10] SAIF T, LIN Qingyang, ALAN R, et al. Multi-scale multi-dimensional microstructure imaging of oil shale pyrolysis using X-ray micro-tomography, automated ultra-high resolution SEM, MAPS Mineralogy and FIB-SEM[J]. Applied Energy, 202: 628-647.
- [11] BAI F, SUN Y, LIU Y, et al. Evaluation of the porous structure of Huadian oil shale during pyrolysis using multiple approaches[J]. Fuel, 2017, 187: 1-8.
- [12] YANG L, YANG D, ZHAO J, et al. Changes of oil shale pore structure and permeability at different temperatures[J]. Oil Shale, 2016, 33(2): 101-110.
- [13] 董付科,杨 栋,冯子军.高温三轴应力下吉木萨尔油页岩渗透

率演化规律[J]. 煤炭技术, 2017, 36(8): 165–166.

DONG Fuke, YANG Dong, FENG Zijun. Thermal deformation characteristics of Jimusar oil shale in Xinjiang under high temperature and triaxial stresses[J]. Coal Engineering, 2017, 36(8): 165–166.

[14] 杨栋, 薛晋霞, 康志勤, 等. 抚顺油页岩干馏渗透实验研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(2): 23–25.

YANG Dong, XUE Jinxia, KANG Zhiqin, et al. Study on the seepage characteristics in fractured network porous media[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Nature Science Edition), 2007, 22(2): 23–25.

[15] 刘中华, 杨栋, 薛晋霞, 等. 干馏后油页岩渗透规律的实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(4): 414–416.

LIU Zhonghua, YANG Dong, XUE Jinxia, et al. Experimental study on seepage law of distilled oil shale[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(4): 414–416.

[16] 赵丽梅. 油页岩原位热解与煤地下气化耦合过程研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.

ZHAO Limei. Properties of oil shale in-situ pyrolysis and coupling process of underground coal gasification[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2013.

[17] 耿毅德. 油页岩地下原位压裂—热解物理力学特性试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.

GENG Yide. Experimental study on the physical and mechanical properties of oil shale during in-situ fracturing and pyrolysis [D].

Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.

[18] 赵静. 高温及三维应力下油页岩微观特征及力学特性试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.

ZHAO Jing. Experimental study on the microscopic characteristics and mechanical property of oil shale under high temperature& three-dimensional stress[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.

[19] 李强. 油页岩原位热裂解温度场数值模拟及实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.

LI Qiang. Simulation of temperature field experiment of in-situ oil shale pyrolysis[D]. Changchun: Jilin University, 2012.

[20] 张红鸽, 赵阳升, 杨栋, 等. 温度对油页岩热解-力学-渗流特性的影响研究[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(6): 945–952.

ZHANG Hongge, ZHAO Yangsheng, YANG Dong, et al. Study on the effect of temperature on the pyrolysis-mechanics-seepage characteristics of oil shale[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(6): 945–952.

[21] 王磊, 杨栋, 康志勤. 高温水蒸汽作用后油页岩渗透特性及各向异性演化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2286–2295.

WANG Lei, YANG Dong, KANG Zhiqin. Experimental study on permeability characteristics and anisotropy evolution of oil shale after high-temperature water vapor treatment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2286–2295.