

热解褐煤的渗透性与微细观结构

李亚军, 孟巧荣, 陈 涛, 林 峰

(太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 为了研究褐煤热解过程中, 热流固耦合作用下的微细观孔裂隙结构对渗透性的影响, 利用太原理工大学 μ CT225kVFCB型高精度显微CT试验系统和自主研制的高温加热气氛炉, 对低温热解褐煤进行实时CT扫描, 结合三维可视化重构软件AVIZO对褐煤的微细观结构进行研究分析。通过对褐煤的有效孔裂隙的提取分析, 从Kozeny-Carman渗透率估算方程与达西定律2种角度研究了无应力状态下的褐煤的渗透性和孔裂隙结构随温度的演化过程, 结果表明: ①从室温~600℃, 演化过程可以分为3个阶段: 第1阶段, 常温~300℃, 煤体热破裂, 导致大量孔裂隙产生, 渗透率快速增加, 发生量级变化; 第2阶段为300~500℃, 煤基质热解, 新的热解产物改变了流体通道, 使渗透率缓慢下降; 第3阶段为500~600℃, 渗透率又开始增加, 渗透率进入下一个快速增加阶段; ②300℃时, 褐煤的渗透率达到了 $15.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, 煤体基本完全渗透; ③热流固耦合作用下, 褐煤热解渗透率不仅取决于孔裂隙微细观结构, 而且与流体在煤基质中的流动特性有关, 随温度的增加, 流体的传热传质特性对渗透率的影响越来越明显; ④基于孔裂隙结构参数的Kozeny-Carman方程估算的渗透率和绝对渗透率相差不大, 基本可以反应渗透率随温度的变化关系。基于真实孔裂隙结构上的渗透率估算可以大大减少高温高压渗流实验强度, 为简化和验证岩体渗透试验提供一种方法。

关键词: 热解褐煤; 渗透率; CT; 三维裂隙网络

中图分类号: TQ530

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2023)04-1707-08

Permeability and microstructure of pyrolysis lignite

LI Yajun, MENG Qiaorong, CHEN Tao, LIN Feng

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to study the influence of micro pore fissure structure on permeability under the thermal-fluid-solid coupling during lignite pyrolysis, real-time CT scanning of lignite during low-temperature pyrolysis was carried out by using the μ CT225kVFCB high-precision micro-CT test system of Taiyuan University of Technology, combined with the self-developed high-temperature atmosphere furnace. The micro-structure of lignite was studied and analyzed with AVIZO software. Through the extraction and analysis of the effective pore and fissure of lignite, the evolution process of the permeability of lignite under non-stress condition with temperature was studied from the perspectives of Kozeny-Carman permeability estimation equation and Darcy's law. The results show that: ① From room temperature to 600℃, the evolution process can be divided into three stages: the first stage, at room temperature to 300℃, thermal cracking occurs in the coal body, resulting in the generation of a large number of pores and fissures, and the permeability increases by orders of magnitude. The second stage is at 300 to 500℃, the coal matrix is pyrolysed and the new pyrolysis products change the fluid

收稿日期: 2022-04-30 修回日期: 2022-07-29 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0633

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51974191); 山西省省筹资助回国留学人员资助项目(2021-059)

作者简介: 李亚军(1998—), 男, 山西运城人, 硕士研究生。E-mail: 891071944@qq.com

通讯作者: 孟巧荣(1974—), 女, 山西朔州人, 副教授, 硕士生导师。E-mail: mq_zxf@163.com

引用格式: 李亚军, 孟巧荣, 陈涛, 等. 热解褐煤的渗透性与微细观结构[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1707-1714.

LI Yajun, MENG Qiaorong, CHEN Tao, et al. Permeability and microstructure of pyrolysis lignite[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1707-1714.



移动阅读

channels, causing a slow decrease in permeability. The third stage is at 500 to 600 °C, permeability begins to increase again, permeability enters the next rapid increase stage. ② At 300 °C, the permeability of lignite reaches $15.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, and the coal body is basically completely penetrated. ③ Under the thermal-fluid-solid coupling, the pyrolysis permeability of lignite depends not only on the micro-structure of pores and fissures, but also on the flow characteristics of fluid in the coal matrix. With the increase of temperature, the influence of heat and mass transfer characteristics of fluid on the permeability becomes more and more obvious. ④ The permeability estimated by Kozeny-Carman equation based on pore fissure structure parameters is similar to the absolute permeability, which can basically reflect the relationship between permeability and temperature. The permeability estimation based on the real pore fissure structure can greatly reduce the difficulty of seepage experiment at high temperature and pressure, and provide a method for simplifying and verifying the seepage experiment of rock mass.

Key words: pyrolysis lignite; permeability; CT; three-dimensional fissure network

褐煤已探明储量占我国煤炭储量的 13%, 是重要的煤炭资源之一^[1]。然而, 由于其含水量高、灰分高、发热量低、易于风化和自燃的缺陷, 导致对褐煤的直接使用效率较低^[2]。通过褐煤热解提质改性来提高褐煤的利用率已是业界的共识。褐煤热解是在惰性气氛下持续加热至高温, 褐煤经过脱水脱硫解聚缩聚等复杂的物理化学反应后提高煤质的过程。但传统的高温沉降炉热解工艺产生的 CO_2 、 SO_2 等废弃物太多, 对环境危害太大。而褐煤的地下气化工艺由于工作面前端的燃烧区可控性差、受水文地质条件影响较大、回采率和气体燃烧值一直没有得到工业上的大规模推广利用。针对褐煤开发利用现状结合褐煤自身特点, 赵阳升院士团队提出了褐煤的原位注热开采理论, 将有益气体和半焦焦油引出地面, CO_2 进行就地封存, 这一理论不仅使褐煤改性提质, 同时减少了碳排放, 兼顾了褐煤的开发利用和环境的绿色发展。笔者所在团队已经做了大量的试验研究^[3-7], 在常温~600 °C 的低温热解过程中, 大部分挥发分和灰分已经脱除, 不稳定的桥键和侧链也已断裂, 煤质达到了焦煤及以上。褐煤的原位开采最关键的技术是增渗、核心理论问题是热流固耦合问题。渗透性不仅制约热解气体的解析能力, 而且关系着传热传质效率, 是影响褐煤原位热解产气量和产气速率的关键因素。煤岩的孔裂隙结构不仅是气体的储存空间, 又是流体的渗流通道, 所以, 研究褐煤热解过程中, 孔裂隙结构与渗透性的演化规律对褐煤的原位热解具有重要的意义。

目前, 国内外学者对褐煤的结构研究方法有很多种, 如: 压汞法、液氮吸附法、CT 扫描、电镜扫描、核磁共振等^[8]。液氮法只能检测一些微孔, 而注汞容易出现煤的弹性压缩效应问题, 传统方法在表征孔隙裂隙的原位性质及其完整性方面存在局限性。而先进的 CT 技术可以无损表征煤岩的孔裂隙^[9]。孟巧荣等^[10]通过对褐煤进行 CT 扫描发现 300 °C 左右时, 热

破裂最剧烈, 裂隙的数量、所占的面积增长很快, 之后其增长速度变慢。冯子军等^[11]通过 CT 扫描发现 300 °C 前新生裂隙不仅起始于煤中的硬质颗粒之间, 更普遍的起始于有机质中; 300 °C 后孔隙裂隙的形成主要起始于有机质内。王刚、付裕等^[12-13]基于 CT 扫描的数据, 结合三维可视化软件 AVIZO 中内置数学算法, 提出了煤的孔裂隙结构定量表征的方法, 并建立了煤的三维孔裂隙结构模型和具有拓扑结构的孔隙网络简化模型, 并对孔裂隙的微观参数进行了分析。宋党育等^[14]通过结合 CT 与扫描电镜发现, DTM 灰度阈值分割可准确识别煤种孔裂隙。LI 等^[15]采用扫描电子显微镜与 CT 扫描结合, 对烟煤与无烟煤的孔裂隙进行提取分析, 发现无烟煤样品的孔隙-裂缝网络比烟煤样品更有利于煤层气的储存和流动能力。LIU 等^[16]利用核磁共振技术研究了气体热解褐煤中孔隙裂隙的产生, 发现褐煤的总连通性、孔隙率和渗透率在 25~250 °C 间增加, 然后在 350 °C 时降低, 在 450 °C 时再次增加。YANG 等^[17]通过对胜利褐煤提质改性发现, 热改质后褐煤的化学和物理结构特征发生了显著变化, 温度是影响提质褐煤性能的主要因素。450~550 °C 等温改质应是胜利褐煤在热改质后气化过程中使用的最佳操作条件。上述研究表明通过 CT 扫描可以准确、全面反映孔裂隙结构, 但是, 对同一热解煤样在做渗透实验时在线进行 CT 扫面的文章还未见报道。究其原因主要是因为煤的密度较低, 渗流实验装置都是钢制的, 在 CT 扫描后煤的分辨率极低; 另一方面, 煤热解渗透实验耗时较长, CT 机的 X 射线不能长时间处于发射状态。

为了研究孔隙结构对渗透性的影响, 笔者通过高精度的显微 CT 设备对低温热解条件下褐煤进行不同温度下的扫描, 利用 AVIZO 进行三维重构, 并进行有效裂隙的提取与结构分析, 通过达西公式与 Kozeny-Carman 公式探究了渗透率随温度的演变规律, 提出一

种基于真实孔裂隙结构上的渗透率估算方法,为简化和验证岩体渗透试验提供一种方法。

1 实验设备与过程

1.1 煤样制备

实验所需煤样来自内蒙古平庄的褐煤,经砂线切割机切割出 $\phi 7\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的圆柱体试件,再通过砂纸对试件进行磨平处理。

1.2 实验设备

CT 扫描系统采用太原理工大学 $\mu\text{CT}225\text{kVFCB}$ 型高精度显微 CT 试验系统并配以自主研制配套的高温加热气氛炉,该配套设备可以使试件不用移动,实现同一位置在不同热解条件下的 CT 扫描,避免了频繁取放试件带来的扫描误差。热解 CT 扫描系统如图 1 所示。

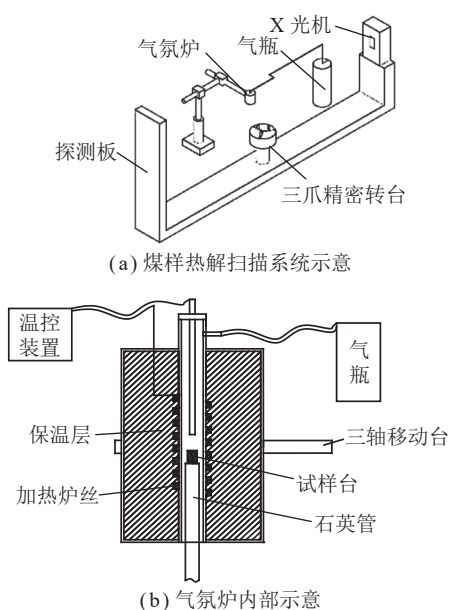


图 1 煤样热解系统示意

Fig.1 Schematic diagram of coal sample pyrolysis system

CT 试验系统主要由 X 光机、三爪精密转台、探测板和配套的软件系统组成。试件夹持在三爪卡盘上,转台旋转 1 周时,X 光机持续发射锥束 X 射线,穿透试件后照射到探测器上,形成 DR 图片,经过层析重

建后得到试件的二维和三维结构。该 CT 扫描系统的放大倍数为 $1 \sim 400$ 倍,试样尺寸为 $\phi 1 \sim 50\text{ mm}$,可分辨 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙和 $1\text{ }\mu\text{m}$ 宽度的裂缝。

高温加热气氛炉由加热炉丝、保温层、石英管、氮气瓶等组成。将试件插到中空石英管中,固定到三爪转台上,加热和冷却时,持续通入氮气。加热炉丝为 300 W ,升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,温度的控制和检测由温控器和热电偶执行。

1.3 实验过程

(1) 将打磨好的试样插入内径为 7 mm 的石英管中,再将石英管固定到 CT 扫描系统的三爪精密转台上。

(2) 调整三爪精密转台与 X 射线源的距离,确定放大倍数以及扫描参数。参数设置结束后对其进行常温扫描。具体参数为:扫描电流 $75\text{ }\mu\text{A}$,电压 60 kV ,帧频 1 fps ,帧数 2 ,放大倍数为 40 ,最小可分辨 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的孔裂隙。

(3) 移动高温加热气氛炉,使试样处于高温加热气氛炉中央位置,并对此位置进行标记,以便后续温度点气氛炉移动时能够到达同一位置;之后向炉中注入氮气,保证热解环境,并以 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温速率进行加热。达到设定的温度 ($100\text{ }^\circ\text{C}$) 后,恒温 1 h 以便试样充分热解,最后冷却到室温,按照常温扫描设置的参数继续进行 CT 扫描。

(4) 重复步骤 (3),依次完成其余设定温度 (200 、 300 、 400 、 500 、 $600\text{ }^\circ\text{C}$) 热解—保温—冷却—扫描。其中在加热、保温、冷却过程中一直持续向气氛炉中充氮气,确保热解环境。

2 煤样数据处理

2.1 二维图像处理

由 CT 扫描获得的二维切片,灰度为 $0 \sim 255$,灰度越小,所代表的物质密度越小。由于孔裂隙与周围煤基质的灰度相差不大,因此,更加有效、精确的分割方法尤为重要。本文采用偏微分方程 (PDE) 图像分割法对 CT 扫描二维切片图进行分割,得到的分割图像如图 2 所示,其中黑色代表煤基质,白色代表孔裂隙。

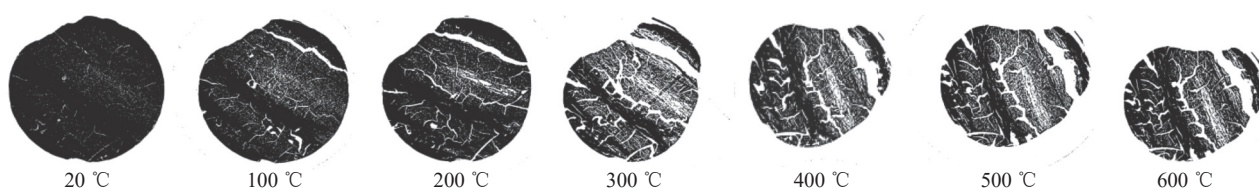


图 2 煤样 PDE 阈值分割

Fig.2 PDE threshold segmentation diagram of coal sample

该分割方法具有运算快、精度高的优点,可有效解决煤岩图像灰度不均一、弱边缘等问题^[18]。

2.2 三维煤基质与孔裂隙的重构

选取标记点上下的 200 层二维切片 (对应被扫描试件的中间部位) 进行三维重构。利用 MATLAB 对 CT 图像进行处理后,再在三维可视化软件 AVIZO 中

进行图像重构,建立煤岩三维模型,并分别提取煤基质和煤的孔裂隙三维模型,如图 3 所示。图 3(a) 为煤基质的三维重构,灰色代表煤基质,白色和黑色代表孔裂隙,白色表示从该视图方向看,可透光的孔裂隙,黑色代表不可透光的孔裂隙。图 3(b) 为孔裂隙的三维重构,白色代表煤基质,蓝色和黑色代表孔裂隙。

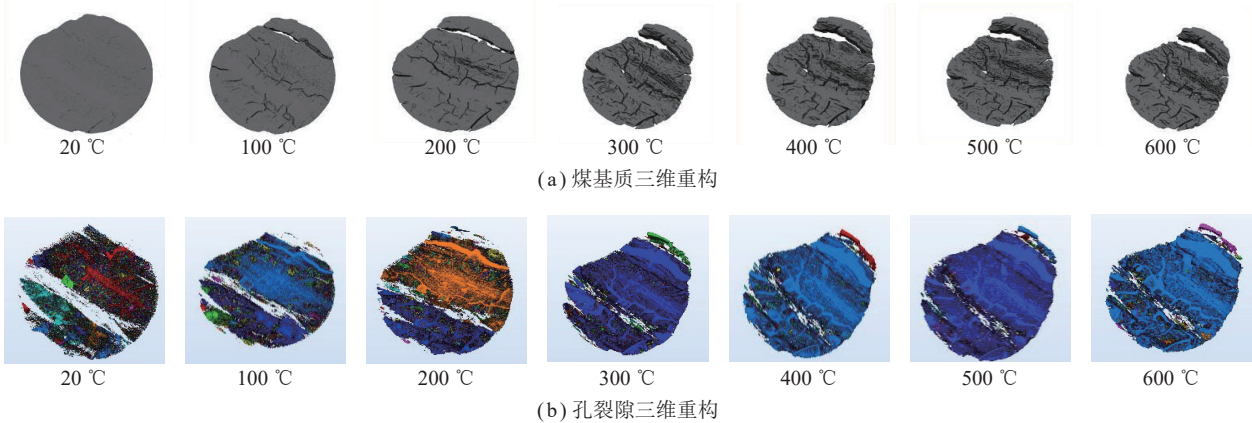


图 3 三维重构
Fig.3 3D reconstruction

2.3 有效孔裂隙提取

根据孔裂隙对渗透性的作用,可以将煤中的孔裂隙分为有效孔裂隙与无效孔裂隙。当孔裂隙的表面与其他孔裂隙有接触点时,代表相互连通,计算为有效孔裂隙。无效孔裂隙为孤立的孔裂隙或盲孔,对渗

流是无效的,与有效孔裂隙无接触点。图 4 为褐煤的有效孔裂隙重构,是在图 3(b) 的基础上,将孤立的孔裂隙去除得到的。温度低于 200 °C 时,煤样中有 2 条大裂隙,温度高于 200 °C 后,2 条大裂隙相互联通,形成一条贯穿整个试样的裂隙。

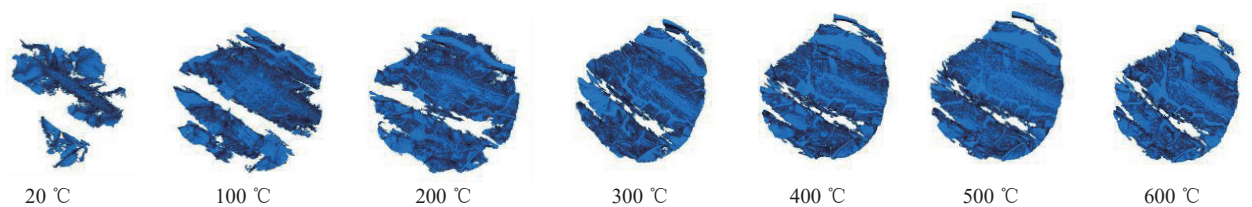


图 4 有效裂隙重构
Fig.4 Effective fracture reconstruction diagram

3 三维有效孔裂隙的参数分析

3.1 孔隙率分析

通过对不同温度下的三维孔裂隙结构研究分析,可以得到孔裂隙及有效孔裂隙的结构参数,不同温度下孔裂隙体积见表 1。

从表 1 可以看出,常温时,无效孔裂隙体积占总孔裂隙体积的一半以上,大部分的孔隙均为孤立的封闭孔,对渗透不起作用,随着温度的升高,100~300 °C 时,有效裂隙增加,有效体积占比也增加,到 300 °C 时达到 99%,说明此时大裂隙已完全贯通,只有小孔隙是孤立的。600 °C 时,缩聚反应以及部分焦油导致某

些大裂隙重新堵塞,有效占比减小。

表 1 不同温度下孔裂隙体积			
Table 1 Pore fissure volume under different temperature			
温度/ °C	总的孔裂隙体积/ mm ³	有效的孔裂隙体积/ mm ³	有效体积占比/ %
20	1.11	0.54	48
100	4.25	3.29	77
200	6.08	4.67	77
300	8.40	8.31	99
400	8.58	8.48	99
500	8.87	8.81	99
600	7.62	6.77	89

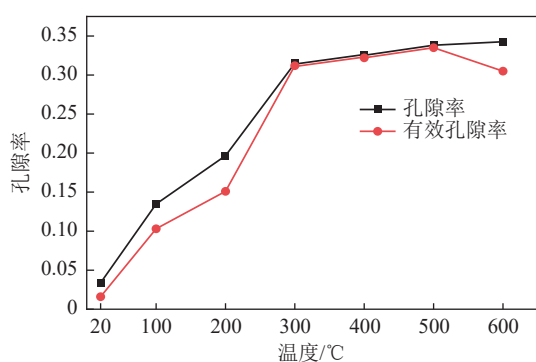


图5 孔隙率与有效孔隙率随温度的变化

Fig.5 Changes of porosity and effective porosity with temperature

图5为孔隙率与有效孔隙率随温度的变化曲线。从图5可以看出,在褐煤从常温~600℃的热解过程中,孔隙率的变化可以分为2个阶段:快速增加阶段与缓慢增加阶段。常温~300℃,快速增加阶段,温度每增加100℃,孔隙率增加10%左右,主要是由热破裂引起的。从常温~100℃,褐煤孔裂隙率主要来源于2个方面:一是褐煤中大量游离水析出形成空洞,另一个是煤样加热后,气固膨胀系数不同,发生热破裂,使原生裂隙扩展并产生新生裂隙。新生裂隙主要产生于软硬煤质交界处,该处裂隙的体积经计算,占孔裂隙总体积的4.5%;温度升高到200℃时,褐煤中的气体以及结合水析出,该阶段的孔隙率增长相较于前一个温度点相对较慢;温度升高到300℃时,此时褐煤热解开始,煤中的有机质和无机岩成分受热发生化学反应,煤气溢出,气固耦合过程中,由于热破裂而产生大量的裂隙,使孔隙率大幅增加,孔隙率达到31.51%,此时煤中的孔裂隙已基本联通,达到完全渗透的状态;300~600℃,缓慢增加阶段,孔隙率仅增加了2.7%。该阶段,煤体发生解聚缩聚等化学反应,产生大量热解气体,煤体骨架逐渐变轻,形成大量孔隙,但由于前期已形成畅通的裂隙通道,所以此阶段气体的溢出对裂隙的增加起的作用不大,所以总的孔隙率增加缓慢。

有效孔隙率随温度的变化趋势与孔隙率随温度的变化趋势在常温~500℃间一致,到600℃时,有效孔隙率减小,其原因是缩聚反应产生的焦油和半焦使部分微裂隙堵塞,有效占比减小。

3.2 有效孔裂隙的分析

3.2.1 有效孔裂隙的比面分析

比面定义为有效孔裂隙的表面积/总的试样体积。比面越大,代表单位体积的表面积越大,由于煤岩是孔隙裂隙双重介质,它的比面主要取决于孔隙和微裂

隙,孔隙越多,比面越大,图6为有效孔裂隙的比面随温度的变化。

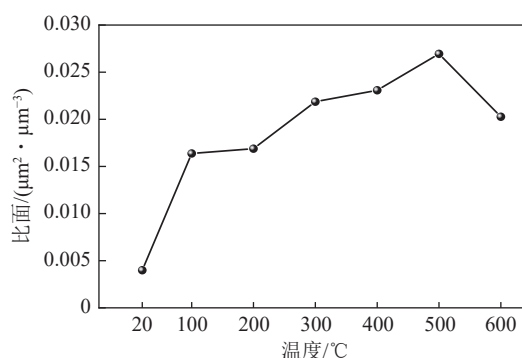


图6 有效孔裂隙的比面随温度的变化

Fig.6 Variation of specific surface of connecting crack with temperature

从图6可以看出,从常温到100℃,比面增长最快,是因为自由水的析出导致大量微孔和微裂隙的产生,使比面快速增加。温度从200℃升高到300℃时,热解开始,大量微裂隙的产生使比面增加。温度在400~500℃时,解聚反应产生大量热解气体,从而产生较大的孔裂隙,导致比面增加;温度升高到600℃时,褐煤发生缩聚反应,产生半焦和焦油,堵塞了部分孔裂隙,比面减小。

3.2.2 有效孔裂隙的分形维数分析

分形维数可以反映孔隙结构在煤体内部的分布状况及复杂程度,其值越高表明孔裂隙结构越复杂。孔裂隙表面积分形模型采用Menger海绵体模型。通过计算可以得到表面积分形维数随温度的演化过程如图7所示。从图7可以看出,从常温~100℃,分形维数增加较多,褐煤孔裂隙结构变化较大;100~200℃,分形维数几乎不变,说明该阶段裂隙结构基本不变;200~500℃间,分形维数增加缓慢,该阶段褐煤开始热解,煤基质表面开始分解,结构不规则度增加,

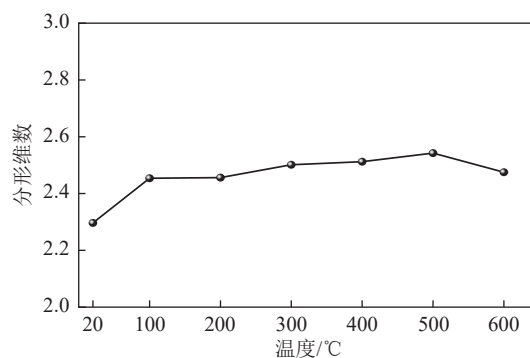


图7 有效裂隙的分形维数随温度的变化

Fig.7 Variation of fractal dimension of interconnected fractures with temperature

分形维数变大; 500~600 ℃, 分形维数减小。

分形维数随温度的变化规律与比面的演化规律总体趋势是一样的, 因为孔裂隙的表面积主要来源于孔隙, 特别是微孔, 孔隙越多表面积越大, 而孔隙越多, 煤样的分形维数也越大。

4 渗透率的分析

4.1 渗透率的估算

渗透率的大小与煤样孔隙率、渗透方向上孔裂隙的形状、大小等因素相关^[19-20]。目前比较流行的渗透率估算公式为 Kozeny-Carman 半经验公式。它是一种表示岩石渗透率 (K) 与孔隙度 (ψ) 和岩石比面 (S) 之间关系的公式为

$$K = \frac{\psi^3}{CS^2} \quad (1)$$

其中, C 为 KC 常数, 最初推导时 KC 常数取值为 5; ψ 为岩石的孔隙度; S 为岩石比面, $\mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ 。随着研究的进行, 此公式不断被改进, 分形维数的出现, 因其能更好的描述孔裂隙的结构特征, 使 KC 方程估算更加准确^[21-22]。基于第 3 节计算出的有效孔裂隙的孔隙度、比面、分形维数 (D), 令 $C=2D$, 得到新的 KC 方程为

$$K = \frac{\psi^3}{2DS^2} \quad (2)$$

式中, D 为有效孔裂隙的表面积分形维数。

经计算得到渗透率的估算值见表 2。

表 2 渗透率估算值

Table 2 Permeability estimate

温度/℃	有效孔隙度/%	比面/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}^{-3}$)	分形维数	渗透率估算值/ 10^{-12}m^2
20	1.6	4.0	2.297	0.06
100	10.4	16.7	2.454	0.94
200	15.1	17.0	2.456	2.60
300	31.2	22.0	2.501	12.23
400	32.2	23.0	2.512	12.42
500	33.5	27.0	2.543	10.22
600	30.5	20.0	2.475	13.94

4.2 绝对渗透率的模拟

绝对渗透率为多孔材料传输单相流体能力的量度。它是材料的固有属性, 与任何外部条件无关。绝对渗透率应用达西公式 (式 (3)) 与斯托克斯方程 (式 (4)) 进行联合求解得到渗透率。

该模拟要求流体为不可压缩流体, 且该流体为牛顿流体。另一方面流体流动时达到稳定状态, 即流体

流动速度不随时间发生变化。

$$\frac{Q}{A} = -\frac{k\Delta P}{\mu L} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \\ \mu \nabla^2 \vec{v} - \vec{\nabla} P = \vec{0} \end{cases} \quad (4)$$

式中, Q 为多孔介质的整体流速, m^3/s ; A 为流体通过样品的横截面积, m^2 ; k 为绝对渗透率, m^2 ; μ 为动态黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ΔP 为样品上下截面的压力差, Pa ; L 为样品在流动方向上的长度, m ; $\vec{\nabla}$ 为发散算子, 也称散度算子; ∇^2 为梯度算子; $\vec{v}$ 为流体在样品中的流速, m/s ; ∇^2 为拉普拉斯算子。

由此可得到褐煤绝对渗透率随温度的变化规律见表 3。

表 3 不同温度下绝对渗透率

Table 3 Absolute permeability at different temperatures

温度/℃	渗透率模拟值/ 10^{-12}m^2
20	0.054
100	0.815
200	2.550
300	15.435
400	14.781
500	13.686
600	17.526

4.3 渗透率的对比分析

图 8 为渗透率估算值与绝对渗透率随温度的演化规律, 从图 8 可以看出, 2 者随温度的演化趋势一致。从常温至 300 ℃ 时, 渗透率增加了 200~300 倍, 渗透率从 $0.054 \times 10^{-12} \text{m}^2$ 增加至 $(12 \sim 16) \times 10^{-12} \text{m}^2$, 煤体基本达到完全渗透; 300~500 ℃ 时, 由于褐煤热解造成煤基质内部结构形态学变化, 由分形维数可以看出,

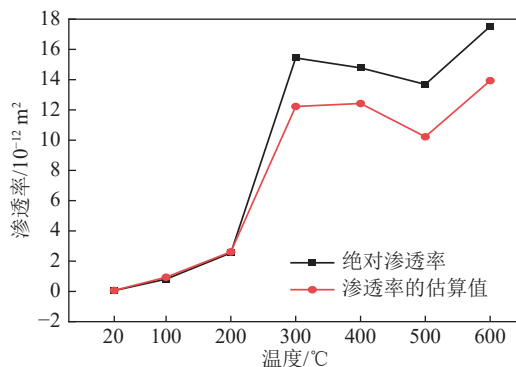


图 8 绝对渗透率与渗透率估算值随温度的演化关系

Fig.8 Evolution of absolute permeability and estimated permeability with temperature

该阶段的裂隙形状更为复杂, 相应的渗透率也减小了, 减小至 $13.68 \times 10^{-12} \text{ m}^2$; 到 600°C 时, 裂隙结构复杂度变小, 渗透率又开始增加, 甚至超过 300°C 时的最大值达到 $17.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, 渗透率进入下一个快速增加阶段。

随温度的增加, 渗透率的估算值与绝对渗透率的差值逐渐增大。当温度低于 300°C 时, 估算值基本等于绝对渗透率, 300°C 以后, 估算值比绝对渗透率小了 $(3 \sim 5) \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 。究其原因, 在估算时, 只考虑了孔裂隙结构对渗透率的影响, 而在热流固作用下, 渗流是一个三场相互作用的耦合过程, 在此过程中, 应考虑流体像 CH_4 、 CO_2 等的传热传质对渗透率的影响, 所以, 在利用 KC 方程进行岩体受热后的渗透率模拟估算时, 应考虑流体的热黏滞系数等流体属性以及流体与煤岩的热流固耦合作用, 在此基础上对 KC 方程做进一步的修正, 以满足在热力作用下不同流体经过不同岩体时渗透性估算需求。

5 有效裂隙的球棒模型

渗透性的大小还取决于有效孔裂隙的最小断面大小, 最小连通断面称为孔裂隙的吼道。利用 Skeleton-Aggressive 算法, 将每一条有效裂隙分割成若干小裂隙, 每个小裂隙按体积相等等效为一个球体, 小裂隙之间的连通通道等效为棒, 建立球棒模型, 分析吼道随温度的演化过程^[23-24], 棒的断面半径称为吼道半径。

图9为吼道半径的中位数随温度的变化。随温度的升高, 吼道半径在 300°C 以前持续增加, 从 $6.68 \mu\text{m}$ 增长至 $10.87 \mu\text{m}$, 增加 62%, $300 \sim 400^\circ\text{C}$ 略微减小, 400°C 以后又开始增加。从图9可以看出, 吼道等效半径随温度的变化趋势从一定程度上可以反映该煤岩的渗透性随温度的变化趋势, 所以吼道等效半径与煤岩渗透性具有很大的相关性。

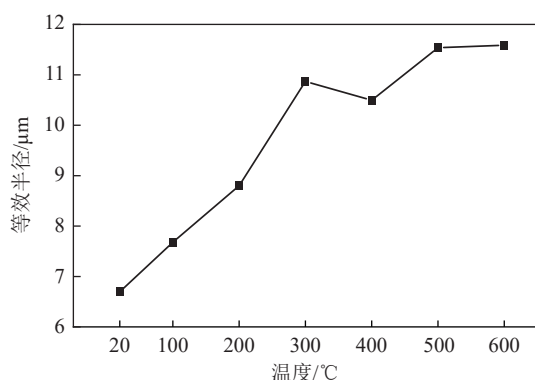


图9 吼道半径的中位数随温度的变化

Fig.9 Variation of median roar radius with temperature

6 结 论

(1) 褐煤随温度的演化过程可以分为3个阶段: 第1阶段, 常温 $\sim 300^\circ\text{C}$, 该温度段中由于水和气体的析出, 使煤体发生热破裂, 导致大量孔裂隙产生, 孔隙率增加, 比面和分形维数增加, 渗透率快速增加, 发生量级变化, 到 300°C 时, 煤体基本达到完全渗透; 第2阶段为 $300 \sim 500^\circ\text{C}$, 由于煤基质的热解主要产生的是孔隙, 新的热解产物改变了流体通道, 使渗透率缓慢下降; 第3阶段为 $500 \sim 600^\circ\text{C}$, 渗透率又开始增加, 渗透率进入下一个快速增加阶段。

(2) 300°C 时, 褐煤的渗透率达到了 $15.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 左右, 煤体基本完全渗透, 褐煤的下一个渗透率增加温度为 600°C , 但渗透率也只能提高 17%。所以, 从增渗角度考虑, 褐煤的低温热解温度点至少要超过 300°C , 最好达到 600°C 以上。

(3) 有效裂隙的吼道半径与煤样的渗透性具有一定的相关性。

参考文献(References):

- [1] 范涛, 初荣, 畅志兵. 蒙东褐煤热解技术工业应用进展[J]. 化工进展, 2021, 40(3): 1362-1370.
FAN Tao, CHU Mo, CHANG Zhibing. Industrial application progress of lignite pyrolysis technology in eastern Mongolia, China[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(3): 1362-1370.
- [2] LIU Peng, ZHANG Dexiang, WANG Lanlan, et al. The structure and pyrolysis product distribution of lignite from different sedimentary environment[J]. Applied Energy, 2016, 163: 254-262.
- [3] 冯子军. 褐煤原位注蒸汽开采油气的理论与试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012: 15-25.
FENG Zijun. The theory and experimental research of hydrocarbon resources extraction from in-situ lignite via injecting vapour [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012: 15-25.
- [4] 于伟东. 高温蒸汽压力热解褐煤变形与细观结构演化试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017: 10-20.
YU Weidong. Lignite deformation characteristics and its meso-structure evolution under high temperature steam with different pressures [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017: 10-20.
- [5] 孟巧荣. 热解条件下煤孔裂隙演化的显微CT实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011: 20-30.
MENG Qiaorong. The Micro-CT experimental research on the evolvement of pores and cracks of coal in pyrolysis [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011: 20-30.
- [6] 牛世伟. 褐煤高温渗透与细观特征的试验研究及原位注蒸汽开采油气数值模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2016: 40-50.
NIU Shiwei. Experimental investigation of the high-temperature permeability and microscopic characteristics of lignite and numerical simulation of the in-situ oil gas exploitation of lignite by steam injection [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016: 40-50.

- tion [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016: 40–50.
- [7] 赵阳升, 梁卫国, 冯子军, 等. 原位改性流体系采矿科学、技术与工程[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 25–35.
ZHAO Yangsheng, LIANG Weiguo, FENG Zijun, et al. Science, technology and engineering of in-situ modified mining by fluidization[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 25–35.
- [8] 王勇, 孟巧荣, 高力, 等. 热解无烟煤三维裂隙重构及定量表征研究[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(2): 211–218.
WANG Yong, MENG Qiaorong, GAO Li, et al. Research on reconstruction and quantitative characterization of three-dimensional cracks in pyrolysis anthracite[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(2): 211–218.
- [9] EHAB Moustafa Kamel Karim, GERARD Pierre, COLLIAT Jean-Baptiste, et al. Modelling stress-induced permeability alterations in sandstones using CT scan-based representations of the pore space morphology[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 150: 104998.
- [10] 孟巧荣, 赵阳升, 胡耀青, 等. 褐煤热破裂的显微CT实验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 855–860.
MENG Qiaorong, ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing, et al. Micro-CT experimental of the thermal cracking of brown coal[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 855–860.
- [11] 冯子军, 赵阳升. 煤的热解破裂过程——孔裂隙演化的显微CT细观特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 103–108.
FENG Zijun, ZHAO Yangsheng. Pyrolytic cracking in coal: Meso-characteristics of pore and fissure evolution observed by micro-CT[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 103–108.
- [12] 王刚, 沈俊男, 褚翔宇, 等. 基于CT三维重建的高阶煤孔裂隙结构综合表征和分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2074–2080.
WANG Gang, SHEN Junnan, CHU Xiangyu, et al. Characterization and analysis of pores and fissures of high-rank coal based on CT three-dimensional reconstruction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(8): 2074–2080.
- [13] 付裕, 陈新, 冯中亮. 基于CT扫描的煤岩裂隙特征及其对破坏形态的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 568–578.
FU Yu, CHEN Xin, FENG Zhongliang. Characteristics of coal-rock fractures based on CT scanning and its influence on failure modes[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 568–578.
- [14] 宋党育, 何凯凯, 吉小峰, 等. 基于CT扫描的煤中孔裂隙精细表征[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 41–49.
SONG Dangyu, HE Kaikai, JI Xiaofeng, et al. Fine characterization of pores and fractures in coal based on a CT scan[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(3): 41–49.
- [15] LI Zhenhao, LIU Dameng, CAI Yidong, et al. Multi-scale quantitative characterization of 3-D pore-fracture networks in bituminous and anthracite coals using FIB–SEM tomography and X-ray μ -CT– ScienceDirect[J]. *Fuel*, 2017, 209: 43–53.
- [16] LIU Weizhen, NIU Shiwei, TANG Haibo, et al. Pore structure evolution during lignite pyrolysis based on nuclear magnetic resonance[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 26: 101125.
- [17] YANG Xianjun, ZHANG Cheng, TAN Peng, et al. Properties of upgraded Shengli lignite and its behavior for gasification[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(1): 264–274.
- [18] 王勇. 基于PDE优化算法的热解无烟煤微细观结构研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021: 20–30.
WANG Yong. Research on microstructure of pyrolysis anthracite based on PDE optimization algorithm [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021: 20–30.
- [19] YIN Peijie, SONG Huihui, MA Hairui, et al. The modification of the Kozeny-Carman equation through the lattice Boltzmann simulation and experimental verification[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127738.
- [20] 李雄炎, 秦瑞宝, 曹景记, 等. 复杂储层连通孔隙度评价与渗透率定量计算方法[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(2): 377–385, 245.
LI Xiongyan, QIN Ruibao, CAO Jingji, et al. Method of connected porosity evaluation and quantitative permeability calculation for complex reservoirs[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(2): 377–385, 245.
- [21] 郑斌, 李菊花. 基于Kozeny-Carman方程的渗透率分形模型[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(1): 193–198.
ZHENG Bin, LI Juhua. A new fractal permeability model for porous media based on kozeny-carman equation[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(1): 193–198.
- [22] 房营光, 陈建, 谷任国, 等. 基于有效比表面积修正的Kozeny-Carman方程在黏土渗透中的适用性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2547–2554.
FANG Yingguang, CHEN Jian, GU Renguo, et al. Applicability of clay permeability based on modified Kozeny-Carman equation by effective specific surface area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2547–2554.
- [23] ZHOU Sandong, LIU Dameng, CAI Yidong, et al. 3D characterization and quantitative evaluation of pore-fracture networks of two Chinese coals using FIB–SEM tomography[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 174: 41–54.
- [24] 公维宽, 王伟强. CT三维重构煤体结构及瓦斯渗流数值模拟[J]. 煤矿安全, 2020, 51(11): 19–23.
GONG Weikuan, WANG Weiqiang. Three-dimensional reconstruction of coal structure and numerical simulation of gas seepage by CT[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(11): 19–23.