

于艳梅,胡耀青,梁卫国等.应用 CT 技术研究瘦煤在不同温度下孔隙变化特征.地球物理学报,2012,55(2):637-644,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.027.

Yu Y M, Hu Y Q, Liang W G, et al. Study on pore characteristics of lean coal at different temperature by CT technology. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(2):637-644,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.027.

## 应用 CT 技术研究瘦煤在不同温度下孔隙变化特征

于艳梅,胡耀青\*,梁卫国,孟巧荣,冯增朝

太原理工大学采矿工艺研究所,太原 030024

**摘 要** 应用  $\mu$ CT225kvFCB 型高精度( $\mu\text{m}$  级)CT 试验分析系统,对直径 1 mm 的瘦煤从 18 °C 到 600 °C 高温下的热破裂过程进行了显微 CT 观测和分析.发现了瘦煤的热破裂规律:300 °C 煤样中大量小的孔隙贯通成大的孔隙团,因此瘦煤的热破裂阈值在 300 °C 附近,从常温到 300 °C 煤样的孔隙率增加了 0.5 倍左右.研究了煤样在 100~600 °C 范围内热破裂孔隙分布的分形规律,研究发现:从 100 °C 到 600 °C,煤样的分形维数  $D$  随温度升高呈现先减小、后增加的趋势.孔隙的演化规律:由初始较规则的小孔隙变形,过渡到大量较规则、小孔隙贯通成不规则的大的孔隙团,之后孔隙团缩合减小趋于规则.分布初值的对数随温度升高呈现先降低后增加的趋势;从 18 °C 到 600 °C 孔隙数量的演化规律为先减小后增加.

**关键词** 瘦煤,高温,热破裂,孔隙,显微 CT,分形

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.027

中图分类号 P631

收稿日期 2010-12-17,2012-01-03 收修定稿

### Study on pore characteristics of lean coal at different temperature by CT technology

YU Yan-Mei, HU Yao-Qing\*, LIANG Wei-Guo, MENG Qiao-Rong, FENG Zeng-Chao

*Mining Technology Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*

**Abstract** To investigate the micro-pores development of coal under high temperature, experimental studies were performed with fine specimen of lean coal as small as 1 mm in diameter through a micro-CT system  $\mu$ CT225kVFCB. Through statistic analysis, some fundamental characteristics of pores development are discovered with temperature rising from 18 °C to 600 °C. It was demonstrated that the thermal cracking temperature threshold is 300 °C for lean coal. From room temperature to 300 °C the porosity of coal increased by 0.5 times. Fractal analysis demonstrates that, most of the original regular small pores become connected and gradually grow to irregular and larger pores as the effect of thermal expansion and cracking with temperature rising. Above 400 °C, the size of the pores becomes smaller again while the pore number increases with the complicated effect of pyrolysis of the coal. The study is significant for insight into the micro-structure development of coal under high temperature.

**Keywords** Lean coal, High temperature, Thermal cracking, Pore, Micro-CT, Fractal

## 1 引言

煤是一种复杂的多孔性固体<sup>[1]</sup>,煤的孔隙特征直接关系到煤对瓦斯的吸附性、解吸性以及瓦斯在煤层中的流动性等.煤体孔隙性的研究,对于认识煤中瓦斯的赋存、瓦斯在煤层中的运移具有重要意义.目前,在煤的孔隙特性研究中,较常见的研究方法有两种<sup>[2]</sup>,即用扫描电子显微镜观测煤表面孔隙的特征和用压汞法测定煤体孔隙大小.国内外大量研究表明:含有孔隙和裂隙的煤体是一种分形体,煤体孔隙的变形、孔隙率及渗透率等都具有分形特征,用分形分维能刻画煤体孔隙的本质特征.用分维可以描述孔隙的不规则程度,即煤中存在的  $10^{-8} \sim 10^{-2}$  cm 的孔隙都可以用分维这个指标来定量描述.

国内外学者对于煤的孔隙进行了大量研究.张慧<sup>[3]</sup>将煤孔隙的成因类型划分为四大类(原生孔、外生孔、变质孔、矿物质孔)十小类.研究表明,煤孔隙的成因类型多,形态复杂,它们借助于裂隙而参与煤层气的渗流系统.煤孔隙的成因类型及其发育特征是煤储层生气、储气和渗透性能的直接反映,具有理论与实用研究意义.李小彦等<sup>[4]</sup>从煤储层双孔隙系统出发探讨了介质对煤层气扩散运移的制约关系及程度.认为孔隙系统在煤层气运移过程中主要承担扩散作用——把气体从微孔输送到裂隙系统.赵阳升等<sup>[5]</sup>以物理学单纯孔隙介质的愈渗概念与方法为基础,提出了孔隙、裂隙介质愈渗研究方法.胡耀青等<sup>[6]</sup>通过研究煤体的渗透性与裂隙的分形规律,揭示了煤体的裂隙发育程度与分形维数的关系,得出煤体渗透性与裂隙分维关系式及煤体渗透性随体积应力、水压、分形维数、强度的定量变化规律,对实际工程具有重要的指导意义.周军等<sup>[7]</sup>使用化学吸附法测定不同热解温度下煤焦比表面积及孔隙容积与孔径的分布特征,并采用 SEM 观察煤焦颗粒表面的形态,分析了高温下热解温度对煤焦孔隙结构的影响规律.纵观相关研究领域,对于煤在热应力作用下孔裂隙变化的研究较少. Taske<sup>[8]</sup>使用微孔测定仪对煤样进行测量,测定仪记录了孔径、压力、累积体积、平均直径、体积增加量和微分体积,并且进行了孔隙分布的讨论,指出煤中大孔和中孔的分布是非常易变并且是没有规律性的.

本文应用太原理工大学和中国工程物理研究院应用电子学研究所共同研制的  $\mu$ CT225kVFCB 型高精度( $\mu\text{m}$  级)CT 试验分析系统,对山西东曲 4 号

煤样的热破裂过程进行了观测和分析,重点对不同温度下瘦煤孔隙结构的变化特征与规律进行了研究.

## 2 实验装置与煤样

### 2.1 显微 CT 系统及其原理简介<sup>[9-11]</sup>

$\mu$ CT225kVFCB 型高精度 CT 试验分析系统主要由微焦点 X 光机、数字平板探测器、高精度的工作转台及夹具、机座、水平移动机构、采集分析系统等结构部分组成如图 1.



图 1  $\mu$ CT225kvFCB 型高精度显微 CT 试验系统

Fig. 1 Micro-CT experimental system  $\mu$ CT225kvFCB

数字平板探测器尺寸为  $500 \text{ mm} \times 367 \text{ mm} \times 47 \text{ mm}$ ;成像窗口:  $406 \times 293 \text{ mm}^2$ ;有效窗口:  $406 \times 282 \text{ mm}^2$  ( $3200 \times 2232$  个探元);探元尺寸:  $0.127 \text{ mm}$ .

CT 技术是通过计算机图像重建,使指定层面上不同密度的材料信息以高分辨率的数字图像显示出来.在 X 射线穿透物质的过程中,其强度成指数关系衰减,物质的密度是由物质对于 X 射线的衰减系数来体现的,不同物质对 X 射线的吸收系数不同,在 X 射线穿透被检测物体时,它的光强遵循下述方程:

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho \chi), \quad (1)$$

式中,  $I$  为 X 射线穿透物体前的光强;  $I_0$  为 X 射线穿透物体后的光强;  $\mu_m$  为被检测物体单位质量的吸收系数,在一般情况下  $\mu_m$  只与入射 X 射线波长有关;  $\rho$  为物质密度;  $\chi$  为入射 X 射线的穿透长度.

在 CT 重建图片上,物质密度越大,图像上的亮度就越高,表现为白色;而孔隙和裂隙的密度最小,表现为黑色.因此,通过分析 CT 重建后的图片,观

察分析孔裂隙的发展衍化,可以观测到不同温度阶段煤样热破裂的全过程.

## 2.2 煤样及试验方法

选择山西省东曲 4 号煤作为研究对象. 4 号煤属于瘦煤,地质年代是石炭系. 对煤样用砂纸手工磨制成最大断面直径为 1 mm 的近似圆柱体,煤样长度为 10 mm.

试验中使用的加热装置最大加热温度可达 800 °C,该装置可于 CT 室内边加热边扫描,通过氩气保护得到煤样在各个温度下热破裂的直接观察图片. 试验时,用 1 mm 的实心石英棒将近似圆柱体试件放置于显微 CT 扫描旋转工作台的中心位置,并使其与旋转工作台保持垂直,以保证试件能有足够大的放大倍数. 显微 CT 试验机工作电压为 60 kV,电流为 80  $\mu$ A,煤样放大倍数为 300 倍. 由于 X 光机的温度敏感性和煤样的受氧化情况,在加热过程中,对试件进行氩气保护加热到设定温度值后,恒温 15 min

进行自然冷却,当温度降至 50 °C 以下时,开始对煤样进行扫描. 扫描叠加帧数为 8(叠加帧数越高扫描图片越清晰),扫描时间为 1 h. 然后以 100 °C 为间隔增加试验温度,重复上述实验步骤,设定最高加热温度为 600 °C. 将扫描后的图片进行重建得到 CT 剖面图,选择每一个温度下的第 500 层图片的内接最大正方形进行分析,得出煤在不同温度下孔隙变化规律.

## 3 不同温度下瘦煤的孔裂隙发展衍化分析

对所加工瘦煤煤样,分别在 18、100、200、300 °C、400、500、600 °C 温度下热破裂过程进行显微观测. 为便于对比,选择煤样同一层位在不同温度下的结构变化进行分析,图 2 为不同温度下试件重建图片中第 500 层孔隙结构变化的 CT 剖面图.

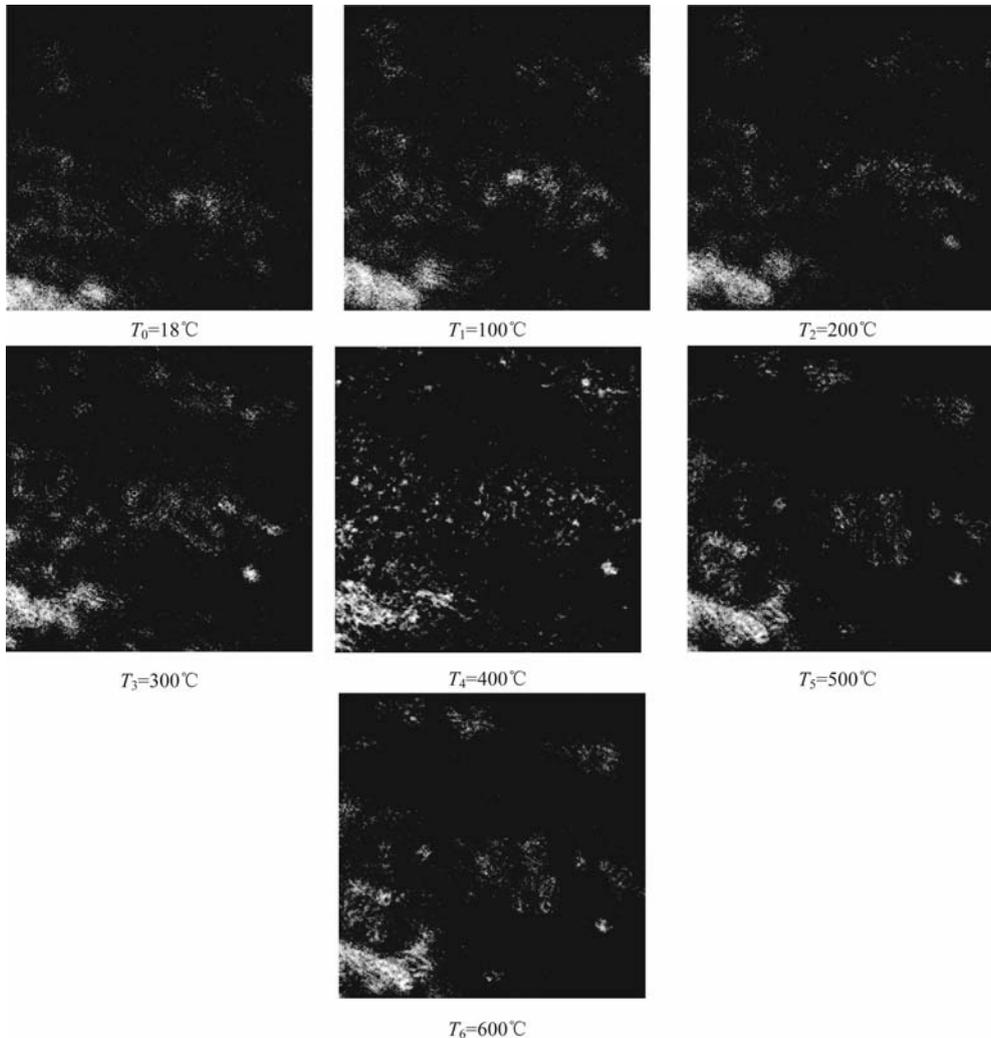


图 2 不同温度下瘦煤结构 CT 剖面(放大 300 倍,图中白色代表固体,黑色代表孔裂隙)

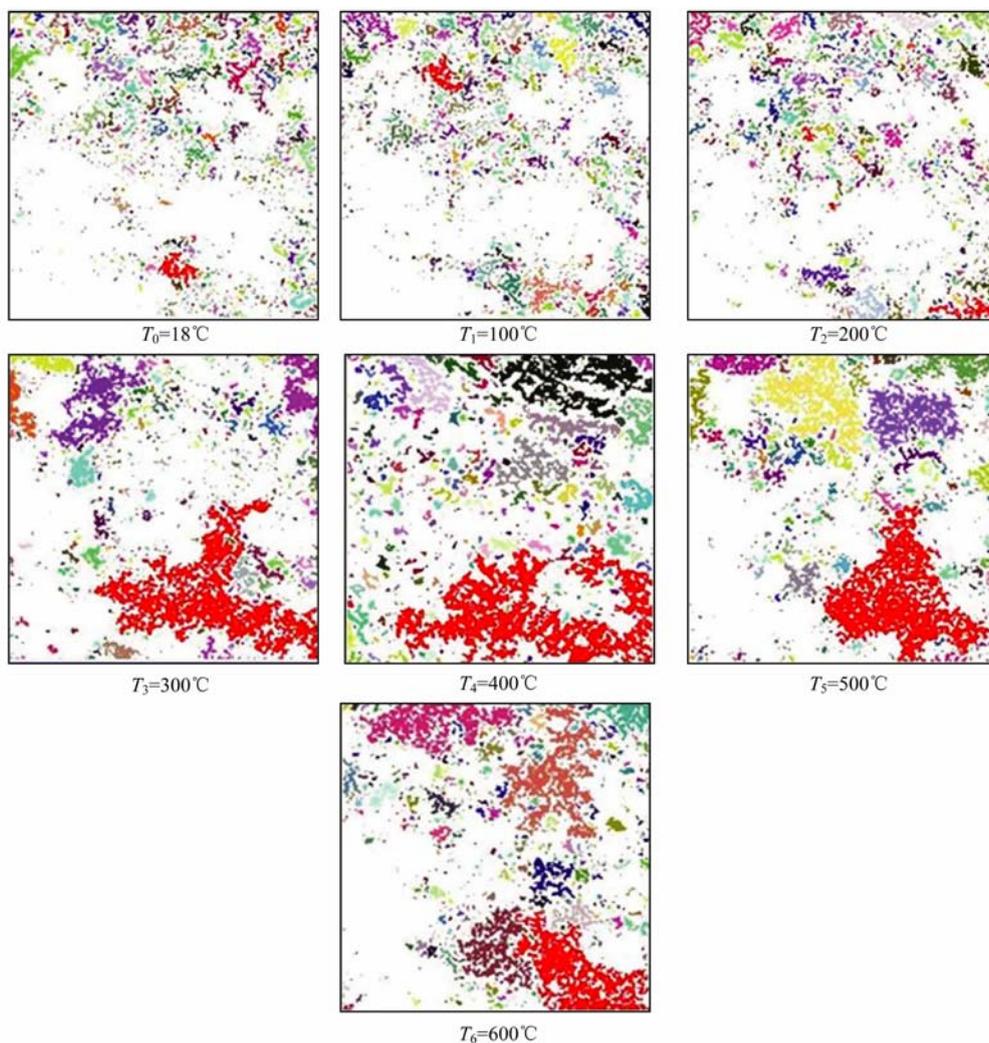


图 3 不同温度下瘦煤孔隙分布(一种颜色代表一个连通的孔裂隙团)

Fig. 3 Pore distribution of lean coal at different temperatures(A kind of color represents a connected pore)

利用 CT 图像分析软件对图片进行二值化处理,二维通道计算得到图 3 所示的图片,图片中一种颜色代表一个贯通的孔隙团。

对不同温度下煤样孔隙率统计分析如表 1。

表 1 不同温度下煤样孔隙率

Table 1 The porosity of coal at different temperatures

温度 $T/^\circ\text{C}$	18	100	200	300	400	500	600
孔隙率/%	24.5	23.5	23.4	31.8	36.9	35.2	29.9

### 3.1 常温到 200 °C 瘦煤的孔隙衍化

由图 2 可见,从常温到 200 °C 煤样变化不大,由于煤颗粒大小及分布的非均匀性,在加热(冷却)过程中具有膨胀(收缩)的各向异性特征,从而局部产生应力集中,当应力高于煤样强度时,即产生新的孔裂隙。而孔隙周围的矿物成分不同,热膨胀率各向异性导致了原有孔隙的闭合。因此从 18 °C 到 200 °C 煤

样的孔隙率略有变化,但变化不大,具体见表 1。

### 3.2 200 °C 到 400 °C 孔裂隙衍化

在重建的图片中我们发现:从 200 °C 到 300 °C 煤样发生了很大的变化,煤样出现大量孔隙,并且原有的小孔隙连通成大的孔隙团,孔隙率增加了 0.5 倍左右。因此瘦煤的热破裂阈值在 300 °C 附近。大量研究表明当温度高于 300 °C 时煤样开始发生热解反应<sup>[12-19]</sup>。因此从 200 °C 到 400 °C 瘦煤的孔隙率急剧增加,不仅与瘦煤的热破裂有关还与热解反应的加深有关。

### 3.3 400 °C 到 600 °C 条件下孔裂隙衍化

由表 1 可见瘦煤在 400 °C 到 600 °C 孔隙率降低。煤样在 400 °C 以上主要发生热解反应。煤的热解是一个复杂的过程。热解生成的自由基之间的结合,液相产物分子间的缩聚,液相与固相之间的缩聚和固相内部的缩聚等直接导致了煤样孔隙率的下降。

## 4 不同温度下煤样孔隙尺度分析

由于煤样中孔隙分布的复杂性,很难统计煤样中孔隙的尺度. 鉴于作者选取的煤样尺度为 1 mm, 因此将煤样中的孔隙等效为圆形. 通过 CT 图像分析软件, 得出每个孔隙团中包含的像素个数, 而每个像素的大小为  $0.194 \text{ mm}/300$ , 将像素点视为圆点, 这样就得到像素的直径为  $0.6 \mu\text{m}$ , 则每个像素代表的面积为  $0.3 \mu\text{m}^2$ , 从而得到每个孔隙团的面积:  $S = \text{每个像素面积} \times \text{像素个数}$ . 知道了孔隙团的面积从而得到孔隙团的等效半径. 对每个孔隙的面积进行加和得到孔隙总面积, 已知孔隙总面积和孔隙的个数则得到孔隙的平均面积, 从而得到孔隙的等效平均半径. 表 2 给出了不同温度下煤样孔隙数量及尺度统计. 由表 2 可以看出孔隙数量随着温度的升高呈现先减少后增加的规律. 原因为: 从常温到  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  煤样内在水分脱

出和煤样中矿物颗粒的热膨胀各向异性导致常温下的孔隙消失; 从  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  到  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  大量小孔隙贯通成较大的孔隙导致孔隙数量急剧下降; 从  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  到  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  是由于煤的化学反应产生了许多新的小孔隙, 因此该温度段孔隙数量增加. 由表 2 还可以看出从常温到  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  孔隙都集中在  $0.4 \sim 30 \mu\text{m}$  的范围内, 而半径为  $0.4 \sim 3 \mu\text{m}$  的孔隙数量占绝对优势, 并且这一温度段的孔隙最大半径和平均半径都是先减小后增加的, 其原因为: 在温度作用下, 煤样内在水分脱出和煤样中矿物颗粒的热膨胀各向异性等原因综合作用所致.  $300 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$  煤样的孔隙尺度分布范围增大, 尺度分布为  $0.4 \sim 100 \mu\text{m}$ , 最大孔隙半径达到  $96.3 \mu\text{m}$ . 这是因为随着温度的升高, 煤样受热应力和热化学反应综合作用使得大量小孔隙贯通成大的孔隙团, 因此瘦煤的热破裂阈值在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  左右. 图 4~6 分别给出了温度与孔隙数量、最大孔隙半径、平均半径的关系图, 直接的反应了表 2 中孔隙统计结果.

表 2 不同温度下煤样孔隙数量及尺度统计

Table 2 Pores number and scale at different temperatures

温度 $T/^\circ\text{C}$	孔隙数量 $M/\text{个}$	不同尺度(单位: $\mu\text{m}$ )孔隙百分含量/%						最大半径 $R/\mu\text{m}$	平均半径 $r/\mu\text{m}$
		0.4~3	3~5	5~20	20~30	30~50	50~100		
18	6171	89.921	7.146	2.885	0.048	0	0	27.2	2.2
100	5889	90.134	6.962	2.870	0.034	0	0	24.2	2.1
200	5853	90.501	6.407	3.041	0.051	0	0	25.6	2.2
300	3213	91.784	5.820	2.241	0.062	0.062	0.031	94.9	2.8
400	2010	84.527	8.756	6.268	0.299	0.100	0.050	93.4	3.8
500	2464	89.286	7.386	3.084	0.122	0.081	0.041	96.3	3.4
600	3322	90.999	6.382	2.559	0	0	0.060	90.7	2.7

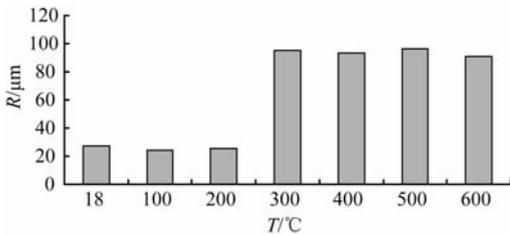


图 4 最大孔隙半径与温度关系

Fig. 4 The relationship between the maximum pore radius and temperature

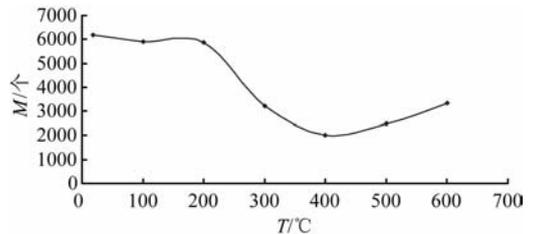


图 6 孔隙数量与温度的关系

Fig. 6 The relationship between the number of pores and temperature

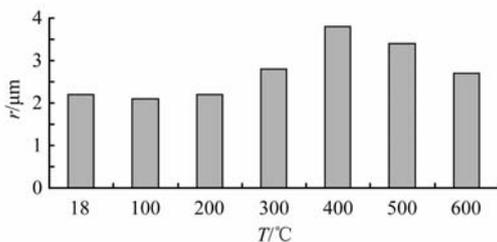


图 5 孔隙平均半径与温度关系

Fig. 5 The relationship between the average radius of pore and temperature

## 5 瘦煤热破裂的分形规律

煤的孔隙结构与煤层气的吸附性和流动性密切相关, 然而由于煤中孔径分布范围很大, 变化幅度达 5~6 个数量级, 以往采用中值孔径或平均孔径来定量描述, 不甚科学, 而分形几何学的理论为煤中孔隙

结构的研究提供了一种全新方法,它将不规则形态的几何体集合视为分形体,按分形几何学的方法定量求解的分形体空间分布特征参数-分维,能够有效地刻画出几何体的形态<sup>[20]</sup>.

作者将分形的基本理论运用到了煤样的热破裂过程中,研究了煤在 100~600 °C 范围内热破裂孔隙分布的分形规律,得到了不同温度下孔隙的分维数和分布初值,建立了分维数、分布初值与温度的关系,用分形理论分析了煤的热破裂过程.

该方法是以孔隙的等效半径和数量为基本参数,半径长度代表孔隙团的大小及其分布的连同性,数量代表孔隙分布的密度,因此半径长度和数量的分布特征在总体上表达了煤样孔隙分布的规律.从 100 °C 到 600 °C 的 CT 图像中,统计等效半径  $\geq L$  的孔隙数量,计为  $M(L)$ ,若这个分布是分形分布,则等效半径长度-数量服从  $M(L) \propto L^{-D}$ . 写成等式为

$$M(L) = A_0 L^{-D}, \quad (2)$$

式中,  $M(L)$  为  $L$  尺度对应的孔隙数量;  $D$  为孔隙数量分布的分形维数;  $A_0$  为孔隙数量的分布初值. 上式两端取对数,有:

$$\ln M(L) = -D \ln L + \ln A_0. \quad (3)$$

分析(3)式可知,如果不同温度下裂隙的分布特征具有自相似性的分形规律,那么  $\ln M(L)$  和  $\ln L$  就会满足很好的线性关系. 以  $\ln L$  为横轴,  $\ln M(L)$  为纵轴作图(图 7),图中直线的斜率就为煤样孔隙数量分布的分形维数  $D$ . 从几何上来说,分形维数  $D$  表征了煤样孔隙图形的复杂程度,  $D$  值越大,孔隙图形越规则越接近圆;  $D$  值越小,孔隙图形越不规则. 孔隙数量的分布初值  $A_0$  与各阶段孔隙数量密切相关,数量越多,  $A_0$  越大.

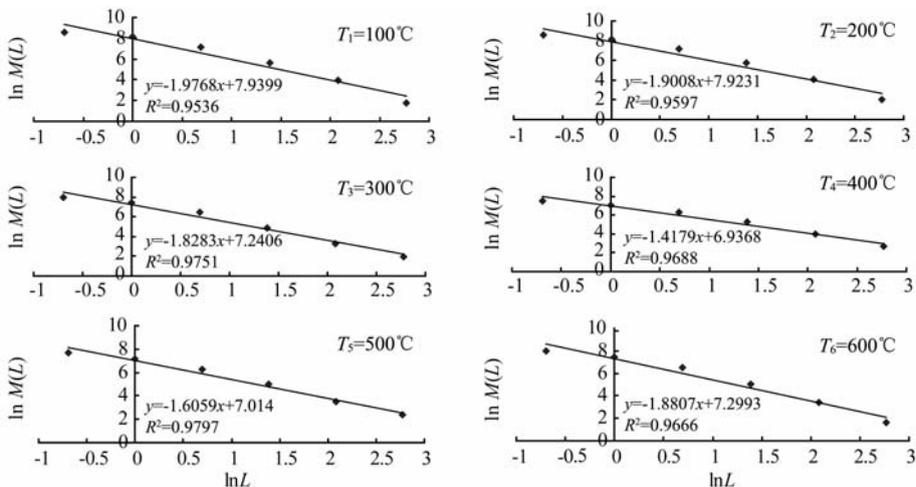


图 7 不同温度下  $\ln M(L)$  和  $\ln L$  的关系

Fig. 7 The relationship between  $\ln L$  and  $\ln M(L)$  at different temperatures

分别统计不同温度下,孔隙等效半径长度  $\geq L$  ( $L=0.5, 1, 2, 4, 8 \mu\text{m}$  和  $16 \mu\text{m}$ ) 的孔隙数量,作为分形研究对象,进而依据公式(3)来获取孔隙数量分布的分形维数  $D$  和孔隙数量分布初值  $A_0$ . 由于计算过程中数据较多,因此本文只给出 100 °C 下瘦煤的孔隙分形计算过程数据及结果(见表 3),其它温度依照此方法计算. 结果见表 4.

表 3 100 °C 下瘦煤的孔隙分形结果

Table 3 Results of fractal analysis for pores number and scale at 100 temperature

$L/\mu\text{m}$	0.5	1	2	4	8	16
$\ln L$	-0.693	0	0.693	1.386	2.079	2.773
$\ln M(L)$	8.591	8.115	7.183	5.656	3.970	1792
$D$	1.97					

表 4 不同温度下瘦煤的孔隙分形结果

Table 4 Results of fractal analysis for pores number and scale at different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600
分形维数 $D$	1.97	1.901	1.828	1.418	1.606	1.881
$\ln A_0$	7.940	7.923	7.241	6.937	7.014	7.300
相关系数 $R^2$	0.954	0.960	0.975	0.967	0.980	0.967

图 8 为孔隙数量分形维数  $D$  与温度的关系图. 由图 8 可知,从 100 °C 到 600 °C,分形维数  $D$  随温度升高呈现先减小、后增加的趋势. 在 100 °C 到 200 °C 分形维数减小速度比较缓慢,在 300 °C~400 °C 减小速度最快,400 °C 左右达到最小值,说明 400 °C 时煤样内部孔隙的形态最为复杂. 分析其原因:从 100 °C 到 200 °C 煤样脱水,失水小孔由于部分孔隙周围矿

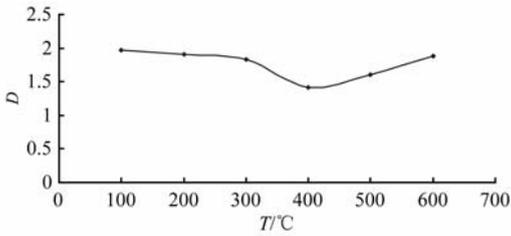
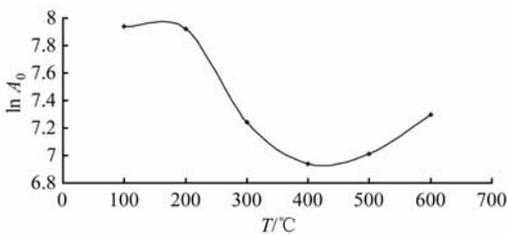


图 8 分形维数与温度的关系

Fig. 8 The relationship between fractal dimension and temperature

物质的热膨胀系数差异较大,小孔发生形状的变化导致分形维数有减小的趋势;300~400 °C原有的大量较规则小孔隙相互贯通成大的不规则的孔隙团,因而分形维数急剧减小;从400~600 °C由于煤的热解反应加深,产生了大量新的比较规则的小孔隙,而煤的缩聚反应使自由基之间相互缩聚从而原有不规则大的孔隙团尺寸减小,故分形维数又有所增加.因此随着温度的升高,煤样孔隙的演化规律:“较规则小孔隙变形-大量较规则小孔隙贯通成不规则的大的孔隙团—孔隙团缩合减小趋于规则”.图9为孔隙分布初值的对数  $\ln A_0$  与温度之间关系图,分析图9可知分布初值的对数  $\ln A_0$  随温度升高呈现先降低后增加的趋势,其中以200~400 °C之间降低最为迅速,使曲线形态变得十分陡峭,并在400 °C达到最小值.

比较图6与图9发现两者的拟合曲线非常相似,因此  $A_0$  与孔隙的数量有关.分析图6、图9,从100 °C到200 °C孔隙数量减小速度比较缓慢,从而  $\ln A_0$  也缓慢减小;300 °C许多小的孔隙贯通成大的孔隙团,从而孔隙的总数量减少,导致  $\ln A_0$  急速减小,这也可以说明瘦煤的热破裂阈值在300 °C附近;300~400 °C大的孔隙团数量继续增加,孔隙总数减少,从而  $\ln A_0$  继续降低;400 °C~600 °C由于煤的热解反应加深,产生了大量新的小孔隙,孔隙数量增加,从而  $\ln A_0$  增大.因此煤样孔隙数量随着温度升高的演化规律为:“减小—增加”.

图 9  $\ln A_0$  与温度的关系Fig. 9 The relationship between  $\ln A_0$  and temperature

## 6 结 论

本文用  $\mu$ CT225KVFCB 型高精度显微 CT 试验系统及自制在线加热装置,对 1 mm 瘦煤煤样从常温 18 °C 到 600 °C 不同温度条件下,煤样中孔隙的发展演化规律特征进行了初步分析.获得的主要结论如下:

(1)从常温到 200 °C,孔隙都集中在 0.4~30  $\mu$ m 的范围内,而半径为 0.4~3  $\mu$ m 的孔隙数量占绝对优势,并且这一温度段的孔隙最大半径和平均半径都是先减小后增加的;300~600 °C 煤样的孔隙尺度分布范围增大,尺度分布为 0.4~100  $\mu$ m,最大孔隙半径达到 96.3  $\mu$ m;

(2)300 °C 煤样中大量小的孔隙贯通成大的孔隙团,因此瘦煤的热破裂阈值在 300 °C 附近,从常温到 300 °C 煤样的孔隙率增加了 0.5 倍左右;

(3)瘦煤从 18 °C 到 600 °C 孔隙数量的演化规律为:“先减小后增加”,分布初值的对数  $\ln A_0$  随温度升高呈现先降低后增加的趋势;

(4)随着温度的升高,分形维数  $D$  随温度升高呈现先减小、后增加的趋势.瘦煤孔隙的演化规律:“较规则小孔隙变形-大量较规则小孔隙贯通成不规则的大的孔隙团-孔隙团缩合减小趋于规则”.

## 参考文献(References)

- [1] 赵志根,蒋新生.谈煤的孔隙大小分类.标准化报道,2000,21(5):23-24.  
Zhao Z G, Jiang X S. Discussion about the classification of pore in coal. *Reporting of Standardization* (in Chinese), 2000, 21(5):23-24.
- [2] 冯增朝.低渗透煤层瓦斯强化抽采理论及应用.北京:科学出版社,2008.  
Feng Z C. *Low-Permeability Coal Seam Gas Extraction Theory and Application* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2008.
- [3] 张慧.煤孔隙的成因类型及其研究.煤炭学报,2001,26(1):40-44.  
Zhang H. Genetical type of pores in coal reservoir and its research significance. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 2001, 26(1): 40-44.
- [4] 李小彦,解光新.孔隙结构在煤层气运移过程中的作用—以沁水盆地为例.天然气地球科学,2004,15(4),341-344.  
Li X Y, Xie G X. Effect of pore structure on CBM transport-taking Qinshui basin as the example. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 2004, 15(4), 341-344.
- [5] 赵阳升,冯增朝,文再明.煤体瓦斯愈合机理与研究方法.

- 煤炭学报, 2004, 29(3): 293-297.
- Zhao Y S, Feng Z C, Wen Z M. The percolation mechanism and research method of methane in coal mass. *Joumat of China Coal Society* (in Chinese), 2004, 29(3): 293-297.
- [6] 胡耀青, 赵阳升, 杨栋等. 煤体的渗透性与裂隙分维的关系. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1452-1456.
- Hu Y Q, Zhao Y S, Yang D, et al. Relationship between permeability and fractal dimension of coal mass. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2002, 21(10): 1452-1456.
- [7] 周军, 张海, 吕俊复等. 高温下热解温度对煤焦孔隙结构的影响. 燃料化学学报, 2007, 35(2): 155-159.
- Zhou J, Zhang H, Lu J F, et al. Effect of pyrolysis temperature on porous structure of anthracite chars produced at high temperatures. *Journal of Fuel Chemistry and Technology* (in Chinese), 2007, 35(2): 155-159.
- [8] Taske K. An investigation into the Pore size distribution of coal using mercury Porosimetry and the effect that stress has on this distribution. Queensland: The University of Queensland, 2000.
- [9] Herman G T. From Projection to Reconstruction Image-the Theory Fundamental of CT. Translated by Yan Hong-Fan et al. (in Chinese). Beijing: The Science and Technology Press, 1985.
- [10] 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. 地球物理学报, 2009, 52(3): 842-848.
- Kang Z Q, Zhao Y S, Meng Q R, et al. Micro-CT experimental research of oil shale thermal cracking laws. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(3): 842-848.
- [11] 杨更社, 刘慧. 基于 CT 图像处理技术的岩石损伤特性研究. 煤炭学报, 2007, 32(5): 463-468.
- Yang G S, Liu H. Study on the rock damage characteristics based on the technique of CT image processing. *Joumat of China Coal Society* (in Chinese), 2007, 32(5): 463-468.
- [12] Porada S. The influence of elevated pressure on the kinetics of evolution of selected gaseous products during coal pyrolysis. *Fuel*, 2004, 83(7-8): 1071-1078.
- [13] Sun Q L, Li W, Chen H K, et al. The variation of structural characteristics of macerals during pyrolysis. *Fuel*, 2003, 82(6): 669-676.
- [14] Jamil K, Hayashi J I, Li C Z. Pyrolysis of a victorian brown coal and gasification of nascent char in CO<sub>2</sub> atmosphere in a wire-mesh reactor. *Fuel*, 2004, 83(7-8): 833-843.
- [15] Tromp P J J, Kapteijn F, Moulijn J A. Characterization of coal pyrolysis by means of differential scanning calorimetry. 2. Quantitative heat effects in a H<sub>2</sub> and in a CO<sub>2</sub> atmosphere. *Fuel Processing Technology*, 1989, 23(1): 63-74.
- [16] Tomeczek J, Gil S. Volatiles release and porosity evolution during high pressure coal pyrolysis. *Fuel*, 2003, 82(3): 285-292.
- [17] Gadiou R, Bouzidi Y, Prado G. The devolatilisation of millimetre sized coal particles at high heating rate: the influence of pressure on the structure and reactivity of the char. *Fuel*, 2002, 81(16): 2121-2130.
- [18] Cai Y, Güell J, Dugwell R, et al. Heteroatom distribution in pyrolysis products as a function of heating rate and pressure. *Fuel*, 1993, 72(3): 321-327.
- [19] Wang J H, Du J, Chang L P, et al. Study on the structure and pyrolysis characteristics of Chinese western coals. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(4): 430-433.
- [20] 谢和平, 陈至达. 分形(fractal)几何与岩石断裂. 力学学报, 1988, 20(3): 264-272.
- Xie H P, Chen Z D. Fractal geometry and fracture of rock. *Acta Mechanica Sinica* (in Chinese), 1988, 20(3): 264-272.

(本文编辑 汪海英)