

文章编号:0253-9993(2011)03-0487-04

## 焦煤孔隙结构形态的实验研究

孟巧荣,赵阳升,胡耀青,冯增朝,于艳梅

(太原理工大学 采矿工艺研究所,山西 太原 030024)

**摘要:**利用微焦点显微CT技术和压汞法分别对东曲2号焦煤的孔隙结构进行测试,综合分析两种方法所测结果,从孔隙连通性和尺度两个方面,全面研究了2号焦煤的孔隙结构和形态特征。研究表明:2号焦煤的孔隙率为17.2%,连通的开放孔隙占27.04%,封闭孔隙占72.96%;孔径大于0.64 μm的孔占67.74%,孔径介于0.64 μm和7.50 nm的孔占32.26%,但比表面积占总比表面积的93.4%,煤中微孔径的孔数量很大;大量微孔径孔和封闭孔的存在导致煤体渗透性、连通性很差。东曲2号煤的封闭孔多呈圆形、葫芦形和不规则形,孔隙壁厚,连通团呈镂空的雪片状,相互连通的吼道小且少。

**关键词:**焦煤;孔隙结构;孔隙形态;微焦点CT;压汞法

**中图分类号:**TQ531.1 **文献标志码:**A

### Experimental study on pore structure and pore shape of coking coal

MENG Qiao-rong, ZHAO Yang-sheng, HU Yao-qing, FENG Zeng-chao, YU Yan-mei

(Mining Technology Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Using micro focus CT and Hg-injection, pores structure of Dongqu No. 2 coking coal were tested, and two groups of data were got. From the two points of view—connectivity and scale of pores, characteristic of pore structure and shape were analyzed synthetically. The results show that porosity of No. 2 coking coal is 17.2%, the ratio of connectived open pore to all pores is 27.04%, that of closed pore is 72.96%; the percentage of the pore which aperture is more than 0.64 μm is 67.74%, the percentage of which pore aperture is from 0.64 μm to 7.50 nm is 32.26%. But the ratio of its specific surface area to total specific surface area is 93.4%, so the quantity of micro-pores is large, large number of micro-pores and closed pores result in low permeability and poor connectivity. Closed pore of Dongqu No. 2 coal are round, gourd-shaped or irregular, pore walls are thick. Connectivity group are like hollowed-out snowflakes, pore throats connected each other are few and small.

**Key words:** coking coal; pore structure; pore shape; micro focus CT; Hg-injection

煤是一种复杂的多孔有机岩,煤孔隙空间是不包括裂隙(由于构造力作用使煤体发生破裂而留下的空间)在内的那部分空间<sup>[1]</sup>,孔隙结构很大程度上决定了煤的吸附性和渗透性,从而影响着煤层气的吸附与运移<sup>[2-3]</sup>,由于煤的多样性和不均匀性以及各种研究方法的局限性,准确阐明煤的孔隙结构非常困难。研究煤孔隙性比较常用的方法是SEM技术和压汞法,前者可直观地观察到煤样表面一些微米级的孔隙<sup>[4-5]</sup>,后者可定量地得到一定孔径范围内有关孔隙大小、孔隙分布、孔隙类型以及孔隙突破压力方面的

信息<sup>[6-8]</sup>。这些研究对煤孔隙的成因、物性特征、油气的储集以及瓦斯抽放均是有益的。

近年来,随着工业CT的飞速发展,CT技术在岩石领域的应用越来越广,应用CT技术对岩石的微细观损伤特性和岩芯的物理结构进行检测,在岩石基本物理性质、特殊岩芯性质、岩芯地质特征描述、岩芯驱替研究等众多方面起到了重要作用<sup>[9-14]</sup>。本文应用先进的微焦点显微CT技术测试煤的内部三维结构,同时结合压汞法,全面分析了煤的孔隙结构特征和形态特征,更进一步了解了煤的真实结构,为研究岩石

微细观特征提供了一种可行的研究方法。

## 1 试验煤样

试验煤样取自东曲煤矿 12307 工作面三采区 2 号煤层中,此煤层为下二叠统山西组。煤层倾角为 2~8°,平均倾角为 3°,工作面煤厚 1.2~2.0 m,平均煤层厚度 1.59 m,煤层稳定,结构简单,属中厚煤层,2 号煤密度 1.37 t/m<sup>3</sup>,煤质为焦煤。工作面瓦斯绝对涌出量 1.12 m<sup>3</sup>/min,相对瓦斯涌出量 0.96 m<sup>3</sup>/t。试验煤样的主要煤质指标见表 1。

表 1 试验煤样的主要煤质指标  
Table 1 Main indexes of coal quality

样品	灰分/ %	挥发 分/%	硫分/ %	水分/ %	胶质层最大 厚度/mm	罗加指 数 LR	煤种
煤样	35.68	19.68	0.61	3.00	5	21.78	焦煤

## 2 试验方法

利用压汞法和显微 CT 法两种方法来研究煤孔隙结构。压汞法测试精度高,最小孔径能达到 7.5 nm,但它只能分析某一尺度下开放的孔;CT 法能对大于 0.5 μm 的所有孔进行研究。因此,为了避免单一方法的局限性,全面了解煤的孔隙特征,本文用压汞法和显微 CT 法分别测定了煤的孔容、比表面积等孔隙特征,更深入地了解了开放孔和封闭孔的孔隙特征。

### 2.1 压汞法

压汞实验采用美国 Quantachrome 公司的自动扫描 60 型压汞仪,工作压力从 0.1~30 000 Pa,测得的孔径范围为 7.5~360 000 nm。从试验煤样中选取一小块样品在 110 °C 真空脱气 2 h 后进行压汞实验,测试样品质量 0.534 9 g,汞的表面张力为 0.485 N/m,汞与样品接触角为 130°,汞的密度  $\rho = 13.533 5 \text{ g/mL}$ 。

### 2.2 显微 CT 法

CT 扫描是利用太原理工大学的  $\mu\text{CT}225\text{kVFCB}$  型高精度显微 CT 机完成的。该 CT 机的主要部件是 Phoenix 微焦点 X 光机和 Paxscan4030 平板探测器,X 光机的最小焦点为 3 μm,焦距仅 4.5 mm,X 射线呈锥束水平扫描被测物体。平板探测器的探元尺寸为 0.194 mm。该 CT 机系统成像放大比为 1~400,密度分辨率  $\leq 0.2\%$ ,可检测到  $\phi 0.5 \mu\text{m}$  的孔隙。CT 图像重建矩阵 1 024×1 024,重建切片厚度最小 0.127 mm。

此 CT 机采用射线三维显微层析 (3D- $\mu\text{CT}$ ) 技术,利用微焦点 (3 μm) 锥束 X 射线对微小试件做透照投影放大扫描,并以这种扫描采集的二维数字透照显微图像 ( $\mu\text{DR}$ ),重建其内部介质结构,形成可视化高分辨力的三维图像,可以对各种岩石的内部结构进行细观三维研究。

实验时,在选取压汞样品的同一块试验煤样上,利用内径 3 mm 的玻璃钻头钻取 3 个  $\phi 2.2 \text{ mm}$  的煤柱,再用细砂纸手工磨成  $\phi 1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的近似圆柱体,分别记为 I、II、III 煤样;调试 CT 机的试验参数:电压 65 kV,电流 85 μA,帧频 1 帧/s,叠加帧数 8 帧,转台每转 0.9° 扫描一次,共扫描 400 幅,放大倍数 303 倍,可以观测的最小孔隙直径为 0.64 μm;依次将 I、II、III 煤样放在 CT 机的转台上进行扫描,扫描完成后,对扫描图像进行二维重建,得到煤样的二维剖面图,利用二维剖面图生成煤样三维立体图。

## 3 试验结果

将煤中所有的孔隙分为开放孔和封闭孔<sup>[15]</sup>,开放孔包括可渗透的孔隙空间和死端孔隙空间,是连通的有效孔隙;封闭孔隙指无效的孔隙空间。利用压汞法只能测出连通的有效孔 (开放孔) 的孔隙特征,表 2 是应用压汞法测得的孔隙参数值。

表 2 压汞法测得的孔隙结构参数  
Table 2 Pore structure parameters by Hg-injection

孔径尺度	孔隙总容积/ (mL · g <sup>-1</sup> )	孔隙比表面积/ (m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> )	孔隙率/%
>7.50 nm	0.035 6	3.85	4.65
>0.64 μm	0.024 1	0.021 36	3.15

从表 2 可以看出,大于 7.50 nm 的开放孔的孔隙率是 4.65%,大于 0.64 μm 的开放孔的孔隙率为 3.15%,所占比率为 67.74%,说明开放孔中,大于 0.64 μm 的孔隙占 2/3,小于 0.64 μm 的孔只占 1/3,但是大于 0.64 μm 的开放孔的比表面积只占大于 7.5 nm 的开放孔的比表面积的 0.56%,说明煤体中孔隙的比表面积主要来源于小孔,小孔的数量越多比表面积越大,越有利于煤层气和瓦斯的吸附和储存。

应用 CT 扫描得到的二维剖面图如图 1 所示。图中颜色越白表示煤质的密度越大,黑色表示孔隙,煤的层理方向很清晰,而且此煤样中含有硬质夹层,从图 1 的局部放大图可以看出,煤中的孔隙连通性很差,单一封闭孔隙较多。

三维立体图如图 2(a) 所示,该三维立体图为煤

样Ⅲ中的一个小立方体块,小立方体块的大小为 $500 \times 500 \times 200$ (像素点个数),实际尺寸为 $0.320 \text{ mm} \times 0.320 \text{ mm} \times 0.128 \text{ mm}$ ;图 2(b)为小立方体块中的最大连通团。对 3 个煤样的三维立体图进行分析,得到煤样的孔隙结构参数,见表 3。

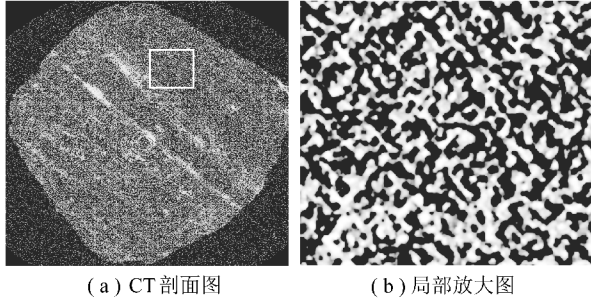
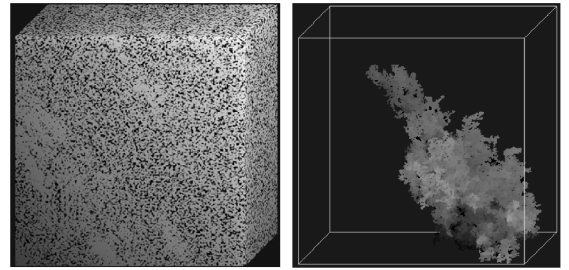


图 1 煤样 CT 剖面图和局部放大图

Fig. 1 CT section and magnified part of coal

所测的孔隙为煤样中所有的孔隙,包括开放孔和封闭孔。煤样的孔隙率达到 11.65%,而最大连通团只占总体积的 1.25%,所以煤样的孔隙连通性很差。通道比表面积占总比表面积的 6.63%,说明吸附在



(a) 三维图 (b) 最大连通团

图 2 煤的三维结构和最大连通团图

Fig. 2 Three-dimensional structure and max connective group of coal

煤体中的气体大部分聚集在不连通的孔隙中,连通孔隙中只含有少部分,所以,此类煤中煤层气和瓦斯的抽放不易进行。

## 4 试验结果分析

### 4.1 孔隙结构分析

将压汞实验数据和 CT 实验数据综合分析可得表 4。

表 3 2 号煤 CT 法测试孔隙结构的特征参数

Table 3 Pore structure parameters of No. 2 coal by CT

煤样编号	平均衰减系数/ $10^{-3}$	孔隙率/%	孔隙总容积/ $(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	最大连通团占总体积之比/%	总比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	通道比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	通道比表面积占总比表面积之比/%
I	3.18	11.65	0.089 1	1.21	0.32	0.029 7	9.28
II	2.83	12.20	0.093 3	1.39	0.33	0.023 0	6.97
III	2.77	11.11	0.085 0	1.15	0.31	0.011 4	3.64
平均值	2.93	11.65	0.089 1	1.25	0.32	0.021 4	6.63

表 4 不同尺度不同类型孔的孔隙率、孔隙容积和比表面积

Table 4 Porosity, pore volume and specific surface area of different scales and types of pores

孔 径	孔隙率/%			孔隙容积/ $(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$			比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$		
	开放孔	封闭孔	合计	开放孔	封闭孔	合计	开放孔	封闭孔	合计
$>0.64 \mu\text{m}$	3.15	8.50	11.65	0.024 1	0.065 0	0.089 1	0.02	0.30	0.32
$7.50 \text{ nm} \sim 0.64 \mu\text{m}$	1.50	4.05	5.55	0.011 5	0.031 0	0.042 5	3.84	53.95	57.79
$>7.50 \text{ nm}$	4.65	12.55	17.20	0.035 6	0.096 0	0.131 6	3.86	54.25	58.11

从表 4 可以看出,大于 7.50 nm 的所有孔隙的总孔隙率为 17.20%,总孔容为 0.131 6 mL/g,总比表面积为 58.11  $\text{m}^2/\text{g}$ ,其中大于 0.64  $\mu\text{m}$  的孔的孔容为 0.089 1 mL/g,占总孔容的 2/3,但比表面积只有 0.32  $\text{m}^2/\text{g}$ ,占总比表面积的 0.55%,这说明在焦煤中小于 0.65  $\mu\text{m}$  的微孔的孔径都特别小,数量特别多。对于开放孔来说,其孔容为 0.035 6 mL/g,占总孔容的 27%,开放孔的孔隙率为 4.65%,所以,此煤的连通性很差。封闭孔的比表面积为 54.25  $\text{m}^2/\text{g}$ ,占总比表面积的 93.4%,说明煤体中聚集着大量的煤

层气体和瓦斯,都吸附在封闭的微孔径孔隙中,参与层流渗透过程的游离态气体很少,2 号焦煤中大量的封闭微孔径孔隙的存在导致了煤体的低渗透性,煤层气不易抽放,瓦斯不易突出。

### 4.2 孔隙形态分析

孤立的单个封闭孔隙多为圆形或长圆形,如图 3 中 A 所示,两个孔形成的封闭孔多呈两头大中间细的葫芦形,如图 3 中 B 所示,多个孔形成的封闭孔形态多样,如图 3 中 C 所示,孔隙与孔隙之间的孔隙壁很厚,这样,即使孔隙内部的孔隙压很大,煤体也不易

发生瓦斯突出事故。

如图2(b)所示,开放孔形成的连通团形状复杂多变,连通团多呈雪花片状分散分布,团与团之间呈镂空状,仅靠相近的几个孔连通。连通团中,孔与孔之间的吼道小而且窄,不利于煤层气的层流渗透。

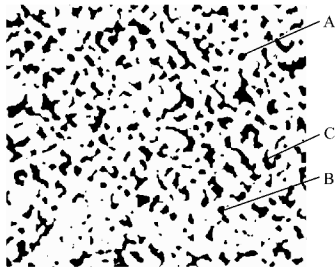


图3 图1(b)的二值化

Fig.3 Two value figure of Fig.1(b)

## 5 结 论

(1) 东曲2号焦煤的孔隙率为17.20%,大于0.64 μm的渗流孔(孔径大于0.1 μm)虽占67.74%,但封闭孔隙占总孔隙的72.96%,连通性差,渗透性差。煤层气体和瓦斯富含于煤体的微孔径封闭孔隙中,不易抽放和突出。

(2) 东曲2号煤的封闭孔多呈圆形、葫芦形和不规则性形,孔隙壁厚,连通团呈镂空的雪片状,相互连通的吼道小且少,连通性差。

## 参考文献:

- [1] 吴俊,金奎励.煤孔隙理论及在瓦斯突出和抽放评价中的应用[J].煤炭学报,1991,16(3):86-95.  
Wu Jun, Jin Kuili. Theory of coal pores and its application in evaluation of gas outburst proneness and gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(3): 86-95.
- [2] 罗志明.煤比表面积和煤与瓦斯突出关系的研究[J].煤炭学报,1989(3):44-54.  
Luo Zhiming. Study on relation between specific surface area and outburst of coal and gas[J]. Journal of China Coal Society, 1989(3): 44-54.
- [3] 秦勇.国外煤层气成因与储层物性研究进展与分析[J].地学前缘,2005,12(3):289-298.  
Qin Yong. Advances in overseas geological research on coalbed gas: origin and reservoir characteristics of coalbed gas[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 289-298.
- [4] 张慧.煤孔隙的成因类型及其研究[J].煤炭学报,2001,26(1):40-44.  
Zhang Hui. Genetical type of pores in coal reservoir and its research significance[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1): 40-44.
- [5] 张素新,肖红艳.煤储层中微孔隙和微裂隙的扫描电镜研究[J].电子显微学报,2000,19(4):531-532.  
Zhang Suxin, Xiao Hongyan. Study of the pore and microfracture of the coal reservoirs in the SEM[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2000, 19(4): 531-532.
- [6] Amarasekera G, Scarlett M J. Micropore size distributions and specific interactions in coals[J]. Fuel, 1995, 74(1): 115-118.
- [7] 段旭琴,曲剑午,王祖訥.低变质烟煤有机显微煤岩组分的孔结构分析[J].中国矿业大学学报,2009,38(2):224-228.  
Duan Xuqin, Qu Jianwu, Wang Zuna. Pore structure of macerals from a low rank bituminous[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(2): 224-228.
- [8] 秦跃平,傅贵.煤孔隙分形特性及其吸水性能的研究[J].煤炭学报,2000,25(1):55-59.  
Qin Yueping, Fu Gui. Study on fractal characteristic of pore in coal and moisture-absorbing property of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 55-59.
- [9] 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].地球物理报,2009,52(3):842-848.  
Kang Zhiqin, Zhao Yangsheng, Meng Qiaorong, et al. Micro-CT experimental research of oil shale thermal cracking law[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(3): 842-848.
- [10] 王家禄,高建,刘莉.应用CT技术研究岩石孔隙变化特征[J].石油学报,2009,30(6):887-897.  
Wang Jialu, Gao Jian, Liu Li. Porosity characteristics of sandstone by X-ray CT scanning system[J]. Acta Petrolei Sinic, 2009, 30(6): 887-897.
- [11] 杨更社,刘慧.基于CT图像处理技术的岩石损伤特性研究[J].煤炭学报,2007,32(5):463-468.  
Yang Gengshe, Liu Hui. Study on the rock damage characteristics based on the technique of CT image processing[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 463-468.
- [12] 李玉彬,李向良.利用微焦点X射线CT描述特殊岩性油藏岩芯[J].特种油气藏,2000,7(4):53-56.  
Li Yubin, Li Xiangliang. Description of special lithological cores with micro-focus X-ray CT[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2000, 7(4): 53-56.
- [13] 崔中兴,仵彦卿,蒲毅彬.渗流状态下砂岩的三维实时CT观测[J].岩石力学与工程报,2005,24(8):1390-1395.  
Cui Zhongxing, Wu Yanqing, Pu Yibin. Triaxial real-time observations of sandstone under seepage by X-ray CT scan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1390-1395.
- [14] 乔丽苹,刘建,冯夏庭.砂岩水物理化学损伤机制研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(10):2117-2124.  
Qiao Liping, Liu Jian, Feng Xiating. Study on damage mechanism of sandstone under hydro-physico-chemical effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2117-2124.
- [15] Alexeev A D. Closed porosity in fossil coals[J]. Fuel, 1999, 78: 635-638.