

文章编号:0253-9993(2013)03-0435-06

基于显微 CT 的构造煤渗流孔精细表征

宋晓夏^{1,2}, 唐跃刚¹, 李 伟², 冯增朝³, 康志勤³, 李妍均⁴, 相建华²

(1. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 3. 太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024; 4. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042)

摘要:利用显微 CT 技术对重庆市中梁山南矿构造煤的渗流孔进行了精细定量表征。研究发现:构造煤孔隙直径一般小于 10 μm , 但不同类型构造煤的孔隙分布特征有着明显差别。随着构造变形的增强, 煤的孔隙数量、面孔隙度逐渐增大。原生-碎裂煤的孔隙以原生孔为主; 碎裂煤脆性破坏加剧, 角砾孔增加; 碎粒煤碎粒孔和微裂隙发育, 平均孔径加大; 鳞片煤受到强烈剪切作用, 煤颗粒在脆性破碎的基础上, 同时具有韧性变形特征, 包括局部揉皱和粉末状糜棱质, 充填部分孔隙, 造成平均孔径下降。构造煤孔隙三维建模表明, 随着应力作用的增强, 构造煤的孔隙度、孔比表面积、孔体积及最大连通孔隙团不断增高。

关键词:构造煤; 渗流孔; 显微 CT; 煤层气; 连通孔隙团

中图分类号: P618. 11 **文献标志码:** A

Advanced characterization of seepage pores in deformed coals based on micro-CT

SONG Xiao-xia^{1,2}, TANG Yue-gang¹, LI Wei², FENG Zeng-chao³, KANG Zhi-qin³,
LI Yan-jun⁴, XIANG Jian-hua²

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Mining Technology Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 4. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China)

Abstract: The advanced quantitative characterization of seepage pores of deformed coals in Zhongliangshan Southern coalmine, Chongqing, was studied by micro-CT. The results show that the pore diameter of deformed coals is commonly less than 10 μm , but the pores distribution characteristics are different among various types of deformed coals. Pore numbers and areal porosity increase with the intensity of tectonic deformation. For primary-cataclastic coal, the primary pore is the major pore types, and interbreccia pores from angular particles increase in cataclastic coal with stress increasing. For granulated coal, intergranular pores and micro-fractures are well-developed, and mean pore diameter increases. The intense shear failure resulted in the brittle-ductile deformation, including local wrinkle structure and dusty mylonite in flake coal. Coal particles filled in some fractures and pores, which results in the reduction of mean pore diameter. The spatial visualization of pores indicate that porosity, pore surface area, pore volume and the distribution of max connective pores group increases along with stress strengthen.

Key words: deformed coals; seepage pores; micro-CT; coalbed methane; connective pores group

煤是一种对温度、压力十分敏感的有机岩石, 与其它坚硬岩石相比, 很容易产生变形和流变^[1]。我

国煤盆地经历多期次构造演化, 导致煤体结构、煤的物理特性和化学结构发生了强烈的变化^[2-5], 使煤的

收稿日期: 2012-12-05 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05062-009); 国家青年自然科学基金资助项目(41102092)

作者简介: 宋晓夏(1967—), 男, 山西原平人, 博士研究生。Tel: 0351-6014470, E-mail: songxiaoxia@tyut.edu.cn。通讯作者: 唐跃刚(1958—), 男, 教授, 博士生导师。Tel: 010-62339302, E-mail: tyg@vip.163.com

孔隙结构变得更为复杂,进而影响煤层气的赋存和运移,增大了煤层气的抽采难度。根据煤层气的运移、储集特征,甲烷在孔径大于 1 μm 的孔隙中表现为渗流运动^[6]。研究构造煤渗流孔分布特征对煤与瓦斯突出防治及煤层气勘探开发具有一定的意义。

测定煤孔隙结构的常规方法有:光学显微镜法、电子显微镜法^[7]、气体吸附法^[8-9]、压汞法^[10-12]等,并在构造煤研究方面得到广泛应用。例如,吴俊等^[13],张井等^[14],Li 等^[15]采用压汞法研究构造煤孔隙结构与煤层气富集及煤与瓦斯突出的关系;琚宜文等^[16]和范俊佳等^[17]采用压汞法、X 射线衍射、液氮吸附法和高分辨透射电镜,从煤的变形变质角度分析构造煤孔隙结构的变化特征,表明构造应力对煤孔隙结构的变形起着明显的控制作用。

CT 技术作为研究煤孔裂隙结构的一种新手段,具有无损化、精细化、量化、三维数字化等优点,因而颇受人们青睐。Van 等^[18]和姚艳斌等^[19]利用 X-CT 试验获取煤中矿物、显微组分、孔裂隙的分布信息;Coles 等^[20]和 Karacan 等^[21]采用 CT 技术研究煤孔裂隙中气体吸附和运移特征;许彦卿等^[22]从 CT 尺度上分析砂岩渗透率随渗透水压的变化规律;王家禄等^[23]通过 CT 试验分析岩石孔隙度的分布情况和变

化特征;孟巧荣等^[24]利用显微 CT 技术定量研究焦煤孔隙结构形态特征;姚艳斌等^[25]运用 X-CT 定量表征不同煤级煤中孔裂隙的发育程度和空间展布特征。此外,部分学者^[26-28]利用显微 CT 技术进行不同温度下煤岩热破裂的细观研究。然而,利用 CT 技术对构造煤孔隙特征的研究却很少报道^[29]。笔者利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 $\mu\text{CT}225\text{kVFCB}$ 型高精度 CT 试验分析系统,对不同类型构造煤样品进行三维 CT 扫描成像,精细表征构造煤渗流孔特征。

1 样品采集与实验方法

样品采自重庆市中梁山南矿二叠系龙潭组煤层。依据文献^[30],煤样可分为原生-碎裂煤、碎裂煤、碎粒煤和鳞片煤 4 类,其变形特征见表 1。

按照 GB/T 6948—2008 使用 Leica DM4500P 偏光显微镜测定煤的镜质组随机反射率及显微组分定量分析(表 1)。结果表明,煤的镜质组反射率为 1.50% ~ 1.59%,煤类均属焦煤。不同类型构造煤显微组分差异较小,均以镜质组为主。采用 Quanta-200F 型场发射扫描电镜对煤样的孔隙类型进行观测和分析。

表 1 实验煤样特征

Table 1 Features of the experimental samples

样品编号	煤层	$R_o/\%$	显微组成/%			构造煤类型	煤样变形特征
			镜质组	惰质组	矿物		
Z1	K7a	1.56	72.3	7.7	20.0	原生-碎裂煤	煤原生结构保留,宏观煤岩类型清晰可辨。发育垂直层面的裂隙,手试强度较大,可掰成小碎块
Z2	K5	1.57	67.8	17.7	14.5	碎裂煤	
Z3	K8	1.50	77.4	13.2	9.4	碎粒煤	煤原生结构遭到破坏,层理不可分辨。煤中剪切裂隙密集发育,方向不一。手试强度低,可捏成细小颗粒
Z4	K9+K10	1.59	65.6	17.7	16.7	鳞片煤	受强烈剪切作用,呈鳞片状结构。断面常见微型褶曲。煤质疏松,极易剥离,用手轻捏即成粉末

CT 试验分析系统为 $\mu\text{CT}225\text{kVFCB}$ 型高精度扫描仪,主要部件由 Phoenix 微焦点 X 光机和 Paxscan4030 数字平板探测器组成。扫描单元分辨率为 0.194 mm/放大倍数,本文的观测放大比为 115 倍,扫描单元的尺寸为 1.69 μm ,即可分辨 1.69 μm 孔径的孔隙。

CT 扫描是利用 X 射线穿透物质的能力,物质密度越大,在 CT 图像上的亮度就越高,表现为白色;孔隙和裂隙的密度最小,表现为黑色。因此,通过 CT 灰度图片可以分析不同类型构造煤孔隙内部结构,而可视化的三维数字 CT 模型可对孔隙连通性、渗透性

进行细观研究。

手工挑选 4 种类型的构造煤煤样,粒径 1 cm 左右,在细砂纸上磨成直径 1 mm、高度 7 mm 的近圆柱体试件。扫描前,将试件固定在 CT 机工作转台的中心位置。显微 CT 机工作电压为 70 kV,电流 70 μA ,探测器帧数为 1.0 fps,叠加帧数为 2。转台每旋转 0.9°扫描 1 次,共扫描 400 幅。对扫描后的图片进行 CT 剖面的重建,每个煤样获得 1 000 张剖面。为了便于对比,不同煤样均选取第 500 层切片内接最大正方形内的图像进行分析(图 1)。再利用 CT 图像分析软件对图 1 进行二值化处理,从图 1 中分割出孔隙像

素,经二维通道计算得到孔隙结构图(图2),图2用不同颜色直观地区分不同大小的孔隙。

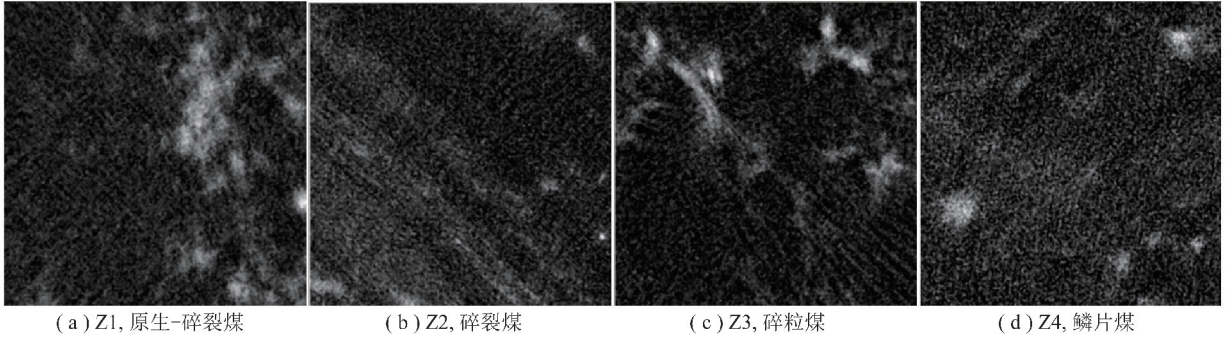


图1 构造煤孔隙结构显微CT剖面(放大115倍)

Fig.1 Micro-CT profiles of pore structure of deformed coals (×115)

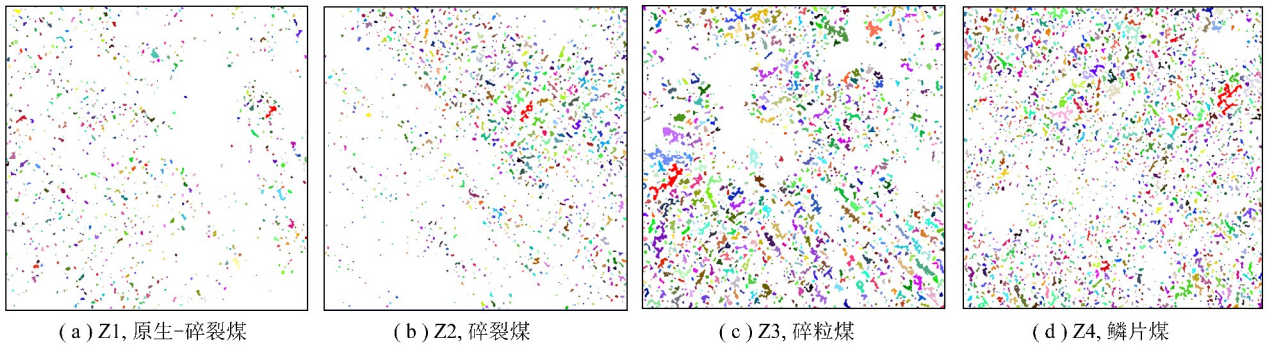


图2 二值化处理后的构造煤孔隙分布

Fig.2 Pore distribution of deformed coals after binary treatment

2 构造煤渗流孔分布特征

图2显示出了不同类型构造煤的孔隙分布状况,可见每张CT图像中都包含大量的孔隙。根据从图像中采集的孔隙数据特点,以最大分辨率1.69 μm为下限,分出组距为5 μm的4组孔径数据,统计结果见表2。

分析表明,构造煤孔隙直径一般小于10 μm,但不同类型的构造煤孔隙分布特征有着明显的差别。原生-碎裂煤孔隙以近圆形为主,分布稀疏,数量较少,面孔隙度低。扫描电镜下显示其孔隙类型主要为原生孔和变质气孔(图3(a));随着构造变形的增

强,碎裂煤孔隙数量和面孔隙度增大,平均孔径加大,这与煤颗粒破碎形成的角砾孔有关(图3(b))。碎粒煤孔隙遍布整个切面,形状多不规则,面孔隙度和平均孔径继续增大。其中,孔径大于10 μm的孔隙显著增加。在扫描电镜下观察,煤破碎成楔状、板条状碎粒,微裂隙发育(图3(c),(d))。碎粒之间形成碎粒孔,加之微裂隙大量出现,导致孔隙数量明显上升;鳞片煤孔隙数量和面孔隙度最大,但平均孔径比碎粒煤略有下降。扫描电镜下可见,由于受强烈的构造剪切变形,形成鳞片结构(图3(e)),进而形成泥状、粉末状糜棱质(图3(f)),堵塞了部分孔裂隙,造成平均孔径的下降。

表2 构造煤孔隙参数统计

Table 2 Pore parameters statistics of deformed coals

样品编号	面孔隙度/%	各孔径段孔隙个数				孔隙个数	平均孔径/μm
		1.69 ~ 5 μm	5 ~ 10 μm	10 ~ 15 μm	>15 μm		
Z1	4.72	587	377	32	7	1 003	4.92
Z2	6.43	725	484	65	7	1 281	5.08
Z3	16.83	849	707	209	78	1 843	6.33
Z4	19.98	1 121	1 020	289	76	2 506	6.20

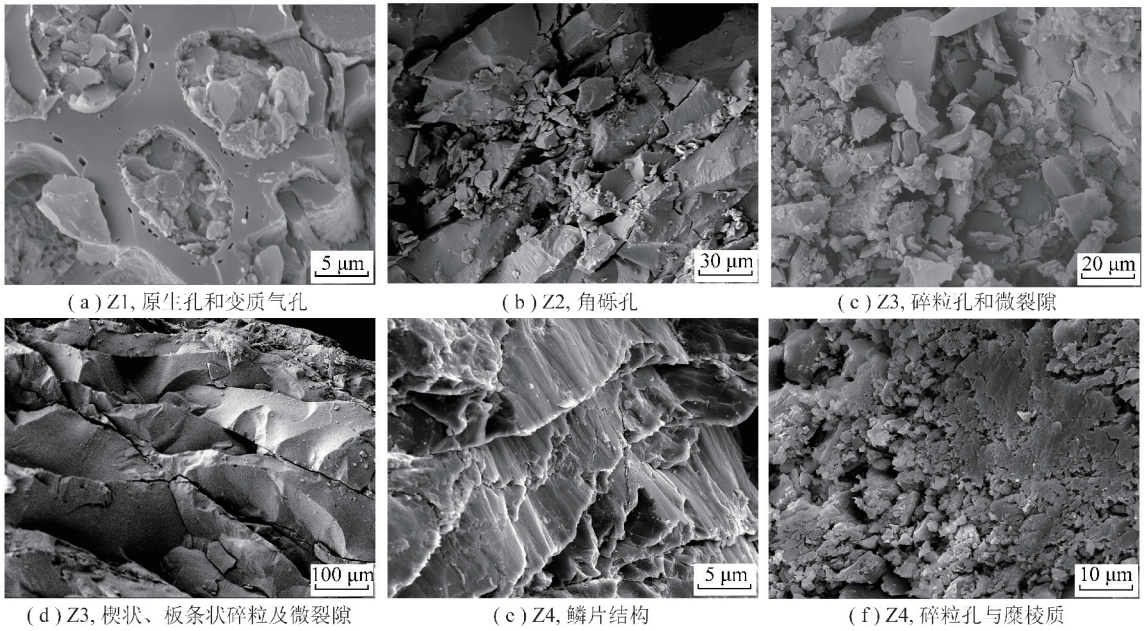


图3 构造煤孔隙类型及显微构造

Fig. 3 Pore types and micro-structure of deformed coals

3 构造煤渗流孔的空间配置

煤孔隙的连通性对煤层渗透性有显著影响,且孔径大于 $1 \mu\text{m}$ 的孔隙对渗透率贡献最大。采用显微CT技术,能够用三维可视化的方式直观地显示渗流孔的空间展布特征。

为了模拟构造煤孔隙的空间配置关系,将CT扫描的剖面图依次叠放在一起,即可实现煤样的三维重构。每个煤样均选择第200~550层切片进行重构,

建立的数字模型为 $350 \times 350 \times 350$ 个像素的正方体,实际尺寸为 $0.592 \text{ mm} \times 0.592 \text{ mm} \times 0.592 \text{ mm}$ (图4)。再对三维数字模型二值化,从煤样中分割出孔隙像素点,用边长为1个像素的小立方体单元代替孔隙像素点,相互连通的孔隙构成一个孔隙团,以此判断模型中孔隙的连通状态,计算出最大连通孔隙团,并绘制其在三维空间中的随机分布形状。不同类型构造煤最大连通孔隙团在空间的分布如图5所示,分析结果见表3。

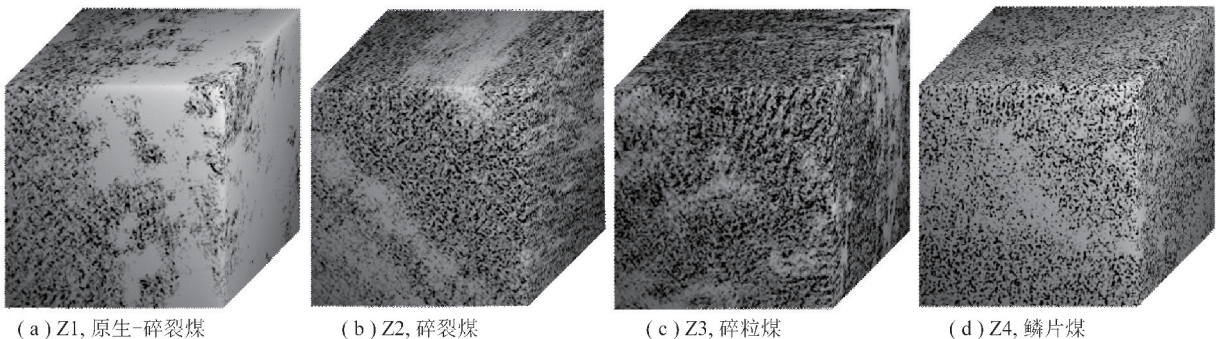


图4 构造煤三维结构模型

Fig. 4 Three-dimensional structure of deformed coals

由表3可知,不同类型构造煤的孔隙空间分布状态和连通性有显著差异。原生-碎裂煤孔隙度、孔比表面积最小。最大连通孔隙团规模很小,呈雪花片状局限在一个很小的区域内,没有形成连通模型两个相对面的渗流通道(图5(a))。表明煤样的孔隙连通性差,煤层气大多数聚集在不连通的孔隙中,不利于抽采。

随着构造变形增强,碎裂煤孔隙度上升。其中,封闭孔比表面积变化不大,开放孔比表面积迅速增大,最大孔隙团规模变大,形成连通模型相对面的渗流通道,孔隙团内部呈镂空状,分布较局限(图5(b))。原因可能是煤体破碎形成的角砾孔、裂隙孔改善了孔裂隙间的连通性,加大了孔隙度。

与碎裂煤相比,碎粒煤孔隙度显著提升,开放孔

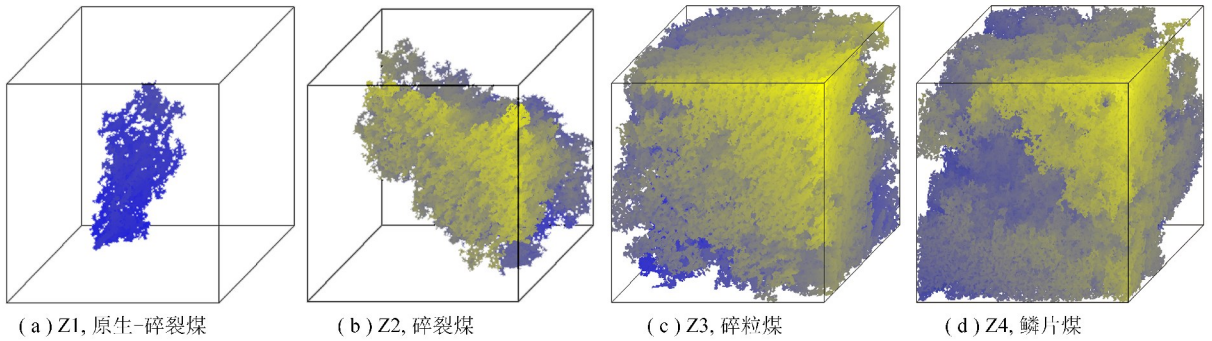


图5 构造煤最大连通孔隙团分布

Fig. 5 The distribution of max connective pores group in deformed coals

表3 构造煤三维CT模型孔隙参数统计

Table 3 Pore parameters of 3D CT sample of deformed coals

样品编号	构造煤类型	孔隙度/%	孔比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)		开放孔比表面积所占比例/%	总体积/($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	最大连通团占总体积之比/%
			开放孔	封闭孔			
Z1	原生-碎裂	5.20	0.005 7	0.127 1	4.29	0.030	0.28
Z2	碎裂	8.10	0.073 8	0.134 7	35.40	0.060	3.35
Z3	碎粒	14.44	0.222 5	0.089 1	71.41	0.108	11.24
Z4	鳞片	17.10	0.286 0	0.149 7	65.64	0.135	12.18

比表面积提升了近3倍,但封闭孔有所降低。最大连通孔隙团几乎充满了模型的整个区域(图5(c))。表明构造应力不仅导致碎粒孔、微裂隙的形成,而且促使封闭孔破碎,增加了孔裂隙的连通性,导致煤中游离气体大多聚集在开放通道中,增加了煤与瓦斯突出的可能性,这与张井等^[14]的研究结果一致;鳞片煤孔隙度最大(图5(d)),但与碎粒煤相比,封闭孔所占比例有所上升。这是因为经过了强烈剪切变形的鳞片煤,煤颗粒已破碎成粉末状、泥状的糜棱质,填充了一部分孔隙,增加了封闭孔数量(图3(f))。

4 结 论

(1)构造煤孔隙直径一般小于 $10 \mu\text{m}$,但不同类型构造煤的孔隙分布特征差异显著。随着构造变形的增强,煤的孔隙数量、面孔隙度逐渐增大。原生-碎裂煤的孔隙以原生孔为主;碎裂煤角砾孔增加;碎粒煤碎粒孔和微裂隙发育,平均孔径加大;鳞片煤受到强烈剪切作用,煤颗粒在脆性破碎的基础上,同时具有韧性变形特征,包括局部揉皱和粉末状糜棱质,并填充部分孔隙,造成平均孔径下降。

(2)随着应力作用的增强,构造煤的孔隙度、孔比表面积、孔体积及最大连通孔隙团不断升高。

研究得到重庆市国土资源与房屋管理局科技项目“重庆市煤层气赋存分布规律及开采地质条件研

究——以中梁山矿区为例”的资助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Cao D Y, Li X M, Deng J M. Coupling effect between coalification and tectonic-thermal events geological records of geodynamics of sedimentary basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 52-60.
- [2] Ju Y W, Jiang B, Hou Q L, et al. Relationship between nano-scale deformation of coal structure and metamorphic-deformed environments[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 1784-1795.
- [3] Ju Y W, Li X S. New research progress on the ultrastructure of tectonically deformed coal[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19: 1455-1466.
- [4] Li X S, Ju Y W, Hou Q L, et al. Spectra response from macromolecular structure evolution of tectonically deformed coal of different deformation mechanisms[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55: 1269-1279.
- [5] Hou Q L, Li H J, Fan J J, et al. Structure and coalbed methane occurrence in tectonically deformed coals[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55: 1755-1763.
- [6] 聂百胜, 张 力, 马文芳. 煤层甲烷在煤孔隙中扩散的微观机理[J]. *煤田地质与勘探*, 2000, 28(6): 20-22.
Nie Baisheng, Zhang Li, Ma Wenfang. Diffusion micro-mechanism of coal bed methane in coal pores[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2000, 28(6): 20-22.
- [7] 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.

- [8] 陈萍,唐修义. 低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究[J]. 煤炭学报,2001,26(5):552-556.
Chen Ping, Tang Xiuyi. The research on the adsorption of nitrogen in low temperature and micro-pore properties in coal[J]. Journal of China Coal Society,2001,26(5):552-556.
- [9] 降文萍,宋孝忠,钟玲文. 基于低温液氮实验的不同煤体结构煤的孔隙特征及其对瓦斯突出影响[J]. 煤炭学报,2011,36(4):609-614.
Jiang Wenping, Song Xiaozhong, Zhong Lingwen. Research on the pore properties of different coal body structure coals and the effects on gas outburst based on the low-temperature nitrogen adsorption method[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(4):609-614.
- [10] Yao Y B, Liu D M, Tang D Z, et al. Fractal characterization of seepage-pores of coals from China-an investigation on permeability of coals[J]. Computers and Geosciences,2009,35:1159-1166.
- [11] Cai Y D, Liu D M, Yao Y B, et al. Fractal characteristics of coal pores based on classic geometry and thermodynamics models[J]. Acta Geologica Sinica,2011,85(5):1150-1162.
- [12] Qu Z H, Geoff G X, Jiang B, et al. Experimental study on the porous structure and compressibility of tectonized coals[J]. Energy & Fuels,2010,24:2964-2973.
- [13] 吴俊,金奎勋,童有德,等. 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, Tong Youde, et al. 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.
- [14] 张井,于冰,唐家祥. 瓦斯突出煤层的孔隙结构研究[J]. 中国煤田地质,1996,8(2):71-74.
Zhang Jing, Yu Bing, Tang Jiaxiang. Pore structure of coal seams with proneness of outburst[J]. Coal Geology of China,1996,8(2):71-74.
- [15] Li H Y, Ogawa Y, Shimada S. Mechanism of methane flow through sheared coals and its role on methane recovery[J]. Fuel,2003,82:1271-1279.
- [16] 琚宜文,姜波,王桂梁,等. 构造煤结构及储层物性[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2005.
Ju Yiwen, Jiang Bo, Wang Guiliang, et al. Tectonic coals; structures and physical properties of reservoirs[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press,2005.
- [17] 范俊佳,琚宜文,侯泉林,等. 不同变质变形煤储层孔隙特征与煤层气可采性[J]. 地学前缘,2010,17(5):325-335.
Fan Junjia, Ju Yiwen, Hou Quanlin, et al. Pore structure characteristics of different metamorphic-deformed coal reservoirs and its restriction on recovery of coalbed methane[J]. Earth Science Frontiers,2010,17(5):325-335.
- [18] Van Geet M, Swennen R, David P. Quantitative coal characterisation by means of microfocuss X-ray computer tomography, colour image analysis and backscattered scanning electron microscopy[J]. International Journal of Coal Geology,2001,46:11-25.
- [19] Yao Y B, Liu D M, Che Y, et al. Non-destructive characterization of coal samples from China using microfocuss X-ray computed tomography[J]. International Journal of Coal Geology,2009,80:113-123.
- [20] Coles M, Hazlett R D, Spanne P, et al. Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,1998,19:55-63.
- [21] Karacan C Ö, Okandan E. Adsorption and gas transport in coal microstructure: investigation and evaluation by quantitative X-ray CT imaging[J]. Fuel,2001,80:509-520.
- [22] 作彦卿,曹广祝,丁卫华. 砂岩渗透系数随渗透水压变化的CT试验[J]. 岩土工程学报,2005,27(7):780-785.
Wu Yanqing, Cao Guangzhu, Ding Weihua. Permeability experiment of sandstone under variable seepage pressures by using X-ray CT real-time observation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,27(7):780-785.
- [23] 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 Sinica,2009,30(6):887-897.
- [24] 孟巧荣,赵阳升,胡耀青,等. 焦煤孔隙结构形态的实验研究[J]. 煤炭学报,2011,36(3):487-490.
Meng Qiaorong, Zhao Yangsheng, Hu Yaoqing, et al. Experimental study on pore structure and pore shape of coking coal[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(3):487-490.
- [25] Yao Y B, Liu D M, Cai Y D. Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography[J]. Science China Earth Sciences,2010,53(6):854-862.
- [26] 赵阳升,孟巧荣,康天合,等. 显微CT试验技术与花岗岩热破裂特征的细观研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(1):28-34.
Zhao Yangsheng, Meng Qiaorong, Kang Tianhe, et al. Micro-CT experimental technology and meso-investigation on thermal fracturing characteristics of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(1):28-34.
- [27] 康志勤,赵阳升,杨栋. 油页岩热破裂规律分形理论研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(1):90-96.
Kang Zhiqin, Zhao Yangsheng, Yang Dong. Theoretical research on thermal cracking fractals laws of oil shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(1):90-96.
- [28] 于艳梅,胡耀青,梁卫国,等. 瘦煤热破裂规律显微CT试验[J]. 煤炭学报,2010,35(10):1696-1700.
Yu Yanmei, Hu Yaoqing, Liang Weiguang, et al. Micro-CT experimental research of lean coal thermal cracking laws[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(10):1696-1700.
- [29] Li S, Tang D Z, Xu H, et al. Advanced characterization of physical properties of coals with different coal structures by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography[J]. Computer and Geosciences,2012,48:220-227.
- [30] 琚宜文,姜波,侯泉林,等. 构造煤结构-成因新分类及其地质意义[J]. 煤炭学报,2004,29(5):513-517.
Ju Yiwen, Jiang Bo, Hou Quanlin, et al. The new structure-genetic classification system in tectonically deformed coals and its geological significance[J]. Journal of China Coal Society,2004,29(5):513-517.