

李 伟,要惠芳,刘鸿福,等. 基于显微 CT 的不同煤体结构煤三维孔隙精细表征[J]. 煤炭学报,2014,39(6):1127-1132. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0920  
Li Wei, Yao Hui-fang, Liu Hong-fu, et al. Advanced characterization of three-dimensional pores in coals with different coal-body structure by Micro-CT[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6):1127-1132. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0920

## 基于显微 CT 的不同煤体结构煤三维孔隙精细表征

李 伟<sup>1</sup>,要惠芳<sup>1</sup>,刘鸿福<sup>1</sup>,康志勤<sup>2</sup>,宋晓夏<sup>1</sup>,冯增朝<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原 030024;2. 太原理工大学 采矿工艺研究所,山西 太原 030024)

**摘要:**为了定量研究不同煤体结构煤的孔隙连通性和渗透能力的差异性,以渭北煤田韩城矿区为研究区,通过显微 CT 三维空间分析技术,采用多孔介质三维逾渗理论,开展了不同结构煤的孔隙三维建模分析,实现了对不同煤体结构煤中孔隙分布三维可视化的精细表征。结果表明:构造变形对煤的孔隙结构有深刻的影响;不同变形机制对煤的孔隙度、孔隙团数和最大孔隙团规模有着不同的影响,导致逾渗概率发生明显的变化;三维逾渗概率表明煤孔隙连通性和渗透率随变形程度增加呈现先升后降的变化趋势。碎裂煤孔隙团连通性最好,渗透性最强;糜棱煤孔隙团连通性最差,渗透性最弱。研究认为脆性破坏可促进外生孔和微裂隙的发育程度,加强孔裂隙间的连通性,提升煤岩渗透性;在脆韧性-韧性变形作用下,孔隙、微裂隙、矿物以及煤岩分布的非均质性明显增强,造成孔隙连通性变差,渗透率降低。

**关键词:**孔隙;煤体结构;显微 CT;煤层气;逾渗;孔隙团

**中图分类号:**P618.11 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2014)06-1127-06

### Advanced characterization of three-dimensional pores in coals with different coal-body structure by micro-CT

LI Wei<sup>1</sup>, YAO Hui-fang<sup>1</sup>, LIU Hong-fu<sup>1</sup>, KANG Zhi-qin<sup>2</sup>, SONG Xiao-xia<sup>1</sup>, FENG Zeng-chao<sup>2</sup>

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Mining Technology Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to quantitatively study the difference of pore connectivity and seepage capacity in coals with different coal-body structure, advanced 3D visualized model of pores for coal samples with different structure collected from Hancheng Mine, Weibei coalfield was done using a 3D-modeling technique and applying the theory of porous media 3D percolation. The spatial visualization of pores indicates that tectonic deformation has significant influence on coal pore structure. The different deformation mechanisms variously affect the porosity, pore clusters and the max pore cluster, resulting in obvious change in percolation probability. Variation of percolation probability show that pore connectivity and permeability of coals present an inverse-U-shaped relationship with the increase in tectonic deformation. The cataclastic coal has the best pore connectivity and the highest permeability, while the smallest values for these two parameters occur in mylonitic coal. The study show that brittle failure may induce the expansion of microfractures and exogenous pores, and thus results in good connectivity and high permeability. The milonitic coal has poor pore connectivity and low permeability due to the uneven distribution of pores, fractures, minerals, and maceral caused by brittle-ductile and ductile deformation effect.

收稿日期:2013-07-01 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2009ZX05062-009,2011ZX05062-009);国家自然科学基金和煤炭联合基金资助项目(U1261102)

作者简介:李 伟(1987—),男,山西平遥人,博士研究生。E-mail: pingyaoliwei@126.com。通讯作者:要惠芳(1959—),女,山西临汾人,副教授。E-mail: yhf5908@163.com

**Key words:** pore; coal-body structure; micro-CT; coalbed methane; percolation; pore clusters

煤是对应力和应变非常敏感的一种有机岩石,在构造应力作用下,原生结构煤的物理结构、化学成分等将发生显著的变化,从而形成具有不同结构特征的、不同类型的构造煤<sup>[1-4]</sup>。研究表明,构造应力改变了原生结构煤的显微构造和孔隙系统,在不同变形机制作用下,构造煤孔隙系统表现出明显的差异性<sup>[5-7]</sup>。

目前,应用于构造煤孔隙表征的常规方法可分为两类:一类是采用压汞法<sup>[8-10]</sup>和低温氮吸附法<sup>[11-12]</sup>间接推断出煤的孔隙结构。然而,这两种方法只能测试到开放的、连通的孔隙,可供信息存在一定的局限性。此外,压汞法必须考虑高压对煤的弹性压缩效应<sup>[13-14]</sup>,实验过程中很有可能会破坏煤的原生孔隙系统;另一类是将煤样制成煤砖或光片,采用光学显微镜或扫描电镜<sup>[15]</sup>对孔隙进行观测。但这种方法的缺陷在于仅能提供样品某个剖面或表面的孔隙信息,无法认识其空间分布规律。以无损化、量化、精细化特点的 CT 扫描技术可弥补这些不足<sup>[16-17]</sup>。该技术可再现物体内部的立体结构,灵活直观地进行形态学研究,定量了解煤岩内部孔隙结构的非均质变化程度,为煤岩的微观研究提供了很好的实验平台。

煤体中孔隙数量的多少、分布及连通程度从结构上决定了流体在孔隙中的渗透能力,而逾渗概率(单位体积的多孔介质中最大孔隙团体积所占的比率)反映了多孔介质中流体的运动与扩散现象<sup>[18-19]</sup>,表

示了孔隙的连通状态,成为衡量多孔介质渗透率的重要指标<sup>[20]</sup>。Stauffer 和 Aharony<sup>[21]</sup>对单一多孔介质的逾渗机理进行了研究,得出多孔介质渗透性随孤立孔隙团数量的增大而降低;吕兆兴<sup>[22]</sup>通过对煤体中孔隙的三维逾渗概率与渗透性的分析,提出了基于三维逾渗概率的煤微观结构连通性分类方案。

笔者采用 CT 技术与三维逾渗理论,建立了不同煤体结构煤的孔隙立体模型,定量评价了不同类型构造煤内部大孔级( $d > 1 \mu\text{m}$ )孔隙连通性和渗透率的变化特征。

## 1 实验方法与试样

为揭示原生结构煤和构造煤孔隙结构的差异性,对渭北煤田韩城矿区的 3 对矿井进行了井下观测和样品系统采集。笔者对 4 块代表性煤样进行了 CT 扫描试验。所用扫描仪为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  $\mu\text{CT}225\text{kVFCB}$  型高精度显微 CT 试验系统,主要包括微焦点 X 光机、探测器、机座和数据采集系统,扫描单元分辨率为  $0.194 \text{ mm}/\text{放大倍数}$ 。本次实验观测放大比为 187 倍,即最小孔径分辨率为  $1 \mu\text{m}$ 。CT 扫描技术原理见文献<sup>[23-24]</sup>。按照据宜文等<sup>[25]</sup>提出的分类方案,实验样品可分为原生结构煤、碎裂煤、鳞片煤和糜棱煤 4 类。样品煤岩特征和宏观变形特征见表 1。

表 1 实验煤样特征

Table 1 Features of the experimental samples

样品编号	采样地点	煤体结构	煤岩组分/%			$R_0/\%$	煤样变形特征
			镜质组	惰质组	矿物		
HC-1	桑树坪煤矿	原生	78.2	13.6	8.2	1.83	煤岩类型界限清晰,原生条带状结构明显,可呈较大棱角状块体,块体间无明显相对位移
HC-2	下峪口煤矿	碎裂	74.8	23.1	2.1	1.77	煤原生结构保留,宏观煤岩类型清晰可辨,裂隙表面可见擦痕,煤体可呈棱角状块体,但块体间已有相对位移。煤质坚硬,不易捏碎
HC-3	桑树坪煤矿	鳞片	78.9	17.9	3.2	1.79	煤原生结构遭到破坏,具鳞片结构。煤颗粒发生旋转,呈大小不一的碎粒。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
HC-4	象山煤矿	糜棱	79.1	11.9	9.0	1.86	煤受强烈构造作用发生塑性变形。颗粒呈鳞片状、弯曲状,可见揉皱构造。煤质疏松,极易剥离,用手轻捏即成粉末

选择样品新鲜断面上的镜煤或亮煤条带,构造煤变形强烈时,则选取光泽较亮部分,形态以近圆柱体,大小以高度为  $6 \sim 10 \text{ mm}$ 、直径约  $2 \text{ mm}$  的颗粒为宜。

将手选过的原生结构煤和构造煤在扫描电镜下进行观测,以尽量保证在微观尺度上代表该类煤体结构的特征,其显微结构如图 1 所示。将代表性试件放置于

CT 机工作转台的中心位置,并矫正到扫描区域中心位置。显微 CT 机工作电压为 70 kV,电流 70  $\mu\text{A}$ ,试件放大倍数 187 倍。随后对样品进行扫描,扫描速率为 0.9  $^\circ\text{C}/\text{幅}$ (共 400 幅)。将扫描后的图像进行重建得到二维 CT 切片。

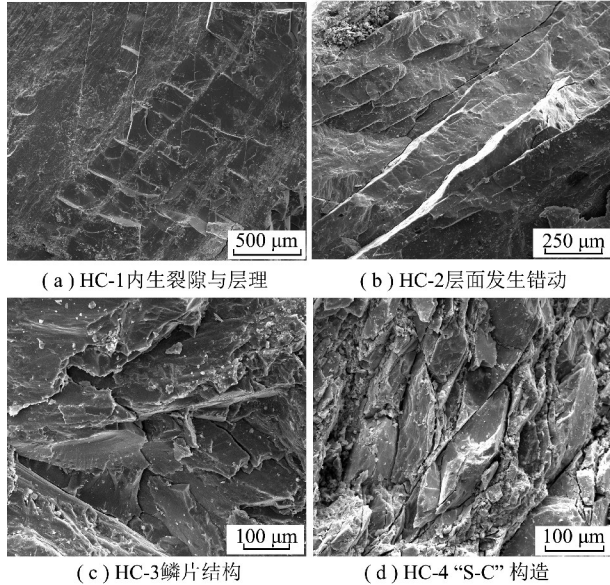


图 1 不同煤体结构煤显微构造

Fig. 1 Microstructure of coals with different coal-body structure

## 2 煤样 CT 三维重构

为获取不同煤体结构煤孔隙的三维空间分布状态,需对煤样进行三维重构,可分为 3 个步骤:三维数字模型建立;图像二值化及孔隙提取;孔隙团的三维重绘。煤样三维重构的原理是,将 CT 重建所得的不同切面图按空间坐标位置依序放置在一起。鉴于构造煤结构的非均质性,笔者利用不同煤体结构煤的二维 CT 重建图像,对每个煤样均选取 4 个区域进行重构(图 2 中的 A, B, C, D)。每个区域建立好的数字模型大小为  $350 \times 350 \times 350$  个像素,真实大小  $0.35 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$  的立方体。不同煤体结构煤的三维结构模型如图 3 所示,属灰度图像。在灰度图像上,每个像素点的灰度与物体密度相对应,其颜色由黑到白分别表示了不同的密度。煤由空隙(孔隙、裂隙)、矿物和有机组分三元介质组成,其中矿物密度最大,表现为白色;孔隙和裂隙的密度最小,表现为黑色;煤基质密度介于两者之间,表现为灰色。为了获得煤样孔隙分布信息,需对灰度图像进行二值化处理。

对三维模型做二值化处理,得到只由孔隙和固体骨架构成的数字模型。之后用边长为 1 个像素大小的小立方体单元代表该像素点对应的孔隙,统计相

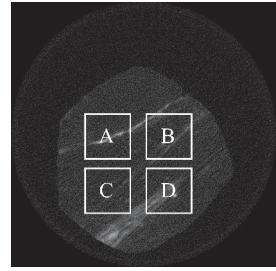


图 2 煤样三维 CT 数字模型的提取位置

Fig. 2 The position sketch map of 3D data of coal samples

互连通的孔隙像素就结合为一个孔隙团,比较这些团的大小并统计其像素数量。为了便于获取不同煤样的逾渗概率,仅对煤样三维 CT 模型中的最大孔隙团进行了重绘。图 4 为不同煤体结构煤的最大孔隙团在三维空间中的分布形状。

## 3 不同煤体结构煤逾渗结果分析

表 2 列出了不同煤体结构煤三维数字 CT 模型逾渗概率的计算结果。图 4 显示出最大孔隙团在不同煤体结构煤中的分布是不同的。原生结构煤逾渗概率变化幅度较大,逾渗概率最小为 0.84%,最大值达 7.24%。最大孔隙团规模较小,所包含的孔隙像素平均约 150 万个,虽有时可连通模型两个相对的面,但孔隙团内部呈镂空状,分布比较局限,逾渗概率低,导致孔隙连通性差,渗透性能低。此外,团中孔隙平行分布,显示出煤层面割理方向渗透性优于端割理方位<sup>[26]</sup>;碎裂煤孔隙率增加较快(平均 18.26%),孔隙团数急剧下降,造成最大孔隙团规模急剧增大。相比原生煤,最大孔隙团所包含的孔隙像素迅速提升至 549 ~ 752 万个,而且最大孔隙团占据了较大的空间,基本充满了模型的整个区域,均贯通了模型的渗流通道,流体可以从其中的一个面渗透到另一个面,逾渗概率明显升高,造成煤孔隙连通性增大,渗透性升高。鳞片煤孔隙率相比碎裂煤降低,孔隙团数上升,说明封闭孔数量增加。最大孔隙团所含孔隙像素相比碎裂煤平均下降了 235 万个,规模下降,团内镂空范围加大,样品逾渗概率下降到 9.61%,渗透性下降,但孔隙连通性整体较好。此外,孔隙分布似呈现出相互平行的现象,时断时续;糜棱煤孔隙度最低,孔隙团数明显增多,最大孔隙团所含孔隙像素最少,规模最小,在煤样空间中只占有非常小的一块区域,逾渗概率显著下降。据逾渗理论<sup>[21]</sup>,孤立孔隙团数的上升将导致渗透率大幅度降低,孔隙团连通性很差,造成流体难以渗透。

三维 CT 重建结果表明构造应力深刻影响了煤的孔隙结构。原生结构煤结构致密,内部孔隙彼此



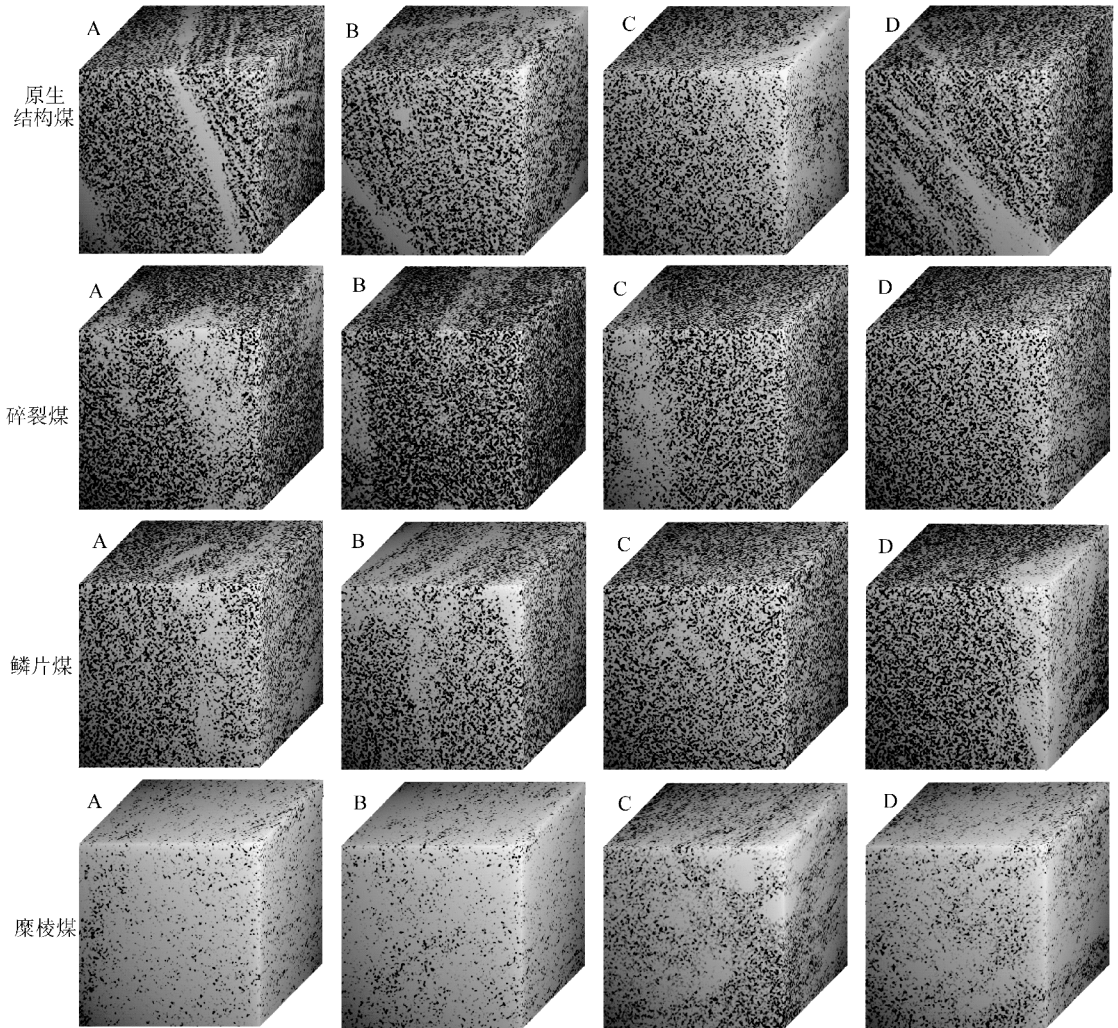


图3 不同煤体结构煤三维结构模型

Fig. 3 Three-dimensional structure of coals with different coal-body structure

孤立而不相连通,而孔隙与裂隙相连部位可形成较大的孔隙团,逾渗概率也明显提高;在构造应力作用下,煤可发生脆性碎裂作用,形成不规则状的微米级角砾。角砾间相互交叠支撑形成不规则的微裂隙和孔隙。这些微裂隙和孔隙彼此相互连通,造成最大孔隙团规模加大,逾渗概率升高,由此提高了煤储层渗透率。

随着构造作用的增强,煤可发生脆-韧性变形形成鳞片煤。该类构造煤具有一组密集的、平行排列的、薄片状的剪切裂隙。这些显微裂面可将煤中的孔隙与其他构造裂隙相连,造成孔隙分布呈现出相互平行的现象。然而,煤基质在强烈剪切变形作用下可形成磨圆状的细小碎粒。这些碎粒可充填孔隙、裂隙,使最大孔隙团规模下降,孔隙连通空间减少,渗透性下降;糜棱煤由于塑性变形,煤岩混杂,碎粒物质进一步研磨形成泥状、粉末状的糜棱质,常常堵塞孔裂隙。此外,在韧性剪切作用下,裂隙趋于闭合、断续而不连

通。在这种变形机制下,孔隙紧密压实、体积缩小、孤立分布,造成孔隙团数的迅速增大,逾渗概率骤降,使气体处于封闭状态,加大了煤与瓦斯突出的可能性。

#### 4 结 论

(1) 构造变形作用可以引起煤孔隙结构的变化,不同类型构造煤的孔隙度、孔隙团数、最大孔隙团规模呈现出明显的差异性,导致逾渗概率发生显著变化。脆性变形碎裂煤孔隙度最大,孔隙团数最少,最大孔隙团贯通了模型的渗流通道,逾渗概率最大;韧性变形糜棱煤孔隙度最小,孔隙团数最多,最大孔隙团规模很小,呈雪花片状局限在一个很小的区域内,逾渗概率最小。

(2) 三维逾渗理论研究表明脆性变形作用可加大孔裂隙间的连通性,提高煤储层渗透率;韧性变形作用造成煤岩物质重新排列,使孔隙体积缩小,裂隙闭合,连通性弱,导致煤储层渗透能力大大减弱。

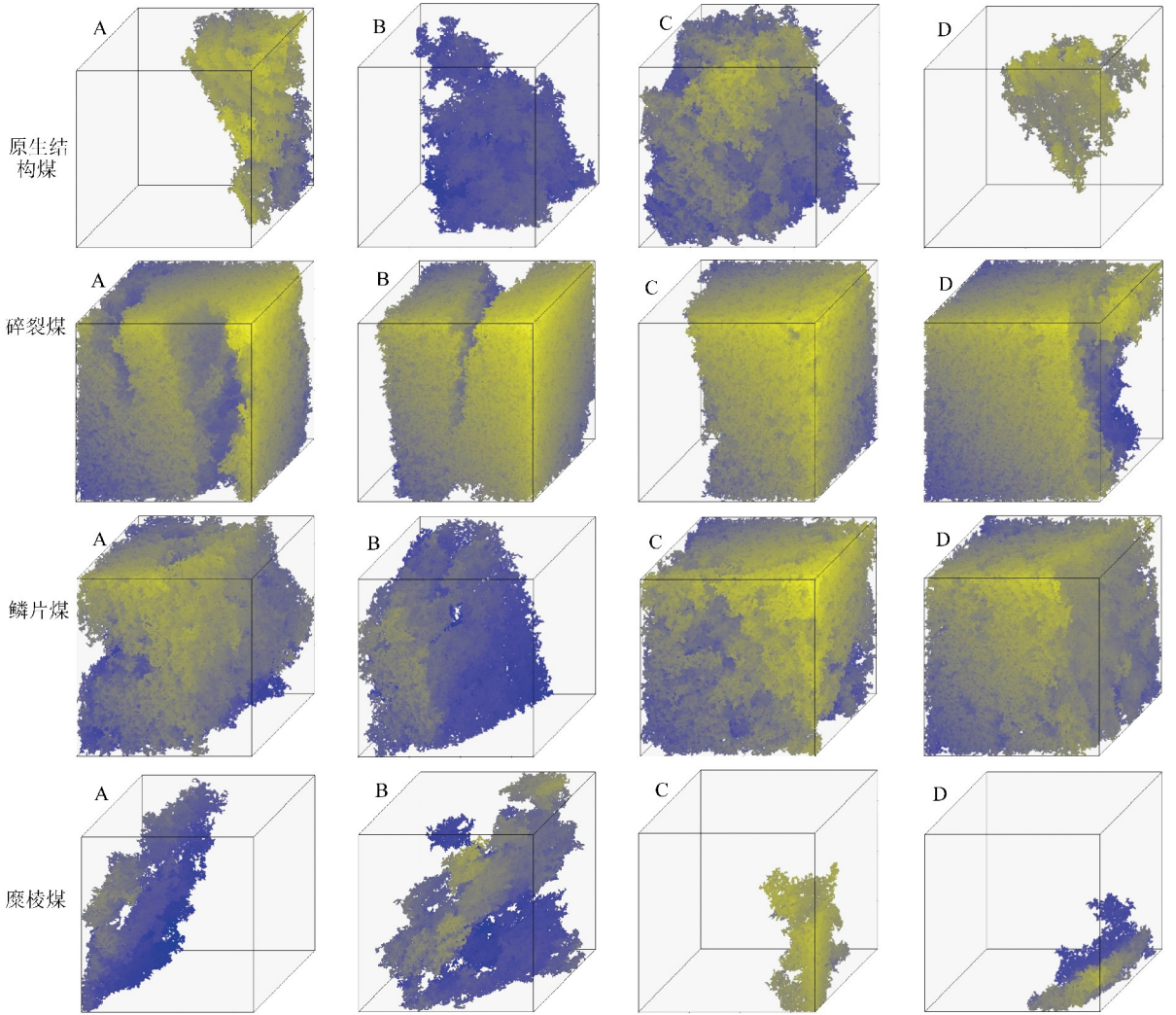


图4 煤样最大孔隙团空间分布形状

Fig. 4 The distribution of max pore cluster of coals with different coal-body structure

表2 不同煤体结构煤三维CT数字模型逾渗概率的计算结果

Table 2 The results of 3D percolation of CT samples of coals with different coal-body structure

样品编号	煤体结构	区域编号	孔隙度/%	孔隙团总数	最大团含像素数量	逾渗概率/%
HC-1	原生	A	11.50	150 440	951 874	2.22
		B	11.85	147 880	1 162 648	2.71
		C	14.64	143 169	3 106 274	7.24
		D	8.83	132 693	359 879	0.84
HC-2	碎裂	A	20.07	96 573	7 519 754	17.54
		B	17.35	115 695	6 022 102	14.05
		C	16.17	120 624	5 488 135	12.8
		D	19.45	104 907	6 833 238	15.94
HC-3	鳞片	A	15.35	136 915	3 980 835	9.28
		B	14.18	139 287	1 862 813	4.34
		C	16.65	127 874	4 903 302	11.44
		D	17.15	116 353	5 729 204	13.36
HC-4	糜棱	A	8.20	155 412	802 128	1.87
		B	9.72	147 353	1 453 359	3.39
		C	7.85	149 510	245 065	0.57
		D	7.76	154 016	281 233	0.66



## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 姜波,秦勇,琚宜文,等.构造煤化学结构演化与瓦斯特性耦合机理[J].*地学前缘*, 2009, 16(2): 262-271.  
Jiang Bo, Qin Yong, Ju Yiwen, et al. The coupling mechanism of the evolution of chemical structure with the characteristics of gas of tectonic coals[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2): 262-271.
- [4] Jiang B, Qu Z H, Wang G G X, et al. Effects of structural deformation on formation of coalbed methane reservoirs in Huaibei coalfield, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 82: 175-183.
- [5] Li M, Jiang B, Lin S F, et al. Tectonically deformed coal types and pore structures in Puhe and Shanchahe coal mines in western Guizhou[J]. *Mining Science and Technology*, 2011, 21(3): 353-357.
- [6] 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(11): 1755-1763.
- [7] 范俊佳,琚宜文,柳少波,等.不同煤储层条件下煤岩微孔结构及其对煤层气开发的启示[J].*煤炭学报*, 2013, 38(3): 441-447.  
Fan Junjia, Ju Yiwen, Liu Shaobo, et al. Micropore structure of coals under different reservoirs conditions and its implications for coalbed methane development[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(3): 441-447.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 宋晓夏,唐跃刚,李伟,等.中梁山南矿构造煤吸附孔分形特征[J].*煤炭学报*, 2013, 38(1): 134-139.  
Song Xiaoxia, Tang Yuegang, Li Wei, et al. Fractal characterization of adsorption pores of tectonic coals in Zhongliangshan southern coalmine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(1): 134-139.
- [13] Suuberg E M, Deevi S C, Yun Y. Elastic behavior of coals studied by mercury porosimetry[J]. *Fuel*, 1995, 74: 1522-1530.
- [14] Qu Z H, Wang G G X, Jiang B, et al. Experimental study on the porous structure and compressibility of tectonized coals[J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24: 2964-2973.
- [15] 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.
- [16] Yao Y B, Liu D M, Che Y, et al. Non-destructive characterization of coal samples from China using microfocus X-ray computed tomography[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 80: 113-123.
- [17] 宋晓夏,唐跃刚,李伟,等.基于显微CT的构造煤渗流孔精细表征[J].*煤炭学报*, 2013, 38(3): 435-440.  
Song Xiaoxia, Tang Yuegang, Li Wei, et al. Advanced quantitative characterization of seepage pores of deformed coals based on micro-CT[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(3): 435-440.
- [18] Sahimi M. Non-linear and non-local transport processes in heterogeneous media: From long-range correlated percolation to fracture and materials breakdown[J]. *Physics Reports*, 1998, 306: 213-395.
- [19] Stanley H E, Andrade Jr J S, Havlin S, et al. Percolation phenomena: A broad-brush introduction with some recent applications to porous media, liquid water, and city growth[J]. *Physical A*, 1999, 266: 5-16.
- [20] 王启立.石墨多孔介质成孔逾渗机理及渗透率研究[D].北京:中国矿业大学(北京), 2011.
- [21] Stauffer D, Aharong A. Introduction to percolation theory[M]. London: Taylor and Francis Press, 1991.
- [22] 吕兆兴.孔隙裂隙双重介质逾渗理论及应用研究[D].太原:太原理工大学, 2008.
- [23] Kalender W A. X-ray computed tomography[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, 51: 29-43.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Laubach S E, Marrett R A, Olson J E, et al. Characteristics and origins of coal cleat: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35: 175-207.