

周动,王辰,冯增朝,等.煤吸附解吸甲烷细观结构变形试验研究[J].煤炭学报,2016,41(9):2238-2245. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0007

Zhou Dong, Wang Chen, Feng Zengchao, et al. Experiment on the deformation of the meso-structure of coal during the methane adsorption and desorption[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2238-2245. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0007

## 煤吸附解吸甲烷细观结构变形试验研究

周 动,王 辰,冯增朝,赵 东,蔡婷婷

(太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室,山西 太原 030024)

**摘 要:**利用扫描电镜与CT扫描相结合的方法,通过对直径为8.5 mm的细观煤样进行不同压力下的吸附解吸甲烷试验,研究其内部细观结构的变形规律。研究表明,煤样是煤基质中含有少量黏土矿物质的天然非均质岩体;吸附解吸甲烷过程中,煤的细观结构变形分为膨胀变形(密度减小)与挤压变形(密度增大)。低吸附压力下,含黏土矿物质区域急剧膨胀,对邻近煤基质形成局部挤压,细观变形程度明显,压力升高后膨胀变形增强,挤压变形减弱;不含黏土矿物质的煤基质区域变形程度较低,近似于均匀变形。解吸后,煤不同区域的变形恢复能力与其非均匀程度有关,非均匀性越强,其变形恢复能力越差。

**关键词:**吸附;膨胀;挤压;黏土矿物质;CT

**中图分类号:**TD712

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-9993(2016)09-2238-08

### Experiment on the deformation of the meso-structure of coal during the methane adsorption and desorption

ZHOU Dong, WANG Chen, FENG Zeng-chao, ZHAO Dong, CAI Ting-ting

(Key Laboratory of In situ Property Improving under Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The changes of microstructure of coal sample with a diameter of 8.5 mm are observed by SEM and CT scanning during methane adsorption and desorption under different pressures. The study shows that coal is a kind of natural non-homogeneous rock consisting of coal matrix and a small amount of clay minerals. In the process of methane adsorption and desorption, the structure deformation of coal can be divided into expansion deformation (density decrease) and extrusion deformation (density increase). Under a low adsorption pressure, the regions containing clay minerals expand rapidly, which has a strong extrusion effect on the adjacent matrix of coal, and leads to significant deformation. With pressure increase, expansion deformation is enhanced and extrusion deformation is weakened. The coal matrix regions without clay mineral have a low degree of deformation, which can be approximated to homogeneous deformation. After desorption, the recovery abilities of different coal regions are related to the degree of non-uniform. The stronger the non-homogeneity, the worse the ability of deformation recovery.

**Key words:** adsorption; expansion; extrusion; clay minerals; CT

煤是一种天然的吸附剂,众多研究表明,煤在吸附甲烷、CO<sub>2</sub>等气体时会发生膨胀变形,并引起弹性

模量下降,力学强度降低等变化。由于煤中煤岩组分与矿物质成分的多样性<sup>[1]</sup>,以及不同尺度的孔隙裂

收稿日期:2016-01-04 修回日期:2016-04-05 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21373146,51304142);山西省基础研究计划资助项目(2013021029-3)

作者简介:周 动(1990—),男,山西忻州人,博士研究生。E-mail:zd407863794@126.com。通讯作者:冯增朝(1971—),男,陕西蒲城人,教授,博士生导师,博士。E-mail:zc-feng@163.com

隙不均匀分布,煤吸附气体后的膨胀变形具有非均匀特征<sup>[2]</sup>。J. Denis 等<sup>[3]</sup>对注入 3.8 MPa 的 CO<sub>2</sub> 后煤体积变化进行长达两个月的观测,发现煤不同方向具有不同的变形量,平均膨胀变形量为 0.34%; Liu Z. X. 等<sup>[4]</sup>试验表明在 0~1.8 MPa 吸附压力之间,煤吸附 CO<sub>2</sub> 变形量为 0~0.2%,且吸附压力与越高,膨胀变形越明显;Wu Y. 等<sup>[5]</sup>研究表明煤吸附 CO<sub>2</sub> 后的膨胀变形与破坏具有非均匀性,并推断其由煤非均匀孔隙裂隙结构引起。煤非均匀膨胀变形会导致其力学强度、渗流能力等多种物理性质发生变化。Karacan C. O. 等<sup>[6]</sup>研究表明煤结构膨胀变形时,趋向于挤压煤中孔隙发育或者有张开裂隙的区域获得膨胀的空间,因此吸附后煤渗流能力会降低;Zofia Majewska 等<sup>[7]</sup>对围压作用下煤吸附 CO<sub>2</sub> 后极限强度测定表明,吸附 CO<sub>2</sub> 对煤极限强度具有弱化作用;赵洪宝等<sup>[8]</sup>通过对甲烷气体吸附饱和前后煤样开展单轴压缩试验,表明吸附气体后煤岩的脆性增强但强度降低。

煤吸附甲烷或 CO<sub>2</sub> 气体后宏观物理性质的改变是由其内部细观的结构变形引起的,为了进一步了解煤细观的非均匀变形规律及其对煤结构的影响,更多细观的观测手段需要被利用。扫描电镜利用二次电子信号成像来观察样品的表面形态,可推断材料组分,揭示材料表面的微观结构<sup>[9]</sup>;CT 扫描基于不同密度物质对 X 射线吸收的差异,对物质内部结构进行无损探测,从而确定材料的物理参量<sup>[10-11]</sup>,这两种手段成为探测材料细观结构的主要途径。国内外众多学者借助电镜扫描试验,从不同角度研究了煤的孔隙特征,发挥了其研究煤孔隙裂隙,矿物质,微观构造等多方面的优势<sup>[12-13]</sup>;Karacan C. O. 等<sup>[14-15]</sup>利用 X 射线 CT 成相技术,观察和评估了煤中不同类型的微观结构在气体运移和吸附速率上的不同,认为煤中泥质矿物质具有很高的孔隙率与密度,而煤质体基质的孔隙结构有更高的气体储藏能力。这些研究结果为煤吸附甲烷细观结构变化规律的研究提供了新思路。

基于已有研究,本文利用扫描电镜与显微 CT 相结合的方法,对煤在不同压力的吸附解吸状态下,内部结构的变化规律及其变形程度进行观测与评估。这项研究对于含瓦斯煤力学性质与渗流能力的研究具有重要的意义。

## 1 煤吸附解吸甲烷的扫描电镜与显微 CT 观测试验

### 1.1 煤样制取

煤样取自阳煤集团寺家庄煤矿,煤种为无烟煤。

手工钻取高度 15 mm、直径 8.5 mm 的细观煤样,清洁烘干后备用,煤样工业成分测定结果见表 1。

表 1 煤样工业成分测定

Table 1 Determination of industrial components of coal samples

煤层	煤种	水分/%	灰分/%	挥发分/%
15	无烟煤	1.395	13.13	7.115

### 1.2 扫描电镜与显微 CT 扫描试验

扫描电镜采用设备为中科院煤化所 JSM-7001F 型热场发射扫描电子显微镜。扫描电压为 5 kV,幅宽为 10 mm,扫描放大倍数为 1 040 倍,可对煤表面微米尺度细观结构进行观测。

CT 扫描设备是太原理工大学采矿工艺研究所  $\mu$ CT225kVFCB 型高精度显微 CT 试验系统<sup>[16]</sup>。试验观测原理如图 1 所示,试验系统主要由以下 4 部分组成:① 耐压筒,由钛合金材料制成,用于放置煤样、储气,使煤样吸附,测试表明具有良好的气密性;② 装置主轴体,用于与显微 CT 固定以及耐压筒、压力表和阀门的连通;③ 精密数字压力表,用于显示耐压筒的甲烷气体压力;④ 其他辅助装置,如针形阀门,甲烷储气瓶和相应的管线等。煤样在耐压筒中垂直放置,并用轻质弹簧分别在上下两端固定,保证煤样在试验中位置固定不变;显微 CT 通过的射线源发射 X 射线,平板探测器可对扫描数据进行精确采集;试验装置固定在 CT 系统的旋转台上,扫描时匀速旋转,使煤样得以全方位扫描;显微 CT 的运动控制器的位移能够精确到微米,可确保装置在全部的扫描过程中不发生任何方向的偏移,从而保证试验结果的准确性。

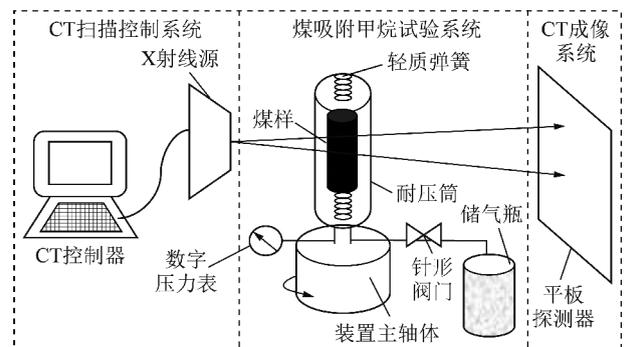


图 1 煤吸附甲烷的显微 CT 观测试验原理

Fig. 1 Sketch map of micro CT observation of methane adsorption by coal

试验设定 CT 扫描参数见表 2,试验前首先进行耐压筒中煤样的真空处理,采用 2XZ-0.5 型双

叶旋片式真空泵使煤样的真空度达到 0.6 Pa 以下,并保持 1 h 以上,确保煤样内部及耐压筒内无其他气体存在;然后对原始状态的煤样进行扫描,之后注入甲烷气体(99.99%)使其达到吸附平衡后再次扫描,甲烷的吸附压力分别为 1,2,3,4,

5 MPa,解吸;在每一个吸附压力下的吸附时间为 12 h,可确保煤样吸附平衡。煤样解吸采用方法与实验前煤样真空处理方法一致,可保证煤样中甲烷完全解吸。扫描所得数据通过 Matlab 软件编程进行处理。

表 2 CT 扫描参数设置

Table 2 Parameter-setting during CT scanning

系统校正参数			系统校正参数			
管电压/kV	管电流/ $\mu$ A	焦距/mm	窗宽/pixel	窗高/pixel	叠加帧数	投影幅数
110	130	2 217	2 040	1 500	2.0	400

## 2 电镜与 CT 扫描煤结构分析

岩石的密度是岩石最基本的物理参数,它与岩石的强度、孔隙率、变形特性等物理力学特性有着密切关系。因此,研究岩石密度分布规律对于研究岩石的其他宏观物理性质具有重要意义。计算机层析成像技术(Computed Tomography, CT)是利用射线对被测物体断面进行扫描,得到材料密度变化的断面图像。衰减系数是射线穿越被测物体横截面任一点的强度变化量,与被测物体的密度关系为

$$\mu_{i,j} = \mu_m \rho_{i,j} \quad (1)$$

其中, $\mu_{i,j}$ 为质量衰减系数; $\rho_{i,j}$ 为被测物体某点处的密度; $\mu_m$ 为衰减系数比例常数。依据式(1)得到试件某截面的衰减系数阵列,并转换为灰度图像,即可观察到煤体内部结构的真实信息。

试验煤样直径为 8.5 mm,在 CT 灰度图像中煤样径向宽度为 1 466 pixel,因此,图中煤样的每个二维像素绝对尺度为  $5.8 \mu\text{m} \times 5.8 \mu\text{m}$ 。通过煤样径向截面 CT 扫描灰度图像与局部扫描电镜图像(图 2)对比,可清楚观察到微米尺度下煤内部非均匀的细观结构。煤样内部主要由煤基质与黏土矿物质构成,且无明显大孔隙裂隙结构存在。煤基质主要煤岩组分为镜质体,内部包含大量微孔隙结构;黏土矿物质呈层理状结晶,其层理间、晶体颗粒间存在大量纳米尺度的孔隙,具有一定的甲烷吸附能力;由于其特殊的层理结构、分布方式,及其较大的密度,吸附甲烷后会对煤细观结构变形产生显著影响<sup>[17-18]</sup>;因此,为了对含黏土矿物质煤体在吸附甲烷时非均匀变形规律研究,现根据黏土矿物质的填充与分布情况,将煤体分为以下 4 类区域。

(1)黏土矿物质团簇区域(A区域)。在 CT 扫描图像中呈亮白色团簇状集中,团簇结构直径在  $100 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$ ,其密度明显大于煤基质。

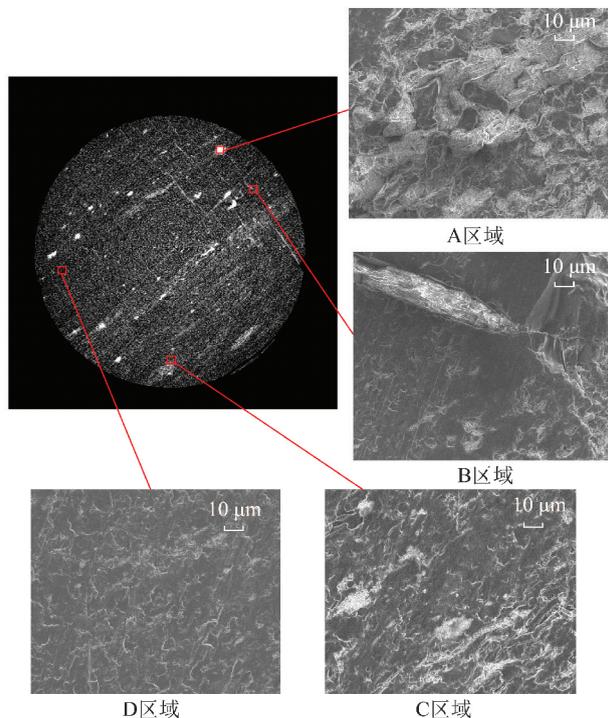


图 2 煤样径向截面 CT 扫描灰度图像与不同黏土矿物质分布区域扫描电镜图像对照

Fig. 2 CT images and SEM images of coal in different regions of clay mineral distribution

(2)被黏土矿物质填充的细观裂隙区域(B区域)。在 CT 图像中呈白色条带状分布,宽度在  $10 \sim 100 \mu\text{m}$ ,长度可达到几毫米,其条带具有一定的方向性,密度明显大于煤基质。

(3)黏土矿物质分散分布区域(C区域)。在煤基质中宽度小于  $10 \mu\text{m}$  的小型黏土矿物质团簇密集分布的区域,CT 图像中呈亮灰色,黏土矿物质含量越高,其区域平均密度越大。

(4)不含黏土矿物质区域(D区域)。CT 图像中色度均匀偏暗区域,其中包含大量微孔隙,在 CT 扫描尺度下密度较小且均匀性较好。

通过对煤样径向截面 CT 扫描图像衰减系数分

布统计得知,煤属于天然非均质岩体,煤样在真空状态下的 CT 衰减系数分布在 0 ~ 0.035 7,平均衰减系数值为 0.004 77。其中,0 ~ 0.007 占 88.06%,主要为含微孔隙结构的煤基质;>0.007 的只有 11.94%,主要为黏土矿物质。黏土矿物质密度明显大于煤基质密度,因此煤密度分布的非均匀性主要是由黏土矿物质的填充程度与分布位置的差别引起的。

### 3 不同黏土矿物质分布区域吸附甲烷细观变形规律

煤吸附甲烷会引起内部结构变形,为了探究其变形规律,现对煤中黏土矿物质不同填充与分布的区域进行分类研究。

#### 3.1 黏土矿物质团簇区域(A 区域)

由该区域 CT 扫描灰度图像(图 3)可看出,区域内黏土矿物质团簇呈近椭圆分布,其面积占该区域图像的 58.24%。黏土矿物质团簇密度具有非均匀特征,与煤基质邻近的团簇边缘位置密度较小,越接近团簇中心,密度越大。为了更直观的观察黏土矿物质在不同吸附解吸甲烷状态下的细观变形过程,现对煤样吸附前,1 MPa 吸附,5 MPa 吸附,与解吸 4 种状态的黏土矿物质团簇密度进行区段划分,并用伪彩色图显示。如图 4 所示,黏土矿物质团簇在吸附甲烷后总体形状变化较小,但不同位置的形状细节发生了明显的非均匀变化;对此区域中衰减系数大于 0.01 的高密度位置的像素数与平均衰减系数统计见表 3,吸附后此区域高密度位置的像素数与平均衰减系数均减

小,最大减小量分别为 14.7% 和 14.9%,这表明区域内黏土矿物质团簇发生了明显的膨胀变形;解吸后此位置像素数与平均衰减系数比 5 MPa 吸附状态增加 9.6% 和 8.5%,即黏土矿物质在解吸后膨胀变形有所恢复。

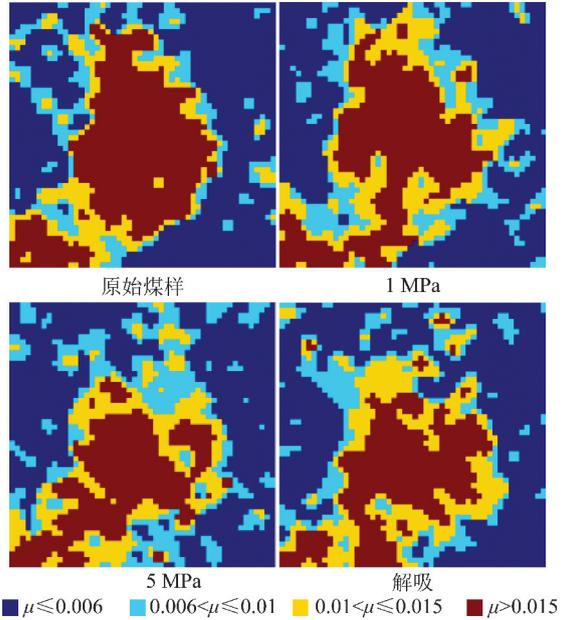


图 4 黏土矿物质团簇区域不同密度段伪彩色图  
Fig. 4 Image of clay minerals cluster regions of different density range

表 3 黏土矿物质团簇区域( $\mu > 0.01$ )像素数与平均衰减系数

Table 3 Pixels number and the average attenuation coefficient in clay minerals cluster region ( $\mu > 0.01$ )

吸附压力/MPa	0	1	5	解吸
像素数	1 048	986	894	980
平均衰减系数	0.019 4	0.017 2	0.016 5	0.017 9

选取此区域中部一条宽为 23.2  $\mu\text{m}$ (4 pixel $\times$ 50 pixel)的条带区段,对其不同横向像素位置在不同吸附压力下的平均衰减系数  $\mu$  统计,并与原始煤样同位置平均衰减系数  $\mu_0$  做差,即:

$$\Delta\mu = \mu - \mu_0 \quad (2)$$

获得条带区段吸附前后的密度变化  $\Delta\mu$  的曲线。如图 3 所示,吸附过程中,煤内部存在膨胀(密度减小)与挤压(密度增大)两种变形效应。吸附压力 1 MPa 时,在像素序号 13 ~ 43,黏土矿物质密度降低,其中靠近黏土矿物质中心的位置(像素序号 18 ~ 30)密度下降量较小,邻近煤基质的黏土矿物质团簇边缘(像素序号 13 ~ 18,35 ~ 43)密度下降非常剧烈;而邻近黏土矿物质团簇的煤基质(像素序号 9 ~ 12,43 ~ 45)密度则明显增大。这表明 1 MPa 吸附压力下,由于

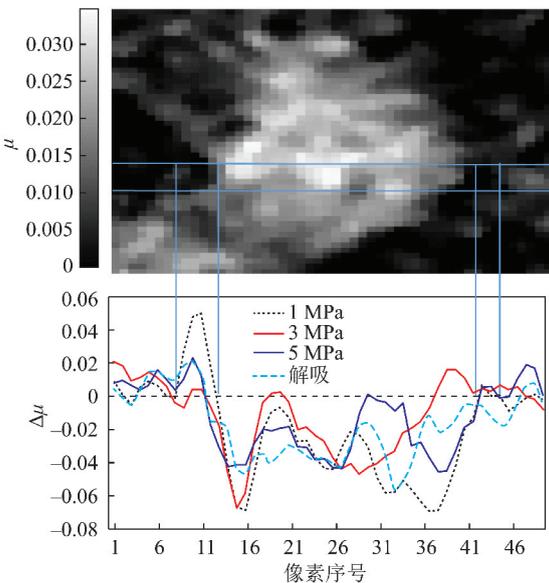


图 3 黏土矿物质团簇区域不同压力下细观变形

Fig. 3 Meso-deformation of clay minerals cluster region under different pressures

黏土矿物质膨胀变形强于煤基质膨胀变形,其对邻近的低密度煤基质形成强烈的局部挤压。吸附压力升高后,此区域进一步膨胀变形,黏土矿物质中心位置(像素序号 18~30)密度下降量增大,团簇边缘(像素序号 13~18,35~43)密度下降量与其邻近的煤基质(像素序号 9~12,43~45)密度升高量减小;即局部应力重新分布,2者边界区域挤压效应减小。解吸后,黏土矿物质膨胀变形与邻近煤基质挤压变形均有一定程度的恢复。

### 3.2 黏土矿物质分散分布区域(B区域)

由 CT 扫描灰度图像(图 5)可知,在黏土矿物质分散分布区域中,宽度从几微米到几十微米不等的大量黏土矿物质团簇分散在煤基质中,约占总区域面积的 16.5%。此区域不同密度段伪彩色图如图 6 所示,吸附甲烷后,大部分黏土矿物质团簇形状和位置均有明显变化。对此区域衰减系数大于 0.008 的高密度位置像素数与平均衰减系数统计见表 4,吸附后区域内高密度位置像素数与平均衰减系数均明显减小,最大减小量分别为 22.4% 和 9.5%,而在解吸后该位置像素数与平均衰减系数比 5 MPa 吸附状态增加 8.5% 和 2.1%。与黏土矿物质团簇区域相比,此区域黏土矿物质膨胀时邻近的可挤压空间更大,吸附时膨胀变形更明显,解吸后恢复程度更低。

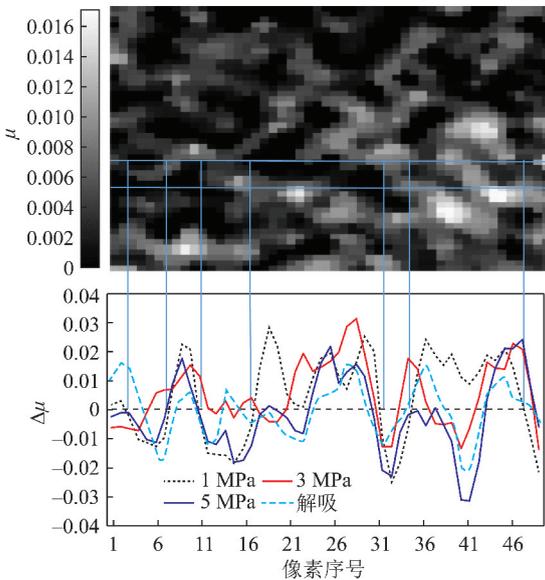


图 5 黏土矿物质分散区域密度变化

Fig. 5 Meso-deformation of clay minerals dispersed region under different pressures

与黏土矿物质团簇区域分析方法一致,同样获得宽为 23.2  $\mu\text{m}$  条带区段吸附前后密度变化  $\Delta\mu$  的曲线(图 5)。由图 5 可以看出,在 1 MPa 时,邻近黏土矿物质的煤基质(像素序号 1~4,8~12,18~32)均

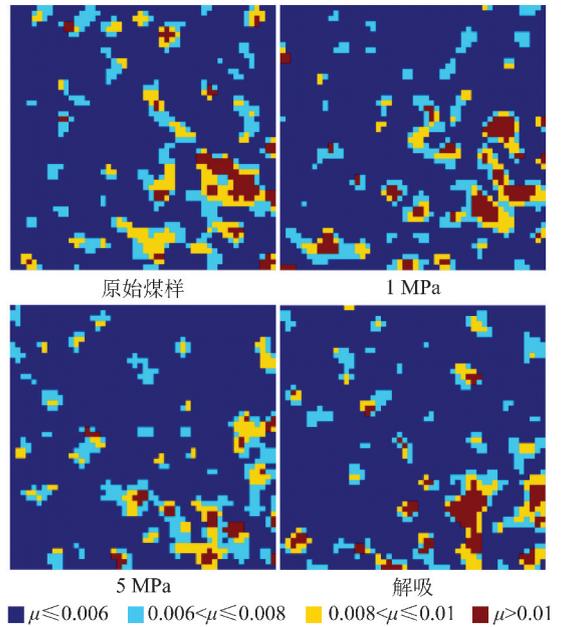


图 6 黏土矿物质分散区域不同密度段伪彩色图

Fig. 6 Image of clay minerals dispersed regions of different density range

表 4 黏土矿物质分散区域内( $\mu > 0.008$ )像素数与平均衰减系数

Table 4 Pixels number and the average attenuation coefficient in clay minerals dispersed region ( $\mu > 0.008$ )

吸附压力/MPa	0	1	5	解吸
像素数	259	232	201	218
平均衰减系数	0.010 5	0.009 9	0.009 5	0.009 7

因黏土矿物质挤压而密度增大,黏土矿物质(像素序号 4~8,12~18,32~36)由于膨胀变形,密度均减小;在像素序号 36~47 之间的黏土矿物质,由于其上下两侧存在密度更大的黏土矿物质膨胀变形,密度也因挤压而增大。压力升高时,条带区段内非均匀的膨胀与挤压变形进一步加剧,解吸后仍有明显的膨胀与挤压变形存在。

### 3.3 被黏土矿物质填充的细观裂隙区域(C区域)

分别截取被黏土矿物质填充的细观裂隙区域原始状态(图 7(a))与 1 MPa 吸附状态的 CT 灰度图像,并对 2 者衰减系数阵列做差,得到该区域吸附前后密度变化梯度图(图 7(b))。观察可知,在吸附前后,被黏土矿物质填充的细观裂隙形状与走向未发生明显变化,但裂隙内部分低密度区域(A,B,C,D,E,F 区域)因黏土矿物质膨胀而挤压变形。通过对挤压区域附近黏土矿物质密度降低的位置观察,可推断黏土矿物质膨胀变形的方向,可以看出,膨胀变形均沿着密度梯度降低的方向发生。黏土矿物质在细观裂隙内的膨胀挤压变形使裂隙中低密度位置更加密实,

可能会导致煤渗透能力的降低。

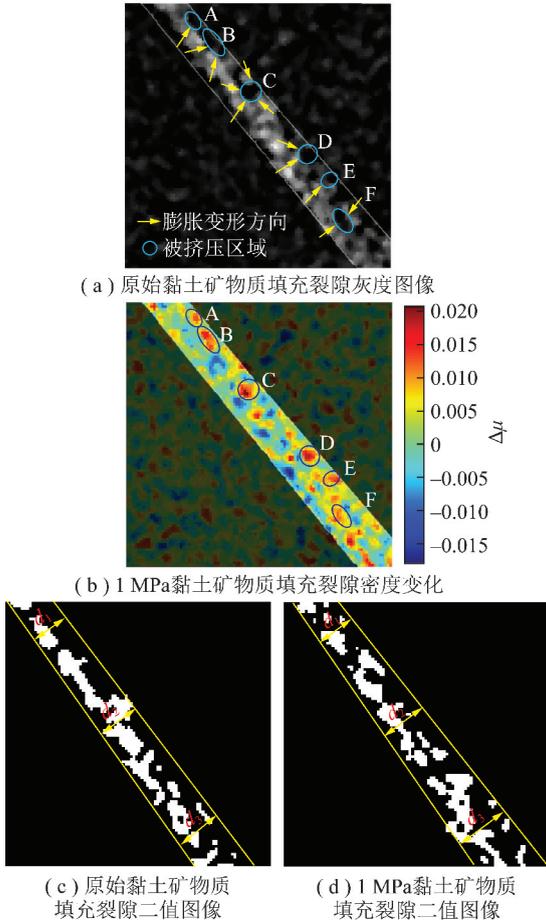


图7 填充黏土矿物质的微观裂隙区域微观变形及裂隙宽度变化

Fig. 7 Deformation of meso-fracture filled with clay minerals region and variation of fracture width

通过对原始状态与吸附 1 MPa 状态的煤样 CT 灰度图像中填充黏土矿物质微观裂隙区域提取,设定阈值为 0.007 并二值化处理,然后分别对裂隙不同位置( $d_1, d_2, d_3$ )的宽度测量,计算得到吸附前后裂隙平均宽度。如图 7(c), (d) 所示,在吸附后,由于黏土矿物质膨胀挤压,微观裂隙平均宽度由 65  $\mu\text{m}$  变成了 74  $\mu\text{m}$ ,这表明微观裂隙内黏土矿物质非均匀膨胀与挤压会对导致裂隙变宽,这将有可能引起煤力学强度降低。

### 3.4 不含黏土矿物质区域(D 区域)

对不含黏土矿物质的煤基质区域取宽度为 23.2  $\mu\text{m}$  条带区段,其吸附前后密度变化  $\Delta\mu$  的曲线如图 8 所示。吸附过程中,此区段膨胀与挤压现象均有发生;由于均匀性较好,煤基质区域在不同吸附压力下密度变化较小,密度最大变化量绝对值(0.026 2)仅为黏土矿物质团簇区域(0.068 9)的 0.38 倍。因此,在微观尺度下,煤基质吸附甲烷变形可近似看作均匀变形。在各个吸附压力下,此条带区

段密度增大的面积均大于减小的面积,这表明在吸附甲烷后,煤基质区域更易被邻近含黏土矿物质区域挤压。解吸后,条带区段内密度减小(像素序号 5 ~ 13, 38 ~ 43)位置的变形较易恢复,而密度增大位置的残余变形较明显。

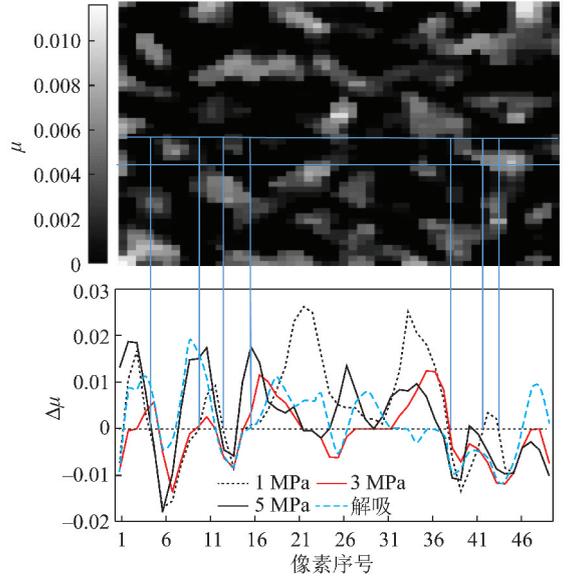


图8 不含黏土矿物质区域密度变化

Fig. 8 Meso-deformation of the region without clay minerals under different pressures

## 4 不同吸附压力下煤微观结构变形统计

根据损伤力学,前人在对岩石损伤研究时,将岩石内部裂纹等微缺陷的密度作为损伤因子来表征岩石的损伤变形程度<sup>[19]</sup>,此方法对于煤吸附甲烷微观变形的研究不能完全适用。在煤吸附甲烷 CT 扫描试验中,煤内部结构的微观变形体现为煤密度(衰减系数)的变化:煤密度增大的原因主要为煤内部非均匀挤压变形,减小的原因主要为膨胀变形。为了对煤内部不同区域发生微观变形的剧烈程度量化描述,现分别对煤内部膨胀效应与挤压效应采用如下方法统计:

$$C_{m \times n} = B_{m \times n} - A_{m \times n} \quad (3)$$

其中,  $A_{m \times n}$  与  $B_{m \times n}$  分别为面积大小为  $m \times n$  的煤样研究区域内,原始状态与吸附变形后的 CT 扫描衰减系数阵列。则  $C_1, C_2$  分别为煤膨胀与挤压变形后衰减系数变化的集合:

$$C_1 = \{x \mid x < 0, x \in C_{m \times n}\} \quad (4)$$

$$C_2 = \{x \mid x > 0, x \in C_{m \times n}\} \quad (5)$$

对单位面积的膨胀衰减系数变化  $C_1$  与挤压衰减系数变化  $C_2$  绝对值分别累加,即可得到此区域的膨胀效应  $\varepsilon_1$  与挤压效应  $\varepsilon_2$ :

$$\varepsilon_1 = \frac{\sum |C_1|}{m \times n}, \varepsilon_2 = \frac{\sum |C_2|}{m \times n} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (7)$$

式(7)中膨胀效应 $\varepsilon_1$ 与挤压效应 $\varepsilon_2$ 之和 $\varepsilon$ 即为该区域细观变形剧烈程度。此统计方法,不仅对煤中不同位置密度变化程度与变化范围真实描述,而且能对膨胀效应与挤压效应分别进行定量化计算,从而更有效的评估煤细观变形程度及其影响。

依据煤细观膨胀与挤压效应统计方法,分别对不同压力下 A, B, D 三区域(图 3, 5, 8)膨胀与挤压变形效应统计,如图 9 所示,可以看出,同一煤结构区域内,煤膨胀与挤压效应基本相当;但由于黏土矿物质在煤中非均匀分布,不同区域内吸附甲烷时膨胀效应与挤压效应变化规律不同。具体分析如下:

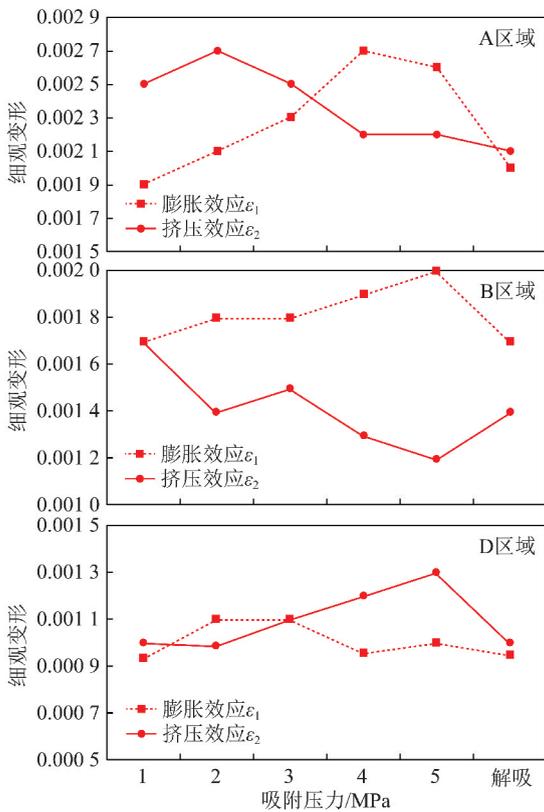


图9 不同吸附压力下各区域膨胀与挤压效应统计

Fig. 9 Statistics of the effects of extrusion and expansion under different adsorption pressure

黏土矿物质团簇区域(A区域)。团簇有较大的硬度与较强的膨胀能力,吸附压力越高,膨胀效应越明显。低吸附压力下,黏土矿物质吸附甲烷后急剧膨胀,对邻近煤基质的局部挤压效应非常明显;随压力升高,煤基质进一步膨胀,挤压效应减小。解吸后,黏土矿物质收缩,膨胀效应与挤压效应同时减少。

黏土矿物质分散分布区域(B区域)。与黏土矿物质团簇区域类似,分散分布的黏土矿物质团簇

在吸附压力下也发生明显膨胀变形;因其周围存在充足的低密度可膨胀空间,挤压效应随压力升高呈减弱趋势。此区域膨胀变形的非均匀性较强,因此解吸后膨胀变形仅少量恢复,且收缩变形时又产生了新的挤压。

不含黏土矿物质区域(D区域)。在不含黏土矿物质且无明显裂隙与大孔隙的煤基质区域,随吸附压力升高,由于邻近含黏土矿物质区域整体膨胀变形,挤压效应有增大趋势;而膨胀效应仅在小范围内波动,可近似看作均匀膨胀变形;解吸后膨胀与挤压效应均有所减弱。

对 A, B, D 三区域吸附甲烷时的细观结构变形剧烈程度统计如图 10 所示,黏土矿物质团簇区域细观变形最剧烈,黏土矿物质分散分布区域次之,不含黏土矿物质的煤基质细观变形程度最弱。这表明,吸附甲烷时,煤细观结构变形主要发生在含黏土矿物质的区域,变形的非均匀特征是由黏土矿物质与煤基质吸附膨胀能力和膨胀速率的差异引起的。解吸后黏土矿物质团簇区域恢复最明显,煤基质区域次之,黏土矿物质分散分布区域最弱;这表明解吸后煤变形的恢复能力与其均质程度有关,黏土矿物质团簇密度大,均质度与弹性好,变形恢复最明显;不含黏土矿物质的煤基质均质度好,弹性差,恢复程度次之;黏土矿物质分散分布区域非均匀程度最强,其解吸后变形恢复能力最差。

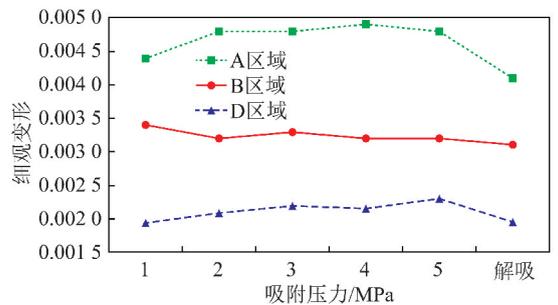


图10 煤不同区域细观变形 $\varepsilon$ 随吸附压力的变化规律

Fig. 10 Meso-deformation law of different regions in coal under different adsorption pressures

## 5 结 论

利用扫描电镜与 CT 扫描相结合的方法,通过对直径为 8.5 mm 的细观煤样进行不同压力下的吸附解吸甲烷试验,研究其内部细观结构变形规律。通过煤样 CT 扫描灰度图像与电镜图像对比得知,煤样是煤基质中含有少量黏土矿物质的天然非均质岩体,根据黏土矿物质在煤不同位置分布状况的不同,可将其分为黏土矿物质团簇区域,被黏土矿物质填充的细观

裂隙区域,黏土矿物质分散分布区域与不含黏土矿物质的煤基质区域。

吸附解吸甲烷过程中,煤的细观结构变形分为膨胀变形(密度减小)与挤压变形(密度增大)。低吸附压力下,含黏土矿物质区域急剧膨胀,并对邻近煤基质形成局部挤压,细观变形程度明显;压力升高后膨胀变形增强,挤压变形减弱;不含黏土矿物质的煤基质区域变形程度较低,近似于均匀变形。解吸后,煤不同区域变形的恢复能力与其非均匀程度有关,非均匀性越强,变形恢复能力越差。

根据煤不同区域细观变形规律,可以对煤在吸附解吸时物理性质的变化推断。例如黏土矿物质团簇区域密度降低,以及被黏土矿物质填充的细观裂隙宽度的增加,均可导致煤力学强度降低;而存在于黏土矿物质分散分布区域的不可逆变形会导致煤体存在宏观的残余变形,这些信息对于含瓦斯煤力学性质与渗流能力的研究具有非常重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] Wang H P, Yang Y S, Wang Y D, et al. Data-constrained modelling of an anthracite coal physical structure with multi-spectrum synchrotron X-ray CT[J]. *Fuel*, 2013, 106: 219-225.
- [2] 周动,冯增朝,赵东,等.煤吸附瓦斯细观特性研究[J].*煤炭学报*, 2015, 40(1): 98-102.  
Zhou Dong, Feng Zengchao, Zhao Dong, et al. Study on mesoscopic characteristics of methane adsorption by coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 98-102.
- [3] Pone J D N, Hile M, Halleck P M, et al. Three-dimensional carbon dioxide-induced strain distribution within a confined bituminous coal[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 77: 103-108.
- [4] Liu Z X, Feng Z C, Zhang Q M, et al. Heat and deformation effects of coal during adsorption and desorption of carbon dioxide[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 25: 242-252.
- [5] Wu Y, Liu J S, Elsworth D, et al. Evolution of coal permeability: Contribution of heterogeneous swelling processes[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 88: 152-162.
- [6] Karacan C O. Swelling-induced volumetric strains internal to a stressed coal associated with CO<sub>2</sub> sorption[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 72: 209-220.
- [7] Zofia Majewska, Stanisław Majewski, Ziętek J. Swelling and acoustic emission behaviour of unconfined and confined coal during sorption of CO<sub>2</sub>[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2013, 117: 17-25.
- [8] 赵洪宝,李振华,仲淑娟,等.单轴压缩状态含瓦斯煤岩力学特性试验研究[J].*采矿与安全工程学报*, 2010, 27(1): 131-134.  
Zhao Hongbao, Li Zhenhua, Zhong Shuheng, et al. Experimental study of mechanical properties of coal rock containing gas under uniaxial compression[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2010, 27(1): 131-134.
- [9] 张慧,李小彦.扫描电子显微镜在煤岩学上的应用[J].*电子显微学报*, 2014, 23(4): 467-468.  
Zhang Hui, Li Xiaoyan. The application of SEM in coal petrology[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2004, 23(4): 467-468.
- [10] 李玉彬,李向良,李奎祥.利用计算机层析(CT)确定岩心的基本物理参数[J].*石油勘探与开发*, 1999, 26(6): 86-90.  
Li Yubin, Li Xiangliang, Li Kuixiang. Using computed tomography to determine the basic petrophysical properties of cores[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(6): 86-90.
- [11] Karacan C O, Gareth D Mitchell. Behavior and effect of different coal microlithotypes during gas transport for carbon dioxide sequestration into coal seams[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2003, 53: 201-217.
- [12] Cetine, Gupatal, Moghtaderib. Effect of pyrolysis pressure and heating rate on radiate pine char structure and apparent gasification reactivity[J]. *Fuel*, 2004, 83: 1469-1482.
- [13] Rameshks, Janbw, Vickillb, et al. Characterization of chars from pyrolysis of lignin[J]. *Fuel*, 2004, 83: 1328-1482.
- [14] Karacan C O, Okandan E. Adsorption and gas transport in coal microstructure: investigation and evaluation by quantitative X-ray CT imaging[J]. *Fuel*, 2001, 80: 509-520.
- [15] Karacan C O. An effective method for resolving spatial distribution of adsorption kinetics in heterogeneous porous media: Application for carbon dioxide sequestration in coal[J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(20): 4681-4693.
- [16] 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 Weigu, et al. Micro-CT experimental research of lean coal thermal cracking laws[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(10): 1696-1700.
- [17] 吉利明,邱军利,夏燕青,等.常见黏土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性[J].*石油学报*, 2012, 33(2): 249-256.  
Ji Liming, Qiu Junli, Xia Yanqing, et al. micro-pore characteristics and methane adsorption properties and methane adsorption properties of common clay minerals by electron microscope scanning[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 249-256.
- [18] Ji Liming, Zhang Tongwei, Kitty L, et al. Experimental investigation of main controls to methane adsorption in clay-rich rocks[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(12): 2533-2545.
- [19] 刘保县,黄敬林,王泽云,等.单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2009, 28(S1): 3234-3238.  
Liu Baoxian, Huang Jinglin, Wang Zeyun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal rock under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S1): 3234-3238.