

## 煤低压吸附瓦斯变形试验

梁 冰<sup>1</sup>,于洪雯<sup>2</sup>,孙维吉<sup>1</sup>,石迎爽<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院,辽宁 阜新 123000;2. 辽宁工程技术大学 矿业学院,辽宁 阜新 123000)

**摘 要:**在瓦斯抽采和煤炭开采过程中,始终伴随着煤对瓦斯的吸附和解吸,煤吸附瓦斯发生膨胀变形,解吸瓦斯发生收缩变形。利用自制的吸附解吸试验装置,测试了煤在低压吸附瓦斯过程中煤体变形规律。试验结果表明:煤样在同一瓦斯压力下的吸附变形分为快速增长、缓慢增长、平衡3个阶段;煤体吸附瓦斯膨胀变形呈各向异性,垂直层理方向和平行层理方向的变形整体变化趋势呈现一致性;在等梯度加压吸附过程中,随着吸附瓦斯压力的不断增大,煤样吸附膨胀变形梯度值逐渐呈增大趋势;一次加压吸附煤膨胀变形量小于等梯度加压吸附至相同吸附压力值时的累积变形量。

**关键词:**低压吸附;煤和瓦斯;变形;等梯度加压吸附

**中图分类号:**TD712.6 **文献标志码:**A

## An experimental on deformation of coal adsorption of low pressure gas

LIANG Bing<sup>1</sup>, YU Hong-wen<sup>2</sup>, SUN Wei-ji<sup>1</sup>, SHI Ying-shuang<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Institute of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Along with adsorption and desorption of coal and gas, coal produce inflation deformation after adsorption and produce contraction deformation after desorption in the process of gas extraction and coal mining, in order to further study coal deformation in low pressure after adsorption and desorption, using self-made instrument of adsorption and desorption were tested. The results show that: deformation of coal samples in the same gas pressure is divided into rapid growth stage, slow growth stage, balance stage, adsorption inflation deformation of coal appears as anisotropy, strain of vertical and parallel direction of bedding overall trend present consistency, along with the gas pressure increasing, maximum deformation of coal appear trend of increase in the test of increasing pressure adsorption, deformation of the a pressure adsorption is less than the successive pressure in the same pressure.

**Key words:** adsorption of low pressure; coal and gas; deformation; increasing pressure adsorption

煤炭开采和瓦斯(煤层气)抽采过程中,煤体会因吸附和解吸瓦斯发生变形<sup>[1-5]</sup>。我国多数矿区煤层气储层具有低压力的特性,低储层压力不利于瓦斯抽采。研究煤体低压吸附瓦斯过程的变形规律对研究低透气性煤层难排采机理和指导瓦斯抽采具有重要意义。

针对煤吸附瓦斯引起的膨胀变形,目前国内外学者开展了大量的研究工作,并取得了一定成果。在探

讨煤岩膨胀机制方面,姚宇平<sup>[6]</sup>认为煤体吸附瓦斯产生膨胀变形是瓦斯分子挤入煤的微孔引起的。李祥春等<sup>[7-10]</sup>对煤吸附膨胀变形与孔隙率、渗透率关系进行研究,认为煤层中瓦斯压力越大,产生的膨胀变形越大,煤吸附变形将使煤的孔隙率减小,而孔隙率减小引起渗透率的减小。针对煤吸附甲烷膨胀变形的试验研究,A G Kim<sup>[11]</sup>、刘延宝等<sup>[4]</sup>对不同压力下的煤吸附膨胀变形与时间的关系比较后认为煤体的

吸附膨胀变形不可逆。张国华等<sup>[12-16]</sup>对含瓦斯煤在带压与常压条件下的解吸过程进行研究,认为带压条件下的瓦斯解吸速度要明显小于常压条件下瓦斯解吸速度。

综上所述,对煤在低储层压力条件下吸附瓦斯煤体的变形规律仍不清楚,低压吸附条件下的煤体变形规律还有待于进一步研究。通过试验研究的方法,开展原煤吸附瓦斯过程煤体变形量测试试验,研究低储层低压力条件下煤体变形规律。

## 1 试验装置及试验方法

### 1.1 试验装置

煤与瓦斯吸附解吸变形试验装置为自行研发设计。该试验装置包括高压吸附解吸罐、吸附气体加压子系统、抽真空子系统和数据采集记录子系统。试验装置系统如图 1 所示。

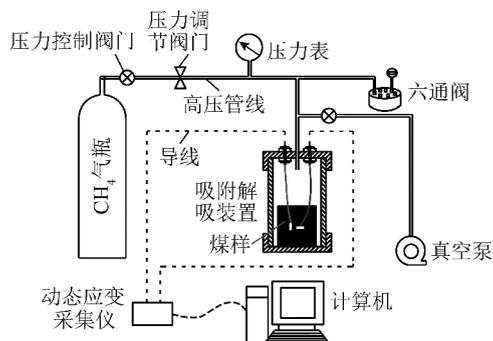


图 1 试验装置

Fig. 1 Test system device

### 1.2 煤样的制备

试验所用的煤样取自山西保利铁新煤业有限公司所开采的 9 号煤层,9 号煤基本参数见表 1。将采得煤在实验室加工为 50 mm×50 mm×100 mm 标准柱状试样。试样表面平行层理方向和垂直层理方向各粘贴一对应变片(图 2),用胶水将连接好的应变片固定于煤样表面,以防脱落。

表 1 9 号煤基本参数

Table 1 Basic parameters of No. 9 coal

煤样编号	煤种	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{daf}/\%$	$f$ 值	瓦斯含量/ ( $m^3 \cdot t^{-1}$ )	瓦斯压 力/MPa
BLTX-9	焦煤	0.12	5.29	20.17	0.2	4.0	0.25

### 1.3 试验方法

研究煤体吸附瓦斯后的变形规律,进行两种增压吸附瓦斯条件下的煤体变形测试试验。两组试验吸附瓦斯的目标压力值均是 0.6 MPa,试验 1 是将 0.6 MPa 的目标压力分 6 次等梯度加压,每次加压吸附饱和后

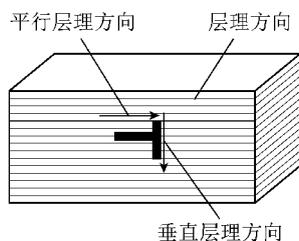


图 2 应变片粘贴位置

Fig. 2 Scheme of coal sample posted strain film

进行下一次加压,直至目标函数值,加压梯度均为 0.1 MPa/次;试验 2 是一次将吸附压力增至目标压力值均是 0.6 MPa,比较两个试验过程煤样的变形量。

### 1.4 试验过程

将煤样放置于试验装置中,连接各子系统确保正常工作。使用 2XZ-4 旋叶真空泵对高压吸附解吸罐持续抽真空 24 h,高压吸附解吸罐中的压强下降到 0.06 MPa 时并持续抽真空 24 h 后停止抽真空。按表 2 中的实验方法通入瓦斯,并记录煤体的变形量。试验过程高压吸附罐始终与气源连接,保持煤样在设定的吸附压力吸附饱和。试验在封闭的条件下进行,温度保持恒定。

表 2 试验方法

Table 2 Test method

实验名称	实验内容	MPa
等梯度加压吸附瓦斯煤体变形试验	0~0.1 0.3~0.4	0.1~0.2 0.4~0.5 0.2~0.3 0.5~0.6
一次加压吸附瓦斯至目标压力煤体变形试验	0~0.6	

## 2 试验结论及分析

### 2.1 等梯度加压吸附条件煤吸附变形规律

图 3 为 0.2, 0.4, 0.6 MPa 吸附压力条件下的煤体膨胀变形曲线。垂直层理方向的变形大于平行层理方向的变形量。向密闭吸附罐注入甲烷气体后,在气体压力作用下,煤基质内部分子间距减小<sup>[1]</sup>,但其减小量很小;吸附甲烷气体后煤基质孔隙表面能下降<sup>[15]</sup>,孔隙表面层膨胀,且膨胀量较大,总体表现为膨胀,当煤基质的膨胀受限时,煤基质内产生膨胀应力,煤基质向外膨胀,发生膨胀变形。

由图 4 可知,膨胀变形量随时间的增加不断增加,而增加速率逐渐减小,变形量最终趋于一个稳定值。吸附膨胀变形过程基本分为 3 个阶段:快速增长阶段、缓慢增长阶段和平衡阶段。在快速增长阶段,由于煤体外部的低瓦斯压力梯度和高瓦斯浓度梯度,使甲烷分子以渗透和扩散的方式进入,和煤分子结

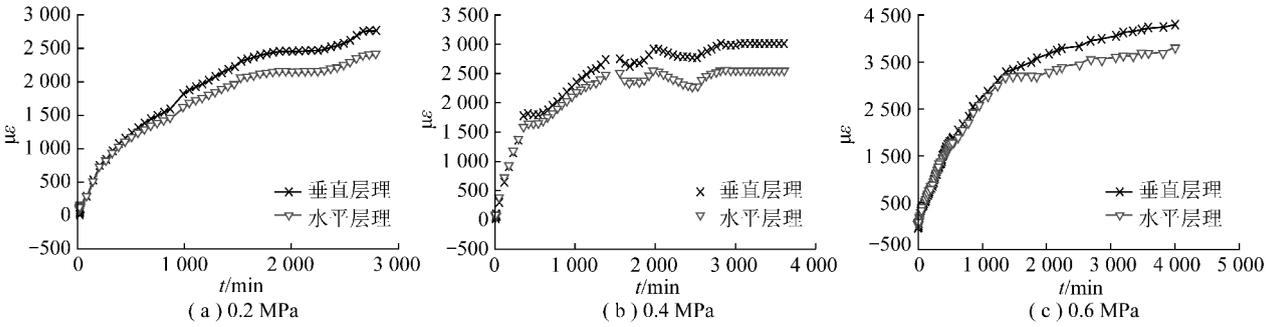


图3 等梯度加压吸附膨胀变形曲线

Fig. 3 Inflation deformation curves of increasing pressure adsorption

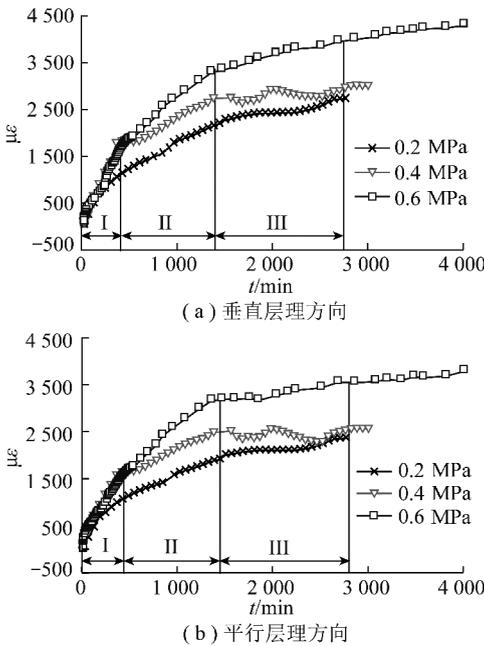


图4 不同压强下垂直层理方向、平行层理方向吸附变形与时间关系曲线

Fig. 4 Relationship between longitudinal and horizontal adsorption deformation and time

表3 不同压强垂直层理方向、平行层理方向应变数据

Table 3 Data of longitudinal and horizontal strain in different pressures

压强/MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
垂直层理方向变形(μɛ)	3 190	2 777	2 898	3 007	3 316	4 299
平行层理方向变形(μɛ)	3 054	2 444	2 508	2 565	3 114	3 788

### 2.3 不同加压方式对煤吸附变形量的影响

两种试验结论对比(表4和图7)可知:等梯度加压吸附方式下的煤样吸附变形累积量大于一次加压吸附方式下的煤吸附变形量。煤在缓慢均匀加压时产生的破坏裂隙要比一次加很大载荷产生的裂隙多,与岩石的性质相同。由于缓慢加压产生了较多裂隙,为煤吸附存储更多瓦斯提供了条件。图3和图7比较,在两种不同的加压方式下煤的平行层理和垂直层

合,随着大量的甲烷分子进入裂隙、孔隙,煤的孔隙体积增大,煤发生吸附膨胀变形;随着吸附时间的增加,吸附饱和度不断增加,瓦斯浓度梯度与瓦斯压力梯度迅速降低,使得脱离煤分子的甲烷分子数量相等时,吸附达到平衡。

保利铁新9号煤进行等梯度加压吸附变形试验表明,垂直层理方向变形量大于平行层理方向变形量(表3和图5)。0.2 MPa瓦斯压力下的垂直层理方向和平行层理方向最大静变形量小于0.1 MPa瓦斯压力下的最大静变形量,这是由于压力表读数为相对压强,煤样从近真空状态到相对压强为0.1 MPa实际压强增高0.2 MPa。从0.2 MPa压强开始,随着瓦斯压力的增高,而无论是垂直层理方向变形量还是平行层理方向变形量,在不同压力下的静变形量都随压力的升高呈增大的趋势,增加的速率先增大后减小。

### 2.2 一次加压至目标压力煤吸附变形规律

一次加压至0.6 MPa吸附变形试验表明(图6):煤吸附饱和过程中其平行层理方向变形量与垂直层理方向变形量在吸附第1阶段相同,在第2阶段和第3阶段垂直层理方向变形量略大于平行层理方向变形量。

理变形量都存在差异性,且等梯度加压吸附饱和时间小于一次加压吸附方式下吸附饱和时间。

## 3 结 论

(1)煤吸附膨胀变形呈各向异性,垂直层理方向和平行层理方向的应变整体变化趋势呈现一致性,但是垂直层理方向的变形值与平行层理方向的变形值随加压方式的不同表现出不同的结果。

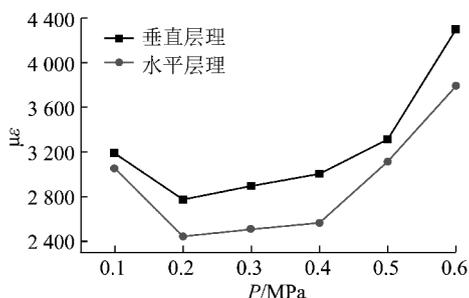


图 5 吸附压力与最大变形量之间的关系  
Fig. 5 Relationship between pressures and maximum inflation deformation

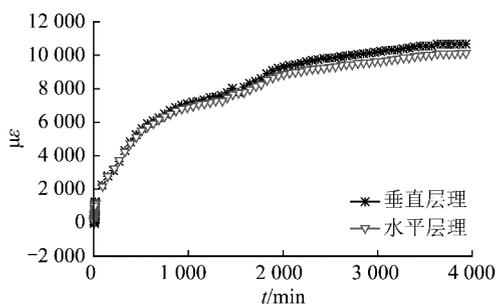


图 6 一次加压吸附膨胀变形曲线

Fig. 6 Inflation deformation curves of all pressure adsorption

表 4 不同状态下垂直层理方向、平行层理方向最大变形量

Table 4 Maximum deformation of vertical bedding direction and parallel bedding direction in different states

试验	0.3 MPa		0.6 MPa	
	垂直层理方向 微应变	平行层理方 向微应变	垂直层理方向 微应变	平行层理方向 微应变
等梯度加压吸 附试验	8 865	8 528	19 325	17 990
一次加压吸 附试验	8 371	8 406	18 004	16 493

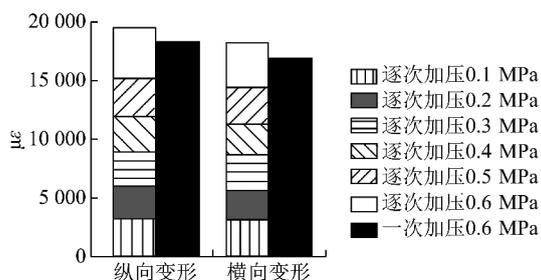


图 7 不同吸附状态下煤最大变形量对比

Fig. 7 Bar chart of maximum coal deformation in different states

(2) 在等梯度加压吸附试验中,随着瓦斯压力的不断增大,煤最大变形量呈增大趋势。

(3) 等梯度加压吸附煤产生的破坏裂隙较一次加压吸附产生的裂隙多,吸附的瓦斯量大,产生的变形量大。

(4) 在 0 ~ 0.6 MPa 压力范围内,不同压力下的煤样应变总量随压力的增大呈现非线性的增大趋势。

参考文献:

[1] 周世宁,林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京:煤炭工业出版社,1999.

[2] 林柏泉,周世宁. 含瓦斯煤体变形规律的实验研究[J]. 中国矿业学院学报,1986(3):9-16.  
Lin Baiquan, Zhou Shining. Experimental investigation on the deformation law of coal body containing methane[J]. Journal of China Institute of Mining & Technology, 1986(3):9-16.

[3] 李祥春,聂百胜,何学秋,等. 瓦斯吸附对煤体的影响分析[J]. 煤炭学报,2011,36(12):2035-2038.  
Li Xiangchun, Nie Baisheng, He Xueqiu, et al. Influence of gas adsorption on coal body[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12):2035-2038.

[4] 刘延保,曹树刚,李勇,等. 煤体吸附瓦斯膨胀变形效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(12):2484-2491.  
Liu Yanbao, Cao Shugang, Li Yong, et al. Experimental study of swelling deformation effect of coal induced by gas adsorption[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12):2484-2491.

[5] 梁冰,章梦涛,潘一山,等. 瓦斯对煤的力学性质及力学响应影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,1995,17(5):12-18.  
Liang Bing, Zhang Mengtao, Pan Yishan, et al. the experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5):12-18.

[6] 姚宇平. 吸附瓦斯对煤的变形及强度的影响[J]. 煤矿安全, 1988, 19(12):37-41.

[7] 李祥春,郭勇义,吴世跃. 煤吸附膨胀变形与孔隙率、渗透率关系的分析[J]. 太原理工大学学报,2005,36(3):264-266.  
Li Xiangchun, Guo Yongyi, Wu Shiyue. Analysis of the relation of porosity, permeability and swelling deformation of coal[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(3):264-266.

[8] Anderson R B, Bayer J, Hofer L J E. Equilibrium sorption studies of methane on pittsburgh seam and pocahontas No. 3 seam coal[A]. Coal Science[C]. 1966:386-399.

[9] 曹树刚,郭平,李勇,等. 瓦斯压力对原煤渗透特性的影响[J]. 煤炭学报,2010,35(4):595-599.  
Cao Shugang, Guo Ping, Li Yong, et al. Effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4):595-599.

[10] 覃建华,肖晓春,潘一山,等. 滑脱效应影响的低渗储层煤层气运移解析分析[J]. 煤炭学报,2010,35(4):619-622.  
Qin Jianhua, Xiao Xiaochun, Pan Yishan, et al. Analytical solution of coal bed methane migration with slippage effects in hypotonic reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4):619-622.

[11] Kim A G. Estimating methane content of bituminous coal beds from adsorption data[M]. Washington: US Bureau of Mines Report of Investigations, 1977.

[12] 张国华,梁冰. 煤岩渗透率与煤与瓦斯突出关系理论探讨

- [J]. 辽宁工程技术大学学报,2002,21(4):414-417.  
Zhang Guohua, Liang Bing. Aretical discussion of relationship between penetrate-rate of coal-rock and breaking out of coal and gas [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(4): 414-417.
- [13] 张国华, 梁冰, 毕业武. 水锁对含瓦斯煤体的瓦斯解吸的影响[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 253-258.  
Zhang Guohua, Liang Bing, Bi Yewu. Impact of water lock on gas desorption of coal with gas [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 253-258.
- [14] 孙维吉. 煤渗透和吸附变形规律实验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.  
Sun Weiji. Experimental study on permeability changes and adsorption-induced deformation in coal [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011.
- [15] 聂百胜, 何学秋, 王恩元. 煤的表面自由能及应用探讨[J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(4): 346-348.  
Nie Baisheng, He Xueqiu, Wang Enyuan. The exploration about coal surface free energy and its application [J]. The Journal of Taiyuan University of Technology, 2000, 31(4): 346-348.
- [16] 邵强, 王恩营, 王红卫, 等. 构造煤分布规律对煤与瓦斯突出的控制[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 250-254.  
Shao Qiang, Wang Enying, Wang Hongwei, et al. Control to coal and gas outburst of tectonic coal distribution [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 250-254.

## 《煤炭学报》2012年Ei收录情况

根据Ei中国信息部发布的最新收录结果,本刊2012年第1~12期和增刊第1,2期共发表论文461篇, Ei Compendex收录论文461篇,收录率为100%。