

文章编号: 1001-4888(2014)02-0215-08

考虑压力作用的煤吸附/解吸 CH_4 变形试验研究^{*}

梁冰¹, 石迎爽¹, 孙维吉¹, 于洪雯²

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 山西朔州山阴中煤顺通辛安煤业有限公司, 山西朔州 036900)

摘要: 气体压力是煤吸附/解吸瓦斯的重要影响因素之一。因此, 在实验室通过改变压力差, 进行了一次升压/降压和等梯度逐次升压/降压方式吸附/解吸试验。通过比较分析了两种吸附/解吸方式煤变形量大小, 研究了两种吸附/解吸方式下煤残余变形量的变化规律。研究结果表明, 等梯度逐次升压吸附煤膨胀变形量大于同一压力水一次升压吸附煤膨胀变形量, 而两种解吸试验中煤收缩变形量大小关系与之相反, 残余变形量大小关系与之相同; 同一压力水平下, 变压力梯度降压解吸好于等梯度逐次降压解吸。

关键词: 等梯度逐次升压/降压; 一次升压/降压; 膨胀变形; 收缩变形; 残余变形

中图分类号: TD712.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-13-088

0 引言

在瓦斯抽采和煤炭开采过程中, 伴随着 CH_4 气体的吸附、解吸、扩散和渗流, 吸附 CH_4 煤发生膨胀变形, 解吸 CH_4 煤发生收缩变形, 煤与 CH_4 气体之间的相互作用是一种复杂的耦合关系。文献[1]通过研究发现, 低瓦斯压力煤吸附瓦斯煤表面能降低发生膨胀变形, 高瓦斯压力煤吸附瓦斯煤内产生新的微小裂隙, 吸附瓦斯煤强度降低, 解吸瓦斯煤强度增加。煤变形影响煤的孔隙率, 从而影响渗透率。文献[2—5]在对煤吸附膨胀变形与孔隙率、渗透率关系的研究中发现, 煤层中瓦斯压力越大, 煤产生的膨胀变形越大, 煤吸附变形将使煤的孔隙率减小, 孔隙率减小则引起渗透率的减小。文献[6—8]通过实验研究得出吸附 CH_4 气体过程, 气体压力持续变化, 煤膨胀变形不断变大, 煤的渗透率也发生降低—恢复—升高的过程, 考虑吸附作用煤的渗透率小于不考虑吸附作用煤的渗透率。瓦斯压力也是影响 CH_4 气体吸附、解吸过程的重要因素^[9]。文献[10—11]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的吸附膨胀变形不可逆。文献[12]通过研究恒压室温条件下解吸量与煤岩变形关系, 并按解吸速率把煤变形过程分为了三个阶段。文献[13]通过研究得出气体压力影响游离态气体分子煤中扩散的自由程, 气体分子的自由程与气体压力成反比。文献[14]在实验室通过顺序和逆序两种加载方式, 研究了煤变形与瓦斯排放量随时间的变化规律, 并建立了煤变形量与瓦斯排放量之间的数学关系式。

由上述可知, 改变煤层中 CH_4 气体的压力, 煤体内 CH_4 量发生变化, 煤体会发生变形, 从而改变煤体原有的孔隙—裂隙结构, 孔隙—裂隙结构的改变会影响煤体渗透率, 影响气体的流动, 从而又反过来影响煤体中的气体含量。在吸附/解吸过程中, 气体压力有何作用, 对煤变形的影响有多大, 在此方面, 国内外研究很少。因此本文以保利铁新 9[#] 煤层煤和忻州窑煤矿煤为试样, 设计了等梯度逐次升压/降压吸附/解吸试验和一次升压/降压至设定压力吸附/解吸试验, 研究两种吸附/解吸方式下煤的变形规

^{*} 收稿日期: 2013-05-30; 修订日期: 2013-09-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(973)(2011CB201206); 国家自然科学基金项目(51304111); 国家科技重大专项(2011ZX05040005); 辽宁省教育厅一般项目(L2013136)

通讯作者: 梁冰(1962—), 女, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究领域: 气体渗流理论及其应用。E-mail: lbwqx@163.com

律,为进一步研究煤层气在煤中的流动规律,以及两者之间的复杂耦合关系提供依据。此外,解吸 CH₄ 后煤会产生残余变形,影响煤的强度,因此本文还研究了两种吸附/解吸方式下煤残余变形量的变化规律。

1 试验装置、试件及内容

1.1 试验方法

为进一步研究吸附/解吸 CH₄ 过程中煤的变形规律,以及 CH₄ 气体压力差对吸附/解吸的影响,为煤炭开采和瓦斯抽采设定更合理的方案提供依据,本文设计了等梯度逐次升压/降压吸附/解吸试验和一次升压/降压吸附/解吸试验,以分析压力差相同的条件下升压吸附/降压解吸煤变形量随 CH₄ 气体压力变化的变化规律;压力差不同时,煤变形量随 CH₄ 气体压力差不同的变化规律。具体试验方法见表 1 和表 2(解吸试验按照吸附试验的逆序进行)。

在研究吸附/解吸煤变形规律的过程中,气体压力使煤基质产生变形,而基质变形量很小,为忽略基质变形量的影响,设计了充入不吸附气体 He 的对照试验。在进行数据处理时,用 CH₄ 气体试验组试验数据减去相对应的 He 气体试验组试验数据。

表 1 等梯度逐次吸附 CH₄ 试验方法
Tab.1 Method in the boosting as the same gradient adsorption test

气体压力(MPa)	保利铁新 9 [#] 煤	忻州窑煤			
0.1		0.0 ↓ 0.3	0.3 ↓ 0.5	0.5 ↓ 0.7	0.7 ↓ 0.9
0.2					
...					
0.9					
...					
2.1					2.1 ↓ 2.3
2.2					
2.3					

表 2 一次升压吸附 CH₄ 试验方法
Tab.2 Method in the boosting directly adsorption test

气体压力(MPa)	保利铁新 9 [#] 煤			忻州窑煤	
0.0	0.0 ↓ 0.3	0.0 ↓ 0.6	0.0 ↓ 0.9	0.0 ↓ 0.7	0.0 ↓ 2.3
0.3					
0.6					
0.7					
0.9					
2.3					

1.2 试验试件

煤样取自保利铁新煤矿 9[#] 煤层和忻州窑煤矿,在实验室切制成 100mm×50mm×50mm 的煤样。切制时保证煤样的长度方向为平行层理方向,高度方向为垂直层理方向,如图 1 所示。

将加工好的标准试样用酒精进行擦拭,把制作好的煤样上的煤粉、碎屑等杂物清除掉,然后将 4 个应变片呈“T”形粘贴在试样的 2 个相对表面的中心,每个表面粘贴 2 片,分别为平行层理方向和垂直层

理方向(如图1所示),将不同表面上同一方向的2个应变片串联作为一组。

1.3 试验装置

试验使用自行研究的吸附/解吸变形试验装置,如图2所示,装置包括高压供气子系统、高压吸附/解吸子系统(高压吸附/解吸腔)、压力调节与控制子系统、抽真空子系统和数据采集与记录子系统。

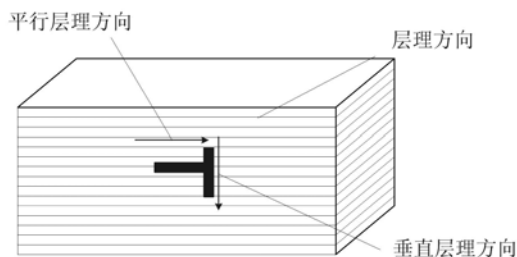


图1 切制试样

Fig.1 Schematic diagram of cut experiment

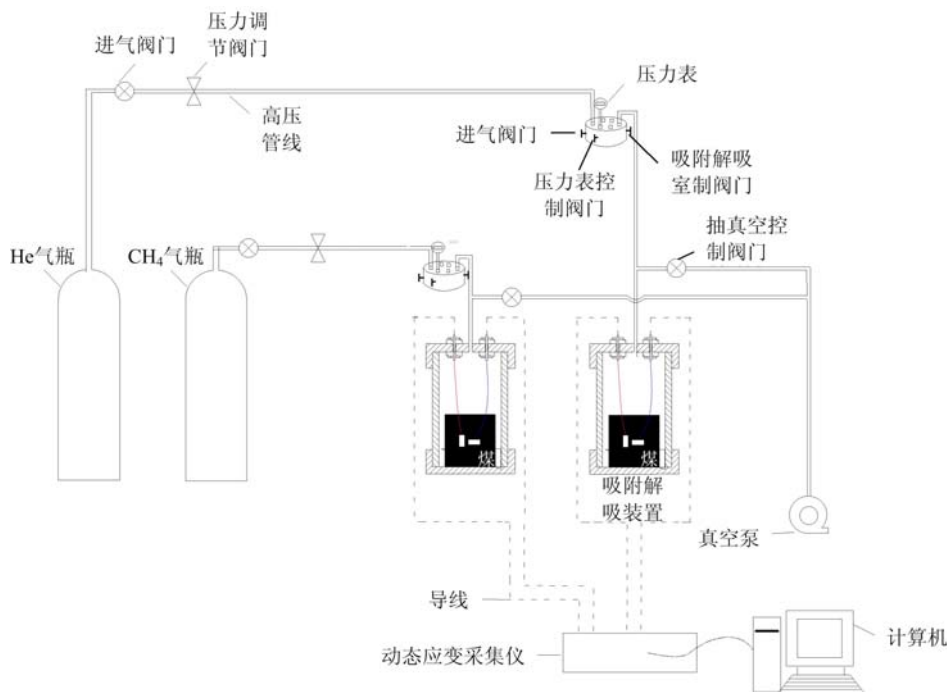


图2 试验装置原理

Fig.2 Schematic of the experimental setup

1.4 试验步骤

(1) 按照试验装置原理图连接试验系统,检测系统气密性后,把制作好的煤试样放到吸附/解吸腔,连接数据采集系统,用真空泵对吸附/解吸腔及气体通道持续抽真空24小时,关闭阀门,记录抽真空结束时的时间和各通道的数值。

(2) 按照表1所示的试验方法进行等梯度逐次升压/降压吸附/解吸试验。对保利铁新9#煤试件从0.0MPa开始升压,间隔0.1MPa,直至升压到0.9MPa;等梯度逐次升压吸附试验结束后,从0.9MPa开始,同样间隔0.1MPa进行等梯度逐次降压解吸试验。整个过程用数据采集仪间隔1s记录一次数据,直至每组试验的数据趋于一定值,即吸附/解吸达到平衡,结束此组试验。

(3) 表1中全部试验结束以后,按照表2所示的试验方法进行一次升压/降压吸附/解吸试验。对保利铁新9#煤试件进行0.0MPa~0.3MPa、0.0MPa~0.6MPa、0.0MPa~0.9MPa的升压吸附试验和对应的降压解吸试验。数据记录方式同步骤(2)。

(4) 参照步骤(2)、(3),按照表1和表2中的试验方法,用忻州窑煤试件进行等梯度逐次升压/降压

吸附/解吸试验和一次升压/降压吸附/解吸试验。

2 试验结果及分析

2.1 吸附试验结果及分析

保利铁新 9[#] 煤层煤试件经约三天吸附达到平衡,忻州窑煤矿煤试件经约两天吸附达到平衡,图 3 为保利铁新煤试件一次升压吸附煤变形量与时间的关系曲线。吸附 CH_4 气体煤相对变形量计算方法为:本组试验达到平衡后的煤变形量减去上组试验达到平衡后的煤变形量,再减去本组试验中对照组充入相同压力的 He 气体达到平衡后煤的变形量。图 4 为等梯度升压吸附试验煤最大相对变形量与压力的关系曲线,表 3 是两种吸附试验中同一压力水平条件下煤膨胀变形量数据的对比。对试验结果进行分析得出:

(1) 在等梯度升压吸附试验中,气体压力小于 1.0 MPa 时,煤最大相对变形量随气体压力的升高呈现先增大后变小的趋势,转折点为 0.6 MPa。煤累计变形量在整个试验过程中是不断增大的,在 0.6 MPa 之前增大速率是增加的,0.6 MPa 之后增大速率则不断减小;

(2) 在一次升压吸附试验中,随着压力的增加,煤的变形量是增大的;

(3) 将等梯度逐次升压吸附试验与一次升压吸附试验进行对比,同一压力水平下,前者煤变形量大于后者煤变形量,不考虑 0.9 MPa 压力水平下煤垂直层理方向变形量差值,两种吸附方式煤变形量的差值随着气体压力的升高有增大的趋势。

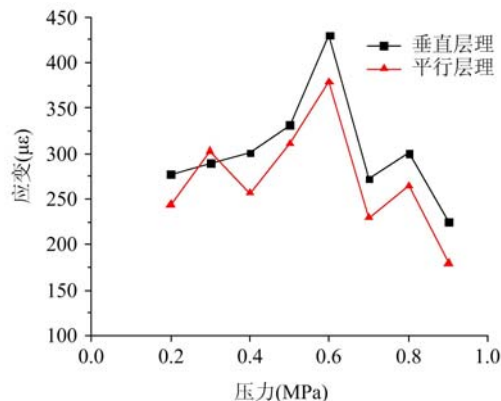
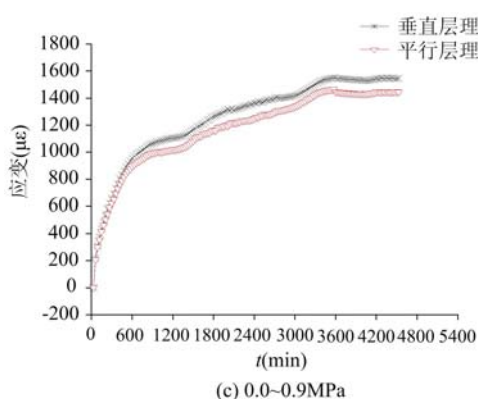
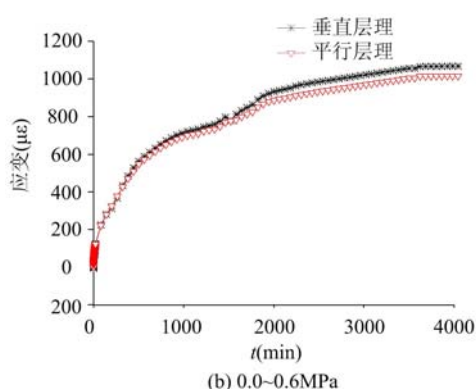
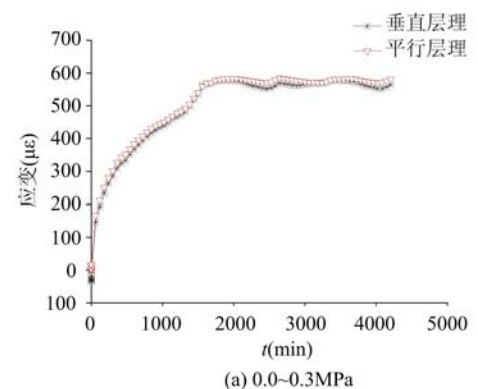


图 3 保利铁新 9[#] 煤试件一次升压
吸附煤变形量与时间的关系

Fig. 3 Relation between deformation and
time in the boosting directly test

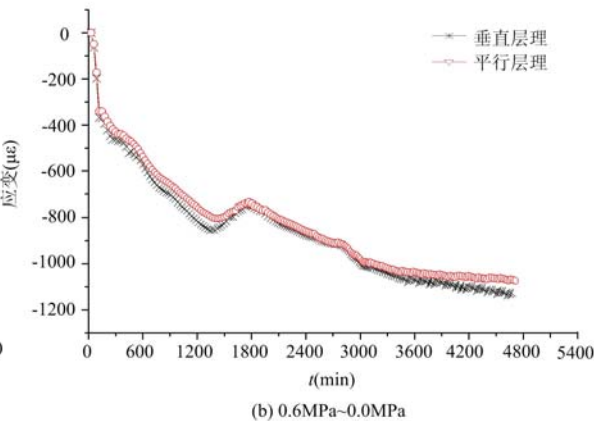
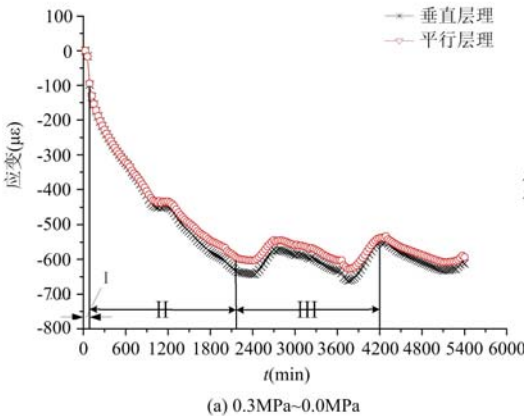
图 4 保利铁新 9[#] 煤等梯度升压吸附
试验压力与最大相对变形的关系

Fig. 4 Relation between pressure and corresponding
strain in the constant gradient

表 3 两种吸附方式相对膨胀变形量比较

Tab. 3 The comparison of the relative expansive deformation as two different types of adsorption

煤试件 来源	气体压力 (MPa)	平行层理方向变形量($\mu\epsilon$)			垂直层理方向($\mu\epsilon$)		
		等梯度逐次 升压吸附试验	一次升压 吸附试验	差值	等梯度逐次 升压吸附试验	一次吸附 试验	差值
保利铁新 9 [#] 煤层	0.0→0.3	852.8	774.3	78.5	886.5	754.2	132.3
	0.0→0.6	1709.0	1615.3	93.7	1932.5	1767.7	164.8
	0.0→0.9	2272.9	2044.7	228.2	2560.5	2458.8	101.7
忻州窑煤矿	0.0→2.3	4045.7	3380.4	665.3	4094.8	3800.6	294.2



2.2 解吸试验结果及分析

解吸过程是吸附过程的逆过程,解吸达到平衡所用时间与吸附达到平衡所用时间相差无几。图 5 为保利铁新煤试件一次降压解吸煤变形量与时间的关系曲线,表 4 是降压解吸试验中同一压力水平两种试验方法煤收缩变形量数据的对比。

由表中数据可知,等压力梯度降压解吸煤变形量与一次降压解吸煤变形量大小关系与吸附试验情况相反,即,一次降压解吸煤变形量大于同一压力水平下的等梯度降压解吸煤变形量。两种解吸方式煤收缩变形量的差值随着气体压力的降低呈减小的趋势。

结合吸附煤膨胀变形量规律分析,煤吸附/解吸气体的主要动力是气体压力差。在吸附过程中,等梯度逐次升压使得煤受到的气体作用力较一次升压吸附更均匀,且同一压力水平下,等梯度逐次吸附作用时间更长,使得等梯度逐次吸附煤变形量较一次升压吸附煤变形量大。在解吸过程中,气体压降梯度越大,提供给吸附态气体分子的能量就越大,解吸出的气体越多,煤收缩变形量越大。

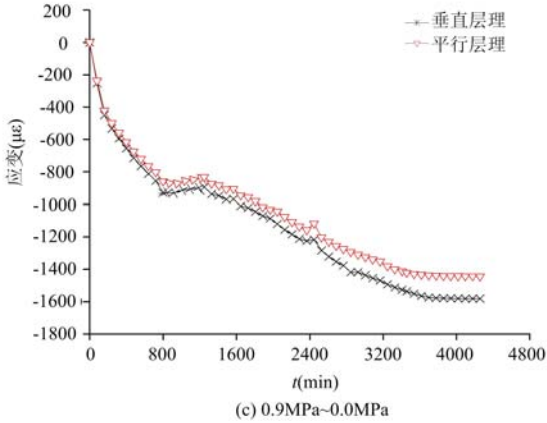


图 5 保利铁新 9[#] 煤试件一次降压解吸煤变形量与时间的关系

Fig. 5 Relation between deformation and time in the decompressing directly test

表 4 两种解吸方式相对收缩变形量比较

Tab. 4 The comparison of the relative shrinkage deformation as two different types of desorption

煤试件 来源	气体压力 (MPa)	平行层理方向变形量($\mu\epsilon$)			垂直层理方向变形量($\mu\epsilon$)		
		等梯度逐次 降压解吸试验	一次降压 解吸试验	差值	等梯度逐次 降压解吸试验	一次降压 解吸试验	差值
保利铁新 9 [#] 煤层	0.3→0.0	587.0	670.0	83.0	592.7	701.7	109.0
	0.6→0.0	1066.9	1222.7	155.8	1110.4	1297.7	187.3
	0.9→0.0	1432.6	1669.9	237.3	1519.5	1820.7	301.2
忻州窑煤矿	2.3→0.0	3102.66	3507.66	405.0	3499.36	3756.06	256.7

2.3 残余变形试验结果及分析

在解吸过程中,被煤吸附的 CH₄ 气体分子有些不能由吸附态解吸成游离态,而是以吸附态的形式继续残留在煤内,因此解吸达到平衡后,煤变形不能完全恢复,而产生残余变形。图 6 是保利铁新 9[#] 煤层试件两种吸附/解吸试验时煤产生的残余变形量随气体压力的变化曲线。由图可知,随着气体压力的增大,残余变形量有增大的趋势。结合表 5 忻州窑煤矿试件在 2.3MPa 压力范围内两种吸附/解吸方式残余变形量对比数据可知,无论是垂直层理方向还是平行层理方向,都有等梯度升压/降压吸附/解吸残余变形量大于一次升压/降压吸附/解吸残余变形量,平行层理方向前者约是后者的 1.64~2.55 倍,垂直层理方向前者最大是后者的 5.6 倍,最小是后者的 1.63 倍。对此进行分析可知,在吸附过程中,气体压力越大,裂隙孔隙产生的膨胀变形量越大,新生的微裂隙吸附态分子解吸为游离态需要很大的能量,解吸时能量主要来源于气体压力梯度,压力梯度越大,吸附态分子获得的能量越多,由吸附态变为游离态的分子量也就越多。

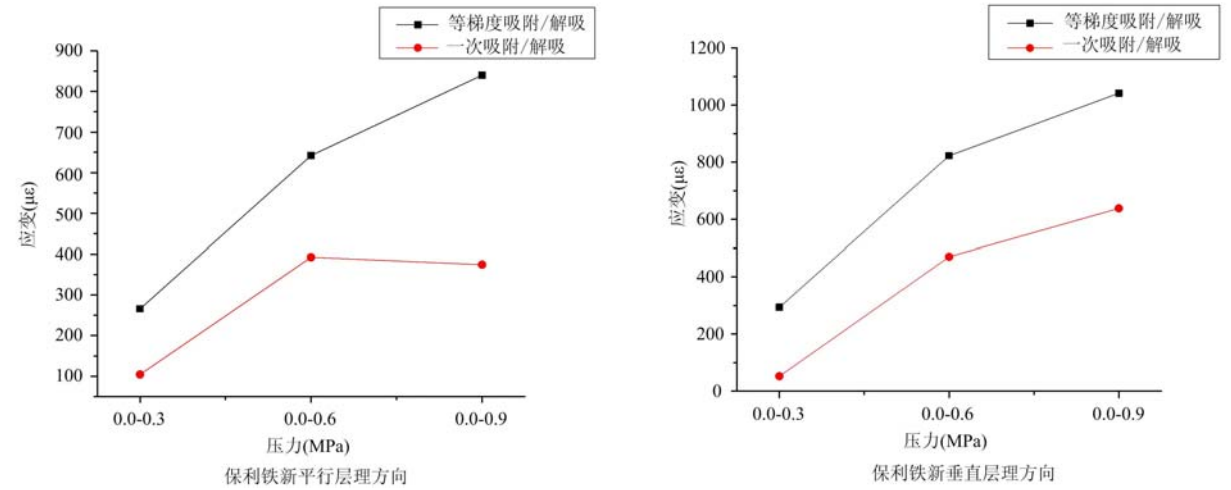


图 6 保利铁新煤试件残余变形量与压力关系

Fig. 6 Relationship between residual deformation and stress

表 5 2.3MPa 忻州窑煤吸附/解吸变形量数据

Tab. 5 Data of adsorption/desorption deformation under 2.3MPa

	平行层理方向			垂直层理方向		
	吸附总变形量	解吸总变形量	残余变形量	吸附总变形量	解吸总变形量	残余变形量
等梯度吸附/解吸	4045.7	3380.4	665.3	4094.8	3800.6	294.2
变压力梯度吸附/解吸	3286.7	2928.2	358.5	3791.5	3616.3	175.2

3 结论

通过等梯度逐次升压/降压和一次升压/降压吸附/解吸试验的研究,在吸附/解吸 CH_4 过程中,压力梯度对煤变形量有很大的影响,对试验数据进行处理,并分析对比两种试验方法煤变形量大小的关系,主要得出如下结论:

(1) 在等梯度升压吸附试验中,气体压力小于 1.0 MPa 时,煤最大相对变形量随气体压力的升高呈现先增大后变小的趋势,由此可知,煤累计变形量在整个试验过程中的增加速率是先增大后减小的;

(2) 在吸附试验中,等梯度升压吸附煤变形量大于一次升压吸附煤变形,在解吸试验中,等梯度降压解吸煤变形量小于一次降压解吸煤变形量;

(3) 气体压力差是吸附态分子解吸为游离态分子的主要动力,同一压力范围内,气体压力差越大,吸附态分子获得的能量越多,两种吸附/解吸方式产生的残余变形量随着气体压力梯度的增大而增大。

(4) 两种吸附/解吸试验中,无论是垂直层理方向还是平行层理方向,都有等梯度升压/降压吸附/解吸残余变形量大于一次升压/降压吸附/解吸的残余变形量,平行层理方向前者约是后者的 1.64~2.55 倍,垂直层理方向前者最大是后者的 5.6 倍,最小是后者的 1.63 倍。同一压力范围内,一次降压解吸好于等梯度逐次降压解吸。

参考文献:

- [1] 何学秋,王恩元,林海燕. 孔隙气体对煤变形计蚀损作用机理[J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25(1):6—11 (HE Xueqiu, WANG Enyuan, LIN Haiyan. Coal Deformation and Fracture Mechanism under Pore Gas Action[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1996, 25(1):6—11(in Chinese))
- [2] 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 (in Chinese))
- [3] Anderson R B, Bayer J, Hofer L J E. Equilibrium Sorption Studies of Methane on Pittsburgh Seam and Pocahontas No. 3 Seam Coal[C]. Coal Science, 1966:386—399.
- [4] 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(in Chinese))
- [5] 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 Bedmethanem Igration with Slippage Effects in Hypotonic Reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4):619—622(in Chinese))
- [6] Zhu W C, Wei C H, Liu J, Xu T, Elsworth D. Impact of Gas Adsorption Induced Coal Matrix Damage on the Evolution of Coal Permeability[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(6):1353—1366.
- [7] Jishan Liu, Zhongwei Chen, Derek Elsworth, et al. Interactions of Multiple Processes During CBM Extraction: A Critical Review[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 87:175—189.
- [8] 孙维吉. 不同孔径下瓦斯流动机理及模型研究[D]. 辽宁工程技术大学, 2007 (SUN Weiji. A Study of the Transport Mechanism and Model of Coalbed Methane on Different Pore Scal[D]. Liaoning Technical University, 2007(in Chinese))
- [9] 梁冰,孙可明. 低渗透煤层气开采理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2006 (LIANG Bing, SUN Keming. Theory of Exploiting Coal Methane in Low Permeability Reservoir and Its Application[M]. Beijing: Science Press Ltd., 2006(in Chinese))
- [10] Kim A G. Estimating Methane Content of Bituminous Coal Beds from Adsorption Data[M]. Washington: US Bureau of Mines Report of Investigations, 1977.
- [11] 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(in Chinese))
- [12] 刘向峰, 刘建军, 吕祥锋 等. 煤体基质吸附(解吸)变性规律试验研究[J]. 广西大学学报, 2004, 37(1):173—177 (LIU Xiangfeng, LIU Jianjun, LV Xiangfeng, et al. An Experimental Research on the Law of Adsorption (Desorption) Deformation of Coal Matrix[J]. Journal of Guangxi University, 2004, 37(1): 173 — 177 (in Chinese))
- [13] 何学秋, 聂百胜. 孔隙气体在煤层中扩散的机理[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(1):1—4 (HE Xueqiu, NIE Baisheng. Diffusion Mechanism of Porous Gases in Coal Seams[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2001, 30(1):1—4(in Chinese))
- [14] 范家文, 冯增朝, 段康廉 等. 煤体变形及其瓦斯排放的相关性试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(2): 172—174 (FAN Jiawen, FENG Zengchao, DUAN Kanglian, et al. Relativity Testing Study of Coal Mass Deformation and Gas Drainage[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004, 35(2): 172 — 174 (in Chinese))

Experimental Study of Coal Deformation Produced by CH₄ Adsorption/Desorption Taking into Account Pressure Influence

LIANG Bing¹, SHI Ying-shuang¹, SUN Wei-ji¹, YU Hong-wen²

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

2. Xinan Coal Industry Limited Company, Shuozhou 036900, Shanxi, China)

Abstract: CH₄ pressure is one of the important factors of gas adsorption/desorption. In order to study its influence, based on change pressure difference, CH₄ adsorption/desorption experiments was carried out in laboratory by both means of direct boost/buck and constant gradient successive boost/buck, respectively. Comparing the deformation size of coal subjected to above both means of adsorption/desorption, the coal residual deformation pattern was studied. Results show that under the same pressure, the expansion deformation due to constant gradient successive boost/buck is bigger than that of direct Boost/buck; while the shrinkage deformation in both means of boost/buck presents opposite relation. The residual deformation due to constant gradient successive boost/buck is bigger than that of direct Boost/buck. Under the same pressure, desorption through variable gradient buck is better than that through constant gradient successive buck.

Keywords: constant gradient successive boost/buck; direct boost/buck; expansion deformation; shrinkage deformation; residual deformation