

文章编号 : 1000 - 7598 (2013) 05 - 1247 - 06

有效应力对煤吸附特性影响的试验研究

李小春, 付 旭, 方志明, 胡海翔

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 为了研究煤岩吸附特性受有效应力影响的机制, 结合压汞试验所测定的孔隙率和孔径分布情况, 利用自制的原煤等温吸附装置, 分别在不同有效应力条件下对山西潞安煤样进行了 CH_4 等温吸附试验。结果表明: 恒温条件下, 随着有效应力的增加, 煤对 CH_4 吸附量呈下降趋势, 气体压力越高时这种变化趋势越明显; Langmuir 方程吸附常数 a 与有效应力呈负相关关系、吸附常数 b 则呈正相关关系, 分析认为这与原煤内部部分微孔隙封闭和化学势差变化有关; 根据试验数据拟合得出考虑有效应力影响的 Langmuir 方程形式, 所得结果对于煤层气资源评价和开采具有较大的参考价值。

关 键 词: 有效应力; 原煤; 吸附; Langmuir 方程; 临界孔隙尺度; 化学势

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Experimental study of influence of effective stress on coal adsorption performance

LI Xiao-chun, FU Xu, FANG Zhi-ming, HU Hai-xiang

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In order to investigate the influence mechanism of effective stress on the adsorption property of coal, a series of isothermal adsorption experiments of coal from Lu'an coal mine are designed and conducted. Combining the porosity and pore size distribution law determined by mercury injection test and using the self-made testing apparatus, the difference of methane adsorption law are confirmed under the different effective stress conditions. The results show that: When temperature is constant, CH_4 adsorption amount decreases as the effective stress increases; and the larger the gas pressure is the stronger such change tendency becomes.

The Langmuir equation constant a has a negative correlation with effective stress and the constant b has a positive correlation with effective stress. It is related to the closure of a portion of micropores and the change of chemical potential difference. According to the fitting results of experiments, the Langmuir equation takes the influence of effective stress into account is proposed. The research results have some reference significance to the reservoir evaluation and development of coalbed methane.

Key words: effective stress; raw coal; adsorption; Langmuir equation; critical pore size; chemical potential

1 引 言

煤岩由有机质、矿物质和煤中的各类孔隙、裂隙所构成, 是 1 种含不同孔径分布的多孔固态物质, 其孔隙体积主要部分是在微孔中^[1]。煤层气俗称瓦斯, 主要成分为 CH_4 , 主要以吸附态的形式赋存于其中, 煤岩表面吸附 CH_4 量的多少, 与煤岩表面积的大小密切相关, 而煤岩表面积的大小则与煤岩孔隙特征有关。国内外大量研究表明, 煤对气体分子的吸附作用来源于煤分子与气体分子之间的作用

力, 包括德拜诱导力和 London 色散力^[2-3]; 煤的吸附特性受煤本身性质 (包括煤的显微组分、煤阶、煤体结构) 和气体类型及煤体所处地层温度等条件控制^[4-5]。

储层条件下, 煤岩吸附气体可以产生膨胀, 如果膨胀受到限制, 将会导致原位应力状态的改变, 可以明显地改变煤岩内部的孔隙体积和表面积, 而煤岩的吸附特性又与两者密切相关, 因此, 应力是影响煤岩吸附特性的重要因素之一^[6-9]。目前, 国内外学者针对应力对煤岩解吸特性影响方面进行了

收稿日期: 2012-03-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 51104143, No. 50904061)。

第一作者简介: 李小春, 男, 1964 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土工程安全性监测与评价、二氧化碳地下储存地层稳定性评价与工程设计理论方面的研究工作。E-mail: xcli@whrsm.ac.cn

一些研究工作。何满潮等^[10]通过试验研究了单轴应力-温度作用下煤中吸附 CH₄ 解吸特征,认为煤体在静载作用下破裂诱使吸附 CH₄ 产生解吸;唐巨鹏等^[11]在试验研究中发现,煤体解吸量与有效应力呈负指数递减关系,认为当有效应力达到一临界值时,原有孔隙、裂隙闭合,煤内表面积迅速减小,从而吸附 CH₄ 量极少或者没有;Sander 等^[12]研究发现,在单轴有效应力作用下型煤吸附 CO₂ 发生了解吸现象,并给出了考虑煤基质表面自由能减少的吸附模型。由以上研究可见,应力确实影响了煤岩的解吸特性,但机制尚不清楚,且有矛盾之处。一般认为,煤吸附解吸气体是可逆过程,应力既然影响煤岩的解吸特性也会影响吸附特性,但以上研究并没有直接证明在吸附过程中应力产生了影响,同时这些研究涉及多个物理场的耦合过程,没有考虑有效应力作为单一因素对煤岩吸附特性的影响。

因此,根据上述研究中的不足,本文利用自主研发的原煤等温吸附装置,分别在有效应力为 5、10、15、20、30 MPa 作用下进行了脱气干燥原煤样对 CH₄ 气体的等温吸附试验,依据试验结果探讨了有效应力对煤吸附能力的影响和 Langmuir 吸附常数随有效应力变化机制,根据试验数据拟合得出了考虑有效应力影响的 Langmuir 方程,该方程对于煤层气资源评价和开采具有较大的参考价值。

2 试验介绍

2.1 试验原理

目前,有关煤对 CH₄ 的等温吸附试验方法多采用粉煤作为试验样品,该法既破坏了煤岩中原始的孔隙裂隙结构,也不能对煤样施加应力,不能较为真实地描述吸附气体在煤岩中的赋存规律。为此,笔者开发了应力条件下原煤等温吸附试验装置,如图 1、2 所示。

该试验装置的测定原理是:将事先加工好的圆柱形试样用热收缩管包裹,然后安放在压力容器内。利用计量泵给试样施加一定围压。然后真空脱气,脱气完成后充氦气测定管路系统和试样内孔隙体积。调节调压阀,向参考容器中充入一定压力的气体,待参考容器中的气体压力稳定后,打开参考容器和压力容器之间的阀门,此时煤样开始吸附气体,根据系统内气体压力变化,利用计量泵调整围压值,使试验过程中有效应力为一恒定值。吸附平衡后,根据已知充入的气体量,扣除自由体积中的游离量,即为吸附量;重复上述过程,得到各平衡压力下的吸附量。

煤样的等温吸附曲线,由 Langmuir 方程来描述,即^[13]

$$A = \frac{abP}{1 + bP} \tag{1}$$

式中: P 为气体压力 (MPa); A 为吸附量 (mL/g); a 、 b 均为吸附常数。 a 称为 Langmuir 体积 V_L , 又称饱和吸附量; b 为 Langmuir 压力 P_L 的倒数。

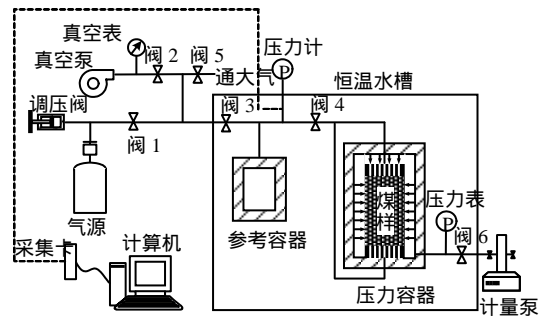


图 1 应力条件下原煤等温吸附试验装置示意图
Fig.1 Sketch of testing apparatus for measuring isothermal adsorption of coal under stress conditions



图 2 应力条件下原煤等温吸附试验装置照片
Fig.2 Photo of testing apparatus for measuring isothermal adsorption of coal under stress conditions

2.2 试验条件

试验用煤样取自山西潞安常村煤矿的气煤,由加工成直径为 50 mm、长为 50 mm 的圆柱形试样。试验前取一典型原煤样置于干燥箱内加热到 105 时恒温 90 min,再冷却至室温后取出称重,最终试样质量为 147.22 g。

将加工后所剩原煤制成 4 组边长为 10 mm 的立方体煤块,送至日本经济产业省产业技术综合研究所进行压汞试验。根据压汞法测定原煤样的孔隙率为 5.78%,以孔隙半径 R 的对数为横坐标并以不同孔径所对应的孔隙体积占总孔隙体积的百分比即孔容比 C 为纵坐标列出孔径分布情况,如图 3 所示。

根据霍多特的孔径结构十进制划分方案^[14],从图 3 可以看出,试验煤样的孔容积主要分布在微孔

(小于 $1 \times 10^{-2} \mu\text{m}$) 和过渡孔 (介于 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1} \mu\text{m}$) 段, 大孔 (大于 $1 \mu\text{m}$) 所占体积次之, 而中孔 (介于 $1 \times 10^{-1} \sim 1 \mu\text{m}$) 所占体积最少。

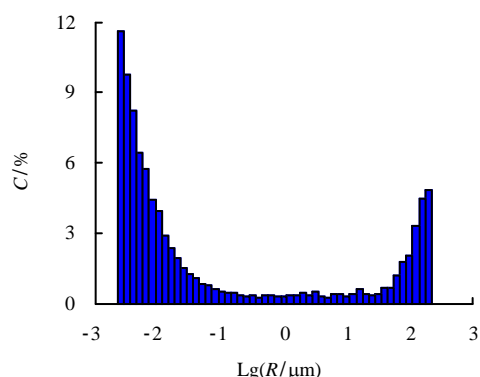


图 3 原煤样孔径分布

Fig.3 Pore size distribution of coal sample

试验所用 CH_4 气体纯度为 99.995%。利用纯度为 99.999% 的 He 测得系统参考容积为 12.86 mL、压力容器内自由空间体积为 7.62 mL。试验过程中, 整个试验系统控制恒定温度为 40。

试验前利用 CH_4 测定系统在不同气体压力下的泄漏率情况, 如图 4 所示。

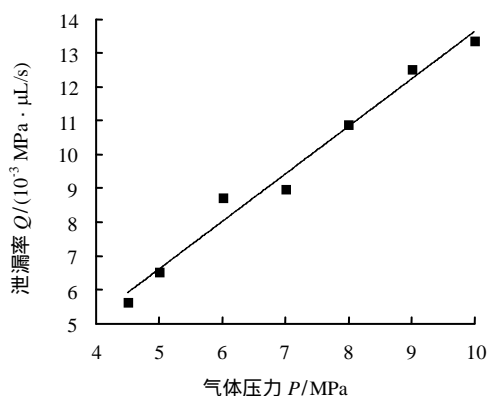


图 4 不同气体压力下的泄漏率情况

Fig.4 Leakage rate of testing apparatus under different pressures

泄漏率 Q 的拟合方程为

$$Q = 0.0014P \quad (2)$$

该方程相关系数为 0.9777, 计算吸附量时利用该方程求得不同初始压力下的系统泄漏率, 并结合吸附时间对结果进行修正。

2.3 试验流程

(1) 利用计量泵将压力容器内围压调至试验设定压力, 然后打开阀门 1、3, 此时阀门 2、4、5 关闭, 打开气瓶, 调节调压阀向参考容器注气, 待容器内气体达到所需压力后, 关闭调压阀, 记录此时参考容器内的压力值。

(2) 关闭阀门 1、3, 打开阀门 4, 此时煤样开始吸附气体, 连续监测系统压力变化。根据系统内气体压力变化, 利用计量泵调整围压值, 使试验过程中有效应力为一恒定值。待煤样吸附平衡后根据参考容器内气体压力的初始值、平衡后的气压、管路系统和试样内孔隙体积即可计算煤样的吸附量。

(3) 改变参考容积内的初始压力设定值可以进行下一步试验, 直至试验最高压力。

(4) 上述试验完成后, 重新对系统抽真空, 调高有效应力值, 重复步骤 (1)~(3), 进行下一组原煤等温吸附试验, 直至完成全部 5 组试验。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

试验测得的在不同有效应力作用下, 同一原煤等温吸附试验数据如表 1 所示, 等温吸附曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 在有效应力恒定的条件下, 原煤等温吸附曲线仍符合第 I 类等温线特征, 并与 Langmuir 方程具有较好的拟合程度, 拟合结果如表 2 所示。

表 1 不同有效应力作用下原煤等温吸附试验数据

Table 1 Isothermal adsorption test data of coal under different effective stresses

试验点号	有效应力 $\sigma_e=5 \text{ MPa}$		有效应力 $\sigma_e=10 \text{ MPa}$		有效应力 $\sigma_e=15 \text{ MPa}$		有效应力 $\sigma_e=20 \text{ MPa}$		有效应力 $\sigma_e=30 \text{ MPa}$	
	P/MPa	$A/(\text{mL/g})$	P/MPa	$A/(\text{mL/g})$	P/MPa	$A/(\text{mL/g})$	P/MPa	$A/(\text{mL/g})$	P/MPa	$A/(\text{mL/g})$
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.67	2.26	0.79	2.01	1.20	2.13	1.20	2.21	1.47	1.64
3	2.10	4.84	2.19	4.39	3.08	3.90	3.28	3.75	3.67	2.60
4	4.03	6.61	4.18	5.85	5.22	4.78	5.43	4.37	5.45	3.02
5	6.05	8.42	6.10	6.81	7.20	5.15	7.36	4.58	7.36	3.19
6	7.66	9.47	7.61	7.34	8.60	5.32	8.75	4.63	8.71	3.24
7	9.01	10.03	8.78	7.83	9.75	5.47	9.90	4.62	9.88	3.22
8	10.16	10.41	9.99	8.01	10.88	5.44	10.96	4.57	10.94	3.17

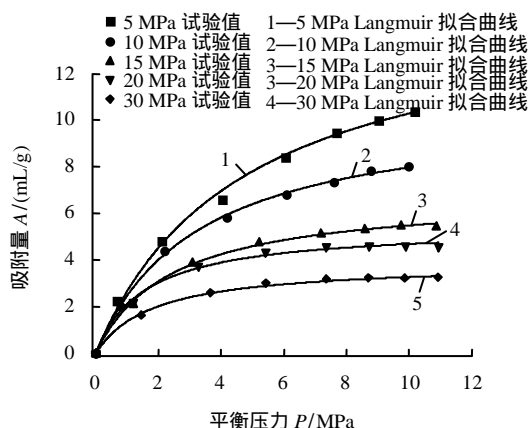


图5 不同有效应力作用下原煤等温吸附曲线
Fig.5 Isothermal adsorption curves of coal under different effective stresses

表2 不同有效应力作用下原煤等温吸附试验拟合结果
Table 2 Isothermal adsorption test fitting results of coal under different effective stresses

有效应力 σ_e /MPa	常数 a / (mL/g)	常数 b /MPa ⁻¹	R^2	Langmuir 拟合方程
5	15.07	0.21	0.996	$A = 3.16P / (1 + 0.21P)$
10	10.59	0.31	0.999	$A = 3.28P / (1 + 0.31P)$
15	6.81	0.42	0.997	$A = 2.86P / (1 + 0.42P)$
20	5.44	0.63	0.994	$A = 3.43P / (1 + 0.63P)$
30	3.87	0.55	0.993	$A = 2.13P / (1 + 0.55P)$

由于本试验结果与 Langmuir 方程具有较好的拟合程度,故根据每组试验结果拟合的 Langmuir 方程绘制在相同的气体压力下吸附量随有效应力变化关系图,如图6所示。

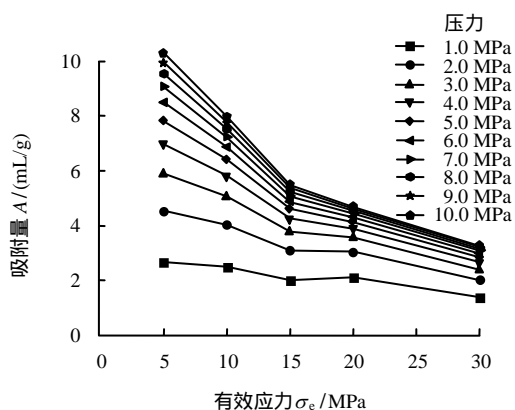


图6 吸附量A随有效应力 σ_e 的变化关系
Fig.6 Variation relationships between adsorption amount A and effective stress σ_e

由图可以看出,当CH₄压力一定时,随着有效应力的增加,煤样吸附CH₄量呈下降趋势。如在1.0 MPa压力下,有效应力从5~30 MPa,煤样的吸附量从2.61 mL/g减少到1.37 mL/g,吸附量减少

了47%;在4.0 MPa压力下,有效应力从5~30 MPa,煤样的吸附量从6.87 mL/g减少到2.67 mL/g,吸附量减少了61%,可见有效应力对煤岩吸附能力的影响不容忽视。同时,气体压力较高时,吸附量受有效应力影响明显;在气体压力较低时,与气体压力较高时相比吸附量受有效应力影响较小。

3.2 结果讨论

由于 Langmuir 方程描述的是非孔固体表面上的单分子层吸附,而煤岩是一种典型的孔隙裂隙双重孔隙介质,吸附能力与其复杂的孔隙结构密切相关,因而在理论上煤的吸附特性不完全服从 Langmuir 方程。但根据试验结果原煤对CH₄的吸附等温线与单分子层吸附等温线均符合第 I 类等温线类型,且 Langmuir 方程的两个吸附常数 a 、 b 的物理意义比较明确,所以本文仍采用 Langmuir 方程来研究有效应力对煤岩吸附特性的影响规律。

为了得到考虑有效应力影响的 Langmuir 方程,利用 Matlab 软件将5组试验数据中的气体压力 P 、有效应力 σ_e 、吸附量 A 整体进行三维数据拟合,并考虑将吸附常数 a 、 b 与有效应力之间的关系按照指数函数拟合,最终结果为

$$A = \frac{18.033 0e^{-0.055 69\sigma_e} 0.229 8e^{0.030 53\sigma_e} P}{1 + 0.229 8e^{0.030 53\sigma_e} P} = \frac{4.144 0 e^{-0.025 16\sigma_e} P}{1 + 0.229 8 e^{0.030 53\sigma_e} P} \quad (3)$$

该方程相关系数为0.9816,具有一定的拟合程度。将式(3)与式(1)对比可以看出,吸附常数 a 与有效应力 σ_e 成负相关关系,而吸附常数 b 则成正相关关系; a 值的变化程度要大于 b 值,在两者综合作用下吸附量 A 随有效应力的增加而减小,但最终将趋于一恒定值。

该方程拟合图形如图7所示。

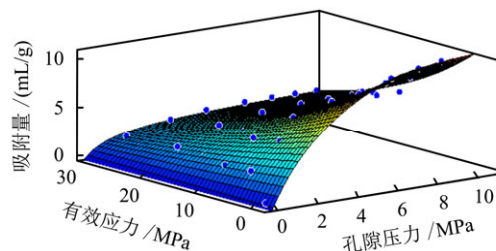


图7 考虑有效应力影响的 Langmuir 方程拟合图形
Fig.7 Fitting diagram of Langmuir equation which take the influence of effective stress into account

根据以上试验结果及分析可以提出考虑有效应力影响的 Langmuir 方程形式:

$$A = \frac{a(\sigma_e)b(\sigma_e)P}{1+b(\sigma_e)P} \quad (4)$$

吸附常数 a 代表最大吸附能力，其物理意义是：在给定的温度下，煤吸附 CH_4 达到的最大吸附量，即煤岩内部所有吸附位被气体分子完全占有时的吸附量^[15]。它随有效应力的升高而降低，主要与煤岩内孔隙结构和表面积变化有关。笔者认为，煤岩对不同的吸附气体存在不同的临界孔隙尺度，其定义为：气体进入到煤体内部孔隙的最小孔径值。在恒定温度下，煤岩内孔隙大小随气体压力和作用在煤骨架上的应力变化而变化，即由有效应力控制。有效应力的增加导致部分微孔隙闭合，使其孔径小于临界孔隙尺度，气体很难进入到这部分孔隙中，进而导致煤岩饱和吸附量的减少。另一方面，有效应力的增加，会导致煤岩孔隙率的减少，造成煤岩内表面积的减少，进而造成表面吸附位的损失，也可以导致煤岩饱和吸附量的减少。

吸附常数 b 为 Langmuir 压力 P_L 的倒数，反映的是吸附速率与解吸速率的比值关系，由于在本试验研究范围内的有效应力很难改变地质年代内形成的煤分子与气体分子之间的作用力，从而不能单纯地从吸附动力学角度对 b 值变化的机制进行解释。为了能更细致地了解应力对吸附常数 b 值的影响机制，本文利用热力学知识研究应力对煤岩与吸附气体之间化学势差的影响，而化学势差的变化正是造成应力作用下 b 值变化的原因。

正如温度梯度是决定热传导过程方向和限度的参量一样，化学势（偏摩尔 Gibbs 自由能）则是决定恒定温度和压力条件下化学反应方向和限度的强度性质。温度差越大，热传导进行得越强烈。同样，化学势差越大，越能推动化学反应的进行。应力作用下煤岩与气体由于相互作用组成了一个体系，该体系在化学势梯度的驱动下发生着物质和能量的交换。

在应力作用下煤岩吸附气体的这一过程中化学势变为^[16]

$$\Delta\mu = \mu_s - \mu_f = (f_s - f_f) + P(v_s - v_f) + (\sigma_n - P)v_s \quad (5)$$

式中： μ_s 为固相物质的偏摩尔自由能，也称为化学势； μ_f 为气相物质的偏摩尔自由能； f_s 为固相偏摩尔 Helmholtz 自由能，对于固相材料而言，Helmholtz 自由能代表了材料的应变能； f_f 为气相偏摩尔 Helmholtz 自由能； v_s 为固相物质的偏摩尔体积； v_f

为气相物质的偏摩尔体积； σ_n 为煤岩表面上的压力。

等式右边第 1 项表示应力 σ_n 作用下与气体压力 P 作用下的弹性应变能之差，第 2 项为静水应力与吸附引起的偏摩尔体积变化的乘积，第 3 项为有效应力与固相物质偏摩尔体积的乘积。由上述表达式可知，应力作用下煤岩发生吸附时化学势变化受三方面的因素影响，即弹性应变能、气体压力及有效应力。

由热力学知识可知，反应总是从化学势高的方向向化学势低的方向进行，无论有无应力作用在煤岩上，煤岩都将吸附气体，说明这时气体的化学势高于煤岩的化学势，当吸附平衡时 $\Delta\mu = 0$ ，但式(5)表明，受应力煤岩与周围环境之间形成的压力差改变了原有的化学势差，使得吸附过程发生了变化。值得注意的是，上述分析过程中未考虑吸附相化学势，这是因为煤岩吸附气体为自发过程，由固体相与气相之间的化学势差决定，当气体分子吸附到煤岩表面时吸附相化学势等于煤岩固相化学势，吸附平衡时固相、吸附相、气相三者化学势相等。

4 结 论

(1) 有效应力对煤岩吸附 CH_4 量有明显影响。恒温条件下，增加有效应力，吸附量降低，而且气体压力较低时影响不大，气体压力较高时影响明显。

(2) 煤岩对不同的吸附气体存在不同的临界孔隙尺度。有效应力增加导致部分微孔孔隙尺寸小于临界孔隙尺度，气体很难进入到这部分孔隙中，进而对吸附量产生影响。另一方面，较大孔隙在有效应力作用下发生压缩，导致表面积减小，也是减小吸附量的因素之一。

(3) 应力条件下原煤等温吸附曲线仍可用 Langmuir 方程描述，但分析认为，吸附常数 a 、 b 均为有效应力 σ_e 的函数，根据试验结果提出考虑有效应力影响的 Langmuir 方程形式。该方程与传统 Langmuir 方程相比，考虑了有效应力对吸附量的影响，这对于煤层气资源评价和开采具有较大的参考价值。

(4) 由于原煤本身为各向异性的非均质体且试验组数较少，因此，本文仅仅是初步研究和提供以上研究思路，对于复杂地应力条件下的煤层气赋存规律，还需要大量试验和进一步的深入分析。

参 考 文 献

[1] 冯增朝. 低渗透煤层瓦斯强化抽采理论及应用[M]. 北

- 京: 科学出版社, 2008.
- [2] 方志明, 李小春, 白冰. 煤岩吸附量-变形-渗透系数同时测量方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1829 - 1833.
FANG Zhi-ming, LI Xiao-chun, BAI Bing. Study of method for simultaneously measuring adsorption-deformation-permeability of coal[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(9): 1829 - 1833.
- [3] 钟玲文. 煤的吸附性能及影响因素[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(3): 327 - 334.
ZHONG Ling-wen. Adsorptive capacity of coals and its affecting factors[J]. **Earth Science—Journal of China University of Geosciences**, 2004, 29(3): 327 - 334.
- [4] 张天军, 许鸿杰, 李树刚, 等. 温度对煤吸附性能的影响[J]. 煤炭学报, 2009, 34(6): 802 - 805.
ZHANG Tian-jun, XU Hong-jie, LI Shu-gang, et al. The effect of temperature on the adsorbing capability of coal[J]. **Journal of China Coal Society**, 2009, 34(6): 802 - 805.
- [5] 方志明. 混合气体驱替煤层气技术的机理及试验研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [6] RANJITH P G, PERERA S M S A. A new triaxial apparatus to study the mechanical and fluid flow aspects of carbon dioxide sequestration in geological formations[J]. **Fuel**, 2011, 90(8): 2751 - 2759.
- [7] HAN FENGSHUANG, BUSCH ANDREAS, KROOSS B M, et al. Experimental study on fluid transport processes in the cleat and matrix systems of coal[J]. **Energy & Fuels**, 2010, 24(Supp.): 6653 - 6661.
- [8] WU YU, LIU JISHAN, DEREK ELSWORTH, et al. Dual poroelastic response of a coal seam to CO₂ injection[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2010, 4(4): 668 - 678.
- [9] DENIS J PONE N, PHILLIP HALLECK M, MATHEWS JONATHAN P. Sorption capacity and sorption kinetic measurements of CO₂ and CH₄ in confined and unconfined bituminous coal[J]. **Energy & Fuels**, 2009, 23(9): 4688 - 4695.
- [10] 何满朝, 王春光, 李德建, 等. 单轴应力-温度作用下煤中吸附瓦斯解吸特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 865 - 872.
HE Man-chao, WANG Chun-guang, LI De-jian, et al. Desorption characteristics of adsorbed gas in coal samples under coupling temperature and uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(5): 865 - 872.
- [11] 唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 有效应力对煤层气解吸渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1563 - 1568.
TANG Ju-peng, PAN Yi-shan, LI Cheng-quan, et al. Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of coalbed methane[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1563 - 1568.
- [12] SANDER HOL, PEACH COLIN J, SPIERS CHRISTOPHER J. Applied stress reduces the CO₂ sorption capacity of coal[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2010, 85(1): 128 - 142.
- [13] 中华人民共和国煤炭工业部. MT/T752 - 1997 煤的甲烷量测定方法[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.
- [14] 霍多特 B B. 煤与瓦斯突出[M]. 宋仕钊, 王佑安译. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [15] 朱和保, 严家平, 王松, 等. 煤体温度压力变化对瓦斯吸附性能影响的试验研究[J]. 煤炭技术, 2010, 29(4): 186 - 190.
ZHU He-bao, YAN Jia-ping, WANG Song, et al. Experimental discussion on the gas absorption performance effected by temperature and gas pressure[J]. **Coal Technology**, 2010, 29(4): 186 - 190.
- [16] 申林方, 冯夏庭, 潘鹏志, 等. 应力作用下岩石的化学动力学溶解机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1322 - 1323.
SHEN Lin-fang, FENG Xia-ting, PAN Peng-zhi, et al. Chemical kinetics dissolution mechanism of rock under stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1322 - 1323.