

文章编号:1000-582X(2008)06-0667-05

基于声震法的煤层气特性测试系统

鲜晓东,石为人

(重庆大学 自动化学院,重庆 400030)

摘要:通过声震法影响煤层气吸附和渗流特性的原理,设计了一种用于煤样对煤层气的吸附/解吸和渗流特性研究的测试系统。该系统以压力试验机为主体,由智能声波发生器、吸附及渗流、加压、变形测试、气体供给。测试等 6 部分组成。介绍了实验装置的功能和操作方法。实验结果表明该装置完全能够满足加声场与不加声场条件下煤层气的吸附和渗流实验需求。

关键词:测试系统;声震法;煤层气;吸附/解吸;渗流;声场

中图分类号:TP274

文献标志码:A

An ultrasonic vibration-based test system for the study of coalbed gas

XIAN Xiao-dong, SHI Wei-ren

(Automation College of Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

Abstract: Based on the influence of ultrasonic vibration on the adsorption/desorption and seepage characteristics of coalbed gas, a test system for the measurement of adsorption and seepage characteristics of coalbed gas was designed. The main component of the system is a pressure testing device. The test system consists of six parts, including an intelligentized acoustic generator, adsorption and seepage devices, a pressure supply, a deformation measurement component, a gas supply and a deformation tester. The function and operating method of the test system were introduced in detail. Experimental results show that the test system can meet completely the requirements for the characterization of adsorption/desorption and seepage of coalbed gas in either the presence or absence of an ultrasonic field.

Key words: test system; ultrasonic vibrating; coalbed gas; adsorption; seepage; ultrasonic field

煤层气,原称煤层瓦斯,是含煤岩系中有机质在成煤过程中生成的以甲烷(CH_4)为主混有一些有害物质的多组分气体。国内外许多学者研究了煤的物理化学结构、煤岩成分与显微组分、煤级、灰分与水分含量以及在应力场、温度场、静电场、交变电场下煤对甲烷气的吸附/解吸特性^[1-6]。文献[7]曾提出对声场作用下的煤层气渗流特性进行研究。但在声场作用下煤对甲烷气的吸附/解吸和渗流特性研究^[8]却很少。文中介绍了一种可用于研究声场作用下甲烷的吸附、解吸、渗流特性的实验装置、实验方法及实验结果。

1 吸附、渗流的特性分析

1.1 吸附特性分析

煤层气主要以吸附形态赋存于煤体中。天然煤中甲烷的吸附量可以用修正的 Langmuir 公式来表示:

$$Q = \frac{abP}{1 + bP} e^{n(t_0 - t)} \cdot \frac{1}{1 + 0.31\omega} \cdot \frac{100 - A - \omega}{100}, \quad (1)$$

式中 P 为压力; A 为灰分; ω 为水分; t_0 为实验室测定煤的 a, b 值时的实验温度; t 为煤层温度; e 为自

收稿日期:2008-04-18

基金项目:重庆市院士基金资助项目(STC2005AB6007)

作者简介:鲜晓东(1966-),女,重庆大学副教授,主要研究方向为智能系统、无线传感器网络及其应用、移动机器人控制、信号处理等。(E-mail) xxd@cqu.edu.cn.

然对数的底数, $e = 2.78$; n 为实验系数, 与 P 值有关。

从式(1)中可以看出煤对甲烷的吸附不仅受煤岩自身的性质制约, 还要受到温度、湿度、气体压力等因素的影响。

而煤层气在煤层中流动时, 温度不变, 并等于煤温, 游离状态的煤层气服从理想气体状态方程,

$$p = \rho RT, \quad (2)$$

式中: p 为吸附平衡压力; R 为煤层气气体常数; T 为煤层绝对温度; ρ 为游离态煤层气的密度。

提高煤层气的抽采率可通过改变影响煤对煤层气吸附的相关参数, 降低煤对煤层气的吸附量, 打破吸附平衡, 使其解吸。

1.2 渗流特性

应力场、温度场中煤的渗透率与有效应力成负指数的关系, 与煤体的温度 T 成幂函数关系^[7], 其表达式为

$$k(\sigma, T) = k_0(1 + T)^m e^{-B\sigma}, \quad (3)$$

在声场作用下, 煤体渗透率 k_j 与声场强度的经验公式为

$$k_j = k(\sigma, T)(1 + \beta J), \quad (3)$$

式中 J 为声场强度; β 为试验确定的系数。

那么在地应力、温度、声场作用下的煤体渗透率 $k(\sigma, T, J)$ 就可表示为

$$k(\sigma, T, J) = k_0(1 + \beta J)(1 + T)^m e^{-B\sigma}, \quad (4)$$

从公式(2)、(3)、(4)可以看出: 当有效应力、温度、声强发生变化时, 煤体的渗透率也会发生变化。

煤层气抽采时通过改变有效应力、温度、声强等来提高煤体渗透率, 以提高煤层气在煤层中的流动性。

由于吸附和渗流特性都要受到气体压力、湿度、温度等外界环境因素的影响, 那么实验装置就需要能够模拟特定情况下的煤层气实验环境。

具体功能要求:

1) 能够在恒压条件下测定不同温度时的吸附量。

2) 当吸附物质的量或体积一定时, 能够测量不同温度下、有声场作用和无声场作用下压力的变化。

3) 能够在恒温条件下、加声场/不加声场时, 测定不同压力下的吸附量。

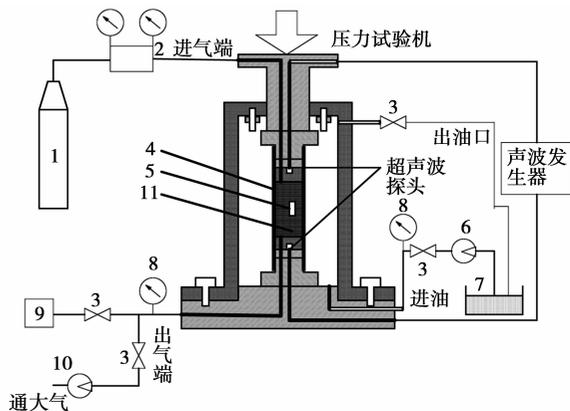
4) 能够测定相同压力下不同煤样的解吸量, 同种煤样在不同解吸压力下的解吸速度。

5) 能够进行煤样在不同声场作用下的甲烷气的渗流特性实验测试。

2 实验装置结构

实验装置以压力试验机为主体, 由智能声波发生器^[9-11]、吸附及渗流装置、加压系统、变形测试系统, 气体供给系统, 测试系统等 6 部分组成, 如图 1 所示。

1) 智能声波发生器是一套智能化可控声震法的实验系统, 由接收机、发射机、智能控制系统 3 部分组成。



注: 1. 高压甲烷气瓶, 2. 减压阀, 3. 高压阀, 4. 热收缩管, 5. 应变片, 6. 手动液压泵, 7. 油箱, 8. 压力表, 9. 吸附/解吸/渗流测量装置, 10. 真空泵, 11. 煤样

图 1 可控声场作用下煤对瓦斯吸附、解吸、渗流实验装置示意图

图 2 中虚线框内为智能控制系统, 主要由消除直流偏置电路、电压跟随器、可控功率放大器和信号反馈电路组成, 实现了声波频率和声强的任意调节, 且可根据反馈环节发送回来的反馈信号实现对发射机和接收机的频率跟踪。发射机和接收机为压电陶瓷式超声波换能器^[12], 即图 1 中的超声波探头。文中所用超声波探头具有频率范围宽、精度高、功率大等特点。

2) 气体由高压瓦斯气瓶通过减压阀减压供给, 瓦斯气瓶减压阀的高压腔与气瓶连接, 低压腔为气体出口, 通往使用系统。高压表的示值为气瓶内贮存气体压力。低压表的出口压力可由调节螺杆控制。使用时先打开气瓶总开关, 然后顺时针转动低压表压力调节螺杆, 使其压缩主弹簧并传动薄膜、弹簧垫块和顶杆将活门打开。这样进口的高压气体由高压室经节流减压后进入低压室, 并经出口通往工作系统。转动调节螺杆, 改变活门开启的高度, 从而调节高压气体的通过量并达到所需的减压压力^[13]。

3) 吸附及渗流装置是一个压力容器(图 1 中 4 热收缩管内部分), 试验时将试件以及换能器装在该

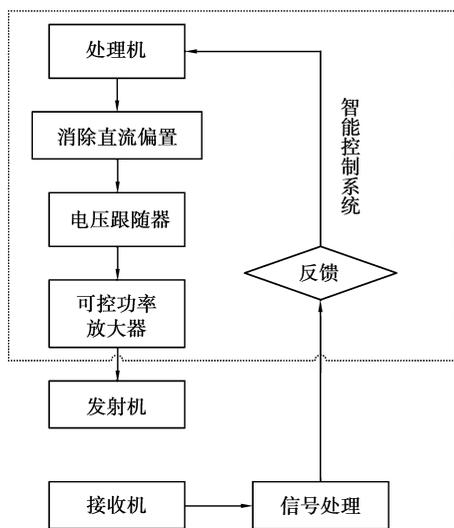
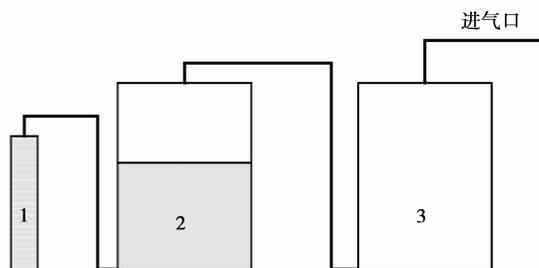


图 2 智能声波发生器结构示意图



注:1. 量筒, 2. 含盐水玻璃瓶, 3. 空玻璃瓶

图 3 测试系统示意图

压力容器。其围压可以达到 8 MPa, 实验的气体压力可以达到 6 MPa, 可以进行高低压煤层气的吸附、解吸、渗流实验。

4) 加压系统由轴向加压和围压加压两部分构成。轴向加压为 25 MPa 的千斤顶, 用于对试件进行轴向加压。围压采用手动的液压泵进行加载, 手动液压泵通过手动将油压进油腔内, 从而为试件提供围压, 围压的大小通过压力表显示。

5) 变形测试系统采用应变仪测试试件在其整个受力过程中的轴向及横向形变, 在实验应力分析及静力强度和动力强度的研究中, 应变仪可用来测量试件及其结构的静、动态拉伸及压缩应变, 也可测量试件及其结构上任意点的应变。

6) 测试系统示意图见图 3, 可以用于包括测试吸附缸的自由空间、高低压吸附测试、解吸测试、渗流测试等。测试时将图 1 中出气口端与测试系统进气口通过高压阀相连。测试时打开高压阀使气体进入图 3 中玻璃瓶 3, 由于玻璃瓶 2 与玻璃瓶 3 通过导管相连, 当 3 中气体增加时, 瓶 2 中的水在气体的压力下将通过其底部导管排到量筒 1 中, 通过测量单位时间排出的水的体积, 再经过公式计算得到相应的测试数据。

3 实验方法及数据

3.1 吸附/解吸实验方法

煤层气的低压吸附采用容量法测试, 将煤样破碎, 筛 40~60 目作为实验煤样, 取其 35.0 g 置于带有压力表的吸附缸中, 将吸附缸的所有压盘用热收缩管密封后放在压力容器中, 在压力容器上加载一

定的轴向压力, 用手动液压泵加载 2 MPa 的围压。开启真空泵让煤样在常温下脱气 6 h, 脱气后向吸附缸中注入不吸附氦气测出吸附缸的自由空间, 然后再脱气 6 h, 脱气后向吸附缸中注入 1 个大气压的甲烷气体, 达到吸附平衡后测出滴定管下降水的体积, 则两体积之差为煤样的吸附量, 可以得到单位煤样的吸附量^[14]。

煤层气的高压吸附也采用容量法测试, 安装过程与煤样低压吸附相同, 要求围压比气压大 2 MPa。实验中测量出每一平衡压力之间排出的体积, 这样一直测到 1 个大气压。通过公式计算就可以得到不同压力的吸附量。

解吸试验的安装过程与煤样低压吸附相同, 煤样脱气 6 h, 然后向吸附缸中注入一定压力的甲烷, 当吸附 3 h 达到平衡后, 打开高压气阀让吸附缸与大气接通 30 s, 排除甲烷气体, 然后关上高压气阀让甲烷解吸, 测量出放水排出到量筒中水的体积, 然后换算单位质量煤的解吸量, 就可以得到解吸量与时间关系曲线。

3.2 吸附/解吸实验结果及数据

按照上述吸附实验方法, 对采自三汇煤矿煤样进行不加声场的实验。在该实验结束后, 重新充入高压甲烷, 立即施加声场, 当吸附达到平衡后测量出吸附量, 得到单位煤样的吸附量, 图 4 为该煤样在不加声场和加声场作用下煤对甲烷的吸附等温线, 所加声场条件为: 声波发生器输出信号频率为 38.5 kHz、功率为 30 W。从图 4 中可以看出: 在不加声场和加声场作用下煤对甲烷的吸附等温线很好地遵从 Langmuir 方程; 声场作用后煤对甲烷的吸附量明显减少, 吸附能力降低。且声波作用有滞后效应, 声场作用后煤对甲烷的吸附量介于不加声场和声场作用之间。

同样按照上述解吸实验方法, 对该煤样进行解吸实验, 可得到如图 5 所示的解吸量与时间曲线。

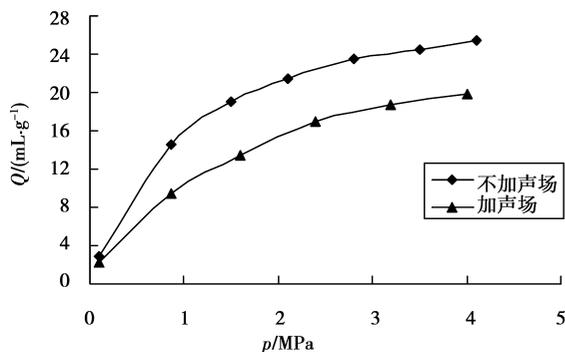


图4 采自三江煤矿煤样声场作用下的吸附等温线

从该图可以看出:两种条件的解吸曲线形式一样;加声场作用下甲烷解吸量比不加声场甲烷解吸量大;且声场作用下达到解吸平衡的时间比不加声场达到解吸平衡的时间要长。在2 MPa气压下加声场作用的解吸量增加24%,说明声场能促进甲烷解吸。

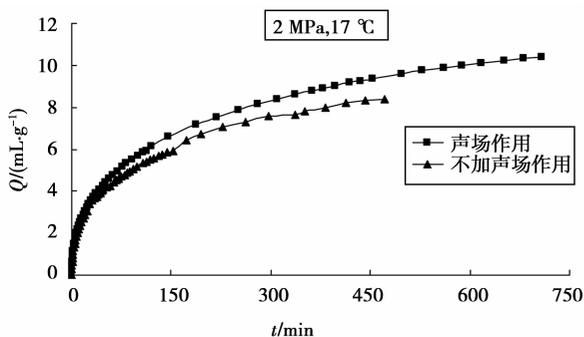


图5 未加声场和加声场作用甲烷气解吸量与时间曲线(2 MPa, 17 °C)

3.3 渗流实验方法

实验采用图1所示的吸附、解吸渗流装置,将试件放入三轴压力室内,安装好后,在轴向方向加一定的压力,然后向压力室内冲油排出空气,并加围压到实验值,开启真空泵让煤样脱气1 h后,关闭回气阀,打开进气阀,高压甲烷气瓶中的甲烷气体经过减压阀减压后流入试件,使煤样进行甲烷吸附,当吸附达到平衡后(吸附1 h),开启回气阀并使之与流量测量部分连接(气体流量采用排水法测得),待水流量稳定(说明瓦斯渗流达到了稳定)后测量出排水体积和时间,每一种条件测量3次取其平均值。然后施加下一级载荷,同样测量出排水体积和时间。在测量声场作用下甲烷渗流时,当不加声场时瓦斯流量达到稳定后,只需在实验中打开声波发生器系统给试件施加声场,测量出声场作用下的排水体积和时间。

3.4 渗流实验结果及数据

采用上述实验方法对同一煤样进行渗流实验,其中声场作用下的渗透特性实验采用的超声波频率为38.5 kHz,功率为30 W。声波发生器输出的电压峰值为10 V,平均电压为5 V。

实验结果如图6、图7所示。图6是在不同有效围压下未加声场和加声场作用煤样渗透率对比,图7是在不同平均有效应力下未加声场和加声场作用煤样渗透率对比。从图中可以看出:无论是未加声场还是加声场,煤样的渗透率随有效围压或平均有效应力的增加而减小;但是在相同有效围压或平均有效应力条件下,加声场比不加声场的渗透率高,说明超声波的作用有助于煤样渗透率的提高^[15]。

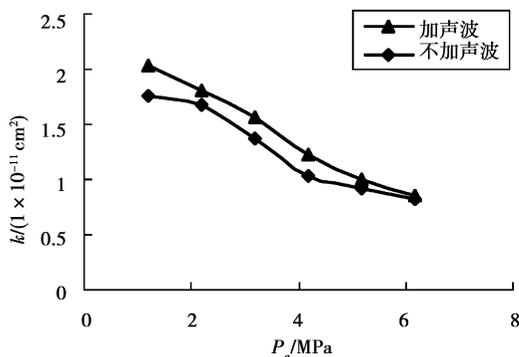


图6 声场作用煤样渗透率与有效围压曲线

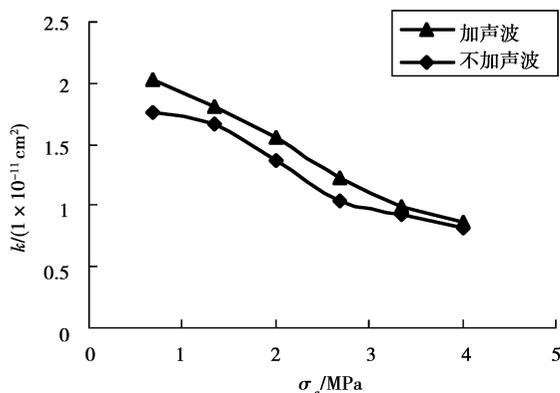


图7 声场作用煤样渗透率与平均有效应力曲线

4 结论

针对煤层气特性研究所设计的实验装置:

- 1) 满足了不加声场时煤层气的吸附、解吸及渗流实验需求。
- 2) 能够为实验提供频率与幅度可调的可变声场,满足了声场作用下煤层气特性实验的需求。

3)声场作用下煤层气特性实验结果显示声场能够影响煤层气的吸附、解吸及渗流,为煤层气抽采率的提高提供了新思路。

参考文献:

- [1] 刘保县,熊德国,鲜学福. 电场对煤瓦斯吸附渗流特性的影响[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2006,29(2):83-85.
LIU BAO-XIAN, XIONG DEG-UO, XIAN XUE-FU. Adsorption and Seepage Characteristics of Coal to Methane under Electric Field[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(2):83-85.
- [2] 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.
- [3] 孙立东,赵永军,蔡东梅. 应力场、地温场、压力场对煤层气储层渗透率影响研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版:2007,26(3):12-14.
SUN LI-DONG, ZHAO YONG-JUN, CAI DONG-MEI. Research on Effect of Pressure, Geo-temperature and Stress Fields on Permeability of Coalbed-gas-bearing Seams in Qinshui Basin [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007,26(3):12-14.
- [4] 降文萍,崔永君,钟玲文,等. 煤中水分对煤吸附甲烷影响机理的理论研究[J]. 天然气地球科学,2007,18(4):576-579
JIANG WEN-PING, CUI YONG-JUN, ZHONG LINGWEN, et al. Quantum Chemical study on Coal Surface Interacting with CH₄ and H₂O[J]. Natural Gas Geoscience,2007, 18(4):576-579
- [5] HAENEL, M, W. Recent Progress in Coal Structure Research[J]. Fuel,1992,71:1211-1223.
- [6] 陈昌国,鲜晓红,张代均,等. 温度对煤和炭吸附甲烷的影响[J]. 煤炭转化,1995,18(3):88-92.
CHEN CHANG-GUO, XIAN XIAO-HONG, ZHANG DAI-JUN, et al. The Dependence of Temperature to the Adsorption of Methane on Anthracite Coal and Its Char[J]. Coal Conversion, 1995,18(3):88-92.
- [7] 姜永东,鲜学福,刘保县. 地应力、地温、声场中的煤层瓦斯渗流分析 [J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2007,22(51):141-144.
JIANG YONG-DONG, XIAN XUE-FU, LIU BAO-XIAN. Seepage Equation of Coalbed Gas in Ground Stress, Temperature and Ultrasound Field [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2007,22(51):141-144.
- [8] BREITBACH, M. BATHEN, D. Effect of Ultrasound on Adsorption and Desorption Processes[J]. Ind. Eng. Chem. Res, 2003, 42: 5635-5646.
- [9] 陈潮红. 基于 DDS 技术的智能信号源 [J]. 现代电子技术,2006,24(239):148-150.
CHEN CHAO-HONG. Intelligent Signal Source Based on DDS Technology [J]. Modern Electronics Technique, 2006,24(239):148-150.
- [10] K. IMANO, H. INOUE. A simple method for generating the monopole ultrasonic pulse and its sound field, Ultrasonics Symposium[J]. IEEE,1997,2(5-8):1017-1019.
- [11] A. R. KOOSHA, S. SUNTHANKAR. A highly directional ultrasonic sensor[J]. Acoustic Sensing and Imaging,1993(29-30):28-31.
- [12] NAGAHARA, H. SUGINOUCHI, T. HASHIMOTO, M. PIM-8 Acoustic Properties of Nanofoam and its Applied Air-Borne Ultrasonic Transducers[J]. Ultrasonics Symposium,2006,1541-1544.
- [13] 徐龙君,鲜学福. 煤层气赋存状态及提高煤层气采收率的研究 [J]. 中国煤层气,2005,2(3):22.
XU LONG-JUN, XIAN XUE-FU. Study on Status of CBM Reserves and Improvement of CMM Recovery [J]. China Coalbed Methane, 2005,2(3):22.
- [14] 易俊. 在交变电场声场作用下煤解吸吸附瓦斯特性分析 [J]. 中国矿业,2005,14(5):72-73.
YI JUN. The Research on The Traits of The Absorption And Desorption of Coal to Gas in Alternating Electric Field (AEF) or Sound Field(SF) [J]. China Mining Magazine,2005,14(5):72-73.
- [15] 杨胜来,崔飞飞,杨思松,等. 煤层气渗流特征实验研究 [J]. 中国煤层,2005,2(1):37-38.
YANG SHENG-LAI, CUI FEI-FEI, YANG SISONG, et al. Experimental Study on Mechanism of Gas Flow in Coal Bed [J]. China Coalbed Methane, 2005, 2(1):37-38.

(编辑 陈移峰)