

文章编号:1000-582X(2011)04-083-05

吸附和长时间荷载作用煤渗透规律试验

孙维吉, 梁冰, 李辉, 白云鹏, 盖迪

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要:以阜新矿业集团恒大煤业有限责任公司阜新组煤样为研究对象,通过自制的多功能三轴渗透仪,进行了原煤在吸附瓦斯过程和长时间三轴加载过程渗透规律的试验研究。试验结果表明:煤吸附瓦斯后渗透率比不吸附瓦斯测得的渗透率要小,降低 48.94%~82.18%,煤吸附瓦斯后的瓦斯渗流过程存在滑脱效应;经过 78 d 总应力为 18 MPa 的外力对煤样持续加载作用,煤渗透率降低了 82.05%~92.65%,煤渗透率可用以时间为变量的负幂指数函数表示;应力荷载释放后二次加载,煤渗透率较卸载前增加,但远低于不考虑长时间荷载作用的渗透率;采用目前实验方法测得的煤岩渗透率要高于原始地层环境下的渗透率。

关键词:吸附;长时间荷载;原煤;渗透率

中图分类号:TD84,O357

文献标志码:A

Experimental study on permeability rules of coal considering sorption and long-term stress

SUN Wei-ji, LIANG Bing, LI Hui, BAI Yun-peng, GAI Di

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, P. R. China)

Abstract: The paper studies the permeability rules of coal during methane sorption and long-term triaxial load by self-manufactured triaxial permeation apparatus. The experimental coal samples are excavated from Fuxin Stratum Coal seam of HengDa Coal Industry Co., Ltd in Fuxin city. The experiment results show that: the value of coal permeability considering methane adsorption is lower than that without methane adsorption, reducing by 48.94%~82.18%; slippage effect exists in coal after sorpting methane. Coal permeability has significant reduce by 82.05%~92.65% under 18 MPa total stress after 78 day, coal permeability variations with time can be described by negative exponential function. The value of permeability of coal sample is higher than that without stress release condition, but is lower than that under initial condition, which is loaded again after stress release. The value of coal permeability is higher than reservoir permeability under initial stratum condition by current experiment methods.

Key words: sorption; long-term stress; raw coal; permeability

中国多数煤层为低透气性煤层,随着矿井采深的逐年增加,煤层的渗透性在地层压力等因素作用

下会进一步降低。煤岩渗透率是煤岩参数中较为重要的参数之一,也是进行煤矿瓦斯资源抽采,预防煤

收稿日期:2010-12-21

基金项目:国家 973 计划资助项目(2011CB201206、2005CB221503-02);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(50904033);辽宁省自然科学基金资助项目(20102090)

作者简介:孙维吉(1980-),男,博士研究生,主要从事煤层瓦斯渗流理论及应用方向研究,(Tel)13941820145;
(E-mail)sunweiji-1231@163.com.

岩瓦斯动力灾害发生的重要衡量指标。关于煤岩渗透率的研究,国内外学者已经做了大量的研究工作。赵阳升通过实验研究的方法建立渗透率与体积应力之间的关系^[1],指出吸附作用和孔隙压共同影响煤的渗透系数;肖晓春进一步提出了煤试件在小孔隙压力阶段渗流出现滑脱效应^[2-3];Farhang Sereshki, Harpalani S等^[4-5]研究了吸附对瓦斯渗透的影响;杨新乐、赵阳升等人^[6-7]分别进行了低温和高温不同条件煤岩渗透规律的研究,用以指导煤层气注热增产和煤炭气化开发;SOMMERTON W J, BRACE W F, ENEVER J R E和唐巨鹏等^[8-11]研究了有效应力对煤渗透率的影响;许江等人^[12]研究了型煤试件蠕变过程中瓦斯的流动规律;同登科等人^[13]通过理论析研究了煤层介质变形煤层气的不稳定渗流问题;邓志刚,齐庆新等人^[14]研究了矿井工作面回采过程中瓦斯的涌出规律。前人对煤岩渗透率的研究主要通过改变应力、温度和电场等外部条件来研究煤岩的渗透规律,而考虑煤岩介质吸附作用和长期加载过程煤岩渗透规律的研究则较少。

通过自行研制的多功能三轴渗透仪,进行了原煤吸附条件和长时间应力荷载条件实验室尺度煤岩渗透率变化规律的研究工作。

1 试验设计和试验过程

1.1 煤样的制备和实验装置

考虑煤岩对瓦斯吸附和长时间应力荷载条件的煤岩渗流试验在辽宁工程技术大学环境与灾害力学实验室进行,实验室自行开发了ZYS-1型多功能三轴渗透仪(见图1)。三轴仪可以实现长时间目标应力和孔隙压力荷载加载煤岩渗透率的测试工作。试验煤样采至辽宁阜新矿业集团恒大煤业有限责任公司(原王营矿),经实验室加工成标准煤样(图2),具体参数见表1。



图1 实验装置

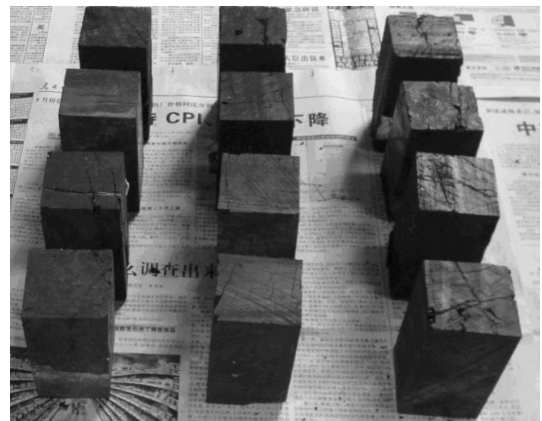
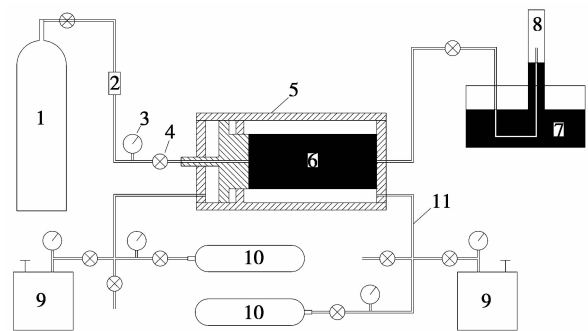


图2 制备的试验煤样

表1 煤样基本参数

编号	煤种	尺寸/mm			围压 /MPa	轴压 /MPa
		长	宽	高		
HD1-5	长焰煤	50.08	50.29	99.90	6.0	6.0

试验系统主要由加压系统、稳压系统、气体供给系统和气体测量系统组成。煤样轴压及围压由试压泵施加,加压后通过稳压器(自制)保持压力恒定;气体孔隙压力通过高压调节阀调控(见图3)。



1-瓦斯钢瓶,2-气体调压阀,3-数字压力表,4-阀门,
5-煤样夹持器,6-煤试件,7-水槽,8-量筒,9-加压泵,
10-稳压器,11-管线

图3 长时间加载条件下煤渗透试验装置图

1.2 试验方案

研究煤吸附作用对煤渗透率的影响和长时间应力加载过程煤岩的渗透率变化规律,试验研究方案如下

1)进行瓦斯吸附饱和条件原煤渗透率的测试试验研究;2)进行原煤在长时间加载过程渗透率变化规律的试验研究;3)对处于长时间载荷状态下的煤样卸载,二次加载至目标荷载,研究煤样的渗流规律。

1.3 试验过程和数据处理

将煤样置于夹持器中,施加外力荷载至目标压力,通过调节气体调节阀改变入口瓦斯孔隙压力,待出口瓦斯流量稳定后应用排水法收集瓦斯流量。

考虑煤岩对瓦斯的吸附作用,将煤样置于恒定压力条件下,通入一定压力的瓦斯,且压力保持数值恒定,待48 h煤样吸附瓦斯饱和后,测量出口瓦斯流量,测量完成,增大入口孔隙瓦斯压力,待48 h吸附饱和后进行下一循环的测试。

长时间荷载作用对煤岩渗透率影响的试验,外力持续对煤试件恒定加载94 d,测试不同时间区段内煤的渗透率,以及荷载释放二次加载至目标荷载,测定其渗透率。

对采集的数据,根据Darcy定律,利用公式(1)计算渗透率

$$K = \frac{2 \cdot P_2 \cdot Q_g \cdot \mu_g \cdot L}{A \cdot (P_1^2 - P_2^2)}, \quad (1)$$

式中: K 为渗透率(mD); P_1, P_2 为夹持器入口、出口流体压力(MPa); Q_g 为标况下气体流量(mL/s); μ_g 为甲烷气体动力粘度(mPa·s); L 为煤试件长度(mm); A 为煤试件渗透截面面积(mm²)。

2 试验结果及分析

2.1 吸附作用对煤渗透率的影响

原煤吸附瓦斯和不考虑吸附作用的渗透率测试结果均表明(见图4):煤渗透率随着瓦斯孔隙压力的增加呈先减小后增大的规律。在外力和孔隙压力条件相同的情况下,考虑吸附作用煤的渗透率数值要小于不考虑吸附作用的结果(见表2)。考虑吸附作用煤渗透率比不考虑吸附作用降低了48.94%~82.18%。

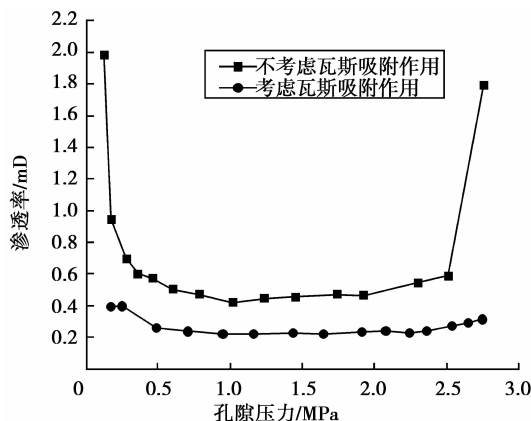


图4 考虑吸附作用煤渗透率变化规律

表2 吸附作用对煤渗透率的影响

孔隙压 /MPa	0.176	0.709	1.165	1.914	2.360	2.747
不吸附渗透 率/mD	0.93	0.48	0.44	0.47	0.56	1.74
吸附渗透 率/mD	0.39	0.24	0.22	0.24	0.24	0.31
降低比例 /%	58.06	50.00	50.00	48.94	57.14	82.18

对低瓦斯压力状况下的数据拟合,在瓦斯孔隙压力较小的条件下,考虑吸附作用和不考虑吸附作用的试验结果均呈现滑脱效应,不考虑吸附作用的滑脱渗透率明显(见图5)。说明滑脱效应的产生并非单因煤对瓦斯的吸附作用而引起。

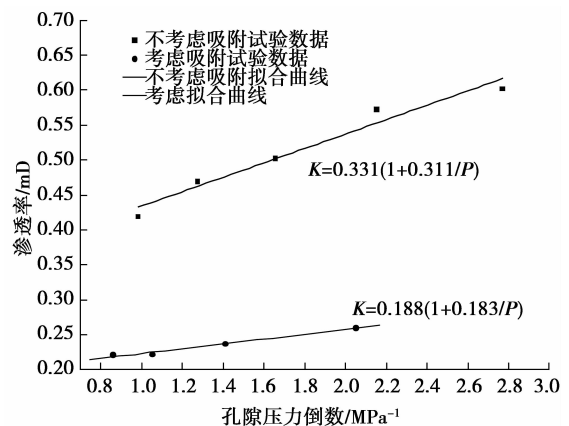


图5 煤样渗透初始阶段的滑脱效应

2.2 长时间加载作用煤的渗透规律

实验室用于煤岩渗透率测试的煤岩试件是在原岩应力释放条件下采集的,通过对其应力恢复后进行测试。而地层中的煤岩在漫长地应力场、温度场、电磁场等作用下形成的,目前在实验室进行的渗透性测试试验对应力恢复只是简单的加载至目标荷载,并未考虑时间对渗透性能的影响。本次试验用过对原煤试件进行94 d的长期加载,测试了煤试件在第1天、69天、78天和94天时间点的渗透率。

由图6可知,原煤在长时间荷载作用下,渗透率随着时间的增加呈减小的趋势,78 d后渗透率降低了82.05%~92.65%,降低了将近1个数量级。第94天渗透率测试值和第78天的结果趋于一致,渗透率的变化率较小(见表3)。

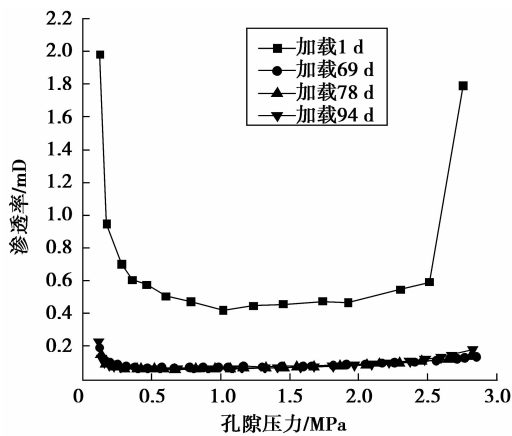


图 6 长时间荷载作用煤渗透率变化规律

表 3 长时间荷载作用渗透率变化情况

孔隙压 /MPa	0.176	0.709	1.165	1.914	2.36	2.747
1 d	0.925	0.483	0.436	0.466	0.557	1.741
69 d	0.106	0.065	0.076	0.084	0.099	0.124
78 d	0.088	0.056	0.064	0.079	0.100	0.128
降低比例/%	90.49	88.41	85.32	83.05	82.05	92.65

根据图 6 试验结果,对煤渗透率和时间数据进行拟合,得到孔隙压力分别为 0.6 MPa、1.0 MPa 和 1.5 MPa 时,渗透率随时间变化的规律为: $K=0.483e^{-0.0855t}+0.0598$ 、 $K=0.388e^{-0.0675t}+0.0607$ 和 $K=0.613e^{-0.0804t}+0.0695$ 。渗透率随时间的规律可应用幂指数函数 $K=ae^{bt}+c$ 形式表示(见图 7)。

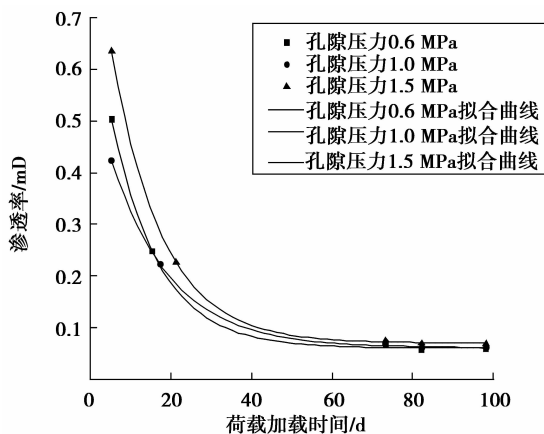


图 7 渗透率与加载时间的关系

2.3 卸载条件下煤渗透率变化规律

将煤试件持续加载 94 d 后,对其卸载,7 d 后二次加载至目标荷载,测试长期荷载、卸载和加载对煤

渗透率的影响。由图 8 可知,二次加载后煤渗透率数值上高于卸载前测试结果,但远低于第 1 天的测试结果,二次加载后的渗透率较卸载前的渗透率分别提高了 30.82%~61.29%,但不能恢复至试验初始阶段的结果。采用目前实验方法测得的煤岩渗透率要高于原始地层环境下的渗透率(见表 4)。

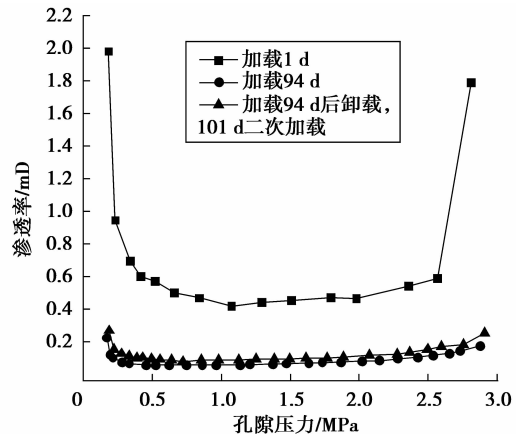


图 8 卸载-二次加载煤渗透率变化规律

表 4 长时间荷载作用渗透率变化情况

孔隙压 /MPa	0.176	0.709	1.165	1.914	2.36	2.747
94 d	0.093	0.059	0.063	0.082	0.106	0.159
101 d	0.150	0.082	0.096	0.113	0.146	0.208
升高比例/%	61.29	39.98	52.38	37.80	37.74	31.82

3 结 论

通过对原煤进行吸附瓦斯和长时间加载过程渗透率的试验研究,得到主要结论

1)煤吸附瓦斯后渗透率降低,吸附瓦斯的煤在渗透过程有滑脱效应产生,较不吸附条件滑脱效应减弱。

2)煤样在长时间的应力荷载环境下,渗透率随时间的增加出现衰减趋势,降低幅度较大,渗透率衰减规律可以用负幂指数函数表示。

3)对长时间处于应力荷载条件的煤样,卸载二次加载,渗透率会较卸载前提高,但不能恢复至试验初始阶段的渗透率数值。

参考文献:

[1] 赵阳升, 胡耀青, 杨栋, 等. 三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651-653.

- ZHAO YANG-SHENG, HU YAO-QING, YANG DONG, et al. The experimental study on the gas seepage law of rock related to adsorption under 3-D stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 651-653.
- [2] 肖晓春, 潘一山. 滑脱效应影响的低渗煤层气运移实验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1154-1158.
XIAO XIAO-CHUN, PAN YI-SHAN. Experimental study of gas transfusion with slippage effects in hypotonic coal reservoir [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1154-1158.
- [3] KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquid sand gases [J]. API Drilling and Production Practice, 1941: 200-213.
- [4] FARHANG S. Improving coal mine safety by identifying factors that influence the sudden release of gas in outburst prone zones[D]. New South Wales, Australia; The University of Wollongong, 2005.
- [5] HARPALANI S, SHRAUFNAGEL R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal[J]. Fuel, 1990, 69(5): 551-556.
- [6] 杨新乐, 张永利, 李成全, 等. 考虑温度影响下煤层气解吸渗流规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1811-1814.
YANG XIN-LE, ZHANG YONG-LI, LI CHENG-QUAN, et al. Experimental study on desorption and seepage rules of coal-bed gas considering temperature conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1811-1814.
- [7] 赵阳升, 万志军, 张渊, 等. 岩石热破裂与渗透性相关规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1970-1977.
ZHAO YANG-SHENG, WAN ZHI-JUN, ZHANG YUAN, et al. Experimental study of related laws of rock thermal cracking and permeability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1970-1977.
- [8] SOMMERTON W J, SOYLEMEZOGLU I M, DUDLEY R C. Effect of stress on permeability of coal [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 12(5/6): 129-145.
- [9] BRACE W F. A note on permeability change in geologic material due to stress[J]. Pageoph, 1978, 116(4/5): 627-632.
- [10] ENEVER J R E, HENING A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir mode[C]//Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium, May 12-17, 1997, Tuscaloosa, AL. USA: University of Alabama, 1997: 13-22.
- [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] 许江, 彭守建, 陶云奇, 等. 蠕变对含瓦斯煤渗透率影响的试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2273-2280.
XU JIANG, PENG SHOU-JIAN, TAO YUN-QI, et al. Experimental analysis of influence of creep on permeability of gas-bearing coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2273-2280.
- [13] 同登科, 刘珊. 变形介质煤层气不稳定渗流问题[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 74-76.
TONG DENG-KE, LIU SHAN. Unsteady percolation flow of coal-bed methane through deformed coal seam [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 74-76.
- [14] 邓志刚, 齐庆新, 李宏艳, 等. 采动煤体渗透率示踪监测及演化规律[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 273-276.
DENG ZHI-GANG, QI QING-XIN, LI HONG-YAN, et al. Evolution law of mining coal Permeability by real-time tracer moultering system [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 273-276.

(编辑 侯湘)