

文章编号:0253-9993(2010)S0-0076-05

加卸荷同时作用下煤样渗透性的试验研究

祝捷^{1,2},姜耀东^{1,2},赵毅鑫²,马建芝¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

摘要:煤矿开采引起的应力重分布使得周围煤岩体一定范围内形成卸荷区。考虑到煤矿开采中的卸荷扰动区具有某个方向卸载和其他方向加载的特点,试验研究了煤样在加卸载同时作用下的渗透率变化特点。试验结果表明:渗透率变化曲线存在拐点,拐点之前煤样渗透率缓慢增加,拐点之后渗透率急剧增大;在外部应力相同条件下,渗透率增幅随孔隙压力的增大而增大。经两类幂函数对试验数据的拟合发现,以有效应力卸荷比为基本变量的幂函数对试验数据的拟合效果更好。

关键词:卸荷;渗透率;有效应力;气体压力

中图分类号:TD713.1 **文献标志码:**A

Experimental study on permeability of coal samples under the simultaneous action of unloading and loading

ZHU Jie^{1,2},JIANG Yao-dong^{1,2},ZHAO Yi-xin²,MA Jian-zhi¹

(1. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Stress redistribution induced by excavation of coal mining results in the unloading zone in parts of surrounding rock masses. Considering the characteristic of excavation-disturbed zone as unloading in some direction and loading in other directions, the permeability of coal samples under the simultaneous action of unloading and loading were investigated. The test results show that there is an inflection point in each permeability curve of coal samples, and that the permeability change slightly before the inflection, but increase sharply after the inflection. The increase amplitude of permeability enlarges with gas pressure under the same condition of stress. The fitting results from two kinds of power function indicate that the power function, in which the unloading ratio is regarded as fundamental variable, has the better simulating effect.

Key words: unloading; permeability; effective stress; gas pressure

应力作用下的煤岩体渗透率变化规律是煤与瓦斯突出机理与防治研究中的重要内容。国内外学者对煤样渗透率及其影响因素进行了大量的研究^[1-17],研究表明影响煤层渗透率的因素十分复杂,地质构造、应力状态、煤体结构、煤岩煤质特征等对煤层渗透率产生不同程度的影响;煤体渗透性具有非均匀和各向异性的特点,受应力条件和研究尺度影响显著。

煤矿开采破坏了原岩应力场和原始瓦斯压力的平衡,造成采掘空间周围应力重分布。原岩应力状态

由三向应力状态变为两向应力状态,围岩深处出现应力增高区,在此过程中瓦斯流动状态也发生改变。目前卸荷岩体渗透性研究方面已有不少成果^[18-21],但大多数研究采用的卸荷方式为某一方向卸荷,其他方向应力不变,未能体现煤矿开采中煤岩体呈现某一方向应力降低,其他方向应力增高的特点^[22]。

因此笔者设计了轴向加载伴随径向卸荷的煤样渗透试验,研究加卸荷同时作用下煤样渗透率的变化特点。

收稿日期:2009-10-21 责任编辑:常琛

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226801);中国博士后科学基金资助项目(20090460404);煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题;北京市教育委员会共建项目建设计划资助项目

作者简介:祝捷(1978—),女,江西南昌人,博士后。Tel:010-51734825, E-mail:chinazhujie@163.com

1 试验原理和煤样制备

试验煤样取自河北峰峰集团羊渠河煤矿 8460 工作面,取样深度约 540 m,取出边长大于 30 cm 的煤块,沿层理方向钻取直径 2.5 cm、高度 5.0 cm 的圆柱体煤样,取 6 块分两组进行渗透性试验。另取 5 块测试孔隙度和渗透率,测得平均密度为 1.36 g/cm^3 ,孔隙度范围为 $5.3\% \sim 7.1\%$,空气渗透率范围为 $0.09 \times 10^{-3} \sim 1.45 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$ 。

渗透试验前测量煤样尺寸和质量,抽真空 12 h,用取自羊渠河煤矿 8460 工作面的采出水饱和 24 h 后再次称重。试验开始后,将煤样放入岩芯夹持器(工作压力 50 MPa),试验用气为高纯氮气,考虑到煤对氮气吸附速率较慢,本次试验的吸附平衡时间为 3 d。通过恒压恒速泵控制氮气进口压力,出口压力由回压系统控制,在进口和出口布置压力传感器精确测得氮气压力。煤样的轴向压力和径向压力由手摇泵施加至设计压力,待出口气体流量稳定后读取数据,出口端使用与气体流量匹配的计量方法(本次试验采用排水法和气体流量计)测量气体流量,计算机完成数据采集后调整轴压和围压进行下一级流量的测量工作,试验温度控制在 $27 \text{ }^\circ\text{C}$ 。试验流程如图 1 所示。

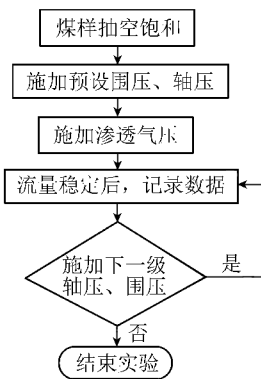


图 1 试验流程

Fig. 1 Experiment procedure

2 试验结果

试验分 2 组进行;第 1 组煤样进出口气体压力分别为 2.1 和 0.1 MPa;第 2 组煤样进出口气体压力分别为 3.1 和 1.1 MPa。2 组实验应力(轴向应力/径向应力)变化均为 12 MPa/12 MPa→14 MPa/10 MPa→16 MPa/8 MPa→18 MPa/6 MPa→19 MPa/5 MPa→20 MPa/4 MPa,借此研究气体压力对加卸载同时作用下煤样渗透性的影响。

由试验测得氮气压力和流量可计算出相应压力条件下的氮气渗透率,计算式为

$$K = \frac{2q_0 p_0 \mu L}{A(p_1^2 - p_2^2)} \times 100 \quad (1)$$

其中, K 为煤样渗透率, $10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$; q_0 为通过煤样的流量, mL/s ; p_0 为大气压力,取 0.1 MPa; μ 为流体动力黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$, $27 \text{ }^\circ\text{C}$ 氮气取 $0.0149 \text{ mPa} \cdot \text{s}$; L 为岩样长度, cm ; A 为煤样横截面面积, cm^2 ; p_1 、 p_2 为煤样进出口两端的压力, MPa 。

试验测得渗透率见表 1,根据试验结果绘出渗透率与主应力差的关系如图 2 所示。

分析图 2 可知:

(1) 随着径向压力降低和轴向压力升高,表明初始压力作用下发生挤压的渗透通道逐渐恢复,煤样透气性增大,煤样的渗透率逐渐增大。

(2) 不同煤样渗透率随主应力差的增加程度不同,当围压从 12 MPa 降低至 4 MPa,主应力差由 0 增加至 16 MPa,第 1 组煤样 1-1、1-2、1-3 的渗透率分别由 2.22×10^{-6} 、 0.46×10^{-6} 和 $2.70 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}^2$ 增加到 8.45×10^{-6} 、 1.41×10^{-6} 和 $11.53 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}^2$,而第 2 组煤样 2-1、2-2、2-3 的渗透率分别由 0.23×10^{-6} 、 0.06×10^{-6} 和 $0.12 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}^2$ 增加到 3.70×10^{-6} 、 2.52×10^{-6} 和 $10.48 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}^2$ 。

(3) 当外部应力条件相同时,具有较高气体压力的第 2 组煤样渗透率增幅大于第 1 组煤样,当主应力

表 1 煤样渗透率试验结果

Table 1 Experiment results of permeability of coal samples

煤样 编号	进口气压 (MPa)/ 出口气压 (MPa)	围压 (MPa)/轴压 (MPa)						$10^{-6} \text{ } \mu\text{m}^2$
		12/12	10/14	8/16	6/18	5/19	4/20	
1-1	2.1/0.1	2.224	2.998	3.378	4.221	5.700	8.445	
1-2	2.1/0.1	0.468	0.630	0.726	0.770	0.919	1.412	
1-3	2.1/0.1	2.699	4.006	5.543	6.746	8.140	11.533	
2-1	3.1/1.1	0.227	0.357	0.533	1.158	1.997	3.698	
2-2	3.1/1.1	0.057	0.078	0.141	0.205	0.279	2.526	
2-3	3.1/1.1	0.006	0.007	0.008	0.033	0.193	1.629	

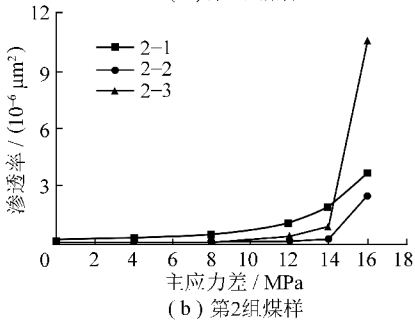
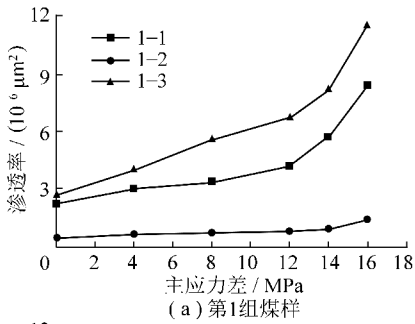


图2 煤样渗透率变化曲线

Fig. 2 Permeability change curves of coal samples

差达到 12 MPa 之后,第 2 组渗透率增幅接近第 1 组的 2 倍,这说明在相同外部应力条件下,气体压力对煤样渗透率的变化产生重要影响。

表2 煤样拟合常数

Table 2 Fitting constants of coal samples

煤样 编号	$K=K_0\sigma^{-C}$			$K=K_0[1-(\xi/R)^{1/t}]^{-3}$			
	K_0	C	相关系数 R^2	K_0	R	t	相关系数 R^2
1-1	516.11	5.273	0.895	0.002 61	0.384 6	0.400 1	0.978
1-2	3.46	3.765	0.801	0.000 59	0.352 6	0.265 2	0.909
1-3	393.90	4.981	0.957	0.003 11	0.546 5	0.759 3	0.957
2-1	1.27	12.269	0.989	0.000 23	0.402 5	0.793 6	0.999
2-2	1.32	29.944	0.958	0.000 06	0.294 2	0.265 2	0.997
2-3	3.68	32.072	0.966	0.000 13	0.290 5	0.283 3	0.999

笔者根据文献[23]给出的裂隙张开度与渗透率关系,建立以有效应力卸荷比 ξ 作为基本变量的幂函数关系为

$$K = K_0 [1 - (\xi/R)^{1/t}]^{-3} \quad (4)$$

其中, $\xi = (\sigma_n - \sigma_0)/\sigma_0$, σ_n 为某一时刻的平均有效应力, σ_0 为初始时刻的平均有效应力。根据式(4)对试验数据进行非线性拟合,所得拟合常数及相关系数见表 2。

比较表 2 所列两类幂函数对试验数据的拟合结果可知:式(2)拟合的相关系数在 0.80~0.99,拟合常数 K_0 的离散性较大;式(4)拟合的相关系数均大于 0.90,并且拟合常数项 K_0 和围压卸荷前的渗透率基

(4) 值得注意的是,每个煤样包含的孔隙和裂隙数量、开度和分布不同,载荷过程中煤样内部的微裂纹演化和裂纹的扩展长度和速度也不尽相同,因此即使同组煤样也有可能出现某个煤样渗透率增幅显著大于其他煤样渗透率增幅的现象,例如煤样 2-3 后期的渗透率增幅显著大于同组的 2-1 和 2-2。

3 分析与讨论

以往研究采用指数函数^[7]、幂函数^[1]和多项式函数^[4,14]来描述渗透率随体积压力、孔隙压力和有效应力的变化趋势,其中幂函数常常用来拟合卸荷过程中煤样渗透率与有效应力的关系,拟合关系式^[1,15]为

$$K = K_0 \sigma^{-C} \quad (2)$$

其中, K_0 、 C 为回归常数; σ 为有效应力,一般采用实验平均有效应力,计算式为

$$\sigma = \frac{1}{3} |\sigma_z + 2\sigma_r| - \frac{1}{2} (p_1 + p_2) \quad (3)$$

其中, σ_z 和 σ_r 分别表示轴向压力和径向压力,利用式(2)对试验数据进行非线性拟合,得到拟合常数及相关系数见表 2。

本一致,拟合效果更加理想。式(4)得到的渗透率与有效应力卸荷比关系的拟合效果如图 3 所示,可见采用有效应力卸荷比作为基本变量,描述加卸荷同时作用下煤样渗透率的变化趋势是合适的。

4 结 论

(1) 随着径向压力的减小和轴向压力的增大,煤样渗透率均有增加,但每个煤样渗透率的增幅不同,这表明应力作用下煤样性质及内部结构响应存在个体差异。

(2) 从现有试验数据来看,渗透率与主应力差的关系曲线存在拐点,拐点之前煤样渗透率缓慢增加,

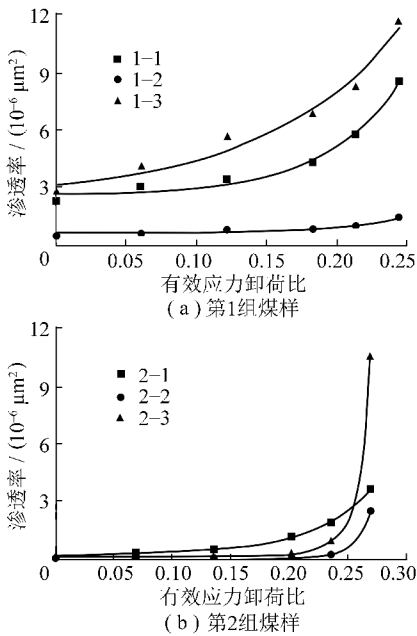


图3 渗透率与有效应力卸荷比关系的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of K - ξ relationship

拐点之后渗透率急剧增大,这一趋势在气体压力较大的第2组渗透率曲线上更为显著。可见相同应力条件下,孔隙压力对煤样渗透率有重要影响。

(3) 与以往采用有效应力作为基本变量不同,本文采用有效应力卸荷比作为基本变量,建立了渗透率的幂函数拟合方程。比较两类幂函数对试验数据的拟合结果发现,以有效应力卸荷比作为基本变量的幂函数拟合效果更加理想,能够较好地反映煤样渗透率在卸荷条件下的变化趋势。

参考文献:

[1] 林柏泉,周世宁. 煤样瓦斯渗透率的实验研究[J]. 中国矿业学院学报,1987(1):21-28.
Lin Baiquan,Zhou Shining. Experimental investigation on the permeability of the coal samples containing methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology,1987(1):21-28.

[2] Somerton W H, Soyletaezoglou I M, Dudley R C. Effect of stress on permeability of coal[J]. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 1975, 12: 129-143.

[3] Harpalani S, Mopherson M J. The effect of gas evacuation on coal permeability test specimens[J]. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1984, 21(1):161-164.

[4] 杨永杰,楚俊,郇冬至. 煤岩固液耦合应变-渗透率试验[J]. 煤炭学报,2008,33(7):760-764.
Yang Yongjie, Chu Jun, Huan Dongzhi. Experimental of coal s strain-permeability rate under solid and liquid coupling condition[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 760-764.

[5] 彭苏萍,屈洪亮,罗立平,等. 沉积岩石全应力应变过程的渗透性试验研究[J]. 煤炭学报,2000,25(2):113-116.
Peng Suping, Qu Hongliang, Luo Liping, et al. An experimental study

on the penetrability of sedimentary rock during the complete stress strain path[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 113-116.

[6] 邓泽,康永尚,刘洪林,等. 开发过程中煤储层渗透率动态变化特征[J]. 煤炭学报,2009,34(7):947-951.
Deng Ze, Kang Yongshang, Liu Honglin, et al. Dynamic variation character of coal bed methane reservoir permeability during depletion [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 947-951.

[7] 胡耀青,赵阳升,魏锦平,等. 三维应力作用下煤体瓦斯渗透规律实验研究[J]. 西安矿业学院学报,1996,16(4):308-311.
Hu Yaoqing, Zhao Yangsheng, Wei Jinping, et al. Experimental study of permeating law of coal mass gas under action of 3-dimension stress[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1996, 16(4): 308-311.

[8] Enever J R E, Henning A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coal bed methane exploration and reservoir model[A]. Proceedings of the 1997 International Coal-bed Methane Symposium[C]. Tuscaloosa: University of Alabama, 1997:13-22.

[9] Clarkson C R, Bustin R M. Variation in permeability with lithotype and maceral composition of Cretaceous coals of the Canadian Cordillera[J]. International Journal of Coal Geology, 1997, 33(2): 135-151.

[10] 姜德义,张广洋,胡耀华,等. 有效应力对煤层气渗透率影响的研究[J]. 重庆大学学报,1997,20(5):22-25.
Jiang Deyi, Zhang Guangyang, Hu Yaohua, et al. Study on affection to permeability of gas of coal layers by effective stress[J]. Journal of Chongqing University, 1997, 20(5): 22-25.

[11] 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 Yangsheng, Hu Yaoqing, Yang Dong, et al. The experimental study on the gas seepage law of rock related to adsorption under 3D stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 651-653.

[12] 孙培德,凌志仪. 三轴应力作用下煤渗透率变化规律实验[J]. 重庆大学学报,2000,23(S):28-31.
Sun Peide, Ling Zhiyi. Experimental study of the law for permeability of coal under action of 3-triaxial compression [J]. Journal of Chongqing University, 2000, 23(S): 28-31.

[13] 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): 1 563-1 568.
Tang Jupeng, Pan Yishan, Li Chengquan, 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): 1 563-1 568.

[14] 彭永伟,齐庆新,邓志刚,等. 考虑尺度效应的煤样渗透率对围压敏感性试验研究[J]. 煤炭学报,2008,33(5):509-513.
Peng Yongwei, Qi Qingxin, Deng Zhigang, et al. Experimental research on sensibility of permeability of coal samples under confining pressure status based on scale effect[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5): 509-513.

- [15] 彭守建,许江,陶云奇,等.煤样渗透率对有效应力敏感性实验分析[J].重庆大学学报,2009,32(3):303-307.
Peng Shoujian, Xu Jiang, Tao Yunqi, et al. Coefficient of sensitive-ness between permeability and effective pressure of coal samples [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(3):303-307.
- [16] 尹光志,李小双,赵洪宝,等.瓦斯压力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(4):697-702.
Yin Guangzhi, Li Xiaoshuang, Zhao Hongbao, et al. Experimental study of effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4):697-702.
- [17] 孟祥跃,丁雁生,俞善炳,等.一维含气多孔介质突然卸压破坏引起渗流变化的实验研究[J].爆炸与冲击,1997,17(1):15-22.
Meng Xiangyue, Ding Yansheng, Yu Shanbing. Experimental study of gas permeability variation due to sudden unloading[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(1):15-22.
- [18] 李玉岐,周健,谢康和.基坑开挖卸载诱发的渗流分析[J].岩土工程学报,2006,28(10):1 259-1 262.
Li Yuqi, Zhou Jian, Xie Kanghe. Analysis of seepage induced by excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10):1 259-1 262.
- [19] Kelsall P C, Case J B, Chabames C R. Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1984, 21(3):123-135.
- [20] Raven K G, Gale J E. Water flow in a natured rock fracture as a function of stress and sample size[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1985, 22(4):251-261.
- [21] 刘先珊,林耀生,孔建.考虑卸荷作用的裂隙岩体渗流应力耦合研究[J].岩土力学,2007,28(5):192-196.
Liu Xianshan, Lin Yaosheng, Kong Jian. Study of hydro-mechanical coupling of fractured rock masses considering unloading effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5):192-196.
- [22] 周世宁,林柏泉.煤矿瓦斯动力灾害防治理论与控制技术[M].北京:科学出版社,2007:15-65.
- [23] 白矛,刘天泉.孔隙裂隙弹性理论及应用导论[M].北京:石油工业出版社,1999:60-78.