JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY

文章编号:0253-9993(2008)07-0760-05

## 煤岩固液耦合应变-渗透率试验

杨永杰,楚 俊,郇冬至,李 磊

(山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建教育部重点实验室,山东 青岛 266510)

摘 要:采用 MTS815 岩石伺服试验系统进行了煤样全应力应变过程中的渗透性试验.试验结果 表明,煤岩的应变-渗透率变化曲线与其全应力-应变曲线变化趋势基本一致,但表现出相对 "滞后"的特点,表明渗透率的变化与其损伤演化过程密切相关,同时煤体通过其内部裂隙的渗 透需要一定的时间过程,煤岩体达到峰值强度及之后的软化阶段,即损伤变量达一定值时,渗透 率出现峰值.根据试验结果,拟合得出了煤岩应变-渗透率分段曲线方程.由于煤岩微孔隙裂隙 相对较发育,其渗透率受有效围压的影响较明显,随有效围压增大,煤岩渗透率总体上呈下降趋 势,这主要与煤岩中发育的原生裂隙受围压压密闭合以及限制了新生裂隙的扩展和张开度有关. 关键词:煤岩;全应力应变;渗透率;拟合;围压 中图分类号:TD311 文献标识码:A

# Experimental of coal's strain-permeability rate under solid and liquid coupling condition

YANG Yong-jie, CHU Jun, HUAN Dong-zhi, LI Lei

(Key Laboratory of Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

**Abstract**: The permeability test of coal during the whole stress-strain process was carried out on MTS815 servocontrolled rock mechanical test system. The development trend between strain-permeability rate curve and whole stress-strain curve of coal is identical on the whole, except that the former puts up "hysteretic" characteristic relatively, which indicates that the development of permeability rate closely relates with the evolvement of damage. At the same time, the permeating through the internal of coal needs a certain time. The permeability arrived its peak value when the coal arrived the softened stage after the peak strength, namely, the damage variable arrived a certain value. According to the test results, the segmental curve equations of strain-permeability were fitted. Because micro holes and cracks are relatively well developed, coal's permeability rate is influenced by confining pressure obviously, and the coal's permeability rate presents downtrend in the whole along with the increase of confining pressure, this mainly dues to the primary fracture in the coal was compressed and closed by confining pressure, and the expanding and opening of new fracture was restricted.

Key words: coal; whole stress-strain; permeability rate; fit; confining pressure

在煤矿井下开采过程中,由于应力重新分布,采空区围岩应力应变状态发生了变化,从而改变了原有 岩层的渗透状态,形成了新的不均匀、各向异性的渗透系数场.在应力-渗流耦合数值计算和理论分析 时,除本构方程外,对应于全应力应变过程的应变-渗透率方程应作为另一个不可缺少的控制方程.在以

**收稿日期:** 2007-07-25 责任编辑: 柴海涛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674040);山东省科学仪器设备升级改造专项(2006GG1108097-14);矿山灾害预防控制教育部重点实验室开放基金资助项目(MDPC0603)

作者简介:杨永杰(1964—),男,山东新泰人,教授,博士.Tel: 0532-86057053, E-mail: yyj.6125@163.com

本构方程和应变-渗透率方程共同作为控制方程的条件下分析应力-渗透耦合,才能更加符合实际.因此, 这种与应力应变有关的渗透系数场对于评价煤炭回采过程中顶底板水文地质条件及采动空间围岩突水防治 具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>.

渗透率 K 可以直接由达西定律来定义,即 K = 
$$-\frac{q}{A} \frac{\mu}{\rho g} \left( \frac{\partial h}{\partial s} \right)^{-1}$$
,其中, q 为单位时间内液体通过横截面

积为 A 的流量; μ 为流体的黏度; ρ 为流体密度; g 为重力加速度; ∂h/∂s 为流动方向 S 上的水力梯度.达 西定律本身并没有反映出渗流与孔隙介质应力-应变状态的关系. 20 世纪 50 年代学者们才开始对裂隙岩 体的水力特征以及其中流体的流动进行定量评价, Romm (1966), Snow (1969), Louis (1974), Wittke (1970) 等人相继进行裂隙岩体水力学的试验研究,建立了裂隙岩体渗流模型. 通过试验及理论研究,国 内外学者已经初步得到了岩体应力与渗流之间的一些基本关系<sup>[2-4]</sup>. 但在这些研究中,煤岩渗透性特征的 研究还很少,属于沉积岩的煤岩,由于其沉积环境的不同,煤岩组分及微结构与其它沉积岩石有较大的不 同<sup>[5]</sup>,因而其渗透特征与其它沉积岩石有何异同有待研究.

#### 1 煤岩固液耦合应变-渗透率试验方法

#### 1.1 试验原理及设备

试验在山东科技大学具有渗透装置的 MTS815.03 电液伺服岩石 试验系统上进行.渗透性试验原理如图1所示.在试件的上下端头 各有一块透水板,透水板是具有许多均匀分布的小孔的钢板,其作 用是使水压均匀地作用于整个试件断面,以保证液体在整个试件表 面均匀地向试件内渗透.在上渗透板的上部为试件上端水压,下渗 透板的下部为试件下端水压,其中心各开有一个竖向小孔,这是水 流动的通道.试验原理:根据试验设计先施加一定的轴压 *p*<sub>1</sub>、围压 *p*<sub>2</sub>和孔压 *p*<sub>3</sub>(始终保持 *p*<sub>3</sub><*p*<sub>2</sub>,否则将使热缩塑料等密封失效而使 试验失败),然后降低试样下端的水压值 *p*<sub>4</sub>(开始时 *p*<sub>4</sub>=*p*<sub>3</sub>),在试



#### 图1 水渗透试验原理

Fig. 1 Principle of water permeability test

件两端形成渗透压差 Δp(设备最大压差 ≤2 MPa,渗透试验一般取 Δp=1.5 MPa 左右),从而引起水体通 过试件渗流.渗透试验液压系统均为伺服控制,试验全过程由计算机控制,包括数据采集和处理,在施加 每一级轴向压力过程中,测定试样的轴向变形及渗透压差随时间的变化过程,并读取每一级轴向压力下的 轴向应变及渗透率值,可以获得应力-应变和渗透率-应变关系曲线<sup>[6]</sup>.

在渗流过程中, Δ*p* 不断减小, Δ*p* 减小的速率与岩石种类、岩石结构、试件高度(渗流路径)、试件 截面尺寸大小、流体黏度与密度以及应力状态和应力水平等有关.根据试验过程中计算机自动采集的数 据,岩石渗透率  $K = \frac{1}{5n} \sum_{i=1}^{n} 526 \times 10^{-6} lg[\Delta p(i-1)/\Delta p(i)],$ 其中, *n* 为数据采集行数; Δ*p*(*i*-1)为第 *i*-1 行渗透压差; Δ*p*(*i*)为第 *i* 行渗透压差.

在进行渗透试验前必须预先使试样充分饱和,试样不饱和或不充分饱和会造成渗流过程不畅,渗透压 差有时不是单调减小(有局部升高现象),使试验 **表1 试验参数** 

结果不准确. 另外,岩石试件为圆柱形,试验时一 定要密封良好,否则会造成试件内的水与试件外三 轴室内的油相混,造成试验数据失真或试验失败.

#### 1.2 试样条件

选取鲍店矿3煤的3个煤样进行不同围压下的 渗透试验,煤样条件及试验参数见表1.

表 1 试验参数 Table 1 Test parameters

煤样	煤样尺寸									
编号	d∕ mm	$h/\mathrm{mm}$	$p_2/\mathrm{MPa}$	$p_3$ /MPa	$\Delta p/\mathrm{kPa}$					
BD-ST-1	50.1	70. 2	4.0	3.8	1.5					
BD-ST-2	49.6	69.5	6.0	3.8	1.5					
BD-ST-3	49.8	68.8	8.0	3.8	1.5					

762	煤	炭	学	报	2008 年第 33 卷
-----	---	---	---	---	--------------

#### 2 煤岩渗透性试验结果

全应力应变过程岩石渗透性试验方法称为瞬态渗透法,即给试件施加一定的轴压、围压和孔隙压力, 然后固定试件上端的孔隙压力,降低试件下端的孔隙压力,这样在试件两端造成一定的压差,测定这个压 差随时间的变化过程就可以计算出试样在该应力状态下的渗透率(为消除试验误差,一般选择压差开始 稳定降低后的100~300 s内的有关参数计算渗透率).如果将试件峰前、峰值、峰后各点的渗透率测出, 就可以画出试件全应力-应变过程的渗透曲线.为尽可能降低煤岩强度离散性而带来的试验误差<sup>[7-8]</sup>,在 进行渗透试验前,先选择纵波速度相近的煤样进行相同条件下的孔隙水压试验,以测取试件的最大应力值 及应变值,以期在渗透试验时尽可能地捕捉到应力峰值和合理选择不同应力应变点的渗透试验.本次试验 试样的全应力应变过程控制在13个测试点进行测试,煤样的实验结果如图 2 所示.



The permeability curves of No. 3 coal samples from Baodian Colliery during the whole stress-strain process

3 试验结果分析

渗透率/(10-19 m2)

Fig. 2

#### 3.1 应变-渗透率拟合曲线

根据以上煤样在不同围压、孔压条件下全应 力应变过程的渗透率试验数据,通过模型简化可 以拟合出相应的应变-渗透率(*k-ε*)曲线方程.

以煤样 BD-ST-1 的渗透试验结果为例,给出 *k*-ε 曲线如图 3 所示.将应变-渗透率试验曲线简 划为 *AB*, *BC*, *CD* 三段线分别进行拟合,得到分 段拟合曲线如图 4 所示.分段拟合方程如下:





Strain-permeability rate curve of coal sample BD-ST-1



Fig. 3





$$BD-ST-1: \begin{cases} AB: \quad k = -5 \times 10^7 \varepsilon^3 + 1 \times 10^6 \varepsilon^2 - 9\ 726.\ 9\varepsilon + 24.\ 119 \quad (0.\ 002\ 6 \le \varepsilon \le 0.\ 009\ 7) \ , \\ BC: \quad k = -924\ 461\varepsilon^2 + 24\ 272\varepsilon - 135.\ 67 \quad (0.\ 009\ 7 \le \varepsilon \le 0.\ 015\ 0) \ , \\ CD: \quad k = -2 \times 10^7 \varepsilon^3 + 2 \times 10^6 \varepsilon^2 - 33\ 246\varepsilon + 248.\ 09 \quad (0.\ 015\ 0 \le \varepsilon \le 0.\ 026\ 2). \end{cases}$$

 $BD-ST-2:\begin{cases}
AB: k = -1 \times 10^8 \varepsilon^3 + 2 \times 10^6 \varepsilon^2 - 13\ 481\varepsilon + 29.\ 664 & (0.\ 002\ 5 \le \varepsilon \le 0.\ 008\ 7), \\
BC: k = -1 \times 10^6 \varepsilon^2 + 27\ 135\varepsilon - 141.\ 94 & (0.\ 008\ 7 \le \varepsilon \le 0.\ 013\ 5), \\
CD: k = -2 \times 10^7 \varepsilon^3 + 1 \times 10^6 \varepsilon^2 - 20\ 204\varepsilon + 146.\ 8 & (0.\ 013\ 5 \le \varepsilon \le 0.\ 025\ 4). \\
BD-ST-3:\begin{cases}
AB: k = -9 \times 10^7 \varepsilon^3 + 2 \times 10^6 \varepsilon^2 - 11\ 556\varepsilon + 24.\ 564 & (0.\ 002\ 5 \le \varepsilon \le 0.\ 009\ 2), \\
BC: k = -1 \times 10^6 \varepsilon^2 + 26\ 055\varepsilon - 141.\ 74 & (0.\ 009\ 2 \le \varepsilon \le 0.\ 014\ 3), \\
CD: k = -2 \times 10^7 \varepsilon^3 + 2 \times 10^6 \varepsilon^2 - 29\ 860\varepsilon + 206.\ 74 & (0.\ 014\ 3 \le \varepsilon \le 0.\ 026\ 8).
\end{cases}$ 

#### 3.2 全应力应变过程的渗透率变化规律

从全应力应变曲线看出,煤样的应力峰值 和应力峰值处的应变值均随围压增大而增大, 这与一般岩石的围压效应一致<sup>[9]</sup>.在不同围压 作用下,其应变-渗透率曲线与应力应变曲线 变化趋势基本一致,但表现出相对"滞后"的 特点,表明渗透率的变化与其损伤演化过程密 切相关,同时煤体通过其内部裂隙的渗透需要 一定的时间过程,以煤样 BD-ST-1 为例,对 应全应力应变过程曲线,分析渗透率的变化趋 势(图5),主要有以下几个特征阶段:



图 5 煤样 BD-ST-1 全应力应变过程的渗透率特征阶段

Fig. 5 Permeability rate characteristic segments corresponding to the whole stress-strain process of coal sample

(1) 煤岩初始压密阶段(OA 段). 煤岩属孔隙裂隙介质,内部微孔隙、微裂隙非常发育,这些微损 伤在初始受压阶段出现压密闭合,渗透通道变小变窄,煤岩渗透率出现下降. 煤样 BD-ST-1 的渗透率从 开始时的 7.180×10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup> 下降为 2.856×10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup>.

(2) 表观线弹性变形阶段(AB段).随着轴向压力的增加,煤岩渗透率缓慢增加,说明煤岩在轴向压力、围压及孔压共同作用下,内部开始出现原生裂隙扩展和新的微裂隙萌生.渗透通道逐渐增大,煤样BD-ST-1的渗透率从2.856×10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup>逐渐增大到6.783×10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup>.

(3) 非线性变形和峰值强度阶段(BC 段). 随着作用在煤岩试件上的轴向力的增加,其内部的裂隙进一步扩展、贯通,开始出现宏观裂缝,煤岩渗透率从缓慢增大演化为急剧增大.煤样 BD-ST-1 的渗透率从 6.783×10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup> 急剧增大到 11.987×10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup>.

(4) 岩石应变软化阶段(*CD*段).一般情况下,峰值强度后,破裂煤块沿破裂面发生错动,裂隙的 张开度和连通程度随变形扩展而提高,裂隙间的连通比较充分,此时,煤样的渗透率达到峰值.煤样BD-ST-1 的渗透率从11.987×10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup> 急剧增大到 22.378×10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup>.

(5) 残余强度阶段(DE 段). 随着变形的进一步发展, 破裂煤块的凹凸部分被剪断或磨损, 裂隙张开度减小, 在围压作用下, 破坏试件又出现一定程度的压密闭合, 试件渗透率有所下降, 特别是围压较大时渗透率下降更明显. 煤样 BD-ST-1 的渗透率从最大的 22.378×10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup> 急剧下降到 15.767×10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup>, 然后出现较缓慢的下降.

#### 3.3 围压对煤岩渗透率变化的影响

由图 2 可以看出,随着围压增加,煤岩在不同的应力应变阶段其渗透率均出现不同程度的降低,说明 围压对煤岩试件内部的裂隙起到了压密闭合作用,限制了煤岩内部裂隙的扩展和张开程度<sup>10</sup>.另外,从 试验结果看,增大围压,煤岩在残余强度阶段的渗透率明显减小.

#### 4 结 论

(1)在煤岩固液耦合分析时,除本构关系外,应变-渗透率关系也是必不可少的控制因素.研究全应 力应变过程中的渗透特性对于科学合理地进行煤岩的固液耦合渗透性分析具有重要意义.

(2) 煤岩全应力应变过程的渗透性试验表明,煤岩的应变-渗透率变化曲线与其全应力-应变曲线变

### 764 煤炭学报 2008 年第 33 卷

化趋势基本一致,但表现出相对"滞后"的特点,表明渗透率的变化与其损伤演化过程密切相关,同时 煤体通过其内部裂隙的渗透需要一定的时间过程,煤岩体到达峰值强度及之后的软化阶段,即损伤变量达 一定值时,渗透率出现峰值.

(3)根据试验结果,煤岩应变-渗透率关系可简化为3段曲线.通过数据拟合,得出了煤样全应力应 变过程中的应变-渗透率曲线方程.

(4)试验结果表明,不同围压对煤岩渗透率影响很大.随有效围压增大,煤岩渗透率总体上呈下降 趋势,这主要与煤岩中发育的原生裂隙受围压压密闭合以及限制了新生裂隙的扩展和张开度有关.

#### 参考文献:

[1] 张金才,张玉卓,刘天泉.节裂岩体渗流与煤层底板突水 [M].北京:地质出版社,1997.

Zhang Jincai, Zhang Yuzhuo, Liu Tianquan. Seepage in rock fissures and water-inrush from the floor of the coal [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.

[2] 彭苏萍,孟召平,王 虎,等.不同围压下砂岩孔渗规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5):742-746.

Peng Suping, Meng Zhaoping, Wang Hu, et al. Testing study on por permeability law of sandstone under different confining pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (5): 742-746.

- [3] 李世平,李玉寿,吴振业. 岩石全应力应变过程对应的渗透率-应变方程[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 13-19.
   Li Shiping, Li Yushou, Wu Zhenye. The permeability-strain equations relating to the complete stress-strain path of the rock
   [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17 (2): 13-19.
- [4] 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.

- [5] 吴立新. 煤岩强度机制及矿压红外探测基础实验研究 [D]. 北京:中国矿业大学(北京), 1997.
   Wu Lixin. Coal strength mechanism and experimental basic study on rock pressure infrared detection [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 1997.
- [6] 朱珍德,刘立民. 脆性岩石动态渗流特性试验研究 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (6): 588-592.
   Zhu Zhende, Liu Limin. Experimental research on dynamic seepage characteristics of brittle rock [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28 (6): 588-592.
- [7] 杨永杰,陈绍杰.同种岩石强度离散性的实验技术研究 [J].实验技术与管理,2005,22 (1):34-37.
   Yang Yongjie, Chen Shaojie. Experiment technology of strength discretion of the same kind of rock [J]. Experimental Technology and Management, 2005, 22 (1): 34-37.
- [8] 杨永杰,宋 扬,陈绍杰. 三轴压缩煤岩强度及变形特征的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 31 (2): 150-153.
   Yang Yongjie, Song Yang, Chen Shaojie. Test study of coal's strength and deformation characteristics under triaxial compression [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31 (2): 150-153.
- [9] 孟召平,彭苏萍,张慎河.不同成岩作用程度砂岩力学性质三轴试验研究 [J]. 岩土工程学报,2003,25 (2): 140-143.

Meng Zhaoping, Peng Suping, Zhang Shenhe. Triaxial test on physical and mechanical properties of sandstone for different diagenesis degree [J], Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25 (2): 140-143.

[10] 杨永杰. 煤岩强度、变形及微震特征的基础试验研究 [D]. 青岛:山东科技大学, 2006.
 Yang Yongjie. Basic experemental study on characteristics of strength, deformation and microseisemic under compression of coal [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2006.