

# 全应力-应变过程中煤岩渗透系数演化规律

王国樾<sup>1</sup>, 张凯<sup>2</sup>

(1. 阳泉煤业(集团)有限责任公司 力学与建筑工程学院, 山西 阳泉 045000;  
2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 瓦斯抽采是治理高瓦斯和突出煤层的有效手段。在应力和钻孔扰动的作用下, 瓦斯抽采孔周围的煤岩体会产生屈服和破坏, 这部分煤岩体的渗透特性对瓦斯抽采效果有直接影响。本文对全应力-应变过程中煤岩的渗透特性进行了试验研究, 研究结果表明: 煤岩渗透性与其损伤程度关系密切, 损伤越大其渗透系数越大; 峰后渗透系数比峰前大1-2个数量级。

**关键词:** 应变-应变全过程; 渗透系数; 损伤演化

**中图分类号:** TD315.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2015)04-0010-04

## Evolution of permeability coefficient of coal rock during compression

WANG Guochi<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>2</sup>

(1. Coal Mine Safety Supervision Bureau, Yangquan Coal Industry Group Co. Ltd., Yangquan 045000, China;  
2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Gas extraction is an effective means to control the high gas and outburst of coal seam. Under the actions of in-situ stress and borehole disturbances, the coal rock surrounding the gas drainage holes will suffer from yield or failure. The permeability of the failure or yield coal rock will have direct impact on the gas drainage effect. A series of experimental studies have been carried out on the permeability of coal rock under compression. Some conclusions are drawn as follows: (1) the permeability of coal rock is closely related to its damage degree, and its permeability evolution law agrees with its damage evolution law; (2) the permeability coefficient in the post-peak stage is much higher than that in the pre-peak stage.

**Key words:** stress-strain relation; evolution of permeability coefficient; damage evolution

瓦斯灾害问题已成为我国煤炭开采中的突出灾害之一<sup>[1,2]</sup>。阳煤矿区的数个矿为高瓦斯或突出矿井<sup>[3]</sup>, 不仅严重影响了矿井的经济效益, 而且对矿井的安全带来很大威胁。瓦斯抽采是当前治理高瓦斯和突出煤层的有效手段, 在该方面的研究也取得了丰硕的成果, 发展了较为成熟的技术<sup>[4,5]</sup>。

瓦斯抽采的技术难点之一为抽采效果的评价。实践表明, 煤岩的渗透性对钻孔有效抽采范围有直接影响, 是评价抽采效果时必须考虑的因素。理论分析结果表明钻孔周围的煤岩存在不同程度的损伤和塑性变形<sup>[6]</sup>, 而这部分煤岩是煤层中瓦斯渗流进入钻孔的通道, 因此, 研究钻孔周围不同损伤程度的煤岩的渗透特性对瓦斯抽采钻孔设计和抽采效果评价具有重要意义。

很多学者对煤岩变形过程中渗透性演化规律进行了研究<sup>[7-11]</sup>, 结果表明煤岩变形对其渗透性影响显著, 特别在其应力峰值附近。前述学者主要研究不同应变条件下煤岩的渗透性, 但是试验结果表明在煤岩的弹性变形阶段, 其渗透性几乎不变, 即煤岩渗透性的变化是受其损伤程度控制的, 因而研究不同损伤程

度下煤岩的渗透性对掌握煤岩渗透性演化更为有效. 本研究设计了不同损伤程度煤岩的渗透性试验, 获取了损伤对煤岩渗透性的影响规律.

## 1 渗透性试验方法

测试岩石渗透性的方法有瞬态法和稳态法<sup>[12]</sup>. 瞬态法适用于测试渗透性较小的试样渗透率, 而稳态法适用于测试渗透性较大的试样渗透率. 本文中试样的渗透率采用稳态法测试.

### 1.1 试验原理与设备

本研究试验在中国矿业大学开展, 所用设备为美国引进的 MTS815.03 电液伺服岩石试验机. 本套试验系统通过轴压、围压和孔隙压力 3 套独立的闭环伺服控制系统可以分别控制应力加载和渗透过程. 岩样渗透试验过程见图 1. 试验过程中先加载围压  $\sigma_3$ , 然后加载轴压  $\sigma_1$ , 最后在试样上下两端施加水压力  $P_{in}$  和  $P_{out}$ , 通过测量经过岩样的单位时间内的流量来计算岩样的渗透率, 计算公式为

$$k = \frac{Q\mu L}{(P_{in} - P_{out})A} \quad (1)$$

式中,  $k$ : 试样渗透率,  $m^2$ ;  $Q$ : 单位时间流量,  $m^3/s$ ;  $\mu$ : 流体的粘度,  $Pa \cdot s$ ;  $L$ : 试样的高度,  $m$ ;  $P_{in}$  和  $P_{out}$ : 试样两端的压力,  $Pa$ ;  $A$ : 试样的横截面,  $m^2$ .

### 1.2 试验方案

煤岩在应力加载过程中会产生变形. 当加载的应力超过其屈服强度时, 岩样中会产生新的裂纹, 原有的裂纹也会产生扩展和相互贯通, 此过程中岩石的损伤逐渐积累. 因为岩样的损伤和塑性变形是相互关联的, 参考前人的研究成果, 利用等效塑性剪应变定义损伤变量  $d$ .

$$d = \begin{cases} \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} de^p : de^p}{\bar{\gamma}} & \text{当 } \sqrt{\frac{2}{3}} de^p : de^p \leq \bar{\gamma}; \\ 1 & \text{当 } \sqrt{\frac{2}{3}} de^p : de^p > \bar{\gamma}. \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $de^p$ : 塑性偏应变张量;  $\bar{\gamma}$ : 达到残余强度时对应的等效塑性剪应变. 利用此式定义的损伤变量  $d$  的取值范围为  $[0, 1]$ .

为了测试不同损伤程度下岩样的渗透率, 设计了如图 2 所示的试验方案. 具体试验过程如下:

- 1) 加载围压至预定值 (5, 10, 15 MPa);
- 2) 采用轴向位移控制加载模型加载轴向应力至岩样产生塑性变形;
- 3) 卸载轴向应力至预定值 (大于相应围压 5 MPa);
- 4) 进行渗透率测试, 渗透压差为 1 MPa;
- 5) 重复步骤 2) 直至岩样破坏.

## 2 试验结果与分析

阳泉煤业集团 (原阳泉矿务局) 是中国最大的无烟

煤生产基地, 集团位于沁水煤田东北部, 矿区井田规划总面积  $1\,322\text{ km}^2$ , 地质储量  $1\,204\,450 \times 10^4\text{ t}$ , 可采储量  $633\,592 \times 10^4\text{ t}$ . 矿区共含煤 15 层 (自上而下顺序排号), 煤层总厚度 13 ~ 15 m. 其中主采 3<sup>#</sup>, 12<sup>#</sup>, 15<sup>#</sup>

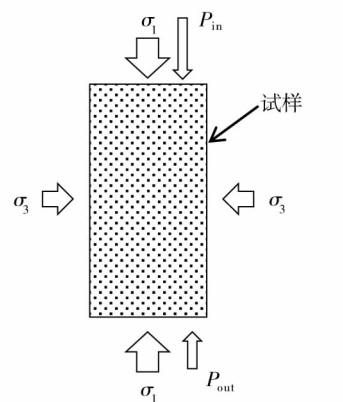


图 1 应力加载过程中的渗透试验示意图

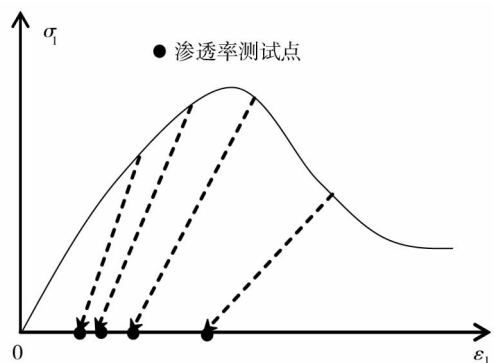


图 2 试验方案

个煤层,总厚度 10 ~ 12 m. 各煤层均富含瓦斯,瓦斯含量为 7.13 ~ 21.73 m<sup>3</sup>/t 之间,瓦斯压力 0.25 ~ 2.3 MPa 之间,在可采煤层中,9<sup>#</sup>煤层的瓦斯含量、瓦斯压力值最大;而 15<sup>#</sup>煤层的瓦斯含量、瓦斯压力值最小;3<sup>#</sup>煤层局部区域具有煤与瓦斯突出危险. 本研究用煤岩样取自阳煤集团二矿的 3<sup>#</sup>煤层,岩样制备采用相关国家标准.

## 2.1 常规压缩试验结果

为了确定煤岩的强度,为后续试验中的损伤控制提供参考应力值,进行了 3 组围压下的饱和岩样三轴压缩试验,围压分别为 5, 10, 15 MPa. 典型的试验结果见图 3. 从图中可以看出,由于取样和制样过程的扰动,岩样中存在裂隙,岩样的应力 - 应变曲线存在明显的初始压密阶段;围压为 5 MPa 时,岩样的峰值强度约为 26 MPa,达到峰值强度后继续加载,岩样发生脆性破坏.

试验测得峰值强度时偏应力与围压的关系见图 4. 利用摩尔 - 库伦准则可计算得到饱和煤样的粘聚力为 2.75 MPa,内摩擦角为 35.7°.

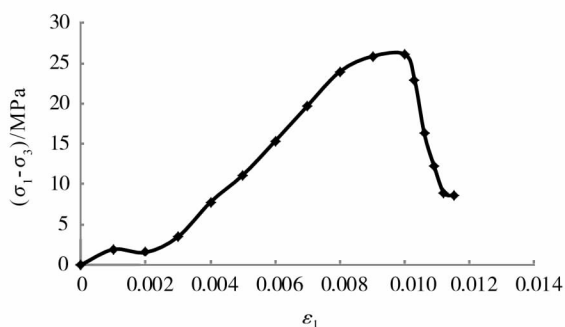


图 3 围压 5 MPa 下饱和岩样的应力 - 应变曲线

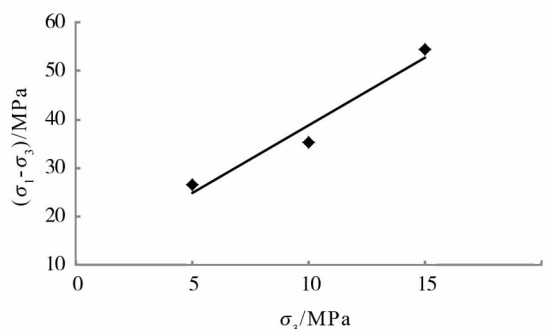


图 4 峰值强度时偏应力与围压的关系

## 2.2 不同损伤程度煤岩的渗透率试验结果

根据 1.2 节的试验方案,在 3 组围压条件下对不同损伤程度岩样的渗透率进行了测试. 因为试验过程中只能控制加载的轴向应力或位移,而不能精确控制损伤程度,因而不同围压下的测试渗透率时的损伤变量取值是不确定的. 图 5 给出了不同围压下不同损伤程度煤岩的渗透率测试结果. 从图中可以看出,煤岩试样的渗透率与损伤程度密切相关,在损伤程度较小时,试样渗透率变化很小;在峰值附近(不同围压时对应的损伤  $d$  不同),试样的渗透率会有达到的变化,渗透率增加幅度可达 10 倍以上;在峰后阶段,渗透率略有降低,但也显著大于初始的渗透率. 因而,分析瓦斯在钻孔周边的渗流规律时,必须考虑煤岩损伤对其渗透率的影响,才能获得合理的结果.

## 2.3 围压对煤岩渗透性的影响

从图 5 可以看出,随着围压的升高,岩样是渗透率逐渐较小,这是由于围压限制了岩样裂纹的扩展,并使裂纹处于闭合状态. 为了便于比较,取不同围压下 2 种损伤状态时的岩样渗透率进行对比,结果见图 6. 从图中可以看出,岩样的渗透率与围压存在非线性关系,在试验围压范围内,围压越高对岩样渗透率的限制越显著.

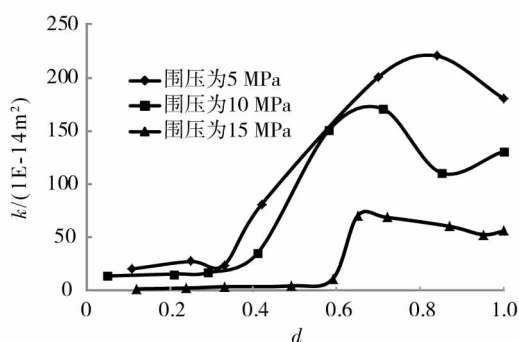


图 5 不同围压下不同损伤程度煤岩的渗透率

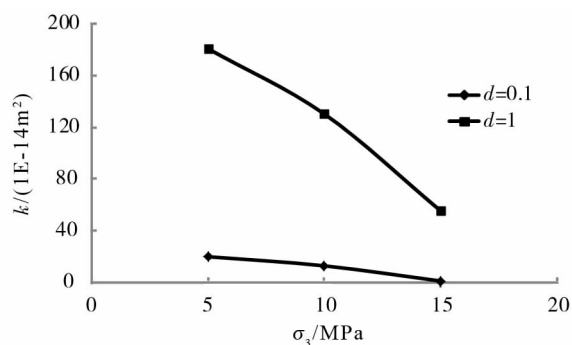


图 6 不同损伤程度时围压对岩样渗透率的影响

### 3 结论

- 1) 煤岩损伤演化过程中,其渗透率不断变化,两者演化规律具有一致性.
- 2) 煤岩损伤对其渗透率影响显著,分析瓦斯在钻孔周边的渗流规律时,必须考虑损伤对其渗透率的影响,才能获得合理的结果.
- 2) 围压对煤岩的渗透率影响较大,损伤程度相同时,围压越大煤岩渗透率越小.

### 参考文献:

- [1] 丁继辉,麻玉鹏,赵国景,等. 煤与瓦斯突出的固-流耦合失稳理论及数值分析[J]. 工程力学,1999,16(4):47-53.
- [2] 林伯泉,张建国. 矿井瓦斯抽放理论与技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1996.
- [3] 魏若飞. 阳泉矿区东北部3<sup>#</sup>煤层瓦斯地质特征研究[D]. 焦作:河南理工大学,2012.
- [4] 程远平,付建华,俞启香. 中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J]. 岩石力学与工程学报,2009,26(2):127-138.
- [5] 张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2001.
- [6] 易丽军,俞启香. 密集钻孔周围塑性区随煤体强度变化的数值模拟[J]. 矿业安全与环保,2008,35(1):1-7.
- [7] 杨永杰,宋扬,陈绍杰. 煤岩全应力应变过程渗透性特征试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(2):381-385.
- [8] 孟召平,王保玉,谢晓彤,等. 煤岩变形力学特性及其对渗透性的控制[J]. 煤炭学报,2012,37(8):1342-1347.
- [9] Gentzis T, Deisman N, Chalaturnyk R J. Geomechanical properties and permeability of coals from the foothills and Mountain regions of western Canada[J]. International Journal of Coal Geology,2007,69(3):153-164.
- [10] 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, 1975, 12(2):129-145.
- [11] Mckee C R, Bumb A C, Koenig R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations[J]. SPE Formation Evaluation,1988,3(1):81-91.
- [12] 程林松. 高等渗流力学[M]. 北京:石油工业出版社,2011.