

文章编号: 1000-7598(2009)04-0985-05

破碎煤体渗透特性的试验研究

马占国, 缪协兴, 陈占清, 李玉寿

(中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室/理学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 破碎煤体的渗透特性是影响煤矿瓦斯抽放和地下采空区突水灾害预防的重要因素之一。利用一种专用的破碎岩体压实渗透试验装置, 在 MTS815.02 岩石力学伺服试验系统上完成了破碎煤体压实过程中的渗透特性测定, 得到了破碎煤体轴向应力、渗透压差、水头梯度与渗流速度的关系, 并分析了各种粒径破碎煤体在不同渗透速度下轴向应力对渗透系数的影响。研究表明, (1) 不同粒径破碎煤体的渗透特性与其压实状态密切相关, 轴压从 5~15 MPa 变化时, 渗透压差的最大值增加了 3.28~166.47 倍, 渗透系数都相应降低了 1 个量级以上; (2) 在恒定的渗流速度下渗透压差随轴压变化的规律近似呈指数函数关系; (3) 渗透系数随轴压变化的规律近似呈对数函数关系; (4) 恒定的轴压下水头梯度随渗流速度变化的规律近似呈指数函数关系。

关键词: 破碎煤体; 轴向应力; 渗透特性; 试验

中图分类号: TD 742^{+.2}

文献标识码: A

Experimental study of permeability of broken coal

MA Zhan-guo, MIAO Xie-xing, ZHEN Zhan-qing, LI Yu-shou

(China University of Mining & Technology, State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineer,
School of Science, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Much attention should be paid to the permeability of broken rocks in goaf for the sake of the gas outburst and disaster prevention. Using a special device together with the MTS815.02 Rock Mechanics Test System, we tested the permeability of broken coal during its compacting process, getting the relations between the axial stress and the differential seepage pressure and between the pressure gradient and the seepage velocity. The effects of axial stress, grain size, and seepage velocities on the permeability coefficient are analyzed. The results show that the permeability of broken coal with different sizes is closely related with its compaction state: (1) the maximum value of seepage pressure will increase 3.28-166.47 times as the axial stress changing from 5 MPa to 15 MPa; the permeability coefficient of broken coal will decrease one magnitude; and (2) for a constant seepage velocity, the differential seepage pressure and the axial stress can be expressed by an exponential function; and (3) for a constant axial stress, the pressure gradient and the seepage velocity can be also expressed by an exponential function; and (4) the permeability coefficient of broken coal will decrease with the increase of axial stress, having a logarithm functional relation between them.

Key words: broken coal; axial stress; seepage properties; test

1 引言

地下矿体的采出会引起采场围岩体内应力重新分布, 引起围岩的变形、破坏和运动, 导致围岩裂隙状态的变化, 并使煤岩体的渗透性质随其变形程度发生变化, 从而影响其中的瓦斯的压力分布及运移状况, 严重时将危及工作面的安全生产诸如煤与瓦斯突出等^[1-2], 因此研究破碎煤体的渗透特性对

煤层瓦斯流动特性研究、抽排瓦斯参数选取及煤与瓦斯突出预防等有重要的指导意义。周世宁、赵阳升、Somerton WH 等^[3-7]通过大量试验, 对不同矿井的各种煤样应力与瓦斯渗透系数关系进行了广泛研究, 结果表明两者一般均为指数函数关系。人们还从颗粒粒径、应力水平等不同的角度对破碎岩石的渗透特性进行了深入地研究^[8-14], 为工程应用提供了理论依据。在煤样超过峰值强度后, 特别是破碎

收稿日期: 2008-06-13

基金项目: 973 项目 (No. 2007CB209400); 国家自然科学基金项目 (No. 50834005, No. 50834004, No. 50004008); 教育部新世纪优秀人才支持计划国家“十一五”科技支撑计划项目 (No. 2006BAC09B01); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金项目资助 (No. 07KF14)。

第一作者简介: 马占国, 男, 1972 年生, 博士, 副教授, 主要从事采动岩体力学方面的教学与研究工作。E-mail: zgma@cumt.edu.cn

煤体，其渗透性会如何变化，鲜见报导。

2 试验方法

试验时，将装有破碎煤体的破碎岩石压实装置放入 MTS815.02 型岩石力学试验系统，对 4 种粒径煤体采用 3 种速度（活塞速度分别为 5/180、15/180 mm/s 和 30/180 mm/s）进行渗透试验，每种粒径做 3 组，以 3 组试验结果的平均值作为所需测定的渗透特性参数，分别研究了渗透压差与轴向应力的关系、压力梯度与渗透速度的关系、渗透系数与轴向应力的关系，通过回归得到破碎煤体的渗透特性。试样粒径及块度见表 1。

表 1 岩样的粒径及块度

Table 1 Geometrical size of rock specimens

块度 / mm	粒径 1	粒径 2	粒径 3	粒径 4
	20~25	15~20	10~15	10~5
煤体代号	m1	m2	m3	m4

3 破碎煤体轴压对渗透压差的影响

在压实过程中，按 3 种速度渗透时用指数函数来拟合 4 种粒径破碎煤体的渗透压差随应力的变化规律。不同活塞速度下渗透压差 Δp 与轴向应力 σ 的关系曲线如图 1 所示，对应方程和相关系数见表 2。

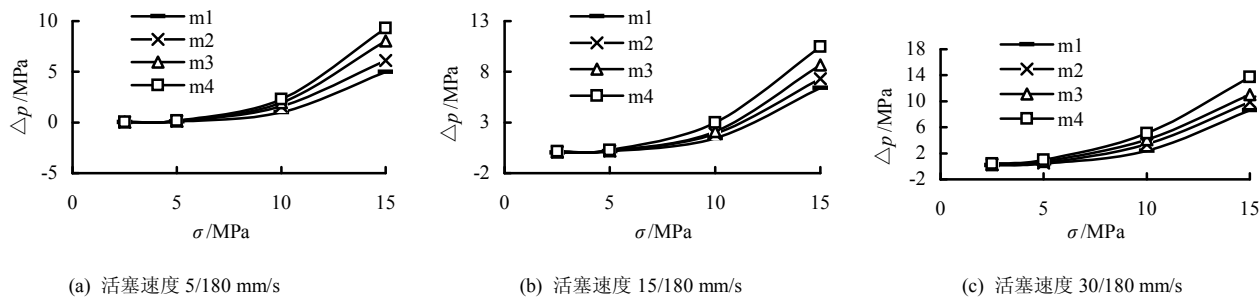


图 1 不同活塞速度下渗透压差 Δp 与轴向应力 σ 的关系曲线图

Fig.1 Relation between differential seepage pressure and axial stress corresponding to different piston velocities

由图 1 可知，①随轴向应力的增加，破碎煤体的渗透压差逐渐升高；②加载初期（小于 5 MPa），渗透压差增势平缓，当压力达到一定值后渗透压差增加较快。③当轴压渗透速度相同时，破碎煤体粒径越小，渗透压差越大；④渗透速度对渗透压差有影响，在轴压相同的状态下，随着渗透速度的增加，各粒径破碎煤体的渗透压差都在升高。由表 2 可见，破碎煤体渗透压差与轴向应力拟合函数的相关系数都在 0.97 以上，说明两者具有很好的相关性。

4 破碎煤体渗透速度对水头梯度的影响

不同轴压下各种粒径破碎煤体渗透水头梯度与渗透速度的变化曲线用指数函数来拟合，对应各种粒径的方程和相关系数见表 3。破碎煤体的水头梯度 J 与渗透速度 V 关系曲线如图 2 所示。

表 3 煤的水头梯度与渗透速度关系

Table 3 Relationship between the pressure gradient and seepage velocity

轴向应力 σ /MPa	块度	回归方程	相关系数 r^2
2.5	m1	$J = 0.0002e^{83.544v}$	0.9743
	m2	$J = 0.0003e^{82.16v}$	0.9612
	m3	$J = 0.0004e^{80.32v}$	0.9489
	m4	$J = 0.0005e^{82.438v}$	0.9439
5	m1	$J = 0.0004e^{87.539v}$	0.9844
	m2	$J = 0.0006e^{80.37v}$	0.9744
	m3	$J = 0.0007e^{85.13v}$	0.9827
	m4	$J = 0.0008e^{90.198v}$	0.9585
10	m1	$J = 0.0036e^{87.906v}$	0.9823
	m2	$J = 0.0052e^{79.687v}$	0.9403
	m3	$J = 0.0062e^{77.601v}$	0.9541
	m4	$J = 0.0068e^{76.718v}$	0.9617
15	m1	$J = 0.0128e^{90.25v}$	0.9914
	m2	$J = 0.0137e^{90.333v}$	0.9931
	m3	$J = 0.0155e^{87.371v}$	0.9891
	m4	$J = 0.0171e^{85.535v}$	0.9855

表 2 煤的渗透压差与轴向应力关系

Table 2 Relationship between the seepage pressure difference and the axial stress

活塞速度 V /(mm/s)	块度	回归方程	相关系数 r^2
5/180	m1	$\Delta p = 0.0116e^{0.3076\sigma}$	0.9862
	m2	$\Delta p = 0.0149e^{0.3023\sigma}$	0.9865
	m3	$\Delta p = 0.0185e^{0.2967\sigma}$	0.9789
	m4	$\Delta p = 0.0207e^{0.2962\sigma}$	0.9757
15/180	m1	$\Delta p = 0.0388e^{0.3041\sigma}$	0.9840
	m2	$\Delta p = 0.0518e^{0.2972\sigma}$	0.9716
	m3	$\Delta p = 0.0660e^{0.2871\sigma}$	0.9702
	m4	$\Delta p = 0.0867e^{0.2739\sigma}$	0.9809
30/180	m1	$\Delta p = 0.1058e^{0.3189\sigma}$	0.9902
	m2	$\Delta p = 0.1203e^{0.3154\sigma}$	0.9914
	m3	$\Delta p = 0.1583e^{0.3011\sigma}$	0.9928
	m4	$\Delta p = 0.2048e^{0.2863\sigma}$	0.9941

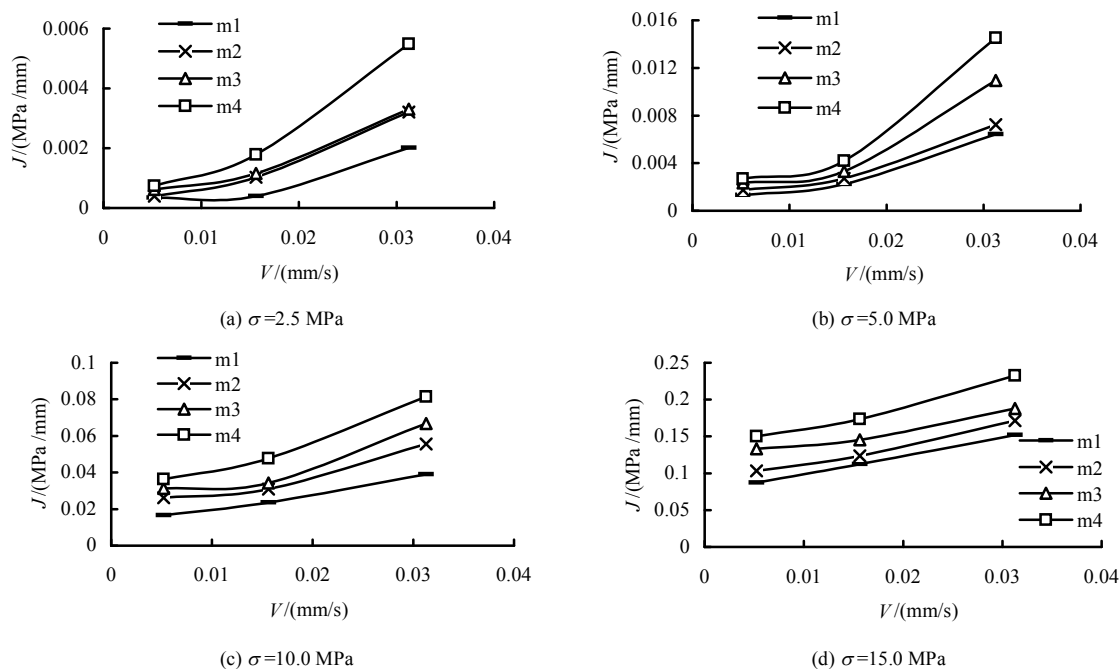
图2 不同轴压下水头梯度 J 与渗透速度 V 的关系曲线

Fig.2 Curves of the seepage pressure gradient varying with the seepage velocity under different axial compressive stresses

由表3可见,各粒径破碎煤体的水头梯度与渗透速度的相关系数都在0.94以上,说明两者具有很好的相关性。

由图2可以看出,①在轴压一定的情况下,随着渗透速度的加快,各粒径煤体的水头梯度增加;②相同状态下,随着轴压增加,各粒径煤体的水头梯度增加;③当轴压较小(≤ 5 MPa)时,渗透速度对水头梯度的影响较大;当轴压较大(≥ 10 MPa)时渗透速度对水头梯度的影响较小;④渗

透速度相等的情况下破碎煤体粒径越小,水头梯度越大。

5 破碎煤体轴压对渗透系数的影响

在不同渗透速度下,各种粒径破碎煤体渗透系数与轴向应力的变化曲线用对数函数来拟合,破碎煤体渗透系数与轴向应力的关系曲线如图3所示,对应各粒径的具体方程和相关系数见表4($\sigma_0 = 1$ MPa)。

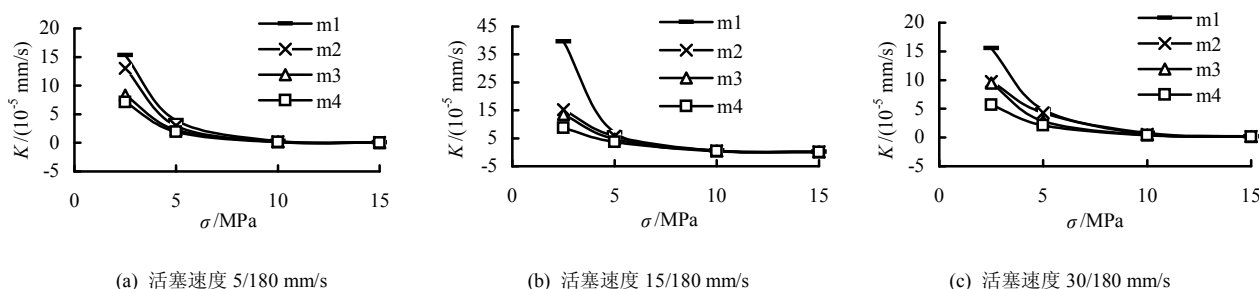
图3 不同活塞速度下渗透系数 K 与轴向应力 σ 的关系曲线

Fig.3 Curves of permeability coefficient changing with axial stress under the different velocities of the piston.

由图3可以看出,①较高压力作用下破碎煤体的渗透系数比完整煤体渗透系数高得多,如本次试验测到的最低值为 1.344×10^{-7} cm/s,与同性质的完整煤体渗透系数(10^{-8} cm/s量级)相比,约增加1个量级;②不同粒径破碎煤体的渗透系数与其压实

状态密切相关,轴压从5 MPa增至15 MPa时其渗透系数都相应降低了1个量级以上;③相同的压力状态下粒径越小,渗透系数也越小;④随着压力增加,各种粒径破碎煤体的渗透系数也逐步趋于一致。

表 4 煤的渗透系数与轴向应力关系
Table 4 Relationship of permeability coefficient and axial stress

渗透速度 V/(mm/s)	块度	回归方程	相关系数 r^2
5/180	m1	$K = -8.798 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 22.777 \ 0$	0.969 6
	m2	$K = -7.343 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 18.864 \ 0$	0.955 5
	m3	$K = -5.497 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 14.288 \ 0$	0.969 0
	m4	$K = -4.986 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 13.001 \ 0$	0.970 2
15/180	m1	$K = -7.992 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 20.719 \ 0$	0.970 2
	m2	$K = -6.368 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 16.445 \ 0$	0.963 4
	m3	$K = -4.624 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 12.136 \ 0$	0.969 2
	m4	$K = -3.843 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 10.051 \ 0$	0.971 1
30/180	m1	$K = -5.705 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 14.655 \ 0$	0.961 2
	m2	$K = -4.973 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 12.808 \ 0$	0.963 6
	m3	$K = -3.798 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 9.820 \ 1$	0.964 1
	m4	$K = -3.189 \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + 8.256 \ 1$	0.960 3

由表 4 可见, 不同活塞速度下渗透系数与轴向应力相关系数都在 0.95 以上, 说明两者具有很好的相关性。

6 讨 论

破碎煤体存在如前述的渗透特性是由于压力较小时各粒径构成骨架, 形成较多的有效缝隙, 因而渗透系数较大。随着压力增大, 各粒径颗粒重新排列。同时, 从棱角压碎下来的或颗粒破碎形成的细小颗粒填充缝隙, 产生了较多的无效缝隙, 致使部分通道被堵塞, 使得渗透越来越困难, 渗透压差越来越大, 水头梯度越来越大, 渗透系数越来越小。当煤的强度低时又有一定的粘结作用, 破碎煤体经过压密-破碎-压密的循环过程, 基本上被压实, 渗透系数趋于一个稳定的值。破碎煤体压实过程中轴压与渗透系数关系一般为对数函数关系, 而完整煤样轴压与渗透系数关系一般为指数函数关系。

7 结 论

通过试验现象分析和试验数据处理得到如下结论:

(1) 不同粒径破碎煤体的渗透系数与其压实状

态密切相关, 轴压从 5 MPa 增至 15 MPa 时其渗透系数都相应降低了 1 个量级以上。

(2) 恒定的渗流速度下破碎煤体的渗透压差与轴压之间近似成指数函数关系。

(3) 轴压恒定的情况下破碎煤体的水头梯度与渗流速度之间成指数函数关系。

(4) 相同的压力状态下粒径越小, 渗透系数也越小。

(5) 不同粒径破碎煤体的渗透系数与其压实情况密切相关, 随轴压增加渗透系数都相应降低, 且两者之间成对数函数关系。

参 考 文 献

- [1] 李树刚, 钱鸣高, 石平五. 煤样全应力应变过程中的渗透系数——应变方程[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(1): 22—24.
LI Shu-gang, QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu. Permeability-strain equation relation to complete stress-strain path of coal sample[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2001, 29(1): 22—24.
- [2] 赵阳升, 冯增朝, 文再明. 煤体瓦斯渗机理与研究方法[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3): 293—297.
ZHAO Yang-sheng, FENG Zeng-chao, WEN Zai-ming. The percolation mechanism and research method of methane in coal mass[J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(3): 293—297.
- [3] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存及流动规律[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.
- [4] 康天合, 白世伟, 赵永宏. 煤体导水系数及其变化规律的实验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 587—591.
KANG Tian-he, BAI Shi-wei, ZHAO Yong-hong. Testing study on water conduction coefficient of coal mass and its variation law[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4): 587—591.
- [5] SOMERTON W H. Effect of stress on permeability of coal[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1974, (12): 129—145.
- [6] 李树刚, 常心坦, 林海飞. 西北矿区安全生产存在问题及对策研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 52—55.
LI Shu-gang, CHANG Xin-tan, LIN Hai-fei. Problems and countermeasures for safety production in mining area of northwest china[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(1): 52—55.

- [7] 程远平, 俞启香, 周红星, 等. 煤矿瓦斯治理“先抽后采”的实践与作用[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 389—392.
- CHENG Yuan-ping, YU Qi-xiang, ZHOU Hong-xing, et al. Practice and effectiveness of “draining gas before coal mining” to prevent gas from bursting[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2006, 23(4): 389—392.
- [8] 刘卫群. 破碎岩体的渗流理论及其应用研究[博士学位论文 D]. 徐州: 中国矿业大学, 2002.
- [9] 孙明贵, 李天珍, 黄先伍, 等. 破碎岩石非 Darcy 流的渗透特性试验研究[J]. 安徽理工大学学报 (自然科学版), 2003, 23(2): 11—13.
- SUN Ming-gui, LI Tian-zhen, HUANG Xian-wu, et al. Penetrating properties of non-Darcy flow in broken rocks[J]. **Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)**, 2003, 23(2): 11—13.
- [10] 刘玉庆, 李玉寿, 孙明贵. 岩石散体渗透试验新方法[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, (4): 108—110.
- LIU Yu-qing, LI Yu-shou, SUN Ming-gui. New method in seepage testing broken rock[J]. **Ground Pressure and Strata Control**, 2002, (4): 108—110.
- [11] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [12] 刘卫群, 缪协兴, 陈占清, 等. 破碎岩石渗透特性的试验测定方法[J]. 实验力学, 2003, 18(1): 56—61.
- LIU Wei-qun, MIAO Xu-xing, CHEN Zhan-qing, et al. A testing method for determining the permeability of overbroken rock[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2003, 18(1): 56—61.
- [13] 郭广礼. 老采空区上方建筑地基变形机理及其控制. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [14] 杨胜强, 张人伟, 邸志前, 等. 综采面采空区自然“三带”的分布规律[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 93—96.
- YANG Sheng-qiang, ZHANG Ren-wei, DI Zhi-qian, et al. Distribution regularity of spontaneous combustion “three-zone” in goaf of fully-mechanized coal faces[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2000, 29(1): 93—96.